

На правах рукописи

Ющенко Валерий Павлович

НЕПРОЕКЦИОННАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ
МОНОХРОМАТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВА И
СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный консультант: **Легкий Владимир Николаевич**
доктор технических наук, с.н.с.

Официальные оппоненты: **Воскобойников Юрий Евгеньевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет», заведующий кафедрой

Меледин Владимир Генриевич
доктор технических наук, профессор, «Институт оптико-электронных информационных технологий», (Новосибирск), генеральный директор

Петров Виктор Петрович
доктор технических наук,
Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», профессор

Ведущая организация «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно – исследовательский институт метрологии (ФГУП «СНИИМ») (Новосибирск)

Защита состоится “ 6 ” марта 2014г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 20 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д.ф.-м. н.

Ильичев Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Поиск новых методов реконструкции изображения объектов, основанных на непроекционных способах сбора данных, расширяет возможности исследования объектов. Важное значение имеет способ сбора данных и связанные с ним методы извлечения информации, результатом обработки которой является реконструкция изображения объектов. Реконструированное изображение является наивысшим достижением информационно-измерительного процесса и даёт исчерпывающую информацию об объекте или о его внутренней структуре. Поэтому поиск новых методов реконструкции изображения – это всегда актуальная задача. В 1979 году Годфри Ньюболд Хаунсфилд и Аллан МакЛеод Кормак получили Нобелевскую премию за проекционные методы реконструкции изображения объектов. Как выяснилось позже, математические основы проекционной томографии были разработаны австрийским математиком Иоганном Радоном в 1917 году, а Годфри Ньюболд Хаунсфилд и Аллан Мак Леод Кормак переоткрыли изобретение И. Радона.

В настоящее время метод реконструкции изображения по проекциям, основанный на преобразовании И. Радона, широко используется в рентгеновской томографии. В Томском университете был разработан радиоволновой томограф с монохроматическим излучением в трёхсантиметровом диапазоне волн по методике, основанной на просвечивании объекта сформированным радиолучом с регистрацией проекций. При этом использовалась двойная фокусировка, чтобы получить тонкий проекционный луч, так как величина сечения луча определяет разрешающую способность проекционного метода реконструкции.

Существенный вклад в развитие радиоволновой проекционной томографии сделан в начале восьмидесятых годов американскими учёными Д. Менсой, Ш. Халеви и Г. Уэйдом в опубликованной работе «Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображения на СВЧ». Ими использовался монохроматический зондирующий сигнал. Новизна их метода в том, что вместо просвечивания объектов они работали с отражённой от объекта волной. Они показали, что регистрация проекций по кругу, опоясывающему цель, позволяет восстановить картину цели и её положение в пространстве. Предложенный ими метод относится как к проекционной томографии, так и к круговому апертурному синтезу антенны. К сожалению, проекционные методы реконструкции не применимы в задачах, в которых требуется восстановить пролётные параметры ракеты «Поверхность-Воздух» или «Воздух- Воздух» около цели (рисунки 1 и 2). Это связано с тем, что проекции регистрируются при круговом обходе объекта, а ракеты движутся по прямолинейной траектории. Поэтому есть потребность в разработке непроекционных методов реконструкции изображения объектов, основанных на движении локатора по любой траектории, в том числе по прямолинейной. Из пролётных параметров наибольший интерес представляет промах ракеты, так как он позволяет оценить качество системы наведения и работу системы ближней локации. Под промахом подразумевается кратчайшее расстояние от центра цели до ракеты. Будем считать, что в момент реализации промаха $t = 0$.

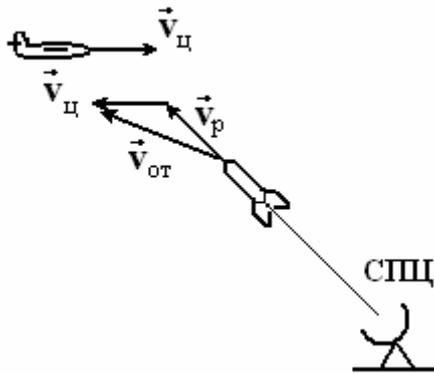


Рисунок 1 – Пояснение пролетной ситуации в системе координат, связанной со станцией подсвета цели (СПЦ)

Пролетная ситуация характеризуется следующими параметрами: a – промах, $\vec{v}_Ц$ – вектор скорости цели, $\vec{v}_Р$ – вектор скорости ракеты, $\vec{v}_{от}$ – вектор относительной скорости, α – угол атаки ракеты. В настоящее время промах определяют с помощью триангуляционного теодолита. Точность определения координат с его помощью описывается выражением $(\delta L)_0 \approx \omega L^2 / BN$, где N – число элементов оптической матрицы, B – база триангуляционной системы, ω – поле зрения. Из этой формулы следует, что погрешность измерения дальности δL возрастает с увеличением расстояния до цели прямо пропорционально квадрату ее удаленности L . Пусть погрешность измерения дальности при удаленности цели на 1 км составляла 20 м, тогда при удалении точки встречи ракеты с целью на 10 км от измерителя погрешность измерения дальности увеличится в 100 раз и составит значение 2000 м. При такой погрешности промах определить невозможно. Остаётся единственный путь извлечения информации о промахе – из траекторного доплеровского сигнала, переданного с борта ракеты по телеметрическому каналу.

Если по траекторному сигналу реконструировать изображение цели в плоскости, проходящей через траекторию и цель, в координатах расстояния от траектории по одной оси и расстояния вдоль траектории по другой оси, то будет возможность определить пролётную ситуацию и промах в том числе.

Поскольку монохроматический сигнал не испытывает дисперсионных искажений при распространении в неоднородных средах, есть предпосылки его использования в геолокации и томографии, где применение широкополосных зондирующих сигналов связано с критическим проявлением указанных искажений. Есть ряд причин, сдерживающих его применение. Основной из них является отсутствие радиального разрешения у монохроматического зондирующего сигнала. В связи с этим актуальной является научная проблема обеспечения радиального разрешения локационных систем с монохроматическим излучением. Если реализовать высокое радиальное разрешение таких систем, то открывается возможность их применения для визуализации пролётной ситуации, а в дальнейшем и в интроскопии, геолокации и томографии.

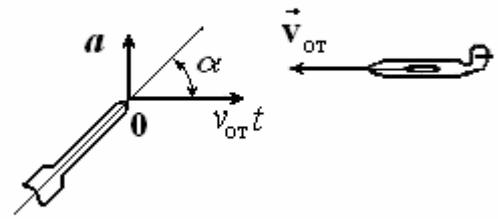


Рисунок 2 – Пролетная ситуация в системе координат ракеты, которую требуется восстановить

Целью работы является расширение круга задач, решаемых в результате реконструкции изображения на такие задачи, как восстановление пролётной ситуации при испытаниях зенитных ракет и когерентной томографии, за счет новых непроекционных методов реконструкции изображений объектов при монохроматическом зондировании, основанных на сканировании пространства за счёт управляемой фокусировки синтезированной апертуры антенны, а также исследование свойств и возможностей предложенных методов реконструкции изображения объектов с учётом прохождения сигналов через разные среды.

Состояние рассматриваемых вопросов. При монохроматическом зондировании обеспечить радиальное разрешение можно только за счёт использования фокусирующих свойств синтезированной апертуры антенны. Для этого необходимо организовать перемещение локатора относительно исследуемого объекта с известной скоростью.

Традиционно синтез апертуры антенны применяется в бортовых РЛС бокового обзора для картографирования земной поверхности. Синтезированная апертура – это условная апертура антенной решетки, которая синтезируется в результате движения по траектории летательного аппарата единственным антенным элементом с изотропной диаграммой направленности. Единственный движущийся элемент, занимая ряд последовательных положений на траектории, ведет себя как полноценная антенная решетка с множеством элементов, расположенных вдоль апертуры (траектории) с некоторым шагом. Как реальная, так и синтезированная антенная решетка имеет узкую диаграмму направленности, угловая ширина которой определяется длиной апертуры антенны: $\Delta\theta = \lambda/d$. Здесь $\Delta\theta$ – ширина диаграммы направленности в радианах, λ – длина волны, d – длина апертуры.

Синтез апертуры при малой дальности до объекта имеет много особенностей по сравнению с синтезом апертуры антенны на большом удалении. Эти особенности не позволяют перенести приемы синтеза апертуры, используемые при картографировании земли, на малую дальность. Главное препятствие, мешающее такому переносу, это проблема радиального разрешения.

Радиальное разрешение в системах картографирования достигается за счет импульсной или частотной модуляции зондирующего сигнала. Если при картографировании земли обходятся радиальным разрешением от 1,5 м до 30 см, то в задачах с реконструкцией изображения цели такого разрешения бывает недостаточно. Для повышения разрешающей способности уменьшают длительность зондирующего импульса. В итоге пространственная протяженность зондирующих импульсов становится сравнимой с длиной волны λ . При таком соотношении пространственной протяженности импульса и длины волны синтез апертуры становится невозможным. Более выгодным является путь синтеза апертуры при непрерывном зондирующем сигнале с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала.

Вернёмся к синтезу апертуры при монохроматическом зондировании, где разрешение достигается за счет фокусировки. Максимально достижимое разрешение при этом составляет: $\Delta R = \lambda/5$. Благодаря фокусировке и высокому разрешению открывается возможность реконструкции изображения цели по

траекторному сигналу с координатной привязкой к конечному участку траектории синтеза апертуры. Построенное изображение цели в координатах промаха и расстояния вдоль траектории позволяет восстановить пролётную ситуацию и использовать её для анализа причин неэффективного пуска ракеты.

В настоящий момент не разработаны приемы такой реконструкции. Известны лишь проекционные методы реконструкции, основанные на преобразовании Радона при круговом синтезе апертуры антенны. Реконструкция изображения цели в этом случае основана на регистрации и обработке кольцевого спектра. Такую регистрацию невозможно организовать при движении локатора по прямолинейной траектории. В связи с этим *основной задачей диссертации* является разработка научных основ непроекционных методов реконструкции изображения объектов синтезом апертуры антенны по траекторному сигналу при монохроматическом зондировании.

Главный недостаток метода, основанного на обратном преобразовании И.Радона, сопряжен с рядом ограничений, которые не допускают синтеза апертуры на малой дальности. Это ограничение состоит в том, что в каждую точку регистрации проекции должен приходиться только один проекционный луч волны, рассеянной объектом. Именно это требование Радона нарушается при синтезе апертуры на малой дальности. Находясь вблизи от объекта, локатор принимает пучок (веер) сходящихся проекционных лучей. Поэтому *первой задачей* является разработка алгоритмов реконструкция изображения объектов по пучку сходящихся лучей. Такая задача И.Радонем не рассматривалась. Требование И.Радона на регистрацию узкого луча для рассеянного излучения можно выполнить в том случае, если регистратор находится на большой дальности от объекта, когда его угловые размеры малы и он воспринимается как точка. Поэтому методы реконструкции И.Радона не работают на малой дальности. Следует разработать методы реконструкции, позволяющие работать на любых дальностях от объекта. В связи с этим откроются новые возможности для исследования свойств синтезированной апертуры на малой дальности. Поэтому *следующей задачей диссертации* является исследование свойств апертурного синтеза на малой дальности при движении локатора по прямолинейной, круговой или квадратной траектории, т. е. исследование функций рассеяния объектов, их пространственных спектров по кольцу и интерференционных явлений.

