

На правах рукописи

Семенов Семен Николаевич

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

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена лаборатории общества с ограниченной ответственностью
АПСТЕК Лабс (ООО «АПСТЕК Лабс»)

Научный руководитель	Дудкин Валентин Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Фотоники и Линий связи СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч- Бруевича
Официальные оппоненты	Шамрай Александр Валерьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник–заведующий лабораторией квантовой электроники, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук Подстригаев Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, начальник научно- исследовательской лаборатории 623, Акционерное общество «Научно- исследовательский институт «Вектор»
Ведущая организация	Открытое акционерное общество «Центральное научно-производственное объединение «ЛЕНИНЕЦ» (ОАО «ЦНПО ЛЕНИНЕЦ»)

Защита состоится «4» октября 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.034.01 на базе Института аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул.Ивана Черных, д. 31–33 лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИАПРАН по тому же адресу и на сайте www.iairas.ru. Отзывы на диссертацию и автореферат направлять по адресу: 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., д.26, Институт аналитического приборостроения РАН, а/я 207.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Буляница А.Л

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 отраженных или рассеянных 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 формы 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 спектральные 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.

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 СВЧ диапазона. Исследуемый неподвижный объект (пассажир) зондируют излучением СВЧ диапазона 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 энергиях. 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). Из вышесказанного следует, что существует потребность в создании систем удовлетворяющих современным требованиям: скрытная работа, безопасность работы, отсутствие человеческого фактора, быстроедействие.

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 8-18 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 анализа, который устраняет необходимость принимать решение оператору, что в свою очередь устраняет человеческий фактор. А применение современных методов параллельных вычислений позволяет проводить измерения, восстановление и анализ изображения, принятие решения в режиме реального времени.

Объектом исследования в диссертационной работе являются радиоголографические и радиотомографические изображения, получаемые

при измерении рассеянного и прошедшего через вещество электромагнитного излучения в сверхвысоком частотном (СВЧ) диапазоне.

Цели и задачи диссертационной работы.

Разработка методов построения и методов анализа изображений, основанных на радиоголографических 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 *радиоголографических* 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 *радиоголографического* изображения, полученного в 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 достигается эффективно в совместном анализе его изображения в двух спектральных диапазонах – оптический и СВЧ диапазон 10–18ГГц. Анализ позволяет вычислить ключевые физические параметры

диэлектрического слоя – диэлектрическая проницаемость, размеры, положение в пространстве, расположенного на поверхности тела человека.

2. Предложенный метод решения обратной томографической задачи в СВЧ поддиапазоне 10–18 ГГц дает возможность идентифицировать присутствие скрытого диэлектрика в исследуемой области. Томографический метод позволяет вычислить ключевые физические параметры диэлектрика – 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.

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 макеты в процессе диссертационной работы численно 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. Разработанный метод обнаружения диэлектрика, основанный на предложенном в работе синтезе нескольких методов численного решения обратной задачи дифракции для поддиапазона СВЧ 10-18 ГГц, позволяет производить идентификацию динамического объекта в режиме реального времени. Ранее такой поддиапазон не использовался в подобных задачах.

2. Полученное в результате работы быстроедействие алгоритмов разработанного метода позволяет производить идентификацию в реальном времени по сравнению с существующими (на существующих 1 человек за ~ 1 мин, до 5 человек одновременно за ~3 с не останавливая).

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

4. Предложенные методы и алгоритмы являются составной частью аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего автоматическое обнаружение скрытых предметов и производящего классификацию обнаруженных предметов по степени опасности в рамках задачи досмотра.

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 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.

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).

Публикации.

По материалам диссертационной работы было опубликовано 15 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 патента в РФ №2629911, №2629914.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 106 источников. Текст диссертации изложен на 125 страницах и включает 61 рисунок и 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приводится краткая характеристика диссертационной работы: актуальность выбранной темы, объект, цель, задачи, методы и предмет исследования, научные положения, обоснование достоверности истинности полученных положений и результатов, их научной и прикладной значимости.

