

На правах рукописи

Чижиков Сергей Владимирович

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ  
МОДУЛЯ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА  
МНОГОКАНАЛЬНОГО МНОГОЧАСТОТНОГО РАДИОТЕРМОГРАФА

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной  
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Гудков Александр Григорьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологий приборостроения Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Официальные оппоненты: **Потрахов Николай Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

**Данилов Арсений Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, доцент Института БМС Национального исследовательского университета МИЭТ

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 на базе Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

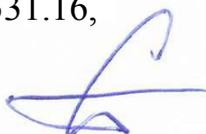
Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета в двух экземплярах по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте МГТУ им. Н. Э. Баумана [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок 8 (499) 263-66-33, доб. 3628

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.16,  
кандидат технических наук



Сырицкий Антони Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Технология микроволновой радиометрии находит применение в различных сферах народного хозяйства. Метод позволяет дистанционно получать информацию о температуре как на поверхности, так и в глубине исследуемого объекта, за счет приема электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Существующие одноканальные и одночастотные микроволновые радиометры не позволяют измерить внутреннюю температуру и определить местоположение источника повышения температуры с необходимой точностью, многоканальные одночастотные и одноканальные многочастотные микроволновые радиометры также не позволяют решить полностью поставленные задачи, поэтому целесообразно разработать многоканальный многочастотный радиометр, который позволит обеспечить выполнение данных требований.

Работа посвящена разработке основного элемента многоканального многочастотного радиотермографа – модуля сверхвысокочастотного (СВЧ) радиометрического приемника, обеспечивающего высокую точность измерений температуры и местоположения источника повышения температуры при высоких требованиях по динамическому диапазону, помехозащищенности, малому шуму и энергопотреблению. В настоящее время публикаций, посвященных данной тематике исследований, в литературных источниках нет.

Сложность решения поставленных задач требует разработки специального конструкторско-технологического обеспечения создания модуля СВЧ радиометрического приемника на этапах разработки и производства.

**Цель диссертационной работы:** конструкторско-технологическое обеспечение создания модуля СВЧ радиометрического приемника многоканального многочастотного радиотермографа для измерения радиояростной температуры в глубине исследуемого объекта.

### **Основные задачи:**

1. Провести анализ схем и конструкций существующих микроволновых радиометров, позволяющий выявить основные элементы приемника, определяющие технические характеристики и функциональные возможности радиометров, и сформулировать требования к их параметрам.

2. Разработать способы улучшения выходных характеристик монолитных интегральных схем (МИС) малошумящего усилителя (МШУ) и переключателя и изготовить макет модуля СВЧ радиометрического приемника.

3. Разработать методики конструкторско-технологического обеспечения радиометрических измерений на этапах разработки и производства модуля СВЧ радиометрического приемника.

4. Разработать и изготовить стенд для радиометрических измерений, включающий макет модуля СВЧ радиометрического приемника и помехозащищенные антенны-аппликаторы.

5. Разработать алгоритм и программное обеспечение визуализации измеряемых радиотермометрических данных для удобного представления информации о внутренних тепловых полях исследуемого объекта.

**Методы исследования.** В работе использовались фундаментальные положения технологии приборостроения, радиотехники, методы конструкторско-технологического проектирования, методы схмотехнического моделирования и автоматизированного проектирования на основе программных средств, а также методы электродинамического анализа микроволновых структур, методы численного моделирования процессов переноса вещества и заряда.

**Научная новизна:**

1. Разработан алгоритм моделирования конструктивных параметров МИС МШУ, переключателя и входящих в них элементов, позволяющий исследовать влияние изменения параметров на рабочие характеристики и оценить наиболее значимые из них для обеспечения выполнения заданных требований к прямым и обратным потерям, динамическому диапазону и малому энергопотреблению МШУ и переключателя, базовым элементом которых является транзистор.

2. Разработаны методики проведения технологических операций калибровки приемника, позволяющие осуществить калибровку как по температуре источника, так и по глубине его залегания, и тем самым повысить точность радиометрических измерений.

3. Разработан способ подавления внешних импульсных помех при эксплуатации прибора, базирующийся на программной реализации итерационных процедур выявления и дискриминации импульсных помех, позволяющий повысить точность измерений от 2 до 10 раз в зависимости от интенсивности помех.

4. Разработан алгоритм расчета внутреннего теплового поля по результатам измерения параметров электромагнитных волн объекта на его поверхности в нескольких частотных диапазонах, что позволило разработать программное обеспечение визуализации 3D изображения теплового поля с применением сплайновой интерполяции.

**Практическая значимость работы:**

1. Предложенная методика конструкторско-технологического обеспечения создания модуля СВЧ приемника радиотермографа с введением дополнительных операций и соответствующего технологического оборудования в технологический процесс его производства позволяют обеспечить улучшение его параметров назначения.

2. Впервые разработанные макеты многочастотных многоканальных модулей СВЧ приемников для радиотермометрии обеспечивают точность относительных измерений температуры до 0,1 °С и определение местоположения источника повышенной температуры до 1 мм.

3. Общность конструкторско-технологических решений основных элементов СВЧ приемника позволяет использовать их для других применений, включая сельское хозяйство, мелиорацию и т.д.