На возможность применения синтеза апертуры с монохроматическим сигналом в задачах томографии указывается в работе Д.Менсы «Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображения на СВЧ». В этой работе поставлена и решена задача реконструкции внутренней структуры объекта по кольцевому спектру, зарегистрированному при локации вращающегося объекта. При непроекционной реконструкции сбор данных может производиться также при обходе объектов по кругу, но при этом регистрируется не кольцевой спектр, а траекторный доплеровский сигнал.

В настоящее время нет алгоритмов реконструкции изображения объектов по траекторному сигналу при монохроматическом зондировании. Разработка этих алгоритмов открывает возможности для решения *третьей задачи диссертационной работы*, такой как разработка принципов построения нового класса

систем радиовидения на малой дальности, томографов, интроскопов и систем визуализации цели, обеспечивающих получение требуемого радиального разрешения без модуляции монохроматического зондирующего сигнала.

В работе Д.Менсы подробно рассмотрены вопросы разрешающей способности круговой синтезированной апертуры. О разрешающей способности синтезированной апертуры дают представление функции рассеяния точечных объектов при различных секторах синтеза апертуры. В работе Д.Менсы вместо принятого термина в оптике «функция рассеяния точки» введен термин «передаточная функция точки». Получены функции рассеяния точечных объектов при трехчастотном и пятичастотном зондировании. Однако это все результаты проекционного метода. Потому *четвертой задачей* является сравнение предлагаемых методов реконструкции с известными проекционными методами.

Поскольку непроекционный метод новый, то необходима проверка его работоспособности и возможности применения на практике. В связи с этим *пятая задача* диссертационной работы является экспериментальная проверка предлагаемых методов и алгоритмов реконструкции изображения объектов.

Шестой задачей диссертации является совершенствование результатов реконструкции и повышение качества изображения объектов, а также решение выявленных проблем, основной из которых является интерференция. Она присутствует на структурах изображения и структурах спектра на кольце. Эту задачу можно сформулировать так: разработка методов повышения качества изображения, т. е. устранение интерференции на изображениях при сохранении монохроматического зондирующего сигнала.

Задачи диссертационной работы

1. Разработка основ непроекционных методов реконструкции изображения объектов синтезом апертуры антенны по траекторному сигналу при монохроматическом зондирующем сигнале, и создание на их базе способов визуализации пролётной ситуации.

2. Исследование свойств реконструированного изображения при сборе данных по прямолинейной, круговой или квадратной траектории, т. е. исследование функций рассеяния объектов, их пространственных спектров по кольцу и интерференционных явлений.

3. Разработка принципов построения нового класса систем визуализации пролётной ситуации, систем радиовидения на малой дальности, томографов, геолокаторов, обеспечивающих требуемое радиальное разрешение при монохроматическом зондирующем сигнале.

4. Сравнение предлагаемых и известных методов реконструкции.

5. Экспериментальная проверка предлагаемых методов и алгоритмов реконструкции изображения объектов.

6. Разработка методов повышения качества изображения, т. е. устранение интерференции на изображениях при сохранении монохроматического зондирующего сигнала.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенный новый метод реконструкции изображения объектов при монохроматическом зондировании без регистрации проекций, применимый для

восстановления пролётных ситуаций, основанный на сканировании пространства по дальности сфокусированным за счет синтеза апертуры объёмом когерентного излучения, одинаково эффективно работающий как в зоне Френеля, так и в зоне Фраунгофера по отношению к апертуре объекта.

2. Созданный алгоритм реконструкции изображения по данным движущегося локаатора по прямолинейной траектории состоящий в следующем:

- расчёт опорных траекторных сигналов от точечных объектов, расположенных на разном удалении от траектории движения локаатора;
- получение набора корреляционных функций в результате многократных сверток объектного траекторного сигнала с опорными траекторными сигналами точечных объектов, из которых строится корреляционная поверхность в декартовой системе координат;
- совмещение контуров сечений поверхности из корреляционных функций горизонтальными плоскостями на разной высоте, из которых образуется радиолокационное изображение протяжённой цели с интерференционными проявлениями на изображении.

3. Получение полукольцевого спектра передаточной функции объекта, представленной корреляционной поверхностью, изрезанность которого характеризует степень интерференционных проявлений.

4. Предложенный способ ослабления интерференционных проявлений путем перемножения матриц из отсчётов корреляционных функций, полученных при разных направлениях движения локаатора.

5. Разработанный алгоритм реконструкции изображения при сборе данных локатором, движущимся по круговой траектории, состоящий в следующем:

- опорные точки расставляются равномерно по всей площади траекторного круга в соответствии с декартовой сеткой и шагом не более $\lambda/5$,
- определяются полярные координаты опорных точек,
- отсчёты траекторных сигналов для опорных точек рассчитываются по формуле радиолокации, в которой расстояние между локатором и опорной точкой определяется в соответствии с геометрическими параметрами кругового перемещения локаатора,
- отсчёты сигнала на круговой траектории берутся через равные угловые промежутки в полярной системе координат в соответствии с теоремой Котельникова,
- начальная точка на круговой траектории для каждого опорного сигнала определяется полярным углом опорной точки,
- расчёт корреляционных функций между объектным и опорными траекторными сигналами производится по отсчётам, полученным в полярных координатах,
- передаточная функция объекта, а затем изображение строятся в декартовых координатах из центральных отсчётов корреляционных функций, располагаемых в местах нахождения опорных точек.

Научная новизна работы

1. Реализация принципа синтеза апертуры антенны отличается от извест-

ных подходов тем, что вместо построения передаточной функции объекта путем обратного преобразования Фурье от зарегистрированного спектра на кольце регистрируют траекторный сигнал в пространственной области (в области оригиналов), а передаточную функцию объекта строят из набора одномерных корреляционных функций.

2. Предложено применение монохроматической локации с синтезом апертуры антенны для восстановления радиальной дальности на малом расстоянии от цели и для реконструкции изображения цели при движении локатора по прямолинейной траектории.

3. Впервые предложено устранение проявления интерференции с помощью синтеза апертур антенны в разных направлениях и матричной обработки данных, получаемых при разных направлениях синтеза апертур, что обеспечивает высокое качество реконструкции изображения объектов.

4. Способ реконструкции изображения гомогенных структур с включенной в них неоднородностью отличается тем, что зондирование осуществляется монохроматическим сигналом, а синтез апертуры ведется в разных направлениях по прямым линиям.

5. Исследованы интерференционные явления при различных вариантах синтеза апертур, такие как переход кругового синтеза апертуры в прямолинейный при учете радиального ослабления сигнала, уменьшение интерференционных явлений на структурах передаточных функций протяженных объектов и структурах их пространственных спектров на кольце при применении многоркурсного синтеза апертур.

6. Получение передаточных функций и изображений протяженных объектов отличается тем, что оно осуществляется в области оригиналов и не связано с известными проекционными методами.

Новизна результатов диссертационной работы подтверждается патентом и авторским свидетельством на изобретение.

Практическая ценность работы

1. Предложенные методы реконструкции изображения цели по траекторному сигналу позволяют решить задачи визуализации пролётной ситуации и распознавания объектов.

2. Предлагаемая реализация синтеза апертуры в области оригиналов без фазовых измерений при сборе данных реализуется с меньшими затратами, чем синтез апертуры в области изображений, т. е. в спектральной области.

3. Предложенный непроекционный метод реконструкции изображения объектов возможен как в ближней зоне, так и в дальней зоне, в то время как метод реконструкции по проекциям применим только в дальней зоне по отношению к апертуре объекта.

4. Благодаря возможности сбора данных на малых дальностях от объекта исключается необходимость облучения больших пространств, что выгодно с точки зрения затрат энергии и безопасности для работающего персонала.

5. Непроекционные методы реконструкции изображения объектов открывают перспективы для развития систем ближней локации с монохроматическим излучением, предназначенных для визуализации пролётной ситуации,

радиовидения, томографии, и могут быть использованы в интроскопии жидких и газообразных сред, при решении задач георазведки и скрытого наблюдения.

6. Появление новых возможностей диагностирования в медицине за счет использования при реконструкции изображения резонансного характера отклика тканей на воздействие монохроматического сигнала.

7. Исключение влияния дисперсионности сред на результаты реконструкции изображения объектов благодаря применению монохроматического зондирования.

Методы исследования

Теоретические методы основаны:

- на корреляционном анализе натуральных и модельных траекторных доплеровских сигналов;
- на приемах линейной фильтрации, быстрого преобразования Фурье и статистической радиотехники;
- на использовании математических методов реконструкции изображения по проекциям с применением прямого и обратного преобразования Радона, теоремы о центральном сечении, метода обратного проецирования и метода обращения по Фурье (метод Д.Менсы).

Экспериментальные методы основаны:

- на корреляционной обработке натуральных траекторных сигналов и реконструкции по ним изображения объектов с помощью разработанных программ;
- на проведении модельных экспериментов, позволяющих объяснить результаты натуральных экспериментов (модельный синтез апертуры с исключенной центральной частью апертуры антенны или модельный синтез апертуры с учетом границы раздела разнородных сред).

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается корректным аналитическим исследованием, математическим моделированием, экспериментальными результатами, а также отсутствием противоречий результатов диссертации известным положениям теории реконструкции изображения объектов проекционными методами, основанными на обратном преобразовании Радона.

Реализация и внедрение результатов

В ОАО «НИИ Электронных приборов» (г. Новосибирск), в ОАО «Новосибирское производственное объединение «Луч», на ФКП «Новосибирский опытный завод измерительных приборов» результаты диссертации использованы для анализа натуральных испытаний систем ближней локации.

Результаты диссертации используются также в научно-методическом комплексе подготовки инженеров по специальности 170100 «Боеприпасы и взрыватели», бакалавров и магистров направлению 220400 «Управление в технических системах» при разработке курсов «Обработка сигналов и изображений», «Математические методы в инженерных расчетах», «Радиоэлектронные информационно-управляющие системы».

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях.

1. Ющенко, В.П. Метод построения изображения объекта по доплеровскому сигналу с помощью синтезированной апертуры // Актуальные проблемы электронного приборостроения: труды IV Международной конференции АПЭП-98 / НГТУ.– Новосибирск, 1998.– Т.10.– С. 47–52.

2. Yushchenko, V. P. A Circular Aperture synthesis for Tomography // On Science and Technology: The 6th Russian-Korean International Symposium KORUS-2002. / At the – Novosibirsk State Technical University Russia, June 24–30, 2002.– Vol. 1.– P. 374–378.

