

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доцент каф. РСС, к.т.н., доцент
Убайчин Антон Викторович

Томск 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	13
1.1 Пассивное радиовидение.....	13
1.2 Быстропротекающие процессы	14
1.3 Современные схемные и алгоритмические решения для построения микроволновых радиометров	18
1.4 Виды микроволновых радиометров	26
1.4.1 Компенсационный микроволновый радиометр.....	27
1.4.2 Модуляционный микроволновый радиометр	30
1.4.3 Корреляционный микроволновый радиометр	34
1.4.4 Нулевые микроволновые радиометры.....	35
1.4.5 Нулевой микроволновый радиометр с импульсным подшумливанием	38
1.5 Цель и задачи исследования	42
2. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТР	45
2.1 Структурная схема предложенного быстродействующего микроволнового радиометра.....	45
2.2 Алгоритм работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра.....	50
2.3 Измерение быстропротекающих радиотепловых процессов и аналитическое моделирование работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра	54
2.4 Расширение динамического диапазона в предложенном быстродействующем микроволновом радиометре	57
2.4.1 Расширение динамического диапазона в верхней границе	57
2.4.2 Расширение динамического диапазона в нижней границе.....	58
2.5 Расчетная флуктуационная чувствительность	62
2.6 Основные результаты и выводы	64
3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	66

3.1 Численное моделирование компенсационного микроволнового радиометра	66
3.2 Численное моделирование модуляционного микроволнового радиометра	68
3.3 Численное моделирование нулевого микроволнового радиометра	69
3.4 Численное моделирование предложенного быстродействующего микроволнового радиометра.....	70
3.5 Ограничение динамического диапазона микроволновых радиометров на основе нулевого метода измерений	74
3.6 Основные результаты и выводы	77
4. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРА.....	80
4.1 Имитатор быстропротекающего процесса	81
4.2 Генератор шума.....	83
4.3 СВЧ-переключатели	86
4.4 Малошумящий усилитель	88
4.5 Полосно-пропускающий фильтр	90
4.6 Направленный ответвитель.....	91
4.7 Детектор	92
4.8 Усилитель постоянного тока	94
4.9 Аналого-цифровой преобразователь.....	95
4.10 Блок управления.....	97
5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	109
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	112
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное) Копии актов о внедрении результатов диссертационной работы	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное) Копии охранных документов на результаты интеллектуальной деятельности	137

ВВЕДЕНИЕ

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, нарушению 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 и 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 оптимизацию алгоритмов обработки.

3. Предложен новый способ расширения динамического диапазона измерений шумовой температуры антенны, отличающийся совместным использованием дифференциального метода измерений и алгоритма запуска широтно-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 быстротекущих 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 дифференциального 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 дифференциального методов измерений, создана экспериментальная установка микроволнового радиометра с повышенным быстродействием.

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

2.1 Способа измерения чувствительности бортовых радиолокационных приемников на основе нулевого и дифференциального 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 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. Всероссийская научно-техническая конференция "Метрология в радиоэлектронике." Менделеево, 2021 г.

6. Международная конференция «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.

Краткое содержание работы. Во введении представлена краткая характеристика работы. В первом разделе приведено обоснование актуальности разработки микроволнового радиометра для исследования быстропротекающих радиотепловых процессов. Во втором разделе описана структурная схема быстросействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений, принцип ее работы, приведены результаты аналитического моделирования, описаны принцип расширения динамического диапазона и расчет флуктуационной чувствительности в четырех режимах работы. В третьем разделе представлены результаты численного моделирования схем построения микроволновых радиометров: компенсационной, нулевой, модуляционной и предложенной. В четвертом разделе описана разработка экспериментального макета радиометрической системы и все составные части макета. В пятом разделе приведены результаты экспериментальных исследований. В заключении отражены достигнутые результаты, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Пассивное радиовидение

Постановка задачи реализации радиометрических измерений в режиме реального времени витала в воздухе с момента первых пассивных исследований в микроволновом диапазоне, на что указывает широкий спектр перспективных задач, описанных еще в [1]. Развитие и реализация многих из них стала возможной благодаря технологическому прогрессу, созданию новой элементной базы и т.д.

В настоящий момент уровень технологического прогресса позволяет создавать радиометрические приемники, обеспечивающие удовлетворительные параметры быстродействия. Примерами тому могут являться результаты передовых исследований в области создания систем пассивного радиовидения, опубликованных зарубежными партнерами в [2].

Идея повышения быстродействия радиометрических систем подразумевает предельное уменьшение длительности измерений для повышения информативности исследований быстропротекающих процессов различной природы [3, 4]. Общеизвестным является факт, того, что уменьшение времени измерения (уменьшение временного интервала интегрирования измеренного шумового сигнала) приводит к снижению чувствительности, необходимости уменьшения собственных шумов приемника и/или увеличению рабочей полосы частот, нарастанию влияния нестабильности параметров приемника во времени и т.д. Представленные особенности, являются фундаментальными ограничениями при реализации измерений шумовых сигналов тепловой природы с повышенной динамикой [1 – 4].

Очевидно, что решение задачи исследования быстропротекающих радиотепловых процессов существующими методами и средствами пассивных дистанционных исследований сопряжено с компромиссом между удовлетворительной чувствительностью и длительностью измерения.

1.2 Быстропротекающие процессы

Проблема изменения климата на нашей планете тесно связана с динамикой развития технологического уровня человечества. Еще в середине XX века начали серьезнее относиться к динамике изменений климата, однако возможность оценки серьезных изменений была присуща только экспертам. На сегодняшний день каждый житель нашей планеты может наблюдать такие изменения: уменьшается площадь ледниковых запасов пресной воды, смещаются климатические пояса вечной мерзлоты, пересыхают реки, увеличивается среднегодовая температура воздуха и т.д.

Взаимодействие Мирового океана и атмосферы является одним из важных факторов, формирующих динамику эволюции климата. Совокупность меняющихся факторов взаимодействия потоков тепла и испаренной влаги над Мировым океаном во многом определяют климатообразующие факторы. Глобальный и непрерывный мониторинг такого взаимодействия позволит повысить обоснованность построения динамических моделей океан-атмосфера и дать точные результаты изменения климатических условий не только в краткосрочной перспективе, но и сформировать долгосрочный прогноз динамики таких изменений [5 – 8].

Получение качественных, детализированных и оперативных данных, необходимых для решения обратных задач анализа скорости ветра, пространственного распределения и интенсивности осадков, влагосодержания атмосферы и водозапаса облачности, способствует повышению точности климатического прогнозирования. Существенное улучшение временного и пространственного разрешения измерений может быть достигнуто за счет повышения информативности методов дистанционного зондирования [9, 10].

В настоящее время материалы дистанционного зондирования земных покровов, полученные при помощи радиометрических методов, обладают низким пространственным разрешением. Это связано с ограничениями размеров апертуры приемных антенн спутников дистанционного

зондирования и с низким быстродействием радиометрических методов исследований. Задача повышения временного разрешения при радиометрическом исследовании земной поверхности и Мирового океана дополняет перспективные направления исследований по развитию антенной техники. Улучшение пространственного разрешения позволит более эффективно применять методы решения обратных задач и повысить детализацию материалов дистанционного зондирования, улучшить результаты привязки радиотепловых изображений с реальными картами местности [11 – 13].

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. С точки зрения описания внутренних быстроразвивающихся корональных процессов, улучшение временной детализации результатов пассивных дистанционных исследований вспышечной активности в микроволновом диапазоне послужит для улучшения прогнозирования влияния солнечной активности на Землю [14].

Другим из наиболее актуальных направлений микроволновой радиометрии являются медицинские исследования [15 – 17]. Методы радиометрической диагностики, или радиотермографии, позволяют осуществлять раннее выявление онкологических заболеваний на основе анализа распределения внутренней температуры тканей, отражающего особенности их метаболической активности. Применение метода радиотермографии, по сравнению с другими методами исследований, такими как компьютерная томография, ультразвуковое исследование и рентгенография, радиотермография обладает рядом существенных преимуществ, таких как неинвазивность, безвредность для пациента и

медперсонала, возможность проведения диагностики на стадии, предшествующей структурному изменению клеток ткани [15 – 17].

Одной из актуальных задач развития радиотермографии является формирование трехмерных радиотепловых изображений организма человека. Реализация данной задачи требует проведения большого числа многочастотных измерений по всей исследуемой поверхности тела. Получение объемной карты распределения радиояркой температуры связано с выполнением сотен и даже тысяч последовательных измерений, что существенно увеличивает продолжительность обследования. В результате в процессе диагностики возможно изменение радиотепловых характеристик исследуемых тканей, что приводит к снижению достоверности получаемых данных. Дополнительным источником погрешностей является механическая нестабильность положения приемной антенны при длительных аппликационных измерениях, вызывающая изменение условий согласования антенны с исследуемой областью и, как следствие, ухудшение точности регистрации собственного теплового излучения. Одним из факторов, ограничивающих развитие технологий объемной радиотермографии, остается недостаточное быстродействие существующих радиометрических систем [15 – 17].

Большой задел в использовании радиометрических методов получен в работах отечественных и зарубежных коллективов при разработке и исследовании систем пассивного радиовидения. В настоящее время активно развиваются системы пассивного радиовидения, предназначенные для решения задач обеспечения безопасности при досмотровом контроле, дистанционного поиска потенциально опасных объектов за оптически не прозрачными преградами [18], обеспечения безопасности полетов, в том числе на малой высоте, поиска радиотепловых аномалий, всепогодной и круглосуточной навигации летательных аппаратов и т.д.

Одной из основных характеристик систем пассивного радиовидения является скорость получения радиотепловых изображений. При этом, системы

цифровой обработки изображений и повышения пространственного разрешения развиты в достаточной степени за счет использования передовых математических методов и высокого быстродействия современных систем цифровой обработки сигналов и их технической реализации в программируемой логике для работы в режиме «реального времени» [19]. Сдерживающим фактором для широкого внедрения систем пассивного радиовидения, является сравнительно низкое быстродействие радиометрических приемников. Увеличение быстродействия систем пассивного радиовидения, позволит успешно решать существующие задачи и бросать вызов для получения новых знаний и сведений о явлениях, сопровождающихся быстропротекающими радиотепловыми процессами.

Измерение температуры фронта ударной или детонационной волны, а также области интенсивного протекания химической реакции представляет значительный научный интерес, поскольку позволяет уточнять уравнения состояния исследуемых материалов и совершенствовать математические модели исследуемых быстропротекающих процессов [20 – 30]. Определение скорости распространения, давления и температуры высокоэнергетических процессов, относится к числу наиболее сложных экспериментальных задач, требующих применения специализированных методов диагностики.

Применение быстродействующих систем может быть востребовано для исследования быстропротекающих газодинамических процессов за оптически непрозрачными защитными преградами, например за бункерами, предназначенными для защиты от воздействия ударных волн взрыва. Помимо определения кинематических характеристик ударных и детонационных волн, одной из важнейших задач является дистанционное измерение основных термодинамических параметров вещества, прежде всего температуры, необходимой для определения его состояния и анализа динамики протекающих процессов. В настоящее время единственным методом бесконтактного определения температуры удаленных объектов является

радиометрический метод, основанный на измерении их яркостной температуры [22 – 25].

Следующей областью применимости радиометрических быстродействующих систем является дистанционное зондирование поверхности (полей, лесов и водной глади) с беспилотных летательных аппаратов. Высокая скорость движения летательных аппаратов с установленными радиометрами выдвигает требования пространственного и временного разрешения. Смена поверхностей приводит к быстрым скачкам яркостной температуры и изменению сигнала в полосе обзора радиометра [31, 32].

Анализ тенденций развития различных направлений применения радиометрических методов показал, что во многих прикладных областях существует необходимость разработки новых методологических решений, позволяющих проводить исследования нестационарного радиотеплового излучения с высоким временным разрешением при удовлетворительной разрешающей способности по яркостной температуре.

1.3 Современные схемные и алгоритмические решения для построения микроволновых радиометров

Ряд отечественных и зарубежных коллективов проводит разносторонние исследования в области создания средств и методов пассивного радиовидения и их применения в различных отраслях народного хозяйства.

Коллектив Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, при активном участии Е.В. Федосеевой, И.Н. Росточкина и др., специализируется на дистанционном зондировании атмосферы для решения задач сверхкраткосрочного прогнозирования развития неблагоприятных и опасных атмосферных метеоявлений, компенсации влияния фоновых шумов, включения в состав системы радиофотонных трактов и нейронной сети.

Имеющий в своем составе трехдиапазонный радиометеорологический комплекс с рабочими длинами волн 1,35 см, 3,2 см, 7,5 см. [33 – 39]

Специалисты центра магнитной томографии и спектроскопии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова достигли значительных успехов в задачах пассивного радиовидения [40]. Разработан демонстрационный макет системы пассивного радиовидения 3-мм диапазона, предназначенный для обнаружения скрытых под одеждой проводящих объектов.

Анализ работ коллектива показал, что основное направление научных исследований посвящено созданию алгоритмов цифровой обработки результатов измерений радиометрической системы для достижения максимально возможного разрешения по пространству наблюдения. Несомненно, высокие результаты достигнуты при нахождении объекта исследований в непосредственной близости от радиометрической системы – 1,8...2,4 м. Один из недостатков разработки, состоит в том, что в основе построения самой радиометрической приемной системы применяются модуляционные радиометры, предложенные Дикке в 1946 году [41], обладающие не высокой стабильностью и на сегодняшний день не обеспечивающие достаточного быстродействия измерений при сохранении заданной чувствительности.

Коллектив Рязанского государственного радиотехнического университета [42] приводит «оригинальный способ повышения качества радиотеплолокационных изображений, заключающийся в формировании в каждый дискретный момент времени обзора участка поверхности или воздушного пространства, матрицы амплитудного изображения зоны обзора в прямоугольной антенной системе координат. При этом операции повторяют в каждый дискретный момент времени обзора и осуществляют пространственно-временную обработку полученных матриц, основанную на преобразовании координат, совмещении и усреднении кадров изображения».

В цикле работ Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ РАН) приводится описание оригинальных технических решений, направленных на реализацию субдифракционного разрешения, системы пассивного радиовидения с активной подсветкой, дистанционный поиск оружия под одеждой и т.д. [43 – 45]. Работы ИРЭ РАН направлены на изучение поляризационных эффектов при исследовании объектов и сред радиофизическими методами. Разработанные методы облучения шумовым сигналом позволяют охарактеризовать поляризационные свойства объектов и многопозиционное рассеяние. При использовании данных методов можно получить информацию о диэлектрических свойствах объекта и отличать металлические предметы от неметаллических и т.д.

В работе Быстрова В.П., Загорина Г.К., Соколова А.В., Фёдорова Л.В. [46] проведены физические и экспериментальные исследования радиотеплового излучения объектов различной природы, с учетом влияния атмосферы на распространение радиоволн миллиметрового диапазона и сложной электромагнитной обстановки. Значительный вклад внесен в изучение излучательных характеристик различных видов техники (в том числе тактического назначения). Разработана модель контраста наземного объекта для количественной оценки его излучающей способности. Анализ проведенных исследований коллектива показал, что в настоящее время особой актуальностью в задачах пассивного радиовидения обладают задачи повышения чувствительности и быстродействия микроволновых радиометров, разработки новых быстродействующих методов и алгоритмов обработки радиотепловых сигналов.

Коллективом Научно-исследовательского радиофизического института (г. Нижний Новгород) проведены работы по созданию специализированных радиометрических систем для исследования быстропротекающих газодинамических процессов, ближнепольного радиовидения в медицинских приложениях и т.д. [23 – 25, 47 – 49]. А также в работе Корнева упомянуто

возможное применение открытого конца волновода [50]. Как отмечено в работе Безрукова [24] скорость ударной волны в аргоне может достигать 4500 м/с, а среднее значение 3690 м/с. Согласно статье, «в эксперименте использовалось скользящее окно усреднения, в момент соприкосновения его с участком сигнала, соответствующим возникновению ударной волны в аргоне, начинается рост яркостной температуры от комнатной температуры до 5000К за промежуток времени менее 1мкс». Яркостная температура ударной волны измерялась при помощи компенсационного радиометра.

Большая работа проделана коллективом под руководством Филатова А.В. В описании к патенту [51] указано, что предлагаемым изобретением решается задача повышения быстродействия радиометра без снижения его флуктуационной чувствительности и расширение динамического диапазона измерения сигнала антенны. Это так же подтверждается в работе [52], где говорится: «Быстродействие радиометра по отработке быстроменяющихся сигналов антенны возрастает в 4 раза, а чувствительность быстродействующего радиометра останется на том же уровне, что и в одноприемниковом нулевом радиометре.».

Ниже приведена краткая характеристика наиболее значимых работ зарубежных исследователей, опубликованных в открытой печати.

В Государственном научно-исследовательском центре радиоэлектроники сверхпроводника "Айсберг" г. Киев разработаны системы радиотеплолокации в 8-мм диапазоне при рабочей полосе частот 5 ГГц [53]. Разработанная система состоит из 32 каналов, расположенных в фокальной плоскости квазиоптической антенны с механическим сканированием. Поле изображения 120x16 градусов формируется за 3 секунды. Проведенные эксперименты с разработанной системой показали возможность обнаружения металлического листа размером 1,25м x 2,5м на удалении 500 метров. Приемники системы выполнены по компенсационной схеме. Как известно, данное решение построения радиометрического канала характеризуется низкой стабильностью и сильным влиянием дестабилизирующих внутренних

факторов, к которым в первую очередь относятся флуктуации и дрейф коэффициента усиления измерительного тракта, и собственные шумы, что обуславливает низкую чувствительность реальной системы и длительные времена сканирования. Перечисленные факторы существенно ограничивают эффективность применения схемы компенсационного радиометра (радиометра полной мощности). В результате, несмотря на наиболее высокую потенциальную чувствительность, предсказываемую теорией для данного типа радиометрических схем, ее практическая реализация сопровождается снижением достижимой чувствительности относительно теоретического предела [54, 55].

В работе китайских исследователей [56] описана система формирования радиоизображений миллиметрового диапазона для обнаружения скрытых под одеждой проводящих материалов, в том числе оружия и пластиковых мин. Разработанная система выполнена на основе активной фазированной антенной решетки, состоящей из 24 приемников, позволяющих реализовать флуктуационную чувствительность порядка $1..2K$. Проведены испытания по обнаружению холодного и огнестрельного оружия. Активная фазированная антенная решетка подразумевает использование усложненной структуры приемника, как следствие, его дороговизну, длительный и не простой процесс калибровки и настройки. Использование информации о фазах принимаемых сигналов накладывает жесткие требования на стабильность фазочастотных характеристик приемников гетеродинного типа.

В патенте [57] описано оригинальное устройство для контроля и обеспечения режима безопасности. Приведена конструкция разработанного сканера. Однако, техническая реализация сенсоров не отражена должным образом, что может указывать на применение известных технических решений при его реализации.

В [58] описан алгоритм нечеткой морфологической фильтрации для повышения разрешающей способности в системах пассивного радиовидения.

Разработанные алгоритмы апробированы на радиолокационных системах различных типов.

В работе [59] описана система военного назначения, использующая метод и технику синтеза апертуры антенны при исследовании Земной поверхности при помощи беспилотного летательного аппарата. В работе раскрыты возможности синтеза апертуры антенны в радиотепловидении и получены радиотепловые изображения, используемые в задачах обнаружения и целеуказания.

В цикле работ концерна QinetiQ (UK) опубликованы результаты последних достижений зарубежных исследователей в направлении формирования и анализа радиотепловых изображений в миллиметровом диапазоне. Основные опубликованные источники [60 – 63] показывают значительные успехи наших западноевропейских партнеров в области прикладной реализации систем пассивного обнаружения и радиовидения. В работе [2] приведено решение поиска малоразмерных металлических объектов в условиях недостаточной видимости в задачах обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов на малых высотах на примере обнаружения проводов линий электропередач при маневрировании вертолетов. Разработан комплекс датчиков, состоящий из инфракрасных камер ближнего и дальнего диапазона, и 3-мм радиотеплолокационной системы. Радиотеплолокационная система с разрешением 544x314 и диаграммой направленности антенны 7,8 MRAD имеет размер апертуры 300мм при флуктуационной чувствительности 1К. Опубликованы результаты испытаний системы, проведенных в различных погодных условиях. В работе [63] приведена система для работы в ближней зоне антенны на основе принципов радиотеплолокации с синтезированной апертурой. Изделие выполнено в виде портативного сканера с возможностью визуализации подповерхностного слоя.

В данном направлении исследований фирмой QinetiQ разработан датчик взрывных устройств SPO-20. Датчик функционирует на основе измерения радиотеплоконтраста на дальности до 20м при частоте 94ГГц. Другим

достижением специалистов QinetiQ является сенсорная система SPO-30, направленная на обнаружение скрытых объектов под одеждой.

Коллектив Pacific Northwest National Laboratory в 2011 году опубликовал отчет о научно-технической работе «A Novel Passive Millimeter Imager for Broad-Area Search» по проекту PL09-NPMI-PD07 департамента Энергетики США. В отчете описана пассивная система миллиметрового диапазона для построения радиотепловых изображений на основе радиометров Дикке. Проведен анализ радиотеплового излучения на двух линейных поляризациях, получено пространственное разрешение, превосходящее предел Релея. Антенная система выполнена в виде двухапертурной системы зеркал Драгоне. Практическая ценность работы состоит, в том числе, в актуальном анализе проведенных исследований, в котором приведены основные недостатки разработанной системы, заключающиеся в сложной процедуре калибровки, в низкой динамике получения изображений при механическом сканировании [64].

Совместные разработки международных исследователей из США и Италии обрабатывают и публикуют результаты измерений разработанного в рамках программы NASA Instrument Incubator Program Сверхширокополосного программно-определяемого микроволнового радиометра (Ultra-Wideband Software Defined Microwave Radiometer, UWBRAD). UWBRAD расширяет возможности дистанционного зондирования, позволяя впервые определять температуру внутри ледяных щитов на больших глубинах без бурения. Это крайне важно для климатических исследований — мониторинга изменений массы ледников и оценки вклада льда в повышение уровня моря [65 – 67].

Зарубежные специалисты из Air Force Institute of Technology [68, 69] использовали радиометр с высоким разрешением (10 мкс) и четырьмя каналами, охватывающими инфракрасный спектр для наблюдения детонации девяти самодельных взрывных устройств. Радиометрические измерения показывают, что эффективный радиус, полученный из абсолютной

интенсивности, указывает на рост огненного шара с сверхзвуковой скоростью в период от 0 до 3 мс. Пиковая температура огненного шара в начальной фазе детонации колеблется в диапазоне 3000–3500 К.

Начальное снижение температуры во времени ($t \leq 10$ мс) можно описать простой феноменологической моделью, основанной на радиационном охлаждении. После этого быстрого снижения температура демонстрирует небольшое, стабильное повышение во времени ($10 \leq t \leq 50$ мс) с максимумом примерно между 1000 и 1500 К – вероятно, результат постдетонационного горения – прежде чем температура вновь понизится до температуры окружающей среды.

Радиус, определенный по радиометрическим измерениям, хорошо описывается функциональными формами моделей взрыва, что позволяет предположить, что энергия взрыва может быть оценена с помощью радиометрических детекторов с одним пикселем. Сравнение размера огненного шара, определённого радиометром, с инфракрасными изображениями FLIR показывает, что оценки размера на основе интенсивности по Планку примерно вдвое меньше физического размера огненного шара.

С современным уровнем развития технологий цифровые микроволновые радиометры заменяют как можно большую часть обычных аналоговых схем в радиометре аналого-цифровым преобразователем, за которым следует этап высокоскоростной цифровой обработки сигналов [70]. Цифровые технологии расширяют возможности радиометра [71, 72]. Работа [73] подчёркивает, что переход к цифровой микроволновой радиометрии представляет собой значительный шаг вперёд в плане гибкости, точности, спектральных и поляризметрических возможностей. Эти достижения особенно важны для дистанционного зондирования Земли [74 – 79], океанов и атмосферы и закладывают фундамент для развития современных радиометрических инструментов. Работы [80 – 87] с цифровой обработкой

сигналов, реализованной на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), являются тому доказательством.

1.4 Виды микроволновых радиометров

Микроволновые радиометры (СВЧ-радиометры) предназначены для приема и обработки слабого собственного электромагнитного излучения объектов в сверхвысокочастотном диапазоне, а также излучения, прошедшего через исследуемую среду или отраженного от ее поверхности. Мощность принимаемых сигналов, как правило, не превышает 10^{-20} Вт/Гц, вследствие чего к чувствительности и шумовым характеристикам приемной аппаратуры предъявляются исключительно высокие требования. С точки зрения радиометрии любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, является естественным источником теплового радиоизлучения [88].

Принимаемое тепловое излучение представляет собой шумовой сигнал. Его статистические свойства близки к свойствам собственных шумов радиометрического приемника. Регистрируемый процесс рассматривается как стационарный случайный процесс с распределением, близким к нормальному. В традиционных приемных устройствах и активных радиолокационных системах влияние внутренних шумов уменьшается за счет применения частотной селекции и временного стробирования. Однако при регистрации собственного теплового излучения объекта такие методы оказываются неэффективными, поскольку полезный сигнал сам является шумоподобным. В результате чувствительность микроволнового радиометра определяется уровнем собственных шумов приемного тракта и минимальным изменением мощности, которое может быть достоверно зарегистрировано за заданный интервал накопления [89].

В статистической радиотехнике показано, что оптимальная регистрация шумовых сигналов на фоне внутренних шумов приемника может быть реализована двумя основными способами. Первый основан на квадратичном детектировании принимаемого сигнала с последующим интегрированием и

компенсацией постоянной составляющей, обусловленной собственными шумами приемной аппаратуры. Второй предусматривает применение корреляционной обработки сигналов, поступающих с двух независимых приемных каналов, и их последующее статистическое усреднение.

В настоящее время разработано несколько основных схем построения радиометрических приемников, отличающихся принципами формирования и обработки полезного сигнала. В литературе встречаются такие схемы радиометров, как компенсационные, модуляционные, корреляционные и нулевые. Их названия отражают используемые в них основные методы работы [88].

1.4.1 Компенсационный микроволновый радиометр

Компенсационный радиометр относится к наиболее простому типу микроволнового радиометрического приемника [90, 91]. Его классическая структурная схема (рисунок 1.1) включает антенну (А), радиометрический приемник (РП) с высокочастотным усилителем (УВЧ) и квадратичным детектором (КД). Поскольку уровень принимаемого теплового излучения чрезвычайно мал, входной высокочастотный усилитель должен обеспечивать высокий коэффициент усиления при минимальном собственном коэффициенте шума. После усиления высокочастотный шумовой сигнал поступает на квадратичный детектор, на выходе которого снимается огибающая, которая затем усиливается усилителем постоянного тока (УПТ) и интегрируется с интегратора (И), что обеспечивает статистическое усреднение случайных флуктуаций и повышение отношения сигнал/шум за счет радиометрического выигрыша. Для компенсации постоянной составляющей, обусловленной собственным шумовым излучением приемного тракта, в состав радиометра вводятся источник опорного напряжения (ИОН) и вычитающее устройство (ВУ). Настройка опорного сигнала осуществляется таким образом, чтобы при отсутствии внешнего излучения на выходе схемы поддерживался нулевой уровень напряжения. Это позволяет компенсировать

влияние собственных шумов приемника и повысить чувствительность измерений

При поступлении электромагнитного излучения от исследуемого объекта равновесие компенсационной схемы нарушается, возникающее изменение выходного сигнала пропорционально приросту антенной температуры, обусловленному принимаемым радиоизлучением, которое и фиксируется регистратором (Р) [92].

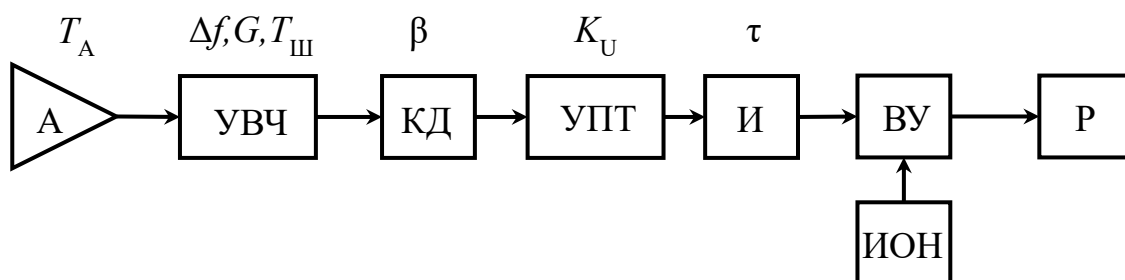


Рисунок 1.1 – Структурная схема компенсационного микроволнового радиометра

На представленном рисунке 1.1 T_A – это эффективная температура шумов антенны, Δf – полоса частот, G – коэффициент усиления усилителя высоких частот (УВЧ), $T_{ш}$ – собственная шумовая температура радиометра, β – коэффициент преобразования квадратичным детектором мощности на входе в напряжение на выходе, K_U – коэффициент усиления УПТ, τ – постоянная времени интегратора. Коэффициент передачи зависит от всех вышеперечисленных переменных и выражается следующим образом [89]:

$$T_A = G \cdot K_U \cdot \beta \cdot k \cdot \Delta f \cdot \tau \cdot (T_A + T_{ш}), \quad (1.1)$$

где k – постоянная Больцмана $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К,

Одной из важнейших характеристик радиометрических приемников является флуктуационная чувствительность. Под ней понимают наименьшее изменение антенной температуры, при котором среднее значение выходного сигнала микроволнового радиометра становится равным действующему значению его собственных флуктуаций [93].

Для компенсационного радиометра чувствительность определяется выражением [88, 89, 92]:

$$\Delta T = (T_{ш} + T_A) \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta f \cdot \tau} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2}, \quad (1.2)$$

где ΔG – изменения коэффициента усиления.

Увеличение постоянной времени интегрирования приводит к более эффективному статистическому усреднению шумовых флуктуаций, вследствие чего возрастает радиометрический выигрыш и уменьшается влияние нестабильности коэффициента усиления приемника. Вместе с тем увеличение времени интегрирования неизбежно сопровождается ростом длительности одного измерительного цикла, что приводит к снижению быстродействия радиометрической системы.

Способ измерения связан с усреднением, сглаживание быстроизменяющихся температурных изменений в несколько сотен Кельвин приводит к регистрации малозначительной флуктуации, а то и вовсе к его невосприимчивости системой.

Чувствительность и быстродействие, два важных параметра любой измерительной системы, для микроволнового радиометра являются взаимоисключающими параметрами. Повышение чувствительности требует увеличения времени накопления сигнала, тогда как обеспечение высокой временной разрешающей способности предполагает его уменьшение. Поэтому выбор постоянной времени интегрирования представляет собой компромисс между точностью измерений и скоростью регистрации процессов и определяется требованиями конкретной области применения радиометрической системы. Характерное искажение формы быстропротекающего радиотеплового процесса при измерении компенсационным радиометром приведено на рисунке 1.2 [88].

