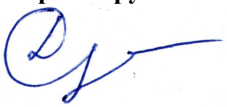
На правах рукописи



Суханов Дмитрий Яковлевич

МНОГОМЕРНАЯ СОГЛАСОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В РАДИО- И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», в лаборатории распространения радиоволн и в лаборатории «Методы, системы и технологии безопасности» Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова и на кафедре радиофизики радиофизического факультета.

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор **Якубов Владимир Петрович**

Официальные оппоненты:

Смалихо Игорь Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория распространения волн, ведущий научный сотрудник

Нагорский Петр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики климатических систем, ведущий научный сотрудник

Денисов Вадим Прокопьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра радиотехнических систем, профессор

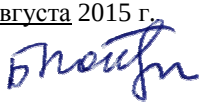
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится 29 октября 2015 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, 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.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/SuhanovDJa29102015.html

Автореферат разослан «___» августа 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Пойзнер Борис Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке методов радиоволновой и ультразвуковой томографии на основе многомерной согласованной фильтрации и фокусировки волновых полей. Рассматриваются узкополосные и сверхширокополосные зондирующие сигналы, локационные, трансмиссионные, моностатические и мультистатические схемы зондирования.

Актуальность работы

Радиотомография и ультразвуковая томография находят широкое применение в задачах обнаружения и визуализации скрытых объектов и неоднородностей. Радиоволны позволяют бесконтактно и неразрушающим способом исследовать объекты из пластика, дерева или керамики, и могут использоваться для обнаружения пустот или неоднородных включений. Ультразвуковые волны в основном применяются для контактного исследования плотных объектов, в том числе металлов. Возможность обнаружения скрытых объектов под землёй позволяет применять системы подповерхностной радиотомографии в археологии, в задачах поиска пластиковых противопехотных мин, для геологоразведки, в коммунальном хозяйстве для обнаружения подземных коммуникаций или для исследования состояния дорог, в строительстве при исследовании почвы под фундаментами.

В радио- и ультразвуковой томографии имеется ряд задач, постоянно интересующих исследователей. Среди первоочередных и актуальных, задачи оптимального построения зондирующих систем. Подразумевается минимизация применяемых аппаратных средств, снижение количества коммутационных узлов, оптимизация траекторий механического сканирования, оптимальный подбор количества и взаимного расположения излучающих и приёмных антенн, сокращение сверхвысокочастотных (СВЧ) трактов, повышение уровня сигнал-шум, уменьшение времени измерений, удешевление аппаратной части, снижение энергопотребления, уменьшение массы конструкции. То есть требования весьма противоречивы и оптимизация одного параметра может привести к ухудшению другого. Не менее важными являются задачи визуализации путём обработки данных зондирования с учётом влияния фоновых неоднородностей и преград. Обработка должна позволить получить изображение неоднородностей с наилучшим разрешением и минимальным уровнем артефактов. Данная задача тесно связана с оптимизацией схемы измерений. Методы обработки данных и визуализации должны быть устойчивы к шумам измерений, реализовываться с применением быстрых алгоритмов и допускать распараллеливание вычислений.

Цель диссертационной работы

Методы решения задач волновой томографии с учётом особенностей моностатических и мультистатических схем зондирования узкополосными и сверхширокополосными сигналами при наличии фоновых неоднородностей среды.

Задачи диссертационной работы

1. Решение прямой и обратной задач волновой томографии при контактном и бесконтактном зондировании через многослойные плоскослоистые среды и среды с неплоскими границами раздела сред.
2. Разработка метода численного моделирования дифракции волн на объектах произвольной формы.
3. Разработка метода моностатической трёхмерной волновой томографии по сверхширокополосным локационным измерениям на цилиндрической поверхности.
4. Разработка метода трёхмерной волновой томографии на основе измерений системой из ортогональных линейных решёток излучателей и приёмников.
5. Разработка метода трансмиссионной монохроматической многоракурсной дифракционной радиотомографии.
6. Разработка метода доплеровской узкополосной радиотомографии с применением подвижного рефлектора.
7. Исследование разрешающей способности по дальности для случая многопозиционного бистатического волнового зондирования.
8. Разработка метода трёхмерной радиотомографии с применением сигналов с линейной частотной модуляцией.
9. Разработка метода восстановления изображений звукоизлучающих объектов.
10. Разработка метода восстановления радиоизображений объектов, скрытых за протяжёнными неоднородностями среды с контрастными границами известной формы.
11. Разработка метода восстановления изображений электропроводящих объектов на основе данных многопозиционного магнитоиндукционного зондирования в диапазоне очень низких частот.
12. Численное моделирование и экспериментальная проверка всех предложенных методов и математических моделей.

Основными методами исследований являлись: аналитические решения уравнений Максвелла и уравнения Гельмгольца; методы численного моделирования распространения волновых полей на основе уравнения Гельмгольца; линейное приближение преобразования сигналов и полей; метод интегральных преобразований для решения обратных задач волновой и ближнеполевой томографии; физические эксперименты с применением векторных и скалярных анализаторов цепей в диапазоне частот от 1 ГГц до 20 ГГц; физические эксперименты с ультразвуковыми волнами в воздухе на частотах до 43 кГц.

Положения, выносимые на защиту

1. При бесконтактном многопозиционном моностатическом локационном зондировании по плоскости, восстановление распределения неоднородностей, расположенных за неровными границами раздела диэлектрических сред, осу-

ществимо в приближении фазового экрана путём обращения волнового поля методом многомерной согласованной фильтрации на удвоенных частотах зондирующих сигналов с последующим суммированием восстановленных монохроматических томограмм.

2. Трёхмерное изображение рассеивающих неоднородностей внутри зондируемого цилиндрического объёма восстановимо методом пространственно согласованной фильтрации по данным моностатического многочастотного многопозиционного радиозондирования, реализуемым через восстановление пространственного спектра рассеивающих неоднородностей из многочастотных измерений поля и последующее его обращение.

3. Пространственное распределение неоднородностей в объёме многоракурсно зондируемом трансмиссионным способом монохроматическими СВЧ радио- и (или) ультразвуковыми волнами восстановимо за счёт суммирования амплитуд восстановленных распределений полей для каждого ракурса измерений методом пространственно согласованной фильтрации.

4. Восстановление рассеивающих неоднородностей с разрешением по дальности осуществимо по данным монохроматического бистатического многопозиционного зондирования вдоль протяжённой плоской апертуры методом пространственно согласованной фильтрации. Пространственное разрешение по дальности улучшается с увеличением размеров апертуры, уменьшением длины волны и дальности до неоднородностей.

5. Трёхмерное распределение рассеивающих неоднородностей восстановимо системой из ортогональных линейных решёток из ультразвуковых излучателей и приёмников по данным амплитудно-фазовых измерений широкополосного сигнала методом пространственно согласованной фильтрации, реализуемым через интеграл свёртки по пространственным координатам.

6. Синтез плоской апертуры и восстановление плоских радиоизображений осуществимы на основе обработки методом пространственно согласованной фильтрации данных амплитудно-фазовых измерений неподвижной линейной решёткой моностатических радиолокаторов за счёт подвижного рефлектора, выполненного в форме параболического четвертьцилиндра, с произвольными поперечными размерами, но длиной не менее размеров решётки.

7. Изображения электропроводящих объектов размерами много меньше длины волны, восстановимы по данным многопозиционного зондирования переменными магнитными полями путём восстановления распределения элементарных вихревых токов методом пространственно согласованной фильтрации.

Основные результаты работы

1. Решена обратная задача радиотомографии для рассеивающих неоднородностей, распределенных в многослойной плоскослоистой среде, при известных характеристиках слоёв, в приближении однократного рассеяния по данным моностатического сверхширокополосного зондирования на плоской апертуре.

2. Предложен метод восстановления трёхмерных изображений неоднородностей, скрытых за неровной границей раздела сред в приближении фазового экрана по данным моностатического сверхширокополосного радиозондирования.

3. Разработан быстрый алгоритм восстановления трёхмерных радиоизображений по данным моностатического сверхширокополосного зондирования на цилиндрической апертуре.

4. Предложены методы трёхмерной томографии монохроматическими сигналами по данным трансмиссионного зондирования и локационного бистатического зондирования.

5. Предложено решение прямой задачи радиотомографии в неоднородных средах в приближении Кирхгофа, на основе разбиения среды на тонкие плоскопараллельные области с вертикальными границами и сшивания решений для однородных областей, позволяющее учитывать эффекты рефракции и дифракции на диэлектрических объектах.

6. Предложен метод восстановления плоских радиоизображений объектов на основе применения подвижного рефлектора и решётки моностатических радиолокаторов.

7. Разработано устройство для ультразвуковой томографии в воздухе на основе перпендикулярных линейных решёток излучателей и приёмников.

8. Разработано устройство для магнитоиндукционной интроскопии на основе сканирующей матрицы спиральных катушек, а также метод магнитоиндукционного зондирования на основе сканирующей самоскомпенсированной катушки. Предложен способ повышения разрешения плоских изображений, получаемых по результатам магнитоиндукционного зондирования.

9. Разработан метод ультразвуковой томографии звукоизлучающих объектов в воздухе на основе широкополосных измерений звукового поля на плоской апертуре.

Достоверность научных положений диссертационной работы подтверждается тем, что:

1. Достоверность первого положения подтверждена экспериментально, путём восстановления изображений тестовых объектов, скрытых за неровной поверхностью сухого песка, с разрешением 15 мм, при зондировании в диапазоне частот от 4 до 14 ГГц.

2. Достоверность второго положения подтверждена совпадением заданных и восстановленных изображений объектов в ходе численного моделирования прямой и обратной задач, а также экспериментально – совпадением с оригиналом восстановленных изображений тестовых объектов с погрешностью до разрешающей способности в 12 мм при зондировании в полосе частот от 1 до 18 ГГц.

3. Достоверность третьего положения подтверждена совпадением изображений заданного моделируемого объекта и восстановленного теневого изображения по результатам численного моделирования прямой и обратной задач,

а также экспериментально – совпадением изображения тестовых объектов и восстановленных томографических изображений по данным ультразвукового зондирования в воздухе на частоте 40 кГц с погрешностью до разрешающей способности в 10 мм.

4. Достоверность четвёртого положения доказана совпадением заданного и восстановленного распределения рассеивателей в ходе численного моделирования и экспериментально на ультразвуковых волнах в воздухе на частоте 40 кГц, восстановлением изображений тестовых объектов с погрешностью до разрешающей способности в 10 мм. Показано согласие результатов численного моделирования и экспериментальных результатов с погрешностью до 10 мм.

5. Достоверность пятого положения подтверждена совпадением изображений заданного объекта и восстановленного по результатам численного моделирования прямой и обратной задач с точностью до разрешающей способности в 10 мм. Экспериментальные исследования с помощью решёток излучателей и приёмников из 32 элементов каждая, работающих на частоте 40 кГц показали совпадение формы тестовых объектов и их восстановленных изображений с погрешностью до 16 мм.

6. Достоверность шестого положения подтверждена совпадением изображений заданных и восстановленных тестовых объектов в ходе численного моделирования прямой и обратной задачи с точностью до длины волны, а также совпадением формы тестовых объектов и их восстановленных изображений по результатам экспериментов на частоте 24 ГГц с восстановлением деталей объекта размерами не менее 5 см.

7. Достоверность седьмого положения подтверждена экспериментально путём восстановления изображений тестовых объектов с разрешением до 10 мм на дальностях от 10 до 35 мм на частотах от 5 до 30 кГц.

Достоверность научных положений и других результатов диссертационной работы подтверждается тем, что:

1. При решении прямых задач применялись классические решения уравнения Гельмгольца в области пространственных спектров, а также метод функции Грина для решения уравнения Гельмгольца;

2. Метод численного моделирования дифракции волн на объектах произвольной формы основан на классическом приближении Кирхгофа и решении уравнения Гельмгольца в спектре плоских волн;

3. Восстановленные трёхмерные изображения по данным экспериментов по многопозиционному моностатическому радиозондированию через плоскую границу раздела диэлектрических сред и через плоскопараллельную диэлектрическую пластину корректно визуализируют форму тестовых объектов с погрешностью менее 15 мм;

4. Метод восстановления трёхмерных радиоизображений с применением сигналов с линейной частотной модуляцией проверен путём обработки экспериментальных данных, полученных в Институте неразрушающих методов

контроля качества общества Фраунгофера (Fraunhofer IZFP, Германия) и восстановления изображений тестовых объектов с погрешностью не более 3 мм при зондировании на частотах от 92 до 98 ГГц;

5. Метод трёхмерной томографии при моностатических локационных измерениях на неплоской апертуре подтверждён совпадением заданного и восстановленного распределения точечных рассеивателей по результатам численного моделирования для диапазона частот от 5 до 10 ГГц с разрешением не хуже 7 см;

6. Метод двумерной визуализации звукоизлучающих объектов в широком диапазоне частот и метод определения дальности до звукоизлучающих объектов проверены путём восстановления изображения вибрирующей стеклотекстолитовой пластины по результатам измерений в диапазоне частот от 10 до 30 кГц с погрешностью не более 1 см в плоскости сканирования и 10 см по дальности;

7. Метод трёхмерной радиотомографии в неоднородной фоновой среде, позволяющий учитывать влияние преград с известной формой и электрическими характеристиками, проверен экспериментально и путём сравнения результатов численного моделирования прямой задачи распространения волн через линзу и известного аналитического решения для линзы. Показано, что численная модель фокусирующей линзы с аналитически рассчитанной формой преобразует сферический волновой фронт в плоский. Проведён эксперимент по визуализации объекта, скрытого за гипсовой линзой, в полосе частот от 4 до 14 ГГц: изображение объекта восстановлено с погрешностью менее 15 мм.

Научная новизна положений, выносимых на защиту

1. Предложено применить приближение фазового экрана в сочетании с методом пространственно согласованной фильтрации для учёта неровностей границы раздела сред в подповерхностной томографии.

2. Предложено сочетание моностатического локационного зондирования и метода пространственно согласованной фильтрации для восстановления трёхмерного пространственного спектра рассеивающих неоднородностей.

3. Предложено сочетание когерентной обработки методом пространственно согласованной фильтрации для каждой проекции трансмиссионного монохроматического зондирования и суммирования амплитуд восстановленных полей для получения теневых изображений объектов.

4. Впервые доказано, что многопозиционное монохроматическое бистатическое зондирование совместно с многомерной согласованной фильтрацией позволяет получать изображения с разрешением по дальности.

5. Предложено применение аппроксимированного согласованного фильтра для крестовидной приёмопередающей зондирующей системы в ближней зоне для сведения решения обратной задачи к интегралу типа свёртки.

6. Предложено совместное применение линейной решётки монохроматических радиолокаторов и подвижного рефлектора в виде параболического четвертьцилиндра для обеспечения синтеза плоской апертуры.

7. Предложено применение метода пространственно согласованной фильтрации для обработки данных магнитоиндукционного зондирования на плоскости с целью визуализации электропроводящих объектов.

Научная новизна других результатов работы

1. Предложено дополнить метод согласованной фильтрации для восстановления трёхмерного пространственного спектра рассеивающих неоднородностей методом обращения волнового поля для учёта влияния многослойной плоскослоистой среды с известными характеристиками.
2. Предложено сочетание приближения Кирхгофа, метода обращения волнового поля и разбиения пространства на тонкие слои для численного моделирования дифракции волн на объектах произвольной формы.
3. Предложено применение метода согласованной фильтрации для случая радиозондирования линейно частотно модулированными сигналами на отдельных частотах, однозначно соответствующих дальности, что позволяет свести задачу восстановления томограмм к трёхмерному преобразованию Фурье.
4. Предложено оптимизировать размещение антенн в монохроматической радиолокационной системе с множеством излучателей и множеством приёмников на основе расчёта аппаратной функции через произведение реакций излучающей и приёмной решёток.
5. Предложено оценивать дальность до звукоизлучающего объекта по ширине пространственного спектра изображений, восстанавливаемых методом пространственно согласованной фильтрации.
6. Предложено применить восстановление волнового поля в неоднородной среде с конечным множеством вариаций диэлектрической проницаемости, на основе сшивания решений для однородных областей в форме призм, что позволяет учитывать влияние преград с известными формами и электрическими характеристиками для радиотомографии в неоднородной фоновой среде.
7. Разработано устройство для ультразвуковой томографии в воздухе на дальности до 50 см (Пат. 144100 РФ, МПК G01N 29/06).
8. Разработано устройство для двухкоординатного магнитоиндукционного зондирования на дальностях до 5 см (Пат. 143322 РФ, МПК G01V 3/11.).
9. Разработано устройство для мультистатической радиоголографии (Пат. 144400 РФ, МПК G01S 13/89.).