3. Ющенко, В.П. Особенности в постановке задачи реконструкции при томографии с помощью синтезированной апертуры и ее решение // Информационные системы и технологии: международная науч.-техн. конференция ИСТ' 2003 / НГТУ.– Новосибирск, 22–25 апреля, 2003.– Т. 1.– С. 158–162.

4. Ющенко, В.П. Сравнение различных методов и возможностей апертурного синтеза в ближней локации // Конверсия, оборона, безопасность: все-российская научно-практическая конференция / ПГУ.– Пенза, Россия. 17–19 сентября, 2003.– С. 102–108.

5. Ющенко, В. П. Траекторный контроль с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко, С. А. Лукьяненко, Н. М. Федуличева // Наука, промышленность, оборона : тр. VII всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – С. 105–111.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 24 работах. Из них 12 работ опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации материалов докторских диссертаций, 1 работа – в периодическом издании, 11 статей в сборниках трудов конференций. Имеются 4 отчета по НИР, 1 патент на изобретение, 1 авторское свидетельство СССР на изобретение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе дан анализ известных методов реконструкции изображения объектов, сформулирована постановка задачи. Дана историческая справка этапов развития реконструкции изображения с использованием синтеза апертуры. Подробно рассмотрен метод Д.Менсы, в котором предлагается синтезировать апертуру антенны по кругу за счет вращения томографируемых объектов вокруг своей оси. При этом синтез апертуры осуществляется в спектральной области. Теоретические основы метода взяты из проекционной томографии. В результате анализа проекционного метода выявлены его недостатки. Одним из них является то, что вблизи объекта невозможно выполнить требования Радона к узости проекционного луча. Невыполнение этого требования приводит к тому, что при регистрации приходится иметь дело не с бесконечно тонким пучком, а с веером сходящихся пучков. До настоящего времени задача реконструкции изображения объекта по пучку сходящихся проекций не решалась.

Из вышеизложенного следует, что круговой синтез апертуры в спектральной области методом проекций невозможно применить к задачам визуализации пролётной ситуации по следующим причинам:

1. Нельзя работать на малой дальности
2. Известный проекционный метод синтеза апертуры по кругу не применим к прямолинейным траекториям.

Во втором разделе раскрываются п. 1, 2, 3, 4 положений выносимых на защиту, излагаются основы методов синтеза апертуры антенны на малой дальности при монохроматическом зондирующем сигнале. Особенность их в том, что апертура синтезируется в области оригиналов, т. е. в пространственных координатах. Дается решение задачи реконструкции картины объекта с координатной привязкой ее к отрезку траектории, на котором синтезировалась апертура антенны, а именно предлагаются основы, непроекционного метода реконструкции изображения объектов и его приложения для визуализации пролётной ситуации [1, 2, 3, 4, 5, 7, 13, 14, 16, 18, 20].

Суть предлагаемого метода можно описать следующим образом. Геометрическая схема процесса сбора информации при визуализации пролётной ситуации и реконструкции изображения приведена на рисунке 3.

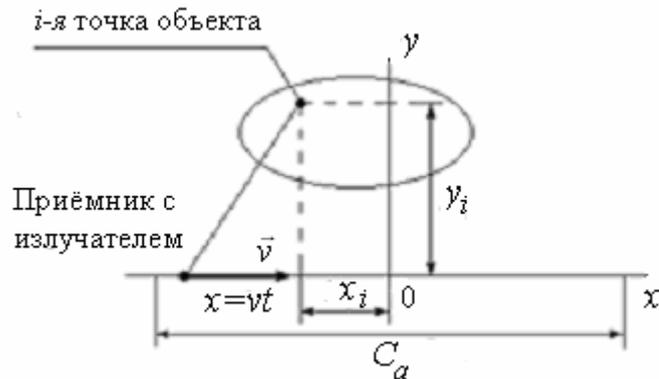


Рисунок 3 – Геометрия процесса сбора данных

Сигнал, отраженный от i -й точки объекта с координатами (x_i, y_i) , принимаемый локатором при пролете мимо этой точки по прямолинейной траектории с промахом y_i , можно записать в виде

$$f_i(t) = \frac{a(x_i, y_i)}{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}), \quad (1)$$

где под промахом понимается кратчайшее расстояние по нормали от траектории до точки объекта, $a(x_i, y_i)$ – комплексная амплитуда рассеяния в i -й точке, C_a – длина синтезированной апертуры, t – время, v – постоянная скорость перемещения приемника с излучателем относительно объекта, λ – длина волны.

Сигнал, отраженный от всего объекта, можно представить в виде

$$f(t) = \sum_{i=1}^I f_i(t), \quad (2)$$

Введем понятие опорных сигналов. Опорными называются сигналы, отраженные от опорных точек, с координатами $(0, l\Delta y)$, с единичной амплитудой рассеяния. Опорные точки расставляются в середине синтезированной апертуры антенны на разном промахе с некоторым шагом Δy . Траекторный сигнал от опорной точки можно описать таким образом:

$$g_l(t) = \frac{1}{(vt - C_a/2)^2 + (l\Delta y)^2} \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt - C_a/2)^2 + (l\Delta y)^2}\right], \quad (3)$$

Δy – шаг по промаху, l – номер шага по промаху.

Тогда набор одномерных взаимных корреляционных функций между опорными сигналами $g_l(t)$ и сигналом $f(t)$ может быть представлен так:

$$B(\tau, l\Delta y) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) g_l\{(t + \tau), l\Delta y\} dt. \quad (4)$$

Возьмем функцию $f(t)$ для одноточечного объекта, т. е. в выражении (2) примем $l=1$, а в выражении (1) положим $x_i = 0$, $y_i \neq 0$, $a(x_i, y_i) = 1$ и тогда взаимная корреляционная функция примет вид:

$$B_i(\tau, l\Delta y) = B(\tau, l\Delta y) = \frac{1}{T} \int_0^T f_i(t) g_l\{(t + \tau), l\Delta y\} dt. \quad (5)$$

Соотношение (5) представляет собой свертку двух функций времени и является аналогом выражения (6), описывающего реакцию линейного фильтра с импульсной характеристикой $g_l(t)$ при воздействии на него сигнала $f(t)$.

При определении корреляционной функции лучше использовать приведенный ниже частотный аналог выражения (5), тогда могут быть применены алгоритмы быстрого преобразования Фурье, которые позволяют уменьшить число вычислительных операций.

$$B_i(\tau, l\Delta y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\omega_1}^{\omega_1} \mathbf{S}(\omega) \mathbf{K}_l^*(\omega) \exp[j\omega\tau] d\omega, \quad (6)$$

где

$$\mathbf{S}(\omega) = \int_{-C_a/2v}^{C_a/2v} f(t) \exp[-j\omega(t + \tau)] dt, \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_l^*(\omega) = \int_{-C_a/2v}^{C_a/2v} g_l(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (8)$$

Здесь $\omega_1 = 4\pi v/\lambda$, $\mathbf{S}(\omega)$ – спектр зарегистрированного траекторного сигнала $f(t)$, $\mathbf{K}_l^*(\omega)$ – комплексно-сопряженный спектр опорной функции $g_l(t)$ для промаха с номером l , $\mathbf{K}_l^*(\omega)$ является частотной характеристикой дисперсионного фильтра, перестраиваемого на разные промахи $l\Delta y$ (дисперсионным считается фильтр, задержка сигнала в котором зависит от частоты).

При построчной развертке набора корреляционных функций с шагом Δy , получается трехмерная фигура, которую будем называть передаточной функцией точки (термин Д.Менсы) или функцией рассеяния точки. Если рассеять полученную фигуру горизонтальными плоскостями разной высоты и раскрасить образовавшиеся сечения, получим реконструированное изображение точки.

Далее предлагается алгоритм обработки траекторного сигнала и построения изображения. Для построения алгоритма вычисления компоненты $f_i(t)$ и $g_l(t)$ взаимно корреляционной функции (5) представляются в дискретном виде. Шаг дискретизации определяется в соответствии с теоремой Котельникова.

Предположим, что исследуемый объект состоит из I точек и траекторный сигнал, отраженный от i -й точки, в дискретном виде запишется так:

$$s_i(k) = \frac{a(x_i, y_i)}{(v(k\Delta t) + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} \left[\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}\right) - j \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}\right) \right]. \quad (9)$$

Сигнал, отраженный от всех I точек, можно представить суммой

$$s(k) = \sum_{i=1}^I s_i(k). \quad (10)$$

Выражения, записанные в дискретном виде, легко программируются. Траекторный сигнал, от трехточечного объекта, рассчитанный по формулам (9) и (10), представлен на рисунках 4, а, а на рисунке 4, б представлен его спектр.

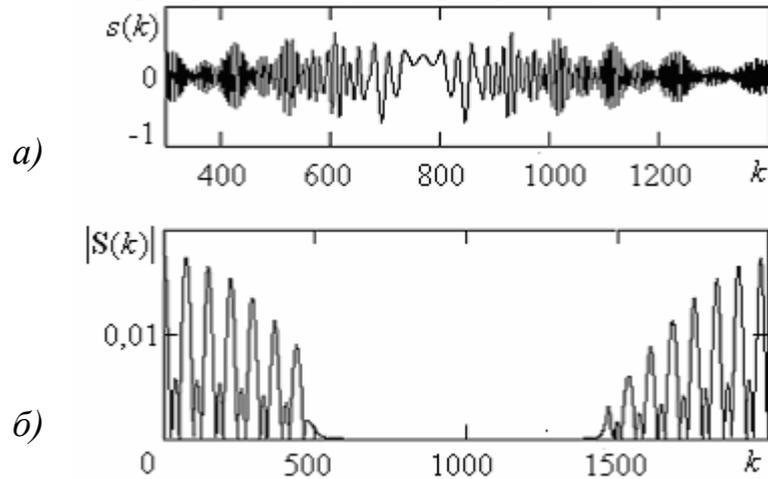


Рисунок 4 – Результаты моделирования: а) траекторный сигнал, от трехточечного объекта; б) его спектр

Изрезанность спектра на рисунке 4, б можно интерпретировать как проявление интерференции в спектральной области. Представим опорный сигнал в дискретном виде.

$$g_l(k) = \frac{1}{(v(k\Delta t) - C_a/2)^2 + y_l^2} \left[\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) - C_a/2)^2 + y_l^2}\right) + j \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) - C_a/2)^2 + y_l^2}\right) \right]. \quad (11)$$

В выражении (11) через l обозначается номер опорного сигнала. Всего L опорных сигналов. Каждому l соответствует задаваемое значение промаха y_l . Отсчеты промаха y_l берутся через равные промежутки Δy .

С помощью прямого преобразования Фурье отсчеты траекторного доплеровского сигнала (10) превращаются в отсчеты спектра $S(n)$:

$$S(n) = \sum_{k=1}^N s(k) \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn), \quad (12)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, N, k = 1, 2, 3, \dots, N$.

