Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

На правах рукописи

and

САТАРОВ РАИЛЬ НАИЛЕВИЧ

РАДИОВОЛНОВАЯ ТОМОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА ТАКТИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

01.04.03 – Радиофизика

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

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

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, Шипилов Сергей Эдуардович

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1 Обзор, существующих технических средств обнаружения	. 14
1.1 «Rescue Radar LS-RR02»	14
1.2 «Пикор Био»	15
1.3 «Prism 200»	17
1.4 Георадар-обнаружитель "АБ-400СН"	18
1.4 «Данник-5»	19
1.5 «Xaver 800»	20
1.6 «3D Radar»	22
1.7 «Кондор»	23
Глава 2 Методы обработки результатов измерений	. 25
2.1. Решение прямой и обратной задачи	25
2.2 Двухтактная фокусировка	28
2.3 Групповая фокусировка	31
2.4 Оценка пространственного разрешения	34
2.5 Решение задачи фокусировки при зондировании через преграду	36
2.5.1 Решение без учета преломления	36
2.5.2 Решение задачи с учетом преломления	38
2.6 Моделирование задачи зондирования диэлектрической преграды СШП сигналом	41
2.7 Определение параметров диэлектрической преграды	42
2.8 Выводы	49
Глава 3 Экспериментальная апробация разработанных методов	c
использованием кругового механического сканирования	. 50
3.1 Численный эксперимент	50
3.2 Натурный эксперимент	54
3.3 Обнаружение движения при круговом сканировании	65
3.4 Регистрация колебаний, характерных для дыхания человека	67
3.5 Выводы	71
Глава 4 Двумерная тактированная СШП антенная решетка	. 72
4.1 Оптимизация расположения приемопередающих элементов в эквидистантной антен	ной
решетке	72
4.2 Оценка пространственного разрешения при линейном сканировании	78
4.3 Эксперимент по обнаружению движения при линейном сканировании	84
4.4 Блок коммутации каналов	86
4.4 Тактированная линейная антенная решетка	90
4.5 Моделирование фокусирующего рефлектора	104
4.6 Оптимизация фокусирующего рефлектора	10/
4. / Выводы	119
I лава 5 Планарная тактированная СШП антенная решетка	120
5.1 Оптимизация расположения приемопередающих элементов в планари	НОЙ
тактированной антенной решетке, с длительностью зондирующего импульса 200 пс	120
5.2 Схема радиотомографа с зондирующим импульсом на 200 пс.	124
5.3 Натурный эксперимент по восстановлению формы ооъектов	127
5.4 Оптимизация расположения приемопередающих элементов в планар.	нои
тактированной антенной решетке, с длительностью зондирующего импульса 100 пс	122
5.5 CYANG PATHOTONOTOPADA A DOWNLOW WITH THE ADA WE 100 HO	133 126
5.5 Схема радиотомографа с зондирующим импульсом на 100 пс	133 136
5.5 Схема радиотомографа с зондирующим импульсом на 100 пс 5.6 Выводы	133 136 139
5.5 Схема радиотомографа с зондирующим импульсом на 100 пс 5.6 Выводы	133 136 139 141

ВВЕДЕНИЕ

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

Обнаружение пустот и различных подслушивающих устройств в стенах и строительных конструкциях – также важная задача. Можно ещё больше расширить список ситуаций, когда необходима визуализация скрытых объектов. Например в досмотровых системах безопасности. Использование рентгеновских установок не всегда допустимо. Более безопасным средством является использование радиоволн. В работе используются сверхширокополосные (СШП) сигналы, что обусловлено их преимуществами относительно узкополосных, а именно: существенно более высокое разрешение, увеличение полосы пропускания позволяет СШП радарам получать больше информации о цели, благодаря этому стало возможным не только обнаружение, но и распознавание малоразмерных частей объектов, что позволяет получать, так называемый, «портрет цели». Коротко-импульсные сигналы позволяют эффективно бороться с проблемами многолучевого распространения и приема. Это приводит к более стабильной работе канала радиосвязи или радара в условиях, при которых работа узкополосных радаров невозможна.

Настоящая работа основана на использовании оригинальных результатов собственных исследований автора по СШП томографии [1-14]. Выбор темы и методов исследований продиктован стремлением дальнейшего развития известных результатов предшествующих отечественных [15-23] и зарубежных [24-53] работ.

Огромное количество уже существующих методов дифракционной томографии [54-72] не всегда способны решать задачи для систем безопасности. Решение подобных специфических и нестандартных задач обнаружения объектов требует

создания и разработки специального математического аппарата, с использованием активной локационной томографией.

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

Для достижения указанной цели в работе ставятся следующие <u>задачи</u> <u>диссертационной работы:</u>

- 1. Разработка методики и алгоритмов проведения радиолокационных измерений с использованием СШП импульсных сигналов без несущей.
- 2. Разработка метода бесконтактных СШП радиолокационных измерений для определения коэффициента преломления и толщины диэлектрической преграды в виде плоского слоя.
- 3. Разработка метода фильтрации СШП сигналов, отраженных от неподвижных объектов, с целью выделения движения человека за диэлектрической преградой.
- 4. Разработка метода регистрации колебаний, характерных для дыхания человека.
- 5. Определение необходимых требований для создания радиоволнового томографа на основе использования технологии тактированных антенных решеток применительно к СШП излучению.
- 6. Построение и испытание действующих макетов тактированных антенных решеток для радиоволнового томографа.
- 7. Создание специализированного программного обеспечения для управления разработанными макетами тактированных антенных решеток.
- 8. Разработка программного обеспечения для восстановления томограмм с использованием разработанных макетов тактированных антенных решеток.
- 9. Комплексное тестирование разработанного программно-аппаратного комплекса для выполнения СШП томографии на тестовых объектах.

Методы исследования.

При алгоритмов обработки разработке радиолокационных сигналов использовались методы синтезирования большой апертуры и пространственновременной фокусировки, а также известные методы статистической радиофизики для приема сигналов в условиях шумов. Численное моделирование, регистрация и обработка данных проводились в среде CST Microwave Studio, MathCad и Matlab. Экспериментальная часть работы основана на использовании сканеров, СШП антенн и решеток из них, разработанных при активном участии автора диссертации на кафедре радиофизики радиофизического факультета Томского государственного университета. В качестве инструмента для проведения экспериментальных

исследований использовался собранные автором макеты линейного и планарного радиоволновых томографов, состоящих из решёток приёмо-передающих СШП элементов, работающих в диапазоне частот 2-12 ГГц. В качестве приемного устройства использован СШП стробоскопический приемник АКИП-4112. Автоматическая регистрация и обработка данных производилась под управлением универсального быстродействующего компьютера общего назначения с помощью написанного автором специального программного обеспечения.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Минимальный достаточный набор проекций исследуемой сцены неоднородностей, получаемый с использованием тактированной антенной решетки, состоящих из малогабаритных СШП антенн, размерами не превышающих пространственную протяженность импульса, достижим за счет всевозможных комбинаций пар приемных и передающих антенн. Полученный набор проекций соответствует антенной решетке с плотностью заполнения совмещенными приемопередающими элементами, вдвое превышающей плотность заполнения исходной решетки. Послойная структура трехмерного распределения неоднородностей восстановима суммированием по дифракционным гиперболам.

2. Задача определения показателя преломления n и толщины d диэлектрического слоя разрешима в приближении геометрической оптики за счет определения запаздывания импульсов, отраженных от передней и задней границ слоя t1 и t2, при двухпозиционном измерении. Значение n и d находятся в результате решения уравнения с полиномом четвертой степени, к которому сводятся два алгебраических уравнения, содержащих в правой части t1 и t2.

<u>Достоверность защищаемых положений и других результатов работы</u> подтверждается согласием полученных теоретических результатов с данными разносторонних численных моделей и результатами обработки прямых экспериментов по зондированию различных диэлектрических и металлических тестовых объектов в воздухе и скрытых за диэлектрическими преградами. Экспериментально подтверждено, что при использовании полосы частот от 2 до 12 ГГц обеспечивается совпадение формы тестовых объектов и восстановленного изображения с точностью до разрешающей способности системы.

Метод определения коэффициента преломления с помощью двухпозиционного зондирования был применён к результатам численных и натурных экспериментов. Получено соответствие расчетного значения коэффициента преломления преграды и смоделированного в численном эксперименте. Коэффициент преломления, определённый по результатам натурных измерений для газобетона составил 1.5 ± 0.1 , а толщина - 10 ± 0.1 см.

Научная новизна заключается в следующем:

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

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

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

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

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

1. Первое научное положение дает теоретическое обоснование создания

радиоволнового томографа ближнего радиуса действия с использованием СШП импульсного излучения, способного обеспечивать пространственное разрешение скрытых объектов с точностью порядка пространственной протяженности импульса.

2. Благодаря сведению задачи измерения параметров диэлектрического слоя к решению системы двух уравнений, в правую часть которых входят относительные задержки зондирующих импульсов, искомые параметры определяются однозначно.

Практическая значимость результатов работы:

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

Совместное использование данных тактированных СШП радиолокационных измерений исследуемой сцены неоднородностей и метода взвешенного суммирования по дифракционным гиперболам позволяет восстановить её томограмму – послойную структуру трехмерного распределения неоднородностей. При этом использование

импульсов длительностью 200 пс обеспечивает пространственное разрешение не хуже 3 см.

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

Макет №1 представляет собой устройство с размерами 800×250×300 мм. На рисунке В1 представлено изображение этого макета. Макет обеспечивает двумерное радиоизображение участка зондируемой поверхности в горизонтальном срезе по дальности. Получение одного радиоизображения требует времени порядка 1.2 с



Рисунок В1 – Макет №1

Макет № 2 представлен на рисунке В2. Такое устройство позволит в режиме реального времени получать радиоизображение двумерного среза пространства по глубине.



Рисунок В2 – Макет №2

Макет №3 представляет собой устройство с размерами 500х600х230 мм, помещенным для удобства транспортировки в пластиковый кейс. На рисунке В3

представлено изображение этого макета. Основным элементом является планарная тактированная СШП антенная решетка. На корпус чемодана выведены разъемы для питания от сети 220В и разъем USB для связи с ноутбуком. Таким образом, все измерения можно проводить сразу, не открывая чемодан. Управление коммутацией, расчет трехмерной томограммы и ее визуализация по слоям осуществляется с помощью стандартного ноутбука.





Рисунок В3 – Макет №3 с планарной тактированной антенной решеткой

Размеры макета №4. решетки составили 55х44 см. Количество антенных элементов – 37, из которых 24 приемных и 13 передающих антенн (Рисунок В4). Отличия данной решетки от предыдущей состоят в следующем. Для получения большего качества радиоизображения повышено количество приемо-передающих элементов и был осуществлен переход от длительности импульса 0.2 нс к длительности импульса 0.1 нс. Также осуществлена развязка между приемо-передающими элементами для использования усилителей.



Рисунок В4 – Макет №4 с модернизированной планарной тактированной антенной решеткой

Внедрение результатов диссертационной работы.

Результаты были использованы при выполнении следующих проектов:

- «Исследование волновых процессов в неоднородных средах и создание основ радиовидиния высокого разрешения с использованием метода синтезирования апертуры». Государственный контракт от 06 сентября 2010 г.№14.740.11.0076. Шифр «2010-1.1-123-085-015», рук. Якубов В.П.
- «Физико-математическая модель радиолокационного томографа» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала Высшей школы(2009-20011 годы)». Проект №2.1.2/12874, рук. Якубов В.П.
- «Радиолокационная томография удаленных объектов за диэлектрическими преградами» Государственный контракт от 31 июля 2009 года № П452, рук.Шипилов С.Э.
- «Фокусировка волновых проекций неоднородных сред в сверхширокополосной радиотомографии скрытых объектов». Тематический план ТГУ 2009-2011 гг. Шифр 1.10.09, рук. Якубов В.П.

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

- Международная выставка «Интерполитех-2011»: получена золотая медаль за разработку комплексной системы радиоволновой томографии скрытых объектов.
- Международная выставка «Радиофизика и электроника. РиЭ-2012» : получена золотая медаль за разработку «Тактированная сверхширокополосная антенная решетка для радиовидения за преградами».
- Международная выставка «Радиофизика и электроника. РиЭ-2013»: получена золотая медаль за разработку «Переносной импульсный радиотомограф».
- «Качество товаров и услуг «Евразия-2011» : получена золотая медаль за разработку «Радиолокационная томография удаленных объектов за диэлектрическими преградами»
- «Сибирские Афины» 2011: получена золотая медаль за разработку «Комплексная система радарной томографии скрытых объектов».
- «Сибирские Афины» 2012: получена золотая медаль за разработку «Сверхширокополосный радиоволновый томограф скрытых объектов».

- III Всероссийская научно-практическая конференция «Информационноизмерительная техника и технологии 2012» : диплом второй степени за разработку «Коммутируемая СШП антенная решетка для радиовидения»
- IV Всероссийская научно-практическая конференция «Информационноизмерительная техника и технологии 2013» : диплом первой степени за разработку «Малогабаритная переносная система трехмерного радиовидения».

Кроме того в ходе выполнения диссертационной работы:

- 1. Оформлен режим ноу-хау «Технология создания антенной решетки для радиотомографии» (Приказ по ТГУ №499 от 13.09.2013 г.).
- 2. Образовано при Томском государственном университете малое инновационное предприятие ООО «Радиовидение».
- 3. Выполнен проект по программе УМНИК «Разработка программного обеспечения системы радиоволнового поиска живых людей за препятствиями». Госконтракт №9545р/14200 от 04.07.2011 г., рук. Сатаров Р.Н.

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

Также основные положения и результаты докладывались на следующих конференциях:

3-я Международной научно-практическая конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2010» (Томск, 2010 г.); 4-ой Международной научнопрактическая конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2012» (Томск, 2012 г.); 5-ой Международной научно-практическая конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2013» (Томск, 2013 г.); 3-й научно-практической «Информационно-измерительная конференции техника технологии» И с международным участием (Томск, 2012 г.); 4-й научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием (Томск, 2013 г.); 5-й научно-практической конференции «Информационноизмерительная техника и технологии» с международным участием (Томск, 2014 г.); всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 3-я (Санкт-Петербург, 2014); 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014).

<u>Личный вклад автора.</u>

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

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

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

<u>Структура и объём работы.</u> Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Общий объём диссертации 149 страниц машинописного текста, в том числе 176 рисунков, библиографический указатель из 94 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

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

Во второй главе проводится исследование основных методов фокусировки: суммирование по дифракционным гиперболам, фокусировка и групповая фокусировки. Эта запись представляет собой приближенное решение задачи томографии.

Так же проведена оценка пространственного разрешения. Так показана важность учета влияния преграды при осуществлении фокусировки излучения за диэлектрический слой. Показано, что если не учитывать задержки в слое, то при фокусировке экран становится выгнутым, а границы отверстия посередине сильно размыты. Учет влияния позволяет устранить эти искажения, а также повышает разрешение радиоизображения. Как следствие становится актуальной задача определения параметров преграды для последующего устранения ее влияния. Показано, что для точного определения неизвестных параметров, достаточно информации, полученной только в двух ракурсах – когда приемник совмещен с передатчиком и когда разнесен.

В третьей главе приводятся результаты численного моделирования по проверке разработанных методов и алгоритмов визуализации зондируемых объектов при круговом сканировании для различных вариантов заполнения апертуры. Предложен метод обнаружения движущихся объектов при помощи дифференциальноразностного подхода к обработке данных, в котором фильтрация сигналов от неподвижных объектов проводится на основе разностных данных о регистрации сигналов в соседние периоды времени. Разработан метод для регистрации колебаний, характерных для дыхания человека. Все методы получили экспериментальное подтверждение работоспособности.

В четвертой главе представлена разработанная система радиовидения на базе линейной эквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и шестнадцати приемных антенн. При численном моделировании выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Разработан блок коммутации каналов для управления СШП переключателями. Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения. Разработана система радиовидения на базе линейной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и двенадцати приемных антенн. Система дополнена фокусирующим рефлектором.

В пятой главе представлена разработанная система радиовидения на базе планарной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и шестнадцати приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Длительность

зондирующего импульса 200 пс. Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения.

Разработана система радиовидения на базе планарной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из тринадцати передающих и двадцати четырех приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Длительность зондирующего импульса 100 пс. Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения.

Модель радиотомографа <u>найдёт применение</u> на производстве, для неразрушающего контроля качества готовой продукции, а также в системах безопасности в аэропортах и других общественных местах для обнаружения запрещенных предметов под одеждой, в ручной клади и почтовых отравлениях.

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

Глава 1 Обзор, существующих технических средств обнаружения

Актуальность проблемы, вызванной неспокойной политической обстановкой в мире, заставила ученых и инженеров из разных стран взяться за создание методов, позволяющих ответить на ключевые вопросы, определяющих тактические решения при проведении спецопераций: "Есть ли кто-нибудь за стеной?", и "Какова активность происходящего за преградой?". Результатом подобного рода исследований стало создание различных систем радионаблюдения, позволяющих по данным регистрируемого отраженного поля судить о наличии либо отсутствии, интересующих нас, объектов за преградой.

1.1 «Rescue Radar LS-RR02»

Разработан российскими специалистами компанией «Лайф Сенсор». Rescue Radar (рисунок 1.1) [73] предназначен для обнаружения живых людей по их дыханию и движениям под завалами обрушившихся зданий и шахт, оползнями и лавинами. Прибор позволяет обнаруживать наличие живых людей за диэлектрическими преградами и контролировать их физическую активность путем измерения параметров отраженных сигналов. Специальный прибор "Rescue Radar" способен находить людей даже под многометровыми нагромождениями бетонных конструкций и может использоваться как в спасательных операциях после землетрясений, так и для обнаружения шахтеров после обвала горной породы или спортсменов, накрытых лавиной (рисунок 1.2). Bec "Rescue Radar" - всего 6 кг.



Рисунок 1.1 – «Rescue Radar»[73]



Рисунок 1.2 – Изображение на приборе «Rescue Radar LS-RR02»[73]

1.2 «Пикор Био»

Контрольно-индикационный прибор, обнаружения движения за непрозрачными преградами Пикор-Био (рисунок 1.3) [74], предназначен для обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами (стены и перекрытия зданий, в том числе межэтажные, неосвещенные помещения, завалы из строительных материалов разрушенных сооружений и горной породы, снежные лавины и т.д.), причем как движущихся, так и неподвижных (по шевелению и дыханию). Прибор позволяет оператору "видеть сквозь стены" количество людей в комнате, определять расстояние до них, в реальном времени видеть, двигаются они или неподвижны. Прибор обладает безопасностью действия, излучаемая им мощность, распределенная в широком спектре частот, крайне мала. При своей работе он не создает помех другим радиосредствам И сам обладает помехоустойчивостью. Прибор использует сверхкороткие импульсы радиоволн с высокими характеристиками проникновения сквозь стены и перекрытия, изготовленные из стандартных строительных материалов, включая кирпичи, блоки, бетонные перекрытия, включая железобетон, деревянные балки, штукатурку, обои, а также офисную мебель, стекло и т.д. Экраном для него будут лишь металлические преграды.



