

На правах рукописи



Федянин Иван Сергеевич

**ЛОКАЦИОННОЕ РАДИОВИДЕНИЕ
С КОНТРОЛИРУЕМЫМ СКАНИРОВАНИЕМ**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре радиофизики

Научный руководитель:

Якубов Владимир Петрович, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой радиофизики ТГУ.

Официальные оппоненты:

Аксенов Валерий Петрович, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,

Кашкин Валентин Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирского федерального университета» (СФУ).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Защита состоится « 13 » декабря 2012 г. в 14³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36, ауд.119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 34а.

Автореферат разослан « 12 » ноября 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета _____



Пойзнер Б.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Глобализация современного мира приводит к тому, что пассажирооборот между городами и странами неуклонно растет. По данным интернета статистика перевозок пассажиров говорит о том, что за последние пять лет общий объем пассажирооборота, только в России, увеличился с 473,3 до 483,9 млрд. пассажиро-километров, причем в основном за счет воздушного транспорта. Это означает постоянное увеличение нагрузки на аэропорты, а следовательно на обслуживающий персонал и службы безопасности. Растет население крупных городов, и основная нагрузка по перевозу местных жителей ложится на городской транспорт, в частности метро. Печально известные события, связанные с терактами в аэропортах и станциях метро, демонстрируют несовершенство современных средств досмотра пассажиров. Проведение массовых мероприятий, по типу олимпийских игр, концертов, футбольных матчей собирает огромное количество людей со всего мира и очевидно такие мероприятия должны проводиться максимально безопасно для желающих их посетить. Поэтому основной задачей для служб безопасности является своевременное выявление граждан с представляющими потенциальную угрозу намерениями, обнаружение и визуализация опасных предметов, в частности скрытых под одеждой, в ручной клади или в багаже.

Очень важно при этом обеспечить быстрый и бесконтактный досмотр, не создавая паники и не задерживая людей. Современные службы безопасности для поиска опасных предметов, чаще всего, используют стационарные рамки металлодетекторов или ручные металлодетекторы, которые, имеют ограниченный спектр применений – они эффективны только для обнаружения металлических предметов и не могут показать форму этих предметов. Наиболее достоверную информацию о скрытых предметах дает рентгеновская интроскопия. Однако, используют интроскопы, в основном, для досмотра багажа, так как рентгеновское излучение потенциально опасно для человека и живых организмов. Радиоволновые томографы миллиметрового диапазона длин волн призваны восполнить существующий пробел в системах контроля. Сейчас эти устройства начинают широко применяться в крупных аэропортах и других общественно значимых местах. Однако, такие устройства остаются пока достаточно громоздкими и дорогостоящими так, что покупать их могут очень крупные компании.

В общем, можно резюмировать, что у современных служб безопасности нет доступного, с точки зрения финансов, и универсального прибора для быстрого досмотра граждан. Очевидно, прибор должен

иметь габариты ручного металлодетектора, быть безвредным для окружающих и способный выводить легко читаемое изображение, т.е. работать в миллиметровом диапазоне длин волн. В данной диссертационной работе проводится попытка реализовать прототип такого устройства, которое было бы способно без вреда для человека бесконтактно «заглянуть» под его одежду с помощью радиоволн. При этом исключается применение дорогостоящей элементной базы, значительно уменьшаются массогабаритные параметры, а быстродействие наоборот возрастает. Этот эффект достигается за счет объединения новой идеи реализации схемы сканирования и нового метода восстановления томографических изображений.

Цель диссертационной работы

Данная работа имеет своей целью создание бесконтактной томографической системы радиовидения на основе объединения в линейную решетку микроволновых доплеровских датчиков (МДД) перемещений, использующей технологии синтеза большой апертуры при произвольном, но контролируемом ручном перемещении решетки вблизи зондируемой сцены неоднородностей.

Задачи диссертационной работы

Для достижения указанной цели в работе ставятся следующие задачи:

1. Определение необходимых требований для создания ручного радиоволнового сканера на основе сравнительного анализа существующих систем досмотра.
2. Теоретическое и экспериментальное обоснование применимости движущихся микроволновых датчиков перемещений для измерения квадратурных составляющих сигнала от неподвижного объекта.
3. Разработка методики и алгоритма обработки радиолокационного сигнала распределенного на равномерно координатной сетке, основываясь на методе синтеза, тестирование алгоритма на численной модели.
4. Поиск возможностей отслеживания пространственных координат центра радиоволнового сканера и разработка алгоритма для получения координат всех датчиков антенной решетки при произвольном движении сканера.
5. Построение и испытание действующего макета радиоволнового сканера в связке с системой слежения за его пространственными координатами, используя специально разработанное для этого программное обеспечение.
6. Применение разработанного алгоритма обработки сигнала к экспериментальным данным, полученным с помощью разработанного

макета радиоволнового сканера. Восстановление изображения тестовых сцен объектов.

7. Разработка метода восстановления изображения тестовых объектов без использования полного отслеживания пространственных координат датчиков решетки.

