

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук
Легкий В.Н.

Новосибирск – 2013

ВВЕДЕНИЕ	7
1 АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ НА МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ КАК ФАКТОР ПОИСКА ПУТЕЙ ИХ РАЗВИТИЯ	30
1.1 Апертурный синтез в науке и технике.....	30
1.2 Историческая справка об использовании апертурного синтеза на малой дальности.....	31
1.3 Анализ состояния вопросов и тенденции развития синтеза апертуры на малой дальности	33
1.4 Апертурный синтез в спектральной области (метод Д.Менсы).....	38
1.5 Проблемы применения методов И.Радона и Д.Менсы для реконструкции изображения с помощью синтеза апертуры на малой дальности	45
1.6 Обзор методов построения изображений в сечении, постановка задачи исследования	48
1.6.1 Алгоритм восстановления, основанный на преобразовании Радона.....	50
1.6.2 Алгоритм обратного проецирования	53
1.6.3 Реализация оператора обратного проецирования.....	56
1.6.4 Реконструкция с помощью операции свертки и обратного проецирования	58
Выводы	60
2 РЕКОНСТРУКЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПРИ СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ ДЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ	61
2.1 Теоретическое обоснование метода	61

2.2 Алгоритм обработки сигнала и построения изображения.....	68
2.3 Сопоставление результатов модельной реконструкции изображения точечных объектов предлагаемым методом с результатами томографии по методу Д.Менсы.....	80
2.4 Применение теоремы о центральном сечении к результатам.....	90
томографии методом прямолинейного синтеза апертуры	90
2.5 Проблемы интерференции при когерентной томографии.....	96
2.6 Операции с матрицами изображения после синтеза апертуры для устранения интерференции.....	102
2.7 Отличия предлагаемого метода от известного метода Радона, метода обратного проецирования и метода обращения по Фурье.....	109
2.8 Сравнение точечной и непрерывной моделей объекта.....	116
2.9 Проверка корреляционного метода синтеза апертуры антенны в задачах траекторного контроля для реальных сигналов.....	127
Выводы	134
3 СИНТЕЗ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЛОКАТОРА	136
3.1 Постановка задачи кругового синтеза апертуры в области.....	136
пространственных функций	136
3.2 Суть кругового синтеза апертуры в области пространственных функций...	137
3.2 Математическое и модельное описание кругового синтеза	138
апертуры с помощью взаимных корреляционных функций	138

3.4 Синтезирование апертуры для квадратной траектории	159
3.5 Сопоставление алгоритма реконструкции на основе взаимных корреляционных функций с алгоритмами реконструкции изображения по проекциям	171
Выводы	180
4 МОДЕЛЬНОЕ ТОМОГРАФИРОВАНИЕ ГОМОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ВКЛЮЧЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ	183
4.1 Существо вопроса и постановка задачи	183
4.2 Выбор метода томографирования	183
4.3 Модель гомогенной области	184
4.4 Результаты модельного томографирования гомогенной области с включенной неоднородностью	187
4.5 Устойчивость к шумам непроекционного метода реконструкции изображения объектов	189
4.6 Результат томографии точечных объектов, наблюдаемых в адитивном гауссовом шуме	192
4.7 Результат томографирования гомогенных объектов с включенной пустотой при наличии гауссова шума	195
4.8 Количественная мера оценки качества изображения в шумах	198
4.9 Характеристика контрастного разрешения для метода	200
томографии при синтезе апертуры в двух ортогональных направлениях	200
Выводы	201

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	202
5.1 Цели и задачи эксперимента, возможные пути получения экспериментальных результатов	202
5.2 Сущность экспериментов Д.Менсы	205
5.3 Выбор типа волн и среды томографирования.....	209
5.4 Эксперименты по реконструкции акустического изображения объекта в задачах траекторного контроля	210
5.4.1 Выбор способов проведения экспериментов и построение экспериментальной установки.....	210
5.4.2 Устройство экспериментальной установки.....	216
5.4.3 Экспериментальные траекторные сигналы и их спектры, сопоставление с модельными траекторными сигналами, результаты реконструкции	223
5.4.4 Обсуждение экспериментальных результатов ультразвуковой локации.	241
5.5 Эксперименты по томографированию в диапазоне частот 8-10 ГГц электромагнитного излучения	243
5.5.1 Синтез апертуры с учетом границы двух сред.....	247
5.5.2 Результаты экспериментов по томографированию	253
5.5.3 Объяснение ячеистой структуры изображения	266
5.5.4 Анализ результатов эксперимента	267
Выводы	269
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	271
Основные результаты диссертационной работы	271

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	274
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	288
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	288
Список сокращений.....	288
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	289
Символы операций.....	289
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	290
Программа и результаты расчета двумерной взаимной корреляционной функции для точечного объекта.....	290
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	291
Программа и результаты расчета передаточной функции точки.....	291
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	292
Программа и результаты расчета двумерной корреляционной функции для точечного объекта при синтезе апертуры антенны по круговой траектории движения.....	292
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	293
Программа и результаты расчета передаточной функции точки при синтезе апертуры антенны по круговой траектории движения.....	293
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	294
Сведения о практическом использовании результатов диссертации.....	294

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Поиск новых методов реконструкции изображения объектов, основанных на непроекционных способах сбора данных, расширяет возможности исследования объектов. Имеет большое значение 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 Радонам в 1917 году, а Годфри Ньюболд Хаунсфилд и Аллан МакЛеод Кормак переоткрыли изобретение И. Радона.

В настоящее время метод реконструкции изображения по проекциям, основанный на преобразовании И. Радона, широко используется в рентгеновской томографии. Процесс измерения проекций осуществляется следующим образом. Между источником и детектором рентгеновского излучения помещают пациента и регистрируют интенсивность пройденного сквозь него излучения. Затем перемещают источник излучения с детектором в направлении, перпендикулярном проекционному лучу в плоскости, секущей пациента, сохраняя параллельность проекционного луча первоначальному положению. При каждом перемещении регистрируют детектором интенсивность пройденного сквозь объект луча. Далее поворачивают проекционный луч на некоторый угол, оставаясь в плоскости сечения пациента, и возобновляют процесс перемещения луча и регистрации проекций. Проекционные лучи поворачивают в плоскости секущей

пациента в пределах от 0° до 360° . Далее, используя преобразование Радона, восстанавливают картину сечения пациента по проекциям.

Предпринимаются попытки вместо рентгеновского излучения использовать электромагнитные волны. В Томском университете [96, 97] реализован радиоволновой томограф с монохроматическим излучением в трёхсантиметровом диапазоне волн по выше описанной методики просвечивания исследуемого объекта. При этом использовалась двойная фокусировка, чтобы получить тонкий проекционный луч, так как толщина луча определяет разрешающую способность проекционного метода реконструкции изображения. К сожалению, не представлены результаты работы с биологическими объектами.

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 предлагалось использовать монохроматический зондирующий сигнал для реконструкции изображения объектов проекционными методами с помощью кругового апертурного синтеза. Новизна их работы состояла в том, что вместо просвечивания объектов они стали работать с отражённой от объекта волной. Проекционный метод с синтезом апертуры по кругу был опробован ими в диапазоне СВЧ на волне 3 см. Получены передаточные функции одноточечных объектов (функции рассеяния одноточечных объектов), при различных секторах синтеза апертуры.

При представлении метода, в котором для синтеза апертуры по кругу используется вращение объектов вокруг своей оси, авторы работы ограничились демонстрацией результатов реконструкции точечных объектов. Однако основные проблемы начинаются при исследовании многоточечных, т. е. протяженных объектов. Одной из таких проблем является интерференция. При реконструкции точечных объектов она не проявляется на восстановленных изображениях. В работе [31] проблемы интерференции не были выявлены.

По материалам открытой печати зарождение апертурного синтеза на малой дальности можно отнести к 1970 годам с появлением работ по голографии и томографии. В это время вышли работы, указывавшие на тесную связь голографии и апертурного синтеза [18, 19, 50, 60, 112].

Появились также статьи, указывающие на голографическую трактовку эффекта Доплера [99, 112]. В настоящее время доплеровские измерительные системы ближней локации работают по-прежнему на упрощенных принципах синтеза апертуры, не используя многих информационных возможностей, которые может предоставить полноценный синтез апертуры антенны. Объяснить это можно, если исходить из целесообразности. Нужно ли расширять количество информации об объекте, если его все равно придется разрушать? Совершенно другой оттенок вопрос целесообразности приобретает в задачах визуализации пролётной ситуации на этапе испытаний и отработки всей системы и отдельных узлов зенитного комплекса. В этом случае информация о промахе и моменте взаимодействия может оказаться для разработчиков особенно ценной, позволяющей корректировать его в направлении, повышения эффективности.

Одним из недостатков проекционного метода с круговым синтезом апертуры является то, что на реконструированном изображении присутствуют артефакты в виде концентрических кругов вокруг максимума передаточной функции точки, обусловленные большим уровнем боковых лепестков передаточной функции точки. Для избавления от них была предложена двухпозиционная локация или многочастотное зондирование, что эквивалентно расширению спектра зондирующего сигнала и, фактически, отступлению от применения монохроматического зондирования объектов.

Известный метод реконструкции, использующий вращение объектов при сборе данных [31], относится как к проекционной томографии, так и к круговому апертурному синтезу. К сожалению, проекционные методы реконструкции с синтезом апертуры по кругу не применимы в задачах визуализации пролётной ситуации, то есть в задачах, где требуется восстановить пролётные параметры

ракеты около цели. Это связано с тем, что проекции регистрируются при круговом обходе объекта, а зенитную ракету невозможно заставить облетать цель по круговой траектории. Поэтому есть потребность в других непроекционных методах реконструкции изображения объектов, основанных на движении локатора по прямолинейной траектории.

В настоящий момент существует острая необходимость в применении монохроматических сигналов. Монохроматический зондирующий сигнал используется в зенитных ракетных комплексах. Вызывают интерес диагностические качества монохроматического сигнала у специалистов, связанных с томографией и геолокацией. В геолокации и томографии зондирующему сигналу приходится распространяться в дисперсионных средах. Особенностью дисперсионной среды является то, что разные участки спектра широкополосного зондирующего сигнала имеют не одинаковую скорость распространения. Это приводит к дисперсионным искажениям распространяющегося импульсного сигнала. Он искажается в такой степени, что по нему не возможно реконструировать чёткое изображение объекта. В частности это имеет место при ультразвуковой томографии. Монохроматический сигнал не испытывает дисперсионных искажений при распространении в неоднородных дисперсионных средах, поэтому есть предпосылки его использования в геолокации и в томографии.

Понятие монохроматичности связано с шириной спектра зондирующего сигнала. Существует связь монохроматичности с когерентностью. Эта связь выражается соотношением

$$l_{\text{ког}} \approx \lambda^2 / \Delta\lambda = c / \Delta f ,$$

где $l_{\text{ког}}$ – пространственная длина когерентности, λ – длина волны, f – частота зондирующего сигнала, Δf – абсолютная нестабильность частоты, c – скорость света.

Зондирующий сигнал в системах ближней локации с монохроматическим излучением создаётся кварцевыми генераторами, которые обеспечивают относительную нестабильность $\Delta f / f \approx 10^{-6}$. При этом абсолютная нестабильность

на частоте 10 ГГц будет равна $\Delta f = 10^{-6} f = 10^4$ Гц. Тогда длина пространственной когерентности составит. $l_{\text{кор}} = c / \Delta f = 3 \cdot 10^8 / 10^4 = 30$ км. Так как взаимодействие локатора с целью происходит на участке траектории длиной 1 км, который значительно меньше длины пространственной когерентности, то можно считать, что условие когерентности обеспечивается. Учитывая связь когерентности и монохроматичности, можно видеть, что условие монохроматичности также выполняется.

Отсутствие радиального разрешения у монохроматического сигнала сдерживает его применение. В связи с этим актуальной является научная проблема обеспечения радиальным разрешением локаторов с монохроматическим излучением. Такую возможность может предоставить апертурный синтез, если найти способы управления сфокусированным пятном у синтезированной апертуры. Управление пятном позволяет просканировать пространство, окружающее ракету и построить изображение исследуемого объекта с координатной привязкой к конечному участку траектории. В результате определяется промах ракеты.

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 добиться радиального разрешения возможно только за счёт использования фокусирующих свойств синтезированной апертуры антенны. Для этого необходимо организовать перемещение локатора относительно исследуемого объекта с известной скоростью. В настоящее время фокусировку синтези-

рованной апертуры во время реконструкции изображения объектов реализуют проекционными методами. При этом сбор данных для реконструкции производят по кругу в спектральной области [31].

Традиционно синтез апертуры антенны применяется в бортовых РЛС бокового обзора для картографирования земной поверхности. Синтезированная апертура – это условная апертура воображаемой антенной решетки, которая синтезируется в результате движения локатора по траектории летательного аппарата одним единственным антенным элементом с изотропной диаграммой направленности. Единственный движущийся элемент, занимая ряд последовательных положений на траектории, ведет себя как полноценная антенная решетка с множеством изотропных 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 на малой дальности 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 [54, 55, 56, 57]. Если при картографировании земли обходятся радиальным разрешением от 1,5 м до 30 см, то в задачах с реконструкцией изображения объектов 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 являет-

ся путь синтеза апертуры при непрерывном зондирующем сигнале с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала. Широкий спектр обеспечивается за счет линейной частотной модуляции зондирующего сигнала. Обработка отраженного частотно-модулированного сигнала методом синтеза апертуры с подробным описанием применяемых математических приемов изложена в [53]. Нашей задачей является синтез апертуры при монохроматическом зондирующем сигнале, где разрешение достигается за счет фокусировки синтезированной апертуры. В [31] подробно рассмотрены вопросы разрешающей способности круговой синтезированной апертуры. Достижимое разрешение за счет фокусировки составляет: $\Delta R = \lambda/5$ [31].

Теоретически установить границы достижимого разрешения при синтезе апертуры по кругу можно следующим образом. Для этого нужно использовать аналогию синтезированной апертуры и оптической линзы. Данная аналогия использовалась в [31]. В связи с этим можно воспользоваться известной из оптики формулой для определения радиуса центрального пятна дифракционной картины точечного источника [69, стр. 34, формула (1.6)]:

$$\rho = \frac{1,22\lambda}{2\alpha},$$

где ρ – радиус центрального дифракционного пятна, λ – длина волны, 2α – угловой размер апертуры.

При круговом синтезе угловой размер апертуры равен 2π и радиус центрального пятна составит, согласно приведенной выше формуле $\lambda/5$. В первом приближении радиус центрального дифракционного пятна можно принять в качестве характеристики разрешения линзы или синтезированной апертуры.

Благодаря такому высокому разрешению открывается возможность реконструкции изображения цели по траекторному сигналу с координатной привязкой к участку траектории синтеза апертуры. Построенное изображение цели в координатах промаха и расстояния вдоль траектории позволяет получить картину взаимодействия летательных аппаратов, восстановить пролётную ситуацию и использовать эту информацию для оценки работы комплекса. Кроме то-

го, высокое разрешение $\Delta R = \lambda/5$ позволяет применить фокусировку синтезированной апертуры для построения изображения при томографировании.

В настоящий момент не разработаны ни приемы такой реконструкции, ни теоретические основы синтеза апертуры антенны на малой дальности до объекта. 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 [31]. Такую регистрацию невозможно организовать при движении локатора по прямолинейной траектории. В связи с этим *основной задачей диссертации* является разработка научных основ непроекционных методов реконструкции радиолокационного изображения объектов синтезом апертуры антенны по траекторному сигналу при монохроматическом зондировании.

Главный недостаток проекционного метода, основанного на обратном преобразовании Радона, сопряжен с рядом ограничений, которые не допускают синтеза апертуры на малой дальности. Основное ограничение состоит в том, что при перемещении локатора в каждую точку регистрации проекции должен приходиться только один проекционный луч, рассеянный объектом волны. 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.Радона не рассматривалась. Требование И. Радона на регистрацию узкого луча для рассеянного излучения можно выполнить в том случае, если синтез апертуры осуществлять на большой дальности от объекта, когда его угловые размеры чрезвычайно 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. Подобным образом формулируется задача реконструкции изображения внутренней структуры объекта по траекторному доплеровскому сигналу. Такого рода задачи относятся к классу обратных задач.

В настоящее время не разработаны алгоритмы реконструкции изображения объектов с помощью синтеза апертуры 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 пролётной ситуации, обеспечивающих получение требуемого радиального разрешения без модуляции монохроматического зондирующего сигнала.

В работе [31] подробно рассмотрены вопросы разрешающей способности круговой синтезированной апертуры. О разрешающей способности синтезированной апертуры дают представление функции рассеяния точечных объектов при различных секторах синтезирования апертуры. В работе [31] 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 непроекционных методов реконструкции с известными методами.

Поскольку непроекционный метод предложен впервые, то необходима проверка его работоспособности и возможности применения на практике. В связи с этим *пятая задача* диссертационной работы является экспериментальная проверка предлагаемых 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 методов реконструкции с известными методами.

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. Возможен новый метод реконструкции изображения объектов при монохроматическом зондировании без регистрации проекций, применимый для восстановления пролётных ситуаций и томографии, 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. Создан новый алгоритм реконструкции изображения объекта по данным движущегося локатора по прямолинейной траектории с равномерной скоростью состоящий в следующем:

- рассчитывают опорные траекторные сигналы от точечных отражателей, расположенных на разном удалении от траектории движения локатора;

- получают наборы корреляционных функций в результате многократных сверток объектного траекторного сигнала с опорными траекторными сигналами точечных отражателей, из которых получается двумерная корреляционная функция в декартовой системе координат;

- совмещают секущие эту функцию на разной высоте горизонтальные плоскости с контурами сечений, из которых образуется радиолокационное изображение протяжённой цели с интерференционными проявлениями на изображении.

3. В результате преобразования Фурье от полученной двумерной корреляционной функции возможно получение полукольцевого спектра, изрезанность которого характеризует степень интерференционных проявлений.

4. Возможно ослабление интерференционных проявлений путем перемножения матриц из отсчётов корреляционных функций, полученных при разных направлениях движения локатора.

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

- расставляются опорные точки 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 локатора,
- 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,
- двумерная корреляционная функция объекта, а затем изображение строятся в декартовых координатах из центральных отсчётов одномерных корреляционных функций, располагаемых в местах нахождения опорных точек.

Научная новизна работы

1. Реализация принципа синтеза апертуры антенны отличается от известных 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 рас-

стоянии 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 многокурсного 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 СССР 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, быстром преобразовании Фурье и статической радиотехнике;
- 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. [Приложение Ж].

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». [Приложение Ж].

Апробация работы. Основные открытые 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 научно-техническая 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 опубликовано 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.

В первом разделе диссертационной работы определено место синтеза апертуры на малой дальности среди других областей науки и техники. Ссыл-

ками на публикации подтверждается популярность апертурного синтеза и широкое применение его в науке и технике.

Дана историческая справка о синтезе апертурной антенны на малой дальности. Из анализа литературных источников определено время начала использования фокусирующей способности синтезированной апертурной антенны для радиального разрешения. Анализируется современное состояние и достижения синтеза апертурной антенны на малой дальности. Показано, что в настоящее время известен лишь синтез апертурной антенны по методу Менсы в Фурье-области. Математическим фундаментом известного метода является обратное преобразование Радона, которое известно из литературных источников как метод восстановления изображения по проекциям. Дано детальное описание метода Менсы с его анализом и критикой. Обращено внимание на то, что теория Радона применима к апертурному синтезу при выполнении требований дальней зоны, что неприемлемо для синтеза апертурной антенны на малой дальности от объекта.

В заключение первого раздела дан подробный обзор современных методов реконструкции изображения по проекциям.

Второй раздел посвящен теоретическим аспектам синтеза апертурной антенны в пространственной области при движении локатора по прямолинейной траектории. В этом разделе раскрыты пункты 1, 2, 3, 4, положений, выносимых на защиту. Излагается сущность предлагаемого метода, и даются его теоретические основы. Разрабатывается теоретический аппарат синтеза апертурной антенны на базе применения взаимных корреляционных функций объектного траекторного сигнала с набором опорных траекторных сигналов от точечных объектов, распределенных на разном удалении от траектории движения, с последующим формированием из набора одномерных корреляционных функций двумерных матриц радиолокационного изображения объектов.

Чтобы довести алгоритм до практического использования, он представляется в дискретном виде. По представленному алгоритму получены изображения простейших модельных объектов в виде одной, трех и множества точек. С по-

мощью реконструированных изображений протяженных объектов показано, что объекты на них отображаются вместе со своими диаграммами обратного рассеяния волн. Эти диаграммы являются результатом интерференции сигналов, отраженных от разных точек протяженного объекта.

С помощью полученных изображений объектов показано, что прямолинейный апертурный синтез не дает артефактов в виде колец Эйри.

Определены пространственные спектры передаточных функций одноточечных и многоточечных объектов. Показано, что пространственные спектры так же, как и в методе Менсы, расположены на кольце. Проиллюстрировано, что интерференция в случае протяженных объектов появляется не только в пространственной области, но и в спектральной области в виде изрезанности спектральной функции на кольце.

Проведено сопоставление передаточных и спектральных функций, полученных методом взаимных корреляций и методом Менсы. Совпадение сопоставляемых результатов говорит о том, что метод взаимных корреляций имеет такие же потенциальные возможности, что и метод Менсы.

Во втором разделе также показано, что непроекционный метод реконструкции изображения не противоречит теоремам о центральном сечении.

Помимо этого, во втором разделе значительное внимание уделено вопросам устранения интерференции. Предложен способ ее устранения. Он основан на многоракурсном синтезе апертур, который сводится к наложению повернутых матриц изображения с их последующим перемножением. Показано отличие метода поворота матриц изображения от метода обратного проецирования. Дано математическое описание метода поворота матриц.

Значительное место в разделе уделено подтверждению того, что метод взаимных корреляций не относится к методу реконструкции изображения по проекциям. Актуальность этого вопроса связана с совпадением результатов реконструкции изображения точечных объектов обоими методами.

В конце второго раздела уточняется многоточечная дискретная модель протяженного объекта путем сравнения ее с непрерывной моделью. Устанавливаются требования к дискретной модели, которые позволят приблизить ее к непрерывной модели.

Особое внимание уделено опробованию разработанного программного комплекса для обработки траекторных сигналов с полигона, полученных от реальной цели методом проездов. Результаты реконструкции изображения цели по этим сигналам с координатной привязкой к траектории синтеза апертуры демонстрируют эффективность и наглядность предлагаемого метода восстановления пролетной ситуации.

Третий раздел посвящен синтезу апертуры по замкнутой траектории. В этом разделе раскрыты пункты 1, 3, 5, 6, положений, выносимых на защиту. Дается математическое описание метода синтеза апертуры по круговой траектории и предлагается алгоритм реконструкции изображения объекта по траекторному сигналу, зарегистрированному локатором при движении по кругу относительно объекта. По предложенному алгоритму получены передаточные функции точки и их изображения. Впервые учтено радиальное ослабление сигнала в соответствии с формулой локации. Показано, что для точки, удаленной от центра синтезирования апертуры при учете радиального ослабления сигнала, автоматически создаются условия для прямолинейного апертурного синтеза. То есть при учете радиального ослабления передаточная функция точки для смещенного относительно центра объекта приобретает черты передаточной функции точки, соответствующей прямолинейному апертурному синтезу. Этим обоснована связь кругового и прямолинейного апертурного синтеза.

Выявлено, что если не учитывать радиального ослабления, то круговой апертурный синтез обладает одинаковой фокусировкой на все области внутри круговой апертуры. То есть точки, находящиеся в центре апертуры, дадут ту же передаточную функцию, что и точки, удаленные от центра и приближенные

к траектории синтеза апертуры. Показано, что апертурный синтез по замкнутой траектории сопровождается кольцами Эйри на изображениях объектов.

Продемонстрированы интерференционные явления при реконструкции изображения протяженных объектов с помощью кругового синтеза апертуры.

Представлены пространственные кольцевые спектры одноточечных и многоточечных объектов, проиллюстрировано проявление интерференции на кольцевом спектре.

Рассмотрен синтез апертуры по квадратной траектории. Показаны отличия в результатах апертурного синтеза по круговой и квадратной траектории. Рассмотрены результаты интерференции при реконструкции трехточечного объекта. Показаны проявления интерференции в пространственной и спектральной области при синтезе апертуры по квадратной траектории.

Представлены спектры на кольце для различных объектов при синтезе апертуры по квадратной траектории.