**Достоверность результатов работы** достигается использованием общепринятых достоверных методов проектирования и моделирования, основанных на фундаментальных положениях технологии приборостроения. Полученные результаты не противоречат общепризнанным принципам и результатам исследований, опубликованным в работах отечественных и зарубежных авторов. Численные результаты, полученные с помощью разработанных методик, показали хорошее согласование с результатами экспериментальных исследований.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм моделирования конструктивных параметров МИС МШУ, переключателя и входящих в них элементов, позволивший исследовать влияние изменения параметров на рабочие характеристики и обеспечить выполнение требований к параметрам назначения устройств.

2. Методики проведения технологических операций калибровки приемника, позволившие осуществить калибровку как по температуре источника, так и по глубине его залегания.

3. Способ подавления внешних импульсных помех при эксплуатации прибора, базирующийся на программной реализации итерационных процедур выявления и дискриминации импульсных помех.

4. Алгоритм расчета внутреннего теплового поля по результатам измерения параметров электромагнитных волн исследуемого объекта на его поверхности в нескольких частотных диапазонах.

5. Схема и конструкция многоканального многочастотного СВЧ приемника, обеспечивающая возможность проведения радиометрических измерений относительных изменений температуры исследуемого объекта с точностью до 0,1 °С и определения месторасположения источника повышения температуры до 1 мм.

**Соответствие паспорту специальности 2.2.9 «Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры»** в части следующих направлений исследований:

- Разработка новых и совершенствование существующих функциональных и физических моделей приборов радиоэлектронной аппаратуры с учетом решения вопросов обеспечения их эффективного применения;

- Разработка, исследование и внедрение новых видов технологического оборудования для контроля и испытаний приборов с учётом решения вопросов обеспечения их надежности, экологической безопасности окружающей среды и возможности внедрения в цифровые информационные технологии.

**Личный вклад автора.** Все основные научные положения, определение цели, постановка задач, выводы и рекомендации сформулированы лично автором. Результаты теоретических исследований получены лично автором, экспериментальные исследования проводились с его участием. Личное участие автора в получении изложенных в диссертации результатов отражено в публикациях и подтверждено соавторами. Во всех необходимых случаях использования заимствованных результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 научных конференциях: 29-й и 31-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2019 г. и 2022 г.), Инжиниринг & Телекоммуникации — En&T 2019 (г. Москва, 2019 г.), 6-ой, 7-ой и 9-ой международной школе-конференции "Saint-Petersburg OPEN" по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям (г. Санкт-Петербург, 2019 г., 2020 г. и 2022 г.), 2-ой Международной Конференции ФКС-2021 «Физика конденсированных состояний», посвященная 90-летию со дня рождения академика Ю.А. Осипьяна (г. Черноголовка, 2021 г.), XLVI Академические чтения по космонавтике «Королёвские чтения» (г. Москва, 2022 г.), Международная научная конференция «Системы и технологии цифрового медицины – STDH-2023» (г. Ташкент, 2023 г.), 9-ая Всероссийская микроволновая конференция (г. Москва, 2024 г.).

**Внедрение и использование.** Материалы диссертации использовались в ходе следующих работ: Соглашение Минобрнауки РФ № 14.574.21.0116 о предоставлении субсидии от 12.11.2014 г. «Разработка научно-технических решений для повышения надежности и радиационной стойкости элементной базы полупроводниковой СВЧ электроники аппаратуры космического назначения»; Соглашения РФФИ № 19-19-00349 от 24.04.2019 и № 19-19-00349-П от 19.05.2022 «Создание методики и многоканального многочастотного СВЧ радиотермографа на основе монолитных интегральных схем для нахождения 3D распределения и динамики радиояркой температуры в глубине тела человека»; проект РФФИ № 20-37-90124/20 от 24.08.2020 «Выявление и исследование ключевых элементов медицинских радиотермометров в монолитном интегральном исполнении, обеспечивающих выполнение предъявляемых к ним высоких требований по чувствительности, точности, широкополосности, помехозащищенности»; Соглашение РФФИ № 22-19-00063 от 13.05.2022 «Новые подходы к дистанционному определению портрета профиля влажности по измеренным характеристикам собственного теплового поля земной поверхности».

Результаты работы используются в учебном процессе подготовки специалистов по специальности 11.05.01 «Проектирование и технология

радиоэлектронных средств», бакалавров по направлению 28.03.02 «Наноинженерия» и магистров по направлению 28.04.02 «Наноинженерия» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Получен акт внедрения результатов работы в следующие дисциплины: «Технология радиоэлектронных систем», «Основы проектирования наноприборов и систем на их основе».

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования представлены в 30 научных работах в рецензируемых журналах и изданиях из перечня ВАК РФ и 10 статьях, индексируемых в Scopus и Web of Science, в том числе одна публикация в журнале Sensors and Actuators A: Physical (Q1), а также в 2 монографиях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Основное содержание работы изложено на 149 страницах основного текста и на 54 страницах приложений вспомогательного материала, работа содержит 117 рисунков, 10 таблиц, список используемой литературы из 80 библиографических источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность диссертационного исследования, сформулирована цель и задачи работы, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость, представлены общие сведения о работе.

**В первой главе** проведен обзор литературы, посвященный современным радиометрам, их схемам и конструкциям.

Технологией одноканальной и одночастотной микроволновой радиометрии занимались такие ученые как Гуляев Ю.В., Веснин С.Г., Гудков А.Г., Сидоров И.А. Леушин В.Ю., Шашурин В.Д., Тихомиров В.Г., Соловьев Ю.В., Егоров С.Т., Шутко А.М., Лосев А.Г., Новичихин Е.П., Z. Popovich, P. Momenroodaki, P. Maccarini, P. Stauffer, и другие отечественные и зарубежные ученые. Однако существующие одноканальные и одночастотные микроволновые радиометры не позволяют измерить внутреннюю температуру с точностью 0,1 °С и определить местоположение источника повышения температуры до 1 мм, многоканальные одночастотные и одноканальные многочастотные микроволновые радиометры также не позволяют решить полностью поставленные задачи, поэтому целесообразно разработать многоканальный многочастотный микроволновый радиометр, который позволит обеспечить выполнение данных требований.

