

На правах рукописи



Воробьев Станислав Игоревич

**МЕТОДИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА СВЧ-ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.**

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы
(машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Шкодырев Вячеслав Петрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Полянский Владимир Александрович

доктор технических наук
Кулешов Сергей Викторович

Ведущая организация:

ОАО «ЦНПО «ЛЕНИНЕЦ»

Защита состоится «19» ноября 2015 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251 С.-Петербург, ул. Политехническая, 21, 9-й учебный корпус, ауд. 121

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences/>

Автореферат разослан « » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Богач Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Восприятие и анализ информации в различных частотных диапазонах электромагнитных волн несут в себе огромный научный потенциал. Исследования особенностей изображений объектов в радиоволновом диапазоне сформировали такое направление науки как радиовидение. Под радиовидением понимается метод получения видимого изображения объектов с помощью радиоволн (отраженных или излучаемых). С помощью радиовидения осуществляется дистанционное неразрушающее зондирование внутренней или поверхностной структуры объектов прозрачных или полупрозрачных для радиоизлучения. Для радиовидения обычно используют радиоволны миллиметрового (частота 30-300 ГГц, длина волны 1-10 мм) и сантиметрового (3 - 30 ГГц, 10-100 мм) диапазонов. В данной работе будет рассматриваться исключительно задача радиовидения в сантиметровом диапазоне длин волн, более распространенное название, которой в современной литературе - задача СВЧ-видения или задача формирования СВЧ-изображения.

Понятие СВЧ-изображения приобрело в последние годы иной смысл, чем в эпоху зарождения СВЧ-техники в середине 20 века. Изначально под понятием СВЧ-изображения объекта понимался набор импульсных откликов пространства, формы, длительности и амплитуды которых по косвенным признакам могли бы быть ассоциированы с реальными объектами. Только в начале 21 века с развитием технологии быстрых расчетов на вычислительных системах появилась возможность построения СВЧ-изображений объектов качественно другого уровня, уровня при котором степень детализации изображения позволяет прямую ассоциацию с формой поверхности и его электрическими признаками. Более того, появилась возможность построения изображений, сравнимых по уровню качества с изображениями видимого и инфракрасного диапазонов. В ходе появления этого нового качественного класса изображений возникла необходимость разработки новых методик обработки, анализа и классификации этих изображений.

В данный момент известны работы В.П. Якубова, В.А.Зверева, David M. Sheen и Douglas L. McMakin, описывающие процессы получения СВЧ-изображений высокого качества применительно к квазистатическим объектам. Однако, ни в одной из работ упомянутых авторов не описана возможность применимости предлагаемых методов получения СВЧ-изображения применительно к условиям зондирования динамических объектов при сохранении качества изображения. Главной причиной невозможности сохранения качества СВЧ-изображения при наблюдении динамических объектов является сверхбольшая вычислительная сложность методов восстановления СВЧ-поля и, как следствие, практически нереализуемые требования к мощностям вычислительных систем.

Другой важнейшей проблемой СВЧ-видения является практически полное отсутствие методов быстрого анализа полученных СВЧ-изображений необходимых для исследования динамических объектов. Задача анализа изображений не универсальна и может сильно варьироваться в зависимости от типа исследуемого объекта и конечной цели исследования, но, основываясь на предположении, что СВЧ-изображения объектов могут быть напрямую ассоциированы с видимыми образами данных объектов, становится возможным частичная

универсализация методик анализа путем исследования применимости методов анализа и фильтрации изображений в видимом диапазоне частот для СВЧ-изображений.

В настоящее время системы СВЧ-видения находят все большее число перспективных применений, начиная от контроля качества различных материалов, конструкций и сооружений, медицинской диагностики и до систем обеспечения безопасности, реализованных в виде технологий досмотра тела пассажиров и багажа.

Настоящая работа посвящена методам построения и анализа СВЧ-изображений в сантиметровом диапазоне применительно к задаче досмотра тела человека, как наиболее актуальной и быстро развивающейся проблеме современных технологий СВЧ-техники.

Цель и задачи диссертационной работы. Цель диссертационной работы – разработка и программная реализация комплекса методов быстрого построения и анализа изображения динамических объектов, полученного путем зондирования пространства СВЧ-излучением сантиметрового диапазона, а также исследование применимости разрабатываемого комплекса методов к анализу изображений человеческого тела в СВЧ-диапазоне с одновременным поиском и частичной идентификацией обнаруженных на теле объектов.

Для достижения этой цели в работе решены следующие **основные задачи**:

1. Разработана и экспериментально исследована многоканальная измерительная информационная система, позволяющая на основе результатов прямых измерений комплексных амплитуд рассеянного СВЧ-поля в области зондирования формировать СВЧ-изображение движущихся объектов.

2. Методы и алгоритмы обработки результатов прямых измерений, реализованные в системе, позволяют проводить измерения диэлектрической проницаемости и объема различных объектов, в том числе предметов скрытых на теле человека, что в применении к задачам досмотра позволяет обнаруживать и частично идентифицировать опасные предметы.

3. Необходимая для формирования СВЧ-изображения пространственная локализация точек поверхности движущихся объектов зондирования достигается разработанным алгоритмом и программой быстрого формирования трехмерного СВЧ-изображения путем восстановления по результатам измерений распределения комплексных амплитуд СВЧ-поля в трехмерном пространстве при использовании алгоритма цифровой фокусировки в приближении распространения плоских волн в окрестности точки фокуса.

4. Для обеспечения требований, предъявляемых к построению СВЧ-изображения движущихся объектов, разработан программно-аппаратный комплекс коррекции входных сигналов информационно-измерительных систем построения СВЧ-изображения.

5. Предложена методика метрологического обеспечения измерительных каналов разработанной системы измерения комплексных амплитуд рассеянного СВЧ-поля с обеспечением возможности ввода поправок в результаты измерений, а также метрологического обеспечения косвенных измерений диэлектрической проницаемости, объема и массы скрываемых диэлектрических предметов.

Решение и практическая реализация данных задач позволили создать комплексную методику обработки и анализа СВЧ-изображений объектов, которая, в свою очередь, была интегрирована и использована в технологиях систем досмотра человека.

Предметом исследования являются методы и программно-аппаратные средства построения и анализа изображений объектов, полученных в процессе дистанционного зондирования СВЧ системой, а также математические и теоретические модели процессов рассеяния, распространения и поглощения электромагнитных волн СВЧ диапазона в различных средах.

Методы исследования. В работе использовались методы цифровой обработки сигналов и изображений, методы математического моделирования, математический анализ. При математическом моделировании и разработке программного обеспечения использовалась система MathCad и языки программирования высокого уровня C/C++.

Научные результаты и их новизна

1. Предложен метод устойчивого решения задачи восстановления комплексных амплитуд СВЧ-поля в трехмерном пространстве по результатам измерений. Устойчивость решения обеспечивается использованием методики цифровой фокусировки в приближении распространения плоских волн в окрестности точки фокуса.

2. С целью поиска и идентификации опасных объектов в работе выделены и классифицированы их специфические признаки, количественные значения которых определяются в системе разработанными методами обработки и анализа СВЧ-изображений зондируемых объектов.

3. В отличие от широко распространенных приемов метрологического обеспечения прямых измерений комплексных амплитуд рассеянного СВЧ-поля и результатов косвенных измерений параметров скрываемых объектов выполняется не с помощью эталонных средств измерений, а с помощью образцовых фантомов рассеивающего объекта и фантома диэлектрического предмета с известными размерами и массой.

Теоретическая значимость работы

1. Предложен ряд приближений при решении задачи обратного рассеяния СВЧ волны на пространственно распределенном множестве точечных рассеивающих центров для пространственно распределенного набора источников излучения и регистраторов. Для данного ряда приближений вычислительная сложность задачи рассеяния (при ее количественном решении) многократно уменьшается.

2. Решена задача пространственной локализации точек отражающей поверхности зондируемого СВЧ-излучением объекта, основанная на анализе пространственного восстановленного распределения комплексных амплитуд СВЧ-поля в пределах объема зондирования.

3. Решена задача выделения и построения изображений объектов, имеющих существенно меньшую отражающую способность для СВЧ-излучения и находящихся на фоне объектов с сильными отражающими способностями.