Конец раздела посвящен сопоставлению математических операторов и алгоритмов реконструкции метода взаимной корреляции с методами реконструкции по проекциям. Это сопоставление проведено для подтверждения отсутствия связи предложенных методов реконструкции с проекционными методами реконструкции. Единственным связующим звеном является совпадение результатов реконструкции точечных объектов.

В четвертом разделе решаются задачи приложения синтеза апертуры на малой дальности. В этом разделе раскрыты пункты 4, 6 положений, выносимых на защиту. Рассмотрены вопросы применения двухракурсного апертурного синтеза в томографии. Приводятся результаты томографии гомогенной области с включенной неоднородностью в виде полости, не заполненной веществом. Рассмотрен также случай модельного томографирования гомогенной области, внутри которой находится область с повышенной плотностью отражения.

Во второй части раздела рассмотрено влияние шумов на результаты реконструкции точечного объекта и гомогенной области с включенной неоднородностью.

родностью. Рассмотрение этих вопросов имеет существенное значение для внедрения апертурного синтеза на малой дальности в практическую томографию. Если модельная томография точечных объектов имеет теоретическое значение, то модельное томографирование гомогенных областей с включенной неоднородностью с учетом шумового воздействия имеет прикладное значение.

Результаты такого моделирования предназначены для того, чтобы продемонстрировать принципиальную возможность преодоления основных проблем, стоящих на пути создания томографа с монохроматическим зондированием. Главными из этих проблем являются интерференция и артефакты в виде колец Эйри. Кроме того, модельные томограммы, полученные при воздействии шумов, позволяют продемонстрировать корректность решения обратной задачи, устойчивость разработанных алгоритмов и эффективность вычислений.

Модель гомогенной области была создана из отражающих точек, имеющих одинаковые комплексные амплитуды рассеяния. Отражающие точки были равномерно распределены по всей моделируемой области с шагом $\lambda/7$.

Для моделирования пустот в гомогенной области точкам, принадлежащим пустоте, присваивалось нулевое значение модуля комплексной амплитуды рассеяния. Точкам, принадлежащим внедренной неоднородности с повышенной плотностью отражения, присваивалось значение модуля комплексной амплитуды рассеяния в несколько раз большее, чем точкам гомогенной области.

При томографии применялся двухракурсный синтез апертуры, т. е. моделировались два траекторных доплеровских сигнала от гомогенной области в двух взаимно перпендикулярных направлениях движения локатора. Таким образом, синтез апертуры осуществлялся также в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Эта мера позволила почти устранить интерференцию и получить приемлемое изображение. На томограммах хорошо просматривается пустота или область с повышенной плотностью отражения на фоне охватывающей гомогенной области. В конце четвертого раздела приведены характеристики контрастной чувствительности предлагаемого метода.

В пятом разделе приведены экспериментальные результаты. В нем экспериментально подтверждены пункты 1, 2, 3 положений, выносимых на защиту. Формулируются цели и задачи экспериментальной части, главными из которых являются проверка правильности теоретических представлений о процессе реконструкции изображения и накопление практического опыта по реализации предложенного метода для визуализации пролётной ситуации объектов, движущихся в водной и воздушной среде. При разработке экспериментальных установок учтен опыт проведения экспериментов Д. Менсой, а также использован опыт разработки доплеровских локаторов в НИИ электронных приборов. Приводится обоснование экспериментальной установки с гидролокатором, у которого для подавления турбулентных помех принимаемый сигнал сразу после приема переносится на высокую промежуточную частоту и после усиления и фильтрации возвращается на нулевую частоту.

Обоснована целесообразность использования дополнительного Гильбертовского (квадратурного) канала. Приведена функциональная схема экспериментальной установки и принципиальные схемы основных узлов локатора.

Приведены полученные на экспериментальной установке траекторные сигналы, а также их спектры и результаты реконструкции изображения объектов. Подробно объяснены экспериментальные результаты с привлечением моделирования. Из-за потери в трактах приемника постоянной составляющей и прилегающих к ней низких частот было использовано моделирование для объяснения экспериментальных результатов. На моделях показано влияние указанной потери на траекторные сигналы и результаты реконструкции изображения. Показано, что потеря низких частот спектра и постоянной составляющей эквивалентна апертурному синтезу с исключенным центром апертуры.

С помощью моделей дано объяснение влияния ширины диаграммы направленности в плоскости перпендикулярной траектории относительного движения на экспериментальные результаты. Эксперименты на акустических волнах в водной среде показали возможность локализации цели и возможность ко-

ординатной привязки ее к требуемому участку траектории, на котором синтезируется апертура антенны.

Вторая половина пятого раздела посвящена СВЧ-томографии на частоте 8 ГГц. Разработаны основы «сухого» томографирования, т. е. без помещения пациента в водную среду. Показано, что спектр траекторного доплеровского сигнала состоит из двух частей. Первая часть спектра имеет большую плотность и сосредоточена в области низких частот. Она обусловлена отражением мощного сигнала от границы двух сред (воздух – ткани пациента). Эта часть траекторного доплеровского сигнала распространяется в воздушной среде с длиной волны 3,6 см. Вторая часть спектра имеет слабую спектральную плотность, которая простирается далеко в область верхних частот и обусловлена отражением сигнала от внутренних тканей пациента на волне длиной 6 мм. Для выделения сигнала от внутренних областей предлагается сначала подавить активным аналоговым фильтром первую часть спектра, обусловленную отражением от границы двух сред, а затем подвергнуть корреляционной обработке оставшуюся часть сигнала. При этом опорные сигналы от точечных объектов предлагается формировать с длиной волны 6 мм. Такую длину имеет волна, распространяющаяся в тканях пациента. На примере томограммы пальца показана принципиальная возможность получения сигнала, отражённого от внутренних областей объекта, и проиллюстрирована возможность построения изображения его внутренней структуры по данному сигналу.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложениях приведены расшифровки сокращений, используемых в диссертации, результаты сопоставления двумерных корреляционных функций с нетипичными двумерными корреляционными функциями, полученными из набора одномерных корреляционных функций, сведения о практическом использовании результатов диссертации.

1 АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА АПЕРТУРЫ НА МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ КАК ФАКТОР ПОИСКА ПУТЕЙ ИХ РАЗВИТИЯ

1.1 Апертурный синтез в науке и технике

Апертурный синтез широко используется в науке и технике. Вот некоторые области, в которых задачи решаются с помощью апертурного синтеза.

1. Апертурный синтез в задачах картографирования земной поверхности [20, 35, 53, 54, 56, 102, 122, 127,].
2. Картографирование городов для решения геодезических задач [4, 115].
3. Картографирование полярных областей [54, 105].
4. Картографирование поверхности океанов. Определение мест зарождения волн, ветров и течений [113, 124].
5. Апертурный синтез в задачах наблюдения лесных массивов [38].
6. Апертурный синтез в задачах экологического контроля [116, 104].
7. Томография ионосферных слоев [110].
8. Картографирование минных полей (под поверхностное зондирование) [8, 108, 120, 123].
9. Создание сверхапертур для радиовидения [20].
10. Спутниковые РЛС с синтезированной апертурой, исследование Земли из космоса [35, 38, 52, 118].
11. Определение кильватерного следа кораблей и подводных лодок [106].
12. Апертурный синтез в астрономических задачах [101].
13. Апертурный синтез в гидролокации. Картографирование дна морей и океанов [40, 67, 119].
15. Определение геодинамических эффектов [125].
16. Ультразвуковая томография деталей. Неразрушающий контроль, дефектоскопия [13].
17. Картографирование ледовой обстановки [105].
18. Распознавание целей на фоне морской или земной поверхности [106].
19. Построение рельефа поверхности в трехмерных координатах [109].

20. Контроль над разливами нефти [104].

21. Когерентная томография, использующая фокусирующие свойства синтезированной апертуры [19, 31, 90, 98].

Перечисление областей применения апертурного синтеза, представленное выше, показывает популярность метода синтезированной апертуры и его огромные возможности.

Визуализации пролётной ситуации, распознавание образов, томография, интроскопия – это очень специфическая область апертурного синтеза, особенность которой в том, что синтез апертуры осуществляется на малой дальности от исследуемого объекта. В этой ситуации фокусировка синтезированной апертуры для получения радиального разрешения может быть использована очень эффективно, что невозможно в задачах дальней локации.

1.2 Историческая справка об использовании апертурного синтеза на малой дальности

Одним из достижений в развитии апертурного синтеза является попытка его применения в томографии. Анализ публикаций свидетельствует о том, что впервые такая попытка была осуществлена в 70–80 годах XX века. Ведь именно в этот период времени появилось достаточно много статей по томографии.

Специалистам, работа которых связана с апертурным синтезом, давно известно свойство синтезированной апертуры антенны фокусироваться на определенную дальность [56, стр. 119].

$$\delta_r = 3,5\lambda \left| \frac{R_n}{X_c \sin(\varphi_n)} \right|^2, \quad (1.1)$$

где δ_r – радиальное разрешение по дальности за счет фокусировки, λ – длина волны, X_c – длина синтезированной апертуры, φ_n – угол наклона диаграммы направленности к траектории движения, R_n – расстояние до объекта.

Из формулы (1.1) следует тот факт, что на малой дальности ($R_n / X_c \leq 1$) разрешение по дальности можно получить за счет фокусировки антенны, не

прибегая к модуляции зондирующего сигнала. Однако до 1970-х годов свойство фокусировки синтезированной апертуры практически не использовалось. Это было связано с тем, что синтезированная апертура использовалась только для сужения диаграммы направленности бортовой антенны самолетной РЛС при картографировании земной поверхности. В этой ситуации отношение $R_n / X_c \gg 1$, поэтому фокусировкой синтезированной апертуры невозможно было воспользоваться.

Несмотря на то, что фокусировка при синтезе апертуры известна с давних времен, ее не использовали при движении локатора по прямолинейной траектории для разрешения отдельных деталей объекта в радиальном направлении. Реализовать радиальное разрешение удалось лишь при круговом синтезе апертуры антенны.

Круговой синтез апертуры реализуется неподвижной антенной при вращении объекта. Вращение заимствовано из томографии, в которой проекции регистрируются по окружности.

Следует отметить, что известный круговой синтез апертуры характерен тем, что регистрируется не траекторный доплеровский сигнал, а значения спектра пространственных частот рассеянного объектом поля по кольцевой линии. Способ проведения измерений для получения отсчетов на круговой области пространственного спектра был независимо предложен М.Адамсом и А.Андерсеном [98]. Специфика обработки зарегистрированного спектра на кольцевой линии явно томографическая, поэтому неслучайно разработчики алгоритма восстановления изображения объекта по кольцевому спектру взяли на вооружение новую теорию. Ведь именно она отвечает потребностям обработки кольцевого спектра. Это так называемая теория о проекциях и центральном сечении, которая заимствована из томографии.

Основы теории «Восстановление изображения в сечении по проекциям» были разработаны немецким математиком И.Радоном в 1917 году.

Несмотря на то, что когерентную томографию вращающихся объектов сразу же отнесли к апертурному синтезу, ее не связали с линейным классическим апертурным синтезом. Из-за отсутствия такой связи многие специалисты по апертурному синтезу даже не обратили внимания на возможность синтеза апертуры в спектральной области.

1.3 Анализ состояния вопросов и тенденции развития синтеза апертуры на малой дальности

Первоначально апертурный синтез применялся в самолетных РЛС для картографирования земной поверхности [56]. В настоящее время наблюдается тенденция использования апертурного синтеза на малой дальности для целей томографии, интроскопии, радиовидения и траекторного контроля.

Идея апертурного синтеза проста. Чтобы различать мелкие детали на поверхности земли, нужен узкий луч. Ширина антенного луча определяется как $\theta = \lambda/D$, где D – длина апертуры антенны. Длина волны λ выбирается из требований всепогодности, чтобы ни туман, ни облака не могли препятствовать картографированию. Поэтому существует единственная возможность для сужения луча – это увеличение длины апертуры антенны (D).

Используя движение летательного аппарата, можно синтезировать протяженную антенную решетку одним элементом с изотропной диаграммой направленности. Сбор данных с этого единственного элемента осуществляется через равные промежутки времени, т. е. элемент занимает в эти моменты ряд последовательных положений на траектории. Если просуммировать сигналы, принимаемые единственным элементом в разные моменты с учетом их фаз, то эффект будет такой же, как и при суммировании сигналов от множества элементов, равномерно расположенных на траектории и образующих антенную решетку с большой апертурой, вытянутой вдоль траектории. Это и есть синтезированная апертура. Она в несколько раз превосходит длину самолета. В ре-

зультате луч получается настолько узким, что обеспечивает разрешение, соизмеримое с оптическими системами.

Второе свойство синтезированной апертуры – это возможность ее фокусировки на требуемую дальность. В дальней локации это свойство только учитывается, но не используется для получения разрешения в радиальном направлении. Из-за условий дальней локации воспользоваться фокусировкой невозможно (1.1).

Высокое угловое разрешение, а также свойство фокусировки оказались привлекательными для применения апертурного синтеза в томографии, начало применения которого, в данной области можно отнести к 1970-м годам прошлого века. Однако под влиянием достижений проекционной томографии к апертурному синтезу подошли с позиций радоновской томографии. С этого момента наступило время кругового апертурного синтеза, осуществляемого в спектральной области.

Чтобы проанализировать состояние этого периода когерентной доплеровской томографии, использующей фокусировку синтезированной апертуры за счет вращения, удобно обратиться к библиографическому указателю, приведенному в статье Д.Л.Менсы, Ш.Халеви, Г.Уэйда «Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображений на СВЧ» [31]. Вот некоторые источники указателя.

Перевод названия статьи [99] «Доплеровское и голографическое отображение вращающихся предметов». В статье показана тесная связь голографии и эффекта Доплера. В данной работе используется вращение картографируемого предмета для синтеза апертуры по кругу, при этом апертура синтезируется неподвижной антенной. В данном случае неподвижной антенной регистрируется кольцевой спектр рассеянного объектом поля, а не траекторный доплеровский сигнал. Поэтому здесь трудно усмотреть приемы классического апертурного синтеза, основанного на обработке траекторного доплеровского сигнала. В конечном счете, обратное преобразование Фурье от кольцевого пространственно-

го спектра дает эффект фокусировки так же, как и при синтезировании апертуры антенны по траекторному сигналу.

К идее кругового апертурного синтеза разработчиков подтолкнули успехи томографии, где проекции в процессе томографирования регистрируются по кругу.

Следует отметить, что когерентная томография в известных работах строится исключительно на принципе синтезирования апертуры по кругу неподвижной антенной и вращающимся объектом. Вот целый ряд публикаций, в которых на вращение объекта указывают сами заголовки статей:

[121] – перевод названия статьи с английского «Амплитудно-доплеровское отображение вращающихся предметов»;

[103] – перевод названия с английского языка «Многочастотное отображение радарных данных поворотной платформы»;

[114] – перевод названия с английского языка «Апертурный синтез вращающихся предметов в когерентном отображении»;

[100] – перевод названия с английского языка «Цифровая реконструкция изображений при их проецировании в полярных координатах».

Далее следует перечислить работы, в которых подготовлен подходящий математический аппарат. На их фундаменте базируется метод томографии вращающихся объектов. Эти работы носят самостоятельный характер и относятся к общей теории радоновской томографии.

[100] – перевод названия статьи с английского языка «Цифровое восстановление изображений по их проекциям в полярных координатах». Данная работа решает математические проблемы, обслуживающие потребности кругового апертурного синтеза. Рассматриваются вопросы преобразования Фурье в полярных координатах и переход в декартовую систему координат.

[72] – известная книга Габора Хермена по теории томографии. В ней рассматриваются теоретические и практические вопросы восстановления изображения по проекциям.

Таким образом, из перечисленных публикаций следует, что идея когерентной томографии с синтезом апертуры для вращающихся объектов была известна в начале 1970-х годов. Математическая база для этого метода синтеза апертуры была уже готова в тот период времени. Ее можно было взять из литературы, посвященной классической радоновской томографии.

В настоящее время метод томографии с синтезом апертуры по вращающимся объектам рассматривается большинством специалистов как интересный с общетеоретических позиций, но малоперспективный.

Монохроматическое излучение продолжает привлекать внимание ученых, работающих в области томографии и интроскопии. Можно найти работы, где монохроматическое излучение используется для диагностики онкологических заболеваний. Подбирая частоту зондирующего когерентного сигнала, можно настроиться на резонансное отражение или поглощение интересующих нас тканей и, таким образом, подчеркнуть их на реконструируемом изображении.

В работах Томского государственного университета (ТГУ) успешно развивается направление томографии на электромагнитных волнах с использованием монохроматического излучения [96, 33]. Сотрудниками ТГУ реализован метод восстановления изображения по проекциям, использующий когерентное СВЧ-излучение, но без применения апертурного синтеза [96].

Большое внимание СВЧ-томографии уделяется в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете на кафедре радиофизики. Сотрудниками кафедры развивается новое направление радиолокации – радиоинтроскопия, использующее различные методы радиофизики и радиотехники, а также современные средства обработки информации с целью обнаружения и исследования объектов в плотных материальных средах с помощью подповерхностной радиолокации. Разработана и создана аппаратура сантиметрового, дециметрового, метрового диапазонов волн.

Глубокими теоретическими исследованиями в области апертурного синтеза занимаются в Нижнем Новгороде. В институте прикладной физики имеется

много работ по многоакурсному апертурному синтезу, который используется для определения траектории движения источника звука в воде [40, 48, 66, 67]

В настоящее время синтезирование апертуры в интроскопии осуществляется с помощью коммутируемых протяженных антенных решеток. [64, 44]. Они позволяют исключить перемещение локатора и перейти от временных к пространственным отсчетам информации. Кроме того, коммутируемые антенные решетки позволяют синтезировать апертуру в твердых средах. Открывается возможность синтеза апертуры при геологической разведке или при неразрушающем контроле бетонных блоков, других деталей и сооружений.

В России сформировалось несколько центров интроскопии.

1. НИИ интроскопии ТГУ.
2. Научно-исследовательский институт интроскопии закрытого акционерного общества «Московское научно-производственное объединение “Спектр”».
3. Препринт / РАН; Институт прикладной физики (Нижний Новгород) и Нижегородский государственный университет им. И.Лобачевского.
4. Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, кафедра акустики.
5. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Радиофизический факультет, кафедра радиофизики.

В каждом из этих центров есть разработки, имеющие отношение к когерентной томографии, интроскопии и апертурному синтезу.

Апертурный синтез успешно применяется в ультразвуковой томографии [«Мульс – семейства ультразвуковых диагностических устройств на базе медицинского ультразвукового локатора с синтезированием апертуры; разработка НПО “Спектр”»]. Используется технология синтеза апертуры, применяемая в бортовых РЛС обзора земной поверхности. При этом не используется фокусировка синтезированной апертуры для обеспечения разрешающей способности в радиальном направлении.

После того как закончились попытки применения кругового апертурного синтеза в томографии, фокусировка для радиального разрешения практически

не используется. В известных разработках, если апертурный синтез применяется для томографии, то, как правило, радиальное разрешение достигается за счет импульсной или частотной модуляции зондирующего сигнала.

Анализ состояния когерентной томографии свидетельствует о том, что для синтеза апертуры широко используется когерентное, но не монохроматическое излучение. Радиальное разрешение достигается за счет модуляции зондирующего сигнала, а не за счет фокусировки. В отдельных работах используется монохроматический сигнал, и изображение восстанавливается с применением обратного преобразования Радона [96] без использования синтеза апертуры.

1.4 Апертурный синтез в спектральной области (метод Д.Менсы)

Материал этого раздела опубликован автором диссертации в [90]. Идея изложения метода Д.Менсы оригинальна и рекомендована рецензентом статьи [90] при ее обсуждении.

Одной из обобщающих работ по когерентной томографии можно считать публикацию Д.Менсы, Ш.Халеви и Г.Уэйда «Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображений на СВЧ» [31]. Сущность метода, используемого в [31], состоит в следующем.

Сигнал, принимаемый в точке, где находятся передатчик, излучающий монохроматический сигнал, и приемник, можно представить формулой*

$$x(\vec{r}) = A \int_S \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} a(\vec{r}') \exp[-i \frac{4\pi}{\lambda} |\vec{r} - \vec{r}'|] d\vec{r}', \quad (1.2)$$

где интеграл берется по площади обследуемой области S , причем $\vec{r}' \in S$, а \vec{r} компланарен \vec{r}' . A – несущественная постоянная, $a(\vec{r}')$ – комплексная амплитуда рассеяния в точке, определяемой вектором \vec{r}' , λ – длина волны, \vec{r} – ради-

* В [31] радиальное уменьшение амплитуды сигнала в соответствии с $\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2}$ не учитывалось.

ус-вектор, отсчитываемый от центра регистрируемой области до наблюдателя, \vec{r}' – радиус-вектор, отсчитываемый от центра регистрируемой области до отражающей точки. Поясняющая геометрия процесса реконструкции приведена на рисунке 1.1

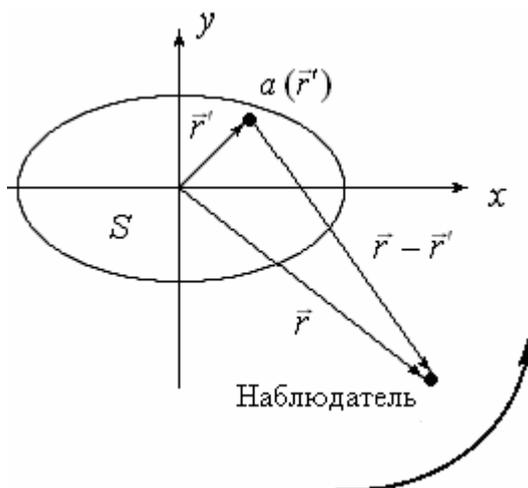


Рисунок 1.1 – Поясняющая геометрия процесса сбора данных при реконструкции изображения

При большом расстоянии от центра томографируемой области до наблюдателя имеет место приближенное равенство $|\vec{r} - \vec{r}'| \approx r - \vec{r}\vec{r}'/r$ – условие дальней зоны. Учтем это приближенное равенство в показателе экспоненты (1.2), и формула превращается в преобразование Фурье:

$$\begin{aligned} \hat{x}(\vec{r}) &= \hat{a}(\vec{r}') = A \int_S \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} a(\vec{r}') \exp(-i \frac{4\pi}{\lambda} r) \exp(i \frac{4\pi}{\lambda} \vec{r}\vec{r}') d\vec{r}' = \\ &= A \int_S \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} a(\vec{r}') C_1 \exp(i \frac{4\pi}{\lambda} \vec{r}\vec{r}') d\vec{r}' \end{aligned} \quad (1.3)$$

В выражении (1.3) при условии дальней зоны $\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} \approx const$,

$C_1 = \exp(-i \frac{4\pi}{\lambda} r) = const$, так как r в методе Менсы является постоянной величиной, $\vec{r}\vec{r}'$ – скалярное произведение векторов, \vec{r}' – вектор в области пространственных координат, $\hat{a}(\vec{r}')$ – Фурье образ $a(\vec{r}')$. С учетом пояснений сделанных

выше, выражение (1.3) приводится к канонической форме преобразования Фурье, в котором $C_1 \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2}$ вынесено за знак интеграла и объединено с A в несущественную постоянную:

$$\hat{x}(\vec{r}) = \hat{a}(\vec{r}') = A \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} C_1 \int_s a(\vec{r}') \exp(i \frac{4\pi}{\lambda r} \vec{r} \vec{r}') d\vec{r}' = A \int_s a(\vec{r}') \exp(i \frac{4\pi}{\lambda r} \vec{r} \vec{r}') d\vec{r}' .$$

Выражение (1.3) является двумерным преобразованием Фурье в векторной форме. Следует обратить внимание на то, что $x(\vec{r})$ в (1.2) и (1.3) приобретает смысл спектральной функции $\hat{x}(\vec{r})$, т. е. $\hat{x}(\vec{r})$ является Фурье образом комплексной амплитуды рассеяния $a(\vec{r}')$, где \vec{r} является вектором в области пространственных частот, а регистрация значений $x(\vec{r})$ есть не что иное, как сбор данных при томографировании в спектральной области. В методе Менсы данные $\hat{x}(\vec{r})$ регистрируются по круговой линии и этим самым определяются значения спектра на кольце.

Способ проведения измерений для получения отсчетов спектра на кольце был независимо предложен М.Адамсом и А.Андерсеном [98] и получил дальнейшее развитие в работах Д.Менсы, Ш.Халеви и Г.Уэйда [31] и других специалистов. Этот метод по существу является круговым апертурным синтезом, осуществляемым в Фурье области. Для восстановления распределения $a(\vec{r}')$ из принимаемых сигналов берут ОБПФ от (1.3) или (1.2).