Рисунок 1.3 – Внешний вид «Пикор Био»[74]



а) б)Рисунок 1.4 – Применение «Пикор Био»[74]

использует сверхкороткие импульсы радиоволн Прибор с высокими характеристиками проникновения сквозь стены и перекрытия, изготовленные из стандартных строительных материалов, включая кирпичи, блоки, бетонные перекрытия, включая железобетон, деревянные балки, штукатурку, обои, а также офисную мебель, стекло и т.д. Экраном для него будут лишь металлические преграды. Ключевые преимущества прибора для обнаружения движения за преградами Пикор-Био: достоверное обнаружение людей, укрытых за стенами из любых стандартных стройматериалов, по их движению (чем больше амплитуда движения, шевеления, дыхания, тем выше вероятность правильного обнаружения) раздельное обнаружение объектов, находящихся вблизи друг от друга (на расстоянии от 0.5 м) одновременное обнаружение движущихся и неподвижных объектов возможность работы как без отрыва, так и с отрывом от поверхности среды помехозащищенность И безопасность действия зондирования максимальная дальность обнаружения объектов 20 м (в воздухе) при отсутствии "мертвой зоны" [74].

1.3 «Prism 200»

Разработка английской фирмы «Cambridge Consultants» «Prism 200» [75] (рисунок 1.5) также работает в сверхширокополосном диапазоне и позволяет визуально отображать на экране положение и перемещение объектов, находящихся за стенами здания или помещения. Анализ презентационного ролика показал, что т.н. «разность кадров», применяется и в «Prism 200» (рисунок 1.5).





Рисунок 1.5 – «Prism 200» [75]



Рисунок 1.6 – Отображение на дисплее «Prism 200» и реальная сцена, происходящего за стеной[75]

Внутренние антенны прибора обеспечивают угол обзора по горизонтали 120 градусов, а по вертикали 90. Дальность обнаружения достигает 20 м. Масса всей системы составляет 5.4 кг. В ходе экспериментов было установлено, что допустимая толщина препятствия составляет до 40 см., при этом зондирующий импульс способен

проникать сквозь такие строительные материалы как кирпич, бетон, дерево, штукатурка, черепица и блоки.

Заявленные технические характеристики рассмотренных приборов позволяют судить о высокой эффективности, предложенных создателями, методов поиска людей за диэлектрическими преградами. Получение данных в режиме реального времени позволяет оперативно реагировать на изменение обстановки в рассматриваемом пространстве. Одностороннее зондирование и небольшие габариты обеспечивают мобильность установок, что немаловажно при проведении спецопераций.

Fктуальным становится вопрос о создании отечественного устройства, способного получать разрешение объекта в поперечном сечении помимо определения по дальности.

1.4 Георадар-обнаружитель "АБ-400СН"

Разработка компании «ЛОГИС»[76] применяется для:

- Обнаружения движущихся людей за различными преградами, в том числе за железобетонными стенами толщиной до 60 см.
- Обнаружения минно-взрывных устройств, в том числе бес корпусных или в неметаллических корпусах, в строительных конструкциях, под автомобильными дорогами, под полотном железных дорог, в грунте.
- Обнаружения тайников с оружием и снаряжением.
- Обнаружения подкопов, подземных ходов, коммуникаций.
- Обнаружения криминальных захоронений и т.д.



Рисунок 1.6 - «АБ-400СН»[76]

Данное устройство для наблюдения сквозь стены работает в частотном диапазоне 400 МГц. Разрешающая способность 0,15 метров. Прибор позволяет обнаруживать за преградами людей по их движению в реальных условиях через толстые железобетонные стены и многослойные строительные конструкции. При проведении обнаружения оператор видит на экране монитора отметки от движущихся людей и слышит изменяющийся по тону звуковой сигнал, характеризующий приближение или удаление человека от точки наблюдения.



Рисунок 1.7 – Способ расположения «АБ-400СН»

1.4 «Данник-5»

Разработка «НИЦ СШП МАИ» «Данник-5»[77] представляет собой СШП радар (рисунок 1.7), работающий в частотном диапазоне 0.5 – 1 ГГц. Прибор представляет собой некий дальномер, позволяющий определять расстояние до движущихся объектов за преградами. Дистанция за препятствиями разделена на элементы разрешения протяженностью 30 см. Информация о расстоянии до движущегося объекта отображается на специальной шкале.



Рисунок 1.7 – «Данник – 5»[77]

Компактный размер и небольшая масса обеспечивают мобильность установки. Существенным недостатком данного устройства является отсутствие визуализации происходящего за преградой, что делает невозможным точное определение местоположения объекта.

1.5 «Xaver 800»

Разработка израильской фирмы «Саmero»[78,79] основана на использовании сверхширокополосных сигналов, представляющих в режиме реального времени местонахождение объектов в обследуемом пространстве.



Рисунок 1.8 – «Хаver 800»[78]



Рисунок 1.9 – Способ расположения «Xaver 800»[78]

Данное устройство для наблюдения сквозь стены работает в частотном диапазоне от 3 до 10 ГГц, диапазон обнаружения составляет порядка 20 м., разрешение по горизонтали 20 см., по дальности 1 см. Прибор позволяет получать одно – , двух – и трехмерные изображения, через такие материалы, как цемент, гипс, кирпич, бетон, армированный бетон и дерево. Масса всей системы, включая аккумулятор, составляет 15 кг.





б) Рисунок 1.10 – Работа «Хаver 800» На рисунках 1.10а приведены отображения на дисплее прибора двух людей, находящихся за стеной. На рисунке 1.10в приведена реальная картина,

происходящего за стеной. Проанализировав презентационный ролик к данному аппарату, был сделан вывод о том, что «видеть» за стеной, используя данную систему, мы можем только движущиеся объекты. Статичные же предметы никак не отображаются, что свидетельствует об использовании, при построении отображения, т.н. «разности кадров», т.е. чтобы выделить движение объекта необходимо вычесть из принятого в настоящем сигнала, сигнал, принятый в предыдущий момент времени.

1.6 «3D Radar»

Прибор для проверки качества дорожного покрытия 3D Radar [79,80] (рисунок 1.11). Рзработан Норвежскими учёными с целью выявления неровностей в дорожном грунте.



Рисунок 1.11 – Георадар 3D Radar

Георадар использует электромагнитные волны для отображения структуры и объектов ниже поверхности земли. Антенны посылают сигнал, который отражается от слоёв почвы или подземных металлических объектов. Данное устройство хорошо работает в песке/ гравие и других сухих почвах с низкой проводимостью среды, но плохо проявляет свои качества при сканировании через глину, либо через слои почвы с высокой проводимостью. Георадар использует антенные решётки для эффективного сбора данных на больших поверхностях. Это позволяет пользователю получать трёхмерной изображение сканируемого участка. Устройство работает на частоте 1,5ГГц и проникать вглубь среды до 2м. 3D Radar получает данные о грунте используя разную частоту. Радар измеряет фазу и амплитуду на каждой частоте и использует обратное преобразование Фурье этих данных для создания профиля изображения во временной области.

1.7 «Кондор»

Многофункциональная установка "Кондор" [81] (рисунок 1.12) одновременно проводит геомагнитные исследования и работает как рентгеновский плотномер. Измерение параметров занимает долю секунды, и за час машина способна проверить до 30 километров.



Рисунок 1.12 – «Кондор»[81]

Установка, внешне похожая на передвижной холодильник для продажи мороженого, одновременно проводит геомагнитные исследования и работает как рентгеновский плотномер. Измерение параметров покрытия трассы занимает долю секунды, а за один час машина способна проверить до 30 километров! При этом глубина проникновения рентгеновских лучей достигает трех метров, следовательно, на основании полученных данных эксперты сделают полноценные выводы о дефектах, толщине слоев и плотности дорожного покрытия.

«Кондор» оснащен двумя блоками биологической защиты: внутренним и внешним. Мощность дозы на расстоянии 1 метра от установки более 1 мкЗв/ч. При этом, «Кондор» не содержит традиционных для данного вида контроля радиационных источников и в выключенном состоянии, не является источником радиационного

излучения, а выход радиоактивных продуктов в окружающую среду просто невозможен в связи с их отсутствием. Именно поэтому установку «Кондор» можно отнести к экологически чистым технологиям.

Заявленные технические характеристики рассмотренных приборов позволяют судить о высокой эффективности, предложенных создателями, методов поиска людей за диэлектрическими преградами. Получение данных в режиме реального времени позволяет оперативно реагировать на изменение обстановки в рассматриваемом пространстве. Одностороннее зондирование и небольшие габариты обеспечивают мобильность установок, что немаловажно при проведении спецопераций.

Среди рассмотренных устройств, у отечественных имеются недостатки, в частности все они представляют собой лишь некие дальномеры, без какой-либо внятной визуализации. Таким образом, актуальной становится задача о создании отечественного устройства, способного получать разрешение объекта в поперечном сечении помимо определения по дальности.

Глава 2 Методы обработки результатов измерений

2.1. Решение прямой и обратной задачи

Как известно, сверхширокополосное (СШП) излучение обладает высоким продольным пространственным разрешением, и это особенно важно для обнаружения скрытых объектов за диэлектрическими препятствиями. СШП излучение обеспечивает достаточное проникновение за препятствия, ЧТО обеспечивает радиотомограммы возможность обнаружения объектов путем построения интересующей области пространства. При разработке алгоритмов построения томограммы, необходимо обеспечить их устойчивость к шумам и помехам, оказывающим существенное влияние на принятый сигнал при односторонней схеме локании объектов за диэлектрическими преградами. Также важно. чтобы разработанные алгоритмы обеспечивали необходимое быстродействие при не слишком высоких требованиях к аппаратуре измерения и регистрации, а также к средствам компьютерной обработки.

Для решения задачи об определении наличия объектов за преградами необходимо просканировать область пространства за ней. Сканирование можно провести путем фокусировки излучения в каждую точку пространства. Фокусировку в свою очередь можно осуществить двумя методами - физическим и математическим. Первый осуществляется при использовании «традиционных» средств, а именно линз, зеркал и радиотехнических устройств. При использовании последних, для обеспечения фокусировки в произвольную точку следует обеспечить возможность независимой фазировки каждого из элементов. Под фазировкой понимается создание для каждого элемента приемопередающей системы такой задержки в электрическом тракте при излучении и приеме сигнала, чтобы возбуждаемые одним электрическим импульсом сигналы от всех элементов одновременно приходили в требуемую точку, а отраженные от нее сигналы после приема всеми преобразователями суммировались бы синфазно. Создание подобной фазировки при использовании СШП сигналов радиотехническими средствами представляется довольно-таки проблематичным, ввиду малой длительности СШП импульсов. Осуществление же фокусировки излучения при помощи линз и зеркал обладает массой недостатков, основными из которых являются громоздкость установки и большие временные затраты.

Математическая фокусировка [1-15] производится при помощи цифровой обработки регистрируемого амплитудно-фазового распределения поля и при определенных навыках позволяет решать поставленную задачу быстро и эффективно. Подобные алгоритмы и применялись в работе.

Основная идея обработки СШП данных восходит К технологии синтезирования апертуры [72] и программно-аппаратной фокусировки излучения [15]. Фокусировка осуществляется путем последовательного суммирования принятых сигналов с выравниванием временных задержек импульсов, рассеянных точкой с заданными координатами. Для этого необходимо внести в принятый сигнал задержки, соответствующие суммарному времени прохождения сигнала от передатчика до объекта и обратно (рисунок 2.1). Для этого требуется рассчитать время задержки для каждого из импульсов. При этом все зарегистрированные в различных точках излучения-приема сигналы суммируются в фазе для каждой задаваемой точки фокусировки с коррекцией существующего запаздывания. В приближении однократного рассеяния принятый локационный сигнал формируется как



Рисунок 2.1 – К пояснению принципа фокусировки.

$$S(\rho_j, t) = k_0^2 \iiint_V S_0(t - 2\frac{\left|\mathbf{r}_1 - \rho_j\right|}{c}) \frac{\Delta \varepsilon(\mathbf{\rho}_1, z_1)}{\left(4\pi \left|\mathbf{r}_1 - \rho_j\right|\right)^2} \left(d^3 \mathbf{r}_1\right)$$

Здесь $S_0(t)$ - излученный СШП сигнал. Если провести описанную фокусировку, то можно записать интегральное уравнение для неизвестного распределения неоднородностей $\Delta \varepsilon$:

$$F(\mathbf{r}) \equiv \sum_{j} S(\rho_{j}, t = 2 \frac{|\mathbf{r} - \rho_{j}|}{c}) = \iiint_{V} \Delta \varepsilon (\mathbf{\rho}_{1}, z_{1}) Q(\mathbf{\rho}_{1}, z_{1}; \mathbf{r}) (d^{3} \mathbf{r}_{1})$$

где

$$Q(\mathbf{p}_{1}, z_{1}; \mathbf{r}) = \sum_{j} S_{0}(t = 2\frac{\left|\mathbf{r} - \rho_{j}\right|}{c} - 2\frac{\left|\mathbf{r}_{1} - \rho_{j}\right|}{c} \frac{k_{0}^{2}}{\left(4\pi\left|\mathbf{r}_{1} - \rho_{j}\right|\right)^{2}}$$

играет роль аппаратной функции системы. Записанный интеграл, дает характерную картину, представленную на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Дифракционная гипербола[15]

При достаточном объеме зарегистрированных данных и коротких зондирующих импульсах эта функция приближается к «размазанной» δ -функции, что позволяет отождествить результаты фокусировки с распределением диэлектрической проницаемости $\Delta \varepsilon$:

$$F(\mathbf{r}) \sim \Delta \varepsilon (\mathbf{\rho}, z).$$

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

В случае, показанном на рисунке 2.2, эта процедура фокусировки эквивалентна интегрированию (суммированию) по гиперболе. Поэтому в литературе иногда этот метод фокусировки называют методом суммирования по (дифракционным) гиперболам [1-15]. По своей сути и методу реализации этот подход равнозначен использованию пространственно–временной согласованной фильтрации, а фокусирующая функция играет роль передаточной функции согласованного фильтра.

2.2 Двухтактная фокусировка

В случае слабо преломляющей среды или нижней среды с меньшим показателем преломления, чем у верхней среды, ситуация кардинально меняется. Частично сфокусированное излучение начинает расходиться в нижней среде. Для исправления ситуации требуется проведение дополнительной (второй) фокусировки. Рассмотрим, как это можно сделать[15].

Будем считать, что излучатель и приёмник монохроматических волн перемещаются параллельно плоской границе раздела сред на некотором расстоянии от неё. С определённым шагом производится локационное зондирование среды монохроматическими волнами, а точки излучения и приема совпадают друг с другом и перемещаются на высоте h=const в воздухе над границей раздела.

Предположим, что мы уже провели фокусировку в некоторую точку на границе раздела сред. Для исправления ситуации проведем дополнительную (вторую) фокусировку. Сделаем это с помощью интеграла типа свертки:

$$F_{1}(\mathbf{\rho}_{F1}, h_{1}, f) = \iint_{S} F(\mathbf{\rho}_{F}, f) M_{1}(\mathbf{\rho}_{f1} - \mathbf{\rho}_{F}, h_{1}, f) \left(d^{2} \mathbf{\rho}_{F} \right)$$
(2.1)

где $M_1(\mathbf{p}_F, f) = \exp[-ikn 2\sqrt{\mathbf{p}_F^2 + h_1^2}]$ – весовая функция фокусировки, $\mathbf{r}_1 = (\mathbf{p}_F, h_1)$ – точка фокусировки в нижнем полупространстве, S – плоскость границы раздела сред, которая и представляет плоскость вторичной синтезируемой апертуры. Предполагается, что значение показателя преломления известно. Функция M_1 в (2.1) берется от разности аргументов в силу предполагаемой однородности синтезируемой апертуры.

С учетом представления (2.2) сфокусированное поле можно переписать в виде

$$F_{1}(\mathbf{\rho}_{F1}, h_{1}, f) = \iiint_{V_{1}} \Delta \varepsilon(\mathbf{\rho}_{1}, z_{1}) Q_{1}(\mathbf{\rho}_{1}, \mathbf{\rho}_{F1}, h_{1}, f) (d^{2} \mathbf{\rho}_{1}) dz_{1}, \qquad (2.2)$$

где функция

$$Q_{1}(\boldsymbol{\rho}_{1},\boldsymbol{\rho}_{F1},h_{1},f) = \iint Q(\boldsymbol{\rho}_{1},z_{1},\boldsymbol{\rho}_{F})M_{1}(\boldsymbol{\rho}_{F1}-\boldsymbol{\rho}_{F},h_{1})(d^{2}\boldsymbol{\rho}_{F}), \quad (2.3)$$

соответствует отклику системы на точечную неоднородность, расположенную в точке \mathbf{r}_1 , т.е. представляет собой аппаратную функцию системы на частоте f при фокусировке в подповерхностную точку $\mathbf{\rho}_{F_1}$.

В случае большой апертуры S интегралы трансформируется в интегралы типа свертки, и тогда можно приближенно записать

$$Q_{1}(\boldsymbol{\rho}_{1},\boldsymbol{\rho}_{F1},z_{1},h_{1}) = k_{1}^{2} \iint G_{0}^{2}(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0},)M(\boldsymbol{\rho}_{F}-\boldsymbol{\rho}_{0},f)d^{2}\boldsymbol{\rho}_{0} \cdot \iint M_{1}(\boldsymbol{\rho}_{F1}-\boldsymbol{\rho}_{F},h_{1})(d^{2}\boldsymbol{\rho}_{F}).$$
(2.4)

Сделав замену $G_0^2(\mathbf{\rho}_1 - \mathbf{\rho}_0) = g(\mathbf{\rho}_1 - \mathbf{\rho}_0)$, запишем (2.1) в следующем виде

$$Q_{1}(\mathbf{\rho}_{1}, z_{1}, h_{1}, \mathbf{\rho}_{F1}) = k_{1}^{2} \iint g(\mathbf{\rho}_{1} - \mathbf{\rho}_{0}) M(\mathbf{\rho}_{F} - \mathbf{\rho}_{0}) M_{1}(\mathbf{\rho}_{F1} - \mathbf{\rho}_{F}) (d^{2} \mathbf{\rho}_{0}) (d^{2} \mathbf{\rho}_{F}) .$$
(2.5)

В результате выполнения интегрирования получим:

$$Q_{1} = k^{2} \frac{1}{2\pi} \int \tilde{g}(-\mathbf{\kappa}_{2\perp}) \tilde{M}(\mathbf{\kappa}_{3\perp}) \tilde{M}_{1}(\mathbf{\kappa}_{3\perp}) \exp(i\mathbf{\kappa}_{3\perp}(\mathbf{\rho}_{F1} - \mathbf{\rho}_{1})) (d^{2}\mathbf{\kappa}_{3\perp}) = Q_{1}(\mathbf{\rho}_{F1} - \mathbf{\rho}_{1}, h_{1}, z_{1}) (2.6)$$

где $\tilde{g}(-\mathbf{\kappa}_{2\perp})$, $\tilde{M}(\mathbf{\kappa}_{3\perp})$, $\tilde{M}_{1}(\mathbf{\kappa}_{3\perp})$ пространственные спектры функций $g(\mathbf{\rho}_{1} - \mathbf{\rho}_{0})$,
 $M(\mathbf{\rho}, h, f)$, $M_{1}(\mathbf{\rho}_{f}, f)$ соответственно.