Следующим шагом на пути реконструкции является определение комплексно сопряженного спектра опорного сигнала, т. е. частотной характеристики перестраиваемого дисперсионного фильтра. Дисперсионный фильтр поочередно настраивается на L дальностей. При настройке на дальность с номером l частотную характеристику дисперсионного фильтра можно записать в виде:

$$\mathbf{K}_l^*(n) = \sum_{k=1}^N g_l(k) \exp(j \frac{2\pi}{N} kn), \quad (13)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, N$, $k = 1, 2, 3, \dots, N$.

Далее вычисляется дискретная свертка двух функций, т. е. находятся отсчеты взаимной корреляционной функции.

$$B_l(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{S}(n) \mathbf{K}_l^*(n) \exp(j \frac{2\pi}{N} kn), \quad (14)$$

реальная (b) где $n = 1, 2, 3, \dots, N$, $k = 1, 2, 3, \dots, N$.

Полученные отсчеты взаимно корреляционной функции для одного опорного сигнала g_l соответствуют одной строке разворачиваемого изображения. Число строк изображения равно числу опорных сигналов. Каждый опорный сигнал соответствует конкретному промаху. Значения промаха следуют один за другим от минимального до максимального с некоторым шагом. При этом для компенсации радиального ослабления сигнала в соответствии с формулой локации, амплитуда отсчетов опорного сигнала умножается на величину промаха в четвертой степени. Таким образом, вводится автоматическая регулировка усиления принимаемого сигнала. Далее отсчеты всех взаимно корреляционных функций нормируются по отношению к наибольшему значению из всего набора корреляционных функций. После этого модуль каждого комплексного числа перекодируется в яркостной или цветовой пиксель в соответствии с его величиной по отношению к найденному максимуму. Далее пиксели располагаются по строкам в декартовой системе координат в том же порядке, что и числа корреляционной матрицы. В результате такой развертки воспроизводится картина внутренней структуры объекта в сечении.

Для обеспечения возможности модельной реконструкции приняты следующие ограничения: полагалось, что диаграмма приема и излучения локатора изотропна в плоскости, секущей исследуемый объект и проходящей через траекторию синтеза апертуры (см. рисунок 5, a); вне плоскости приема нет.



Рисунок 5 – Диаграмма направленности антенны локатора: идеальная (a), реальная (b)

Диаграмма направленности антенны для реальных локоаторов приведена на рисунке 5, б. Результаты модельной реконструкции, которые приводятся ниже, соответствуют идеальной диаграмме направленности (рисунок 5, а). Поверхность, построенную из набора корреляционных функций, называют функцией рассеяния. Этот термин заимствован из оптики. Функция рассеяния точки приведена на рисунке 6, а. На рисунке 6, б дан вид её сверху. Подобные поверхности у Д.Менсы называются передаточными функциями.

Функция рассеяния точки характеризует разрешающую способность метода реконструкции изображения объекта. Как видно из рисунка 6 представленный метод обладает высоким разрешением по координате вдоль траектории. Максимальное разрешение характеризуется «талией восьмерки» (рисунок 6, б).

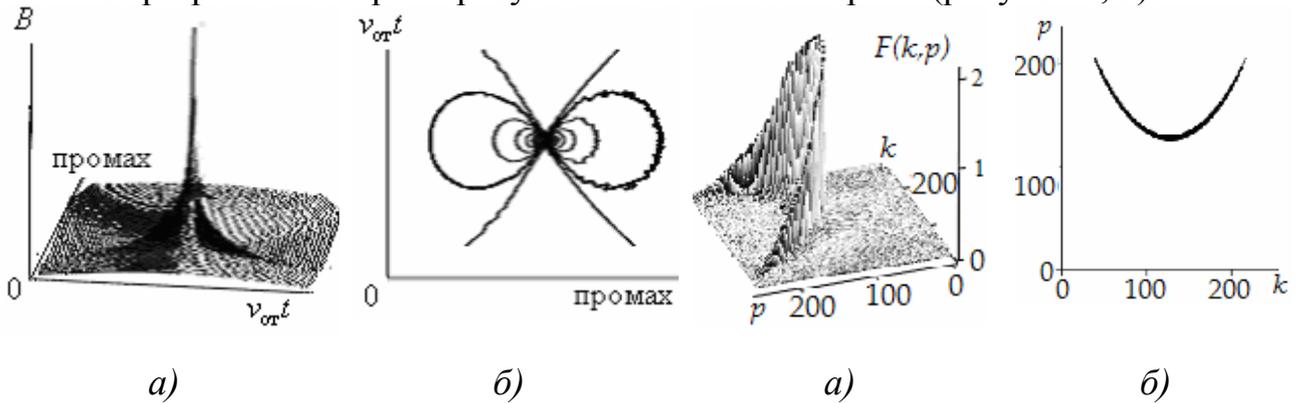


Рисунок 6 – Результат реконструкции изображения: функция рассеяния точки (а), изолинии или вид функции рассеяния сверху (б)

Рисунок 7 – Виды спектра: спектр функции рассеяния точки (а), его вид в плане (б)

Следует подчеркнуть отличия в алгоритмах проекционной и непроекционной реконструкции. При проекционном методе регистрируют отсчёты спектра по кольцу. Затем по нему реконструируется функция рассеяния точки. Для этого берут обратное преобразование Фурье от кольцевого спектра. Здесь предлагается обратный алгоритм. Регистрируется траекторный сигнал при движении локоатора по прямой траектории. С помощью метода взаимных корреляций производится многократная свёртка зарегистрированного траекторного сигнала с каждым опорным траекторным сигналом и из полученного набора взаимных корреляционных функций строится поверхность в декартовой системе координат, которая даёт функцию рассеяния точки. Прямое двумерное преобразование Фурье от этой функции (15) даёт кольцевой спектр.

$$F(X, Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x, y) \exp[-j(xX - yY)] dx dy. \quad (15)$$

В дискретном виде эту математическую операцию можно представить следующим выражением:

$$F(k, p) = \frac{1}{N} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N B(n, l) \exp[-j \frac{2\pi}{NN} (nk - lp)]. \quad (16)$$

Кольцевой спектр (рисунок 7, а) функции рассеяния (рисунок 6, а) получен в результате двумерного преобразования Фурье (16) от функции рассеяния

точечного объекта. Из рисунка 7, видно, что спектр расположен на полукольце, которое приняло форму полуэллипса, потому что шаг по координате промаха не был равен шагу по траектории.

На рисунке 8 показан результат реконструкции изображения трехточечного объекта. В качестве регистрационных данных взят сигнал, (рисунок 4а).

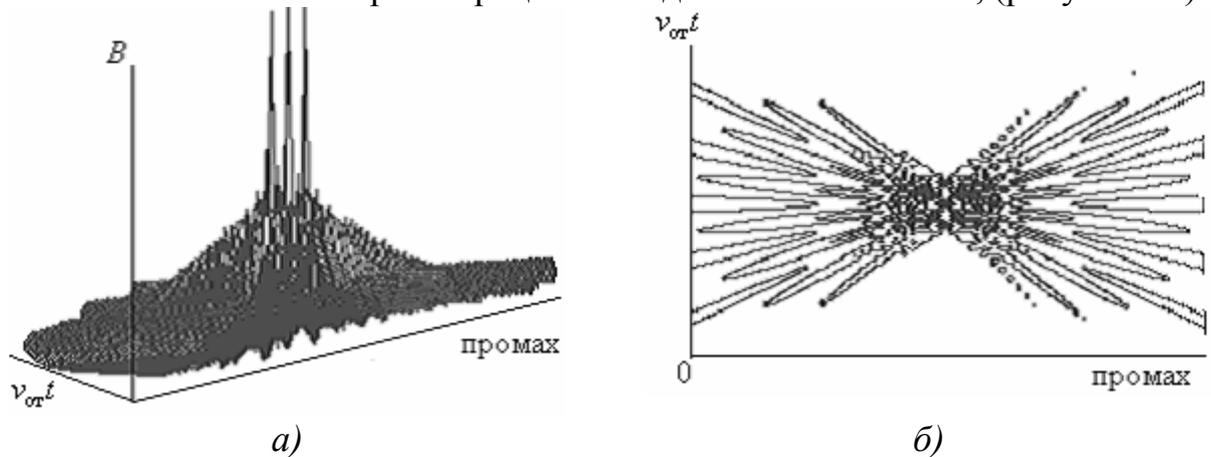


Рисунок 8 – Результат реконструкции изображения: функция рассеяния трех точек (а), томограмма трехточечного объекта (б).

На рисунке 9 показан полукольцевой спектр пространственных частот трехточечного объекта.

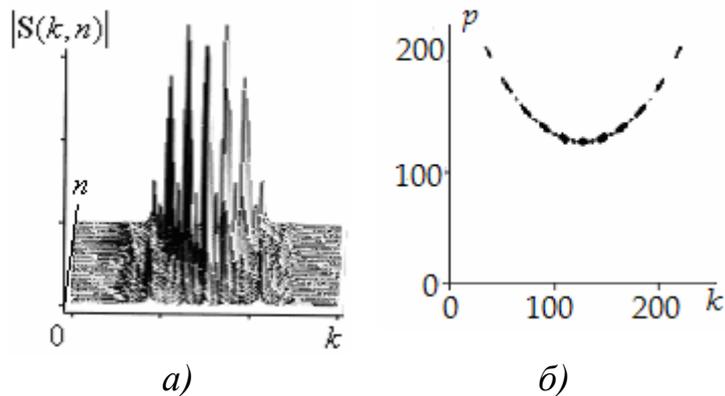


Рисунок 9– Виды спектра: спектр пространственных частот трехточечного объекта (а), вид этого спектра сверху (б)

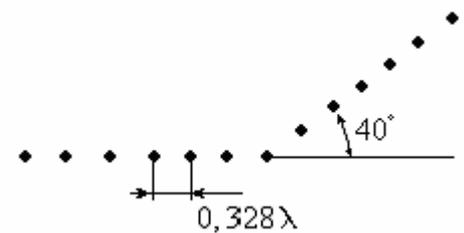


Рисунок 10 – Многоточечный объект в виде тупого угла

На томограмме трехточечного объекта рисунок 8, б хорошо виден интерференционный узор. Интерференция проявляется также в спектральной области рисунок 9, а в виде изрезанности спектральной функции на полукольце.

Рассмотрим реконструкцию изображения многоточечного объекта, состоящего из ряда точек на ломаной линии в виде тупого угла. Всего тридцать точек, расположенных через $0,328\lambda$ (рисунок 10). На рисунке 11 представлено реконструированное изображение этого многоточечного объекта. Она имеет вид двух пересекающихся лучей. Из рисунка 11 можно видеть, что изображение объекта представляет собой диаграмму обратного рассеяния волн, которая образовалась в результате интерференционных явлений. Далее проводится сопоставление результатов модельной реконструкции точечных объектов предлагаемым методом, с результатами реконструкции проекционным методом.



