

На правах рукописи



Сатаров Раиль Наилевич

**РАДИОВОЛНОВАЯ ТОМОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРИНЦИПА ТАКТИРОВАННЫХ РЕШЕТОК**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», на кафедре радиофизики.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Якубов Владимир Петрович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук
Шипилов Сергей Эдуардович

Официальные оппоненты:

Кашкин Валентин Борисович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», кафедра радиотехники, профессор

Банах Виктор Арсентьевич, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория распространения радиоволн, заведующий лабораторией

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

Защита состоится 25 декабря 2014 г. в 14³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36, ауд.119 (Главный корпус, ауд. 119).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Автореферат разослан « ____ » октября 2014 г.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:

http://www.tsu.ru/content/news/announcement_of_the_dissertation_in_the_tsu.php

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пойзнер Борис Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Последнее время в области радиофизики наметился большой интерес к проблемам радиолокации объектов, скрытых за различными преградами. Прежде всего, это вызвано проблемами обеспечения безопасности при проведении спецопераций, например, по обезвреживанию террористов, скрывающихся в зданиях. Положение особенно осложняется при захвате заложников, когда точное определение наличия людей и их состояния является насущной проблемой. Не менее перспективным направлением сверхширокополосной радиолокации является создание радиолокаторов малой дальности для обнаружения людей в завалах. Использование высокой несущей частоты в сверхширокополосных системах (3 — 10 ГГц) дает возможность конструировать направленные сверхширокополосные антенны, габариты которых не превышают 20-30 см, что позволяет изготавливать портативные автономные приборы, пригодные для использования одним человеком. Такие радиолокаторы позволяют по мельчайшим движениям, характерным для человека, определять его наличие за оптически непрозрачными преградами.

Обнаружение пустот и различных подслушивающих устройств в стенах и других строительных конструкциях — также важная задача. Можно ещё больше расширить список ситуаций, когда необходима визуализация скрытых объектов. Например, в досмотровых системах безопасности использование рентгеновских установок не всегда допустимо. Более безопасным средством является использование радиоволн.

В работе используются сверхширокополосные (СШП) сигналы, что обусловлено их преимуществами относительно узкополосных, а именно: существенно более высокое разрешение, увеличение полосы пропускания позволяет СШП радарам получать больше информации о цели, благодаря этому стало возможным не только обнаружение, но и распознавание малоразмерных частей объектов, что позволяет получать, так называемый, «портрет цели». Коротко-импульсные сигналы позволяют эффективно бороться с проблемами многолучевого распространения и приема. Это приводит к более стабильной работе канала радиосвязи или радара в условиях, при которых работа узкополосных радаров невозможна.

Настоящая работа основана на использовании оригинальных результатов собственных исследований автора по СШП томографии. Выбор темы и методов исследований продиктован стремлением дальнейшего развития известных результатов предшествующих отечественных и зарубежных работ.

Огромное количество уже существующих методов дифракционной томографии не всегда способны решать задачи для систем безопасности. Решение подобных специфических и нестандартных задач обнаружения объектов требует создания и разработки специального математического аппарата, с использованием активной локационной томографией.

Целью диссертационной работы ставится создание бесконтактной томографической системы радиовидения на основе развития технологии тактированной антенной решетки, использующей СШП излучение, и метода синтезирования большой апертуры совместно с фокусировкой.

Для достижения указанной цели в работе ставятся следующие задачи диссертационной работы:

1. Разработка методики и алгоритмов проведения радиолокационных измерений с использованием СШП импульсных сигналов без несущей.
2. Разработка метода бесконтактных СШП радиолокационных измерений для определения коэффициента преломления и толщины диэлектрической преграды в виде плоского слоя.
3. Разработка метода фильтрации СШП сигналов, отраженных от неподвижных объектов, с целью выделения движения человека за диэлектрической преградой.
4. Разработка метода регистрации колебаний, характерных для дыхания человека.
5. Определение необходимых требований для создания радиоволнового томографа на основе использования технологии тактированных антенных решеток применительно к СШП излучению.
6. Построение и испытание действующих макетов тактированных антенных решеток для радиоволнового томографа.

7. Создание специализированного программного обеспечения для управления разработанными макетами тактированных антенных решеток.
8. Разработка программного обеспечения для восстановления томограмм с использованием разработанных макетов тактированных антенных решеток.
9. Комплексное тестирование разработанного программно-аппаратного комплекса для выполнения СШП томографии на тестовых объектах.

Методы исследования.