В первой главе изложены основные физические модели распространения электромагнитных волн, рассматриваемые в диссертации. Изучены основные физические процессы, которые необходимо принимать во внимание, при решении задач радиоголографии и радиотомографии: распространение радиоволн в однородной среде, теория однократного рассеяния, основные методы зондирования среды (локационная схема зондирования, трансмиссионная схема зондирования, зондирование с использованием радара с синтезированной апертурой (РСА)). Рассмотрены методы, используемые при обработке результатов измерений рассеянного поля на неоднородностях и поля прошедшего через объект. Обработка рассеянного поля осуществлялась методами преобразования Фурье и быстрого преобразования Фурье (БФП), а прошедшего через объект поля – последовательным применением преобразования Фурье и метода обратных Радоновских проекций. Дан краткий обзор радиоголографических и томографических методов исследования, и сделаны выводы. Были представлены используемые методы измерения диэлектрической проницаемости и заранее подготовленный набор диэлектрических материалов, диэлектрическая проницаемость которых измерялась заранее этими методами. Основными диэлектрическими материалами были выбраны воск и поливинилхлорид (ПВХ), как вещества, диэлектрическая проницаемость которых близка к реальным взрывчатым веществам.

Во второй главе представлен разработанный метод построения радиоголографического изображения человека на основе решения обратной задачи дифракции в приближении однократного рассеяния. Построение СВЧ изображения объекта осуществляется пространственной локализацией точек его поверхности, определяемых амплитудным анализом трехмерного облака

точек, получаемого преобразованием Фурье (1), вдоль выбранного направления:

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

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, N_f – количество используемых частот, N_t – количество передающих элементов, R_t – суммарное расстояние от передающего элемента t до точки восстановления и от точки восстановления до приемного элемента.

При решении задачи восстановления было выбрано расположение приемо-передающих элементов, изображенное на рисунке 1. Данное расположение обеспечивает равномерное облучение человека в исследуемой области (рис. 1).

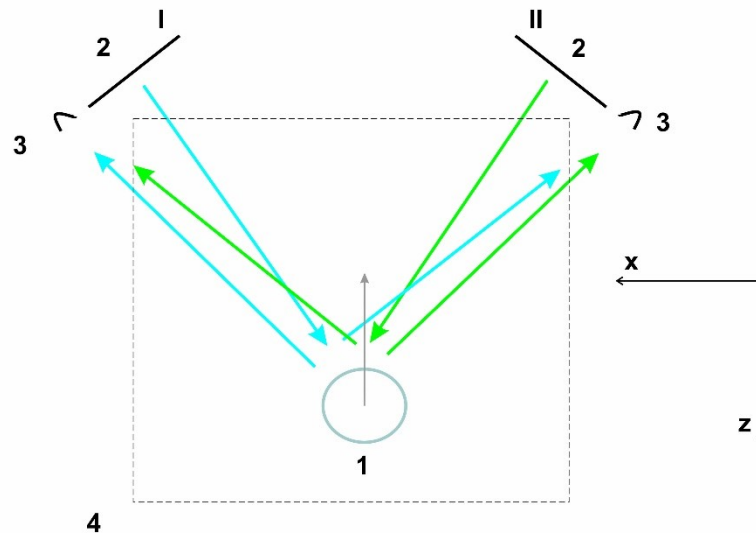


Рисунок 1. Схема движения человека относительно экспериментальной установки в избранной системе координат. 1 – исследуемый человек, 2 – РСА (в экспериментальной системе АМУ256 РСА состоял из 256 передающих элементов), 3 – приемные антенны, 4 – исследуемая область.

Результаты численного моделирования процесса восстановления трехмерного облака точек, условно соответствующего габаритам человека, выявили существенные ограничения при численном решении данной задачи в режиме реального времени, выражающейся в высокой вычислительной емкости задачи восстановления СВЧ поля с использованием преобразования Фурье.

Для повышения быстродействия восстановление радиоголографического изображения человека было предложено использовать метод БФП (2):

$$P'(x, y, z_0) = \frac{1}{z_0} \sum_{f=0}^{N_f-1} P(x', y', 0) e^{ikR_t}$$

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

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.

Было показано, что качество получаемого изображения человека методом БПФ идентично в рамках решаемой задачи идентификации, как и методом преобразования Фурье (рис. 2 и 3).

