

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Объект авторского права

УДК 621.317.341.3

КОНДРАШОВ
Денис Александрович

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ
S-ПАРАМЕТРОВ РАССОГЛАСОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук
по специальности 05.11.08 – радиоизмерительные приборы**

Минск 2026

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Гусинский Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Малкин Виталий Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных систем учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Давыдова Надежда Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Защита состоится «03» сентября 2026 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.06 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «10» июля 2026 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



О. В. Бойправ

ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиоэлектроники характеризуется многими научными и прикладными направлениями в различных областях науки, техники и народного хозяйства, которые включают в себя создание новых поколений и типов измерительных систем, обладающих необходимыми свойствами и характеристиками.

Проблема измерения комплексных параметров различных объектов является важной задачей, охватывающей совершенствование известных и перспективных методов и средств радиоизмерений. Наиболее критичным к требованиям по точности, стабильности и повторяемости являются объекты исследований на основе диэлектриков, жидкостей, биологических объектов, органических и неорганических веществ. Интересны исследования свойств изменения биологических объектов при воздействии электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн (ММДВ). В большей мере они характеризуются диэлектрическими параметрами, которые вычисляются на основе правильно определенных комплексных S -параметров в условиях максимального согласования объекта и измерительного прибора. В большинстве случаев исследователи вышеперечисленных объектов непосредственно используют измерители комплексных параметров или векторные анализаторы цепей, напрямую подключая объект исследования к входным разъемам (волноводным фланцам) радиоизмерительного прибора. В этом случае не выполняется условие согласования объекта измерения с радиоизмерительным прибором. Исходя из этого вышеперечисленная группа объектов называется объектами с рассогласованными характеристиками. Данное рассогласование наблюдается на устройстве отображения в виде сильно изрезанной, постоянно меняющейся характеристики измеряемого комплексного параметра.

Особенно актуальны данные исследования и измерения в ММДВ, представляющим собой перспективный частотный диапазон для создания новых технологий и материалов. Однако радиоизмерительные приборы, функционирующие в данном диапазоне, обладают рядом недостатков, таких как узкий диапазон применения, невысокие стабильность и точность, флуктуации фазы и частоты генераторов сигналов, сложность и громоздкость конструкции, что ухудшает качество измерений комплексных параметров.

Диссертационная работа посвящена разработке моделей и совершенствованию методов измерения объектов с рассогласованными характеристиками в ММДВ, выделения квадратурных составляющих сигнала для гомодинного измерителя комплексных S -параметров при автоматической калибровке, и основанного на них радиоизмерительного прибора.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2026–2030 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 01.04.2025 № 135 (п. 2 «Инновационные технологии в промышленности: фотоника, микроэлектроника, сенсорика и СВЧ-технологии»). Работа выполнялась в рамках следующих государственных научно-технических программ (далее – ГНТП) и государственных программ научных исследований (далее – ГПНИ), а также контрактов с зарубежными заказчиками на разработку и поставку радиоизмерительных приборов:

– ГНТП «Эталоны и научные приборы», подпрограмма «Приборы для науки», приказ Государственного комитета по науке и технологиям (ГКНТ) Республики Беларусь от 04.08.2016 № 163, задание 2.1, договор № 16-1171Б от 29.08.2016 г. «Разработать и изготовить панорамный измеритель КСВН и ослаблений в диапазоне частот 118,1–178,4 ГГц», сроки выполнения – с 01.09.2016 г. по 30.06.2021 г., заказчик – государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси», г. Минск, характер работы – НИОКР;

– ГНТП «Разработка и создание лазерных, оптико-электронных систем, приборов и технологий» («Оптиэл»), приказ ГКНТ от 27.05.2014 № 143, задание 11, договор № 14-1079Б от 30.05.2014 г. «Разработать и освоить производство высокостабильного твердотельного генератора миллиметрового диапазона длин волн», сроки выполнения – с 30.05.2014 г. по 31.12.2019 г., заказчик – государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси», г. Минск, характер работы – ОКР;

– ГНТП «Эталоны и научные приборы», подпрограмма «Приборы для науки», приказ Государственного комитета по науке и технологиям (ГКНТ) Республики Беларусь от 18.02.2014 № 55, задание 1.12, договор № 14-1041Б от 17.03.2014 г. «Разработать и изготовить измерительную установку сверхвысокочастотного диапазона длин волн для определения и воспроизведения индивидуальной характеристической частоты человека», сроки выполнения – с 18.02.2014 г. по 31.12.2015 г., заказчик – государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси», г. Минск, характер работы – НИОКР;

– ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», утверждена Президиумом НАН Беларуси, протокол № 4 от 15.01.2014 г., задание 3.3.17, договор 14-3095 «Разработка научных основ и технологий построения наземной спутниковой системы связи с малой апертурой антенны для приема и передачи потоков цифровых сигналов», сроки выполнения – с 03.01.2014 г. по 31.12.2015 г.,

заказчик – Минобразования РБ, г. Минск, характер работы – фундаментальная;

– договор № 16/13-1190 от 20.12.2013 г. «Разработка элементов макета пассивной телекоммуникационной системы с конформными антеннами», шифр «Конструктор-Б», сроки выполнения – с 02.12.2013 г. по 27.02.2015 г., заказчик – Республиканское производственное унитарное предприятие «Завод точной электромеханики», г. Минск, характер работы – НИОКР;

– ГНТП «Радиоэлектроника-2», приказ ГКНТ № 193 от 08.06.2011 г., задание РС10, договор № 11-1143 от 29.09.2011 г. «Разработать и освоить производство панорамного измерителя комплексных коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 75–110 ГГц», сроки выполнения – с 01.09.2011 г. по 31.12.2016 г., заказчик – Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь, г. Минск, характер работы – ОКР;

– ГНТП «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» («Эталоны и научные приборы»), утверждена Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 01.02.2011 г. № 116, договор № 11-1036Б от 21.07.2011 г. «Разработать и создать аппаратно-программные средства эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля (ППЭ ЭМП)», сроки выполнения – с 03.10.2011 г. по 20.12.2013 г., заказчик – Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии» (БелГИМ), характер работы – НИОКР;

– Контракты Центра 1.9 с зарубежными заказчиками в период с 2015 по 2024 годы.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы заключается в уменьшении погрешности радиоизмерений комплексных параметров объектов, обладающих рассогласованными характеристиками, в миллиметровом диапазоне длин волн.

Для достижения цели работы потребовалось решить *следующие задачи*.

1. Разработать модель и метод калибровки измерителя комплексных S -параметров объектов с рассогласованными характеристиками в миллиметровом диапазоне длин волн.

2. Разработать модель и метод выделения квадратурных составляющих измерительного сигнала при автоматической калибровке измерителя комплексных S -параметров объектов в миллиметровом диапазоне длин волн.

3. Разработать усовершенствованный генератор СВЧ для радиоизмерительных приборов ММДВ, характеризующийся расширенным частотным диапазоном и стабильными во времени амплитудой и фазой выходного сигнала.

4. Разработать усовершенствованный метод радиоизмерений и радиоизмерительный прибор для измерения комплексных параметров объектов с рассогласованными характеристиками.

Объект исследования – радиоизмерительные приборы миллиметрового диапазона длин волн.

Предмет исследования – методы измерения комплексных параметров объектов и цепей в ММДВ, структурные схемы радиоизмерительных приборов и алгоритмы обработки измерительных сигналов.

Научная новизна

1. Модель калибровки измерителя и модель измерения комплексных S-параметров объектов с рассогласованными характеристиками в миллиметровом диапазоне длин волн, которые основаны на векторном анализе цепей и в которых в отличие от аналогов учтены составляющие погрешности измерений, характеризующие направленность и потери СВЧ измерительного тракта, рассогласование со стороны источника сигнала, за счет чего может быть уменьшена суммарная погрешность измерения значений коэффициента отражения в 1,7 раза и коэффициента передачи в 1,3 раза указанных объектов.