При разработке алгоритмов обработки радиолокационных сигналов использовались методы синтеза большой апертуры и пространственно-временной фокусировки, а также известные методы статистической радиофизики для приема сигналов в условиях шумов. Численное моделирование, регистрация и обработка данных проводились в среде CST Microwave Studio, MathCad и Matlab. Экспериментальная часть работы основана на использовании сканеров, СШП антенн и решеток из них, разработанных при активном участии автора диссертации на кафедре радиофизики радиофизического факультета Томского государственного университета. В качестве инструмента для проведения экспериментальных исследований использовался собранный автором макеты линейного и планарного радиоволновых томографов, состоящих из решёток приёмо-передающих СШП элементов, работающих в диапазоне частот 2-12 ГГц. В качестве приемного устройства использован СШП стробоскопический приемник АКИП-4112. Автоматическая регистрация и обработка данных производилась под управлением универсального быстродействующего компьютера общего назначения с помощью написанного автором специального программного обеспечения.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Минимальный достаточный набор проекций исследуемой сцены неоднородностей, получаемый с использованием тактированной антенной решетки, состоящих из малогабаритных СШП антенн, размерами не превышающих пространственную протяженность импульса, достижим за счет всевозможных комбинаций пар приемных и

передающих антенн. Полученный набор проекций соответствует антенной решетке с плотностью заполнения совмещенными приемопередающими элементами, вдвое превышающей плотность заполнения исходной решетки. Послойная структура трехмерного распределения неоднородностей восстанавливается суммированием по дифракционным гиперболам.

2. Задача определения показателя преломления n и толщины d диэлектрического слоя разрешима в приближении геометрической оптики за счет определения запаздывания импульсов, отраженных от передней и задней границ слоя t_1 и t_2 , при двухпозиционном измерении. Значение n и d находятся в результате решения уравнения с полиномом четвертой степени, к которому сводятся два алгебраических уравнения, содержащих в правой части t_1 и t_2 .

Достоверность защищаемых положений и других результатов работы подтверждается согласием полученных теоретических результатов с данными разносторонних численных моделей и результатами обработки прямых экспериментов по зондированию различных диэлектрических и металлических тестовых объектов в воздухе и скрытых за диэлектрическими преградами. Экспериментально подтверждено, что при использовании полосы частот от 2 до 12 ГГц обеспечивается совпадение формы тестовых объектов и восстановленного изображения с точностью до разрешающей способности системы. Метод определения коэффициента преломления с помощью двухпозиционного зондирования был применён к результатам численных и натурных экспериментов. Получено соответствие расчетного значения коэффициента преломления преграды и смоделированного в численном эксперименте. Коэффициент преломления, определённый по результатам натурных измерений для газобетона составил 1.5 ± 0.1 , а толщина 10 ± 0.1 см.

Научная новизна заключается в следующем:

Предложено искать решение задачи определения параметров диэлектрического слоя, зондируемого СШП импульсами, за счет определения их запаздывания.

Для детектирования движущихся за преградами объектов предложен оригинальный дифференциально-разностный метод на основе спектрограммы радиолокационных разностных СШП сигналов при последовательном зондировании объектов.

Как альтернатива механическому сканированию, предложено использование режима тактирования СШП антенной решетки, заключающегося во всевозможной комбинации стационарных пар приемной и передающей СШП антенн из всего их множества.

Разработан метод комплексирования данных тактированных измерений для восстановления радиотомограмм скрытых тестовых объектов.

Научная ценность защищаемых положений и других результатов работы заключается в следующем.

1. Первое научное положение дает теоретическое обоснование создания радиоволнового томографа ближнего радиуса действия с использованием СШП импульсного излучения, способного обеспечивать пространственное разрешение скрытых объектов с точностью порядка пространственной протяженности импульса.
2. Благодаря сведению задачи измерения параметров диэлектрического слоя к решению системы двух уравнений, в правую часть которых входят относительные задержки зондирующих импульсов, искомые параметры определяются однозначно.

Практическая значимость результатов работы:

Принцип тактирования сверхширокополосных (СШП) антенных решеток, состоящий в последовательном электронном переборе пары активных передающих и приемных антенн, позволяет ускорить снятие необходимых для дистанционной томографии локационных проекций исследуемой сцены неоднородностей по сравнению с последовательным механическим сканированием при сохранении взаимного влияния антенных элементов на заданном минимально допустимом уровне. При этом время полного цикла тактирования решетки из 6 передающих и 16 приемных СШП антенн в линейной и планарной исполнении не превышает 5 с, что дает выигрыш по сравнению с механическим сканированием более чем на 2 порядка, а взаимная развязка антенн обеспечивается на уровне -60 дБ.