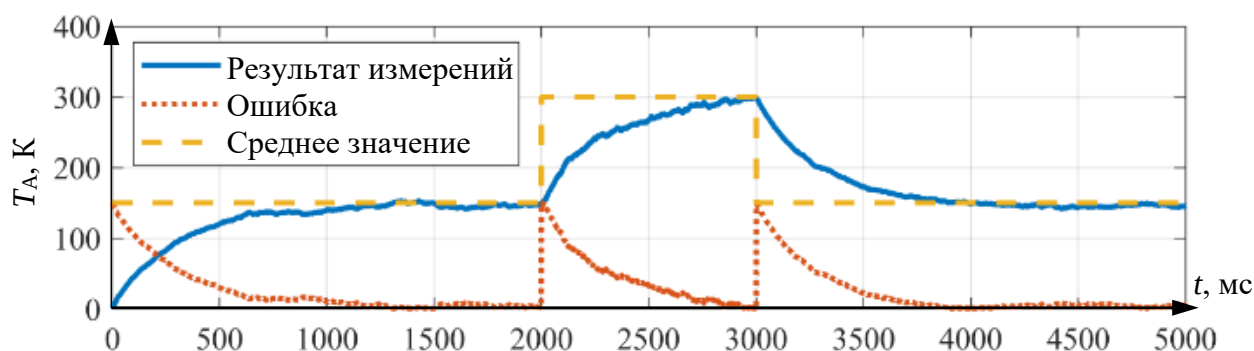


Рисунок 1.2 – Результат работы компенсационного микроволнового радиометра при измерении быстропротекающего процесса

Таким образом, основными достоинствами компенсационного радиометра являются простота реализации схемы и высокий коэффициент использования энергии, поступающей от антенны, что теоретически обеспечивает чувствительность выше, чем у других типов микроволновых радиометров. Однако, в реальных условиях эксплуатации, потенциальные преимущества данной схемы существенно ограничиваются нестабильностью коэффициента усиления и изменением шумовой температуры приемного тракта. Воздействие этих дестабилизирующих факторов приводит к ухудшению фактической чувствительности, вследствие чего компенсационные радиометры находят применение лишь в ограниченном круге задач.

1.4.2 Модуляционный микроволновый радиометр

Применение дифференциального принципа обработки сигналов, позволяет существенно ослабить влияние медленно изменяющейся составляющей собственных шумов приемника. Реализация данного метода достигается путем периодического переключения входа микроволнового радиометра между исследуемым объектом и эталонным источником шумового излучения с известной и стабильной шумовой температурой. Для этого на входе приемного тракта устанавливается модулятор, представляющий собой высокочастотный переключатель с двумя входами и

одним выходом. К одному входу подключается антенна, принимающая излучение исследуемого объекта, а ко второму – опорный источник шума. В качестве опорного сигнала в зависимости от диапазона измеряемых температур могут использоваться пассивные эталонные нагрузки с известной шумовой температурой [94 – 96], активные генераторы шума [99], построенные на лавинно-пролетных диодах [97, 98] или малошумящих усилителях, подключаемые входом к входу микроволнового радиометра [100–103], работающих в режиме активного «холодного» генератора шума.

Структурная схема модуляционного радиометра (рисунок 1.3) [104], включает в себя антенну (А), опорный генератор шума (ОГШ), модулятор в виде переключателя (ПК), усилитель высоких частот (УВЧ), квадратичный детектор (КД), усилитель низких частот (УНЧ), синхронный детектор (СД), интегратор (И), устройство управления (УУ) и регистратор (Р).

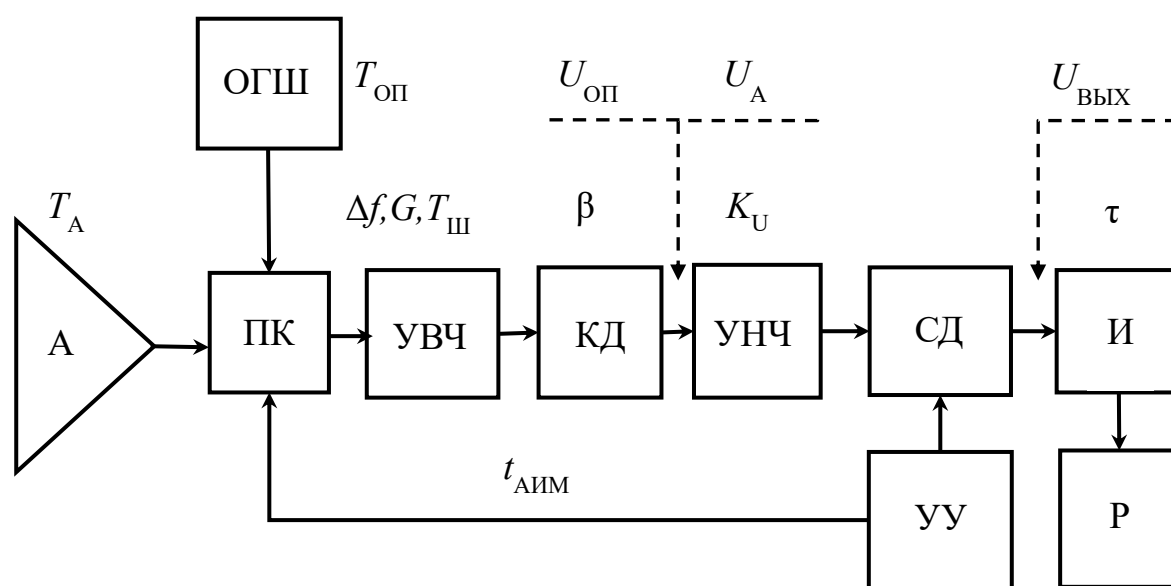


Рисунок 1.3 – Структурная схема модуляционного микроволнового радиометра

Управление модуляционным радиометром осуществляется, как правило, при помощи амплитудно-импульсного сигнала $t_{\text{АИМ}}$ со скважностью 2. Осциллограммы, поясняющие принцип работы показаны на рисунке 1.4.

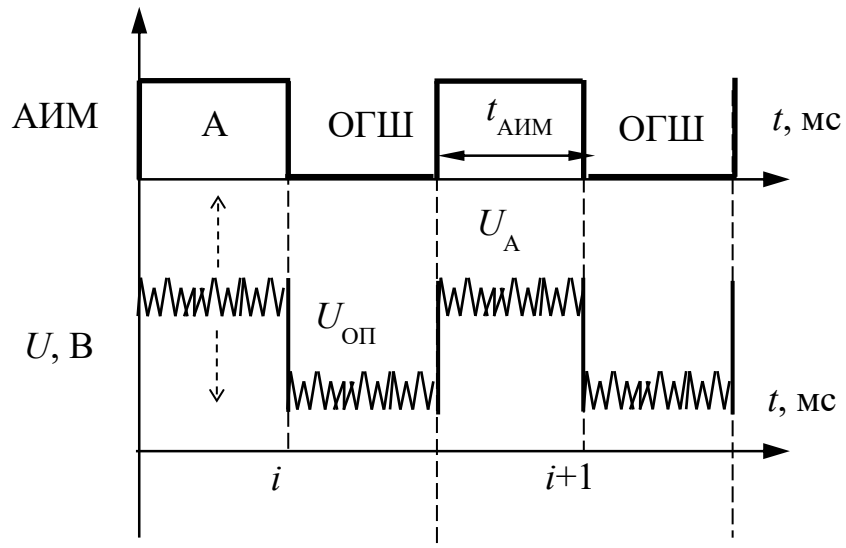


Рисунок 1.4 – Осциллограммы на выходе УУ и на входе СД

Ниже приведены формулы описывающие постоянные составляющие напряжений шумов на выходе КД при подключении на вход антенны (U_A) и опорного генератора шума ($U_{ОП}$) [88, 89 92]:

$$U_A = G \cdot \beta \cdot k \cdot \Delta f \cdot (T_A + T_{ш}), \quad (1.3)$$

$$U_{ОП} = G \cdot \beta \cdot k \cdot \Delta f \cdot (T_{ОГШ} + T_{ш}), \quad (1.4)$$

где k – постоянная Больцмана $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К,

$T_{ОГШ}$ – шумовая температура опорного генератора.

Выходное напряжение после синхронного детектора является разностью:

$$U_{ВЫХ} = G \cdot \beta \cdot k \cdot \Delta f \cdot K_U \cdot (T_A - T_{ОГШ}). \quad (1.5)$$

Из выражения (1.5) следует, что постоянная составляющая собственных шумов $T_{ш}$ не входит в формулу. Благодаря модуляции значительно снижено влияние собственных шумов на результаты измерений. И результирующее напряжение на выходе синхронного детектора формируется, основываясь на разнице $T_A - T_{ОГШ}$.

Флуктуационная чувствительность ΔT в свою очередь продолжает зависеть от дрейфа коэффициента усиления приемного тракта ΔG и от величины измеренного сигнала. С учетом этого влияния формула для

флуктуационной чувствительности модуляционного радиометра имеет вид [89, 105, 106]:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{2(T_{ш} + T_A)^2}{\Delta f \cdot \tau} + \frac{2(T_{ш} + T_{огш})^2}{\Delta f \cdot \tau} + (T_A - T_{огш})^2 \left(\frac{\Delta G}{G} \right)^2}. \quad (1.6)$$

Чем больше будет T_A при неизменном $T_{огш}$, тем больше будет получившееся значение ΔT , т.е. хуже флуктуационная чувствительность. Уравнивание уровней T_A и $T_{огш}$ в подкоренном выражении флуктуационной чувствительности приведет к обнулению второго слагаемого.

Из выражения (1.6) видно, что существует два подхода к снижению влияния колебаний коэффициента усиления. Первый заключается в увеличении постоянной времени τ фильтра низких частот, что позволяет накапливать сигнал антенны на более длительном интервале, однако приводит к возрастанию времени измерения и снижению быстродействия радиометра. Второй способ основан на выравнивании сигналов шумовой температуры антенны T_A и шумовой температуры опорного генератора шума $T_{огш}$, например путем регулировки уровня опорного генератора шума. В этом случае третье слагаемое подкоренного выражения в формуле (1.6), определяющий влияние нестабильности коэффициента усиления, стремится к нулю. Реализация данного принципа фактически приводит к использованию нулевого метода измерений, положенного в основу построения нулевых радиометров.

Следует отметить, что модуляционные радиометры получили широкое распространение при исследовании быстропротекающих процессов. Ослабление влияния собственных шумов приемного тракта позволяет уменьшить постоянную времени интегрирования при сохранении требуемой флуктуационной чувствительности. В результате достигается повышение временного разрешения и быстродействия микроволновой радиометрической системы без ухудшения качества измерений.

1.4.3 Корреляционный микроволновый радиометр

Дополнительное повышение точности измерений может быть достигнуто за счет использования корреляционного принципа обработки сигналов. Его основой является то обстоятельство, что собственное излучение антенны, внутренние шумы независимых приемных каналов и флуктуации их коэффициентов усиления статистически некоррелированные. Благодаря этому появляется возможность выделения только полезной составляющей принимаемого сигнала при подавлении внутренних шумов измерительного тракта. Структурная схема корреляционного радиометра (рисунок 1.5) [108] включает: антенну (А), делитель мощности (Д), два идентичных усилителя высоких частот (УВЧ₁ и УВЧ₂), умножитель (У), интегратор (И), усилитель постоянного тока (УПТ) и регистратор (Р) [88 – 92].

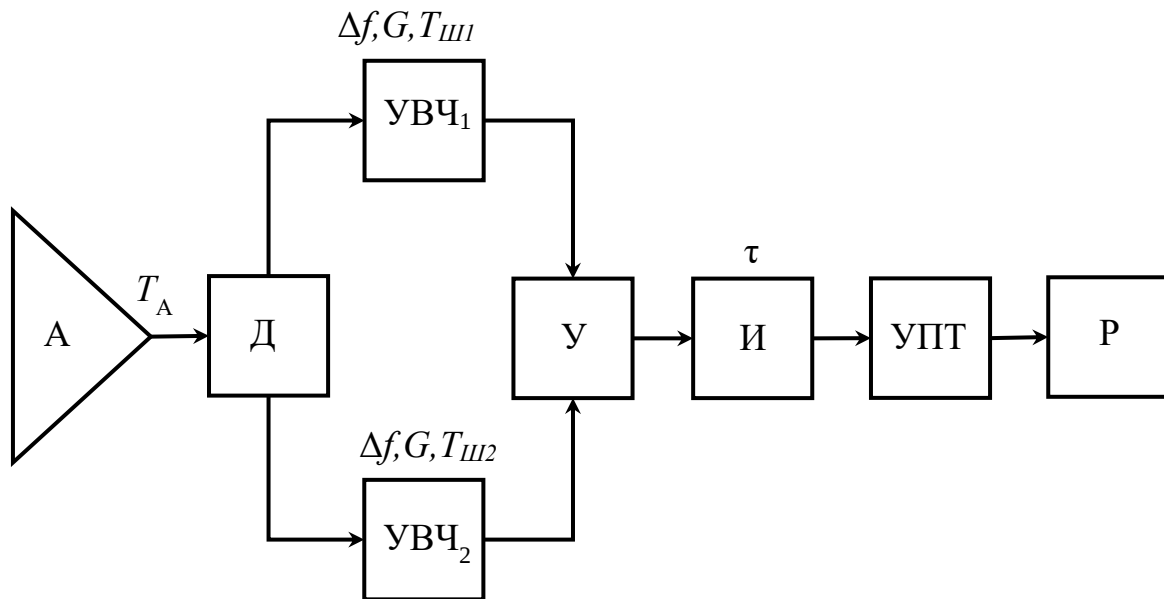


Рисунок 1.5 – Структурная схема корреляционного микроволнового радиометра

Схема умножения и интегратор образуют коррелятор. Напряжение на выходе умножающего устройства описывается следующей формулой [88, 92, 107]:

$$U = (U_{ш1} + U_A)(U_{ш2} + U_A) = U_A^2 + U_A U_{ш1} + U_A U_{ш2} + U_{ш1} U_{ш2}, \quad (1.7)$$

где U_A – напряжение шумов антенны на входе идентичных усилителей,

$U_{ш1}$ и $U_{ш2}$ – напряжения собственных шумов первого и второго УВЧ соответственно.

Сигнал антенны на выходах усилителей высоких частот остаётся сильно коррелированным, тогда как собственные шумы усилителей и шумы антенны между собой не связаны. В результате произведения некоррелированных составляющих обращаются в ноль, и на выходе интегратора формируется напряжение, пропорциональное квадрату антенного напряжения U_A . Использование корреляционного метода позволяет отказаться от входного модулятора и квадратичного детектора, а также существенно уменьшить влияние собственных шумов приемного тракта. Вместе с тем подобная схема предъявляет значительно более жесткие требования к идентичности амплитудно и фазочастотных характеристик обоих каналов. Даже незначительные различия их параметров и временные изменения фазовых характеристик приводят к возникновению дополнительных погрешностей, аналогичных ошибкам, обусловленным нестабильностью коэффициента усиления в традиционных схемах. Кроме того, усложняются процедуры настройки, калибровки и обеспечения стабильной работы радиометра в заданном диапазоне измеряемых температур [88, 92, 107].

1.4.4 Нулевые микроволновые радиометры

Как и в модуляционных радиометрах, в нулевых радиометрах для выполнения измерений используется опорный источник шумового сигнала. В процессе работы по приемному тракту попеременно проходят два сигнала: собственное излучение, принимаемое антенной, и сигнал внутреннего генератора шума. Принципиальное отличие нулевого радиометра заключается в том, что уровень опорного сигнала не является постоянным, а автоматически изменяется в процессе измерений. Регулировка мощности опорного генератора осуществляется таким образом, чтобы в течение обоих полупериодов амплитудно-импульсной модуляции через приемный тракт проходили сигналы одинаковой средней мощности. При достижении этого

условия разностная составляющая на выходе синхронного детектора стремится к нулю, что соответствует установлению нулевого баланса. В качестве регулируемого опорного источника, как правило, используется полупроводниковый генератор шума, уровень которого изменяется либо регулированием питающего тока, либо посредством прецизионного аттенюатора, ослабляющего выходной сигнал. В отличие от модуляционного радиометра, в котором информация о принимаемом излучении содержится непосредственно в выходном сигнале измерительного тракта, в нулевом радиометре измеряемая величина определяется управляющим воздействием, необходимым для восстановления баланса между антенной и опорным источником. Таким образом, результат измерения формируется косвенным способом по величине регулировочного сигнала.

В настоящее время предложено большое число схем построения нулевых радиометров, отличающихся способом формирования и регулирования опорного сигнала [88, 109]. В ряде конструкций выравнивание уровней осуществляется непосредственно на входе приемного тракта методом «подшумливания». Если используется низкотемпературный опорный источник, его шумовая температура повышается путем добавления регулируемой шумовой составляющей до уровня температуры антенного сигнала. При использовании высокотемпературного генератора, напротив, дополнительный шум вводится в антенный тракт, что обеспечивает выравнивание уровней сигналов, но сопровождается увеличением собственной шумовой температуры приемной системы.

Для нулевых радиометров можно сформировать следующую классификацию [88, 108, 109]:

Нулевые микроволновые радиометры основываются на:

1. Выравнивание сигналов в низкочастотном тракте:

1) Регулирование уровня опорного сигнала с использованием резистивных делителей, работающих синхронно с модуляцией.

2) Синхронное усиление опорного сигнала.

2. Выравнивание сигналов в высокочастотном тракте:

1) Синхронное ослабление опорного сигнала.

2) Формирование опорного сигнала частотным методом на основе собственных шумов приемного тракта.

3. Методы, основанные на делении сигналов.

4. Устройства, применяемые в контактных измерениях.

5. Выравнивание сигналов непосредственно на входе микроволнового радиометра:

1) Аналоговая регулировка выходной мощности опорного сигнала:

а. применение прецизионного аттенюатора,

б. изменение тока, питающего опорный генератор.

2) Регулировка средней мощности опорного сигнала изменением времени его действия:

а. использование частотной модуляции,

б. использование широтно-импульсной модуляции:

- использование направленных ответвителей;
- использование двух модуляторов;
- использование полосовых фильтров.

1.4.5 Нулевой микроволновый радиометр с импульсным подшумливанием

Наилучшие метрологические характеристики нулевых микроволновых радиометров, такие как высокая стабильность измерений, линейность передаточной характеристики в широком динамическом диапазоне и высокая абсолютная точность – обеспечиваются тогда, когда регулировка средней мощности опорного сигнала выполняется не за счёт изменения его амплитуды, а путём варьирования времени его подачи на вход приёмника [110]. Такой способ управления позволяет отказаться от применения высокоточных регулируемых аттенуаторов, существенно упрощая конструкцию входной части микроволнового радиометра. В подобных схемах функцию регулирования выполняет высокочастотный модулятор, работающий в ключевом режиме. Его управление может осуществляться либо последовательностью импульсов постоянной длительности с изменяемой частотой повторения, либо сигналом широтно-импульсной модуляции, изменяющим коэффициент заполнения в соответствии с уровнем принимаемого антенного сигнала. Структурная схема нулевого микроволнового радиометра с импульсным подшумливанием представлена на рисунке 1.6 [110, 111].

В состав устройства входят два опорных генератора шума (ОГШ_1 и ОГШ_2). Сигнал первого генератора вводится в измерительный тракт через направленный ответвитель (НО) только в интервалы времени, определяемые широтно-импульсным управляющим сигналом, формируемым устройством управления (УУ) и подаваемым на переключатель ПК_1 , работающий в режиме высокочастотного ключа. Второй опорный генератор и антенна подключаются к приемному тракту посредством второго переключателя ПК_2 , работающего в режиме амплитудно-импульсной модуляции под управлением того же устройства. Измерительный тракт включает малошумящий усилитель (МШУ), квадратичный детектор (КД), усилитель постоянного тока (УПТ) и

синхронный фильтр (СФ), выполненный на основе схемы коммутируемых конденсаторов и реализующий функции фильтра нижних частот. Работа фильтра синхронизируется с сигналом амплитудно-импульсной модуляции, обеспечивая корректное выделение полезной составляющей измерительного сигнала. Для реализации нулевого метода на выходе измерительного тракта дополнительно устанавливаются фильтр верхних частот (ФВЧ) и компаратор (К), функционирующий в режиме нуля-органа. Их совместная работа обеспечивает контроль момента достижения нулевого баланса и формирование управляющего воздействия, необходимого для автоматической регулировки мощности опорного шумового сигнала.

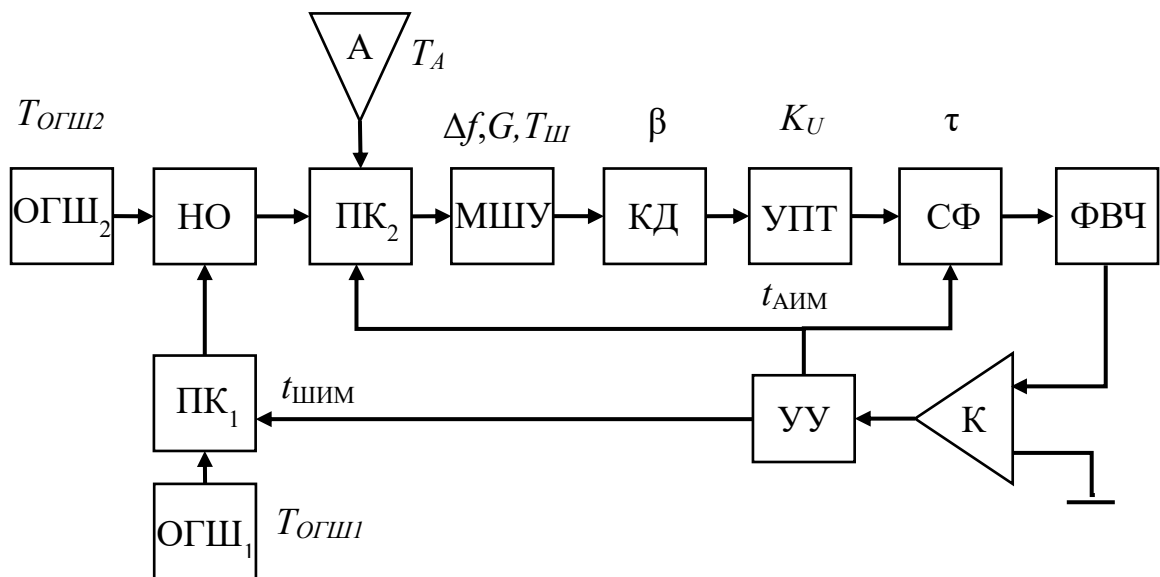


Рисунок 1.6 – Структурная схема нулевого микроволнового радиометра с импульсным подшумливанием

На рисунке 1.7 показаны осциллограммы, поясняющие принцип работы нулевого микроволнового радиометра.

Принцип работы нулевого радиометра основан на установлении нулевого баланса и регулировании канала подшумливания при помощи обратной связи. В данной схеме используются два сигнала управления. амплитудно-импульсный сигнал $t_{\text{АИМ}}$ со скважностью 2 и широтно-импульсный сигнал $t_{\text{ШИМ}}$. При высоком уровне $t_{\text{АИМ}}$ сигнала и низком уровне $t_{\text{ШИМ}}$ сигнала в измерительный тракт поступает шумовая температура

опорного генератора шума ОГШ₂. Когда сигналы $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$ в высоком уровне через направленный ответвитель дополнительно поступают шумы с ОГШ₁.

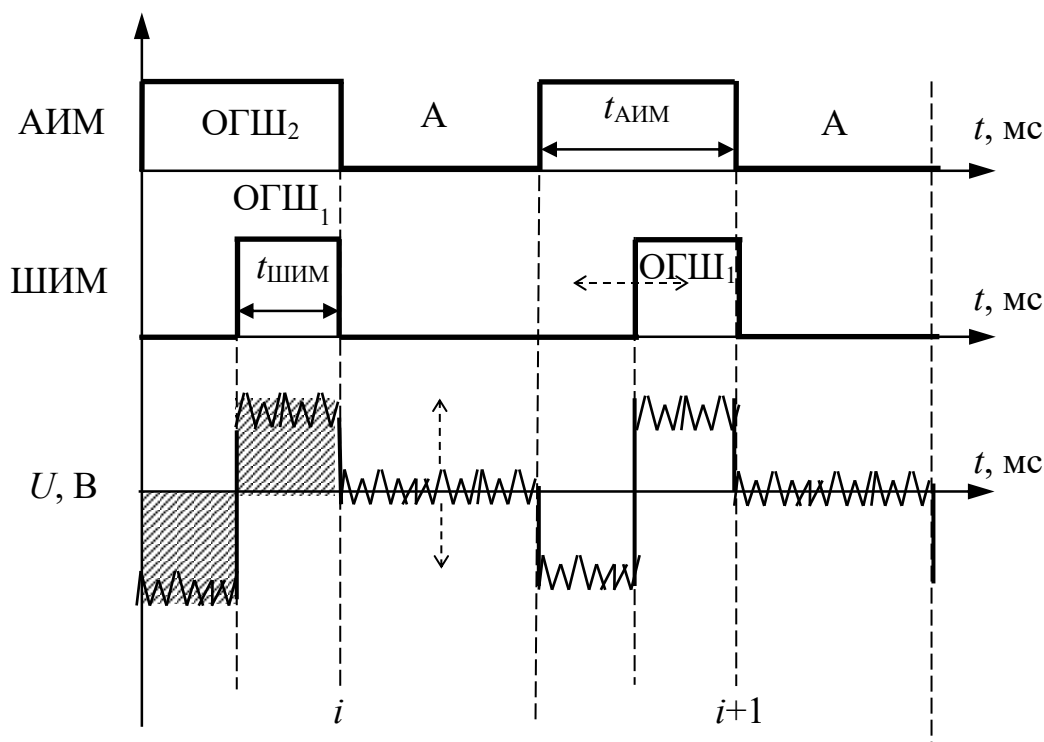


Рисунок 1.7 – Осциллограммы на выходе УУ и на входе СФ

Когда оба сигнала $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$ в низком уровне в измерительный тракт поступает шумовая температура антенны. Нулевой баланс считается установленным, когда средние значения вольт секундных площадей полупериодов будут равны. И тогда численное значение длительности $t_{\text{ШИМ}}$ пересчитывается в температуру по следующему выражению [110 – 113]:

$$T_A = T_{\text{ОГШ1}} - T_{\text{ОГШ2}} \cdot \frac{t_{\text{ШИМ}}}{t_{\text{АИМ}}}, \quad (1.8)$$

где $T_{\text{ОГШ1}}$, $T_{\text{ОГШ2}}$ – шумовые температуры первого и второго опорных генераторов,

$t_{\text{ШИМ}}$ – длительность импульса широтно-импульсно модулированного сигнала,

$t_{\text{АИМ}}$ – длительность импульса амплитудно-импульсно модулированного сигнала.

Флуктуационная чувствительность для нулевого микроволнового радиометра определяется по формуле [114, 115]:

$$\Delta T_A = \sqrt{\frac{T_A(2T_{огш2} + T_{огш1} + 4T_{ш}) + 2T_{ш}^2 - T_{огш2}(T_{огш2} + T_{огш1})}{2 \cdot \Delta f \cdot \tau \cdot R}}, \quad (1.9)$$

где τ – постоянная времени синхронного фильтра,

R – количество усредненных цифровых кодов длительности $t_{\text{шим}}$ в цифровом устройстве управления радиометром на интервале одного измерения.

Минимальной чувствительностью обладает нулевой микроволновый радиометр на краю диапазона измерения при $T_A = T_{A,\text{макс}} = T_{огш2} + T_{огш1}$:

$$\Delta T_{A,\text{макс}} = \sqrt{\frac{2(T_{огш2} + T_{ш})^2 + 2T_{огш1}^2 + 4T_{огш1}(T_{огш2} + T_{ш})}{2 \cdot \Delta f \cdot \tau \cdot R}}. \quad (1.10)$$

Из-за наличия обратной связи и образуется главный недостаток нулевого микроволнового радиометра при измерениях быстропротекающих радиотепловых процессов это длительное установление нулевого баланса [116]. Тем не менее при измерении квазистационарных процессов нулевой микроволновый радиометр определяется лучшими метрологическими характеристиками флуктуационной чувствительности, дисперсии результатов измерений и сниженным влиянием дрейфа коэффициента передачи, собственных шумов приемника на результаты измерений.

Ограничение по динамическому диапазону для схемы на рисунке 1.6 лежит в пределах от $T_{огш2}$ до $T_{огш2} + T_{огш1}$.

1.5 Цель и задачи исследования

По результатам проведенного литературно обзора можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение быстродействия радиометрических систем, как правило за счет уменьшения временного интервала интегрирования измеряемого шумового сигнала, напрямую влияет на снижения чувствительности. Это фундаментальное ограничение приводит к компромиссу между точностью измерений и скоростью регистрации радиотепловых процессов и определяется требованиями конкретной области применения радиометрической системы.

2. Задача повышения быстродействия микроволновых радиометрических систем при сохранением заданной флуктуационной чувствительностью является актуальной для широкого круга задач. К их числу относятся дистанционное зондирование Земли с целью улучшения климатического прогнозирования, (снятия ограничения скачкообразного изменения яркостной температуры из-за смены поверхностей вода-суша); исследование и мониторинг интегральной и вспышечной активности Солнца с целью оценки его влияния на геомагнитное поле Земли; прикладные медицинские исследования с целью повышения скорости получения объемной карты распределения радиояркостной температуры; дистанционного поиска потенциально опасных объектов за оптически не прозрачными преградами; системы пассивного радиовидения; а также измерения температуры фронта ударной или детонационной волн и области протекания химической реакции для совершенствования математических моделей исследуемых быстропотекающих процессов, в том числе за оптически непрозрачными защитными преградами. Следовательно, существует необходимость разработки новых методологических и технических решений, обеспечивающих исследование нестационарного радиотеплового излучения с высоким временным разрешением при сохранении удовлетворительной флуктуационной чувствительности.

3. В общей массе отечественных и зарубежных научных сообществ при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов распространено применение микроволновых радиометров компенсационного и модуляционного типа. Данные типы радиометров обладают хорошим быстродействием, но худшей флуктуационной чувствительностью по сравнению с нулевыми микроволновыми радиометрами

4. Среди общего количества структурных схем микроволновых радиометров перспективна в использовании схема нулевого микроволнового радиометра, так как она имеет наилучшие характеристики в виде высокой стабильности измерений, линейности передаточной функции в широком диапазоне сигналов и высокой абсолютной точности, ее главным недостатком является длительное время установления нулевого баланса, при достижении которого результаты измерений и соответствуют вышеперечисленным критериям, т.е. при измерении квазистационарных процессов.

Цель работы – Разработка быстродействующего микроволнового радиометра, обеспечивающего повышенное временное разрешение результатов измерений при пассивных дистанционных исследованиях быстропротекающих радиотепловых процессов и обладающего метрологическими характеристиками, соответствующими лучшим мировым аналогам.

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

1. Разработка алгоритма работы микроволнового радиометра, обеспечивающего повышенное быстродействие при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов;
2. Разработка структурной схемы микроволнового радиометра, реализующей предложенный алгоритм повышения быстродействия;
3. Разработка экспериментальной установки, реализующей структурную схему и алгоритм работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра;

4. Проведение экспериментальных исследований на основе экспериментальной установки, реализующей предложенный быстродействующий микроволновый радиометр.

2. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТР

В представленной главе описан быстродействующий микроволновый радиометр, на основе нулевого и дифференциального методов измерений [117 – 119]. Отличительной особенностью предложенного устройства является адаптивный алгоритм работы. Это позволяет использовать преимущества нулевого метода измерений, заключающиеся в его инвариантности к изменяющимся шумовой температуре и коэффициенту передачи радиометрического приемника [121], и дифференциального метода измерений, позволяющего расширить динамический диапазон и увеличить быстродействие микроволнового радиометра при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов.

2.1 Структурная схема предложенного быстродействующего микроволнового радиометра

На рисунке 2.1 приведена разработанная и запатентованная структурная схема быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений [117 – 119]. В состав предложенного быстродействующего микроволнового радиометра входят: источник тока (ИТ), генератор шума (ГШ), переключатель (ПК), направленный ответвитель (НО), аттенюаторы (АТТ₁) и (АТТ₂), модулятор (М), антенна (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 выходная шина данных (ВШ).

Принцип работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра поясняется временными диаграммами, показанными на рисунке 2.2.