Используя преобразование (1.4), которое известно в литературе [27] как теорема о проекционном слое, или теорема о центральном сечении, можно получить (1.2) и установить тем самым связь метода Менсы с методом Радона:

$$\hat{a}(R \cos \theta, R \sin \theta) = \hat{p}(R, \theta), \quad (1.4)$$

где $\hat{p}(R, \theta)$ – одномерный Фурье образ проекции $p(s, \theta)$; θ и R – полярные координаты в спектральной области, s и θ – параметры, задающие положение проекционного луча в полярных координатах (r, ϕ) , которые будем называть

объектной областью. Более конкретно s – это расстояние на линии проекции от начала координат до проекционного луча, а θ – угловое положение проекции. При этом нужно помнить, что проекционный луч перпендикулярен проекции. Определение и пояснение проекции можно найти в литературе [72, 22, 27, 70, 71]. Для доказательства связи метода Менсы с методом Радона подвергнем проекционное соотношение (1.4), устанавливающее фундаментальную связь преобразования Радона с двумерным преобразованием Фурье, операции обратного проецирования, проинтегрировав левую и правую части равенства по θ в пределах от 0 до 2π и, переходя к векторной форме, получим исходное выражение (1.2) для метода Менсы. Это является свидетельством того, что метод Менсы связан с методом Радона. Действительно,

$$\int_0^{2\pi} \hat{a}(R \cos \theta, R \sin \theta) d\theta = \int_0^{2\pi} \hat{p}(R, \theta) d\theta, \quad (1.5)$$

где
$$\int_0^{2\pi} \hat{a}(R \cos \theta, R \sin \theta) d\theta = \hat{a}(\vec{r});$$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \hat{p}(R, \theta) d\theta &= \int_S x(\vec{r}) \exp\left(-i \frac{4\pi}{\lambda} \vec{r} \vec{r}'\right) d\vec{r} \approx \int_S x(\vec{r}) \exp\left[-i \frac{4\pi}{\lambda} |\vec{r} - \vec{r}'|\right] d\vec{r}' = \\ &= \hat{x}(\vec{r}) = A \int_S \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} a(\vec{r}') \exp\left[-i \frac{4\pi}{\lambda} |\vec{r} - \vec{r}'|\right] d\vec{r}'. \end{aligned}$$

Здесь также учтено приближение дальней зоны, и поэтому правую часть выражения (1.5) можно считать преобразованием Фурье в векторной форме, но не в каноническом виде.

Для восстановления функции $a(\vec{r})$ достаточно правую часть выражения (1.2) или (1.3) подвергнуть обратному преобразованию Фурье. Представленный алгоритм известен как реконструкция методом обращения по Фурье [27]. Разрешающая способность метода характеризуется функцией рассеяния точки (термин из оптики) или передаточной функцией точки (термин Менсы [31]). Она получается, если в (1.2) заменить $a(\vec{r})$ дельта-функцией в точке \vec{r}_0 , учесть

стролирующее действие дельта-функции и взять обратное преобразование Фурье по кольцевой линии L , где dl' – элемент длины на кольцевой линии. Тогда оценка восстановленной дельта функции $C(\vec{r}, \vec{r}_0)$ определится как

$$C(\vec{r}, \vec{r}_0) = A \int_L \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} \exp[i \frac{4\pi}{\lambda} (|\vec{r} - \vec{r}'| - |\vec{r} - \vec{r}_0|)] dl'. \quad (1.6)$$

Если предположить, как в [31] при определении разрешающей способности с помощью передаточной функции точки, что $\vec{r}_0 = 0$, $\vec{r} \gg \vec{r}'$, то результат (1.6) примет вид функции Бесселя:

$$C(\vec{r}, \vec{0}) = A \int_L \frac{1}{|\vec{r}|^2} \exp[i \frac{4\pi}{\lambda} (|\vec{r} - \vec{r}'| - |\vec{r}|)] dl'.$$

Учтем, что $(|\vec{r} - \vec{r}'| - |\vec{r}|) = |\vec{r}'| \cos(\phi - \theta)$, где ϕ – угловое положение вектора r , θ – угловое положение вектора r' . Также надо учесть, что $dl' = |\vec{r}| d\theta$. Тогда функция Бесселя [6] примет вид:

$$C(|\vec{r}|, \phi) = \frac{A}{|\vec{r}|} \int_0^{2\pi} \exp[i \frac{4\pi}{\lambda} |\vec{r}'| \cos(\phi - \theta)] d\theta. \quad (1.7)$$

Передаточная функция точки, полученная методом Менсы, имеет вид (рисунок 1.2, а), где n и k номера отсчетов аргументов функции $C(|\vec{r}|, \phi)$.

Расчеты производились по формуле (1.7) при следующих исходных данных: $\lambda = 1,3$ мм, шаг по координатам x и y составлял $0,1\lambda$, габариты рисунка 1.2, б составляют $2\lambda \times 2\lambda$.

Из рисунка 1.2 видно, что передаточная функция точки имеет главный лепесток шириной $\lambda/5$, однако уровень первого бокового лепестка этой функции всего лишь на 8 дБ ниже уровня главного лепестка, что существенно может ограничить динамический диапазон восстанавливаемых изображений.

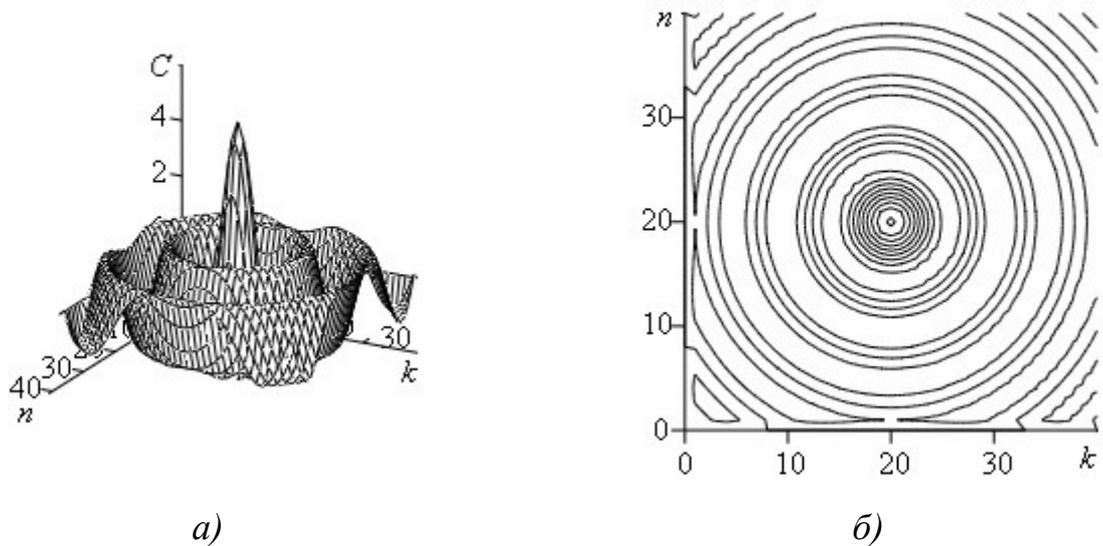


Рисунок 1.2 – Передаточная функция точки, полученная Менсой и построенная в соответствии с формулой (1.6): *а)* общий вид; *б)* вид в плане

Для устранения влияния артефактов, т. е. боковых лепестков передаточной функции точки, Д.Менса предлагает многочастотное зондирование. Это ведет к расширению спектра зондирующего сигнала и является отходом от когерентности. Когерентность нужно сохранить, потому что она дает возможность легко управлять разрешающей способностью, или увеличением изображения. Достаточно уменьшить длину волны.

Сбор данных в спектральной области сложен и занимает много времени, потому что надо регистрировать амплитуду, фазу принимаемого сигнала и соответствующий им угол поворота объекта. Этот недостаток становится существенным, если требуется регистрировать фазы быстро протекающего процесса, например регистрацию различных фаз работы сердца.

Реконструкция изображения с применением приемов линейного апертурного синтеза [53, 78, 83] позволяет существенно упростить сбор информации. В отличие от метода Д.Менсы сбор информации, т. е. процесс томографирования, осуществляется не в Фурье области, а в области пространственных функций, называемых просто траекторными доплеровскими сигналами. Таким образом, процесс сбора информации сводится только к регистрации траекторного доплеровского сигнала антенной с изотропной диаграммой. Это можно сделать,

двигаясь мимо подсвеченного предмета, например, по прямолинейной траектории с известной постоянной скоростью.

Специалист, знакомый с апертурным синтезом в системах картографирования земной поверхности, может увидеть, что приведенный выше алгоритм не похож на алгоритм обработки доплеровского сигнала при синтезе апертуры движущимся локатором по прямолинейной траектории. Традиционный синтез апертуры в самолетных РЛС предполагает корреляционную обработку пространственно-временной функции, а не взятие ОБПФ от спектра на кольце. Пространственно-временная функция и траекторный доплеровский сигнал – это эквивалентные понятия. Далее будет показано, что приемами традиционного синтеза апертуры можно получить результаты, похожие на результаты Д.Менсы. Кроме того, приемы традиционного синтеза апертуры пригодны для синтезирования апертуры по любой траектории, в том числе и по круговой. Сущность традиционного апертурного синтеза состоит в определении взаимной корреляции зарегистрированного при пролете мимо исследуемого объекта траекторного доплеровского сигнала с опорным траекторным доплеровским сигналом от точечного объекта.

Если точечный объект поместить в центр декартовой системы координат и начать его вращать, то принимающая антенна будет фиксировать один и тот же фазовый сдвиг прошедшей волны $\varphi(t) = \frac{4\pi R(t)}{\lambda} = const$, так как при любом угле поворота точки путь, пройденный электромагнитной волной $R(t) = const$, где $R(t)$ – расстояние от вращающейся точки до антенны, λ – длина волны.

Доплеровский сдвиг частоты, равный производной от фазы $\omega_D = \frac{d\varphi(t)}{dt} = 0$, будет нулевым, и доплеровская обработка здесь кажется не возможной. Тем не менее передаточная функция точки, полученная методом Д.Менсы, не равна нулю. Далее будет показано, что предлагаемый метод взаимной корреляции дает такой же результат.

Подробный анализ статьи Дина Менсы, Шалома Халеви и Глена Уэйда

дан для того, чтобы показать достигнутый уровень знаний в области синтеза апертуры на малой дальности и в когерентной томографии. Авторы этой статьи и ряд специалистов [С.С.Алексофф, С.К.Нхристенсон, М.И.Адамс, А.Р.Андерсен, Р.К.Мюллер, М.Кавех, G.Хейдбредер, G.Уэйд, S.Эллиотт, I.Хогер, G.Фишер, J.Айслер, N.S.Рамеш, J.I.Уолкер] являются разработчиками идеи получения изображений с помощью синтеза апертуры антенны для вращающихся объектов.

Кроме рассмотренного метода когерентной томографии существует также ряд других методов: ЯМР-интроскопия [11, 2, 3, 15, 16, 7, 68], рентгеновская томография [3, 22, 62, 72], импедансная томография [21, 23], эмиссионная томография [68], сейсмическая томография [61] и др. Однако в этих методах не так много подходящего материала для томографии с синтезом апертуры.

1.5 Проблемы применения методов И.Радона и Д.Менсы для реконструкции изображения с помощью синтеза апертуры на малой дальности

Первоначально метод реконструкции внутренней структуры объекта по проекциям разрабатывался для рентгеновских лучей. Предполагалось, что рентгеновский луч, пронизывающий тело пациента, бесконечно тонкий. Здесь не нужно было учитывать волновую природу излучения, так как спектр рентгеновского излучения достаточно широк, и дифракционные явления можно было не учитывать. Однако метод реконструкции изображения по проекциям нашел применение и в случае использования волнового излучения. Примером тому служит рассмотренная выше работа Д.Менсы, Ш.Халеви и Г.Уэйда.

Все проблемы проекционной томографии можно разделить на физические и математические [26, 27]. Рассмотрим сначала физические проблемы.

Изображение поперечного сечения объекта можно точно реконструировать, если известны его проекции, т. е. линейные интегралы вдоль прямой от реконструируемой функции $f(x,y)$ при всех углах. Но во многих случаях результаты реальных измерений не позволяют точно определить полный набор линейных интегралов, что приводит к погрешностям и искажениям в реконструи-

руемом изображении. Результаты измерения могут оказаться неадекватными по различным причинам, в том числе из-за нелинейностей при детектировании, при сборе информации, воздействии шума и недостаточности полученных данных. Шумы приводят к неопределенности результатов измерения. Неполнота данных может возникнуть из-за ряда причин, одной из которых является неадекватность процесса дискретизации и наличие областей, по которым не получены проекционные данные.

Процесс дискретизации может привести к потере проекционных данных, и связано это с эффектом наложения (перекрывтия) спектров при недостаточности отсчетов. Иногда перед дискретизацией делают усечение спектра путем фильтрации, однако это не всегда приводит к положительным результатам.

Надо отметить, что традиционный метод постановки и решения задачи реконструкции изображения по проекциям, т. е. метод Радона, не всегда подходит к апертурному синтезу. Первоначально метод реконструкции по проекциям разрабатывался для рентгеновской томографии.

В основе метода реконструкции по проекциям лежит допущение, что проекционный луч, по которому ведется интегрирование коэффициента поглощения рентгеновского излучения, является бесконечно тонким. Такое допущение приемлемо в схеме регистрации проекций по методу Хаунсфилда и Мак-Кормака, когда ненаправленный источник рентгеновского излучения находится по одну сторону от пациента, а принимающий детектор с изотропной диаграммой направленности приема – по другую сторону от пациента [22]. При этом предполагают, что точки внутри объекта не рассеивают рентгеновское излучение. Кроме того, для каждой точки должно быть снято достаточно проекций под разными углами, т. е. проекционные лучи для каждой точки должны в ней пересекаться и их должно быть достаточно много, рисунок 1.3 [72]. На рисунке 1.3 показаны две точки, принадлежащие исследуемому объекту, заданные в виде функции коэффициента линейного поглощения рентгеновского излучения в полярных координатах $a_1(r, \phi)$, $a_2(r, \phi)$. Для точки $a_1(r, \phi)$ можно определить множество проекций

$p_{1i} = \int_{-\infty}^{\infty} a_1(z, \theta_i + \pi/2) dz$, z – координата расстояния по лучу, θ – угол, опреде-

ляющий направление проекционного луча. Аналогично для точки $a_2(r, \phi)$ можно

определить другое множество проекций $p_{2i} = \int_{-\infty}^{\infty} a_2(z, \theta_i + \pi/2) dz$.

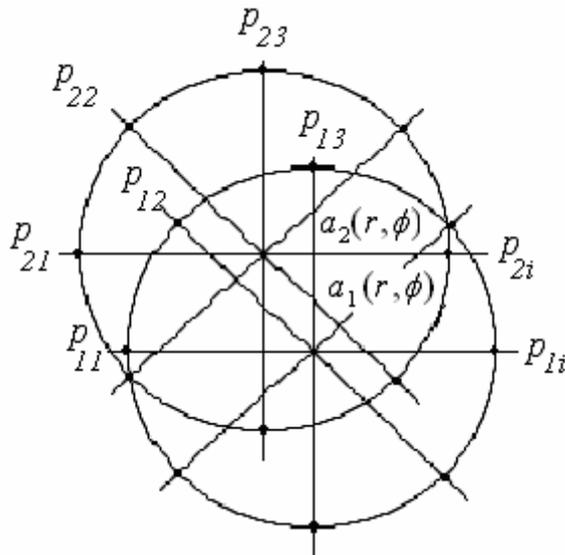


Рисунок 1.3 – Реконструкция отдельных точек объекта, полученная при помощи алгоритма обратного проецирования. Каждая прямая соответствует проекции данной точки в определенном направлении

Совсем иные условия сбора данных при томографировании движущимся локатором, синтезирующим апертуру антенны (рисунок 1.4).

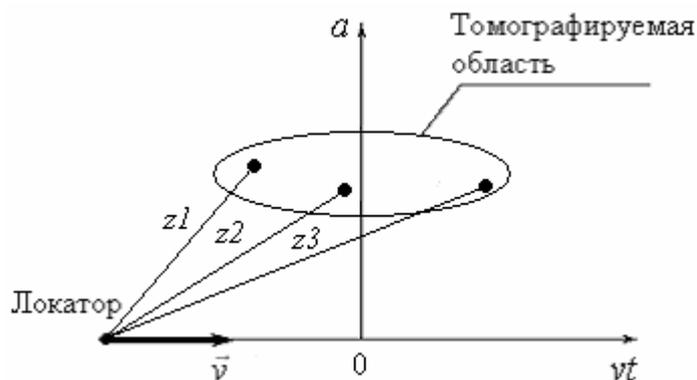


Рисунок 1.4 – Метод сбора данных при томографии с синтезом апертуры,

z_1, z_2, z_3 – проекционные лучи

Из сопоставления рисунков 1.3 и 1.4 видно, что в радоновской томографии проекционные лучи для двух разных точек объекта не сходятся в одной точке, тогда как в томографии с синтезом апертуры при изотропной диаграмме антенны локатора принимается пучок сходящихся в одну точку проекций. Радоном не решалась задача восстановления изображения для веера сходящихся проекций. Известно лишь решение задачи для пучка расходящихся проекционных лучей от источника излучения. Постановка и решение задачи реконструкции изображения с помощью синтезированной апертуры отличается от традиционной томографической задачи восстановления изображения по проекциям.

1.6 Обзор методов построения изображений в сечении, постановка задачи исследования

В разделе 1.4 был рассмотрен метод Д.Менсы, реконструирующий внутреннюю структуру объекта по проекциям. Это так называемый метод обращения по Фурье. Существует ряд других методов реконструкции [72]. Все они вытекают из проекционной теоремы о центральном сечении, которая устанавливает фундаментальное соотношение между преобразованием Радона и двумерным преобразованием Фурье [72]. На языке математических операторов проекционная теорема о центральном сечении выглядит следующим образом:

$$[F_2 f](r, \phi) = [Fp_\theta](L), \quad (1.8)$$

где $[F_2 f](r, \phi)$ – двумерное преобразование Фурье от реконструируемой функции в полярных координатах, $[Fp_\theta](L)$ – одномерный Фурье образ от фиксированной под углом θ проекции p по одной переменной L .

F_2 - оператор двумерного преобразования Фурье от функции f в полярных координатах, определяемый как:

$$[F_2 f](R, \Phi) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty |r| f(r, \phi) \exp(-2\pi i r R \cos(\Phi - \phi)) dr d\phi, \quad (1.9)$$

где r, ϕ – полярные координаты в пространственной области, R, Φ – полярные координаты в Фурье-области.

Здесь же, для справки, приведем известный оператор обратного двумерного преобразования Фурье

$$[F_2^{-1}F](r, \phi) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty |R|F(R, \Phi) \exp(2\pi i r R \cos(\phi - \Phi)) dR d\Phi. \quad (1.10)$$

При этом справедливо соотношение:

$$F_2^{-1}F_2 f = F_2 F_2^{-1} f = f. \quad (1.11)$$

Для обозначения n -мерного преобразования Фурье возможно использование такой формы записи оператора.

$$\widehat{f}(\vec{\omega}) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty f(\vec{x}) \exp(-i\vec{\omega}\vec{x}) d\vec{x}, \quad (1.12)$$

$$f(\vec{x}) = (2\pi)^{\frac{-n}{2}} \int_{-\infty}^\infty \dots \int_{-\infty}^\infty \widehat{f}(\vec{\omega}) \exp(i\vec{\omega}\vec{x}) d\vec{\omega}, \quad (1.13)$$

где $\widehat{f}(\vec{\omega})$ – Фурье образ функции $f(\vec{x})$, $\vec{\omega}$ – вектор пространственной частоты.

Известно, что проекция p в выражении (1.8) есть не что иное, как прямое преобразование Радона, т. е.

$$[Rf](l, \theta) = p(l, \theta) = \int_{-\infty}^\infty f(\sqrt{l^2 + z^2}, \theta + \arctg(z/l)) dz \quad \text{при } l \neq 0, \quad (1.14)$$

$$[Rf](l, \theta) = p(0, \theta) = \int_{-\infty}^\infty f(z, \theta + \pi/2) dz \quad \text{при } l = 0, \quad (1.15)$$

где z – координата по лучу, θ – угловое направление луча, l – расстояние от луча до начала координат по нормали.

Тогда с помощью математических операторов теорему о центральном сечении можно представить в виде

$$F_2 = F_Y R, \quad (1.16)$$

где F_Y – Фурье-образ проекции $p(l, \theta)$ по переменной l

Таким образом, вычисление двумерного преобразования Фурье F_2 (образа Фурье) сводится к одномерному преобразованию Фурье по первой переменной l от прямого преобразования Радона.

Если взять обратное двумерное преобразование Фурье от обеих частей равенства (1.16), то удастся восстановить исходную функцию $f(r, \theta)$:

$$f = F_2^{-1}F_2f = F_2^{-1}F_YRf, \quad (1.17)$$

$$f = F_2^{-1}F_YRf. \quad (1.18)$$

Выражения (1.17) и (1.18) показывают принципиальную возможность реконструкции исходной функции.

С правой частью выражения (1.18) будем разбираться по частям. Сначала распишем оператор F_YRf :

$$F_YRf = |F_Yp|(R, \Phi) = \int_{-E}^E p(l, \theta) \exp(-2\pi iRl) dl = \hat{p}(R, \Phi), \quad (1.19)$$

где E и $-E$ – границы реконструируемой области.

Теперь можно расписать оператор $F_2^{-1}F_YRf$ и, переходя к декартовым координатам, получить выражение для реконструкции исходного изображения:

$$f(x, y) = F_2^{-1}F_YRf = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}((X^2 + Y^2)^{1/2}, \arctg(Y/X)) \exp(i2\pi(xX + yY)) dXdY, \quad (1.20)$$

где x, y – декартовы координаты в пространственной области, X, Y – декартовы координаты в Фурье-области.

Полученная формула преобразования называется реконструкцией методом обращения по Фурье [27]. Этот метод был использован в работе Д.Менсы.

1.6.1 Алгоритм восстановления, основанный на преобразовании Радона

Прямое преобразование Радона (1.14) устанавливает соответствие между функцией $f(r, \phi)$, двух полярных переменных и функцией $Rf = p(l, \theta)$, где $r = \sqrt{l^2 + z^2}$, $\phi = \theta - \arctg(z/l)$. Соотношение между множеством (r, ϕ) и множеством (l, θ) пояснено геометрически на рисунке 1.5.