2. Модель выделения квадратурных составляющих измерительного СВЧ сигнала миллиметрового диапазона длин волн в гомодинном векторном анализаторе цепей, в которой в отличие от модели, основанной на применении внешних эталонных мер, предусмотрено автоматическое дискретное изменение фазы этого сигнала, за счет чего может быть уменьшен на $\pm 0,1 \div 0,5$ дБ интервал, в котором находится расширенная неопределенность суммарной погрешности измерений значений коэффициентов отражения и передачи и до 2 раз сокращена продолжительность измерений с использованием такого анализатора комплексных S-параметров объектов с рассогласованными характеристиками в заданном диапазоне длин волн.

3. В усовершенствованном СВЧ генераторе радиоизмерительного прибора ММДВ в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц использованы однотипные блоки расширения частоты и цепи обратной связи с применением балансных смесителей для выработки сигналов управления амплитудой и фазой, подаваемые на входы управляемого усилителя после умножителя частоты и фазовращателя предыдущего блока расширения частоты, соответственно, за счет чего у формируемого сигнала нестабильность амплитуды снижается до $\pm 0,2$ дБ, флуктуации фазы снижаются до -100 дБн при отстройке 100 кГц, при нестабильности частоты за 15 мин – $6,1 \cdot 10^{-11}$ и погрешности установки частоты – $\pm 2 \cdot 10^{-7}$.

4. Метод радиоизмерений, отличающийся от аналогов комплексированным использованием автоматического дискретного изменения фазы сигнала в СВЧ измерительном тракте, компенсации нелинейности балансных смесителей, генерации сигналов в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц с нестабильностью частоты $6,1 \cdot 10^{-11}$, согласования

объекта измерения с измерительным трактом с применением узконаправленной диэлектрической антенны, цифровой фильтрации измерительных сигналов, за счет чего суммарная погрешность измерения коэффициента передачи и коэффициента отражения составила $\pm 1,3$ дБ и $\pm 0,6$ дБ соответственно.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод калибровки радиоизмерительного прибора на основе гомодинного векторного анализатора цепей и метод измерения этим прибором комплексных S -параметров объектов с рассогласованными характеристиками в миллиметровом диапазоне длин волн, в которых учтены и скомпенсированы составляющие погрешности измерений, характеризующие направленность и потери измерительного СВЧ тракта, рассогласование со стороны источника, что позволяет уменьшить в 1,7 раза суммарную погрешность измерения коэффициента отражения и в 1,3 раза суммарную погрешность измерения коэффициента передачи указанных объектов.

2. Метод выделения квадратурных составляющих измерительного СВЧ сигнала в радиоизмерительном приборе на основе гомодинного векторного анализатора цепей, отличающийся от аналогов тем, что в предложенном методе реализована автоматическая калибровка, заключающаяся в формировании калибровочного и измерительного СВЧ сигналов без необходимости использования внешних эталонных мер сдвига, что позволяет устанавливать с погрешностью ± 3 градуса фазовый сдвиг указанных сигналов в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц, исключать дополнительную погрешность измерений, связанную с рассогласованием при подключении указанных мер и обеспечивать за счет этого уменьшение на $\pm 0,1 \div 0,5$ дБ интервала, в котором находится расширенная неопределенность суммарной погрешности измерений значений коэффициентов отражения и передачи объектов с рассогласованными характеристиками.

3. Усовершенствованный широкополосный генератор для формирования измерительного СВЧ сигнала в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц, отличающийся тем, что включает в себя схемы переноса частоты с балансными смесителями и цепи дополнительной обратной связи и по сравнению с аналогами обеспечивает установку и отсчет частоты сигнала с пониженной на $2 \div 3$ порядка погрешностью, а также снижение до уровня -100 дБн его кратковременных флуктуаций.

4. Усовершенствованный радиоизмерительный прибор на основе векторного анализатора цепей, отличающийся тем, что включает в себя СВЧ измерительный тракт с дискретным фазовращателем, широкодиапазонный высокостабильный генератор измерительных СВЧ сигналов, диэлектрическую антенну со значением КСВН 1,4, коэффициентом усиления 19,27 дБи, шириной диаграммы направленности $\pm 15^\circ$, согласованную с СВЧ измерительным трактом и объектом измерения, а также реализует цифровую фильтрацию и компенсацию нелинейности балансных смесителей, что

позволяет проводить с помощью такого прибора измерения коэффициента отражения в диапазоне от 0 до – 32 дБ с погрешностью $\pm 0,6$ дБ и коэффициента передачи в диапазоне от 0 до – 40 дБ с погрешностью $\pm 1,3$ дБ при рассогласовании объектов с измерительным трактом в пределах значений КСВН от 1,4 до 3,0.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, отражают личный вклад соискателя, который заключался в выборе направления и постановке задач научных исследований, анализе и интерпретации результатов исследований, выдвижении и проверке идей и гипотез, а также в непосредственном выполнении основных исследований. Основными соавторами публикаций автора по тематике диссертационной работы являются научный руководитель д. т. н., профессор А. В. Гусинский, к. т. н., доцент А. М. Кострикин, к. т. н., доцент А. И. Волковец, с. н. с. М. С. Свирид, которые принимали участие в обсуждении целей, задач, методов и результатов исследований, а также в планировании работ. Остальные соавторы: с. н. с. С. С. Гурский, к. т. н., доцент А. П. Белошицкий, н. с. А. А. Копшай, с. н. с. А. В. Ворошень, к. т. н., доцент В. В. Гладейчук, к. т. н., доцент Н. А. Певнева, д. т. н., профессор В. В. Баранов, н. с. А. Н. Луферов, н. с. Д. Г. Булавко, н. с. А. В. Сайков, д. т. н., профессор В. Л. Ланин, н. с. В. Е. Самонов, м. н. с. Т. А. Дубновицкая, с. н. с. А. Я. Бельский, к. т. н., с. н. с. А. С. Волынец, н. с. Д. А. Лисов, н. с. М. М. Касперович, П. Д. Клименко, Д. П. Клименко, м. н. с. Е. А. Матющенко, В. Л. Воробьёв, В. П. Липатников, н. с. С. М. Лапшин, н. с. М. А. Боровская, Г. А. Шаров, В. С. Осипович, А. А. Павлючик, М. А. Гончарик, Л. В. Колоскова Ю. В. Шевалдина, Л. В. Колоскова, А. В. Галыго, Т. К. Зезюлина, к. т. н., с. н. с. Т. К. Толочко, д. т. н., профессор И. И. Забеньков, к. т. н., с. н. с. Н. Н. Исакович, м. н. с. И. Н. Вошко, м. н. с. А. А. Дыдо, м. н. с. И. С. Сурвило, н. с. С. С. Солонович, м. н. с. Я. В. Рощупкин, м. н. с. А. В. Турло, м. н. с. А. В. Доронина, инж. В. В. Коледа, к. в. н., с. н. с. С. И. Паскробка, д. ф.-м. н., профессор А. Л. Гурский, д. ф.-м. н., профессор В. А. Богуш, н.с. И.А. Захаров участвовали в реализации спланированных работ – изготовлении аппаратуры и средств измерений, проведении метрологических исследований и оформлении их результатов. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР, 18–19 марта 2014, Минск;

Конференция «Медэлектроника-2014: Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии», 10–11 декабря 2014, Минск; 10-я международная научно-техническая конференция БНТУ: «Новые направления развития приборостроения», 26–28 апреля 2017, Минск; XI Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике», 19–21 июня 2018, Москва; 10-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам и проблемам обороны и безопасности, а также по вопросам технологий двойного применения, 18–19 мая 2023, Минск; XXIII международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», 2024, Обнинск; 11-я Международная научная конференция по вопросам развития вооружения, военной и специальной техники и технологий двойного назначения: контрольно-измерительные и испытательные приборы и оборудование, электронно-компонентная база, 21–24 мая 2025, Минск.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертационной работы отражены в 30 публикациях, в том числе 14 статей в научных журналах, 9 статей в сборниках материалов конференций, 1 монография. Получены 6 патентов Республики Беларусь на изобретение. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 4,2 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и 2 приложений. Полный объем диссертации составляет 133 страницы, из них 88 страниц занимает текст, 22 страницы занимают 50 иллюстраций, на 5 страницах приведено 9 таблиц, 5 страниц занимают 2 приложения. Список использованных источников на 13 страницах включает библиографический список из 115 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 30 наименований.