Определено, что обеспечение необходимой точности измерений возможно при применении гибридных интегральных схем (ГИС) и МИС СВЧ технологий и информационного обеспечения при построении многоканальной многочастотной схемы микроволнового радиометра. Выявлено, что основными элементами конструкции приемника микроволнового радиометра являются переключатель и малошумящий усилитель. Определены предъявляемые к ним требования.

При построении миниатюрного радиотермографа возникают дополнительные ограничения. Так, при коэффициенте усиления порядка 80 дБ требуется до 4 каскадов усиления с потреблением тока в сотни миллиампер, что приводит к значительному повышению температуры СВЧ приемника и вследствие этого к повышению погрешности измерений. Существующую проблему можно решить созданием новых активных элементов специализированных монолитных СВЧ микросхем - малошумящих транзисторов, для которых уже при проектировании будут учитываться индивидуальные требования для применения в радиометрическом приемнике: высокая энергоэффективность, прежде всего низкое потребление тока, пониженное тепловыделение в окружающее пространство, малый уровень шумов и достаточный коэффициент усиления.

Таким образом, показана актуальность создания модуля СВЧ радиометрического приемника многоканального многочастотного радиотермографа и соответствующего конструкторско-технологического обеспечения для медицины, сельского хозяйства и других применений, и тем самым подтверждает научную и практическую значимость поставленной цели и решаемых задач.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы разработки алгоритма моделирования конструктивных параметров МИС МШУ, переключателя и входящих в них элементов, проведения численного моделирования параметров конструкций и натурального моделирования с последующим созданием модуля СВЧ радиометрического приемника.

В первой части главы по принципу метода декомпозиции произведено разделение модуля СВЧ приемника на элементы (МШУ и переключатель), и на базе теории чувствительности выявлен наиболее влияющий на их параметры общий элемент – транзистор. На основании этого был разработан алгоритм моделирования конструктивных параметров этих рассматриваемых устройств, включающий блок определения влияния конструктивных параметров псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ) на его выходные характеристики (крутизну передаточной характеристики, выходную дифференциальную проводимость (внутреннее сопротивление), коэффициент усиления и коэффициент шума) и далее на выходные характеристики МШУ и переключателя с целью последующей корректировки его конструкции для построения на его основе МИС МШУ и переключателя. Блок включает два этапа: первый этап позволял исследовать параметры гетероструктуры транзистора (толщины и состав слоев, глубину подзатворной канавки и др.), изменение которых в технологически допустимых значениях приводило к значительным изменениям выходных характеристик транзистора; второй этап позволял исследовать параметры конструкции транзистора (расположение затвора, ширина подзатворной канавки, ширина электродов и

др.), изменение которых приводило к значительным изменениям выходных характеристик МШУ и переключателя.

Влияние параметров конструкции транзистора определялось при моделировании распределения полей и заряда в структуре и последующем построении вольтамперной характеристики (ВАХ) с помощью использования программного комплекса TD Synopsys.

Далее проведено моделирование исследуемых параметров. В результате численного моделирования на основании предложенного блока алгоритма установлено, что доминирующее влияние оказывает глубина травления подзатворной канавки, определена глубина расположения затворного электрода – 84 нм, которая позволила достичь необходимой крутизны (статического коэффициента усиления) при в 2 раза меньшем токе покоя - 10-15 мА, а также что более стабильными характеристиками обладают транзисторы с центральным расположением затвора в канавке и с расположением затвора у истока при ширине канавки затвора 1,6 мкм (Рисунок 1).