Совместное использование данных тактированных СШП радиолокационных измерений исследуемой сцены неоднородностей и метода взвешенного суммирования по дифракционным гиперболам позволяет восстановить её томограмму – послойную структуру трехмерного распределения неоднородностей. При этом использование импульсов длительностью 200 пс обеспечивает пространственное разрешение не хуже 3 см.

В результате работы было сконструировано четыре действующих макета радиоволновых томографов на базе СШП тактированных антенных решеток.

Внедрение результатов диссертационной работы.

Результаты были использованы при выполнении следующих проектов:

- «Исследование волновых процессов в неоднородных средах и создание основ радиовидения высокого разрешения с использованием метода синтеза апертуры». Государственный контракт от 06 сентября 2010 г. №14.740.11.0076. Шифр «2010-1.1-123-085-015», рук. Якубов В.П.
- «Физико-математическая модель радиолокационного томографа» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала Высшей школы (2009-2011 годы)». Проект №2.1.2/12874, рук. Якубов В.П.
- «Радиолокационная томография удаленных объектов за диэлектрическими преградами» Государственный контракт от 31 июля 2009 года № П452, рук. Шипилов С.Э.
- «Фокусировка волновых проекций неоднородных сред в сверхширокополосной радиотомографии скрытых объектов». Тематический план ТГУ 2009-2011 гг. Шифр 1.10.09, рук. Якубов В.П.

На данный момент результаты научных работ Сатарова Р.Н. представлены на **8 выставках**, из которых 3 международного уровня:

- Международная выставка «Интерполитех-2011»: получена золотая медаль за разработку комплексной системы радиоволновой томографии скрытых объектов.

- Международная выставка «Радиофизика и электроника. РиЭ-2012» : получена золотая медаль за разработку «Тактированная сверхширокополосная антенная решетка для радиовидения за преградами».
- Международная выставка «Радиофизика и электроника. РиЭ-2013»: получена золотая медаль за разработку «Переносной импульсный радиотомограф».
- «Качество товаров и услуг «Евразия-2011» : получена золотая медаль за разработку «Радиолокационная томография удаленных объектов за диэлектрическими преградами»
- «Сибирские Афины» 2011: получена золотая медаль за разработку «Комплексная система радарной томографии скрытых объектов».
- «Сибирские Афины» 2012: получена золотая медаль за разработку «Сверхширокополосный радиоволновый томограф скрытых объектов».
- III Всероссийская научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии 2012» : диплом второй степени за разработку «Коммутируемая СШП антенная решетка для радиовидения»
- IV Всероссийская научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии 2013» : диплом первой степени за разработку «Малогабаритная переносная система трехмерного радиовидения».

Кроме того, в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Оформлен режим ноу-хау «Технология создания антенной решетки для радиотомографии» (Приказ по ТГУ №499 от 13.09.2013 г.).
2. Образовано при Томском государственном университете малое инновационное предприятие ООО «Радиовидение» для реализации результатов интеллектуальной деятельности (изобретений, полезных моделей).

3. Выполнен проект по программе УМНИК «Разработка программного обеспечения системы радиоволнового поиска живых людей за препятствиями». Госконтракт №9545р/14200 от 04.07.2011 г., рук. Сатаров Р.Н.

Апробация работы. По материалам диссертации опубликовано 14 работ, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий.

Также основные положения и результаты докладывались на следующих конференциях:

3-я Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2010» (Томск, 2010 г.); 4-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2012» (Томск, 2012 г.); 5-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2013» (Томск, 2013 г.); 3-й научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием (Томск, 2012 г.); 4-й научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием (Томск, 2013 г.); 5-й научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием (Томск, 2014 г.);

3-я всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2014); 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014).

Личный вклад автора.

Все основные теоретические и практические результаты диссертационной работы получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии в качестве основного исполнителя. Так автором диссертации проведены: постановка задач, определение схем измерений, построение численных моделей решения прямых задач, разработка алгоритмов решения обратных задач, построение конструкций лабораторных макетов, подборка комплектующих, проведение экспериментов с исполь-

зованием СШП измерений, а также анализ полученных результатов диссертации.

Определение направления и выбор методов исследований осуществлено научным руководителем профессором Якубовым Владимиром Петровичем. Совместно с научным консультантом доцентом Шипиловым Сергеем Эдуардовичем проведены: численное моделирование с применением пакета программ MathCad, CST Microwave Studio, обсуждение идей и методов постановки и методики проведения экспериментальных и теоретических исследований. Разработаны четыре макета радиоволновых томографов. Научный консультант является соавтором всех основных публикаций автора диссертации.