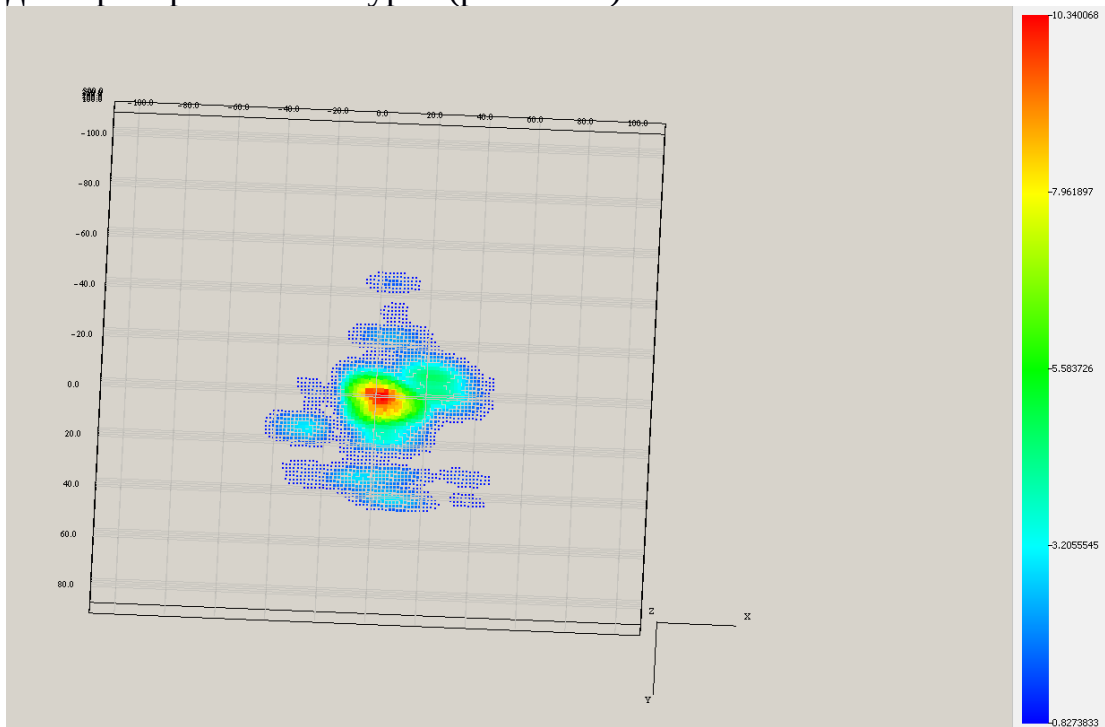


Рисунок 2. Радиоголографическое изображение человека, восстановленное с использованием преобразования Фурье