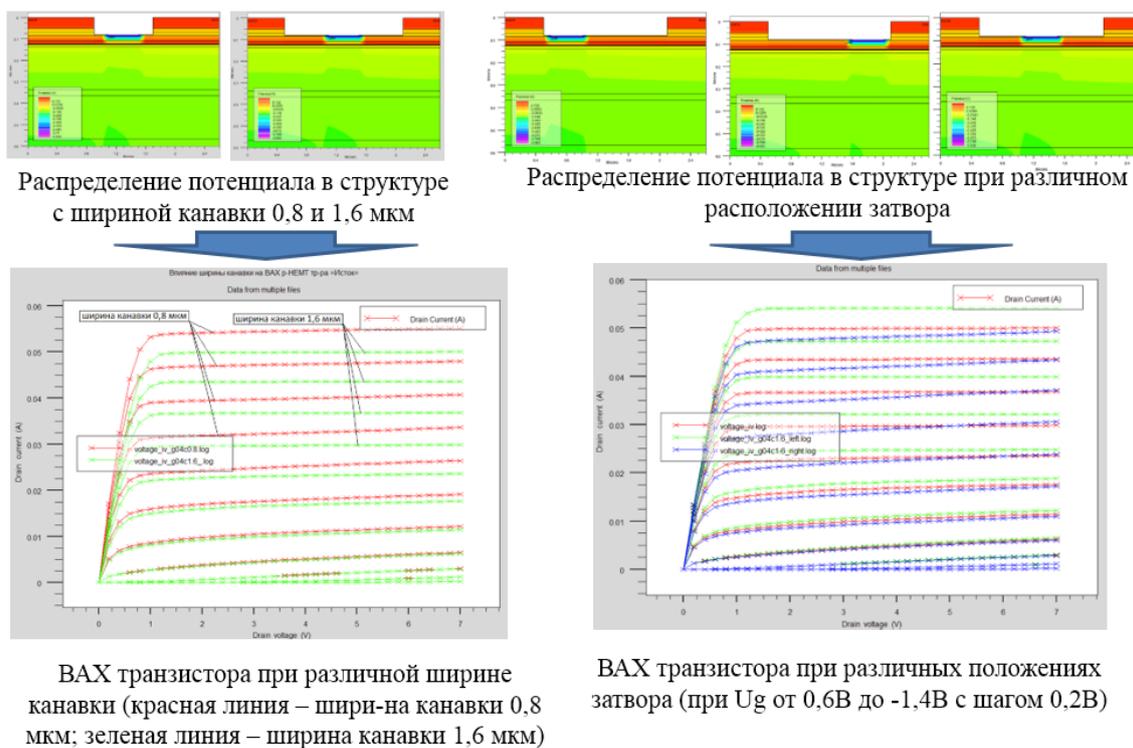


Рисунок 1. Результаты моделирования конструкции транзистора

Полученные результаты использовались при моделировании МИС МШУ и переключателя с применением стандартных методов проектирования. Результаты моделирования МИС МШУ и переключателя на основе смоделированного энергоэффективного транзистора удовлетворяют требованиям, предъявляемым к параметрам приемника (Таблица 1).

Таким образом, результаты численного моделирования позволили разработать конструкцию транзистора, обеспечивающую выполнение заданных

требований к прямым и обратным потерям, динамическому диапазону, малому коэффициенту шума и малому энергопотреблению приемника.

Вторая часть главы посвящена разработке и экспериментальным исследованиям МИС МШУ и переключателя модуля СВЧ на основе разработанного транзистора с применением стандартных методов проектирования.

Транзисторы в кристаллах МШУ и переключателя были изготовлены по стандартной для группы материалов  $A_3B_5$  технологии с применением электронной литографии. Изготовленные МШУ имели параметры, указанные в Таблице 1. Изготовленный переключатель обеспечивает на частоте 0,5 ГГц потери в одном канале на проход СВЧ сигнала до 0,4 дБ и изоляцию не хуже 27 дБ, на частоте 3,0 ГГц - потери в одном канале на проход СВЧ сигнала до 0,9 дБ и изоляцию не хуже 15 дБ.

Таблица 1.

Параметры МИС МШУ

Параметр	Требуемые значения	Значения, полученные при моделировании	Экспериментальные значения	Значения после проведения термотренировки
Коэффициент шума МШУ	менее 1,5 дБ	1,057 дБ	1,4 дБ	1,3 дБ
Коэффициент усиления МШУ	не менее 20 дБ	28,66 дБ	20 дБ	20 дБ
Ток потребления МШУ	менее 15 мА	10 мА	15 мА	12 мА

В этой же части работы была проведена оценка возможности улучшения характеристик МШУ технологическими методами (термотренировкой, проводимой по стандартной методике). Введение операции термотренировки транзистора позволило снизить токопотребление всей микросхемы усилителя на 20%, улучшить ее шумовые характеристики и достичь стабилизации токов канала – уменьшен разброс значений тока в три раза (Таблица 1).

В заключительной части главы представлены результаты разработки и изготовления макета модуля пятиканального двухчастотного радиометрического приемника в ГИС исполнении с частичным использованием МИС на основе разработанных МШУ и переключателя, внешний вид которого показан на Рисунке 2, а.

Характеристики разработанного приемника: диапазон частот 1-го частотного диапазона – 700-860 МГц; 2-го частотного диапазона – 1340-1500 МГц; Коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) входов 5-канальных СВЧ-модулей 1 и 2 частотных диапазонов менее 1,4; коэффициент шума каждого

приемного канала менее 1,4 дБ; затухание входных канальных СВЧ выключателей в режиме запираения более 25 дБ; шумовая температура встроенного генератора шума более 360 К; уровень выходного сигнала модулей на нагрузке 1 кОм более 30 мВ.



а



б

Рисунок 2. Внешний вид макета малогабаритного пятиканального двухчастотного СВЧ приемника (показана одна из частот) (а) и стенд для калибровки по глубине с использованием имитатора источника излучения (б)

Таким образом, определены конструктивные параметры МИС МШУ, переключателя и их общего базового элемента - транзистора, влияющие на их выходные характеристики, и технологические способы улучшения выходных характеристик элементов и устройства в целом путем выбора параметров конструкции и введения дополнительной операции термотренировки в технологический процесс изготовления с целью улучшения энергоэффективности микросхемы за счет уменьшения тока потребления с сохранением динамического диапазона и уменьшения собственных шумов, что позволило создать модуль многоканального многочастотного СВЧ радиометрического приемника, и результаты 2 главы позволяют перейти к решению задач следующей главы.

**Третья глава** посвящена разработке методик проведения технологических операций калибровки, а также способа подавления внешних импульсных помех при эксплуатации модуля СВЧ радиометрического приемника.

Для установления однозначного соответствия выходного сигнала радиометрического приемника внутренней температуре биологического объекта используется процедура калибровки. Радиометры требуют два типа калибровки: внутреннюю, с использованием встроенных в приемник эталонных источников теплового шума, и внешнюю, с применением внешнего оборудования для проведения сравнения с контрольной мерой.