4. Решена задача определения диэлектрической проницаемости диэлектрического объекта, основанная на нахождении разницы пространственных положений точек поверхности объекта в видимом и СВЧ-диапазоне.

Практическая значимость работы. Одним из наиболее перспективных направлений в технике многопозиционных СВЧ-систем является развитие систем досмотра (в основном, досмотра тела человека), определяющих наличие скрытых объектов под одеждой и/или в багаже. В данный момент ни одно из современных досмотровых устройств не обладает

необходимым набором важных свойств: они не обеспечивают возможности быстрого и автоматического (без наличия человеческого фактора) принятия решения о результатах досмотра, а значит, не позволяют вовремя обнаружить опасный объект и принять меры к его обезвреживанию прежде, чем он нанесет вред. В ходе выполнения работы была создана программная реализация описанного в диссертационной работе комплекса методов, которая при интеграции в системы безопасности может обеспечить проведение быстрого автоматизированного досмотра человеческого тела с автоматической же возможностью селекции расположенных на теле объектов. Программно-аппаратная реализация методов, приведенных в диссертационной работе, является актуальной научно-технической задачей, реализация которой позволит существенно повысить вероятность обнаружения опасных объектов, скрытых под одеждой на теле потенциальных преступников и террористов.

На базе полученных научных результатов разработан комплекс программно-аппаратных средств, интегрированных в технологии многопозиционных систем класса AMD (досмотровые системы «АМУ-256», «АМУ-256х2», «AMDх4», «MS-SRIP», «SMD», «HSR GO»). На основе реализованных методик разработаны первые в своем классе системы досмотра человека имеющие следующие свойства: скрытый досмотр, дистанционный досмотр, автоматический досмотр, досмотр в режиме реального времени, безопасность для здоровья при одновременном сохранении тайны личной жизни.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный быстрый метод восстановления распределения комплексных амплитуд рассеянного зондируемым объектом СВЧ-поля позволяет существенно снизить вычислительную сложность задачи восстановления СВЧ-поля и понизить требования к производительности вычислительных систем при численном решении задачи без существенной для задач досмотра человека потери в качестве восстанавливаемого СВЧ-изображения объекта.

2. Предложенный метод анализа СВЧ-изображения объекта позволяет классифицировать объект по типу проводимости и определять диэлектрическую проницаемость диэлектрического объекта, а также в рамках задачи досмотра человека производить поиск объектов, скрытых на теле человека.

3. Разработанный программно-аппаратный комплекс коррекции исходных характеристик сигнала для многопозиционных информационно-измерительных СВЧ систем, позволяет упростить процесс нахождения полного набора характеристик излучения многопозиционной системы. Цифровая коррекция исходного сигнала ИИС позволяет выполнить начальные условия задачи восстановления СВЧ-поля и обеспечить дальнейшую работу системы в качестве средства построения СВЧ-изображения объекта.

Степень достоверности и апробации. Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается апробацией результатов разработанных методов, как на модельных данных, так и на экспериментальных данных, полученных при зондировании реальных объектов.

На базе полученных научных результатов разработан комплекс программно-аппаратных средств, интегрированных в технологии многопозиционных систем класса AMD (досмотровые системы «АМУ-256», «АМУ-256х2», «AMDх4», «MS-SRIP», «SMD», «HSR GO»).

Разработанный программно-аппаратный комплекс является основой программного обеспечения, разработанного для системы досмотра человека SMD (Secret Microwave Door), которая была разработана в ходе выполнения крупнейшего международного проекта финансируемого в рамках работы Совета Россия - НАТО «STANDEX» в 2012-2013 году. Работа системы была оценена международными экспертами в области разработки технических средств обеспечения безопасности как «...наиболее перспективная технология нового поколения».

Научная новизна проекта подтверждена двумя патентами Российской Федерации: патент РФ №2408005 «Способ определения диэлектрической проницаемости диэлектрического объекта» и патент РФ №2411504 «Способ дистанционного досмотра цели в контролируемой области пространства» и двумя поданными заявками на патенты (№2014129115, №2014129117 дата приоритета 15.07.2014).

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на региональных и международных научных конференциях: «Тринадцатой международной научно-практической конференции Hi-Tech»(Санкт-Петербург, 2012г.); «6-th Future Security Conference» (Berlin, 2011г.); «Specialist Meeting SET-159 on «Terahertz and Other Electromagnetic Wave Techniques for Defence and Security» (Vilnius, 2010г.); «9th Future security research conference» (Berlin, 2014г.).

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 18 печатных работах, в том числе 4 патентах РФ и 1 патенте US, 7 работах на английском языке и 2 статьях, в изданиях рекомендованных ВАК РФ.

Внедрение. На базе предложенных методов разработан комплекс программно-аппаратных средств, интегрированных в технологию многопозиционных систем, базирующихся на технической платформе AMD, и реализованных в следующих досмотровых системах «АМУ-256», «АМУ-256х2» (разработчик - ООО «Научно-технический центр прикладной физики») и системы «AMDx4» и «SMD» (разработчик ООО «APSTEC Labs»).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 172 страницах, содержит 98 рисунков, 6 таблиц и библиографический список из 126 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. В разделе «Введение» показана актуальность темы диссертации, определена цель и задачи проведенных исследований, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о реализации работы, ее апробации, публикациях и структуре диссертации.

В первой главе приводится критический анализ современных проблем информационно-измерительных систем (ИИС) построения и анализа СВЧ-изображений применительно к задаче досмотра тела человека. Приводится детальный обзор современных активных и пассивных СВЧ-технологий досмотра тела человека, включающий в себя критическое сравнение с другими существующими досмотровыми технологиями. Описана

проблема ограничения скорости работы систем досмотра, которая определяется методами построения и анализа СВЧ-изображений. Выделяется и описывается ряд основных методов, требующих оптимизации или полной модификации в процессе построения и анализа СВЧ-изображений объекта применительно к задаче досмотра тела человека.

В первой главе также производится постановка задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны этапы разработки комплекса методов построения и анализа СВЧ-изображений объектов применительно к технологиям многопозиционного зондирования объектов когерентным СВЧ-излучением со ступенчато меняющейся частотой.

Входными данными активных ИИС построения СВЧ-изображения являются значения сигнала зондирующего излучения, рассеянного объектом исследования. Применительно к задачам досмотра тела человека выходными данными ИИС будет являться решение о степени «опасности» исследуемого объекта на основе определяемых в процессе анализа СВЧ-изображения характеристик объекта. Таким образом, при обработке входных данных ИИС происходит построение, фильтрация и анализ СВЧ-изображения, на основе которого могут быть определены некоторые свойства объекта, позволяющие произвести его классификацию и принять конечное решение о степени его опасности.

На рис. 1 показана структура разработанного в рамках диссертационной работы комплекса методов построения и анализа СВЧ-изображений объектов.

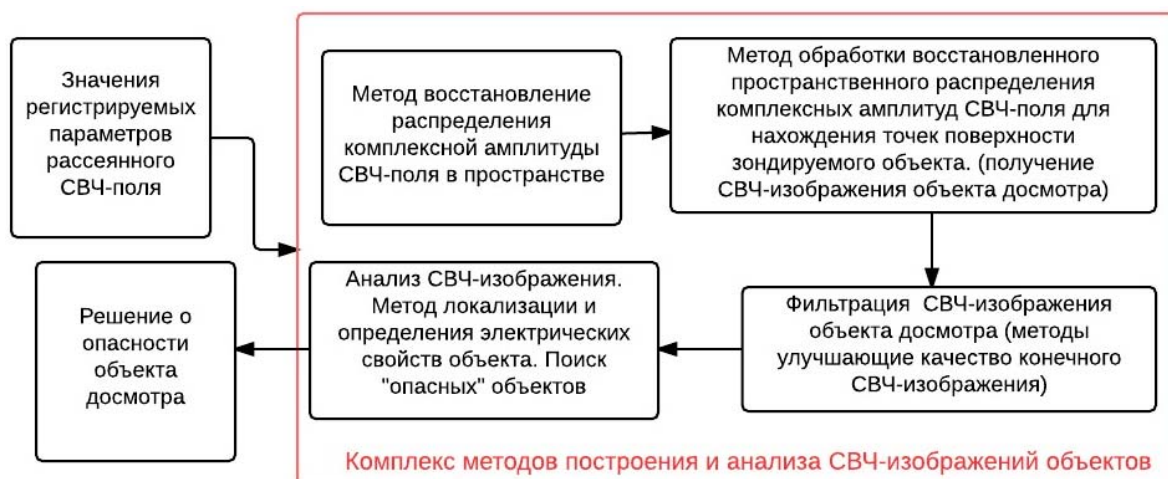


Рисунок 1. Структура комплекса методов построения и анализа СВЧ-изображений активных ИИС применительно к задаче досмотра человека.