Автор диссертации выражает свою искреннюю благодарность научному руководителю и научному консультанту за большую непосредственную помощь в выполнении диссертационной работы, а также всему коллективу кафедры радиофизики ТГУ и отделению радиофизики и электроники СФТИ ТГУ за внимание и полезные обсуждения в ходе работы над диссертацией.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Общий объём диссертации 149 страниц машинописного текста, в том числе 176 рисунков, библиографический указатель из 93 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задач, поставленных перед диссертационной работой, описаны цели исследования, приведены защищаемые научные положения, отражена научная новизна, показано практическое применение и дана общая характеристика диссертационной работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору литературы с описанием действующих приборов и установок для решения задач томографии. Представлены предполагаемые методы, используемые автором и полученные им результаты. Указаны основные недостатки и отличительные преимущества.

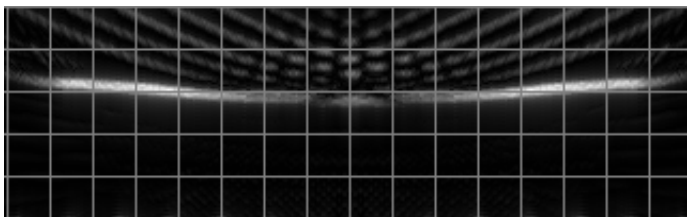
Во второй главе проводится исследование основных методов фокусировки: суммирование по дифракционным гиперболам, групповая и двухтактная фокусировки. Представлено приближенное решение задачи томографии получаемое при достаточном объеме зарегистрированных данных и коротких зондирующих импульсах:

$$F(r) \equiv \sum_j S(\rho_j, t = 2 \frac{|r - \rho_j|}{c}) \sim \Delta \varepsilon(\rho, z),$$

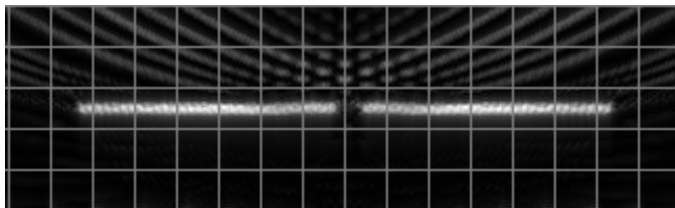
где $\Delta \varepsilon$ - распределение возмущений диэлектрической проницаемости, а $S(\rho, t)$ - набор всех принятых СШП сигналов.

Полученное решение по сути своей представляет собой некое интерференционное поле, имеющее максимумы в точках истинного положения точек рассеяния. В других точках сигналы будут складываться со случайной задержкой, и там будут наблюдаться более низкие значения сфокусированного поля. Результат тем лучше, чем больше независимых слагаемых участвует в фокусировке. Записанное решение обладает исключительной простотой, но реализация его требует больших аппаратных ресурсов, поскольку суммирование сигналов приходится осуществлять для каждой точки фокусировки. Использование быстрых алгоритмов позволяет ускорить эту процедуру.

Так же проведена оценка пространственного разрешения. Так показана важность учета влияния преграды при осуществлении фокусировки излучения за диэлектрический слой. Показано, что если не учитывать задержки в слое, то при фокусировке излучения экран, состоящий из точечных объектов, становится выгнутым, а границы отверстия посередине сильно размыты. Учет влияния позволяет устранить эти искажения, а также повышает разрешение радиоизображения.



а)



б)

Рисунок 1 – Радиоизображение сечения экрана с отверстием, восстановленное при имитационном моделировании без (а) и при учете (б) запаздывания в слое

Как следствие становится актуальной задача определения параметров преграды для последующего устранения ее влияния. Показано, что для точного определения неизвестных параметров, достаточно информации, полученной только в двух ракурсах – когда приемник совмещен с передатчиком и когда разнесен. Этот результат составляет основу второго защищаемого положения.

В третьей главе приводятся результаты численного моделирования по проверке разработанных методов и алгоритмов визуализации зондируемого тестового объекта, изображенного на рисунке 2, при круговом механическом сканировании для различных вариантов заполнения апертуры (рисунок 3). Результат численного моделирование представлен на рисунке 4.