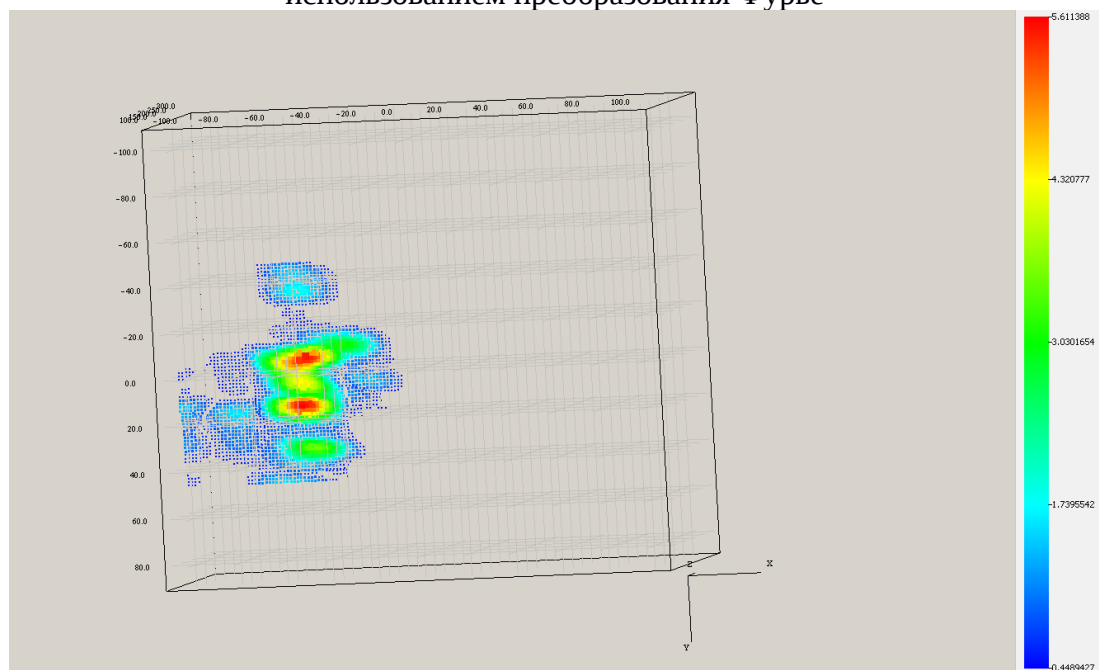


Рисунок 3. Радиоголографическое изображение человека, восстановленное с использованием БПФ

Экспериментальные результаты показали, что восстановление методом преобразования Фурье может уступать в быстродействии методу БПФ при расчете идентичных радиоголографических изображений на идентичных вычислительных системах в несколько раз (результаты существенно зависят от количества восстанавливаемых точек в облаке).

На основании расчетов по методу БПФ было установлено, что использование поддиапазона СВЧ 10-18 ГГц дает большую производительность расчетов, чем поддиапазон 60-66 ГГц, используемый в настоящее время в подобных задачах. Кроме того, поддиапазон 10-18 ГГц позволяет работать с динамическими объектами – объектами, движущимися со скоростью до 5-6 км/ч. Поддиапазон 60-66 ГГц не позволяет принципиально такого сделать.

На основании полученного радиоголографического изображения человека был разработан физический метод идентификации диэлектрического объекта на его теле. Предлагаемый метод основан на сравнении изображений человека, получаемых в различных спектральных диапазонах – видимом и СВЧ. Схематично сравнение проиллюстрировано на рисунке 4.

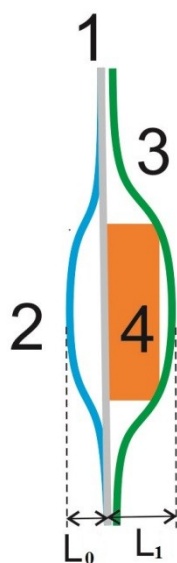


Рисунок 4. Построение изображений в общей системе координат в разных спектральных диапазонах. 1 – положение рассеивающей поверхности, 2 – изображение в СВЧ диапазоне, 3 – изображение в видимом диапазоне, 4 – положение диэлектрика.

Метод анализа радиоголографических изображений основан на том, что диэлектрический объект, находящийся на теле человека, вызывает смещение соответствующего участка радиоголографического изображения (рис.4, 2) на величину L_0 и смещения соответствующего участка видео изображения (рис.4, 3) на величину L_1 в противоположном направлении. Данный анализ позволяет идентифицировать объект по параметрам: объем и

диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость ε диэлектрика рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \left(\frac{L_0}{L_1} + 1 \right)^2 \quad (3)$$

На основе задачи идентификации объекта была исследована возможность классификации объектов, носимых на теле человека, «на условно опасные» и «условно безопасные», что позволяет использовать данную методику применительно к задачам досмотра человека. В диссертационной работе представлены результаты идентификации и классификации объектов с использованием данного метода, интегрированного в программное обеспечение системы АМУ256х4х8.