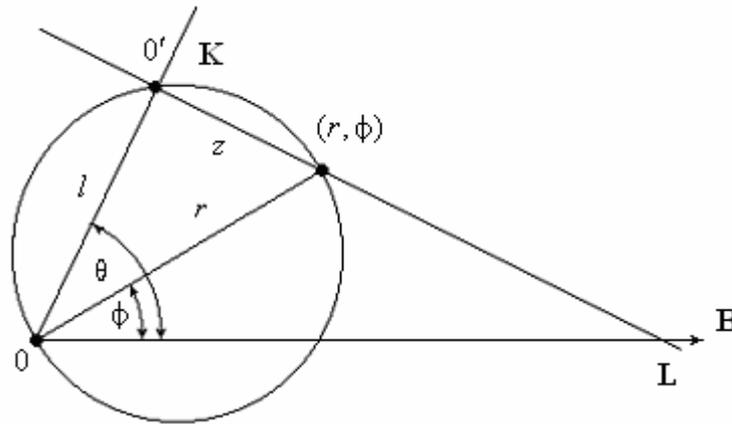


Рисунок 1.5 – Связь между (r, ϕ) - и (l, θ) - пространствами: В – базисная ось, от которой производится отсчет углов и расстояний; L – проекционный луч; К – перпендикуляр к проекционному лучу или линия, на которую осуществляется проецирование; 0 – начало координат; (r, ϕ) – полярные координаты точки, принадлежащей томографируемому объекту; (l, θ) – пара чисел, задающих положение проекционного луча L; $l = r \cos(\theta - \phi)$ – удаление проекционного луча от начала координат; z – расстояние от точки O' по проекционному лучу

Интеграл по проекционному лучу называется проекцией или прямым преобразованием Радона и определяется выражениями (1.14) и (1.15). Задача томографии состоит в том, чтобы по проекциям реконструировать исходную функцию $f(r, \theta)$. Такой оператор был предложен Радонам. Его математическая запись имеет вид [72].

$$[R^{-1}p](r, \phi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-E}^E \frac{1}{r \cos(\theta - \phi) - l} p_1(l, \theta) dl d\theta, \quad (1.21)$$

где $p_1(l, \theta)$ – частная производная от $p(l, \theta)$ по l . При этом обратное преобразование Радона (1.21), также как и преобразование Фурье, обладает обратимостью

$$[R^{-1}Rf](r, \phi) = f(r, \theta). \quad (1.22)$$

Для того чтобы понять сущность обратного оператора Радона, представим его в виде последовательности простейших операторов. Обозначим взятие частной производной от $p(l, \theta)$ по первой переменной через $D_y p$:

$$[D_Y p](l, \theta) = [D_Y Rf] = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{p(l + \Delta l, \theta) - p(l, \theta)}{\Delta l}. \quad (1.23)$$

Выражение (1.23) показывает, что оператор дифференцирования воздействует на оператор Радона, т. е. на проекцию. Обозначим $D_Y Rf = p_1(l, \theta) = q(l, \theta)$, а $r \cos(\theta - \phi) = l'$. Тогда внутренний интеграл в выражении (1.21) можно представить в виде преобразования Гильберта.

$$[H_Y q](l', \theta) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q(l, \theta)}{l' - l} dl = -\frac{1}{\pi} \lim_{\xi \rightarrow 0} \left\{ \int_{-\infty}^{l' - \xi} \frac{q(l, \theta)}{l' - l} dl + \int_{l' + \xi}^{\infty} \frac{q(l, \theta)}{l' - l} dl \right\}. \quad (1.24)$$

Обозначим внутренний интеграл в выражении (1.19) как функцию двух переменных $t(r \cos(\theta - \phi), \theta)$:

$$t(r \cos(\theta - \phi), \theta) = [H_Y D_Y p] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_1}{r \cos(\theta - \phi) - l} dl. \quad (1.25)$$

Тогда операцию в (1.21) взятия интеграла по θ назовем операцией обратного проецирования и обозначим этот оператор как Bt :

$$[Bt](r, \phi) = \int_0^{\pi} t(r \cos(\theta - \phi), \theta) d\theta. \quad (1.26)$$

Записывая в цепочку все введенные операторы, получаем

$$|BH_Y D_Y p|(r, \phi) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p_1(l, \theta)}{r \cos(\theta - \phi) - l} d\theta dl. \quad (1.27)$$

Окончательно обратное преобразование Радона через последовательность операторов можно представить в виде:

$$R^{-1} = -\frac{1}{2\pi} BH_Y D_Y. \quad (1.28)$$

Обратное преобразование Радона для функции двух переменных может быть сведено к следующей последовательности операций:

– взятию частной производной от проекции p по ее первой переменной для получения функции q ;

- преобразованию Гильберта для функции q по ее первой переменной для получения функции t ;
- обратному проецированию t ;
- умножению полученного результата всех этих операций на $(-1/2\pi)$.

Этот процесс можно назвать нормировкой.

1.6.2 Алгоритм обратного проецирования

Алгоритмы реконструкции с использованием только обратного проецирования не позволяют получать такие же хорошие изображения, как и те, которые получают другими алгоритмами реконструкции [72]. Алгоритм обратного проецирования как необходимая составная часть входит в более сложные алгоритмы. Наипростейший алгоритм реконструкции, т. е. алгоритм суммирования или обратного проецирования, состоит в том, что оценку плотности в любой точке находят путем сложения лучевых сумм для всех лучей, проходящих через данную точку (рисунок 1.6).

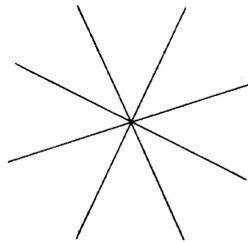


Рисунок 1.6 – Реконструкция отдельной точки методом обратного проецирования

Каждая прямая соответствует проекции данной точки в определенном направлении. Традиционная томография по существу является методом обратного проецирования. На рисунке 1.7 поясняется сущность метода обратного проецирования, первоначально применявшегося в рентгеновской томографии с регистрацией результата на фотопленке.

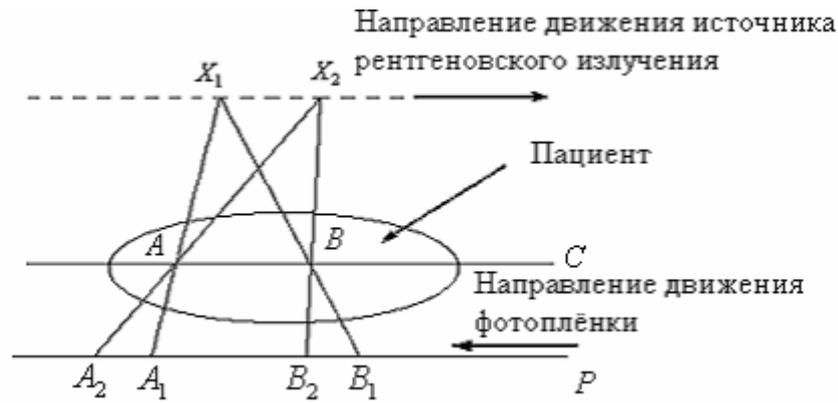


Рисунок 1.7 – Пояснение метода обратного проецирования: A и B – две точки сечения C пациента; X_1 и X_2 – положения источника рентгеновского излучения в моменты времени t_1 и t_2 ; P – фотографическая пленка; A_1 и A_2 – положения некоторой фиксированной точки на фотопленке P в моменты времени t_1 и t_2 ; B_1 и B_2 – положения другой точки на фотопленке P в моменты времени t_1 и t_2 .

Перемещая источник излучения с постоянной скоростью в одном направлении и передвигая пластинку P с соответствующей скоростью в противоположном направлении, мы создадим условие, при котором любая точка в плоскости C в любой момент времени будет спроектирована в одну и ту же точку на плоскости P , в то время как точки, которые лежат вне плоскости C и расположены ниже либо выше этой плоскости, будут спроектированы в различные точки на плоскости P . Поэтому на фотографической пленке сечение C будет видно четко, а остальная часть тела будет размыта.

На рисунке 1.7 линейное ослабление в точке A оценивают путем сложения (интегрирования) суммарной плотности вдоль пути от X_t до A_t в течение времени t . Напомним, что A_t – всегда одна и та же точка на передвигающейся фотографической пленке P , и поэтому A является единственной общей точкой для любых двух путей от X_t до A_t в различные моменты времени t .

Все виды традиционной томографии, включая систему, в которой перемещение источника излучения и фотопленки ведут вдоль осей координат, представляют собой трехмерную версию алгоритма обратного проецирования.

По заданной функции двух переменных оператор обратного проецирования B производит другую функцию B_p двух полярных переменных таким образом, что $[B_p](r, \phi)$ равно интегралу по θ величин $p(l, \theta)$, где $l = r \cos(\theta - \phi)$. Для определенных r, θ и ϕ величина $l = r \cos(\theta - \phi)$ равна расстоянию от начала координат до прямой L , проходящей через точку (r, ϕ) и перпендикулярной прямой K , которая образует угол θ с осью V (см. рисунок 1.5).

Ранее было указано, что обратное преобразование Радона можно выполнить при помощи четырех последовательных операций: дифференцирования, преобразования Гильберта, обратного проецирования и нормировки. Использование для реконструкции только обратного проецирования мало эффективно и приводит к размазыванию изображения. Поэтому операция обратного проецирования используется совместно с другими операциями. Чтобы понять, как возникает размазывание, учтем следующие очевидные рассуждения.

Допустим, что мы получили ряд проекций объекта, состоящего из единственной точки. Результатом реконструкции по этим проекциям методом суммирования будет объект в форме звезды с центром в начале координат (рисунок 1.6). Рассмотрим на этом рисунке равномерно распределенные в пространстве проекции точки по всем направлениям. По мере увеличения числа проекций реконструкция по этим проекциям начнет все больше приближаться к распределению плотности, пропорциональной $1/r$, где r – расстояние от данной точки. Это связано с тем, что предельный случай суперпозиции ряда равномерно распределенных в пространстве прямых, имеющих общую точку, является эквивалентом вращения прямой вокруг этой точки. Статистический вес каждой точки равномерно распределяется при вращении на окружности длиной $2\pi r$. Эти пояснения указывают на то, что при любой реализации алгоритма обратного проецирования, вероятно, будет происходить размазывание четких деталей на реконструированном изображении.

1.6.3 Реализация оператора обратного проецирования

Метод суммирования реализуется различными «аналоговыми» устройствами. Например, можно использовать электронно-лучевую трубку, на экране которой последовательно отображаются линии; их положение соответствует тем пучкам рентгеновского излучения, для которых производится измерение лучевых сумм. Информация с электронно-лучевой трубки суммируется на фотопленке, причем плотность почернения будет пропорциональна величине лучевой суммы. Результирующее изображение на фотопленке будет представлять собой реконструкцию, полученную обратным проецированием.

Далее не будут рассмотрены подобные аналоговые методы реконструкции. Интерес представляет вычисление величины $[B_p](r, \phi)$ по данным Y [72], где $Y_i = p(l_i, \theta_i)$ для $1 \leq i \leq I$. Ограничим наше рассмотрение схемой сбора данных для M равномерно распределенных в пространстве ракурсов. Пусть Δ обозначает угол между направлениями ракурсов и определим его как $\Delta = \pi/M$, а d – шаг между параллельными лучами при выбранном фиксированном ракурсе. Пусть $Nd > E > r$, где E – ширина области, занятая пациентом.

Предположим, все (l, θ) – пространство разбито на M ракурсов и N параллельных лучей для каждого ракурса, т. е. N отсчетов на проекции. Пусть также для каждого (l_i, θ_i) посчитана проекция p_i , т. е., найдено прямое преобразование Радона R с помощью оператора:

$$[Rf](l_i, \theta_i) = p_i(l_i, \theta_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sqrt{l_i^2 + z^2}, \theta_i + \arctg(z/l_i)) dz.$$

Чтобы получить $[B_p](r, \phi)$, нужно проинтегрировать проекции по всем лучам для каждой точки объекта, т. е. выполнить операцию обратного проецирования, которую математически можно записать в виде интеграла:

$$[B_p](r, \phi) = \int_0^{\pi} p(r \cos(\theta - \phi), \theta) d\theta. \quad (1.29)$$

Метод, который обычно используют для численного определения величины данного интеграла, состоит из следующих двух этапов. Сначала аппроксимируем правую часть выражения (1.29) суммой, которую называют *суммой Римана* для данного интеграла:

$$\int_0^{\pi} p(r \cos(\theta - \phi), \theta) d\theta \approx \Delta \sum_{m=0}^{M-1} p(r \cos(m\Delta - \phi), m\Delta), \quad (1.30)$$

а затем производим оценку для каждого значения m величины

$p(r \cos(m\Delta - \phi), m\Delta)$ по известным значениям $p(nd, m\Delta)$ ($-N \leq n \leq N$) путем интерполирования.

В реконструктивной томографии обычно используют два метода интерполяции: метод *интерполяции по ближайшему значению* и метод *линейной интерполяции*. При интерполяции по ближайшему значению вычисляют $p(r \cos(m\Delta - \phi), m\Delta)$ по величинам $p(nd, m\Delta)$, где n выбирают таким образом, чтобы выражение $|nd - r \cos(m\Delta - \phi)|$ имело возможное наименьшее значение.

При линейной интерполяции n выбирают так, чтобы $nd \leq r \cos(m\Delta - \phi) \leq (n+1)d$ и вычисляют $p(r \cos(m\Delta - \phi), m\Delta)$ по формуле

$$\frac{(n+1)d - r \cos(m\Delta - \phi)}{d} p(nd, m\Delta) + \frac{r \cos(m\Delta - \phi) - nd}{d} p((n+1)d, m\Delta). \quad (1.31)$$

Другими словами, определение $[B_p](r, \phi)$ при помощи метода интерполяции по ближайшему значению выполняют следующим образом: а) складывают вместе лучевые суммы для лучей по одному из каждого ракурса, которые являются ближайшими к точке (r, ϕ) ; б) результат умножают на Δ . Линейная интерполяция является несколько более сложной и дорогостоящей. Вместо лучевых сумм одного луча складывают линейную интерполяцию лучевых сумм двух лучей, которые находятся по обеим сторонам от точки (r, ϕ) .

Чтобы получить дискретизированное изображение, вычисления повторяют для центральной точки каждого элемента изображения, и полученный результат рассматривают как оценку плотности в данном элементе изображения.

Такое дискретизированное изображение может быть представлено как J -мерный вектор-столбец x^* .

При таком методе можно получить дискретизированное изображение x^* , средние плотности которого \bar{x}^* существенно отличаются от средней плотности \bar{x} дискретизации x изображения, которое реконструируют. Так как обычно мы имеем достаточно хорошую оценку $\bar{\bar{x}}$ величины x , то мы можем скорректировать это при помощи *нормировки*, которая может быть либо *аддитивной*, либо *мультипликативной*.

Аддитивная нормировка позволяет получить дискретизированное изображение x^{**} , у которого j -компонента равна:

$$x_j^{**} = x_j^* + (\bar{\bar{x}} - \bar{x}^*)/J. \quad (1.32)$$

Мультипликативная нормировка дает дискретизированное изображение, j -я компонента которого равна:

$$x_j^{**} = x_j^* (\bar{\bar{x}} / \bar{x}^*). \quad (1.33)$$

Последнее выражение применимо только тогда, когда $\bar{x}^* \neq 0$. Отметим, что в любом случае средняя плотность x^{**} равна $\bar{\bar{x}}$.

1.6.4 Реконструкция с помощью операции свертки и обратного проецирования

Отправным пунктом этого метода служит проекционная теорема для преобразований Фурье (1.8), однако в окончательных результатах преобразование Фурье явно не фигурирует [72]. Запишем проекционную теорему (1.8), не прибегая к символам математических операторов:

$$\hat{p}(R, \theta) = \hat{f}(R \cos \theta, R \sin \theta). \quad (1.34)$$

Взяв обратное преобразование Фурье от равенства (1.34), получим:

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty \hat{p}(R, \theta) \exp[i2\pi R(x \cos \theta + y \sin \theta)] |R| dR d\theta. \quad (1.35)$$

Для построения функции $f_B(x, y)$, служащей аппроксимацией функции $f(x, y)$ с ограниченной шириной спектра, необходимо ввести функцию окна в частотной области $W(R)$, представляющую собой полосовой частотный фильтр. Введение функции окна эквивалентно подбору регуляризирующей функции для решения проблем вычисления дифференцирования и преобразования Гильберта в обратном преобразовании Радона. Эти две операции заменяются эквивалентным сверточным алгоритмом, в состав которого входит функция окна [72]. Переписав (1.35) для функции $f_B(x, y)$, получим:

$$f_B(x, y) = \int_0^\pi \int_{-1/2\Delta l}^{1/2\Delta l} \widehat{p}(R, \theta) W(R) \exp[i2\pi R(x \cos \theta + y \sin \theta)] |R| dR d\theta. \quad (1.36)$$

Заменим теперь $\widehat{p}(R, \theta)$ ее выражением из (1.19) и изменим порядок интегрирования по l и R . В результате получим:

$$f_B(x, y) = \int_0^\pi \int_{-1}^1 p(l, \theta) q((x \cos \theta + y \sin \theta) - l) dl d\theta, \quad (1.37)$$

где

$$q(l) = \int_{-1/2\Delta l}^{1/2\Delta l} |R| W(R) \exp(i2\pi Rl) dR. \quad (1.38)$$

Эти выражения составляют основу метода реконструкции, известного под названием метода *свертки и обратного проецирования*. Для того чтобы пояснить это название и посмотреть, как метод реализуется на практике, представим (1.35) в виде следующей последовательности операций, обозначив в (1.35) $x \cos \theta + y \sin \theta = l'$:

$$\tilde{p}(l', \theta) = \int_{-1}^1 p(l, \theta) q(l' + l) dl, \quad (1.39)$$

$$f(x, y) = \int_0^\pi \tilde{p}(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta, \quad (1.40)$$

где $[-1, 1]$ границы, занимаемые пациентом, в виде единичной окружности.

Промежуточная величина $\tilde{p}(l', \theta)$, определяемая формулой (1.39), является результатом свертки по l проекции $p(l, \theta)$ при угле θ и функции $q(l)$, заданной выражением (1.36). Назовем функцию $\tilde{p}(l, \theta)$ *свернутой проекцией* при угле θ , а $q(l)$ – *сворачивающей функцией*. Заметим, что при выборе разных функций окна получаются различные сворачивающие функции, так как

$$\hat{q}(R) = |R|W(R). \quad (1.41)$$

Операция, записываемая выражением (1.40), называется обратным проецированием. Она имеет простую геометрическую интерпретацию. В самом деле, заметим, что аргументами функции \tilde{p} в этом выражении служат параметры луча, проходящего через точку (x, y) под углом θ , поэтому функция $f_B(x, y)$ образуется посредством интегрирования значений свернутых проекций по всем лучам, проходящим через точку (x, y) .

Выводы

1. Анализ работ Д.Менсы [31] и Г.Хермена [72] показал, что круговой апертурный синтез, осуществляемый в спектральной области, принято рассматривать с позиций проекционной томографии, вытекающей из теоремы о центральном сечении и обратного преобразования Радона.

2. Для синтеза апертуры в спектральной области необходимо выполнить требование Радона к узости проекционного луча. При синтезе апертуры в случае протяженных объектов приходится иметь дело со сходящимся пучком проекционных лучей. Эта ситуация не совместима с требованием Радона к узости проекционного луча и не рассматривается в проекционной томографии.

3. Чтобы не выходить за рамки проекционной томографии и выполнить требуемые ограничения Радона, Д.Менса ввел требование дальней зоны и малых угловых размеров объекта. Эти ограничения позволили использовать метод Радона для реконструкции одноточечных объектов по набору проекций, однако не позволили реконструировать протяженные объекты.

2 РЕКОНСТРУКЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПРИ СИНТЕЗЕ АПЕРТУРЫ ДЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

2.1 Теоретическое обоснование метода

При синтезе апертуры на малой дальности от протяженного объекта локатору приходится регистрировать пучок сходящихся проекционных лучей. Не избежать такого же пучка лучей и при синтезе апертуры по кругу с помощью спектра на кольце. В проекционной томографии нет решения задачи реконструкции изображения объекта по пучкам сходящихся лучей. Если все же требуется воспользоваться проекционными методами реконструкции, то надо выбирать такие условия синтеза апертуры, которые не дают сходящихся пучков лучей [31], или искать другие, непроекционные методы синтеза апертуры.

Методом обращения по Фурье [31], который также относится к классу проекционных методов, не удалось осуществить реконструкцию изображения протяженных объектов. Сделать это не удалось потому, что в ближней зоне нельзя выполнить главное ограничение Радона, которое лежит в основе проекционных методов. Суть этого ограничения в том, что при сборе данных в местах, где осуществляется регистрация проекций, в каждую точку должен приходиться один проекционный луч. На малой дальности от протяженного объекта регистратору проекций не избежать пучка лучей. Проекционная томография не дает ответа на вопрос, как реконструировать изображение объекта по пучкам проекционных лучей. Выведем решение этой задачи за рамки настоящей работы и рассмотрим другой метод.

Предлагается непроекционный метод реконструкции изображения протяженных объектов. Алгоритм предлагаемого метода не предусматривает обработку отдельных проекционных лучей. При сборе данных с помощью локатора предполагается ситуация со сходящимся пучком лучей.

Рассмотрим принцип предлагаемого метода реконструкции изображения объектов на примере прямолинейного синтеза апертуры по траекторному сиг-

налу, который можно описать математически следующим образом [1, 2, 78, 83, ап]. Комплексную амплитуду сигнала от i -й точки объекта с координатами (x_i, y_i) , принимаемую локатором при пролете на малой дальности по прямолинейной траектории с постоянной скоростью v и промахом y_i , можно записать как

$$f_i(t) = \frac{a(x_i, y_i)}{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}), \quad (2.1)$$

где $a(x_i, y_i)$ – комплексная амплитуда рассеяния в i -й точке, C_a – длина синтезированной апертуры, t – время, v – постоянная скорость перемещения приемника с излучателем относительно исследуемого объекта, λ – длина волны зондирующего сигнала. Поясняющая геометрия процесса сбора информации при реконструкции приведена на рисунке 2.1

Комплексную амплитуду сигнала, отраженного от всего объекта и состоящего из I точек, можно представить в виде:

$$f(t) = \sum_{i=1}^I f_i(t), \quad (2.2)$$

где $f(t)$ – комплексная амплитуда суммарного сигнала, отраженного от всех I точек объекта.

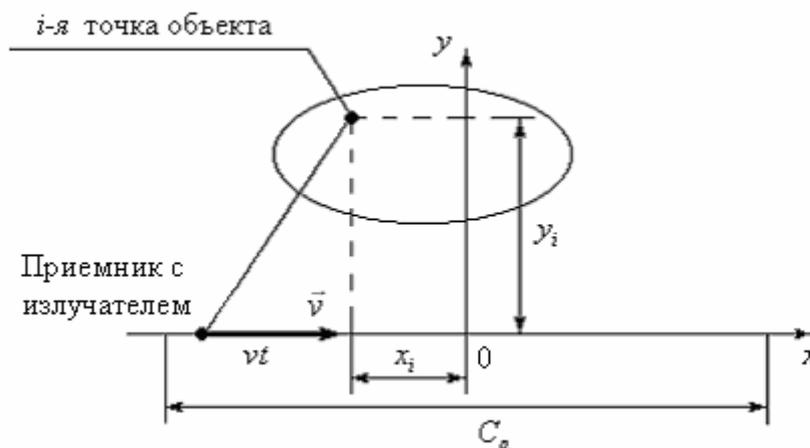


Рисунок 2.1 – Геометрия, поясняющая процесс реконструкции

Комплексную амплитуду опорного сигнала, соответствующую отражению от опорного точечного объекта с координатами $(0, l\Delta y)$, можно записать как

$$f_o(t) = \frac{1}{(vt - C_a/2)^2 + (l\Delta y)^2} \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt - C_a/2)^2 + (l\Delta y)^2}\right], \quad (2.3)$$

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

Под промахом понимается кратчайшее расстояние по нормали от траектории до реконструируемой точки.

Тогда набор одномерных взаимных корреляционных функций между опорными сигналами $f_o(t)$ и сигналом $f(t)$ может быть представлен в виде функции двух переменных:

$$B(\tau, l\Delta y) = \int_0^T \sum_{i=1}^l \frac{a(x_i, y_i)}{[(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2][(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (l\Delta y)^2]} \times \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (\sqrt{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} - \sqrt{(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (l\Delta y)^2})\right] dt, \quad (2.4)$$

где $T = C_a/v$ – время синтезирования апертуры, τ – сдвиг по времени. Соотношение $x = \tau v$ позволяет перейти от временного сдвига к пространственному сдвигу и построить взаимную корреляционную функцию в координатах промаха $l\Delta y$ и дальности по траектории x .

Следует обратить внимание на то, что интеграл (2.4) не является двумерной взаимной корреляционной функцией. Это по сути сумма, состоящая из набора одномерных корреляционных функций для разных дальностей опорной точки, отсчитываемых от траектории движения локатора. Выражение (2.4) представляет собой двумерную функцию, которая будет похожа на двумерную корреляционную функцию. Далее, на примере передаточной функции точки будет проиллюстрировано сходство одномерного набора корреляционных функций и двумерной взаимной корреляционной функции.

Следует подчеркнуть, что для реконструкции не подходит двумерная взаимная корреляционная функция, так как для ее получения нужно регистрировать двумерный сигнал, вторгаясь во внутрь области, занимаемой объектом или пациентом. Смысл реконструкции именно в том, что сбор данных должен производиться за пределами реконструируемого объекта.

Чтобы получить передаточную функцию точки, нужно взять функцию $f(t)$ для односточечного объекта, т. е. в выражениях (2.2) и (2.4) нужно принять $I=1$, также положить $x_1 = 0$, $y_1 \neq 0$, $a(x_1, y_1) = 1$. Тогда набор взаимных корреляционных функций примет вид:

$$B(\tau, l\Delta y) = \int_0^T \frac{1}{[(vt - C_a/2)^2 + y_1^2][(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (l\Delta y)^2]} \times \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} (\sqrt{(vt - C_a/2)^2 + y_1^2} - \sqrt{(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (l\Delta y)^2})] dt. \quad (2.5)$$

Выражение (2.5) позволяет построить передаточную функцию точки. Этот термин взят из [31]. Можно пользоваться терминами: «импульсная характеристика», «тело неопределенности двумерного сигнала» или «функция рассеяния точки» (термин из оптики). Однако это будет не совсем правильно. Ведь выражение (2.5) не является полноценной двумерной автокорреляционной функцией, с помощью которой строится двумерная импульсная характеристика.