В основной части работы приводятся аналитический обзор литературы и обзор нормативной базы по теме диссертации, современные методы и средства измерения комплексных характеристик объектов в миллиметровом диапазоне длин волн (глава 1), теоретическое обоснование модели и алгоритма измерения объекта с рассогласованными характеристиками (глава 2), разработка составных частей специализированного радиоизмерительного прибора для векторного анализа рассогласованных объектов (глава 3), результаты экспериментальных и метрологических исследований разработанного радиоизмерительного прибора и методов измерений характеристик рассогласованного объекта (глава 4).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе на основании анализа литературных данных и патентных источников показана перспективность использования миллиметровых волн при разработке радиоизмерительного прибора для объектов с рассогласованными характеристиками, особенно при точечном воздействии на объект измерения. Рассмотрены основные типы векторных анализаторов цепей (ВАЦ) и предложена схема построения ВАЦ по гомодинному типу как основа радиоизмерительного прибора (РП).

Для достижения цели необходимо проведение комплекса исследований: учесть в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц большое затухание распространения зондирующего сигнала; скомпенсировать составляющие погрешности измерений в методе калибровки и методе измерений радиоизмерительного прибора; разработать метод выделения квадратурных составляющих измерительного СВЧ сигнала с реализацией автоматической калибровки без необходимости использования внешних эталонных мер сдвига; разработать твердотельный генератор с пониженной погрешностью установки частоты сигнала и сниженными кратковременными флуктуациями амплитуды и фазы СВЧ сигнала; разработать РП с усовершенствованным измерительным трактом с дискретным фазовращателем, широкодиапазонным высокостабильным генератором, согласованной диэлектрической антенной, цифровой фильтрацией и компенсацией нелинейности балансных смесителей.

Во второй главе представлены разработанные модель, алгоритм измерения и калибровки РП на основе гомодинного анализатора цепей. Определена номенклатура параметров систематических погрешностей, максимально влияющих на измерение параметров рассогласованных объектов, таких как погрешность направленности E_D , погрешность неравномерности измерительного тракта E_R и погрешность рассогласования источника сигнала E_S . Модель погрешностей в этом случае представляется эквивалентным четырехполусником, граф которого представлен на рисунке 1.

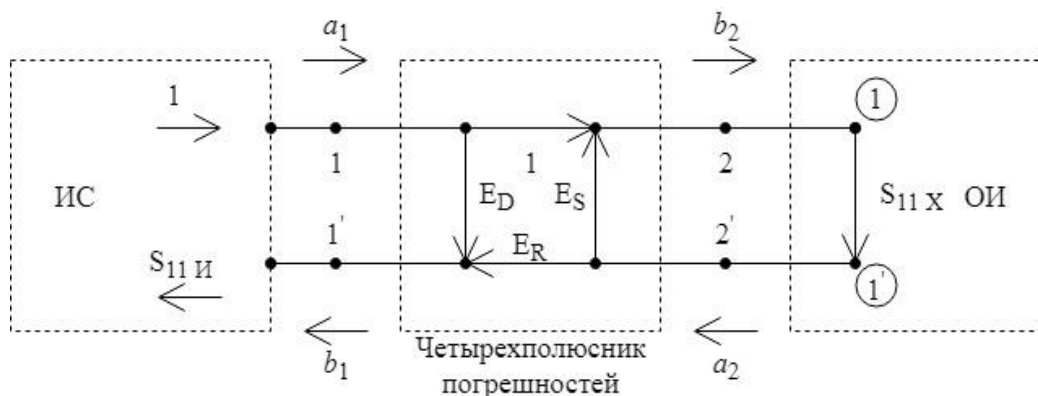


Рисунок 1 – Графическое представление модели погрешностей измерений в виде четырехполусника

Процедуры калибровки для учета погрешностей заключаются в проведении серии измерений, позволяющих установить параметры погрешностей E_D , E_R и E_S . С этой целью проводятся измерения коэффициентов отражения S_{11xi} известных нагрузок, заранее аттестованных с высокой точностью, которые используются в качестве калибровочных мер или стандартов. По измеренным значениям S_{11xi} коэффициентов отражений этих стандартов, зная их «истинные» значения S_{11xi} , с помощью уравнений (1), (2) находятся искомые параметры погрешностей. Каждый из параметров в общем случае является комплексной величиной, характеризуемой своим амплитудным значением и фазой. Поскольку неизвестных параметров погрешностей в данном случае три, для их определения в процессе калибровки используется не менее трех калибровочных стандартов.

Для определения параметра ошибки E_D при калибровке выбрана методика полупараметрической круговой аппроксимации с использованием фазовых соотношений.

Параметры погрешностей рассогласования измерительного тракта со стороны источника сигнала E_S и E_R из-за потерь измерительного тракта (на участке от измерительного фланца до направленного ответвителя, отвечающего за измерение параметра S_{11}), связанные между собой уравнениями калибровки (1), (2), определяются по результатам двух операций коррекции с предположением, что E_D уже определено калибровкой по согласованной нагрузке ($E_D = S_{11i}^{CH}$).

Таковыми двумя операциями являются калибровка ВАЦ по короткозамкнутой нагрузке (далее – КЗ) ($S_{11x}^{K3} = \Gamma^{K3} = e^{j\pi} = -1$) и калибровка ВАЦ по нагрузке холостого хода (далее – ХХ) ($S_{11x}^{XX} = \Gamma^{XX} = e^{-j\pi} = 1$). Для обеспечения режима ХХ в волноводе используются аттестованные образцовые меры фазового сдвига совместно с КЗ нагрузкой.

$$E_R = \frac{2(S_{11i}^{K3} - E_D)(S_{11i}^{XX} - E_D)}{(S_{11i}^{K3} - S_{11i}^{XX})}, \quad (1)$$

$$E_S = \frac{(S_{11i}^{K3} - E_D)(S_{11i}^{XX} - E_D)}{(S_{11i}^{XX} - S_{11i}^{K3})}. \quad (2)$$

Разработана структурная схема РП, специализированного для измерения объектов, имеющих рассогласование с измерительным трактом, состоящего из СВЧ тракта и блока цифровой обработки информации. РП с целью дальнейшего повышения точности измерений обеспечивает формирование квадратурных составляющих сигналов, пропорциональных исследуемым S-параметрам без использования дополнительных мер фазового сдвига на основе повышения стабильности уровня сигнала во всем указанном диапазоне при использовании предложенных балансного смесителя и дискретного фазовращателя, упрощающих конструкцию СВЧ тракта.

Определены основные источники погрешностей, связанных с первичными преобразователями измерительной информации, – балансные смесители (рисунок 2). Предложен алгоритм компенсации нелинейности

балансных смесителей. Применение полинома третьего порядка (рисунок 2) позволяет снизить уровень погрешности при получении флуктуирующего, ослабленного отклика на границе чувствительности радиоизмерительного прибора и расширить динамический диапазон до минус 50 ÷ 60 дБ, обеспечив снижение составляющей погрешности измерения коэффициента передачи из-за нелинейности смесителей до 0,2 дБ в диапазоне до –40 дБ и от 0,2 до 1,2 дБ в диапазоне от –40 до –60 дБ.