В третьей главе представлен метод построения радиотомографического изображения диэлектрического объекта, основанный на измерении комплексных амплитуд прошедшего через диэлектрик поля, последовательным применением методов преобразования Фурье и обратных Радоновских проекций. Методом преобразования Фурье (5) измерялось положение приемной антенны относительно передающей в отсутствии и присутствии диэлектрика вдоль отрезка прямой, соединяющего их центры:

$$P(x, y, z) = \sum_{f=0}^{N_f-1} P(x', y', 0) e^{ikR} \quad (5)$$

где $P(x', y', 0)$ – поле на передающем элементе решетки, $P(x, y, z)$ – восстанавливаемое поле в точки приемной антенны, N_f – количество используемых частот, (x, y, z) – координаты точки восстановления, $(x', y', 0)$ – координаты передающего элемента антенной решетки, R – физическое расстояние от передающего элемента до приемной антенны, k – волновой вектор. Удлинение оптического пути, вызванное присутствием диэлектрика, определялось смещением положения максимума функции отношения:

$$A(l) = \frac{P(x, y, z)}{P_0(x, y, z)} \quad (6)$$

где $P(x, y, z)$ и $P_0(x, y, z)$ – восстанавливаемые поля в точке приемной антенны, соответственно в присутствии и отсутствии диэлектрика между передающей и приемной антеннами, l – удлинение оптического пути.

При решении задачи построения радиотомографического изображения было выбрано расположение приемо-передающих элементов, изображенное на рисунке 5.

Измерение удлинения оптического пути, измеряемое для каждой пары приемник-передатчик, составляло профиль удлинения – распределение удлинения оптического пути в плоскости РСА.

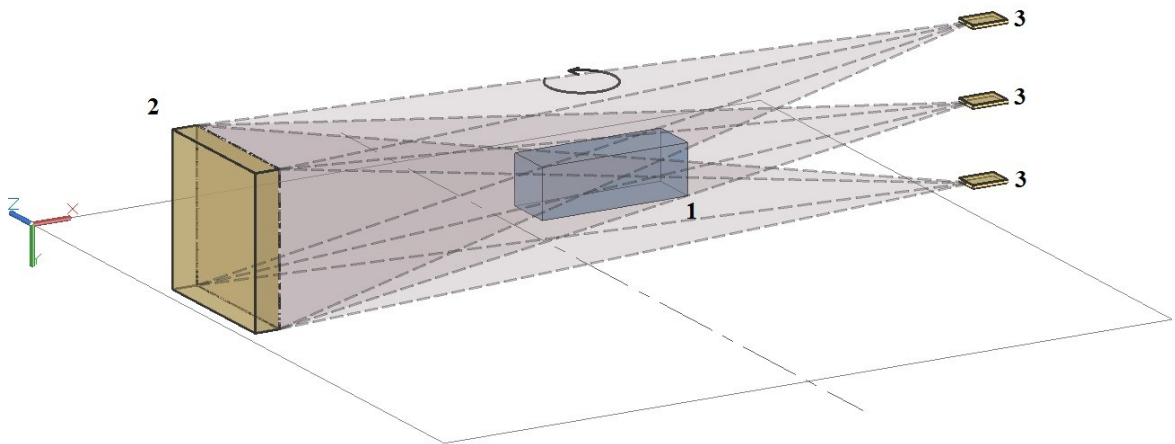


Рисунок 5. Схема экспериментальной установки в избранной системе координат. 1 – исследуемый диэлектрический объект, 2 – РСА, 3 – 3 приемные антенны. Пунктиром отмечены области видимости для пар антенная решетка-приемник.

Для измерения профилей удлинения исследуемый диэлектрический объект поворачивался вокруг вертикальной оси с равномерным шагом по углу. Для каждого положения диэлектрика вычислялся профиль удлинения. Для построения радиотомографического изображения диэлектрика применялся метод обратных радоновских проекций:

$$S(x, y, z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i(s_i, \varphi_i) \quad (7)$$

где $S(x, y, z)$ – суммарная проекция, R_i – обратная радоновская проекция, s_i – плоскость, в которой измеряется профиль удлинения, φ_i – угол поворота.

Функция $S(x, y, z)$ является распределением плотности удлинения оптического пути в исследуемой области пространства.

Эксперименты были проведены на наборе заранее подготовленных диэлектрических образцов. На рисунке 6 представлено сечение трехмерной томограммы плоскостью, в которой расположен диэлектрик, профиль удлинения которого был измерен с 36 ракурсов.