Научная ценность положений, выносимых на защиту, определяется:

1. доказательством применимости приближения фазового экрана для задач трёхмерной подповерхностной томографии за неровными границами раздела сред;
2. демонстрацией возможности решения обратной задачи радиотомографии, при сканировании по неплоской поверхности, операцией трёхмерной свёртки с согласованной аппаратной функцией одиночного моностатического локатора, а также разработкой решения задачи трёхмерной томографии по данным широкополосного зонирования на цилиндрической поверхности сводящегося к операции трёхмерного преобразования Фурье;

3. демонстрацией применимости сочетания когерентной и некогерентной обработки для восстановления трансмиссионных томографических изображений;

4. доказательством возможности получения разрешения по дальности путём согласованной фильтрации данных монохроматического бистатического зондирования;

5. доказательством применимости незаполненной апертуры мультистатической зондирующей системы на основе крестовидного размещения линейных решёток излучателей и приёмников для восстановления трёхмерных изображений в ближней зоне;

6. демонстрацией возможности применения подвижного рефлектора в сочетании с линейной решёткой моностатических радиолокаторов для осуществления синтеза плоской апертуры и восстановления двумерных радиоизображений;

7. демонстрацией возможности применения пространственно согласованной фильтрации для решения обратных задач многопозиционного магнитоиндукционного зондирования.

Практическая значимость

1. Метод радиотомографии за неровной поверхностью в приближении фазового экрана позволяет устранять искажения радиотомограмм, вызванные неровностью поверхности, и восстанавливать трёхмерные изображения на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье, что обеспечивает ускорение обработки данных в несколько раз по сравнению с методами миграции во временной области и методами, основанными на численном моделировании распространения волн.

2. Алгоритм обработки данных моностатического зондирования на цилиндрической поверхности для трёхмерной визуализации рассеивающих объектов, реализуется на основе быстрого преобразования Фурье, что обеспечивает сокращение времени для восстановления томограмм в отличие от методов миграции во временной области в десятки раз.

3. Метод трансмиссионной волновой томографии позволяет визуализировать слабоконтрастные диэлектрические объекты на основе данных монохроматического зондирования и обеспечивает разрешение порядка длины волны в отличие от локационных методов и трансмиссионных методов, основанных на амплитудных измерениях.

4. Многопозиционное бистатическое зондирование в сочетании с пространственно согласованной фильтрацией позволяет ограничиться применением генераторов монохроматических сигналов для получения разрешения по дальности, в отличие от схем моностатического зондирования.

5. Метод ультразвуковой томографии на основе крестовидного размещения излучателей и приёмников позволяет в десятки раз уменьшить количество датчиков, необходимых для получения трёхмерного изображения по сравнению с заполненными приёмными решётками.

6. Применение подвижного рефлектора позволяет осуществить механическое сканирование для синтеза апертуры и использовать доплеровские датчики движения для построения радиотомографической системы.

7. Предложенный метод восстановления изображений электропроводящих объектов с помощью фильтрации данных магнитоиндукционного зондирования позволяет визуализировать металлические объекты, скрытые за металлическими преградами, визуализировать их форму и определять нарушения электрического контакта с улучшением разрешения в 2-3 раза по сравнению с необработанными данными.

Сведения о внедрении результатов и предложения по их использованию

Результаты работы внедрены в магистерской программе курса «Радиоволновая томография» в рамках дисциплин «Подповерхностная радиолокация» и «Волновая акустика, и ультразвуковая томография» ТГУ. Полученные результаты по ультразвуковой и радиоволновой томографии используются в курсах лабораторных работ «Распространение радиоволн» и «Волновая томография: лабораторный практикум» ТГУ. Разработанные методы применены в ходе выполнения международных контрактов Сибирского физико-технического института ТГУ.

Связь работы с научными программами, планами, темами

Результаты работы были получены при поддержке следующих грантов:

1. Международный контракт СФТИ ТГУ с IZFP, Германия, № 025/232328, 2007 г., название проекта: «Программа для ЭВМ, предназначенная для обработки данных радиозондирования в миллиметровом диапазоне сигналами с линейной частотной модуляцией с целью восстановления радиоизображений объектов».

2. Международный контракт СФТИ ТГУ с IZFP, Германия, № 025/232610/721/6, 2008-2009 г., Название проекта: «Многоканальная поляриметрическая микроволновая система миллиметрового и сантиметрового диапазона».

3. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, мероприятие 1.3, ГК от 03 сентября 2009 года № П1468: «Разработка методов радиовидения скрытых объектов». Руководитель: доцент, канд. физ.-мат. наук Д.Я. Суханов.

4. РФФИ на 2012-2013 годы проект № «12-02-31470 мол_а» «Восстановление трёхмерных радиоизображений на основе многопозиционных измерений интенсивности поля». Договор (соглашение) № 12-02-31470\12 от 3 октября 2012 года. Руководитель: канд. физ.-мат. наук Суханов Д.Я.

5. Грант фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Государственный контракт №7448р/10239 от 29.01.2010 г. «Разработка алгоритмов обработки данных ультразвукового и радиоволнового зондирования с системой распределенных датчиков», 2010 г. Руководитель: Суханов Д.Я.

6. Грант фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Государственный контракт № 6360 р/8858 от 8 декабря 2008 г. «Разработка математического обеспечения для радио и акустических систем томографии скрытых объектов для служб безопасности и контроля качества», 2009 г. Руководитель: Суханов Д.Я.

7. АВЦП «Физико-математическая модель радиолокационного томографа» № 2.1.2/12874 и № 2.1.2/3339 на 2010-2012 годы. Руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор В.П. Якубов.

8. НИР «Фокусировка волновых процессов проекций неоднородных сред в сверхширокополосной радиотомографии скрытых объектов». Тематический план ТГУ 2009-2011 гг. Шифр 1.10.09. Руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор В.П. Якубов.

9. НИР «Радиоволновой томосинтез неоднородных сред и объектов». Тематический план ТГУ 2012-2014 гг. Рег. Номер НИР: 7.3747.2011. № гос. регистрации 01201257789. Руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор В.П. Якубов.

10. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. ГК от 06 сентября 2010 года № 14.740.11.0076: «Исследование волновых процессов в неоднородных средах и создание основ радиовидения высокого разрешения с использованием метода синтезирования апертуры». Руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор В.П. Якубов.

11. РФФИ на 2013-2014 годы, проект № «13-02-98025 р_сибирь_а» «Фундаментальные ограничения в ближнеполевой электродинамике сложных излучающих систем». Договор № 13-02-98025\13 от 27 августа 2013 года. Руководитель: доктор физ.-мат. наук Беличенко В.П.

Личный вклад автора:

Основными соавторами опубликованных по теме диссертации работ являются: научный консультант – профессор В.П. Якубов, доценты Шипилов С.Э. и Клоков А.В., а также ученики автора диссертации – студенты и аспиранты кафедры радиофизики К.В. Завьялова, М.Д. Совпель, Е.С. Совпель (Берзина), Л.М. Латипова, М.А. Гончарик, Н.Н. Ерзакова, Е.Г. Пермяков, А.С. Рубаненко, В.Н. Цыденова, А.А. Муравьёва, М.А. Калашникова. Все представленные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо в сотрудничестве с соавторами, и соавторы публикаций не возражают против использования совместных результатов автором. Автором разработано программное обеспечение для численного моделирования, обработки данных и автоматизации экспериментов. Часть экспериментальных результатов получена в Институте неразрушающих методов контроля качества общества Фраунгофера (Fraunhofer IZFP, Германия), где автор проходил стажировку.

Автор диссертации выражает свою искреннюю благодарность всем своим соавторам, а также коллективу отделения радиофизики и радиоэлектроники СФТИ ТГУ и кафедры радиофизики ТГУ за поддержку и помощь в организации и проведении исследований, за полезные обсуждения результатов. Осо-

бую благодарность автор выражает научному консультанту Якубову В.П., который на протяжении более 10 лет направлял исследования автора.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar (Delft, The Netherlands, 2004); VII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2004, (Новосибирск, 2004); Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2004); 11-th international conference “Modern technique and technologies” IEEE (Томск, 2005); Третья международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2005); Вторая международная научно-практическая конференция. "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (Санкт-Петербург, 2006); Вторая Всероссийская научная конференция – семинар «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» СРСА, (Муром, 2006); Workshop on Safety Technologies “Research and Development on Safety Technologies” (Saarbrücken, Germany, 2008); 2-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» АПР-2008 (Томск, 2008); Третья Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» СРСА-2010 (Муром, 2010); 3-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» АПР-2010 (Томск, 2010); II Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2011); III Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием. (Томск, 2012); 4-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» АПР-2012 (Томск, 2012); VIII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2012); IV Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии», (Томск, 2013); 5-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» АПР-2013 (Томск, 2013); 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2014), (Brussels, Belgium, 2014); 24-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Крым, Россия, 2014);

Участие в выставках: Вторая международная выставка «Радиофизика и электроника» (г. Томск, 1-6 октября 2013 г.) с экспонатами «Магнитоиндукционный интроскоп» и «Ультразвуковой томограф»; Третья международная выставка «Радиофизика и электроника» (г. Томск, 10-11 октября 2014 г.) с экспонатом «Магнитоиндукционный интроскоп».

Публикации

По результатам работы опубликовано 71 работы, включая 46 статей в журналах из Перечня ВАК, 3 патента, 1 монографию.

Структура работы. Диссертация изложена на 409 страницах состоит из введения, 8 глав и заключения, списка литературы и приложения А, содержит 457 рисунка, список литературы включает 255 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы. Описывается общее состояние мировых исследований в области радиотомографии и геолокации. Приводятся основные современные направления исследований в этой области. Формулируются цель и задачи диссертации, защищаемые положения, отмечается новизна, практическая значимость, излагается структура диссертации.

Все задачи диссертации рассматриваются в частотной области, предполагается временная зависимость вида $e^{-i\omega t}$, а сверхширокополосные сигналы представляются в виде суммы множества гармонических сигналов.

В первой главе приводится описание наиболее распространенных схем измерений в радиотомографии и соответствующие методы восстановления радиоизображений. Описаны основные особенности и оценка разрешающей способности технологии синтезирования апертуры.

Представлен обобщённый подход восстановления радиоизображений, основанный на методе согласованной фильтрации с применением аппаратной функции системы. Под аппаратной функцией понимается реакция на точечный рассеиватель. При этом система может включать в себя математическую постобработку измеренных сигналов. Для определения разрешения необходимо рассчитать реакцию системы на два точечных рассеивателя, расположенных на близком расстоянии друг от друга. Минимальное расстояние, на котором два точечных рассеивателя различимы и является разрешающей способностью.

Математически аппаратная функция представляется в виде многомерной функции. Рассмотрим скалярные функции, поскольку будем пользоваться скалярным приближением при описании распространения радиоволн. Чем ближе вид аппаратной функции системы к дельта функции, тем лучше качество получаемых радиоизображений. Однако невозможно создать реальную систему радиовидения с аппаратной функцией в виде дельта функции в силу существования дифракционного предела и ограниченности пространственного спектра.

Рассмотрим два вида аппаратных функций. Первый вид это аппаратные функции системы без учёта математической обработки измеренного сигнала, обозначим их $A(\mathbf{r}, q_1 ... q_n)$. Второй – аппаратные функции системы с учётом математической обработки измеренных сигналов, обозначим их $A'(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$. Обозначим вектором $\mathbf{r}$ положение точечного рассеивателя в исследуемом пространстве, $\mathbf{r}'$ - пространственная переменная восстанавливаемого изображения. Величины $(q_1 ... q_n)$ – множество независимых параметров, которые описывают состояние системы, ими могут быть координаты приёмных и пере-

дающих антенн, частота зондирования, ширина диаграмм направленности антенн, направление максимумов диаграмм направленности антенн и другие параметры, изменение которых влечёт изменение условий зондирования и позволяет получить дополнительную информацию об исследуемом объекте. В простейшем случае зондирования ненаправленными антеннами в однородной среде, аппаратная функция $A(\mathbf{r}, q_1 ... q_n)$ строится на основе функции Грина свободного пространства и рассчитывается аналитически. Если решение прямой задачи невозможно аналитически, аппаратная функция рассчитывается численно либо измеряется, с применением рассеивающих тестовых объектов размерами порядка длины волны.

В случае если все преобразования сигнала в системе линейны, то результат измерений для произвольного объекта можно рассчитать на основе аппаратной функции, в приближении однократного рассеяния следующим образом:

$$U(q_1 ... q_n) = \iiint_V \rho(\mathbf{r}) A(\mathbf{r}, q_1 ... q_n) d^3\mathbf{r}\,, \qquad (1)$$

где $\rho(\mathbf{r})$ - функция, описывающая распределение рассеивающих неоднородностей. Физически функция $\rho(\mathbf{r})$ пропорциональна контрасту диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и проводимости, но также зависит от формы объектов и их рельефа.

Таким образом, результат измерений представляется в виде линейной комбинации аппаратных функций системы. Формула (1) не учитывает явления самозатенения и многократные переотражения, но является общим решением прямой задачи в приближении однократного рассеяния. Под прямой задачей, в данном случае подразумевается определение результатов измерения по заданному распределению неоднородностей.

Для восстановления распределения неоднородностей по измеренным данным необходимо решить обратную задачу, то есть восстановить функцию $\rho(\mathbf{r})$ по измеренным данным $U(q_1 ... q_n)$. Для решения этой задачи целесообразно применить комплексно сопряжённую аппаратную функцию системы в качестве согласованного фильтра. Такой подход называется методом пространственно согласованной фильтрации (space match filtering), если параметры $(q_1 ... q_n)$ являются пространственными переменными, например координатами приёмных и передающих антенн.

Решение обратной задачи методом согласованной фильтрации запишем в виде:

$$\rho(\mathbf{r}) = \int_{q_1} \cdots \int_{q_n} U(q_1 ... q_n) A^*(\mathbf{r}, q_1 ... q_n) dq_n \cdots dq_1 \qquad (2)$$

Решение (2) позволит восстановить точное изображение неоднородностей, если функция

$$A'(\mathbf{r},\mathbf{r}') = \int_{q_1}\cdots\int_{q_n} A(\mathbf{r},q_1...q_n)A^*(\mathbf{r}',q_1...q_n)dq_n\cdots dq_1 \qquad (3)$$

будет иметь вид дельта функции, то есть $A'(\mathbf{r},\mathbf{r}') = \delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}')$, где $\mathbf{r}$ - координата точечного рассеивателя, $\mathbf{r}'$ - координата точки в пространстве восстанавливаемого изображения. Однако в реальности $A'(\mathbf{r},\mathbf{r}')$ не равна дельта функции, это было бы возможно, только если $A(\mathbf{r},q_1...q_n)$ образуют ортогональное множество функций. В реальных системах вид функции $A'(\mathbf{r},\mathbf{r}')$ определяет разрешающую способность системы и наличие артефактов на восстанавливаемых изображениях. Преимуществом метода согласованной фильтрации является высокое отношение сигнал-шум. Однако данный метод не гарантирует, что $A'(\mathbf{r},\mathbf{r}')$ будет иметь единственный и локализованный максимум, то есть решение будет однозначным. Однозначность решения и качество изображения зависят от выбранного способа измерений, а также области и шага варьирования параметров $(q_1...q_n)$. При измерениях на высоких частотах, когда зондирующие радиоволны имеют длину волны много меньше расстояний до исследуемых неоднородностей, функция $A(\mathbf{r},q_1...q_n)$ имеет осциллирующий вид по пространственным переменным и содержит высокие пространственные частоты. Если схема измерений обеспечивает наличие высоких и низких пространственных частот в $A(\mathbf{r},q_1...q_n)$, то система будет способна обеспечить разрешение порядка длины волны.

Также следует учитывать, что для восстановления трёхмерных изображений необходимо производить трёхмерные измерения. То есть это могут быть измерения поля на двумерной поверхности, но на различных частотах, что обеспечивает трёхмерное множество независимых данных. Для получения двумерных радиоизображений достаточно осуществить пространственные измерения поля на двумерной области на одной частоте, либо осуществить измерения на одномерной траектории в широкой полосе частот. Шаг измерений определяется теоремой Котельникова, то есть должен быть вдвое меньше длины волны самой высокочастотной компоненты в пространственном спектре измеряемого поля.

Рассмотрим особенности восстановления изображений для случая монохроматического зондирования. Разрешение по дальности для моностатического узкополосного радара с синтезированной апертурой (РСА) возможно только в ближней зоне и только для одиночных целей. Плоский горизонтальный объект не будет разрешён по дальности даже в ближней зоне. В этом можно убедиться на основе результатов численного моделирования представленных в пункте 1.6.3 диссертации.