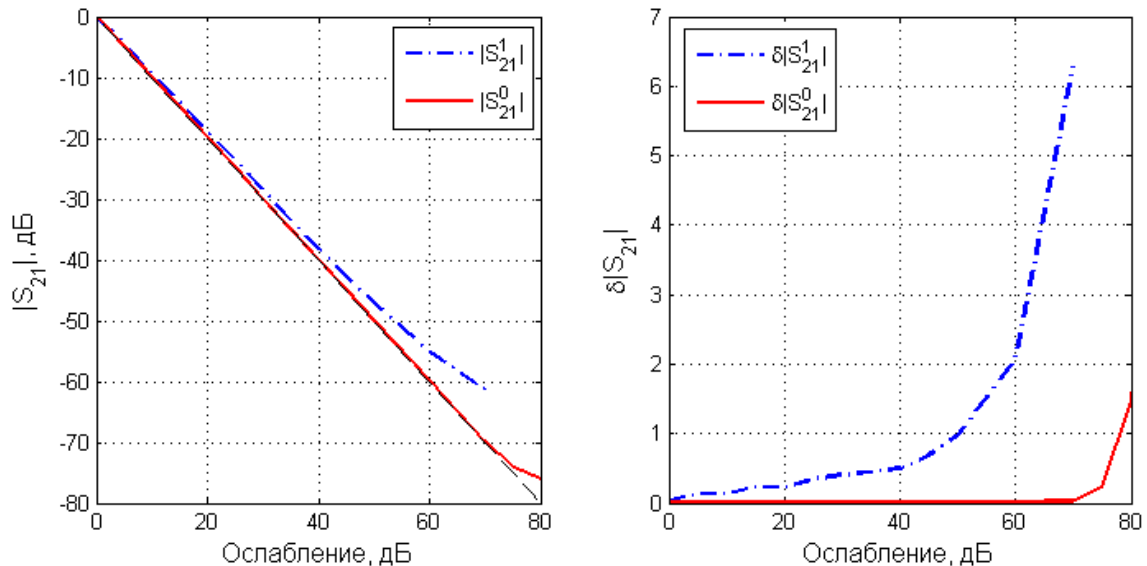


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость коэффициента передачи от ослабления аттенюатора

В третьей главе представлены исследования и показано, что для исключения или минимизации случайных погрешностей, связанных с нестабильностью частоты и мощности во времени, требуется увеличение мощности твердотельного генератора, введение системы стабилизации по частоте, фазе и уровню мощности. Предложенный способ расширения диапазона перестройки частоты в разработанной модели генератора заключается в использовании одинаковых по структуре блоков расширения, в которые входят умножители частоты, что позволяет реализовать в одном устройстве возможность формирования сигналов в широком диапазоне частот. Формирование стабильных по уровню сигналов с малыми флуктуациями фазы обеспечивается за счет использования балансных смесителей в блоках расширения. В блоке расширения при взаимодействии сигнала с первого выхода предыдущего блока расширения и выходного сигнала текущего блока расширения балансный смеситель представляет собой фазовый дискриминатор, при этом на втором выходе балансного смесителя вырабатывается сигнал, постоянная составляющая которого, выделяемая фильтром нижних частот и пропорциональная разности фаз сигналов на входах балансного смесителя, приумножается вторым усилителем постоянного тока и подается на вход управления регулируемого фазовращателя, обеспечивая уменьшение флуктуаций фазы. При взаимодействии сигнала с выхода предыдущего блока расширения с

выходным сигналом текущего блока расширения на первом выходе балансного смесителя формируется высокочастотный сигнал, уровень которого пропорционален уровню выходной мощности сигнала текущего блока расширения. Этот сигнал выделяется фильтром верхних частот и проводится амплитудным детектором и после усиления первым усилителем постоянного тока подается на вход управления регулируемого усилителя текущего блока, обеспечивая тем самым стабилизацию уровня мощности выходного сигнала.

Для упрощения и повышения стабильности калибровки радиоизмерительной установки предложено ввести в СВЧ измерительный тракт дискретный фазовращатель на основе скачкообразного изменения фазового сдвига проходящего СВЧ сигнала за счет изменения электрической длины распространения сигнала через три ячейки фазового сдвига, соединенные в цепочку. Каждая ячейка представляет собой отрезок волноводно-щелевой линии с последовательно включенными $p-i-n$ -диодами, расположенными на расстоянии $\lambda_{\text{ср}}/4$ друг от друга, где $\lambda_{\text{ср}}$ – длина волны на средней частоте рабочего диапазона частот. Конструктивные элементы выбраны таким образом, чтобы на средней частоте рабочего диапазона сдвиг фаз составлял приблизительно -30° при переключении $p-i-n$ -диодов из закрытого состояния в открытое и обратно. Ячейки коммутируются независимо друг от друга, и, таким образом, фазовращатель обеспечивает восемь возможных значений фазового сдвига.

В режимах измерения комплексных коэффициентов передачи $S_{\text{хп}}$ и отражения $S_{\text{хo}}$ подключается исследуемое СВЧ устройство, определяются по два значения напряжений $U_{1\text{пн}}, U_{2\text{пн}}$ и $U_{1\text{он}}, U_{2\text{он}}$ в каждом из режимов, причем при первом состоянии фазовращателя все три $p-i-n$ -диода закрыты (исходный фазовый сдвиг), при втором состоянии все три $p-i-n$ -диода открыты (фазовый сдвиг отличается от исходного приблизительно на минус 90°). Квадратурные составляющие СВЧ сигналов рассчитываются по следующим формулам (3) ÷ (6):

$$\text{Re}(S_{\text{хп}}) = \frac{\text{Im}(t_{\text{он}})U_{2\text{пн}} - [\text{Re}(t_{\text{он}})r_{s123} + \text{Im}(t_{\text{он}})r_{c123}]U_{1\text{пн}}}{[\text{Re}(t_{\text{он}})r_{c123} - \text{Im}(t_{\text{он}})r_{s123}]\text{Im}(t_{\text{он}}) - [\text{Re}(t_{\text{он}})r_{s123} + \text{Im}(t_{\text{он}})r_{c123}]\text{Re}(t_{\text{он}})}; \quad (3)$$

$$\text{Im}(S_{\text{хп}}) = \frac{\text{Re}(t_{\text{он}})U_{2\text{пн}} - [\text{Re}(t_{\text{он}})r_{c123} - \text{Im}(t_{\text{он}})r_{s123}]U_{1\text{пн}}}{[\text{Re}(t_{\text{он}})r_{c123} - \text{Im}(t_{\text{он}})r_{s123}]\text{Im}(t_{\text{он}}) - [\text{Re}(t_{\text{он}})r_{s123} + \text{Im}(t_{\text{он}})r_{c123}]\text{Re}(t_{\text{он}})}; \quad (4)$$

$$\text{Re}(S_{\text{хo}}) = \frac{\text{Im}(t_{\text{оо}})U_{2\text{он}} - [\text{Re}(t_{\text{оо}})r_{s123} + \text{Im}(t_{\text{оо}})r_{c123}]U_{1\text{он}}}{[\text{Re}(t_{\text{оо}})r_{c123} - \text{Im}(t_{\text{оо}})r_{s123}]\text{Im}(t_{\text{оо}}) - [\text{Re}(t_{\text{оо}})r_{s123} + \text{Im}(t_{\text{оо}})r_{c123}]\text{Re}(t_{\text{оо}})}; \quad (5)$$

$$\text{Im}(S_{\text{хo}}) = \frac{\text{Re}(t_{\text{оо}})U_{2\text{он}} - [\text{Re}(t_{\text{оо}})r_{c123} - \text{Im}(t_{\text{оо}})r_{s123}]U_{1\text{он}}}{[\text{Re}(t_{\text{оо}})r_{c123} - \text{Im}(t_{\text{оо}})r_{s123}]\text{Im}(t_{\text{оо}}) - [\text{Re}(t_{\text{оо}})r_{s123} + \text{Im}(t_{\text{оо}})r_{c123}]\text{Re}(t_{\text{оо}})}. \quad (6)$$

Предложена узконаправленная диэлектрическая антенна, согласованная с волноводом в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц, с коэффициентом усиления 19,27 дБи, узкой диаграммой направленности $\pm 15^\circ$, уровнем боковых лепестков 10,19 дБи и локализирующая точку измерения для концентрации энергии СВЧ сигнала в строго определенном месте.

Геометрические размеры, значение диэлектрической проницаемости материала и диаграмма направленности антенны представлены на рисунке 3.