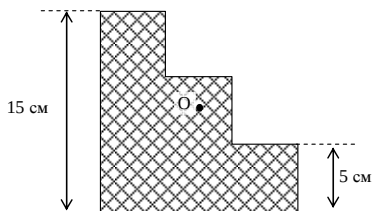
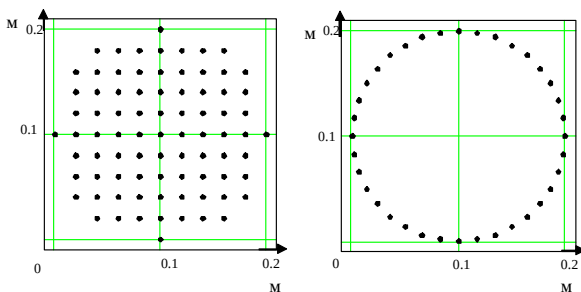
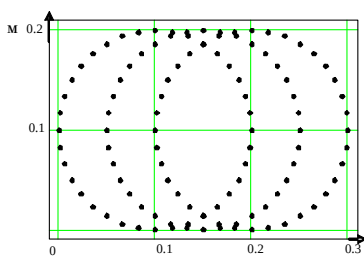


Рисунок 2– Тестовый объект



а)

б)



в)

Рисунок 3 – Варианты заполнения апертуры



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Радиоизображение тестового объекта для различного заполнения апертуры

Проведенное численное моделирование подтвердило работоспособность предложенного подхода по восстановлению формы объектов, что позволяет перейти к натурному эксперименту. Можно сделать вывод, что качество изображения тем лучше, чем более полно заполнена синтезируемая апертура.

В ходе эксперимента синтезировалась апертура по результатам измерений отраженных от тестового объекта сигналов на четырех окружностях, сдвинутых друг относительно друга на 5 см аналогично системе, изображенной на рисунке 3в. Шаг перемещения по углу составлял $4,5^\circ$. Таким образом, за один оборот сканирующей системы реализовывалось 80 осциллограмм. К экспериментальным данным был применен подход устранения помех, основанный на фильтрации постоянных составляющих сигнала на каждом временном отрезке принятого сигнала с учетом информации о сигналах, полученных при других углах сканирования.

$$S_{\phi}(t, \varphi) = S(t, \varphi) - \langle S(\varphi) \rangle,$$

где $S_{\phi}(t, \varphi)$ – отфильтрованный сигнал, $S(t, \varphi)$ – регистрируемый сигнал, $\langle S(\varphi) \rangle$ – постоянная составляющая, полученная при других углах сканирования.

Сравнение осциллограмм при зондировании без преграды и с преградой после фильтрации показывает эффективность предложенного алгоритма фильтрации, но при этом заметно, что локационный отклик от объекта является более размазанным. Это приводит к ослаблению контрастности восстанавливаемого радиоизображения. Для устранения этого явления был использован алгоритм винеровской фильтрации с регуляризацией. Цифровая фильтрация выполняется фильтром с передаточной функцией:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)^*}{X(\omega)X(\omega)^* + \alpha},$$

где $X(\omega)$ – спектр опорного сигнала, α – параметр регуляризации, а символ «*» обозначает комплексное сопряжение. Далее спектры принятых сигналов перемножаются с передаточной функцией винеровского фильтра. В итоге сигналы на границах объекта становятся более резкими. Результат восстановления радиоизображения тестового объекта после всех преобразований представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Радиоизображение тестового объекта по экспериментальным данным

Далее в этой главе рассматривается метод обнаружения движущихся объектов с использованием дифференциально-разностного подхода обработки данных, в котором фильтрация сигналов от неподвижных объектов проводится на основе разностных данных о регистрации сигналов в соседние периоды времени.

$$\overline{S(t)}^{(i)} = S(t)^{(i)} - S(t)^{(i-1)},$$

где $\overline{S(t)}^{(i)}$ – обработанный сигнал, $S(t)^{(i)}$ – регистрируемый сигнал, $S(t)^{(i-1)}$ – сигнал, принятый в соседний период времени.

В качестве движущегося объекта можно рассматривать неподвижного, но дышащего человека. Для регистрации колебаний, характерных для дыхания человека был разработан метод, основанный на регистрации СШП импульсов, отраженных от грудной клетки при вдохе/выдохе (рисунок 6).