При анализе набора одномерных корреляционных функций возникает вопрос, сильно ли мы проигрываем, если не используем двумерную корреляционную функцию. Предположим, мы имеем возможность просканировать поле отраженной когерентной волны, как за пределами, так и внутри реконструируемого объекта и получить двумерный сигнал. Комплексную амплитуду двумерного сигнала от односточечного объекта можно представить в виде:

$$f_1(t, y) = \frac{a(x_1, y_1)}{(vt + x_1 - C_a/2)^2 + (y + y_1)^2} \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt + x_1 - C_a/2)^2 + (y + y_1)^2}), \quad (2.6)$$

где y – текущая координата по промаху.

Здесь речь идет о передаточной функции точки. Запишем комплексную амплитуду для двумерного опорного сигнала, соответствующую отражению от точечного объекта. Она будет такой же, как у объектной точки.

$$f_o(t, y) = \frac{1}{(vt - C_a/2)^2 + (y + y_1)^2} \exp[j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt - C_a/2)^2 + (y + y_1)^2}]. \quad (2.7)$$

Двумерная взаимная корреляционная функция, образованная из двумерных сигналов, будет иметь вид:

$$B(\tau, \Delta y) = \int_0^{Y_{\max}} \int_0^T \frac{a(x_1, y_1)}{[(vt - C_a/2)^2 + (y + y_1)^2][(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (y + y_1 + \Delta y)^2]} \times \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} (\sqrt{(vt - C_a/2)^2 + (y + y_1)^2} - \sqrt{(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (y + y_1 + \Delta y)^2})] dt dy, \quad (2.8)$$

где Y_{\max} – верхняя граница диапазона изменения промахов y . В данном случае под максимальным промахом понимается расстояние по нормали к траектории регистрации данных до самой удаленной опорной точки.

На рисунке 2.2 представлена двумерная взаимная корреляционная функция, построенная с помощью выражения (2.8).

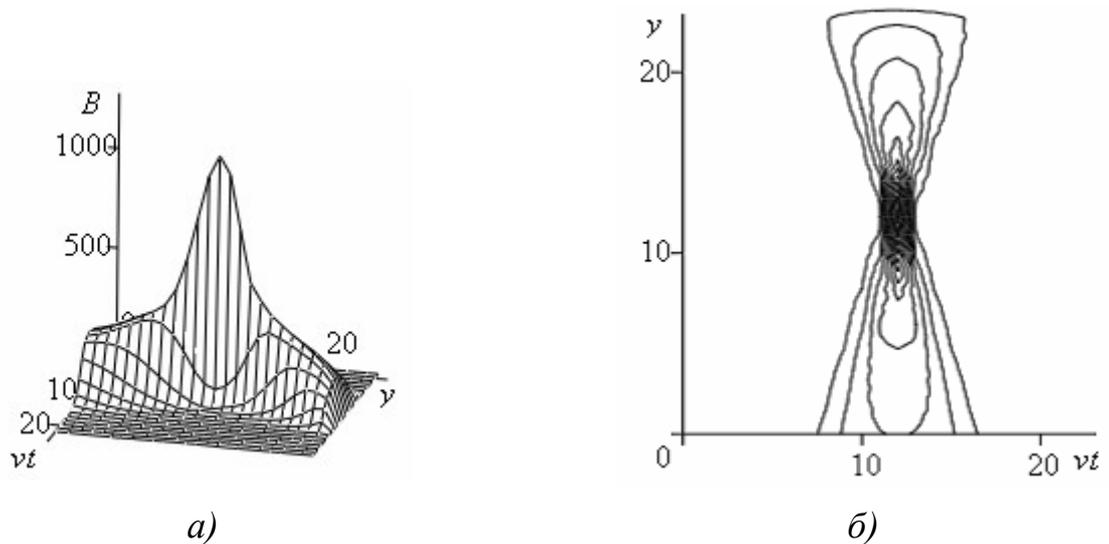


Рисунок 2.2 – Передаточная функция точки, полученная путем построения двумерной взаимной корреляционной функции:

a) общий вид; *б)* вид функции сверху

На рисунке 2.3 представлена построчная развертка набора одномерных взаимных корреляционных функций, т. е. двумерный график функции (2.5). Программа с расчетом графиков (рисунки 2.2 и 2.3) представлена в приложениях В и Г. Сопоставляя рисунок 2.2 и рисунок 2.3, можно убедиться, что двумерную взаимную корреляционную функцию можно заменить без потери качества реконструкции изображением набором одномерных корреляционных функций. Теперь рассмотрим вопрос, может ли взаимная корреляционная функция, а

точнее набор одномерных взаимных корреляционных функций, служить оценкой восстановленной функции $a(x, y)$.

Передаточная функция точки подавляет или, можно сказать, фильтрует точки объекта с комплексной амплитудой рассеяния $a(x_i, y_i)$, находящиеся за ее пределами. Передаточная функция точки, подобно импульсу Дирака, обладает стробирующим (фильтрующим) действием.

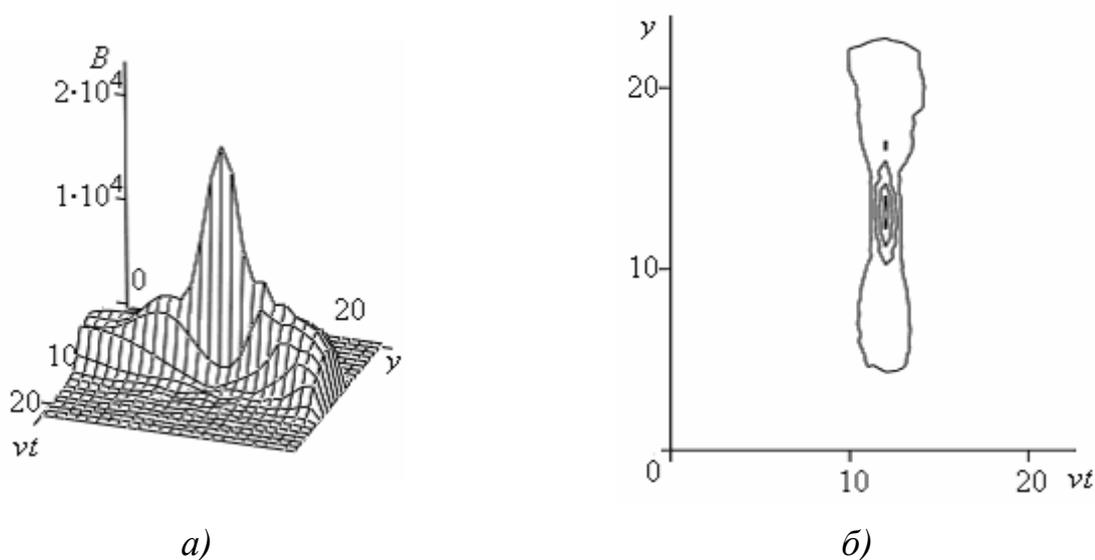


Рисунок 2.3 – Передаточная функция точки, полученная из набора одномерных корреляционных функций: а) общий вид; б) вид этой функции сверху

Фильтрующее действие импульса Дирака пояснено в [9]. То есть на амплитуду передаточной функции точки будут влиять в основном точки функции $a(x_i, y_i)$, находящиеся внутри области разрешения передаточной функции точки. У идеального томографа передаточная функция точки должна иметь вид, схожий с функцией Дирака, но не с бесконечно большой, а с фиксированной амплитудой. В этом случае группа точек с координатами (x_i, y_i) с одинаковыми комплексными амплитудами рассеяния $a(x_i, y_i)$ в пределах области разрешения передаточной функции точки могут быть вынесены за пределы интеграла (2.4). Тогда оценку восстановленной функции $a_b(x, y)$ можно записать так:

$$a_b(x, y) = a(x, y)B_{norm}(x, y) = B(x, y), \quad (2.9)$$

где $B_{norm}(x, y)$ – передаточная функция, рассчитанная для точки с комплексной амплитудой рассеяния, модуль которой равен единице (2.5). Принимая во внимание (2.9), в качестве оценки восстановленной функции $a_b(x, y)$ будем использовать непосредственно взаимную корреляционную функцию $B(x, y)$.

Для получения набора взаимных корреляционных функций лучше воспользоваться сверткой функций в спектральной области [9]. Тогда можно будет использовать алгоритмы быстрого преобразования Фурье, которые позволяют уменьшить число вычислительных операций.

$$B_l(\tau) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\omega_1}^{\omega_1} \mathbf{S}(\omega) \mathbf{K}_l^*(\omega) \exp[j(\omega\tau)] d\omega, \quad (2.10)$$

где
$$\mathbf{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp[-j(\omega(t - \tau))] dt, \quad (2.11)$$

$$\mathbf{K}_l^*(\omega) = \int_{-\omega_1}^{\omega_1} (f_0)_l \exp(-j\omega t) dt. \quad (2.12)$$

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 $(f_0)_l$ для промаха с номером l . $\mathbf{K}_l^*(\omega)$ можно назвать частотной характеристикой дисперсионного фильтра, перестраиваемого на разные промахи $l\Delta y$. Дисперсионным называют фильтр, задержка сигнала в котором зависит от его частоты.

Полученные математические формулы для взаимной корреляционной функции (2.4), (2.5), (2.10) не решают полностью задачу реконструкции внутренней структуры объекта в сечении как, например, преобразование Радона. Потребуется дополнительные математические операторы для полного решения поставленной задачи реконструкции. Преобразование Радона, по существу, является сложным математическим оператором, состоящим из последовательности более простых операторов (1.28). Тем не менее полученные выражения для взаимной корреляционной функции могут послужить начальным моментом для написания алгоритма реконструкции картины сечения исследуемого объекта.

2.2 Алгоритм обработки сигнала и построения изображения

Для построения алгоритма реконструкции внутренней структуры объекта в сечении компоненты взаимной корреляционной функции (2.5) надо представить в дискретном виде. Шаг дискретизации по времени определяется в соответствии с теоремой Котельникова. Реконструируемый сложный объект состоит из N точек. Траекторный сигнал, отраженный от i -й точки, в дискретном виде можно записать так:

$$s_i(k) = \frac{a(x_i, y_i)}{(v(k\Delta t) + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} \left[\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}\right) + j \sin\left(-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}\right) \right]. \quad (2.13)$$

Сигнал, отраженный от всех N точек, расположенных в сечении объекта, можно представить суммой:

$$s(k) = \sum_{i=1}^N s_i(k). \quad (2.14)$$

Траекторный сигнал от трех точек, рассчитанный по формулам (2.13) и (2.14), представлен на рисунке 2.4, *а*, а на рисунке 2.4, *б* дан его спектр.

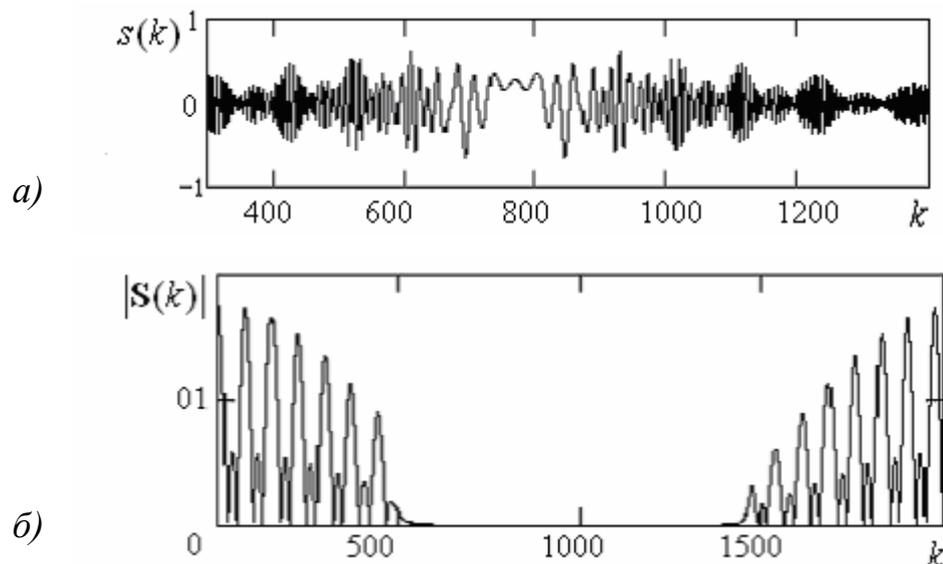


Рисунок 2.4 – Результат сбора данных: *а*) траекторный сигнал, от трехточечного объекта; *б*) его спектр

Изрезанность спектра на рисунке 2.4, б можно интерпретировать как проявление интерференции в области пространственных частот (в спектральной области). Далее необходимо выразить опорный сигнал в дискретном виде [42]:

$$s_l(k) = \frac{1}{(v(k\Delta t) - C_a/2)^2 + y_l^2} \left[\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) - C_a/2)^2 + y_l^2}\right) - j \sin\left(-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) - C_a/2)^2 + y_l^2}\right) \right]. \quad (2.15)$$

Особенность опорного сигнала в том, что он является комплексно-сопряженным объектному сигналу, т. е. перед мнимой частью должен стоять минус. В выражении (2.15) через l обозначен номер опорного сигнала. Всего L опорных сигналов. Каждому l соответствует задаваемое значение промаха y_l . Промахи y_l берутся через равные промежутки Δy . В дальнейшем Δy будем называть шагом по промаху.

Преобразуем отсчеты траекторного доплеровского сигнала (2.14) в отсчеты спектра $\mathbf{S}(n)$ [12, 42]:

$$\mathbf{S}(n) = \sum_{k=1}^N s(k) \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn), \quad (2.16)$$

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

В настоящее время нет необходимости программировать формулу (2.16), так как в распоряжении имеются алгоритмы быстрого преобразования Фурье.

Следующим шагом на пути реконструкции картины сечения объекта является определение комплексно-сопряженного спектра опорного сигнала, т. е. частотной характеристики перестраиваемого дисперсионного фильтра. Перестраиваемый дисперсионный фильтр должен поочередно настраиваться на L промахов. При настройке на промах l частотную характеристику дисперсионного фильтра можно записать в виде:

$$\mathbf{K}_l^*(n) = \sum_{k=1}^N s_l(k) \exp(j \frac{2\pi}{N} kn), \quad (2.17)$$

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

Отсчеты частотной характеристики $\mathbf{K}_l(n)$ необязательно вычислять с помощью выражения (2.17). Можно воспользоваться стандартными алгоритмами быстрого преобразования Фурье.

Далее вычислим свертку двух функций, т. е. найдем отсчеты взаимно корреляционной функции:

$$B_l(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{S}(n) \mathbf{K}_l^*(n) \exp(j \frac{2\pi}{N} kn), \quad (2.18)$$

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

Свертку двух функций (2.18) также можно выполнить с помощью быстрого обратного преобразования Фурье, перемножив сначала одноименные отсчеты двух функций под знаком суммы в выражении (2.18).

Можно записать весь представленный алгоритм с помощью математических операторов:

$$B_l = F^{-1} \{ [Fs] \times [Fs_{l,op}] \}, \quad (2.19)$$

где s – зарегистрированный при сборе данных траекторный доплеровский сигнал; $s_{l,op}$ – опорный траекторный сигнал, рассчитанный для случая пролета мимо точечного объекта при промахе l .

Замечания по построению изображения

Полученные отсчеты взаимной корреляционной функции для опорного сигнала s_l соответствуют одной строке разворачиваемого изображения. Число строк изображения равно числу опорных сигналов. Каждый опорный сигнал соответствует конкретному промаху. Промахи следуют один за другим от минимального до максимального значения с некоторым шагом. При этом для компенсации радиального ослабления сигнала амплитуда отсчетов опорного сигнала умножается на величину промаха в четвертой степени. Таким образом, вводится автоматическая регулировка усиления принимаемого сигнала.

Замечание по выбору шага по промаху

Если шаг по промаху брать в соответствии с теоремой Котельникова, то между отсчетами будет очень большой интервал, потому что траекторная

функция при движении в радиальном направлении к объекту имеет очень узкий спектр. Предлагается брать интервал между отсчетами по промаху таким же, как интервал между отсчетами траекторного сигнала. В этом случае получается одинаковый масштаб изображения по координате промаха и поперечной дальности при развертке набора корреляционных функций. При этом отсчеты по промаху будут нести значительную избыточность информации.

Далее отсчеты всех взаимных корреляционных функций нормируются по отношению к наибольшему значению. Это можно сделать, если предварительно отыскать максимальное значение из всего набора корреляционных функций, т. е. вводится операция поиска максимума по всему двумерному комплексному массиву данных. После этого модуль каждого комплексного числа перекодируется в яркостный или цветовой пиксель. Далее пиксели разворачиваются по строкам в декартовой системе координат. В результате такой развертки воспроизводится картина внутренней структуры объекта в сечении.

Прежде чем приступить к модельной реконструкции изображения простейших объектов, следует ввести некоторые ограничения. Предположим, что диаграмма приема и излучения локатора изотропная в плоскости, секущей исследуемый объект и проходящей через траекторию относительного движения. Будем также считать, что вне этой плоскости приема нет (рисунок 2.5, *а*).

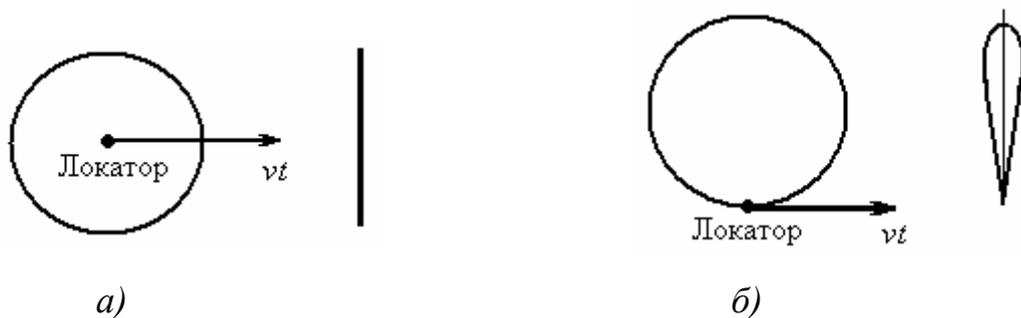


Рисунок 2.5 – Диаграммы направленности локатора: *а*) идеальная, *б*) реальная

В плоскости, перпендикулярной траектории относительного движения, диаграмма направленности должна иметь нулевую ширину.

Диаграмма направленности антенны для реальных локаторов приведена на рисунке 2.5, б. Результаты модельной реконструкции, которые приводятся ниже и соответствуют идеальной диаграмме направленности (рисунок 2.5, а).

Поясним физику реконструкции изображения по данному методу. Ранее упоминалось (1.1), что синтезированная апертура обладает свойством фокусировки на определенную дальность. Обратимся к оптической аналогии. Синтезированную апертуру можно отождествить с выпуклой оптической линзой. Такой аналогией при определенных допущениях пользовались многие авторы, в том числе Д.Менса, Ш.Халеви и Г.Уэйд [31].

Изменяя параметры опорного сигнала, можно перестраивать дисперсионный фильтр, т. е. управлять фокусным расстоянием синтезированной линзы (синтезированной апертуры). Это дает возможность просканировать управляемым фокусным пятном внутреннюю структуру объекта и развернуть изображение этой структуры.

Возьмем одноточечный объект. Траекторный сигнал, спектр траекторного сигнала и его взаимная корреляционная функция с согласованным по промаху опорным сигналом представлены на рисунке 2.6. Следует обратить внимание на малый уровень боковых лепестков взаимной корреляционной функции (рисунок 2.6, в). Это сказывается положительное влияние подынтегрального ядра в выражении (2.4), стоящего перед экспонентой.

Передаточная функция дана на рисунке 2.7, а. На рисунке 2.7, б представлен вид передаточной функции сверху. Моделирование проводилось при следующих условиях: $\lambda = 0.0013623$ м; $v = 0.28$ м/с; $\Delta t = 0.0008$ с; число отсчетов траекторного сигнала $N = 1024$; число отсчетов по промаху $L = 64$; шаг по промаху $\Delta y = 2.625\lambda$; размеры изображения (рисунок 2.7, б) $168\lambda \times 168\lambda$.

Передаточная функция точки характеризует разрешающую способность метода на основе линейного апертурного синтеза. Представленный метод обладает высоким разрешением по координате вдоль траектории относительного движения.

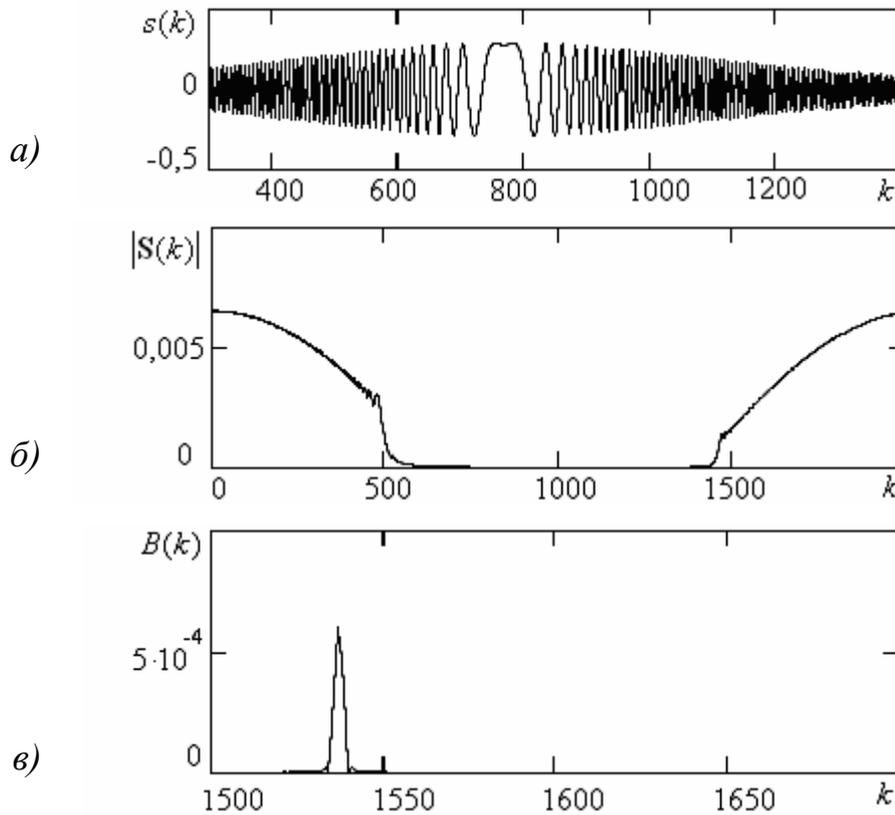


Рисунок 2.6 – Расчетные данные: *а)* траекторный сигнал от одноточечного объекта; *б)* спектр траекторного сигнала; *в)* взаимная корреляционная функция

Это разрешение характеризуется «талией восьмерки» и равно $\lambda/5$. По координате промаха разрешающая способность метода гораздо хуже, чем вдоль координаты расстояния по траектории.