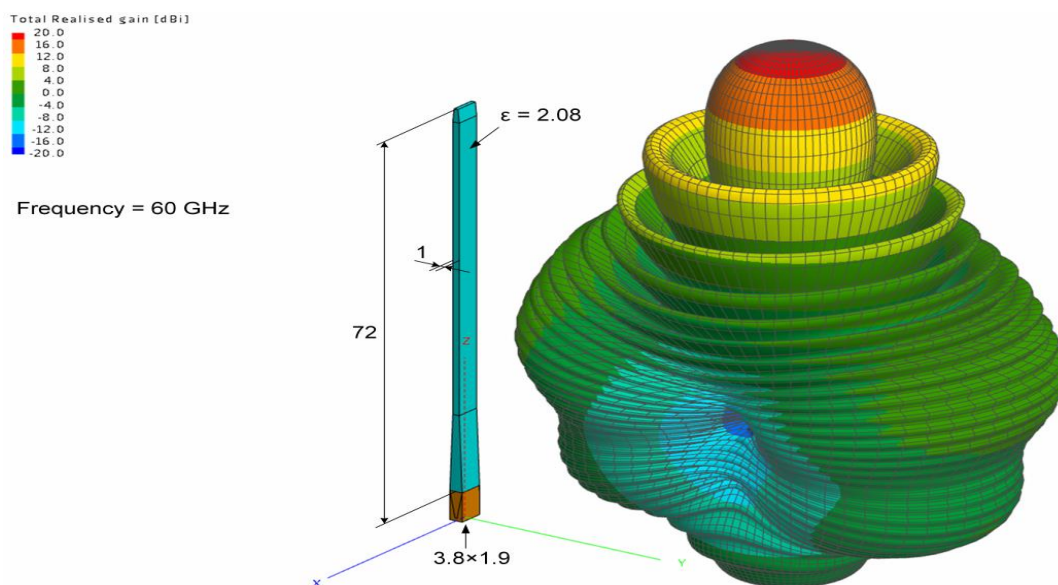


Рисунок 3 – Внешний вид и трехмерная диаграмма направленности диэлектрической волноводной антенны

Разработана методика измерения отклика объекта с произвольными электродинамическими характеристиками на примере биологического объекта при изменении коэффициента отражения S_{11} в пределах от -40 до 0 дБ, обеспечивающий автоматическое проведение исследования в диапазоне частот в выбранной точке на объекте размером 2 мм^2 , обладающий точностью измерений коэффициента отражения (КО) $\pm 0,5 + 0,3 \text{ КО дБ}$, универсальностью и полнотой определения характеристик, в диапазоне частот от $53,57$ до $78,33$ ГГц. Суть методики заключается в формировании электрически управляемого по частоте сигнала в миллиметровом диапазоне длин волн. Он передается в выбранную точку поверхности исследуемого объекта, где формируется отраженный СВЧ сигнал, несущий информацию о его амплитудах и фазах в диапазоне перестройки частоты. Таким образом получают информацию о поверхности объекта при различных значениях частоты СВЧ сигнала, находят значение характеристической частоты, которой соответствует частотная точка с наибольшими условиями согласования (минимальным КО). Измерительная установка определения характеристической частоты включает в себя предложенный и разработанный генератор качающейся частоты с повышенной стабильностью, формирующий электрически управляемый по частоте сигнал в миллиметровом диапазоне длин волн, и направленный ответвитель, ориентированный на отраженный СВЧ сигнал и подключенный к узконаправленной разработанной диэлектрической антенне, воздействующей на выбранную точку поверхности. Кроме этого, в нем заложен измерительный СВЧ тракт с использованием нового разработанного дискретного фазовращателя, на который поступает отраженный от объекта СВЧ сигнал. Внедрение нового дискретного фазовращателя позволило исключить сложную калибровку, характерную для любого векторного анализатора цепей, и

упростить ее всего до одной операции с использованием меры отражения. В качестве меры отражения используется короткозамкнутая нагрузка или это может быть участок исследуемого объекта с характеристиками, приближенными к короткозамкнутой нагрузке.

Разработан алгоритм цифровой фильтрации откликов сигналов в радиоизмерительном приборе, используемый при обработке и отображении сигнала. Использование цифровой фильтрации позволяет исключить неоднозначность отсчета показаний при наличии «шумовой» флуктуирующей составляющей, улучшить восприятие амплитудно-частотной характеристики и исключить неинформативное изменение показаний в любой точке частотного диапазона. Эффективность алгоритма цифровой фильтрации позволила уменьшить до $\pm 1,5^\circ$ изменение фазы измеряемого параметра S_{11} , находившегося до этого в пределах $\pm 15^\circ$. Цифровая фильтрация предназначена для выполнения задач: выравнивания незначительных по значению флуктуаций на отдельных участках характеристики – усреднение отдельных участков характеристики; устранения выбросов в отдельных значениях характеристики; аппроксимации выводимых на экран отдельных участков характеристик, придание им монотонности – сглаживание отдельных участков характеристик.

В четвертой главе представлена архитектура разработанного программного обеспечения, которая позволила организовать измерение S -параметров в разных участках частотного диапазона от 53,57 до 78,33 ГГц. Программное обеспечение может функционировать как на удаленных компьютерах, так и на одной локальной системе.

Разработан алгоритм математического и программного определения отклика от объектов с рассогласованными характеристиками, который представляет собой следующую последовательность:

1. Подготовить радиоизмерительную установку к работе в соответствии с руководством по эксплуатации.
2. Выбрать режим определения по показаниям приборов отклика от объекта: S_{11} .



Рисунок 4 – Внешний вид контроля указательного пальца правой руки

3. Установить диапазон рабочих частот: по умолчанию этот диапазон установлен от 53,57 до 78,33 ГГц. Рекомендуемый диапазон частот для определения ИХЧ – от 53,57 до 70 ГГц.

4. Выполнить калибровку измерительной установки в режиме « S_{11} » по короткозамкнутой нагрузке или ее эквиваленту.

5. Сохранить калибровку.

6. В режиме измерения S_{11} переключить предел отображения характеристики на экране в удобную для отображения измерения форму.

7. Поднести измеряемый объект к диэлектрической антенне (рисунок 4).

Результат измерения отображается на экране в виде амплитудно-частотной характеристики, представленной на рисунке 5.

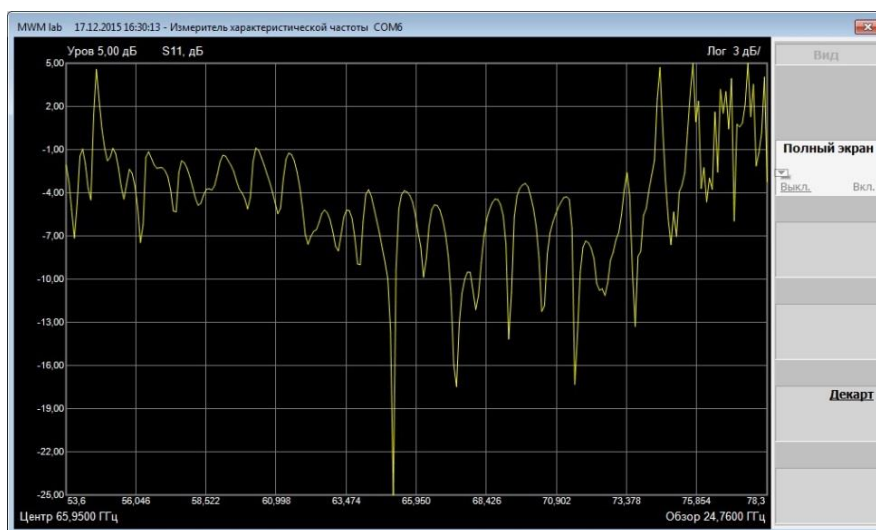


Рисунок 5 – Внешний вид амплитудно-частотной характеристики

Метрологическая калибровка показала, что технические характеристики радиоизмерительного прибора, заложенные при разработке, подтвердились. Диапазон рабочих частот измерителя от 53,57 до 78,33 ГГц. Основная относительная погрешность установки частоты не превышает $\pm 2 \cdot 10^{-7}$, а нестабильность частоты менее $\pm 6,1 \cdot 10^{-11}$, что на порядки точнее в сравнении с измерителями, источники сигналов которых реализованы на лампах обратной волны. РП позволяет производить измерения модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$, дБ, от 0 дБ до -40 дБ с погрешностью, не превышающей $\pm(0,3 + 0,05 \cdot |S_{21}|)$ дБ во всем частотном и динамическом диапазоне. По полученным данным погрешность измерения КСВН не превысила значений $\pm(3 \cdot K_{стU} + 3) \%$, в то время как у Р2-69 и Р2-69М $\pm(5 \cdot K_{стU} + 5) \%$.

В Приложении А представлена копия свидетельства о калибровке радиоизмерительного прибора сверхвысокочастотного диапазона длин волн Р2-78 ИХЧ.