Во второй главе описаны методы радиотомографии с плоской апертурой в приближении однократного рассеяния. Предложен метод восстановления радиоизображений объектов, скрытых в многослойной плоскослоистой среде.

На рисунке 1 представлена рассматриваемая схема моностатического зондирования в плоскослоистой среде. В данном случае интересует процесс рассеяния радиоволн на неоднородностях, находящихся в плоскослоистой среде. Однократно рассеянная волна от неоднородности в среде будет приходить с минимальной задержкой, и иметь наибольшую амплитуду относительно многократно рассеянных волн. Не будем рассматривать поля, отраженные от плоскослоистой среды, поскольку данная задача уже имеет известное решение.

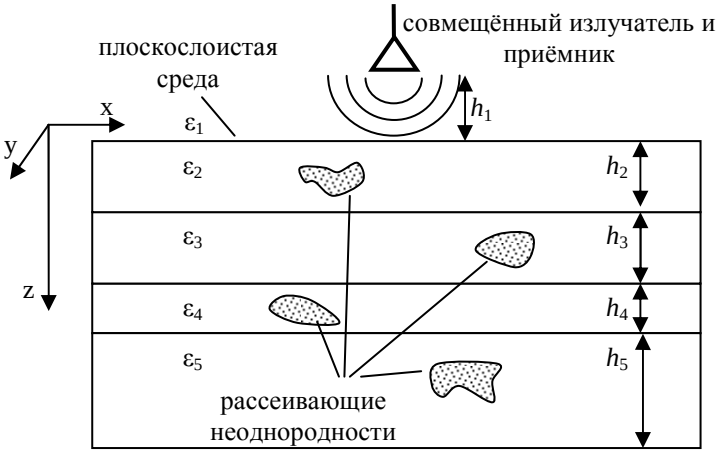


Рисунок 1 - Схема зондирования плоскослоистой среды

В разделе 2.2 диссертации, учёт влияния плоскослоистой среды осуществляется в спектре плоских волн, а задача восстановления трёхмерных изображений сводится к трёхмерному преобразованию Фурье. Восстановленное изображение в M -том слое записывается в виде:

$$p_M(x,y,z)=\iiint \tilde{U}\left(k_x,k_y,\frac{\sqrt{\tilde{k}_{Mz}{}^2+k_x{}^2+k_y{}^2}}{2\sqrt{\varepsilon_M}}\right)\frac{e^{-i\sum_{n=1}^{M-1}k_{nz}h_n-ik_{Mz}z}e^{ik_xx+ik_yy}\tilde{k}_z d\tilde{k}_z dk_x dk_y}{i2(2\pi)^2 k_{Mz}2\sqrt{\varepsilon_M}\sqrt{\tilde{k}_{Mz}{}^2+k_x{}^2+k_y{}^2}},$$

где $z=z_s-\sum_{n=1}^{M-1}h_n$ - глубина рассеивателя, отсчитываемая от верхней границы слоя, в котором он находится; $\tilde{U}(k_x,k_y,k)$ - плоский пространственный спектр измеренного поля на частоте kc. Данное выражение является преобразованием Фурье, отображающим функцию из области пространственных частот k_{Mz} в пространство z. Однако полученный результат $\tilde{p}(k_x,k_y,z)$ справедлив только для слоя с номером M. Для получения решения в других слоях необходимо повторить вычисления, изменив номер слоя M, после чего решения, полу-

ченные для различных слоёв необходимо объединить для получения общего распределения неоднородностей в плоскослоистой среде. Представленный метод решения обратной задачи является быстродействующим, поскольку полностью сводится к применению алгоритма быстрого преобразования Фурье. Для применения метода необходима априорная информация о толщине слоёв и их диэлектрической проницаемости.

В ходе экспериментальной проверки метода визуализации объектов в плоскослоистой среде в качестве тестовой была рассмотрена среда воздух-поливинилхлорид-воздух (рисунок 2). Пластины из поливинилхлорида (ПВХ) располагались на опорах из пенопласта. Общая толщина пластин составила 5 см. Показатель преломления ПВХ составляет 1,38. За ПВХ размещались тестовые объекты.

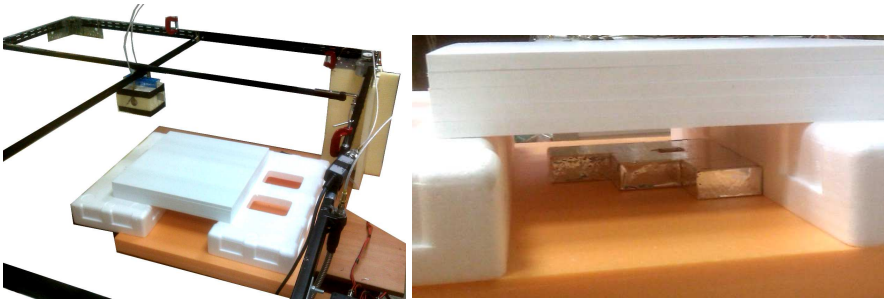


Рисунок 2 - Фотографии экспериментальной установки и тестового объекта

Расстояние от измерительной системы до тестового объекта составило 20 см, расстояние от преграды до объекта 4 см. Зондирование осуществлялось в полосе частот от 4 до 14 ГГц. В результате обработки данных радиозондирования без учёта наличия пластины из ПВХ, в приближении, что фоновая среда – вакуум, было получено радиоизображение тестовых объектов, которое представлено на рисунке 3а. Видно, что изображение объектов искажено, поскольку волны проходят через плоскопараллельную пластинку. Благодаря учёту толщины пластины и диэлектрической проницаемости ПВХ было восстановлено более точное изображение тестового объекта, которое представлено на рисунке 3б.

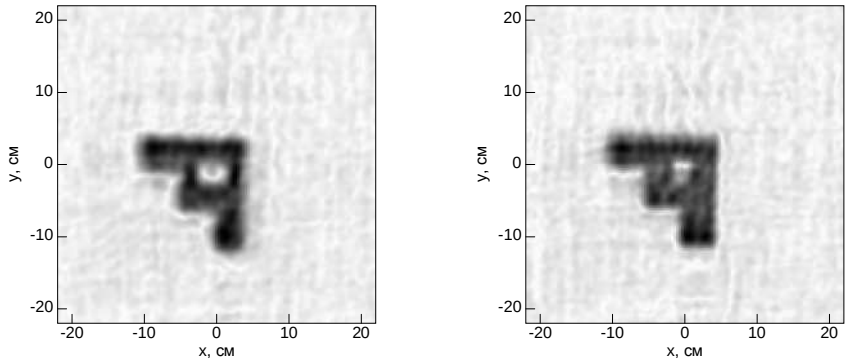


Рисунок 3 – Восстановленные изображения объекта: а - в предположении, что фоновая среда вакуум; б - с учётом влияния слоя поливинилхлорида

Полученный результат подтверждает практическую применимость предложенного метода и его соответствие реальным физическим процессам.

Помимо рассмотрения многослойных сред во второй главе исследуется влияние эффекта дифракции на восстановление радиоизображений путём численного моделирования и экспериментально. Учёт эффекта дифракции основан на приближении Кирхгофа. Среда разбивается на тонкие слои, толщиной много меньше длины волны. В каждом слое сечение сплошного объекта представляется в виде дифракционного экрана с соответствующей функцией пропускания. Поле, проходящее от слоя к слою вычисляется на основе разложения в спектр плоских волн.

В третьей главе предлагаются методы восстановления изображения при измерениях на неплоской апертуре, а так же метод восстановления изображений объектов, скрытых под неровной поверхностью среды.

При рассмотрении задачи томографии через неровную границу раздела сред, будем считать, что прохождение волн через границу описывается в приближении фазового экрана. Зададим форму поверхности функцией $\mathrm{H}(x, y)$. Верхняя среда описывается показателем преломления n_1, а нижняя среда описывается показателем преломления n_2. На рисунке 4 представлена схема моностатического радиозондирования через неровную границу раздела сред. Область неровности представляется в виде слоя толщиной d, в пределах которого изменяются значения функции $\mathrm{H}(x, y)$. Излучатель и приёмник перемещаются в горизонтальной плоскости на высоте h над верхней границей поверхности раздела сред.

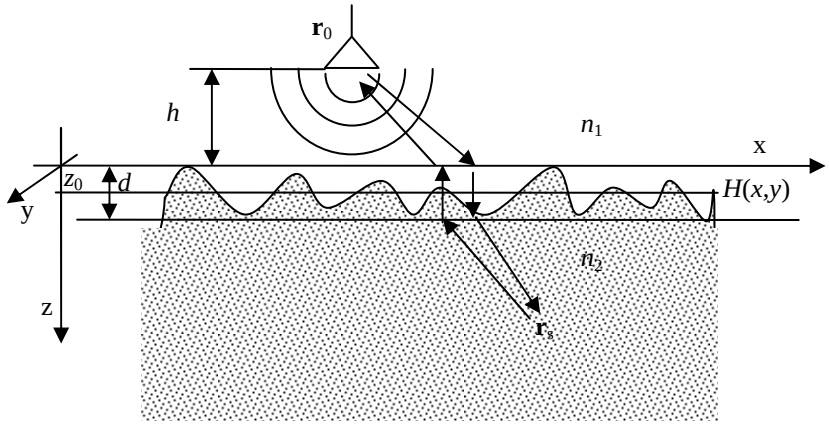


Рисунок 4 - Распространение радиоволн через неровную поверхность среды

В пункте 3.1.4 предлагается метод восстановления томографических изображений, основанный на приближении фазового экрана. Неровная поверхность заменяется на бесконечно тонкий фазовый экран. Поскольку рассматривается случай моностатического зондирования, представим рассеянные радиоволны в виде поля эквивалентных источников, расположенных в точках рассеивателей и излучающих на удвоенной частоте. Иными словами, обратная задача, сводится к задаче обнаружения множества синфазных источников на удвоенной частоте по измерениям поля на плоскости.

Вычислим поле на границе раздела сред с верхней стороны перед прохождением фазового экрана. Пусть поле в области измерений задано функцией $U(x,y,k)$, тогда пространственный спектр поля на высоте границы раздела сред z_0 можно записать в виде:

$$\tilde{u}_0(k_x,k_y,k)=\frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}U(x,y,k)\exp\left(-ik_x x-ik_y y-ik_z h\right)dxdy\,,$$

где $k_z=\sqrt{(2kn_1)^2-k_x^2-k_y^2}$.

Теперь необходимо учесть влияние фазового экрана. Но перед этим, перейдём в пространство координат:

$$u_0(x,y,k)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{u}_0(k_x,k_y,k)\exp\left(ik_x x+ik_y y\right)dk_x dk_y\ .$$

Чтобы компенсировать искажение, вносимое фазовым экраном, необходимо умножить $u_0(x,y,k)$ на комплексно сопряжённую передаточную функцию фазового экрана, то есть:

$$u_1(x,y,k)=u_0(x,y,k)\exp\left(-i2k(\mathrm{H}(x.y)-z_0)(n_1-n_2)\right).$$

Далее перейдем в область пространственных спектров и восстановим пространственный спектр поля в нижней среде перед прохождением фазового экрана:

$$\tilde{u}_1(k_x, k_y, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x, y, k) \exp(-ik_x x - ik_y y) dx dy .$$

Теперь изображение неоднородностей можно восстановить методом, аналогичным методу Столта:

$$p(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{k_{z\min}}^{k_{z\max}} \tilde{u}_1 \left(k_x, k_y, \frac{\sqrt{\tilde{k}_z^{\,2} + k_x^{\,2} + k_y^{\,2}}}{2n_2} \right) e^{-i\tilde{k}_z z} e^{ik_x x + ik_y y} d\tilde{k}_z dk_x dk_y .$$

Таким образом, решение обратной задачи с учётом прохождения неровной границы раздела сред сводится к трехмерному преобразованию Фурье

Для экспериментальной проверки метода восстановления изображения объектов, скрытых за неровной границей раздела сред был проведён эксперимент по визуализации металлического объекта в сухом песке с неровной поверхностью. Диэлектрическая проницаемость песка равна 2,2. Приёмная и передающая антенны перемещались в плоскости на средней высоте 20 см над поверхностью песка. Радиозондирование проводилось в полосе частот от 4 до 14 ГГц. Для песка использовался ящик с внутренними горизонтальными размерами 36 см на 36 см и высотой 18 см. В качестве тестового объекта использовался объект ступенчатой формы, с размерами ступеньки 5 см и помещённый на глубину около 5 см.

На рисунке 5 представлена фотография экспериментальной установки. Путём обработки данных зондирования методом Столта была восстановлена форма поверхности песка (рисунок 6). Максимальная разность высот поверхности составила 7 см.

В предположении, что поверхность песка плоская, и приняв показатель преломления песка равным 1.5, было восстановлено изображение тестового объекта (рисунок 7а). Восстановленное изображение объекта искажено. Это объясняется тем, что форма поверхности имеет форму линзы, что приводит к искажению размеров восстанавливаемого изображения объекта. После учёта формы поверхности было восстановлено изображение объекта, представленное на рисунке 7б.



Рисунок 5 – Фотография экспериментальной установки и поверхности песка

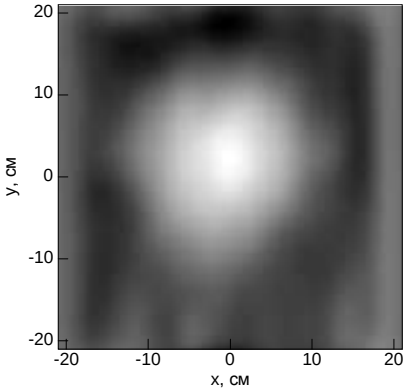
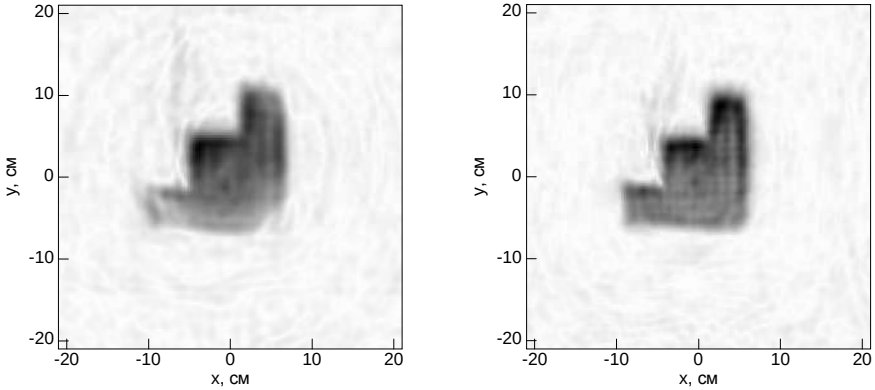


Рисунок 6 – Восстановленная форма поверхности



а б

Рисунок 7 – Восстановленное изображение тестового объекта, скрытого под неровной поверхностью песка: а - в приближении, что поверхность плоская; б – с учётом формы поверхности в приближении фазового экрана

После учёта формы поверхности точность восстановления формы объекта улучшилась, однако имеются артефакты, связанные с неточным определением формы поверхности и приближением фазового экрана. Также был проведён эксперимент с резко неровной поверхностью. В пункте 3.1.6 диссертации представлены результаты обработки экспериментальных данных при резкой неровности песка высотой 2 см, и показана возможность восстановления изображения объекта. Отметим, что приближение фазового экрана для восстановления томографических изображений можно применять и при

контактном зондировании по неплоской поверхности, при этом достаточно положить $h = 0$, и $n_1 = n_2$.

Отдельно исследован случай зондирования на цилиндрической поверхности. Рассматриваемая схема измерений представлена на рисунке 8. Предполагается, что приёмопередающий радиолокатор перемещается по окружности радиуса R. Считаем, что излучающая и приёмная антенны не направленные и описываются как источники сферических волн.