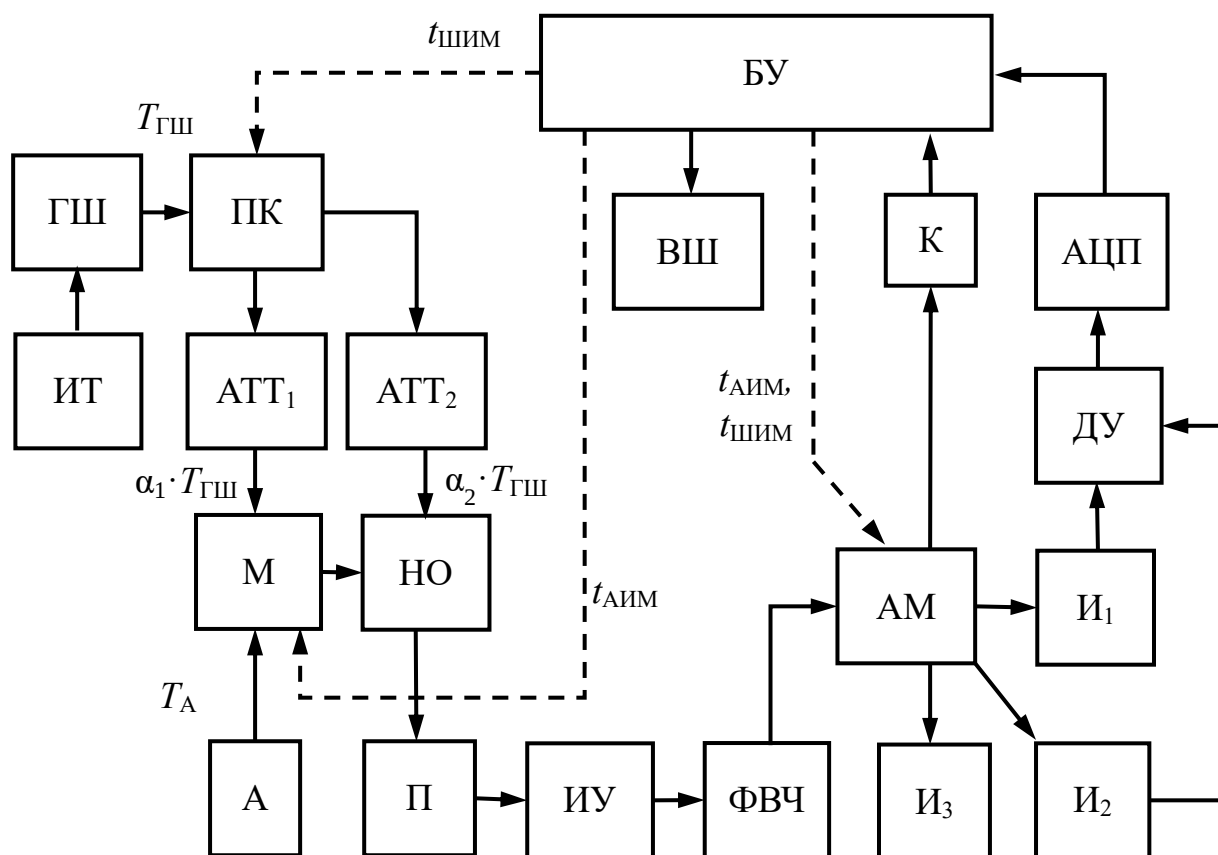


Рисунок 2.1 – Структурная схема предложенного быстродействующего микроволнового радиометра

Блок управления формирует сигнал амплитудно-импульсной модуляции для управления модулятором (рисунок 2.2*а*), сигнал широтно-импульсной модуляции для управления переключателем (рисунок 2.2*б*). Оба этих сигнала служат для управления аналоговым мультиплексором.

Сигнал амплитудно-импульсной модуляции $t_{\text{АИМ}}$ представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов со скважностью следования, равной двум. Каждый период состоит из двух равных по длительности интервалов, в течение которых измерительный тракт последовательно подключается к различным источникам сигнала (рисунок 2.2*a*) [110 – 119].

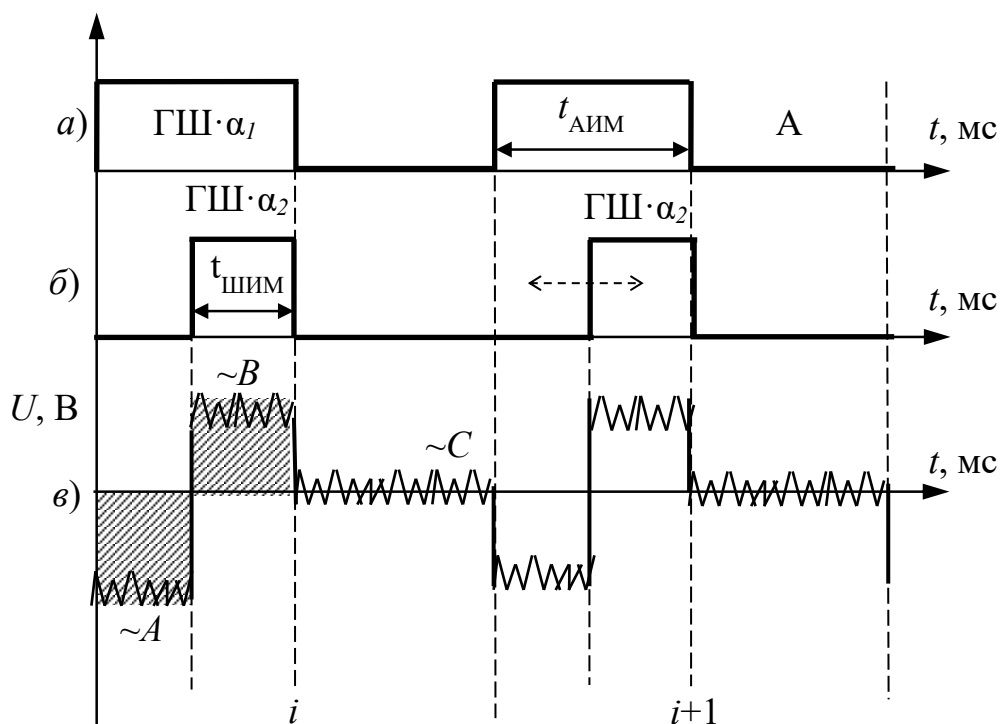


Рисунок 2.2 – Временные диаграммы, поясняющие принцип работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра: управляющий сигнал амплитудно-импульсной модуляции (а), управляющий сигнал широтно-импульсной модуляции (б), вход компаратора (в)

Сигнал широтно-импульсной модуляции $t_{\text{ШИМ}}$ представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов с переменной длительностью (рисунок 2.2б).

В соответствии с временными диаграммами, представленными на рисунке 2.2, блок управления формирует три комбинации сигналов $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$, определяющие различные режимы работы измерительного тракта.

При высоком уровне сигнала амплитудно-импульсной модуляции $t_{\text{АИМ}}$ и низком уровне широтно-импульсного сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ вход приемника соединяется с генератором шума через направленный ответвитель, модулятор и первый аттенюатор. Генератор шума питается от источника тока в непрерывном режиме, а его сигнал поступает на вход приемного тракта через основной канал направленного ответвителя. После прохождения через импульсный усилитель и фильтр верхних частот сигнал $T_{\text{ГШ}}$ посредством аналогового мультиплексора направляется на первый интегратор, где

осуществляется его накопление и усреднение. При этом на входе компаратора формируется сигнал, описываемый выражением [117 – 123]:

$$A = (\alpha_1 T_{ГШ} + T_{Ш}) \Delta f G k, \quad (2.1)$$

где α_1 – коэффициент передачи первого аттенюатора;

$T_{ГШ}$ – уровень шумов генератора шума;

$T_{Ш}$ – уровень собственных шумов приемника;

Δf – рабочая полоса частот приемника;

G – коэффициент передачи приемника;

k – постоянная Больцмана.

Посредством аналогового мультиплексора сигнал A сглаживается и накапливается в первом интеграторе.

При высоком уровне управляющих сигналов $t_{АИМ}$ и $t_{ШИМ}$ сигнал генератора шума $T_{ГШ}$ поступает на вход приемника через второй аттенюатор и вспомогательный канал направленного ответвителя. После прохождения измерительного тракта выполняются операции усиления, фильтрации, детектирования и интегрирования третьим интегратором, в результате чего на входе компаратора формируется сигнал, определяемый выражением (рисунок 2.2б) [117 – 123]:

$$B = (\alpha_2 \cdot T_{ГШ} + T_{Ш}) \cdot \Delta f G k, \quad (2.2)$$

где α_2 – коэффициент передачи второго аттенюатора.

При низком уровне управляющих сигналов $t_{АИМ}$ и $t_{ШИМ}$ вход приемника связан с антенной через направленный ответвитель и второй вход модулятора. Выходной сигнал приемника через фильтр верхних частот и аналоговый мультиплексор поступает на второй интегратор, где выполняется его накопление. Соответствующий сигнал на входе компаратора описывается выражением аналогично выражению (2.1):

$$C = (T_{Ш} + T_A) \cdot \Delta f G k, \quad (2.3)$$

где T_A – шумовая температура антенны.

Посредством аналогового мультиплексора сигнал C сглаживается и накапливается во втором интеграторе.

В зависимости от состояния сигнала на выходе компаратора в блоке управления, при высоком уровне $t_{\text{АИМ}}$, происходит регулирование длительности сигнала широтно-импульсной модуляции $t_{\text{ШИМ}}$. Если на выходе компаратора сформирован сигнал высокого уровня, то длительность сигнала широтно-импульсной модуляции $t_{\text{ШИМ}}$ увеличивается. Если на выходе компаратора сформирован сигнал низкого уровня, то длительность сигнала широтно-импульсной модуляции $t_{\text{ШИМ}}$ уменьшается. Регулирование осуществляется до тех пор, пока не выполнится равенство вольт-секундных площадей положительного и отрицательного импульсов на первом входе компаратора (заштрихованные области на рисунке 2.2в). 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 [117 – 123]:

$$(B - C) \cdot t_{\text{ШИМ}} = (C - A) \cdot (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}). \quad (2.4)$$

Подставляя (2.1), (2.2) и (2.3) в (2.4) получим:

$$\begin{aligned} & (\alpha_2 T_{\text{ГШ}} + T_{\text{Ш}} - T_{\text{Ш}} - T_{\text{А}}) \cdot \Delta f G k \cdot t_{\text{ШИМ}} = \\ & = (T_{\text{Ш}} + T_{\text{А}} - \alpha_1 T_{\text{ГШ}} - T_{\text{Ш}}) \cdot \Delta f G k \cdot (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Решая (2.5) относительно $t_{\text{ШИМ}}$ получим:

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{T_{\text{А}} - \alpha_1 T_{\text{ГШ}}}{\alpha_1 T_{\text{ГШ}} + \alpha_2 T_{\text{ГШ}}} \cdot t_{\text{АИМ}}. \quad (2.6)$$

Из последней формулы (2.6) следует линейная зависимость сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ от входного сигнала антенны. Через длительность сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ определяется шумовая температура объекта. Так же, из формулы (2.6) 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 то, что

предложенный быстродействующий микроволновый радиометр работает согласно методу нулевых измерений [117 – 123].

После накопления необходимого количества цифровых кодов длительности блок управления формирует цифровой код, пропорциональный шумовой температуре исследуемого объекта, который поступает на выходную шину данных.

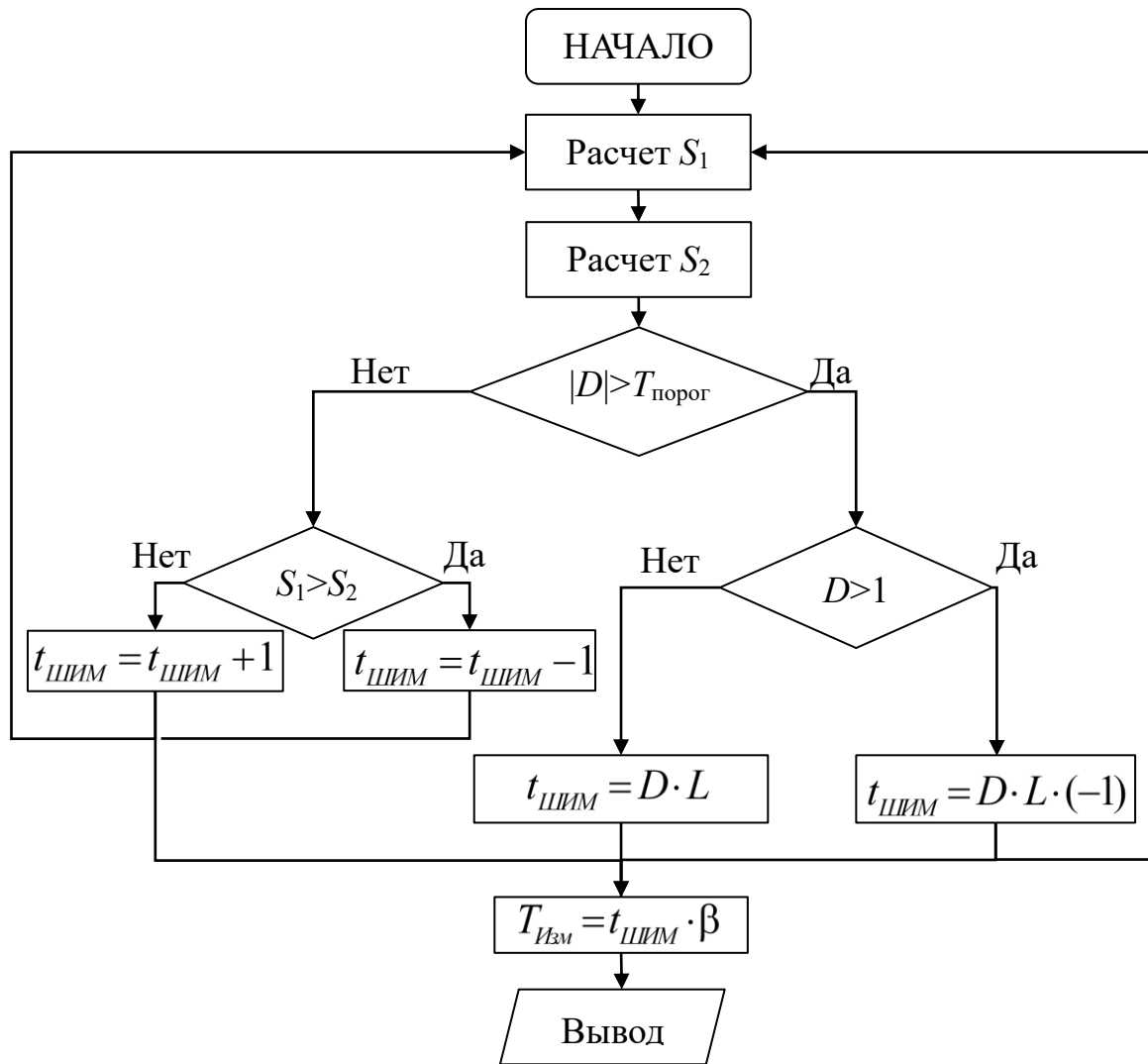
Одновременно с работой нулевого контура в предложенном быстродействующем микроволновом радиометре реализуется дифференциальный режим обработки сигналов. На выходе дифференциального усилителя формируется напряжение, пропорциональное разности сигналов, накопленных первым и вторым интеграторами, что описывается выражением [117 – 119]:

$$dU = C - A = (T_A - \alpha_1 \cdot T_{ГШ}) \cdot \Delta f G k. \quad (2.7)$$

Полученный сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя и определяется разностью между сигналом опорного генератора шума (с учетом ослабления первым аттенуатором) и сигналом антенны. В этом случае результаты измерений не зависят от изменений $T_{Ш}$, а предложенный быстродействующий микроволновый радиометр работает в модуляционном режиме (согласно дифференциальному методу измерений) [117 – 119].

2.2 Алгоритм работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра

На рисунке 2.3 представлен разработанный алгоритм работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений [124, 125].



где: $T_{\text{порог}} = x \text{ К}$;

L – коэффициент пропорциональности разности сигналов к положению $t_{\text{ШИМ}}$;

β – коэффициент пропорциональности шумовой температуры к физической (коэффициент калибровки).

Рисунок 2.3 – Алгоритм работы предложенного
быстродействующего микроволнового радиометра
на основе нулевого и дифференциального методов измерений

Показанный на рисунке 2.3 расчет площадей S_1 и S_2 происходит по формулам (2.8) и (2.9):

$$S_1 = \frac{A[1:t_{\text{ШИМ}}]}{t_{\text{ШИМ}}}, \quad (2.8)$$

$$S_2 = \frac{B \left[t_{\text{ШИМ}} : \frac{T}{2} \right]}{\frac{T}{2} - t_{\text{ШИМ}}}. \quad (2.9)$$

Дифференциальный расчет (аналогично расчету по формуле (2.7)) производится по формуле:

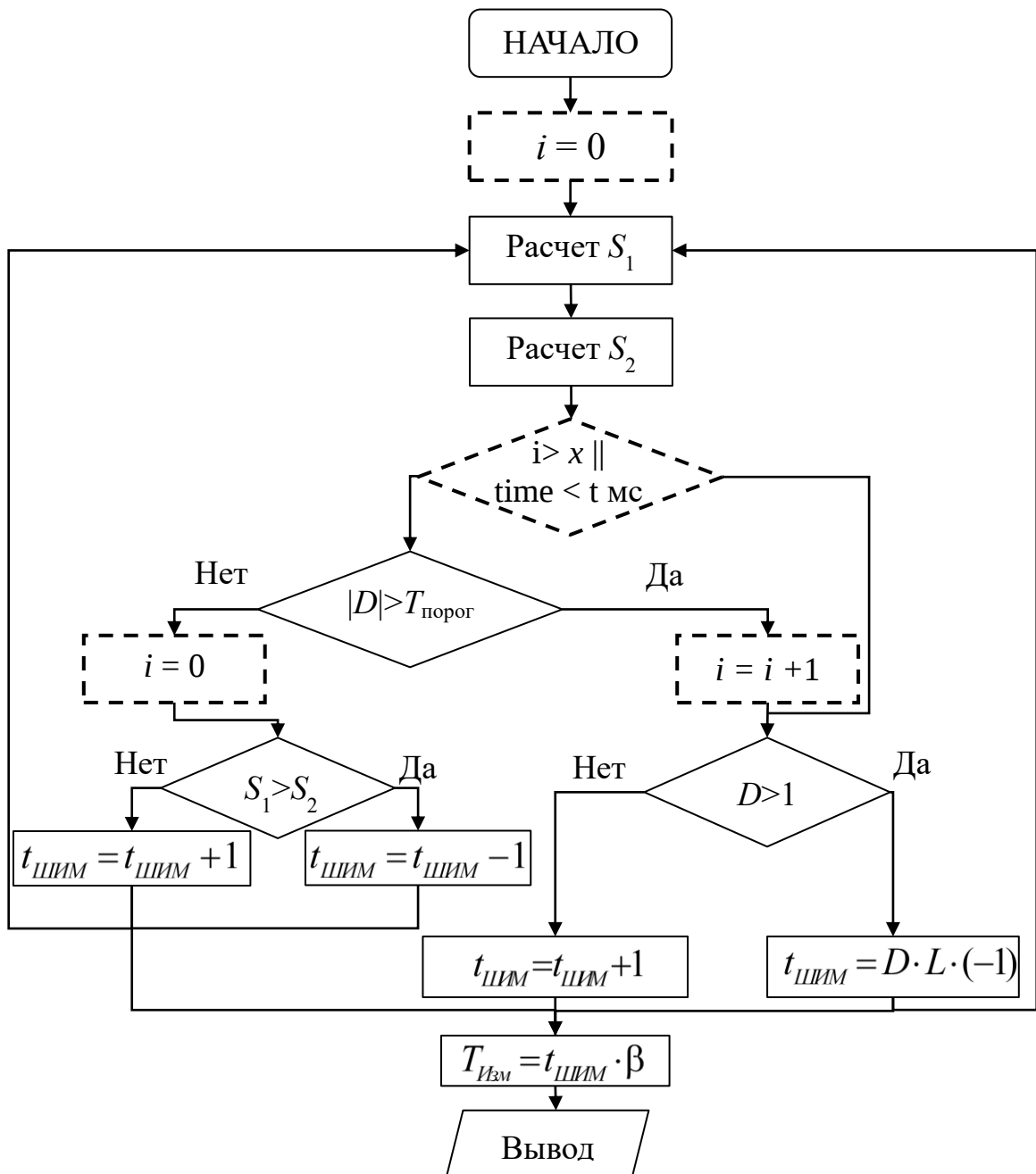
$$D = \frac{C \left[\frac{T}{2} : T \right]}{\frac{T}{2}} - \left\{ \frac{A[1 : t_{\text{ШИМ}}]}{t_{\text{ШИМ}}} \right\}. \quad (2.10)$$

Данный алгоритм оптимизирован для работы с сигналами со скачкообразным изменением шумовой температуры (функция Хевисайда). Полученные результаты измерений дифференциальным методом используются для расчета значения сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ 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 быстродействующего 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.

При исследовании природных и антропогенных объектов в полевых условиях огибающая шумового сигнала в большинстве случаев описывается более сложными функциями [14] и их комбинациями.

В этом случае следует использовать алгоритм работы, показанный на рисунке 2.4 [124, 125].



где i – количество периодов амплитудно-импульсной модуляции

Рисунок 2.4 – Модифицированный алгоритм работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра

Отличием алгоритма, показанного на рисунке 2.4, от алгоритма, показанного на рисунке 2.3, является условие: если разность полученных результатов дифференциальным и нулевым методами D превышает значение $T_{\text{порог}}$ на протяжении x последовательных периодов, то алгоритм работы прекращает регулировку положения $t_{\text{ШИМ}}$ и на выходную шину данных поступают результаты измерений, полученные дифференциальным методом.

2.3 Измерение быстропротекающих радиотепловых процессов и аналитическое моделирование работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра

При регистрации быстрых изменений шумовой температуры антенны, величина которых за один период амплитудно-импульсной модуляции превышает флуктуационную чувствительность микроволнового радиометра, работа в нулевом режиме сопровождается увеличением погрешности измерений. Причиной возникновения данной ошибки является инерционность следящей системы: алгоритм последовательного приближения, реализованный в цепи обратной связи, не успевает своевременно скорректировать длительность широтно-импульсного сигнала, необходимую для восстановления нулевого баланса между сигналами антенны и опорного генератора шума [110 – 119].

В дифференциальном режиме влияние указанного эффекта существенно снижено. Динамические характеристики микроволнового радиометра в этом случае определяются преимущественно постоянными времени первого и второго интеграторов (I_1 и I_2), а время установления выходного сигнала составляет порядка трех-четырех постоянных времени интеграторов.

На рисунке 2.5 приведены результаты аналитического сравнения характеристик нулевого микроволнового радиометра и предложенного быстродействующего микроволнового радиометра при измерении радиотеплового процесса, сопровождающегося скачкообразным изменением шумовой температуры [122].

Для проведения аналитического моделирования приняты следующие параметры: длительность переходного процесса изменения шумовой температуры антенны 500 мкс, длительность периода амплитудно-импульсной модуляции $2 \cdot t_{\text{АИМ}} = 1$ мс, величина изменения шумовой температуры антенны порядка 7 К, флуктуационная чувствительность $dT_A = 1$ К, постоянная времени первого и второго интеграторов 120 мкс.

высоким быстродействием при регистрации быстропротекающих радиотепловых процессов.

Активация различных режимов работы происходит в блоке управления согласно алгоритму, показанному на рисунке 2.3 и его описанию в разделе 2.2. А именно, осуществляется сравнение результатов измерений с модуляционного и нулевого каналов. Если величина разности измерений превышает заданный порог, определяемый типом исследуемого радиотеплового процесса, то значение $t_{\text{ШИМ}}$ изменяется пропорционально результатам измерений полученным дифференциальным методом. Если величина разности измерений не превышает порога, то на выходную шину поступают результаты измерений с нулевого канала. Таким образом, предложенный быстродействующий микроволновый радиометр работает в адаптивном режиме.

Использование нулевого метода позволяет существенно повысить метрологические характеристики при измерении квазистационарных объектов благодаря компенсации влияния изменений коэффициента передачи и собственной шумовой температуры приемного тракта. Применение дифференциального метода, реализованного с использованием аналогового мультиплексора, интеграторов, дифференциального усилителя и аналого-цифрового преобразователя, обеспечивает повышение быстродействия системы и уменьшение динамической составляющей погрешности при регистрации быстропротекающих процессов.

Следует отметить, что в дифференциальном режиме точность измерений определяется главным образом постоянными времени интеграторов и практически не зависит от инерционности следящей системы. По сравнению с традиционными нулевыми радиометрами это позволяет существенно уменьшить систематическую погрешность, возникающую вследствие ограниченного быстродействия алгоритма последовательного уравнивания сигналов антенны и опорного генератора. При этом чувствительность устройства при исследовании медленно изменяющихся

процессов сохраняется на высоком уровне благодаря неизменным параметрам интегрирующих цепей.

2.4 Расширение динамического диапазона в предложенном быстродействующем микроволновом радиометре

Для нулевых микроволновых радиометров, использующих принцип подшумливания и регулирования нулевого баланса за счет изменения широтно-импульсного сигнала актуальна проблема ограничения динамического диапазона, связанная с ограничением диапазона регулировки $t_{\text{шим}}$.

Динамический диапазон для предложенной и описанной выше схемы находится в пределах от значения шумовой температуры генератора шума $T_{\text{ГШ}} \cdot \alpha_1$ до значения $T_{\text{ГШ}} \cdot \alpha_2$.

2.4.1 Расширение динамического диапазона в верхней границе

Если шумовая температура антенны T_A превышает значение шумовой температуры опорного генератора шума, ослабленного первым аттенуатором, $T_{\text{ГШ}} \cdot \alpha_1$ алгоритм работы обратной связи увеличивает длительность сигнала $t_{\text{шим}}$ до верхнего предела регулирования, а между полупериодами модуляции не удастся установить нулевой баланс. Осциллограммы для верхнего предела регулирования сигнала $t_{\text{шим}}$ (верхней границе динамического диапазона шумовой температуры антенны) показаны на рисунке 2.6.

Решением такой проблемы в предложенном быстродействующем микроволновом радиометре в моменты измерений сигнала за пределами динамического диапазона заключается в отказе от нулевого метода измерений в пользу вычисления дифференциального результата измерений сигнала антенны и одного из опорных генераторов шума.

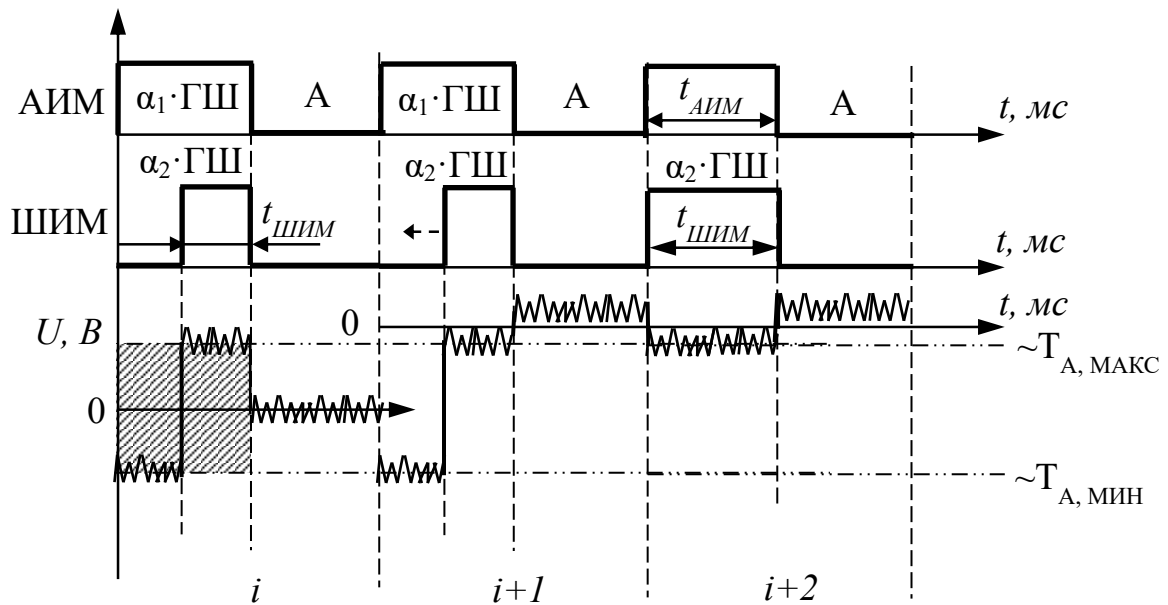


Рисунок 2.6 – Ограничение по верхней границе динамического диапазона измеряемых шумовых температур нулевым методом

Тогда результаты измерений сохранят зависимость от величины шумовой температуры антенны и нестабильности коэффициента передачи. Однако результат будет иметь валидность хоть и с большей погрешностью измерений и худшей флуктуационной чувствительностью, относительно нулевого метода измерений.

2.4.2 Расширение динамического диапазона в нижней границе

Причинно-следственная связь описываемой проблемы схожа с предыдущим пунктом. Если шумовая температура антенны T_A оказывается ниже значения шумовой температуры опорного генератора шума, ослабленного вторым аттенюатором, $T_{ГШ} \cdot \alpha_2$ алгоритм обратной связи уменьшает длительность сигнала $t_{ШИМ}$ до нижнего предела регулирования, а между полупериодами модуляции не удастся установить нулевой баланс. Осциллограммы достижения нижней границы динамического диапазона при использовании нулевого метода измерений показаны на рисунке 2.7.

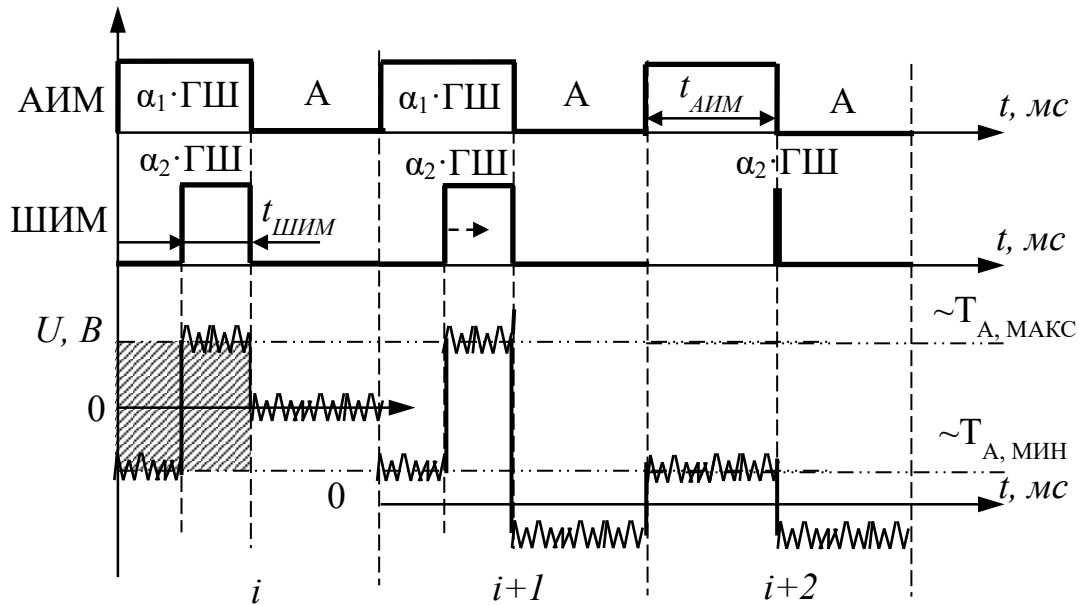


Рисунок 2.7 – Ограничение динамического диапазона в нижней границе

Для решения описанной проблемы разработан алгоритм изменения положения работы канала подшумливания с полупериода измерения опорного генератора шума на полупериод измерения сигнала антенны. Тогда динамический диапазон будет находиться в пределах от 0К до уровня $T_{ГШ} \cdot \alpha_1$ (рисунок 2.8).