На основании выражения (2.6) интеграл (2.2) трансформируется в интеграл типа свертки, тогда можно приближенно записать:

$$F_1(\mathbf{\rho}_{f1}, h_{1,f}) = \iiint_{V_1} \Delta \varepsilon(\mathbf{\rho}_1, z_1) Q_1(\mathbf{\rho}_1 - \mathbf{\rho}_{f1}, h_1, f) d\mathbf{r}_1.$$

Функция $Q_1(\mathbf{p}, h_1, f)$ играет роль аппаратной функции фокусирующей системы с использованием двойного синтезирования эффекта фокусировки. На рисунке 2.3а представлена аппаратная функция системы при двухтактной фокусировке на глубину 10 см под поверхностью раздела сред.



Рисунок 2.3 – Аппаратная функция (АФ) при при двухактной фокусировке и ее приближенное представление[15]

Допустим приближение о том что, в некоторой области вблизи точки фокусировки волны распространяются по нормали к поверхности. Данная область будет локализована в горизонтальной плоскости и вытянута по вертикальной оси при большой высоте *h*₁. В данной области, можно приближённо записать аппаратную функцию системы следующим образом:

$$Q_{1} = Q_{1}(\boldsymbol{\rho}_{F1} - \boldsymbol{\rho}_{1}, z_{1} - h_{1}) \approx Q_{1\perp}(\boldsymbol{\rho}_{F1} - \boldsymbol{\rho}_{1}) \exp(2ikn[z_{1} - h_{1}]).$$

С учетом этого сфокусированное поле примет следующий вид:

$$F(\mathbf{\rho}_F, h_1) = \iint (d^2 \mathbf{\rho}_1) dz_1 \Delta \mathcal{E}(\mathbf{\rho}_1, z_1) Q_{1\perp}(\mathbf{\rho}_{F1} - \mathbf{\rho}_1) \exp(2ikn[z_1 - h_1]).$$

где $k = \omega/c$. Если произвести переход из частотной области во временную область, с помощью преобразования Фурье, то можно будет получить разрешение по глубине и приближённо восстановить изображение рассеивающих неоднородностей $\Delta \varepsilon(\mathbf{p}_f, z_f)$:

$$\int F_1(\mathbf{\rho}_{F_1}, h_1) \exp(-2iknz_F) df \approx$$

$$\approx \int d\mathbf{\rho}_1 dz_1 \Delta \varepsilon(\mathbf{\rho}_1, z_1) Q_{1\perp} \delta[z_F - [z_1 - h_1]] 2\pi / (2n/c) \approx \Delta \varepsilon(\mathbf{\rho}_F, z_F)$$

где z_F – глубина, на которую производится фокусировка, $t_F = 2nz_F/c$ – время прохождения волной до точки фокусировки и возврата назад.

Полученная формула дает решение задачи томографии с использованием двухтактной фокусировки.

2.3 Групповая фокусировка

В ряде случаев двухтактной фокусировки может быть недостаточно, например, в многослойной фоновой среде или, наоборот, в однородной среде. При этом фокусировку следует осуществлять последовательно или параллельно сразу на все дальности. Поясним суть предлагаемого решения в наиболее простом частном случае однородной фоновой среды и в приближении однократного рассеяния

$$E(\mathbf{\rho}_{0}, f) = k_{1}^{2} \iiint_{V_{1}} \Delta \varepsilon(\mathbf{\rho}_{1}, z_{1}) G_{0}^{2} (\mathbf{\rho}_{1} - \mathbf{\rho}_{0}, z_{1}) d^{2} \mathbf{\rho}_{1} dz_{1}.$$
(2.6)

Здесь $k_1 = k = 2\pi f/c$ – волновое число соответствующее фоновой среде. Функция Грина для этого случая записывается как поле сферической волны

$$G_{0}(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0},z_{1}) = \exp\left\{ik\sqrt{(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0})^{2}+z_{1}^{2}}\right\} / 4\pi\sqrt{(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0})^{2}+z_{1}^{2}}.$$

Если в (2.26) выполнить дифференцирование, то можно записать

$$\frac{d}{dk}\left\{\frac{\mathrm{E}(\mathbf{\rho}_{0},f)}{k^{2}}\right\} = \iiint_{V_{1}} \Delta \varepsilon(\mathbf{\rho}_{1},z_{1}) \mathrm{G}_{2}(\mathbf{\rho}_{1}-\mathbf{\rho}_{0},z_{1}) d^{2}\mathbf{\rho}_{1} dz_{1},$$

где

$$G_{2}(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0},z_{1}) \equiv \exp\left\{i2k\sqrt{(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0})^{2}+z_{1}^{2}}\right\} / 4\pi\sqrt{(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0})^{2}+z_{1}^{2}}$$

Эта функция допускает разложение в спектр по плоским волнам (формула Вейля)

$$\mathbf{G}_{2}\left(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0},z_{1}\right)=\frac{i}{\left(2\pi\right)^{2}}\int\int\frac{\exp\left\{i\left(\kappa_{\perp}\left(\boldsymbol{\rho}_{1}-\boldsymbol{\rho}_{0}\right)+\kappa_{z}z_{1}\right)\right\}}{2\kappa_{z}}\left(d^{2}\kappa_{\perp}\right).$$

Здесь $\kappa_z = \sqrt{(2k)^2 - \kappa_{\perp}^2}$. С учетом этого представления можно записать, что

$$E_{1}(\mathbf{u}_{\perp}, f) \equiv \\ \equiv \iint \exp\{i\mathbf{u}_{\perp}\mathbf{\rho}_{0}\}\frac{d}{dk}\left\{\frac{\mathrm{E}(\mathbf{\rho}_{0}, f)}{k^{2}}\right\}d^{2}\mathbf{\rho}_{0} = \iiint_{V_{1}}\Delta\varepsilon(\mathbf{\rho}_{1}, z_{1})\frac{\exp\{i(\mathbf{u}_{\perp}\mathbf{\rho}_{1} + \mathbf{u}_{z} z_{1})\}}{2i\mathbf{u}_{z}}d^{2}\mathbf{\rho}_{1}dz_{1},$$
(2.7)

где $\mathbf{u}_{z} = \sqrt{(2k)^{2} - \mathbf{u}_{\perp}^{2}}$. Это выражение означает, что спектр пространственных частот неоднородностей с точностью до некоторого множителя совпадает с полученным выражением для $E_{1}(\mathbf{u}_{\perp}, f)$:

$$\Delta \varepsilon \left(\mathbf{u}_{\perp}, \mathbf{u}_{z} \right) \equiv \iiint_{V_{1}} \Delta \varepsilon \left(\boldsymbol{\rho}_{1}, z_{1} \right) \exp \left\{ i \left(\mathbf{u}_{\perp} \boldsymbol{\rho}_{1} + \mathbf{u}_{z} z_{1} \right) \right\} d^{2} \boldsymbol{\rho}_{1} dz_{1} = 2i \mathbf{u}_{z} \operatorname{E}_{1} \left(\mathbf{u}_{\perp}, f \right). \quad (2.8)$$

В конечном счете, для восстановления пространственного распределения неоднородностей осталось выполнить трехмерное обратное преобразование Фурье. При этом имеется только одна вычислительная особенность при использовании выражения (2.27) – необходимость перехода от временных частот *f* к соответствующим пространственным частотам

$$\mathbf{u}_{z} = \sqrt{(2k)^{2} - \mathbf{u}_{\perp}^{2}} = \sqrt{(4\pi f/c)^{2} - \mathbf{u}_{\perp}^{2}}, \qquad (2.9)$$

что реализуется с помощью простой интерполяции. Выражение (2.8) реализует идею метода фокусировки, но сразу (параллельно) на все дальности.



a)



Рисунок 2.4 – Задача локационного зондирования[15]

На рисунке 2.4 показан результат имитационного моделирования по использованию описанной процедуры групповой фокусировки. В верхней части рисунка 2.4 а показан результат численного моделирования распределения вещественной части радиолокационного отклика на точечную неоднородность с координатами: x = 20 см, y = 0 см и z = 150 см. Зондирование проводилось по оси x в пределах \pm 50 см в плоскости y = 0 см в частотном диапазоне от 6 ГГц до 12 ГГц. Результат решения – восстановление томограммы в плоскости y = 0 см показан на рисунке 2.4 б в виде градаций серого цвета. Видно, что заданная неоднородность восстанавливается вполне однозначно.

Здесь и далее задачу синтезирования большой апертуры с фокусировкой излучения будем для краткости называть радиоволновым томосинтезом. В представленном виде записанное решение представляет собой обобщение известного метода Столта [56,89] и учитывает отличие функции $G_0^2(\rho_1 - \rho_0, z_1)$ от $G_2(\rho_1 - \rho_0, z_1)$. Справедливости ради следует заметить, что такая замена играет роль выбора оконной функции, а на эффект фокусировки не влияет существенно.

Предложенный метод применим и в случае многослойной среды. Для этого в формуле (2.7) достаточно экспоненциальный множитель $\exp\{iu_{z} z_{1}\}$ заменить на составной множитель $\exp\{i(\sum_{j} u_{zj} z_{j} + u_{z} z_{1})\}$, который учитывает фазовые набеги во

всех предшествующих слоях с толщиной z_j и известным показателем преломления n_i . Нормальная проекция волнового числа в каждом их этих слоев находится как

$$\mathbf{u}_{zj} \equiv \sqrt{\left(2kn_j\right)^2 - \mathbf{u}_{\perp}^2}$$

2.4 Оценка пространственного разрешения

Под разрешением будем понимать минимальное расстояние между двумя точечными целями, на котором их можно отдельно различить. Разрешающая способность системы может быть определена по уровню отраженного от точечного рассеивателя сигнала и по его изображению, однако при этом требуется численный расчёт данного изображения.

Разрешающую способность системы можно определить по функции неопределённости, которая аналогична реакции системы на точечный рассеиватель. Получим аналитическое выражение для разрешающей способности, определяемое размером апертуры, полосой частот и расстоянием до цели.

Рассмотрим одномерный случай перемещения антенной системы вдоль оси *x* (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Фокусировка измеренных значений поля при синтезировании апертуры

Пусть в точке $(x_0 = 0, z_0)$ расположен единственный точечный рассеиватель, создающий рассеянное поле, которое в точке приёма x с точностью до постоянных множителей имеет следующий вид: [21]

$$\mathrm{U}(x) = \frac{\exp(i2kr)}{r^2}$$

где $r = \sqrt{x^2 + z_0^2}$ – расстояние от точечного рассеивателя до текущей точки измерения рассеянного поля.

Операция синтезирования апертуры в этом случае аналитически записывается так:

$$V(x_{f}, z_{f}) = \int_{-B/2}^{B/2} U(x) \exp\left(-2ik\sqrt{(x - x_{f})^{2} + z_{f}^{2}}\right) dx =$$

$$= \int_{-B/2}^{B/2} \frac{\exp\left(2ik\left(\sqrt{x^{2} + z_{0}^{2}} - \sqrt{(x - x_{f})^{2} + z_{f}^{2}}\right)\right)}{r^{2}} dx$$

где (x_f, z_f) – точка фокусировки; *B* – размер синтезируемой апертуры (размер области перемещения антенн); $V(x_f, z_f)$ – фактически и является функцией неопределённости.

Для вычисления интеграла (2.1) примем приближение $z_0 >> B$ и будем рассматривать операцию фокусировки при $z_f = z_0$. То есть, рассматриваем фокусировку на глубине положения точечного рассеивателя.

В результате функция неопределённости примет вид:

$$V(x_{f}, z_{0}) \cong \int_{-B/2}^{B/2} \frac{\exp\left(2ik\left(2xx_{f} - x_{f}^{2}\right)/z_{0}\right)}{z_{0}^{2}} dx = \frac{\sin\left(kx_{f}B/z_{0}\right)}{z_{0}kx_{f}} \exp\left(-ikx_{f}^{2}/z_{0}\right)$$

Разрешающую способность определим из критерия $kx_f B/z_0 = \pi$ (при этом функция неопределённости обращается в ноль). Таким образом, разрешающая способность по горизонтали:

$$\Delta x = 2x_f = \frac{2\pi z_0}{kB} = \frac{z_0 \lambda}{B}$$

Таким образом, разрешение по оси движения тем лучше, чем больше размер апертуры *B*, выше частота зондирования и меньше расстояние до цели.

Разрешение по дальности определяется только типом зондирующего сигнала:

где
$$\Delta f$$
 – полоса частот сигнала. Т.о. разрешение тем лучше, чем шире полоса частот сигнала.

 $\Delta r = \frac{c}{\Delta f}$

Поперечное разрешение можно определить из приближения геометрической оптики (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Оценка пространственного разрешения[72]

Тогда выражение для разрешения запишется в виде:

$$\Delta y = \frac{c}{2\Delta f \cos(\alpha)},$$

а для плоской поверхности:

$$\Delta y = \frac{\Delta r}{\sin(\alpha)} \, .$$

2.5 Решение задачи фокусировки при зондировании через преграду

При осуществлении операции фокусировки все зарегистрированные в различных точках апертуры СШП сигналы суммируются в фазе для каждой задаваемой точки фокусировки с коррекцией существующего запаздывания. И для проведения этой коррекции мы должны рассчитать запаздывание сигнала при прохождении его через преграду.

2.5.1 Решение без учета преломления
Рассчитать данную задержку можно, не прибегая к громоздким вычислениям, если не учитывать преломление, вносимое препятствием. При этом будем считать, что сигнал прошел большее расстояние, равное n'd, где n' - коэффициент преломления, а d – толщина преграды.

Рассмотрим траекторию движения волны (рисунок 2.7). Пусть мы имеем схему с совмещенными приемником и передатчиком. Расположим их в начале координат.





Запишем время прохождения для каждого участка:

$$\tau_1 = \frac{z_0}{\tilde{n}\cos(\alpha)}$$
$$\tau_2 = \frac{dn}{\tilde{n}\cos(\alpha)}$$

$$\tau_3 = \frac{z_T - d - z_0}{\tilde{n}\cos(\alpha)}$$

Тогда общее время будет равно:

$$\tau = \frac{z_T + d(n-1)}{c\cos(\alpha)}$$

Запишем второе выражение для τ :

$$\tau = \frac{x_T}{c\sin(\alpha)}$$

Решая, систему уравнений, получаем:

$$\tau = \frac{z_T + d(n-1)}{c\sqrt{1-x_T}}$$

2.5.2 Решение задачи с учетом преломления

Для получения точного решения, мы должны учесть преломление вносимое стеной. Рассмотрим траекторию движения волны в этом случае (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Схема прохождения сигнала с учетом преломления.

Составим и решим систему уравнений.

$$\tau_1 = \frac{z_0}{\tilde{n}\cos(\alpha)},$$

$$\tau_2 = \frac{dn}{\tilde{n}\cos(\beta)},$$

$$\tau_3 = \frac{z_T - d - z_0}{\tilde{n}\cos(\alpha)}.$$

Тогда общее время будет равно:

$$\tau = \frac{z_T}{c\cos(\alpha)} - \frac{d}{c} \left(\frac{1}{\cos(\alpha)} - \frac{n}{\cos(\beta)} \right).$$

Как видно, для определения *т* нам необходимо знать углы падения и преломления. Для этого составим уравнение:

$$x_T = x_1 + x_2 + x_3$$
,

ИЛИ

$$x_T = z_0 tg(\alpha) + dtg(\beta) + (z_T - d - z_0)tg(\alpha),$$

упростив, получаем:

$$x_T = z_T t g(\alpha) + d(t g(\beta) - t g(\alpha)).$$
(2.10)

Рассмотрим

$$tg^{2}(\beta) = \left(\frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)}\right)^{2}.$$

Запишем закон Снеллиуса:

$$n = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)},$$

теперь используя его и основные тригонометрические тождества, получим:

$$tg^{2}(\beta) = \left(\frac{\sin^{2}(\alpha)}{n^{2}\left(1 - \frac{\sin^{2}(\alpha)}{n^{2}}\right)}\right) = \frac{\sin^{2}(\alpha)}{n^{2} - \sin^{2}(\alpha)} = \frac{\sin^{2}(\alpha)}{n^{2}} - 1 = \frac{1}{\left(1 + ctg^{2}(\alpha)\right)n^{2}} - 1 = \frac{tg^{2}(\alpha)}{\left(n^{2}tg^{2}(\alpha) + n^{2}\right)} - 1 = \frac{tg^{2}(\alpha)}{n^{2} + (n^{2} - 1)tg^{2}(\alpha)}$$
(2.11)

Подставим (2.11) в (2.10) и, обозначив $tg^2(\alpha) = \gamma$, получим:

$$x_T = z_T \gamma - d\gamma + \gamma \frac{d}{\sqrt{n^2 + (n-1)\gamma^2}} \,.$$

Возведем обе части уравнения в квадрат:

$$(x_T - \gamma(z_T - d))^2 = \left(\frac{d\gamma}{\sqrt{n^2 + (n-1)\gamma^2}}\right)^2$$

и раскроем скобки:

$$x_{T}^{2} + \gamma^{2}(z_{T} - d)^{2} - 2x_{T}(z_{T} - d)\gamma = \frac{d^{2}\gamma^{2}}{n^{2} + (n-1)\gamma^{2}}.$$

$$\left(x_{T}^{2} + \gamma^{2}(z_{T} - d)^{2} - 2x_{T}(z_{T} - d)\gamma\right)\left(n^{2} + (n-1)\gamma^{2}\right) = d^{2}\gamma^{2}$$

$$\left(x_{T}^{2}n^{2} + \gamma^{2}(z_{T} - d)^{2}n^{2} - 2x_{T}(z_{T} - d)n^{2}\gamma\right) + \left(n^{2}\gamma + (n-1)x_{T}^{2}\gamma^{2}\right) + (z_{T} - d)^{2}(n^{2} - 1)\gamma^{4} - 2x_{T}(z_{T} - d)(n^{2} - 1)\gamma^{3} - d^{2}\gamma^{2} = 0$$

$$(2.12)$$

Введем следующие обозначения:

$$V = (z_T - d)(n^2 - 1),$$

$$A = \frac{-2x_T(z_T - d)(n^2 - 1)}{V},$$

$$B = \frac{(z_T - d)^2 n^2 + (n - 1)x_T^2 - d^2}{V},$$

$$C = \frac{-2x_T(z_T - d)n^2}{V},$$

$$D = \frac{x_T^2 n^2}{V}.$$

Тогда уравнение (2.12) запишется следующим образом:

$$\gamma^{4} + A\gamma^{3} + B\gamma^{2} + C\gamma + D = 0$$
 (2.13)

Найдем решение данного уравнения четвертой степени методом Декарта – Эйлера[85]. Подстановкой $x = y - \frac{A}{4}$ приведем уравнение (2.13) к «неполному» виду

$$y^4 + py^2 + qy + r = 0$$
.