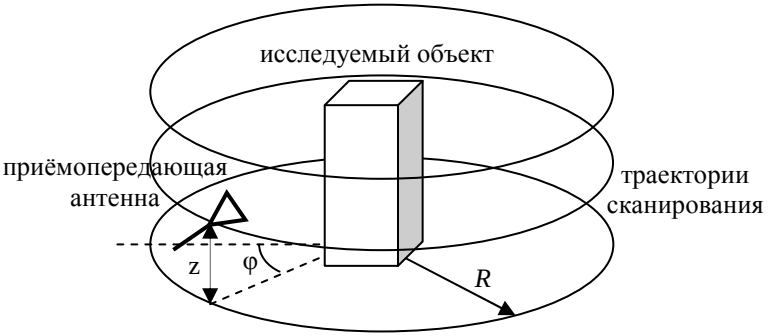


Рисунок 8 - Схема зондирования цилиндрического объёма

В разделе 3.3 предлагается быстрый алгоритм восстановления трёхмерных радиоизображений за счёт сведения задачи пространственно согласованной фильтрации к трёхмерному преобразованию Фурье. Решение обратной задачи, в данном случае – это нахождение функции рассеивающих неоднородностей $p(x, y, z)$ по измеренному полю $U(\varphi, k, z)$, k - волновое число для соответствующей частоты зондирования. На основе метода пространственно согласованной фильтрации был получен метод восстановления трёхмерных изображений, который сводится к следующим операциям:

$$\tilde{U}(\varphi', k_z, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} U(\varphi, z, k) \exp\left(ik' R \cos(\varphi - \varphi') + ik_z z\right) d\varphi dz,$$

где $k' = \sqrt{(2k)^2 - k_z^{\,2}}$.

Данное выражение является преобразованием Фурье по оси z и циклической сверткой по φ. То есть двойной интеграл может быть полностью вычислен на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье, а пространственный спектр неоднородностей можно записать в виде:

$$\tilde{P}(k_x, k_y, k_z) = \tilde{U}(\varphi', k_z, k) = \tilde{U}\left(\arg(k_x + ik_y), k_z, \sqrt{k_x^{\,2} + k_y^{\,2} + k_z^{\,2}} \,/\, 2\right).$$

Распределение рассеивающих неоднородностей восстанавливается путём обратного трёхмерного преобразования Фурье:

$$p(x,y,z) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{P}(k_x,k_y,k_z)\exp\left(-ixk_x - iyk_y - izk_z\right)dk_x dk_y dk_z \,.$$

Предложенный метод был проверен путём численного моделирования и экспериментально. Был проведён эксперимент с металлизированным манекеном и пистолетом (рисунок 9). Были измерены косинусные квадратуры сигналов на 512 частотах в диапазоне от 4 ГГц до 14 ГГц для области сканирования антенн по вертикали 100 см и вращения манекена по углу на 360 градусов (рисунок 10).



Рисунок 9 – Фотография экспериментальной установки и тестового объекта в виде манекена с пистолетом

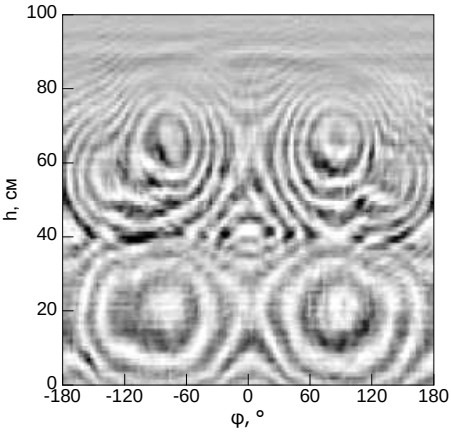


Рисунок 10 – Косинусная квадратура измеренного поля на частоте 10 ГГц.

С помощью обработки измеренного поля предложенным методом было восстановлено трёхмерное изображение исследуемого объекта размерами 256x256x256 точек менее чем за 10 секунд на персональном компьютере. На рисунке 11 представлены два сечения восстановленного трёхмерного изображения. Виден контур манекена, и в определённом сечении наблюдается изображение пистолета наклеенного на манекен. Визуально разрешение восстановленного изображения порядка 15 мм. Артефакты на восстановленном изображении связаны с неточностью позиционирования манекена по углу и неточностью позиционирования антенн. Кроме того, артефакты появляются из-за преобразований системы координат в дискретной сетке пространственных частот, даже при использовании интерполяции.

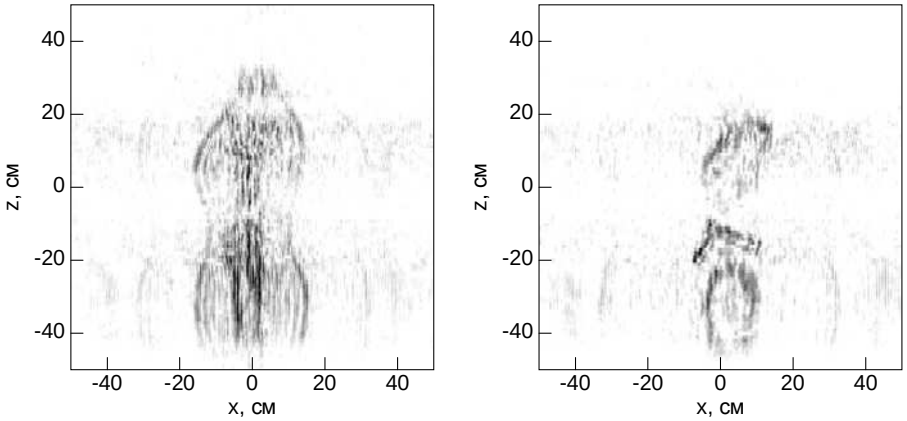


Рисунок 11 – Сечения восстановленного трёхмерного изображения:
а – сечение по центру; б – в плоскости пистолета

В четвёртой главе рассмотрены схемы бистатического зондирования, в которых излучатель и приёмник разнесены в пространстве. Разработаны следующие методы: трансмиссионной дифракционной томографии; метод восстановления изображений звукоизлучающих объектов; метод локационной многопозиционной бистатической томографии.

Предлагается рассмотреть трансмиссионную схему зондирования, представленную на рисунке 12. Волна от монохроматического источника сферических волн дифрагирует на исследуемом объекте и попадает на матрицу приёмников, позволяющих измерять амплитуду и фазу волны. Система может вращаться вокруг объекта для осуществления многоракурсных измерений. Предполагается, что длина волны сравнима с характерными размерами объекта, а следовательно, существенен эффект дифракции и лучевое приближение неприменимо. Рассматриваемые волновые процессы имеют схожее математическое описание, как для электромагнитных, так и для ультразвуковых волн. На примере ультразвуковых волн в воздухе с частотой 40 кГц (длина волны 8,25 мм) исследуем возможности данной схемы зондирования.

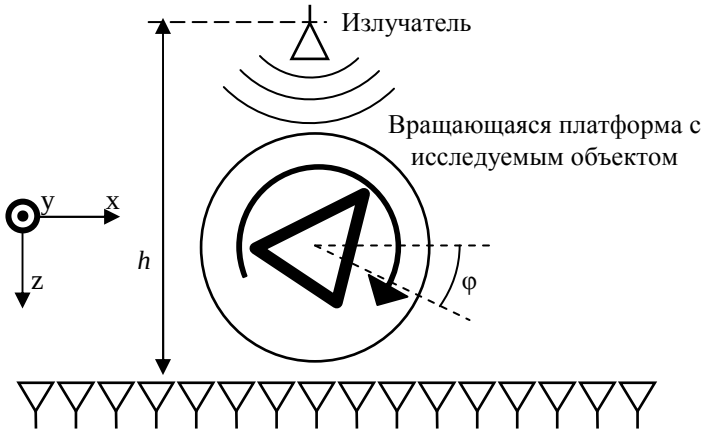


Рисунок 12 – Схема трансмиссионных измерений

Для численного моделирования прямой задачи воспользуемся приближением Кирхгофа при описании процесса дифракции. В качестве тестовых объектов возьмём круг и квадрат (рисунок 13). На рисунке 14 представлен результат моделирования поля дифракции на выбранных тестовых объектах. Можно наблюдать, что теневая область достаточно размыта, что не позволяет применить существующие трансмиссионные томографические методы, основанные на лучевом приближении, такие как обратное преобразование Радона.

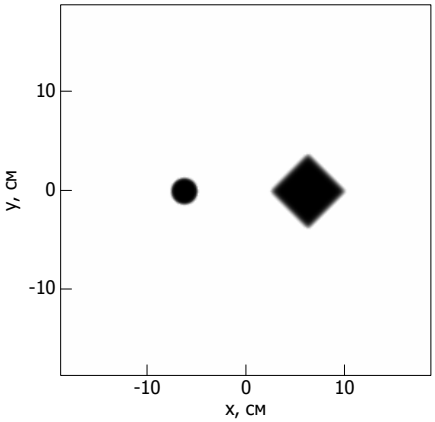


Рисунок 13 – Изображение моделируемых объектов

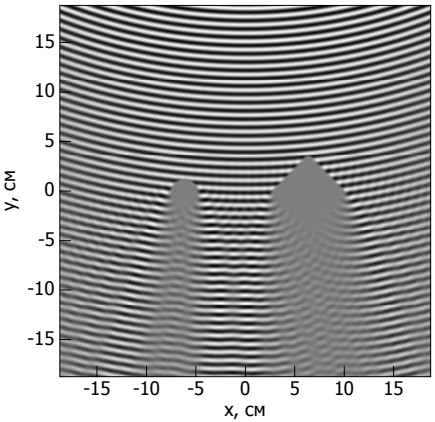
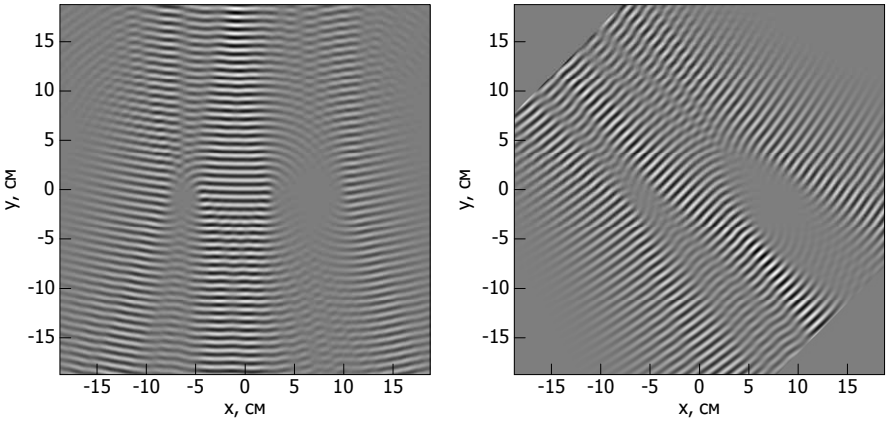


Рисунок 14 – Результат моделирования поля дифракции

Предлагается на основе измеренного поля в области размещения матрицы приемников восстановить распределение поля во всём пространстве методом обратной фокусировки:

$$U_R(x,y,z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{U}(k_x,k_y,z=h)\exp(ik_x x+ik_y y)\cdot(\exp(ik_z(h-z)))^{*}\,dk_x dk_y$$

где $\tilde{U}(k_x,k_y,z=h)=\frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}U(x,y,z=h)\exp(-ik_x x-ik_y y)dk_x dk_y$ - пространственный спектр поля в области измерений, $U_R(x,y,z)$ - восстановленное распределение поля. Данное выражение позволяет восстановить однородные волны, однако не учитывает неоднородные волны. На рисунке 15 показан результат восстановления поля для различных углов поворота.



а б

Рисунок 15 – Восстановленные распределения поля:
а – при угле поворота 0°; б - при угле поворота 45°

Для восстановления изображения объектов суммируем амплитуды восстановленных распределений поля для различных углов зондирования. Путём суммирования амплитуд полей для 64 проекций было восстановлено изображение моделируемых объектов (рисунок 16).

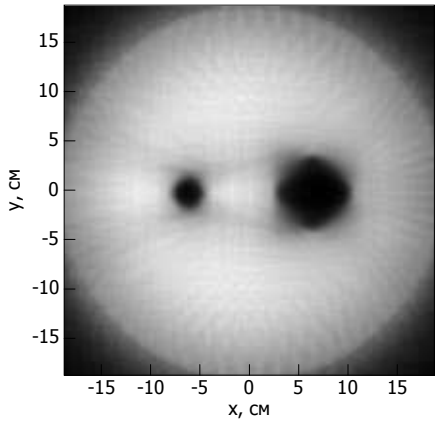


Рисунок 16 – Восстановленное изображение объекта по 64 ракурсам измерений

Был проведён эксперимент по трансмиссионной ультразвуковой томографии в воздухе на частоте 40кГц (рисунок 17). В качестве тестового объекта использовался бумажный цилиндр, скрытый в призме из нетканого полотна.

На рисунке 18 представлена косинусная квадратура измеренного поля при различных углах поворота платформы с тестовым объектом. Восстановленное изображение представлено на рисунке 19. Видно, что скрытый объект визуализируется, а также визуализирована призма из нетканого полотна. Полученное изображение подтверждает применимость предложенного метода трансмиссионной дифракционной томографии.

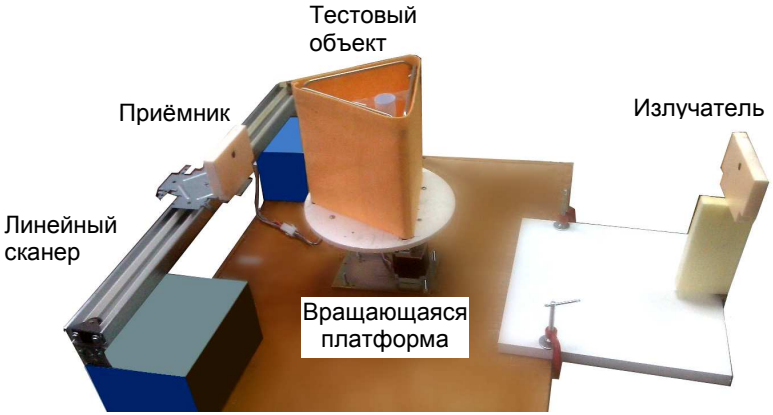


Рисунок 17 – Фотография экспериментальной установки и тестового объекта в виде призмы из нетканого плотна и бумажного цилиндра диаметром 3 см

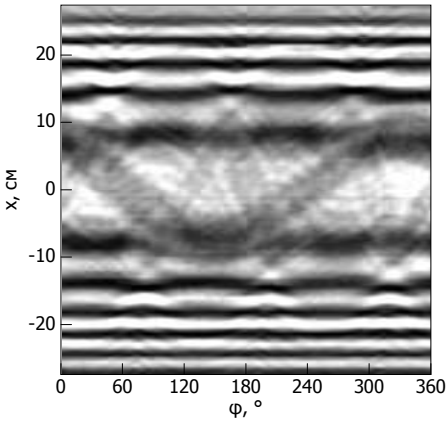


Рисунок 18 – Измеренное поле

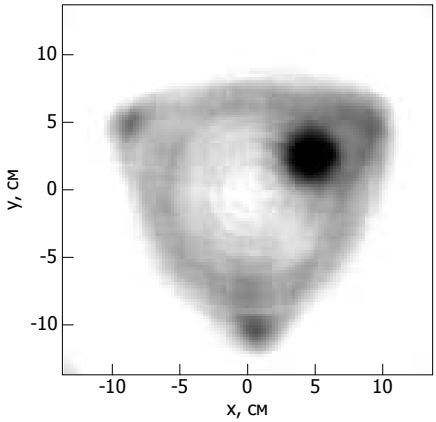


Рисунок 19 – Восстановленное изображение

Трансмиссионная схема зондирования требует многосторонний доступ к объекту и не позволяет визуализировать вогнутые области объектов, а также объекты с самозатенением. При одностороннем доступе локационные схемы зондирования более предпочтительны, однако требуют применения сверхширокополосных сигналов для получения разрешения по дальности.

В разделе 4.2 диссертации рассмотрена возможность визуализации источников на примере источников звука в воздухе в широкой полосе частот на основе метода пространственно согласованной фильтрации.

В разделе 4.3 предлагается локационный многопозиционный бистатический метод зондирования (рисунок 20), который как выяснится, позволяет получать разрешение по дальности даже при использовании монохроматических сигналов. Кроме того, благодаря множеству комбинаций позиций излучателя и приёмника обеспечивается зондирование частично затенённых объектов. Решение обратной задачи для данного случая зондирования выглядит следующим образом:

$$p(x,y,z) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} U(x_1,y_1,x_2,y_2,f)\,\mathrm{G}^*(\mathbf{r}-\mathbf{r}_1)\,\mathrm{G}^*(\mathbf{r}_2-\mathbf{r})\,dx_1dy_1dx_2dy_2df,$$

где $(x_{\min}, x_{\max})$ - пределы перемещения излучателя и приёмника по оси x, $(y_{\min}, y_{\max})$ - пределы перемещения излучателя; $\mathrm{G}(\mathbf{r}) = \exp(ik|\mathbf{r}|)/(4\pi|\mathbf{r}|)$; $(f_{\min}, f_{\max})$ - полоса частот сигнала; $U(x_1,y_1,x_2,y_2,f)$ - измеренное поле при положении излучателя (x_1,y_1) и координате приёмника (x_2,y_2) на частоте зондирующего сигнала f.