В Приложении Б представлена копия акта использования результатов диссертационной работы в практической деятельности «Научно-образовательного инновационного центра СВЧ технологий и их метрологического обеспечения».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана модель и алгоритм калибровки, измерения комплексных коэффициентов отражения и передачи объектов с рассогласованными характеристиками в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц. Определены составляющие погрешностей измерений, которые могут быть систематическими, воспроизводимыми и предсказуемыми во времени, что скорректировано и учтено предложенным алгоритмом калибровки. Выявлены основные источники погрешностей в наибольшей степени, влияющие на точность измерений, связанные с рассогласованием со стороны источника сигнала миллиметрового диапазона длин волн, направленностью и потерями СВЧ измерительного тракта, частотными параметрами каналов. Уменьшена суммарная погрешность измерения значений коэффициента отражения в 1,7 раза и коэффициента передачи в 1,3 раза объектов с рассогласованными характеристиками [2–А, 5–А, 15–А, 18–А, 23–А, 30–А].

2. На основе разработанного метода получения квадратурных составляющих измерительного СВЧ сигнала в гомодинном векторном анализаторе цепей предложена новая конструкция трехсекционного фазовращателя, у которого на среднем значении рабочего диапазона частот сдвиг фаз составляет приблизительно 30° при переключении $p-i-n$ -диодов в каждой секции из закрытого состояния в открытое. Секции коммутируются независимо друг от друга, и, таким образом, фазовращатель обеспечивает восемь возможных значений фазового сдвига сигнала опорного канала. Для каждой частотной точки, установленной генератором, решается система из восьми уравнений, решение которой на основе нового разработанного алгоритма, позволяет произвести корректировку суммарного фазового сдвига на 90° с точностью $\pm 3^\circ$, что обеспечивает стабильный квадратурный сдвиг фазы, в отличие от известных квадратурных формирователей на основе СВЧ мостов или направленных ответвителей, имеющих отклонение фазового сдвига в диапазоне частот $\pm 10^\circ$. Использование разработанного фазовращателя позволяет автоматизировать процесс калибровки и измерения, исключить использование дополнительных фазовых мер, тем самым сокращая время измерений анализатором комплексных S-параметров объектов с рассогласованными характеристиками в 2 раза и уменьшая на $\pm 0,1 \div 0,5$ дБ интервал, в котором находится расширенная неопределенность суммарной погрешности измерений значений коэффициентов отражения и передачи [7–А, 20–А, 21–А, 26–А].

3. Созданная новая структура твердотельного генератора позволяет реализовать возможность формирования сигналов в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц посредством применения алгоритма расширения диапазона перестройки частоты, заключающегося в использовании одинаковых по структуре блоков расширения, в которые входят умножители частоты на 2. Формирование стабильных по уровню сигналов со сниженной до $\pm 0,2$ дБ

нестабильностью амплитуды и малыми флуктуациями фазы -100 дБн при отстройке 100 кГц обеспечивается за счет использования цепей обратной связи с применением балансных смесителей для выработки сигналов управления амплитудой и фазой при нестабильности частоты за 15 мин $-6,1 \cdot 10^{-11}$ и погрешности установки частоты $-\pm 2 \cdot 10^{-7}$ [4–А, 9–А, 19–А, 24–А, 27–А].

4. Создан экспериментальный радиоизмерительный прибор на основе векторного анализатора цепей для определения индивидуальной характеристической частоты объектов с рассогласованием с измерительным трактом в пределах значений КСВН от $1,4$ до $3,0$ в диапазоне частот от $53,57$ до $78,33$ ГГц, позволяющий измерять коэффициент отражения S_{11} в диапазоне от 0 до -32 дБ с погрешностью до $\pm 0,6$ дБ, коэффициент передачи S_{21} – в диапазоне от 0 до -40 дБ с погрешностью до $\pm 1,3$ дБ. Радиоизмерительный прибор содержит в СВЧ измерительном тракте дискретный фазовращатель, балансные смесители и диэлектрическую антенну. Применение компенсации нелинейности балансных смесителей дает снижение составляющей погрешности измерения коэффициента передачи до $0,2$ дБ в диапазоне измерения до -40 дБ и от $0,2$ до $1,2$ дБ в диапазоне от -40 до -60 дБ. В составе радиоизмерительного прибора используется широкодиапазонный генератор сигналов с высокой частотной стабильностью до $6,1 \cdot 10^{-11}$. Достигнуто согласование объекта исследования с измерительным трактом путем использования диэлектрической антенны с КСВН $= 1,4$, коэффициентом усиления $19,27$ дБи, диаграммой направленности $\pm 15^\circ$. Программное обеспечение радиоизмерительной установки позволяет пошагово управлять измерительным прибором с передней панели и дистанционно, производить оптимальную цифровую обработку с применением цифровой фильтрации и специальных алгоритмов на основе метода Чебышева, осуществлять представление S -параметров в графическом виде и отображать характеристические частоты объектов с рассогласованными характеристиками [1–А, 3–А, 6–А, 8–А, 10–А, 11–А, 12–А, 13–А, 14–А, 16–А, 17–А, 22–А, 25–А, 28–А, 29–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанный экспериментальный радиоизмерительный прибор на основе векторного анализатора цепей для определения индивидуальной характеристической частоты объектов с рассогласованными характеристиками в диапазоне частот от $53,57$ до $78,33$ ГГц может быть использована при исследовании материалов, непригодных к непосредственному подключению путем стандартных разъемных соединений, согласованных с волноводными трактами передачи электромагнитного сигнала, таких, как композитные материалы, жидкости, коллоидные вещества, материалы, изготавливаемые по порошковым технологиям, находящиеся в различных агрегатных состояниях.

2. Исследования радиоизмерительной установки проводились в расширенном динамическом диапазоне, что позволяет сделать вывод о дальнейшей модернизации с расширением пределов измерений до минус 60 дБ и более.

3. Разработанные алгоритмы и программные средства в сочетании с реализованными техническими средствами могут быть использованы при биологических, медицинских исследованиях, исследовании материалов растительного происхождения как в лабораторных условиях, так и при постановке новых направлений исследований, основанных на перспективных медицинских исследованиях человеческого материала.

4. Результаты проведенных исследований внедрены в ООО «ПРИБОРЭЛЕКТРО» (изготовлены и поставлены радиоизмерительные приборы Р2-МВМ-78 на основе векторного анализатора цепей) при выполнении ГНТП «Эталоны и научные приборы», подпрограмма «Приборы для науки» (изготовлен радиоизмерительный прибор сверхвысокочастотного диапазона длин волн для определения и воспроизведения индивидуальной характеристической частоты Р2-78 ИХЧ), в рабочий процесс БГУИР (способ калибровки векторного и скалярного анализатора цепей, радиоизмерительные приборы сверхвысокочастотного диапазона длин волн серии Р2-МВМ и серии Р4-МВМ).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1–А. Апертурные антенны сантиметровых и миллиметровых длин волн / Г. А. Шаров, В. В. Гладейчук, А. В. Гусинский, Д. А. Кондрашов, М. С. Свирид. – М. : Горячая линия – Телеком, 2019. – 656 с.

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

2–А. Кондрашов, Д. А. Математическая модель и программное обеспечение спектроанализатора СВЧ-сигналов в диапазоне 8–18 ГГц / Д. А. Кондрашов, А. В. Гусинский, А. Н. Луферов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 5 (83). – С. 24–29.

3–А. Кондрашов, Д. А. Программное обеспечение векторного анализатора цепей миллиметрового диапазона длин волн / Д. А. Кондрашов, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. – 2014. – № 6 (84). – С. 17–22.

4–А. Гусинский, А. В. Особенности конструкции и технология сборки радиовысотомера миллиметрового диапазона / А. В. Гусинский, А. И. Волковец, В. Л. Ланин, М. С. Свирид, Д. А. Кондрашов, В. Е. Самонов,

С. С. Гурский, Д. Г. Булавко, Т. А. Дубновицкая // Минск : Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 4 (535). – С. 22–27.