Методы исследования

Работа основана на получении и обработке данных реальных экспериментов, проведенных на кафедре радиофизики радиофизического факультета Томского государственного университета. В качестве инструмента для проведения экспериментальных исследований использовался собранный автором макет ручного радиоволнового сканера, состоящий из решётки приёмо-передающих доплеровских датчиков движения, работающих на частоте 24 ГГц, и встроенного магнитного устройства слежения Тайваньской фирмы VR-SPACE INC. Сигнал с микроволновых доплеровских датчиков записывался с помощью 14-битового 32-канального АЦП с общей частотой дискретизации 100 кГц. Для синхронного сбора данных с АЦП радиоволнового сканера и системы слежения использовалось специально разработанное программное обеспечение. Для обработки данных были использованы известные методы статистической радиофизики для обработки нестационарных сигналов (теория аналитического сигнала и согласованная фильтрация), а также элементы теории антенн и синтезирования больших апертур с фокусировкой излучения. Автоматическая регистрация данных производилась с помощью программы написанной на языке программирования Delphi, на нем же производилась первичная обработка данных. Последующая томографическая обработка данных производилась с использованием математического пакета MathCad.

На защиту выносятся следующие положения

1. Одна из квадратурных составляющих сигналов, отраженных от неподвижных сосредоточенных целей или контуров распределенных целей, находится дифференцированием выходного сигнала типового микроволнового доплеровского датчика мощностью 40 мВт и работающего на частоте 24 ГГц, при перемещении его с постоянной скоростью.

2. Дополненная магнитным 3D-позиционером линейная решетка из микроволновых доплеровских датчиков, при ручном её перемещении позволяет с использованием алгоритмов интерполяции трёхмерных координат восстанавливать эквидистантную двумерную радиоголограмму сканируемой сцены неоднородностей.

3. Для построения радиоизображения сканируемой сцены неоднородностей по её эквидистантно измеренной (восстановленной) ра-

диограмме достаточно выполнить томосинтез методом согласованной пространственной фильтрации с использованием в качестве опорного сигнала измеренной или вычисленной двумерной аппаратной функции системы.

4. Радиоизображение скрытых неоднородностей, полученное без использования координатных данных 3D-позиционера в области равномерного и прямолинейного относительного движения линейной решетки из доплеровских датчиков, восстанавливается методом согласованной пространственной фильтрации с использованием в качестве опорного сигнала измеренной или вычисленной двумерной аппаратной функции системы.

Достоверность защищаемых положений и других результатов работы

Достоверность первого защищаемого положения подтверждается тем, что результат обработки лабораторных экспериментальных данных при изменении направления движения совпадают между собой с точностью до знака при одном и том же абсолютном значении скорости движения МДД. Наблюдаемое отличие не превышает уровня шумов, т.е. не более чем на 3%.

Достоверность второго защищаемого положения, основывается на том, что экспериментально полученная радиолографическая картина тестовой сцены неоднородностей после интерполяции на равномерную сетку с учетом данных 3D-позиционера отличается от соответствующей картины, численно рассчитанной, не более чем на половину шага расположения антенных элементов, т.е. не более 1 см.

Правомерность третьего защищаемого положения подтверждается результатами восстановления изображения заданной сцены неоднородностей после применения алгоритма томосинтеза к данным как численного, так и натурального экспериментов. Экспериментально подтверждено, что на частоте 24 ГГц обеспечивается совпадение формы и взаимное расположение тестовых объектов с точностью до 1-2 см, что близко к потенциально достижимой точности, определяемой рабочей длиной волны 1,25 см.

Достоверность четвертого защищаемого положения основывается на выводе, сделанном в результате обработки экспериментальных данных без использования данных системы 3D позиционирования. На участке равномерного движения антенной решетки над тестовой сценой неоднородностей, восстановленное изображение неоднородностей имеет разрешающую способность на уровне 2-3 см.

Научная новизна

1. Впервые микроволновые датчики движения, предназначенные для охранных систем и энергосбережения, предложено использовать в качестве приемо-передающих элементов антенной решётки для синтеза большой апертуры.
2. Предложено конструктивное решение расположения МДД в действующем макете портативного ручного радиоволнового сканера для поиска и томографии скрытых объектов, позволяющее увеличить разрешающую способность в поперечном и продольном направлении сканирования не хуже рабочей длины волны.
3. Теоретически и экспериментально обоснован новый способ получения радиоголограммы и восстановления изображения тестовой сцены неоднородностей на основе сканирования с помощью решётки МДД при её перемещениях, контролируемых с помощью 3D позиционера.
4. Впервые алгоритм томосинтеза применен для восстановления изображения, полученного в результате неконтролируемого, но равномерного сканирования с помощью решётки МДД.