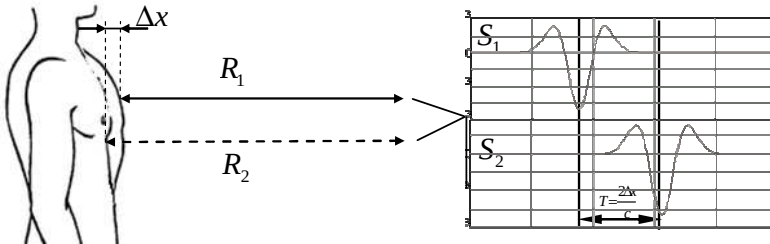


Рисунок 6 – Схема регистрации отраженных сигналов, характерных для дыхания человека
Зная T найдем смещение грудной клетки Δx :

$$\Delta x_i = \frac{cT_i}{2},$$

В результате обработки экспериментальных осциллограмм были выделены колебания грудной клетки человека. На рисунке 7 приведены характерные спектрограммы отраженных сигналов, характерных для спокойного и учащенного дыхания человека.

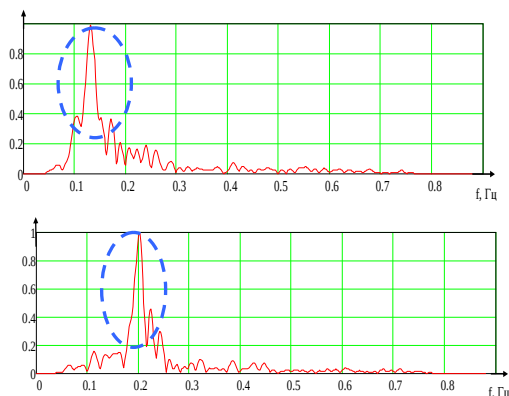


Рисунок 7 – Спектрограммы нормального и учащенного дыхания человека

В четвертой главе приведено обоснование расположения приемопередающих элементов в эквидистантной антенной решетке на основании численного моделирования. Для оптимизации решётки были решены задачи различного положения приёмных и передающих антенн и определён алгоритм тактирования, который бы являлся наиболее оптимальным. Критерий основывался на получении радиоизображения, максимально приближенного к модельному при сохранении низкого уровня артефактов.

На основании результатов численного моделирования была разработана система радиовидения на базе линейной эквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из 6 передающих и 16 приемных антенн (рисунок 8). Для управления СШП переключателями был разработан блок коммутации каналов на базе микроконтроллера Atmega 16.

Макет №1 представляет собой устройство с размерами 800×250×300 мм. Длительность СШП импульса составляет 200 пс. На рисунке 8 представлено изображение этого макета. Макет обеспечивает двумерное радиоизображение участка зондируемой зондируемой неоднородности в горизонтальной плоскости.

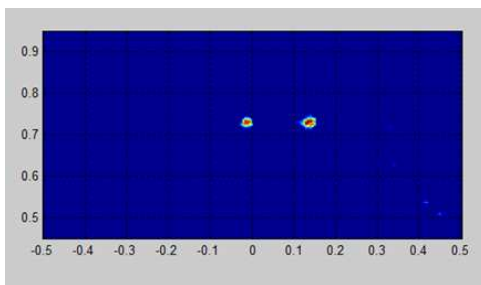


Рисунок 8 – Макет №1

Управление макетом, сбор и обработка данных проводились при помощи разработанного программного обеспечения. Для проверки работоспособности всей системы в целом, проводился эксперимент по СШП зондированию двух металлических цилиндров, расположенных за преградой (стеной). В лабораторных условиях была построена преграда в виде стены из газобетонных блоков, толщиной 10 см, высотой 150 см и шириной 200 см (рисунок 9). Расстояние от установки до преграды составляло 25 см., от стены до тестовых объектов-20 см., между объектами - 35 см.



а)



б)

Рисунок 9 – Эксперимент по обнаружению объектов за преградой

По оси абсцисс отложена координата вдоль апертуры антенной решетки, по оси ординат - расстояние до цели. Размерность каждой клетки 10х10 см. Благодаря использованию быстрых алгоритмов фокусировки, при которых обработка происходит параллельно операции приема СШП сигналов, общее время построения томограммы тестовой сцены составило за 1.2 с. Дальнейшее увеличение производительности устройства ограничивается лишь скоростью СШП осциллографа.

Макет № 2 представлен на рисунках 10-11. Система радиовидения разработана на базе линейной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из 6 передающих и 12 приемных антенн. Система дополнена фокусирующим рефлектором. Такое устройство позволит в режиме реального времени получать радиоизображение двумерного среза пространства по глубине.