Первичной и наиболее ресурсоемкой задачей разработанного комплекса методов является задача восстановления распределения значений комплексной амплитуды СВЧ-поля в пространстве.

1. Метод восстановления распределения значений комплексной амплитуды СВЧ-поля в трехмерном пространстве, основанный на алгоритме цифровой фокусировки для случая дискретного спектра частот зондирующего излучения и дискретного набора приемо-передающих каналов ИИС.

Пусть в пространстве в ограниченном объеме V расположен набор передающих (т) антенных элементов с координатами \vec{R}_j^t , $i = 1..N^t$ и приемных (гх) элементов с координатами

\vec{R}_j^{rx} , $j = 1..N^{rx}$. В этом объеме также могут находиться какие-либо рассеивающие объекты. В процессе измерений передающие элементы поочередно излучают непрерывную волну на частоте f_k , при этом на каждом из приемных элементов регистрируется комплексная амплитуда $E_{i,j,k}^a$ рассеянной объектами СВЧ-волны. Процесс измерений повторяется на N^f различных частотах. Ставится задача определения комплексной амплитуды E рассеянной волны в узловых точках некоторой пространственной сетки в объеме V .

а) «Классический» метод

Пусть $E_0(\vec{R}_0)$ - некоторое распределение поля от источников излучения, сосредоточенных в некотором объеме V , то создаваемое ими поле в точке \vec{R} некоторой однородной среды определяется уравнением в свертках:

$$E(\vec{R}) = \iiint_V E_0(\vec{R}_0) G_0(\vec{R}_0 - \vec{R}) d^3 \vec{R}_0, \quad (1)$$

Где $G_0(\vec{R}) = \frac{\exp(ik|R|)}{4\pi|R|}$ - функция Грина свободного пространства, т.е. решения

уравнения Гельмгольца для свободного пространства.

В отсутствие неоднородностей в области зондируемого пространства задача нахождения значения поля $E(\vec{R})$ в любой точке пространства является прямой задачей распространения волн. Обратная задача состоит в решении интегрального уравнения (1) и восстановления распределения $E_0(\vec{R}_0)$ по измеренным величинам $E(\vec{R})$. В задачах рассеяния распределение источников излучения может быть заменено на распределение рассеивающих центров.

Если бы поле было измерено во всех точках пространства, то решение достиглось бы применением обратной свертки, но т.к. поле $E(\vec{R})$ регистрируется лишь в некоторых точках (в некоторой плоскости) пространства, то для восстановления распределения излучателей используется процедура обратной фокусировки. В рамках решаемой задачи предполагается цифровая фокусировка поля в каждую узловую точку некоторой пространственной сетки в объеме V .

В общем случае при проведении процедуры обратной фокусировки значение комплексной амплитуды поля в точке фокусировки \vec{R}_F может быть представлено в виде свертки измеренного поля с функцией импульсного отклика свободного пространства H :

$$E(\vec{R}_F) = \iint_{R,f} E(\vec{R}, f) H(\vec{R}_F - \vec{R}, f) dRdf, \quad (2)$$

где $H(\vec{R}, f) = -\frac{1}{2\pi} ik \frac{e^{ikR}}{R} \frac{z}{R} + \frac{1}{2\pi} \frac{e^{ikR}}{R^2} \frac{z}{R}$, $k = 2\pi / \lambda = 2\pi f / c$ и $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

В случае восстановления поля на расстояниях от приемных элементов существенно превышающих длину волны, т.е. при условиях $k \gg \frac{1}{R}$ импульсный отклик пространства можно записать в виде:

$$H(\vec{R}, f) = -\frac{1}{2\pi} ik \frac{e^{ikR}}{R} \frac{z}{R} \quad (3)$$

Для случая данного приближения, а также факторов ограничения дискретного набора приемо-передающих каналов ИИС и дискретного частотного диапазона выражение (2) принимает вид:

$$E(\vec{R}_F) = \sum_{i,j,k} E_{i,j,k}^a H(\vec{R}_F - \vec{R}_j^{rx}, f_k) H(\vec{R}_j^t - \vec{R}_F, f_k), \quad H(\vec{r}, f) = -\frac{2\pi if}{c} \frac{r_z}{|\vec{r}|^2} \exp\left(\frac{-2\pi if|\vec{r}|}{c}\right) \quad (4)$$

разложив суммирование по составляющим

$$E_{rx}(\vec{R}_F) = \sum_f f \sum_t E^a(t, f) \exp\left(\frac{-2\pi if}{c} (|\vec{R}_t(t)| + |\vec{R}_{rx}|)\right) \frac{Z}{|\vec{R}_t(t)|^2} \quad (5)$$

где t – набор пространственных координат x, y, z передатчиков, а \vec{R}_t и \vec{R}_{rx} оптические

пути волны до и после точки фокусировки (Рис.2), $E^a(t, f)$ – принимаемые значения СВЧ-поля на антенне для каждого передатчика на каждой частоте.

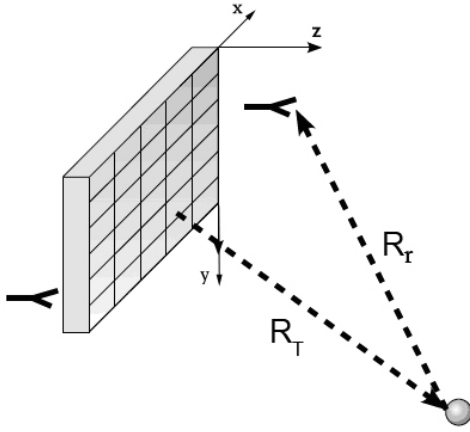


Рисунок 2. Расположение приемо-передающих элементов относительно точки фокусировки

Данный метод является приближенным в том смысле, что скалярное волновое уравнение не учитывает многих эффектов, возникающих при взаимодействии СВЧ волны с веществом. Следовательно, вид решения, даваемого этим методом, не совпадает с видом реально наблюдаемого СВЧ-поля. Однако это приближенное решение дает достаточно информации для задач дистанционного зондирования поверхности тела человека.

Также стоит отметить, что в выражении (5) отсутствует суммирование по приемным антеннам для формирования пространственного распределения амплитуд восстановленного СВЧ-поля. Для случая существования в пространстве нескольких регистрирующих элементов (приемных антенн) применяется когерентное сложение (6) значений комплексных амплитуд восстановленного СВЧ-поля всех регистрирующих элементов с использованием коэффициентов баланса k_{rx} . Использование коэффициентов баланса необходимо для учета различий в условиях видимости объекта для разных регистрирующих элементов.

$$A(\vec{R}) = \left| \sum_{rx} k_{rx} E_{rx}(\vec{R}) \right| \quad (6)$$

Приведенный метод был программно реализован и показал возможность восстановления распределения амплитуд СВЧ-поля с возможностью дальнейшего построения СВЧ-изображения объекта. В силу приближенности метода качество получаемых изображений сильно зависит от сложности рассеивающей структуры объекта. Так для восстановления поля точечного рассеивателя качество его изображения близко к

дифракционному пределу. Для сложной многократно перерассеивающей неизотропной структуры качество изображения может падать по сравнению с решением точной задачи рассеяния СВЧ-волны. В диссертационной работе показано, что при применении метода к задаче досмотра тела человека достижение дифракционного предела разрешения не является обязательным и при восстановлении СВЧ-поля, рассеянного поверхностью человеческого тела, качества изображения, получаемого данным методом, вполне достаточно.