Научная ценность защищаемых положений и других результатов работы

1. Результаты работы дают теоретическое обоснование для создания ручного радиоволнового сканера ближнего радиуса действия с использованием доплеровских датчиков, способных обеспечивать пространственное разрешение скрытых объектов с точностью порядка рабочей длины волны.
2. Использование системного таймера точного времени для обработки данных 3D магнитного позиционера позволяет осуществить с точностью до 3 мс взаимную привязку координатных и радиоволновых измерений и на этой основе произвести интерполяцию неэквилидистантных данных на равномерную прямоугольную сетку, что важно для использования быстрых алгоритмов томосинтеза.
3. Использование линейной эквидистантной решетки из МДД совместно с 3D позиционером и алгоритмов интерполяции дает новый метод измерения эквидистантной радиоголограммы при произвольном (ручном) перемещении решетки доплеровских датчиков вблизи исследуемой сцены скрытых объектов.
4. В случае обеспечения достаточно равномерного и прямолинейного движения решетки МДД радиоизображение удовлетворительного качества (на уровне рабочей длины волны) может быть получено без использования точной координатной привязки, что позволяет упростить математическую обработку данных.

Практическая значимость результатов работы

1. Предложенный и реализованный действующий макет ручного радиоволнового сканера на основе решетки из типовых микроволновых датчиков движения, представляет собой портативное устройство и позволяет производить поиск скрытых под одеждой и в ручной клади малоразмерных объектов без вреда для человека, при этом получать изображение деталей формы объектов соизмеримых с рабочей длиной волны.
2. Предложенный способ компоновки элементов антенной решетки увеличивает заполняемость апертуры в поперечном направлении и позволяет повысить разрешающую способность системы в целом, не хуже рабочей длины волны.
3. На основе процедуры преобразования декартовых и угловых координат датчика позиционера получен способ непрерывного контроля пространственных координат для каждого элемента антенной решетки датчиков, относительно произвольно движущейся над областью сканирования и реализовать метод томосинтеза с заявленной точностью восстановления тестовой сцены неоднородностей.
4. При обеспечении относительной равномерности сканирования алгоритм восстановления радиоизображения неоднородностей томосинтезом может быть применен без использования координатной привязки данных, что, в конечном итоге, позволяет удешевить предлагаемое устройство при сохранении приемлемого качества изображения.

Использование и внедрение результатов работы

Все результаты работы были использованы при выполнении следующих проектов министерства науки и образования:

- «Физико-математическая модель радиотомографа», АВЦП № 2.1.2/3339. Проведение фундаментальных исследований в области естественных, технических и гуманитарных наук. Научно-методическое обеспечение развития инфраструктуры вузовской науки. (2009-2010), рук. Якубов В.П.
- «Радиолокационная томография удаленных объектов за диэлектрическими преградами», ФЦП, мероприятие 1.2.2. Контракт № П452, область знаний «Радиофизика, акустика и электроника», (2009-2011), рук. Шипилов С.Э.;
- «Исследование волновых процессов в неоднородных средах и создание основ радиовидения высокого разрешения с использованием метода синтезирования апертуры», Государственный контракт № 14.740.11.0076 на выполнение научно-исследовательских работ «Проведение научных исследований коллективами научно-

- образовательных центров в области радиопизики, акустики и электроники» по теме: (2010-2012), рук. Якубов В.П.;
- «Разработка локационной аппаратуры радиочастотного диапазона для выявления возможно скрытых на теле человека средств терроризма», Хоздоговор с МИРЭА, номер госрегистрации темы (РК): 01201068006, (2010), рук. Якубов В.П.;
 - «Исследование возможности создания томографической системы с использованием электромагнитного и ультразвукового излучения для обнаружения скрытых объектов», Хоздоговор с ИПХЭТ, по контракту от 03 сентября 2010 г. № 09-3-10. Шифр «Штора-1» как составной части Государственного контракта № 158/2010-620к от 19.07.2010 г. (2010-2011), рук. Якубов В.П.;
 - «Фокусировка волновых проекций неоднородных сред в сверхширокополосной радиотомографии скрытых объектов», ЕЗН, Федеральное агентство по образованию, (2009-2011), рук. Якубов В.П.;
 - «Радиоволновой томосинтез неоднородных сред и объектов», ЕЗН, Федеральное агентство по образованию, (2012-2014), рук. Якубов В.П.;
 - «Ручной радиоволновой сканер для поиска скрытых объектов», Инновационный проект по молодежной программе «УМНИК», (2012-2013), рук. Федянин И.С.;

а также в учебном процессе при постановке лабораторных работ в магистерском курсе по радиоволновой томографии по направлению «Радиофизика». Образец ручного радиосканера был представлен на международной выставке «ИНТЕРПОЛИТЕХ-2011», где он в составе комплекса разработок Томского государственного университета был отмечен Золотой медалью. Развитие предложенных методов и алгоритмов легло в основу инновационного проекта по программе «УМНИК».

Апробация результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы были опубликованы в виде 9 статей, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 5-й Конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора (Томск, 2008 г.); 3-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиопизики АПР-2010» (Томск, 2010 г.); 1-й научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2010 г.); 3-й научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием (Томск, 2012 г.); 4-й Международной научно-практической конфе-

ренции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2012» (Томск, 2012 г.).