Рисунок 11 – Изображение много-точечного объекта из ломаной линии в виде тупого угла



Рисунок 12 – Функции рассеяния точки полученные: *а)* методом Д.Менсы; *б)* непроекционным методом

Выражение (17), заимствованное из описания проекционного метода реконструкции по спектру на кольце, позволяет рассчитать и построить функцию рассеяния точки (рисунок 12, *а*), которая даёт лепестки в виде концентрических окружностей вокруг главного лепестка.

$$C(|\vec{r}|, \phi) = \frac{A}{|\vec{r}|} \int_0^{2\pi} \exp[j \frac{4\pi}{\lambda} |\vec{r}'| \cos(\phi - \theta)] d\theta \quad (17)$$

На рисунке 12, *б* приведена функция рассеяния точки, полученная методом корреляций при синтезе апертуры по прямолинейной траектории. Из сравнения этих функций видно, что прямолинейный синтез апертуры не даёт артефактов в виде концентрических колец, что является его преимуществом.



Рисунок 13 – Передаточные функции точки, полученные двумя разными методами при секторе синтеза апертуры 60° : результат Менсы (*а*); результат предлагаемого непроекционного метода (*б*)

Сравним передаточные функции точки, полученные по спектру на кольце (рисунок 13, *а*) проекционным методом с передаточными функциями, полученными синтезом апертуры при движении локатора по прямолинейной траектории при секторе синтеза апертуры 60° (рисунок 13, *б*). Результаты проекционной и непроекционной реконструкции совпадают.

Дальнейшее моделирование показало, что при сужении сектора синтеза апертуры происходит ухудшение разрешающей способности по обеим координатам.

натам. Кроме того, тело неопределенности (передаточная функция точки) вытягивается по координате продольной дальности (вдоль координаты промаха). Одинакового разрешения по обеим координатам можно добиться либо при круговом синтезе апертуры антенны, либо при прямолинейном синтезе в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Далее в разделе 2.5 раскрывается предложенный путь устранения интерференции. Он основан на многоракурсном синтезе апертур антенны [4, 7, 9, 10]. Функция рассеяния точки для идеального процесса реконструкции должна иметь вид δ -импульса. Такую функцию можно получить, синтезируя апертуру в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 14).

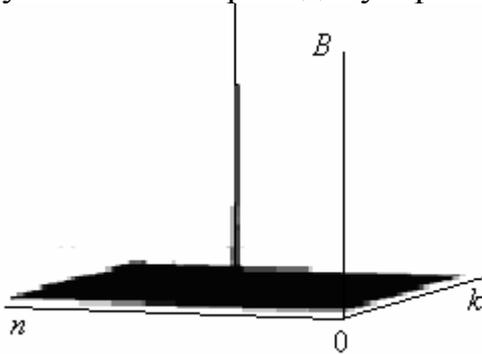


Рисунок 14 – Передаточная функция точки при двукурсном синтезе апертуры

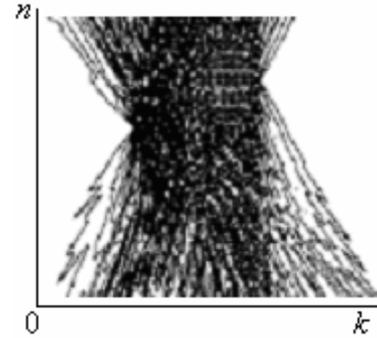
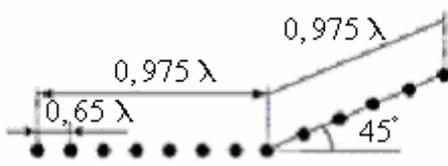


Рисунок 15 – Результаты реконструкции шестнадцатиточечного объекта при однокурсном синтезе апертуры

Рассмотрим результаты реконструкции изображения шестнадцатиточечного объекта (рисунок 16, *a*). На рисунке 15 представлен результат восстановления изображения этого объекта по одному траекторному доплеровскому сигналу. Интерференционная картина на рисунке 15 не позволяет распознать объект.



a)

Рисунок 16 – Шестнадцатиточечный объект: *a)* вид объекта; *б)* результат реконструкции с помощью двухкурсного синтеза апертуры



б)



Рисунок 17 – Результат реконструкции при четырехкурсном синтезе апертуры

На рисунке 16, *б* представлен результат восстановления этого же объекта, по двум траекторным доплеровским сигналам при ортогональном расположении траекторий синтеза апертур.

Результат реконструкции ещё улучшится, если повернуть координатный базис синтеза апертур в двух взаимно перпендикулярных направлениях на 45° и еще раз сделать синтез апертур в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а затем перемножить совпавшие элементы матриц (рисунок 17). Ослабление интерференции объясняется тем, что максимумы функций рассеяния одно-

именных точек объекта при повороте и наложении совмещаются и результат их перемножения быстро растет, а для неоднородных точек хаотическое перемножение, даёт значительно меньший результат. На рисунке 17 представлено изображение шестнадцатиточечного объекта, состоящего из набора точек в виде тупого угла, восстановленное по четырем траекторным сигналам, т. е. в результате четырехкурсного синтеза апертур антенны. Далее рассматриваются теоретические аспекты многокурсного синтеза апертур: дается описание операции поворота и совмещения матриц, доказываемся отсутствие связи этой операции с операцией обратного проецирования.

В результате синтеза апертур в двух направлениях получены две матрицы изображения размером 256×256 элементов. Если расстояние между элементами в обеих матрицах одинаковое, т. е. шаг по промаху равен шагу вдоль траектории $\Delta pr = v\Delta t$, тогда при наложении развернутых на 90° матриц элементы строк совпадают с элементами столбцов и происходит полное совпадение одноименных точек. Совпавшие элементы перемножаются. Другой результат получается, если матрицы развернуть на 45° (рисунок 18).

Чтобы у матриц совпало большее число элементов уменьшают расстояние между элементами какой либо одной матрицы в $\sqrt{2}$ раз. Для этого при регистрации шаг по промаху и шаг вдоль траектории уменьшают в $\sqrt{2}$ раз.

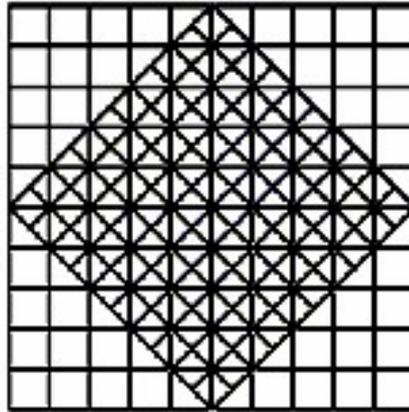


Рисунок 18 – Совмещение элементов развернутых матриц

На участке полного перекрытия матриц совпадение элементов достигает 50 %. При этом перемножаются только совпадающие элементы матриц и отбрасываются не совпадающие элементы. Объект на развернутой матрице изображения будет занимать такое же положение, что и при не развернутой матрице. На первый взгляд разворот матриц с перемножением элементов похож на известный алгоритм обратного проецирования. Однако есть существенное отличие. Главное отличие в том, что при обратном проецировании в выбранной точке объекта суммируются не значения лучевых функций, которые они имеют в точке пересечения лучей, как это делается в предлагаемом методе, а значения интегральных сумм вдоль пересекающихся лучей. Другими словами, в точке пересечения лучей суммируются их проекции. Если представить, что объект состоит из одной точки, то не точка проецируется куда - то по лучам, а наоборот проекции по этим лучам собираются в точке. Отсюда и название «Метод обратного проецирования».

Далее раскрываются п. 1, 2, 6 положения, выносимого на защиту. Эта часть раздела посвящена опробованию корреляционного метода синтеза апертуры на задачах визуализации пролётной ситуации с использованием натуральных сигналов. Визуализация подразумевает восстановление таких параметров пролета, как промах, размеры объекта, положение объекта относительно конечного отрезка траектории. В качестве объекта для исследования взят конус (рисунок 19).

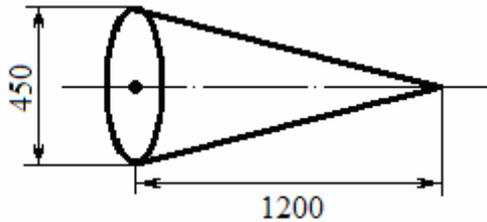


Рисунок 19 – Объекта для исследования

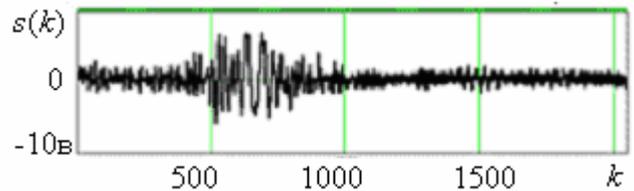


Рисунок 20 – Траекторный сигнал, отраженный от объекта

Сигнал от объекта регистрируется доплеровским приемником, работающим с монохроматическим сигналом на длине волны ≈ 3 см при перемещении локатора перпендикулярно продольной оси конуса с некоторым промахом.

Траекторные сигналы получены методом проездов по схеме (рисунок 21).



Рисунок 21 – Схема проезда локатора мимо исследуемого объекта

В первом эксперименте скорость движения локатора была $v_{от} = 2$ м/с. Промах составлял 0,5 м. Отсчеты траекторного сигнала взяты с интервалом 1 мс. Экспериментальный сигнал представлен на рисунке 20. На рисунке 22 представлены результаты реконструкции изображения сечения конуса по этому сигналу, то есть функция рассеяния исследуемого объекта и его реконструированное изображение.

Результаты отображаются в координатах промаха и расстояния вдоль траектории относительного движения локатора и объекта. Поле реконструкции изображения объекта (рисунок 22, б) охватывает пространство размером 4x4 м. Цель отображается в виде сгустка точек повышенной плотности отражения. Как видно из рисунка 22. б область с повышенной плотностью соответствует картине усреднённого поперечного сечения конуса, напоминающего круг. Лепестки диаграммы обратного рассеяния объекта (рисунок 22, б) ориентированы определенным образом. Они веером исходят из центра круга и тем самым помогают локализовать цель. Таким образом, область с повышенной плотностью указывает положение цели в окрестности траектории (горизонтальная ось) и определяет её промах (вертикальная ось).