Другим важным аспектом является возможность восстановления СВЧ-поля динамического объекта. Так как выражение (5) для восстановления СВЧ-поля в каждой точке пространства предполагает суммирование сигналов во всех приемо-передающим каналах на всех рабочих частотах ИИС, то вычислительная сложность данного метода напрямую связана с количеством каналов регистрации и частот зондирования. Для оценки вычислительной сложности задачи восстановления поставим ограничение для набора приемо-передающих элементов и частот, соответствующие характеристикам экспериментальной ИИС АМУ-256: 14 частот, 256 излучающих элементов, 2 приемных антенны. Применительно к задаче досмотра тела человека проведен расчет для пространственного массива точек восстановления СВЧ-поля размерами 60x60x56 точек. Полное количество процессорных операций для построения одного изображения будет рассчитываться следующим образом:

$$N_{total} = N_{tx} \cdot N_f \cdot N_{rx} \cdot (n_x \cdot n_y \cdot n_z) \cdot N_{conv} = 1.2 \cdot 10^{11} \text{ операций} \quad (7)$$

где N_{conv} - количество процессорных операций, требуемых для осуществления проведения операции свертки. N_{tx}, N_{rx}, N_f - количество приемников, передатчиков и частот.

При наличии требования работы алгоритма в режиме реального времени (применительно к динамическим объектам - со скоростью не менее 10 кадров (изображений) в секунду) необходима процессорная мощность, способная производить вычисления со скоростями не менее $1.2 \cdot 10^{12} \text{ op/сек}$ т.е. 1.2 TFlops. В современных вычислительных системах данная процессорная мощность является достижимой при использовании систем параллельного программирования, например технологии CUDA, использующей современные графические процессоры.

Однако, в случае использования систем с большим количеством приемо-передающих каналов или частот, вычислительные требования алгоритма восстановления СВЧ-поля способны превысить предел доступных вычислительных технологий. Была рассмотрена возможность модификации данного метода для уменьшения вычислительной сложности задачи восстановления СВЧ-поля.

б) «Быстрый» метод

На основе приближений, используемых в задачах радиоволновой томографии, а точнее, алгоритмов цифровой фокусировки на границе раздела сред была рассмотрена возможность разделения операции свертки (5) в частотном и пространственном диапазонах. В случае подповерхностной томографии, задача сводилась к фокусировке излучения в приповерхностную точку среды и операции обратного преобразования Фурье по частоте.

В работе была рассмотрена возможность применения данного подхода к задаче восстановления распределения комплексной амплитуды СВЧ-поля в ограниченном объеме

Ω путем фокусировки излучения в граничную область объема и операции обратного преобразования Фурье по частоте.

Пусть E_{z_0, x_i, y_j} распределения значений СВЧ-поля в некоторой граничной области z_0 объема Ω . Проведем восстановление СВЧ-поля в плоскости z_0 на каждой из частот:

$$E_{z_0, x_i, y_j}(rx, f) = \sum_t E^a(t, f, rx) \exp\left(\frac{-2\pi i f}{c} \left(\left| \bar{R}_{i,j, z_0}(t) \right| + \left| \bar{R}_{i,j, z_0}(rx) \right| \right) \right) \frac{z_0}{\left| \bar{R}_{i,j}(t) \right|^2} \quad (8)$$

Расчет поля на плоскости z_0 приближенно можно считать аналогом сдвига массива излучающих и приемных элементов в точку с координатой z_0 . Точность данного перехода может быть абсолютной только в модельных случаях при бесконечных размерах антенного массива, но с учетом диаграмм направленности передающего массива можно приближенно сказать, что большая часть энергии поля сосредоточена в направлении вектора z , и при использовании новой плоскости пространства в качестве первичного источника информации о поле не теряется основное количество информации.

Далее предполагается, что вблизи точки фокусировки распределение значений СВЧ-поля вдоль направления z может быть вычислено в приближении распространения плоских волн на основе Фурье преобразования из частотной в пространственную область.

$$E_{z, x_i, y_j}(rx) = \sum_f E_{z_0, x_i, y_j}(rx, f) \exp\left(\frac{ik_f z}{c}\right) \quad (9)$$

Другими словами, получается то же распределение поля в объеме для каждого x_i, y_j и z - элементарных узлах сетки, но распределение поля по z для каждого x_i, y_j рассчитывается не за счет поточечного расчета трехмерного массива, а за счет Фурье преобразования из частотной в пространственную область в каждой точке x_i, y_j в направлении z .

Так же как и в случае «классического» метода для формирования пространственного распределения амплитуд восстановленного СВЧ-поля для случая существования в пространстве нескольких регистрирующих элементов (приемных антенн) применяется когерентное сложение значений комплексных амплитуд восстановленного СВЧ-поля всех регистрирующих элементов (6).

Для оценки вычислительной сложности задачи восстановления поставим такие же ограничения, как и для «классического» метода: 14 частот, 256 излучающих элементов, 2 приемных антенны. Применительно к задаче досмотра тела человека был проведен расчет для пространственного массива точек восстановления СВЧ-поля размерами 60x60x56 точек:

$$N_{total2} = N_{tx} \cdot N_f \cdot N_{rx} \cdot (n_x \cdot n_y) \cdot N_{conv} + N_{rx} \cdot n_x \cdot n_y \cdot N_f \cdot N_{conv2} = 4.7 \cdot 10^9 \text{ операций} \quad (10)$$

где N_{conv} - количество процессорных операций требуемых для осуществления проведения операции свертки; N_{conv2} - количество процессорных операций требуемых для осуществления проведения операции Фурье преобразования; N_{tx}, N_{rx}, N_f - количество приемников, передатчиков и частот. При требовании работы алгоритма в режиме реального времени (применительно к динамическим объектам - со скоростью не менее 10 кадров

(изображений) в секунду) необходима процессорная мощность, способная производить вычисления со скоростями не менее $4.7 \cdot 10^{10}$ *оп*/сек т.е. 0.047 TFlops, что порядка 25 раз меньше аналогичных требований к процессорной мощности «классического» алгоритма. Численные различия вычислительной сложности обоих методов во многом зависят от начальных условий задачи восстановления, а именно размеров восстанавливаемого пространственного массива точек, числа приемо-передающих каналов информации о значениях рассеянного СВЧ-поля и рабочих частот. Однако, для многопозиционных ИИС построения СВЧ-изображений объектов, используемых в задачах досмотра, данная разница всегда будет носить порядковый характер, что, безусловно, несет в себе потенциал многократного снижения времени формирования изображения объекта и увеличения скорости работы систем в целом.

Приведенный метод был программно реализован и показал возможность восстановления распределения амплитуд СВЧ-поля с возможностью дальнейшего построения СВЧ-изображения объекта. В силу приближенности «быстрого» метода, качество получаемых изображений может падать по сравнению с качеством изображения «классического» метода. Основным фактором влияния является выбор плоскости z_0 в качестве первичного источника информации. При совпадении плоскости z_0 с соответствующей поверхностью объекта точки x_i, y_j качество изображений идентично, при удалении от точки поверхности наблюдается падение разрешения.

Подробная оценка разрешающей способности алгоритмов приведена в диссертационной работе. Для минимизации падения разрешения возможен выбор плоскости z_0 на основе данных видео системы, обеспечивающей приближенную локализацию точек поверхности объекта.

2. Метод обработки восстановленного пространственного распределения комплексных амплитуд СВЧ-поля для нахождения точек поверхности зондируемого объекта и формирования его конечного СВЧ-изображения. Методы, улучшающие качество конечного СВЧ-изображения.

После обработки данных с помощью алгоритма восстановления СВЧ-изображения формируется пространственный массив распределения значений амплитуды поля в пространстве. Известно, что в СВЧ-диапазоне частот электромагнитного излучения проводящие объекты имеют большой коэффициент отражения, который зависит от проводимости объекта. В процессе восстановления поля из всего облака точек восстановления центрами рассеяния будут являться те, которые имеют наибольшую амплитуду. При этом стоит отметить, что центры рассеяния СВЧ-волны на проводящем объекте являются точками внешней поверхности объекта, так как рассеяние волны в данном диапазоне частот происходит на скин слое проводника, толщина которого не превышает нескольких микрон. Таким образом, можно постулировать, что точки зондируемого пространства, в которых в ходе восстановления поля значения амплитуды восстановленного сигнала получились максимальными, являются точками отражающей поверхности объекта.