Личный вклад автора

Совместно с научным руководителем работы д.ф.-м.н. профессором В.П. Якубовым был определён план диссертационной работы, обсуждались и анализировались результаты исследований. Автором, совместно с сотрудниками кафедры обсуждались и разрабатывались варианты конфигурации макетов радиоволновых сканеров. Автор самостоятельно проводил монтаж датчиков решётки, элементов блока усилителей и фильтров, доводил макет до работоспособного состояния, оптимизировал его конструкцию. Самостоятельно проводил испытания сканера и ставил все представленные в работе эксперименты. Автором разработано программное обеспечение для синхронного сбора данных с АЦП устройства и системы 3D позиционирования для последующей томографической обработки экспериментальных данных. Значительную помощь в организации работ, конструировании и обработке результатов экспериментов, оказали следующие сотрудники кафедры радиофизики: к.ф.-м.н. Шипилов С.Э., аспирант Кузьменко И.Ю., аспирант Муксунов Т.Р., Швадленко П.Ф. Постоянное обсуждение с ними состояния исследований способствовало успешному завершению работ. Автор диссертации выражает свою искреннюю благодарность всем упомянутым выше лицам, а также всему профессорско-преподавательскому составу кафедры радиофизики за поддержку и помощь в выполнении работы.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, из них 4 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертации.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит: страниц – 92, рисунков – 44, таблиц – 1. Список литературы – 97 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследования, приведены защищаемые положения, показана научная новизна, отмечается практическая значимость и достоверность полученных результатов, личный вклад, описана структура работы.

В первой главе проведён обзор существующих систем непосредственно применяемых в мире для досмотра граждан в местах их массового скопления. Рассмотрены системы бесконтактного досмотра, такие как рентгеновские интроскопы и металлодетекторы, также радиоволновые системы досмотра и системы пассивного радиовидения. Выявлены основные достоинства и недостатки этих систем, проведен сравнительный анализ и на его основе сделан вывод о необходимости создания нового устройства, объединяющего основные достоинства существующих систем в единой конструкции.

Во второй главе рассматривается принцип работы микроволнового доплеровского датчика, в соответствии с его внутренней схематикой проводится математический расчет выходного сигнала датчика. В смесителе датчика происходит перемножение опорного и принятого сигналов, затем выделяется сигнал с частотой доплеровского сдвига. После прохождения через дифференцирующую цепочку, выходной сигнал имеет следующий вид:

$$U_{\text{вых}} = \frac{dU_{\text{см}}}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{dr}{dt} A_0 A \sin(kr + \varphi) = -\frac{1}{2} \frac{dr}{dt} A_0 S(t),$$

где $k = 2\pi f/c$ – волновое число, $V_{\text{об}}$ – скорость движения датчика относительно отражающего объекта, $r(t) = V_{\text{об}} t$ – расстояние пройденное датчиком за время t .

Множитель $\frac{dr}{dt}$ становится либо положительным, либо отрицательным, в зависимости от того, в прямом или в обратном направлении движется датчик, как правило, сигналы отраженные от одного и того же объекта схожи, но находятся в противофазе. Последнее обстоятельство важно для интерпретации результатов измерений.

При постоянной скорости перемещений выражение, описывающее выходной сигнал МДД, с точностью до постоянного множителя совпадает с квадратурной составляющей принимаемого сигнала

$$S(t) = A \sin(kr + \varphi),$$

которая несет на себе информацию как об амплитуде, так и о фазе сигнала. Из этого следует первое защищаемое положение.

Далее проводится исследование проникающей способности излучения МДД для различных материалов, встречающихся на теле человека или его багаже. Делается описание экспериментальной установки и описываются условия сбора данных, приводятся фрагменты записанных сигналов.

Исходя из условий проведения экспериментов, проводится расчет проникающей способности для различных материалов. С учетом двукратного ослабления излучения слоем материала, получаем, что корень отношения максимального значения амплитуды аналитического сигнала исследуемого материала $\max(Z_m)$ к максимальному значению амплитуды аналитического сигнала металлической пластины $\max(Z_{Me})$, даёт значение коэффициента прохождения на частоте 24 ГГц:

$$W_{24} = \sqrt{\frac{\max(Z_m)}{\max(Z_{Me})}}.$$

В результате, минимальный коэффициент прохождения (передачи), для книги толщиной 2.7 см, имеет значение $W_{24} = 0,7$. Коэффициент прохождения для остальных исследуемых материалов близок к единице. Делается вывод, что в обычных условиях одежда не является серьезной преградой для выбранной в экспериментах частоты 24 ГГц.

В третьей главе проводится описание метода синтезирования, а точнее имитационное моделирование с целью получить отклик на точечную неоднородность, который представляет собой аппаратную функции системы (АФС) в методе согласованной пространственной фильтрации.