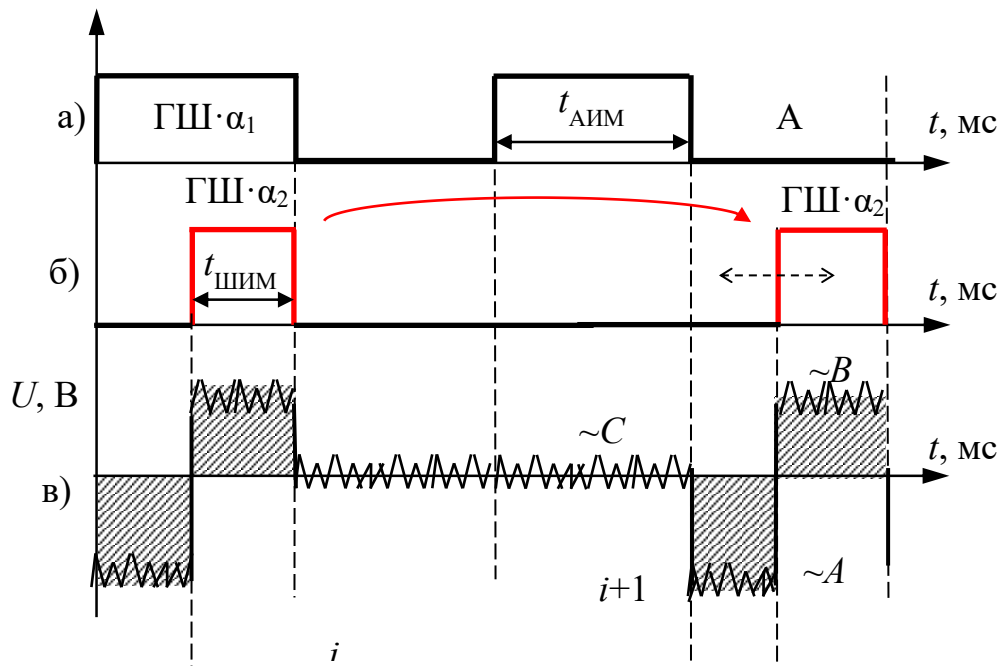


Рисунок 2.8 – Осциллограммы на выходе блока управления и входе компаратора

Если блок управления формирует управляющий сигнал $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$ низкого уровней на вход приемника поступает сигнал T_A . При этом на входе компаратора образуется сигнал:

$$A = (T_{\text{ш}} + T_A + T_{\text{АТТ2}}) \cdot \Delta f G k, \quad (2.11)$$

где $T_{\text{АТТ2}}$ – шумовая температура второго аттенюатора.

Посредством аналогового мультиплексора сигнал T_A сглаживается и накапливается во втором интеграторе.

Когда блок управления формирует сигналы $t_{\text{АИМ}}$ низкого уровня и $t_{\text{ШИМ}}$ высокого уровня, на вход приемника поступает сумма сигналов T_A и $T_{\text{ГШ}}$. На входе компаратора формируется сигнал:

$$B = (T_{\text{ш}} + T_A + \alpha_2 \cdot T_{\text{ГШ}}) \cdot \Delta f G k. \quad (2.12)$$

Сигнал C будет иметь вид, схожий с сигналом A в формуле (2.1):

$$C = (\alpha_1 \cdot T_{\text{ГШ}} + T_{\text{ш}}) \cdot \Delta f G k. \quad (2.13)$$

Посредством аналогового мультиплексора сигнал C сглаживается и накапливается в третьем интеграторе.

Половину периода модуляции, когда блок управления формирует управляющие сигналы $t_{\text{АИМ}}$ высокого и $t_{\text{ШИМ}}$ низкого уровней, то вход приемника связан с генератором шума через направленный ответвитель, модулятор и первый аттенюатор. Следовательно, сигнал $T_{\text{ГШ}}$ связан с входом первого интегратора.

Среднее значение сигнала в первом 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:

$$(C - A) \cdot t_{\text{ШИМ}} = (B - C) \cdot (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}). \quad (2.14)$$

Подставляя (2.11), (2.12) и (2.13) в (2.14) получим:

$$\begin{aligned} & (\alpha_1 T_{\text{ГШ}} + T_{\text{ш}} - T_{\text{ш}} - T_A - T_{\text{АТТ2}}) \cdot \Delta f G k \cdot t_{\text{ШИМ}} = \\ & = (T_{\text{ш}} + T_A + \alpha_2 T_{\text{ГШ}} - \alpha_1 T_{\text{ГШ}} - T_{\text{ш}}) \cdot \Delta f G k \cdot (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}). \end{aligned} \quad (2.15)$$

Решая (2.12) относительно $t_{\text{ШИМ}}$ получим:

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{T_A + \alpha_2 T_{\text{ГШ}} - \alpha_1 T_{\text{ГШ}}}{\alpha_2 T_{\text{ГШ}} - T_{\text{АТТ2}}} \cdot t_{\text{АИМ}} . \quad (2.16)$$

Из последней формулы (2.16) следует, что предложенный быстродействующий микроволновый радиометр работает по методу нулевых измерений.

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

$$dU = C - A = [(\alpha_1 \cdot T_{\text{ГШ}} - T_{\text{АТТ2}}) - T_A] \cdot \Delta f G k . \quad (2.17)$$

Таким образом, предложенный быстродействующий микроволновый радиометр работает в модуляционном режиме (дифференциальный метод измерений).

Итоговый график передаточной характеристики показан на рисунке 2.9. Динамический диапазон от $T_{\text{ГШ}} (\alpha_1 - \alpha_2)$ до T_1 (где $T_1 = \alpha_1 T_{\text{ГШ}}$) обеспечивается нулевым методом с подшумливанием в полупериод измерения сигнала антенны. Динамический диапазон от T_1 до T_2 (где $T_2 = T_{\text{ГШ}}(\alpha_1 + \alpha_2)$) обеспечивается нулевым методом с подшумливанием в полупериод измерения опорного генератора шума. Увеличение верхней границы динамического диапазона от T_2 до $T_{\text{А, МАКС'}}$ (где $T_{\text{А, МАКС'}}$ – верхняя граница линейности радиометрического приемника) обеспечивается дифференциальным методом

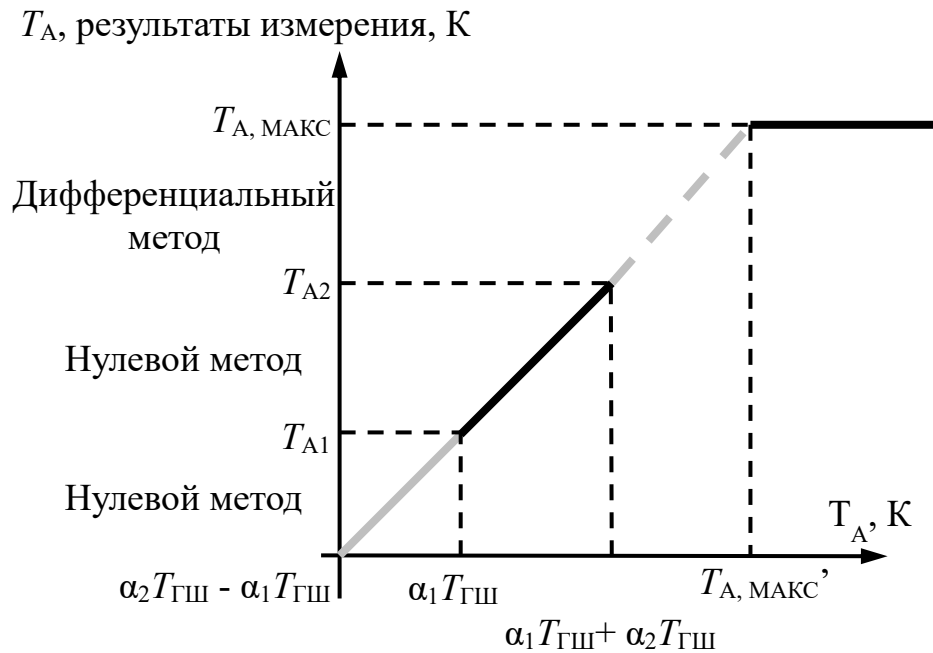


Рисунок 2.9 – График передаточной характеристики предложенного быстродействующего микроволнового радиометра

2.5 Расчетная флуктуационная чувствительность

Флуктуационную чувствительность для предложенного быстродействующего микроволнового радиометра необходимо рассчитывать в зависимости от используемого режима работы:

1. Нулевой режим работы с сигналом $t_{\text{шим}}$ в полупериоде измерения генератора шума.
2. Нулевой режим работы с сигналом $t_{\text{шим}}$ в полупериоде измерения антенны.
3. Модуляционный режим работы с сигналом $t_{\text{шим}}$ в полупериоде измерения генератора шума.
4. Модуляционный режим работы с сигналом $t_{\text{шим}}$ в полупериоде измерения антенны.

Как уже описано в главе 2.4 для первого режима работы динамический диапазон равняется:

$$dT_A = T_{A, \text{МАКС}} - T_{A, \text{МИН}} = B - A = \alpha_2 T_{\text{ГШ}} - \alpha_1 T_{\text{ГШ}}, \quad (2.18)$$

где $T_{A, \text{МАКС}}$ – верхняя граница динамического диапазона,

$T_{A, \text{мин}}$ – нижняя граница динамического диапазона.

Обобщенная формула расчета флуктуационной чувствительности нулевого радиометра имеет вид [88]:

$$\Delta T_A = \frac{dT_A}{\sqrt{2\Delta f \tau R}} \cdot \frac{\sqrt{C(B + A + C) - BA}}{B - A}. \quad (2.19)$$

Подставляя (2.1), (2.2), (2.3), (2.18) в (2.19) получим флуктуационную чувствительность для первого режима работы:

$$\Delta T = \frac{\sqrt{T_A [T_A + 4T_{ш} + T_{гш}(\alpha_1 + \alpha_2)] + 2T_{ш}^2 - \alpha_1 \alpha_2 T_{гш}^2}}{\sqrt{2\Delta f \tau R}}. \quad (2.20)$$

Динамический диапазон для второго режима работы:

$$dT_A = T_{A, \text{макс}} - T_{A, \text{мин}} = B - A = \alpha_2 T_{гш} - T_{ATT2}. \quad (2.21)$$

Подставляя (2.8), (2.9), (2.10), (2.18) в (2.16) получим флуктуационную чувствительность для второго режима работы:

$$\Delta T = \sqrt{\frac{\alpha_1 T_{гш} [2T_A + 4T_{ш} + T_{ATT2} + T_{гш}(\alpha_1 + \alpha_2)]}{2\Delta f \tau R}} + \frac{2T_{ш} - T_A(T_A + T_{ATT2} + \alpha_2 T_{гш}) - \alpha_2 T_{гш} T_{ATT2}}{2\Delta f \tau R}. \quad (2.22)$$

Флуктуационную чувствительность для модуляционного (третьего) режима работы описывается аналогично представленному в главе 1.4 и будет иметь вид:

$$\Delta T_A = \sqrt{\frac{2(\alpha_1 T_{гш} + T_{ш})^2}{\Delta f \tau} + \frac{2(T_{ш} + T_A)^2}{\Delta f \tau} + (T_A - \alpha_1 T_{гш})^2 \cdot \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2} \quad (2.23)$$

Флуктуационную чувствительность для модуляционного (четвертого) режима работы выглядит следующим образом:

$$\Delta T_A = \sqrt{\frac{2(T_{ш} + T_A + T_{ATT2})^2}{\Delta f \tau} + \frac{2(\alpha_1 T_{гш} + T_{ш})^2}{\Delta f \tau} + [(\alpha_1 T_{гш} - T_{ATT2}) - T_A]^2 \cdot \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2}. \quad (2.24)$$

2.6 Основные результаты и выводы

Разработана структурная схема быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений. Разработаны алгоритмы ее работы, предназначенные для измерений быстропротекающих процессов, описываемых функцией Хевисайда (рисунок 2.3) и других теоретически возможных процессов, описываемых более сложными функциями и их комбинациями (рисунок 2.4). Проведено аналитическое моделирование предложенного алгоритма функционирования, подтвердившее эффективность реализации адаптивного режима работы. Использование комбинированного принципа измерений позволяет применять нулевой режим при исследовании квазистационарных объектов и осуществлять переход к дифференциальному режиму при регистрации быстропротекающих радиотепловых процессов.

На примере моделирования скачкообразного изменения шумовой температуры антенны на 7 К показано, что время установления квазинулевого режима составляет около 3 мс при следующих параметрах моделирования: длительность переходного процесса – 500 мкс, полупериод амплитудно-импульсной модуляции – 500 мкс, флуктуационная чувствительность – 1 К и постоянная времени интеграторов – 120 мкс.

Предложенное решение обеспечивает повышение точности измерений быстропротекающих радиотепловых процессов без ухудшения чувствительности при исследовании медленно изменяющихся объектов, что расширяет область практического применения микроволновых радиометрических систем.

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.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной главе описано численное моделирование: компенсационного, модуляционного, нулевого микроволновых радиометров и предложенного микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений [126 –131]. При моделировании для всех схем оценена возможность измерения быстропротекающего процесса в виде скачкообразного изменения температуры антенны по принципу функции Хевисайда с временем переходного процесса 1 мс. Промоделировано ограничение динамического диапазона для нулевого радиометра и расширенный динамический диапазон для микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений.

3.1 Численное моделирование компенсационного микроволнового радиометра

Для численного моделирования использовались следующие параметры: шумовая температура антенны до быстропротекающего радиотеплового процесса $T_{A, \text{мин}} = 300 \text{ К}$, шумовая температура антенны после быстропротекающего радиотеплового процесса $T_{A, \text{макс}} = 1090 \text{ К}$, длительность быстропротекающего радиотеплового процесса $t_{\text{БП}} = 1 \text{ мс}$, период амплитудно-импульсной модуляции $T = 1 \text{ мс}$, шумовая температура первого опорного генератора шума $T_{\text{ОГШ1}} = 900 \text{ К}$, шумовая температура второго опорного генератора шума $T_{\text{ОГШ2}} = 200 \text{ К}$, шаг изменения длительности широтно-импульсного сигнала $dt_{\text{ШИМ}} = 1 \text{ мкс}$, величина порогового уровня разницы результатов измерений полученных нулевым и дифференциальным методом $T_{\text{порог}} = 100 \text{ К}$.

Результаты измерений быстропротекающего радиотеплового процесса компенсационным микроволновым радиометром показаны на рисунках 3.1 и 3.2. Результат моделирования, показанный на рисунке 3.1, получен при использовании постоянной времени интегратора $\tau = 0,5 \text{ мс}$. Время

установления результатов измерений равняется 1,5 мс. Значение ошибки для временного интервала от 0 до 1000 мс не превышает 36 К, а для интервала от 1002 мс до 2000 мс не превышает 115 К.

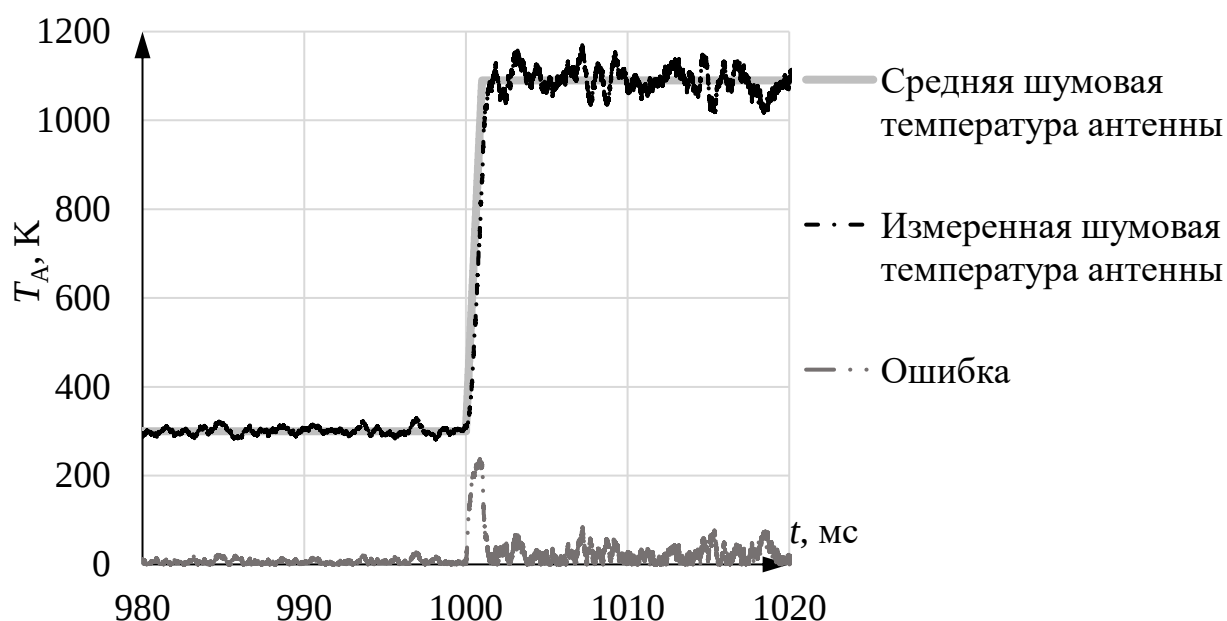


Рисунок 3.1 – Результат измерения быстропротекающего радиотеплового процесса компенсационным микроволновым радиометром при $\tau_{\text{инт}} = 0,5$ мс

Результат моделирования, показанный на рисунке 3.2 получен при использовании постоянной времени интегратора $\tau = 10$ мс. Время установления результатов измерений равняется 12 мс. Значение ошибки, для временного интервала от 0 до 1000 мс не превышает 6 К, а для интервала от 1012 мс до 2000 мс не превышает 19 К.

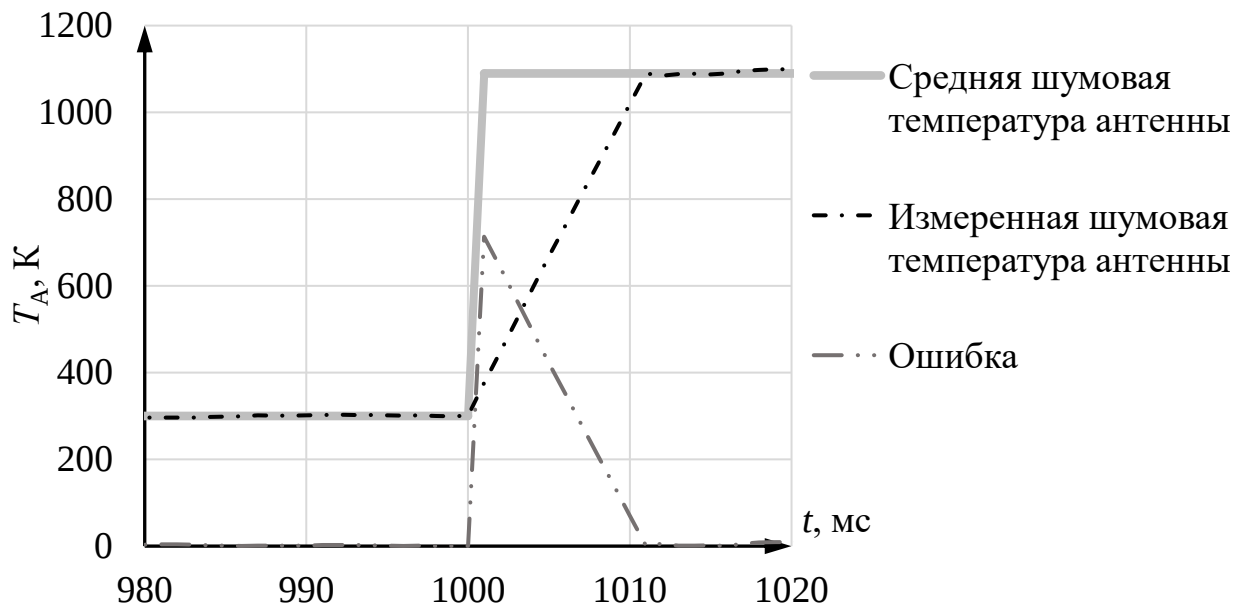


Рисунок 3.2 – Результат измерения быстропротекающего радиотеплового процесса компенсационным микроволновым радиометром при $\tau_{\text{инт}} = 10$ мс

3.2 Численное моделирование модуляционного микроволнового радиометра

Результат измерения быстропротекающего радиотеплового процесса модуляционным микроволновым радиометром показан на рисунке 3.3 [129]. Время установления результатов измерений равняется 2 мс. Значение ошибки, для временного интервала от 0 до 1000 мс не превышает 27 К, а для интервала от 1003 мс до 2000 мс достигающее 73 К.

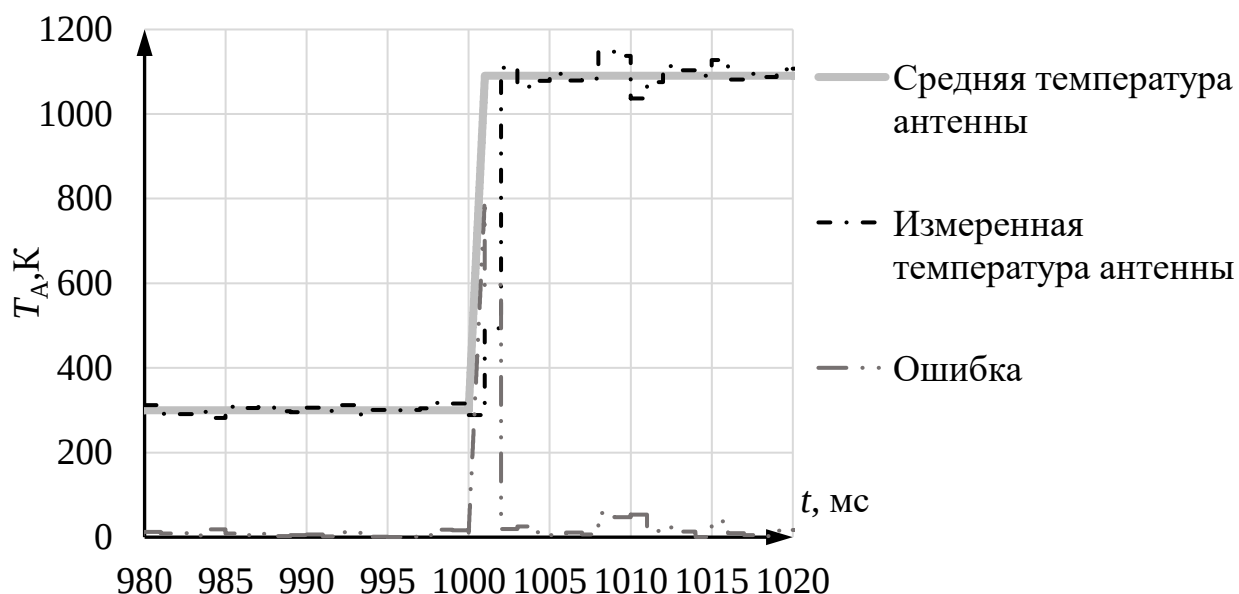


Рисунок 3.3 – Результат измерения быстропротекающего радиотеплового процесса модуляционным микроволновым радиометром

3.3 Численное моделирование нулевого микроволнового радиометра

На рисунке 3.4 представлен результат работы численной модели классического нулевого микроволнового радиометра с шагающим алгоритмом установления нулевого баланса [132 –137]. Установление нулевого баланса для заданного изменения шумовой температуры антенны происходит за время равное 900 мс.

Недостатком нулевого метода измерений является использование алгоритма следящей обратной связи для реализации нулевого баланса на входе приемника. Алгоритм работы контура обратной связи обладает инертностью работы, что дополнительно увеличивает ошибку результатов измерений быстропротекающих радиотепловых процессов.

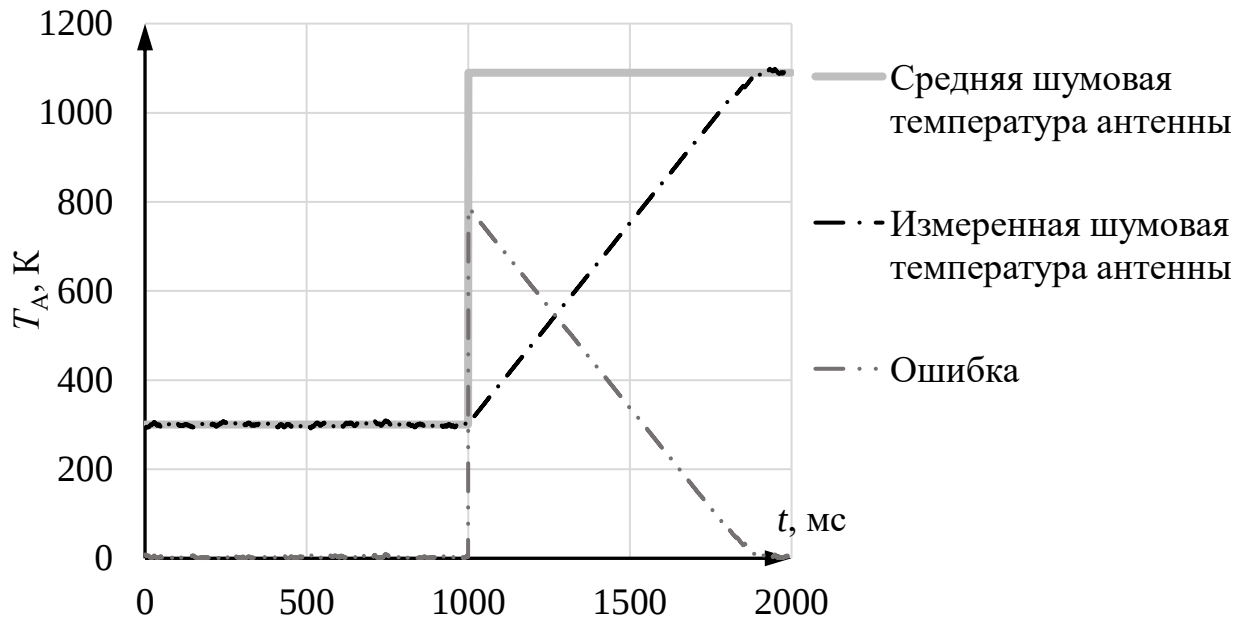


Рисунок 3.4 – Результат измерения быстропротекающего радиотеплового процесса нулевым микроволновым радиометром

Тем не менее на интервалах от 0 мс до 1000 мс и от 1900 мс до 2000 мс, при измерении квазистационарных процессов нулевым микроволновым радиометром значение ошибки не превышает 14 К и не зависит от шумовой температуры антенны [138 – 140].

3.4 Численное моделирование предложенного быстродействующего микроволнового радиометра

Для решения проблемы длительного установления нулевого баланса предложена схема быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений, детально описанная во второй главе. Принцип действия при измерении квазистационарных процессов такой же как у нулевого радиометра. Но дополнительно в схеме присутствует вычисление разности яркостных температур антенны и одного из опорных генераторов шума как в модуляционной схеме.

На рисунке 3.5 представлен результат работы численной модели предложенной схемы. Установление квази-нулевого баланса для заданного

изменения шумовой температуры антенны происходит за время равное 2 мс, т.е. за 2 периода модуляции.

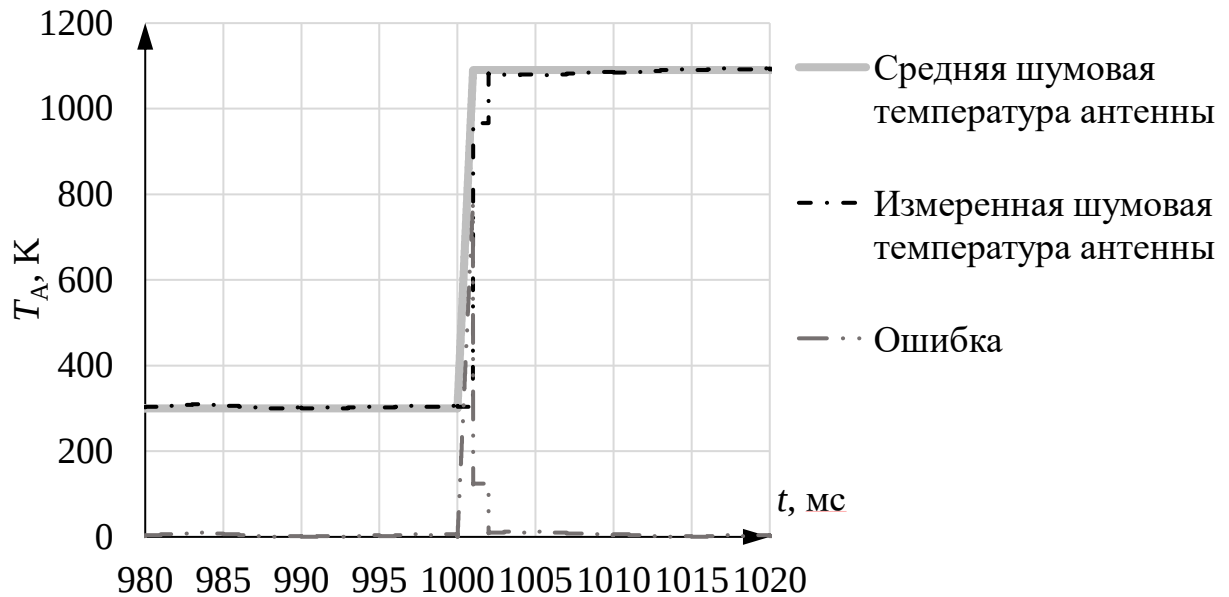


Рисунок 3.5 – Результат измерения быстропротекающего радиотеплового процесса предложенным быстродействующим микроволновым радиометром

Алгоритм работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра (рисунок 2.3) описывается следующим образом: в момент резкого изменения яркостной температуры измеряемого объекта вычисленное значение температуры антенны дифференциальным способом отличается от фактического положения $t_{\text{шим}}$ на величину порогового уровня, происходит обратный пересчет вычисленного значения температуры антенны дифференциальным способом в предполагаемое положение $t_{\text{шим}}$ и производится его перестройка. Благодаря этому устанавливается нулевой баланс в пределах флуктуационной чувствительности дифференциального канала измерений. При этом величина ошибки на интервалах от 0 мс до 1000 мс и от 1003 мс до 2000 мс, при измерении квазистационарных процессов не превышает 14 К.

На рисунке 3.6. показан результат измерения предложенным микроволновым радиометром быстропротекающего процесса на основе функции $\sin(x)/x$. На отрезке от 1003 до 1100 мс величина ошибки достигает 200 К.