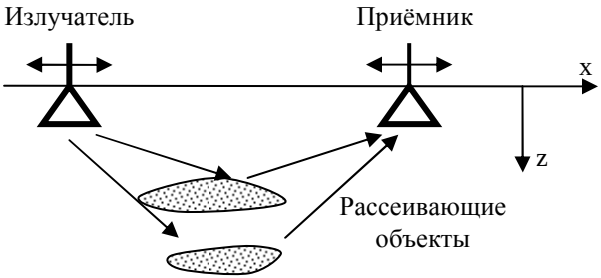


Рисунок 20 - Схема бистатических многопозиционных измерений

В пункте 4.3.3 диссертации было получено, что разрешение по дальности при монохроматическом зондировании можно оценить по формуле:

$$\Delta Z = \frac{8{T_{0.5}}^2 z^2 B^2 k}{B^4 k^2 - z^2 16{T_{0.5}}^4},$$

где константа $T_{0.5} = 1.9504318$ находится численно, B - размер апертуры системы, z - дальность до объекта, k - волновое число.

Для проверки возможности получения разрешения по дальности, а также возможности визуализации частично затенённых объектов был проведён эксперимент с применением ультразвуковых волн в воздухе на частоте 40 кГц с областью сканирования 42 см (рисунок 21).

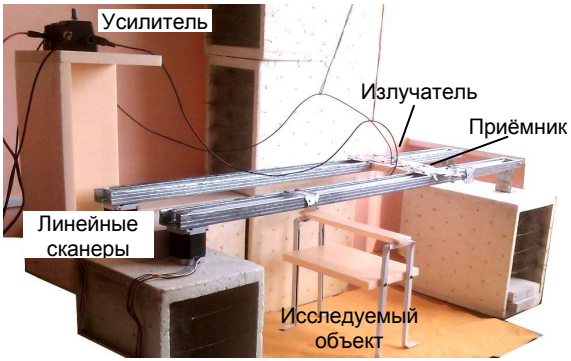


Рисунок 21 - Фотография экспериментальной установки и тестового объекта

Результат измерений косинусной квадратуры поля на частоте 40 кГц приведен на рисунке 22. Представлены измерения для объекта в виде двух горизонтальных пластинок и объекта в виде одной пластинки. Видна симметрия измеренных данных, что является следствием выполнения теоремы взаимности.

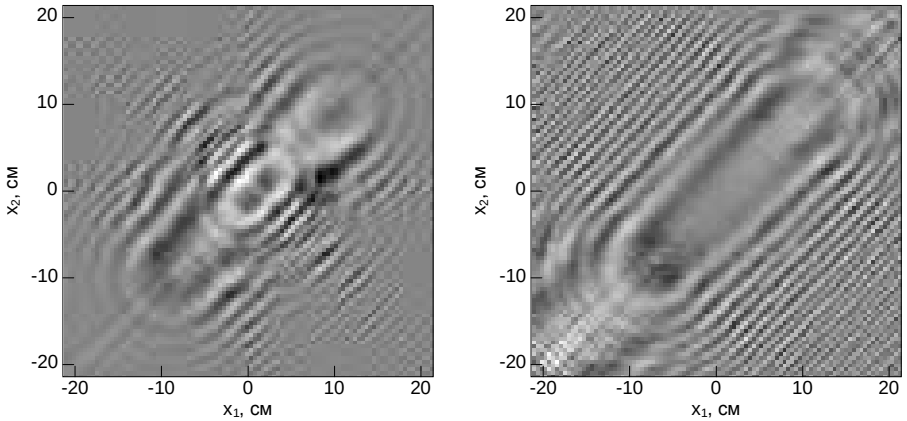


Рисунок 22 - Результаты измерений: а – для двух горизонтальных пластинок; б - для одной горизонтальной пластинки

В результате обработки данных зондирования были восстановлены изображения тестовых объектов (рисунки 23а и 24а). Так же было проведено численное моделирование аналогичных объектов для сравнения и проверки численной модели. На рисунках 23б и 24б представлены результаты численного моделирования. Наблюдается соответствие численной модели и эксперимента, что свидетельствует о корректности численной модели. Имеется также разрешение по дальности при монохроматическом зондировании, а также визуализируются частично затенённые объекты.

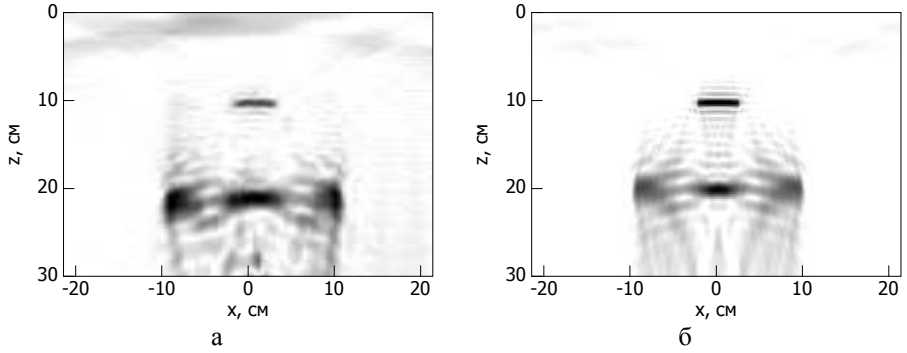
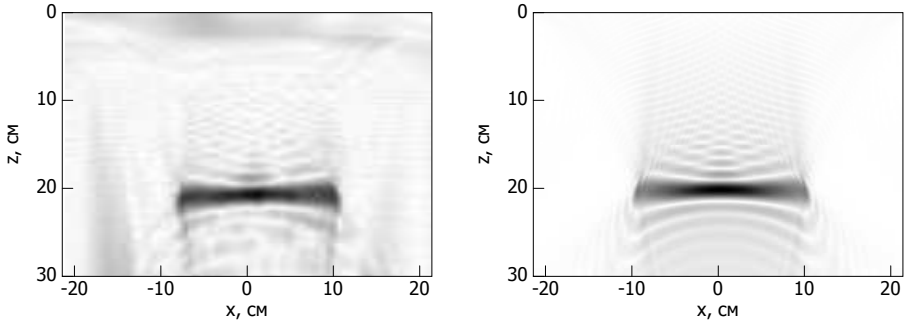


Рисунок 23 - Восстановленные изображения тестового объекта: а – эксперимент; б – численная модель

Дифракция на верхней пластине вызывает искажения изображения пластины расположенной ниже (рисунок 23), поскольку метод обработки данных не учитывает эффект дифракции.



а б

Рисунок 24- Восстановленные изображения одиночного объекта: а – эксперимент; б – численная модель

В пятой главе предлагаются методы оптимизации измерений в системах радиотомографии для ускорения процесса сбора данных при минимальном количестве излучателей и приёмников. Одним из возможных решений является применение множества излучателей и множества приёмников. Подобные технологии получили название Multiple Input Multiple Output (MIMO). При этом оптимальное размещение излучателей и приёмников зависит от множества факторов: спектра зондирующих сигналов, дальности до цели, апертуры системы, максимально допустимого количества излучателей и приёмников, диаграммы направленности антенн и других факторов. Поэтому, как правило, MIMO системы строятся на основе эквидистантных антенных решёток с равномерным распределением излучающих и приёмных элементов.

Предлагается рассмотреть монохроматическую зондирующую систему и осуществить оптимизацию размещения излучателей и приёмников таким образом, чтобы точечный рассеиватель на заданном расстоянии перед центром апертуры визуализировался однозначно с наилучшим разрешением. Пусть излучатели и приёмники располагаются в одной плоскости. В пункте 5.1.1 диссертации показано, что реакция системы на точечный рассеиватель может быть представлена в виде произведений аппаратных функций излучающей решётки и приёмной решётки, что позволяет ускорить процесс численного моделирования аппаратной функции системы и численно оптимизировать расположение излучающих и приёмных антенн.

В случае если стоимость излучателей и приёмников сопоставима, то наиболее оптимальной MIMO системой является система с одинаковым количеством излучателей и приёмников. Если взять линейную матрицу излучателей и линейную матрицу приёмников, разместить их ортогонально (рисунок 25), то произведение их аппаратных функций даст единственный локализованный максимум.

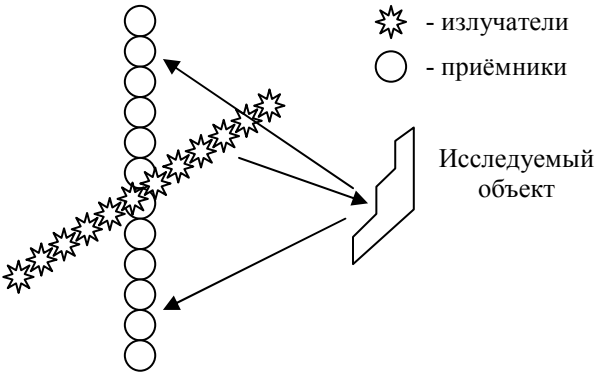


Рисунок 25 – Крестовидное размещение излучателей и приёмников

Согласно схеме, изображенной на рисунке 25 была разработана экспериментальная установка для ультразвуковой томографии в воздухе на основе перпендикулярных матриц ультразвуковых излучателей и приёмников с полосой частот от 37 до 43 кГц. На рисунке 26 представлена фотография экспериментальной установки и тестовый объект, а на рисунке 27. результат измерений косинусной квадратуры сигнала на частоте 40 кГц. По оси x отложена координата излучателя, а по оси y координата приёмника.



Рисунок 26 - Фотография экспериментальной установки

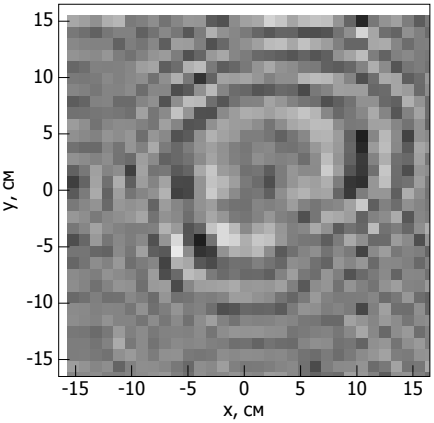


Рисунок 27 – Результат измерений (косинусная квадратура)

В ходе эксперимента измерения производились на 16 частотах в полосе от 37 до 43 кГц. Тестовый объект размещался на расстоянии 22 см. Данные измерений были обработаны с помощью метода пространственно согласован-

ной фильтрации. На рисунке 18 представлен результат обработки на частоте 40 кГц, а на рисунке 29 представлен результат суммирования восстановленных изображений на 16 частотах в полосе от 37 кГц до 43 кГц. Видно, что при обработке данных на одной частоте, высок уровень артефактов, что связано с неточностью изготовления экспериментальной установки и разреженностью решёток. При суммировании в полосе частот артефакты и шумовые компоненты уменьшаются, в то время как сигнал складывается синфазно, в результате чего, отношение сигнал-шум возрастает.

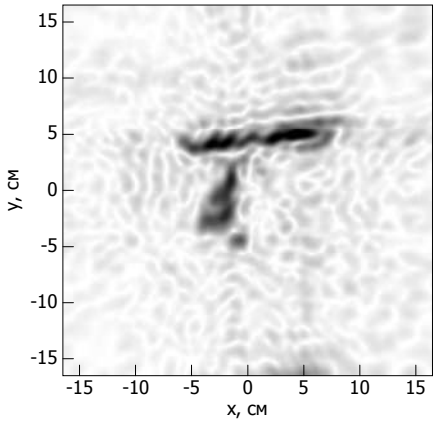


Рисунок 28 - Восстановленное изображение тестового объекта на частоте 40 кГц.

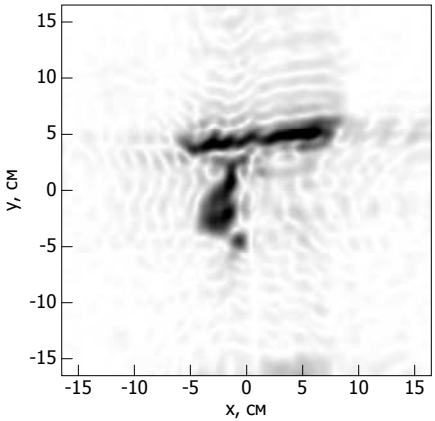


Рисунок 29 - Восстановленное изображение тестового объекта в полосе частот 37-43 кГц.

Для радиоволновых систем сложнее создать коммутируемую решётку излучающих антенн, чем для ультразвуковых. Гораздо дешевле использовать множество моностатических радиолокаторов с собственным генератором, например, доплеровские датчики. В разделе 5.2 диссертации предлагается схема измерений, представленная на рисунке 30. Применяются два рефлектора в виде параболических четвертьцилиндров. Один параболический рефлектор неподвижен и служит для фокусировки волны на второй параболический рефлектор. Второй переизлучатель является подвижным. Доплеровские радиолокаторы располагаются в фокусе неподвижного рефлектора. Рассеянные объектом волны, согласно теореме взаимности, возвращаются в приёмную антенну доплеровского радиолокатора по той же траектории и с тем же фазовым набегом. При этом считаем, что излучающая и приёмная антенны размещены достаточно близко, и расстоянием между ними можно пренебречь.

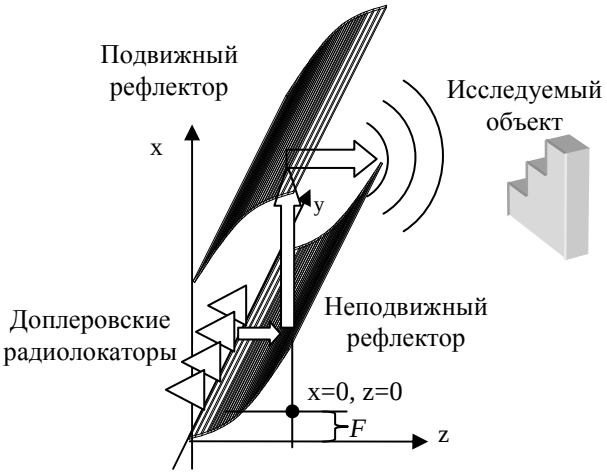


Рисунок 30 - Схема измерений

В пункте 5.2.4 диссертации показано, что реакция на точечный рассеиватель для данной системы записывается в виде:

$$\mathrm{A}(x,y,x_0,y_0)=\mathrm{a}(x,y,h)\exp\left(i2k\sqrt{(y-y_0)^2+\left(x+\sqrt{h^2+(x-x_0)^2}+4F\right)^2}\right)$$

где $\mathrm{a}(x,y,h)$ - плавно меняющийся амплитудный множитель, описывающий ослабление поля с расстоянием; h - расстояние от плоскости перемещения фокуса подвижного переизлучателя до точечного рассеивателя; (x_0,y_0,h) - координата точечного рассеивателя; x - координата подвижного переизлучателя (расстояние от фокуса неподвижного параболоида до фокуса подвижного параболоида); y - положение доплеровского радиолокатора; F - фокусное расстояние параболоидов. Далее будем считать, что амплитудный множитель $\mathrm{a}(x,y,h)$ не существенно влияет на поле измерений, поскольку меняется намного медленнее экспоненциального множителя, и будем считать $\mathrm{a}(x,y,h)=1$. В пункте 4.2.4 показано, что данное аналитическое решение согласуется с численным решением аналогичной задачи с точностью до слабо меняющихся амплитудных множителей.

Было проведено численное моделирование поля в области измерений для объекта сложной формы (в форме ступенчатого треугольника с размерами ступеньки 5 см) на частоте 24 ГГц. Результат численного моделирования результата измерений представлен на рисунке 31.

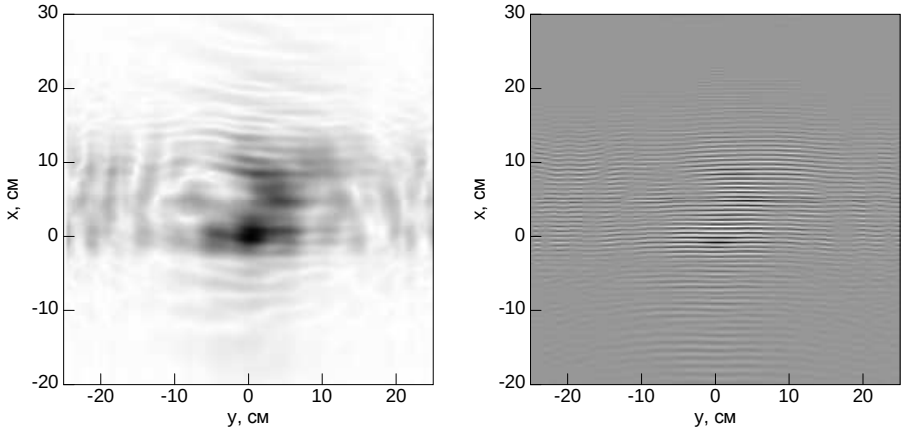


Рисунок 31 - Реакция системы на объект в форме ступенчатого треугольника на частоте 24 ГГц: а – амплитуда сигнала; б – косинус квадратура сигнала

Даже по данным моделирования прямой задачи видны некоторые очертания тестового объекта, что связано с фокусирующими свойствами переизлучателя и плоской формой объекта, однако такого качества изображения недостаточно для получения разрешения близкого к дифракционному пределу. Поэтому необходимо решить обратную задачу восстановления распределения рассеивающих неоднородностей на основе измеряемых данных на выходе доплеровских радиолокаторов.