Поясним модель формирования АФС. Если локационная система перемещается со скоростью V вдоль оси Oy на некоторой фиксированной высоте H (рисунок 1а), а точечный отражатель находится в точке с координатами $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, 0)$, то принятый в точке наблюдения в момент времени t сигнал записывается как

$$E_0(x, t) = A_0 G^2 \frac{\exp\left\{2ik \left[(x - x_0)^2 + (Vt - y_0)^2 + H^2 \right]^{1/2}\right\}}{\left[(x - x_0)^2 + (Vt - y_0)^2 + H^2 \right]}, \quad (1)$$

где G - диаграмма направленности антенны, A_0 - коэффициент отражения, $k = 2\pi f/c$ - волновое число для излучения с центральной частотой f .

Параметр x здесь соответствует поперечной к направлению движения координате антенной системы, т.е. положению СВЧ датчика в антенной решетке. Направление сканирования показано стрелкой на рисунке 1а. Рассчитанная так функция $E_0(x, t)$ может быть интерпретирована как АФС. На рисунке 1б показан вид функции $\text{Re}\{E_0(x, t)\}$ для то-

речного отражателя $\mathbf{r}_0 = (0,0,0)$ при локационном сканировании решеткой СВЧ датчиков.

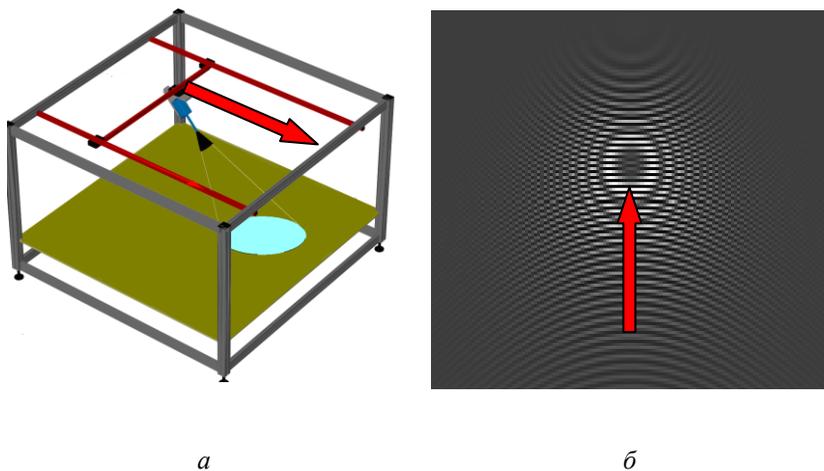


Рисунок 1 – Схема имитационного моделирования (а) и вид рассчитанной АФС (б)

Далее проводится моделирование на подобии реально проведенного эксперимента с тестовой картиной из четырех неоднородностей в виде одного металлического стержня и трёх шариков (рисунок 2а).

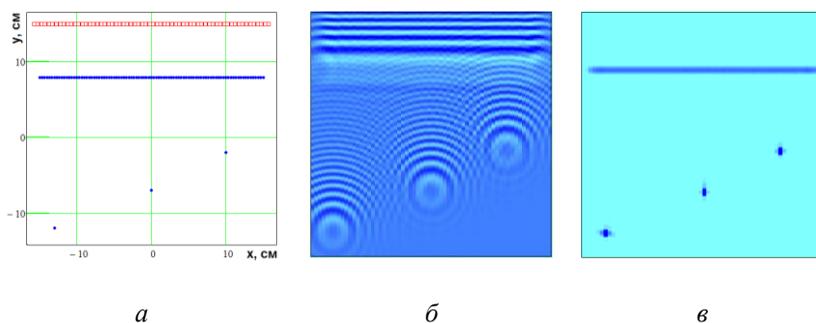


Рисунок 2 – Результаты имитационного моделирования:
а – исходная сцена из 4-х неоднородностей,
б – решение прямой задачи, в – решение обратной задачи

На рисунке 2б показано решение прямой задачи – расчет радиолокационной картины для выбранной сцены неоднородностей. Отчетливо наблюдается явление интерференции сигналов приходящих от всех 4-х объектов: в верхней части картины видны следы отражений от стержня, а ниже – следы точечных неоднородностей. Важно, что при расчете учтено влияние диаграммы направленности СВЧ датчиков. Это проявляется в несимметрии распределения интенсивности отражений в верхней и нижней частях для точечных неоднородностей.

Обработка локационного сигнала $E(x, t)$ для случая сложной распределенной цели может быть проведена с использованием технологии радиолокации с синтезированной апертурой (РСА), согласно которой достаточно выполнить обратную компьютерную фокусировку принятого излучения или, что равнозначно, провести двумерную согласованную фильтрацию с использованием АФС. Эта операция выполняется с использованием операции двумерной свертки с комплексно сопряженной АФС:

$$W(x, y = Vt) = E(x, t) * E_0^*(x, t). \quad (2)$$

На рисунке 2в показан вид получающейся в результате функции $|W(x, y)|$. Видно, что все отражатели достаточно хорошо локализируются именно там, где они были изначально заданы. Причина достигнутого эффекта простая – РСА-технология обеспечивает фокусировку излучения с большой апертурой, равной размеру области сканирования, точнее, размеру пятна, которое засвечивается диаграммой направленности на зондируемой поверхности. Возникает типичная ситуация – чем шире диаграмма направленности, тем более размыто исходное локационное изображение, но тем лучше разрешение при использовании РСА-технологии для его обработки.