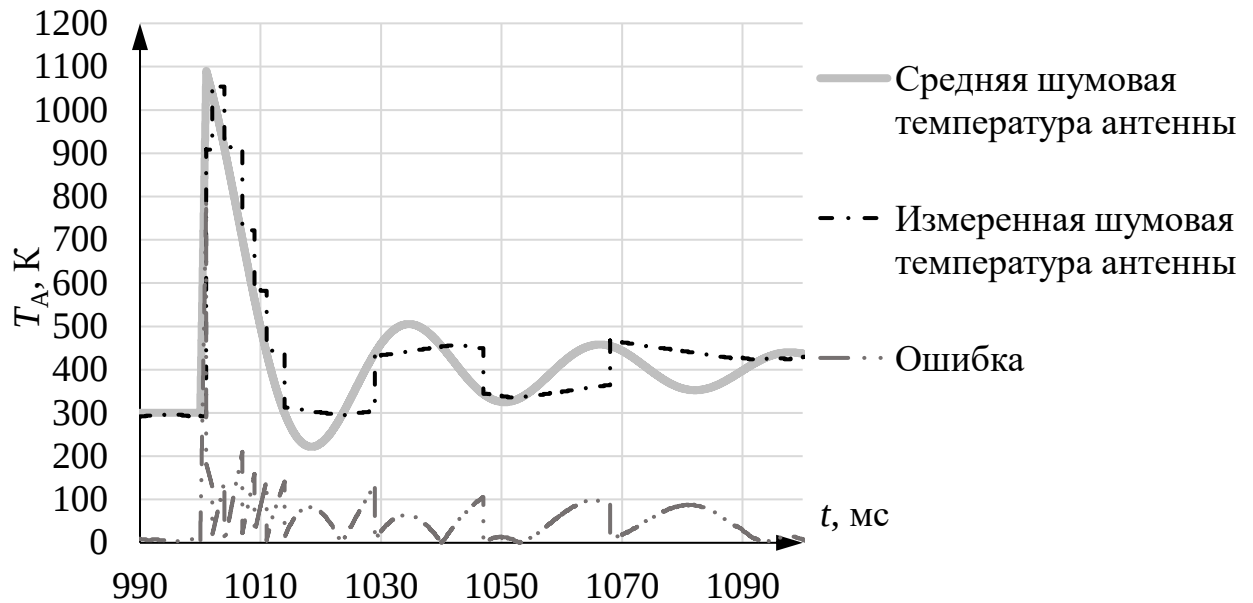


Рисунок 3.6 –Результат измерения быстропротекающего радиотеплового процесса на основе функции $\sin(x)/x$ предложенным быстродействующим микроволновым радиометром с алгоритмом ускоренной перестройки $t_{\text{шим}}$, показанным на рисунке 2.3

Для измерения процессов отличных от процессов, описываемых функцией Хевисайда, применяется модифицированный алгоритм работы, описанный во второй главе и показанный на рисунке 2.4. На рисунке 3.7 показан результат измерения быстропротекающего процесса на основе функции $\sin(x)/x$ предложенным быстродействующим микроволновым радиометром с модифицированным алгоритмом ускоренной перестройки $t_{\text{шим}}$.

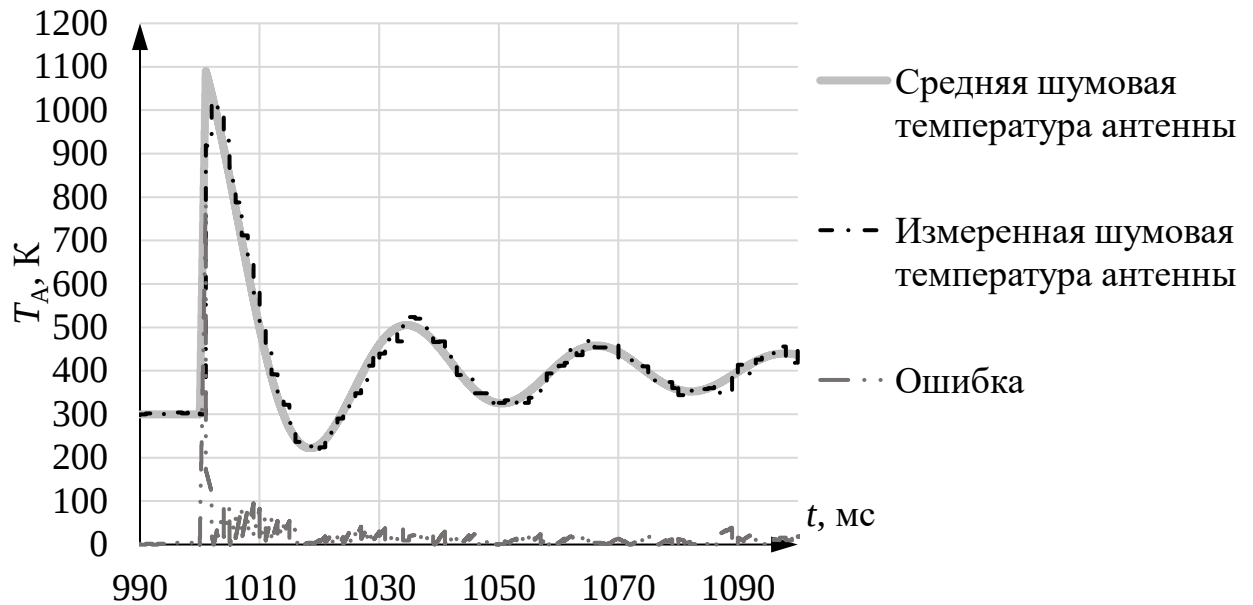


Рисунок 3.7 – Результат измерения быстропротекающего радиотеплового процесса на основе функции $\sin(x)/x$ предложенным быстродействующим микроволновым радиометром с модифицированным алгоритмом ускоренной перестройки $t_{\text{шим}}$, показанным на рисунке 2.4

На отрезке от 1003 до 1020 мс величина ошибки не превышает 90 К. А от 1021 до 1100 мс не превышает 35К

Одновременное использование в предложенном микроволновом радиометре нулевого и дифференциального измерительных каналов позволяет уменьшить погрешность измерений быстропротекающих процессов до уровня модуляционных схем при сохранении инвариантности результатов измерений к дрейфу и флуктуациям коэффициента передачи и собственных шумов приемника сопоставимой нулевому методу при измерении параметров стационарных радиотепловых процессов.

3.5 Ограничение динамического диапазона микроволновых радиометров на основе нулевого метода измерений

На рисунке 3.8 рассмотрен случай, когда шумовая температура антенны равна 1400 К, а динамический диапазон не позволяет измерить более 1200 К. На интервале от 1000 мс до 1050 мс результаты измерений не обладают валидностью.

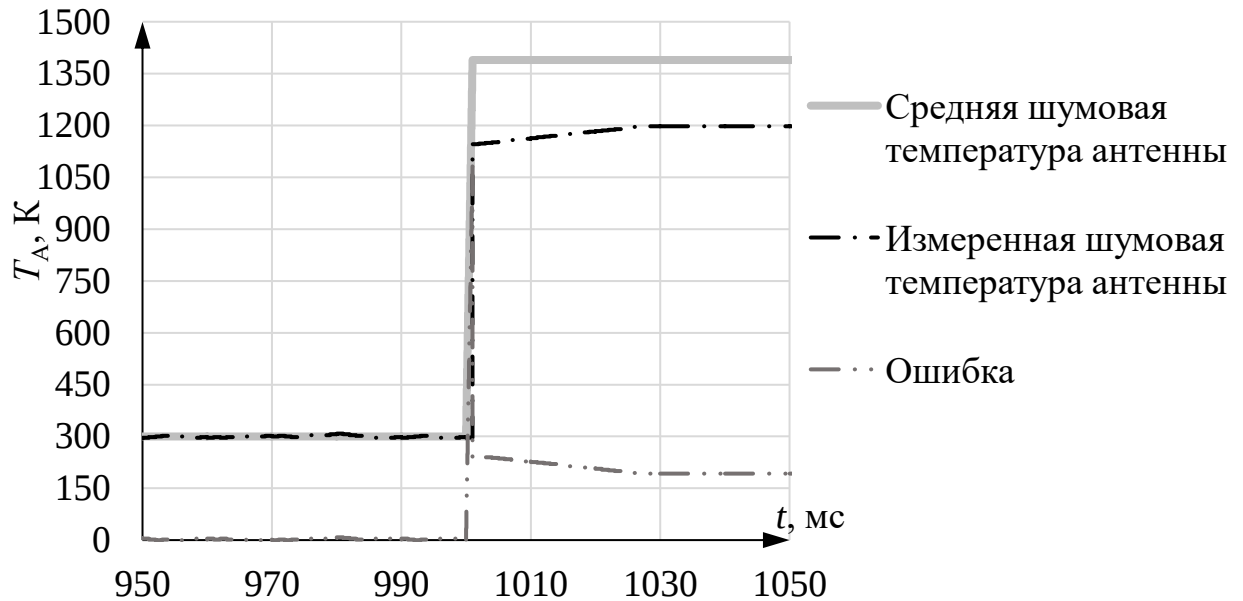


Рисунок 3.8 – Измерение быстропротекающего процесса нулевым микроволновым радиометром за пределом верхней границы динамического диапазона

Благодаря наличию в схеме дифференциального канала в моменты, когда шумовая температура антенны превышает динамический диапазон нулевого радиометра, можно отказаться от вычисления результатов измерений основываясь на положении $t_{\text{шим}}$ и вычислять результаты на основе разности одного опорного генератора шума и шума антенны.

Результат измерения быстропротекающего процесса предложенным быстродействующим микроволновым радиометром представлен на рисунке 3.9. На интервале времени от 1000 мс до 1050 мс результат измерений вычислен дифференциальным методом.

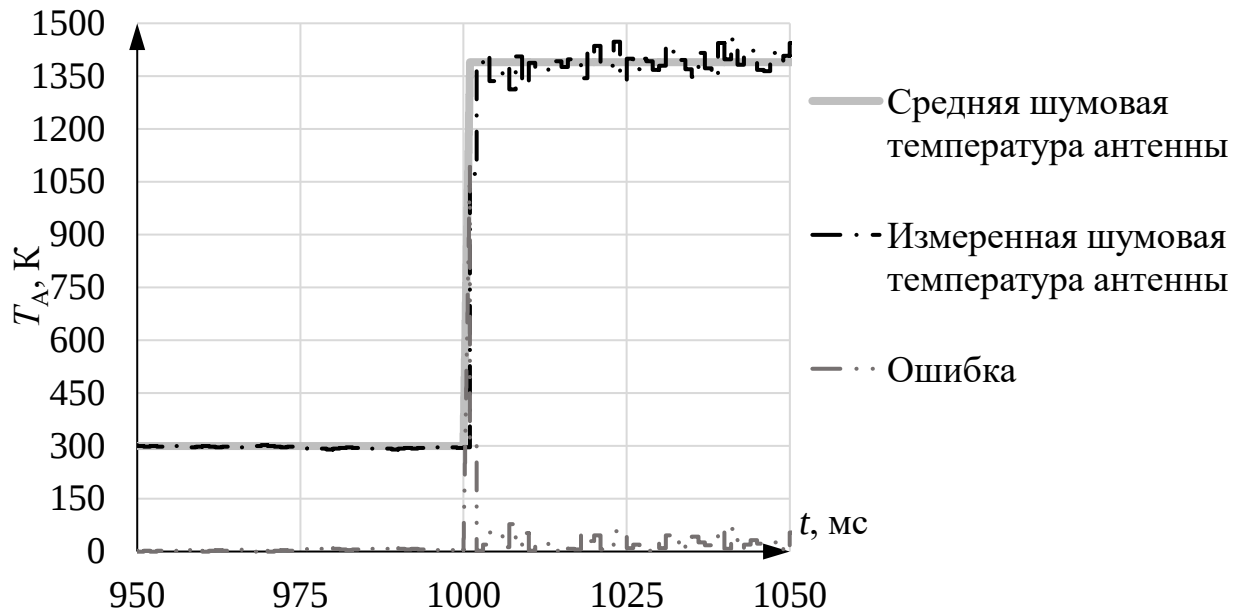


Рисунок 3.9 – Измерение быстропротекающего процесса предложенным быстродействующим микроволновым радиометром с расширенным динамическим диапазоном

Использование дифференциального измерительного канала в предложенном микроволновом радиометре позволяет расширить верхнюю границу динамического диапазона вплоть до верхней границы линейности радиометрического приемника. Погрешность результатов измерений в дифференциальном режиме пропорциональна величине шумовой температуры антенны и нестабильности коэффициента передачи.

Следующая проблема – ограничение диапазона, но уже с нижней границы. На рисунке 3.10 рассмотрен случай, когда шумовая температура антенны равна 50 K, а динамический диапазон не позволяет измерить менее 200K.

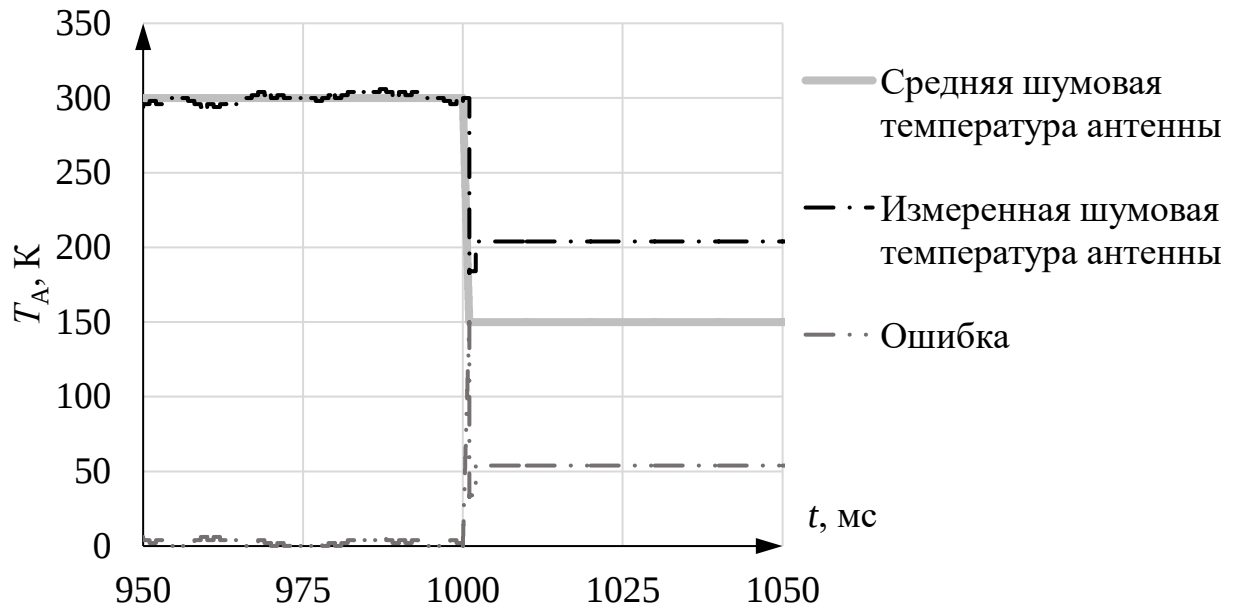


Рисунок 3.10 – Измерение быстропротекающего процесса нулевым микроволновым радиометром за пределом нижней границы динамического диапазона

Для решения данной проблемы разработан алгоритм перемещающий подшумливание с полупериода измерения опорного генератора шума на полупериод измерения сигнала антенны.

Результаты измерений будут соответствовать метрологическим характеристикам нулевого метода измерений. В случае, представленном на рисунке 3.11, также используется ускоренная перестройка $t_{\text{шим}}$ благодаря дифференциальному каналу измерений

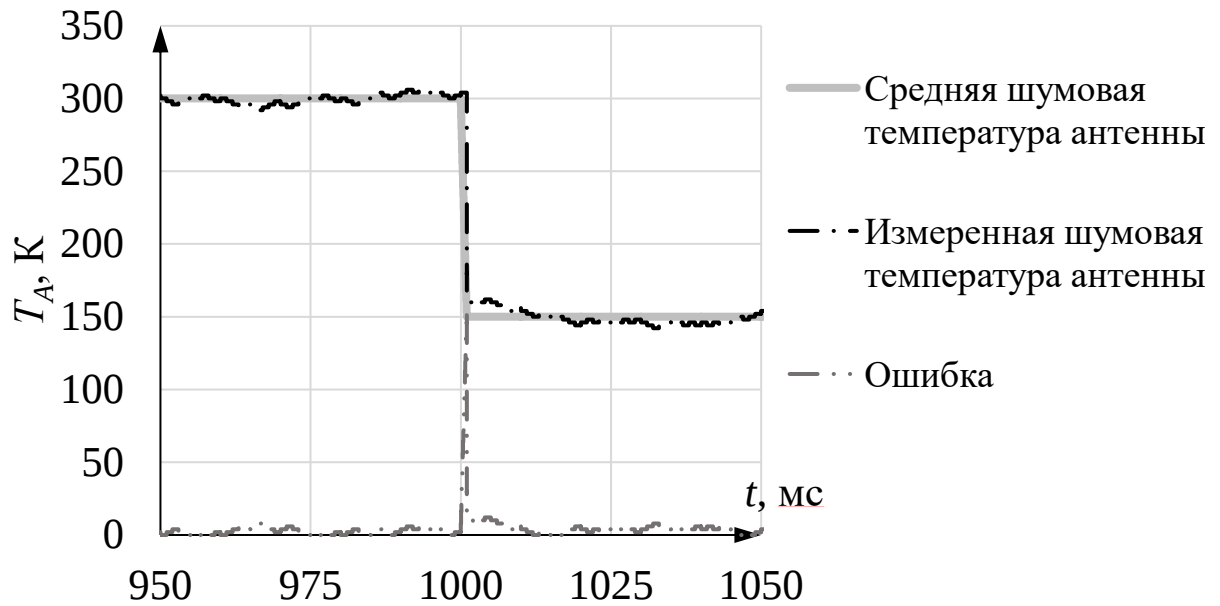


Рисунок 3.11 – Измерение быстропротекающего процесса предложенным быстродействующим микроволновым радиометром с расширенным динамическим диапазоном

Предложенный алгоритм запуска широтно-импульсной модуляции первого опорного генератора шума, согласно которому, временной интервал запуска импульса широтной модуляции переходит в временную область работы антенны позволяет увеличить нижнюю границу динамического диапазона работы предложенного микроволнового радиометра в нулевом режиме на величину шумовой температуры второго генератора шума.

3.6 Основные результаты и выводы

Результаты численного моделирования сведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Итоговое сравнение результатов численного моделирования

№ п.п.	$\tau_{\text{инт}},$ мс	Флуктуационная чувствительность		Время установления результатов измерений при $t_{\text{БП}} = 1$ мс, мс	Преимущества	Недостатки
		При $T_A =$ 300 К, К	При $T_A =$ 1090 К, К			
1	10	6	19	12	Удовлетворительные метрологические параметры	Неудовлетворительные измерения переходных процессов Ошибка растет с ростом T_A
2	0,5	36	115	1,5	Хорошее измерение переходных процессов	Неудовлетворительные метрологические параметры Ошибка растет с ростом T_A
3	0,5	27	73	2	Хорошее измерение переходных процессов Хорошие метрологические параметры	Ошибка растет с ростом T_A
4	0,5	14	14	900	Отличные метрологические параметры. Ошибка не растет с ростом T_A	Неудовлетворительные измерение переходных процессов
5	0,5	14	14	2	Отличные метрологические параметры Ошибка не растет с ростом T_A Хорошее измерение переходных процессов	—

Предложенная схема микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений позволяет одновременно решать 3 основные проблемы нулевого радиометра с шагающим алгоритмом установления квази-нулевого баланса:

1. Использование в предложенном быстродействующем микроволновом радиометре дифференциального метода измерений при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов, описываемых скачкообразным изменением шумовой температуры антенны, позволяет уменьшить время 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 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 и нулевого методов измерений и алгоритма запуска широтно-импульсной модуляции в первом или во втором полупериоде амплитудно-импульсной модуляции позволяет расширить нижнюю границу динамического диапазона измеряемых шумовых температур антенны до абсолютного нуля, а верхнюю границу динамического диапазона до верхней границы линейности радиометрического приемника.

4. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРА

В представленной главе описаны составные части экспериментального макета быстродействующего микроволнового радиометра, на основе нулевого и дифференциального методов измерений. Отличительной особенностью разработанной экспериментальной установки является возможность программной реконфигурацию системы без изменения аппаратной части. Такая архитектура обеспечивает высокую гибкость экспериментальной установки, упрощает проведение исследований в лабораторных условиях и позволяет оперативно сопоставлять характеристики различных схемотехнических решений [141] в соответствии с современными тенденциями развития измерительной техники, связанными с расширением функциональной универсальности и повышением степени автоматизации [142, 143].

Для проверки работоспособности быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений была реализована экспериментальная установка радиометрической системы. Структурная схема реализованной экспериментальной установки представлена на рисунке 4.1.

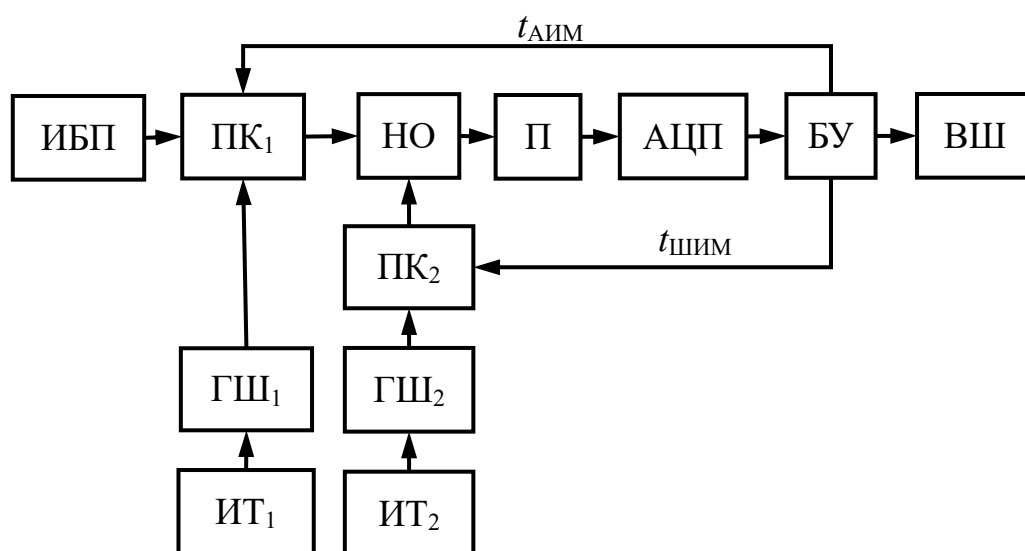


Рисунок 4.1 – Обобщенная структурная схема экспериментальной установки радиометрической системы

Экспериментальная установка в своем составе имеет: имитатор быстропротекающего процесса (ИБП), первый переключатель ($ПК_1$) обеспечивающий модуляцию по сигналу $t_{\text{АИМ}}$ с блока управления (БУ), первый генератор шума ($ГШ_1$) питающийся первым источником тока ($ИТ_1$), направленный ответвитель (НО), второй переключатель ($ПК_2$) управляемый сигналом $t_{\text{ШИМ}}$, второй генератор шума ($ГШ_2$) питающийся вторым источником тока ($ИТ_2$), радиометрический приемника (П), включающий в себя блоки усиления, фильтрации и детектирования, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и выходную шину данных (ВШ).

4.1 Имитатор быстропротекающего процесса

Для того чтобы провести многократные эксперименты в приближённо равных условиях, быстропротекающий процесс должен обладать псевдослучайным, но при этом воспроизводимым характером. Это особенно важно при исследовании радиометрических систем, чувствительных к динамике сигнала и его амплитудным характеристикам. Реальные сигналы, например, возникающие при солнечных вспышках или других астрофизических явлениях, непредсказуемы по времени возникновения, интенсивности и длительности, что делает невозможным прямое сравнение откликов системы при разных запусках эксперимента. Использование имитатора быстропротекающего процесса позволяет обеспечить идентичность или строго контролируемое варьирование входного воздействия при испытании различных схем (нулевой, модуляционной, предложенной быстросредействующей и др.) микроволновых радиометров, что критично для их оценки и сравнения чувствительности, быстросредействия и стабильности работы. Кроме того, наличие программно-управляемого имитатора позволяет формировать серию воздействий с заданными параметрами, проводить статистическую обработку данных, вычислять дисперсию и флуктуационную чувствительность, а также точно оценивать реакцию системы на резкие изменения входного сигнала. Именно поэтому применение имитатора

является необходимым условием при макетных испытаниях радиометрических систем, ориентированных на регистрацию быстропротекающих радиотепловых процессов.

Требования, предъявляемые к имитатору быстропротекающего процесса:

1. Равномерное распределение шума в диапазоне частот от 2 до 3 ГГц;
2. Напряжение питания: не более 30В;
3. Рабочий ток: не более 3 А;
4. Мощность шума: не менее -80 дБм;
5. Модулирование шума функцией Хевисайда;
6. Время переходного процесса для пилообразных функций и функции Хевисайда: не более 1мс;
7. Четыре уровня мощности. Первый уровень ниже нижней границы, второй в пределах нижней границы, третий в пределах верхней границы и четвертый выше верхней границы динамического диапазона нулевого радиометра.

Имитатор быстропротекающего процесса, выполнен на основе источника тока (ИТ), направленного ответвителя (НО), делителя мощности (Д), четырехпозиционного переключателя (ПК) и перестраиваемого аттенюатора (АТТ). Структурная схема представлена на рисунке 4.2.

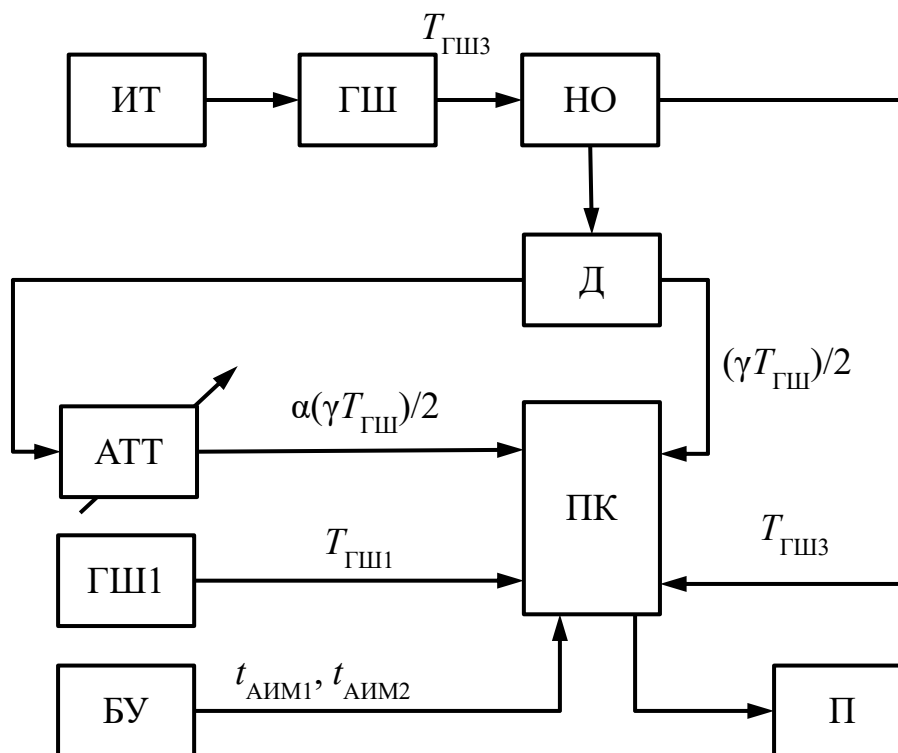


Рисунок 4.2 – Структурная схема имитатора быстропротекающего радиотеплового процесса

Переключатель, изображенный на рисунке 4.2, одновременно выполняет функцию имитатора и модулятора для разработанной экспериментальной установки. Первую половину периода модуляции на вход приемника поступает сигнал $T_{ГШ1}$, а вторую половину периода на вход может поступать сигнал $T_{ГШ1}$, подключенный на вход основного канала направленного ответвителя и следом коммутируемый переключателем, сигнал $T_{ГШ}$, умноженный на коэффициент связи направленного ответвителя γ и разделенный на 2 при помощи делителя мощности. И аналогичный сигнал после делителя мощности дополнительно умноженный на коэффициент передачи перестраиваемого аттенюатора α .

4.2 Генератор шума

Генератор шума (ГШ) является одним из основных элементов радиометрического микроволнового радиометра и предназначен для формирования широкополосного шумового сигнала с известными и стабильными характеристиками. Генераторы шума с низкой эффективной

температурой реализуются, как правило, на основе согласованной нагрузки, охлажденной жидким азотом или элементом Пельтье, либо на основе малошумящего усилителя. Генераторы шума с высокой эффективной температурой реализуются на основе ЛПД диодов, диодов Ганна, нагретой согласованной нагрузки. [144, 145]

Одним из распространенных способов формирования широкополосного шумового сигнала в СВЧ-диапазоне является использование полупроводникового прибора, работающего в режиме лавинного пробоя [146]. В генераторах семейства М31305 в качестве шумообразующего элемента используется лавинно-пролетный полупроводниковый диод (ЛПД). При работе диода в области лавинного пробоя носители заряда приобретают высокую энергию и вызывают лавинное размножение носителей. Случайный характер процессов генерации и переноса носителей приводит к формированию широкополосных флуктуаций электрического тока. Эти флуктуации преобразуются в высокочастотный шумовой сигнал, который далее передается в СВЧ-тракт [147, 148].

Конструктивное исполнение генератора предусматривает размещение шумового диода непосредственно в высокочастотном тракте. Для М31305-1, например, шумовой элемент конструктивно установлен в разрыв коаксиальной линии. Такое решение обеспечивает непосредственную передачу сформированного шумового сигнала в СВЧ-тракт и позволяет минимизировать дополнительные потери и паразитные элементы, способные оказывать влияние на спектральные характеристики источника. Конструктивно генератор также включает корпус, элементы подключения и узлы, обеспечивающие требуемый режим работы шумового диода [147, 148].

Особенностью генераторов шума на лавинно-пролетных диодах является необходимость обеспечения стабильного режима питания. В отличие от обычной нагрузки, для которой определяющим параметром может являться приложенное напряжение, рабочий режим шумового диода существенно зависит от протекающего через него тока. Поэтому питание генератора

осуществляется от источника тока, обеспечивающего заданный и стабильный ток через полупроводниковый элемент. Изменение тока питания приводит к изменению режима лавинного процесса и, соответственно, уровня формируемого шумового сигнала. По этой причине стабильность источника питания непосредственно связана со стабильностью выходных параметров генератора и должна учитываться при построении радиометрической системы.

Выбор генератора шума М31305 для рассматриваемой радиометрической системы обусловлен его возможностью формирования широкополосного шумового сигнала в требуемом СВЧ-диапазоне, конструктивной совместимостью с коаксиальным трактом и возможностью стабильного управления режимом работы посредством источника питания. Конкретные электрические и частотные параметры применяемого исполнения М31305 приведены далее [149].

Для обеспечения вариативности работы используется генератор шума, показанный на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Внешний вид генератора шума М31305

Технические характеристики генератора шума [149]:

- диапазон частот – от 0,01 ГГц до 4 ГГц;
- рабочий ток – 25 мА;
- коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) тракта – не более

1,3;

- спектральная плотность мощности – не менее 30 дБ;
- напряжение питания – минус 27 В;
- неравномерность уровня М31305-1 в диапазоне рабочих частот не более $\pm 2,5$ дБ;
- неравномерность уровня М31305-1 в полосе частот шириной 0,2 ГГц не более $\pm 0,5$ дБ;
- неравномерность уровня М31305-1 в полосе частот шириной 1 ГГц не более ± 1 дБ.

4.3 СВЧ-переключатели

СВЧ-переключатель необходим для реализации модуляционных и нулевых схем, так как он обеспечивает переключение источников шума на входе радиометрического приёмника. Без этого компонента невозможно применение методов, позволяющих компенсировать шумовые флуктуации. В модуляционных схемах переключатель коммутирует вход приёмника между антенной и нагрузкой с известной температурой. Это даёт возможность сравнивать сигнал и опорный уровень, компенсируя дрейф усиления и шумовые флуктуации, что значительно повышает точность измерений [150, 151].

Основные предъявляемые требования к СВЧ-переключателю— это минимальные вносимые потери, время переключения менее 1,5 мкс для осуществления модуляционного режима работы и соответствующий диапазон работы.

В качестве переключателей были подобраны твердотельные СВЧ-переключатели ZSWA4-63DR+ для осуществления амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) и ZSW2-63DR+ для осуществления широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Характеристики ZSWA4-63DR+ [152]:

- диапазон работы от 1 МГц до 6 ГГц;
- вносимые потери 1,5 дБ;

- время переключения 400 нс;
- КСВН входа – не более 1,2.