Корни y₁, y₂, y₃, y₄ «неполного» уравнения четвертой степени равны одному из выражений

$$\pm\sqrt{z_1},\pm\sqrt{z_2},\pm\sqrt{z_3}$$
,

в котором сочетание знаков выбирается так, чтобы удовлетворялось условие:

$$\sqrt{z_1}\sqrt{z_2}\sqrt{z_3} = -\frac{q}{8} \,.$$

Причем z_1, z_2, z_3 – корни кубического уравнения:

$$z^{3} + \frac{p}{2}z^{2} + \frac{p^{2} - 4r}{16}z - \frac{q}{64} = 0.$$

2.6 Моделирование задачи зондирования диэлектрической преграды СШП сигналом

При решении задачи о вычислении поля преломленных сферических волн, в качестве первого приближения мы получаем геометрическую оптику, а в последующих приближениях – поправки к ней, иногда весьма существенные[87].

Из теории распространения электромагнитных волн в слоистых средах [87] известно, что выражения для коэффициентов отражения от слоя Г и прохождения через слой Т имеют следующий вид:

$$\Gamma = \frac{\exp(ikR_1)}{R_1} \cdot V ,$$

где

$$V = \frac{n^2 \cos(\alpha) - \sqrt{n^2 - 1 + \cos^2(\alpha)}}{n^2 \cos(\alpha) + \sqrt{n^2 - 1 + \cos^2(\alpha)}}$$

- коэффициент отражения от границы слоя,

$$T_{1} = \frac{2\sqrt{\sin(\theta)}}{\sqrt{R_{2}\left(z_{0}\cos^{-3}(\theta) + \left(\frac{d}{n}\right)\cos^{-3}(\beta)\right)}} \exp\left(ik\left(\frac{z_{0}}{\cos(\theta)} + \frac{nd}{\cos(\beta)}\right)\right) \left(\frac{1}{n^{2}\cos(\theta) + n\cos(\beta)}\right),$$
$$T_{2} = \frac{2n\sqrt{\sin(\theta)}}{\sqrt{R_{2}\left(z_{0}\cos^{-3}(\theta) + \left(\frac{d}{n}\right)\cos^{-3}(\beta)\right)}} \exp\left(ik\left(\frac{z_{0}}{\cos(\theta)} + \frac{nd}{\cos(\beta)}\right)\right) \left(\frac{1}{n^{2}\cos(\theta) + n\cos(\beta)}\right),$$

где

$$R_1 = \frac{2z_0}{\cos(\alpha)}, \quad R_2 = z_0 \tan(\theta) + d \tan(\beta),$$

– расстояния, пройденные волной (рисунок 2.9). При этом, выражение для T_1 применимо при прохождении волны из воздуха в среду, а для T_2 – из среды в воздух.



Рисунок 2.9 – Прохождение волны через преграду

Будем считать, что *n* – не зависит от частоты в полосе частот падающего сверхширокополосного электромагнитного излучения, тогда выражение для отраженного от преграды и прошедшего через преграду сигналов запишутся в следующем виде:

$$Y_{i\delta\delta}(t) = \frac{1}{2\pi} \int X(\omega) \Gamma(\omega) e^{-i\omega t} d\omega.$$

$$Y_{r\delta}(t) = \frac{1}{2\pi} \int X(\omega) T_1(\omega) T_2(\omega) V(\omega) e^{-i\omega t} d\omega,$$

где $X(\omega)$ – спектр, зондирующего сигнала.

2.7 Определение параметров диэлектрической преграды

Для точного определения параметров преграды, достаточно информации, полученной только в двух точках – в точке, когда приемник совмещен с передатчиком и когда разнесен. (рисунок 2.10).



передатчике(а) и разнесенных(б)

Для имитационного моделирования был использован импульс X(t), представленный на рисунке 2.11 а. Его амплитудный спектр $|X(\omega)|$ представлен на рисунке 2.11 б.



Рисунок 2.11 – Зондирующий сигнал и его спектр

В ходе имитационного моделирования в среде MathCad решалась прямая задача по зондированию диэлектрической преграды.

Для проверки правильности использования рассмотренной теории, в CST Studio также было смоделировано зондирование диэлектрической преграды. В качестве источника сферических волн, использовалась численная модель (рисунок 2.12) антенны, изображенной на рисунке 3.7а.



Рисунок 2.12 – Численная модель антенны

На изображенном ниже рисунке представлен сигнал, подаваемый на вход антенны.



Рисунок 2.13 – Сигнал, подаваемый на вход антенны

На рисунке 2.14 представлен излучаемый сигнал





Рисунок 2.14 – Излучаемый импульс

В ходе имитационного моделирования (рисунок 2.15) зондировалась преграда толщиной 10 см. и с *n* = 1.5811. Приемники находились на расстоянии 3 и 20 см.



Рисунок 2.15 – Схема численного эксперимента

Результаты решения прямой задачи приведены на рисунках 2.16 и 2.17



на 3 см



на 20 см.

Сплошной линии соответствует решение прямой задачи в с MathCad, пунктирной –в CST Studio.

По полученным данным были рассчитаны следующие задержки; 1.0293 нс. Для MathCad и 1.0372 нс. Для CST Studio. Как видно, используя предложенную теорию, было обеспечено определение задержек с погрешностью менее 1 %.

Таким образом, используя решения прямой задачи для двух приемников, можно определить параметры преграды. Воспользуемся уравнениями из п. 3.2 и получим выражение для *n*:

$$n = \sqrt{\frac{\tau c \sin(\theta) \cos(\theta) - z_0 \sin(\theta)}{x_0 \cos(\theta) - z_0 \sin(\theta)}},$$

тогда *n* = 1.5818, а *d* = 0.0983

На основании разработанного алгоритма проводилось численное моделирование решения обратной задачи восстановления формы плоского экрана с отверстием посередине. При этом моделировалась работа решетки состоящей из 16 приемников линейно распределенных по апертуре и 2 передатчиков по краям решетки. Апертура решетки составляла 1.2 м. Экран находился на расстоянии 1 м от решетки за диэлектрической преградой с параметрами d = 0.1 м и n = 1.581. На рисунке 2.18 представлены результаты восстановления сечения экрана без коррекции 2.18 а и с коррекцией запаздывания в слое 2.18 б. Размер сетки на графике составил 4×4 см.

No. of Concession, Name								Sel.	a	()	Ø	ť,	e fai	est.
	1										the second			
		in in it was	n	n trainings	MERCENTE	entenant) -	-			Providence (et al.	ai di produc	*****		-83
												1000		

a)

б)

Рисунок 2.18 – Восстановленное при имитационном моделировании радиоизображение сечения экрана с отверстием без учета коррекции и при коррекции запаздывания в слое

Из графиков видно, что если не учитывать задержки в слое, то при фокусировке экран становится выгнутым, а границы отверстия посередине сильно размыты. Учет коррекции позволяет устранить эти искажения, а также повышает разрешение радиоизображения.

2.8 Выводы

Проведено исследование основных методов фокусировки: суммирование по дифракционным гиперболам, фокусировка и групповая фокусировки.

Показана важность учета влияния преграды при осуществлении фокусировки излучения за диэлектрический слой Учет коррекции позволяет устранить искажения, а также повышает разрешение радиоизображения.

Показано, что для точного определения неизвестных параметров диэлектрической преграды (толщины и показателя преломления), достаточно информации, полученной только в двух точках – в точке, когда приемник совмещен с передатчиком и когда разнесен. В ходе имитационного моделирования в среде MathCad решалась прямая задача по зондированию диэлектрической преграды.

49

Глава 3 Экспериментальная апробация разработанных методов с использованием кругового механического сканирования

3.1 Численный эксперимент

Для проверки работоспособности алгоритмов восстановления изображения, рассмотрим задачу о рассеянии СШП импульса, форма которого показана на рисунке 3.1а. Зондируется тонкий тестовый объект в виде ступенчатого треугольника (рисунок 3.1б). Этот объект располагался на расстоянии 20 см. от плоскости апертуры круговой решетки. Центр объекта (т. О) и центр плоскости апертуры находились на одной оси. Каждая ступенька тестового объекта имеет размер по 5 см.



Рисунок 3.1 – Зондирующий сигнал и тестовый объект

На рисунке 3.2 представлена модель численного эксперимента. Излучение фокусировалось в каждую плоскость, взятую с шагом *d*, т.е. послойно.



Рисунок 3.2 – Модель численного эксперимента

Рассмотрим результаты восстановления структуры объекта в случае различных вариантов заполнения апертуры (рисунок 3.3), где каждой точке соответствует положение приемопередатчика.



Рисунок 3.3 – Варианты заполнения апертуры

Для всех трех случаев размеры области фокусировки были выбраны 40х40 см., т.е. размеры каждого слоя томограммы равны 40х40 см. Объект находился на расстоянии 20 см. от апертуры.

На приведенном ниже рисунке 3.4 представлена томограмма тестового объекта при плотном заполнении апертуры. На томограмме приведены изображения 16-ти слоев, взятых с шагом 0.5 см. Первому слою соответствует дальность 16 см, а последнему 23.5 см. Светлые участки соответствуют большим значениям амплитуды.



Рисунок 3.4 – Томограмма тестируемого объекта при сканировании заполненной решеткой

Как видно, тестовый объект находится в слое №9, с соответствующей ему дальностью 20 см.

Полученная, при использовании кругового сканирования с шагом 10⁰, томограмма приведена на рисунке 3.5. Радиус сканирования был равен 10 см.

1	2	3	4
5	. 6	et.	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

Рисунок 3.5 – Томограмма тестируемого объекта при круговом сканировании

Как видно, контрастность данного отображения не позволяет судить о форме тестируемого объекта. Значительно увеличить контрастность позволяет сканирования использование круговой системы co сдвигом, т.о. образом увеличивается количество приемников в три раза. Сдвиг круговой решетки составлял 5 см., относительно своего предыдущего положения. Полученная в результате моделирования томограмма, приведена на рисунке 3.6.

1	2	3	4
NA C	NA.	e MA	11 1000
5	6	7	8
(sen	1	1.450	140
9	10	11	12
le.			
13	14	15	16



Т.о. численное моделирование подтвердило работоспособность предложенного подхода по восстановлению формы объектов, что позволяет перейти к натурному эксперименту.

3.2 Натурный эксперимент

Для получения томограммы какого – либо объекта необходимо получение достаточно полного набора его многоракурсных проекций. Это возможно достигнуть либо путем выполнения сканирования объекта, либо путем проведения параллельных многопозиционных измерений. Для получения полного набора измерений была использована круговая система сканирования на основе шагового двигателя, управляемого от компьютера, который одновременно управлял генератором и осциллографом. Такое сканирование равнозначно использованию круговой антенной решетки с параллельным опросом.

Для эксперимента, в качестве излучающей и приемной антенн, использовались, специально разработанная на кафедре радиофизики ТГУ, малогабаритная СШП антенны, изображенная на рисунке 3.7а. Коэффициент стоячей волны (КСВН) такого сорта излучателей не превышает 2 в полосе от 2 до 23 ГГц (рисунок 3.7б).



Рисунок 3.7 – СШП излучатель и его КСВН.

В качестве генерирующего устройства в эксперименте использован генератор биполярных импульсов ТМГ100010Р01, выдающий биполярные импульсы с формой импульсов близкой к периоду синусоиды и амплитудой ±7 В ±0,1 Umax и длительностью 100 пс по уровню 0,1 от амплитудного значения. Частота повторения импульсов 100 кГц. Для регистрации измерения и регистрации сверхширокополосных импульсов использовался двухканальный стробоскопический цифровой осциллограф ТМR8140 (рисунок 3.8) со следующими техническими характеристиками:

•	полоса пропускания	040 ГГц
•	динамический диапазон входных сигналов,	±1 B
•	диапазон изменения временного окна,	0,01100 нс/дел.
•	диапазон изменения чувствительности,	5200 мВ/дел.
•	диапазон изменения числа отсчетов во временном окн	e, 164096
•	кратковременная нестабильность развертки (джиттер),	, 1,5 пс + 0001%
•	уровень собственных шумов, СКО	<2 мВ
•	дискретность амплитудного канала,	12 бит.

55



Рисунок 3.8 – Стробоскопический осциллограф TMR8140.

И генератор, и осциллограф были отечественного производства Научно – производственного предприятия «ТРИМ» г. Санкт – Петербург. Использование такой аппаратуры позволяет перекрыть частотный диапазон от 0,1 до 20 ГГц.



Рисунок 3.9 – Натурный эксперимент

В ходе эксперимента синтезировалась апертура по результатам измерений отраженных от тестового объекта сигналов на четырех окружностях, сдвинутых друг относительно друга на 5 см аналогично системе, изображенной на рисунке 3.3в. Шаг перемещения по углу составлял 4,5°. Таким образом, за один оборот сканирующей системы реализовывалось 80 осциллограмм. На рисунке 3.10 показаны примеры 80 осциллограмм отраженных СШП сигналов, записанных при изменении углов сканирования по окружности от 0 до 360° с шагом по углу 4,5° в отсутствии стены (рисунок 3.10а) и в случае наличия стены (рисунок 3.10б). Разным уровням сигнала

соответствуют разные градации серого цвета. Горизонтальная развертка соответствует времени, а вертикальная – углу регистрации отраженного сигнала. Объект располагался на расстоянии 25 см. от зондирующей системы при зондировании без стены и на расстоянии 21 см. при зондировании через стену.



Рисунок 3.10 – Экспериментальные осциллограммы отраженных СШП сигналов без стены и со стеной.

Здесь определенными номерами отмечены характерные особенности полученных осциллограмм. Максимальная амплитуда в отраженном сигнале связана с прямым попаданием зондирующего импульса из передающей в приемную антенну (1). Эта часть осциллограммы не меняется от угла поворота. Под номерами 2 и 3 отмечена реакция СШП импульса на переднюю и заднюю стенку тестового объекта, соответственно. В случае наличия стены возникает еще сигнал отраженной от её передней (4) и задней стенки (5). Сравнение осциллограмм показывает заметное уменьшение амплитуды отраженного сигнала от тестового объекта при наличии стены. Кроме того, в осциллограмме на рисунке 3.10б появились помехи – полосы, вызванные отражением СШП импульса от передней и задней границей стены.

Уровень сигнала от объекта при зондировании через стену оказался на уровне шумов регистрирующего устройства. Приведенные выше факторы привели к тому, что восстановленное радиоизображение объекта оказалось низкого качества (рисунок 3.11). Это, в свою очередь, потребовало дополнительной обработки принятых сигналов.



Рисунок 3.11 – Экспериментальная томограмма тестового объекта при зондировании через преграду

Так был разработан подход устранения помех, основанный на фильтрации постоянных составляющих сигнала на каждом временном отрезке принятого сигнала с учетом информации о сигналах, полученных при других углах сканирования.

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

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

Применение данного подхода к экспериментальным данным, приведенным на рисунке 3.10б, позволило значительно понизить уровень помех по отношению к сигналу, отраженному от тестового объекта. Сравнение осциллограмм при зондировании без преграды (рисунок 3.10а) и с преградой после фильтрации

(рисунок 3.10а) показывает эффективность предложенного алгоритма фильтрации, но при этом заметно, что локационный отклик от объекта является более размазанным (рисунок 3.10а). Это приводит к ослаблению контрастности восстанавливаемого радиоизображения. Для устранения этого явления был использован алгоритм винеровской фильтрации с регуляризацией. Данная операция позволяет повысить контрастность и одновременно снизить уровень шумов в восстанавливаемом радиоизображении. Для проведения операции винеровской фильтрации необходимо знание опорного сигнала. В качестве опорного можно использовать сигналы, отраженные от металлической пластины или уголкового отражателя.



Рисунок 3.12 - Снятие опорного сигнала с помощью уголкового отражателя



Рисунок 3.13 – Опорный сигнал

Цифровая фильтрация выполняется фильтром с передаточной функцией:

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

где $X(\omega)$ – спектр опорного сигнала, α – параметр регуляризации, символ * обозначает комплексное сопряжение. Далее спектры принятых сигналов перемножаются с передаточной функцией виннеровского фильтра. В итоге сигналы на границах объекта становятся более резкими (рисунок 3.14б). На рисунке 3.14в результат обработки данных после операции фильтрации постоянной составляющей и виннеровской фильтрации.









B)

Рисунок 3.14 – Результаты дополнительной обработки осциллограммы

На основе полученных осциллограмм были построены экспериментальные томограммы тестового объекта при зондировании без преграды (рисунок 3.14) и через преграду (рисунок 3.15). При зондировании через преграду зарегистрированные сигналы обрабатывались с использованием описанных выше алгоритмов фильтрации. Белый цвет на томограммах соответствует максимальному значению, черный – минимальному, а серый цвет – нулевому уровню сигнала.





Рисунок 3.14 – Экспериментальные томограммы тестового объекта для случая зондирования без преграды с применением фильтрации постоянных составляющих

На рисунке 3.14а представлены распределения, соответствующие 16 различным слоям, взятым с шагом 0,5 см. Размеры каждого слоя составляли 40×40 см. Слою № 1 соответствует дальность 22,5 см., слою № 6 соответствует дальность 25 см. Передняя плоскость тестового объекта располагалась на дальности 25 см., что соответствует слою № 6. Как видно из восстановленных томограмм повторение формы объекта происходит на слое 12, но уже другим цветом, что соответствует отражению от задней стенки объекта. Расстояние между слоем 6 и 12 составляет 3,5 см, что приблизительно соответствует толщине зондируемого объекта, умноженной на его показатель преломления. На рисунке 3.14б представлено пиксельное изображение слоя №6. Таким образом, положение и размер тестового объекта определяются вполне достоверно.

При зондировании через преграду расстоянии до тестового объекта составляло 21 см., что и соответствует слою №6 (рисунок 3.15а), слою №1(рисунок 3.15а) соответствует дальность 18.5 см. На рисунке 3.15б представлено пиксельное изображение слоя №6.



a)



Рисунок 3.15 – Экспериментальная томограмма тестового объекта для случая зондирования через преграду с применением фильтрации постоянных составляющих и виннеровской фильтрации

Анализ полученных томограмм показывает, что разрешение восстановленного радиоизображения резко уменьшается при зондировании через большеразмерные диэлектрические преграды. Так при зондировании без преграды разрешение системы приближенно можно оценить в 3 – 5 см, при зондировании через преграду разрешение ухудшается до 5 – 10 см. Данный эффект можно объяснить слабым

уровнем используемого в эксперименте зондирующего СШП импульса, что привело к существенному влиянию шумов и помех на восстанавливаемое изображение.

Также к экспериментальным данным была применена фокусировка в частотной области, называемая в литературе метод Столта[89]:

$$F(r,f) = \sum_{r_0} S(\vec{r_0}, f) \frac{\exp\left(i\frac{4\pi f}{c}\left|\vec{r} - \vec{r_0}\right|\right)}{\left|\vec{r} - \vec{r_0}\right|^2}$$

при которой сигналы, принятые в различных точках приемопередающей системы r_0 , раскладываются в спектр и суммируются на одной частоте.

На рисунке 3.16 приведены радиоизображения тестового объкта при зондировании без преграды (а) и через преграду (б).



Рисунок 3.16 – Экспериментальная томограмма тестового объекта при использовании фокусировки в частотной области

Таким образом, частотная фокусировка позволяет улучшить качество изображения, повысить разрешающую способность и уменьшить количество ложных целей. При этом, переход от разряженной апертуры (рисунок 3.3в) к заполненной (рисунок 3.3а) позволит улучшить качество восстанавливаемого изображения.