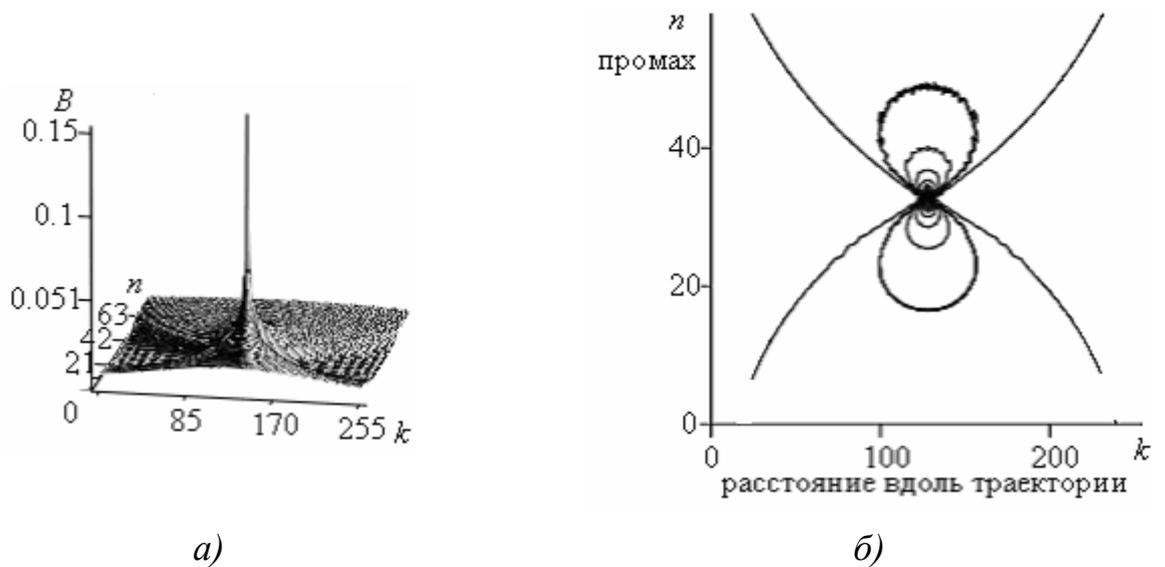


Рисунок 2.7 – Результат обработки траекторного сигнала: *а)* передаточная функция точки; *б)* вид передаточной функции сверху

К детальному обсуждению разрешающей способности синтезированной апертуры мы вернемся в дальнейшем, когда будем сопоставлять результаты исследований Д.Менсы и предлагаемого метода, а пока констатируем, что передаточная функция точки при линейном апертурном синтезе в сечении горизонтальной плоскостью имеет вид восьмерки.

Особый интерес представляет спектр передаточной функции точки при линейном апертурном синтезе. Возьмем прямое двумерное преобразование Фурье от передаточной функции точки (2.16) и тем самым восстановим спектр пространственных частот. Он будет располагаться на кольце.

$$F(X, Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x, y) \exp[j(xX + yY)] dx dy. \quad (2.20)$$

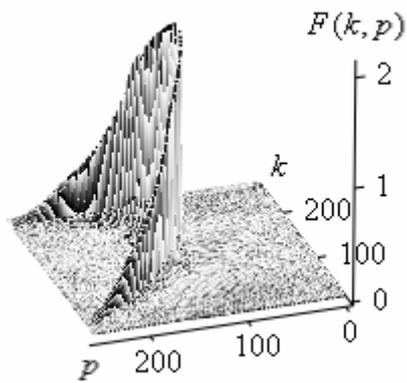
Алгоритм Д.Менсы отличается тем, что регистрируется непосредственно пространственный спектр на кольце и по нему восстанавливается передаточная функция точки. Для этого берется обратное преобразование Фурье от пространственного кольцевого спектра. В дискретном виде, через двумерный массив отсчетов взаимной корреляционной функции, отсчеты двумерного спектра пространственных частот определяются с помощью двумерного дискретного преобразования Фурье следующим образом:

$$F(k, p) = \frac{1}{N} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^N B(n, l) \exp[j \frac{2\pi}{NN} (nk + lp)] \quad (2.21)$$

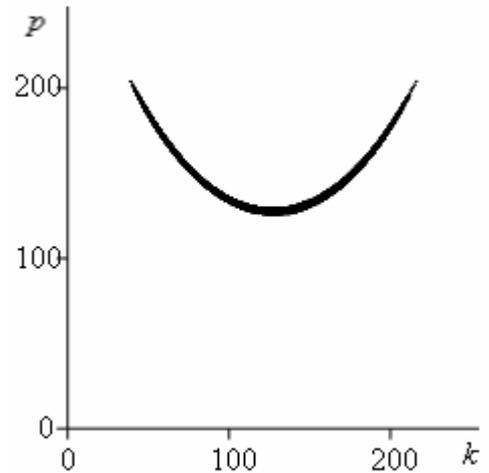
Формулу (2.21) программировать не обязательно. Лучше воспользоваться стандартными алгоритмами быстрого двумерного преобразования Фурье.

Спектр передаточной функции точки при реконструкции изображения с помощью линейной апертуры представлен на рисунке 2.8, а. На рисунке 2.8, б представлен вид сверху этого же спектра.

На рисунке 2.8, можно видеть, что это лишь половина кольцевого спектра. Спектр немного отличается от полукольцевого, потому что шаг по координате промаха взят крупнее, чем шаг по траектории. Если выровнять шаги по обеим координатам, то спектр станет полукольцевым.



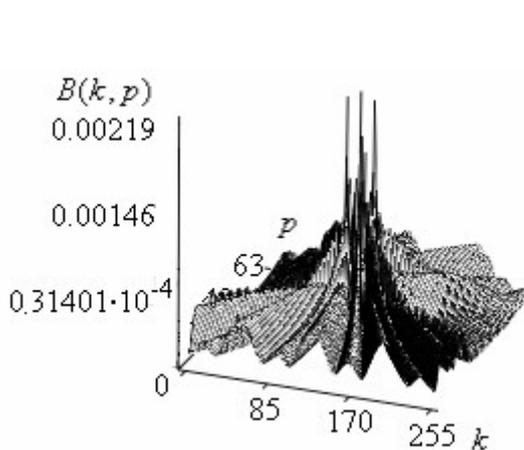
a)



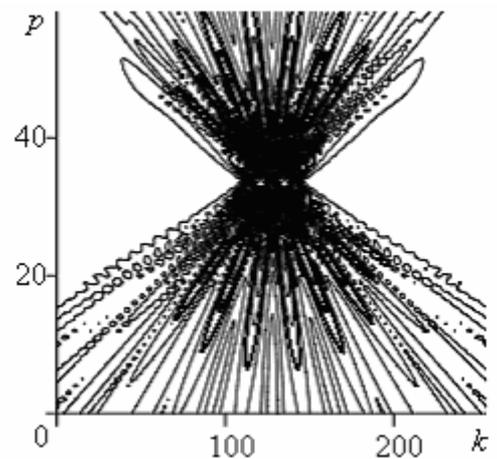
б)

Рисунок 2.8 – Результат обработки траекторного сигнала от точки: а) спектр передаточной функции точки; б) вид сверху этого же спектра

Рассмотрим результаты реконструкции трехточечного объекта.



a)



б)

Рисунок 2.9 – Результат корреляционной обработки траекторного сигнала от трех точек: а) передаточная функция трех точек; б) изображение трехточечного объекта

В качестве регистрационных данных для реконструкции будем использовать траекторный сигнал, представленный на рисунке 2.4, а. Подвергнем его многократной корреляции с набором опорных сигналов и построим поверхность из набора корреляционных функций рисунок 2.9. При расчете сигнала реконструируемые точки располагались в ряд на расстоянии 4.6λ , на промахе 86.6λ .

На рисунке 2.10, *а* изображен спектр пространственных частот трехточечного объекта, а на рисунке 2.10, *б* – вид спектра сверху.

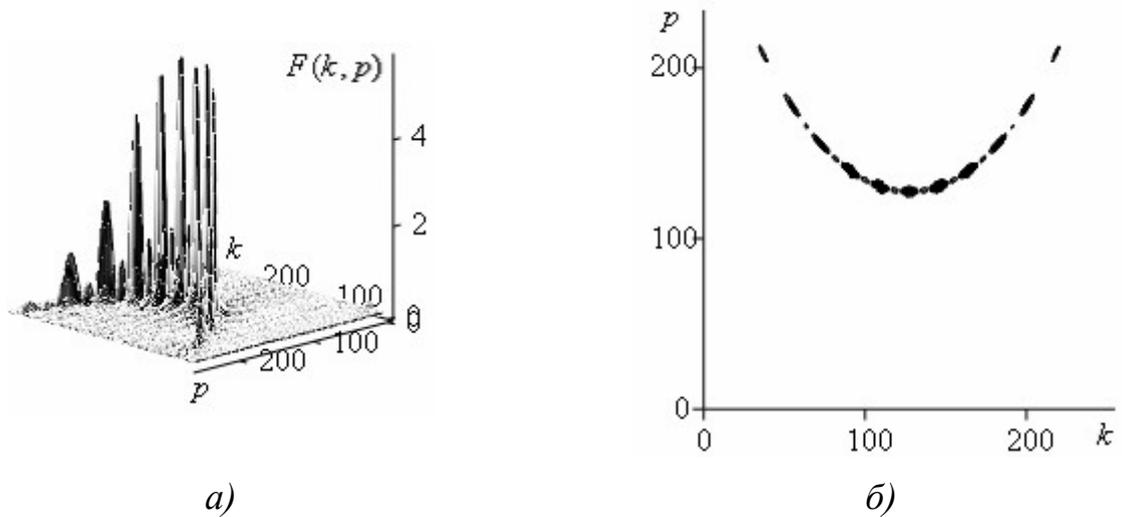


Рисунок 2.10 – Спектральные характеристики: *а*) кольцевой спектр передаточной функции трехточечного объекта; *б*) вид этого спектра сверху

На изображении трехточечного объекта (рисунок 2.9, *б*) хорошо виден интерференционный узор. Интерференция проявляется также на спектре пространственных частот (рисунок 2.10, *а*) в виде изрезанности спектральной функции на полукольце. Таким образом, можно видеть, что интерференция проявляется одновременно как в пространственной области (рисунок 2.9), так и в области пространственных частот (рисунок 2.10). Интерференция ярко проявляется там, где перекрываются круги трех восьмерок, т. е. там, где налагаются передаточные функции отдельных точек, каждая из которых похожа на восьмерку (рисунок 2.7, *б*). Следует заметить, что дифракционные явления в виде колец Эйри (рисунок 1.2) на рисунке 2.9 не проявляются.

На изображениях трех точек (рисунки 2.7, *б* и 2.9, *б*) отображаются «пьедесталы» (основания) передаточных функций точек. На уровне «пьедесталов» передаточные функции точек перекрываются, накладываются и, в конце концов, когерентно суммируются. В результате проявляются интерференционные явления, которые затрудняют восприятие результатов реконструкции изображения.



а)

б)

Рисунок 2.11 – Изображения трехточечных объектов при разных порогах перекодировки амплитуд взаимно корреляционной функции в цветные

пиксели: а) $U_{\text{пор}} = 0$; б) $U_{\text{пор}} = 0,4U_{\text{max}}$

Изображение можно сделать более удобными для восприятия, если убрать «пьедесталы» передаточных функций. Для этого нужно ввести порог, отсекающий пьедестал, и сделать перекодировку амплитуды взаимно корреляционной функции в цветные пиксели в интервале от этого порога до наибольшего значения, выбираемого из максимумов всех корреляционных функций.

На рисунках 2.7, б и 2.9, б перекодировка осуществлялась в диапазоне амплитуд от 0 до U_{max} . На рисунке 2.11, а перекодировка была в диапазоне от $0,1U_{\text{max}}$ до U_{max} , а на рисунке 2.11, б – в диапазоне от $0,4U_{\text{max}}$ до U_{max} .

Из представленного на рисунке 2.11 изображения видно, что изменением порога перекодировки можно уменьшить мешающее действие интерференции, однако эта мера не решает проблему интерференции. Изменяя порог перекодировки, можно срезать слабо отражающие точки на изображении внутренней структуры объекта и потерять информацию о важных деталях объекта. В связи с этим нужно искать другие пути решения этой проблемы.

Рассмотрим изображение протяженного объекта, состоящего из ряда точек, расположенных в виде тупого угла (рисунок 2.12). Расстояние между точками составляет $0,328\lambda$.

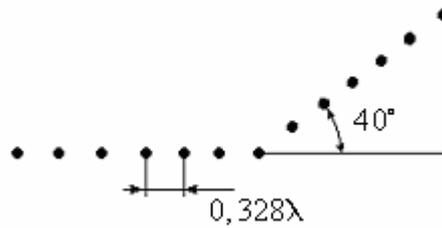


Рисунок 2.12 – Многоточечный объект в виде тупого угла

Траекторный доплеровский сигнал от этого объекта и спектр изображены на рисунке 2.13.

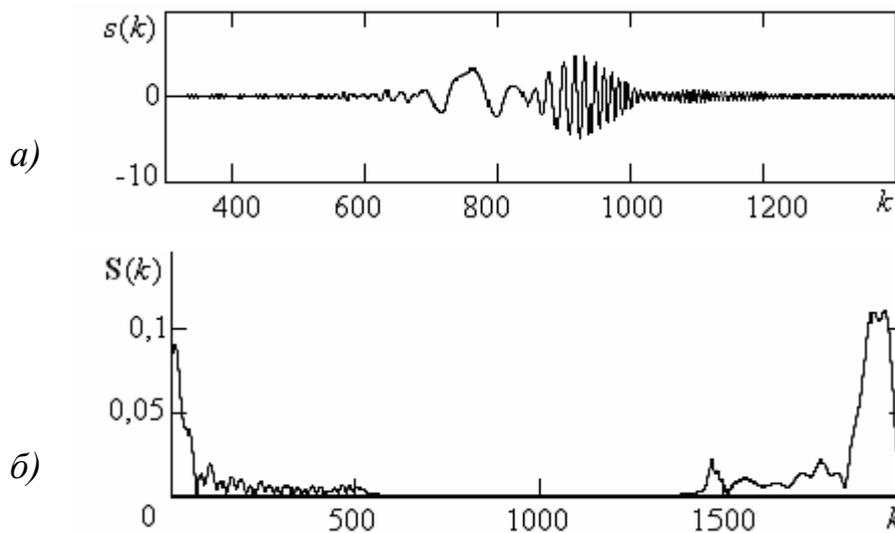


Рисунок 2.13 – Расчетные данные: а) траекторный сигнал многоточечного объекта в виде тупого угла; б) спектр траекторного сигнала

На рисунке 2.14 представлено изображение многоточечного объекта в виде тупого угла, вид которого показан на рисунке 2.12.



Рисунок 2.14 – Изображение многоточечного объекта в виде тупого угла

Реконструированное изображение объекта из ряда точек в виде тупого угла имеет вид двух пересекающихся лучей. Стороны угла дают узкие лучи, направленные перпендикулярно к каждой стороне. Сопоставление рисунков 2.9, б; 2.11, а; 2.14 свидетельствует, что когерентная реконструкция сопровождается интерференционными проявлениями на изображениях, которые принимают вид диаграмм обратного рассеяния волн. Если не удалять «пьедесталы» и не принимать никаких мер, то на реконструированных изображениях вместо протяженных объектов будут видны их диаграммы обратного рассеяния волн. При этом результирующая диаграмма складывается из диаграмм рассеяния отдельных точек в виде восьмерки (рисунок 2.7, б).

Представляет интерес спектр пространственных частот изображения многоточечного объекта, приведенного на рисунке 2.14. Он располагается на полукольце так же, как и спектр передаточной функции точки (рисунок 2.8, б), и так же, как спектр трехточечного объекта (рисунок 2.10). В случае протяженных объектов наблюдаются интерференционные явления на пространственном спектре, расположенном на полукольце (рисунок 2.15).

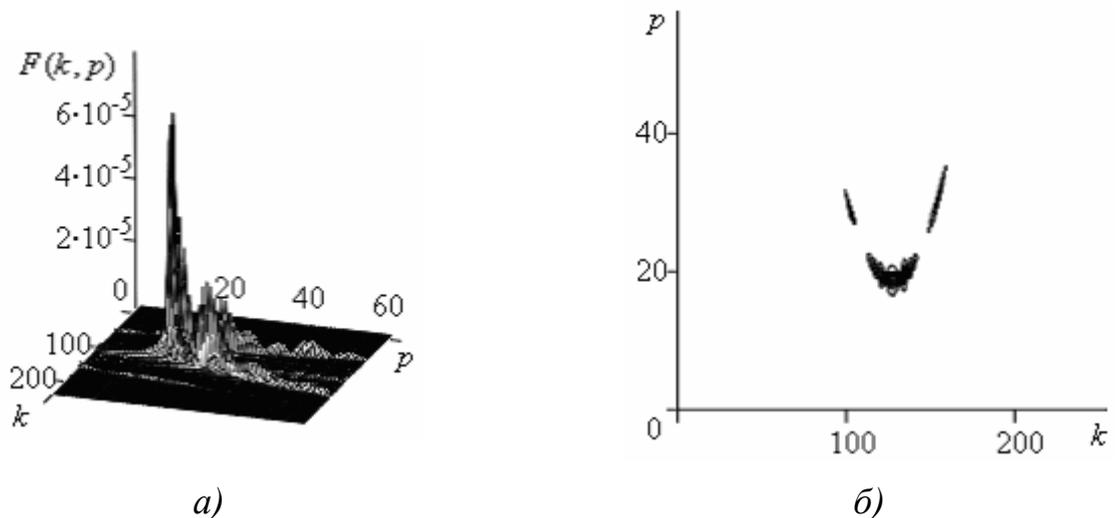


Рисунок 2.15 – Спектральные характеристики: а) кольцевой спектр пространственных частот передаточной функции протяженного объекта в виде тупого угла; б) вид спектральной функции в плане

Интерференция проявляется в том, что амплитуда спектральной функции на полукольце оказывается промодулированной некоторой огибающей. Огибающая спектра определяет его ширину. Ширину спектра можно отсчитывать по уровню 0,707 от максимального значения огибающей спектра. Существует обратно пропорциональная связь между протяженностью передаточной функции и шириной проекции спектра полукольца на плоскость, ориентированную в направлении этой протяженности передаточной функции (рисунки 2.14 и 2.15). Пространственный спектр, ни при каких обстоятельствах, не покидает пределы полукольца.

Теперь, когда получены результаты модельной реконструкции простейших объектов с помощью линейного апертурного синтеза, можно приступить к сопоставлению полученных результатов с результатами томографии простейших объектов по методу Менсы.

2.3 Сопоставление результатов модельной реконструкции изображения точечных объектов предлагаемым методом с результатами томографии по методу Д.Менсы

Много информации о возможностях любого метода реконструкции может дать анализ передаточной функции точки. Сопоставим передаточные функции точки, полученные разными методами. Математическое выражение (2.22), взятое из работы [31], позволяет рассчитать и построить передаточную функцию точки для метода Менсы.

$$C(|\vec{r}|, \phi) = \frac{A}{|\vec{r}|} \int_0^{2\pi} \exp\left[i \frac{4\pi}{\lambda} |\vec{r}'| \cos(\phi - \theta)\right] d\theta, \quad (2.22)$$

Передаточная функция точки, рассчитанная в соответствии с выражением (2.22), приведена на рисунке 2.16, *a*. Ее форму в виде концентрических кругов определяет функция Бесселя (2.22). Круги напоминают кольца Эйри в оптике.

В оптике эти кольца образуются в том случае, если лучи от удаленного когерентного источника падают на экран через очень маленькое отверстие в за-

тениющем экране. На этом же рисунке приведена передаточная функция точки, полученная методом синтеза апертуры для прямолинейной траектории.

Если считать, что функция Бесселя (2.22) объективно описывает физику дифракционных явлений, то кольца Эйри, рассчитанные с помощью этой функции, указывают на связь апертурного синтеза с когерентной оптикой. Не случайно в статье Менсы приводится оптический аналог системы, синтезирующей апертуру по кругу [31].

Передаточные функции точек позволяют объективно оценить возможности того или иного метода, отметить его сильные и слабые стороны. Рисунок 2.16, *a* показывает, что передаточная функция точки, полученная методом Менсы, имеет главный лепесток шириной $\lambda/5$, что характеризует высокую разрешающую способность метода, однако уровень первого бокового лепестка этой функции всего лишь на 8 дБ ниже уровня главного лепестка, что существенно может ограничить динамический диапазон восстанавливаемых изображений.

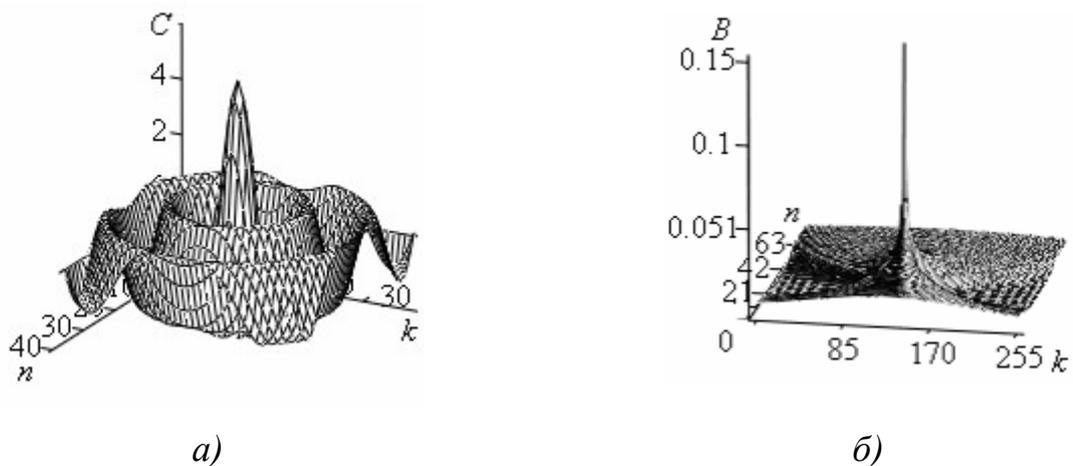


Рисунок 2.16 – Передаточная функция точки: *a*) полученная моделированием по методу Менсы; *б*) полученная моделированием синтеза апертуры для прямолинейной траектории

Для устранения влияния «артефактов», т. е. боковых лепестков передаточной функции точки, Д.Менса предлагает двухпозиционную локацию или эквивалентное ей многочастотное зондирование. Это ведет к расширению спектра зондирующего сигнала и является отходом от когерентности, которую хо-

телось бы сохранить, так как она дает возможность легко управлять разрешающей способностью, а, следовательно, увеличением. Для этого достаточно уменьшить длину волны. Это следует из того, что потенциальная (максимально достижимая) разрешающая способность когерентного томографа при круговом синтезе апертуры равна $\lambda/5$ [31].

При сравнении результатов реконструкции точечных объектов двумя методами можно видеть совпадение передаточных функций точки. В связи с этим возникает ряд вопросов: связаны ли эти два разных метода друг с другом; не вытекает ли один метод из другого; в чем принципиальное отличие метода реконструкции изображения объектов с помощью синтеза апертуры для прямолинейной траектории от метода Менсы, т. е. от метода обращения по Фурье.

Целью дальнейшего исследования является сравнение двух методов томографии и выяснение подчиненности этих двух методов общим закономерностям. Этот вопрос интересен также потому, что не бывает чистого кругового апертурного синтеза. Чаще всего он переходит в синтез для прямолинейной траектории. Достаточно только учесть радиальное ослабление сигнала в соответствии с формулой локации:

$$s_i(r) = \frac{Aa_i}{r^2}, \quad (2.23)$$

где s_i – сигнал от i -й точки объекта, A – несущественная постоянная, r – текущее расстояние от i -й точки до наблюдателя, a_i – комплексная амплитуда рассеяния в i -й точке.

В работе Д.Менсы такое ослабление (2.23) сигнала не учитывалось. При круговом апертурном синтезе значительная часть точек объекта удалена от центра окружности и расположена вблизи круговой траектории, при перемещении по которой локатор синтезирует апертуру.

Если учесть радиальное ослабление сигнала в соответствии с формулой локации (2.23), то для точек, близко расположенных к траектории, эффективное синтезирование апертуры будет не по всей окружности, а лишь на отрезке

близко расположенной дуги окружности, которую можно в известном приближении интерпретировать как отрезок прямой. То есть точки, удаленные от центра и приближенные к круговой траектории, будут подвергаться скорее прямолинейному апертурному синтезу, чем круговому синтезированию апертурной *

На рисунке 2.17, *а* представлены результаты модельного томографирования удаленной от центра точки без учета радиального ослабления сигнала. На рисунке 2.17, *б* иллюстрируется автоматический переход от кругового апертурного синтеза к линейному синтезу при одном лишь учете радиального ослабления сигнала в соответствии с формулой (2.23).