В первой части главы предложена технологическая операция внутренней калибровки модуля СВЧ радиометрического приемника и соответствующая методика ее проведения с целью повышения разрешающей способности устройства. Внутренняя калибровка реализуется программным путем

внутренним микроконтроллером радиометрического приемника и предусматривает управление внутренним переключателем (модулятором) так, чтобы периодически подключать ко входу приемника сигналы от антенн-аппликаторов, генератора шума и внутренней эталонной нагрузки. При этом микроконтроллером на выходе квадратичного детектора измеряются соответствующие значения, которые пересчитываются по известным зависимостям в значения антенных температур с учетом флуктуаций коэффициента усиления и смещения нуля.

На основе результатов измерений определяется значение антенной температуры с учетом внутренней калибровки по двум эталонным сигналам:

$$T_1 = \frac{U_{m1} - U_L}{U_{NG} - U_{m1}} (T_{NG} - T_L) + T_L, \quad (1)$$

где  $U_{NG}$ ,  $U_L$ ,  $U_{m1}$  – напряжения аналогового сигнала на выходе квадратичного детектора за один период модуляции;  $T_{NG}$ ,  $T_L$  – радиояркие температуры измеренные при подключении генератора шума и нагрузки, соответственно;

Следует отметить, что полученное для вычисления антенной температуры выражение (1) не зависит ни от параметров тракта, которые нестабильны, ни от коэффициента отражения, то есть от степени согласования антенны с исследуемым объектом, что гарантирует более высокую точность измерений, достигаемую благодаря внутренней калибровке.

Таким образом, в первой части главы представлена операция технологического процесса, позволяющая повысить точность измерений за счет проведения внутренней калибровки модуля СВЧ радиометрического приемника. В результате проведения технологической операции калибровки устанавливается взаимно-однозначное соответствие между мощностью входного сигнала и значением сигнала на выходе радиометрического приемника.

Вторая часть главы посвящена разработке технологической операции внешней калибровки за счет применения имитатора источника излучения с целью получения калибровочных данных для восстановления 3D-распределения внутреннего теплового поля по измеренным значениям антенных температур на разных частотах. Для этого был разработан калибровочный стенд (Рисунок 2, б), включающий в себя два термостата с различными задаваемыми температурами: один имитирует исследуемый объект, другой – источник излучения с повышенной температурой. Антенны-аппликаторы устанавливаются на радиопрозрачную стенку внешнего термостата. Конструкция стенда обеспечивает возможность перемещения имитатора источника излучения в среде внешнего термостата с шагом 1 мм от радиопрозрачной стенки. При движении имитатора источника излучения от радиопрозрачной стенки внешнего термостата измеряются и запоминаются значения температур, полученные значения пересчитываются в поправочные коэффициенты, сохраняются в калибровочном файле рабочего компьютера и используются в промежутках времени между калибровками.

Таким образом, во второй части главы представлена технологическая операция внешней калибровки, которая на основании косвенных измерений радиоярких температур с помощью многоканального многочастотного радиотермографа позволяет измерить изменение относительной температуры по глубине с точностью  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ее местоположения до  $1\text{ мм}$  и получить калибровочные данные для восстановления 3D-распределения внутреннего теплового поля по измеренным значениям антенных температур на разных частотах.

В заключительной части главы представлена разработка способа подавления помех при эксплуатации, базирующегося на программной реализации итерационных процедур выявления и дискриминации импульсных помех. Применение данного способа позволило повысить точность измерений от 2 до 10 раз в зависимости от интенсивности помех (Рисунок 3). На данную программу было получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

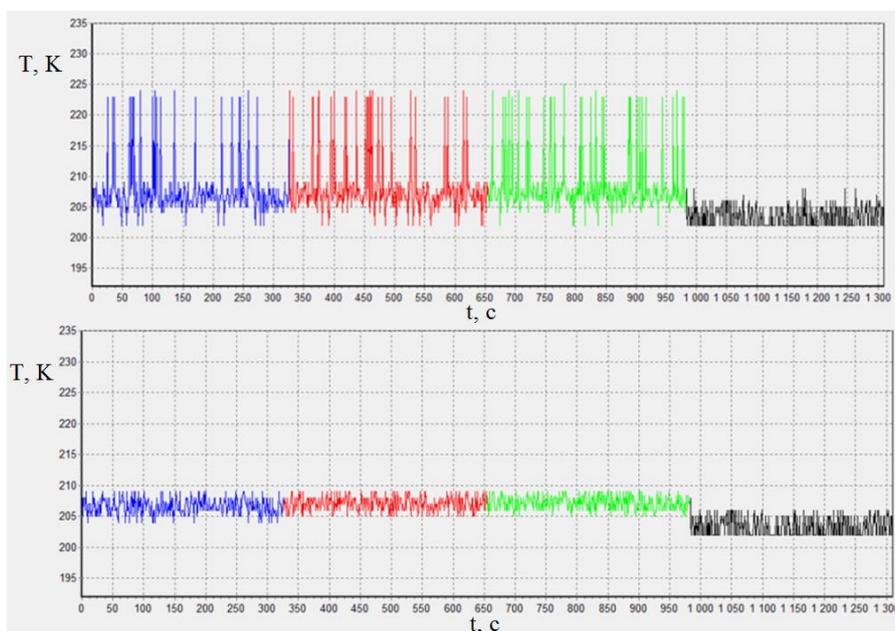


Рисунок 3. Результат применения программы подавления импульсных помех: сверху – сигнал с помехами; внизу – результат подавления

Таким образом, разработаны технологические способы повышения точности проведения радиотермометрических измерений модулем СВЧ радиометрического приемника, и результаты 3 главы позволяют перейти к решению задач следующей главы.