Приведенные выше результаты обработки эксперимента показывают реальную работоспособность предложенного подхода. По восстановленному послойному радиоизображению (радиотомограмме) можно решать задачу обнаружения и распознавания объектов за диэлектрическими преградами.

3.3 Обнаружение движения при круговом сканировании

В ряде случаев задача зондирования за преградами сводится к обнаружению подвижных объектов. Такие задачи возникают при отыскании людей под завалами или получении информации о местоположении и количестве террористов в соседнем помещении за стеной. В этом случае сигналы, отраженные от неподвижных объектов будут являться помехой и их нужно отфильтровать. В данной работе предлагается дифференциально – разностный подход к обработке данных, в котором фильтрация сигналов от неподвижных объектов проводится на основе разностных данных о регистрации сигналов в соседние периоды времени.

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

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

Для проверки работоспособности данного подхода был проведен натурный эксперимент, в котором тестовый объект перемещался за стеной (рисунок 3.17).

Под номером 3 показано начальное положение объекта. Под номером 4 и 5 его последующие положения.



Рисунок 3.17 - Схема проведения эксперимента с движущимся тестовым объектом

Рассчитанные в результате эксперимента томограммы представлены на рисунке 3.18. Для получения томограммы, представленной на рисунке 58а использовались осциллограммы, полученные в моменты времени, когда объект находился в положениях 3 и 4 (рисунок 3.17). Аналогично для томограммы, представленной на рисунке 3.18б использовались осциллограммы, полученные в моменты времени, когда объект находился в положениях 4 и 5 (рисунок 3.17). При каждом новом положении объекта, он удалялся от передающей системы на 1 см. и одновременно сдвигался в право от нее также на 1 см. Представленные томограммы соответствуют 16 различным слоям, взятых с шагом 0,5 см. Размеры каждого слоя составляли 40×40 см. Как видно из восстановленных томограмм, полученных в два

65

соседних момента времени, передняя и задняя стенки объекта сместились на 2 слоя, что соответствует перемещению объекта в продольном направлении на 1 см. Смещение в поперечном направлении также присутствует, но его трудно заметить в связи с малым масштабом изображения. Таким образом, положение движущегося тестового объекта определяется вполне достоверно, а сигналы, отраженные от неподвижных объектов успешно фильтруются.





Рисунок 3.18 – Томограммы движущегося объекта

3.4 Регистрация колебаний, характерных для дыхания человека

В случаях, когда человек неподвижен, судить о его наличии за преградой можно по движению грудной клетки либо брюшной полости. Рассмотрим рисунок 74. Сигнал, отраженный от грудной клетки на выдохе S_2 , отличается от сигнала, отраженного на вдохе S_1 , временной задержкой $T = \frac{2\Delta x}{c}$, где Δx – перемещение грудной клетки при вдохе/выдохе.



Рисунок 3.19 – Регистрация колебаний, характерных для дыхания человека

Для выделения колебаний, характерных для дыхания человека, необходимо преобразовать полученные, при СШП зондировании, данные. Рассмотрим спектры отраженных сигналов. Спектры, принятых в соседние периоды времени, сигналов будут отличаться друг от друга лишь множителем $exp(i\omega T)$:

$$SS_2(\omega) = SS_1(\omega) \exp(i\omega T)$$

Умножим спектры принятых сигналов $SS_i(\omega)$ на комплексно сопряженный спектр $\overline{SS_i(\omega)}$, получим:

$$SS_{i}(\omega)\overline{SS_{1}(\omega)} = |SS_{i}||SS_{1}|\exp(i[\varphi_{i}-\varphi_{1}]) = |SS_{i}||SS_{1}|\exp(i\omega T).$$

Выделим фазу из полученного выражения, тогда

$$T_i = \frac{\arg(SS_i(\omega)SS_1(\omega))}{\omega}, \quad \omega = 2\pi f,$$

где *f* – значимая частота из спектра, принятого сигнала (рисунок 3.20), по уровню 0.2.

Зная *T* найдем смещение грудной клетки Δx :

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



Рисунок 3.20 – Значимые частоты в спектре, принятого сигнала

С целью, подтверждения работоспособности разработанной методики, был поставлен эксперимент по определению дыхания человека. Стена, выполненная из газобетонных блоков, толщиной 10 см., находилась на расстоянии 20 см. от приемопередающей системы. За стеной неподвижно сидел испытуемый и дышал, сначала нормально, затем часто.

Измерения проводились в течение 60 с., регистрация принятых СШП импульсов производилась 2 раза в секунду. Таким образом, за одно измерение реализовывалось 120 осциллограмм. На рисунке 3.21 показаны примеры 120 осциллограмм отраженных СШП сигналов, обработанных с использованием метода фильтрации постоянных составляющих. Разным уровням сигнала соответствуют разные градации серого цвета. Горизонтальная развертка соответствует временной форме сигнала, а вертикальная – моменту регистрации отраженного сигнала.



a)



б)

Рисунок 3.21 – Осциллограммы СШП сигналов от человека с нормальным и учащенным дыханием

В результате обработки экспериментальных осциллограмм были выделены колебания грудной клетки человека (рисунок 3.22):





Рисунок 3.22 – Колебания грудной клетки при нормальном и учащенном дыхании



Перейдя в частотную область получим следующие результаты:

Рисунок 3.23 – Спектрограммы нормального и учащенного дыхания человека

Как видно из представленных графиков в первом случае человек, находившейся за преградой, дышал с частотой 0.12 Гц, что соответствует 6 – 7

вдохам/выдохам в минуту. Во втором случае частота дыхания увеличилась до 0.2 Гц, что соответствует примерно 12 вдохам/выдохам.

Таким образом, работоспособность, предложенных методов поиска колебаний, характерных для дыхания человека, были экспериментально подтверждены. Т.е. можно определять не только местоположение человека за преградой, но и его эмоциональное состояние по частоте дыхания.

3.5 Выводы

Проведена численная и экспериментальная проверка работоспособности разработанных методов восстановления радиоизображения при круговом сканировании с различными вариантами заполнения апертуры.

Предложен метод обнаружения движущихся объектов при помощи дифференциально-разностного подхода к обработке данных, в котором фильтрация сигналов от неподвижных объектов проводится на основе разностных данных о регистрации сигналов в соседние периоды времени.

Разработан метод для регистрации колебаний, характерных для дыхания человека. Все методы получили экспериментальное подтверждение работоспособности.

Глава 4 Двумерная тактированная СШП антенная решетка

4.1 Оптимизация расположения приемопередающих элементов в эквидистантной антенной решетке

Требования, предъявляемые к макету СШП локатора, ставят вопрос об оптимизации заполнения апертуры антеннами. Важными характеристиками приемопередающей системы являются уровень боковых лепестков (УБЛ) и разрешение.

В ходе численного моделирования в среде MathCad была рассчитана разрешающая способность для различных вариантов линейного заполнения апертуры, где каждой синей точке соответствует положение приемника, а красной – положение передатчика. Зеленые точки показывают, какой передатчик испускает сигнал и какие приёмники этот сигнал принимают.

Схема проведения модельного эксперимента решётки, представлена на рисунке 4.1а. В виде исследуемого образца выступали 4 точечных рассеивателя рисунок 4.16. Расстояние между точками составляло 2,5 см., расположенных на одной линии на расстоянии z=100 см от решетки.



a)

б)

Рисунок 4.1 – Схема модельного эксперимента решётки

Режим тактирования достигался комбинацией всевозможных пар приемной и передающей антенны.

Для оптимизации решётки были учтены две задачи: во-первых – должны были смоделированы различные положения приёмных и передающих антенн; и во-вторых – должен быть определён алгоритм тактирования, который бы являлся самым оптимальным, так как критерием оптимальности являлось качество радиоизображения.
В ходе численного моделирования для оптимизированной решетки проводился расчет томограммы тестового объекта. В качестве зондирующего сигнала выбирался СШП импульс длительностью 0,2 нс. Сбор данных проводился с использованием режима тактирования. Расчет томограммы проводился с использованием метода дифракционного суммирования.

Рассмотрим первый вариант заполнения апертуры, когда передающие и приёмные антенны совмещены (рисунок 4.2), тем самым образуя комбинированную систему. При этом каждый элемент принимает только «свой» сигнал.



Рисунок 4.2 – Вариант заполнения апертуры

Для данного заполнения была получено радиоизображение точечных рассеивателей, изображённая на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Томограмма тестового объекта

Были сделаны 2 среза, чтобы произвести оценку разрешения и определить уровень боковых лепестков (УБЛ), в поперечном и продольном направлениях. При этом расстояние между точками 2,5см. УБЛ в поперечном сечении составляет порядка 0,05 (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Оценка разрешения и УБЛ в поперечном направлении

УБЛ в продольном сечении порядка 0,06 (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – УБЛ в продольном напарвлении

Для удобства оценки качества системы можно ввести коэффициент *K*, равный произведению разрешения на УБЛ. Соответственно, чем меньше этот коэффициент, тем лучше система. Таким образом для данной системы K=0,012.

Рассмотрим следующий вариант заполнения апертуры, когда передающие антенны находятся на одинаковом расстоянии друг от друга (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Вариант заполнения апертуры Получена томограмма для данной системы (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Томограмма тестового объекта УБЛ в поперечном сечении составил 0,06 (рисунок 4.8).



УБЛ в продольном направлении не превышает 0,06 (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – УБЛ в продольном направлении

Полученный для данной системы коэффициент составил К=0,044.

Следующий вариант заполнения апертуры представлен на рисунке 4.10. Здесь изображена система с оптимизированным расположением передающих и приемных элементов. Также подобран оптимальный режим тактирования: на 1-ый передатчик откликаются 1,2,3,4 приёмники; на 2-ой – 5,6; на 3-ий – 7,8, на 4-ый – 9,10; на 5-ый – 11;12 и на 6-ой – 13,14,15,16.



Рисунок 4.10 – Вариант заполнения апертуры

Получена томограмма тестового объекта (рисунок 4.11)



Рисунок 4.11 – Томограмма тестового объекта

На рисунках 4.12 и 4.13 представлены горизонтальное и вертикальное сечения томограммы вдоль штриховых линий, изображённых на рисунке 4.11. Так же произведена оценка разрешения и измерен УБЛ.

Уровень боковых лепестков(УБЛ) в поперечном сечении равен 0,05 (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Оценка разрешения и УБЛ в поперечном направлении УБЛ в продольном сечении равен 0,08 (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – УБЛ в продольном направлении

Для данной системы К=0,082

Дальнейшие комбинации по расположению антенн привели к ухудшению системы. Таким образом, оптимальным оказались варианты заполнения, изображённые на рисунках 4.2 и 4.10. В обоих случаях, полученные коэффициенты оказались приближённо равными, точно также как и качество изображения. Т.к.

создание комбинированных систем физически трудно осуществимо, то для дальнейшего использования была выбрана система представленная на рисунке 4.10.

4.2 Оценка пространственного разрешения при линейном сканировании

Для экспериментального подтверждения потери пространственного разрешения с увеличением расстояния до объекта при использовании линейной антенной решетки, было проведено зондирование тестовых объектов, при этом в качестве ее эквивалента, использовалось механическое сканирование (рисунок 4.14). Приемопередающая система перемещалась по направляющим при помощи шагового двигателя, управляемого с компьютера.



Рисунок 4.14 – Лабораторный макет СШП сканера

В качестве излучающей и приемной антенн использовались разработанные на кафедре радиофизики СШП антенны, изображенные на рисунке. Металлический экран, расположенный между антеннами использовался для уменьшения прямого импульса, прошедшего непосредственно из передатчика в приемник.



Рисунок 4.15 – Приемопередающая система

В качестве генерирующего устройства в эксперименте использован генератор биполярных импульсов ТМГ200020P01, выдающий биполярные импульсы с формой импульсов близкой к периоду синусоиды и амплитудой ±15 B ±0,1 Umax и длительностью 200 пс по уровню 0,1 от амплитудного значения. Частота повторения импульсов 100 кГц. Для регистрации измерения и регистрации сверхширокополосных импульсов использовался двухканальный стробоскопический цифровой осциллограф TMR8140 (рисунок 3.8).

Для оценки пространственного разрешения была проведена серия экспериментов (рисунок 4.16–4.17) по зондированию двух металлических цилиндров СШП излучением. На дальностях 90, 135 и 180 см. проводилась регистрация СШП импульсов, отраженных от цилиндров при расстояниях между ними 3, 6 и 9 см. На рисунке приведена схема эксперимента.



Рисунок 4.16 – Схема эксперимента: 1 и 2 – металлически цилиндры, 3 – лабораторный макет СШП сканера



Рисунок 4.17 – Схема эксперимента: 1 и 2 – металлически цилиндры, 3 – лабораторный макет СШП сканера

На рисунке 4.18а представлено распределение интенсивности радиоизображения на дальности L=90 см, соответсвующей положению цилиндров приемопередающей системы. Расстояние относительно между цилиндрами составляло D=3 см. На рисунке 4.186 приведено радиоизображение зондируемых объектов. При этом появляется вторичный сигнал (рисунок 4.186, 3), связанный с переотражением между металлическими цилиндрами. В результате эффекта переотражения на томограмме появляется ложный объект (цель). Его интенсивность сравнима с интенсивностью реальных объектов



Рисунок 4.18 – К оценке пространственного разрешения при L = 90 см. и D = 3 см

На рисунке 4.19 представленно поперечное сечение томограммы и двумерное радиоизображение цилиндров при L=90 см. и D=6 см. Как видно, при увеличении расстояния между цилиндрами, интенсивность ложной цели уменьшается.



Рисунок 4.19 – К оценке пространственного разрешения при L = 90 см. и D = 6 см

На рисунке 4.20 представленно поперечное сечение томограммы и двумерное радиоизображение цилиндров при L=90 см. и D=12 см. Интенсивность ложной цели много меньше интенсивности реальных объектов.



Рисунок 4.21 – К оценке пространственного разрешения при L = 90 см. и D = 12 см

На рисунке 4.22 представленно поперечное сечение томограммы и двумерное радиоизображение цилиндров при L = 135 см. и D = 3 см. Интенсивность ложной цели сравнима с интенсивностью реальных объектов.



Рисунок 4.22 – К оценке пространственного разрешения при L = 135 см. и D = 3 см

На рисунке 4.23 представленно поперечное сечение томограммы и двумерное радиоизображение цилиндров при L=135 см. и D=6 см. Интенсивность ложной цели уменьшилась.



Рисунок 4.23 – К оценке пространственного разрешения при L = 135 см. и D = 6 см

На рисунке 4.24 представленно поперечное сечение томограммы и двумерное радиоизображение цилиндров при L=135 см и D=12 см. Интенсивность ложной цели значительно уменьшилась.



Рисунок 4.24 – К оценке пространственного разрешения при L=135 см. и D=12 см На рисунке 4.25 представленно поперечное сечение томограммы и двумерное радиоизображение цилиндров при L=180 см. и D=3 см. Интенсивность ложной цели сравнима с интенсивностью реальных объектов. Объекты не разделяются.



Рисунок 4.25 – К оценке пространственного разрешения при L = 180 см. и D = 3 см

На рисунке 4.26 представленно поперечное сечение томограммы и двумерное радиоизображение цилиндров при L=180 см. и D=6 см. Интенсивность ложной цели уменьшилась, но объекты не разделяются.



Рисунок 4.26 – К оценке пространственного разрешения при L = 180 см. и D = 6 см

На рисунке 4.27 представленно поперечное сечение томограммы и двумерное радиоизображение цилиндров при L=180 см. и D=12 см. Интенсивность ложной цели уменьшилась, объекты хорошо разделяются.



Рисунок 4.27 – К оценке пространственного разрешения при L = 180 см. и D = 12 см

Таким образом, можно отметить, что на расстоянии до 135 см от приемопередающей системы разрешающая способность радиоизображения не превышает 3 см. Для расстояния 180 см она составляет около 10 см.

4.3 Эксперимент по обнаружению движения при линейном сканировании

Для проверки дифференциально – разностного подхода при использовании линейной решетки был проведен натурный эксперимент (рисунок 4.28). Зондирование проводилось с использованием синтезирования апертуры (1). За диэлектрической преградой (2) перемещался цилиндр вдоль направления, указанного стрелкой(7).



Рисунок 4.28 – Схема проведения натурного эксперимента с движущимся тестовым объектом

При положении 4, объект удалился от первоначального на 6 см и одновременно сдвинулся вправо на 7.5 см. При перемещении в положения 5 и 6, смещение составило 5 см.

Рассчитанные результаты эксперимента представлены на рисунке 4.29. Размер каждой клетки данной томограммы равен 5см.



Рисунок 4.29 – Визуализация движения объекта

Таким образом, положение движущегося тестового объекта определяется достоверно, а сигналы, отраженные от неподвижных объектов успешно фильтруются.

4.4 Блок коммутации каналов

Существует три способа сканирования антенных решёток: механический, электромеханический и электрический способ. Механический способ реализуется путём поворота всей антенной системы и обладает наибольшей инерционностью. При электромеханическом способе с помощью электродвигателей осуществляется перемещение одного или нескольких антенн . Но наибольшую скорость обзора можно получить с помощью электрического способа сканирования, при этом способе амплитудно-фазовое распределение возбуждения в неподвижном раскрыве антенны регулируется с помощью электронно-управляемых устройств.

В данной работе была предложена и использована технология тактирования антенной решётки, для проведения серии радиотомографических измерений с использованием сверхширокополосного импульса.

Для осуществления режима тактирования был смоделирован и разработан блок коммутации каналов, отвечающий за переключение электромеханических коммутаторов.

Блок коммутации каналов представляет собой устройство, построенное на базе микроконтроллера Atmega 16 (рисунок 4.30).



Рисунок 4.30 – Внешний вид блока коммутации

Аtmega 16 один из недорогих и доступных микроконтроллеров, выполненный в корпусе PDIP40. Рабочая частота микроконтроллера составляет 8 МГц от внутреннего тактового генератора и также может работать на частоте 16МГц при использовании внешнего кварца. Рабочее напряжение 4,5-5,5В; имеет 4 порта ввода/ вывода, в каждом из которых содержится по 8 пинов.

На передней стороне блока (рисунок 4.31) располагаются основные органы управления, которое включает в себя разъём под питание (1), кнопку

включения/выключения блока (2) и USB-порт (3), по которому осуществляется передача сигнала с компьютера.



Рисунок 4.31 – Блок коммутации

На фронтальной стороне блока (рисунок 4.32) находятся три разъёма DB9 – через которые происходит управление коммутаторами.



Рисунок 4.32 – Фронтальная часть блока коммутации каналов

В интегрированной среде разработки AVR для микроконтроллера была разработана и создана программа на языке C++.

Для проверки правильности и корректности работы написанной программы, была использована среда моделирования Proteus Studio 5.



Рисунок 4.33 – Численное моделирование в Proteus Studio 5.

На виртуальный СОМ порт компьютера, был подключён микроконтроллер для приёма внешних антенн, с помощью пинов RX(приём сигнала), TX(передача). При подаче команды 010101 через HyperTerminal на первых пинах портов A,B, и C выставлялась логическая единица, При подаче команды 010302 выставлялась логическая единица, на первом, третьем и втором пине портов A, B и C соответственно.