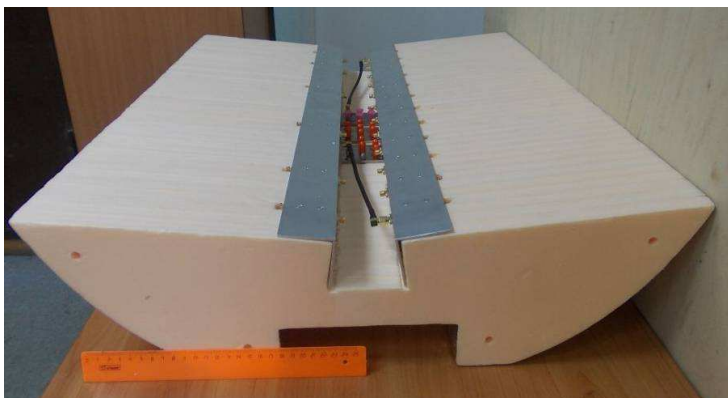


Рисунок 10 – Макет № 2 с линейной тактированной антенной решеткой

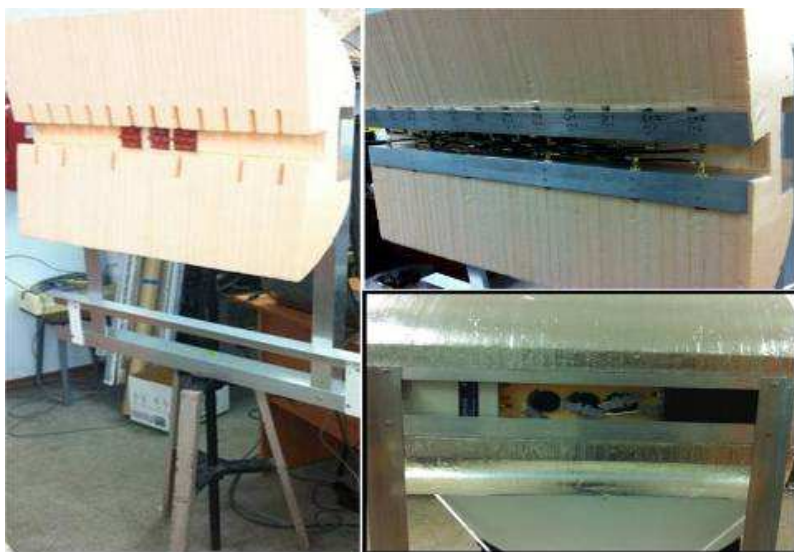


Рисунок 11 – Макет № 2 с линейной тактированной антенной решеткой

В пятой главе представлено решение задачи получения трехмерного радиоизображения заданной области пространства. Для этого необходимо обеспечить набор многоакурсных проекций. Это возможно достигнуть либо путем выполнения двумерного сканирования приемно-передающим модулем, либо путем проведения многопозиционных измерений с использованием двумерной антенной решетки. Для второго варианта необходимо обеспечить коммутацию элементов решетки. Данная система была взята за основу при создании двумерной решетки. На рисунке 5 представлена разработанная система радиовидения на базе планарной неэквилидентной тактированной антенной решетки, состоящей из 6 передающих и 16 приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Длительность зондирующего импульса 200 пс.

Макет № 3 представляет собой устройство с размерами 500x600x230 мм, помещенным для удобства транспортировки в пластиковый кейс. На рисунке 12 представлено изображение этого макета. Основным элементом является планарная тактированная СШП антенная решетка. На корпус чемодана выведены разъемы для питания от сети 220В и разъем USB для связи с ноутбуком. Таким образом, все измере-

ния можно проводить сразу, не открывая кейс. Управление коммутацией, расчет трехмерной томограммы и ее визуализация по слоям осуществляется с помощью стандартного ноутбука.

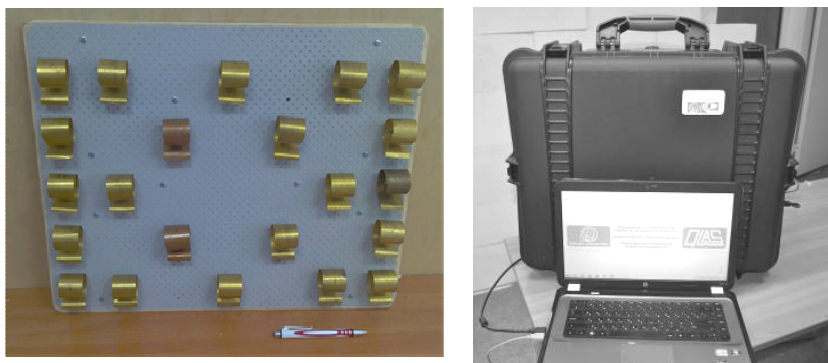


Рисунок 12 – Макет № 3 с планарной тактированной антенной решеткой

Для проверки работоспособности проводился эксперимент по восстановлению радиоизображения тестового объекта, изображенного на рисунке 6. Полученный результат представлен на рисунке 13 б.