Для восстановления изображения объекта предлагается использовать метод пространственно согласованной фильтрации. В линейном приближении измеренный сигнал от сложного объекта, можно представить в виде суммы сигналов от точечных рассеивателей. То есть сигналы от рассеивателей, расположенных в различных точках пространства, можно использовать в качестве пространственно согласованного фильтра. Предлагается следующая операция согласованной фильтрации для восстановления изображений:

$$\rho_R(x', y') = \int_y \int_x U(x, y) A^*(x, y, x', y') dx dy ,$$

где $\rho_R(x', y')$ - восстановленное плоское изображение неоднородностей в среде; $U(x, y)$ - измеренное поле при положении переизлучателя x, и положении радиолокатора y. Следует отметить, что в данном случае нет разрешения по дальности, поэтому изображение объекта будет восстановлено, если точно задать дальность до объекта h. Результат восстановления изображения объекта представлен на рисунке 32.

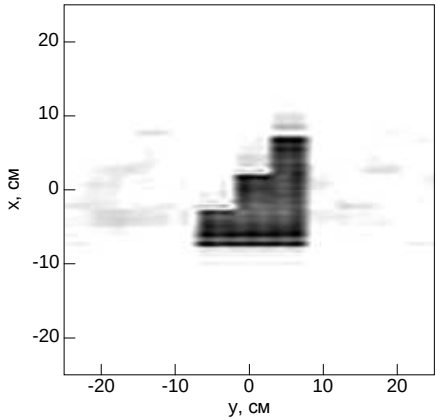


Рисунок 32 - Восстановленное изображение на частоте 24 ГГц (численное моделирование)

Изображение моделируемого объекта отчётливое и имеет разрешение порядка половины длины волны, однако, на изображении присутствуют артефакты, что связано с дискретностью численной модели, ограниченностью области моделирования, а также небольшим отличием аналитически рассчитанной аппаратной функции от численно смоделированной. Следует отметить, что в данной системе разрешение по оси x и по оси y различно, по оси y разрешение будет хуже, поскольку угловой размер апертуры системы, в данном случае, меньше.

Для проверки предложенного метода и разработанной численной модели были проведены экспериментальные исследования по визуализации металлического объекта ступенчатой формы с размером ступеньки 5 см. В качестве доплеровского радиолокатора использовался доплеровский датчик CONRSM1700, работающий на частоте 24 ГГц. В эксперименте вместо линейной решётки доплеровских датчиков использовался механический сканер, который перемещал датчик по оси y с шагом 5 мм. Параболический переизлучатель имел ту же форму, что была рассмотрена в численной модели. Сигнал с доплеровского датчика измерялся с помощью микровольтметра UT-70D. Фотография экспериментальной установки представлена на рисунке 33.

После обработки данных измерений было восстановлено изображение тестового объекта (рисунок 34). Качество восстановленного изображения невысоко, вследствие погрешностей в изготовлении экспериментальной установки (в частности параболических рефлекторов) и наличия шумов измерений. Однако полученный результат подтверждает принципиальную возможность восстановления радиоизображений объектов с помощью доплеровских радиолокаторов и подвижного переизлучателя.

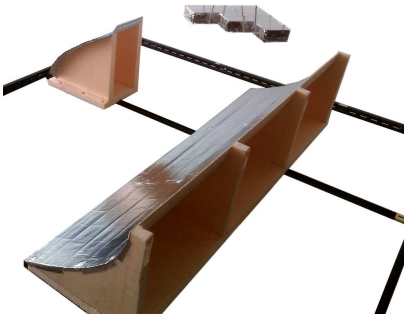


Рисунок 33 - Фотография экспериментальной установки и тестового объекта

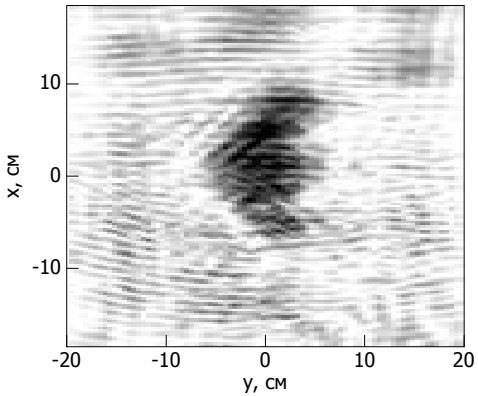


Рисунок 34 - Восстановленное радиоизображение тестового объекта

В шестой главе предлагаются методы визуализации рассеивающих объектов, скрытых за электрически неоднородными препятствиями. Разработан метод учёта влияния диэлектрической преграды известной формы при восстановлении трёхмерных изображений скрытых объектов. Для моностатического зондирования используется приём замены рассеивающих объектов на эквивалентные синфазные источники на удвоенной частоте. Таким образом, решение прямой задачи сводится к расчёту поля эквивалентных источников, проходящего через диэлектрические неоднородности, а обратная задача сводится к восстановлению распределения источников на основе обработки поля в плоскости измерений.

Для решения прямой задачи предлагается разбить среду на тонкие плоские слои толщиной $\Delta z << \lambda$. В пределах каждого слоя аппроксимируем форму объекта вертикальными границами, как показано на рисунке 35. Расчет поля в среде производится последовательно, от слоя к слою. Поле в последующем слое на глубине $z + \Delta z$ вычисляется на основе значений поля в слое на глубине z. Предлагается осуществлять расчет поля в неоднородной среде на основе расчета поля в однородных средах с показателями преломления n_1 и n_2, а затем объединять эти решения в соответствии с распределением показателя преломления $n(\mathbf{r})$.

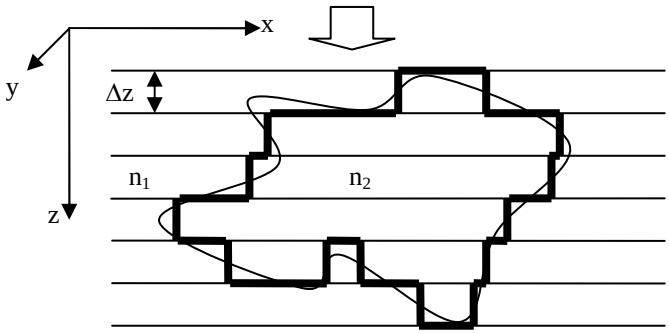


Рисунок 35 – Иллюстрация к решению задачи распространения волн в неоднородной среде – аппроксимация формы объекта

Решение в среде с n_1, на основе разложения в спектр плоских волн, имеет вид:

$$U_1(x,y,z+\Delta z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{U}(k_x,k_y,z)\exp\left(ik_x x+ik_y y+ik_{1_z}\Delta z\right)dk_x dk_y ,$$

где $k_{1_z}=\sqrt{(kn_1)^2-k_x{}^2-k_y{}^2}$ - это z компонента волнового вектора в среде с показателем преломления n_1;

$$\tilde{U}(k_x,k_y,z)=\frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}U(x,y,z)\exp\left(-ik_x x-ik_y y\right)dxdy$$

- это спектр плоских волн поля на выходе предыдущего слоя; $U_1(x,y,z+\Delta z)$ - поле на выходе текущего слоя, если среда в нём однородна и имеет показатель преломления n_1.

Решение в среде с n_2 записывается аналогичным образом:

$$U_2(x,y,z+\Delta z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{U}(k_x,k_y,z)\exp\left(ik_x x+ik_y y+ik_{2_z}\Delta z\right)dk_x dk_y ,$$

где $k_{2_z}=\sqrt{(kn_2)^2-k_x{}^2-k_y{}^2}$ - это z компонента волнового вектора в среде с показателем преломления n_2.

Далее необходимо объединить решения $U_1(x,y,z+\Delta z)$ и $U_2(x,y,z+\Delta z)$ с учётом распределения показателя преломления $n(\mathbf{r})=n(x,y,z)$. Итоговое поле в последующем слое запишется в виде:

$$U(x,y,z+\Delta z)=\begin{cases} U_1(x,y,z+\Delta z), \text{если } n(x,y,z)=n_1 \\ U_2(x,y,z+\Delta z), \text{если } n(x,y,z)=n_2 \end{cases}. \quad (4)$$

С помощью итерационных вычислений согласно формуле (4) вычисляется поле во всей среде.

Для проверки предложенного решения прямой задачи, было проведено численное моделирование линзы с показателем преломления 2 и фокусным расстоянием 16 см. Линза должна обеспечить преобразование сферического волнового фронта в плоский. Форма линзы рассчитывается аналитически. На рисунке 36 представлен результат численного моделирования поля точечного источника, расположенного в фокусе линзы, по формуле (4). Сферический волновой фронт действительно преобразован в плоский, что свидетельствует о согласии предложенной численной модели с известным аналитическим решением для линзы.

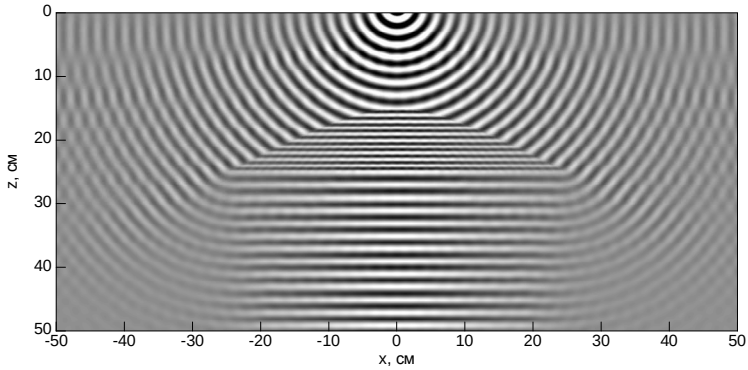


Рисунок 36 – Поле волны точечного источника, проходящее через линзу (толщина линзы 10 см, показатель преломления 2, фокусное расстояние 16 см, частота 15 ГГц)

Рассмотрим решение обратной задачи для моностатической схемы измерений, в которой излучатель и приёмник совмещены и вместе перемещаются в плоскости над исследуемой средой (рисунок 37). В данном случае задача сводится к восстановлению синфазных источников, излучающих на удвоенной частоте. Для решения обратной задачи воспользуемся тем же подходом, что и при решении прямой задачи.

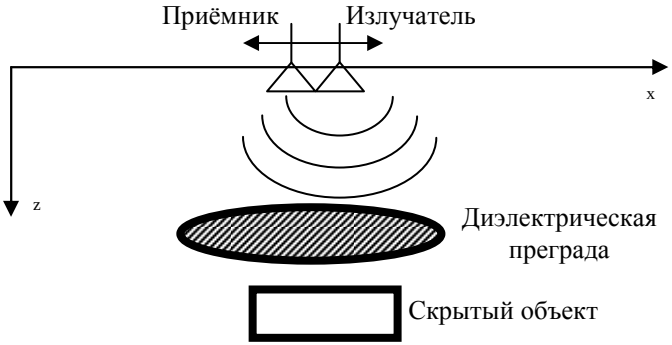


Рисунок 37 – Моностатическая схема измерений

Решение обратной задачи осуществим на основе обратного распространения поля от области измерений в исследуемую среду. Разобьем весь объём среды на тонкие слои толщиной Δz и будем последовательно вычислять поле от слоя к слою, считая, что поле в области измерений $P(x,y,z)$, при $z=0$ задано. Необходимо восстановить распределение поля $P(x,y,z)$ во всём исследуемом объёме. Запишем операции, необходимые для вычисления поля P в слое $z+\Delta z$, через поле P в слое z:

$$P_1(x,y,z+\Delta z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{P}(k_x,k_y,z)e^{ik_x x+ik_y y}\left(e^{ik_{1z}\Delta z}\right)^{*}dk_x dk_y\,, \tag{5}$$

$$P_2(x,y,z+\Delta z)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{P}(k_x,k_y,z)e^{ik_x x+ik_y y}\left(e^{ik_{2z}\Delta z}\right)^{*}dk_x dk_y\,, \tag{6}$$

где

$$\tilde{P}(k_x,k_y,z)=\frac{1}{(2\pi)^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}P(x,y,z)\exp\left(-ik_x x-ik_y y\right)dxdy\,,$$

$$k_{1z}=\sqrt{(2kn_1)^2-k_x{}^2-k_y{}^2}\,,\ k_{2z}=\sqrt{(2kn_2)^2-k_x{}^2-k_y{}^2}\,.$$

Искомое поле сшивается из двух решений P_1 и P_2:

$$P(x,y,z+\Delta z)=\begin{cases}P_1(x,y,z+\Delta z), \text{ если } n(x,y,z)=n_1\\ P_2(x,y,z+\Delta z), \text{ если } n(x,y,z)=n_2\end{cases} \tag{7}$$

Множители $\left(e^{ik_{1z}\Delta z}\right)^{*}$ и $\left(e^{ik_{2z}\Delta z}\right)^{*}$ в интегралах (5) и (6) обеспечивают восстановление распределения однородных волн, однако не позволяют восстановить неоднородные волны, а напротив устремляют их к нулю. Данное обстоятельство делает решение более устойчивым, но менее точным. По сути, применение множителей подобного вида эквивалентно решению прямой задачи

распространения волн в среде, но с инвертированной фазой. Данное поле действительно может распространяться в среде и поэтому предложенный метод целесообразно назвать методом обратного распространения поля.

Восстановленное поле $P(x,y,z)$ является монохроматическим. Для получения разрешения по глубине необходима обработка в широкой полосе частот. Для обработки широкополосного сигнала, достаточно провести обработку по формулам (5-7) на всех частотах зондирующего сигнала в отдельности, а затем суммировать полученные результаты:

$$P_{3D}(x,y,z) = \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} P(x,y,z,\omega) d\omega, \qquad (8)$$

где $P_{3D}(x,y,z)$ - восстановленное трёхмерное изображение с разрешением по дальности, $P(x,y,z,\omega)$ - восстановленное трёхмерное распределение поля эквивалентных источников на частоте ω.

Для проверки предложенного метода решения обратной задачи был проведен эксперимент по визуализации металлического объекта, скрытого за линзой из гипса. В качестве тестового объекта использовался ступенчатый треугольник с размерами ступеньки 5 см. В качестве преграды выступала параболическая линза из гипса диаметром 335 мм, высотой 60 мм, показатель преломления гипса 1,5.

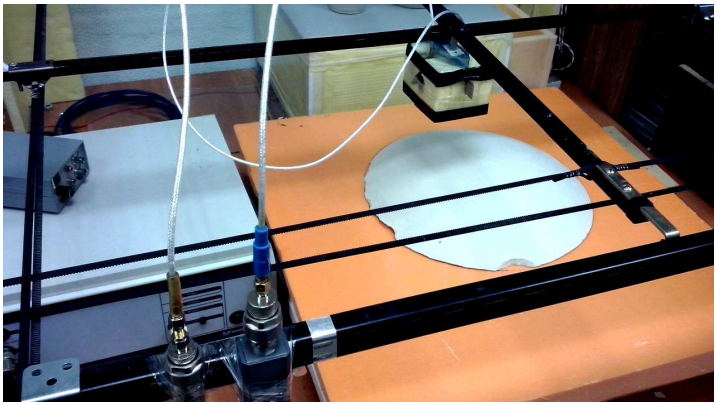


Рисунок 38 – Фотография экспериментальной установки

На рисунке 39 представлен результат измерений на частотах 8 ГГц и 12 ГГц. Сигнал, отражённый от линзы преобладает, однако сверхширокополосная обработка должна позволить получить разрешения по дальности и визуализировать изображение объекта за линзой.