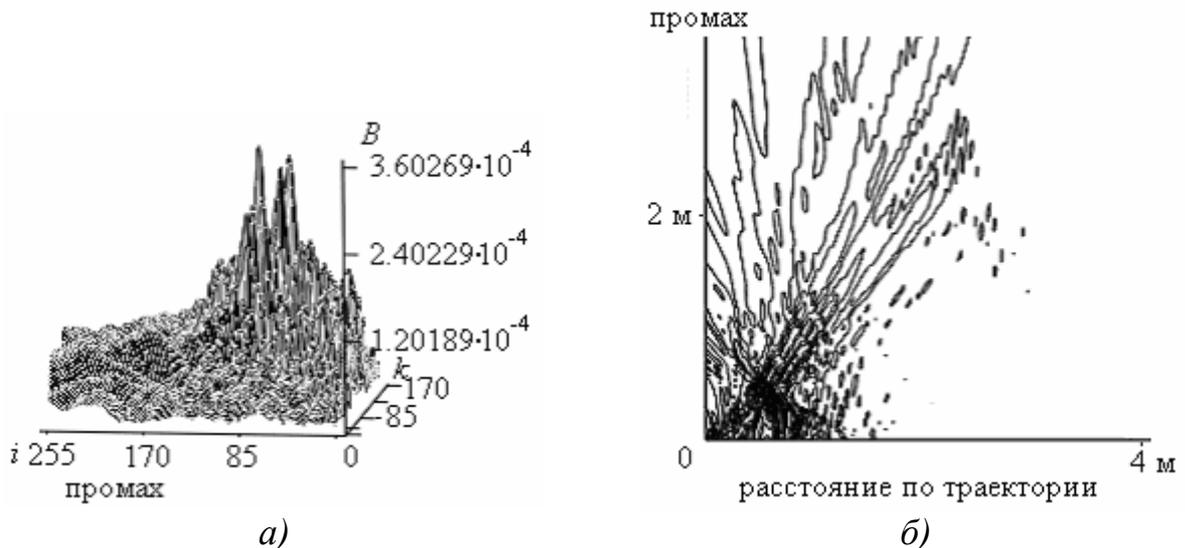


Рисунок 22 – Результат реконструкции: а) функция рассеяния исследуемого объекта; б) реконструированное изображение объекта в сечении

Из реконструированного изображения (рисунок 22, б) видно, что цель находится как раз на расстоянии 0,5 м от траектории. Статистика показывает, что погрешность измерения промаха составляет примерно 20% от истинного значения промаха. Интерференция, то есть ДОР одновременно мешает и помогает локализовать цель. Веерный характер расположения лепестков ДОР своим схождением указывает место положения цели. В тоже время лепестки ДОР в принципе препятствуют локализации цели. Оценка погрешности зависит также от того, как на картинке оператор ограничит место локализации цели. Если исходить из практических соображений, то погрешность измерения 20% или 50% лучше, чем полное незнание промаха.

В третьем разделе раскрываются п. 1, 3, 5, 6 положений выносимых на защиту, а именно, теоретические аспекты синтеза апертуры по круговой и квадратной траектории [6, 8]. Формулируется постановка задачи в области оригиналов, вводятся основные понятия и определения, дается математическое описание метода взаимной корреляции при круговом синтезе апертуры. Синтез апертуры по круговой и квадратной траектории интересен не только с общетеоретических позиций. Его применение ориентировано на системы радиовидения, томографию, охрану объектов, досмотр в аэропортах.

Пусть локализатор с изотропной диаграммой движется по круговой траектории, облучая монохроматическим сигналом отражающую точку, смещенную относительно центра на расстояние δ_k , и регистрирует траекторный сигнал. Дискретные отсчеты сигнала регистрируются с угловым шагом $\Delta\phi = (2\pi/N)$, где N – число отсчетов, а R_0 – радиус круговой траектории, по которой синтезируется апертура. Можно показать, что в этом случае расстояние от реконструируемой точки до локализатора будет изменяться по закону

$$R(i) = \sqrt{R_0^2 + \delta_k^2 - 2R_0\delta_k \cos(i\Delta\phi)},$$

где δ_k – радиальное удаление k -й точки объекта от центра синтезирования апертуры, i – номер отсчета доплеровского сигнала на круговой траектории от 0 до N ,

$0 \leq i\Delta\phi \leq 2\pi$ – текущий угол между радиусами R_0 и δ_k при регистрации отсчетов. Эти границы изменения угла соответствуют обходу реконструируемого объекта по круговой траектории в полярных координатах.

Если не учитывать радиального затухания, траекторный сигнал $s(i)$ от одной точки можно рассчитать по формуле:

$$s(i) = \cos \varphi(i). \quad (17)$$

Более точная модель, требует учета радиального затухания, которое будет изменяться обратно пропорционально второй степени $R(i)$.

$$s(i) = (1/R^2(i)) \cos \varphi(i), \quad (18)$$

где $\varphi(i) = \frac{4\pi R(i)}{\lambda}$, λ – длина волны.

В случае большого количества точек, отраженный от них сигнал $s(i)$, в соответствии с принципом суперпозиции можно рассчитать по формуле:

$$s(i) = \sum_{m=1}^M s_m(i), \quad (19)$$

где M – общее число реконструируемых точек, m – порядковый номер реконструируемой точки объекта, s_m – траекторный доплеровский сигнал, отраженный от точки с номером m и рассчитанный по формуле (17) или (18).

Для пространственной селекции точек необходимо просканировать принятый доплеровский сигнал, вида (19), перестраиваемым дисперсионным фильтром, поочередно настраиваемым на разные дальности внутри круговой апертуры. Т. е. процесс сканирования сведется к определению взаимных корреляционных функций $B_k(i_1)$, расчет которых для применения быстрых преобразований Фурье лучше выполнять в спектральной области.

$$B_k(i_1) = \sum_{i=1}^{2N} s(i)s_k(i+i_1) = \sum_{n=1}^{2N} \mathbf{S}(n)\mathbf{K}_k(n) \exp(j\frac{2\pi}{N}i_1n) \quad \text{при } i_1=1,2,\dots,2N, \quad (20)$$

при $n=1,2,\dots,2N$,

$$\text{где } \mathbf{S}(n) = \sum_{i=1}^{2N} s(i) \exp(-j\frac{\pi}{N}in) \quad \text{при } i=1,2,\dots,2N, \quad (21)$$

$$s(i) = 0 \quad \text{при } i=N+1, N+2, \dots, 2N,$$

$$\mathbf{K}_k(n) = \sum_{i=1}^{2N} s_k(i) \exp(-j\frac{\pi}{N}in) \quad \text{при } i=N+1, N+2, \dots, 2N, \quad (22)$$

$$s_k(i) = 0 \quad \text{при } i=1, 2, \dots, N.$$

В выражениях (20) (21), (22) приняты следующие обозначения: $\mathbf{S}(n)$ – отсчеты спектра сканируемого сигнала (19), $\mathbf{K}_k(n)$ – отсчеты частотной характеристики дисперсионного фильтра, настроенного на дальность δ_k , $s_k(i)$ – отсчеты опорного сигнала, рассчитанные по формуле (17) или (18) для одной точки, удаленной от центра синтезирования апертуры на δ_k , n – номера отсчетов частоты, i – номера отсчетов сигнала, i_1 – номера отсчетов взаимной корреляционной функции. Таким образом, процесс синтеза апертуры и построения изобра-

жения сводится к многократной свертке траекторного сигнала вида (19) с опорными сигналами вида (17) или (18), рассчитанными при различных расстояниях от центра δ_k , и развертке центральных отсчетов взаимной корреляционной функции, перекодированных в тоновые или цветные пиксели, в декартовых координатах. Каждый центральный отсчет взаимной корреляционной функции соответствует полярным координатам $\delta_{i,k}$ и $\psi_{i,k}$. Для перехода от декартовой к полярной сетке координат, используются формулы:

$$\delta_{i,k} = \Delta s \sqrt{i^2 + k^2}, \quad (23)$$

$$\psi_{i,k} = \arctg \frac{i}{k}, \quad (24)$$

где $i=1,2,\dots,256$ – номер отсчета по оси абсцисс, $k=1,2,\dots,256$ – номер отсчета по оси ординат, Δs – шаг по координатам

Эта процедура позволяет с некоторой погрешностью перейти от декартовой сетки координат к полярной сетке. На рисунке 23, *а* представлена функция рассеяния точки, находящейся в центре синтезирования апертуры. Расчет проведен без учета радиального ослабления.



Рисунок 23 – Круговой синтез апертуры: *а*) функция рассеяния центральной точки; *б*) функция рассеяния точки, удаленной от центра на 14λ

На рисунке 23, *б* представлена функция рассеяния точки, удаленной на расстояние 14λ от центра синтезирования апертуры. Радиус синтеза апертуры R_0 составлял 25λ . Новым оказался результат, состоящий в том, что для точки, расположенной в центре круговой апертуры и дающей траекторный сигнал с нулевым доплеровским спектром, получается такая же функция рассеяния, как и для точки, удаленной от центра круга, дающей сигнал с широким доплеровским спектром (рисунок 23, *а*, *б*). Отсюда следует: 1) нет зависимости разрешающей способности от ширины спектра траекторного сигнала, 2) круговая апертура дает одинаковое разрешение внутри круговой области для всех точек.

Таким образом, два разных метода, проекционный и непроеционный, дают одинаковые функции рассеяния точки. Следует ожидать совпадения и спектральных функций. Чтобы получить спектр на кольце, не прибегая к его регистрации при сборе данных, надо взять двумерное преобразование Фурье от передаточной функции точки, полученной методом корреляций.

Рассмотрим точечный объект расположенный в начале координат, функция рассеяния которого приведена на рисунке 23, *а*. Пространственный спектр этой функции представлен на рисунке 24, *а*. На рисунке 24, *б* представлен этот же спектр в плане. На рисунке 24, *в* представлена фазо-частотная характери-

стика кольцевого спектра $\varphi(f_x, f_y) = \arctg\left(\frac{B(f_x, f_y)}{A(f_x, f_y)}\right)$, где $A(f_x, f_y)$ – действительная часть спектральной функции, а $B(f_x, f_y)$ – её мнимая часть.

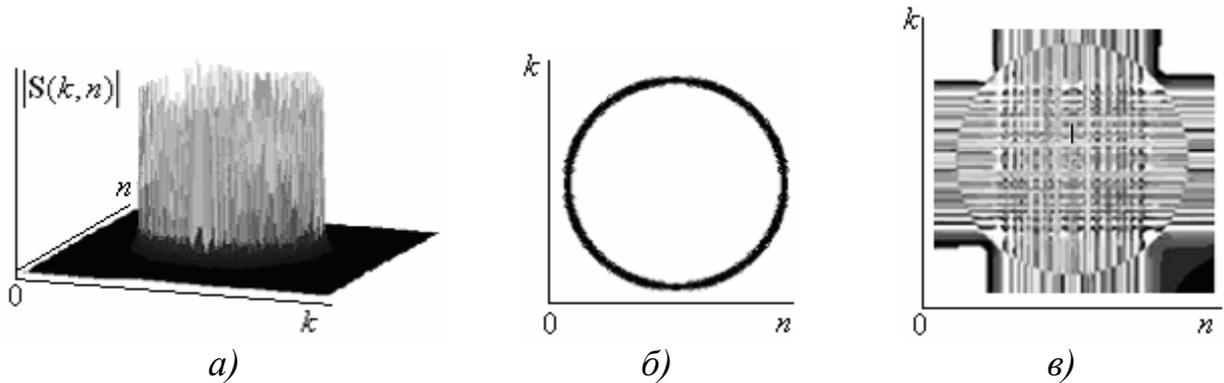


Рисунок 24 – Спектральные характеристики: а) кольцевой спектр передаточной функции точки; б) вид кольцевого спектра в плане; в) фазовый спектр

На рисунке 25, а изображен трехточечный объект, реконструированный по траекторному сигналу. Точки удалены от центра синтезирования апертуры на 14λ . Расстояние между точками 2.8λ .