С целью проверки разрешающей способности описанного метода синтезирования, проводится эксперимент, с помощью специально собранной установки, основой которой является высокоточный инкрементный энкодер, а тестовым объектом – линейка. Применяя описанный алгоритм обработки сигнала, было получено одномерное радиоизображение линейки (рисунк 3).

Исходя из полученного результата, сделан вывод о предполагаемой разрешающей способности излучения датчиков антенной решетки и возможности визуализации достаточно мелких предметов с размерами вплоть до 1-2 см.

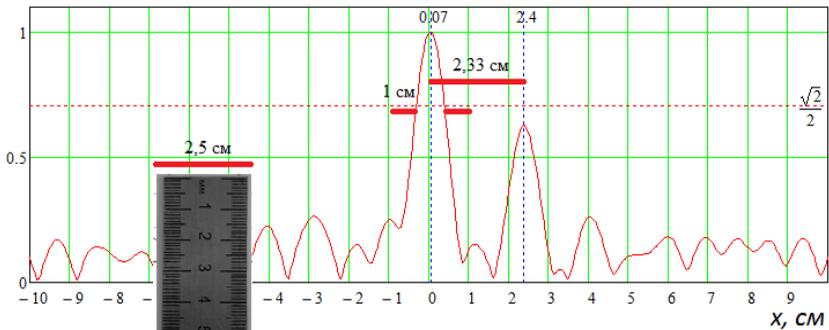


Рисунок 3 – Одномерное радиоизображение линейки

В четвертой главе описываются этапы развития (оптимизации) конструкции радиоволнового сканера, приведены основные проблемы, с которыми пришлось столкнуться в ходе работы. Приведена принципиальная схема предварительной обработки сигнала, которая позволила существенно увеличить чувствительность датчиков решетки и уменьшить уровень помех. Пример окончательного варианта тестовой конструкции макета радиоволнового сканера, в виде двух рядов датчиков, показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Решетка из двух рядов приемо-передающих датчиков

На рисунке 5 показана задействованная в экспериментах система 3D позиционирования сканера. Далее описан метод расчёта траектории движения каждого датчика решетки в отдельности, исходя из шести регистрируемых координат приемника позиционера прикрепленного на корпусе сканера.

Приведена тестовая сцена из четырех неоднородностей (одного металлического стержня и трёх шариков, рисунок ба) и показан результат натурального эксперимента – радиоволновая голограмма тестовой сцены и сделан вывод о втором защищаемом положении (рисунок бб).

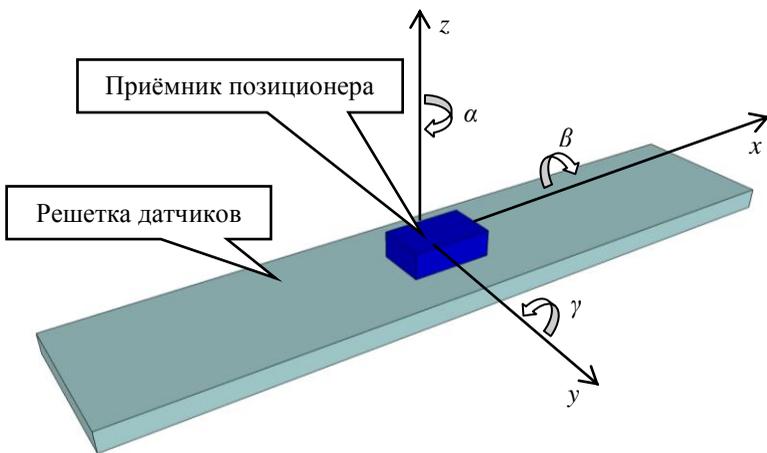
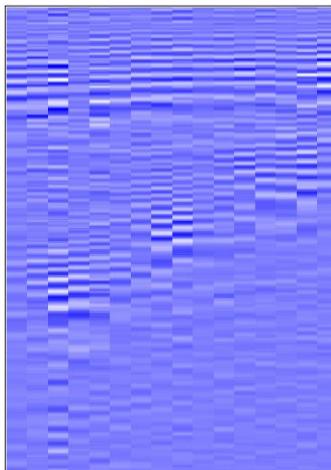
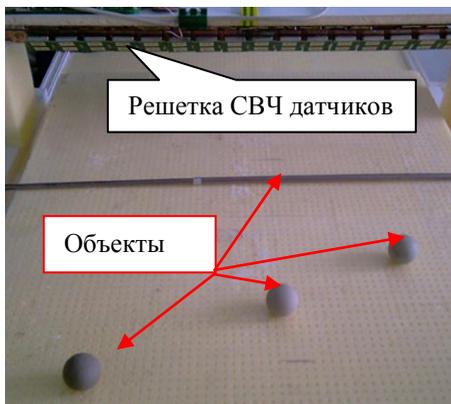


Рисунок 5 – Угловые повороты линейной решетки СВЧ датчиков



a

б

Рисунок 6 – Условия проведения экспериментальных исследований:
 а – тестовая сцена объектов, б – волновая проекция тестовой сцены

Полученная радиоволновая голограмма может быть использована для восстановления аппаратной функции системы (АФС). В качестве АФС может быть взято одно из сечений полученной картины, соответствующее отклику на точечный объект. В качестве такового был взят центральный шарик.