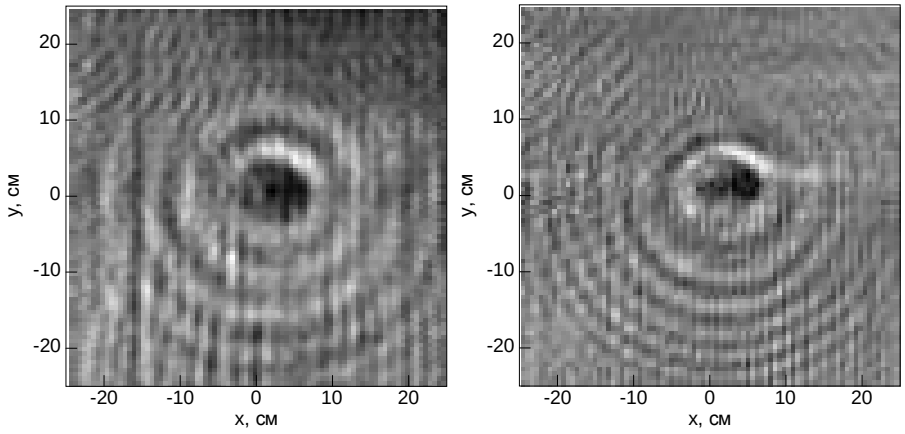
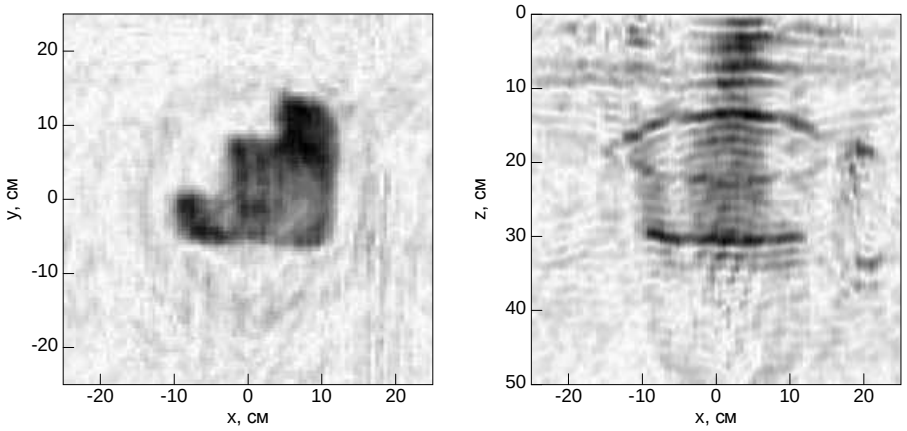


Рисунок 39 – Данные измерений: а - на частоте 8 ГГц; б - на частоте 12 ГГц

Сначала была проведена обработка измеренных данных без учёта влияния преграды, в предположении, что фоновая среда – вакуум. В результате было восстановлено трёхмерное изображение, два сечения, которого представлены на рисунке 40. Изображение объекта в плоскости XY искажено и увеличено, и, судя по полученному изображению, его линейные размеры порядка 20 см, в то время как истинный размер объекта 15 см. Линза вызвала эффект увеличения изображения. Кроме того, в сечении XZ изображение нижней поверхности линзы искривлено, хотя на самом деле она плоская. Форма объекта также искажена и выглядит изогнутой. Следовательно, учёт формы диэлектрической преграды необходим для точного восстановления изображения скрытого объекта.

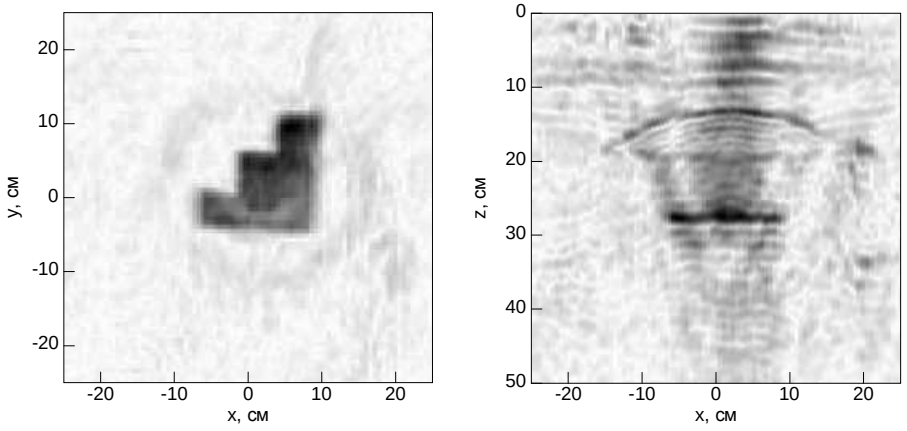
После применения обработки по формулам (5-8) было восстановлено трёхмерное изображение исследуемого объекта (рисунок 41). Видно, что изображение объекта в сечении XY соответствует его фактическим размерам. В сечении XZ плоские грани выглядят почти плоскими. Оставшиеся искажения можно объяснить неточностью задания формы линзы и её положения при решении обратной задачи, а также шумами измерений.

Учёт всех эффектов, возникающих при радиозондировании через диэлектрические и электропроводящие преграды, требует точной априорной информации о форме и характеристиках преград, которая не всегда доступна. Целесообразно производить измерения в таких частотных диапазонах, для которых влияние преград будет несущественным.



а б

Рисунок 40 – Восстановленное изображение тестового объекта без учёта линзы из гипса: а – сечение в плоскости XY; б – сечение в плоскости XZ



а б

Рисунок 41 – Восстановленное изображение тестового объекта с учётом линзы из гипса с показателем преломления 1.5: а – сечение в плоскости XY; б – сечение в плоскости XZ

В седьмой главе предлагается рассмотреть возможности диапазона очень низких частот (ОНЧ) – менее или порядка 30 кГц. В данном диапазоне частот переменные магнитные поля проникают практически без искажений через немагнитные материалы, что позволяет их использовать для зондирования скрытых объектов без учёта характеристик большинства видов преград.

Предлагаются схемы измерений, представленные на рисунке 42. Катушка – источник (рисунок 42а) переменного магнитного поля создаёт индукционные токи в исследуемом объекте. Магнитное поле, создаваемое индукционными токами, измеряется с помощью сканирующей матрицы спиральных магнитных катушек на расстоянии h от объекта. Измеряется только вертикальная компонента вектора магнитной индукции. Для увеличения динамического диапазона при магнитоиндукционных измерениях предлагается использовать самоскомпенсированную катушку – источник (рисунок 42б). Данная катушка обеспечивает некоторый уровень поля во всех точках пространства кроме собственного центра. В центре катушки поле нулевое, там же и размещается приёмная катушка. Таким образом, приёмная катушка измеряет поле, порождённое только индукционными токами в исследуемых объектах.

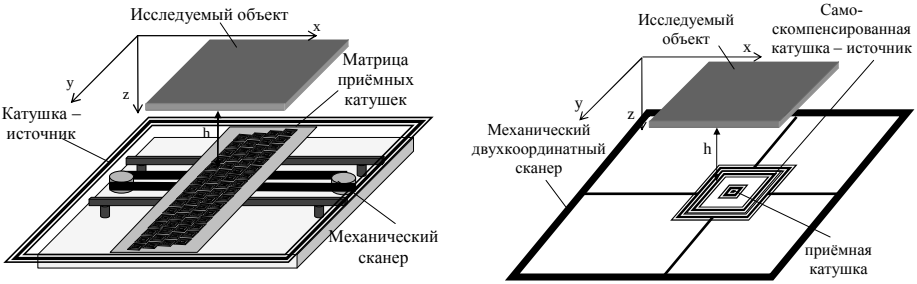
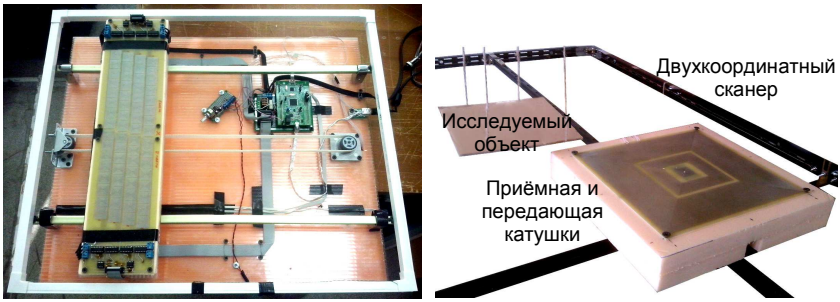


Рисунок 42 - Схема измерений с решёткой приёмных катушек (а) и самоскомпенсированной катушкой (б)

Для экспериментальных исследований разработана установка (рисунок 43а) на основе сканирующей матрицы из 64 плоских спиральных катушек, позволяющая производить измерения с шагом 5 мм на области 32 см на 38 см. Перед началом измерений на тестовых объектах измеряется поле катушки – источника, которое в дальнейшем вычитается из результатов измерений на тестовых объектах, в результате остаётся только поле индукционных токов. На рисунке 43б представлено изображение разработанной экспериментальной установки на основе самоскомпенсированной катушки.

В результате экспериментов с металлическими пластинами с надрезами на частоте 10 кГц были получены их изображения, на которых надрезы отчётливо визуализированы (рисунки 44 - 45). Отметим, что ширина надреза не имеет большого значения, поскольку главным является отсутствие электрического контакта в надрезе. Измерения проводились на дальности 1 см.

Формально, разрешение системы оценивается величиной зазора между однородными областями, при котором эти области различимы. То есть, разрешение оказалось меньше миллиметра, что сравнимо с разрешением рентгеновских методов.



а б

Рисунок 43 - Фотографии экспериментальных установок:
а – решётка приёмных катушек; б – самоскомпенсированная катушка

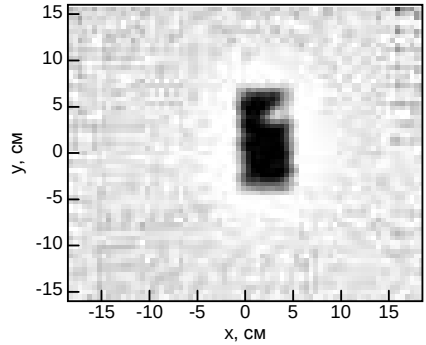


Рисунок 44 - Амплитуда сигнала с приёмных катушек для пластины с надрезом толщиной 1 мм

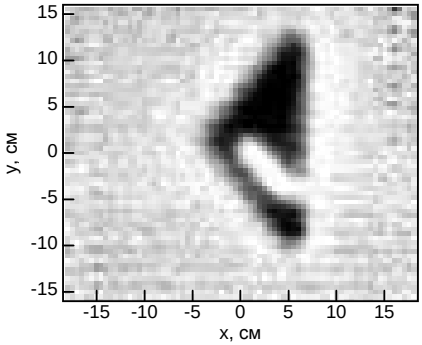
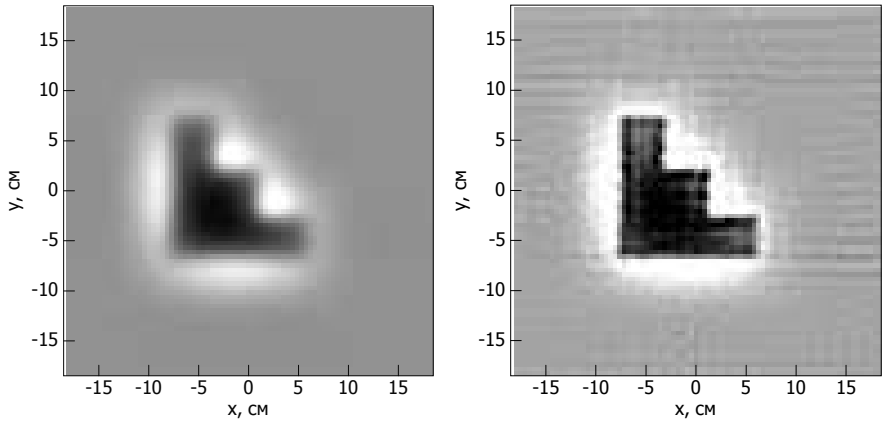


Рисунок 45 - Амплитуда сигнала с приёмных катушек для пластины с надрезом толщиной 15 мм

В пункте 7.3.2 диссертации предлагается критерий оценки разрешения на основе ширины пространственного спектра изображений, а также метод повышения разрешения изображений, получаемых в результате магнитоиндукционного зондирования. Предлагается использовать метод пространственно согласованной фильтрации в виде фильтра на основе поля элементарного витка с током. На рисунке 46а представлена вертикальная компонента вектора магнитной индукции, измеренная с помощью самоскомпенсированной катушки для плоского объекта из латуни на дальности 10 мм. Разрешение данного изображения оценивается в 21 мм. После обработки предложенным методом, было восстановлено изображение объекта с разрешением 10 мм (рисунок 46 б).

Таким образом, пространственно согласованная фильтрация позволяет повышать разрешение изображений, получаемых в результате многопозиционного магнитоиндукционного зондирования.



а б

Рисунок 46 – Повышение разрешения изображений магнитоиндукционного зондирования: а – измеренное поле; б – изображение объекта повышенного разрешения после обработки

В восьмой главе приводится описание разработанного автором программного обеспечения и оборудования, на котором проводились экспериментальные исследования.

В заключении отмечено, что многомерная пространственно согласованная фильтрация является универсальным методом обработки данных волнового зондирования для восстановления томографических изображений неоднородностей среды. Применение в качестве согласованного фильтра функции реакции системы на точечный рассеиватель позволяет восстанавливать изображения с разрешением близким к дифракционному пределу. Осуществление согласованной фильтрации через операции многомерного преобразования Фурье позволяет создать быстродействующие алгоритмы обработки данных измерений.

Основные результаты работы

1. Предложен метод обработки данных многопозиционного моностатического радиозондирования через плоскую границу раздела сред для восстановления трёхмерных радиоизображений. Проведена экспериментальная проверка метода.
2. Решена обратная задача радиотомографии для рассеивающих неоднородностей, распределенных в многослойной плоскослоистой среде, при известных характеристиках слоёв, в приближении однократного рассеяния по данным моностатического сверхширокополосного зондирования на плоской апертуре.
3. Метод численного моделирования дифракции волн на объектах произвольной формы в приближении Кирхгофа.

4. Метод восстановления трёхмерных радиоизображений при многопозиционном бистатическом радиозондировании монохроматическими сигналами с разрешением по дальности.
5. Метод восстановления трёхмерных радиоизображений с применением сигналов с линейной частотной модуляцией.
6. Предложен метод восстановления трёхмерных изображений неоднородностей, скрытых за неровной границей раздела сред в приближении фазового экрана по данным моностатического сверхширокополосного радиозондирования.
7. Метод трёхмерной томографии при моностатических локационных измерениях на неплоской поверхности.
8. Разработан быстрый алгоритм восстановления трёхмерных радиоизображений по данным моностатического сверхширокополосного зондирования на цилиндрической апертуре.
9. Метод оптимизации размещения излучающих и приёмных антенн в радиолокационной системе с множеством излучателей и множеством приёмников.
10. Разработана система трёхмерной ультразвуковой томографии на основе взаимно-перпендикулярных решёток излучателей и приёмников.
11. Предложен метод узкополосной радиоволновой томографии с применением подвижного параболического рефлектора.
12. Метод трансмиссионной дифракционной многоракурсной монохроматической волновой томографии.
13. Метод двумерной визуализации звукоизлучающих объектов в широком диапазоне частот, и метод определения дальности до звукоизлучающих объектов.
14. Предложен метод решения прямой задачи распространения волн в неоднородных средах, позволяющий учитывать эффекты рефракции и дифракции на диэлектрических объектах.
15. Метод трёхмерной радиотомографии в неоднородной фоновой среде, позволяющий учитывать влияние преград с известной формой и электрическими характеристиками.
16. Разработаны метод магнитоиндукционной интроскопии на основе сканирующей матрицы спиральных катушек и метод магнитоиндукционного зондирования на основе сканирующей самоскомпенсированной катушки. Предложен способ повышения разрешения плоских изображений, получаемых по результатам магнитоиндукционного зондирования.
17. Разработаны установки для проведения радиоволновых и ультразвуковых экспериментальных исследований.
18. Разработано программное обеспечение для численного моделирования, обработки данных зондирования и автоматизации экспериментальных установок радиотомографических систем.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, и в Web of Science:

1. Суханов, Д. Я. Оценка разрешающей способности в подповерхностной радиотомографии / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2004. – № 4(12).– С. 84–89. – 0,65 / 0,5 п.л.
2. Суханов, Д. Я. Метод наклонной фокусировки в подповерхностной радиолокации / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, вып. 7. – С. 64–68. – 0,65 / 0,5 п.л.
3. Суханов, Д. Я. Бесконтактный метод измерения электрофизических свойств грунта с использованием сверхширокополосного излучения / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – Т. 49, № 9. – С. 58–61. – 0,44 / 0,3 п.л.
4. Якубов, В. П. Радиоволновая томография неоднородных сред / В. П. Якубов, Е. Д. Тельпуховский, Г. М. Цепелёв, В. В. Белов, Д. Я. Суханов, А. В. Клоков, Н. А. Моисеенко, С. Н. Новик, О. В. Якубова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – Т. 49, № 9. – С. 20–25. – 0,66 / 0,2 п.л.
5. Суханов, Д. Я. Метод дифракционных гипербол для бесконтактного определения показателя преломления среды / Д. Я. Суханов, В П. Якубов, А. С. Омар // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – Т. 49, № 9. – С. 62–66. – 0,5 / 0,4 п.л.
6. Якубов, В. П. Радиолокационная томография / В. П. Якубов, Г. М. Цепелёв, Е. Д. Тельпуховский, Д. Я Суханов, А. В. Клоков, Н. А. Моисеенко, С. Н. Новик, О. В. Якубова // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 12. – С. 1081–1086. – 0,65 / 0,2 п.л.
7. Якубов, В. П. Решение обратной задачи подповерхностной локации в приближении сильно преломляющей среды / В. П. Якубов, Д. Я. Суханов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 4. – С. 329–338. – 1,15 / 0,6 п.л.
8. Суханов, Д. Я. Определение показателя преломления фоновой среды в подповерхностной томографии / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 5. – С. 418–424. – 0,75 / 0,4 п.л.
9. Суханов, Д. Я. Ультразвуковидение / Д. Я. Суханов, А. Т. Коновальчик, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9/2. – С. 82–83. – 0,22 / 0,15 п.л.
10. Якубов, В. П. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем безопасности / В. П. Якубов, К. Г. Склярчик, Р. В. Пинчук, Д. Я. Суханов, А. Н. Булавинов, А. Д. Бевецкий // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51, № 10. – С. 63–79. – 1,8 / 0,5 п.л.