Была смоделирована схема блока коммутации в среде Slayer 5 (рисунок 4.34).



Рисунок 4.34 – Схема блока коммутации

Особенность используемых реле заключается в их источнике питания, для которого требуется напряжение 28В и ток порядка 110мА. Микроконтроллер не сможет обеспечить данные параметры. Решением этих проблем является использование транзисторного ключа.

Транзисторный ключ служит для коммутации цепей нагрузки под воздействием внешних управляющих сигналов. Электронный ключ служит для переключения непрерывно изменяющихся электрических сигналов. Если ключ находится в состоянии "включено", его выходное напряжение должно ПО возможности точно равняться входному; если же ключ находится в состоянии "выключено", выходное напряжение должно быть как можно ближе к нулю или, во всяком случае, должно как можно меньше зависеть от входного. В качестве ключей в нашем устройстве используются полевые транзисторы.

Цифровые ключи на полевых транзисторах потребляют меньший ток управления, обеспечивают гальваническую развязку входных и выходных цепей, и имеют ряд других преимуществ по сравнении с биполярными транзисторами. Для любого ключа на полевом транзисторе Rн > 10-100 кОм. Управляющий сигнал Uвх на затворе порядка 10-15 В. Сопротивление полевого транзистора в закрытом состоянии велико. Для развязки по питанию части схемы с высоким напряжением и микроконтроллера используются оптопары(оптроны).

Оптрон представляет собой электронный прибор, состоящий из излучателя света(светодиод) и фотоприёмника, связанных оптическим каналом и как правило объединённых в общем корпусе. Принцип работы оптрона заключается в преобразовании электрического сигнала в свет, его передаче по оптическому каналу и последующем преобразовании обратно в электрический сигнал.

Ток подаваемый с какого-либо вывода микроконтроллера первым делом протекает через резисторную оптопару. Функционально оптопара представляет собой электрическое сопротивление, управляемое током, протекающим через излучатель. Когда через светодиод протекает ток, он светится, свет попадает на фотоприемник и через него тоже начинает течь электрический ток. Таким образом через оптопару можно передавать сигналы без электрического контакта между различными цепями. Передаваемое напряжение через оптопару поступает на затвор-исток. Если управляющее напряжение Uпр установить меньшим чем минимально-возможное входное напряжение, меньше порогового напряжения транзистора, то тот в свою очередь закроется и выходное напряжение станет равным нулю, но небольшая проводимость всё таки присутствует, так как для того чтобы полностью гарантировать отсутствие проводимости, напряжение должно быть намного меньше, чем пороговая величина. Для того чтобы транзистор был открыт, напряжение затвор-

89

исток Uзи следует поддерживать равным нулю, что обеспечивает минимальное сопротивление канала. Если же это напряжение станет больше нуля, то управляющий переход откроется, и выход ключа окажется соединённым с цепью управления. Таким образом сигнал проходящий через транзистор поступает на реле, которое осуществляет непосредственное переключение между антеннами.

На основании моделирования и проделанной работы по оптимизации заполнения апертуры, можно представить схему устройства (рисунок 3.33):



Рисунок 4.35 – Схема устройства

4.4 Тактированная линейная антенная решетка

Для реализации операции переключения каналов, согласно выбранной схеме(рисунок 4.10), было разработано программное обеспечение «Управление каналами», на языке C++[92]. Интерфейс программы представлен на рисунке 4.36.

Настройки порта	Передача данных		
Номер порта	Takt1	Takt2	Takt3
COM1	1	тх	
Скорость передачи		1	
9600	Z		
Открыть порт	Takt4	Takt5	Takt6
		1	1
	TX		
Сброс ТХ			2
Сброс ВХ	1		

Рисунок 4.36 – Интерфейс программы

Для работы программы необходимо задать настройки СОМ-порта: номер порта и скорость передачи данных и нажать кнопку «Открыть порт». Для удобства отладки и реализации программного обеспечения, управление каналами разбито на такты, согласно схеме коммутации каналов. Перебирая различные комбинации разделов «Takt» можно производить проверку и настройку передающего и приемного оборудования. Предусмотрены клавиши отключения приемных и передающих коммутаторов.

Использование СШП излучения в системах радиовидения ставит жесткие требования к устройствам, используемых в этих системах[1-13] по такому важному параметру как быстродействие. Быстродействие системы достигается благодаря трем СШП переключателям, перекрывающим частотный диапазон до 18 ГГц. Развязка между каналами составляет 60 дБ, максимальное время переключения 15 мс. На рисунке 4.37 представлена вся система в сборе.



Рисунок 4.37 – СШП томограф

В качестве приемника используется сверхширокополосный стробоскопический осциллограф АКИП-4112, представленный на рисунке 4.38.



Рисунок 4.38 – Стробоскопический приемник

Принцип действия осциллографа состоит в стробоскопическом преобразовании исследуемого сигнала в его НЧ – аналог с последующим преобразованием его в цифровые двоичные коды, записываемые в ОЗУ. Записанные коды в ОЗУ, могут быть переданы во внешнюю ЭВМ, обработаны её и выведены на любое периферийное устройство[90,93].

Для работы с устройством в комплекте поставки было представлено программное обеспечение, позволяющие принимать и обрабатывать данные с двух каналов.



Рисунок 4.39 – Интерфейс стандартного ПО для АКИП-4112

Но использование стандартного ПО не позволяло решать требуемые задачи. Поэтому посредством использования системы COM-server[90,93], позволяющей отправлять требуемые команды осциллографу и считывать приемные данные через стандартное ПО, было разработано собственное приложение в среде Matlab[93]. Его особенностью является то, что обработка данных начинается уже в процессе их снятия. На рисунке 4.40 представлена блок-схема. Таким образом, вкупе с экспериментально подобранными настройками осциллографа, такими как «усреднение», «длина памяти», «режим усреднения», было достигнуто быстродействие системы порядка 1.2 с. На рисунке 4.39 представлено стандартное ПО с достигнутыми настройками.



Рисунок 4.40 – Интерфейс стандартного ПО для АКИП-4112

Для проверки работоспособности всей системы в целом, проводился эксперимент по зондированию двух металлических цилиндров СШП излучением. На дальности L=75 см. проводилась регистрация СШП импульсов, отраженных от цилиндров при расстоянии между ними 12 см. На рисунке 12 приведена схема эксперимента, где 1 и 2 – металлически цилиндры, 3 – лабораторный макет СШП сканера.



Рисунок 4.41 – Схема эксперимента.

На рисунке 4.42 представлена томограмма экспериментальной сцены.



Рисунок 4.42 – Результат эксперимента.

По оси абсцисс отложена апертура антенной решетки, по оси ординат расстояние до цели. Размерность каждой клетки10x10 см. Благодаря использованию быстрых алгоритмов фокусировки при которых обработка происходит параллельно операции приема СШП сигналов, общее время построения томограммы тестовой сцены происходит за 1.2 с. и дальнейшее увеличение производительности устройства ограничивается лишь скоростью СШП осциллографа.

На нем отчетливо различимы две цели, с расстоянием между собой согласно сетке 12 см.

В лабораторных условиях была сконструирована стена из газобетонных блоков, толщиной 10 см (рисунок 4.43). Расстояние от установки до преграды составляло 25 см., от стены до тестовых объектов-20 см., между объектами 35 см. При этом стоит отметить, что система располагалась относительно стены не параллельно, что дополнительно усложняло задачу.



Рисунок 4.43- Схема эксперимента.

На рисунке 4.44 представлена томограмма экспериментальной сцены. По оси абсцисс отложена апертура антенной решетки, по оси ординат - расстояние до цели.



Рисунок 4.44 – Результат эксперимента.

Размерность каждой клетки 10х10 см. Как видно отражение от стены 1 настолько сильное, что тестовые объекты не различимы относительно фона. Используя разработанный алгоритм устранения влияния преграды, была получена следующая томограмма (рисунок 4.45):



Рисунок 4.45 – Результат эксперимента.

На нем отчетливо различимы цели 1 и 2. С расстоянием между ними около 35 см. При этом появляется ложная цель - остаточное влияние преграды 3. На рисунке 11а представлена следующая сцена эксперимента, где цели «изменили» свое положение. Расстояние между объектами составляло 12 см. На рисунке 4.466 приведена томограмма тестовых объектов.



Рисунок 4.46 – Эксперимент с обнаружением тестовых объектов

Как видно на представленной томограмме положение тестовых объектов достоверно, а влияние преграды устраняется полностью.

Разработанные ранее алгоритмы по фильтрации статичных объектов, были интегрированы в программное обеспечение, сопряженное с установкой системы радиовидения [5,6]. Для проверки работоспособности проводился эксперимент по зондированию металлического цилиндра СШП излучением, при этом тестовый объект перемещался по диагонали.

На рисунке 4.47 приведена схема эксперимента, где 1 – лабораторный макет СШП сканера; 2 – стена из газобетонных блоков; 3,4,5,6 – положения тестового объекта; 7 – направление движения.



Рисунок 4.47 – Схема проведения натурного эксперимента с движущимся тестовым объектом

На рисунке 4.48 представлены томограммы экспериментальной сцены покадрово. По оси абсцисс отложена апертура антенной решетки, по оси ординат - расстояние до цели. Размерность каждой клетки10x10 см. Благодаря использованию быстрых алгоритмов фокусировки при которых обработка происходит параллельно операции приема СШП сигналов, общее время построения томограммы тестовой сцены происходит за 1.2 с.



Рисунок 4.48 – Результат эксперимента.

г)

B)

Как видно из каждого кадра, перемещение цели отчетливо наблюдается. При этом стоит отметить, что объект перемещался с малой скоростью. Несмотря на то, что опрос антенной решетки происходит за 1.2 с, этого времени недостаточно чтобы «зафиксировать» объект в одном положении, как следствие томограмма размывается и появляется шлейф за объектом. Выходом из ситуации видится отказ от использования СШП импульсов для этих целей и переход на ЛЧМ излучение. При этом все алгоритмы, разработанные в рамках данного НИР, останутся без изменения, ввиду своей универсальности.

Следующим этапом экспериментальной проверки является способность устройства обнаруживать колебания, , характерные для человеческого дыхания, за диэлектрическими преградами.

Для этого был поставлен эксперимент, в котором испытуемый находился за стеной из газобетонных блоков. Расстояние от установки до преграды составляло 25 см., от стены до испытуемого 30 см.



Рисунок 4.49 – Схема эксперимента.

Как было показано ранее- для обнаружения слабых колебаний достаточно использовать не всю антенную решетку, а лишь два крайних приемника при одном центральном работающем передатчике. Благодаря этому мы можем в реальном времени наблюдать, в частности, дыхание человека одновременно с двух ракурсов, используя оба канала осциллографа.

На рисунке 4.50 представлен набор экспериментальных осциллограмм с двух ракурсов.



Рисунок 4.50 – Результат эксперимента.

По оси абсцисс отложено время, по оси ординат – момент регистрации сигнала. Различным градациям серого цвета соответствует различный уровень сигнала: белый – максимум, черный – минимум, серый – ноль. Как видно колебания отчетливо наблюдаются, а постоянные составляющие от статичных объектов (в данном случае от стены), успешно устраняются.

Далее, разработанные ПО, было подвергнуто динамическому анализ. Для большей эффективности динамического анализа требуется подача тестируемой программе достаточного количества входных данных. На рисунке 4.51 приведена схема эксперимента, где 1 – лабораторный макет СШП сканера[3,5,6,7]; 2,3,4 – тестовые объекты, ввиде цилиндров. Расстояние до цели 1 м. между центрами труб 9 см. диаметр тубы 3.5 см.



Рисунок 4.51 – Схема проведения натурного эксперимента с движущимся тестовым объектом

На рисунке 4.52 представлена томограмма экспериментальной сцены. По оси абсцисс отложена апертура антенной решетки, по оси ординат - расстояние до цели. Размерность каждой клетки10×5 см.



Рисунок 4.52 – Томограмма экспериментальной сцены

Как видно из представленного рисунка - качество восстановления изображения неудовлетворительное. Для улучшения изображения был разработан математический подход, основанная идея которого заключается в вычитании усредненных данных по времени[1-10]. На рисунке 4.53 приведен результат восстановления изображения с использованием этого подхода.



Рисунок 4.53 – Томограмма экспериментальной сцены

Как видно визуальное качество изображения существенно улучшилось, цели стали различимыми.

4.5 Моделирование фокусирующего рефлектора

Для устранения недостатков первого макета линейной тактированной антенной решетки, а именно: большая масса, около 15 кг, что исключает его ручное использование для произвольного сканирования; относительно высокий уровень мешающих шумов, приводящий к необходимости накопления множества реализаций для получения качественного изображения; был разработан другой вариант макета.

Основным элементом является введение в конструкцию двух цилиндрических зеркал – рефлекторов. Назначение их позволяет: 1) увеличить уровень излученных и принимаемых сигналов без увеличения мощности генераторов; 2) обеспечить аппаратную фокусировку в вертикальной плоскости, что даст повышение быстродействия устройства и получение первичного изображения без полного сканирования в вертикальном направлении с хорошим разрешением (до 5 см); 3) уменьшить весовые параметры.

За основу была взята идея, что два эллипса, отклонённые на определённый угол (рисунке 4.54), у которых антенны расположены в фокусе, способны фокусировать излучение во второй, совмещенной точке фокусировки.

104



Рисунок 4.54 – Идея создания фокусирующего экрана Моделирование фокусирующего экрана осуществлялось для двух предполагаемых образцов №1 и №2, изображённых на рисунке 4.55а, и рисунке 4.55б соответственно.



Рисунок 4.55 – Предполагаемые образцы

В результате численного моделирования для образца №1 (рисунок 4.56а) рассчитывалась интенсивность поля, создаваемого такой фокусирующей системой на разных расстояниях от экрана (рисунок 4.56 б).



Рисунок 4.56 – Образец №1

На рисунке 4.56а чёрным утолщением обозначена область отражения эллипсов.

Для образца №2 (рисунок 4.57а) в ходе численного моделирования рассчитывалась интенсивность поля, создаваемого такой фокусирующей системой на разных расстояниях от экрана (рисунок 4.57б).



Рисунок 4.57 – Образец №2

Направления больших полуосей эллипсоидов повернуты друг относительно друга на 16°. Жирной серой полосой на рисунке обозначена используемая отражающая поверхность эллипсов. Черными точками обозначены фокусы эллипсов,

в которых располагаются приемная и передающая антенны. Светлой точкой на рисунке обозначен общий фокус, в котором поле должно фокусироваться обеими рефлекторами. Расчеты показывают, что область фокусировки должна быть локализована в пределах 5 см в поперечном направлении и иметь протяженность порядка не менее 30 см в продольном направлении (рисунок 4.57). Это как раз необходимо для устранения перечисленных недостатков макета № 1.

Таким образом, на основании сравнения результатов эксперимента можно прийти к выводу, что интенсивность поля образца №2 выше, чем у образца №1.

4.6 Оптимизация фокусирующего рефлектора

Для экспериментального сравнения исследуемых образцов рефлектора, было изготовлено два макета эллипсоидной формы №1 (рисунок 4.58) и №2 (рисунок 4.58б). Точки фокуса совпадали с фазовыми центрами антенн.





б) Рисунок 4.58 – Экспериментальные образцы

Схема проведения эксперимента, представлена на рисунке 4.59. В качестве исследуемого объекта, был выбран цилиндр, располагавшийся на основании из радиопрозрачного материала. Данный объект находился на расстоянии 60 см от фокусирующего экрана.



Рисунок 4.59 – Схема эксперимента с фокусирующим экраном

В результате эксперимента с образцом № 1 была получена осциллограмма сигнала, изображённая на рисунке 4.60.



Рисунок 4.60 – Осциллограмма сигнала для образца №1
Как видно из осциллограммы сигнала, то для образца №1 амплитуда отраженного сигнала составила около 30 мВ.

Для выявления оценки и уровня сигнала был проделан аналогичный эксперимент с образцом № 2 (рисунок 4.61).



Рисунок 4.61 – Осциллограмма сигнала для образца №2

Амплитуда сигнала, полученная для образца №2, превысила значение сигнала образца №1 в 1.4 раза, и тем самым составила 42мВ.

Так же было проведено сравнение уровня боковых лепестков для двух образцов, изображённые на рисунке 4.61. Пунктирной с точкой линией обозначен сигнал образца №1, а сплошной линией - №2.



Рисунок 4.61 – Сравнение УБЛ для 2-х объектов

Как видно, что у образца №2 уровень лепестков немного меньше чем у образца №1. Стоит так же взять во внимание, что пролаз сигнала образца №2 больше чем у образца №1.

Для улучшения характеристик образца №2 были проделаны 2 дополнительных исследования. В основе первого лежало увеличение длины эллипсов, лежащих в основе отражающего рефлектора.



Рисунок 4.62 – Образец №2 с дополнительной апертурой

В результате, была получена осциллограмма сигнала, отраженная от тестового объекта, изображённая на рисунке 4.63.



Рисунок 4.63 – Осциллограмма сигнала с дополнительной апертурой

Амплитуда отраженного сигнала составила 44 мВ.

Суть второго исследования заключалась в увеличении ширины отражающей части образца (рисунок 4.64).



Рисунок 4.64 – Образец №2 с увеличенной апертурой и расширенным отражающим слоем

Для такого опыта получили осциллограмму, отраженного от тестового объекта сигнала, изображённую на рисунке 4.65, и амплитуда сигнала составила 50 мВ.



Рисунок 4.65 – Осциллограмма отраженного сигнала

Проведённые два дополнительных исследования, не выявили существенных изменений отраженного сигнала, на основании этого, форма образца №2 осталась без изменений.



Рисунок 4.66 – Схема численного эксперимента

В ходе численного моделирования в среде MathCad была рассчитана разрешающая способность для различных вариантов линейного заполнения апертуры, где каждой синей точке соответствует положение приемника, а красной – положение передатчика. Зеленые точки показывают, какой передатчик испускает сигнал и какие приёмники этот сигнал принимают, таким образом осуществлялся режим тактирования.

В ходе численного моделирования для оптимизированной решетки проводился расчет томограммы тестового объекта. В качестве зондирующего сигнала выбирался СШП импульс длительностью 0,2 нс. Сбор данных проводился с использованием режима тактирования. Расчет томограммы проводился с использованием метода дифракционного суммирования.

Рассмотрим первый вариант заполнения апертуры, когда передающие и приёмные антенны совмещены (рисунок 4.67), тем самым образуя комбинированную систему. При этом каждый элемент принимает только «свой» сигнал.

112



Рисунок 4.67 – Вариант заполнения апертуры

Для данного заполнения была получено двумерное радиоизображение точечных рассеивателей, изображённое на рисунке 4.68.



Рисунок 4.68 – Томограмма тестового объекта

Были сделаны 2 среза, чтобы произвести оценку разрешения и определить уровень боковых лепестков (УБЛ), в поперечном и продольном направлениях.

УБЛ в поперечном сечении составляет порядка 0,05 (рисунок 4.69).



Рисунок 4.69 – Оценка разрешения и УБЛ в поперечном направлении

УБЛ в продольном сечении порядка 0,06 (рисунок 4.70).