Пример соответствующего сечения полученной картины показан кривой 1 на рисунке 7а. Первая часть этой кривой (при меньших значениях y) относится к отклику на центральный шарик тестовой сцены, а вторая часть (при больших значениях y) относится к отклику на металлический стержень.

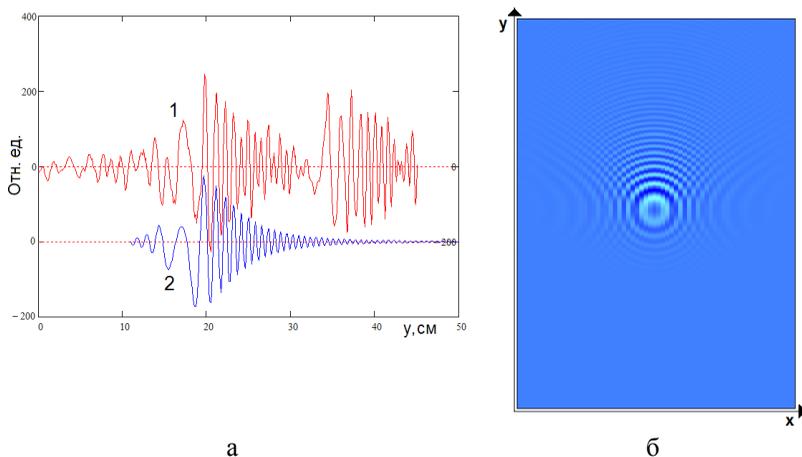


Рисунок 7 – К восстановлению аппаратной функции (АФ):
 а – распределение сигнала центрального датчика вдоль оси y
 (1 – результат измерений, 2 – расчет АФ);
 б – восстановленная двумерная АФ

Приведенное сечение, точнее говоря, фрагмент, относящийся к центральному шарикку тестовой сцены, мы интерпретируем как сечение АФС. Сопоставляя этот фрагмент с функцией (1) можно восстановить идеальный вид АФС. Полученная так идеальная АФ имеет сечение, показанное кривой 2 на рисунке 7а. Двумерный вид самой АФ (вещественная часть) показан на рисунке 7б. Заметим, что восстановленная АФ системы подобна АФ, приведенной на рисунке 1б при численном моделировании.

Найденная АФС реальной системы позволяет по формуле (2) восстановить распределение неоднородностей тестовой сцены. Только в

данном случае под $E(x, y)$ понимается редуцированные экспериментальные данные. Результат восстановления распределения неоднородностей тестовой сцены приведен на рисунке 8а. Была использована сплайн интерполяция для повышения числа точек в поперечном сечении с 16 до 64, т.е. в 4 раза. Без использования интерполяции повышение поперечного разрешения можно было бы достигнуть путем уменьшения шага следования СВЧ датчиков. Далее делается вывод о третьем защищаемом положении.

Следующим этапом развития теории сканера, является попытка избавиться от использования системы 3D позиционирования, но с учетом равномерного движения сканера. Постоянная средняя скорость позволяет пересчитать временную развертку в координатную развертку вдоль направления движения решетки СВЧ датчиков. Далее достаточно применить процедуру томосинтеза с найденной АФ. Результат показал хорошее восстановление изображения неоднородностей в области, где скорость перемещения сканера была приблизительно равномерной. В этой области разрешение ухудшается до 2-3 см, но особенно хуже в области неравномерности движения (рисунок 8б). Этот вывод вошел в четвертое защищаемое положение.