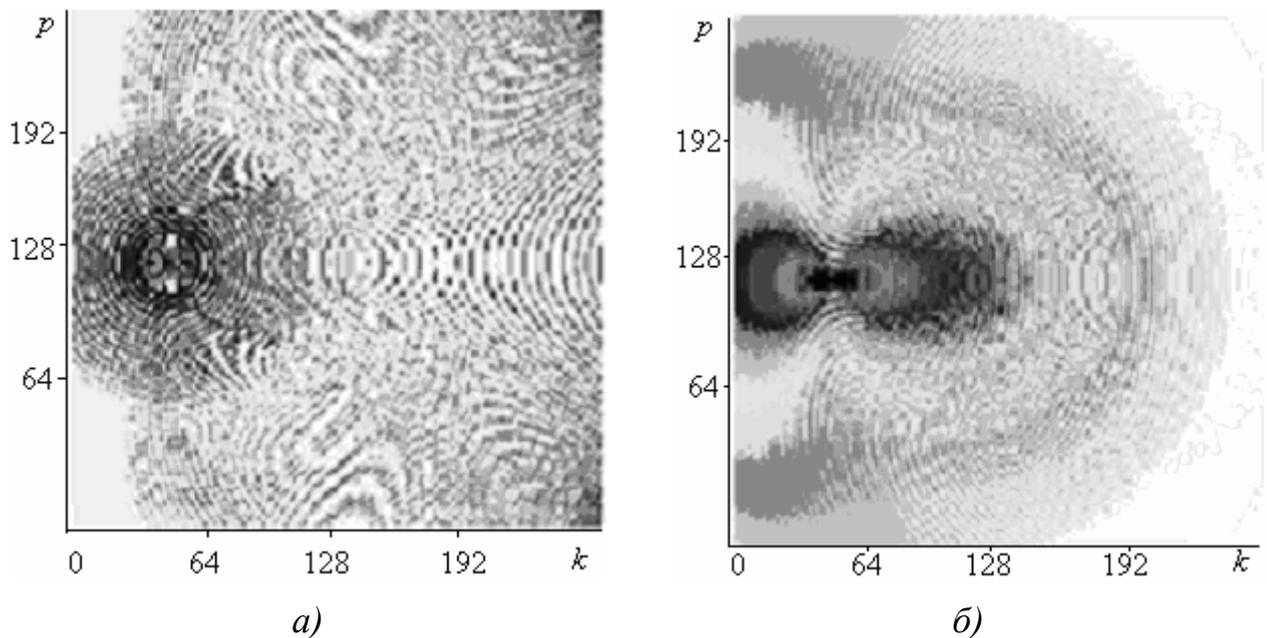


Рисунок 2.17 – Круговой апертурный синтез при томографии одноточечного объекта: *а)* без учета радиального ослабления сигнала; *б)* с учетом радиального ослабления сигнала

В данном случае при моделировании были перенесены многие приемы синтеза апертурной для прямолинейной траектории на круговой апертурный синтез. Ниже приводится краткое изложение алгоритма кругового синтезирования апертурной [81]. В дальнейшем будут даны более детальные разъяснения этого

* В данном случае считается, что движение локатора по кругу эквивалентно вращению объекта вокруг собственной оси при неподвижном локаторе

алгоритма. Краткий алгоритм приводится здесь для разъяснения существа кругового апертурного синтеза в пространственной области, чтобы акцентировать отличия этого алгоритма от алгоритма синтеза апертуры в Фурье области. Результаты моделирования (рисунок 2.17) получены с помощью приведенного ниже алгоритма при следующих условиях.

Траекторный сигнал $s(t)$ рассчитывался по формулам:

для случая без учета радиального ослабления сигнала

$$s(t) = (1) \cos \varphi(t), \quad (2.24)$$

с учетом радиального ослабления сигнала

$$s(t) = (1/R^2(t)) \cos \varphi(t), \quad (2.25)$$

где $\varphi(t) = \frac{4\pi R(t)}{\lambda}$; $\lambda = 1,3$ мм – длина волны; $R(t) = \sqrt{R_0^2 + \delta^2 - 2R_0\delta \cos \phi(t)}$ – расстояние от томографируемой точки до локатора, движущегося по круговой траектории; $R_0 = (12,6 \lambda)$ – радиус круговой траектории, по которой движется локатор, осуществляющий апертурный синтез; $\delta = (7,6 \lambda)$ – радиальное удаление томографируемой точки от центра синтезирования апертуры; $\phi(t) = kt$, $0 \leq \phi(t) \leq 2\pi$ – текущий угол между радиусами R_0 и δ при круговом синтезе апертуры.

Процесс моделирования сводился к расчету взаимной корреляционной функции между траекторным сигналом вида (2.24) или (2.25) с опорными сигналами для одноточечного объекта. Если не нужно учитывать радиальное затухание, то в выражении (2.26) перед экспонентой оставляют только $A = const$.

$$B(\delta_{i,k}, \phi_{i,k}) = \int_0^{\delta_1} \int_0^{2\pi} \frac{A}{R^2(t)} \exp[-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R^2 + \delta^2 - 2R\delta \cos \theta} - \sqrt{R^2 + \delta_{i,k}^2 - R\delta_{i,k} \cos(\theta - \phi_{i,k})}] d\delta_0 d\theta. \quad (2.26)$$

Для того чтобы построить изображение в декартовой системе координат, нужно задаться декартовой сеткой, а расчеты сделать в полярной системе координат. Для перехода к полярной сетке $\delta_{i,k}$ нужно выразить как

$\delta_{i,k} = \sqrt{[(\Delta x)i]^2 + [(\Delta y)k]^2}$, а $\phi_{i,k} = \arctg(\Delta xi / \Delta yk)$, где $i=1,2,3\dots 256$, $k=1,2,3\dots 256$, $(\Delta x)i$ и $(\Delta y)k$ - декартовы координаты опорной точки, а $\phi_{i,k}$ - полярный угол опорной точки.

При сравнении рисунка 2.17, *а* и рисунка 2.17, *б* видно, как, при учете радиального ослабления в соответствии с формулой (2.23) передаточная функция точки в сечении горизонтальной плоскостью приобретает вид восьмерки, которая характерна для синтеза апертуры по прямолинейной траектории (ср. с рисунком 2.7, *б*).

При получении результатов в данной работе использовались операции над траекторными сигналами, применяемые при прямолинейном синтезе апертуры, т. е. применялась операция свертки двух функций, которая эквивалентна операции фильтрации. При этом не использовались традиционные приемы реконструкции с помощью операций свертки и обратного проецирования.

Не использовалась также реконструкция методом обращения по Фурье [31, 27]. Свертка, применяемая в методе обратного проецирования, имеет совсем другое назначение и не подразумевает умножение на опорные функции. При выполнении операции свертки в томографии одна из перемножаемых функций, так называемая функция окна, остается неизменной во всех циклах обработки проекций. Задачей применяемого окна является регуляризация сворачиваемой функции, которая продиктована проблемами вычисления преобразования Гильберта. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в разделе 3.

В изложении данного алгоритма можно обойтись на первом этапе без понятия проекции и преобразования Радона. Если все же траекторный доплеровский сигнал рассматривать как проекцию плотности отражения на траекторию, то можно сказать, что результаты были получены путем корреляции зарегистрированной проекции томографируемого объекта с опорными проекциями одноточечных объектов, лежащих на разных промахах.

Сравним результаты двух методов реконструкции. Общим параметром при линейном и круговом синтезе апертуры является угловой сектор синтеза

апертуры. При линейной апертуре (движение локатора по прямой от $-\infty$ до $+\infty$) он не может превышать 180° .

На рисунке 2.18, *а* приведена передаточная функция точки, полученная Д.Менсой при полукруговой апертуре, т. е. повороте точки на 180° . Моделирование производилось на волне $\lambda=3$ см. На рисунке 2.18, *б* приведена передаточная функция точки, полученная при линейном синтезе апертуры в секторе 150° . Моделирование производилось на волне $\lambda=1,3$ мм.

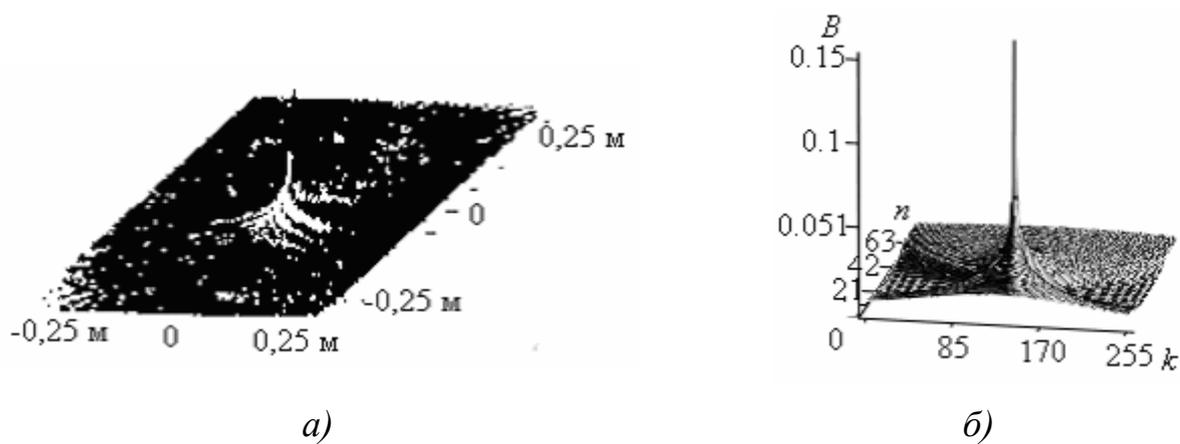


Рисунок 2.18 – Передаточная функция точки: *а*) полученная Д.Менсой [31] при синтезе апертуры по кругу в секторе 180° ; *б*) передаточная функция точки, полученная синтезом апертуры для прямолинейной траектории в секторе 180°

Рисунок 2.18 демонстрирует совпадение результатов при реконструкции точки методом Менсы и методом линейного апертурного синтеза.

На рисунке 2.19 представлены результаты реконструкции точки при синтезировании апертуры в секторе 60° . Приведенные результаты (рисунки 2.18 и 2.19) демонстрируют хорошее совпадение результатов реконструкции точки и показывают, что потенциальные возможности обоих методов одинаковы с точки зрения разрешающей способности в случае, если сектора синтезирования апертуры совпадают. У обоих методов разрешение по координатам продольной и поперечной дальности зависит от сектора синтезирования апертуры.

При сужении сектора синтезирования апертуры происходит ухудшение разрешающей способности как по координате поперечной дальности, так и по

координате продольной дальности. Кроме того, при сужении сектора синтезирования передаточная функция точки вытягивается по координате продольной дальности (вдоль координаты промаха).

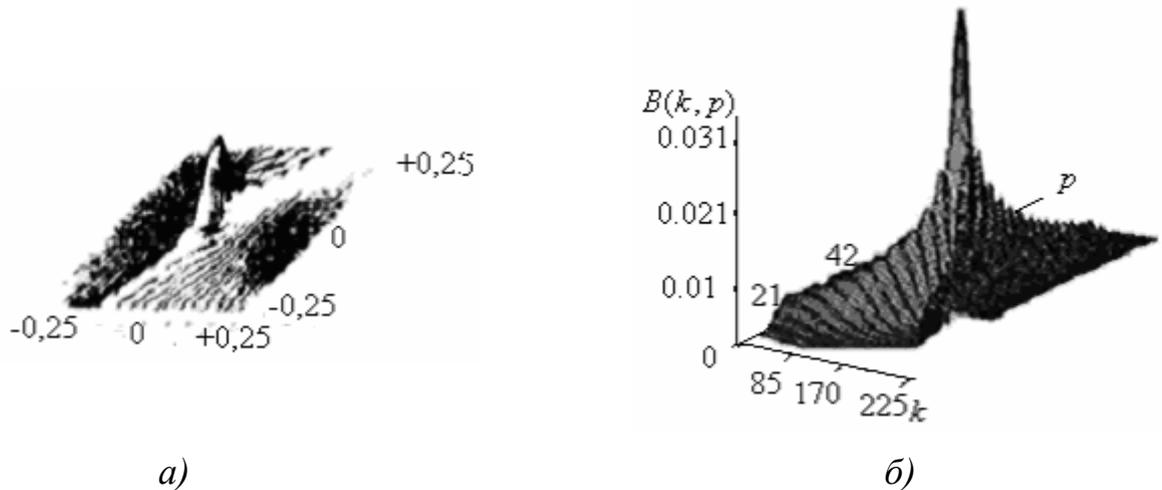


Рисунок 2.19 – Передаточные функции точки, полученные двумя разными методами при секторе синтезирования апертуры 60° : а) результат Д.Менсы[31]; б) результат прямолинейного синтеза апертуры по предлагаемой методике

Одинакового разрешения по обеим координатам можно добиться либо при круговом обходе точки, т. е. при круговом апертурном синтезе по методу Менсы, либо при линейном синтезировании апертуры в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Результаты взаимно-перпендикулярного апертурного синтеза будут показаны далее в разделе 2.5.2.

Результаты сопоставления будут неполными без сравнения спектральных характеристик. Д.Менса при повороте объекта на 360° регистрирует значения пространственного спектра на кольце. Результату реконструкции точки по методу Менсы в секторе 180° будет соответствовать спектральная функция на полукольце (рисунок 2.20, а). Если взять двумерное преобразование Фурье от передаточной функции точки (рисунки 2.7 или 2.18, б), полученной с помощью синтезирования апертуры по линейной траектории, также получается спектральная функция на кривой, напоминающей полукольцо (рисунок 2.20).

Сопоставляя спектры передаточных функций точки (рисунки 2.20, *a* и 2.20, *б*), можно убедиться, что есть сходство этих спектров. На рисунке 2.20, *б* не удалось избежать периодичности, т. е. повторяемости спектральной картины, которая сопровождает дискретные операции.

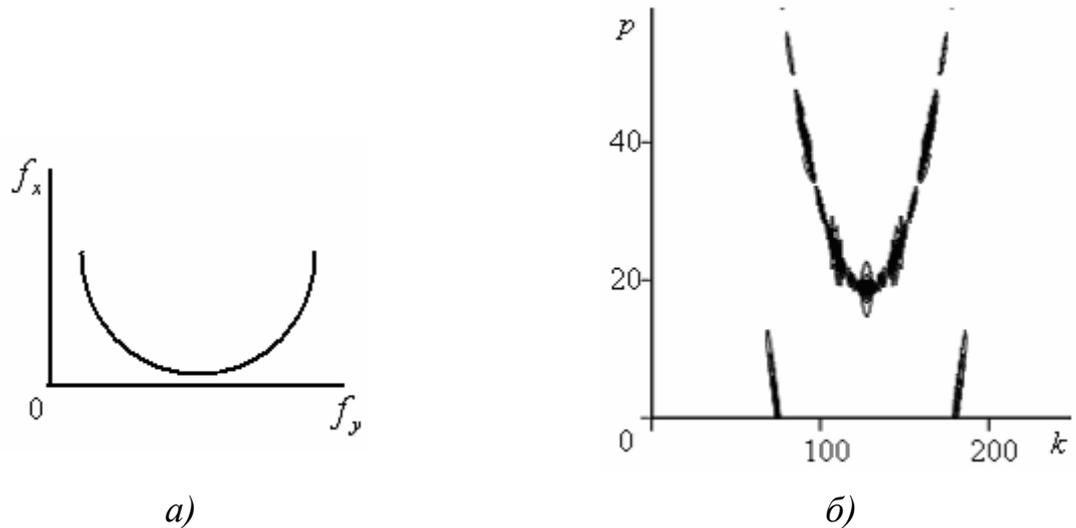


Рисунок 2.20 – Вид сверху на спектры пространственных частот: *a*) полукольцевой спектр, зарегистрированный Д.Менсой; *б*) полукольцевой спектр, полученный прямым преобразованием Фурье от передаточной функции точки

Выводы:

1. Сравнимые методы когерентной реконструкции отличаются. В методе [31] при томографировании объекта регистрируются значения спектра пространственных частот на кольце, а при линейном апертурном синтезе регистрируется пространственная функция, а по существу – траекторный доплеровский сигнал.

2. Результаты сопоставления передаточных функций точки и их двумерных спектров говорят о том, что оба метода дают сходные результаты, которые не противоречат друг другу и подчиняются общим закономерностям.

3. Прямолинейный апертурный синтез позволяет получить передаточную функцию точки такую же, как в [31] при полукольцевой или частично круговой апертуре – 160° .

4. При одинаковых секторах синтезирования апертуры оба метода дают одинаковое разрешение.

5. Сужение сектора синтезирования апертуры в обоих методах приводит к размыванию максимума передаточной функции точки и ее удлинению вдоль линии, перпендикулярной к середине апертуры.

6. Предлагаемый метод прямолинейного апертурного синтеза не позволяет синтезировать круговую апертуру, поэтому разрешение у него по координате промаха в два раза хуже, чем при круговой реконструкции по методу [31].

7. Передаточная функция точки, полученная методом [31], состоит из колец Эйри (Д.Менса называет их «артефактами»).

8. Передаточная функция точки, полученная методом прямолинейного синтеза апертуры, не содержит «артефактов», т. е. колец Эйри.

9. Небольшое отличие в форме передаточной функции точки при разных методах реконструкции приводит к небольшому отличию пространственных спектров. Причиной некоторого отличия результатов является то, что прямолинейный апертурный синтез захватывал зону Френеля и зону Фраунгофера, а в методе Д.Менсы регистратор находился только в зоне Фраунгофера.

10. Небольшое отличие передаточных функций точки и их спектров связано с тем, что при прямолинейном синтезе апертуры учитывалось радиальное ослабление сигнала в соответствии с формулой радиолокации, а при реконструкции по методу [31] радиальное ослабление не учитывалось.

11. Реализации метода [31] препятствуют большие боковые лепестки передаточной функции точки, а у предлагаемого метода реализации мешает интерференция в главном лепестке передаточной функции точки [78].

2. 4 Применение теоремы о центральном сечении к результатам томографии методом прямолинейного синтеза апертуры

Дополнительное представление о характере процесса восстановления изображения можно получить с помощью теоремы проекций или центрального среза [31]. Согласно этой теореме, одномерное обратное преобразование Фурье центрального среза двумерного пространственного спектра дает проекцию пространственной функции на ось, ориентированную под тем же углом, что и центральный срез (рисунок 2.21).

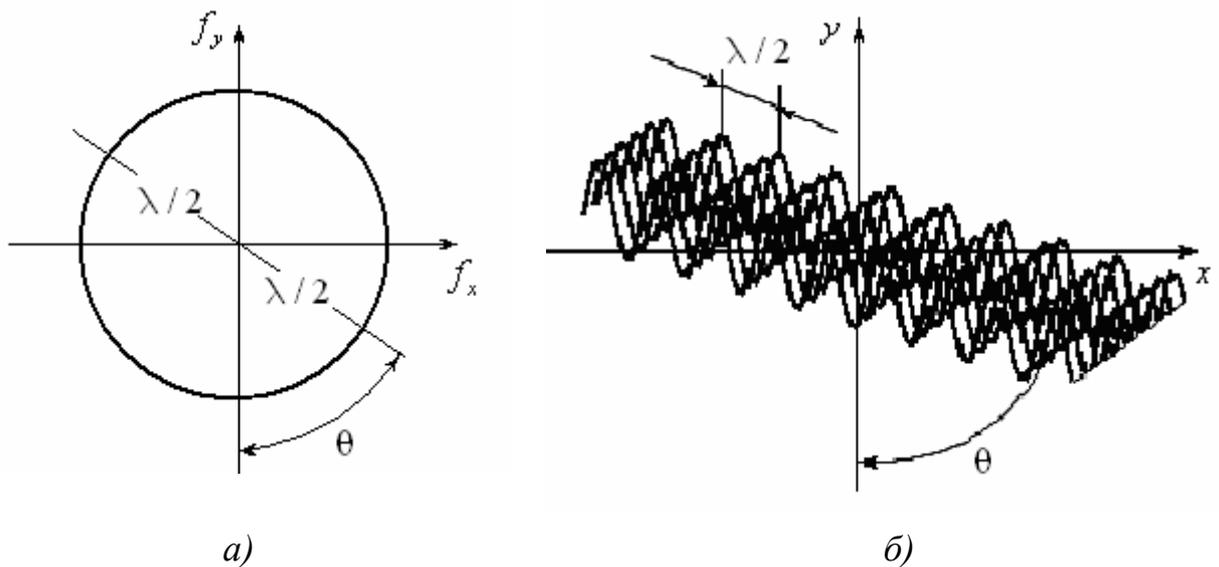


Рисунок 2.21 – Пояснение к теореме о центральном сечении: *а)* пара спектральных точек центрального сечения кольцевого спектра; *б)* пространственная функция, соответствующая паре спектральных точек

Вторая часть проекционной теоремы формулируется следующим образом. Одномерное преобразование Фурье проекции пространственного спектра дает центральный срез передаточной функции точки, ориентированный под тем же углом, что и эта проекция.

Рассмотрим практическое применение первого утверждения этой теоремы. Пусть мы имеем центральный срез кольцевого спектра (рисунок 2.21, *а*). Этот спектр имеет радиальную симметрию, а поскольку собираемые данные по методу [31] дают окружность с центром в начале координат, центральный срез

будет содержать две дельта-функции равной величины, каждая из которых расположена на расстоянии $2/\lambda$ от начала координат.

Одномерное обратное преобразование Фурье этого среза даст проекцию синусоиды с периодом $\lambda/2$, растянутую вдоль этого среза в направлениях $\pm\infty$.

Период $\lambda/2$ обусловлен распространением волны в прямом и обратном направлении [31]. Эта особенность однопозиционной локации. Поскольку эта кривая характеризует некую проекцию, ее можно рассматривать как бесконечный гофрированный лист с периодом, в два раза большим периода распространяющейся радиолокационной волны [31] (рисунок 2.21, б).

Процесс восстановления изображения точечного объекта, находящегося в начале координат, можно описать следующим образом. Каждая пара диаметрально противоположных дельта-функций на кольцевом спектре характеризует гофрированный синусоидальный лист, ориентированный в том же направлении, что и рассматриваемая пара спектральных точек (рисунок 2.21, а). Для восстановления изображения точечного объекта нужно просто наложить друг на друга все гофрированные листы. Кольцевой спектр характеризует континуум таких листов с одинаковым периодом гофра, но с различной ориентацией. После наложения эти листы будут иметь общий максимум в начале координат, где помещен точечный объект. Во всех же остальных точках будет некоторая взаимная компенсация, несовершенство которой приводит к появлению боковых лепестков у передаточной функции точки. Поскольку сбор данных связан с кольцевой геометрией, то все листы будут иметь одинаковый период гофра.

Если же мы при наложении учтем другую спектральную компоненту, то получим дополнительные листы с другим периодом гофра; компенсация в этом случае будет более полной. Если расширить спектр зондирующего сигнала и использовать все спектральные составляющие, то мы получим более полную компенсацию, при которой имеются максимум в начале координат и почти нули во всех остальных точках.

Используя же лишь листы, относящиеся к одному кольцу, что соответствует одночастотному зондирующему сигналу, мы получаем передаточную функцию точки с центральным пиком, меньшим половины периода гофра, и кольцевыми боковыми лепестками (рисунок 1.2)

Вернемся назад и рассмотрим второе утверждение теоремы о проекции. Пусть, как и раньше, объектом является отражающая точка, находящаяся в начале координат. Пусть в результате сбора и регистрации информации получен кольцевой спектр (рисунок 2.22). Проекция кольцевого спектра будет иметь вид прямоугольника. Одномерное преобразование Фурье этой проекции дает центральный срез (или поперечное сечение) передаточной функции точки.

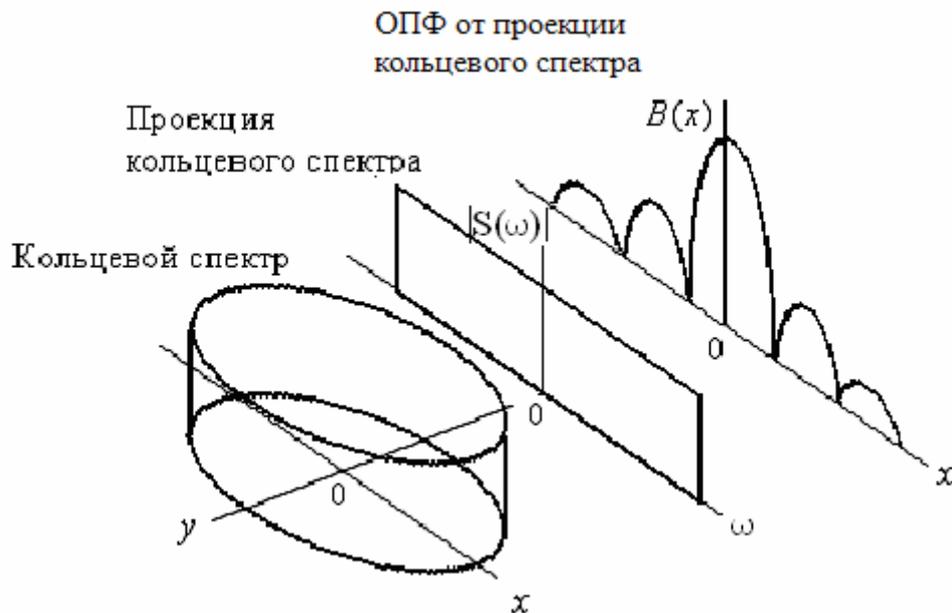


Рисунок 2.22 – Кольцевой спектр, его проекция и обратное преобразование Фурье от проекции для точечного объекта, расположенного в начале координат

Известно [9], что прямоугольному спектру соответствует функция вида $\sin x/x$ с большим уровнем боковых лепестков (рисунок 2.22). Предпочтительных направлений ориентации для этого центрального среза не существует, поэтому все проекции дают одинаковые поперечные сечения передаточной функции точки. Следуя этой процедуре, мы получим график упомянутого выше узкого центрального пика и связанных с ним высоких боковых лепестков.