5–А. Копшай, А. А. Алгоритм обработки измерительного сигнала в векторных анализаторах цепей / А. А. Копшай, А. В. Гусинский, А. В. Ворошень, Д. А. Кондрашов // Доклады БГУИР. – 2017. – № 4 (106). – С. 88–91.

6–А. Кондрашов, Д. А. Цифровая фильтрация квадратурных сигналов векторных анализаторов цепей / Д. А. Кондрашов, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, М. С. Свирид // Доклады БГУИР. – 2017. – № 5 (107). – С. 13–18.

7–А. Бельский, А. Я. Варианты построения фазовращателей / А. Я. Бельский, А. В. Гусинский, А. В. Сайков, Д. А. Кондрашов, М. С. Свирид, А. М. Кострикин // Доклады БГУИР. – 2017. – № 6 (108). – С. 29–34.

8–А. Гусинский, А. В. Формирование квадратурных сигналов в векторных анализаторах цепей миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский, Д. А. Кондрашов, В. А. Богуш // Метрология и приборостроение. – 2019. – № 2(85). – С. 34–40.

9–А. Гусинский, А. В. Генераторы качающейся частоты миллиметрового диапазона длин волн с умножением частоты / А. В. Гусинский, Д. А. Кондрашов, А. С. Волынец // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 98–102.

10–А. Гусинский, А. В. Моделирование микрополосковой антенны радиовысотомера для летательного аппарата / А. В. Гусинский, М. С. Свирид, Д. А. Кондрашов, А. А. Копшай, Д. Г. Булавко, Д. А. Лисов // Доклады БГУИР. – 2021. – № 5 (2021). – С. 5–12.

11–А. Певнева, Н. А. Определение S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов кварцевой керамики в миллиметровом диапазоне длин волн / Н. А. Певнева, Д. А. Кондрашов, А. Л. Гурский, А. В. Гусинский // Доклады БГУИР. – 2021. – № 7 (2021). – С. 65–71.

12–А. Кондрашов, Д. А. Исследование S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов поликора и GaAs с помощью векторного анализатора цепей / Д. А. Кондрашов, Н. А. Певнева, А. В. Гусинский, А. А. Павлючик, М. А. Гончарик // Доклады БГУИР. – 2023. – № 3 (2023). – С. 26–33.

13–А. Захаров, И. А. Измерительный гармонический смеситель в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц / И. А. Захаров, А. В. Гусинский, А. В. Сайков, М. М. Касперович, Д. А. Кондрашов, М. С. Свирид // Доклады БГУИР. – 2024. – № 6 (2024). – С. 29–37.

14–А. Гусинский, А. В. Радиовысотомеры с частотной модуляцией зондирующего сигнала / А. В. Гусинский, И. И. Забеньков, М. С. Свирид, Д. А. Кондрашов, С. С. Солонович // Известия НАН Беларуси. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 318–328.

15–А. Гусинский, А. В. Метрологическая оценка средств измерений ослабления миллиметрового диапазона длин волн / А. В. Гусинский, Д. А. Кондрашов, Ю. В. Шевалдина, А. В. Сайков, М. М. Касперович,

Статьи в сборниках материалов научных конференций

16–А. Кондрашов, Д. А. Программная модель панорамного измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражений миллиметрового диапазона волн / Д. А. Кондрашов, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, М. С. Свирид // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР, Минск, 2014 г. – Минск, 2014. – С. 158–159.

17–А. Аппаратно-программный комплекс для исследования и определения собственной характеристической частоты органических, неорганических и биологических объектов / В. В. Баранов, С. С. Гурский, А. В. Гусинский, М. М. Касперович, П. Д. Клименко, Д. П. Клименко, Д. А. Кондрашов, Н. А. Певнева, А. В. Сайков // Медэлектроника-2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии. – Минск, 2014. – С. 156–158.

18–А. Скалярный анализатор цепей СВЧ диапазона / Е. А. Матющенко, А. П. Белошицкий, Д. А. Кондрашов // 10-я междунар. науч.-техн. конф. БНТУ 26–28.04.2017: Новые направления развития приборостроения. – Минск, БНТУ. – Т. № 2. – 2017. – С. 82–83.

19–А. Возможность создания эталона единицы мощности в диапазоне частот 37,5–178,4 ГГц на основе белорусских разработок (MWMLab) в РФ / Л. В. Колоскова, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, А. В. Галыго, А. Н. Луферов, Д. А. Кондрашов, А. В. Ворошень, С. С. Гурский, А. П. Белошицкий, М. С. Свирид, Т. К. Зезюлина // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике». – Москва, 2018. – С. 27–41.

20–А. Перспективный векторный анализатор цепей на базе широкополосного измерительного смесителя миллиметрового диапазона длин волн / И. А. Захаров, Д. А. Кондрашов, А. В. Гусинский, М. С. Свирид // 10-я междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам и проблемам обороны и безопасности, а также по вопросам технологий двойного применения. – Минск, 2023.

21–А. Разведывательный приемник диапазона 1–18 ГГц / Н. Н. Исакович, Д. Г. Булавко, И. Н. Вошко, А. А. Дыдо, Д. А. Кондрашов, И. С. Сурвило // XXIII международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов»: тезисы докладов. – Обнинск, 2024. – С. 132.

22–А. Способы построения устройств ближней радиолокации на основе сигналов с частотной модуляцией / А. В. Ворошень, А. И. Волковец, Д. А. Кондрашов, Я. В. Рошупкин, А. В. Турло // XXIII международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов»: тезисы докладов. – Обнинск, 2024. – С. 133.

23–А. Измерительный многоканальный приемник в диапазоне частот от 1 до 20 ГГц / А. В. Гусинский, А. П. Белошицкий, Д. Г. Булавко, А. В. Доронина, Д. А. Кондрашов, И. Н. Вошко, А. А. Дыдо, Н. А. Певнева // 11-я междунар. науч. конф. по вопросам развития вооружения: сборник научных статей. – Минск : Четыре четверти, 2025. – 276 с.

24–А. Многофункциональный источник измерительных радиолокационных сигналов в диапазоне частот от 1 до 20 ГГц / А. В. Гусинский, А. П. Белошицкий, В. В. Коледа, Д. А. Кондрашов, М. М. Касперович, Д. А. Лисов, С. И. Паскробка, М. С. Свирид, С. С. Солонович // 11-я междунар. науч. конф. по вопросам развития вооружения 22.05.2025: сборник научных статей. – Минск : Четыре четверти, 2025. – 276 с.

Патенты

25–А. Способ и устройство определения индивидуальной характеристической частоты биологического объекта : пат. № 030390 Евразийское патентное ведомство: МПК (2006) А61В 5/05 / В. В. Баранов, В. Л. Воробьёв, С. С. Гурский, А. В. Гусинский, П. Д. Клименко, Д. А. Кондрашов, А. М. Кострикин; заявитель и патентообладатель УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – № 201600370; заявл. 25.03.2016; опубл. 29.09.2017. – 11 с.

26–А. Способ формирования напряжений, несущих информацию о квадратурных составляющих S-параметров СВЧ-устройства : пат. ВУ 22074 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Д. А. Кондрашов, А. В. Сайков, В. П. Липатников, Н. А. Певнева. – Оpubл. 30.08.2018.

27–А. Широкодиапазонный генератор сигналов : пат. № 036472 Евразийское патентное ведомство: МПК (2006) Н03В 5/02 / А. В. Гусинский, А. В. Ворошень, С. М. Лапшин, Д. А. Кондрашов, А. С. Волинец, А. М. Кострикин; заявитель и патентообладатель УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – № 201800288; заявл. 27.03.2018; опубл. 30.09.2019. – 14 с.

28–А. Автоматизированная система пространственных измерений характеристик радиотехнических СВЧ устройств и материалов : пат. № 038525 Евразийское патентное ведомство: МПК (2006) Н03В 5/02 / М. С. Свирид, А. В. Гусинский, А. Н. Луферов, Д. А. Кондрашов, А. М. Кострикин; заявитель и патентообладатель УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – № 202000105; заявл. 11.02.2020; опубл. 31.08.2021.