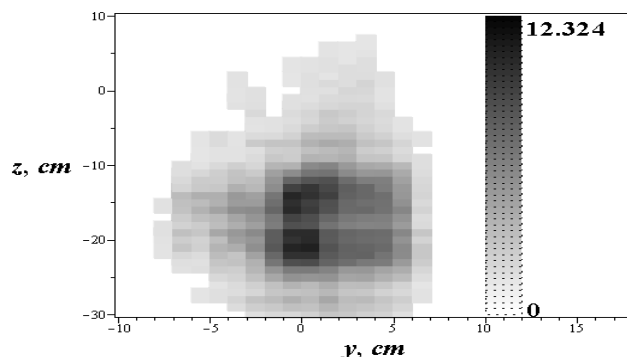


Рисунок 6. Радиотомографическое изображение диэлектрического образца из ПВХ в сечении. На рисунке не представлены значения, не превышающие 10% от максимального значения.

Для идентификации диэлектрического объекта и его ключевых характеристик для задачи идентификации применялся метод трехмерной

сегментации к функции $S(x, y, z)$. Измеряемая диэлектрическая проницаемость соответствовала с заранее измеренной диэлектрической проницаемостью для всех диэлектриков из заранее подготовленного набора.

На основе проделанных экспериментов, была разработана экспериментальная установка, для построения радиотомографического изображения диэлектрика в движении.

Для достижения наибольших размеров контролируемой области – области, находящейся внутри исследуемой зоны, внутри которой определение основных физических параметров диэлектрика происходит с приемлемой точностью; было проведено моделирование, которое рассчитало оптимальное расположение приемо-передающих элементов экспериментальной установки (рис. 7).

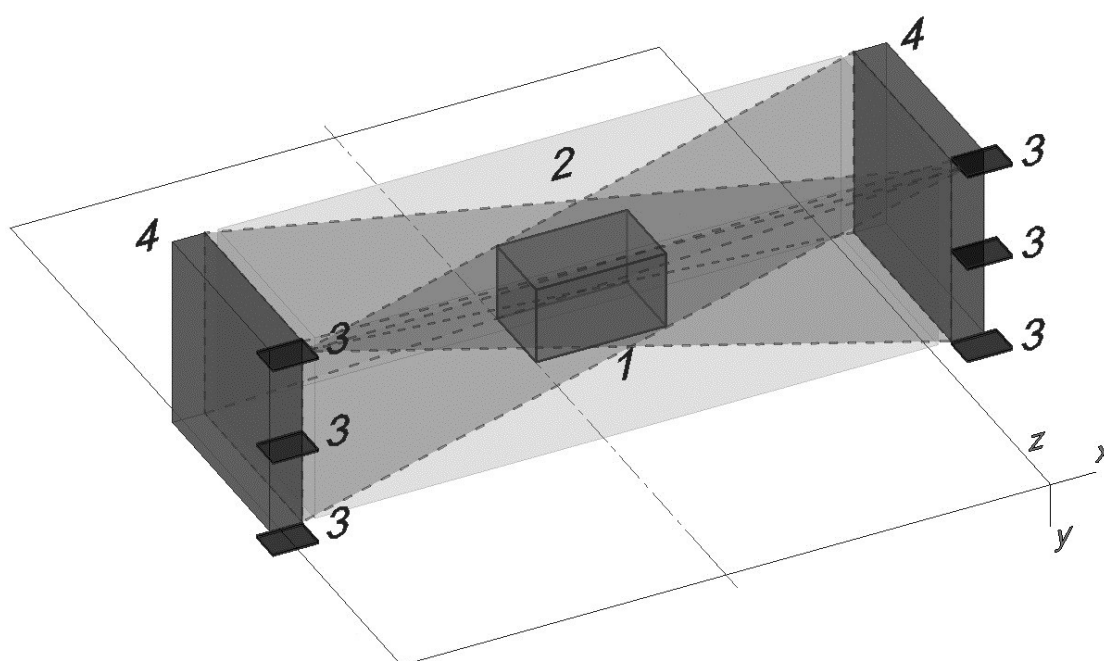


Рисунок 7. Экспериментальная установка для построения движущихся диэлектрических объектов в избранной системе координат. 1 – исследуемый диэлектрик, 2 – исследуемая зона, 3 – 6 приемных антенн, 4 – 2 РСА передатчиков. Пунктиром отмечены 2 пары приемная антенна, РСА, образующие профиль удлинения.