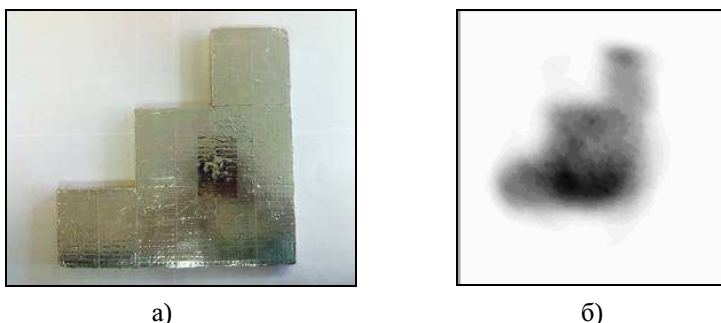


Рисунок 13 – Тестовый объект и его радиоизображение

Размеры макета № 4. решетки составили 55x44 см. Количество антенных элементов – 37, из которых 24 приемных и 13 передающих антенн (рисунок 14). Отличия данной решетки от предыдущей состоят в следующем. Для получения большего качества радиоизображения повышено количество прямо-передающих элементов и был осуществлен переход от длительности импульса 0.2 нс к длительности импульса 0.1 нс. Также осуществлена развязка между прямо-передающими эле-

ментами за счет поглощающих экранов. Это позволило включить в схему дополнительные усилители без опасения перехода системы в насыщение и «ослепление» из-за большого прямого сигнала из передающей в приемную антенну.



Рисунок 14 – Макет № 4 с модернизированной планарной тактированной антенной решеткой

Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения. Модель радиотомографа найдёт применение на производстве, для неразрушающего контроля качества готовой продукции, а также в системах безопасности в аэропортах и других общественных местах для обнаружения запрещенных предметов под одеждой, в ручной клади и почтовых отправлениях.

Инновационная направленность разработки выражается в том, что по совокупному показателю качества (точность разрешения, требуемое быстродействие, себестоимость) она составляет реальную конкуренцию известным зарубежным локационным томографам. В конечном счете, разработка должна решить проблему импортозамещения на сегменте рынка научно-технических разработок, относящемся к радиоволновым средствам обеспечения безопасности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

- 2 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосная томография движущихся объектов за диэлектрическими преградами // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 8/2. – С. 87-91.
- 3 Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Клоков А.В., Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Коммутируемая сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии // Изв. вузов. Физика. – 2012. – № 8. – С. 26-30.
- 4 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 // Изв. вузов. Физика. – 2013. – № 8. – С. 26-30.
- 5 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Цепляев И.С. Планарная неэквилидистантная тактированная сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 8/2. – С. 87-91.
- 6 Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Цепляев И.С., Степанов Е.О. Использование тактированных СШП решеток для 3D томографии // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014).Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конференции. – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 1079-1081.
- 7 Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Еремеев А.И. Пассивная сверхширокополосная отражательная решетка для радиотомографии // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014).Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конференции. – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 637-639.
- 8 Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Якубов В.П. Дистанционное СШП обнаружение нелинейных радиоэлектронных элементов // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014).Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конференции. – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 1189-1191.
- 9 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Использование СШП излучения для поиска живых людей скрытых за препятствиями// Информационно – измерительная техника и технологии: материалы II Все-

российской научно-практической конференции / Под ред. А.В.Юрченко – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 108-110.

10 Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Клоков А.В., Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Коммутируемая СШП антенная решетка для радиовидения // Информационно – измерительная техника и технологии: материалы III Всероссийской научно-практической конференции / Под ред. А.В.Юрченко – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 208-211.

11 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Технология получения трехмерного радиоизображения с использованием плоской неэквидистантной антенной решетки // Информационно – измерительная техника и технологии: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции/ Под ред. А.В.Юрченко – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 108-110.

12 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Планарная СШП тактированная антенная решетка для переносного радиотомографа // Сборник научных трудов Всероссийской молодежной школы-конференции «Не-разрушающий контроль – 2013.

13 Сатаров Р.Н., Цепляев И.С., Степанов Е.О. СШП томограф для радиовидения // Актуальные проблемы радиофизики: материалы II Международной молодежной научной школы/ под ред. В.И.Суслева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2013. – С. 70 – 72.

14 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Еремеев А.И. Управляемая отражательная решетка для системы радиовидения // Сборник трудов третьей всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург: Изд-во ООО Технолит, 2014. – С. 233 – 237.