Функциональная схема переключателя ZSWA4-63DR+ изображена на рисунке 4.4.

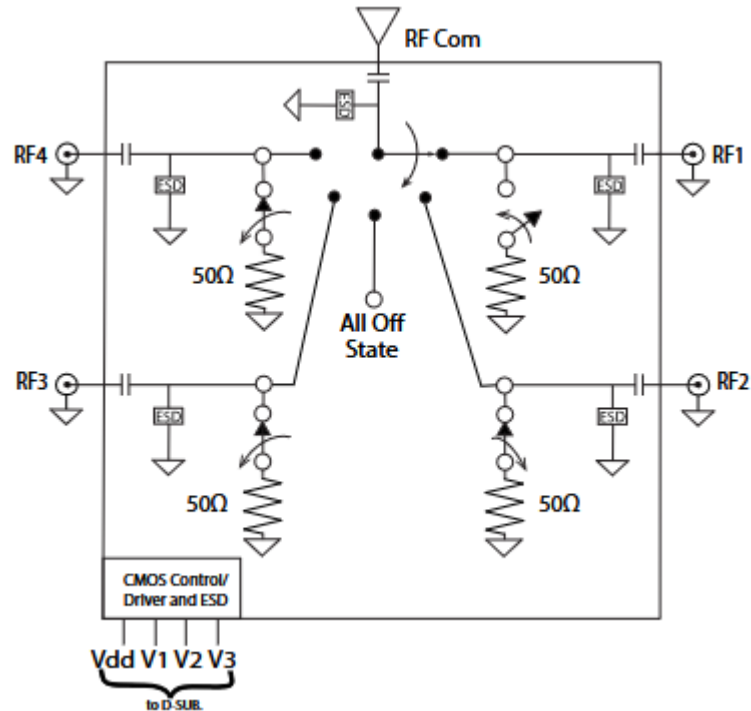


Рисунок 4.4– Функциональная схема переключателя ZSWA4-63DR+

Характеристики ZSW2-63DR+ [153]:

- диапазон работы от 5 МГц до 6 ГГц;
- вносимые потери 0,7 дБ;
- КСВН входа – не более 1,15;
- время переключения 1,2 мкс.

Функциональная схема переключателя ZSW2-63DR+ изображена на рисунке 4.5.

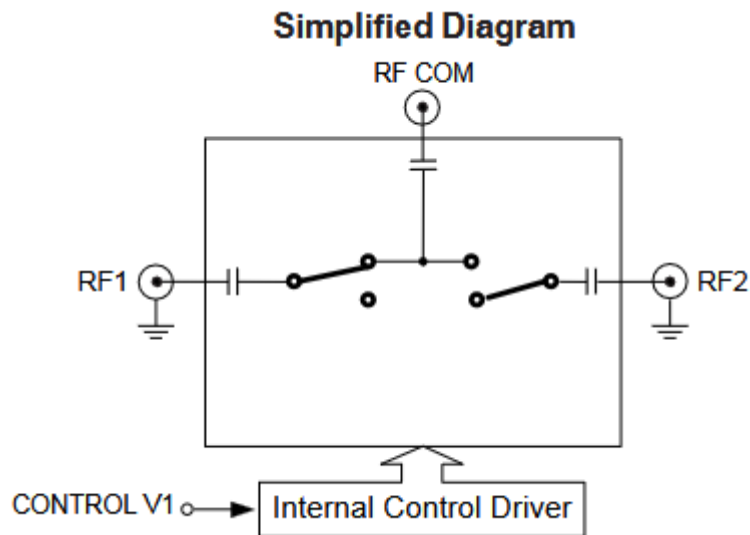


Рисунок 4.5 – Функциональная схема ZSW2-63DR+

Питание переключателей может осуществляться от одного источника постоянного напряжения 2,3...3,6 В. Управление выполняется логическими уровнями, совместимыми с TTL-логикой: уровень логического нуля на управляющем входе не должен превышать $0,2V_{DD}$, но не более 0,6 В, а уровень логической единицы должен быть не ниже $0,8V_{DD}$ и может достигать 5,5 В [152, 153]. Это позволяет непосредственно подключать управляющие входы переключателя к выходам микроконтроллера, программируемой логической интегральной схемы или цифрового генератора импульсов при наличии общего провода и соблюдении требований по питающему напряжению. Малое потребление по цепи питания дополнительно упрощает его применение в составе экспериментальной установки.

4.4 Малошумящий усилитель

Задача малошумящих усилителей (МШУ) в технических системах – улучшать качество входных сигналов. Как следует из их названия, они усиливают слабые сигналы, создавая при этом как можно меньше собственных шумов, чтобы сигналы было легче обнаружить и проанализировать. Таким образом, МШУ повышают чувствительность систем.

Так как радиометры направлены измерять очень слабое микроволновое излучение то вся система должна вкладывать как можно меньше собственного шума и обладать большим коэффициентом усиления всего приемного тракта.

Выбран малошумящий усилитель ZX60-272LN-S+ со следующими характеристиками [154]:

- коэффициент усиления – 14,2 дБ;
- диапазон частот от 2300 до 2700 МГц;
- коэффициент шума на нагрузке 50 Ом равен 0,74 дБ;
- точка децибельной компрессии $P1dB = +18,24$ дБм;
- точка интермодуляции третьего порядка $OIP3 = +31,89$ дБм;
- КСВН входа – не более 1,3;
- КСВН выхода – не более 1,7;
- тип разъемов – SMA

Выбор усилителя ZX60-272LN-S+ для первого каскада обусловлен тем, что он относится к малошумящим широкополосным усилителям и обеспечивает сочетание низкого коэффициента шума, достаточного коэффициента усиления и работоспособности в необходимом диапазоне частот.

Дополнительно в схеме используются еще два усилителя ZX60-2534M+ со следующими характеристиками [155]:

- коэффициент усиления 36,6 дБ;
- диапазон частот от 500 до 2500 МГц;
- коэффициент шума на нагрузке 50 Ом: 3,14 дБ;
- точка децибельной компрессии $P1dB = +15,66$ дБм;
- точка интермодуляции третьего порядка $OIP3 = +27,89$ дБм;
- КСВН входа: не более 1,2;
- КСВН выхода: не более 1,7;
- тип разъемов – SMA;

Выбранные усилители производителем помещены в корпус GA955

показанный на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6. – Внешний вид корпуса GA955

Два усилителя ZX60-2534M+ используются в последующих каскадах тракта для наращивания суммарного усиления и обеспечения требуемого уровня сигнала на входах последующих узлов тракта приемника. Применение именно этих усилителей оправдано их широкополосностью, достаточным коэффициентом усиления, хорошей линейностью и технологической совместимостью с остальными элементами СВЧ-тракта.

4.5 Полосно-пропускающий фильтр

Полосно-пропускающий фильтр (ППФ) в радиометрической системе используется для выделения сигнала в заданном частотном диапазоне и подавления внеполосных шумов и помех, что критически важно для повышения чувствительности и точности измерений. В условиях, когда приёмная система подвержена воздействию широкополосных флуктуаций, атмосферных помех и паразитных сигналов от других источников излучения. Использование фильтра также снижает нагрузку вне полосы исследования на последующие усилительные каскады и детекторы, предотвращая их перегрузку и ухудшение характеристик.

В САПР CST Microwave studio и Altium Designer была разработана печатная плата полосно-пропускающего фильтра, изображенная на рисунке 4.7. На рисунке 4.8 представлены графики коэффициента передачи и коэффициента отражения разработанного полосно-пропускающего фильтра.

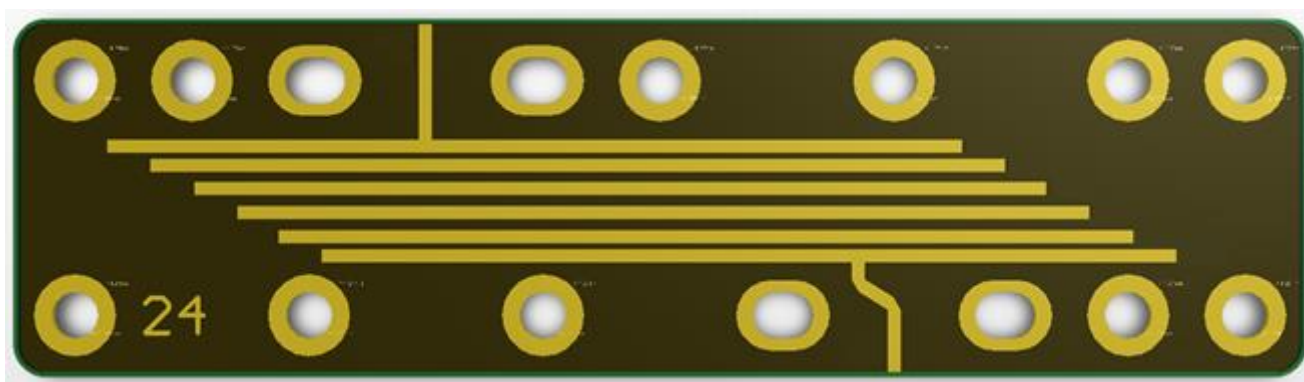


Рисунок 4.7 – Внешний вид топологии полосно-пропускающего фильтра

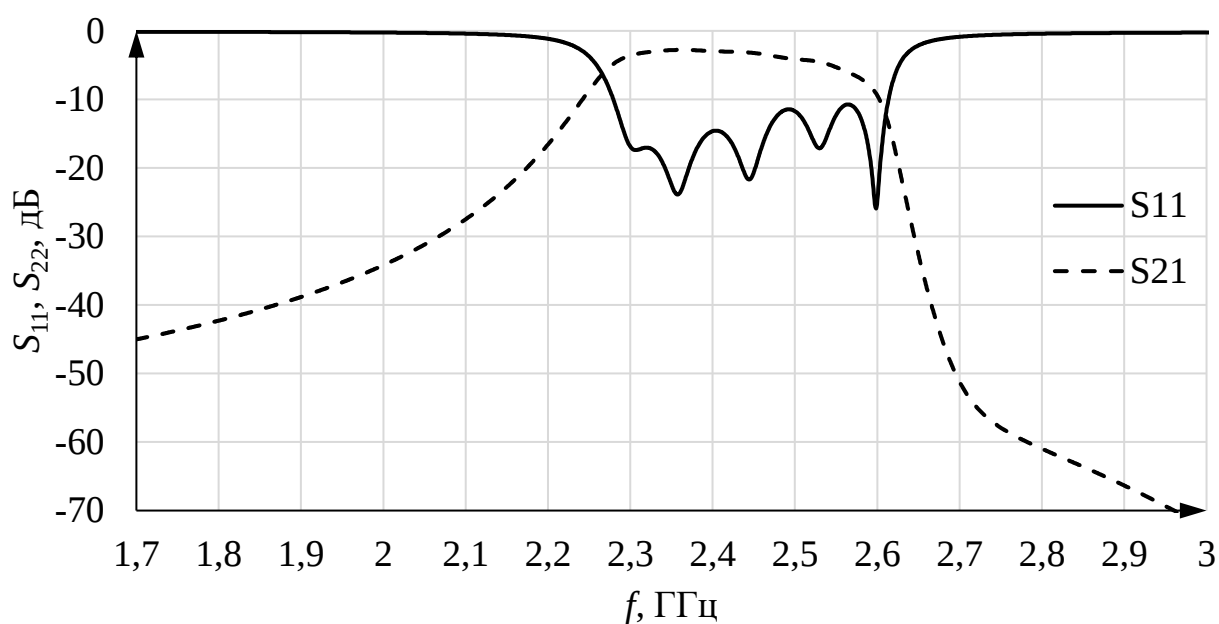


Рисунок 4.8 – Графики коэффициента передачи и коэффициента отражения
Характеристики получившегося устройства:

- центральная частота: 2,36 ГГц;
- полоса пропускания по уровню -3 дБ от 2,27 ГГц до 2,56 ГГц;
- потери на центральной частоте: не более 2,7 дБ;
- затухание вне полосы пропускания не менее 20 дБ;

4.6 Направленный ответвитель

В нулевом радиометре используется обратный контур, который автоматически регулирует вводимую шумовую мощность, чтобы поддерживать баланс между входным антенным сигналом и опорной

нагрузкой. Направленный ответвитель обеспечивает контролируемое введение шума со стороны шумового источника в приёмный тракт.

Благодаря своей конструкции, направленный ответвитель направляет шум строго в один приёмный канал, не допуская обратного распространения в источник шума или антенну. Это важно для предотвращения паразитных эффектов и обеспечения корректной работы регулятора баланса.

Для экспериментальной установки выбран направленный ответвитель Narda 4203-6 [156] внешний вид которого показан на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Внешний вид направленного ответвителя
Характеристики направленного ответвителя Narda 4203-6 [156]:

- Коэффициент связи: 6дБ;
- Диапазон частот от 2 до 18 ГГц;
- Направленность: 15 дБ;
- Вносимые потери: 0,9 дБ;
- КСВН: не более 1,4;
- Тип разъемов: SMA.

4.7 Детектор

Детектор в радиометрических системах выполняет ключевую функцию преобразования СВЧ-сигнала, прошедшего через усилительный тракт, в сигнал низкой частоты или постоянного тока, который соответствует мощности принимаемого радиотеплового излучения. Поскольку тепловой сигнал, принимаемый антенной, имеет характер случайного широкополосного

шума, его нельзя непосредственно анализировать без предварительной обработки. Детектор обеспечивает усреднение мгновенной мощности СВЧ-сигнала за определённый интервал времени, формируя выходной сигнал, пропорциональный эффективной температуре источника излучения [157].

В экспериментальной установке был использован детектор производства компании «Микран» Д5А-20-13-13Р изображенные на рисунке 4.10. Параметры детектора [158]:

- диапазон рабочих частот: от 0,01 до 50 ГГц;
- динамический диапазон: от -50 до -22 дБм;
- КСВН: не более 1,2.



Рисунок 4.10 – Внешний вид детекторной головки

Преимуществом применения Д5А-20-13-13Р в составе радиометрической системы является сочетание широкополосности, хорошего согласования, малой неравномерности частотной характеристики и пригодности для преобразования малых СВЧ-сигналов в низкочастотное напряжение. Кроме того, коаксиальное исполнение с соединителями 3,5 мм обеспечивает удобство включения детектора в экспериментальную установку и совместимость с другими элементами СВЧ-тракта.

4.8 Усилитель постоянного тока

Усилитель постоянного тока в составе радиометрических систем играет ключевую роль в преобразовании слабых сигналов, формирующихся на выходе детектора после детектора СВЧ мощности. Эти сигналы обычно имеют уровень в пределах нескольких микровольт и не могут быть напрямую обработаны аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП) или средствами отображения и регистрации. Основная задача усилителя постоянного тока – усиление этих сигналов до уровня, обеспечивающего точное и стабильное измерение. При этом важно минимизировать добавляемые шумы и устранить смещение, чтобы не исказить исходный сигнала.

В качестве операционного усилителя была подобрана микросхема AD797 – Операционный усилитель со сверхнизким уровнем шума и сверхнизким уровнем искажений [159]. Принципиальная схема усилителя постоянного тока показана на рисунке 4.11.

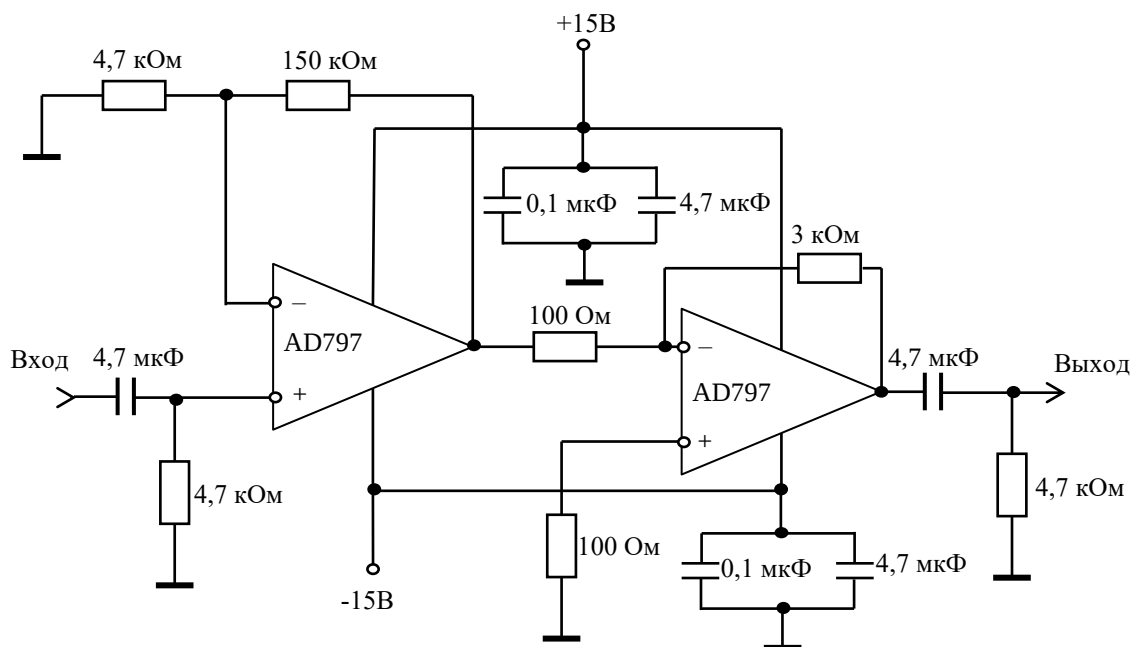


Рисунок 4.11 – Схема усилителя постоянного тока

Собран усилитель по двухкаскадной схеме. Второй каскад инвертирует сигнал. Сделано это для, потому что в отладочной плате АЦП также

присутствует усилитель схема, которого реализована на инвертирующем входе операционного усилителя. Так как не целесообразно вносить изменения в уже имеющей отладочной плате применено дополнительное инвертирование в блоке УПТ, чтобы в цифровом виде сигнал был правильной полярности.

4.9 Аналого-цифровой преобразователь

В качестве модуля аналого-цифрового преобразователя было выбрано готовое решение в виде отладочной платы, показанное на рисунке 4.12 [160]. На данной отладочной плате используется высокоскоростной 12-битный АЦП AD9226, предназначенный для реализации двухканальной высокоскоростной оцифровки сигналов. Конструктивно отладочная плата содержит две микросхемы AD9226 обеспечивающая максимальную частоту дискретизации до 65 Мбит/с. Отладочная плата питается от одного источника питания, имеет 2 входа для синхросигналов, 24 выхода цифровых кодов и 2 выхода для сигнализации о превышении порогового уровня.

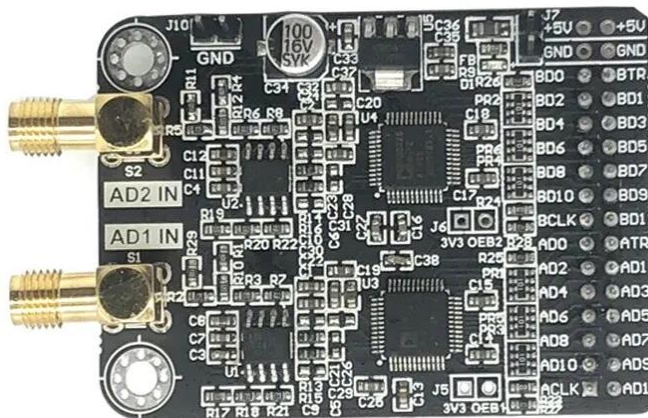


Рисунок 4.12 – Внешний вид отладочной платы с АЦП

Диапазон входных напряжений модуля составляет от -5В до $+5\text{В}$. Для согласования с входом АЦП реализована схема, включающая цепи ослабления и смещения, которая инвертирует входной сигнал и преобразует его в диапазон в диапазон $1\text{--}3\text{В}$, соответствующий уровню 2В , необходимому для корректной работы AD9226. При подаче на вход модуля напряжения -5 В , уровень сигнала на входной клемме АЦП составляет 3В ; при 0В – 2В ; при $+5\text{В}$

– 1В соответственно. Структурная схема данного высокоскоростного АЦП-модуля представлена на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 – Структурная схема отладочной платы

Общие характеристики отладочной платы [160]:

- частота дискретизации: макс.: 65 Мбит/с;
- разрешение объявления: 12 бит;
- диапазон входного напряжения: 10V_{pp} (земля 5В);
- пропускная способность аналогового сигнала: 350 МГц (макс.-3 дБ);
- входное сопротивление: 50 Ом;
- источник питания: постоянного тока + 5 В;
- интерфейс ввода аналогового сигнала: SMA;
- выходной интерфейс: параллельные данные уровня 3.3В.

Применение готового отладочного модуля позволило сократить время разработки аппаратной части, упростить этап макетирования и сосредоточить внимание на отработке алгоритмов регистрации и цифровой обработки радиометрического сигнала. Использование 12-разрядного преобразования в рассматриваемой системе является обоснованным компромиссом между точностью представления сигнала, быстродействием и сложностью аппаратной реализации.

4.10 Блок управления

Эмпирическое исследование проводившееся в matlab Simulink на основе отладочной платы Zedboard с процессором ZYNQ 7000 [161,162] показало, что математическую обработку измеряемых данных, например усреднение, необходимо производить на Программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

В роли блока управления выступает отладочная плата FPGA (Field-programmable gate array) SPARTAN-6 с чипом XC6SLX9-2FTG256. Для данной отладочной платы был разработан специальный код позволяющий осуществлять формирование синхросигнала для отладочной платы с АЦП и принимать с нее цифровые последовательности по параллельной шине данных 12 бит, производить цифровую обработку полученных данных, формировать пакеты и осуществлять передачу через UART интерфейс на внешнее устройство, генерировать последовательности сигналов АИМ и ШИМ, заданной амплитуды и длительности [163, 164], осуществлять обратную связь для регулировки этого ШИМ сигнала.

Отладочная плата SPARTAN-6 изображена на рисунке 4.14.

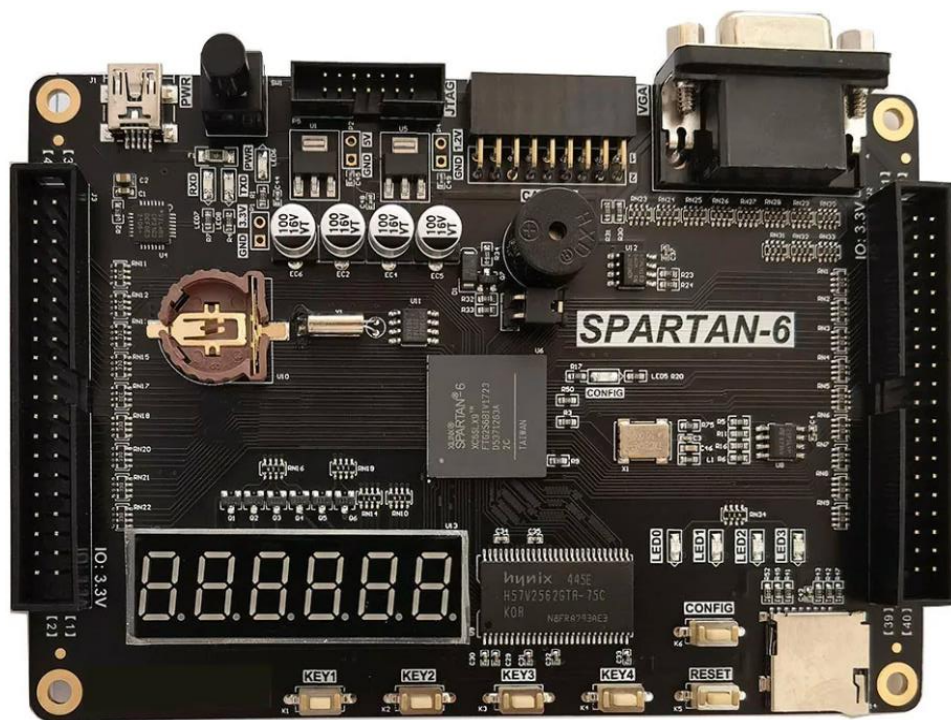


Рисунок 4.14 – Внешний вид отладочной платы ПЛИС

Алгоритм работы радиометрической системы был полностью реализован на ПЛИС. Однако в системе должно присутствовать устройство вывода информации о результатах измерений. В текущей конфигурации после синхронного усреднения и параллельно управлению ШИМ модулятора, результаты измерения передаются на ноутбук при помощи интерфейса UART и отображаются при помощи MATLAB в режиме реального времени. Так как АЦП используется 12 битное, а интерфейс UART способен передавать за один пакет только 8 информативных бит, то пакеты данных нужно делить на 2 пакета по 7 информативных бит и по одному биту для маркировки что пакет в данный момент передает старшие разряды либо младшие разряды одной численной величины.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Использование в радиометрической системе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), и программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) позволяет проводить программную реконфигурацию системы без изменения аппаратной части [165]. Гибкость реконфигурации упрощает проведение экспериментов в экспериментальных условиях, позволяет сравнивать различные схемотехнические решения. В диссертационном исследовании были реализованы и протестированы схемы:

1. Компенсационная схема микроволнового радиометра;
2. Модуляционная схема микроволнового радиометра;
3. Схема нулевого радиометра;
4. Предложенная схема быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений.

Схемы компенсационного, модуляционного и нулевого микроволновых радиометров были сравнены между собой по следующим параметрам: дисперсия результатов измерений, ошибки измерения быстропротекающего радиотеплового процесса, динамический диапазон. Представлены результаты измерений быстропротекающего процесса предложенным быстродействующим микроволновым радиометром.

Дисперсия результатов измерений была зафиксирована при помощи разработанной экспериментальной установки. График сравнения дисперсий результатов измерений в зависимости от температуры антенны представлен на рисунке 5.1.

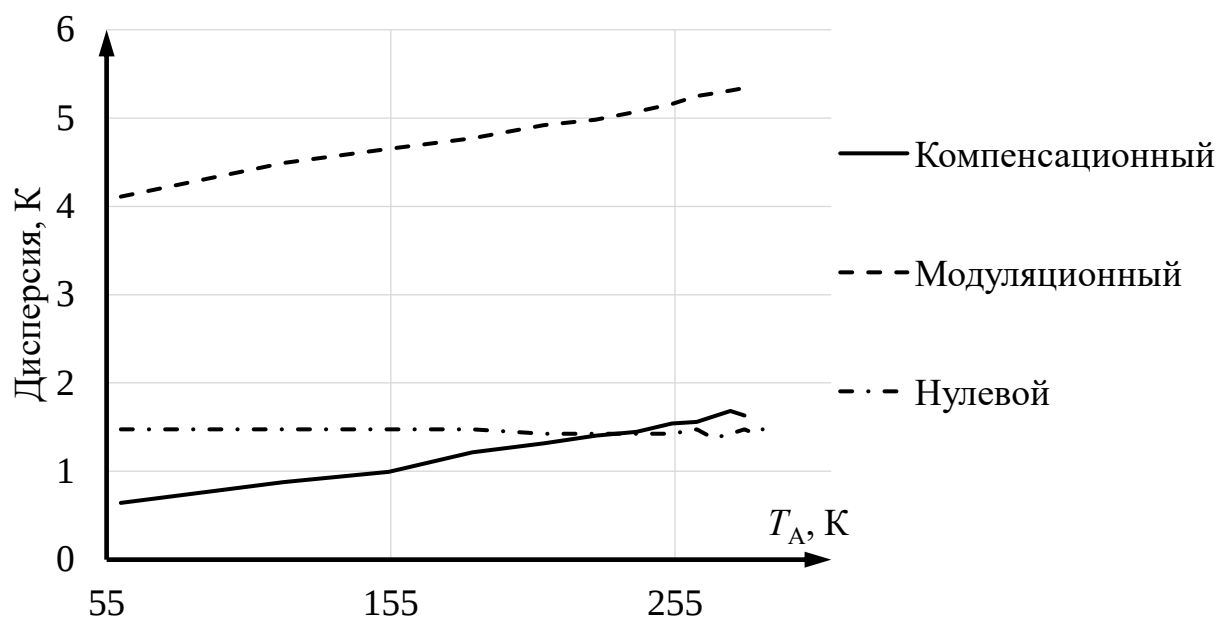


Рисунок 5.1 – График зависимости дисперсии результатов измерений от шумовой температуры антенны радиометров различных типов

Результаты исследования дисперсии (рисунок 5.1) для компенсационной и модуляционной схем микроволновых радиометров показали, что дисперсия результатов измерений растет в зависимости от величины шумовой температуры антенны, а для схемы нулевого радиометра остается неизменной.

Для разработанной экспериментальной установки была измерена передаточная характеристика в различных режимах: компенсационном, модуляционном и нулевом (рисунок 5.2). Из рисунка 5.2 видно, что все три графика имеют линейную зависимость. Линейный отклик системы означает, что экспериментальная установка работает согласно теоретическим выкладкам и результаты измерений можно пересчитывать по стандартному линейному уравнению относительно опорного эталона с известной шумовой температурой в динамическом диапазоне приемников.

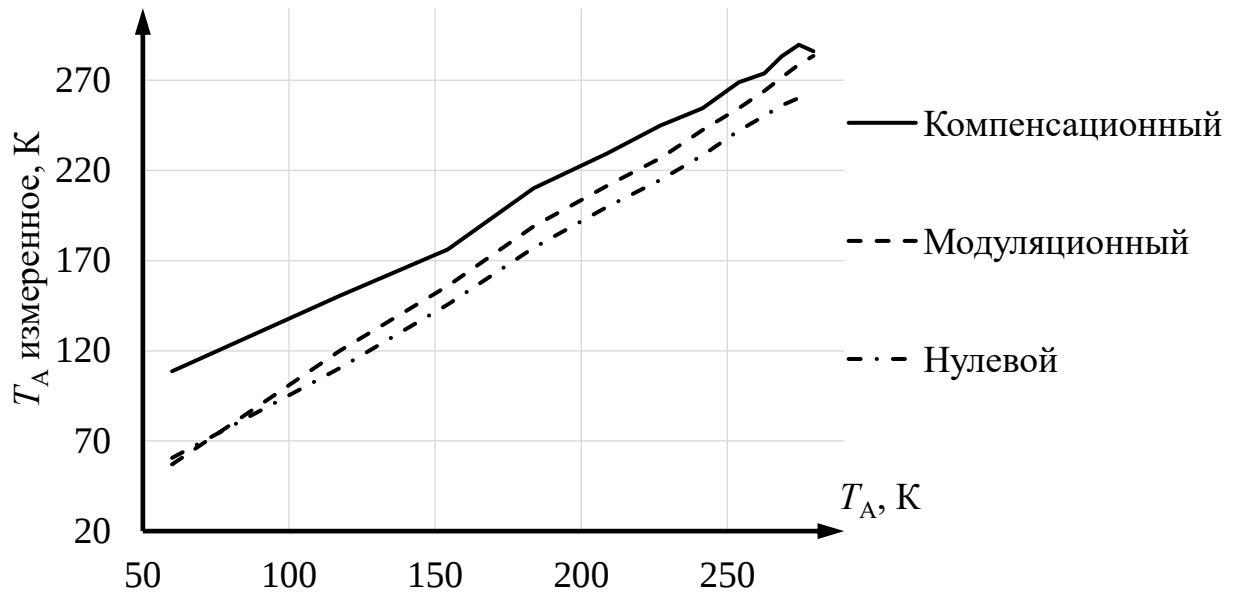


Рисунок 5.2 – График зависимости измеренной шумовой температуры от шумовой температуры антенны микроволновых радиометров различных типов

Использование имитатора быстропротекающего процесса позволило создавать тестовые сигналы с фронтами длительностью порядка 400нс, моделируя температурные выбросы, аналогичные вспышкам солнечной активности, ступенчатому изменению подстилающей поверхности и т.д. Управление параметрами имитируемого сигнала, такими как амплитуда, длительность и частота, позволило получить повторяемые и воспроизводимые результаты.