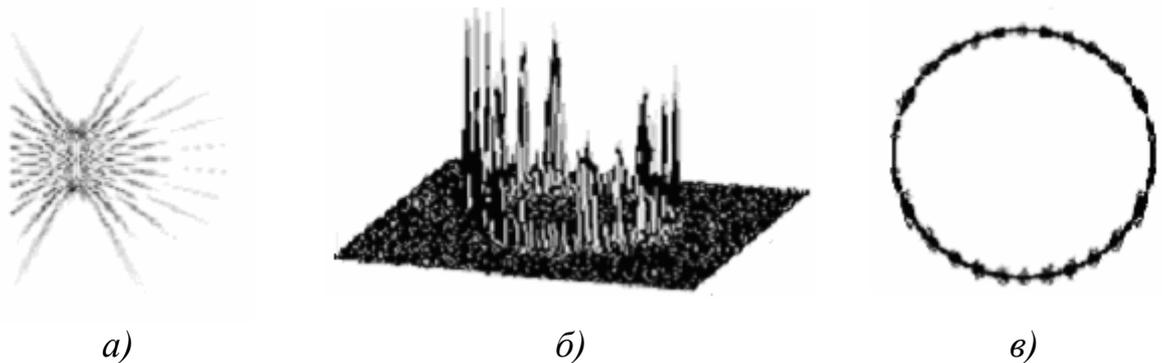


Рисунок 25 – Круговой синтез апертуры: а) реконструированный по траекторному сигналу трехточечный объект; б) его спектр; в) вид спектра в плане

Как видно из рисунка 25, б спектральная функция на кольце сильно изрезана. Эта изрезанность есть результат интерференционных проявлений.

Четвертый раздел посвящен модельной томографии гомогенных областей с включенной неоднородностью [10, 11]. Точки модели гомогенной области распределены равномерно с шагом $\lambda/7$ и имеют одинаковую амплитуду рассеяния за исключением точек включенной неоднородности.



Рисунок 26 – Результаты моделирования томографического процесса: а) гомогенная область с пустотой внутри; б) гомогенная область с неоднородностью

Результат моделирования гомогенной области с пустотой в виде квадрата представлен на рисунке 26, а. На рисунке 26, б в гомогенную область включена неоднородность с модулем комплексной амплитуды рассеяния, превышающей

в пять раз модуль комплексной амплитуды рассеяния точек охватывающей области. Апертуры синтезировались по двум ортогональным траекториям.

На рисунке 27 даны характеристики контрастной чувствительности.

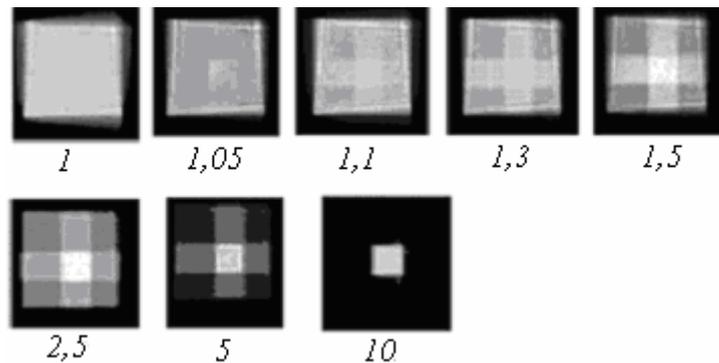


Рисунок 27 – Характеристики контрастной чувствительности

Под контрастной чувствительностью подразумевается различимость двух гомогенных областей с незначительным отличием коэффициентов рассеяния волн их точками. Если модули комплексных амплитуд рассеяния точек внутренней области отличаются от модулей комплексных амплитуд рассеяния точек охватывающей области в 1,05, в 1,1, в 1,3, в 1,5, в 2,5, в 5 и в 10 раз, то ряд томограмм с указанными отличиями гомогенных областей будет выглядеть так, как показано на рисунке 27. Заключительная часть четвертого раздела посвящена исследованию устойчивости предложенного метода томографии к шумам.

В пятом разделе представлены результаты экспериментальной проверки предложенного метода реконструкции изображения на акустических и электромагнитных волнах. На рисунке 28 показан траекторный сигнал от металлического стержня и его спектр, полученный на акустических волнах в водной среде.

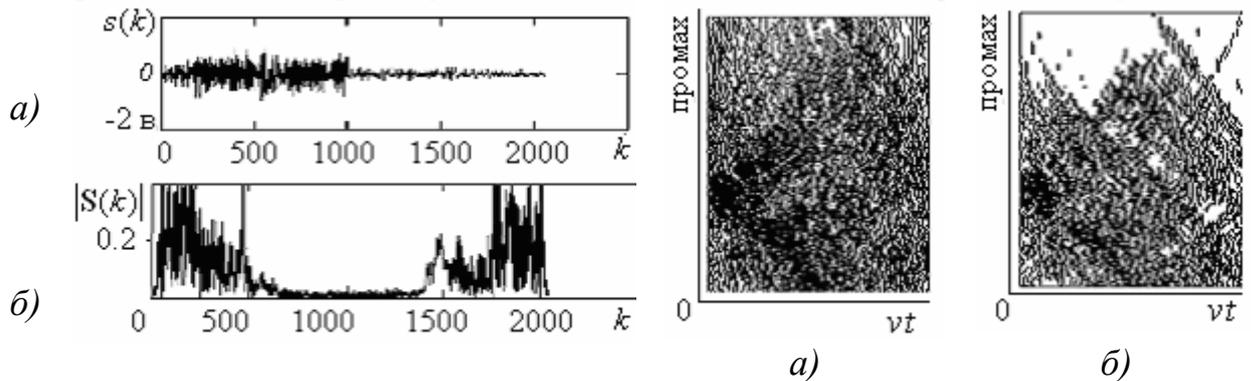


Рисунок 28 – Данные эксперимента: а) траекторный сигнал от стержня; б) спектр сигнала

Рисунок 29 – Результат реконструкции изображения: а) до НЧ коррекции; б) после НЧ коррекции

На рисунке 29 представлено реконструированное изображение металлического стержня в сечении, полученное в результате обработки траекторного сигнала, (рисунок 28, а). Сечение стержня отображается в виде сгустка повышенной плотности, прижатого к оси промаха. Изображение смещено влево, так как влево сдвинута реализация траекторного сигнала (рисунок 28, а).

Вторая половина раздела посвящена экспериментальной томографии на электромагнитных волнах при частоте 8 – 10 ГГц. В разделе выводится мате-

матическое выражение для расчета траекторного сигнала с учетом его распространения в двух средах. Преобразование Фурье от рассчитанного траекторного сигнала для биологического объекта даёт двухкомпонентный характер спектра, а результаты экспериментальной проверки (рисунок 30) подтверждают этот факт. Низкочастотная компонента спектра (рисунок 30) соответствует распространению волны в воздушной среде, а высокочастотная компонента отвечает за распространение в тканях пациента.

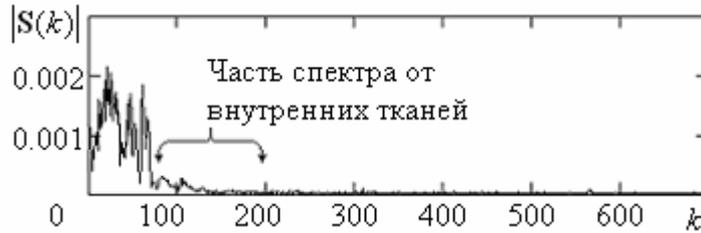


Рисунок 30 – Спектр сигнала от биологического объекта

Корреляционная обработка низкочастотной компоненты с помощью опорных сигналов, сформированных для длины волны в воздушной среде, позволяют получить изображение непрозрачного биологического объекта с низким разрешением, что не представляет интереса для томографии.

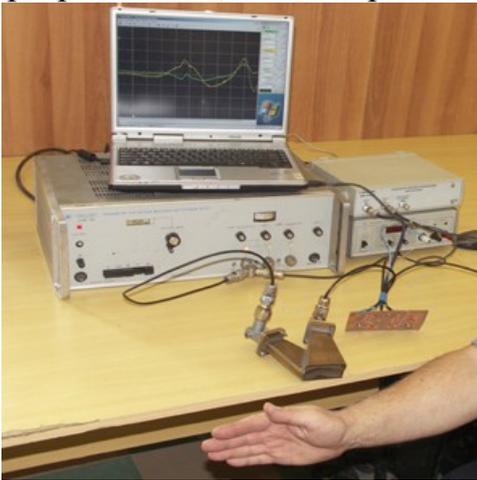


Рисунок 31 – Экспериментальная установка для томографирования

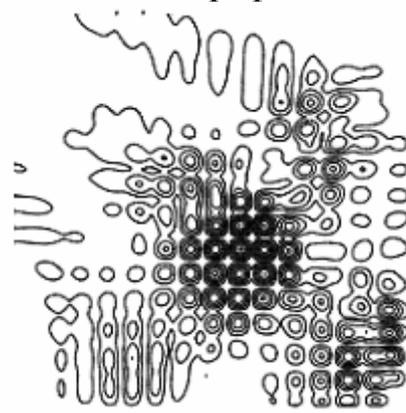


Рисунок 32 –Изображение пальца в сечении

Чтобы осуществить корреляционную обработку высокочастотной компоненты сигнала, несущей информацию о внутренней структуре биологического объекта, необходимо сформировать опорные сигналы при длине волны, с которой она распространяется в тканях биологического объекта. Эта волна в 6–7 раз короче волны в воздушной среде и равна примерно 4 мм [12]. Корреляционная обработка сигнала от внутренних тканей опорными сигналами, сформированными при $\lambda = 4$ мм, позволяет получить разрешение равное 0,8 мм. Такая разрешающая способность вполне приемлема для медицинских исследований.

Экспериментальная установка показана на рисунке 31. Изображение пальца в сечении представлено на рисунке 32. Этот результат показывает возможность предложенного метода реконструкции изображения объекта осуществлять селекцию сигнала по скорости распространения электромагнитной волны в разных средах, что позволяет выделить внутреннюю структуру изображения объекта, относящегося к конкретной среде.