Рисунок 4. Структура метода обработки пространственного распределения комплексных амплитуд СВЧ-поля.

Исходя из вышесказанного, процесс нахождения координат рассеивающих центров необходимо начинать с выделения областей предполагаемого нахождения рассеивающих центров на основе амплитудного анализа. Для этого проводится построение гистограммы распределения амплитуд восстановленного СВЧ-поля (Рис.5).

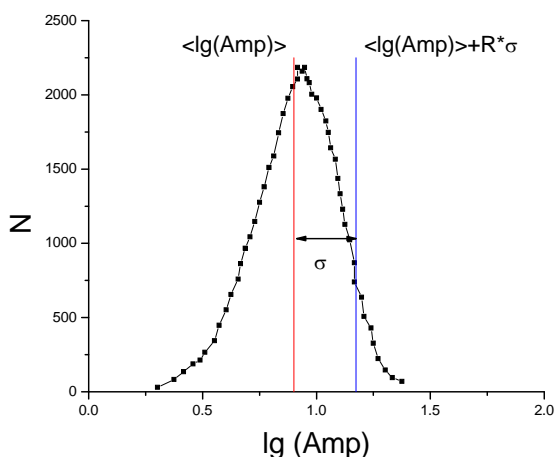


Рисунок 5. Изображение гистограммы распределения амплитуд восстановленного СВЧ-поля

Предполагается, что распределение логарифма амплитуд имеет гауссовский вид, т.е. является нормальным, по стандартным формулам считается среднее значение логарифма - $\langle \lg(Amp) \rangle$ и среднеквадратичное отклонение - σ .

$$\langle \lg(Amp) \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \lg(Amp)_i}{N} \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lg(Amp)_i - \langle \lg(Amp) \rangle)^2}{N-1}} \quad (12)$$

где N – число точек восстановления СВЧ-поля.

Параметр R будет являться параметром резкости конечного СВЧ-изображения, т.к. при больших значениях

данного параметра, поверхность объекта будет становиться шумной, а при малых значениях некоторые области поверхности будут исчезать. Выбор данного параметра зависит от зондируемого объекта, его расположения по отношению к излучающим антеннам и еще

множества других факторов. Определение оптимального параметра проводится вручную на основе результатов визуализации.

Адаптивный фильтр предназначен для исключения из дальнейшего анализа тех узлов координатной сетки, в которых амплитуда поля меньше некоторого определенного значения. Для этого используются значения $\langle \lg(\text{Amp}) \rangle$, σ из амплитудной диаграммы, а также значение параметра R , выбираемое вручную. Параметр R характеризует уровень фильтрации (Рис.6) (отсечение значений).

В цикле все значения массива Amp_i сравниваются со значением $10^{(\langle \lg(\text{Amp}) \rangle + R \cdot \sigma)}$ и преобразуются по правилу:

$$\begin{cases} \text{Amp}_{ia} = \text{Amp}_i, \text{Amp}_i \geq 10^{(\langle \lg(\text{Amp}) \rangle + R \cdot \sigma)} \\ \text{Amp}_{ia} = 0, \text{Amp}_i < 10^{(\langle \lg(\text{Amp}) \rangle + R \cdot \sigma)} \end{cases} \quad (13)$$

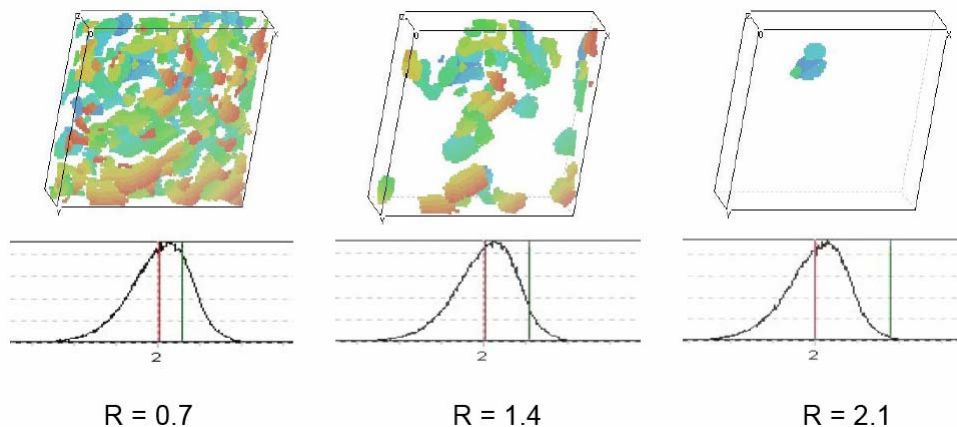


Рисунок 6. Результаты применения адаптивной фильтрации к распределению СВЧ-поля в некоторой области пространства при различных значениях параметра R .

Фильтр максимальных значений предназначен для выделения в пространстве поверхности объекта (тела человека). Для того чтобы выделить в исследуемой области пространства СВЧ-изображение отражающей поверхности объекта необходимо установить однозначное соответствие по дальности (основному направлению распространения волны). В ходе фильтрации для каждой пары значений координат x_i и y_i происходит выделение точки по координате z с максимальной амплитудой восстановленного поля. Если для какой-то пары значений координат x_i и y_i все значения были обнулены применением предыдущего адаптивного фильтра, то и в новый массив значений z записывается нулевое значение z . Таким образом, после фильтрации размерность выходного двумерного массива – количество точек координатной сетки по x , y . После нахождения однозначного соответствия между координатами точек с максимальными значениями амплитуд процесс фильтрации изображения переходит от анализа амплитуд поля к анализу облака точек, соответствующих поверхности объекта.

Метод фильтрации на основе видеоизображения предназначен для удаления «шумовых» точек СВЧ-изображения объекта. Видеоизображение используется для определения области пространства, в которой находятся досматриваемые носители объектов, для визуальной идентификации объектов и для получения дополнительной информации о

форме поверхности объектов. С использованием видеосистемы происходит дальнейшая фильтрация СВЧ-изображения. Фильтрация СВЧ-изображения базируется на идее, что в пространстве не может существовать точек СВЧ-изображения, отсутствующих на видеоизображении, т.е. если таковые точки имеются, они являются шумами и не могут являться частью конечного СВЧ-изображения.

Фильтрация на основе метода связанных областей.

Исходная трехмерная модель, получаемая в процессе восстановления изображения, содержит определенное количество шумов, вызванных внешними электромагнитными шумами, неидеальными условиями освещения и собственно формой и фактурой объектов. Для того чтобы снизить влияние этих факторов на дальнейшие этапы обработки, трехмерная модель подвергается фильтрации методом связанных областей, структура которого приведена далее.

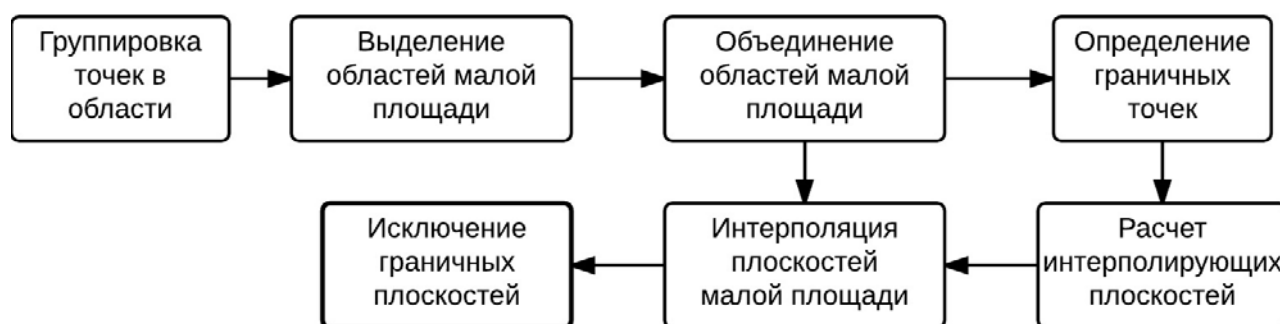


Рисунок 7. Схема алгоритма фильтрации и интерполяции восстанавливаемого микроволнового изображения.