Для каждой схемы было зарегистрировано время отклика на резкий температурный скачок. На рисунке 5.3 представлены результаты измерений быстропротекающего процесса при помощи компенсационного и модуляционного радиометров.

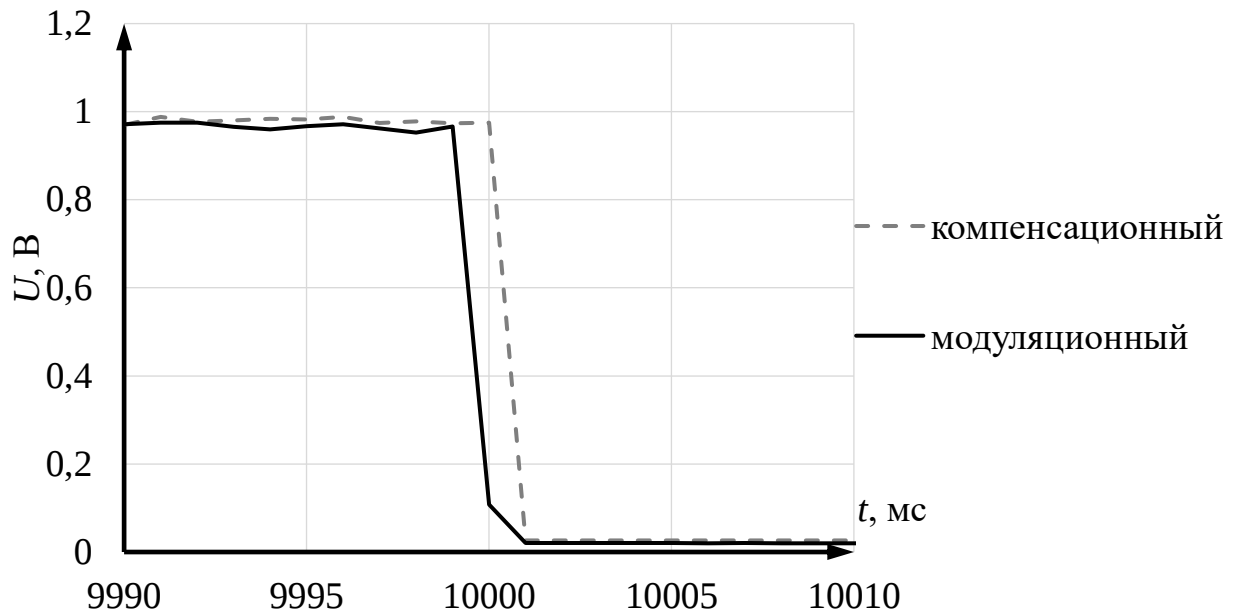


Рисунок 5.3 – Результаты измерения быстропротекающего процесса компенсационным и модуляционным радиометрами

Для нулевого радиометра с обратной связью, основанной на шагающем алгоритме и для предложенного быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений в процессе эксперимента, фиксировалась скорость установления нулевого баланса. На рисунке 5.4 представлены результаты эксперимента. Для нулевого радиометра с шагающим алгоритмом время установления нулевого баланса составило 220 мс, для предложенной схемы 1 мс при измерении быстропротекающего процесса с изменением амплитуды от нижней до верхней границы динамического диапазона нулевого микроволнового радиометра.

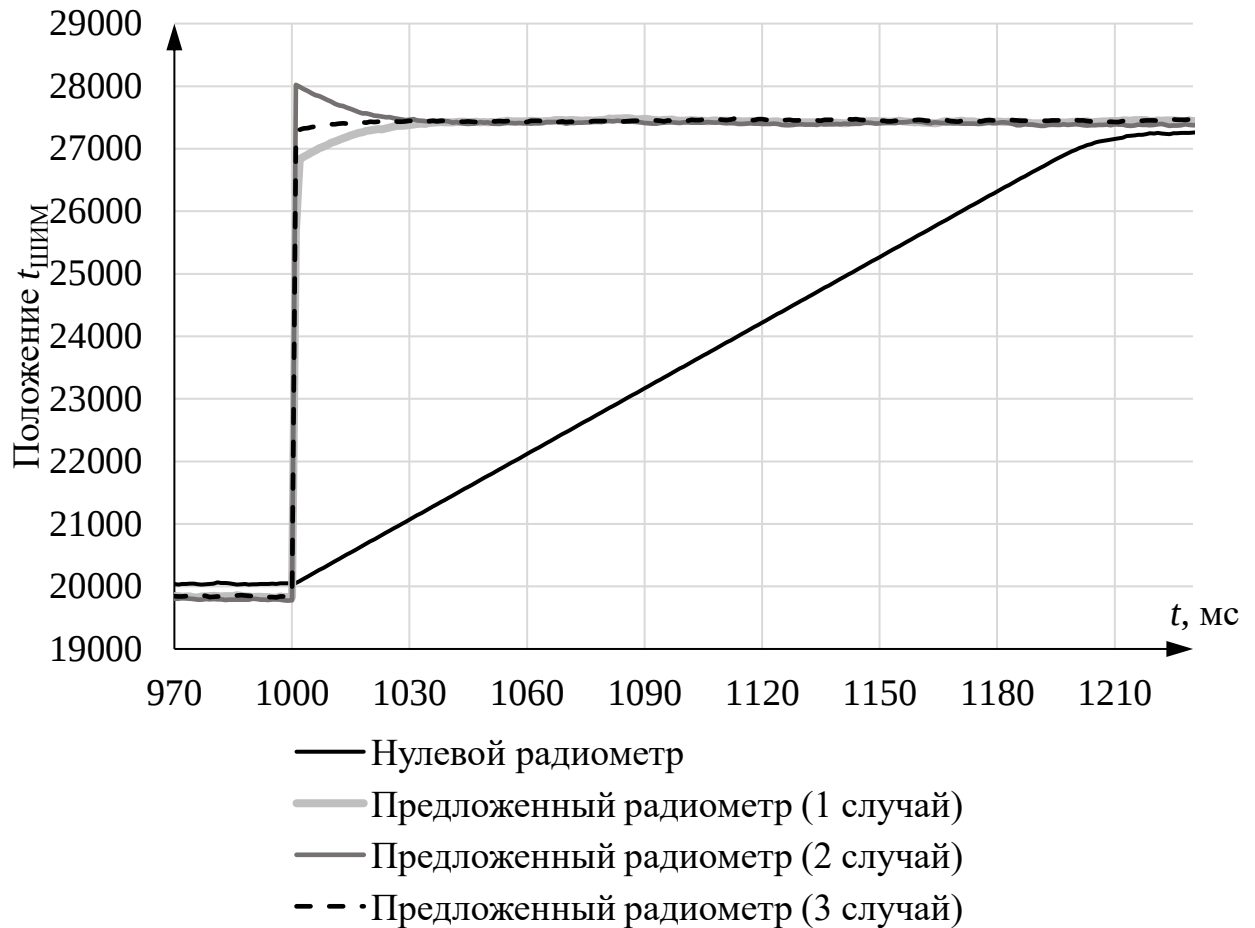


Рисунок 5.4 – Результаты измерений быстропротекающего процесса нулевым и предложенным быстродействующим микроволновыми радиометрами

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.

На рисунке 5.5 показан результат измерения быстропротекающего процесса, представляющего собой функцию $\sin(x)/x$ и продолжительностью 16 мс. Анализируя данные, представленные на рисунке 5.5, можно отметить, что самое детальное отображение быстропротекающего процесса получено при помощи дифференциального метода измерений.

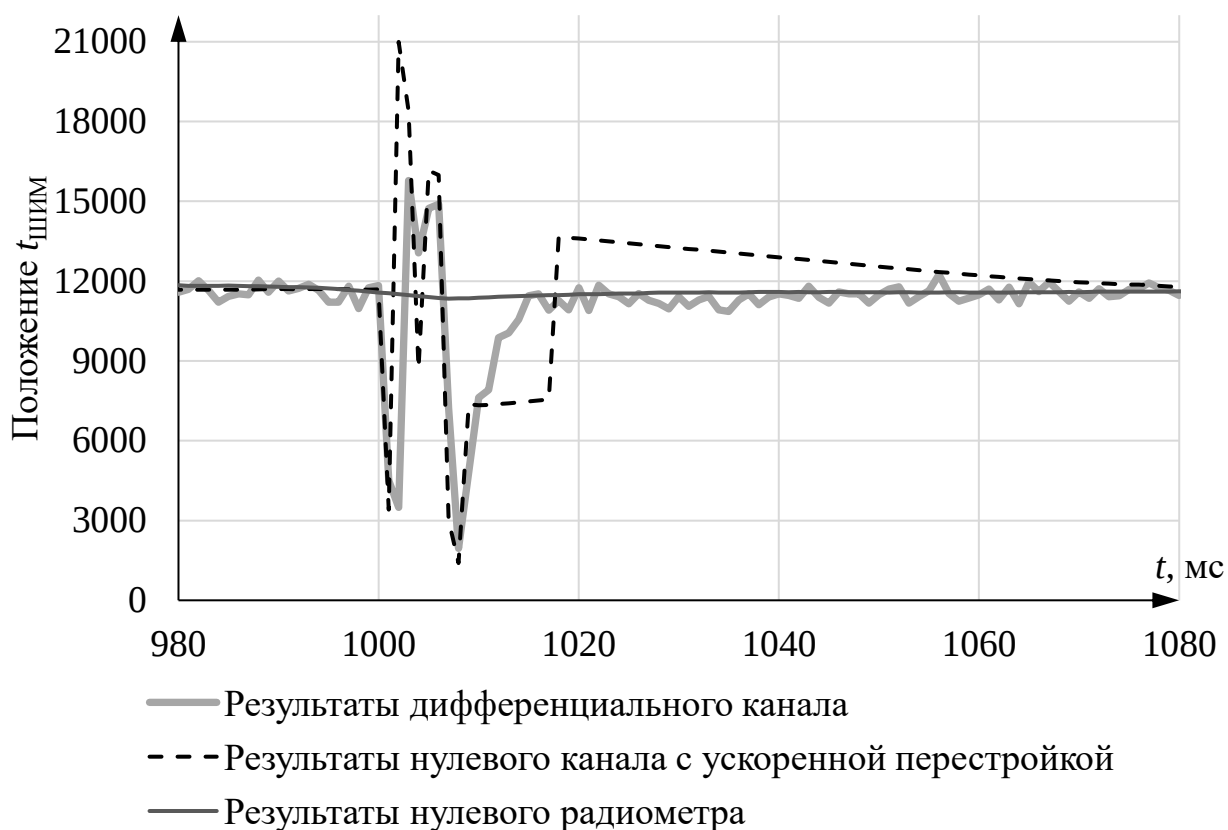


Рисунок 5.5 – Результат измерений быстропротекающего процесса нулевым и предложенным микроволновыми радиометрами

На рисунке 5.6 представлен результат работы экспериментальной установки при измерении сигнала предложенным быстродействующим микроволновым радиометром за пределами верхней границы динамического диапазона нулевого микроволнового радиометра.

На рисунке 5.7 представлен результат работы экспериментальной установки при измерении сигнала нулевым и предложенным быстродействующим микроволновыми радиометрами за пределами нижней границы динамического диапазона нулевого микроволнового радиометра.

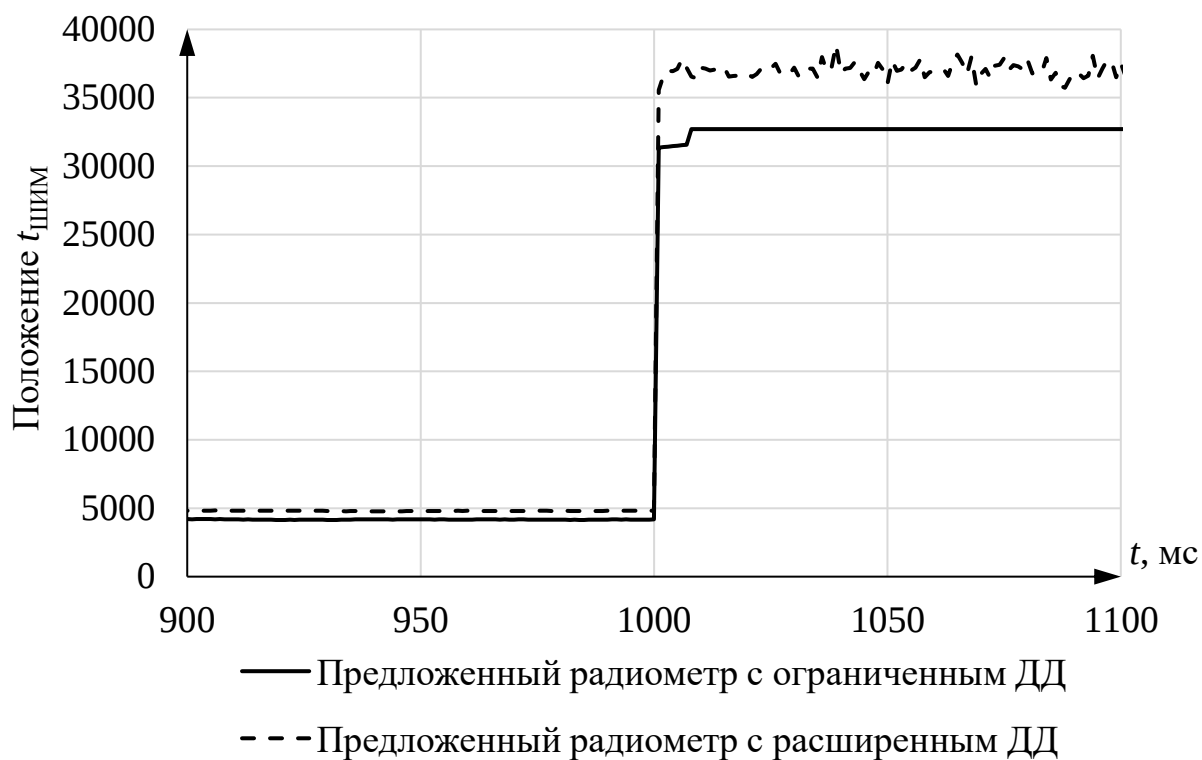


Рисунок 5.6 – Результат работы экспериментальной установки при измерении сигнала за пределами верхней границы динамического диапазона нулевого микроволнового радиометра

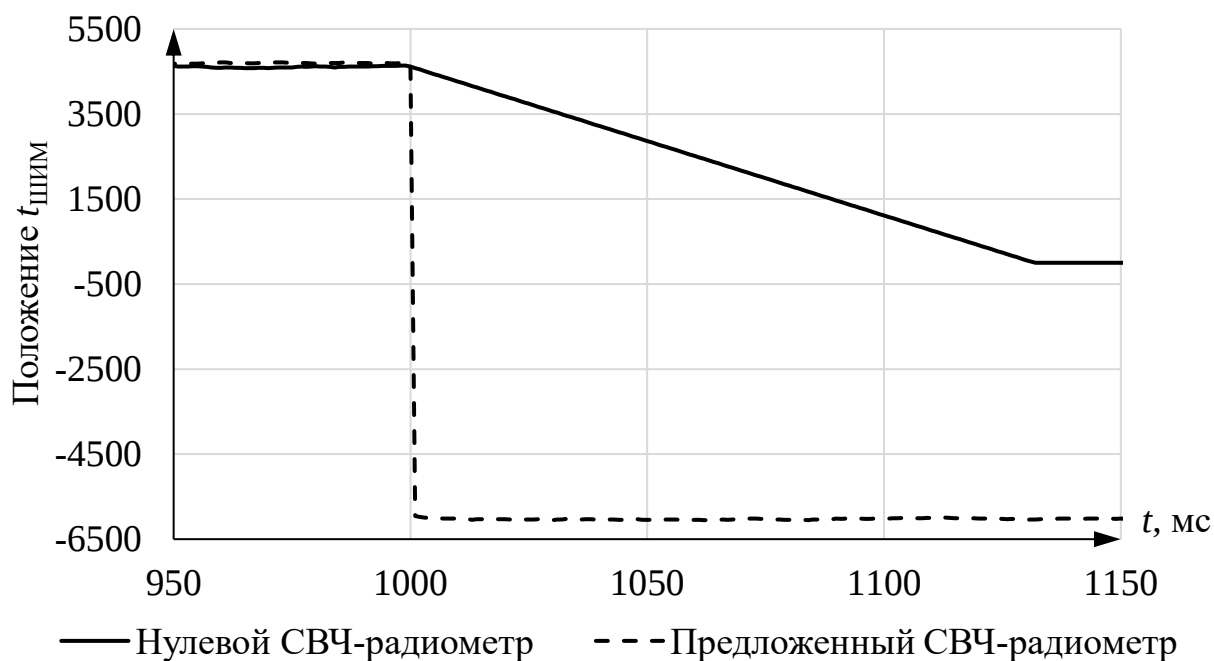


Рисунок 5.7 – Результат работы экспериментальной установки при измерении сигнала за пределами нижней границы динамического диапазона нулевого микроволнового радиометра

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

AD	Analog devices, «Аналоговые устройства»
FPGA	Field-programmable gate array, программируемая пользователем вентильная матрица
FLIR	Forward-Looking Infrared, инфракрасная система переднего обзора
NASA	National Aeronautics and Space Administration, национальное управление по авиации и исследованию космического пространства
TTL	Transistor-transistor logic, транзисторно-транзисторная логика
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, универсальный асинхронный приёмопередатчик
UK	United Kingdom, Великобритания
UWBRAD	Ultra-wideband software defined microwave radiometer, сверхширокополосный программно-определяемый микроволновый радиометр
А	Антенна
АИМ	Амплитудно-импульсная модуляция
АМ	Аналоговый мультиплексор
АТТ	Аттенюатор
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
БП	Быстропротекающий процесс
БУ	Блок управления
ВУ	Вычитающее устройство
ВШ	Выходная шина данных
ГШ	Генератор шума
Д	Делитель мощности

ДД	Динамический диапазон
ДУ	Дифференциальный усилитель
И	Интегратор
ИБП	Имитатор быстропротекающего процесса
ИУ	Импульсный усилитель
ИОН	Источник опорного напряжения
ИТ	Источник тока
К	Компаратор
КД	Квадратичный детектор
КСВН	Коэффициент стоячей волны по напряжению
ЛПД	Лавинно-пролетный диод
М	Модулятор
МШУ	Малошумящий усилитель
НО	Направленный ответвитель
ОГШ	Опорный генератор шума
П	Приемник
ПК	Переключатель
ППВМ	Программируемая пользователем вентильная матрица
ПЛИС	Программируемая логическая интегральная схема
ППФ	Полосно-пропускающий фильтр
Р	Регистратор
РП	Радиометрический приемник
САПР	Система автоматизированного проектирования
СВЧ	Сверхвысокие частоты
СД	Синхронный детектор
СФ	Синхронный фильтр
У	Умножитель
УВЧ	Усилитель высоких частот
УНЧ	Усилитель низких частот
УПТ	Усилитель постоянного тока

УУ	Устройство управления
ФНЧ	Фильтр
ШИМ	Широтно-импульсная модуляция

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев А. Г. Радиотеплолокация / А. Г. Николаев, С. В. Перцов. Москва: Сов. радио, 1964. 326 с.
2. Appleby R. Evaluation of a passive millimeter-wave (PMMW) imager for wire detection in degraded visual conditions / R. Appleby, P. Coward, J. N. Sanders-Reed // Proc. SPIE, 2009. Vol. 7309.
3. Убайчин А. В. Моделирование нестационарного радиотеплового процесса и исследование возможности его регистрации с заданным временным разрешением / А. В. Убайчин, Г. Г. Жук, Е. В. Алексеев [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 28-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо'2018), 2018. С. 1262–1268.
4. Убайчин А. В. Динамические свойства систем радиотеплолокации / А. В. Убайчин, Г. Г. Жук, Д. Е. Миненко [и др.] // Радиолокационные системы специального и гражданского назначения: материалы XXIII научно-технической конференции Жуковский, 27–28 марта 2018 г.
5. Bosch-Lluis X. PAU/RAD: Design and preliminary calibration results of a new L-band pseudo-correlation radiometer concept / X. Bosch-Lluis, A. Camps, I. Ramos-Perez [et al.] // Sensors, 2008. Vol. 8. No. 7. P. 4392–4413.
6. Кутуза Б. Г. Спутниковый мониторинг Земли: микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности / Б. Г. Кутуза, О. И. Яковлев, М. В. Данилычев. Москва: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
7. Blackwell W. J. Design and analysis of a hyperspectral microwave receiver subsystem / W. J. Blackwell, C. Galbraith, T. Hancock [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012. Vol. 50. No. 9. P. 3457–3467.
8. Gunnarsson S. A single-chip 53 GHz radiometer front-end MMIC for geostationary atmospheric measurements / S. Gunnarsson, A. Emrich, H. Zirath

- [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011. Vol. 21. No. 5. P. 263–265.
9. Aslam S. Advanced net flux radiometer for the ice giants / S. Aslam, R. K. Achterberg, S. B. Calcutt [et al.] // Space Science Reviews, 2020. Vol. 216. No. 5.
 10. Anderson N. Design and calibration of field deployable ground-viewing radiometers / N. Anderson, J. Czapla-Myers, N. Leisso [et al.] // Applied Optics, 2013. Vol. 52. No. 2. P. 231–244.
 11. Wan X. A fast storage method for drone-borne passive microwave radiation measurement / X. Wan, X. Li, T. Jiang [et al.] // Sensors. 2021. Vol. 21. No.20.
 12. Munoz-Martin J. F. The Flexible Microwave Payload-2: A SDR-Based GNSS-Reflectometer and L-Band Radiometer for CubeSats / J. F. Munoz-Martin, L. Fernandez Capon, J. A. Ruiz-de-Azua, A. Camps // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020. Vol. 13. No. 1.
 13. Munoz-Martin J. F. The Flexible Microwave Payload-2: Architecture and Testing of a Combined GNSS-R and L-Band Radiometer with RFI Mitigation Payload for CubeSat-Based Earth Observation Missions / J. F. Munoz-Martin, L. Fernandez, J. A. Ruiz-de-Azua, A. Camps // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020. Vol. 13. P. 345– 362.
 14. Тамаров В.А. Астрофизика: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет, 2003. 280 с.
 15. Кубланов В. С. Совершенствование характеристик СВЧ-радиотермографов в медицинских задачах / В. С. Кубланов, О. В. Потапова, Ю. Е. Седельников, [и др.]// Журнал радиоэлектроники. 2012, № 4, С. 1–27.
 16. Кубланов В. С. Природа флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга / В. С. Кубланов, Ю. Е. Седельников, А. Л. Азин, [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника, 2010. № 9. С. 45–54.

17. Ubaichin A. Dynamics of internal thermal processes in dielectric materials and the method of its measurement in microwave hyper-spectral mode / A Ubaichin, A. Surzhikov // Materials Science Forum. 2019. Vol. 942. P. 151–161.
18. Qin S. Real-time detection of concealed threats with passive millimeter wave and visible images via deep neural networks / S. Qin, T. J. Cui, J. Miao // Sensors, 2021. Vol. 21, No. 24.
19. Upton D. W. Gated pipelined folding ADC based low power sensor for large-scale radiometric partial discharge monitoring / D. W. Upton, R. P. Haigh, P. J. Mather [et al.] // IEEE Sensors Journal, 2020. Vol. 20, No. 22. P. 13390–13398.
20. Lui F. A Steel Sheathed Silicon Optical Fibre Probe for the Study of Radiance in illuminised Explosive Combustion // Proceedings of SPIE. 1997. Vol. 3241. P. 206-215.
21. Belskii V. M. Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes / V. M. Belskii, A. L. Mikhailov, A. V. Rodionov [et al.] // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2011. – Vol. 47, No. 6. – P. 639–650.
22. Безруков Д. Е. Измерение кинематических и тепловых характеристик ударной волны в аргоне радиоинтерферометром-радиометром КВЧ-диапазона / Д. Е. Безруков, Н. С. Корнев, Н. А. Макарычев [и др.] // Информационные системы и технологии – 2019: материалы XXV Международной научно-технической конференции – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2019. С. 48–52.
23. Ботов, Е. В. Одновременное измерение параметров движения и тепловых характеристик быстропротекающих процессов радиоинтерферометром-радиометром КВЧ-диапазона / Е. В. Ботов, В. Н. Иконников, Н. С. Корнев [и др.] // Информационные системы и технологии ИСТ–2017: материалы XXIII Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию НГТУ. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2017. С. 1160–1164.

24. Ботов Е. В. Измерение кинематических и тепловых характеристик быстропротекающих газодинамических процессов методом микроволнового зондирования / Е. В. Ботов, В. Н. Иконников, В. А. Канаков [и др.] // Физика горения и взрыва, 2018. Т. 54, № 5. С. 112–116.
25. Botov E. V. Measurement of the brightness temperature of fast gas-dynamics processes using the EHF radiointerferometer-radiometer in the presence of an active-channel signal / E. V. Botov, V. N. Ikonnikov, V. A. Kanakov [et al.] // Radiophysics and Quantum Electronics, 2018. Vol. 61, No. 5. P. 382–388.
26. Sambamurthi J. K. Correlation of slag expulsion with ballistic anomalies in shuttle solid rocket motors / J. K. Sambamurthi, A. Alvarado, E. C. Mathias // Journal of Propulsion and Power, 1996. Vol. 12, No. 4. P. 625–631.
27. Usui H. High-speed color imaging and ratio temperature radiometer by multi-spectral optics / H. Usui, S. Takeuchi, Y. Ohno // Proceedings of SPIE, 2003. Vol. 4948.
28. Linjewile T. M. Optical probe measurements of the temperature of burning particles in fluidized beds / T. M. Linjewile, A. S. Hull, P. K. Agarwal // Fuel, 1994. Vol. 73, No. 8. P. 1374–1379.
29. Cibere J. J. Flash thermal processing through the melting point of silicon / J. J. Cibere, S. P. McCoy, D. Camm, [et. al.]// Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 91, No. 3. P. 1617–1624.
30. Ikonnikov V. N. A method for retrieving the two-dimensional temperature field of the fast-process front by approximating the measurement results of a multichannel radiometer / V. N. Ikonnikov, V. A. Kanakov, V. V. Parkhachev // Radiophysics and Quantum Electronics. 2019. Vol. 62, No. 1. P. 77–84.
31. Whitehead K. Remote Sensing of the Environment with Small Unmanned Aircraft Systems (UASs), Part 1: A Review of Progress and Challenges / K. Whitehead, C. H. Hugenholtz // Journal of Unmanned Vehicle Systems, 2014. Vol. 2, No. 3. P. 69–85.
32. Daponte P. Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview / P. Daponte, L. De Vito, F. Lamonaca // Sensors, 2021. Vol. 21, No. 4.

33. Ростокин И.Н. Современное состояние и перспективы развития комплексных радиофизических методов исследования параметров атмосферы в научно-исследовательской лаборатории Муромского института ВлГУ. / И.Н. Ростокин, Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: Всероссийские открытые Армандовские чтения. Материалы Всероссийской открытой научной конференции, Муром, 25–27 июня 2024 года. Муром: Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2024. С. 16-29.
34. Федосеева, Е. В. Влияние направленных свойств антенны СВЧ радиометрической системы на точность калибровки по излучению атмосферы / Е. В. Федосеева, Г. Г. Щукин, И. А. Кольцов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2019. № 3(35). С. 65-71.
35. Щукин Г.Г. Микроволновая радиометрическая система в задачах прогнозирования опасных атмосферных явлений / Г. Г. Щукин, Е. В. Федосеева, В. В. Булкин, И. Н. Ростокин // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68, № 6. С. 598-607.
36. Ростокин И. Н. Комплексные радиофизические методы исследования параметров атмосферы / И. Н. Ростокин, Е. В. Федосеева, Е. А. Ростокينا [и др.] // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2025: Сборник тезисов докладов XII Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 70-летию со дня образования кафедры электронных и квантовых средств передачи информации КНИТУ-КАИ, 20-летию со дня образования кафедры радиофотоники и микроволновых технологий КНИТУ-КАИ, 60-летию выхода в открытый космос А.А. Леонова, Казань, 10–12 апреля 2025 года. Казань: ИП Сагиев А.Р., 2025. – С. 5-10.

37. Щукин Г. Г. Радиометеорологические исследования в Муромском институте: современное состояние и перспективы развития / Г. Г. Щукин, В. В. Булкин, Е. В. Федосеева [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 4(48). С. 5-18.
38. Ростокин И. Н. Многочастотные микроволновые радиометрические исследования радиотеплового излучения конвективной облачности в условиях формирования и развития опасных атмосферных метеоявлений / И. Н. Ростокин, Е. А. Ростокينا, Е. В. Федосеева [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 670. С. 140-145.
39. Круглов, А. С. Корреляционный анализ результатов измерений радиотеплового излучения атмосферы СВЧ радиометрической системой с компенсацией фоновых шумов / А. С. Круглов, Е. В. Федосеева // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2018. № 20. С. 56-59.
40. Гладун В. В. Система ближнего пассивного радиовидения 3-мм диапазона / В. В. Гладун, А. В. Котов, В. И. Криворучко [и др.] // Журнал радиоэлектроники, 2010. № 7.
41. Dicke R. H. The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies / R. H. Dicke // Review of Scientific Instruments, 1946. Vol. 17. P. 268–275.
42. Патент на изобретение № 2373552 С1 Российская Федерация. Способ формирования радиолокационного изображения в бортовых системах радиовидения / патентообладатель: Федеральное агентство по образованию Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Рязанский государственный радиотехнический университет / Заявка №2008114542/09; заявлен 14.04.2008; опубликован 20.11.2009.
43. Патент на изобретение № RU 2504800 С1 Российская Федерация. Способ формирования радиопортрета объекта методом параллельной обработки с частотным разделением / А.Ю. Зражевский, Е.П. Новичихин, К.Н.

Рыков; патентообладатель: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – Заявка №2012123777/07; заявлен 07.06.2012; опубликован 20.01.2014.

44. Патент на изобретение № RU 2406099 С1 Российская Федерация. Способ обнаружения предметов, скрытых под одеждой человека, и устройство для его реализации / А.Ю. Зражевский, В.А. Коротков, К.Н. Рыков. Заявка №2009124426/07; заявлен 29.06.2009; опубликован 10.12.2012.
45. Патент на изобретение № RU 2398253 С1 Российская Федерация. Устройство формирования изображения с субдифракционным разрешением / А.Н. Выставкин, А.В. Перестянков, С.Е. Банков, В.М. Чаботарев; патентообладатель: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – Заявка №2009109751/28; заявлен 18.03.2009; опубликован 27.08.2010.
46. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов: монография / Под ред. Р.Л. Быстрова, А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
47. Патент на изобретение № RU 2698523 С1 Российская Федерация. Способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, устройство для его осуществления, способы калибровки устройства и генератора шума / В.Н. Иконников, В.А. Канаков, Н.С. Корнев, К.В. Минеев, А.В. Назаров, Ю.И. Орехов, А.А. Седов. – Заявка №2018144404; опубликован 14.12.2018; опубликован 28.08.2019.
48. Патент на изобретение № RU 2698523 С1 Российская Федерация. Способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, устройство для его осуществления, способы калибровки устройства и генератора шума в составе этого устройства / В.Н. Иконников, В.А. Канаков, Н.С. Корнев, К.В. Минеев, А.В. Назаров, Ю.И. Орехов, А.А. Седов; заявитель: Российская Федерация, Госкорпорация «Росатом», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – Заявка №2018144404; заявлен 14.12.2018; опубликован 28.08.2019.