**Четвертая глава** посвящена разработке измерительного стенда для технологического обеспечения создания модуля СВЧ приемника, включающего в себя имитатор объекта, антенны-аппликаторы и программу отображения внутренней температуры на промежуточной плоскости.

Для выбора конструкции антенн было проведено моделирование параметров электромагнитного поля вибраторной и двухзаходной

арифметической спирали. Расчетные данные хорошо совпадают с экспериментальными, полученными с помощью специального стенда и программного обеспечения DAMS Antenna Measurement Studio (ухудшение экспериментальных значений составило 10-15% по сравнению с расчетными данными), разработанные антенны удовлетворяют требованиям, предъявляемым к параметрам радиотермографа.

Алгоритм первичной обработки радиометрических данных и 3D визуализации внутреннего теплового поля исследуемого объекта разрабатывался с учетом результатов предварительной обработки данных натуральных экспериментов и построения радиотепловых портретов внутреннего распределения температур в объекте.

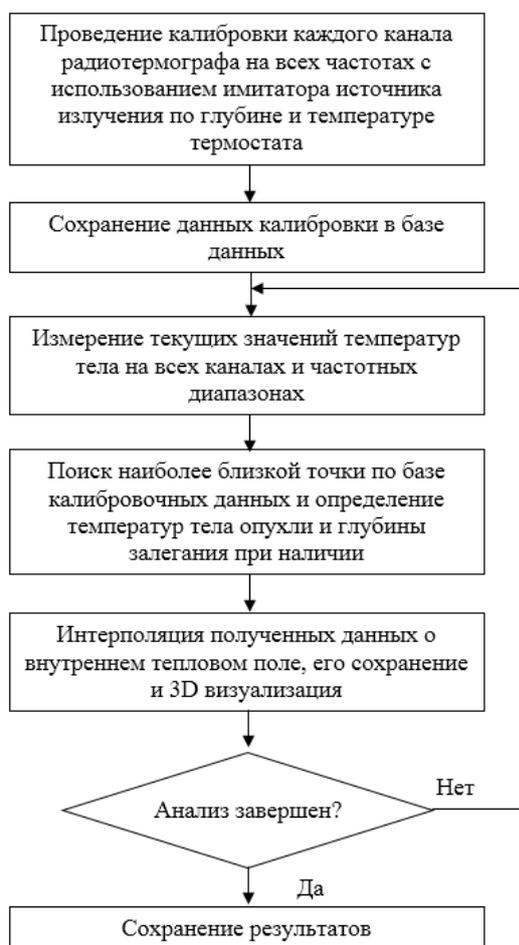
Таблица 2.

Разработанная модель для определения яркостной температуры

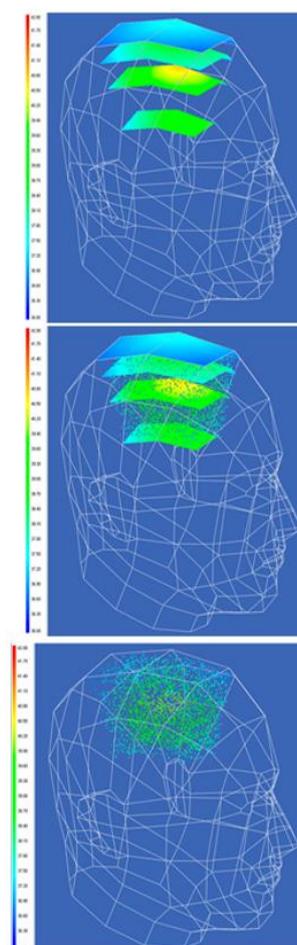
<b>Используемые соотношения</b>	
<p>Интенсивность СВЧ-излучения (формула Рэлея-Джинса):</p> $B_v = \frac{k_B v^2 T}{c^2}$ <p>Яркостная температура для идеального случая:</p> $T_B(x', y'; \nu) = \int_{V_b} \Omega(x, y, z; \nu) T(x, y, z) dV$ <p>Условие нормировки:</p> $\int_{V_b} \Omega dV = 1$	<p>Удельная плотность электромагнитной энергии микроволнового излучения на частоте <math>\nu</math>:</p> $\Omega = \frac{P_d(x, y, z; \nu)}{\int_{V_d} P_d dV}$ $P_d = \frac{1}{2} \sigma(x, y, z; \nu)  \vec{E}(x, y, z; \nu) ^2$
<b>Математическая модель яркостной температуры</b>	
<p>Яркостная температура с учетом рассогласования антенн</p> $T_B = \frac{1}{\Delta \nu} \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \left\{ S_{11} \left[ T_{\text{изум}} + \int_{V_b} \Omega(x, y, z; \nu) T(x, y, z) dV \right] +  S_{11}(\nu) ^2 T_{\text{окр}} \right\} d\nu$ <p>Измеряемая радиояркостная антенная температура на <math>i</math>-ом частотном диапазоне:</p> $T_{b\lambda i}(T_1, \Delta, Z_1) = T_0 + (T_1 - T_0) \left( 1 - e^{-\frac{\Delta}{Z_{S\lambda i}}} \right) e^{-\frac{Z_1}{Z_{S\lambda i}}}; i = 1..N$ <p>Максимальная глубина, с которой источник с температурным контрастом <math>\Delta T</math> может быть обнаружен радиотермографом с чувствительностью <math>\delta T</math>:</p> $Z_{\max} = Z_S \ln \left( \frac{\Delta T}{\delta T} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta}{Z_S}} \right) \right)$	<p>где <math>k_B</math> – постоянная Больцмана;  <math>c</math> – скорость света;  <math>\nu</math> – частота излучения;  <math>\Omega</math> – удельная плотность электромагнитной энергии  <math>V_b</math> – объем исследуемого объекта;  <math>\sigma</math> – электропроводность;  <math>E</math> – вектор электрического поля;  <math>T_0</math> – температура объекта;  <math>T_1</math> – температура источника повышенной температуры;  <math>Z_1</math> – глубина залегания источника;  <math>\Delta</math> – поперечный размер источника;  <math>Z_S</math> – глубина проникновения волны <math>\lambda</math>;  <math>N</math> – количество частотных диапазонов</p>