Рисунок 4.70 – УБЛ в продольном напарвлении

Для удобства оценки качества системы воспользуемся коэффициентом *К*. Таким образом для данной системы K=0,012.

Рассмотрим следующий вариант заполнения апертуры, когда передающие антенны находятся на одинаковом расстоянии друг от друга (рисунок 4.71). Красным цветом обозначены передающие антенны, а синим – приёмные.



Рисунок 4.71 – Вариант заполнения апертуры

Получена томограмма тестового объекта (рисунок 4.72)



Рисунок 4.72 – Томограмма тестового объекта

На рисунках 4.73 и 4.74 представлены горизонтальное и вертикальное сечения томограммы вдоль штриховых линий, изображённых на рисунке 18. Так же произведена оценка разрешения и измерен УБЛ.

Уровень боковых лепестков(УБЛ) в поперечном сечении равен 0,1 (рисунок 4.73).



Рисунок 4.73 – Оценка разрешения и УБЛ в поперечном направлении УБЛ в продольном сечении равен 0,08(рисунок 4.74).



Рисунок 4.74 – УБЛ в продольном направлении

Для данной системы К=0,032

Следующий вариант заполнения апертуры представлен на рисунке 4.75. Здесь изображена система с оптимизированным неэквидистантным расположением приемопередающих элементов. Также подобран оптимальны режим тактирования: на 1-ый передатчик откликаются 1,2,3 приёмники; на 2-ой – 3,4; на 3-ий – 4,5,6; на 4-ый – 7,8; на 5-ый – 9,10,11; и на 6-ой – 11,12.



Рисунок 4.75 – Вариант заполнения апертуры Получена томограмма для данной системы (рисунок 4.76).



Рисунок 4.76 – Томограмма тестового объекта

УБЛ в поперечном сечении составил 0,06 (рисунок 4.77).



Рисунок 4.77 – УБЛ в поперечном направлении УБЛ в продольном направлении не превышает 0,06 (рисунок 4.78).



Рисунок 4.78 – УБЛ в продольном направлении

Полученный для данной системы коэффициент составил К=0,0144.

Дальнейшие комбинации по расположению антенн привели к ухудшению системы. Таким образом, оптимальным оказался последний вариант заполнения.

Для данной работы была использована готовая СШП антенна [8], разработанная на кафедре радиофизики Балзовским Е.В. и Буяновым Ю.И.

Данная антенна изображена на рисунке 4.78.



Рисунок 4.79 – СШП решётка[86]

Размеры одной антенны 55×46×1мм, все антенны закреплены на металлическом уголке с сечением 50×50×1мм, и длина уголка составляет 80см.

На рисунке 4.80 представлен коэффициент стоячей волны (КСВН) [86] для одной антенны.



КСВН данной антенны как видно из рисунка составляет 2 в полосе частот от 1,75 до 10,5 ГГц.

На рисунке 4.81 представлена диаграмма направленности [86] для одной антенны на разных частотах.



Рисунок 4.81 – Диаграмма направленности антенны на разных частотах [86] Для нашей системы в качестве линий передач мы использовали коаксиальные кабели марки RG-58, которые служат для передачи высокочастотных сигналов.

Так же было измерено затухание для каждого из кабелей в полосе частот от 3 до 12ГГц. (рисунок 4.82).



Рисунок 4.82 – Коэффициент передачи сигнала

Как видно из графика затухание в полосе частот от 3 до 12 ГГц составляет порядка -1дБ.

С целью минимизировать использованное пространство для прокладки соединительных линий в кабельном лотке, было предложено использовать все линии различной длины. Тогда, при осуществлении операции фокусировки, при корректировке запаздывания импульсов, необходимо учесть задержки, вносимые каждой линией передачи.



Рисунок 4.83 – Экспериментальная схема установки

4.7 Выводы

Разработана система радиовидения на базе линейной эквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и шестнадцати приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Разработан блок коммутации каналов для управления СШП переключателями. Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения. Макет позволяет получать двумерный срез по дальности исследуемого пространства и обнаруживать скрытые за препятствиям объекты, в том числе и неподвижных людей.

Разработана система радиовидения на базе линейной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и двенадцати приемных антенн. Система дополнена фокусирующим рефлектором.

Данные модели радиотомографов способны найти применение в системах безопасности при обнаружении людей за преградами (завалами) и на контроле качества дорожного полотна.

Глава 5 Планарная тактированная СШП антенная решетка

5.1 Оптимизация расположения приемопередающих элементов в планарной тактированной антенной решетке, с длительностью зондирующего импульса 200 пс.

Для решения задачи получения трехмерного радиоизображения заданной области пространства необходимо обеспечить набор многоракурсных проекций. Это возможно достигнуть либо путем выполнения двумерного сканирования приемопередающим модулем, либо путем проведения многопозиционных измерений с использованием двумерной антенной решетки. Для второго варианта необходимо обеспечить коммутацию элементов решетки. Данная система была взята за основу при создании двумерной решетки.

Для проверки работоспособности алгоритмов восстановления изображения, рассмотрим задачу о рассеянии СШП импульса длительностью 200 пс., форма которого показана на рисунке 3.1 а. Зондируется тонкий тестовый объект в виде ступенчатого треугольника рисунок 3.1 б. Этот объект располагается на расстоянии 33 см от плоскости апертуры решетки. Центр объекта (т.О) и центр плоскости апертуры находились на одной оси. Каждая ступенька тестового объекта имеет размер по 5 см.

На рисунке 5.1 представлена модель численного эксперимента. Излучение фокусировалось в каждую плоскость, взятую с шагом 1 см, т.е. послойно. Где R – 33 см, D – 5 см d- 15 см.



Рисунок 5.1 – модель численного эксперимента.

В ходе численного моделирования в среде MathCad была рассчитана разрешающая способность для различных вариантов линейного заполнения апертуры, где каждой синей точке соответствует положение приемника, а красной – положение передатчика. Размер апертуры составлял 44×55см, расстояние до тестового объекта 33 см.

Рассмотрим вариант заполнения апертуры шестью передатчиками и двенадцатью приемниками, как показано на рисунке 5.2а. При этом осуществляется следующий режим работы: один из передатчиков излучает - все приемники принимают отраженный сигнал. Таким образом реализуется набор из 72 проекций исследуемой сцены. На рисунке 5.2б изображена эквивалентная антенная решетка, состоящая из 72 приемопередатчиков.



Рисунок 5.2 – Вариант заполнения апертуры

Рассмотрим результат восстановления структуры объекта в случае различных вариантов заполнения апертуры (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Томограммы тестового объекта.

Размеры каждой томограммы равны 40×40 см. Расстояние между слоями 1 см. Первому слою соответствует дальность 31 см., таким образом объект находился на расстоянии 33 см от апертуры.

Введем коэффициент, который определяет сравнительные качества системы. Данный коэффициент вводился в программной среде MathCad следующим образом. В каждом слое рассчитывалась погрешность восстановления формы, как сумма квадратов разности истинного и восстановленного изображения. Далее высчитывался коэффициент, равный средней погрешности от всех слоев. Чем меньше коэффициент, тем лучше восстановление. Таким образом, для данной системы K = 0.171.

Рассмотрим следующую систему, изображенную на рисунке 5.4. В этой схеме изменено расположение приемников. При этом их количество осталось неизменным.



Рисунок 5.4 – Вариант заполнения апертуры

Радиоизображение тестового объекта представлено на рисунке 5.5:



Рисунок 5.5 – Радиоизображение слоев томограммы

Для данной системы К = 0.141.

Рассмотрим следующую систему заполнения антенной решетки, изображенную на рисунке 5.6а. В этой схеме увеличено число приемников до шестнадцати. Таким образом число ракурсов исследуемой сцены увеличилось до 96, т.е. теперь подобная антенная решетка эквивалентна системе из 96 комбинированных приемопередатчиков(рисунок 5.6б).



Рисунок 5.6 – Вариант заполнения апертуры

Радиоизображение тестового объекта представлено на рисунке 5.7:



Рисунок 5.7 – Радиоизображение слоев томограммы

Для данной системы K = 0.112. Таким образом в этой системе самая высокая заполненность и самый низкий коэффициент. Эта система была выбрана для дальнейшей разработки.

Таким образом, численное моделирование подтвердило работоспосбность предложенного подхода по восстановлению формы объектов с использованием тактированных антенных решеток, что позволяет перейти к натурному эксперименту.

5.2 Схема радиотомографа с зондирующим импульсом на 200 пс.

Согласно выбранной схеме заполнения апертуры, была разработа плоская неэквидистантная антенная решетка для трехмерной радиотомографии, представленная на рисунке 20. Размеры решетки составили 55х44 см. Количество антенных элементов – 22. В качестве приемо-передающего элемента решетки использовалась малогабаритная СШП антенна (рисунок 5.7), разработанная на кафедре радиофизики ТГУ.



a)

б)



Отличительными особенностями используемой СШП антенны, являются её малые размеры и широкая полоса пропускания. Коэффициент стоячей волны (КСВН) такой антенны в составе решетки не превышает 2 в полосе от 2 до 12 ГГц (рисунок 5.8). При этом антенна сохраняет свои направленные свойства в широкой полосе частот (рисунок 5.9).



Рисунок 5.8 – КСВН антенны в составе решетки



Рисунок 5.9 – Диаграмма направленности антенны на частотах: а) 4 ГГц б) 5 ГГЦ в) 6 ГГЦ г) 7 ГГц

Диаграмма направленности (ДН) каждого излучателя в горизонтальной плоскости симметрична и составляет порядка 90°по уровню 0.7. в вертикальной плоскости ДН элемента решетки имеет наклон, ввиду асимметричной формы антенны. На представленном выше рисунке 23 приведены ДН в вертикальной плоскости на разных частотах вблизи максимума спектра СШП импульса. Таким образом, элементы решетки хорошо согласованы и имеют стабильную ДН в обеих плоскостях в требуемом диапазоне частот.

Для коммутации каналов антенной решетки был разработан специальный блок управления (рисунок 4.30) [3,10], построенный на основе двух 8-ми канальных и одного 6-ти канального механических СШП коммутаторов фирмы «DowKey», перекрывающих частотный диапазон от 0 до 18 ГГц. Развязка между каналами составила 60 дБ, максимальное время переключения 15 мс. Для регистрации сверхширокополосных импульсов использовался измерения И регистрации двухканальный стробоскопический цифровой осциллограф Picoscope-9100, работающий в диапазоне от 0 до 12 ГГц. Сбор данных, управление коммутацией каналов и томосинтез радиоизображения осуществлялись на стандартном ноутбуке с использованием специально разработанной программы в среде MatLab. Общая схема управления решеткой представлена на рисунке 5.10.

125



Рисунок 510 – Диаграмма направленности антенны на частотах:

Для удобства использования и транспортировки антенная решетка и ее блоки были размещены в пластиковом кейсе (рисунок 5.11). На корпус чемодана выведены разъемы для питания от сети 220В и разъем USB для связи с ноутбуком. Таким образом, все измерения можно проводить сразу, не открывая пластиковый бокс. Управление коммутацией, расчет 3D томограммы и ее визуализация по слоям осуществляется с помощью стандартного ноутбука



Рисунок 5.11 – Тактированная антенная решетка в кейсе

5.3 Натурный эксперимент по восстановлению формы объектов

Оценка важных параметров разработанной антенной решетки, таких как быстродействие и разрешение проводились экспериментально. Было установлено, что время опроса решетки и последующего восстановления трехмерного радиоизображения составляет 5 с. Аналогичная зарубежная решетка требует для этих операций 20 минут [87].

Для определения разрешающей способности решетки эксперимента проводился эксперимент с монетами разного диаметра и тестовым объектом в виде металлического зубчатого треугольника. Схема эксперимента представлена на рисунке 5.12 и 5.13



Рисунок 5.12 – Схема эксперимента





Рисунок 5.13 – Схема эксперимента

На рисунке 5.14 представлены радиоизображения слоев томограммы для монет достоинством 5 рублей диаметром 2,5 см, расположенных на расстоянии 33 см от антенной решетки. Каждый слой соответствует определенной дальности, отсчитываемой от плоскости антенной решетки. Линейные размеры слоя 50x50 см, расстояние между слоями 2 см. Положение центрального слоя соответствует дальности R = 33 см. Расстояния между центрами монет составляли 5 см, 6,5 см и 8 см.





Рисунок 5.14 – Эксперимент с пятирублевыми монетами

На рисунке 5.15 представлены аналогичные радиоизображения слоев томограммы для монет достоинством 10 копеек диаметром 1,7 см.





Рисунок 5.15 – Эксперимент с десятикопеечными монетами

На рисунке 5.16 представлены радиоизображения слоев томограммы для металлического зубчатого треугольника, расположенного на расстоянии R = 50 см от антенной решетки. Линейный размер треугольника составил D = 30 см, размер ступеньки составил d = 10 см.





Рисунок 5.16 – Эксперимент с зубчатым треугольником

На рисунке 5.17 представлена схема эксперимента, с обнаружением сцены из монет за преградой. Эти монеты, помещенные в контейнер, располагались за стеной их газобетонных блоков общей толщиной 20 см. Результаты испытаний приведены на рисунках 5.18-5.19.



Рисунок 5.17 – Сцена испытаний макета № 4



Рисунок 5.18 – Радиоизображение сцены из монет без стены



Рисунок 5.19 – Радиоизображение сцены из монет за газобетонной стеной

Положение центрального слоя соответствует дальности 40,5 см. Расстояния между центрами монет составляли 5 и 8 см в горизонтальном и 6,5 см в вертикальном направлениях. Всего на экран компьютера выводилось содержимое 15 слоев, соответствующих разным дальностям (рисунок 5.20).



Рисунок 5.20 – Радиоизображение сцены из монет за газобетонной стеной

Анализ радиоизображений, представленных на рисунках 5.14-5.20, показывает, что разработанная решетка обеспечивает разрешающую способность в поперечном направлении не хуже 5 см, а в продольном направлении не хуже 2 см. Дальность, при которой еще обеспечивается фокусировка составляет не менее 50 см.

Основным недостатком осталась неравномерность разрешения по изображению. Эта неравномерность связана с неквидистантностью расположения антенных элементов и неравномерность заполнения плоскости зондирования. В связи с этим далее предлагается следующий вариант макета радиовидения строительных конструкций.

. Ниже в таблице приведены основные характеристики разработанного устройства.

Характеристики устройства

Диапазон используемых частот	212 ГГц
Разрешающая способность в продольном	2 см
направлении	
Разрешающая способность в поперечном	4 см
направлении.	
Время получения радиоизображения	8 c
Максимальная дальность до объекта	60 см
Габаритные размеры	50x60x23
	СМ
Масса устройства	12 кг



Рисунок 5.21 – Переносной радиолокационный томограф

5.4 Оптимизация расположения приемопередающих элементов в планарной тактированной антенной решетке, с длительностью зондирующего импульса 100 пс.

На основе разработанной антенной решетки и полученных экспериментальных данных, а также разработанных алгоритмов была создана модернизированная СШП антенная решетка. Отличия данной решетки от предыдущей состоят в следующем. Для получения большего качества радиоизображения повышено количество приемопередающих элементов и был осуществлен переход от длительности импульса 0.2 нс к длительности импульса 0.1 нс. Также осуществлена развязка между приемопередающими элементами для использования усилителей.

Для проверки работоспособности алгоритмов восстановления изображения, рассмотрим задачу о рассеянии СШП импульса, форма которого показана на рисунке 5.22 а. Зондируется тонкий тестовый объект в виде ступенчатого треугольника рисунок 5.22 б. Этот объект располагается на расстоянии 33 см от плоскости апертуры решетки. Центр объекта (т.О) и центр плоскости апертуры находились на одной оси. Каждая ступенька тестового объекта имеет размер по 5 см.



Рисунок 5.22 – Зондирующий сигнал тестовый объект

На рисунке 4.24 представлена модель численного эксперимента. Излучение фокусировалось в каждую плоскость, взятую с шагом 1 см, т.е. послойно. Где R=33 см, D=5 см, d=15 см.



Рисунок 5.23 – Модель численного эксперимента

В ходе численного моделирования в среде MathCad была рассчитана разрешающая способность для различных вариантов линейного заполнения апертуры,

где каждой синей точке соответствует положение приемника, а красной – положение передатчика. Размер апертуры составлял 44x55см, расстояние до тестового объекта 0.33 м.

Рассмотрим вариант заполнения апертуры комбинированными приемопередатчиками, как показано на рисунке 5.24. При этом все приемники принимают сигнал одновременно. На рисунке 5.25 изображена эквивалентная система данной решетки. Где каждая точка является приемо-передатчиком.



Рисунок 5.24 – Вариант заполненья апертуры Рисунок 5.25 – Эквивалентная истема



Рисунок 5.26 – Радиоизображение слоев томограммы

Для всех четырех случаев размеры области фокусировки были выбраны 40х40 см, т.е. размеры каждого слоя томограммы равны 40х40 см. Объект находился на расстоянии 33 см от апертуры.

Расположение антенн оптимизировалось по критерию максимального качества радиоизображения. Кроме того, должно было выполняться условие сохранения одинакового расстояния между приемной и передающей антенной при каждом такте переключения. Это условие требовалось для привлечения быстрых алгоритмов обработки сигналов.

Введем коэффициент, который определяет сравнительные качества системы.. Данный коэффициент вводился в программной среде MathCad следующим образом. В

каждом слое рассчитывалась погрешность восстановления формы, как сумма квадратов разности истинного и восстановленного изображения. Далее высчитывался коэффициент, равный средней погрешности от всех слоев. Чем меньше коэффициент, тем лучше восстановление. Таким образом, для данной системы К = 0.712.

Рассмотрим следующую систему, изображенную на рисунке 5.27. В этой схеме переставлены местами приемники и передатчики.





Рисунок 5.27 – Вариант заполненья апертуры Рисунок 5.28 – Эквивалентная система

Радиоизображение данной системы представлено на рисунке 5.29:



Рисунок 5.29 – Радиоизображение слоев томограммы

Для данной системы К = 0.305. Таким образом, в этой системе самая высокая заполненность и самый низкий коэффициент. А также расстояние между приемопередатчиками одинаковое. Эта система была выбрана для дальнейшей разработки.

5.5 Схема радиотомографа с зондирующим импульсом на 100 пс.

На основе выбранной модели была разработа планарная тактируемая антенная решетка для 3D радиотомографии, представленная на рисунке 5.30. Размеры решетки составили 55х44 см. Количество антенных элементов – 37, из которых 24 приемных и 13 передающих антенн. В качестве приемо-передающего элемента решетки использовалась малогабаритная СШП антенна (рисунок 5.31).



Рисунок 5.30 – Антенная решетка



Рисунок 5.31 – СШП антенна

Для уменьшения пролаза меду антеннами, с целью использования усилителей, была осуществлена развязка между антеннами. Развязка была осуществлена при помощи помещения каждой антенны в поглотитель (рисунок 5.32).





Рисунок 5.32 - Расположение антенн в поглотителе

Для проверки работы антенн в поглотителях был проведен эксперимент с металлической пластиной показанный на рисунке 5.33.