Далее приведен результат применения методов фильтрации СВЧ-изображения на примере изображения человеческого тела.

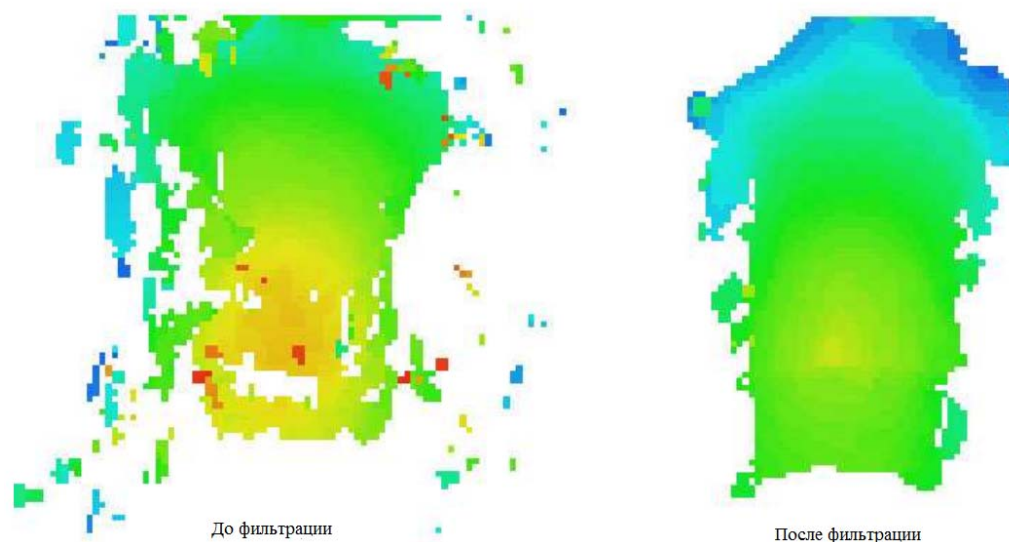


Рисунок 8. Сравнение исходной карты глубины СВЧ-изображения и карты глубины СВЧ-изображения, полученной после применения методов фильтрации.

3. Анализ СВЧ-изображения. Метод локализации и определения свойств диэлектрического объекта путем сравнения пространственного расположения облаков точек поверхности объекта при наблюдении объекта в СВЧ и видимом диапазоне применительно к задаче досмотра тела человека.

Локализация диэлектрического объекта в рамках предлагаемого метода происходит путем сравнения карты глубины восстановленного СВЧ-изображения поверхности тела и карты глубины видео изображения. Области, в которых карта глубины СВЧ-изображения отличается от карты глубины видео изображения больше, чем на фиксированный предел, считаются диэлектрическими.

Полный набор диэлектрических областей всего изображения формирует карту опасности. После получения карты опасности и применения фильтра связанных областей (при наличии объекта) происходит определение параметра выделенного объекта – диэлектрической проницаемости (ϵ).

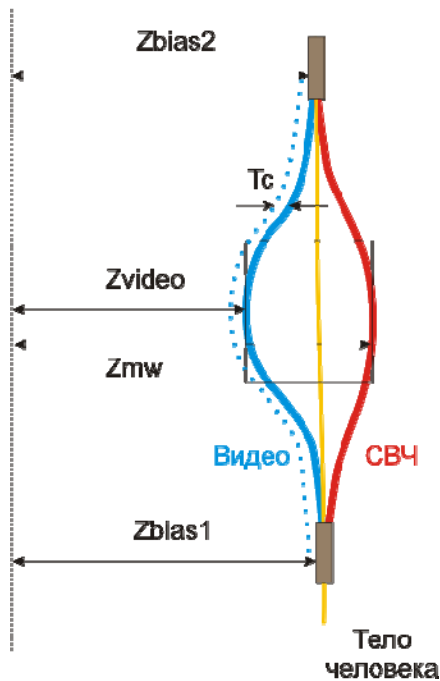


Рисунок 9. Изображение расположения поверхности объекта на видео и СВЧ изображениях.

Координаты определяются как средние значения соответствующих координат точек массива карты опасности. Рассчитываются также значения Z_{video} – как среднее значение карты глубины видеоизображения для точек массива карты опасности, и Z_{mw} – как среднее значения карты глубины СВЧ-изображения в этих же точках (Рис. 9). Далее производится вычисление расстояния до тела человека в месте расположения объекта в предположении отсутствия этого объекта на теле - Z_b . Для этого происходит выбор двух симметрично расположенных областей (по координате y), находящихся над и под предполагаемым объектом на заданном от него расстоянии.

Предполагается, что в этих областях объектов нет, и разница карт глубин видео и СВЧ-изображения может обуславливаться только толщиной одежды человека. Затем вычисляются x и y координаты точек этих областей. Для этих точек определяются для верхней и нижней области Z_{bias1} и Z_{bias2} как средние значения z -координат точек этих областей на карте

глубины СВЧ-изображения.

Диэлектрическая проницаемость диэлектрического объекта - ϵ ,

$$\epsilon = \left(\frac{Z_{mw} - Z_{video}}{Z_b - Z_{video} - T_c} \right)^2 \quad (14)$$

где $Z_b = \frac{Z_{bias1} + Z_{bias2}}{2}$ и T_c – поправочный коэффициент

Также описана и реализована возможность определения диэлектрической проницаемости объекта и без использования видеосистемы. При рассмотрении зависимости отношения амплитуд восстановленного СВЧ-поля для 1-й и 2-й границ диэлектрического объекта от параметра диэлектрической проницаемости (Рис. 10).

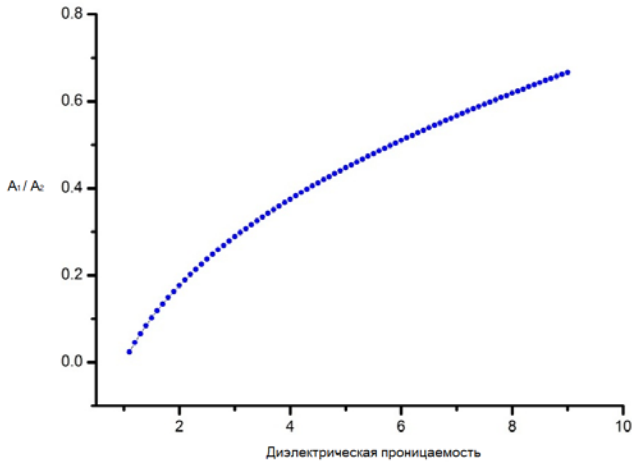


Рисунок 10. Зависимость отношения амплитуд 1ой и 2ой границы диэлектрического объекта в зависимости от коэффициента его диэлектрической проницаемости

Данная зависимость может быть выражена формулой:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\varepsilon - 1}{4\sqrt{\varepsilon}} \quad (15)$$

Таким образом, найдя отношение амплитуд восстановленного поля от двух границ диэлектрического объекта, можно определить диэлектрическую проницаемость объекта. Применение этого метода осложняется проблемой «плохой видимости» 1-й поверхности диэлектрического объекта на фоне сильно отражающей задней поверхности диэлектрика, соответствующей границы раздела сред диэлектрик-проводник.

В третьей главе приведено описание реализации и применения разработанных методик для работы на многопозиционных ИИС построения и анализа СВЧ-изображений объектов. Описаны особенности программной реализации алгоритма восстановления пространственного распределения значений СВЧ-поля для высокопроизводительных вычислительных систем, основанных на технологии CUDA. Приведена оценка быстродействия программной реализации алгоритма для разных вычислительных систем. Проведен сравнительный анализ скорости расчета программных реализаций методов «классического» и приближенного «быстрого» нахождения распределения значений СВЧ-поля в ограниченном объеме пространства. Сформулирована проблема обеспечения начальных условий задачи восстановления СВЧ-поля для систем СВЧ-зондирования. Описана разработанная комплексная методика коррекции исходных сигналов в приемо-передающем тракте ИИС для обеспечения требований задачи построения СВЧ-изображения.

При программной реализации разработанного комплекса методов построения и анализа СВЧ-изображений объектов была сформирована общая программная структура блоков обработки информации (Рис.11). Данная структура имеет два параллельных канала входных данных, получаемых от видеосистемы и СВЧ ИС. Выходными данными является информация о наличии диэлектрических объектов в зоне досмотра и, в случае наличия данного объекта, информация о его характеристиках (объем, эквивалентная масса, диэлектрическая проницаемость).

В случае интеграции комплекса в технологии досмотра, структура программы дополняется блоком «принятия решения», который на основе характеристик обнаруженного

объекта формирует решение о степени его опасности. Стоит отметить, что наиболее вычислительно сложным и емким блоком данной программной структуры является блок восстановления распределения амплитуд СВЧ-поля в пространстве. В силу своих особенностей метод восстановления предполагает проведение большого количества одинаковых расчетных операций с различными элементами массива входных данных, что позволяет использовать при программной реализации технологию параллельного программирования CUDA и производить расчетные действия на графических процессорах (GPU).

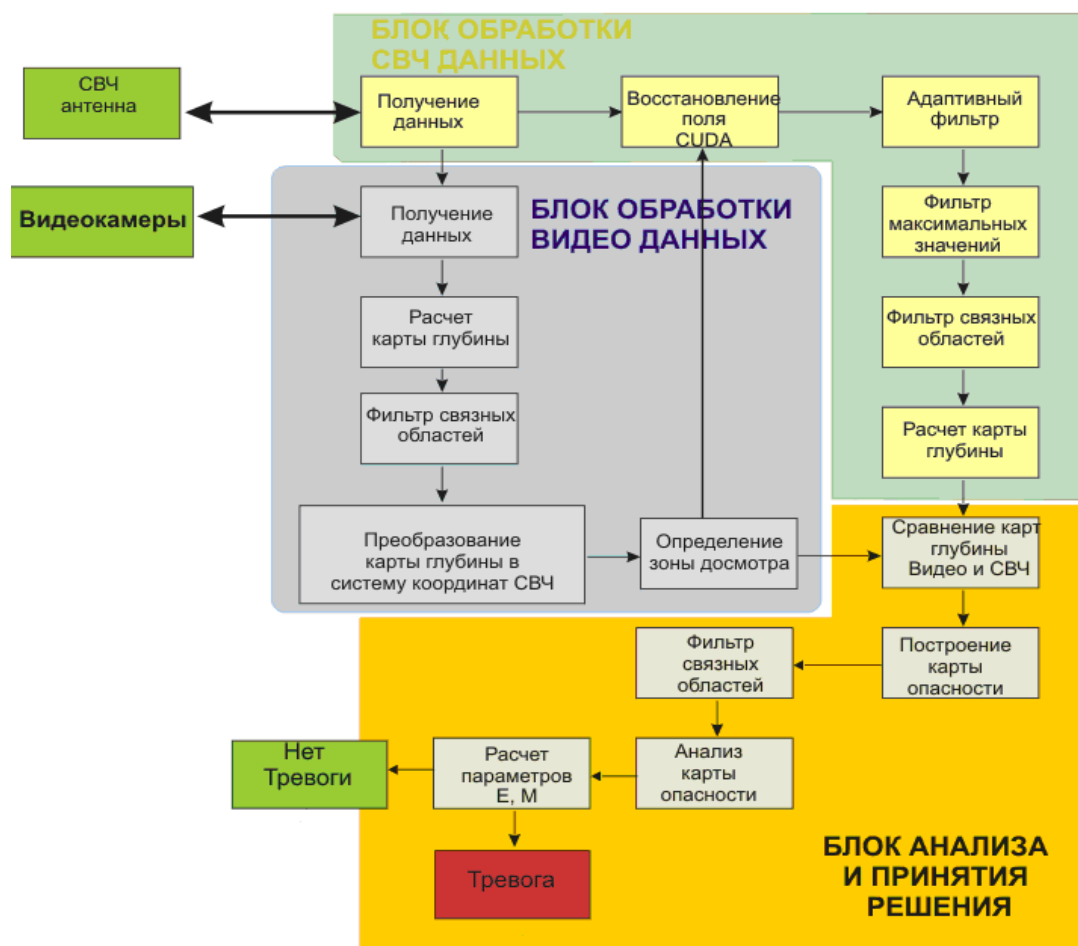


Рисунок 11. Блоковая структура программной реализации комплекса методов построения и анализа СВЧ-изображений объектов.

Метод восстановления распределения амплитуд СВЧ-поля в пространстве имеет начальные требования равенства фаз и амплитуд излучаемых СВЧ волн для всех излучающих элементов многопозиционной системы. Для реальных ИС данное требование является сложной конструктивной задачей, требующей учета многих факторов взаимодействия СВЧ-поля с веществом и большой точности изготовления волноводов, что, в конечном счете, приводит к увеличению стоимости производства. Существует иная возможность обеспечения равенства фаз и амплитуд излучаемого сигнала путем коррекции его не в момент излучения, а через коррекцию цифровых значений компонент принимаемого СВЧ-поля на входе в вычислительную систему. Такой путь коррекции сигнала не требует конструктивных изменений излучающей и измерительных систем. Предложена комплексная

методика коррекции (Рис. 12) исходных сигналов в приемо-передающем тракте ИИС для обеспечения требований задачи построения СВЧ-изображения.

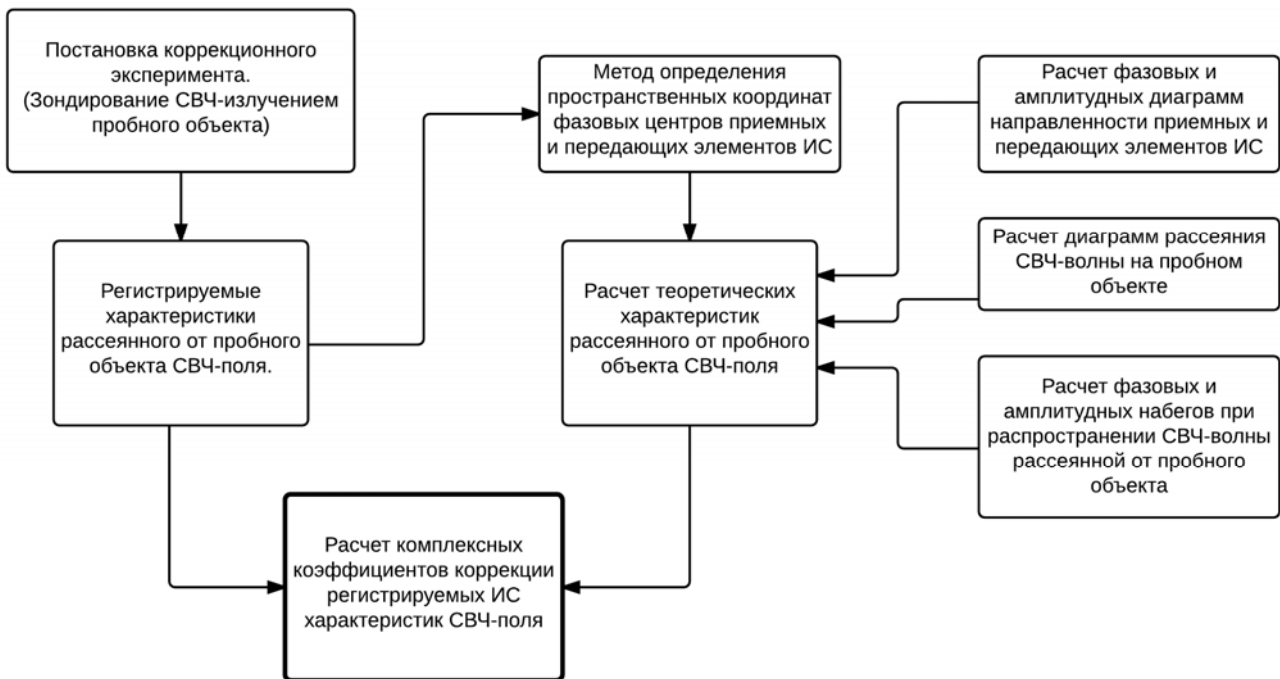


Рисунок 12. Структура методики коррекции исходных сигналов в приемо-передающем тракте ИИС.

Методика коррекции строится на постановке пробного эксперимента с минимизированием факторов влияния на принимаемый сигнал и модельной обработке эксперимента с учетом всех этих факторов и последующим сравнением теоретически смоделированных и экспериментальных данных. Задача методики состоит в формировании таблицы коррекционных коэффициентов, применение которой к значениям входных данных ИИС обеспечит выполнение начального условия равенства фаз и амплитуд излучаемых СВЧ-волн для всех рабочих частот и излучающих элементов многопозиционной ИИС. Основной частью структуры методики коррекции является модуль моделирования входных характеристик СВЧ-поля, рассеянного пробным объектом в условиях проведения коррекционного эксперимента. Моделирование входных характеристик является комплексной задачей расчета факторов изменения СВЧ-сигнала, излучаемого многопозиционной системой при распространении, рассеивании и регистрации СВЧ-сигнала. Также рассматривается возможность неполной пространственной локализации приемо-передающих элементов ИС и метод их уточнения.

В четвертой главе рассмотрена схема интеграции методик в программную структуру экспериментальной ИИС построения и анализа СВЧ-изображений – дистанционную систему досмотра АМУ-256. Приведено описание и технические характеристики ИИС АМУ-256, рассмотрена функциональная схема системы. В качестве результатов внедрения разработанного комплекса методов приведены результаты тестирования системы АМУ-256 в случае досмотра стационарных и динамических целей. В качестве метрологического обеспечения системы АМУ-256 приведены результаты определения выходных характеристик системы (объем и диэлектрическая проницаемость «опасного» объекта) в

процессе досмотра. Приведена оценка погрешности и зависимости выходных характеристик от скорости движения цели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Предложен ряд приближений для решения задачи рассеяния, способных многократно уменьшить вычислительную сложность задачи. На основе данных приближений был разработан и программно-реализован быстрый алгоритм восстановления распределения значений комплексных амплитуд СВЧ-поля в случае рассеяния зондирующего СВЧ-излучения от объекта исследования.

2. Проведен сравнительный анализ пространственного расположения точек отражающей поверхности объекта в случае формирования его СВЧ-изображения и стереоизображения в видимом диапазоне. На основе сравнительного анализа предложены и реализованы алгоритмы, которые позволяют: подразделять объекты исследования на проводящие и диэлектрические, определять диэлектрическую проницаемость диэлектрического объекта, а также производить поиск объектов скрытых на теле человека.

3. Сформулирована общая идеология процесса коррекции исходных сигналов в приемо-передающем тракте ИИС для обеспечения начальных требований задачи восстановления СВЧ-поля в пространстве. На основе данной идеологии была разработана и программно-реализована комплексная методика коррекции исходных сигналов в приемо-передающем тракте ИИС, которая включает в себя: метод нахождения точных пространственных координат фазовых центров приемных и излучающих элементов, метод расчета фазовых набегов и амплитудных изменений в СВЧ сигнале при прохождении его во внутренних трактах излучающей системы, программное средство моделирования диаграммы рассеяния волны СВЧ-излучения на пробном объекте в рамках теории рассеяния Ми и метод формирования таблицы коррекционных коэффициентов, применение которой к значениям входных данных ИИС обеспечивает выполнение начальных условий задачи восстановления СВЧ-поля.

4. Создание и программная реализация описанных выше методов восстановления и анализа СВЧ-изображений объектов обеспечили полную функциональную работоспособность СВЧ-систем скрытого досмотра человека, основанных на базе технологической платформы AMD. Также для ряда разработанных методик и алгоритмов существует возможность их применения к широкому кругу радиолокационных систем различного типа. В перспективе планируемая разработка станет интегрируемой библиотекой в программное обеспечение основных производителей СВЧ-систем досмотра человека, таких как компании APSTEC Systems Ltd., L3 Communications, Brijot и др.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Воробьев С.И.**, Горшков И.Ю., Аверьянов В.П., Способ определения диэлектрической проницаемости диэлектрического объекта // Патент №2408005 Российская Федерация.
2. **Воробьев С.И.**, Горшков И.Ю., Аверьянов В.П., Способ дистанционного досмотра цели в контролируемой области пространства // Патент №2411504 Российская Федерация.
3. Семенов С.Н., **Воробьев С.И.**, Дудкин В.И., Методика построения микроволнового изображения объекта с применением решения обратной задачи дифракции» // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. -2014. №2(194). – С. 69-74.
4. **S.I. Vorobyev**, V.V. Potekhin, S.N. Semenov, Filtering Method for Analysis of the Image Received by Microwave Probing // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. -2014. №1(188). – С.31-36.

Публикации в других изданиях

5. **Воробьев С. И.**, Аверьянов В. П., Осипов М. Ю., Семенов С. Н., Многопозиционная система построения микроволнового изображения в режиме реального времени // сборник статей тринадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике», Санкт-Петербург, Россия, 24-26 мая, 2012. – С. 44-47.
6. **S. Vorobyev**, V. Averianov, I. Gorshkov, A. Kuznetsov, Standoff detection of “suicide bombers” in mass transit environment // Proceedings of the 6th Future Security Conference, Berlin , September 5-7, 2011.
7. **Воробьев С.И.**, Программно-аппаратный комплекс для многопозиционных систем СВЧ-изображения // Сборник докладов победителей программы «У.М.Н.И.К. Фонда содействия развития малых предприятий в научно-технической сфере». -2010. –С.157-159.
8. I. Gorshkov, **S. Vorobyev**, System for Standoff Detection of "Suicide Bombers" with Active Millimetre Waves // Proceedings of the specialist meeting SET-159 on “Terahertz and Other Electromagnetic Wave Techniques for Defence and Security” Vilnius, Lithuania, May 3-4, 2010;
9. **Vorobyev S.**, Semenov S., Shkodyrev V., Distributed imaging algorithm for multi-position microwave systems // Proceeding of the VII International Conference “Distributed Intelligent Systems and Technologies” St. Petersburg, Russia, July 2-4, 2012. – С. 121-130.
10. **Vorobyev S.**, Gorshkov I. etc., Automatic standoff detection of threats in crowded areas // Proceedings of the 9th Future security research conference, Berlin, September 16-18, 2014. –С. 319 - 326
11. **Воробьев С.И.**, Горшков И.Ю., Аверьянов В.П. и др. Способ дистанционного досмотра цели в контролируемой области пространства // заявка на патент №2014129117 от 15.07.2014, Российская Федерация.
12. Averianov V., **Vorobyev S.** etc., Method for standoff detection and analysis of objects // US Patent application № 14/319,222 (June 30, 2014)

13. **Воробьев С.И.**, Горшков И.Ю., Аверьянов В.П. и др., Способ определения диэлектрической проницаемости диэлектрического объекта //заявка на патент №2014129115 от 15.07.2014, Российская Федерация.

14. **Воробьев С.И.** Методы и технологии обработки и анализа изображений объектов в СВЧ диапазоне // Сборник тезисов XIX Санкт-Петербургская ассамблея молодых ученых и специалистов. Санкт-Петербург. -2014. - С.135.

15. Семенов С.Н., **Воробьев С.И.**, Дудкин В.И., Построение томографических изображений диэлектрических объектов в микроволновом диапазоне в приближении ренгеновской оптики // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ –СПб.:Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 125-127.

16. Семенов С.Н., **Воробьев С.И.**, Дудкин В.И., Метод построения изображения дистанционным зондированием пространства // Неделя науки СПбГПУ: Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт физики, наноэлектроники и телекоммуникаций СПбГПУ. Ч. 1. – СПб.:Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 80-83.

17. Vakhtin D., Kuznetsov A., **Vorobev S.** etc., Extending security perimeter and protecting crowded places with Human Security Radar // Proceedings of the 10th Future security research conference, Berlin, September 15-17, 2015.

18. Мещеряков В.В., **Воробьев С.И.**, Семенов С.Н., Микроволновая система дистанционного досмотра // Материалы XVI Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот, Саратов, 2-7 февраля, 2015. – С. 71.