Разработана математическая модель распространения электромагнитного излучения в неоднородной среде, позволяющая решать обратную задачу восстановления внутреннего теплового поля по регистрируемому на поверхности исследуемого объекта тепловому излучению в нескольких частотных диапазонах и учитывающая неоднородность и многослойность имитатора объекта (Таблица 2). Математическая модель применяется для исследования яркостной температуры в различных условиях и позволяют учитывать физические свойства объектов, а также влияние окружающей среды.

С учетом интегрального характера яркостной температуры и законов ее формирования, а также при наличии измерений на разных частотах, оценены значения термодинамических температур на разных подповерхностных уровнях и построены 3D образы подповерхностной температуры, на основе которой сформированы изображения температуры на подвижной плоскости отображения внутреннего теплового поля (Рисунок 4).



а



б

Рисунок 4. Алгоритм восстановления термодинамических температур по результатам измерений радиояркостных температур на нескольких частотах (а) и измерения температур на калибровочном стенде в 3D (б)

Полученные температурные поля головного мозга с использованием разработанного СВЧ радиометрического приемника приведены на Рисунке 5.

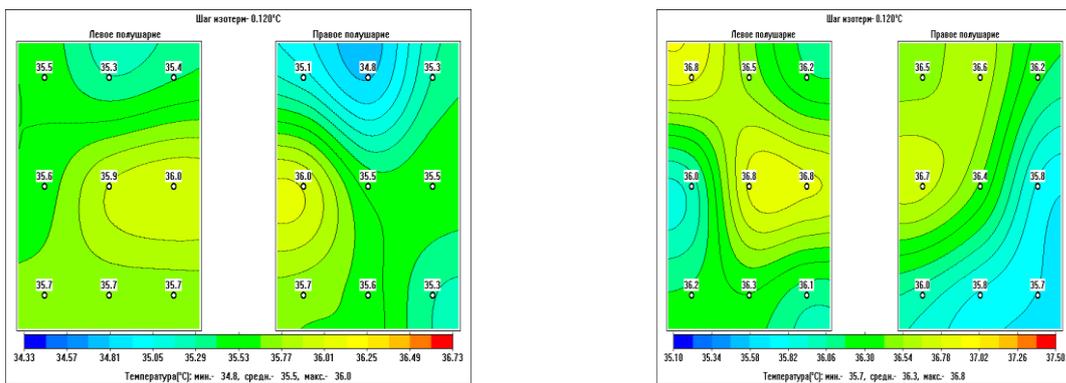


Рисунок 5. Полученные с помощью стенда температурные поля головного мозга

С использованием разработанного СВЧ радиометрического приемника, размещенного на квадроцикле, было также проведено зондирование температуры почвенного профиля, результаты приведены на Рисунке 6.

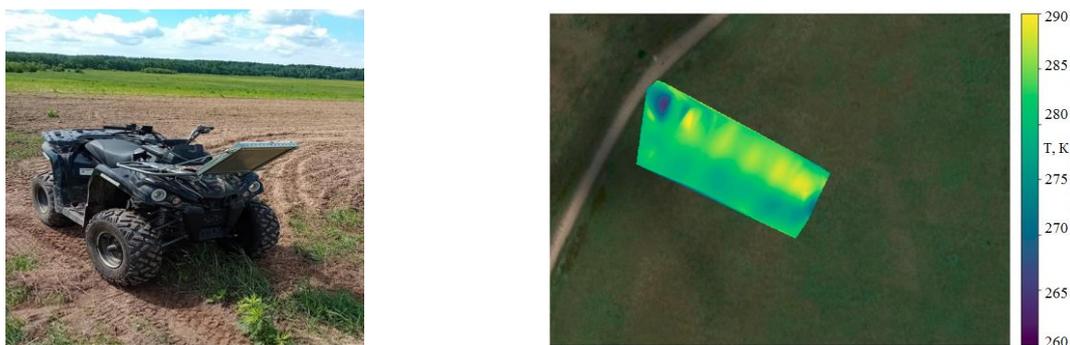


Рисунок 6. СВЧ-радиометр, установленный на квадроцикле, и пример карты температуры, полученной с помощью радиометра

Таким образом, разработанный стенд, оснащенный новыми антеннами-аппликаторами и программным обеспечением, позволит обеспечить создание модуля СВЧ радиометрического приемника, имеющего высокие характеристики измерений.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ схем и конструкций микроволновых радиометров, позволяющий сделать вывод о том, что основным элементом микроволнового радиометра является приемник, а также определить его основные элементы, определяющие технические характеристики и функциональные возможности приборов, и сформулировать требования к параметрам назначения микроволновых радиометрических приемников, обеспечивающие необходимую разрешающую способность и точность метода микроволновой радиометрии.