49. Гайнулина Е. Ю. Применение линий передачи с малыми потерями в составе К.В.Ч.-радиометра при проведении газодинамических экспериментов / Е. Ю. Гайнулина, Н. С. Корнев, К. В. Минеев [и др.] // Приборы и техника эксперимента, 2021. № 1. С. 137–141.
50. Корнев Н. С. О возможности применения открытого конца прямоугольного диэлектрического волновода в качестве приемной антенны микроволнового радиометра при исследовании быстропротекающих газодинамических процессов / Н. С. Корнев, К. В. Минеев, А. В. Назаров // Шарыгинские чтения: Всероссийская научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, 2019. Т. 1, № 1. С. 73–76.
51. Патент на изобретение № RU 2745796 C1 Российская Федерация. Быстродействующий нулевой радиометр / А.В. Филатов, К.А. Сердюков, А.А. Новикова; Заявка №2020113936; заявлен 03.04.2020; опубликован 01.04.2021.
52. Новикова А. А. Быстродействующая микроволновая радиометрическая система многоприемникового типа для дистанционных исследований земного покрова и мирового океана / А. А. Новикова, К. А. Сердюков, А. В. Филатов // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: материалы VI Всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 242–247.
53. Denisov A. Some Experiments Concerning Resolution of 32 Sensors Passive 8 mm Wave Imaging System / A. Denisov, V. Gorishnyak, S. Kuzmin [et al.] // 20th International Symposium on Space Terahertz Technology, 2009. P. 227–229.
54. Убайчин А. В., Филатов А. В., Орлов П. Е. Основы микроволновой радиометрии: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. 85 с.

55. Gao F. Digital simulation of spaceborne microwave radiometer / F. Gao, J. Zhang, N. Song // Proceedings of SPIE, 1998. Vol. 3503. P. 245–250.
56. Yang B.-H. Design of Receiver Used for Passive Millimeter Wave Imaging System / B.-H. Yang, Z.-P. Li, T.-F. Yu [et al.] // TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2014. Vol. 12, No. 1. P. 98–105.
57. Патент на изобретение № RU 2521781 С1 Российская Федерация. Контрольное устройство миллиметрового диапазона / Ч. Чэнь, Ц. Чжао, Ю. Ли и др.; Заявка №2013103797/28; заявлен 29.12.2010; опубликован 10.07.2014.
58. Li Y. Passive Millimeter-wave Image Restoration Based on an Improved Fuzz Morphological Filter / Y. Li, Y. Li, H. Xiao, Y. Hou // International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2011. Vol. 5, No. 4. P. 313–322.
59. Harvey A. R. Passive mm-wave imaging from UAVs using aperture synthesis / A. R. Harvey, R. Appleby // Aeronautical Journal, 2003. Vol. 107, No. 1068. P. 87–98.
60. Salmon N. A. Radiometers. United States Patent 7522274 IC G01J 1/56. Assignee QinetiQ Limited. Prior US 20070121103 A1. Pub. 31 May 2007.
61. Salmon N. A. Calibrating radiometers. United States Patent 6900756 IC G01K 11/00. Assignee QinetiQ Limited. Prior WO02/06694. Pub. 21 Feb 2001.
62. Salmon N. A. Passive Detection Apparatus. United States Patent 8068049 IC G01S 13/00. Assignee QinetiQ Limited. Prior WO2007/054685. Pub. 19 Nov 2009.
63. Salmon N. Passive Millimeter Wave Imagers for Safety and Security / N. Salmon // SPIE Newsroom, 2008. 27 Aug.
64. Tedeschi J.R. A Novel Passive Millimeter Imager for Broad-Area Search. / J.R. Tedeschi, C.D. Knopik, B.E. Bernacki et al. //Final Report on Project PL09-NPMI-PD07 (PNNL-55180). Pacific Northwest National Laboratory, 2011.
65. Yardim C. Greenland Ice Sheet Subsurface Temperature Estimation Using Ultrawideband Microwave Radiometry / C. Yardim, J. T. Johnson, K. C. Jezek

- [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022. Vol. 60. P 1-12.
66. Andrews M. J. The Ultrawideband Software-Defined Microwave Radiometer Instrument Description and Initial Campaign Results / M. J. Andrews, J. T. Johnson, K. C. Jezek [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018. Vol. 56, No. 11. P. 6560–6573.
 67. Johnson J. T. The Ultrawideband Software-Defined Radiometer (UWBRAD) for Ice Sheet Internal Temperature Sensing: Results from Recent Observations / J. T. Johnson, K. C. Jezek, M. Aksoy [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019. Vol. 57, No. 9. P. 6800–6810.
 68. Spidell M. T. High-speed radiometric measurements of IED detonation fireballs / M. T. Spidell, J. Motos Gordon, J. Pitz [et al.] // Proc. SPIE, 2010. Vol. 7668.
 69. Motos Gordon J. High speed spectral measurements of IED detonation fireballs / J. Motos Gordon, M. T. Spidell, J. Pitz [et al.] // Proceedings of the SPIE, 2010. Vol. 7665.
 70. И.А. Белоус, Ю.А. Левашов. Устройства приема и преобразования сигналов, / учебное пособие. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2013. 104 с.
 71. Ruf C. Digital Radiometers for Earth Science / C. Ruf, S. Gross // IMS 2010 Abstract Cards. WE3G: Microwave Space Sensors. Ann Arbor: University of Michigan, 2010.
 72. Filatov A. V. The Dynamic Properties of a Digital Radiometer System and Its Operating Efficiency / A. V. Filatov, A. V. Ubaichin // Measurement Techniques, 2012. Vol. 54, No. 10. P. 1160–1165.
 73. Piepmeier J. R. Advances in Microwave Digital Radiometry / J. R. Piepmeier, A. J. Gasiewski, J. E. Almodovar // Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2000. Vol. 7. P. 2975–2977.
 74. Yao X. Improved Design of a Passive Millimeter-Wave Synthetic Aperture Interferometric Imager for Indoor Applications / X. Yao, K. Liu, A. Hu, J. Miao

- // Proceedings of SPIE: Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology VIII, 2015. Vol. 9651. Art. 965105.
75. Bradley D. Preliminary Results from the Soil Moisture Active/Passive SMAP Radiometer Digital Electronics Engineering Test Unit ETU / D. Bradley, C. Brambora, A. Feizi [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018. Vol. 56, No. 4. P. 2345–2355.
 76. Munoz-Martin J. F. Soil Moisture Estimation Synergy Using GNSS-R and L-Band Microwave Radiometry Data from FSSCat/FMPL-2 / J. F. Munoz-Martin, D. Llaveria, C. Herbert [et al.] // Remote Sensing, 2021. Vol. 13, No. 5. Art. 994.
 77. Skou N. A Second Generation L-Band Digital Radiometer for Sea Salinity Campaigns / N. Skou, S. S. Sobjaerg, J. E. Balling, S. S. Kristensen // Proceedings of IGARSS 2006, 2006. P. 2964–2967.
 78. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты / М.: Наука, 1974. 188 с.
 79. Ракуть И. В. Исследование неоднородностей протяжённых сред методом пассивно-активной радиометрии в миллиметровом диапазоне длин волн / И. В. Ракуть, С. А. Пелюшенко, А. С. Пелюшенко, Ю. А. Железняков // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, 2005. Т. 48, № 10–11. С. 890–898.
 80. Tan L. VIIRS RDR to SDR Data Processing for Ocean Color EDR / L. Tan, M. Wang, J. Sun, L. Jiang // Proceedings of SPIE, 2014. Vol. 9261. Art. 92611.
 81. Hu W. Phase Synchronization Method for Millimeter Wave Radiometer Digital Correlator / W. Hu, Y. Gao, S. Zhao [et al.] // Proceedings of the 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), 2019. P. 593–597.
 82. Asif M. An FPGA Based 1.6 GHz Cross-Correlator for Synthetic Aperture Interferometric Radiometer / M. Asif, X. Guo, J. Zhang, J. Miao // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018. Vol. 56, No. 4. P. 2153–2163.

83. Bosch-Lluis X. FPGA-Based Implementation of a Polarimetric Radiometer with Digital Beamforming / X. Bosch-Lluis, A. Camps, J. F. Marchan-Hernandez [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006. Vol. 44, No. 9. P. 2403–2412.
84. Lu H. Design of High-Speed Digital Correlator in Fully Polarimetric Microwave Radiometer / H. Lu, Z.-Z. Wang, J.-Y. Liu, [et al.]// Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013. Vol. 237. P. 39–47.
85. Li H. The Digital Correlator Design of FPASMR / H. Li, G. Song, Y. Li [et al.] // Proceedings of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Quebec City, Canada, 2014. P. 636–639.
86. Bongers W. A. Intermediate Frequency Band Digitized High Dynamic Range Radiometer System for Plasma Diagnostics and Real-Time Tokamak Control / W. A. Bongers, V. van Beveren, D. J. Thoen [et al.] // Review of Scientific Instruments, 2011. Vol. 82, No. 6. Art. 063508.
87. Gong X. Test and Analysis of a Hyperspectral Microwave Radiometer Intermediate Frequency Module / X. Gong, L. Tong, B. Gao [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021. Vol. 69, No. 7. P. 3185–3194.
88. Филатов А. В., Абенова П. А. Современные микроволновые радиометрические системы: учебное пособие. Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2021. 126 с.
89. Camps A. Microwave radiometer resolution optimization using variable observation times / A. Camps, J.M. Tarongi // Remote Sensing. 2010. № 2. P. 1826–1843.
90. Skou N. Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis / N. Skou, D. L. Vine. London: Artech House, 2006. 222 p.
91. Убайчин А. В. Практические аспекты реализации радиометрического приемника S-диапазона на основе супергетеродинного метода приема / А. В. Убайчин, Е. В. Алексеев, Г. Г. Жук [и др.] // «Электронные средства и

системы управления 2017»: материалы XIII Международной научно-технической конференции. Томск, 2017. Т. 1. С. 5–8.

92. Убайчин А.В. Перспективные микроволновые радиометрические системы на основе модифицированного метода нулевых измерений: монография. Томск: ТУСУР, 2017. 155 с.
93. Ван дер Зил А. Флуктуации в радиотехнике и физике. М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. 234 с.
94. Бутакова С. В. Апертурные шумовые излучатели в микроволновой радиометрии / С. В. Бутакова // Зарубежная радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники, 1997. № 4. С. 3–26.
95. Розанов С. Б. Охлаждаемые квазиоптические поглощающие нагрузки для радиометров коротковолновой части миллиметрового диапазона волн / С. Б. Розанов, Ю. М. Платонов, А. Н. Лукин, [и др.] // Радиотехника и электроника, 1999. Т. 44, № 3. С. 359–365.
96. Вайсблат А. В. Методы калибровки и поверки медицинских радиотермометров / А. В. Вайсблат // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2003. № 1. С. 49–54.
97. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник. / Б.А. Наливайко [и др.] Томск: МГП "РАСКО", 1992. 223с.
98. Тетерич Н.М. Генераторы шума и измерение шумовой характеристики. М.: Энергия, 1968. 214 с.
99. Немлихер Ю. А. Транзистор – источник низкотемпературного СВЧ-шума / Ю. А. Немлихер, А. Ф. Рукавицын, И. А. Струков // Радиотехника и электроника, 1998. Т. 43, № 5. С. 603–608.
100. Frater R. H. An Active "Cold" Noise Source / R. H. Frater, D. R. Williams // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981. Vol. MTT-29, No. 4. P. 344–347.
101. Бережной В. А. Низкотемпературный генератор шума / Бережной В. А. // Электронная техника. Серия: Электроника СВЧ, 1989. № 10. С. 46–47.

102. Адерихин В.И. Расчет шумовой температуры транзисторных низкотемпературных генераторов шума СВЧ / В.И. Адерихин, А.А. Дорофеев, В.Н. Топольницкий // Измерительная техника. 2002. № 2. С. 59–64.
103. Топольницкий В.Н. Генерация "холодного" шума сверхвысокочастотным транзистором / В.Н. Топольницкий // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 12. С. 1513–1516.
104. Краус Дж Д. Радиоастрономия. М.: Советское радио, 2007. 456 с.
105. Ubaichin A.V. Fluctuation sensitivity of microwave radiometers / A.V. Ubaichin, T.A. Abdirasul, E.V. Alekseev // Electronic Devices and Control Systems: International Scientific-Practical Conference, November 29 – December 1, 2017. Tomsk: V-Spektr, 2017. Part 1.
106. Абдирасул Т. О флуктуационной чувствительности микроволновых радиометров / Т. Абдирасул, Е.В. Алексеев, Г.Г. Жук [и др.]// Международная научно-техническая конференция INTERMATIC-2017. Москва. Материалы конференции. 2017. С. 607–611.
107. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 415 с.
108. Орлов П.Е., Убайчин А.В. Введение в теорию создания бортовой радиоэлектронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли и вопросов электромагнитной совместимости: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2015. 112 с.
109. Убайчин А.В., Филатов А.В. Многоприемниковые микроволновые радиометрические системы на основе модификации нулевого метода измерений. Томск: ТУСУР, 2014. 154 с.
110. Филатов А.В. Радиометрические системы нулевого метода измерений: монография // Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. 276 с.
111. Агаджанян А.С. Цифровое управление подшумливанием для квазинулевого радиометра / А.С. Агаджанян // Радиоастрономическая

аппаратура: тезисы докладов XVII Всесоюзной конференции 10-12 окт. 1985 г. Ереван: Изд-во Акад. Наук Арм. ССР. 1985. С. 5-6.

112. Убайчин А.В. Линейность передаточной характеристики нулевых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией при высоком динамическом диапазоне измеряемых шумовых температур / А.В. Убайчин // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 9–3. С.130–133.
113. Троицкий В.С. Нулевой метод измерения слабых электрических флуктуаций / В.С. Троицкий // Журнал технической физики. 1955. Т.25. №3. С. 478-496.
114. Филатов А.В. Флуктуационная чувствительность микроволновых нулевых радиометров на основе комбинированной импульсной модуляции / А.В. Филатов, Н.А. Каратаева, А.Г. Лоцилов // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. No 10. С. 3–18.
115. Abdirasul T. Fluctuation sensitivity models of microwave radiometers / T. Abdirasul, E. Alekseev, D. Minenko // Atlantis Press, Advances in Engineering Research, Volume 72, PP. 10–12, December 2017, ISBN 978-94-6252-432-3.
116. Goggins W.B. A microwave feedback radiometer / W.B. Goggins // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1967. № 3. P. 83–90.
117. 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.
118. 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.
119. 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.

120. 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.
121. 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 научно-практической конференции. Томск, 2022. С.17–19.
122. 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.
123. 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.
124. 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.
125. 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
126. 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. – М.: ИКИ РАН, 2021. – С. 144.
 127. Убайчин А. В. Ошибки измерений компенсационного микроволнового радиометра при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов / А. В. Убайчин, А. В. Щегляков, Т. Абдирасул [и др.] // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской открытой научной конференции, Муром, 28–30 июня 2022 года. Муром: Муромский институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых", 2022. С. 546-551.
 128. 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.
 129. Жук Г. Г. Эффективность использования бортовых микроволновых радиометров различных видов / Г. Г. Жук, Т. Абдирасул уулу, А. В. Щегляков [и др.] // Научная сессия ТУСУР – 2021: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТУСУР, 2021. С. 17–20.
 130. Убайчин А. В. О задаче дистанционного измерения внутренней температуры биологических объектов / А. В. Убайчин, Т. Абдирасул, А. В. Щегляков, [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные

технологии: материалы 31-й Международной конференции «КрыМиКо».
– Севастополь, 2021. – С. 406.

131. Щегляков А. В. Актуальность проблематики динамических свойств радиометрических систем, использующихся в дистанционном зондировании, медицине, космических исследованиях / А. В. Щегляков, Д. С. Кречетов, Т. Абдирасул уулу [и др.] // Научная сессия ТУСУР – 2021: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: ТУСУР, 2021. С. 67–69.
132. Абдирасул уулу Т. Численное моделирование нулевого СВЧ-радиометра / Т. Абдирасул уулу, А. В. Убайчин, А. В. Щегляков, [и др.]// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 19-й Международной конференции – Москва: ИКИ РАН, 2021. – С. 124.
133. 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 Международной конференции. Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 133.
134. 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.
135. 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 Международной конференции. Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 125.

136. 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 Международной конференции. Москва, 2023. С. 122.
137. 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.
138. 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.
139. 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.
140. 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.
141. 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.
142. 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.
143. 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 научно-практической конференции – 2025. № 1–2. С. 157–160.
 144. 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.
 145. 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.
 146. 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 Международной конференции. Москва, 2022. С. 130.
 147. Убайчин А.В. Инвариантность нулевых радиометров с цифровым управлением подшумливанием к нелинейности уравнивающего генератора шума на лавинно-пролетном диоде / А.В. Убайчин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2 (26). Ч.1. С. 87–91.
 148. Мясин, Е. А. Генерация шума в одночастотном генераторе на лавинно-пролетном диоде миллиметрового диапазона длин волн под воздействием

низкочастотного гармонического колебания. / Е. А. Мясин // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47, № 22. С. 33-36.

149. M31305-1, генератор шума твердотельный [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://liderpribor.ru/product/m31305-1/> (дата обращения: 06.03.2023).
150. Pozar D.M. Microwave Engineering. 4th ed. Wiley, 2011. 960 p.
151. 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.
152. Absorptive SP4T, Solid State Switch, 1 - 6000 MHz, 50Ω. [Электронный ресурс]. Datasheet SP4T RF Switch. Режим доступа: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZSWA4-63DR+.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).
153. Reflective SPDT, Solid State Switch, 5 - 6000 MHz, 50Ω. [Электронный ресурс]. Datasheet SPDT RF Switch. Режим доступа: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZSW2-63DR+.pdf> (дата обращения 06.03.2023).
154. Low Noise Amplifier. Mini-Circuits ZX60-272LN-S+ Datasheet. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://octopart.com/datasheet/mini-circuits/ZX60-272LN-S+> (дата обращения 14.03.2023).
155. Amplifier. Mini-Circuits ZX60-2534M-S+ Datasheet. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://octopart.com/datasheet/mini-circuits/ZX60-2534M-S+> (дата обращения 14.03.2023).
156. Narda MITEQ. 4203-16 Datasheet [Электронный ресурс]. URL: https://www.artisanng.com/info/L_3_Narda_Miteq_4203_16_Datasheet_2018422171655.pdf (дата обращения: 20.03.2023)
157. Vesnin S.G. Portable microwave radiometer for wearable devices/ S.G. Vesnin, M.K. Sedankin, L.M. Ovchinnikov // Sensors and Actuators A: Physical. 2021. Vol. 318. Article ID 112506. 11 p.

158. АО "Микран". Детекторы СВЧ-сигналов: краткий каталог изделий [Электронный ресурс]. Томск: АО "Микран", 2023. Режим доступа: <https://www.micran.ru/upload/iblock/4b3/vuliqtesl551nw9hzj6480688i5xx117/Детекторы.pdf>.
159. Analog Devices. Ultralow distortion, ultralow noise op amp AD797 [Электронный ресурс]: Datasheet AD797. Norwood: Analog Devices, 2015. Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad797.pdf>.
160. AliExpress. Модуль AD9226 12-битный два канала [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://aliexpress.ru/item/1005007268524319.html?sku_id=12000040008638945.
161. 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.
162. 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 Международной конференции – Москва, 2022. С. 144.
163. 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.
164. 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.

165. Щегляков А. В. Исследование характеристик микроволновых радиометрических систем различных типов на основе универсального приемо-передатчика 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

Копии актов о внедрении результатов диссертационной работы



ООО «КБ «СПАРТ»
ИНН/КПП 7017493702/701701001
ОГРН 1227000005210
634012, г. Томск, ул. Елизаровых, д.26
Телефон рабочий/мобильный:
8(3822)70-02-77 / +7-952-883-67-67
<https://www.kbspart.ru>
E-mail: kb.spart@inbox.ru

Ведущему инженеру
ООО «КБ «СПАРТ»
А.В. Щеглякову

Исх. №26080801АВ от 08.08.2026г.

Акт внедрения

Акт

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Щеглякова Артема Владимировича.

Настоящим актом подтверждаю внедрение (использование) при реализации СЧ ОКР «Приемник-22», проводимой ООО «КБ СПАРТ» для нужд предприятия ОПК Российской Федерации, следующих результатов диссертационной работы Щеглякова Артема Владимировича:

1. Способ измерения чувствительности бортовых высокочастотных радиолокационных приемников на основе квази-нулевого и дифференциального методов измерений.

2. Алгоритм работы системы измерения чувствительности радиолокационного приемника Х-диапазона на основе предложенного способа измерений.

3. Структурная схема системы измерения электрических параметров радиолокационного приемника Х-диапазона.

Указанные результаты внедрены в производство и отражены в руководстве по эксплуатации Б.468993.008РЭ, разработанного при реализации СЧ ОКР «Приемник-22». При разработке системы измерения электрических параметров радиолокационного приемника Х-диапазона А.В. Щегляков являлся ответственным исполнителем.

И.о. технического директора,
«ООО КБ «СПАРТ», к.ф.-м. н.

 А.С. Мironьчев
«08» 08 2026 г.





«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
и инновациям ФГАОУ ВО ТУСУР

С.П. Куксенко

03» 10 20 25 г.

АКТ

внедрения (использования) результатов диссертационной работы

Щеглякова Артема Владимировича

Настоящим актом подтверждаю факт использования (внедрения) следующих результатов диссертационной работы Щеглякова А.В.:

1. Результаты исследование динамических характеристик микроволновых радиометров различных видов на основе экспериментальной установки реконфигурируемой модульной радиометрической системы.
2. Структурная схема быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений для исследования быстропротекающий радиотепловых процессов.
3. Алгоритм работы быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений.

Указанные результаты использованы в отчете по гранту РНФ № 21-79-00168 «Новый метод пассивных микроволновых исследований быстропротекающих радиотепловых процессов природного и антропогенного характера» 2021-2023 гг.

Руководитель НИР по гранту РНФ № 21-79-00168,
доцент, к.т.н.



А.В. Убайчин

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное)

Копии охранных документов на результаты интеллектуальной деятельности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

2 763 694⁽¹³⁾ C1(51) МПК
G01R 29/08 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 29/08 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021103876, 17.02.2021
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.02.2021
Дата регистрации:
30.12.2021

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 17.02.2021

(45) Опубликовано: 30.12.2021 Бюл. № 1

Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Аркатова
Ольга Евгеньевна

(72) Автор(ы):
Убайчин Антон Викторович (RU),
Абдирасул Уулу Тилекбек (RU),
Жук Григорий Григорьевич (RU),
Кречетов Денис Сергеевич (RU),
Щегляков Артем Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники» (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2485462 C2, 20.06.2013. RU
2431856 C1, 20.10.2011. RU 2619841 C1,
18.05.2017. EP 1739867 B1, 29.08.2007. GB
2211952 B, 13.11.1991.

(54) РАДИОТЕРМОМЕТР

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике, а именно, к устройствам для измерения характеристик электромагнитного поля, применяемым в неразрушающем контроле диэлектриков, медицине. Техническим результатом является повышение точности измерений и упрощение конструкции. Технический результат достигается тем, что радиотермометр содержит антенну и термостатированную плату,

на которой размещены согласованная нагрузка и генератор шума, и при этом отличается от прототипа тем, что выход антенны соединен с первым входом первого переключателя, выход которого соединен с первым входом направленного ответвителя, а второй и третий входы соединены с выходом короткозамыкателя и третьим выходом блока управления соответственно. 2 ил.

RU 2 763 694 C 1

RU 2 763 694 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

2 794 063⁽¹³⁾ C1

(51) МПК
G01R 29/08 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 29/08 (2023.02)

(21)(22) Заявка: 2022125710, 01.10.2022 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 01.10.2022 Дата регистрации: 11.04.2023 Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 01.10.2022 (45) Опубликовано: 11.04.2023 Бюл. № 11 Адрес для переписки: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ФГБОУ ВО "ТУСУР"	(72) Автор(ы): Убайчин Антон Викторович (RU), Щегляков Артем Владимирович (RU), Абдирасул Уулу Тилекбек (RU) (73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (RU) (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2439594 C1, 10.01.2012. RU 2698523 C1, 28.08.2019. RU 2211455 C1, 27.08.2003. Статья: "МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТР ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ", Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2013. US 7088086 B2, 08.08.2006.
---	---

(54) МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТР

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике, а именно к устройствам для измерения характеристик электромагнитного поля, и может быть использовано, например, в дистанционном зондировании, неразрушающем контроле, дистанционном измерении температуры. Микроволновый радиометр содержит источник тока (6), выход которого через генератор шума (5) соединен с первым входом переключателя (16), первый выход которого соединен с первым входом направленного ответвителя (2) через первый аттенуатор (4), а второй выход соединен через второй аттенуатор (15) с одноименным входом модулятора (3), второй вход направленного ответвителя (2) соединен с выходом антенны (1), а выход соединен с первым входом модулятора (3), выход которого соединен

с входом фильтра высоких частот (9) через приемник (7) и импульсный усилитель (8), выход компаратора (11) соединен с первым входом блока управления (12), второй выход которого соединен с третьим входом модулятора (3), а третий и четвертый выходы соответственно соединены с выходной шиной (14) и вторым входом переключателя (16), термостатированную плату (13), на которой размещены источник тока (6), генератор шума (5), переключатель (16), первый (4) и второй (15) аттенуаторы, направленный ответвитель (2) и модулятор (3), согласно изобретению выход фильтра высоких частот (9) соединен с первым входом аналогового мультиплексора (17), первый, второй и третий выходы которого соединены с одноименными интеграторами (18), (19) и (20), а четвертый выход

RU 2 794 063 C 1

RU 2 794 063 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2020615093**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2020615093
Дата регистрации: 14.05.2020
Номер и дата поступления заявки:
2020614172 11.04.2020
Дата публикации и номер бюллетеня:
14.05.2020 Бюл. № 5
Контактные реквизиты:
dualog@mail.ru

Автор(ы):
Жук Григорий Григорьевич (RU),
Убайчин Антон Викторович (RU),
Абдирасул уулу Тилекбек (KG),
Щегляков Артем Владимирович (KZ)
Правообладатель(и):
Жук Григорий Григорьевич (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа управления приемником системы связи на основе шумовых сигналов тепловой природы

Реферат:

Программа может быть использована в области радиосвязи, радионавигации. Программа предназначена для микроконтроллера входящего в состав приемника системы связи на основе шумовых сигналов тепловой природы. Приемник реализован на основе нулевого радиометра с изменением длительности опорного сигнала. Управление приемником осуществляется посредством микроконтроллера. Программа позволяет управлять рабочими процессами приемника путем генерирования сигналов двух типов: импульсный сигнал со скважностью следования 2 и изменяемый по длительности широтный импульсный сигнал.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 2 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021613416

Программа управления счетчиком для широтно-
импульсной модуляции канала подшумливания в
микроволновом радиометре

Правообладатель: *Щегляков Артем Владимирович (RU)*Автор: *Щегляков Артем Владимирович (RU)*

Заявка № 2021612599

Дата поступления 19 февраля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 марта 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021616119

**Программа управления микроволновым радиометром
для дистанционного зондирования**

Правообладатель: **Щегляков Артем Владимирович (RU)**

Авторы: **Щегляков Артем Владимирович (RU), Убайчин
Антон Викторович (RU), Абдирасул уулу Тилекбек (KG),
Жук Григорий Григорьевич (RU), Кречетов Денис
Сергеевич (RU)**

Заявка № **2021612604**

Дата поступления **19 февраля 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **16 апреля 2021 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023610726

**Программа управления коэффициентом стоячей волны
согласованной нагрузки**

Правообладатель: *Щегляков Артем Владимирович (RU)*Авторы: *Щегляков Артем Владимирович (RU), Убайчин
Антон Викторович (RU), Жук Григорий Григорьевич
(RU), Абдирасул уулу Тилекбек (RU)*Заявка № **2022685773**Дата поступления **21 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **12 января 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023614176

Программа управления селекцией импульсов по уровню амплитуды.

Правообладатель: **Щегляков Артем Владимирович (RU)**

Авторы: **Щегляков Артем Владимирович (RU), Убайчин Антон Викторович (RU), Жук Григорий Григорьевич (RU), Абдирасул уулу Тилекбек (RU)**



Заявка № **2022685736**

Дата поступления **22 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **27 февраля 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023610085

**Программа управления фазой коэффициента отражения
согласованной нагрузки**

Правообладатель: *Щегляков Артем Владимирович (RU)*Авторы: *Щегляков Артем Владимирович (RU), Убайчин
Антон Викторович (RU), Жук Григорий Григорьевич
(RU), Абдирасул уулу Тилекбек (RU)*Заявка № **2022685774**Дата поступления **22 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА ПЛЕНАРНОГО ЗАСЕДАНИЯ

**XXVI Международной научно-технической
конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР»**

19 мая 2021 г., Томск

Щеглов Артем Владимирович
Секция 1 Радиотехника и связь
Подсекция 1.3 Радиотехника

**Председатель конференции
Ректор ТУСУРа**

В.М. Рулевский





ТУСУР | TUSUR UNIVERSITY

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

**XXVI Международной научно-технической
конференции студентов, аспирантов
и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР»**

19 - 21 мая 2021 г., Томск

Щеляков Артем Владимирович

Секция 1. Радиотехника и связь

Подсекция 1.3 Радиотехника

**Председатели конференции
Ректор ТУСУР**



[Signature]
В.М. Рулевский



Сертификат участия

Рост
UP

Награждается проект

USRP-РАДИОМЕТР

Авторы проекта:

Шегляков Артем Владимирович, Абдирасул уулу Тилекбек, Жук Григорий Григорьевич, Алексеев Егор Владимирович, аспиранты ТУСУРа; **Кречетов Денис Сергеевич,** магистрант ТУСУРа

Руководитель:

Убайчин А.В., ТУСУР, РТФ, к.т.н., доцент каф. РСС

Ректор ТУСУРа

В.М. Рулевский

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



«ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»

Сертификат участника
XVIII Международной научно-практической
конференции «Электронные средства
и системы управления»
16 – 18 ноября 2022 г.

Щегляков Артем Владимирович



Председатель конференции
Ректор ТУСУРа

В.М. Рулевский

Томск 2022



IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) to the 100th anniversary of the legendary NETI rector Georgy Lyshchinsky

June 30 – July 4, 2022, Eriagol, Altai Republic, Russia

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

THIS CONFIRMS THAT

Shchegliakov Artyom

PRESENTED A REPORT ENTITLED:

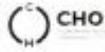
«A High-Performance Microwave Radiometer Design for Sensing High-Temperature Objects»

AT THE SECTION

Microwave Technology and Telecommunications

Chair of
EDM 2022

**Sergey
Kharitonov**



CERTIFICATE OF PARTICIPATION



PIERE

2nd International
Conference
«Problems of Informatics,
Electronics and Radio
Engineering (PIERE)»

THIS CONFIRMS THAT

Artem
Scheglyakov

11-13th November, 2022,
Novosibirsk State
Technical University

PRESENTED A REPORT ENTITLED:

«Errors in Sensing High-Speed Thermal Radio Emission Processes with
a Compensating Radiometer»

AT THE SECTION:

Electrical engineering and circuitry

Chair of
PIERE 2022

Alexey
Vostretsov



ДИПЛОМ I СТЕПЕНИ

награждается

Щегляков Артем Владимирович

за лучший доклад на
Международной научно-практической
конференции «Электронные средства
и системы управления»

16 - 18 ноября 2022 г.

Секция 2 «Радиотехнические и телекоммуникационные
системы»

Председатель конференции
Ректор ТУСУРа



г. Томск

В.М. Рулевский

ТУСУР**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-
ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»**

ДИПЛОМ

II СТЕПЕНИ

за лучший доклад
на Международной научно-практической
конференции **«Электронные средства
и системы управления»**

Щегляков Артём Владимирович

секция 13 «Автоматизация и оптимизация систем управления и
обработки информации»

26 - 28 ноября 2025 г.



Председатель конференции
Ректор ТУСУРа

В. М. Рулевский

г. Томск