29–А. Способ и устройство формирования сложных радиотехнических сигналов в сверхвысокочастотном диапазоне для радиотехнических измерительных систем : пат. № 041531 Евразийское патентное ведомство: МПК (2006) G01R 23/00 / М. С. Свирид, А. В. Гусинский, А. И. Волковец, Д. А. Кондрашов, В. С. Осипович; заявитель и патентообладатель

УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – № 201900409; заявл. 17.06.2019; опубл. 11.01.2022.

30–А. Измеритель комплексных коэффициентов отражения и передачи в миллиметровом диапазоне длин волн : пат. № 040512 Евразийское патентное ведомство: МПК (2006) G01R 27/06 / М. А. Боровская, А. А. Копшай, А. В. Гусинский, Д. А. Кондрашов, А. В. Ворошень, А. М. Кострикин; заявитель и патентообладатель УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – № 201900551; заявл. 30.10.2019; опубл. 14.06.2022.



РЭЗІЮМЭ

Кандрашоў Дзяніс Аляксандравіч

Метады і прыборы для вымярэнняў комплексных S-параметраў няўзгодненых аб'ектаў у міліметровым дыяпазоне даўжынь хваль

Ключавыя словы: вектарны аналізатар ланцугоў, комплексныя параметры, цвёрдацельны генератар ЗВЧ, балансны змяшальнік, фазаўтваральнік, дыэлектрычная антэна, лічбавае фільтраванне, характарыстычная частата

Мэта працы: памяншэнне хібнасці радыёвымярэнняў комплексных параметраў аб'ектаў, якія валодаюць няўзгодненымі характарыстыкамі, у міліметровым дыяпазоне даўжынь хваль.

Метады даследавання: матэматычнае мадэляванне, распрацоўка радыёвымяральнага прыбора, эксперыментальныя вымярэнні.

Выкарыстаная апаратура: вектарны аналізатар ланцугоў P4-MVM-78, частатамер электронна-злічальны РЧЗ-72, атэнюатар палярызацыйны хваляводны ДЗ-38, прыбор камбінаваны Testo-605-N1, аналізатар спектру Agilent E4407B.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны мадэль і алгарытм каліброўкі, вымярэнні комплексных каэфіцыентаў адлюстравання і перадачы аб'ектаў з няўзгодненымі характарыстыкамі ў дыяпазоне частот ад 53,57 да 78,33 ГГц; канструкцыя трохсекцыйнага фазавяртальніка, у якога на сярэднім значэнні працоўнага дыяпазону частот зрух фаз складае прыблізна 30° на аснове распрацаванага метаду атрымання квадратурных складнікаў вымяральнага ЗВЧ сігналаў ў гамадзіным вектарным аналізатары ланцугоў; структура цвёрдацельнага генератара, якая дазваляе рэалізаваць магчымасць фармавання сігналаў у дыяпазоне частот ад 53,57 да 78,33 ГГц пасродкам ужывання алгарытму пашырэння дыяпазону перабудовы частаты, які складаецца ў выкарыстанні аднолькавых па структуры блокаў пашырэння; эксперыментальны радыёвымяральны прыбор на аснове вектарнага аналізатара ланцугоў для вызначэння індывідуальнай характарыстычнай частаты аб'ектаў з разузгадненнем з вымяральным трактам у межах значэнняў КСВН ад 1,4 да 3,0; радыёвымяральны прыбор утрымоўвае ў ЗВЧ вымяральным тракце дыскрэtnы фазаўтваральнік, балансны змяшальнікі і дыэлектрычную антэну.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: пры даследаванні матэрыялаў, непрыстасаваных да непасрэднага падлучэння шляхам стандартных раздымных злучэнняў; пры біялагічных даследаваннях, медыцынскіх даследаваннях, даследаванні матэрыялаў расліннага паходжання.

Вобласць ужывання: лабараторныя вымярэнні S-параметраў пры распрацоўцы новых узораў радыёвымяральных прыбораў; навуковыя даследаванні ў біялогіі, медыцыне, матэрыялазнаўстве.

РЕЗЮМЕ

Кондрашов Денис Александрович

Методы и приборы для измерений комплексных S -параметров рассогласованных объектов в миллиметровом диапазоне длин волн

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, комплексные параметры, твердотельный генератор СВЧ, балансный смеситель, фазовращатель, диэлектрическая антенна, цифровая фильтрация, характеристическая частота.

Цель работы: уменьшение погрешности радиоизмерений комплексных параметров объектов, обладающих рассогласованными характеристиками, в миллиметровом диапазоне длин волн.

Методы исследования: математическое моделирование, разработка радиоизмерительного прибора, экспериментальные измерения.

Использованная аппаратура: векторный анализатор цепей P4-MBM-78, частотомер электронно-счетный РЧЗ-72, аттенюатор поляризационный волноводный ДЗ-38, прибор комбинированный Testo-605-H1, анализатор спектра Agilent E4407B.

Полученные результаты и их новизна: разработаны модель и алгоритм калибровки, измерения комплексных коэффициентов отражения и передачи объектов с рассогласованными характеристиками в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц; конструкция трехсекционного фазовращателя, у которого на среднем значении рабочего диапазона частот сдвиг фаз составляет приблизительно 30° на основе разработанного метода получения квадратурных составляющих измерительного СВЧ сигнала в гомодинном векторном анализаторе цепей; структура твердотельного генератора, которая позволяет реализовать возможность формирования сигналов в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц посредством применения алгоритма расширения диапазона перестройки частоты, заключающегося в использовании одинаковых по структуре блоков расширения; экспериментальный радиоизмерительный прибор на основе векторного анализатора цепей для определения индивидуальной характеристической частоты объектов с рассогласованием с измерительным трактом в пределах значений КСВН от 1,4 до 3,0; радиоизмерительный прибор содержит в СВЧ измерительном тракте дискретный фазовращатель, балансные смесители и диэлектрическую антенну.

Рекомендации по использованию: при исследовании материалов, непригодных к непосредственному подключению путем стандартных разъемных соединений; при биологических исследованиях, медицинских исследованиях, исследовании материалов растительного происхождения.

Область применения: лабораторные измерения S -параметров при разработке новых образцов радиоизмерительных приборов; научные исследования в биологии, медицине, материаловедении.

SUMMARY

Kondrashov Denis Aleksandrovich

Methods and instruments for measuring complex S -parameters of mismatched objects in the millimeter wavelength range

Keywords: vector network analyzer, complex parameters, solid-state microwave generator, balanced mixer, phase shifter, dielectric antenna, digital filtering, characteristic frequency

Purpose of the work: reduction of the error in radio measurements of complex parameters of objects with mismatched characteristics in the millimeter wavelength range.

Research methods: mathematical modeling, development of a radio measuring instrument, experimental measurements.

Used equipment: Vector Network Analyzer R4-MVM-78, electronic frequency counter RF3-72, polarizing waveguide attenuator D3-38, combination device Testo-605-H1, spectrum analyzer Agilent E4407B.

The results obtained and their novelty: a model and algorithm for calibrating and measuring complex reflection and transmission coefficients of objects with mismatched characteristics in the frequency range from 53.57 to 78.33 GHz have been developed; a design of a three-section phase shifter, which has a phase shift of approximately 30° at the average value of the operating frequency range, based on the developed method for obtaining quadrature components of the measuring microwave signal in a homodyne vector network analyzer; a structure of a solid-state generator that makes it possible to generate signals in the frequency range from 53.57 to 78.33 GHz by applying an algorithm for expanding the frequency tuning range, consisting of using expansion units of the same structure; an experimental radio measuring device based on a vector network analyzer for determining the individual characteristic frequency of objects with a mismatch with the measuring path within the VSWR values from 1.4 to 3.0; the radio measuring device contains a discrete phase shifter, balanced mixers and a dielectric antenna in the microwave measuring path.

Recommendations for use: when studying materials that are not suitable for direct connection via standard detachable connections; in biological research, medical research, and research of materials of plant origin.

Scope: laboratory measurements of S -parameters in the development of new types of radio measuring instruments; scientific research in biology, medicine and materials science.

Научное издание

**Кондрашов
Денис Александрович**

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ
S-ПАРАМЕТРОВ РАССОГЛАСОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук
по специальности 05.11.08 – радиоизмерительные приборы**

Подписано в печать 30.06.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 121.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск