

Общество с ограниченной ответственностью
«АПСТЕК Лабс»

На правах рукописи

Семенов Семен Николаевич

**Анализ радиоголографических и радиотомографических
изображений для дистанционного обнаружения скрытых предметов**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор Дудкин Валентин Иванович

Санкт-Петербург – 2019

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. Современные методы построения изображений методами радиоголографии и микроволновой томографии.	19
1.1. Основные модели, применяемые для описания распространения электромагнитного излучения в пространстве.	19
1.1.1. Распространение электромагнитного излучения в пространстве.....	19
1.1.2. Приближение однократного рассеяния.....	20
1.1.3. Приближение удаленности объекта от источников электромагнитного излучения.....	21
1.1.4. Приближение малых углов.....	21
1.1.5. Применение свойств линейных систем.....	22
1.2. Применяемые методы радиозондирования.....	24
1.2.1. Локационный метод зондирования.....	25
1.2.2. Трансмиссионный метод зондирования.....	26
1.2.3. Метод с использованием радара с синтезированной апертурой.....	27
1.3. Методы обработки рассеянного объектом и прошедшего через объект электромагнитного поля.....	29
1.3.1. Радиоголографический метод.....	29
1.3.2. Метод микроволновой томографии.....	30
1.3.3. Быстрое преобразование Фурье.....	32
1.4. Методы измерения диэлектрической проницаемости.....	33
1.4.1. Метод определения диэлектрической проницаемости с использованием коаксиального зонда.....	33
1.4.2. Метод определения диэлектрической проницаемости по анализу прошедшего излучения.....	35
1.4.3. Используемые диэлектрические материалы.....	36
1.5. Определение разрешающей способности.....	37
1.5.1. Продольная разрешающая способность.....	37
1.5.2. Поперечная разрешающая способность.....	37

1.6. Выводы к главе 1.....	38
Глава 2. Радиоголографический метод дистанционного обнаружения скрытых объектов на основе анализа восстановленного изображения.....	39
2.1. Радиоголографический метод восстановления изображения на основе измерения комплексных амплитуд рассеянного поля.....	39
2.1.1. Базовая экспериментальная схема измерений.....	40
2.1.2. Метод расчета восстанавливаемого радиоголографического изображения	41
2.1.3. Эксперименты с модельными объектами в базовой схеме измерений	43
2.1.4. Эксперименты с рассеивающими объектами в базовой схеме измерений	47
2.1.5. Эксперименты по восстановлению радиоголографического изображения человека в базовой схеме измерений.....	52
2.2. Радиоголографический метод восстановления изображения движущихся объектов.....	54
2.2.1. Экспериментальная установка для восстановления радиоголографического изображения движущегося объекта.....	54
2.2.2. Построение радиоголографического изображения движущегося человека	56
2.2.3. Обоснование используемого поддиапазона СВЧ 10-18ГГц. ...	59
2.3. Физический метод обнаружения диэлектрического объекта, расположенного на теле человека на основе анализа его радиоголографического изображения	61
2.3.1. Вычисление диэлектрической проницаемости на восстановленном радиоголографическом изображении по задней поверхности диэлектрика, находящегося вплотную с рассеивающей поверхностью	61
2.3.2. Вычисление диэлектрической проницаемости на восстановленном радиоголографическом изображении по передней и задней поверхностями диэлектрика, находящегося вплотную с рассеивающей поверхностью	64
2.3.3. Вычисление диэлектрической проницаемости диэлектрика, расположенного на теле человека.....	67

2.4. Выводы к главе 2.....	70
Глава 3. Радиотомографический метод дистанционного обнаружения скрытых объектов на основе анализа трехмерного томографического изображения.....	71
3.1. Радиотомографический метод построения трехмерных изображений на основе измеренных комплексных амплитуд прошедшего через объект поля	71
3.1.1. Измерение удлинения оптического пути на основе измеренных комплексных амплитуд прошедшего через объект поля.....	72
3.1.2. Схема экспериментальной установки для измерения удлинения оптического пути	74
3.1.3. Измерение профилей удлинения на тестовых стационарных диэлектрических объектах.....	76
3.1.4. Методы расчета радиотомографических изображений диэлектрических объектов.....	79
3.1.5. Экспериментальная схема измерения радиотомографических изображений диэлектрических объектов	81
3.1.6. Экспериментальные результаты с тестовыми диэлектрическими объектами.....	82
3.1.7. Определение основных параметров диэлектриков по вычисленным радиотомографическим изображениям	86
3.2. Радиотомографический метод построения трехмерных изображений движущихся диэлектрических объектов.....	89
3.2.1. Экспериментальная установка для построения радиотомографического изображения движущегося диэлектрического объекта	90
3.2.2. Построение радиотомографического изображения движущегося диэлектрического объекта	92
3.3. Физический метод обнаружения диэлектрического объекта, скрытно провозимого в багаже на основе анализ его радиотомографического изображения.....	95
3.3.1. Постановка задачи	95

3.3.2. Расчет оптимального расположения приемо-передающих элементов для вычисления радиотомографического изображения движущегося диэлектрика в оболочке.....	96
3.3.3. Вычисление радиотомографического изображения движущегося диэлектрика в оболочке.....	103
3.4 Выводы к главе 3.....	106
Глава 4. Анализ экспериментальных данных.	107
4.1. Анализ экспериментальных данных полученных радиоголографическим методом.	107
4.2. Определение критерия опасности и вычисление вероятностей обнаружения, вероятности ложного срабатывания и вероятности пропуска для радиоголографического метода.	109
4.3. Анализ экспериментальных данных полученных радиотомографическим методом.	112
4.4. Определение критерия опасности и вычисление вероятностей обнаружения, вероятности ложного срабатывания и вероятности пропуска для радиотомографического метода.	114
4.5. Выводы к главе 4.	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
Список литературы:	120

ВВЕДЕНИЕ

В диссертации приводятся результаты анализа данных получаемых методом радиоголографии и методом микроволновой томографии на основе измерений комплексных амплитуд электромагнитного поля [1-13].

Актуальность диссертационной работы

Радиоголографические и радиотомографические системы, работающие в микроволновом диапазоне длин волн, становятся в настоящее время более популярными из-за широкого круга решаемых ими задач. К таким задачам можно отнести поиск новых методов неразрушающего контроля и анализа их физико-химических свойств, медицинская диагностика, досмотр пассажиров и багажа в общественных местах.

Под радиоголографией понимается метод построения изображения объекта путем облучения его радиоволнами и измерением рассеянных или дифрагированных сигналов с последующей компьютерной визуализацией. С помощью радиоголографических методов производится послойное дистанционное неразрушающее изучение области пространства, внутренней структуры объекта непрозрачного в видимом диапазоне длин волн, а также объектов, находящихся в оптически непрозрачной среде. В радиоголографических методах обычно применяют волны сантиметрового (от 3 – 30 ГГц, длина волн 10 – 100 мм) и миллиметрового диапазонов длин волн (от 30 – 300 ГГц, длина волн 1 – 10 мм). Использование таких диапазонов позволяют различать достаточно небольшие детали (до 1 см) в изображении объекта. Предельно достигаемое разрешение методов определяется дифракционным пределом. Измеряемое распределение амплитуд и фаз электромагнитного излучения содержит информацию о среде, положении, размерах и формах рассеивающих объектов. Основная задача радиоголографии – извлечь из измеренного волнового поля информацию о рассеивающих объектах и визуализировать ее в виде изображения – послойного восстановления структуры и пространственного

положения неоднородностей в среде. Для проведения процедуры восстановления необходимо применять специально адаптированные математические алгоритмы с последующей компьютерной визуализацией.

Под радиотомографией понимается метод построения изображения объекта с последующей компьютерной визуализацией путем облучения его радиоволнами и измерением прошедших через объект сигналов. С помощью радиотомографических методов восстанавливается внутренняя структура диэлектрических материалов непрозрачных в видимом диапазоне длин волн. В радиотомографических методах обычно применяют волны нижнего дециметрового (800 МГц – 3 ГГц) и верхнего сантиметрового (3 – 10 ГГц) диапазонов. Предельное разрешение томографических методов составляет длину волны зондирующего излучения, что также соответствует дифракционному пределу. Измеренные комплексные амплитуды содержат информацию о падении амплитуды и фазовом сдвиге при прохождении электромагнитного излучения сквозь объект. Основная задача радиотомографии – восстановить по измеренным комплексным амплитудам пространственное распределение плотности вещества в исследуемом участке пространства. Для проведения процедуры восстановления необходимо применять специально адаптированные математические алгоритмы с последующей компьютерной визуализацией.

В настоящее время в способах обнаружения скрытых предметов применяют практически все частотные диапазоны электромагнитного излучения: от сверхдлинных радиоволн до рентгена, а также газоанализаторные методы и методы ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР). Задача обнаружения скрытых предметов имеет важный прикладной характер при обеспечении безопасности в местах массового скопления людей (транспортные узлы – аэропорты, вокзалы, метро; стадионы, государственные и муниципальные учреждения) из-за возросшей угрозы совершения террористических актов.

Технологии обеспечения безопасности в общественных являются первыми в списке «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации» в соответствии с указом президента РФ от 7.07.2011 № 899.

Широко распространенный в повседневной жизни метод обнаружения скрытых предметов, основанный на использовании сверхдлинных радиоволн, позволяет определять скрытые металлические предметы, провозимые на теле пассажира или в ручной клади и багаже. Металлоискатель – устройство, в принцип работы которого входит использование сверхдлинных радиоволн, позволяет выявлять металлические предметы по их физическому размеру, а также определять их положение на пассажире по высоте. Минимальный детектируемый размер металлических объектов составляет ~5 см.

Другой метод обнаружения скрытых предметов использует электромагнитное излучение диапазона СВЧ. Исследуемый неподвижный объект (пассажир) зондируют излучением диапазона СВЧ (примерно 60-66 ГГц) последовательно с нескольких ракурсов. По измеренному рассеянному излучению физическими методами восстанавливают его радиоизображение (радиоголограмму) и производят компьютерную визуализацию. Оператор, управляющей системой, работа которой основана на СВЧ зондировании, зрительным анализом радиоголограммы определяет наличие скрытых предметов на теле пассажира. С помощью данного метода восстанавливается радиоголограмма человека с предельным возможным разрешением.

Следующий метод обнаружения скрытых предметов использует рентгеновское излучение. Исследуемый объект (чемодан, сумка) облучается рентгеновским излучением на двух длинах волн. По прошедшему сквозь объект излучению измеряется поглощение и с помощью компьютерной визуализации строится профиль поглощения. Оператор, управляющей системой, зрительным анализом определяет наличие металлических (оружие, боеприпасы и пр.), взрывчатых или наркотических веществ. Данный метод позволяет измерять профили поглощения объектов с разрешением в десятки

микрон. Разрешение определяется размером ячеек матрицы детектора, поглощающих гамма кванты.

Более модернизированный метод обнаружения скрытых предметов основан на измерении профилей поглощения в рентгеновском диапазоне. Исследуемый объект (чемодан, сумка) облучается рентгеновским излучением на двух энергиях с двух и более ракурсов. Применяя томографические методы обработки для измеренных профилей поглощения, восстанавливается томограмма исследуемого объекта. Оператор зрительным анализом определяет наличие запрещенных к провозу металлических и других объектов. Данный метод позволяет восстанавливать томограммы с разрешением в десятки – сотни микрон. Разрешение в данном методе определяется двумя факторами: размером ячеек матрицы детектора, поглощающих гамма кванты и точностью позиционирования источников и детектирующих элементов рентгеновского излучения друг относительно друга.

Методы обнаружения скрытых объектов на основе ЯКР и анализа газовых паров основаны на сравнительном спектральном анализе. В каждом из них определяются спектры газовых паров или спектры, получаемые методами ЯКР. Измеренные спектры сравниваются с табличными спектрами, а по результатам сравнения выявляется наличие определенных типов взрывчатых или наркотических веществ.

Однако существующие системы, работа которых основана на описанных выше методах, обладают рядом значительных недостатков, не отвечающим современным требованиям. К недостаткам относятся: отсутствие возможности скрытого измерения (пассажир знает заранее о досмотре), низкая скорость обработки (не способны обрабатывать измеренные данные в режиме реального времени), использование опасного для здоровья человека излучения (рентген применяется только для багажа и ручной клади), отсутствие автономной работы (для работы системы необходим оператор, решение которого зависит от его психофизического состояния), отсутствие

классификации объектов по степени опасности. Из вышесказанного следует, что существует потребность в создании систем удовлетворяющих современным требованиям: скрытная работа, безопасность работы, отсутствие человеческого фактора, быстродействие, классификация объектов по степени опасности.

Предлагаемые в данной работе физические методы восстановления и анализа радиоголографических и радиотомографических изображений позволяют создать систему, отвечающим современным требованиям. Компактность и гибкость в расположении используемых приемо-передающих элементов позволяет встроить систему незаметно в архитектуру объекта, что позволит проводить измерения скрытно. Используемый диапазон электромагнитного излучения 10-18 ГГц, что соответствует верхнему X и нижнему Ku поддиапазнам. Средняя мощность зондируемого излучения удовлетворяет российским и международным санитарным нормам и примерно в 50 раз меньше мощности мобильного телефона. Для восстанавливаемых изображений представлен физический метод обнаружения, анализа и классификации объектов по степени опасности, который устраняет необходимость принимать решение оператору, что в свою очередь устраняет человеческий фактор. А применение современных методов параллельных вычислений обеспечивает быстродействие, которое позволяет проводить измерения, восстановление, анализ, классификацию и принятие решения в режиме реального времени.

Исходя из анализа публикаций и патентов других групп авторов [14-93], можно сделать вывод о том, что представленные результаты диссертации являются уникальными в части схем измерения электромагнитного поля и методов анализа восстановленных изображений. Полученные алгоритмы и методы анализа реализованы с применением параллельного программирования видеопроцессоров на языке OpenCL, позволяющим производить расчет значительно быстрее, чем на обычных процессорах.

Объектом исследования в диссертационной работе являются радиологические и радиотомографические изображения, получаемые при измерении рассеянного и прошедшего через вещество электромагнитного излучения в сверхвысоком частотном (СВЧ) диапазоне.

Цели и задачи диссертационной работы.

Цель диссертационной работы – разработка методов построения и методов анализа изображений, построенных на радиологических и радиотомографических принципах с использованием перестраиваемых источников СВЧ излучения, и их программная реализация.

Для достижения этой цели в рамках диссертационной работы решены **следующие задачи:**

1. Теоретическое обоснование используемого поддиапазона СВЧ 10-18ГГц.
2. Разработка и программная реализация метода построения и обработки *радиологических* изображений, основанного на решении обратной задачи дифракции в приближении однократного рассеяния в поддиапазоне СВЧ 10-18ГГц.
3. Разработка и программная реализация оригинального метода построения и обработки *радиотомографических* изображений, основанного на дискретном обратном преобразовании радоновских проекций.
4. Оценка параметров и решение задачи идентификации объекта на основе анализа его *радиологического* изображения, полученного в поддиапазоне СВЧ 10-18ГГц.
5. Оценка параметров и решение задачи идентификации объекта на основе анализа его *радиотомографического* изображения, полученного в поддиапазоне СВЧ 10-18ГГц.

6. Апробация и внедрение разработанных методов на экспериментальной информационно-измерительной СВЧ системе.

Методы исследования. Для решения обратной задачи дифракции были выбраны модель распространения электромагнитного поля в пространстве, основанная на принципе Гюйгенса-Френеля, и скалярное приближение однократного изотропного рассеяния.

Для решения задачи распространения излучения в оптически плотных средах использовалась линейная модель распространения.

Экспериментальные исследования производились на тестовых информационно-измерительных системах построения изображений.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Идентификация диэлектрического слоя на поверхности тела человека осуществляется в совместном анализе его изображений в двух спектральных диапазонах – оптический и СВЧ диапазон 10–18 ГГц. Анализ позволяет вычислить ключевые физические параметры диэлектрического слоя – диэлектрическая проницаемость, размеры, положение в пространстве, расположенного на поверхности тела человека.

2. Метод построения томографического изображения в СВЧ поддиапазоне 10–18 ГГц выявляет присутствие скрытого диэлектрика в исследуемой области. Анализ получаемого томографического изображения позволяет вычислить ключевые физические параметры диэлектрика размером от 5 до 40 см – диэлектрическая проницаемость, размеры, положение в пространстве.

3. Разработанный алгоритмический комплекс позволяет на основе определения ключевых физических параметров (размеры, положение в пространстве и диэлектрическая проницаемость) произвести классификацию объекта по степени опасности в рамках задачи досмотра. Классификация

объекта по степени опасности производится по соотношению вычисленного объема и диэлектрической проницаемости.

Достоверность научных положений и результатов.

Принятые приближения (однократного изотропного рассеяния, о распространении электромагнитного излучения в среде) физически оправданы и находятся в соответствии с теорией распространения электромагнитного излучения.

В процессе работы были произведены теоретические, численные и экспериментальные исследования. Все разработанные модели в процессе диссертационной работы были промоделированы и показана их работоспособность. Результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными результатами. Достоверность защищаемых положений и прочих экспериментальных результатов диссертационной работы подтверждается согласованностью теоретических и экспериментальных данных.

Качество изображений, восстановленных в практических экспериментах, определяется разрешающей способностью используемых экспериментальных макетов, не превышает дифракционный предел и согласуется с результатами моделирования. Предельная разрешающая способность составляет порядка длины волны зондируемого излучения.

Достоверность первого положения: экспериментально подтверждается существованием на поверхности радиоголографического изображения тела человека участка, смещенного относительно остальной поверхности на расстояние, пропорциональное толщине диэлектрического слоя. А сравнительный анализ участка, соответствующего положению диэлектрического слоя, в двух спектральных диапазонах позволяет идентифицировать присутствие диэлектрического объекта на теле человека и вычислить его ключевые для решаемой задачи идентификации физические параметры.

Достоверность второго положения: экспериментально подтверждается принципиальной возможностью вычисления диэлектрических профилей выбранной области пространства в СВЧ диапазоне и построения радиотомографического изображения, используя вычисленные диэлектрические профили. А анализ радиотомографического изображения выбранной области пространства позволяет идентифицировать присутствие диэлектрического объекта и вычислить его ключевые для решаемой задачи идентификации физические параметры.

Достоверность третьего положения: подтверждается экспериментальными результатами при классификации групп «условно опасных» и «условно безопасных» образцов актуальных при решении задачи досмотра человека.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен и теоретически обоснован поддиапазон СВЧ 10-18 ГГц для метода обнаружения диэлектрика, основанного на синтезе нескольких методов численного решения обратной задачи дифракции. Выбранный поддиапазон дает принципиальную возможность идентификации динамического объекта в режиме реального времени.

2. Полученное быстроедействие алгоритмов, разработанного метода построения и анализа изображений, впервые позволило производить идентификацию нескольких динамических объектов (до 5-ти человек со скоростью перемещения до 5-6 км/ч) в режиме реального времени.

3. Впервые реализован радиотомографический метод, основанный на анализе обратных радоновских проекций, позволяющий обнаруживать диэлектрические предметы в режиме реального времени с размерами от 5 см, скрытые тонким слоем.

4. Разработан алгоритм классификации предметов по степени опасности в рамках задачи досмотра, основанный на вычисленных ключевых физических параметрах – размер, положение в пространстве и диэлектрическая

проницаемость. Разработанный алгоритм обеспечивает автоматическое обнаружение скрытых предметов.

Практическая значимость.

На основе проведенных исследований разработана комплексная методика обнаружения скрытых диэлектрических объектов, проносимых под одеждой, в рюкзаках и чемоданах. Данный комплекс методик был внедрен в ряд многопозиционных СВЧ систем досмотра, отвечающим современным требованиям безопасности – скрытный досмотр, быстроедействие, безопасно для человека, автоматическая работа. Программная реализация комплекса методик была интегрирована в программное обеспечение серийно выпускаемых систем класса HSR (Human Security Radar). Данные комплексы прошли успешные испытания и эффективно работают.

Внедрение результатов диссертационной работы.

Автор диссертационной работы принимал участие в ряде научно-исследовательских работ. В частности:

1. Проект «Фонд содействия инновациям» – фонда содействию и развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (НИОКР по проекту № 9677 «Разработка установки для обнаружения предметов, скрытых на теле человека» (государственный контракт №7232р/9677 от 30.07.2009г.)).

2. Международный научно-технический проект STANDEX (STAndoff Detection of EXplosive) Россия-НАТО, посвященный противодействию международному терроризму. Участие в разработке экспериментального прототипа SMD, демонстрируемого на международных испытаниях.

3. Разработанные в диссертационной работе методы обработки и анализа электромагнитного излучения легли в основу

работы системы досмотра пассажиропотока HSR (Human Security Radar), выпускаемой компанией ООО «АПСТЕК Лабс».

4. По результатам диссертационной работы было зарегистрировано два патента РФ №2016133685 «Способ дистанционного досмотра багажа в контролируемой области пространства», №2016133690 «Способ дистанционного определения диэлектрической проницаемости диэлектрического объекта».

На основе представленных в диссертационной работе методов собранные экспериментальные прототипы прошли серию успешных испытаний, проходивших как на территории РФ, так и на территории Европейского союза.

Публикации

По материалам диссертационной работы было опубликовано 13 статей, из которых:

По материалам диссертационной работы было опубликовано 13 статей, из которых:

- 4 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации
- 7 публикаций с региональных конференций, входящих в базу РИНЦ.
- 2 статьи опубликованы в сборниках трудов международных конференций.
- 2 зарегистрированных в РФ патента №2629911, №2016133690.

Апробация результатов.

Результаты исследований по тематике диссертационной работы докладывались на Тринадцатой международной научно-практической конференции Hi-Tech (Санкт-Петербург, 2012); на международной

конференции «Distributed imaging algorithm for multi-position microwave systems» (Санкт-Петербург, 2012); на XII, XIII, XIV «Недели науки СПбПУ» научных конференциях с международным участием (Санкт-Петербург, 2013, 2014, 2015); на 9-й, 10-й международных научных конференциях Security Research Conference "9th, 10th Future Security" (Berlin, Germany, 2014, 2015); на XVI Международной зимней школа-семинаре по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2015); на Всероссийском молодежном научном форуме «ПРО Регион 2015» (Севастополь, 2015).

Личный вклад автора

Основные теоретические и практические результаты, полученные в течение выполнения диссертационной работы, были получены автором лично или при его непосредственном участии в качестве одного из исполнителей. Таким образом, автором диссертации проведены:

- Постановка задач
- Разработка схем измерений
- Проведено численное моделирование
- Разработка алгоритмов восстановления изображений
- Сборка экспериментальной установки
- Проведение экспериментов по измерению рассеянного от объекта и прошедшего через объект излучения.

Определение направления исследования и выбор методов обработки и анализа было осуществлено автором совместно с научным руководителем профессором Дудкиным Валентином Ивановичем и ведущим инженером компании «АПСТЕК Лабс» Аверьяновым Валерием Петровичем.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю и ведущему инженеру компании за большую помощь, оказанную при выполнении диссертационной работы, а также всему коллективу компании «АПСТЕК Лабс» и коллективу кафедры «Квантовая Электроника» СПбПУ за

полезную критику и посильную помощь в ходе выполнения диссертационной работы.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 106 источников. Текст диссертации изложен на 135 страницах и включает 61 рисунок и 7 таблиц.

Глава 1. Современные методы построения изображений методами радиоголографии и микроволновой томографии.

В настоящей главе рассматриваются основные принципы построения изображений методами радиоголографии и микроволновой томографии, применяемые в настоящее время. Представлены основные физические модели распространения электромагнитного излучения в трехмерном пространстве, а также численные методы обработки и анализа получаемых изображений.

1.1. Основные модели, применяемые для описания распространения электромагнитного излучения в пространстве.

Наибольший интерес для задач радиоголографии и радиотомографии представляют процессы распространения волн в однородной среде, их рассеяния на неоднородностях, а также процессы дифракции. В данной главе рассматриваются основные физические модели распространения электромагнитного излучения в пространстве, описывающие эти процессы.

1.1.1. Распространение электромагнитного излучения в пространстве.

Для описания механизма распространения электромагнитного излучения в пространстве [94] рассмотрим для начала плоскую монохроматическую электромагнитную волну:

$$P(r) = Ae^{i\varphi} e^{ikr} \quad (1.1)$$

где A – амплитуда волны, φ – начальная фаза волны, k – волновой вектор, r – радиус-вектор, P – комплексная амплитуда плоской волны. Для дальнейшего удобства преобразуем выражение (1.1), выделяя более явно параметры, отвечающие за направления распространения волны:

$$P(x, y, z) = ge^{\left(\pm iz\sqrt{k^2 - u_1^2 - u_2^2}\right)} e^{(iu_1x + iu_2y)} \quad (1.2)$$

где:

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (1.3)$$

$u_1 = k_x$, $u_2 = k_y$ – компоненты волнового вектора, g – множитель учитывающий амплитуду и начальную фазу волны. Выражение (1.2) для плоской монохроматической волны записано с выделением преимущественного направления вдоль оси z в определенной системе координат. Выделение преимущественного направления в распространении электромагнитных волн применяется при решении большого множества физических задач. В таких задачах излучение распространяется вдоль оси преимущественного направления, либо под небольшим углом к ней. На основании выражения (1.2) возможно записать выражение для произвольного волнового поля:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} g(u_1, u_2) e^{\left(\pm iz \sqrt{k^2 - u_1^2 - u_2^2}\right)} e^{(iu_1x + iu_2y)} du_1 du_2 \quad (1.4)$$

Выражение (1.4) является алгебраической суммой плоских волн, значения амплитуды, начальной фазы и направление распространения которых произвольны. Кроме того, полученное выражение представляет собой общее решение волнового уравнения, позволяющее представлять любое волновое поле в виде (1.4) – через сумму плоских волн с различными направлениями распространения.

1.1.2. Приближение однократного рассеяния.

В большинстве физических задач применяется приближение однократного рассеяния при описании процесса взаимодействия электромагнитного излучения с поверхностью объекта. Это приближение справедливо по двум причинам: амплитуда, а соответственно и энергия электромагнитной волны, от каждого последующего рассеяния значительно меньше, чем до рассеяния, геометрические формы объектов, рассматриваемых в диссертации, имеют достаточно выпуклую рассеивающую поверхность. Выпуклая рассеивающая поверхность

практически полностью исключает физическую возможность многократного рассеяния.

1.1.3. Приближение удаленности объекта от источников электромагнитного излучения.

В большинстве задач радиоголографии, радиотомографии и радиолокации исследуемый объект располагается на значительном удалении от источников электромагнитных волн по сравнению с длиной волн зондирующего излучения. В диссертационной работе исследуемые объекты располагаются на расстоянии 1 м и более от передатчиков и приемников радиоволн, средняя длина волны зондирующего излучения равна 2.2 см. При данных условиях использование данного приближения справедливо.

1.1.4. Приближение малых углов.

В рассматриваемых задачах о рассеянии электромагнитного излучения от объекта, кроме приближения однократного рассеяния часто применяют приближение малых углов. Приближение малых углов заключается в том, что падающее электромагнитное излучение образует небольшой угол с преимущественным направлением распространения. В выражении (1.4) переменные интегрирования u_1 и u_2 определяют направление распространения электромагнитного излучения относительно преимущественного направления. В нашем случае это положительное направление оси z . В случае, когда они принимают небольшое значение, электромагнитные волны распространяются под небольшим углом к оси z . В случае, когда справедливо условие:

$$u_1^2 + u_2^2 > k^2 \quad (1.5)$$

входящие в интегрирование волны экспоненциально убывают в выбранном преимущественном направлении, тем самым они не вносят существенный вклад в результирующее поле в точке наблюдения. Знак в первой экспоненте выражения (1.4) определяет результирующее направление убывания поля вдоль оси z : «+» – результирующее поле убывает в

положительном направлении вдоль оси z , «-» – результирующее поле убывает в отрицательном направлении вдоль оси z .

Учтем еще одно допущение: будем считать, что все источники электромагнитного излучения расположены в полупространстве $z < 0$, а в другом полупространстве $z > 0$ источники излучения отсутствуют. Плоскость $z = 0$ – граничная плоскость, которая разделяет пространство на два подпространства, одно из которых содержит источники излучения, а другое нет. При таком уточнении перед радикалом в экспоненте в выражении (1.4) должен стоять знак «+».

При таких введенных предположениях о характере распространения электромагнитного излучения в пространстве, рассмотрим распределение комплексной амплитуды в граничной плоскости ($z = 0$):

$$P(x, y, 0) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} g(u_1, u_2) e^{(iu_1x + iu_2y)} du_1 du_2 \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) представляет собой интеграл (двумерное преобразование) Фурье. Поскольку преобразование Фурье обратимо, то возможно обратить выражение (1.6):

$$g(u_1, u_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} P(x, y, 0) e^{-(iu_1x + iu_2y)} dx dy \quad (1.7)$$

Из выражения (1.7) следует, что зная распределение комплексной амплитуды в граничной плоскости, однозначно определяется функция $g(u_1, u_2)$, по которой из выражения (1.4) определяется комплексная амплитуда в любой точке пространства.

1.1.5. Применение свойств линейных систем.

Способ вычисления комплексной амплитуды поля в пространстве путем проведения последовательных вычислений по формулам (1.7) и (1.6) с практической точки зрения затруднителен по двум причинам:

1. Необходимость в вычислении двух двумерных интегралов.

2. Отсутствие точного решения интегрального уравнения для большинства задач.

Для упрощения расчетов применим свойства линейных систем. Система называется линейной, тогда и только тогда, когда входные и выходные сигналы удовлетворяют принципам суперпозиции и транспозиции [94]. Принцип суперпозиции гласит, что если входной сигнал состоит из суммы отдельных сигналов, то выходной сигнал также состоит из суммы отдельных сигналов, причем каждый из отдельных выходных сигналов однозначно соответствуют отдельным входным сигналам. Принцип транспозиции гласит, что сдвиг времени входного воздействия равен сдвигу времени выходного воздействия. Принципы суперпозиции и транспозиции можно соответственно выразить в интегральном виде:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} c_x(\omega) K(i\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1.8)$$

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t') H(t-t') dt' \quad (1.9)$$

где $c_x(\omega)$ – спектр входного воздействия, $K(i\omega)$ – частотная характеристика системы, определяемая как отклик системы на воздействие вида $e^{i\omega t}$, $x(t')$ – входное воздействие, $H(t)$ – импульсная характеристика системы, определяемая как отклик системы на дельтообразный сигнал. Частотная характеристика системы и импульсная характеристика системы однозначно определяют систему и связаны между собой:

$$K(i\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(t) e^{i\omega t} dt \quad (1.10)$$

Для выражения (1.4) входным сигналом является распределение комплексных амплитуд в граничной плоскости ($z = 0$), выходным – в плоскости $z = z_0$, а частотная характеристика свободного пространства [95] представляется тогда в виде:

$$K(u_1, u_2) = e^{iz\sqrt{k^2 - u_1^2 - u_2^2}} \quad (1.11)$$

Его импульсный отклик выглядит:

$$H(x, y) = -\frac{1}{2\pi} ik \frac{e^{ikR}}{R} \frac{z}{R} + \frac{1}{2\pi} \frac{e^{ikR}}{R^2} \frac{z}{R} \quad (1.12)$$

где $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Тогда по аналогии с выражением (1.9) выходной сигнал системы можно представить в виде:

$$P(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} P(x', y', 0) H(x - x', y - y') dx' dy' \quad (1.13)$$

Будем предполагать, что расстояние от исследуемого объекта до источника электромагнитного излучения значительно превышает длину волны. Тогда приближение малых углов и приближение об удаленности объекта от источников электромагнитного излучения позволяют считать:

$$k \gg \frac{1}{R}, \quad z \approx R \quad (1.14)$$

С учетом (1.14) запишем приближенное значение для импульсного отклика свободного пространства:

$$H(x, y) = \frac{1}{i\lambda} \frac{e^{ikR}}{z} \quad (1.15)$$

С учетом (1.15) выражение (1.13) выглядит следующим образом:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{+\infty} P(x', y', 0) e^{ikR} dx' dy' \quad (1.16)$$

где $R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$. Полученное выражение (1.16) позволяет по известному распределению комплексных амплитуд в одной плоскости вычислять его в любой другой плоскости. С физической точки зрения это выражение отражает принцип Гюйгенса–Френеля в интегральном виде.

1.2. Применяемые методы радиозондирования.

В настоящее время существует множество схем радиозондирования. Каждая из существующих схем применима только для конкретно

поставленной задачи. Выбор схем зондирования зависит от ряда внешних факторов:

1. Форма и геометрия исследуемого объекта.
2. Размеры исследуемого объекта.
3. Способ размещения приемопередающих элементов.
4. Тип зондирующего сигнала.

В зависимости от каждого из факторов выбирается схема зондирования.

1.2.1. Локационный метод зондирования.

Локационный метод зондирования – это такой метод зондирования, при котором существует плоскость, разделяющая пространство на два подпространства, в одном из которых располагаются приемник и передатчик электромагнитного излучения, в другом – исследуемый объект. Электромагнитные волны рассеиваются на исследуемом объекте и попадают на приемную антенну. В системах с локационным методом зондирования электромагнитное излучение направляется в заданную область пространства, где располагается объект, а по рассеянному излучению вычисляется его радиоизображение. Схематично локационный метод представлен на рисунке 1.1.

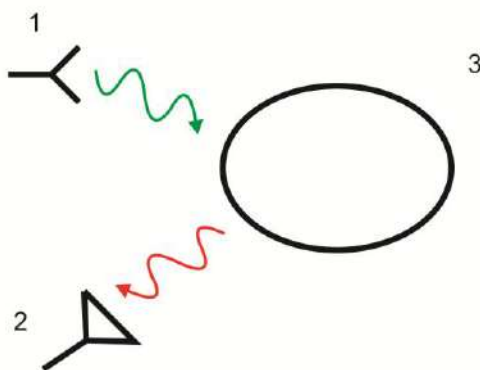


Рисунок 1.1. Локационный метод зондирования. 1 – передающая антенна, 2 – приемная антенна, 3 – исследуемый объект.

При использовании локационного метода зондирования определяется расстояние до исследуемого объекта.

1.2.2. Трансмиссионный метод зондирования.

Трансмиссионный метод зондирования – это такой метод, при котором приемник и передатчик электромагнитного излучения располагаются по разные стороны от исследуемого объекта. В трансмиссионном методе зондирования измеряется прошедшее через объект электромагнитное излучение. Схематично трансмиссионный метод представлен на рисунке 1.2.

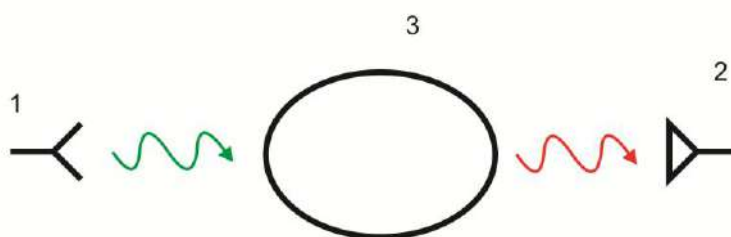


Рисунок 1.2. Трансмиссионный метод зондирования. 1 – передающая антенна, 2 – приемная антенна, 3 – исследуемый объект.

При использовании трансмиссионного метода зондирования измеряются коэффициенты поглощения, пропускания. А при использовании широкополосного излучения измеряют удлинение оптического пути вдоль прямой, проходящей через приемник и передатчик. При измерении удлинения оптического пути, в различных расположениях приемопередающих элементов относительно исследуемого объекта, восстанавливается его изображение методом микроволновой томографии.

1.2.3. Метод с использованием радара с синтезированной апертурой.

В методе с использованием радара с синтезированной апертурой (РСА) зондирование исследуемого объекта происходит последовательно с нескольких положений передающих антенн. Метод с использованием РСА реализован на экспериментальной установке, которая схематично представлена на рис. 1.3.

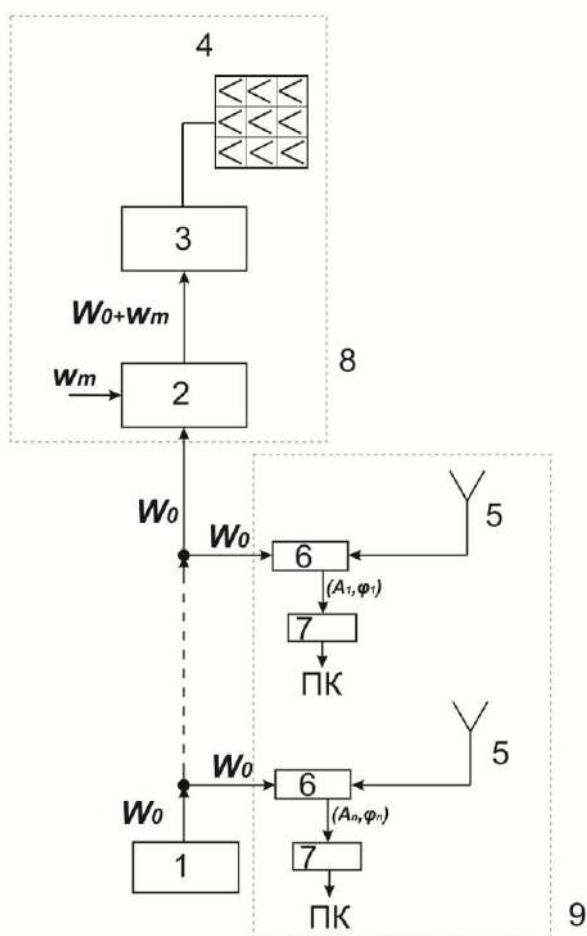


Рисунок 1.3. Схема экспериментальной установки. 1 – генератор СВЧ сигнала,
2 – модулятор, 3 – коммутатор 1 в 256, 4 – массив передающих элементов (РСА),
5 – приемная антенна, 6 – демодулятор, 7 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП),

8 – передающий тракт, 9 – приемный тракт.

Принцип работы экспериментальной установки заключается в следующем: СВЧ сигнал несущей частоты W_0 из поддиапазона 10-18 ГГц формируется генератором (рис. 1.3, 1). Далее СВЧ сигнал поступает параллельно в передающий и приемные тракты (рис. 1.3, 8 и 9, соответственно). В передающем тракте: сигнал модулируется мегагерцовым сигналом w_m . Модулированный сигнал поступает на коммутатор 1 в 256 (рис. 1.3, 3), из которого сигналы поступают на РСА (рис. 1.3, 4). РСА представляет собой массив из 256 (16x16 элементов) передающих элементов, выполненных в виде широкополосных антенн Вивальди в коническом экране. Элементы массива собраны в антенную решетку таким образом, что расстояние между соседними составляет 1.8 см. Излучение происходит для каждого элемента последовательно на заданной несущей частоте, а его длительность составляет 10 нс. Когда каждый элемент в массиве излучил сигнал на частоте W_0 , генератор (рис. 1.3, 1) переключается на следующую частоту из заранее подготовленного списка. В приемном тракте: рассеянное излучение принимается приемной антенной (рис. 1.3, 5), выполненной в виде антенны Вивальди. В демодуляторе (рис. 1.3, 6) происходит выделение амплитуды и фазы сигнала $((A_1, \varphi_1; \dots; A_n, \varphi_n)$, рис. 1.3). Далее, амплитуда и фаза сигнала поступают в АЦП (рис. 1.3, 7). После АЦП сигналы идут в компьютер для обработки.

Расстояние между соседними передающими элементами в массиве выбрано таким образом, чтобы оно не превышало среднюю длину волны зондирующего широкополосного излучения. Несоблюдение этого условия может существенно исказить диаграмму направленности РСА, для которой при увеличении расстояния будет проявляться эффект многолепестковости. Использование антенной решетки увеличивает разрешение системы в поперечном направлении, которое позволяет разрешать два или несколько объектов на меньших расстояниях друг относительно друга и определять их

угловые размеры. А применение широкополосного сигнала позволяет определять форму и размеры исследуемого объекта по глубине.

1.3. Методы обработки рассеянного объектом и прошедшего через объект электромагнитного поля.

Для восстановления изображения как от рассеянного на неоднородностях, так и прошедшего через объект электромагнитного поля необходимо произвести математическую обработку измеренных амплитуд поля.

1.3.1. Радиоголографический метод.

Голография – это интерференционный метод регистрации световых волн, дифрагировавших на объекте, который освещен когерентным светом [96]. Для радиоголографии это определение также справедливо, только с уточнением: объект облучается когерентными радиоволнами, и измеряются амплитуды и фазы рассеянных и дифрагированных волн.

Для численного расчета радиоголографического изображения необходимо произвести процедуру дискретизации выражения (1.16). Для этого в первую очередь необходимо определить граничную плоскость с известным распределением комплексных амплитуд (амплитуды и фазы). В рассматриваемых задачах, когда для зондирования объектов применяются РСА, удобно в качестве граничной плоскости рассматривать плоскость самой решетки. Это означает, что значения комплексных амплитуд поля задаются в пределах плоскости решетки, а вне плоскости решетки их значения будут равны нулю. Тем самым это преобразует область двумерного интегрирования по двум пространственным координатам к суммированию по элементам РСА:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda z} \sum_{r=0}^{N_t} P(x', y', 0) e^{ikR_{rt}} \quad (1.17)$$

где N_t – количество передающих антенн, R_{rt} – расстояние от передающей антенны t до точки (x, y, z) и от точки (x, y, z) до приемной антенны r . В случае использования локационного метода суммирование в (1.17) отсутствует.

При использовании широкополосного диапазона электромагнитного излучения при зондировании необходимо будет также произвести в (1.17) суммирование по использованному набору частот.

Одна из актуальных задач радиоголографии в области безопасности в настоящее время – это дистанционное восстановление радиоголографического изображения человека. По анализу восстановленного изображения человека, выявляется присутствие скрытых подозрительных объектов на теле.

1.3.2. Метод микроволновой томографии.

Томография – математический метод получения послойного изображения внутренней структуры объекта. Томографические методы обработки изображений широко распространены практически во всех сферах человеческой жизни: медицина, астрофизика, дефектоскопия, археология, безопасность, спектроскопия и др.

В томографических методах задействованы практически все частотные диапазоны электромагнитного излучения, а также отдельные диапазоны звуковых волн и сильные высокочастотные магнитные поля. Рентгеновская томография широко распространена в медицине, дефектоскопии, безопасности; оптическая томография – в спектроскопии, микроволновая томография – в медицине и астрофизике.

Математическая идея томографического метода заключается в восстановлении функции $f(x, y)$ – функции распределения плотности (или распределения любой другой величины) в плоскости [97, 98, 100-103]. Начальными данными являются наборы радоновских образов $\{R_\varphi(s)\}$ – проекций функции $f(x, y)$ на набор соответствующих прямых $\{s\}$ в плоскости x - y , образующих углы φ_i с осью x (i – номер проекции). По множеству

радоновских образов вычисляется множество функций – обратных проекций $\{R_\varphi(x, y)\}$. Обратная проекция $R_\varphi(x, y)$ – это функция двух переменных (x, y) , повторяющая соответствующий радоновский образ $R_\varphi(s)$ в любом сечении плоскостью параллельной прямой s . По набору обратных проекций определяется суммарная проекция:

$$S(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi R_\varphi(x, y) d\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi R_\varphi(x \cos(\varphi) + y \sin(\varphi), \varphi) d\varphi \quad (1.18)$$

Функция $S(x, y)$ представляет собой восстановленную по радоновским образам функцию $f(x, y)$. Формула (1.18) справедлива лишь при бесконечном количестве радоновских образов, что на практике реализовать невозможно. Решает эту проблему процедура дискретизации (1.18), в результате которой интегрирование обратных проекций по углу φ – углом с осью x , переходит в суммирование:

$$S(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i(x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i, \varphi_i) \quad (1.19)$$

где N – число радоновских образов. При конечном числе проекций функция $S(x, y)$ только с некоторой точностью повторяет исходную функцию $f(x, y)$. Аналогичные рассуждения справедливы и для общего случая, когда функция $f(x_1, \dots, x_n)$ является функцией распределения плотности (или распределения любой другой величины) в n мерном пространстве. В этом случае n мерное пространство проецируется на $n-1$ мерное.

В рентгеновском диапазоне восстанавливают функцию пространственного распределения плотности вещества, в оптическом диапазоне – оптическую плотность вещества, в методах ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) – плотность атомов водорода в веществе.

Актуальная задача микроволновой томографии в области безопасности в настоящее время это – дистанционное построение томографических изображений чемоданов или рюкзаков, провозимых человеком. По

восстановленным томографическим изображениям выявляется наличие скрытых подозрительных объектов.

1.3.3. Быстрое преобразование Фурье.

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) один из распространенных инструментов спектрального анализа сигналов, широко применяемый в самых разных отраслях науки и техники. При этом разработано множество быстрых алгоритмов для высокой вычислительной эффективности БПФ.

В диссертационной работе БПФ применяется в качестве модернизированного способа восстановления радиоголографического изображения (1.17). Расчет восстановленного изображения с использованием БПФ выглядит следующим образом:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} P'(x, y, z_0) \exp\left(i \frac{2\pi k}{N_f} * nz\right) \quad (1.20)$$

$$P'(x, y, z_0) = \frac{1}{z_0} \sum_{t=0}^{N_t-1} P(x', y', 0) e^{ikR_{rt}}$$

где $P(x, y, z)$ – амплитуда восстановленного поля в точке (x, y, z) , $P(x', y', 0)$ – измеряемая комплексная амплитуда сигнала в известной точке пространства, $P'(x, y, z_0)$ – амплитуда в базисной плоскости расчета, N_f – количество используемых частот, N_t – количество передающих элементов, R_{rt} – суммарное расстояние от передающего элемента t до точки восстановления и от точки восстановления до приемного элемента. Для проведения процедуры БПФ необходимо использовать эквидистантный набор частот, в отличие от восстановления, проводимого по (1.17), в котором нет необходимого условия об использовании эквидистантного набора частот. Кроме того, для наибольшей эффективности БПФ количество частот было равно 2^n . В экспериментах количество частот равнялось 128.

В следующей главе будет представлено восстановление изображений БПФ (1.20), его сравнение с методом преобразования Фурье (1.17). Будет

производиться анализ восстанавливаемых изображений представленными методами. На практике применение БПФ (1.20) значительно увеличивает производительность расчетов при проведении процедуры восстановления поля и ослабляет требования, предъявляемые к вычислительной системе, по сравнению с применением преобразования Фурье (1.17). Высокая производительность расчетов обеспечивает высокое быстродействие системы, что особенно актуально при решении современных задач в области безопасности.

1.4. Методы измерения диэлектрической проницаемости.

Диэлектрическая проницаемость в общем случае является комплексной величиной, мнимая часть которой отвечает за поглощение электромагнитных волн при прохождении через вещество, а вещественная часть – за фазовый сдвиг. Также диэлектрическая проницаемость вещества зависит от длины волны излучения, а метод ее измерения, соответственно, определяется используемым диапазоном длин волн. При анализе радиоголографических и радиотомографических изображений большой интерес представляет вещественная часть диэлектрической проницаемости. В диссертационной работе рассматривалось излучение 10 – 18 ГГц СВЧ диапазона.

1.4.1. Метод определения диэлектрической проницаемости с использованием коаксиального зонда.

Метод определения диэлектрической проницаемости с помощью коаксиального зонда [107] относится к контактному методу. Он основан на измерении зависимости коэффициента отражения от частоты. Схематично экспериментальная установка представлена на рисунке 1.4.

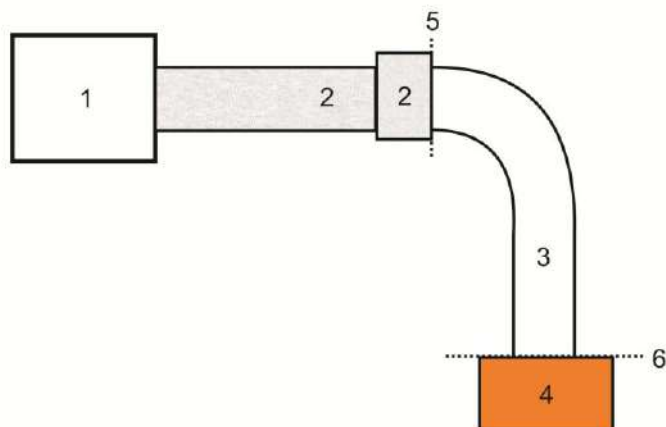


Рисунок 1.4. Схема установки для метода определения диэлектрической проницаемости с использованием коаксиального зонда. 1 – векторный анализатор цепей, 2 – гибкий волновод, 3 – волновод с открытым концом, 4 – исследуемый диэлектрический образец, 5 – плоскость векторного анализатора, 6 – апертурная плоскость исследуемого диэлектрического объекта.

В экспериментальных исследованиях с помощью векторного анализатора цепей (рис. 1.4, 1) измеряется коэффициент отражения в плоскости векторного анализатора Γ_c (рис.1.4, 5). Он связан с коэффициентом отражения диэлектрического образца Γ_a (рис.1.4, 4) в апертурной плоскости соотношением:

$$\Gamma_c = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_a}{1-S_{22}\Gamma_a} \quad (1.21)$$

где S_{21} , S_{12} , S_{11} , S_{22} – коэффициенты матрицы рассеяния. Коэффициенты матрицы рассеяния определяются из калибровки по набору эталонных образцов с известными характеристиками. Из (1.21) определяют коэффициент отражения Γ_a в апертурной плоскости:

$$\Gamma_a = \frac{1}{S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}}{\Gamma_c - S_{11}}} \quad (1.22)$$

Коэффициент отражения связан с коэффициентом проводимости материала:

$$Y = Y_0 \frac{1-\Gamma_a}{1+\Gamma_a} \quad (1.23)$$

где Y_0 – проводимость волновода с открытым каналом (3, рис.4), Y – проводимость исследуемого материала.

Проводимость вычисляется по аппроксимационной формуле:

$$Y(k) = i \frac{Y_0 k^2}{\pi k_c \ln b/a} \left[I_1 - \frac{k^2 I_3}{2} + I_2 k + i \frac{k^3 I_4}{6} + \dots \right] \quad (1.24)$$

где a , b – внутренний и внешний радиусы коаксиального кабеля соответственно, k_c , k – волновые числа для кабеля и для диэлектрика соответственно,

$$k = 2\pi \frac{f}{c} \sqrt{\varepsilon}, \quad I_n = \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi R(r, \rho, \phi)^{n-2} \cos(\phi) d\phi dr d\rho,$$

$R(r, \rho, \phi) = \sqrt{r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos(\phi)}$, ε – искомая диэлектрическая проницаемость.

Решая уравнение (1.24) в представленном разложении, определяется волновое число для образца, а затем и его комплексная диэлектрическая проницаемость.

1.4.2. Метод определения диэлектрической проницаемости по анализу прошедшего излучения.

Метод определения диэлектрической проницаемости по анализу прошедшего излучения относится к классу бесконтактных методов [99]. В основу метода положено определение удлинения оптического пути по прошедшему через объект излучению на заданном наборе частот. Схематично метод представлен на рисунке 1.5.

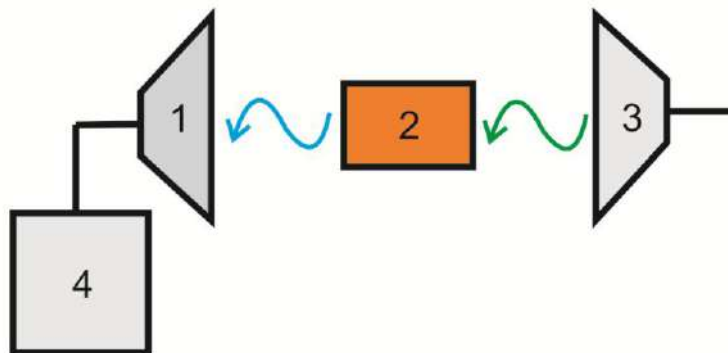


Рисунок 1.5. Схема измерения диэлектрической проницаемости по анализу прошедшего излучения. 1 – приемная антенна, 2 – исследуемый образец, 3 – передающая антенна, 4 – блок обработки.

Схема измерения основана на трансмиссионном методе зондирования. Объект облучается набором частот из выбранного диапазона. По прошедшему излучению измеряют фазовый сдвиг для каждой частоты. По набору фазовых сдвигов определяют удлинение ΔL , которое вызвано присутствием диэлектрического объекта между передающей и приемной антеннами. Измеряя физический размер диэлектрика L , возможно определить вещественную часть диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta L}{L} + 1 \right)^2 \quad (1.25)$$

1.4.3. Используемые диэлектрические материалы.

В диссертационной работе использовались 2 диэлектрических материала: пчелиный воск и поливинилхлорид (ПВХ). Диэлектрическая проницаемость (ее вещественная часть) измерялась для каждого материала двумя представленными методами. Полученные значения в дальнейшем были использованы для оценки точности определения диэлектрической проницаемости в предлагаемых радиоголографическом и радиотомографическом методах. Диэлектрические проницаемости для пчелиного воска и ПВХ равны соответственно $2,6 \pm 0,2$, и $3,8 \pm 0,2$. Выбор

данных веществ обусловлен схожестью их физических характеристик – диэлектрическая проницаемость и плотность, с соответствующими характеристиками реальных взрывчатых веществ (тратил, аммонал, си-четыре).

1.5. Определение разрешающей способности.

Разрешающая способность системы – это минимальное расстояние, при котором возможно различить два элементарных точечных рассеивателя на восстанавливаемом изображении. Разрешающая способность системы выбирается в соответствии с предъявляемыми требованиями к качеству изображений, но ограничивается ее конструктивными особенностями. Различают продольную и поперечную разрешающую способность системы.

1.5.1. Продольная разрешающая способность.

Продольная разрешающая способность при зондировании в широкополосном диапазоне длин волн определяется соотношением:

$$\Delta z = \frac{c}{2(f_{\text{верх}} - f_{\text{ниж}})} \quad (1.26)$$

где c – скорость света в вакууме, $f_{\text{верх}}$ и $f_{\text{ниж}}$ – верхняя и нижняя граница в используемом диапазоне частот. Из формулы (1.26) следует, что продольное разрешение тем лучше, чем шире используемый диапазон частот зондирования.

1.5.2. Поперечная разрешающая способность.

Поперечная разрешающая способность определяется классическим соотношением:

$$\Delta x = \frac{z\lambda}{D} \quad (1.27)$$

где D – размер апертуры, z – расстояние от излучателя до объекта, λ – длина волны зондирующего излучения или центральная длина волны в случае широкополосного зондирования. В оптике под размером апертуры

подразумевается диаметр выходного отверстия. В радиодиапазоне это размер области перемещения антенны при локационном методе зондирования или соответствующий поперечный размер массива передающих элементов в случае метода РСА.

Из формулы (1.27) следует, что при увеличении размера апертуры D , поперечная разрешающая способность улучшается. Формула (1.27) выполняется в случае больших расстояний до цели $D \ll z$.

1.6. Выводы к главе 1.

В главе 1 представлены основные способы методы измерения комплексных амплитуд рассеянного и прошедшего СВЧ излучения.

Представлены основные модели и приближения, используемые в расчетах в работе.

Представлены методы построения радиоголографических и радиотомографических изображений.

Представлена функциональная схема экспериментальной установки, которая использована в экспериментах, проведенных в работе.

Выбраны исследуемые диэлектрические материалы с заранее измеренными диэлектрическими проницаемостями.

Глава 2. Радиоголографический метод дистанционного обнаружения скрытых объектов на основе анализа восстановленного изображения

Один из распространенных методов восстановления изображения является радиоголографический метод. Данный метод заключается в измерении комплексных амплитуд электромагнитного поля рассеянного объектом исследования. В данной главе рассматриваются случаи восстановления изображений, как простых рассеивающих объектов (точечные рассеиватели), так и сложных объектов (макет и тело человека), к рассеивающим поверхностям которых вплотную располагается слой из диэлектрического материала.

2.1. Радиоголографический метод восстановления изображения на основе измерения комплексных амплитуд рассеянного поля

Использование радара с синтезированной апертурой (РСА) в качестве источника зондирующего радиоволнового излучения позволяет последовательно облучать исследуемый объект электромагнитным полем с различных точек пространства, лежащих в одной плоскости, на различных частотах из используемого диапазона. А использование множества приемных антенн, расположенных с различных ракурсов относительно облучаемого объекта, позволяет измерять комплексные амплитуды поля, соответствующие рассеянному полю с разных сторон объекта.

Данный раздел посвящен методикам восстановления радиоголографических изображений стационарных объектов, основанным на измерении комплексной амплитуды рассеянного электромагнитного поля, и быстрым алгоритмам его обработки при восстановлении изображения. Объект исследования подвергается широкополосному зондированию в верхнем X и нижнем Ku поддиапазонах СВЧ. Широкополосное зондирование осуществляется РСА, который позволяет программным образом осуществлять последовательное переключение излучающих элементов и зондирующих частот.

2.1.1. Базовая экспериментальная схема измерений

Предлагаемая экспериментальная схема представлена на рисунке 2.1. В базовой экспериментальной схеме измерений используются радар с синтезированной апертурой (рис.2.1, 2), состоящий из 256-и передающих элементов, и две приемные антенны (рис.2.1, 3). РСА и приемные антенны лежат в одной плоскости, а приемные антенны расположены по разные стороны относительно решетки передатчиков РСА. Передающие и приемные антенны выполнены в виде широкополосных антенн Вивальди.

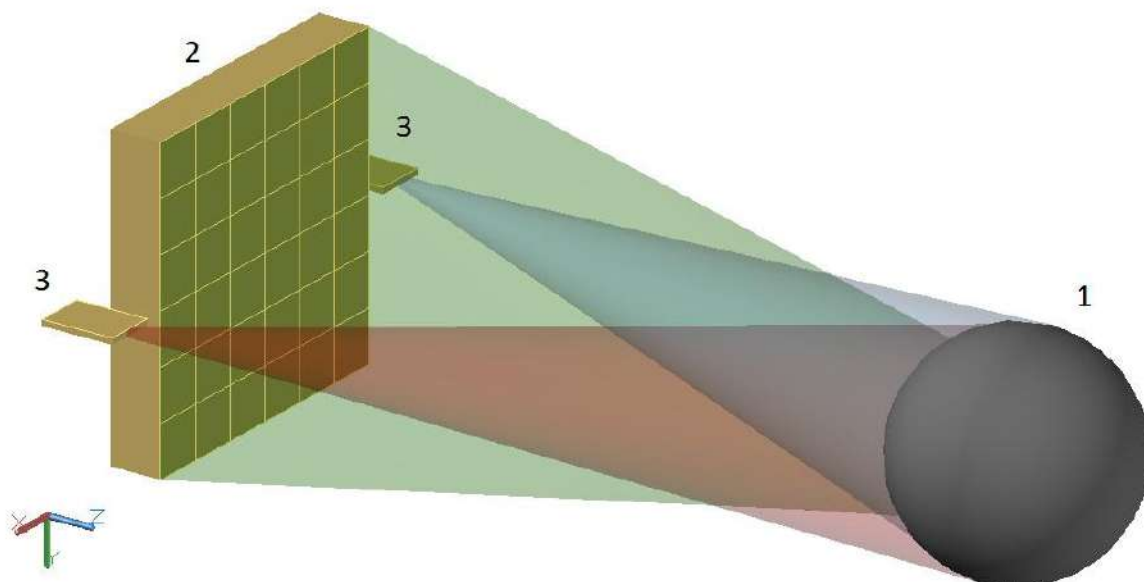


Рисунок 2.1. Базовая схема измерений в выбранной системе координат. 1 – исследуемый объект, 2 – РСА, 3 – приемные антенны.

Антенная решетка подключена к генератору микроволнового излучения с блоком перестройки частот из выбранного диапазона. В базовой схеме измерений используется эквидистантный набор из 14-и частот в диапазоне 8 – 12 ГГц. Исследуемый объект последовательно облучается микроволновым излучением на заданном наборе частот. Облучение объекта происходит на одной частоте последовательным облучением от каждого передающего

элемента антенной решетки. Когда все передатчики последовательно облучили объект, блок перестройки частот в генераторе переключается на следующую частоту из используемого набора. Таким образом, исследуемый объект последовательно облучается эквидистантным набором частот с различных ракурсов. Приемные антенны синхронно с излучением генератора измеряют комплексные амплитуды рассеянного электромагнитного поля, соответствующие определенным передающим элементам и частотам. Измеренные комплексные амплитуды оцифровываются и поступают в компьютер для восстановления радиоголографического изображения.

2.1.2. Метод расчета восстанавливаемого радиоголографического изображения

Для восстановления изображения радиоголографическим методом исследуемая область пространства, в которой расположен объект, разбивается с равномерным шагом вдоль каждого измерения. Для удобства расчетов исследуемая область пространства выбиралась в виде прямоугольного параллелепипеда. Величина шага разбиения определяется разрешающей способностью приемо-передающей системы. Разрешение по дальности определяется используемым диапазоном частот (1.26) и в рассматриваемом случае составляет 3.75 см. Разрешение в поперечном направлении (1.27), определяемое размерами антенной решетки РСА и используемым частотным диапазоном, составляет 8.0 см на расстоянии в 1 м по x и y координатам. Исходя из разрешающей способности системы, шаг разбиения пространства $2 \times 2 \times 1$ см³ по x , y , z координатам соответственно. Таким образом, процесс восстановления поля в заданной области пространства сводится к восстановлению поля в дискретном наборе точек, составляющих данную область. Восстанавливаемое поле для каждой приемной антенны вычисляется по формуле:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{z} \sum_{f=0}^{N_f-1} \sum_{t=0}^{N_t-1} P(x', y', 0) e^{ikR_{rt}} \quad (2.1)$$

где N_f – количество используемых частот, N_t – количество передающих элементов, (x, y, z) – координаты точки восстановления, $(x', y', 0)$ – координаты на антенной решетке, R_{rt} – суммарное расстояние от передающего элемента t до точки восстановления и от точки восстановления до приемного элемента.

Вычисленные комплексные амплитуды по (2.1) определяют набор микроволновых изображений, т. е. плоскостей с известным распределением поля. Этот набор вычисляется для каждой приемной антенны в одних и тех же точках пространства. В итоге для каждой приемной антенны мы получаем набор микроволновых изображений. Восстановленные изображения на каждой приемной антенне объединяются в одно единое изображение. Единое изображение рассчитывалось путем когерентного сложения каждого из изображений:

$$P(x, y, z)_i = \sum_{j=0}^{N_r-1} P(x, y, z)_i^r \quad (2.2)$$

где $P(x, y, z)_i^r$ – амплитуда восстановленного изображения в i -й точке восстановления на r -й приемной антенне, $P(x, y, z)_i$ – амплитуда единого изображения в i -й точке восстановления, N_r – число приемных антенн. По единому изображению определяется радиоголографическое изображение исследуемого объекта. В первую очередь отбрасываются точки восстановления, в которых в принципе не может находиться объект. В таких точках величина амплитуды восстановленного поля незначительна и соизмерима с шумом [4]. Затем в параллелепипеде, в котором производилось вычисление поля, выбираются линии преимущественного направления, проходящие через точки с идентичными координатами по ширине и высоте [5]. В системе отсчета установки (рис.2.1) линии преимущественного направления совпадали с направлением оси z , а координаты, отвечающие ширине и высоте, соответствовали осям координат x и y соответственно.

Каждая линия преимущественного направления была перпендикулярна микроволновым изображениям, т.е. перпендикулярна плоскостям, в которых восстанавливалась комплексная амплитуда поля. Вдоль каждой линии определялась точка с наибольшей по модулю комплексной амплитудой. Множество точек, в котором модуль комплексной амплитуды поля принимал максимальное значение по преимущественному направлению, принималось за микроволновое изображение объекта.

2.1.3. Эксперименты с модельными объектами в базовой схеме измерений

Для описанной схемы измерений и метода построения радиоизображения используется физическая модель, с помощью которой определяются комплексные амплитуды поля по известному расположению рассеивателей в пространстве. В данной модели применяется приближение скалярного однократного рассеяния, а исследуемый рассеивающий объект имеет выпуклую рассеивающую форму. Исследуемый объект дискретизируется на множество точечных, изотропных рассеивателей $\{A(x, y, z)_i\}$. Комплексная амплитуда поля $P(x, y, z, f)$ на приемной антенне описывается следующим соотношением:

$$P(x, y, z, f) = E_0 \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{t=0}^{N_t-1} \frac{\exp(ik(r_{ti} + r_{ir}))}{r_{ti} + r_{ir}} \quad (2.3)$$

где E_0 – комплексная амплитуда в плоскости антенной решетки, k – волновой вектор, r_{ti} и r_{ir} – расстояния от t -о передатчика до i -о точечного рассеивателя и от i -о точечного рассеивателя до приемной антенны, соответственно, N – количество точечных рассеивателей, N_t – количество передающих элементов.

В качестве модельных тестовых объектов [1] в базовой схеме измерений рассматривались сферы малого диаметра (точечные рассеиватели) и рассеивающая плоскость. Точечные рассеиватели рассматривались

изотропными. Результаты моделирования с точечными рассеивателями представлены на рисунках 2.2.1 и 2.2.2.

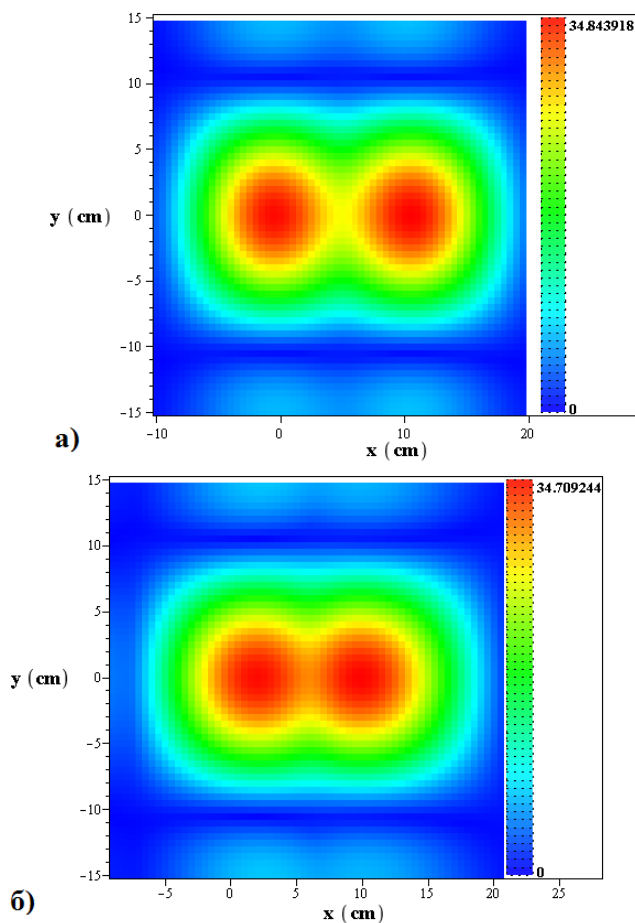


Рисунок 2.2.1. Восстановленное поле двух точечных рассеивателей в поперечном расположении. *а)* – расстояние между рассеивателями 10 см, *б)* – расстояние между рассеивателями 8 см. Положения рассеивателей *а)* (0, 0, 100) см и (10, 0, 100) см, *б)* (2, 0, 100) см и (10, 0, 100) см в системе координат экспериментальной установки. Координаты центра РСА (0, 0, 0), координаты приемных антенн (20, 0, 0), (-20, 0, 0).

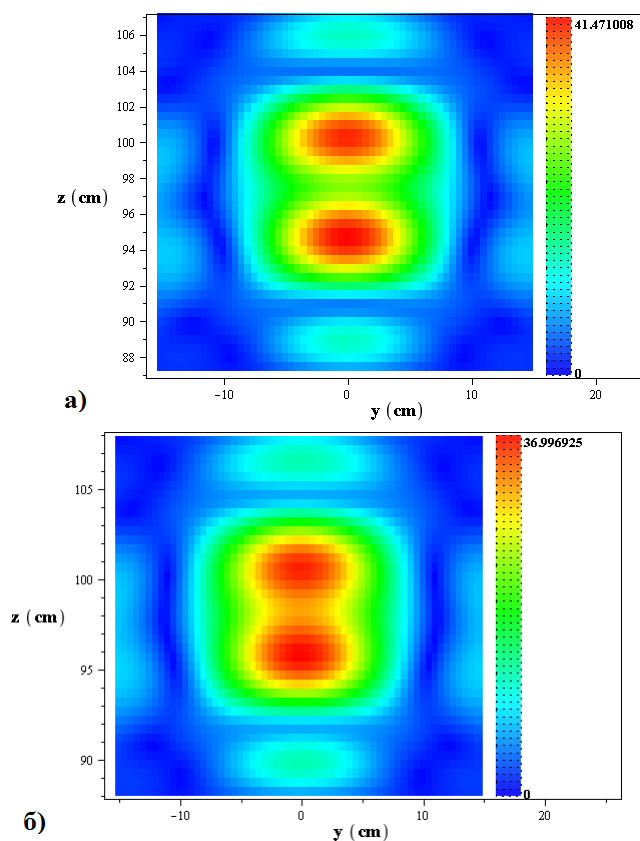


Рисунок 2.2.2. Восстановленное поле двух точечных рассеивателей в продольном расположении. *а)* – расстояние между рассеивателями 5 см, *б)* – расстояние между рассеивателями 3.5 см. Положения рассеивателей *а)* (0, 0, 100) см и (0, 0, 95) см, *б)* (0, 0, 96.5) см и (0, 0, 100) см в системе координат экспериментальной установки. Координаты центра РСА (0, 0, 0), координаты приемных антенн (20, 0, 0), (-20, 0, 0).

Результаты моделирования с точечными рассеивателями подтвердили как адекватность используемой модели при построении радиоголографических изображений, так и рассчитанные теоретически продольное (вдоль оси z) и поперечное (вдоль осей x , y) разрешения.

На следующем этапе производилось моделирование рассеивающей плоскости – квадрата со стороной 50 см, и сравнение результатов моделирования с результатами, полученными в экспериментальных исследованиях (рис. 2.3, *а* и 2.3, *б*). Квадрат представлял собой дискретный набор точечных изотропных рассеивателей.

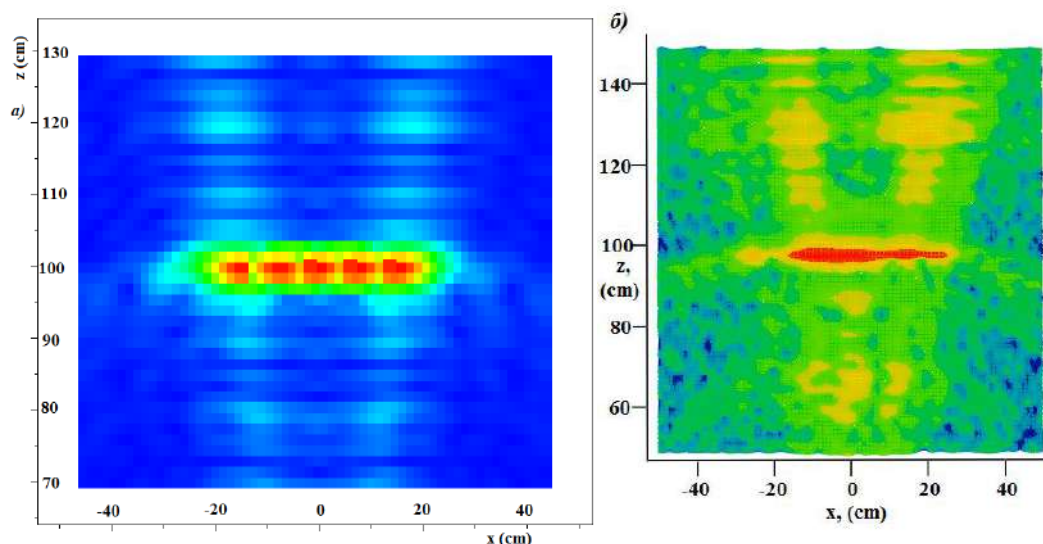


Рисунок 2.3. Восстановленное поле рассеивающим квадратом со стороной 50 см с координатами центра (0, 0, 100) см в системе отсчета приемо-передающих элементов в сечении плоскостью $y = 0$. Красный цвет соответствует наибольшей амплитуде в относительных единицах, а синий – наименьшей.

a) – результаты моделирования, *б)* – данные экспериментальных исследований.

Моделирование и экспериментальное исследование показали идентичность в восстановлении положения и размеров исследуемого объекта. Однако в экспериментальных исследованиях восстановленное изображение содержит существенные побочные максимумы, чем при моделировании. Этот эффект является следствием наличия шума в приемо-передающем тракте, который вносит искажение в восстанавливаемое изображение.

Результаты модельных экспериментов с рассеивающей плоскостью показали принципиальную возможность восстановления положения, формы и размеров исследуемого объекта.

2.1.4. Эксперименты с рассеивающими объектами в базовой схеме измерений

Для экспериментов выбирались объекты из материалов с достаточно хорошими рассеивающими свойствами в микроволновом диапазоне. Такими свойствами обладают металлы, соляные растворы; кроме того, что представляет главную цель, – тела людей.

Эксперименты проводились с манекенами, т. е. с макетами человеческих тел (рис. 2.4) при их стационарном расположении.



Рисунок 2.4. Использованные макеты человеческих тел, обернутые в фольгу для создания рассеивающих свойств

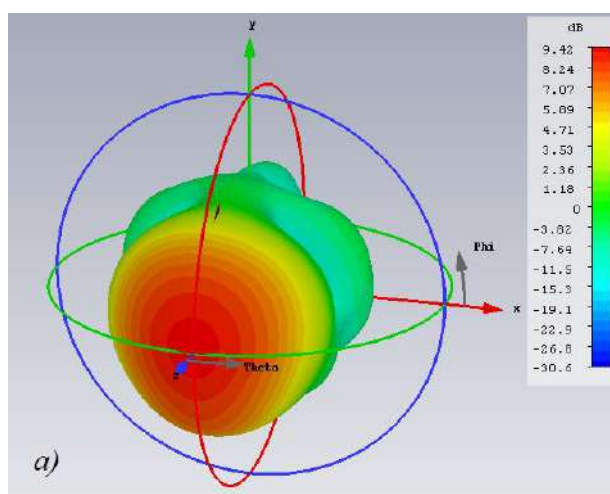
Перед расчетом восстановления радиоизображения проводились калибровочные измерения. Целью калибровочных измерений являлась компенсация неточности в определении координат и фазовых набегов в волноводных трактах приемо-передающих элементов. Фазовые набег в передающем тракте определялись с помощью векторного анализатора цепей непосредственным измерением сигнала на поверхности решетки. Аналогично определялись фазовые набег в волноводных трактах приемных антенн.

В первой серии экспериментов в исследуемую область пространства размещался только один манекен в различных положениях относительно

приемо-передающей системы. Размер исследуемой области составлял $1 \times 1 \times 0.5$ м³ по x , y , z направлениям соответственно, а ее ориентация определялось положением геометрического центра манекена. Манекены размещались по z -координате на расстоянии от 1 м до 4 м и от -2 м до 2 м по x координате относительно приемо-передающей системы. Для радиоизображений каждого манекена (рис. 2.4) были характерны следующие особенности:

- качество изображения не менялось по x -координате в пересечении рабочих секторов главных лепестков диаграмм направленностей приемо-передающих антенн при фиксированной z -координате при различных положениях манекена;
- качество изображения постепенно снижалось при увеличении расстояния по z -координате между системой и манекеном.

Рабочий сектор главного лепестка диаграммы направленности РСА



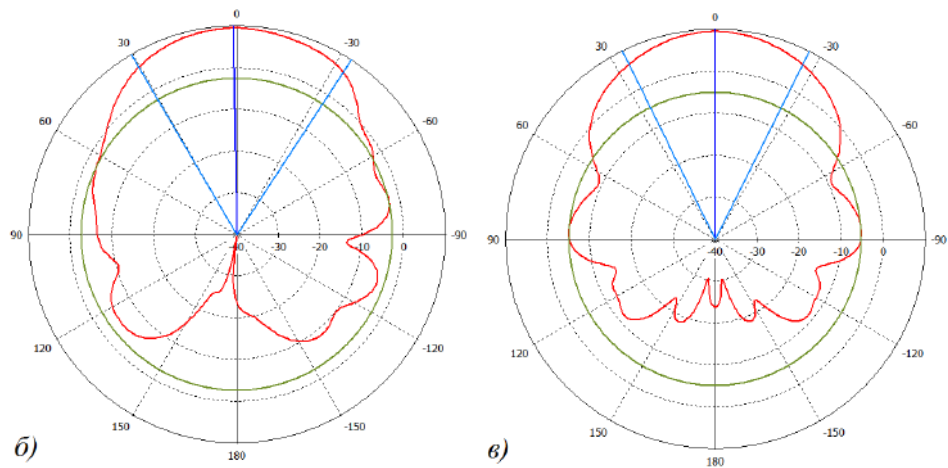
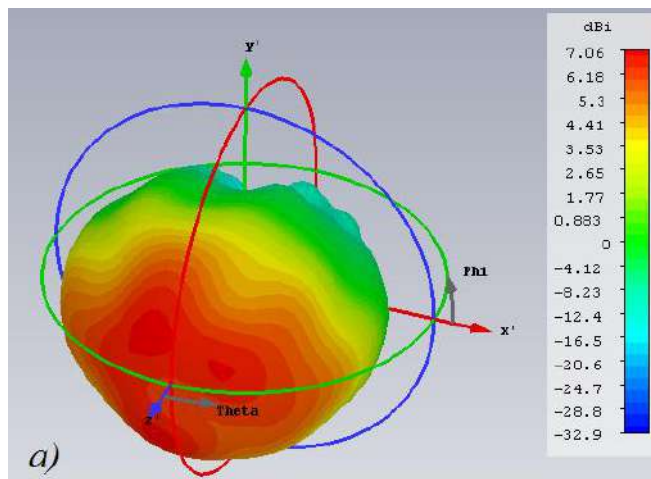


Рисунок 2.5. Типичная диаграмма направленности PCA: (а) трехмерная, (б) в плоскости yz , (в) в плоскости xz .

(рис. 2.5) составляет 60 градусов в плоскостях xz и yz (рис. 2.5, а). На границах сектора падение сигнала относительно максимума диаграммы направленности составляет приблизительно 2 децибел. Рабочий сектор главного лепестка диаграммы направленности приемной антенны (рис. 2.6) составляет 120 градусов в плоскостях xz и yz , а на границах сектора падение сигнала относительно максимума диаграммы направленности составляет приблизительно 2.5 децибел.



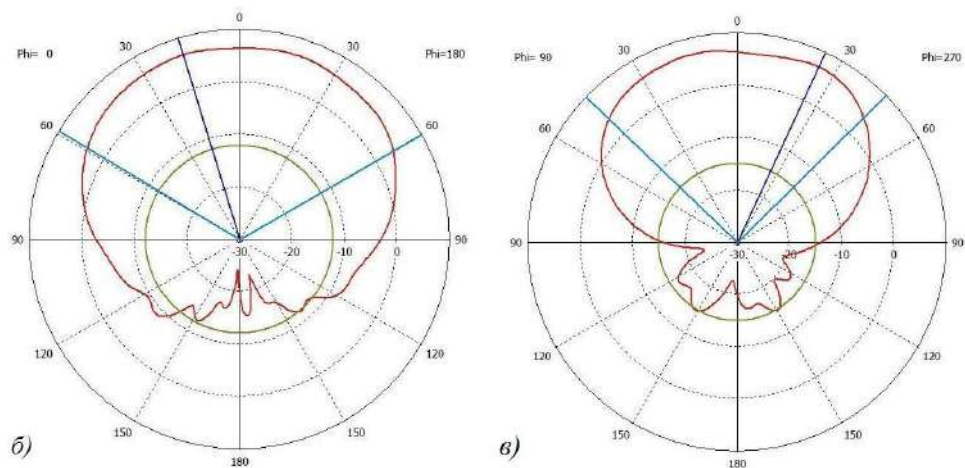


Рисунок 2.6. Типичная диаграмма направленности приемной антенны:
 (а) трехмерная, (б) в плоскости yz , (в) в плоскости xz .

Это означает, что если объект находится вне пересечения рабочих секторов главных лепестков диаграмм направленностей приемо-передающих элементов, то соотношение сигнал-шум для измеряемых комплексных амплитуд будет низким. Низкое соотношение сигнал-шум ухудшает качество восстанавливаемого изображения.

Увеличение затухания излучаемого электромагнитного поля при увеличении расстояния по z -координате служит основной причиной снижения качества изображения.

Во второй серии экспериментов в исследуемую зону размещались одновременно два манекена в различных положениях относительно приемо-передающих элементов. Размер исследуемой области определялся расстоянием между манекенами, а ее центр – положением геометрического центра манекенов. Проведенные эксперименты показали, что на качество радиоголографического изображения одного манекена не влияло присутствие другого манекена, если расстояние между ними составляет не менее 30 см и манекены не перекрывают друг друга по углу обзора. На рисунке 2.7 представлены радиоголографические изображения двух манекенов.

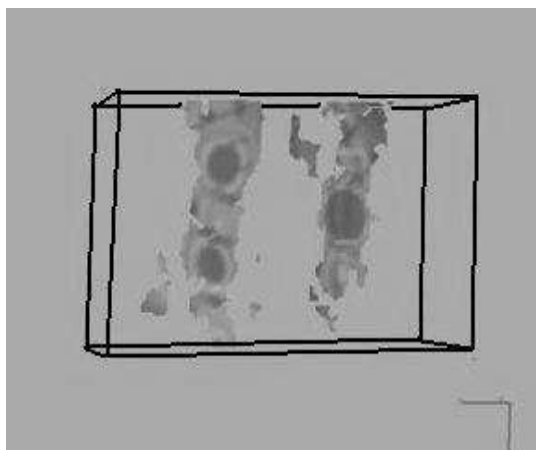


Рисунок 2.7. Радиоголографические изображения двух манекенов (позиции объектов как на рисунке 2.4). Размеры исследуемой области – $2 \times 1 \times 3 \text{ м}^3$.

Анализ полученных радиоголографических изображений (рис. 2.7) показывает, что на каждом изображении манекенов присутствуют 1 – 2 ярких пятна, соответствующих высокому значению модуля амплитуды, а значение модуля амплитуды убывает к краям изображения. Перепад значений амплитуд восстановленного поля на изображении связан с зависимостью от угла между направлением рассеянного поля и нормалью к касательной в соответствующих точках восстановления. Максимальным значениям восстановленных амплитуд соответствуют значения углов близких к нулю, а минимальным – близких к 50-и градусам. Для углов больших 50-и градусов значение амплитуды восстановленного поля не превосходило порогового значения.

Проведенные экспериментальные исследования с макетами человеческих тел показали принципиальную возможность восстановления радиоголографических изображений в используемой модели распространения электромагнитного излучения.

2.1.5. Эксперименты по восстановлению радиоголографического изображения человека в базовой схеме измерений

При построении радиоголографических изображений человека к базовой схеме экспериментальной установки были добавлены две видеокамеры, образующие стереопару (рис. 2.8, *в*). Стереопара позволяла строить трехмерное изображение человека в видимом диапазоне длин волн.

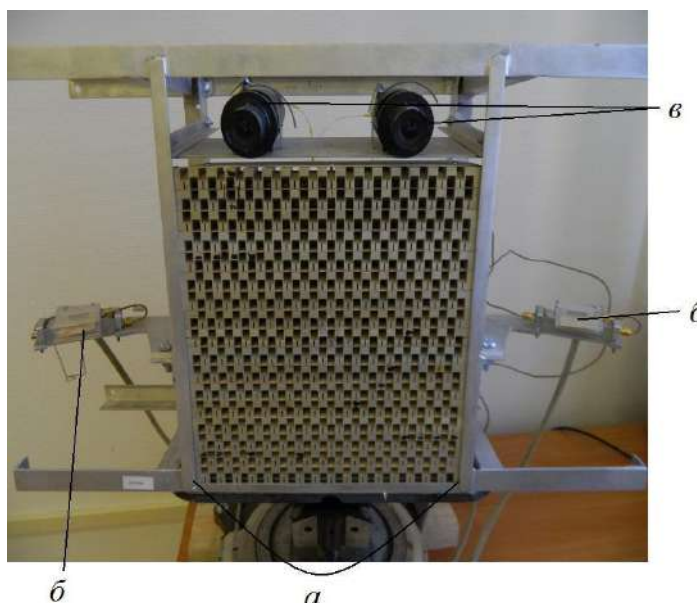


Рисунок 2.8. Изображение доработанной базовой схемы экспериментальной установки: (*а*) – массив передающих антенн, (*б*) – две приемные антенны, (*в*) – стереопара.

Положение исследуемой области определялось в автоматическом режиме в соответствии с изображением со стереопары. Размер исследуемой области составлял $1 \times 1 \times 1 \text{ м}^3$. Определение положения исследуемой области в автоматическом режиме позволяет работать как со стационарными, так и движущимися объектами, что представляет собой большую научную ценность. Радиоголографические изображения человека, получаемые в базовой схеме экспериментальной установки, представлено на рисунке 2.9, *в*. Распределение модуля амплитуды поля на изображении не содержит ярко выраженных максимумов и участков со значительным амплитудным

градиентом, в отличие от распределения модуля амплитуды поля на изображении манекена (рис. 2.7). Полученный результат показывает, что для используемых манекенов и человеческого тела коэффициенты отражения существенным образом не отличаются и адекватно описываются применяемой моделью рассеяния электромагнитного излучения.

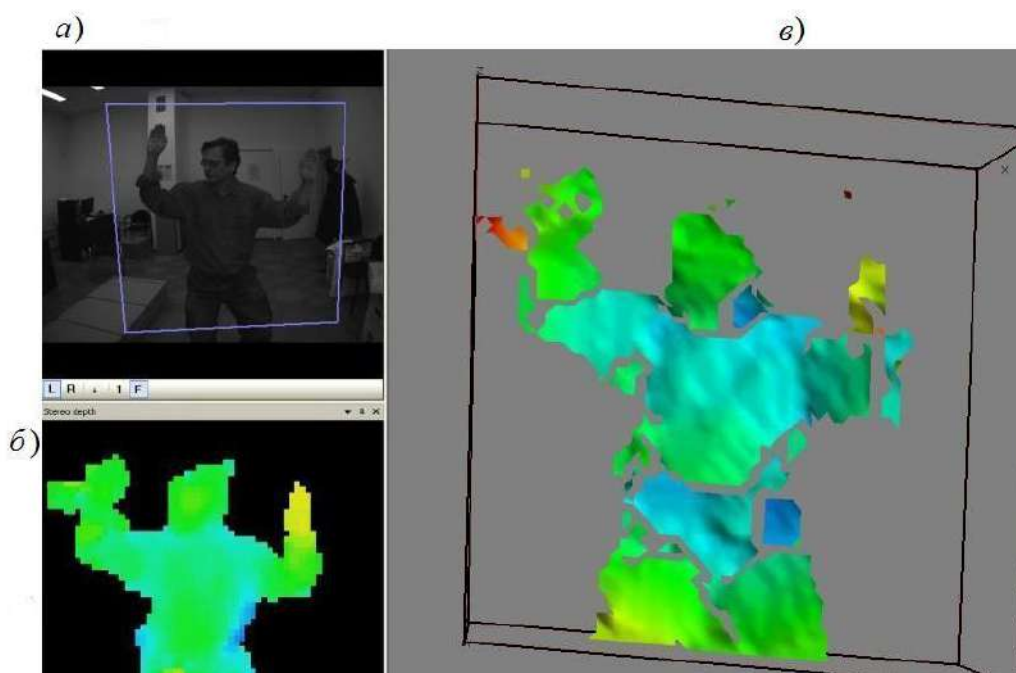


Рисунок 2.9. Получение микроволнового изображения движущегося человека с помощью установки АМУ256х1х2: *а* – ракурс с одной из видеокамер, *б* – изображение с видеосистемы, *в* – микроволновое изображение

Проведенные экспериментальные исследования показали принципиальную возможность построения радиоголографических изображений человеческого тела при зондировании его микроволновым излучением СВЧ диапазона. Качество получаемых изображений наилучшее, если исследуемый объект (человек) находится в пределах 1 – 4 м по z -координате экспериментальной установки и в пределах рабочих секторов диаграмм направленностей приемо-передающих элементов (рис. 2.5, *а*, *б* и рис. 2.6 *а*, *б*). При других расположениях исследуемого объекта, получаемое

радиоголографическое изображение достаточно зашумлено из-за низкого соотношения сигнал-шум.

2.2. Радиоголографический метод восстановления изображения движущихся объектов

Восстановление радиоголографического изображения методом преобразования Фурье в базовой схеме измерений позволяло рассчитывать изображение стоящего естественно человека. В данном разделе рассматривается более актуальная физическая задача – восстановление радиоголографического изображения движущегося объекта. Для реализации поставленной задачи необходимо облучать исследуемый объект СВЧ излучением и обеспечить быстро производимые расчеты восстанавливаемого радиоголографического изображения.

2.2.1. Экспериментальная установка для восстановления радиоголографического изображения движущегося объекта

Для восстановления изображения необходимо, чтобы облучение и измерение рассеянного электромагнитного излучения от исследуемого объекта происходило с нескольких ракурсов. Для обеспечения данного требования была собрана экспериментальная установка (рис. 2.10), представляющая из себя порталный проход со сторонами I и II.

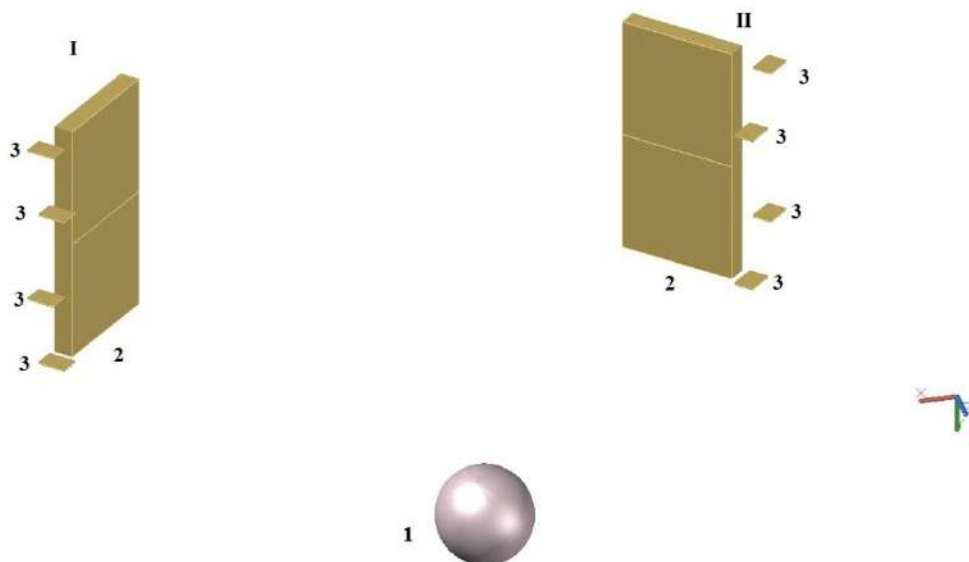


Рисунок 2.10. Схема экспериментальной установки по восстановлению радиоголографического изображения движущегося объекта в выбранной системе координат. 1 – объект, 2 – сдвоенные РСА, 3 – приемные антенны.

Каждая сторона установки содержит две сдвоенные РСА (рис. 2.10, 2) по 256 передающих элементов каждая, 4 приемные антенны (рис. 2.10, 3). Излучение производилось на 40 эквидистантных частотах из диапазона 10 – 18 ГГц. Приемо-передающие элементы установки расположены с зеркальной симметрией.

В реализованной экспериментальной установке восстановление изображения производилось независимо 4-я блоками приемо-передающих элементов:

1. Сдвоенные решетки стороны I, приемные антенны стороны I.
2. Сдвоенные решетки стороны I, приемные антенны стороны II.
3. Сдвоенные решетки стороны II, приемные антенны стороны I.
4. Сдвоенные решетки стороны II, приемные антенны стороны II.

Из полученных изображений с 4-х блоков строилось результирующее изображение движущегося объекта.

2.2.2. Построение радиолографического изображения движущегося человека

Актуальной задачей в области безопасности является задача построения радиолографических изображений движущегося человека. Решение данной задачи производится на экспериментальной установке с порталным проходом (рис. 2.10). Движение человека осуществляется вдоль оси z (рис. 2.11).

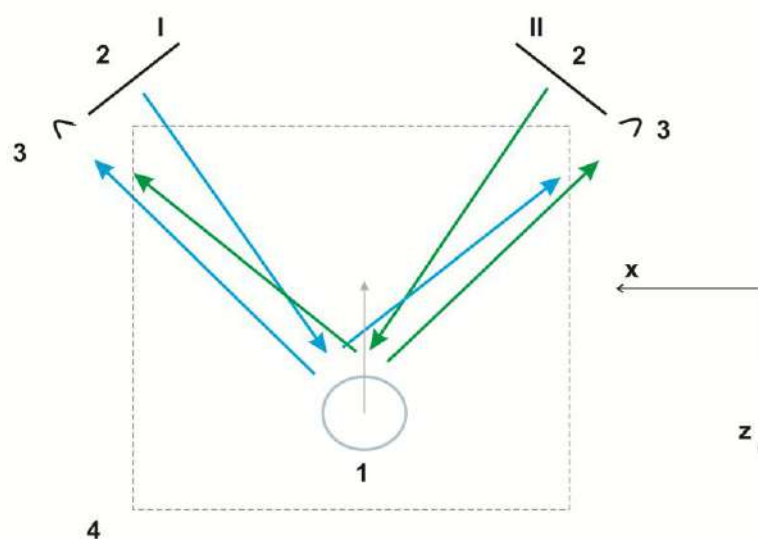


Рисунок 2.11. Схема движения человека относительно экспериментальной установки в выбранной системе координат. 1 – исследуемый человек, 2 – двойные РСА, 3 – приемные антенны, 4 – исследуемая область. Облучение происходит с двух сторон, а приемные антенны измеряют рассеянное человеком поле от каждой из сторон.

Установка позволяла производить полный цикл измерения комплексных амплитуд (излучения и приема) рассеянного поля на 40 частотах за 7 мс. За это время при обычной скорости движения в 5–6 км/ч человек смещается не более чем на 1 см. При таком смещении допустимо использовать формулу 2.2 для восстановления изображения человека. Размеры исследуемой зоны (рис.2.11, 4) 3х1.5х3 м по x , y , z осям соответственно. С помощью стереопары определялось положение человека в исследуемой зоне. Относительно этого

положения задавалась область восстановления, в которой производился расчет радиоголографического изображения, при этом для каждого приемопередающего блока данная процедура производилась независимо. Из изображений, полученных на каждом блоке, вычислялось результирующее изображение. Расчет результирующего изображения состоял из нескольких этапов:

- разбиение области восстановления на равномерные по трем направлениям элементарные объемы,
- пересчет координат точек изображения для каждого блока в соответствии с элементарными объемами и с учетом величины амплитуды,
- усреднение значений амплитуд восстановленного поля в каждом элементарном объеме.

Расчет радиоголографического изображения производился методом преобразованием Фурье. Результаты эксперимента подтвердили возможность восстановления изображения движущегося человека при использовании данного метода. Пример восстановленного радиоголографического изображения представлен на рисунке 2.12.

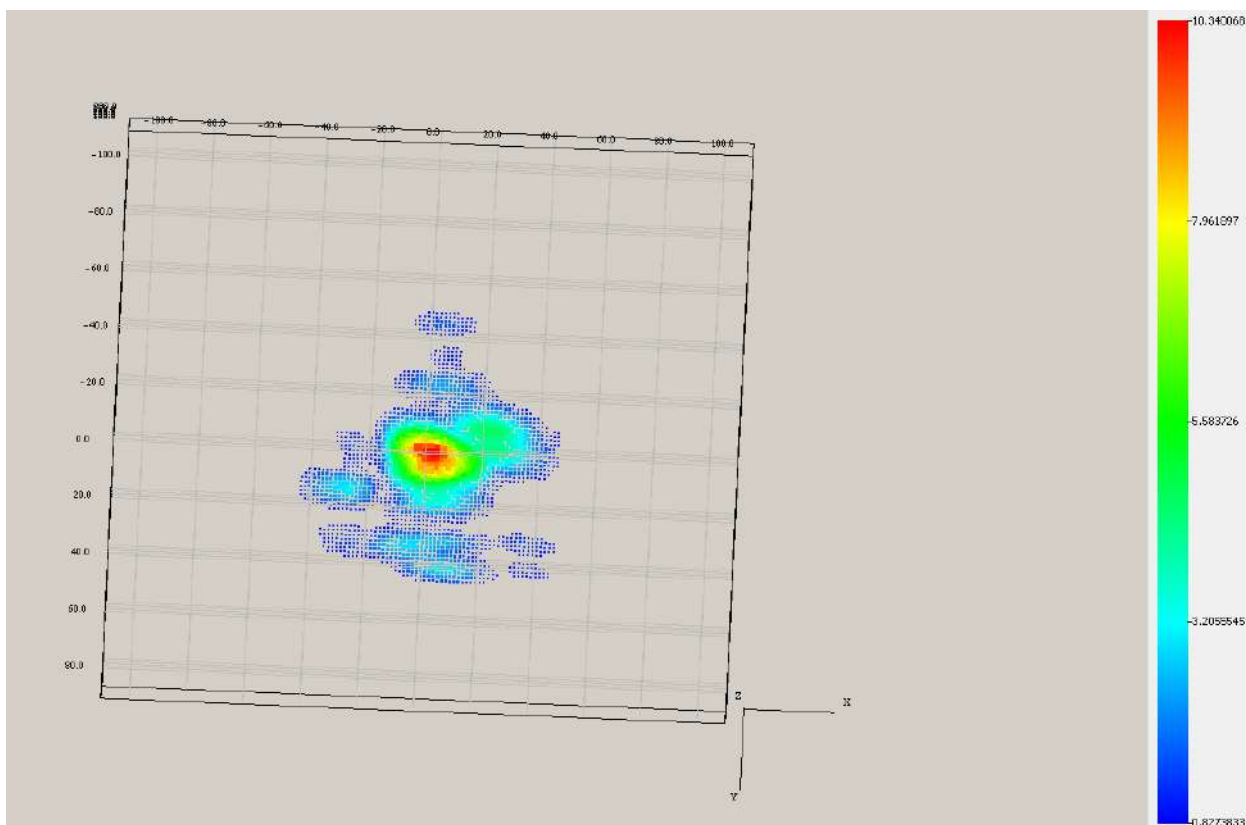


Рисунок 2.12. Радиоголографическое изображение человека, восстановленное преобразованием Фурье. Цвет соответствует модулю комплексной амплитуды в точках восстановления.

Время полного цикла – время измерения и компьютерного расчета поля методом преобразования Фурье, для одного движущегося человека составляет 0.05 с, что соответствует 20 циклам за 1 секунду. При увеличении числа людей в исследуемой области данное время значительно увеличивается, и восстановление изображений движущихся людей, одновременно находящихся в исследуемой области не представляется возможным. Для увеличения быстродействия расчетов, позволяющих восстанавливать одновременно изображения нескольких человек, применялся алгоритм быстрого преобразования Фурье. Главное требование, предъявляемое к алгоритму быстрого преобразования Фурье – это сохранение качества восстанавливаемого радиоголографического изображения (рис.2.13).

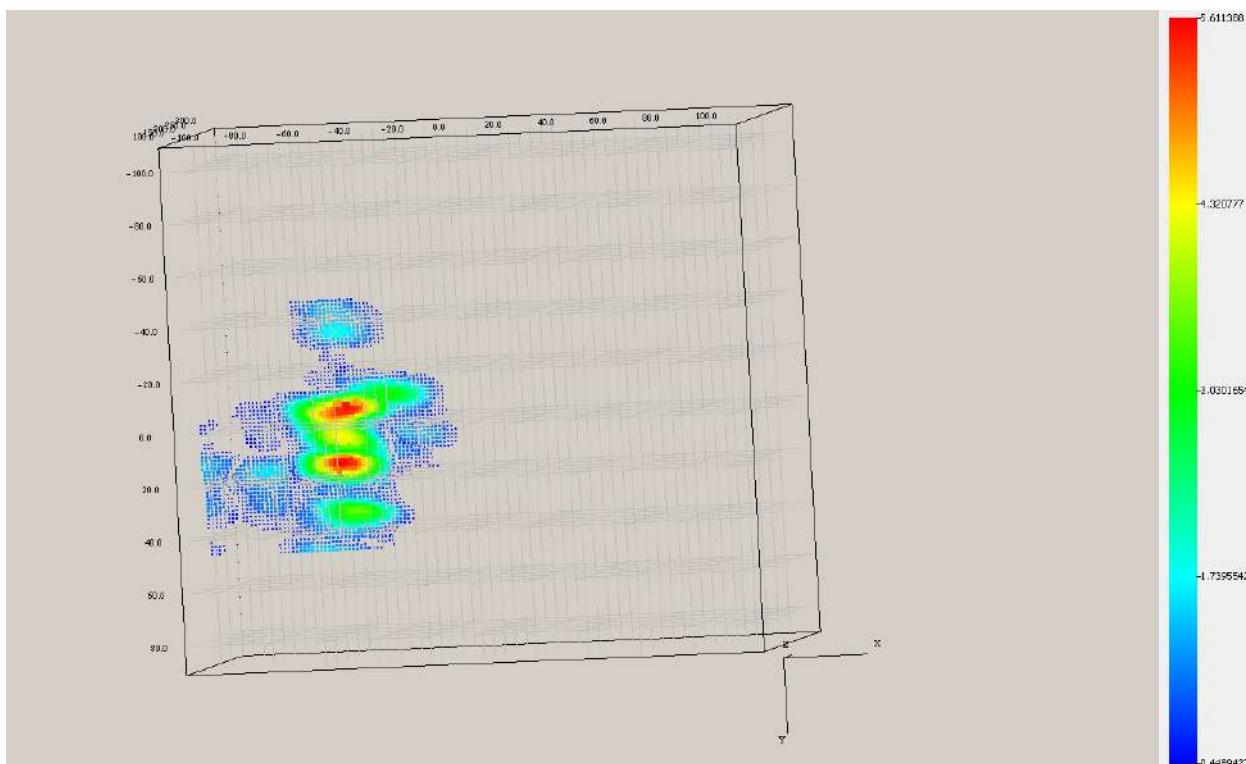


Рисунок 2.13. Радиоголографическое изображение человека, восстановленное БПФ. Цвет соответствует модулю комплексной амплитуды в точках восстановления.

Анализируя радиоголографические изображения человека, получаемые преобразованием Фурье и БПФ, можно утверждать, что основные параметры человека (положение, рост, габариты, телосложение) восстанавливаются идентично для задачи идентификации. Следует отметить, что руки не всегда восстанавливаются на изображении. Это связано в первую очередь с тем, что руки имеют меньшую по сравнению с торсом рассеивающую поверхность, а соответственно, меньший модуль комплексной амплитуды восстанавливаемого поля.

2.2.3. Обоснование используемого поддиапазона СВЧ 10-18ГГц.

В задачах диссертационной работы используется поддиапазон СВЧ 10-18 ГГц. Основные преимущества в использовании данного поддиапазона, по

сравнению с поддиапазоном 60-66 ГГц, который используется в существующих досмотровых системах, следующие:

- Высокое быстродействие расчетов.
- Применим для работы с объектами с размерами ~5 см.
- Принципиальная возможность работы с динамическими объектами.

При расчете радиоголографического изображения подобласть пространства, в которой расположен интересующий объект, разбивается на эквидистантную сетку, в которой происходят вычисления. Расстояние между соседними узлами сетки для поддиапазона СВЧ 10-18 ГГц 2 см. Данное расстояние выбрано как средняя длина волны излучения (для 10-18 ГГц длина волны составляет 1.66-3 см) с небольшим округлением вниз. Для аналогичной задачи, но с поддиапазоном СВЧ 60-66 ГГц расстояние между узлами сетки составляло бы 0.4 см. Количество узлов сетки (количество узлов соответствует количеству производимых вычислительных операций) для области пространства 100x100x50 м для 10-18 ГГц составляет ~261 тыс. операций, а для 60-66 ГГц для той же области ~8000 тыс. операций. Таким образом, поддиапазон 10-18 ГГц имеет явные преимущества по сравнению с поддиапазоном 60-66 ГГц.

Дифракционный предел для поддиапазона 10-18 ГГц составляет 3 см в идеальных условиях. Это означает, что минимально возможный объект, который может быть обнаружен, может иметь характерные размеры 3 см и более. С учетом влияния шумов минимальный размер составляет в реальности 4 см. В диссертационной работе все исследования производились с объектами, имеющими размер от 5 см. Таким образом, поддиапазон 10-18 ГГц подходит для работы с объектами размерами от 5 см с точки зрения дифракционного предела разрешения.

Время измерения рассеянного поля от исследуемого объекта для каждой частоты (всего 128 частот, в быстром преобразовании Фурье) составляет 10 мс (это время без учета времени необходимого для расчета). За 10 мс

исследуемый объект не должен сместиться на расстояние Δ больше половины длины волны используемого излучения, чтобы можно было производить расчеты по (1.20). Для поддиапазона 10-18 ГГц это расстояние составляет $\Delta = 1.5$ см. Для поддиапазона 60-66 ГГц аналогичное расстояние $\Delta = 0.3$ см. Данный факт означает, что поддиапазон 60-66 ГГц не способен принципиально работать с динамическими объектами при том же характерном времени измерения. Таким образом, поддиапазон 10-18 ГГц принципиально подходит для работы с динамическими объектами.

2.3. Физический метод обнаружения диэлектрического объекта, расположенного на теле человека на основе анализа его радиоголографического изображения

Быстрое преобразование Фурье позволило восстанавливать радиоголографическое изображение движущегося человека. Качество восстанавливаемого изображения позволяло однозначно определять положения человека в пространстве, его скорость и пропорции тела. В данном разделе будет решаться комплексная задача по обнаружению диэлектрического объекта, расположенного на теле человека. С физической точки зрения, поставленная задача заключается в восстановлении радиоголографического изображения рассеивающего объекта, вплотную с которым располагается диэлектрический слой. Комплексное решение данной задачи будет разделено на несколько основных этапов.

2.3.1. Вычисление диэлектрической проницаемости на восстановленном радиоголографическом изображении по задней поверхности диэлектрика, находящегося вплотную с рассеивающей поверхностью

Присутствие диэлектрического объекта вплотную с рассеивающей поверхностью оказывает влияние на рассеяние в области, закрытой диэлектриком, а также на восстанавливаемое радиоголографическое

изображение. Отмеченное влияние вызвано дополнительным фазовым набегом зондирующего СВЧ излучения, при прохождении его через диэлектрик. На поверхности радиоголографического изображения дополнительный фазовый набег проявляется в виде провала (рис. 2.14, б)).

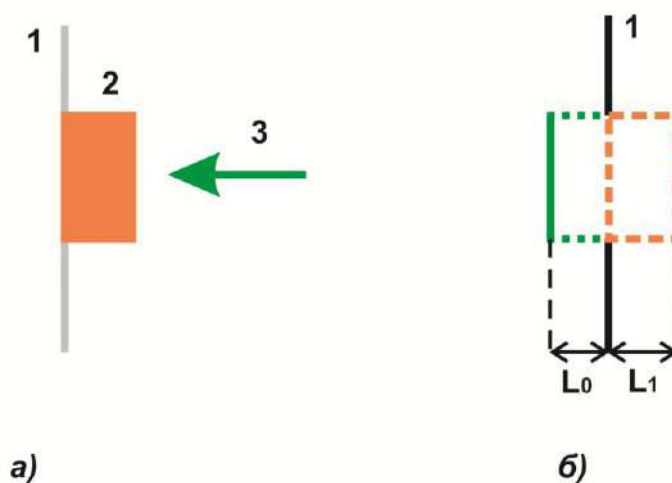


Рисунок 2.14. Вид в сечении диэлектрика, находящегося вплотную к рассеивающей поверхности. а) – схема расположения и зондирования, б) – радиоголографическое изображение с наложением положения диэлектрика. 1 – рассеивающая поверхность, 2 – диэлектрик, 3 – зондирующее СВЧ излучение.

Глубина провала L_0 – расстояние между рассеивающей поверхностью и задней поверхностью диэлектрика (рис.2.14, б)). Она определяется соотношением между диэлектрической проницаемостью диэлектрика (2, рис.2.14, а)) и его физическим размером L_1 в сечении (рис.2.14, б)) вдоль направления распространения:

$$L_0 = L_1(\sqrt{\varepsilon} - 1) \quad (2.4)$$

где ε диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Для нахождения областей на радиоголографическом изображении человека, содержащих провал, изображение, получаемое в СВЧ диапазоне, сравнивалось с изображением, получаемым в другом частотном диапазоне –

в видимом диапазоне. С помощью стереопары производилось построение изображения в видимом диапазоне. По анализу двух изображений (рис. 2.15), получаемых в разных частотных диапазонах, определялась область, содержащую провал.

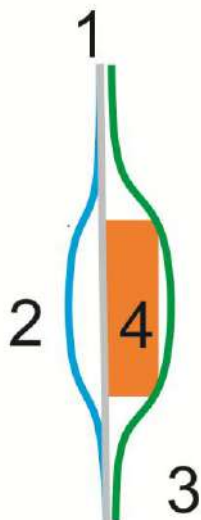


Рисунок 2.15. Построение изображений в общей системе координат в разных частотных диапазонах. 1 – положение рассеивающей поверхности, 2 – изображение в СВЧ диапазоне, 3 – изображение в видимом диапазоне, 4 – положение диэлектрика.

Область, содержащая провал, определялась по двум признакам:

- Сравнение разницы положений между соответствующими точками радиоголографического и видимого изображений.
- Нахождение участков со значительным градиентом по положению на радиоголографическом изображении.

Если существует область, в которой разница между положениями соответствующих точек двух изображений превышала пороговое значение, и на границах вокруг этой области присутствует участки со значительным градиентом по положению, то такая область содержит провал.

При анализе двух изображений из разных частотных диапазонов (2 и 3, рис.2.15), определялось расстояние между L поверхностями в области,

содержащей провал. Это расстояние является расстоянием между задней поверхностью диэлектрика и видео поверхностью – области изображения в видимом диапазоне, соответствующей задней поверхности на радиоголографическом изображении. Оно является суммой величин глубины провала L_0 и физического размера диэлектрика L_1 :

$$L = L_1 + L_0 \quad (2.5)$$

Глубина провала L_0 определялась на радиоголографическом (2, рис.2.15) изображении разницей положения провала и положений прилегающих областей, в которых положения изображений в разных частотных диапазонах совпадают (рис.2.15) – верхних и нижних реперных поверхностей. По глубине провала и по расстоянию между поверхностями в области, содержащей провал, (из формулы 2.5) определялся физический размер диэлектрика в сечении. По глубине провала и физическому размеру диэлектрика из формулы 2.4 вычислялась диэлектрическая проницаемость диэлектрика ε :

$$\varepsilon = \left(\frac{L_0}{L_1} + 1 \right)^2 \quad (2.6)$$

Таким образом, используя информацию о пространственном положении задней поверхности диэлектрика, расстояние между задней поверхностью и видео поверхностью, становится возможным вычислить диэлектрическую проницаемость диэлектрика, расположенного вплотную к рассеивающей поверхности.

2.3.2. Вычисление диэлектрической проницаемости на восстановленном радиоголографическом изображении по передней и задней поверхностями диэлектрика, находящегося вплотную с рассеивающей поверхностью

Как было отмечено в предыдущем пункте, что присутствие диэлектрика вплотную к рассеивающей поверхности образует на их радиоголографическом изображении область содержащую провал,

являющийся задней поверхностью диэлектрика. При определенных диапазонах углов падения зондирующего СВЧ излучения рассеяние излучения происходит не только от рассеивающей поверхности и задней поверхности диэлектрика, но и от передней границы раздела воздух-диэлектрик (рис. 2.16).

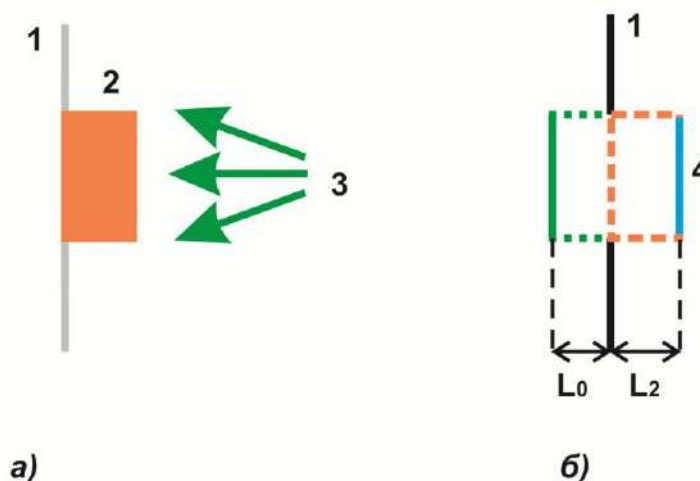


Рисунок 2.16. Вид в сечении диэлектрика, находящегося вплотную к рассеивающей поверхности. а) – схема расположения и зондирования, б) – радиоголографическое изображение с наложением положения диэлектрика. 1 – рассеивающая поверхность, 2 – диэлектрик, 3 – зондирующее СВЧ излучение, 4 – передняя поверхность диэлектрика – граница раздела воздух-диэлектрик на радиоголографическом изображении.

Параметры L_0 – глубина провала и L_2 – физический размер диэлектрика связаны между собой:

$$L_0 = L_1(\sqrt{\varepsilon} - 1) \quad (2.7)$$

Параметры L_0 и L_2 из (2.7) имеют идентичную связь с параметрами L_0 и L_1 из формулы 2.4.

Область, содержащая провал, на радиоголографическом изображении и глубина провала L_0 определяются также как и в п.2.3.1. Параметр L_2 определяется положением передней поверхности диэлектрика. При

восстановлении изображения производится поиск максимумов модуля комплексной амплитуды поля вдоль линий преимущественного направления. Для поиска передней поверхности проводится повторная процедура поиска второго по величине локального экстремума-максимума. Точки пространства, в которых выявляется второй по величине локальный экстремум-максимум, соответствуют положению передней поверхности – границе раздела воздух диэлектрик.

При анализе радиоголографического изображения определялось расстояние между L передней и задней поверхностями диэлектрика. По аналогии с п.2.3.1 оно является суммой величин глубины провала L_0 и физического размера диэлектрика L_2 :

$$L = L_2 + L_0 \quad (2.8)$$

Глубина провала L_0 определялась на радиоголографическом (рис.2.14, б) изображении разницей положения провала и положений, прилегающих к нему областей (рис.2.16, б) – верхних и нижних реперных поверхностей. По глубине провала и по расстоянию между поверхностями в области, содержащей провал, (из формулы 2.8) определялся физический размер диэлектрика в сечении. По глубине провала и физическому размеру диэлектрика из формулы 2.7 вычислялась диэлектрическая проницаемость диэлектрика ε :

$$\varepsilon = \left(\frac{L_0}{L_2} + 1 \right)^2 \quad (2.9)$$

Таким образом, используя информацию о пространственном положении задней поверхности диэлектрика на радиоголографическом изображении, а также расстояние между задней поверхностью и передней поверхностью, становится возможным вычислить диэлектрическую проницаемость диэлектрика, расположенного вплотную к рассеивающей поверхности.

2.3.3. Вычисление диэлектрической проницаемости диэлектрика, расположенного на теле человека

Описанные в п.2.3.1 и п.2.3.2 способы измерения диэлектрической проницаемости для диэлектрика, расположенного вплотную к рассеивающей поверхности применимы для случая, когда рассеивающей поверхностью является человеческое тело.

Облучение и измерение рассеянного электромагнитного поля осуществляется экспериментальной установкой портального типа (рис.2.11). Человек расположен в ее исследуемой области (4, рис.2.11).

В экспериментах с человеком диэлектрический предмет размещался в области живота, а человек свободно перемещался в исследуемой области со скоростью 4-5 м/ч. Определение глубины провала L_0 и физического размера L_1 или L_2 диэлектрика происходило в сечении одной из его сагиттальных плоскостей. Главная сагиттальная плоскость проходила через положение центра на изображении, а остальные на эквидистантном расстоянии друг относительно друга. Расстояние между этими плоскостями составляло 1 см. Диэлектрическая проницаемость вычислялась одновременно двумя способами.

В первой серии экспериментов диэлектрик, расположенный на теле человека, не был закрыт слоем одежды. В такой постановке эксперимента, вычисляемый физический размер диэлектрика, определяемый положением видео поверхности и положением передней поверхности, совпадал для обоих методов ($L_1 = L_2$). В процессе движения человека в исследуемой области (4, рис.2.11) ориентация нормали к поверхности диэлектрика относительно направления падающего СВЧ излучения изменялась в широком диапазоне углов. Широкий диапазон углов позволял обнаруживать рассеяние падающего электромагнитного поля от передней поверхности диэлектрика, соответствующего границе раздела воздух-диэлектрик. На получаемых радиоголографических изображениях (рис.2.17) четко определялась задняя граница диэлектрика, а при большом числе положений человека

относительно приемо-передающих элементов определялась передняя граница диэлектрика.

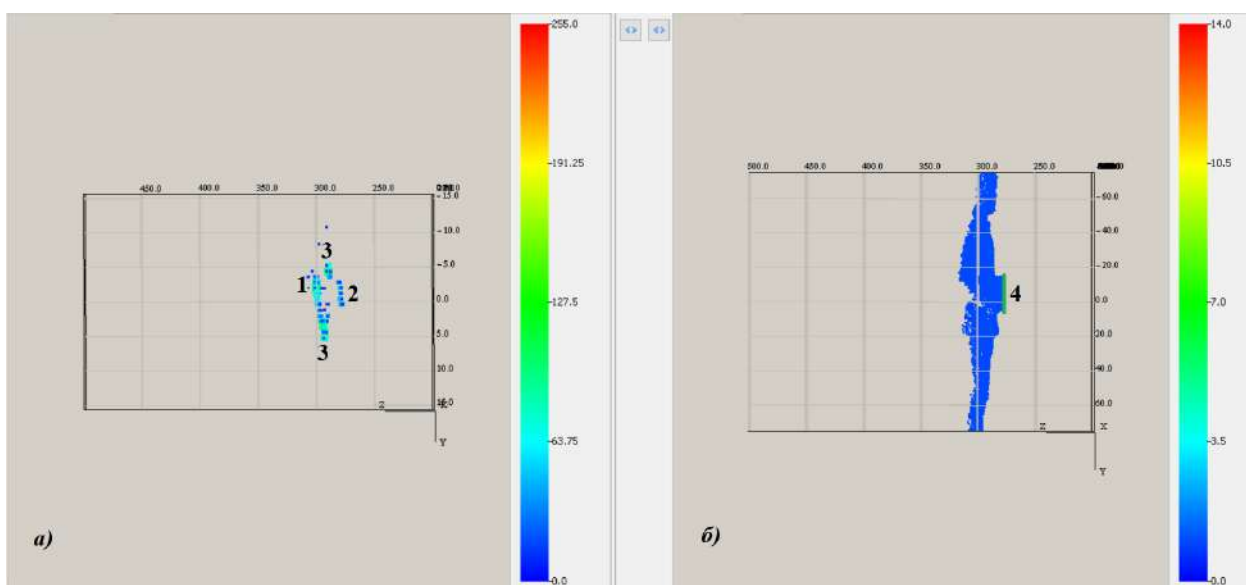


Рисунок 2.17. а) – сечение радиоголографического изображения человека в сагиттальной плоскости, б) – изображение человека в видимом диапазоне (вид с боку). 1 – задняя поверхность диэлектрика, 2 – передняя поверхность диэлектрика, 3 – верхняя и нижняя реперные поверхности, 4 – видео поверхность диэлектрика.

Таким образом, физическая задача об обнаружении диэлектрика, расположенного на теле человека, решается при его движении в исследуемой области. При этом результаты, используемых двух методов, подтверждают и дополняют друг друга.

Во второй серии экспериментов диэлектрик, расположенный на теле человека, закрывался одеждой различной толщины. Эксперименты показали, что одежда является прозрачным материалом для используемого диапазона СВЧ. Благодаря прозрачности материала на радиоголографическом изображении человека выявлялись положения передней и задней поверхностей диэлектрика. Однако присутствие одежды вносит регулярное смещение в положении видео поверхности (рис. 2.18).

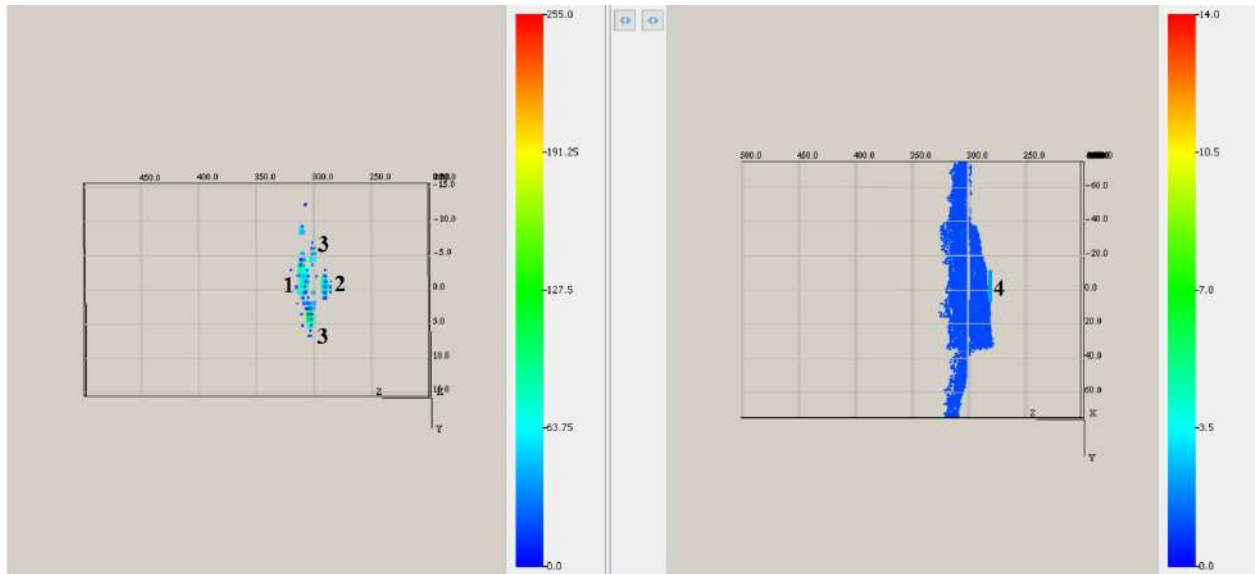


Рисунок 2.18. а) – сечение радиоголографического изображения человека в сагиттальной плоскости, б) – изображение человека в одежде в видимом диапазоне (вид с боку). 1 – задняя поверхность диэлектрика, 2 – передняя поверхность диэлектрика, 3 – верхняя и нижняя реперные поверхности, 4 – видео поверхность диэлектрика.

Из-за вносимого смещения в положение корректное вычисление диэлектрической проницаемости по формуле 2.6 невозможно. Однако формула 2.6 позволяла сократить диапазон возможных значений диэлектрической проницаемости. Вычисление диэлектрической проницаемости производилось только через положения передней и задней поверхностей диэлектрика.

Таким образом, физическая задача об обнаружении диэлектрика, расположенного скрытно на теле человека, решается при его движении в исследуемой области. Однако корректное значение диэлектрической проницаемости вычисляется только методом, описанным в п.2.3.2. При этом метод из п.2.3.1 позволяет ограничить область возможных значений диэлектрической проницаемости и тем самым подтвердить корректность вычисленного значения диэлектрической проницаемости.

2.4. Выводы к главе 2.

В главе 2 представлен метод построения и обработки радиоголографических изображений в поддиапазоне СВЧ 10-18 ГГц.

Представлено теоретическое обоснование используемого поддиапазона СВЧ 10-18 ГГц.

Собрана экспериментальная установка, позволяющая одновременно производить построение, обработку и анализ радиоголографического изображения.

Быстродействие расчетов совместно с выбранным поддиапазоном позволяют производить расчеты одновременно для 6 динамических объектов в режиме реального времени.

Впервые представлен метод на основе анализа радиотомографического изображения вычисления ключевых параметров исследуемого диэлектрика – диэлектрическая проницаемость, размеры, положение в пространстве.

Быстродействие использованных алгоритмов позволило производить процесс построения, обработки и анализа радиотомографического изображения в режиме реального времени. Использование режима реального времени позволило работать с динамическими объектами.

Представлен метод обнаружения скрытых диэлектрических объектов, проносимы на теле человека в области живота, основанный на анализе радиоголографического изображения.

Глава 3. Радиотомографический метод дистанционного обнаружения скрытых объектов на основе анализа трехмерного томографического изображения

Большинство методов обнаружения скрытых объектов в радиочастотном диапазоне работают с отраженными или рассеянными электромагнитными волнами. В данной главе будет уделено внимание к прошедшему через объект радиоволновому излучению. Измеренное прошедшее излучение будет анализироваться томографическими методами, которые хорошо развиты в других частотных диапазонах – рентген и видимый диапазоны.

3.1. Радиотомографический метод построения трехмерных изображений на основе измеренных комплексных амплитуд прошедшего через объект поля

Использование радара с синтезированной апертурой (РСА) в качестве источника зондирующего радиоволнового излучения позволяет последовательно облучать исследуемый объект электромагнитным полем с различных точек пространства, лежащих в одной плоскости, на различных частотах из используемого радиоволнового диапазона. А расположение исследуемого объекта, находящегося между РСА и приемными антеннами, позволяет измерять комплексные амплитуды прошедшего через объект поля с различных сторон.

Данный раздел посвящен методикам построения радиотомографических изображений стационарных объектов, основанным на измерении комплексной амплитуды прошедшего через объект электромагнитного поля. Объект исследования подвергается широкополосному зондированию в верхнем X и нижнем Ku поддиапазонах СВЧ. Исследуемый объект должен проявлять диэлектрические свойства в используемом диапазоне частот. В противном случае измерение комплексных амплитуд прошедшего через объект поля невозможно.

3.1.1. Измерение удлинения оптического пути на основе измеренных комплексных амплитуд прошедшего через объект поля

Присутствие диэлектрического объекта на прямой, проходящей через фазовые центры передающего и приемного элементов, создает дополнительный фазовый набег – удлинение оптического пути, при распространении волны вдоль выбранной прямой. Для вычисления удлинения производился процесс восстановления позиции приемной антенны относительно передающей антенны. В процессе восстановления важной является фазовая информация, поэтому для расчета позиции приемной антенны в формуле (2.1) остается только множитель, отвечающий за фазовый сдвиг:

$$P(x, y, z) = \sum_{f=0}^{N_f-1} P(x', y', 0) e^{ikR} \quad (3.1)$$

где $P(x', y', 0)$ – поле на передающем элементе решетки, $P(x, y, z)$ – восстанавливаемое поле в точке приемной антенны, N_f – количество используемых частот, (x, y, z) – координаты точки восстановления, $(x', y', 0)$ – координаты передающего элемента антенной решетки, R – расстояние от передающего элемента до приемной антенны, k – волновой вектор. При отсутствии объекта между приемником и передатчиком измеряемое поле соответствует полю свободного пространства. Тогда удлинение, вызванное присутствием диэлектрика, будет определяться смещением положения максимума функции отношения:

$$A(l) = \frac{P(x, y, z)}{P_0(x, y, z)} \quad (3.2)$$

где $P(x, y, z)$ и $P_0(x, y, z)$ – восстанавливаемое поле в точке приемной антенны, соответственно в присутствии и отсутствии диэлектрика между передающей и приемной антеннами, l – удлинение. Характерный вид функции отношения $A(l)$ для свободного пространства и для диэлектрика,

находящегося между передающей и приемной антеннами представлен на рис. 3.1 и рис. 3.2 соответственно.

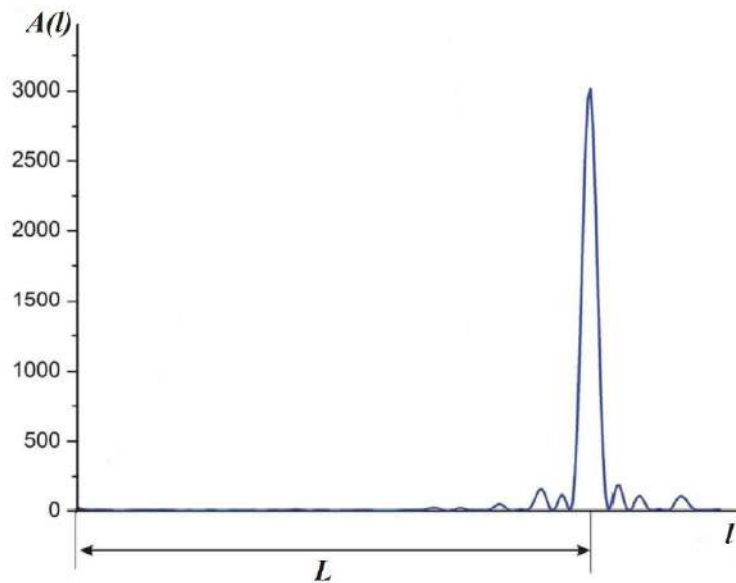


Рисунок 3.1. Функция отношения $A(l)$ в свободном пространстве. L – физическое расстояние между передающей и приемной антеннами.

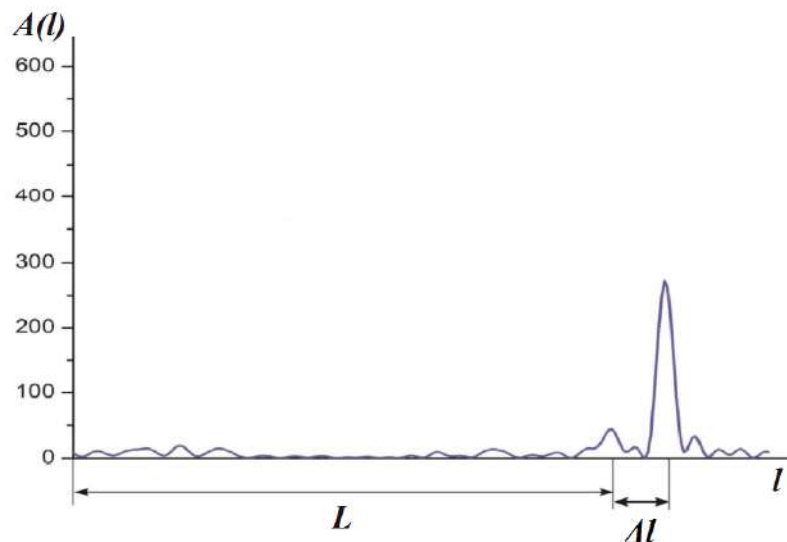


Рисунок 3.2. Функция отношения $A(l)$ в присутствии диэлектрика между передающей и приемной антеннами. L – физическое расстояние между передающей и приемной антеннами, Δl – удлинение оптического пути.

Присутствие диэлектрика между передающей и приемной антеннами создает дополнительное удлинение оптического пути Δl , которое определяется как:

$$\Delta l = t * (\sqrt{\varepsilon} - 1) \quad (3.3)$$

где t – физический размер диэлектрика вдоль прямой, соединяющей фазовые центры передающей и приемной антенн, ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Информация об удлинении оптического пути показывает насколько сместилась позиция приемной антенны относительно передающей, а также позволяет определить соотношение между размером и диэлектрической проницаемостью диэлектрика.

3.1.2. Схема экспериментальной установки для измерения удлинения оптического пути

Схема экспериментальной установки представлена для измерения оптического пути, вызванного присутствием диэлектрического объекта, представлена на рисунке 3.3.

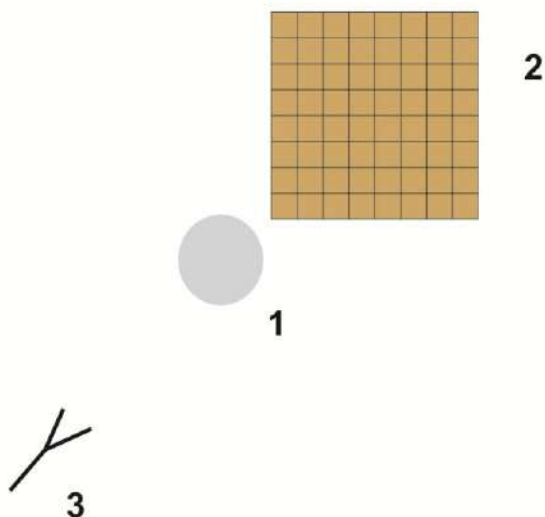


Рисунок 3.3. Схема экспериментальной установки. 1 – исследуемый диэлектрический объект, 2 – РСА, 3 – приемная антенна.

Основными элементами установки являются РСА, состоящая из 256 передающих элементов, (2, рис. 3.3) и приемная антенна (3, рис. 3.3). РСА излучает последовательно 40 эквидистантных частот из диапазона 10 – 18 ГГц. Передающие и приемные антенны выполнены в виде широкополосных антенн Вивальди. Присутствие диэлектрика (1, рис. 3.3) создает удлинения оптического пути вдоль прямых, содержащих пару из передающей и приемной антенн. Создаваемые удлинения пропорциональны размеру диэлектрика вдоль соответствующих прямых.

Удлинения оптического пути при фиксированном расположении приемо-передающих элементов создают профиль удлинения (4, рис.3.4).

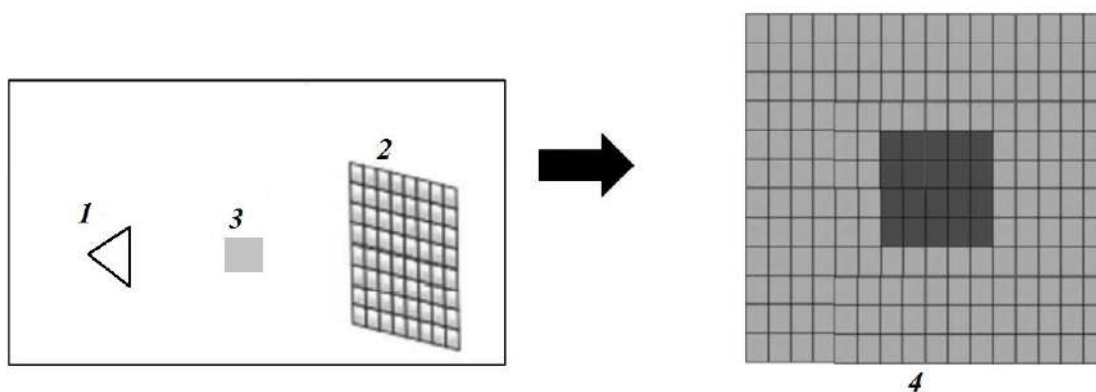


Рисунок 3.4. Схема измерения профиля удлинения. 1– приемная антенна, 2 – РСА, 3 – исследуемый диэлектрик, 4 – профиль удлинения.

Профиль удлинения представляет собой матрицу чисел, каждый элемент которой соответствует удлинению оптического пути для определенной пары приемник-передатчик. Размер матрицы равен количеству передающих элементов РСА. В данном случае размер матрицы составлял 16x16 элементов. Использование в расчетах профиля удлинения позволяет определять форму диэлектрического и соотношение между размерами и диэлектрической проницаемости в направлении на плоскость РСА. Подобный анализ имеет общие черты с рентгеновскими методами регистрации прошедшего через объект излучения. Разница заключается лишь в том, что в рентгеновском диапазоне интерес представляет изменение амплитуды излучения при прохождении его через объект, а в радиоволновом диапазоне – фазовый сдвиг.

3.1.3. Измерение профилей удлинения на тестовых стационарных диэлектрических объектах

Измерения профилей удлинения оптического пути производилось на заранее подготовленных тестовых объектах. Расстояние между РСА и приемной антенной составляло 140 см. Исследуемые объекты размещались на расстоянии 70 см от РСА. Вычисляемые значения удлинения оптического

пути, образующие профиль удлинения и измеряемые на тестовых объектах, подтвердили правильность используемых рассуждений из п. 3.1.1. На рисунке 3.5 представлен характерный вид измеряемого профиля удлинения.

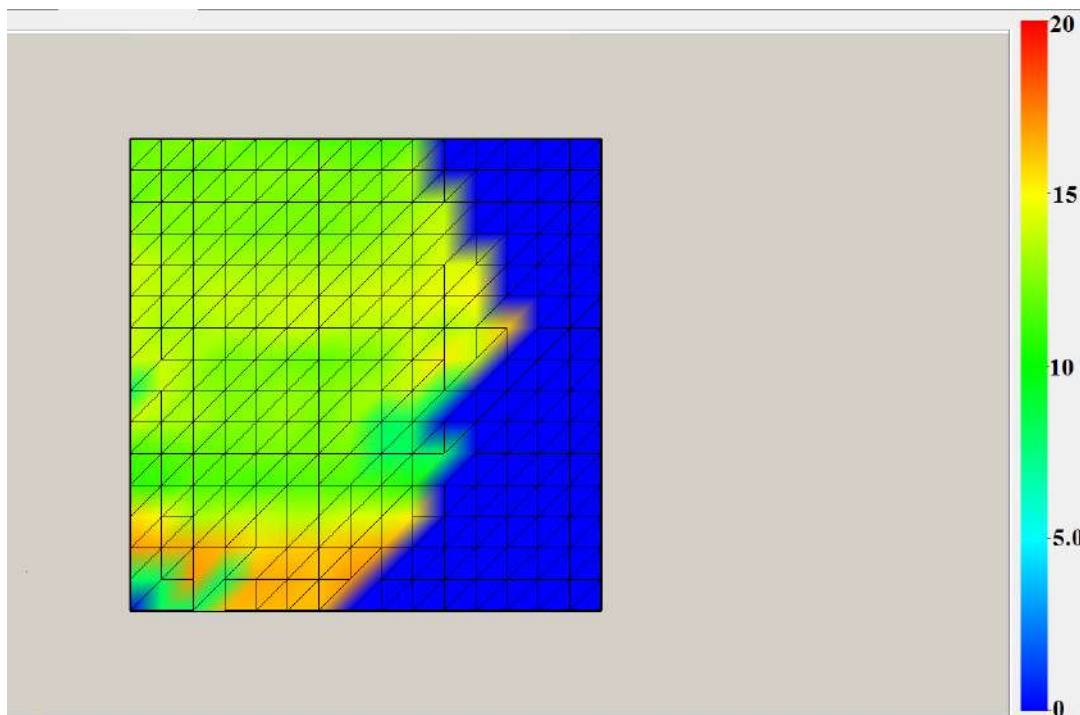


Рисунок 3.5. Профиль удлинения, измеренный на экспериментальной установке. Исследуемый объект – брусок из ПВХ с размерами $15 \times 15 \times 9$ см³. Грань диэлектрика расположена параллельно плоскости решетки.

Используемый объект (см. рис. 3.5) располагался таким образом, что его грань 15×15 см² была параллельна плоскости РСА. Измеряемые удлинения оптического пути варьировались от 9 до 16 см. Заранее измеренная диэлектрическая проницаемость ПВХ $\varepsilon = 3.8 \pm 0.2$, а наименьший размер $L = 9.0 \pm 0.1$ см, что соответствует минимальному значению удлинения оптического пути $\Delta l = 8.5$ см (формула 3.3). Минимально измеренное значение удлинения составило 9 см и в пределах погрешности физического размера и диэлектрической проницаемости совпадало с минимально возможным значением. Аналогичные закономерности наблюдались в экспериментах с диэлектриками из воска.

При расположении исследуемых диэлектриков в случайном расположении относительно приемо-передающих элементов, т.е. в таких положениях, когда ни одна из граней диэлектрика не была параллельной плоскости антенной решетки, на отдельных парах передатчик-приемник наблюдалось отсутствие сигнала (см. рис.3.6). Данное явление объясняется тем, что при определенных ракурсах амплитуда падающего излучения на границе раздела двух сред воздух-диэлектрик и диэлектрик-воздух претерпевает значительное ослабление, при котором ее величина сопоставима с величиной шума.

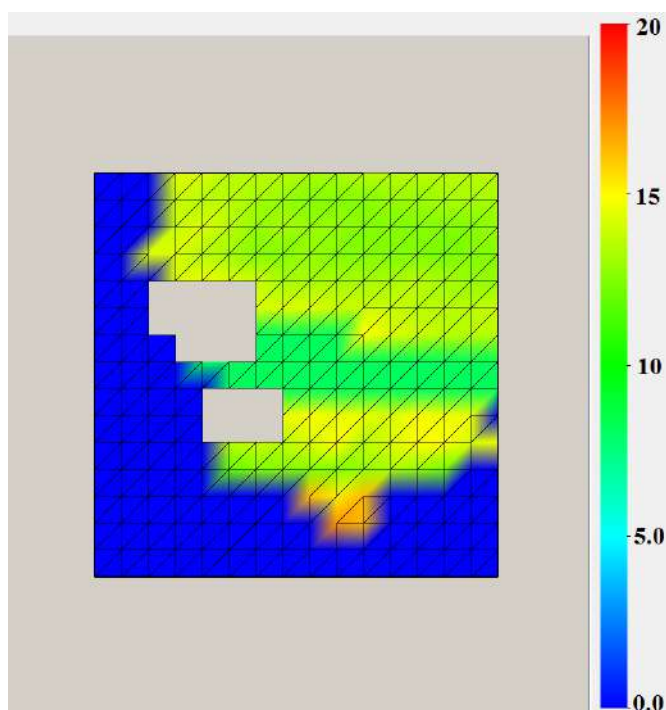


Рисунок 3.6. Профиль удлинения, измеренный на экспериментальной установке. Исследуемый объект – брусок из ПВХ с размерами $15 \times 15 \times 9 \text{ см}^3$. Грань диэлектрика ориентирована случайно к плоскости решетки.

На примере из рис. 3.6 на 17-и из 256-и парах приемник-передатчик удлинение оптического пути было вычислить невозможно из-за низкого уровня измеряемых комплексных амплитуд. При использовании объектов меньшего размера количество пар приемник-передатчик с низким уровнем

значений комплексных амплитуд не превышало 8-и. А при использовании объектов $8 \times 8 \times 5 \text{ см}^3$ таких пар не превышало 2-х для каждого используемого материала.

Таким образом, используемая экспериментальная установка (рис. 3.3) позволяет измерять профили удлинения стационарных диэлектрических объектов. Значение удлинения оптического пути, измеряемого на установке, соответствует теоретически вычисленному удлинению (формула 3.3) в пределах погрешности.

3.1.4. Методы расчета радиотомографических изображений диэлектрических объектов

В настоящее время методы построения томографических изображений широко развиты в рентгеновском диапазоне волн. В их основе положено измерение с последующей математической обработкой профилей поглощения рентгеновского излучения при различной ориентации облучаемого объекта исследования относительно приемо-передающих элементов. Измеряемые профили поглощения в рентгеновском диапазоне являются двумерными проекциями, на основе которых происходит построение трехмерного изображения – распределения плотности поглощения в пространстве, методом обратного преобразования Радона (двумерный случай формулы 1.18). Анализ полученного распределения плотности поглощения позволяет определить структуру и расположения объектов исследования.

В определенных задачах радиотомографическим изображением считают изображение, получаемое методом радиоголографии [45, 64-66]. В таких задачах происходит построение изображения объекта, обладающего рассеивающими свойствами в радиодиапазоне и расположенным за барьером, который в радиодиапазоне является прозрачным и непрозрачным в видимом диапазоне. Данные методы позволяют определять присутствие рассеивающего (металлического) предмета, размещенного за непрозрачной

для видимого излучения преградой, и его форму. Однако недостатками такого подхода являются невозможность изучения области пространства, находящейся за рассеивающим объектом, отсутствие или медленное всестороннее сканирование и влияние преграды на процесс распространения электромагнитного излучения в зависимости от взаимного расположения приемо-передающих элементов.

В настоящей работе метод построения трехмерного томографического изображения в радиодиапазоне (радиотомографического изображения) будет иметь общие черты с методами построения изображений в рентгеновском диапазоне, между которыми проводится аналогия:

- В рентгене измеряются профили поглощения для исследуемого объекта; в СВЧ диапазоне – профили удлинения
- В рентгене вычисляется распределение плотности поглощения в пространстве – величина, количественно характеризующая способность выбранной области пространства поглощать проходящего через нее излучения (рентгена); в СВЧ диапазоне распределение плотности удлинения оптического пути – величина, количественно характеризующая способность выбранной области пространства создавать удлинение оптического пути проходящего через нее пространства излучения (СВЧ излучение).

Распространение радиоволнового излучения в рассматриваемых диссертации задачах считается прямолинейным, вдоль линии, соединяющей положение приемника и передатчика. Справедливость данного утверждения обоснована на основе проведенных экспериментов. Для исследуемого диэлектрика с различных ракурсов измерялись профили удлинения, являющиеся по факту результатом геометрического проецирования на плоскость РСА (2, рис. 3.3). Измеренные профили удлинения преобразовывался в единую координатную систему. В единой координатной системе производился процесс построения трехмерного томографического (радиотомографического) изображения, представляющего собой

распределение плотности удлинения оптического пути в исследуемой области пространства.

3.1.5. Экспериментальная схема измерения радиотомографических изображений диэлектрических объектов

Объектами исследования служили те же (п.3.1.3) образцы из воска и ПВХ. Исследуемый объект располагался в исследуемой зоне – пространство между РСА и приемными антеннами. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.7.

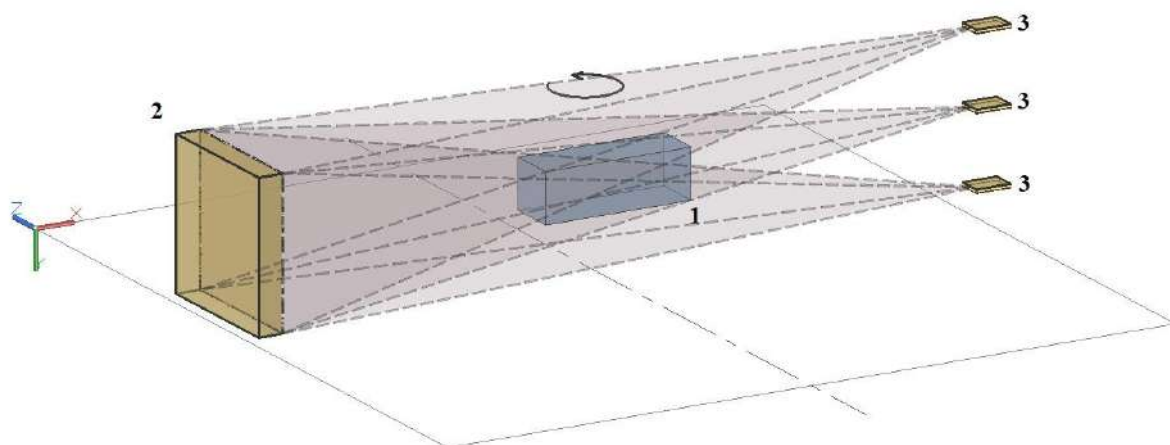


Рисунок 3.7. Схема экспериментальной установки в выбранной системе координат. 1 – исследуемый диэлектрический объект, 2 – РСА, 3 – 3 приемные антенны. Пунктиром отмечены области видимости для пар антенная решетка-приемник.

Исследуемый экспериментальный объект (рис. 3.7, 1) располагается между РСА (рис. 3.7, 2) и приемными антеннами (рис. 3.7, 3). В каждом положении диэлектрика измерялось три профиля удлинения. Для того чтобы измерять профили удлинения с разных ракурсов диэлектрический объект поворачивали вокруг своей оси с равномерным шагом по углу. В результате

эксперимента были измерены множества наборов профилей удлинения для каждого диэлектрика.

Для построения трехмерного томографического изображения измеренные профили удлинения необходимо свести в единую систему координат. После сведения в единую систему координат необходимо вычислить всевозможные пересечения между прямыми, содержащие пары передатчик-приемник, относящиеся к разным профилям удлинения. В расчете пересечений отсутствовала необходимость в вычислении точного пересечения прямых или точного расстояния между ними в пространстве. Вместо этого для расчета пересечений исследуемая область, в которой располагался исследуемый диэлектрический образец, равномерно по трем направлениям разбивалась на элементарные ячейки [9]. Элементарная ячейка – это прямоугольный параллелепипед с заранее известными размерами. Далее для каждой прямой, соединяющей пару передатчик-приемник, определялись ячейки, которые пересекает прямая. В пересекаемые элементарные ячейки записывалось суммарное значение удлинения оптического пути, измеряемое для каждой прямой, пересекающей данную элементарную ячейку. Затем значение удлинения оптического пути нормируется для каждой элементарной ячейки. Получаемые значения в каждой элементарной ячейке образуют дискретизированное распределение плотности удлинения оптического пути в исследуемой зоне.

3.1.6. Экспериментальные результаты с тестовыми диэлектрическими объектами

В экспериментах исследуемые образцы располагались в исследуемой зоне экспериментальной установки. Размер исследуемой зоны составлял $140 \times 50 \times 60$ см³, а координаты границ зоны в пространстве (в см) – от -70 до +70, от -25 до +25, от -40 до +20 по x -, y -, z - направления соответственно (см. рис. 3.7). Размер элементарной ячейки выбирался, исходя из разрешающей способности томографического метода, и составлял $1 \times 1 \times 2$ см³. В

томографических методах разрешающая способность определяется длиной волны используемого излучения [97]. Выбранный размер элементарной ячейки задавал максимальное расстояние между прямыми, пересекающими ее. В данной конфигурации максимальное расстояние было 2.45 см. Исследуемый диэлектрик располагался в центре исследуемой зоны, образуя симметрию вращения относительно оси, проходящей через его центр и параллельной оси y (см. рис. 3.7). Шаг вращения по углу составлял 5 градусов. Результат эксперимента на бруске из ПВХ представлен на рисунке 3.8.

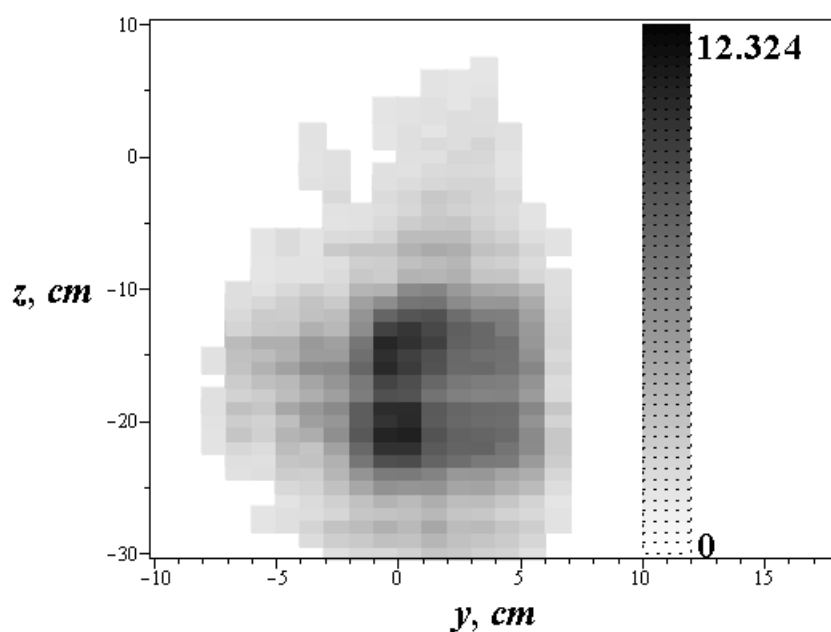


Рисунок 3.8. Радиотомографическое изображение диэлектрического образца из ПВХ $15 \times 15 \times 9$ см³ в сечении плоскостью $x = 3.5$. Шаг по углу 5 градусов.

В сечении радиотомографического изображения (рис. 3.8) ячейки, в которых значение плотности удлинения оптического пути не превышало 10% от максимального значения, не были отображены. Анализ получаемых радиотомографических изображений показал:

- наличие двух локальных максимумов в распределении плотности удлинения в пространстве, между положениями которых располагается фактический центр диэлектрика
- присутствие областей с большим значением плотности удлинения оптического, расположенные вокруг положений двух локальных максимумов
- монотонное убывание значения плотности удлинения оптического пути при удалении от фактического центра и локальных максимумов
- области вокруг локальных максимумов, в которых значения плотности удлинения оптического пути не меньше 90% от соответствующих максимумов, определяют фактическое расположение исследуемого диэлектрика.

Полученные результаты экспериментов показывают применимость использования методов рентгеновской томографии – прямолинейное распространение лучей, при построении радиотомографических изображений. На результирующее радиотомографическое изображение не оказывало влияние возможное наличие пар приемник-передатчик, на которых значения измеряемых комплексных амплитуд прошедшего излучения были сопоставимы с величиной шума.

В последующих экспериментах с диэлектриками выяснялся вопрос о сохранении или изменении качества получаемого радиотомографического изображения. С этой целью результирующее изображение строилось по меньшему набору профилей удлинения. Для этого шаг по углу при последовательных измерениях профилей удлинения уменьшался. В экспериментах выбирались шаги по углу: 10, 20, 40, 60, 90 и 180 градусов. Результат полученного изображения на рис. 3.9, *a – e*.

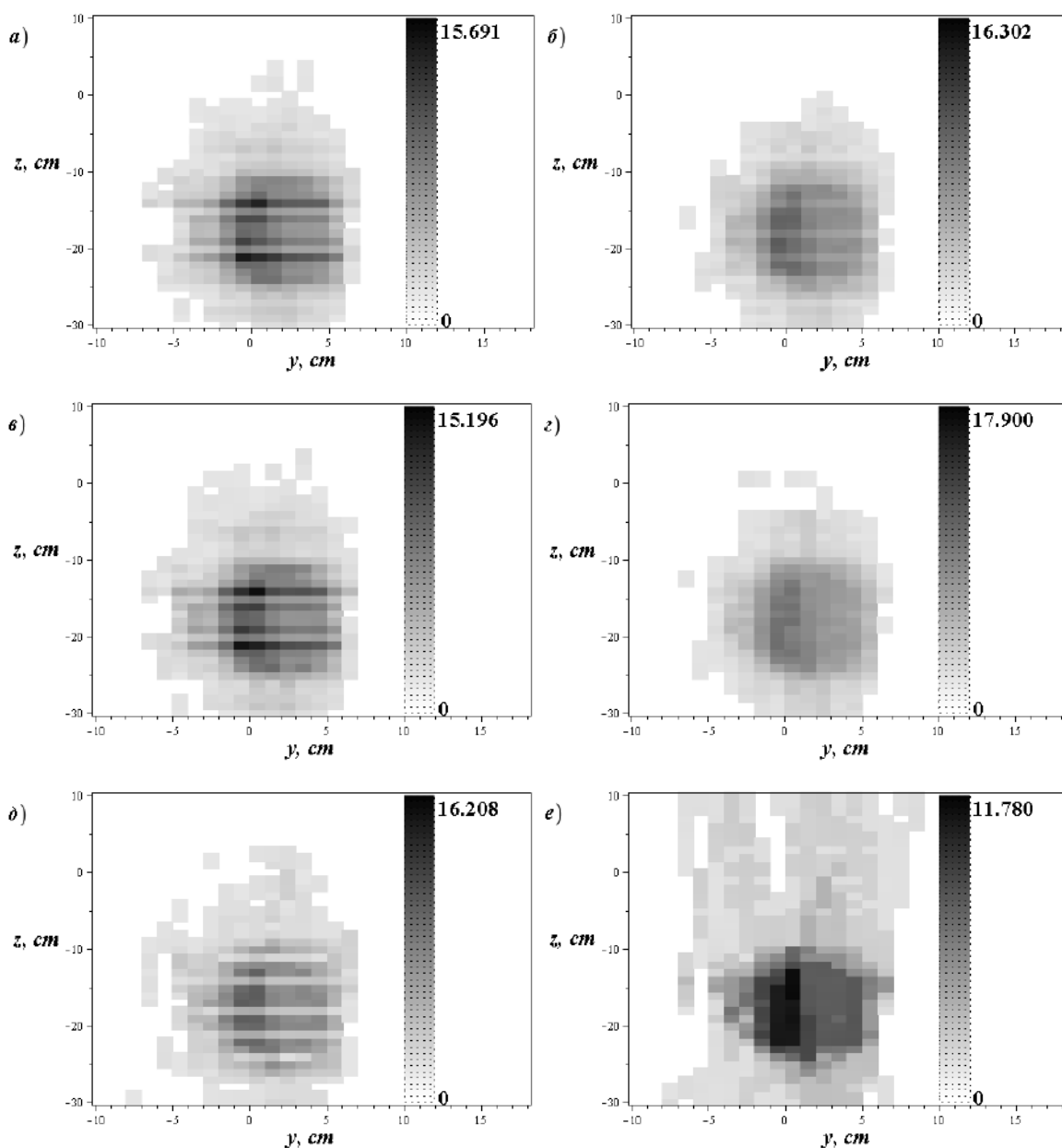


Рисунок 3.9. Радиотомографические изображения диэлектрического образца из ПВХ $15 \times 15 \times 9$ см³ в сечении плоскостью $x = 3.5$, построенные при различных шагах по углу в последовательных измерениях профилей удлинения; *а* – шаг по углу 10 градусов, *б* – шаг по углу 20 градусов, *в* – шаг по углу 40 градусов, *г* – шаг по углу 60 градусов, *д* – шаг по углу 90 градусов, *е* – шаг по углу 180 градусов.

В полученных радиотомографических изображениях (рис. 3.9, *а* – *е*) ячейки, в которых значение плотности удлинения оптического пути не превышало 10% от максимального значения, также не были отображены.

Анализ полученных радиотомографических изображений показал, что при уменьшении числа профилей удлинения (ракурсов) медленно размывается, но при этом пространственное расположение диэлектрика и его размеры в сечении остаются неизменными.

Таким образом, проведенные эксперименты показали принципиальную возможность применения рентгеновских методов при построении радиотомографических изображений диэлектрических объектов.

3.1.7. Определение основных параметров диэлектриков по вычисленным радиотомографическим изображениям

По полученным радиотомографическим изображениям необходимо было определить основные физические параметры диэлектриков: координаты центра, размеры, объем и диэлектрическую проницаемость. С этой целью радиотомографические изображения обрабатывались алгоритмом трехмерной сегментации. Конечным результатом применяемого алгоритма было выявление элементарных ячеек, на которые разделена исследуемая зона, имеющих близкие значения плотности удлинения оптического пути. Элементарные ячейки, имеющие близкие значения плотности удлинения оптического пути образовывали связанные области, положения которых соответствует расположению исследуемого диэлектрика в исследуемой зоне. После выделения связанной области определялось положение центра исследуемого диэлектрического объекта в исследуемой зоне, размер в плоскости облучения, объем и среднюю плотность удлинения оптического пути:

$$R_c = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} r_i \quad (3.4)$$

$$L_j = 6\sigma_j \quad (3.5)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (r_{ij} - R_c)^2} \quad (3.6)$$

$$V = \sum_{i=0}^{N-1} V_i \quad (3.7)$$

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_i \quad (3.8)$$

где R_c – положение центра, r_i – положение i -й элементарной ячейки, N – количество элементарных ячеек, образующих связанную область, L_j – размер исследуемого диэлектрика по j -й координате, j – x или z координата, r_{ij} – положение i -й элементарной ячейки по j -й координате, V – измеряемый объем исследуемого диэлектрика, V_i – объем элементарной ячейки, ρ – средняя плотность удлинения оптического пути, ρ_i – плотность удлинения в i -й элементарной ячейке. Плоскостью облучения в проведенных экспериментах являлась плоскость xz (см. рис. 3.7).

По измеренным размерам в плоскости облучения и средней плотности удлинения оптического пути вычислялась диэлектрическая проницаемость исследуемого диэлектрика:

$$\varepsilon = \left(\left(\frac{\rho}{L_x} + \frac{\rho}{L_z} \right) * 0.5 + 1 \right)^2 \quad (3.9)$$

где ρ – средняя плотность удлинения оптического пути, L_x и L_z – размеры исследуемого диэлектрика по x и z координатам соответственно, ε – диэлектрическая проницаемость.

Проведенные эксперименты с тестовыми диэлектриками показали пригодность в использовании данных методов построения, обработки и анализа радиотомографических изображений. Результаты измерений диэлектрической проницаемости на тестовых диэлектриках представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Список диэлектриков, используемых в построениях радиотомографических изображений, их размеры и измеренные диэлектрические проницаемости.

Диэлектрик	Размеры, см	Диэлектрическая проницаемость
ПВХ	15x15x9	3,8±0.5
ПВХ	15x8x7	3.9±0.5
ПВХ	15x5x5	4.1±0.5
Воск	15x15x9	2.6±0.5
Воск	15x8x7	2.8±0.5
Воск	15x7x5	2.4±0.5

Измерения для тестовых диэлектриков проводились при 5-и градусном шаге по углу вращения в плоскости облучения – xz . Измеренные диэлектрические проницаемости для образцов из воска и ПВХ размеров 15x15x9 и 15x8x7 совпали с заранее измеренными значениями в пределах погрешности (см. п. 1.4.3). Для двух других образцов значения диэлектрической проницаемости отличались значительно от заранее измеренных значений. Данное расхождение объясняется тем, что размеры в одном из направлений у используемых диэлектриков соизмеримы с предельным разрешением томографического метода. При увеличении шага по углу в измерениях профилей удлинения вычисляемое положение центра диэлектрика оставалось без существенных изменений, а размеры в плоскости облучения претерпевали изменения, вызванные размыванием связанных областей (см. рис. 3.9, $a - e$). Изменения размеров привело к изменению вычисляемой диэлектрической проницаемости образцов. Вычисляемые значения диэлектрической проницаемости при увеличении шага по углу в измерениях профилей удлинения, тем не менее, в пределах погрешности с измеренными заранее значениями для образцов с размерами 15x15x9 см³ (см.

п. 1.4.3). Для образцов размерами $15 \times 8 \times 7 \text{ см}^3$, $15 \times 7 \times 5 \text{ см}^3$ и $15 \times 5 \times 5 \text{ см}^3$ величина диэлектрической проницаемости выходила за пределы погрешности измерения.

Таким образом, проведенные эксперименты показали принципиальную возможность вычисления диэлектрической проницаемости диэлектрических образцов, размещенных в исследуемой области пространства, для диэлектрических образцов различных размеров и материалов, используя рентгеновские методы измерения, обработки и анализа томографических изображений. При заглаблении условий эксперимента (уменьшение числа измеряемых профилей удлинения для построения томографического изображения) значения измеряемых диэлектрических проницаемостей становятся более грубыми и уходят за пределы погрешностей для образцов меньших размеров. Тем не менее, данный метод позволил однозначно определять присутствие диэлектрического объекта в исследуемой зоне, поскольку положение для каждого образца определялось без существенных изменений. Рентгеновские методы измерения, обработки и анализа томографических изображений подразумевают:

- прямолинейное распространение излучения от передатчика к приемнику
- измерение профилей удлинения (в рентгене профилей поглощения)
- построение томограмм методом обратных радоновских проекций
- применение к полученным томограммам алгоритма сегментации трехмерных областей.

3.2. Радиотомографический метод построения трехмерных изображений движущихся диэлектрических объектов

Построение радиотомографических изображений диэлектрических объектов рентгеновскими методами позволило вычислять диэлектрическую

проницаемость исследуемых объектов. В данном разделе рассматривается более актуальная физическая задача – построение радиотомографического изображения движущегося диэлектрика. Для реализации поставленной задачи необходимо обеспечить расположение приемо-передающих элементов таким образом, чтобы оптимальным образом производить измерения прошедшего излучения и обеспечить быстрдействие производимых расчетов.

3.2.1. Экспериментальная установка для построения радиотомографического изображения движущегося диэлектрического объекта

При работе с движущимися диэлектриками измерения профилей удлинения при их равномерных поворотах вокруг своей оси невозможно. Для построения радиотомографических изображений движущихся диэлектрических объектов необходимо было обеспечить оптимальное расположение приемо-передающих элементов. Оптимальное расположение должно обеспечивать измерения прошедшего через объект излучения таким образом, чтобы по вычисляемому томографическому изображению стало возможным определять диэлектрическую проницаемость исследуемого диэлектрика и положение его центра. Для отработки оптимального расположения приемо-передающих элементов, позволяющих получать радиотомографическое изображение с минимальным влиянием размытия связанных областей, была собрана экспериментальная установка (рис. 3.10).

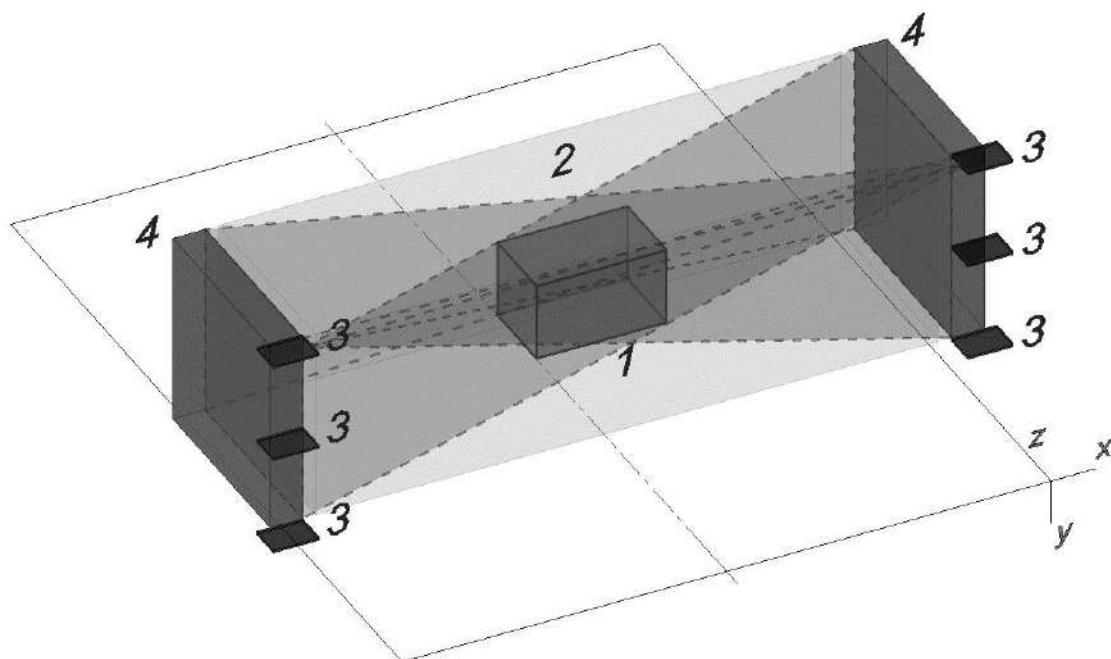


Рисунок 3.10. Экспериментальная установка для построения движущихся диэлектрических объектов в выбранной системе координат. 1 – исследуемый диэлектрик, 2 – исследуемая зона, 3 – 6 приемных антенн, 4 – 2 РСА. Пунктиром отмечены 2 пары приемная антенна, РСА, образующие профиль удлинения.

Экспериментальная установка представляла собой портал с зеркально симметричным расположением приемо-передающих элементов относительно плоскости, проходящей через центр и направленной параллельно плоскости yz . Основными компонентами экспериментальной установки являются 2 РСА (рис. 3.10, 4), состоящих из 256 передающих элементов и работающих на 40 эквидистантных частотах, лежащих в микроволновом диапазоне 10 – 18 ГГц и 6 приемных антенн (рис. 3.10, 3), выполненных в виде антенн Вивальди. Движение диэлектрика осуществлялось через установку, пересекая исследуемую зону, параллельно или под острым углом с осью z .

3.2.2. Построение радиотомографического изображения движущегося диэлектрического объекта

Актуальной задачей в области безопасности является задача построения радиотомографического изображения движущегося диэлектрического объекта. Решение данной задачи производилось на экспериментальной установке с порталным проходом (рис. 3.10). Движение диэлектрического объекта осуществлялось вдоль оси z или под острым с ней углом (рис. 3.11).

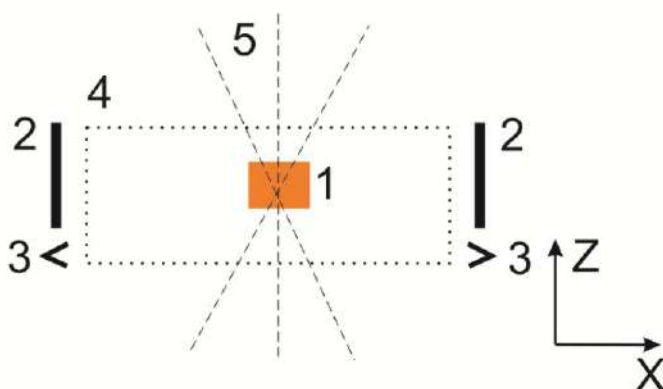


Рисунок 3.11. Схема движения исследуемого диэлектрика через установку в выбранной системе координат. 1 – исследуемый диэлектрик, 2 – 2 РСА, 3 – 6 приемных антенн, 4 – исследуемая зона, 5 – направления движения.

Установка позволяла производить полный цикл измерения комплексных амплитуд (излучения и приема) прошедшего через объект поля на 40 частотах за 3 мс. За это время при обычной скорости движения в 5–6 км/ч человек смещается менее чем на 0.4 см. Максимальное смещение при такой скорости было меньше чем томографическое разрешение применяемого метода, что позволяло вычислять радиотомографическое изображение по методу, применяемому для стационарных объектов. Размеры исследуемой зоны (рис.3.11, 4) $140 \times 50 \times 60 \text{ см}^3$ по x , y , z осям соответственно. Начало координат расположено посередине между РСА, а координаты границ

исследуемой зоны в пространстве составляли (в см) – от -70 до $+70$, от -25 до $+25$, от -40 до $+20$ по x -, y -, z - направлениям соответственно. Исследуемыми диэлектрическими объектами служили образцы из воска и ПВХ с размерами $15 \times 15 \times 9$ см³. Объекты меньшего размера не использовались в экспериментах из-за меньшей точности в определении параметров по рассчитанным томограммам в стационарных случаях.

На рисунке 3.12 представлен скриншот рабочей программы.

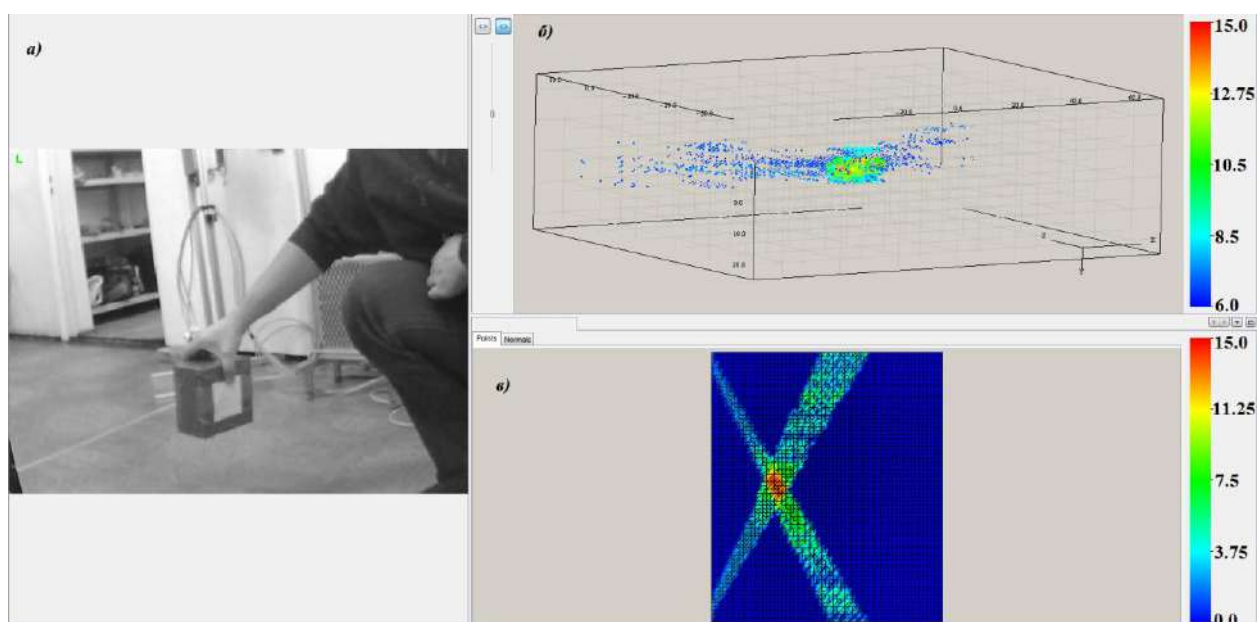


Рисунок 3.12. Скриншот рабочей программы, управляющей экспериментальной установкой; *а* – фотография с объектами, находящимися в исследуемой зоне, *б* – трехмерная томограмма, *в* – сечение томограммы плоскостью $y = -0.5$.

Отдельные шумы на томограмме (рис.3.12, *а*, *б*) являлись следствием не многопозиционного измерения профилей удлинения. Получаемые на изображении шумы отфильтровывались алгоритмом трехмерной сегментации.

Проведенные эксперименты с диэлектриками показали, что при расположении объектов в области, находящейся внутри исследуемой зоны, с

координатами границ (в см) от -30 до $+30$, от -10 до $+10$, от -25 до 0 , по x , y , z направлениям соответственно, формы объектов соответствовали истинным, а их размеры совпадали с заранее полученными (в пределах погрешности). Однако при расположении вне указанной области, например в периферийной части исследуемой зоны, форма объектов переставала соответствовать истинной. Позиции образцов (точнее, геометрические центры областей, выделяемых алгоритмом трехмерной сегментации) совпадали с истинными. При определении значений диэлектрической проницаемости данные воспроизводились, но возрастала ошибка измерения. Искажение на томограмме формы исследуемых объектов, помещенных в периферийную часть исследуемой зоны, может быть вызвано двумя основными причинами. Во-первых, в этом случае имеется малое число (одно-два) пересечений линий, содержащих точки с координатами пар приемник-передатчик и пересекающих элементарную ячейку. Во-вторых, это наличие большей части (более 60 %) от общего числа элементарных ячеек, которых вообще не пересекают какие-либо линии, соответствующие паре приемник-передатчик.

Таким образом, проведенные эксперименты показали

- возможность построения радиотомографического изображения движущегося диэлектрика в исследуемой зоне экспериментальной установке (рис. 3.10)
- существование области в пределах исследуемой зоны, в которой результат вычисления основных физических параметров диэлектрика был в соответствии с заранее измеренными параметрами в пределах погрешности
- существование области (периферийной области), в которой основные физические параметры диэлектрика не были в соответствии с заранее измеренными параметрами, что приводило к большей ошибке в определении диэлектрической проницаемости.

3.3. Физический метод обнаружения диэлектрического объекта, скрытно провозимого в багаже на основе анализ его радиотомографического изображения

Метод обратных радоновских проекций позволяет вычислять радиотомографическое изображение диэлектрического объекта, находящегося в исследуемой зоне пространства. По вычисляемому изображению алгоритмом трехмерной сегментации определялись основные физические параметры диэлектрика: положение центра, размеры, объем, диэлектрическая проницаемость. В данном разделе будет решаться комплексная задача по обнаружению диэлектрического объекта, скрытно провозимого в багаже. С физической точки зрения поставленная задача заключается в вычислении радиотомографического изображения диэлектрика, находящегося внутри оболочки, которая является прозрачной для микроволнового излучения и не прозрачна для видимого излучения. Комплексное решение данной задачи будет разделено на несколько основных этапов.

3.3.1. Постановка задачи

Задача, которую необходимо решить, заключается в построении радиотомографического изображения движущейся системы – диэлектрик, оболочка. Диэлектрик расположен внутри тонкой оболочки, являющейся прозрачной для микроволнового излучения и не прозрачной для видимого излучения. Толщина оболочки должна быть меньше длины волны излучения. Оболочка диэлектрика должна быть по физическим размерам быть меньше исследуемой зоны экспериментальной установки (рис. 3. 13, 4).

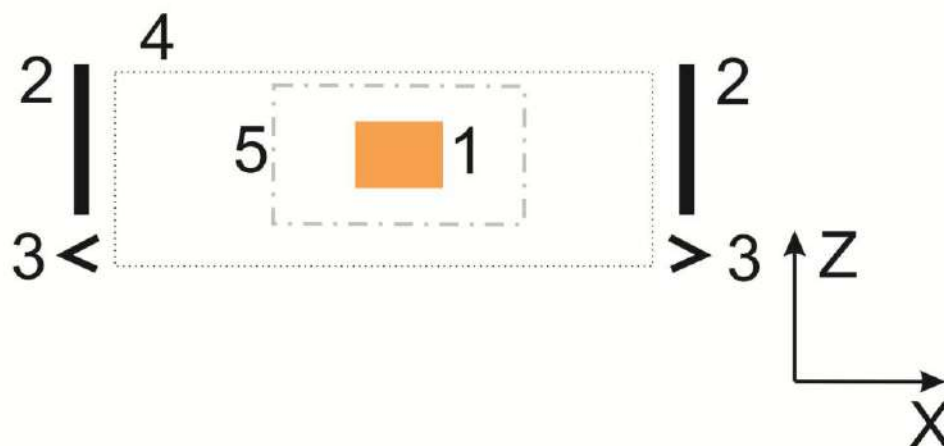


Рисунок 3.13. Схема движения исследуемого диэлектрика в оболочке через установку в выбранной системе координат. 1 – исследуемый диэлектрик, 2 – 2 РСА, 3 – 6 приемных антенн, 4 – исследуемая зона, 5 – оболочка.

Расчет радиотомографического изображения осуществлялся по измеренным комплексным амплитудам прошедшего через исследуемый диэлектрик в оболочке излучения. Оболочка являлась прозрачным материалом для радиоволнового излучения и не прозрачным для видимого диапазона.

3.3.2. Расчет оптимального расположения приемо-передающих элементов для вычисления радиотомографического изображения движущегося диэлектрика в оболочке

Проведенные ранее расчеты показали, что на экспериментальной установке (рис. 3.10) определение основных физических параметров движущегося диэлектрика по вычисленному радиотомографическому изображению на основе анализа прошедшего через него СВЧ излучения было возможно. Однако не во всем объеме исследуемой зоны (рис. 3.10, 2) экспериментальной установке основные определяемые физические

параметры имели приемлемую точность. Существовала область, в которой физические параметры определялись неточно. Для того чтобы минимизировать области исследуемой зоны, в которых физические параметры определялись неточно, было проведено моделирование, оптимизирующее геометрическое расположение приемо-передающих элементов.

За основу в моделировании геометрического расположения использовалась система рис. 3.10. Положение РСА было фиксированным и определяло размеры в поперечном направлении (рис.3.10, вдоль оси x) и по высоте (рис.3.10, вдоль оси y) исследуемой зоны, которые составляли 140 и 50 см соответственно. Варьировались положения приемных антенн при постоянном значении их координаты по оси x . В каждом расположении приемных антенн вычислялись геометрические свойства системы. К геометрическим свойствам системы относятся:

- количество прямых, содержащих фазовые центры приемной и передающей антенн, которые пересекают элементарную ячейку, на которые разбита исследуемая зона
- углы между прямыми, пересекающими данную элементарную ячейку, и их количественное соотношение для всех ячеек исследуемой зоны
- характерные размеры контролируемой области – области, находящейся внутри исследуемой зоны, внутри которой определение основных физических параметров диэлектрика происходит с приемлемой точностью
- характерный объем контролируемой области.

Для определения количества пересечений исследуемая зона, являющаяся прямоугольным параллелепипедом, была разделена равномерно на элементарные ячейки с размером $2 \times 1 \times 1$ см³. Размер исследуемой зоны составлял $140 \times 50 \times 60$ см³ по x , y , z направлениям соответственно. В

зависимости от положения элементарной ячейки относительно приемо-передающих элементов, количество пересечений было от 0 до 6.

После расчета количества пересечений в каждой элементарной ячейке был проведен расчет всевозможных углов, которые эти прямые образуют попарно между собой. Для их анализа были построены гистограммы углов для различных случаев:

- гистограммы углов для ячеек с 2-я пересечениями.
- гистограммы углов для ячеек с 3-я пересечениями.
- гистограммы углов для ячеек с 4-я пересечениями.
- гистограммы углов для ячеек с 5-ю пересечениями.
- гистограммы углов для ячеек с 6-ю пересечениями.
- гистограммы углов для всех ячеек вместе.

Характерные размеры контролируемой области определялись расстоянием по 3-м соответствующим направлениям между наибольшей и наименьшей координатами элементарных ячеек, в которых происходило 4 и более пересечений. А положение геометрического центра контролируемой области определялось полу суммой соответствующих координат крайних ячеек.

Характерный объем определялся суммарным объемом элементарных ячеек, в которых происходило 4 и более пересечений.

За основу в модельных расчетах использовалась установка (рис. 3.10), для которой были промоделированы ее геометрические свойства. Приемные антенны располагались по тройкам в линию параллельно оси y , а расстояние до их фазового центра составляло 25 см от соответствующих сторон антенных решеток.

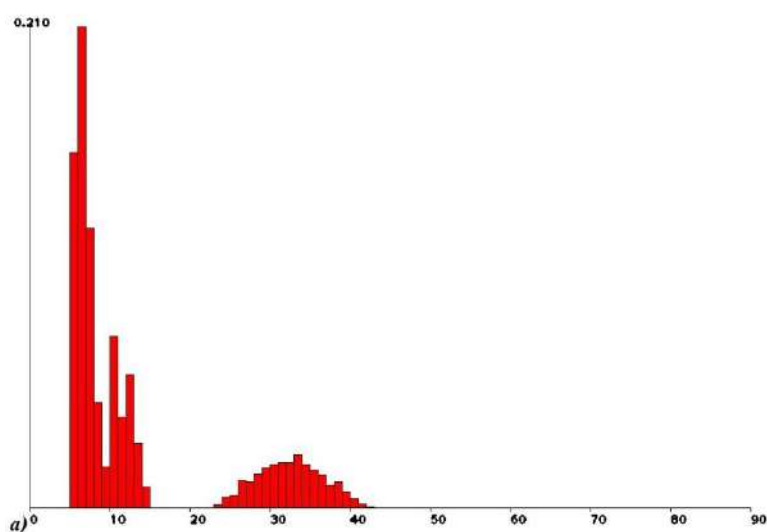
Проведенное моделирование показало:

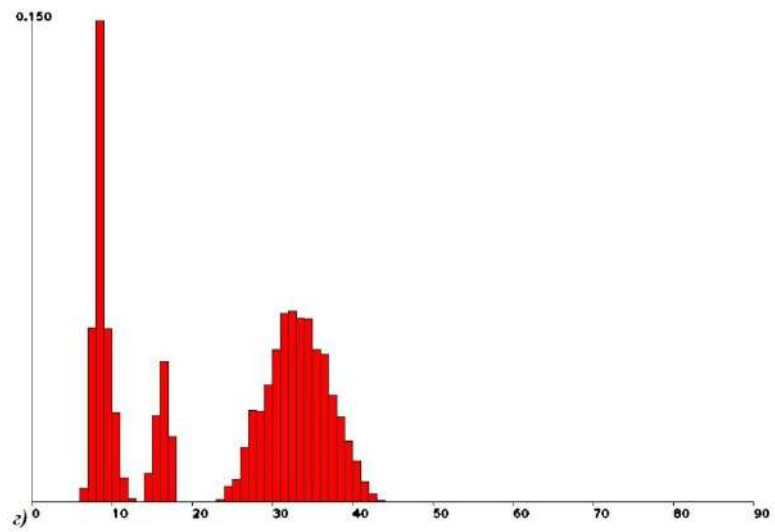
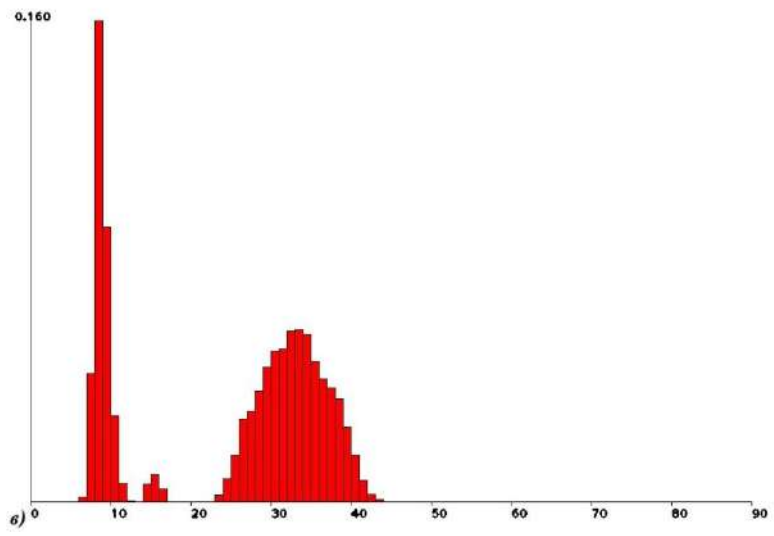
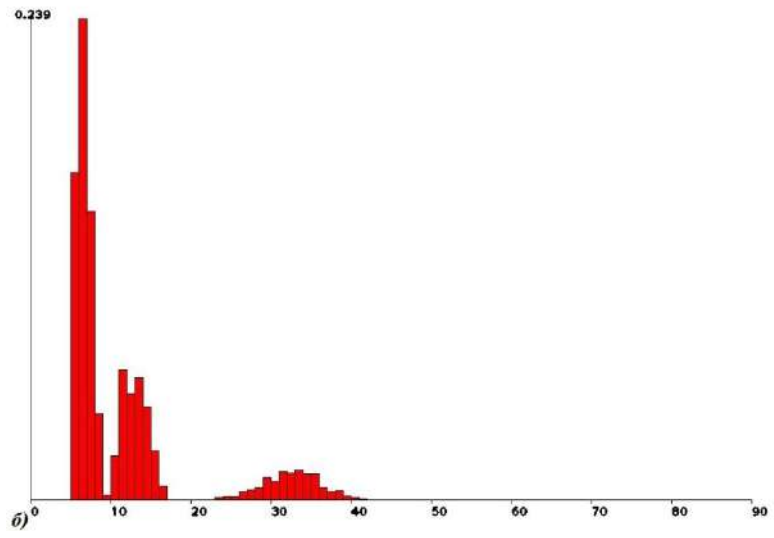
- количество элементарных ячеек, имеющих 2, 3, 4, 5, 6 пересечений, равно соответственно 8690, 3156, 1748, 406, 27.

- были построены гистограммы углов для всех случаев (рис.3.14) и определены максимальные углы между пересекающимися прямыми (таблица 3.2)
- характерные размеры контролируемой области составили 46, 8, 13 см вдоль осей x , y , z соответственно; координаты начала и конца от -23.0 до 23.0, от -4.8 до 3.2, от -30.8 до 17.8 см по x , y , z направлениям соответственно
- характерный объем 4.3 л.

Таблица 3.2. Максимальные значения углов между пересекающимися прямыми в элементарной ячейке.

Количество пересечений в ячейке	Угол (градусы)
2	42.3
3	43
4	44
5	43
6	44





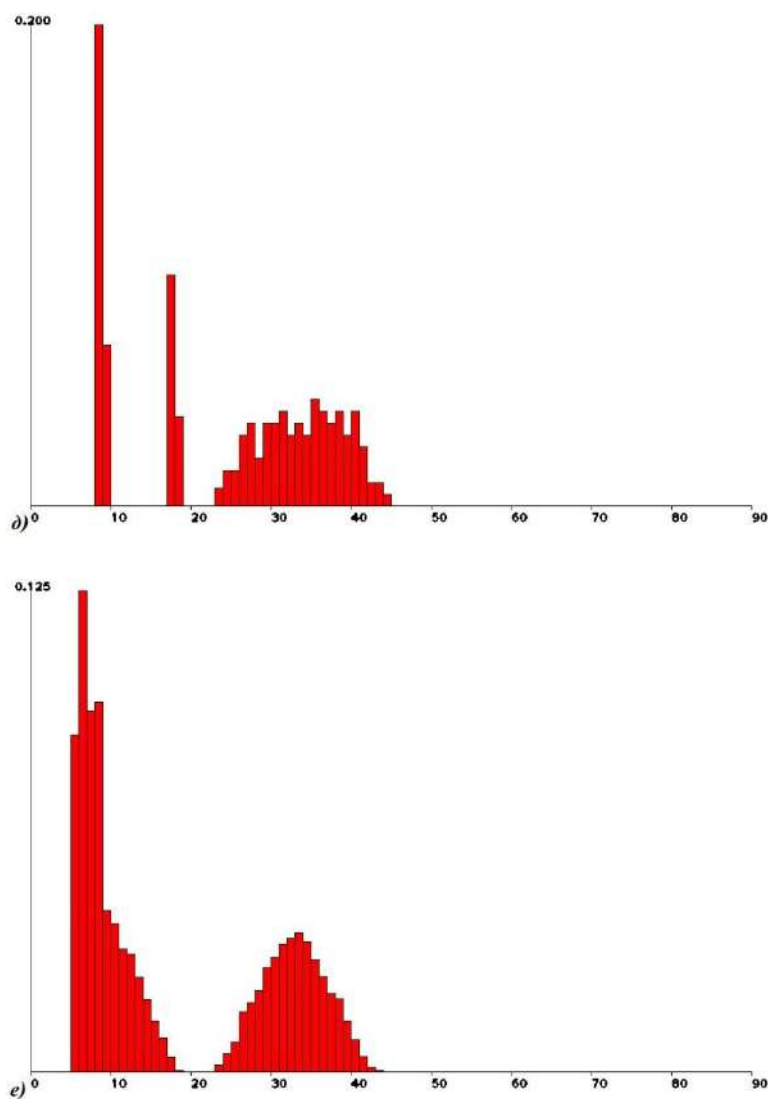


Рисунок 3.14. Гистограммы углов. *а, б, в, г, д, е* – 2 пересечения, 3 пересечения, 4 пересечения, 5 пересечений, 6 пересечений и все вместе пересечения соответственно.

Проведенные эксперименты с тестовыми диэлектриками в п.3.2 показали, что для данной конфигурации размеры контролируемой области составляли 60, 20, 25 см по *x, y, z* направлениям соответственно. Размеры, определенные экспериментально, больше размеров, определяемых моделированием. Получаемое различие объясняется тем, что при моделировании учет ведется только среди ячеек, в которых происходило от 4 до 6 пересечений. На практике не всегда в связанную группу в алгоритме сегментации попадают ячейки только с 4 и более пересечениями.

Экспериментально показано, что граничные ячейки связанных областей могут содержать 3 пересечения. Ячейки с тремя пересечениями на томографическом изображении расположены преимущественно вокруг ячеек, содержащих большее число пересечений, и создают слой толщиной приблизительно в 4-5 ячейки (5-7 см). Таким образом, анализируя данные получаемые при моделировании и в эксперименте, была выявлена количественная закономерность между размером контролируемой области и характерным размером контролируемой области.

В модельных экспериментах при удалении приемных антенн от положения решеток приводило к следующему:

- уменьшению характерных размеров контролируемой области, что уменьшало размеры контролируемой области
- увеличению максимальных углов в пересечениях
- уменьшалось количество ячеек, имеющих 2 и более пересечений, а начиная с определенных положений, пропадали ячейки, содержащие 5 и 6 пересечений
- появление асимметрии и провалов в характерной контролируемой области при расположении приемных антенн не на одной прямой параллельной оси u .

А при приближении, наоборот:

- увеличению характерных размеров контролируемой области, что увеличивало размеры контролируемой области
- уменьшению максимальных углов в пересечениях
- увеличению количество ячеек, имеющих 2 и более пересечений

Из проведенных экспериментов следует, что для увеличения размеров контролируемой области необходимо размещать приемные антенны ближе к решеткам. Одновременно с этим максимальные углы в пересечениях будут уменьшены. Уменьшение углов в пересечениях приводило к росту ошибки при вычислении диэлектрической проницаемости тестовых объектов по

радиотомографическому изображению. Из этого следовало, что необходимо было определять оптимальное расположение антенн, при котором вычисление диэлектрической проницаемости было с достаточной точностью и размеры контролируемой области были наибольшими. Расчеты и эксперимент показали, что оптимальным расположением приемных антенн, удовлетворяющим вышеуказанным требованиям, являлась линия параллельная оси u на расстоянии 15 см от соответствующей стороне краев антенных решеток.

Таким образом, проведенное моделирование и эксперименты позволили определить оптимальное расположение приемо-передающих элементов, позволяющее вычислять с необходимой точностью диэлектрическую проницаемость и наибольшие размер контролируемой области.

3.3.3. Вычисление радиотомографического изображения движущегося диэлектрика в оболочке

Измерения прошедшего через исследуемый объект – диэлектрик в оболочке излучения проводились на экспериментальной установке (рис. 3.13), в которой конфигурация приемо-передающих элементов была определена в п. 3.3.2.

В проведенных экспериментах оболочкой диэлектрика (рис. 3.13, 5) служил чемодан $70 \times 40 \times 30$ см³, стенки которого были сделаны из пластика толщиной 3-4 мм, являющимися прозрачными материалами для радиоволнового излучения. Исследуемыми диэлектрическими объектами служили образцы из воска и ПВХ с размерами $15 \times 15 \times 9$ см³. Диэлектрик был расположен посередине внутри оболочки и был расположен на прозрачной для СВЧ диапазона подложке (рис. 3.15). Подложка использовалась для попадания в контролируемую область по высоте.



Рисунок 3.15. Расположения исследуемого диэлектрика внутри оболочки. 1 – исследуемый диэлектрик (ПВХ), 2 – оболочка (чемодан), 3 – прозрачная для СВЧ диапазона подложка.

В процессе эксперимента положение исследуемого диэлектрика было зафиксировано относительно оболочки и, соответственно, не изменялось в процессе движения системы оболочка-диэлектрик внутри исследуемой зоны. Перемещение системы оболочка-диэлектрик, осуществляемое внутри исследуемой зоны, производилось в плоскости xz (рис. 3.16).

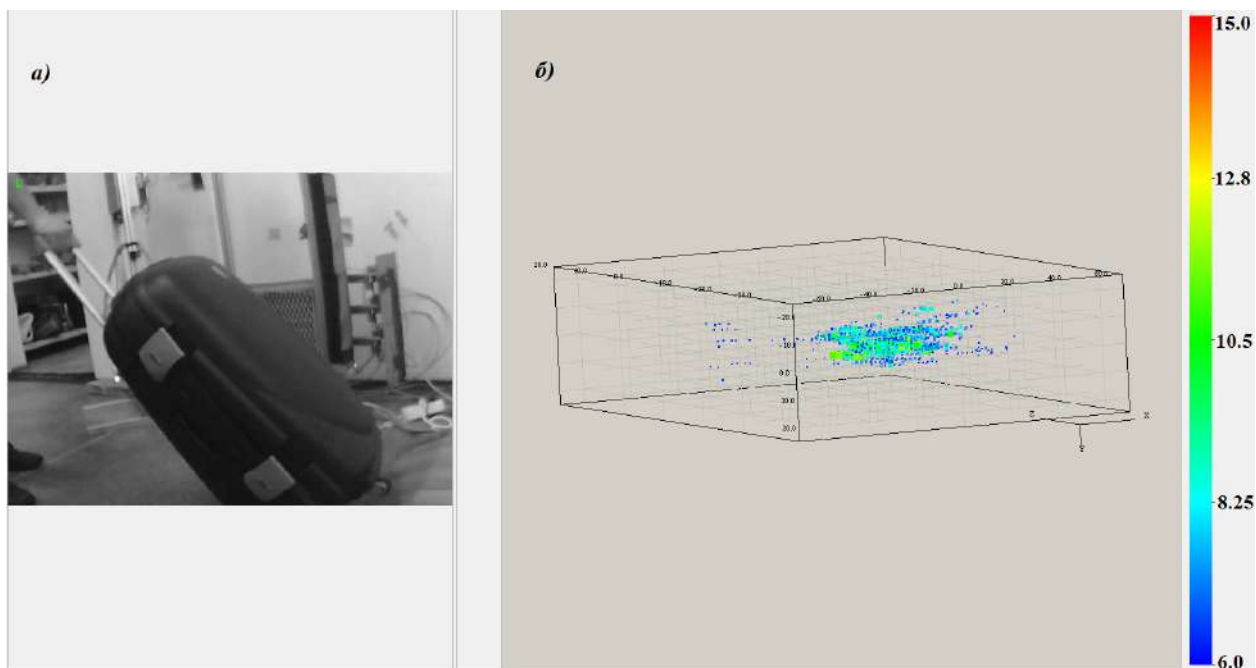


Рисунок 3.16. *а* – фотография системы оболочка-диэлектрик внутри исследуемой зоны, *б* – радиотомографическое изображение системы оболочка-диэлектрик в выбранной системе координат.

По вычисляемому радиотомографическому изображению (рис. 3.16 ,*б*) были определены основные физические параметры исследуемого диэлектрика, находящегося в оболочке. Размеры контролируемой области, при которых основные физические параметры определялись с достаточной точностью, в плоскости xz составляли $100 \times 30 \text{ см}^2$ по x и z координатам соответственно при фиксировании y -координаты. Влияние оболочки, в которой находился диэлектрик, на определение основных физических параметров не оказывало значительного влияния.

Таким образом, физическая задача об обнаружении скрытого диэлектрического объекта провозимого в багаже и определения его физических параметров на основе анализа его радиотомографического изображения решается при его движении в исследуемой области. Для корректного определения его параметров необходимо, чтобы его фактическое пространственное расположение было внутри контролируемой области.

3.4 Выводы к главе 3.

В главе 3 впервые представлен оригинальный метод построения и обработки радиотомографических изображений в поддиапазоне СВЧ 10-18 ГГц.

Собрана экспериментальная установка и оптимизировано расположение приемо-передающих элементов для задачи радиотомографии.

Впервые представлен метод на основе анализа радиотомографического изображения вычисления ключевых параметров исследуемого диэлектрика – диэлектрическая проницаемость, размеры, положение в пространстве.

Быстродействие использованных алгоритмов позволило производить процесс построения, обработки и анализа радиотомографического изображения в режиме реального времени. Использование режима реального времени позволило работать с динамическими объектами.

Впервые в работе был предложен метод обнаружения скрытых диэлектрических предметов, провозимых в багаже, основанный на анализе радиотомографического изображения.

Глава 4. Анализ экспериментальных данных.

4.1. Анализ экспериментальных данных полученных радиоголографическим методом.

В проведенных экспериментах по обнаружению диэлектрика, расположенного скрытно на теле человека, и вычислению его диэлектрической проницаемости использовалась группа добровольцев из 5-ти человек с различными индексами массы тела (25.1, 27.2, 24.3, 29.6, 18.3) и разными телосложениями. Экспериментальными образцами служили бруски из воска и ПВХ (см. таблицу 2.1). Используемые диэлектрики располагались под одеждой.

Таблица 4.1. Список с диэлектрическими материалами и их размерами, использованными в экспериментах

Диэлектрик	Размеры, см
ПВХ	15x15x9
ПВХ	15x8x7
ПВХ	15x5x5
Воск	15x15x9
Воск	15x8x7
Воск	15x7x5

Измерение диэлектрической проницаемости происходило в каждом цикле измерений, во время которых человек находился в исследуемой области (4, рис. 2.11). После выхода из исследуемой зоны результирующее значение диэлектрической проницаемости вычислялось как среднее значение на каждом цикле измерения и обработки. Время измерения и обработки данных для каждого цикла настраивалось программным образом и составляло 40 мс. Это значит, что за 1 секунду производилось 25 циклов. Среднее время нахождения человека в исследуемой области составляло 4 секунды при естественной скорости передвижения, что составляло около 100

циклов. Однако циклы, в которых ориентация диэлектрика относительно приемо-передающих элементов не позволяла восстановить переднюю поверхность, не учитывались в расчете результирующей величины диэлектрической проницаемости. Расположение приемо-передающих элементов экспериментальной установки (рис. 2.10, рис. 2.11) позволяло за полный проход через исследуемую область восстанавливать переднюю поверхность не менее чем в 15% циклах. Наименьшее количество циклов соответствовало диэлектрическому образцу из воска $15 \times 7 \times 5 \text{ см}^3$ и ПВХ $15 \times 5 \times 5 \text{ см}^3$. Это связано с тем, что их размеры близки к предельно допустимым размерам, при которых возможно их принципиальное обнаружение. Предельно допустимое обнаружение определяется предельным разрешением по глубине. Предельное разрешение по глубине составляет 1.5 см в диапазоне частот 10-18 ГГц.

Таблица 4.2. Измеренная диэлектрическая проницаемость образцов, носимых в экспериментах людьми с разными индексами массы тела.

Диэлектрик, Размеры (см)	Диэлектрическая проницаемость
ПВХ, 15x15x9	3,8±0.5
ПВХ, 15x8x7	3.9±0.5
ПВХ, 15x5x5	4.1±0.5
Воск, 15x15x9	2.6±0.5
Воск, 15x8x7	2.8±0.5
Воск, 15x7x5	2.4±0.5

Эксперименты с людьми разного телосложения и разных индексов массы тела показали (таб. 4.2), что минимальный физический размер диэлектрика составляет 5 см. Диэлектрики меньших размеров однозначно различить не всегда получалось в ходе экспериментов из-за особенностей

телосложения добровольцев. Наличие одежды и ее толщина не влияла на предельно допустимые размеры диэлектрика.

Таким образом, проведенные эксперименты показали физическую возможность обнаружения наличия диэлектрика скрытого на теле человека, а также вычисления его диэлектрической проницаемости. При этом были учтены такие существенные факторы, как телосложение, индекс массы тела и толщина одежды.

4.2. Определение критерия опасности и вычисление вероятностей обнаружения, вероятности ложного срабатывания и вероятности пропуска для радиоголографического метода.

На основе проведенных экспериментов с диэлектриками (таб. 4.1) были сформулированы критерии для классификации объектов по степени опасности. Классификация производилась на основе ключевых физических параметрах идентифицированных диэлектриков – диэлектрическая проницаемость, размеры и его положение в пространстве в системе координат экспериментальной установки.

На основании нескольких десятков экспериментов были сформулированы критерии для диэлектрического объекта, который в экспериментах считался «условно опасным»:

- Диэлектрическая проницаемость попадает в диапазон [2.3, 4.5].
- Объем диэлектрика превышает 0.5 л и не превышает 3 л.

Выбранный диапазон значений для диэлектрической проницаемости соответствует диэлектрическим проницаемостям реальных взрывчатых веществ и включает в себя вычисленные значения диэлектрических образцов из таб. 4.2, использованных в экспериментах.

Выбранный диапазон значений для объема диэлектрика соответствует минимально пригодному объему для его идентификации

радиоголографическим методом и максимально возможному для проноса его в области живота в рамках условий эксперимента.

Для вычисления вероятностей обнаружения, ложного срабатывания (ошибка первого рода) и пропуска (ошибка второго рода) производились одиночные проходы людей-добровольцев с разными индексами массы тела через экспериментальную установку (рис. 2.11). Проходы осуществлялись по центру с постоянной скоростью ~5 км/ч, соответствующей скорости естественного перемещения. С данной скоростью люди находились в исследуемой зоне размером 3x4 м примерно 3-4 с.

Для вычисления вероятности ложного срабатывания каждый доброволец проходил через экспериментальную установку 100 раз.

Для вычисления вероятности обнаружения и вероятности пропуска каждый доброволец проходил через экспериментальную установку 100 раз с каждым диэлектриком из таб. 4.1.

Вычисленные вероятности представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Вычисленные вероятности обнаружения, пропуска и ложного срабатывания для радиоголографического метода.

Индекс массы	Диэлектрик, (см)	Вероятность обнаружения (%)	Вероятность пропуска (%)	Вероятность ложного срабатывания (%)
18.3	ПВХ, 15x15x9	96	4	0
18.3	Воск, 15x15x9	98	2	-
24.3	ПВХ, 15x15x9	95	5	0
24.3	Воск, 15x15x9	94	6	-
25.1	ПВХ, 15x15x9	94	6	1

25.1	Воск, 15x15x9	92	8	-
27.2	ПВХ, 15x15x9	94	6	2
27.2	Воск, 15x15x9	94	6	-
29.6	ПВХ, 15x15x9	91	9	3
29.6	Воск, 15x15x9	93	7	-
18.3	ПВХ, 15x5x5	93	7	0
18.3	Воск, 15x7x5	94	6	-
24.3	ПВХ, 15x5x5	91	9	0
24.3	Воск, 15x7x5	92	8	-
25.1	ПВХ, 15x5x5	91	9	1
25.1	Воск, 15x7x5	92	8	-
27.2	ПВХ, 15x5x5	90	10	2
27.2	Воск, 15x7x5	91	9	-
29.6	ПВХ, 15x5x5	90	10	3
29.6	Воск, 15x7x5	91	9	-

Из экспериментов установлено, что вероятность обнаружения находится в диапазоне 90-98% и зависит от индекса массы тела и толщины исследуемого образца.

Зависимость от индекса массы тела объясняется тем, что физический размер диэлектрика L_2 (формула 2.9) для людей с большим индексом массы

тела, определяемый по радиолографическому изображению, больше, чем у людей с меньшим индексом массы тела. А увеличение физического размера уменьшает значение вычисляемой диэлектрической проницаемости (формула 2.9).

Зависимость вероятности обнаружения от толщины диэлектрика объясняется тем, что с уменьшением толщины диэлектрика приближается дифракционный предел обнаружения. Дифракционный предел для поддиапазона 10-18 ГГц составляет 3 см, а влияние различных шумов увеличивает его до 4 см. Тем самым образцы толщиной 5 см близки к границе дифракционного предела обнаружения и имеют меньшую вероятность обнаружения по сравнению с образцами толщиной 9 см.

4.3. Анализ экспериментальных данных полученных радиотомографическим методом.

В проведенных экспериментах определялось присутствие диэлектрика внутри оболочки, движущихся внутри исследуемой зоны как единое целое, и вычислялись основные физические параметры диэлектрика – положение, размеры, диэлектрическая проницаемость. Точность в вычислении значений диэлектрической проницаемости уменьшается при удалении исследуемого диэлектрика от центра контролируемой области в сторону одной из решеток (рис. 3.13).

Процесс измерения комплексных амплитуд прошедшего через исследуемый объект СВЧ поля и их обработка занимал 40 мс, что позволяло производить за 1 с 25 циклов измерений. При скорости перемещения диэлектрика в оболочке, не превышающей 6 км/ч, выявление присутствия диэлектрика, а также вычисления его основных физических параметров (положение центра, размеры и диэлектрическая проницаемость) было возможным, а погрешность в определении диэлектрической проницаемости соответствовала значениям из таблицы 4.4.

Таблица 4.4. Список расположений центров основных диэлектрических образцов вдоль оси x относительно центра исследуемой зоны и вычисленная их диэлектрическая проницаемость в соответствующих положениях.

Диэлектрик	Расположение	Диэлектрическая проницаемость
ПВХ 15x15x9	центр	$3,8 \pm 0.5$
ПВХ 15x15x9	± 15 см от центра	3.9 ± 0.6
ПВХ 15x15x9	± 30 см от центра	4.1 ± 0.6
ПВХ 15x15x9	± 45 см от центра	4.1 ± 0.7
Воск 15x15x9	центр	2.6 ± 0.5
Воск 15x15x9	± 15 см от центра	2.5 ± 0.6
Воск 15x15x9	± 30 см от центра	2.7 ± 0.6
Воск 15x15x9	± 45 см от центра	2.7 ± 0.7

Движение объекта осуществлялось под различными углами с осью z (рис. 3.13). При скорости движения до 6 км/ч исследуемый объект находился в контролируемой области исследуемой зоны не менее 300 мс. За это время производилось не менее 7 циклов измерений и обработки прошедшего через объект поля, а вычисляемые положения центра исследуемого объекта в каждом цикле позволяли построить в пространстве траекторию движения исследуемого объекта и вычислить его вектор скорости.

При использовании диэлектриков меньших размеров (см. таблицу 3.1) погрешность в измерении диэлектрической проницаемости была высокой, однако это позволяло выявить присутствие диэлектрика в контролируемой области исследуемой зоны и правильно определить положение его центра. Основными причинами высокой погрешности в определении диэлектрической проницаемости были:

- 1) Не всесторонне облучение СВЧ полем исследуемого объекта
- 2) Томографический предел разрешения (в условиях эксперимента ~ 5 см).

При размещении основных исследуемых диэлектриков в оболочки других размеров и других материалов, прозрачных для используемого СВЧ излучения, вычисляемая диэлектрическая проницаемость и ее погрешность соответствовали значениям, вычисленным в таблице 4.4. А использование диэлектриков меньших размеров (см. таблицу 3.1) также позволяло выявлять их присутствие и определять положения их центров.

Таким образом, проведенные эксперименты показали физическую возможность выявления присутствия диэлектриков (размеры от 15x15x9 см), находящихся внутри тонкой оболочки, являвшейся прозрачной для СВЧ излучения и непрозрачной для видимого света, и вычисления их основных физических параметров – положение центров, размеры и диэлектрическая проницаемость. Выявление и вычисление основных параметров диэлектрика, находящийся внутри тонкой оболочки, было также возможным при его перемещении со скоростью не более 6 км/ч через контролируемую область и при использовании различных материалов, прозрачных для СВЧ излучения и непрозрачных для видимого света.

4.4. Определение критерия опасности и вычисление вероятностей обнаружения, вероятности ложного срабатывания и вероятности пропуска для радиотомографического метода.

На основе проведенных экспериментов с диэлектриками (таб. 3.1) были сформулированы критерии для классификации объектов по степени опасности. Классификация производилась на основе ключевых физических параметрах идентифицированных диэлектриков – диэлектрическая проницаемость, размеры и его положение в пространстве в системе координат экспериментальной установки.

На основании нескольких десятков экспериментов были сформулированы критерии для диэлектрического объекта, который в экспериментах считался «условно опасным»:

- Диэлектрическая проницаемость попадает в диапазон [2.3, 4.5].
- Объем диэлектрика превышает 2 л и не превышает 6 л.

Диапазон значений для диэлектрической проницаемости выбирался из тех же принципов, что для радиоголографического метода (п. 4.2).

Выбранный диапазон значений для объема диэлектрика соответствует минимально пригодному объему для его идентификации радиотомографическим методом и максимально возможному для проноса его в багаже в условиях эксперимента.

Для вычисления вероятностей ложного срабатывания был подготовлен «условно безопасный» чемодан. «Условно безопасный» чемодан перемещался через исследуемую зону установки (4, рис. 3.13) на различных расстояниях от ее центра (таб. 4.4). Для каждого расстояния чемодана относительно центра исследуемой зоны было произведено 100 его проносов. Скорость перемещения в экспериментах составляла ~5 км/ч.

Для вычисления вероятностей обнаружения, ложного срабатывания (ошибка первого рода) и пропуска (ошибка второго рода) производились одиночные проносы для каждого диэлектрика для каждого расположения чемодана в исследуемой зоне. Исследуемый диэлектрический образец размещался внутри чемодана по центру (рис. 3.15).

В таблице 4.5 представлены вычисленные вероятности обнаружения, пропуска и ложного срабатывания для диэлектрических образцов размерами 15x15x9 см – наименьшими размерами, использованными в экспериментах.

Таблица 4.5. Вычисленные вероятности обнаружения, пропуска и ложного срабатывания для радиотомографического метода.

Диэлектрик, (см)	Расположение	Вероятность обнаружения (%)	Вероятность пропуска (%)	Вероятность ложного срабатывания (%)
ПВХ, 15x15x9	центр	96	4	3

Воск, 15x15x9	центр	95	5	-
ПВХ, 15x15x9	+30 см от центра	91	9	3
Воск, 15x15x9	+30 см от центра	91	9	-
ПВХ, 15x15x9	+45 см от центра	89	11	1
Воск, 15x15x9	+45 см от центра	87	13	-
ПВХ, 15x15x9	-30 см от центра	91	9	3
Воск, 15x15x9	-30 см от центра	91	9	-
ПВХ, 15x15x9	-45 см от центра	89	11	1
Воск, 15x15x9	-45 см от центра	87	13	-

Для образцов с размерами 15x15x9 см вероятность обнаружения варьируется от 87-96%. Вероятность обнаружения уменьшается при отдалении исследуемого чемодана с образцом от центра исследуемой зоны. Это объясняется уменьшением количества элементарных ячеек с оптимальным числом пересечений.

Из таблицы видно, что вероятности обнаружения и пропуска одинаковы для одинаковых абсолютных расстояний от центра исследуемой зоны. Такая симметрия объясняется симметричным расположением приемо-передающих элементов экспериментальной установки.

Для диэлектрических образцов большего объема вероятности обнаружения были выше, чем для образцов с размерами 15x15x9 см. Для образцов с размерами 15x15x15 см вероятность обнаружения варьировалась от 93-98%, а для образцов 15x15x30 см достигала 98-100% в зависимости от расположения в исследуемой зоне.

4.5. Выводы к главе 4.

В главе 4 проведен анализ экспериментальных данных полученных радиоголографическим и радиотомографическим методами.

Проведены измерения диэлектрической проницаемости подготовленного набора образцов проносимых людьми с различными индексами массы тела в области живота.

На основании нескольких десятков экспериментов были сформулированы критерии опасности для идентифицированных радиоголографическим методом диэлектрических образцов по соотношению их объема и диэлектрической проницаемости. Для «условно опасных» диэлектриков диэлектрическая проницаемость варьируется в диапазоне 2.3-4.5, объем 0.5-3 л.

Вычислены вероятности обнаружения, вероятности ложного срабатывания и вероятности пропуска для одиночных проходов людей с различными индексами массы тела на заданном наборе диэлектрических образцов при проходе через экспериментальную установку.

Проведены измерения диэлектрической проницаемости подготовленного набора образцов провозимых в чемодане.

На основании нескольких десятков экспериментов были сформулированы критерии опасности для идентифицированных радиотомографическим методом диэлектрических образцов по соотношению их объема и диэлектрической проницаемости. Для «условно опасных» диэлектриков диэлектрическая проницаемость варьируется в диапазоне 2.3-4.5, объем 2-6 л.

Вычислены вероятности обнаружения, вероятности ложного срабатывания и вероятности пропуска для одиночных проносов чемодана на заданном наборе диэлектрических образцов через исследуемую зону экспериментальной установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1) Теоретически и экспериментально обоснован выбранный поддиапазон СВЧ 10-18 ГГц. Данный поддиапазон позволяет с одной стороны работать с объектами размеров от 4-5 см и, с другой стороны, обеспечивать необходимое для практики быстродействие расчетов.

2) Показано, что реализованный метод построения и обработки *радиоголографических* изображений, основанного на решении обратной задачи дифракции в приближении однократного рассеяния в поддиапазоне СВЧ 10-18 ГГц, позволяет эффективно обнаруживать диэлектрики на теле человека размерами от 5 см. Показано, что использование поддиапазона СВЧ 10-18 ГГц совместно с квазистационарным приближением в данном методе позволяет производить вычисления в режиме реального времени для объектов движущихся со скоростью до 5-6 км/ч.

3) Предложен оригинальный метод построения и обработки *радиотомографических* изображений в поддиапазоне СВЧ 10-18 ГГц, основанный на дискретном обратном преобразовании радоновских проекций. Данный метод позволяет обнаруживать диэлектрические предметы размером от 5 см, скрытые тонкой оболочкой, а его быстродействие позволяет работать в режиме реального времени с объектами, движущимися со скоростью до 5-6 км/ч.

4) Установлены критерии опасности идентифицируемого диэлектрического объекта на основе измеренных его ключевых физических параметров. Опасными являются предметы в диапазоне 2.3-4.5 по величине диэлектрической проницаемости и 0.5-3 л для радиоголографического метода и 1-5 л для радиотомографического метода.

5) Разработанный комплекс методов построения и анализа радиоголографического и радиотомографического изображений объекта внедрен в качестве функционального блока системы досмотра

пассажиропотока HSR (Human Security Radar), обеспечивающего возможность скрытного использования, нужное для работы в реальном времени быстроедействие, безопасность для здоровья человека и автономность работы.

Список литературы:

1. Семенов С.Н., Воробьев С. И., Аверьянов В.П., Осипов М.Ю. Многопозиционная система построения микроволнового изображения в режиме реального времени // Тринадцатая международная научно-практическая конференция Hi-Tech. Санкт-Петербург, 24 – 26 мая 2012 г. Материалы конференции. Санкт-Петербург. С. 44 – 47.
2. Vorobyev S., Semenov S., Shkodyrev V. Distributed imaging algorithm for multi-position microwave systems // In Proceedings of the Distributed Intelligent Systems and Technologies. St. Petersburg 2 – 4 July 2012. St. Petersburg, Russia, 2012. P. 121 – 130.
3. Семенов С.Н., Воробьев С.И., Дудкин В.И. Метод построения изображения дистанционным радиозондированием пространства // XLII неделя науки СПбГПУ. Санкт-Петербург 2 – 7 декабря 2013г. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2013. С. 80 – 83.
4. Воробьев С.И., Потехин В.В., Семенов С.Н. Методика фильтрации анализа изображений микроволнового зондирования // Журнал «НТВ СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление», выпуск 1–2014(188). С. 31 – 36.
5. Семенов С.Н., Воробьев С.И., Дудкин В.И. Методика построения микроволнового изображения объекта с применением решения обратной задачи дифракции // Журнал «НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки», выпуск 2-2014(194). С. 69 – 74.
6. Kuznetsov A., Vakhtin D., Semenov S. and etc. Automatic standoff detection of threats in crowded areas // In Proceedings of the Security Research Conference "9th Future Security", Berlin, September 16 – 18, 2014. Fraunhofer Verlag, Berlin, Germany 2014. P. 319 – 326.
7. Семенов С.Н., Воробьев С.И., Дудкин В.И. Построение томографических изображений диэлектрических объектов в микроволновом диапазоне в приближении геометрической оптики // XLIII неделя науки

СПбГПУ. Санкт-Петербург 1 – 6 декабря 2014г. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2014. С. 125 – 127.

8. Мещеряков В.В., Воробьев С.И., Семенов С.Н. Микроволновая система дистанционного досмотра // XVI Международная зимняя школа-Семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. Саратов 2 – 7 февраля 2015. Материалы конференции. Саратов, 2015. С. 71.

9. Семенов С.Н. Построение изображений диэлектрических объектов методом микроволновой томографии // Журнал «НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки», выпуск 3-2015(225). С. 150 – 155.

10. Kuznetsov A., Vakhtin D., Semenov S. and etc. Extending security perimeter and protecting crowded places with Human Security Radar // In Proceedings of the Security Research Conference "10th Future Security", Berlin, September 15 – 17, 2015. Berlin, Germany 2015. P. 371 – 377.

11. Мещеряков В.В, Семенов С.Н, Григорьев А.Д. Исследование эффекта изменения поляризации микроволнового излучения скрытыми объектами на теле человека // Журнал «Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника», выпуск 6-2015. С. 41 – 45.

12. Семенов С.Н., Мещеряков В.В., Дудкин В.И. Построение томографических изображений диэлектрических объектов в верхнем X и нижним Ku диапазонах СВЧ // XIV неделя науки СПбПУ. Санкт-Петербург 30 – 4 декабря 2015. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2015. С. 122 – 124.

13. Semenov S. N. Imaging the dielectric objects by microwave tomography method // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics 1 (2015). P. 315 – 318.

14. Yurduseven O. Indirect Microwave Holographic Imaging of Concealed Ordnance for Airport Security Imaging Systems // Progress In Electromagnetics Research. 2014. Vol. 146. P. 7 – 13.

15. Gonzalez-Valdes B., Alvarez Y., Martnez-Lorenzo J. A., Las-Heras F., Rappaport C.M. On the use of improved imaging technique for the development of

a multistatic three-dimensional millimeter-wave portal for personnel screening // Progress In Electromagnetics Research. 2013. Vol. 138. P. 83 – 98.

16. Martnez-Lorenzo J. A., Quivira F., Rappaport C.M. SAR Imaging of suicide bombers wearing concealed explosive threats // Progress In Electromagnetics Research. 2012. Vol. 125. P. 255 – 272.

17. Gu X., Zhang Y. H. Resolution threshold analysis of music algorithm in radar range imaging // Progress In Electromagnetics Research B. 2011. Vol. 31. P. 297 – 321.

18. Gonzalez-Valdes B., Alvarez Y., Martnez-Lorenzo J.A., Las-Heras F., Rappaport C. . SAR Processing for profile reconstruction and characterization of dielectric objects on the human body surface // Progress In Electromagnetics Research. 2013. Vol. 138. P. 269 – 282.

19. Duarte I.M.P., Vieira J.M.N., Ferreira P.J.S.G., Albuquerque D.F. Iterative Algorithm for High Resolution Frequency Estimation // International Journal of Information and Electronics Engineering. November, 2014. Vol. 4, No 6. P. 413 – 417.

20. Rodriguez-Vaqueiro Y., Martinez-Lorenzo J.A. On the Use of Passive Reflecting Surfaces and Compressive Sensing Techniques for Detecting Security Threats at Standoff Distances // Hindawi Publishing Corporation. International Journal of Antennas and Propagation. Volume 2014. Article ID 248351. P. 1 – 8.

21. I. D. Longstaff, H. Ashoka, M. AbuShaaban, W. Beere, X. Liu. A longer range body scanner // Proceeding of the 6th EMRS DTC Technical Conference. Edinburgh 2009. A8, 7 pp.

22. Demirci S., Cetinkaya H., Yigit E., Ozdemir C., Vertiy A. A study on millimeter-wave imaging of concealed objects: application using back-projection algorithm // Progress In Electromagnetics Research. 2012. Vol. 128. P. 457 – 477.

23. Martinez-Lorenzo J.A., Rodriguez-Vaqueiro Y., Rappaport C. M. A compressed sensing approach for detection of explosive threats at standoff distances using a Passive Array of Scatters // Proceeding of the 2012 IEEE

Conference on Technologies for Homeland Security (HST). November 13 – 15, 2012. Waltham, MA, USA. P. 134 – 139.

24. Ahmed S.S., Schiessl A., Gumbmann F., Tiebout M., Methfessel S., Lorenz-Peter S. Advanced Microwave Imaging // IEEE Microwave Magazine. 17 September, 2012. Volume:13 , Issue: 6. P. 26 – 43.

25. Ahmed S.S., Schiessl A., Lorenz-Peter S. Illumination Properties of Multistatic Planar Arrays in Near-Field Imaging Applications // Proceeding of the European Radar Conference (EuRAD), 30 September – 1 October, 2010. Paris, France. P. 29 – 32.

26. Kim Y.J., Jofre L., De Flaviis F., Feng M.Q. 3D Microwave imaging technology using antenna array for damage assessment of concrete structure // Proceeding of the 16th ASCE Engineering Mechanics Conference. 16-18 July, 2003. University of Washington, Seattle, USA. 7 p.

27. Kim Y.J., Jofre L., De Flaviis F., Feng M.Q. 3D Microwave Imaging Technology For Damage Detection of Concrete Structures // Proceedings of the SPIE. August, 2003. Volume 5057. P. 29 – 36.

28. Kim Y.J., Jofre L., De Flaviis F., Feng M.Q. Microwave Subsurface Imaging Technology for Damage Detection // Journal of Engineering Mechanics. July 2004. Volume 130, Issue 7. P. 857 – 867.

29. Attardo E.A., Borsic A., Meaney P.M., Vecchi G.. Finite Element Modeling for Microwave Tomography // Proceedings of the Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. 3–8 July, 2011, Spokane, Washington, USA. P. 703 – 706.

30. Saha S., Pal G., Pyne S., Mandal S.. Tomography of human body using exact simultaneous iterative reconstruction algorithm // ACER 2013. P. 437 – 443.

31. Ahmed S.S., Schiessl A., Lorenz-Peter S. Novel Fully Electronic Active Real-Time Millimeter-Wave Imaging System based on a Planar Multistatic Sparse Array // Proceedings of the Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International. 5–10 June, 2011. P. 1 – 4.

32. Liu W. Wideband Beamforming for Multipath Signals Based on Frequency Invariant Transformation // International Journal of Automation and Computing. August 2012. Volume 9(4). P. 420 – 428.

33. Levitan A. C., Kosowsky L. Methods and apparatus for detecting threats using radar. United States, Patent No.: US 7,492,303 B1. 17 February, 2009. 23 pp.

34. Guillet J.P., Recur B., Frederique L., Bousquet B., Canioni L., Manek-Hönninger I, Desbarats P., Mounaix P. Review of Terahertz Tomography Techniques // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. April, 2014. Volume 35, Issue 4. P. 382 – 411.

35. Millimeter-Wave Standoff Detection of Concealed Explosives: report of project // Rappaport C.M., Martinez-Lorenzo J.A., Gonzalez-Valdes B. and etc. Northeastern University, Boston, USA. 2012. 13 pp.

36. Hardware Design for “Stand-off” and “On-the-Move” Detection of Security Threats: report of project // Martinez J., Rappaport C.M., Gonzalez-Valdes B. and etc. Northeastern University, Boston, USA. 2014. 12 pp.

37. Бугаев А.С., Васильев И.А., Ивашов С.И., Разевиг В.В., Шейко А.П. Обнаружение и дистанционная диагностика людей за препятствиями с помощью радиолокационных средств // Журнал: «Радиотехника» №7. 2003. С. 42 – 47.

38. Разевиг В.В., Бугаев А.С., Ивашов С.И., Васильев И.А., Журавлев А.В., Биктел Т., Капинери Л. Экспериментальная оценка параметров голографических подповерхностных радиолокаторов в сравнении с оптической голографией // Журнал: «Радиотехника». 2010. №9. С. 63 – 70.

39. Zhuravlev A., Razevig V., Ivashov S., Bugaev A., Chizh M. Microwave Imaging of Moving Subjects by Combined Use of Video-tracker and Multi-static Radar // Proceedings of the International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2015). November 2-4, 2015. Tel Aviv, Israel. P. 1 – 5.

40. Разевиг В.В., Бугаев А.С., Ивашов С.И., Васильев И.А., Журавлев А.В. Восстановление микроволновых голограмм, полученных подповерхностным

радиолокатором РАСКАН // Журнал: «Успехи современной радиоэлектроники» №9. 2010. С. 51 – 58.

41. Журавлев А.В., Разевиг В.В., Васильев И.А., Ивашов С.И. Микроволновая система досмотра человека в движении на основе комбинированного использования 3D-видеосенсора и радиолокационной системы // X Всероссийская научно-техническая конференция «Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов». 7-9 октября 2014. Пенза, Россия. С.160 – 167.

42. Oka S., Togo H., Kukutsu N., Nagatsuma T. Latest Trends in Millimeter-wave Imaging Technology // Proceedings of the “Progress In Electromagnetics Research Symposium”. March 24-28, 2008. Hangzhou, China. P. 418 – 421.

43. Aftanas M. Through wall imaging with UWB Radar system, dissertation for the degree of Doctor of Philosophy: 05.02.13 // Aftanas Michal. 2009. 121 pp.

44. Zhuravlev A., Ivashov S., Razevig V., Vasiliev I. Inverse synthetic aperture radar imaging for concealed object detection on a naturally walking person // Proceedings of the SPIE Symposium on Defense and Security, Radar Sensor Technology XIII Conference. May 5 – 7, 2014. Baltimore, Maryland, USA. P. 1 – 11.

45. Завьялова К.В. Трехмерное видение на основе измерения амплитуды поля интерференции, диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук: 01.04.03 // Завьялова Ксения Владимировна. 2014. 160 с.

46. Rappaport C. A Novel, Non-Iterative, Analytic Method to Find the Surface Refraction Point for Air-Coupled Ground Penetrating Radar // Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). April 11-15, 2011. Rome, Italy. P. 1786 – 1789.

47. Gonzalez-Valdes B., Martinez-Lorenzo J.A., Rappaport C.M., A. Pino G. Design and nearfield-based optimization on an array of reflectors as radar antenna to sense surface shape anomalies // Proceeding of the 2009 IEEE Antennas and

Propagation Society International Symposium. June 1-5, 2009. Charleston, Scotland. P. 1 – 4.

48. Rappaport C. A Dispersive Microwave Model for Human Breast Tissue Suitable for FDTD Computation // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2007. Vol. 6, p. 179 – 181.

49. Gonzalez-Valdes B., Martinez-Lorenzo J.A., Rappaport C. M., Álvarez Y. Three-dimensional millimeter-wave portal for human body imaging // Proceeding of the 2012 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security (HST). November 13-15, 2012. Waltham, MA, USA. P. 196 – 201.

50. Fernandes J.L., Obermeier R., Hagelen M., Martinez-Lorenzo J.A., Rappaport C.M. A comparison of experimental and modeled results of an active millimeter wave inverse synthetic aperture radar system used to perform standoff detection of person-borne improvised explosive devices // Proceeding of the , 2010 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST). November 8-10, 2010. Waltham, MA, USA. P. 428 – 434.

51. Ghazi G., Martinez-Lorenzo J.A., Rappaport C.M.. A new super-resolution algorithm for millimeter wave imaging on security applications // Proceeding of the 2012 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security (HST). November 13-15, 2012. Waltham, MA, USA. P. 202 – 207.

52. Álvarez Y., Martínez-Lorenzo J.A., Las-Heras F., Rappaport C.M.. An Inverse Fast Multipole Method for Imaging Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2012. Vol. 10, p. 1259 – 1262.

53. González-Valdés B., Martínez-Lorenzo J.Á., Rappaport C.M., Álvarez Y. 3D whole body imaging for detecting explosive-related threats // Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. July 8-14, 2012. Chicago, IL, USA. P. 1 – 2.

54. Álvarez Y., Martínez-Lorenzo J.A., Las-Heras F., Rappaport C.M. An Inverse Fast Multipole Method for Geometry Reconstruction Using Scattered Field Information // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. July, 2012. Vol. 60, issue 7. P. 3351 – 3360.

55. Gonzalez-Valdes B., Martinez-Lorenzo J.A., Rappaport C.M. A New Fast Algorithm for Radar-Based Shape Reconstruction of Smoothly Varying Objects // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2013. Vol. 12. P. 484 – 487.

56. Rappaport C.M., Rodriguez-Vaqueiro Y., Martinez-Lorenzo J.A., Gonzalez-Valdes B. Phenomenological scattering analysis of an RF Area Secure Perimeter // Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST). November 15-17, 2011. Waltham, MA, USA. P. 466 – 469.

57. Gonzalez-Valdes B., Alvarez Y., Gutiérrez-Meana J., Rappaport C.M. On-the-move millimeter wave imaging system using multiple transmitters and receivers // Proceeding of the 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). May 13-17, 2015. Lisbon, Portugal. P. 1 – 4.

58. Rappaport C.M., González-Valdés B., Martínez-Lorenzo J.A. Advanced Portal-Based Multistatic Millimeter-Wave Radar Imaging for Person Security Screening // Proceeding of the 2014 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST). October 13-16, 2014. Rome, Italy. P. 1 – 5.

59. Alvarez Y., Gonzalez-Valdes B., Martínez-Lorenzo J.A., Las-Heras F., Rappaport C.M. SAR-Imaging-Based Techniques for Low-Permittivity Lossless Dielectric Body Characterization // IEEE Antennas and Propagation Magazine. April, 2015. Vol. 57, issue 2. P. 267 – 276.

60. Álvarez Y., Las-Heras F., Gonzalez-Valdes B., Martínez-Lorenzo J.Á., Rappaport C.M. Accurate Profile Reconstruction Using An Improved SAR Based Technique // Proceeding of the 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). July 7-13, 2013. Orlando, FL, USA. P. 818 – 819.

61. Álvarez Y., Gonzalez-Valdés B., Martínez J.Á., Las-Heras F., Rappaport C.M. 3D Whole Body Imaging for Detecting Explosive-Related Threats // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. August, 2015. Vol. 60, issue: 9. P. 4453 – 4458.

62. Rappaport C.M., Gonzalez-Valdes B. Multistatic Nearfield Imaging Radar for Portal Security Systems Using a High Gain Toroidal Reflector Antenna // Proceeding of the 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). May 13-17, 2015. Lisbon, Portugal. P. 1 – 2.

63. Gonzalez-Valdes B., Alvarez Y., Rodriguez-Vaqueiro Y., Arboleya-Arboleya A., García-Pino A., Rappaport C.M., Las-Heras F., Martinez-Lorenzo J.A. Millimeter Wave Imaging Architecture for On-The-Move Whole Body Imaging // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. June, 2016. Vol. 64, issue: 6. P. 2328 – 2338.

64. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосное зондирование за диэлектрическими преградами // Известия вузов. Физика. 2010, №9. С. 10 – 16.

65. Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р. и др. Коммутируемая сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии // Известия вузов. Физика. 2012, №8. С. 26 – 30.

66. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Степанов Е.О. Устройство для 2D радиотомографии на основе СШП-линейной тактированной антенной решетки с фокусирующим рефлектором // Известия вузов. Физика. 2013, №8. С. 26 – 30.

67. Шипилов С.Э., Якубов В.П., Сатаров Р.Н. Когерентный джиттер в импульсной радиотомографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58, №9. С. 22 – 27.

68. Суханов Д.Я., Якубов В.П. Применение сигналов с линейной частотной модуляцией в трехмерной радиотомографии // Журнал технической физики. 2010. Т. 8, №4. С. 115 – 119.

69. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Разинкевич А.К. Сверхширокополосная томография удаленных объектов // Дефектоскопия. 2012. №3. С. 59-65.

70. Кузьменко И.Ю., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Ультразвуковая система 3D-позиционирования для радиотомографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, №9/2. С. 283-284.

71. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Юрченко А.В. Дистанционная сверхширокополосная томография нелинейных радиоэлектронных элементов // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, №2. С. 122 – 125.

72. Разинкевич А.К., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Радиолокационная томография удаленных объектов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, №8/2. С. 20-23.

73. Антипов В.Б., Цыганок Ю.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Применение доплеровских датчиков движения в системах построения радиоизображений // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, №8/2. С. 285-287.

74. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я. Радио- и ультразвуковая томография скрытых объектов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, №8. С. 20-25.

75. Якубов В.П., Суханов Д.Я., Клоков А. В. Радиотомография по сверхширокополосным моностатическим измерениям на неплоской поверхности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, №9. С. 72-79.

76. Сатаров Р.Н., Шипилов С.Э., Якубов В.П., Степанов Е.О. Устройство для 2D-радиотомографии на основе СШП-линейной тактированной антенной решетки с фокусирующим рефлектором // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, №8/2. С.

77. Schiessl A., Ahmed S.S., Genghammer A., Lorenz-Peter S. A Technology Demonstrator for a 0.5 m x 0.5 m Fully Electronic Digital Beamforming mm-Wave Imaging System // Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). April 11 – 15, 2011. Rome, Italy. P. 2606 – 2609.

78. Ahmed S.S., Lorenz-Peter S. Illumination of Humans in Active Millimeter-Wave Multistatic Imaging // Proceedings of the 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). March 26 – 30, 2012. Prague, Czech Republic. P. 1755 – 1757.

79. Ahmed S.S., Schiessl A., Lorenz-Peter S. A Novel Active Real-Time Digital-Beamforming Imager for Personnel Screening // Proceedings of the 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2012. EUSAR. April 23 – 26, 2012. Nuremberg, Germany. P. 178 – 181.

80. Schiessl A., Genghammer A., Ahmed S.S., Lorenz-Peter S. Hardware realization of a 2 m x 1 m fully electronic real-time mm-wave imaging system // Proceedings of the 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2012. EUSAR. April 23 – 26, 2012. Nuremberg, Germany. P. 40 – 43.

81. Schiessl A., Ahmed S.S., Genghammer A., Lorenz-Peter S. Temperature Sensitivity of Large Digital-Beamforming Multistatic mm-Wave Imaging Systems // Proceedings of the 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IMS). June 2 – 7, 2013. Seattle, WA, USA. P. 1 – 3.

82. Schiessl A., Genghammer A., Ahmed S.S., Lorenz-Peter S. Phase Error Sensitivity in Multistatic Microwave Imaging Systems // Proceedings of the 10-th European Radar Conference (EuRAD). October 9 – 11, 2013. Nuremberg, Germany. P. 319 – 322.

83. Ahmed S.S. Microwave/mm-Wave Imaging Systems // Proceedings of the 2013 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). September 30 October 3, 2013. P. Bordeaux, France. 49-52.

84. Ahmed S.S., Genghammer A., Schiessl A., Lorenz-Peter S. Fully Electronic -Band Personnel Imager of 2 m² Aperture Based on a Multistatic Architecture // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. December, 2012. Volume 61, Issue 1. P. 651 – 657.

85. Schiessl A., Ahmed S.S., Lorenz-Peter S. Data Statistics and Image Properties of a Large Multistatic mm-Wave Imaging System // 2013 14th

International Radar Symposium (IRS). June 19-21, 2013. Dresden, Germany. P. 202 – 206.

86. Schiessl A., Ahmed S.S., Genghammer A., Lorenz-Peter S. Phase Error Sensitivity in Multistatic Microwave Imaging Systems // Proceedings of the 2013 43rd European Microwave Conference (EuMC). October 6-10, 2013. Nuremberg, Germany. P. 1631 – 1634.

87. Ahmed S.S. Advanced Fully-Electronic Personnel Security Screening Technology // Proceedings of the 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). May 13-17, 2015. Lisbon, Portugal. P. 1 – 4.

88. Schiessl A., Juenemann R., Lorenz-Peter S. RX-TX Analog Front-End module with 2 x 96-Channels for mm-Wave Imaging Systems // Proceedings of the 2012 7th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). October 29-30, 2012. Amsterdam, Netherlands. P. 917 – 919.

89. Schiessl A., Juenemann R., Lorenz-Peter S. RX-TX Analog Front-End module with 2 x 96-Channels for mm-Wave Imaging Systems // Proceedings of the 2012 42nd European Microwave Conference (EuMC). October 29 November 1, 2012. Amsterdam, Netherlands. P. 1297 – 1299.

90. Koepfel T., Methfessel S., Schiessl A., Lorenz-Peter S. Increasing Measurement Speed in mm-Wave Imaging Systems by Means of Frequency Multiplexing // Proceedings of the 43rd European Microwave Conference (EuMC). October 6-10, 2013. Nuremberg, Germany. P. 1627 - 1630.

91. Koepfel T., Methfessel S., Schiessl A., Lorenz-Peter S. Increasing Measurement Speed in mm-Wave Imaging Systems by Means of Frequency Multiplexing // Proceedings of the 2013 10th European Radar Conference (EuRAD). October 9 – 11, 2013. Nuremberg, Germany. P. 315 – 318.

92. Juenemann R., Zielska A., Schiessl A., Methfessel S., Lorenz-Peter S. Differential Excitation of a Hybrid Antenna for a 75 GHz Antenna Array Implemented on a Multilayer PC Board // Proceedings of the 2013 43rd European Microwave Conference (EuMC). October 6-10, 2013. Nuremberg, Germany. P. 1163 – 1166.

93. Gumbmann F., Schiessl A. Multistatic Short Range Imaging with a Nonuniform SFCW Concept // Proceedings of the 2014 Asia-Pacific Microwave Conference. November 4-7, 2014. Sendai, Japan. P. 1028 – 1030.

94. Зверев В.А. Физические основы формирования изображений волновыми полями. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1998. 252 с.

95. Зверев В.А. Радиооптика. Москва: Сов. радио, 1975. 304 с.

96. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. Москва: Мир, 1973. 698 с.

97. Троицкий И.Н. Статистическая теория томографии. Москва: Радиосвязь, 1989г. 239с.

98. Stanly R. Deans. The Radon Transform and some of its application. A Wiley-Interscience Publication, 1983. 289p.

99. Патент 2563581 (RU), С1. Способ дистанционного определения диэлектрической проницаемости диэлектрического объекта // (RU) 2014129115/07; заявл. 15.07.2014; опуб. 20.09.2015. Бюл. № 26. 2 с.

100. Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. Оптическая томография. Москва: Радиосвязь, 1989г. 225 с.

101. Губарени Н.М. Вычислительные методы и алгоритмы малоракурсной компьютерной томографии. Киев: Наукова Думка, 1997. 327 с.

102. Пикалов В.В., Преображенский Т.С. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1987. 227 с.

103. Пикалов В.В., Мельникова Н.Г. Томография плазмы. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 232 с.

104. Якубов В.В., Шилилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография. Достижения и перспективы. Томск: «Издательство НТЛ», 2014. 262 с.

105. Способ дистанционного досмотра багажа в контролируемой области пространства: пат. 2629914, Рос. Федерация, МПК: G 01 N 22/10/

Семенов С.Н., Воробьев С.И. и др.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «АПСТЕК Лабс» (Ru). - № 2016133685; заявл. 16.08.2016; опубл. 04.09.2017, Бюл. № 25. - 2 с: ил.

106. Способ дистанционного определения диэлектрической проницаемости диэлектрического объекта: пат. 2629911, Рос. Федерация, МПК G 01 R 27/26/ Семенов С.Н., Воробьев С.И. и др.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «АПСТЕК Лабс» (Ru). - № 2016133690; заявл. 16.08.2016; опубл. 04.09.2017, Бюл. № 25. - 2 с: ил.

107. D. Popovic, L. McCartney and etc // Precision open-ended coaxial probes for in vivo and ex vivo dielectric spectroscopy of biological tissues at microwave frequencies, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.53, no.5, May 2005, P. 1713 – 1722.

Приложение А. Патент «Способ дистанционного досмотра багажа в контролируемой области пространства».



Приложение Б. Патент «Способ дистанционного определения диэлектрической проницаемости диэлектрического объекта».