При оптимальном расположении приемо-передающих элементов была решена задача о построении радиотомографического изображения движущейся системы – диэлектрик-оболочка (рис. 8) через исследуемую зону и вычислены основные физические параметры диэлектрика. Оболочка в данной постановке задачи являлась тонким слоем материала, который прозрачен для радиодиапазона длин волн и не прозрачен для оптического диапазона.

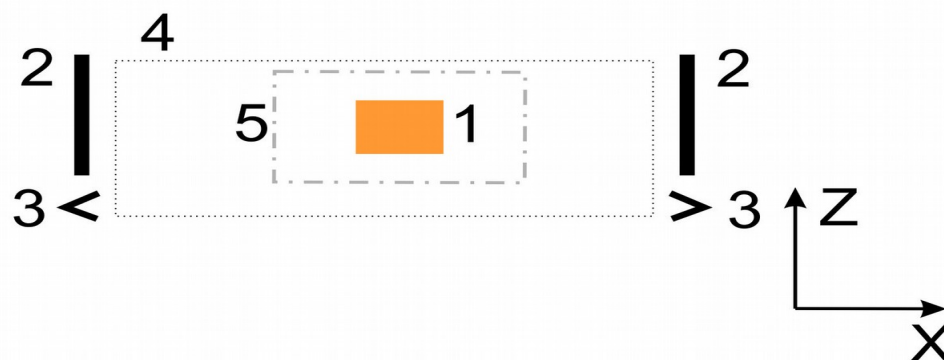


Рисунок 8. Схема движения исследуемого диэлектрика в оболочке через установку в избранной системе координат. 1 – исследуемый диэлектрик, 2 – 2 РСА передатчиков, 3 – 6 приемных антенн, 4 – исследуемая зона, 5 – оболочка.

Эксперименты показали, что для диэлектриков с размерами 15x15x8 см и более, находящимися внутри оболочки, было возможным идентифицировать их ключевые для задачи досмотра физические параметры.

На основании результатов произведенных экспериментов был разработан радиотомографический метод построения и идентификации скрытно провозимых диэлектрических предметов и интегрирован в программное обеспечение систем класса АМУ256: АМУ256x2x6L.

В четвертой главе был установлен критерий опасности на основе многочисленных экспериментов для радиоголографического и радиотомографического методов.

Для радиоголографического метода критерии опасности были следующие:

- Диэлектрическая проницаемость попадает в диапазон [2.3, 4.5] на основании результатов нескольких десятков экспериментов.
- Объем диэлектрика превышает 0.5 л и не превышает 3 л.

Для радиотомографического метода критерии опасности были следующие:

- Диэлектрическая проницаемость попадает в диапазон [2.3, 4.5] на основании результатов нескольких десятков экспериментов.
- Объем диэлектрика превышает 1 л и не превышает 5 л.

Выбранные критерии опасности обусловлены характерными размерами и диэлектрическими свойствами используемых самодельных взрывчатых веществ

С установленными критериями опасности были проведены эксперименты по вычислению вероятностей обнаружения, вероятностей ложного срабатывания (ошибка первого рода) и вероятности пропуска (ошибка второго рода). Установлено, что для радиоголографического метода вероятность обнаружения находится в диапазоне 91-98% и зависит от индекса массы тела человека. Для радиоголографического метода –

вероятность обнаружения находится в диапазоне 87-96% и зависит от геометрического расположения диэлектрика в исследуемой зоне.

Основные результаты работы:

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 10-18ГГц, позволяет эффективно обнаруживать диэлектрики на теле человека размерами от 5 см. Показано, что использование поддиапазона СВЧ 10-18ГГц 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 10-18ГГц, 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 быстродействие, безопасность для здоровья человека и автономность работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации, входящие в перечень ВАК:

1. 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.

2. **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.

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

4. 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.

Патенты РФ:

5. 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.

6. 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.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

7. **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.

8. 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.

9. **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.

10. 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.

11. **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.

12. 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.

13. 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.

14. **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.

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