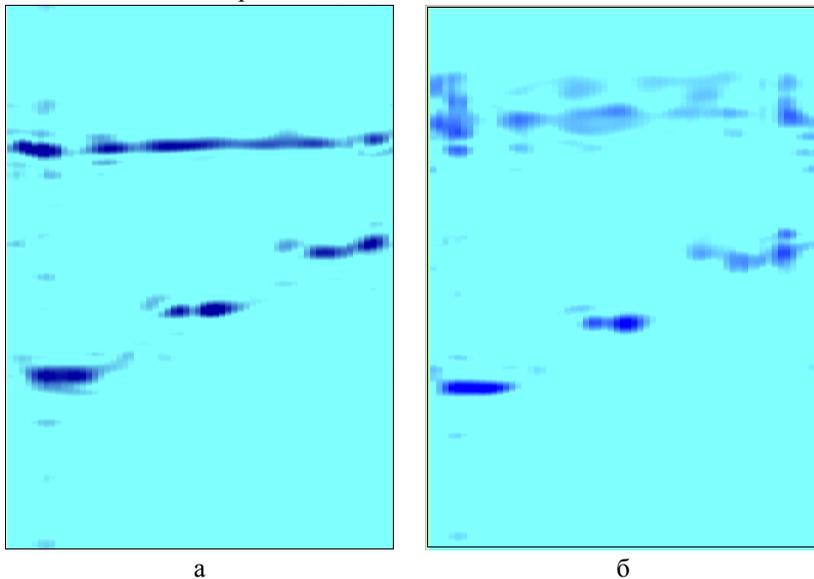


Рисунок 8 – Восстановленное изображение тестовой сцены:
а – с координатной привязкой, б – без координатной привязки

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертационной работы:

1. Проведен сравнительный анализ существующих средств досмотра граждан и их багажа. Основные достоинства и недостатка наиболее популярных средств досмотра позволили определить критерии построения для нового прибора досмотра граждан. Так основными критериями стали: безопасность, скорость досмотра, простота использования и качество определения скрытых объектов. Сформулирована задача создания ручного радиоволнового сканера.
2. Теоретически и экспериментально продемонстрирована пригодность типовых микроволновых датчиков движения в качестве приемопередающих радиомодулей для построения антенной решетки.
3. Теоретически обоснованно применения метода синтезирования апертуры для обработки сигнала, получаемого от множества датчиков, распределенного по координатной сетке. Результатом моделирования стало улучшенное качество изображения.
4. Показаны этапы оптимизации действующего макета сканера. При этом каждый последующий вариант устраняет недостатки предыдущего макета. Результатом стал макет с встроенным блоком усилителей и фильтром сигнала. Это позволило увеличить отношение сигнал-шум на выходе датчиков решетки.
5. Проведен поиск наиболее подходящей системы слежения для определения координат сканера в пространстве, в результате чего предложено использовать один из наиболее точных магнитных позиционеров зарубежного производства.
6. Написано программное обеспечение, позволяющее синхронизировать данные с АЦП и позиционирующего устройства.
7. Разработан алгоритм, позволяющий из данных позиционера рассчитывать координаты всех датчиков антенной решетки.
8. Проведен эксперимент и применен алгоритм для обработки полученных данных, основанный на методе синтезирования апертуры. Получено качественное изображение тестовых объектов с точностью до 1 см. Продемонстрирована пригодность данного метода для обработки сигнала от множества МДД.
9. Предпринята попытка упрощения математического обеспечения радиосканера, в результате чего был сделан вывод о возможности построения изображения без использования позиционирующего устройства. В этом случае обязательным условием остается равномерность движения антенной решетки, т.е. движение с постоянной скоростью и неизменным углом наклона сканера. Точность удалось сохранить око-

ло 2-3 см. Обработка эксперимента, подтвердила данное предположение.

Сделан вывод о инновационности и перспективности предложенного метода проведения сканирования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Федянин И.С., Якубов В.П., Швадленко П.Ф. Использование доплеровских датчиков для локационной томографии скрытых объектов // Известия вузов, Физика, 2010, т. 53, № 9/2, С. 92-93.
2. Федянин И.С., Якубов В.П., Шипилов С.Э., Клоков А.В. Радиотомография по неполным данным // Контроль. Диагностика, 2011, № 11, С. 51-54.
3. Федянин И.С., Кузменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Якубов В.П., Шипилов С.Э., Козлов А.В. Система радиовидения на основе решетки микроволновых датчиков // Контроль. Диагностика, 2012. С. 141-145.
4. Федянин И.С., Кузьменко И.Ю., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Радиовидение с использованием микроволновых доплеровских датчиков. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012, т. 55, № 9, - С. 220-221.

Статьи в сборниках статей и трудов конференций

5. Федянин И.С., Швадленко П.Ф. Доплеровская радиотомография скрытых объектов // Сб. материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника», Национального исследовательского Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 89-90.
6. Федянин И.С., Швадленко П.Ф. Метод синтезирования в задаче радиовидения скрытых объектов // Сб. материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Информационно-измерительная техника», Национального исследовательского Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 93-94.
7. Федянин И.С., Якубов В.П., Шипилов С.Э., Клоков А.В. Радиотомография по выборочным данным// Сборник научных трудов I Всероссийской научно-практической конференции по Инновациям в нераз-

рушающем контроле с международным участием «Инновации в неразрушающем контроле SibTest» / под ред. В.А.Клименова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 г. – с.144-147.

8. Федянин И.С., Кузьменко И.Ю., Шпилов С.Э., Якубов В.П. Радиовидение с использованием микроволновых доплеровских датчиков // Сборник материалов III Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 г. – с.106-110.
9. Федянин И.С., Клоков А.В. Доплеровский метод измерения диэлектрической проницаемости влажных материалов // Труды 5-й конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2008. С. 62.