11. Суханов, Д. Я. Применение сигналов с линейной частотой модуляцией в трёхмерной радиотомографии / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 4. – С. 115–119. – 0,55 / 0,4 п.л.

12. Суханов, Д. Я. Трансмиссионное некогерентное ультразвуковое видение плоских объектов / Д. Я. Суханов, К. В. Барышева // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56, № 4. – С. 491–496. – 0,65 / 0,5 п.л.

13. Суханов, Д. Я. Двумерное радиовидение с использованием доплеровского радиолокатора и линейного переизлучателя / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов, А. С. Рубаненко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/2. – С. 94–95. – 0,22 / 0,15 п.л.

14. Суханов, Д. Я. Бесконтактное ультразвуковое видение через границу раздела воздух – плотная среда / Д. Я. Суханов, М. А. Калашникова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/2.– С. 96–97. – 0,22 / 0,2 п.л.

15. Суханов, Д. Я. Трёхмерное широкополосное радиовидение на основе измерения амплитудного распределения интерференционной картины за дифракционной решёткой / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Известия высших учебных заведений. Физика.– 2010. – Т. 53, № 9/2. – С. 98–102. – 0,55 / 0,4 п.л.

16. Суханов, Д. Я. Пространственно-частотное синтезирование в микроволновой томографии / Д. Я. Суханов, Р. В. Пинчук, В. П. Якубов, В. Б. Антипов, Ю. И. Цыганок, А. М. Манаков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/2. – С. 108–109. – 0,22 / 0,05 п.л.

17. Антипов, В. Б. Исследование широкополосных приемо-передающих модулей для синтеза радиоизображений / В. Б. Антипов, А. М. Манаков, Ю. И. Цыганок, Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/2. – С. 145–146. – 0,22 / 0,05 п.л.

18. Антипов, В. Б. Исследование квазиоптических функциональных узлов для терагерцового диапазона длин волн / В. Б. Антипов, А. М. Манаков, Ю. И. Цыганок, Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/2. – С. 147–148. – 0,22 / 0,05 п.л.

19. Антипов, В. Б. СВЧ приёмопередающие модули для систем ближней локации / В. Б. Антипов, Д. Я. Суханов, Ю. И. Цыганок, В. П. Якубов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 3 (24). – Ч. 1. – С. 183–184. – 0,2 / 0,05 п.л.

20. Якубов, В. П. Микроволновая томография радионепрозрачных объектов / В. П. Якубов, С. Э. Шипилов, Д. Я. Суханов // Дефектоскопия. – 2011. – № 11. – С. 62–68. – 0,75 / 0,3 п.л.

21. Суханов, Д. Я. Восстановление трехмерных радиоизображений по результатам многочастотных голографических измерений / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 85–89. – 0,55 / 0,45 п.л.

22. Якубов, В. П. Сверхширокополосная томография удалённых объектов / В. П. Якубов, С. Э. Шипилов, Д. Я. Суханов, А. К. Разинкевич // Дефектоскопия. – 2012. – № 3. – С. 59–64. – 0,65 / 0,25 п.л.

23. Якубов, В. П. Радио- и ультразвуковая томография скрытых объектов / В. П. Якубов, С. Э. Шипилов, Д. Я. Суханов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8. – С. 20–24. – 0,55 / 0,3 п.л.

24. Суханов, Д. Я. Двумерное радиовидение с подвижным переизлучателем и линейной решёткой некалиброванных доплеровских радиолокаторов / Д.Я. Суханов, А. С. Рубаненко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/2. – С. 5–11. – 0,65 / 0,6 п.л.

25. Суханов, Д. Я. Узкополосное двумерное дифракционное радиовидение / Д. Я. Суханов, А. А. Муравьева // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/2. – С. 40–43. – 0,44 / 0,4 п.л.

26. Суханов, Д. Я. Радиовидение по измерениям амплитуды поля дифракции на объекте и его зеркальном изображении / Д. Я. Суханов, М. Д. Совпель // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/2. – С. 44–48. – 0,55 / 0,5 п.л.

27. Суханов, Д. Я. Дистанционное управление индукционными токами с помощью системы магнитных катушек / Д. Я. Суханов, М. А. Гончарик // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/2. – С. 158–162. – 0,55 / 0,5 п.л.

28. Суханов, Д. Я. Восстановление распределения тока в плоских объектах по дистанционным измерениям вектора магнитной индукции / Д. Я. Суханов, Е. С. Берзина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/2. – С. 163–167. – 0,55 / 0,45 п.л.

29. Суханов, Д. Я. Система трёхмерного голографического сверхширокополосного радиовидения / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9/1. – С. 12–16. – 0,55 / 0,4 п.л.

30. Суханов, Д. Я. Ультразвуковое видение в воздухе на основе взаимно-ортогональных линейной решётки излучателей и линейной решётки приёмников / Д. Я. Суханов, Л. М. Латипова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9/1. – С. 17–21. – 0,55 / 0,5 п.л.

31. Суханов, Д. Я. Магнитная интроскопия с использованием решетки датчиков магнитного поля / Д. Я. Суханов, Е. С. Берзина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 23–26. – 0,44 / 0,35 п.л.

32. Суханов, Д. Я. Определение формы электропроводящего объекта по дистанционным измерениям возмущений переменного магнитного поля / Д. Я. Суханов, М. А. Гончарик // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 41–43. – 0,33 / 0,3 п.л.

33. Суханов, Д. Я. Восстановление изображений звукоизлучающих объектов по многопозиционным широкополосным дистанционным измерениям

звукового поля / Д. Я. Суханов, Н. Н. Ерзакова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 57–61. – 0,55 / 0,45 п.л.

34. Суханов, Д. Я. Оценка одномерного распределения диэлектрической проницаемости на плоской поверхности по бистатическим измерениям отражённого поля / Д. Я. Суханов, Е. Г. Пермяков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 92–96. – 0,44 / 0,4 п.л.

35. Суханов, Д. Я. Доплеровское радиовидение с применением подвижного параболического переизлучателя / Д. Я. Суханов, В. Н. Цыденова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 117–121. – 0,55 / 0,5 п.л.

36. Суханов, Д. Я. Ультразвуковидение в воздухе с применением крестовидной матрицы ультразвуковых излучателей и приёмников / Д. Я. Суханов, Л. М. Латипова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013.– Т. 56, № 8/2. – С. 145–148. – 0,44 / 0,4 п.л.

37. Суханов, Д. Я. Восстановление радиоизображений по измерениям интенсивности поля интерференции разреженной матрицей элементов с применением нескольких источников / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 167–173. – 0,77 / 0,6 п.л.

38. Суханов, Д. Я. Многоракурсная узкополосная ультразвуковая томография с разнесёнными источником и приёмником / Д. Я. Суханов, А. А. Козик // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 180–183. – 0,44 / 0,4 п.л.

39. Суханов, Д. Я. Монохроматическая трансмиссионная дифракционная радиотомография / Д. Я. Суханов, А. А. Муравьева // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 193–195. – 0,3 / 0,25 п.л.

40. Суханов, Д. Я. Сверхширокополосная радиолокация по измерениям амплитудно-фазового распределения поля на цилиндрической поверхности / Д. Я. Суханов, М. Д. Совпель // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 203–206. – 0,44 / 0,4 п.л.

41. Якубов, В. П. Радиотомография по сверхширокополосным моностатическим измерениям на неплоской поверхности / В. П. Якубов, Д. Я. Суханов, А. В. Клоков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 72–79. – 0,89 / 0,45 п.л.

42. Sukhanov, D. Y. Radioholography Using a Spherical Wave as a Reference Signal / D. Y. Sukhanov, K. V. Zavyalova // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 10/3. – С. 229–232. – 0,44 / 0,35 п.л.

43. Суханов, Д. Я. Восстановление изображений скрытых объектов по широкополосным локационным измерениям звукового поля / Д. Я. Суханов, Н. Н. Ерзакова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 4(30). – С. 83–85. – 0,3 / 0,2 п.л.

44. Суханов, Д. Я. Дистанционная ультразвуковая дефектоскопия звукоизлучающих объектов через воздух / Д. Я. Суханов, М. А. Калашникова // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 3. – С. 279–283. – 0,55 / 0,5 п.л.

45. Суханов, Д. Я. Сверхширокополосная трехмерная радиоголография в плоскослоистой среде / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 117–121. – 0,55 / 0,4 п.л.

46. Суханов Д. Я. Бистатическая многопозиционная волновая томография / Д. Я. Суханов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 24–30. – 0,77 п.л.

Патент на полезную модель:

47. Пат. 144100 Российская Федерация, МПК G01N 29/06. Ультразвуковой томограф / Суханов Д. Я., Латипова Л. М., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). – № 2014105770/28; заявл. 17.02.2014; опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22. – 2 с.

48. Пат. 144400 Российская Федерация, МПК G01S 13/89. Радиоголографический сверхширокополосный томограф / Суханов Д. Я., Завьялова К. В., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). – № 2014108126/07; заявл. 03.03.2014; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23. – 2 с.

49. Пат. 143322 Российская Федерация, МПК G01V 3/11. Магнитоиндукционный сканирующий интроскоп / Суханов Д. Я., Берзина Е. С., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). – № 2014108606/28; заявл. 05.03.2014; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. – 2 с.

Публикации в сборниках материалов конференций, включенных в Scopus:

50. Yakubov, V. P. New Fast SAR Method for 3-D Subsurface Radiotomography / V. P. Yakubov, A. S. Omar, V. P. Kutov, D. Y. Sukhanov, N. G. Spiliotis // Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. – Delft, 2004. – P. 103–106. – 0,4 / 0,15 п.л.

51. Sukhanov, D. Three-dimensional non-contact subsurface radiotomography through a non-planar interface between media / D. Sukhanov, K. Zavyalova // 15th International Conference on Ground Penetrating Radar – GPR 2014. – Brussels, 2014. – P. 691–695. – 0,55 / 0,5 п.л.

52. Суханов, Д. Я. Восстановление изображений звукоизлучающих объектов с помощью сканирующей линейной матрицы микрофонов / Д. Я. Суханов, Н. Н. Ерзакова // 24-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2014. – С. 950–951. – 0,22 / 0,2 п.л.

53. Суханов, Д. Я. Локационная радиотомография через диэлектрические неоднородности известной формы / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // 24-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2014. – С. 952–953. – 0,22 / 0,2 п.л.

54. Суханов, Д. Я. Магнитоиндукционная интроскопия с применением сканирующей матрицы индукционных катушек / Д. Я. Суханов, Е. С. Берзина // 24-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2014. – С. 1209–1210. – 0,22 / 0,2 п.л.

55. Суханов, Д. Я. Трансмиссионная монохроматическая радиотомография диэлектрических объектов / Д. Я. Суханов, А. А. Муравьёва // 24-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2014. – С. 1211–1212. – 0,22 / 0,2 п.л.

Монография:

56. Якубов, В. П. Радиоволновая томография: достижения и перспективы: монография / В. П. Якубов, С. Э. Шипилов, Д. Я. Суханов, А. В. Клоков / под общ. ред. В. П. Якубова. – Томск: НТЛ, 2014. – 264 с. – 15 / 4 п.л.

Статьи в других научных изданиях:

57. Якубов, В. П. Метод фокусировки в подповерхностной локации / В. П. Якубов, Д. Я. Суханов // VII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2004». – Новосибирск, 2004. – С. 13–17. – 0,55 / 0,3 п.л.

58. Якубов, В. П. Многочастотная подповерхностная радиотомография диэлектрических объектов / В. П. Якубов, Д. Я. Суханов // Вторая всероссийская научная конференция-семинар «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. СРСА 2006». – Муром, 2006. – С. 210–215. – 0,65 / 0,3 п.л.

59. Суханов, Д. Я. Локационное сверхширокополосное радиовидение с использованием некогерентного во времени излучения / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Третья Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике. СРСА 2010». – Муром, 2010.– С. 214–218. – 0,55 / 0,4 п.л.

60. Суханов, Д. Я. Восстановление трёхмерных радиоизображений без прямого измерения фазы / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Сборник материалов II Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск, 2011. – С. 73–75. – 0,22 / 0,2 п.л.

61. Суханов, Д. Я. Звуковое видение звукоизлучающих объектов / Д. Я. Суханов, М. А. Калашникова // Сборник материалов II Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск, 2011. – С. 79–80. – 0,22 / 0,2 п.л.

62. Суханов, Д. Я. Доплеровское радиовидение с применением подвижного переизлучателя / Д. Я Суханов, А. С. Рубаненко // Сборник материалов II

Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск, 2011. – С. 99–100. – 0,22 / 0,2 п.л.

63. Завьялова, К. В. Система трёхмерного широкополосного радиовидения на основе измерений амплитуды волнового поля / К. В. Завьялова, Д. Я. Суханов // Материалы III Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием. – Томск, 2012. – С. 45–52. – 0,9 / 0,7 п.л.

64. Козик, А. А. Метод определения положения сдвоенной радиолокационной системы при движении по прямой / А. А. Козик, Д. Я. Суханов // Электронные средства и системы управления : материалы докладов VIII Международной научно-практической конференции. – Томск, 2012.– С. 29–35. – 0,8 / 0,7 п.л.

65. Берзина, Е. С. Схема коммутации матрицы датчиков магнитного поля / Е. С. Берзина, Д. Я. Суханов // Материалы IV Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск, 2013. – С. 16–19. – 0,44 / 0,3 п.л.

66. Совпель, М. Д. Двумерная локационная сверхширокополосная радиотомография по измерениям поля на окружности / М. Д. Совпель, Д. Я. Суханов // Материалы IV Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии». – Томск, 2013. – С. 186–189. – 0,44 / 0,35 п.л.

67. Суханов, Д. Я. Визуализация звукоизлучающих объектов, распределённых в объёме / Д. Я. Суханов, Н. Н. Ерзакова // Естественные и математические науки в современном мире. – 2014. – № 18. – С. 73–80. – 0,22 / 0,2 п.л.

68. Суханов, Д. Я. Бесконтактная радиотомография через неплоскую границу раздела сред в приближении фазового экрана / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Естественные и математические науки в современном мире. – 2014. – № 18. – С. 81–90. – 0,6 / 0,4 п.л.

69. Суханов, Д. Я. Бистатическая многопозиционная монохроматическая ультразвуковая томография с разрешением по дальности / Д. Я. Суханов // Новое слово в науке : перспективы развития : материалы международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2014. – С. 162–165. – 0,4 п.л.

70. Завьялова, К. В. Радиоголография с применением монохроматического стороннего источника сферических волн / К. В. Завьялова, Д. Я. Суханов // Новое слово в науке : перспективы развития : материалы международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2014. – С. 198–203. – 0,6 / 0,3 п.л.

71. Завьялова, К. В. Восстановление изображения источника по измерениям амплитуды поля за дифракционной решёткой / К. В. Завьялова, Д. Я. Суханов // Новое слово в науке : перспективы развития : материалы международной научно-практической конференции. – Чебоксары, 2014. – С. 203–206. – 0,4 / 0,2 п.л.