В заключении сформулированы результаты диссертационной работы:

1. Разработаны научные основы непроекционных методов реконструкции изображения объектов по траекторному сигналу при локации объекта монохроматическим сигналом с синтезом апертуры антенны [1, 3, 5, 9, 11, 12, 21].

2. Разработан алгоритм синтеза апертуры антенны в пространстве оригиналов на базе применения взаимных корреляционных функций, полученных сверткой объектного траекторного сигнала с набором опорных сигналов от точечных объектов, распределенных на разном удалении от траектории движения, с последующим формированием из набора одномерных корреляционных функций двумерных матриц изображения цели. Показано, что предложенный способ обеспечивает реконструкцию изображения объектов при расположении локатора как в зоне Френеля, так и в зоне Фраунгофера по отношению к апертуре объекта [1, 4, 6, 11, 21, 22, 23].

3. Разработанные алгоритмы реконструкции изображения и программное обеспечение реализованы в методике натуральных измерений пролетных параметров локатора у цели по реальному траекторному сигналу [1, 3, 4, 7, 8, 10, 11].

4. Предложен способ реконструкции изображения объекта при синтезе апертуры по замкнутой траектории (круговой или квадратной) в пространстве оригиналов при монохроматическом зондировании пространства. Разработан алгоритм синтеза апертуры антенны по замкнутой траектории в пространстве оригиналов в полярных координатах с переходом к двумерным матрицам изображения объектов в декартовых координатах. Разработанный алгоритм способа доведен до программной реализации [4, 6, 11].

5. С помощью разработанных программно-алгоритмических комплексов исследованы особенности апертурного синтеза на малой дальности от объекта при прямолинейной, круговой или квадратной траекториях носителя. Впервые получены функции рассеяния реконструированных объектов, их пространственные спектры на кольце [1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 17, 19, 20].

6. Доказаны следующие свойства изображений точечных объектов:

– отсутствие колец Эйри при синтезе апертуры по прямолинейной траектории [1, 3, 5, 7, 8, 13];

– возможность перехода кругового апертурного синтеза в синтез апертуры по прямолинейной траектории при учете радиального ослабления отраженного сигнала [4, 5];

– совпадение передаточных функций точечных объектов, полученных предложенными методами, с передаточными функциями, полученными проекционными методами [5].

7. Предложен метод устранения интерференции при использовании монохроматического зондирующего сигнала с применением многоакурсного синтеза апертуры антенны [2, 5, 7, 8, 10].

8. Разработаны приёмы для обработки наложенных и развернутых на произвольный угол квадратных матриц изображения. Показано, что эта операция неэквивалентна операции обратного проецирования [5].

9. В результате моделирования многоакурсного синтеза апертуры показана возможность томографирования гомогенных областей с включенной неод-

нородностью [8].

10. Экспериментально доказана возможность реконструкции изображения объектов путем синтеза апертуры антенны на акустических и электромагнитных волнах [3, 10].

11. Экспериментально и на модели установлено, что потеря постоянной составляющей и прилегающих к ней низких частот приводит к эффекту синтеза апертуры антенны с исключенным центром. Такая апертура дает в плане передаточную функцию точки с четырьмя лепестками вместо двух.

12. Экспериментально показано, что отраженный от биологического объекта сигнал состоит из суммы двух сигналов. Первый из них (с узким спектром в районе нулевой частоты) образован отражениями от границы двух сред (воздух – биологическая ткань). Вторым сигналом с широким спектром и малой спектральной плотностью образован отражениями от внутренних тканей [10].

13. Получена картина сечения биологического объекта за счет корреляционной обработки сигнала от внутренних тканей, опорными сигналами, сформированными при длине волны в тканях биологического объекта $\lambda=4$ мм. Достигнута разрешающая способность 0,8 мм при монохроматическом зондировании на частоте 8,3 ГГц, что приемлемо для использования в медицине [10].

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Ющенко, В. П. Метод построения изображения объекта по доплеровскому сигналу с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // Науч. вест. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1999. – № 3. – С. 36–49.
2. Ющенко, В. П. Интерференцию можно устранить [Текст] / В. П. Ющенко // Науч. вест. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. – № 1 (8). – С. 185–192.
3. Ющенко, В. П. Доплеровское сканирование структуры объекта с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 2. – С. 41–45.
4. Ющенко, В. П. Круговой апертурный синтез для целей томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Автометрия. – 2002. – Т. 38, № 6. – С. 28–33.
5. Ющенко, В. П. Сопоставление двух методов когерентной томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Радиотехника и электроника. – 2004. – № 2. – С. 196–205.
6. Ющенко, В. П. Синтезирование апертуры по квадратной траектории для когерентной томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2004. – № 2. – С. 18–27.
7. Ющенко, В. П. Устранение интерференции при томографировании с помощью апертурного синтеза [Текст] / В. П. Ющенко // Науч. вестн. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – № 1 (16). – С. 181–188.
8. Ющенко, В. П. Восстановление внутренней структуры гомогенных объектов с включенной неоднородностью [Текст] / В. П. Ющенко // Автометрия. – 2005. – Т. 41, № 1. – С. 50–57.
9. Ющенко, В. П. Устойчивость к шумам метода томографирования с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // Изв. вузов России. Сер. Радиоэлектроника. – 2005. – № 3. – С. 3–9.

10. Монохромная СВЧ томография с синтезом апертуры методом взаимных корреляций [Текст] / В. П. Ющенко, С. А. Литвиненко, В. Б. Ромодин, Л. В. Щебалкова // Автометрия. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 28–38.
11. Yushchenko W. P. Object Image Reconstruction by Using Trajectory Doppler Signal in The Process of Monochromatic Probing and Circular Aperture Synthesis of Antenna. // Electrical and Electronic Engineering. P-ISSN; 2162-9455, e-ISSN: 2162-8459, 2012, 2(2): 1-6, DOI: 10.5923/j.eee. 20120202.01, <http://www.sapub.org/journal/archive.aspx?journalid=1008>
12. Ющенко, В. П. Обратимость непроекционной реконструкции изображения при монохроматическом зондировании и синтезе апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012» - выпуск 3. Том 11. – Одесса: КУПРИЕНКО. 2012. ЦИТ: 312-119 – С. 10-16.

Публикации в других научных изданиях

13. Ющенко, В. П. Два метода когерентной томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Сб. науч. тр. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – № 3 (25). – С. 24–30.

Публикации в материалах конференций

14. Ющенко, В. П. Исследование диаграмм обратного рассеяния волн на малой дальности с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // 4-е Уткинские чтения. - Санкт-Петербург. : БГТУ "Военмех", 2009. - Т. 2. - С. 58-62
15. Ющенко, В. П. Помехоустойчивость систем ближней локации с синтезированной апертурой антенны [Текст] / В. П. Ющенко, В.В. Бычков // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: тр. международной науч.-техн. конф. – Пенза 2011.
16. Ющенко, В. П. Рациональное построение доплеровских систем ближней локации угломерного типа с синтезом апертуры [Текст] / В. П. Ющенко, В.В. Бычков // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: тр. международной науч.-техн. конф. – Пенза 2011.
17. Ющенко, В. П. Интроскопия с помощью синтеза апертуры для поиска предметов скрытых под одеждой [Текст] / Н. М. Федуличева, С. А. Лукьяненко, В. П. Ющенко // Наука, промышленность, оборона : тр. VII всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – С. 87–93.
18. Ющенко, В. П. Траекторный контроль с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко, С. А. Лукьяненко, Н. М. Федуличева // Наука, промышленность, оборона : тр. VII всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – С. 105–111.
19. Ющенко, В. П. Применение синтеза апертуры в ближней локации [Текст] / В. П. Ющенко // Вторые Рдултовские чтения : науч.-техн. конф. – СПб. : Изд-во БГТУ, 2008. – С. 52–58.
20. Ющенко, В. П. Прямолинейный апертурный синтез для определения пролетной ситуации [Текст] / В. П. Ющенко // Актуальные проблемы развития

- автономных информационных и управляющих систем : сб. тр. V всерос. науч.-техн. конф. – СПб. : Изд-во Военмех, 2003. – Т. 2. – 5 с.
21. Ющенко, В. П. Сравнение различных методов и возможностей апертурного синтеза в ближней локации [Текст] / В. П. Ющенко // Конверсия, оборона, безопасность : всерос. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2003. – С. 102–108
 22. Ющенко, В. П. Метод построения изображения объекта по доплеровскому сигналу с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // АПЭП-98: Актуальные проблемы электронного приборостроения : тр. IV междунар. конф. – Новосибирск, 1998. – Т. 10. – С. 47–52
 23. Ющенко, В. П. Особенности в постановке задачи реконструкции при томографии с помощью синтезированной апертуры и ее решение [Текст] / В. П. Ющенко // ИСТ'2003: Информационные системы и технологии : междунар. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – Т. 1. – С. 158–162 .
 24. Yushchenko, V. P. A Circular Aperture synthesis for Tomography // OnScience and Technology: The 6th Russian-Korean International Symposium KORUS22 2002. / At the – Novosibirsk State Technical University Russia, June 24–30, 2002.–Vol. 1.– P. 374–378.

Патенты и авторские свидетельства

25. Пат. 2066060 Российская Федерация, МПК⁶ G01S 13/90. Способ картографирования с помощью синтезированной апертуры [Текст] / Ющенко В. П. ; заявитель и патентообладатель Ющенко Валерий Павлович. – № 93008773/09 ; заявл. 16.02.1993 ; опубл. 27.08.1996, Бюл. № 24 – 10 с.
26. А. с. 325757 СССР, МКИ³ 6 G 01 S 13/04. Способ картографирования с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко. – № 4513396 ; заявл. 24.04.89 ; опубл. 5.05.91. – 10 с.

отчет о НИР

27. Исследование возможностей апертурного синтеза для целей томографии [Текст] : отчет о НИР / Новосиб. электротехн. ин-т ; рук. В. П. Ющенко ; исполн. : А. И. Харламов, М. И. Гольберг, П. А. Дмитриенко. – Новосибирск, 1992. – 58 с. – № гос. регистрации 01920005752
28. Исследование помехоустойчивости автономных систем управления: отчет о НИР Шифр «Нормаль» / НГТУ; рук. В.Н.Легкий; исполнители: Шумейко В.А., Ющенко В.П., Борисова И.В. – Новосибирск, 2012г. – 188с.
29. Исследование по воздействию излучения на объекты: отчет о НИР / ОАО «НИИЭП»; рук. В.Н.Легкий; исполнители: Колышев Д.В., Ющенко В.П., Борисова И.В. – Новосибирск, 2012г. – 196с.
30. Исследование алгоритмов и систем признаков детального распознавания воздушных целей: отчет о НИР / НП СибНИЦ «Безопасность»; рук. В.Н.Легкий; исполнители: Ющенко В.П., Борисова И.В., Санков О.В. – Новосибирск, 2012г. – 196с.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16, объём 2.1 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 177 подписано в печать xx xx .2013 г.