Рисунок 5.33 – Схема эксперимента

Расстояние между центрами антенн было выбрано R=4.8 см , на таком расстоянии находятся они в решетке. Регистрировался отраженный от металлической пластины сигнал в случае, когда антенны были размещены без поглотителя (рисунок 5.34 – красная линия) и в поглотителе (рисунок 5.34 – синяя линия).



Рисунок 5.34 - Сигнал от металлической пластины без поглотителя и в поглотителе Как видно из рисунка 5.34 пролаз между антеннами уменьшается в 10 раз, что позволяет использовать усилители. А сигнал, отраженный от цели, уменьшается незначительно.

Коэффициент стоячей волны (КСВН) такой антенны в составе решетки не превышает 2 в полосе от 2 до 12 ГГц как показано на рисуноке 5.35, где красная линия соответствует антенне с поглотителем, зеленая линия соответствует антенне без поглотителя.



Рисунок 5.35 – КСВН антенны в составе решетки

Сбор данных, управление коммутацией каналов и томосинтез радиоизображения осуществлялись на стандартном ноутбуке с использованием специально разработанной программы в среде MatLab. Общая схема управления решеткой представлена на рисунке 5.36.



Рисунок 5.36 – Схема управления решеткой

5.6 Выводы

Разработана система радиовидения на базе планарной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и шестнадцати приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Длительность зондирующего импульса 200 пс.

Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения.

Разработана система радиовидения на базе линейной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из тринадцати передающих и двадцати четырех приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Длительность зондирующего импульса 100 пс. Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения.

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной диссертационной работы получены следующие результаты:

Показана важность учета влияния преграды при осуществлении фокусировки излучения за диэлектрический слой. Учет влияния преграды позволяет устранить искажения, а также повышает разрешение радиоизображения.

Показано. что лля точного определения неизвестных параметров диэлектрической преграды (толщины и показателя преломления), достаточно информации, полученной только в двух точках – в точке, когда приемник совмещен с передатчиком и когда разнесен. В ходе имитационного моделирования в среде MathCad решалась прямая задача по зондированию диэлектрической преграды. Для проверки правильности использования рассмотренной теории, в CST Studio также было смоделировано зондирование диэлектрической преграды. В качестве источника сферических волн, использовалась численная модель антенны типа «Улитка». Полученная погрешность в 1% позволяет судить о достаточной корректности предложенного подхода.

Проведена численная и экспериментальная проверка работоспособности предложенных методов по восстановлению радиоизображения при круговом сканировании с различными вариантами заполнения апертуры.

Разработан метод обнаружения движущихся объектов при помощи дифференциально-разностного подхода обработки данных, в котором фильтрация сигналов от неподвижных объектов проводится на основе разностных данных о регистрации сигналов в соседние периоды времени.

Разработан метод для регистрации колебаний, характерных для дыхания человека. Все методы получили экспериментальное подтверждение работоспособности.

Разработана система радиовидения на базе линейной эквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и шестнадцати приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Разработан блок коммутации каналов для управления СШП переключателями. Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения. Макет позволяет получать двумерный срез по дальности исследуемого пространства и обнаруживать скрытые за препятствиям объекты, в том числе и неподвижных людей.

Разработана система радиовидения на базе линейной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и двенадцати приемных антенн. Система дополнена фокусирующим рефлектором.

141

Разработана система радиовидения на базе планарной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из шести передающих и шестнадцати приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Длительность зондирующего импульса 200 пс. Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения.

Разработана система радиовидения на базе линейной неэквидистантной тактированной антенной решетки, состоящей из тринадцати передающих и двадцати четырех приемных антенн. Выбрано оптимальное расположение приемопередающих элементов и режимов тактирования. Длительность зондирующего импульса 100 пс. Разработано и апробировано программное обеспечение для созданной системы радиовидения.

Все разработанные модели радиотомографов способны найти применение на производстве, для неразрушающего контроля качества готовой продукции, а также в системах безопасности в аэропортах и других общественных местах для обнаружения запрещенных предметов под одеждой, в ручной клади и почтовых отправлениях.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

2 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосная томография движущихся объектов за диэлектрическими преградами // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 8/2. – С. 87-91.

3 Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Клоков А.В., Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Коммутируемая сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии // Изв. вузов. Физика. – 2012. – № 8. – С. 26-30.

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

5 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Цепляев И.С. Планарная неэквидистантная тактированная сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 8/2. – С. 87-91.

6 Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Цепляев И.С., Степанов Е.О. Использование тактированных СШП решеток для 3D томографии // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014).Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конференции. – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 1079-1081.

7 Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Еремеев А.И. Пассивная сверхширокополосная отражательная решетка для радиотомографии // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014).Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конференции. – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 637-639.

8 Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Якубов В.П. Дистанционное СШП обнаружение нелинейных радиоэлектронных элементов // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ - техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014).Севастополь, 7-13 сентября 2014 г.: материалы конференции. – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 1189-1191.

9 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Использование СШП излучения для поиска живых людей скрытых за препятствиями// Информационно – измерительная техника и технологии: материалы II Всероссийской научно-практической конференции / Под ред. А.В.Юрченко – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 108-110.

143

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

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

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

13 Сатаров Р.Н., Цепляев И.С., Степанов Е.О. СШП томограф для радиовидения // Актуальные проблемы радиофизики: материалы II Международной молодежной научной школы/ под ред. В.И.Сусляева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2013. – 110 с.

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

15 Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы: монография / под ред. В.П.Якубова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – 264с.

16 Шипилов С. Э. Проблемы восстановления формы объектов при сверхширокополосном зондировании // Труды Всерос. научн. конф. "Физика радиоволн". 2002. С. VI 16–19.

17 Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. – М.: Радио и связь, 1989. – 192 с.

18 Якубов В. П. Доплеровская сверхбольшебазовая интерферометрия. – Томск: Издво Том. ун-та, 1997. – 246 с.

19 Якубов В. П., Машаруев М. Л., Славгородский С. А., Лосев Д. В., Шипилов С. Э. Микроволновая томография неоднородных сред // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10, № 12. С. 1500–1507.

20 Якубов В.П., Склярчик К.Г., Пинчук Р.В., Суханов Д.Я., Булавинов А.Н., Бевецкий А.Д. Радиоволновая томография скрытых объектов для систем
безопасности // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008, № 10. – С. 63 – 79.

21 Исследование технологии радара с синтезированной апертурой: Учебно – методическое пособие / Сост.: Д.Я.Суханов – Томск 2008. – 8 с.

22 Иммореев И.Я. Сверхширокополосная локация: основные особенности и отличия от традиционной радиолокации // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1997. – том 2, № 1. – с-с. 81-88

23 Иммореев И. Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности// - Радиотехника и электроника - 2009, том 54, № 1. - С. 5-31.

24 SUN Xin, LU BiYing, JIN Tian, ZHOU ZhiMin. Wall Clutter Mitigation in Throughthe-Wall MIMO Radar Application

25 Alamouti S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications // J. Sel. Areas Commun. 1998. Vol.16, No. 8. P. 1451-1458.

26 Tarokh V., Seshadri N., and Calderbank A. Space-time codes for high data rate wireless communication: perfor-mance criterion and code construction //IEEE Trans.Inf. Theory. 1998. Vol. 44, No. 2. P. 744-765.

27 Duofang Ch., Baixiao Ch., Shouhong Zh., Multiple-input multiple-output radar and sparse-array synthetic impulse and aperture radar // Proc. CIE Int. Conf. on Radar. 20-0-6. Shanghai, China

28 Rabideau D.J, Parker P.A. Ubiquitous MIMO Multifunction Digital Array Radar...and the Role of TimeEnergy Management in Radar. Project Report DAR-4. Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology, 2004.

29 Donnet B.J., Longstaff I.D. Radar, Techniques and Opportunities.// Proc. 3 rd EuRAD Radar Conf. 20-0-6, UK. P. 112-115 Frazer G.J., Abramovich Y.I., Johnson B.A., and Robey F.C. Recent Results in Over-the-Horizon Radar.// Proc. 20-0-8 IEEE Radar Conf. Rome, Italy. P. 789-794.

30 G. Charvat, L. Kempel, E. Rothwell, C. Coleman, E. Mokole. A Through-Dielectric Ultrawideband (UWB) Switched-Antenna-Array Radar Imaging System // IEEE Trans. on Antennas and Propogation, Vol. 60, No. 11, November 2012, pp. 5495-5500.

31 David M. Sheen, Douglas L. McMakin, Jeffrey Barber, Thomas E. Hall, Roland H. Severtsen. Active imaging at 350 CHz for security applications // Proc. of SPIE. – 2008. – V. 6948

32 Douglas L. McMakin, Thomas E. Hall, David M. Sheen. Holographic radar imaging privacy techniques utilizing dual-frequency implementation// Proc. of SPIE. – 2008. – V. 6943

33 Kyle J. Bunch, Douglas L. McMakin, David M. Sheen. Wideband fractal antennas for holographic imaging and rectenna application// Proc. of SPIE. – 2008. – V. 6948

34 Douglas L. McMakin, David M. Sheen, Jeffery W. Griggin, Nancy B. Valentine, Wayne M. Lechelt. Personnel and mail screening with millimeter waves// Proc. of SPIE. – 2005. – V. 5778.

35 David M. Sheen, Thomas E. Hall, Roland H. Severtsen, Douglas L. McMakin, Brian K. Hatchell. Active wideband 350 GHz imaging system for concealed-weapon detection// Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7309.

36 David M. Sheen, Douglas L. McMakin, H. Dale Collins, Thomas E. Hall. Weapon detection using a wideband millimeter-wave linear array imaging technique// Proc. of SPIE. – 1993 – V. 2092.

37 Douglas L. McMakin, David M. Sheen, Thomas E. Hall, Mike O. Kennedy, Harlan P.
Foote. Biometric identification using holographic radar imaging techniques// Proc. of SPIE.
- 2007. - V. 6538

38 David M. Sheen, Douglas L. McMakin, Thomas E. Hall. Speckle in active millimeterwave and terahertz imaging and spectroscopy// Proc. of SPIE. – 2007. – V. 6548

39 David M. Sheen, Douglas L. McMakin, Thomas E. Hall. Cylindrical millimeter-wave imaging technique and applications// Proc. of SPIE. – 2006. – V. 6211

40 Douglas L. McMakin, David M. Sheen, Jeffery W. Griffin, Wayne M. Lechelt. Extremely high-frequency holographic radar imaging of personnel and mail// Proc. of SPIE. – 2006. – V. 6201

41 David Sheen, Douglas McMakin, Thomas E. Hall. Combined illumination cylindrical millimeter-wave imaging technique for concealed weapon detection// Proc. of SPIE. – 2000. – V. 4032

42 Paul E. Keller, Douglas L. McMakin, David M. Sheen, A. David McKinnon, Jay W.
Summet. Privacy Algorithm for airport passenger screening portal// Proc. of SPIE. – 2000.
– V. 4055

43 Douglas L. McMakin, David M. Sheen, Thomas E. Hall, Roland H. Seversten. Cylindrical holographic radar camera// Proc. of SPIE. – 1998. – V. 3575

44 David Sheen, Douglas McMakin, Thomas E. Hall. Cylindrical millimeter-wave imaging technique for concealed weapon detection// Proc. of SPIE. – 1998. – V. 3240

45 D. M. Sheen, H. D. Collins, R. P. Gribble, D. L. McMakin. Comparison of active-wave and acoustic imaging for weapon detection// Proc. of SPIE. – 1997. – V. 2935.

46 D. L. McMakin, D. M. Sheen, A. Schur, W. M. Harris, G. F. Piepel. Initial test and evaluation of the millimeter-wave holographic surveillance system// Proc. of SPIE. – 1997. – V. 2932.

47 David M. Sheen, Douglas L. McMakin, H. Dale Collins. Circular scanned millimeterwave imaging system for weapon detection// Proc. of SPIE. – 1995. – V. 2511. 48 David M. Sheen, Douglas L. McMakin, H. Dale Collins, Thomas E. Hall, Roland H. Severtsen. Wideband, millimeter-wave, holographic weapons surveillavce systems// Proc. of SPIE. – 1995. – V. 2511.

49 Douglas L. McMakin, David M. Sheen, H. Dale Collins, Thom E. Hall, Russell R. Smith. Millimeter wave, high-reolution, holographic surveillance system// Proc. of SPIE. – 1994. – V. 2092.

50 Douglas L. McMakin, Paul E. Keller, David M. Sheen, Thomas E. Hall. Dual surface dielectric depth detector for holographic millimeter-wave security scanners// Proc. of SPIE. -2009. - V.7309.

51 David M. Sheen, Douglas L. McMakin, Thomas E. Hall. Speckle in active millimeterwave and terahertz imaging and spectroscopy// Proc. of SPIE. – 2007. – V. 6548

52 T. May, G. Zieger, S. Anders, V. Zakosarenko, H.-G. Meyer, M. Schubert, M. Starkloff. Safe VISITOR: VISible, infrared and terahertz object recognition for security screening application// Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7309

53 Erik Heinz, Detlef Born, Gabriel Zieger, Torsten Krause, Andre Kruger. Progress report on Safe VISITOR: approaching a practical instrument for terahertz security screening// Proc. of SPIE. – 2009. – V. 7309

54 Sahiner B., Yagle A.E. Iterative inversion of the Radon transform using image-adaptive wavelet constraints to improve image reconstruction // IEEE Engineering in medicine and biology. - 1996. - Vol. 8, N 7. - P. 395-397.

55 Sarkar T. K., Weiner D. D., Jain V. K. Diant S. A. Impulse response determination in the time domain – theory // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1982. V. 30, № 4. P. 657–663.

56 Stolt, R.H., Migration by Fourier transform // Geophysics, 1978, 43, no. 1, 23-48.

57 Swith W.E., Barrett H.H. Radon transform and band width compression // Opt. Letters. - 1983. - Vol. 8, N 7. - P.395-397.

58 Tesche F. M On the analysis of scattering and antenna problems using the singularity expansion technique // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1973. V. 21, № 1. P. 53–62.

59 Tseng F., Sarkar T. K. Experimental determination of resonant frequencies by transient scattering from conducting spheres and cylinders // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1984. V. 32, № 9. P. 914–918.

60 VanBlaricum M. L., Mittra R. A technique for extracting the poles and residues of a system directly from its transient response // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1975. V. 23, N_{2} 6. P. 777–781.

61 Акудинов В. Е., Романов Е. А. Методы теоретического определения сверхширокополосных радиолокационных характеристик целей. Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 1. С. 6–22.

62 Андерсон Д.Л., Дзевонский А.М. Сейсмическая томография // В мире науки. -1984. - №12. - С. 16-25.

63 Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., Мансуров В.В., Охонский А.Г., Сазонов Н.А., Титов М.П., Толстой Е.Ф., Шаповалов А.В. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. - М.: Радио и связь, 1988.- 304 С.

64 Астанин Л. Ю. Характеристики радиолокационных объектов при использовании сверхширокополосных сигналов // Радиотехника. 1984. № 11. С. 19–24.

65 Астанин Л. Ю., Костылев А. А. Методы теоретического и экспериментального исследования нестационарного рассеяния и излучения электромагнитных волн // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 9. С. 3–27.

66 Баум К. Э. Новые методы нестационарного (широкополосного) анализа и синтеза антенн и рассеивателей // ТИИЭР. Т. 64. № 11. 1976. С. 53–74.

67 Бункин Б. В., Кашин В. А. Особенности, проблемы и перспективы субнаносекундных видеоимпульсных РЛС // Радиотехника. 1995. № 4–5. С. 128–133.

68 Вайнберг Э.И., Казак И.А., Курозаев В.П. Реконструкция внутренней пространственной структуры объектов по интегральным проекциям в реальном масштабе времени // ДАН СССР. - 1981. Т. 257, № 1. - С.89-94.

69 Ванштейн Б.К. Трехмерная электронная микроскопия биологических микромолекул // Успехи физических наук. - 1973. - Т. 109, № 3. - С. 455-497.

70 Введение в современную томографию / Под ред. К.С. Тернового, М.В. Синькова. -Киев: Наук. думка, 1983. - 232 с.

71 Глебович Г. В., Андриянов А. В., Введенский Ю. В., Ковалев И. П., Крылов В. В., Рябинин Ю. А. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. Под ред. Глебовича Г. В. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

72 Формирование изображений в цифровых РЛС с синтезированной апертурой антенны: Учебно – методическое пособие/ Сост.: О.В.Горячкин, Е.О. Хабаров. – 2005 – 19 с.

73 Бюро Научно – Технической Информации «Техника для спецслужб» [Электронный ресурс] – . – Режим доступа: http://www.bnti.ru/

74 Информационно – аналитическое издание по техническим средствам и системам безопасности [Электронный pecypc]/ Security News – . – Режим доступа: http://www.secnews.ru/

75 Cambridge Consultants [Электронный ресурс] – . – Режим доступа: http://www.cambridgeconsultants.com/

76 «American microwave corporation» [Электронный ресурс] – . – Режим доступа: http://www.americanmicrowavecorp.com/

- 77 «НИЦ СШП МАИ» [Электронный ресурс] . Режим доступа http://uwbgroup.org/rus/
- 78 «Camero» [Электронный ресурс] . Режим доступа: <u>http://www.camero –</u> <u>tech.com/</u>

79 Конструкторское бюро опытных работ [Электронный ресурс] - . – Режим доступа: http://uwbs.ru/

- 80 ФГУП ННИПИ «Кварц» [Электронный ресурс] . Режим доступа: <u>http://kvarz.com/index.html</u>
- 81 Дорожный детектор лжи//Вестник атомпрома. 2013. –.№ 7 С. 24.– 29

82 Якубов В.П., Беличенко В.П. Фисанов В.В. Основы электродинамики излучения и его взаимодействия с веществом / Томск: изд. НТЛ. 2010. 237 с.

83 Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: Учебное пособие для вузов / Под. ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005.

84 Радиолокационная томография удаленных объектов за диэлектрическими преградами: отчет о НИР (промежут.) / ТГУ; рук. С.Э.Шипилов – Томск,2009. – 65 с.

85 Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 831 с.

86 Балзовский Е.В., Е.В. Буянов Ю.И. Сверхширокополосный антенный элемент для синтезированной апертуры // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012.

87 Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Изд – во Академии наук СССР, 1957. – 503с.

88 Konstantin M. Yemelyanov, Nader Engheta, Ahmad Hoorfaf. Adaptive polarization contrast techniques for through-wall microwave imaging applications // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. Vol. 47. No. 5, May 2009, pp. 1362-1374

89 Seismic Data Analysis. Oz Yilmaz, Volume I, 2001.

90 PicoScope 9000 Series. Pc Sampling Oscilloscopes user's guide// James House Colmworth Business Park St.Neots Cambridgeshire.UK// 490 p

91 Культин Н.Б. Самоучитель С++ Builder –Спб.: БХВ-Петербург, 2005-320 с.

92 G. Charvat, L. Kempel, E. Rothwell, C. Coleman, E. Mokole. A Through-Dielectric Ultrawideband (UWB) Switched-Antenna-Array Radar Imaging System // IEEE Trans. on Antennas and Propogation, Vol. 60, No. 11, November 2012, pp. 5495-5500.

93 Бадриев И.Б., Бандеров В.В., Задворнов О.А. Разработка графического пользовательского интерфейса в среде Matlab//Учебное пособие. – Казань: Казанский государственный университет, 2010. – 113с.