2. Разработан алгоритм моделирования конструктивных параметров МИС МШУ, переключателя и входящих в них элементов, позволивший исследовать влияние изменения параметров на рабочие характеристики и оценить наиболее значимые из них для обеспечения выполнения заданных требований к прямым и обратным потерям, динамическому диапазону и малому энергопотреблению МШУ и переключателя, базовым элементом которых является транзистор.

3. Разработаны методики проведения технологических операций калибровки радиотермографа для повышения точности проведения радиотермометрических измерений.

4. Разработан способ подавления внешних импульсных помех при эксплуатации прибора, базирующийся на программной реализации итерационных процедур выявления и дискриминации импульсных помех, позволивший повысить точность измерений от 2 до 10 раз в зависимости от интенсивности помех.

5. Разработаны алгоритм расчета внутреннего теплового поля и программное обеспечение визуализации измеряемых радиотермометрических данных для удобного представления информации о внутренних тепловых полях исследуемого объекта.

6. Разработан и изготовлен стенд для проведения радиотермометрических измерений, обеспечивающий проведение относительных измерений температуры на различной глубине объекта с точностью до 0,1 °С и определением месторасположения источника повышения температуры до 1 мм.

7. Впервые разработан макет модуля СВЧ радиометрического приемника многоканального многочастотного радиотермографа.

8. Общие конструкторско-технологические решения основных элементов СВЧ приемника позволяют использовать их для других применений, включая сельское хозяйство, мелиорацию и т.д.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Possibilities of increasing the interference immunity of radiothermograph applicator antennas for brain diagnostics / S.V. Chizhikov [et al.]. Sensors and Actuators A: Physical. 2022. Vol. 337. P. 113439. (1,0 п. л./ 0,25 п. л.)

2. Development and optimization of an ultra wideband miniature medical antenna for radiometric multi-channel multi-frequency thermal monitoring / S.V. Chizhikov [et al.]. EUREKA: Physics and Engineering. 2020. V.6. P. 71-81. (0,6 п. л./ 0,3 п. л.)

3. Миниатюризация радиометрического СВЧ-приемника медицинского многоканального многочастотного радиотермографа / С.В. Чижиков [и др.]. Электромагнитные волны и электронные системы. 2022. Т. 27. № 6. С. 5–12. (0,5 п. л. / 0,25 п. л.)

4. Элементная база в исполнении МИС для радиометрических СВЧ-приемников, применяемых в сельском хозяйстве / С.В. Чижиков [и др.]. Электромагнитные волны и электронные системы. 2023. Т. 28. № 5. С. 24-31 (0,5 п. л. / 0,25 п. л.)
5. Технологические аспекты изготовления МИС СВЧ / С.В. Чижиков [и др.]. Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 8. С. 30-71. (2,0 п. л. / 0,8 п. л.)
6. Анализ энергопотребления ключевых элементов радиометрического приемника / С.В. Чижиков [и др.]. Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. 2023. Т. 15. № 1. С. 23-31 (0,5 п. л. / 0,25 п. л.)
7. Гудков А.Г., Тихомиров В.Г., Чижиков С.В. Гетероструктурный транзистор для энергоэффективного малошумящего усилителя радиотермографа на основе монолитных интегральных схем // Радиотехника. 2023. Т. 87. №3. С. 166-173. (0,5 п. л. / 0,25 п. л.)
8. Влияние поверхностных ловушек на статические характеристики и разброс тока насыщения канала GaN НЕМТ-транзисторов / С.В. Чижиков [и др.]. Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49. № 22. С. 43-46 (0,25 п. л. / 0,1 п. л.)
9. Чижиков С.В., Соловьев Ю.В. Элементная база МИС СВЧ для микроволновой радиотермометрии // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. 2020. Т. 12. № 2. С. 48-57 (0,5 п. л. / 0,25 п. л.)
10. Чижиков С.В. Разработка ключевых элементов медицинского радиотермометра, выполненных в монолитном интегральном исполнении // Научный альманах. 2022. № 7-2 (93). С. 24-30 (0,4 п. л. / 0,4 п. л.)
11. Основные технические требования, предъявляемые к радиометрической системе для дистанционного измерителя влажности почвы / С.В. Чижиков [др.]. Радиотехника. 2024. Т. 88. № 11. С. 181–185 (0,25 п. л. / 0,1 п. л.)
12. Прибор для диагностики функционального состояния головного мозга: патент на изобретение 2718292 РФ / В.Ю. Леушин, А.Г. Гудков, С.В. Чижиков; заявл. 24.07.2019; опубл. 01.04.2020. Бюлл. №10 .
13. Многоканальный многочастотный радиотермограф: патент на изобретение 2814809 РФ / С.В. Чижиков [и др.]; заявл. 27.11.2023; опубл. 04.03.2024. Бюлл. №7.
14. Программа управления, предварительной обработки и передачи данных многоканального радиотермографа: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020667485 / С.В. Чижиков [и др.]; заявл. 14.12.2020; опубл. 23.12.2020. Бюлл. №1.
15. Программа дискриминации импульсных помех радиометрических данных: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024667650 / С.В. Чижиков [и др.]; заявл. 08.07.2024; опубл. 26.07.2024. Бюлл. №1.