Если при бесконечно широком спектре зондирующего сигнала включить в эту проекцию все остальные спектральные составляющие, то результирующий график спектральной функции будет представлять собой бесконечно длинную прямую горизонтальную линию, одномерное преобразование Фурье которой равно дельта-функции (отображающей точечный объект) в начале координат и нулю во всех остальных точках. Таким образом, получить качественное изображение внутренней структуры объекта можно при идеальной передаточной функции точки в виде дельта-функции [31].

Поступим так же с полукольцевым серповидным спектром, полученным при линейном апертурном синтезе (рисунок 2.23).

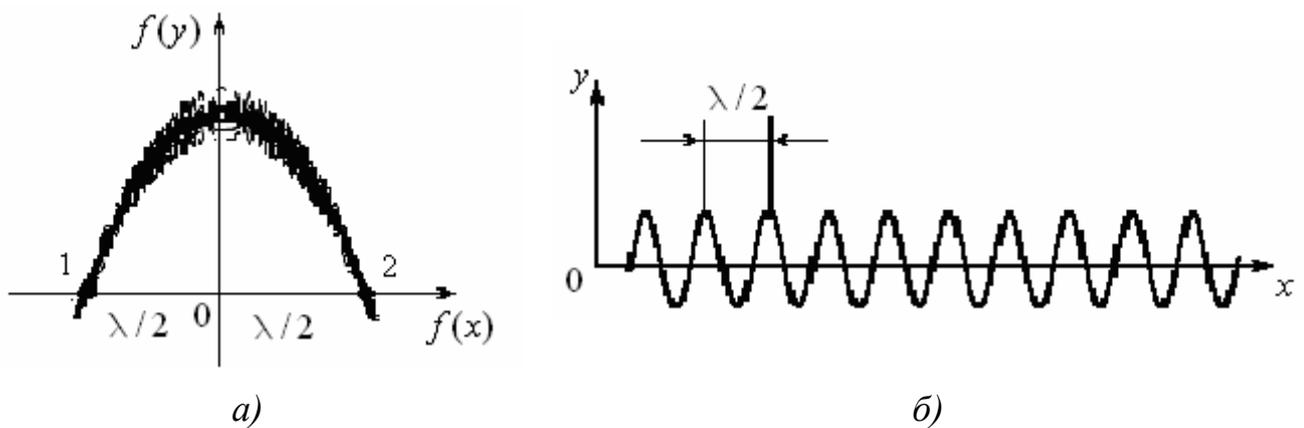


Рисунок 2.23 – Пояснения к теореме о центральном сечении: *а)* пара спектральных точек центрального сечения серповидного спектра; *б)* пространственная функция, соответствующая паре спектральных точек

Следует отметить, что, применяя теорему о центральном сечении для прямолинейного синтеза апертуры, можно видеть, что он является нестандартной ситуацией для этой теоремы. При этом возникает вопрос о правомерности использовании этой теоремы.

Например, при анализе серповидного спектра (рисунок 2.23) сразу возникает вопрос: Где будет центральное сечение серповидного спектра? Очевидно, центральное сечение нужно провести как можно ближе к основанию серпа так, чтобы расстояние между точками 1 и 2 было максимальным. Будем считать, что точка 1 лежит в области отрицательных частот, а точка 2 – в области положи-

тельных частот. Такому спектру соответствует пространственная гармоническая функция, т. е. траекторный сигнал в виде синусоиды (рисунок 2.23, б).

Такой траекторный сигнал получается, если локатор пролетит сквозь томографируемую точку без промаха. При этом возникает вопрос, как получить по сечению полукольцевого спектра траекторный сигнал, как на рисунке 2.6, а, соответствующий пролету с ненулевым промахом.

Воспользуемся второй частью теоремы о проекциях и центральном сечении, позволяющей получить сечение передаточной функции точки. Для этого возьмем обратное преобразование Фурье от проекции серповидного спектра (рисунок 2.24, а), пространственная картина которого приведена на рисунке 2.8.

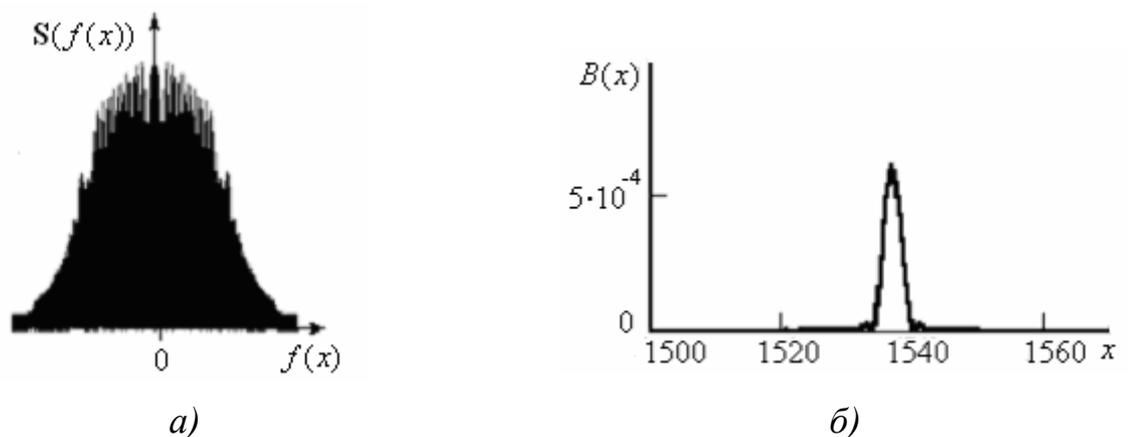


Рисунок 2.24 – Применение теоремы о центральном сечении: а) проекция серповидного спектра; б) сечение передаточной функции точки, полученное обратным преобразованием Фурье от проекции серповидного спектра

Сравним с изображением на рисунке 2.7, б полученное сечение передаточной функции точки по талии восьмерки на рисунке 2.24, б. На этом сечении почти отсутствуют боковые лепестки. Сразу возникает вопрос, как брать другие проекции серповидного спектра, чтобы получить другие сечения передаточной функции точки.

Повернем серповидный спектр на 90° и получим другую проекцию, простирающуюся вдоль координаты промаха (рисунок 2.25, а). В результате неправильно выбранных параметров дискретизации на рисунке 2.25, а можно

видеть перекрытие двух половин одного и того же спектра. Исправленный спектр приведен на рисунке 2.25, б. Огибающая этого спектра представляет собой половинку Гауссовской кривой.

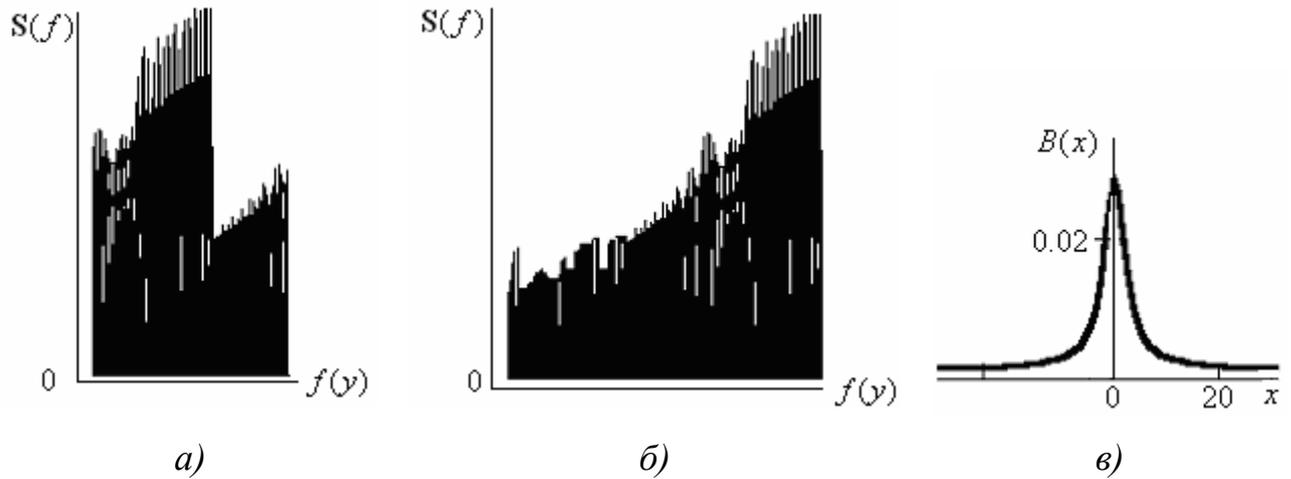


Рисунок 2.25 – Применение теоремы о центральном сечении: а) проекция серповидного спектра на плоскость, развернутую вдоль координаты промаха; б) скорректированная проекция серповидного спектра; в) сечение передаточной функции точки, восстановленное по скорректированной проекции серповидного спектра с помощью обратного преобразования Фурье

Обратное преобразование Фурье от исправленного спектра дает сечение передаточной функции точки плоскостью, проходящей через координату промаха (рисунок 2.25, в). Чтобы убедиться в правильности результата (рисунок 2.25, в), нужно сопоставить сечения передаточной функции точки (рисунок 2.25, в) с трехмерной картиной передаточной функции точки (рисунок 2.7, а).

Выводы

1. Теорема о центральном сечении вытекает из обратного преобразования Радона, в состав которого входит оператор обратного проецирования. Этот оператор обладает круговой симметрией (см. формулы (1.26), (1.19)), поэтому теорема о центральном сечении имеет легкую и наглядную трактовку там, где пространственный спектр обладает круговой симметрией.

2. Полукольцевой серповидный спектр не обладает круговой симметрией, поэтому не для всякого случая можно удачно подобрать центральное сечение.

После взятия обратного преобразования Фурье от проекции серповидного спектра нужно убедиться, что результаты адекватны соответствующему сечению передаточной функции точки.

3. Результаты прямолинейного апертурного синтеза не противоречат проекционным теоремам, однако не все ситуации томографирования могут быть интерпретированы с помощью теоремы о центральном сечении.

2.5 Проблемы интерференции при когерентной томографии

Явления интерференции проявляются нечасто. Это связано с тем, что предметы окружающего нас мира освещаются источниками, излучение которых имеет широкий спектр, например солнце или лампочка накаливания.

Интерференция ярко проявляется при освещении предметов источником, излучающим монохроматическую волну. Естественных источников монохроматического освещения в природе не существует, и хотя в монохроматическом освещении нет острой необходимости в повседневной жизни, оно используется.

Известно применение монохроматического (когерентного) освещения для диагностических целей. Используя резонансные явления при отражении или поглощении, и подбирая длину волны, можно выделять, а, следовательно, и диагностировать патологические ткани.

Другая область применения монохроматического излучения – это наблюдение объектов в дисперсионных средах. Среда и объекты обладают дисперсионными свойствами, т. е. характер их отражающей или поглощающей способности зависит от частоты подсвечивающего излучения. Это отрицательно сказывается на результатах томографии. Так, например, при импульсной томографии всегда присутствуют дисперсионные явления, потому что подсвечивающее импульсное излучение имеет широкий спектр.

Когерентная томография могла бы решить некоторые задачи, недоступные для импульсной томографии, и стать хорошим дополнением к некогерентным импульсным методам диагностики. Однако для внедрения когерентной томографии необходимо убрать или ослабить интерференцию.

Как уже отмечалось ранее, при прямолинейном апертурном синтезе интерференция особенно ярко проявляется в направлении плохого разрешения, т. е. в направлении координаты промаха (координаты продольной дальности) [78, 77, 90]. Если бы передаточная функция точки была в виде дельта-функции, то не было бы проблем интерференции.

Вторым очевидным решением, позволяющим уменьшить интерференционные проявления, является создание одинаково приемлемой разрешающей способности по обеим координатам. Это можно сделать, синтезируя апертуру в двух взаимно перпендикулярных направлениях и перемножая полученные передаточные функции.

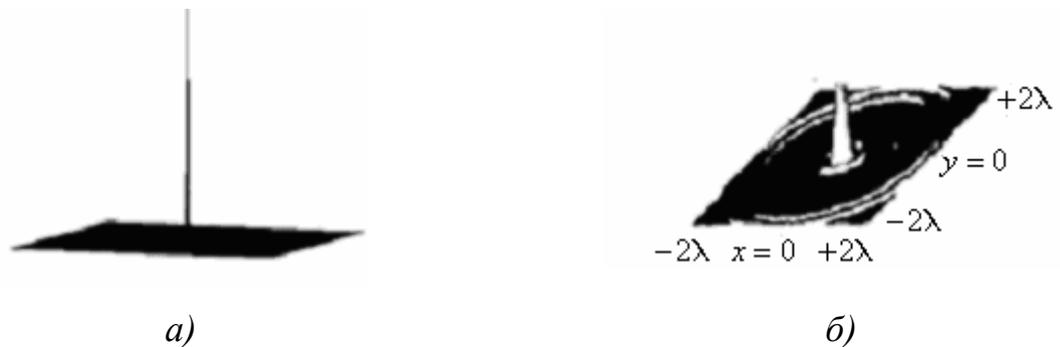


Рис 2.26 – Выбор подходящей передаточной функции для томографии: *а)* передаточная функция точки при синтезе апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях; *б)* передаточная функция точки, полученная Менсой при ее повороте на 360° и при трехчастотном зондирующем сигнале.

Из рисунка 2.26, *а* следует, что синтез апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволяет получить передаточную функцию точки с хорошим разрешением вдоль обеих координат практически без боковых лепестков. Как видно из рисунка 2.26, *б*, при реконструкции изображения по методу [31] даже при зондировании объекта сигналами на трех разных частотах не удалось полностью подавить влияние боковых лепестков.

На рисунке 2.27 представлен результат реконструкции изображения трех отражающих точек, расположенных на расстоянии 5λ (рисунок 2.27, *а,б*) и 1λ

(рисунок 2.27, в). Справа от точек (рисунок 2.27, б) видны следы интерференции. Из рисунка 2.27, б и 2.27, в видно: чем ближе точки, тем сильнее результат проявления интерференции. Однако область интерференции ограничивается габаритами объекта.

Таким образом, при синтезе апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях с последующим перемножением матриц изображения интерференционная картина ограничивается размерами объекта (рисунок 2.27).

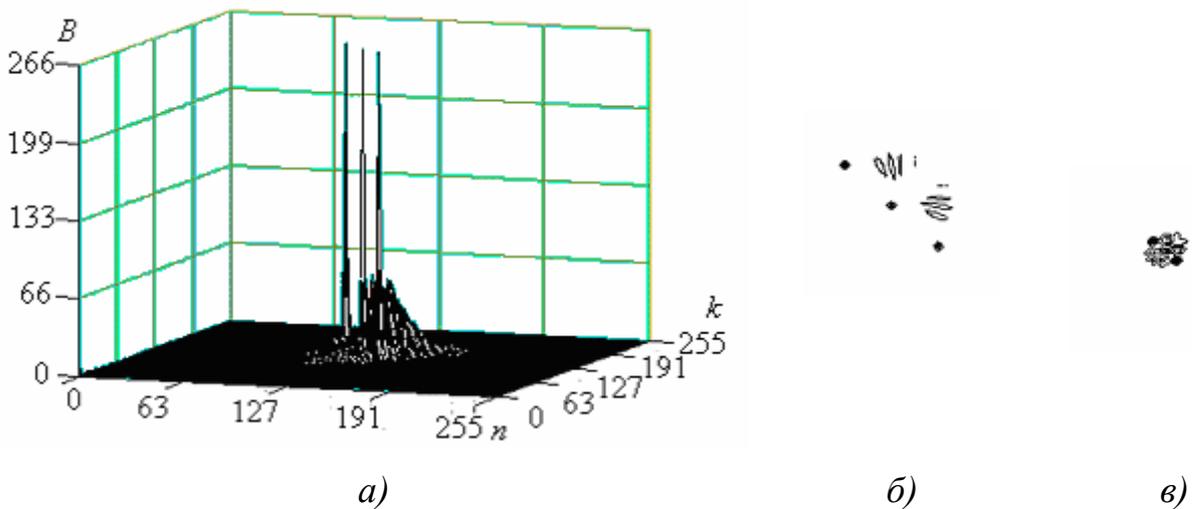


Рисунок 2.27 – Результаты двуракурсной томографии: а) и б) результат реконструкции изображения трех точек, расстояние между которыми 5λ ; в) результат реконструкции изображения трех точек, расстояние между которыми λ

Пояснить это можно следующим образом. Траекторный сигнал, собираемый от всего объекта, согласно принципу суперпозиции состоит из отдельных траекторных сигналов, отраженных от отдельных точек объекта. По суммарному траекторному сигналу реконструируется изображение всего объекта вместе с диаграммами обратного рассеяния отраженных волн. Эти диаграммы простираются в направлении координаты промаха (рисунки 2.28 и 2.29). При синтезе апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях получаем два изображения с взаимно перпендикулярными направлениями диаграмм обратного рассеяния.



Рисунок 2.28 – Томограмма трехточечного объекта, полученная методом прямолинейного апертурного синтеза

Однако точки на томограммах сохраняют свои координаты в неизменном виде.

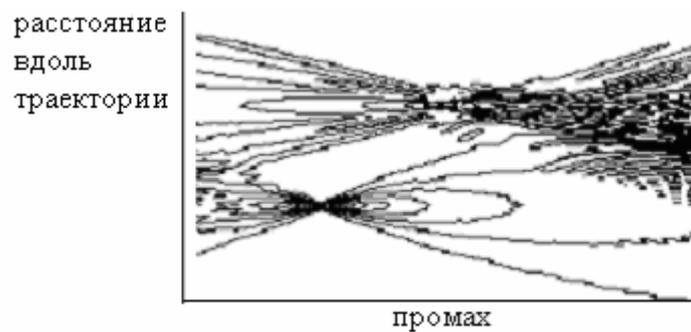


Рисунок 2.29 – Томограмма тех же трех точек (рисунок 2.28) при повернутой траектории синтеза апертуры на 90°

После перемножения этих накладываемых друг на друга изображений, помимо проявления объектных точек создаются дополнительные ложные точки в местах, где эти диаграммы обратного рассеяния пересекаются (рисунок 2.30).



Рисунок 2.30 – Результат сложения изображений рисунков 2.28 и 2.29

Таким образом, из рисунка 2.30 становится понятен результат ограничения интерференционной картины габаритами объекта. Однако результаты томогра-

фирования можно еще улучшить, если повернуть координатный базис синтеза апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях на 45° и еще раз просинтезировать апертуру в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а затем перемножить передаточные функции (матрицы изображения).

Эта операция похожа на метод обратного проецирования и позволяет эффективно бороться с интерференцией. При наложении матриц максимумы передаточных функций одноименных точек объекта будут совмещаться и расти, а результаты хаотического наложения боковых лепестков при перемножении будут отставать от роста максимумов передаточных функций точек объекта.

Это можно показать на примере восстановления изображения многоточечного объекта в виде тупого угла по одному траекторному сигналу, по двум сигналам с двух ортогональных траекторий и четырем траекторным сигналам. При этом координатный базис из ортогональных траекторий для второй пары из четырех траекторных сигналов повернем на 45° . На рисунке 2.31 представлен результат восстановления шестнадцатиточечного объекта в виде тупого угла, изображенного на рисунке 2.32, *в* по одному траекторному сигналу.

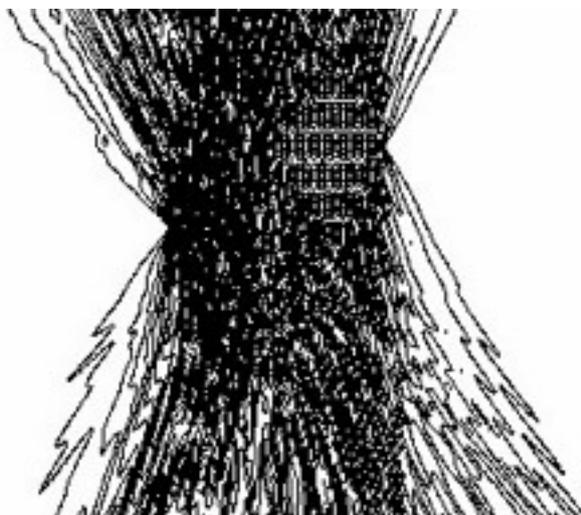


Рисунок 2.31 – Результат реконструкции изображения шестнадцатиточечного объекта в виде тупого угла по одному траекторному сигналу

На рисунке 2.32, *а* представлен результат восстановления шестнадцатиточечного объекта в виде тупого угла для ортогональных траекторий. Точки этого объекта отстоят друг от друга на расстоянии $0,65\lambda$.

Здесь же, (рисунок 2.32, б) представлена томограмма трехточечного объекта с такими же габаритами, что и шестнадцатиточечный объект, и с такой же ориентацией в пространстве. Томограмма трехточечного объекта дана для того, чтобы легче было представить положение шестнадцатиточечного объекта в виде тупого угла в условиях мешающей интерференции.

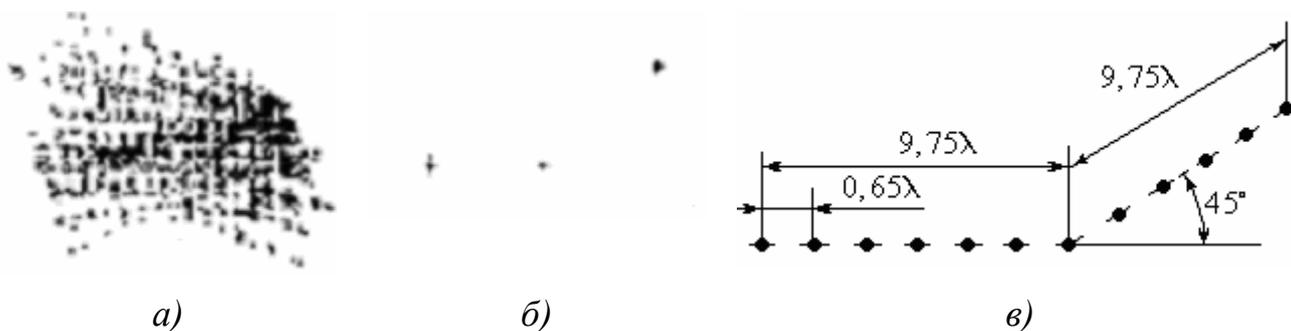


Рисунок 2.32 – Результаты двуракурсной томографии: а) реконструированное изображение объекта в виде тупого угла (рисунок 2.32, в), полученное из двух смоделированных сигналов локатора для взаимно-перпендикулярных траекторий; б) изображение трехточечного объекта с теми же размерами реконструировано также по двум сигналам с взаимно-перпендикулярных траекторий; в) многоточечная модель объекта в виде тупого угла

На рисунке 2.33 представлено изображение шестнадцатиточечного объекта в виде тупого угла, восстановленное по четырем траекторным сигналам. При этом базис второй пары ортогональных траекторий повернут относительно базиса первой пары ортогональных траекторий на 45° .



Рисунок 2.33 – Шестнадцатиточечный объект в виде тупого угла, восстановленный по четырем траекторным сигналам

Эти операции можно назвать многоракурсным синтезом апертуры. Известно его применение для определения траектории источника звука в воде [48, 66, 67]

Из анализа томограмм моделей протяженных объектов (рисунки 2.27 и 2.33) можно сделать следующие **выводы**.

1. Если синтезировать апертуру в двух взаимно перпендикулярных направлениях, перемножая матрицы полученных изображений, то интерференция будет ограничена габаритами объекта.

2. Если базис синтезирования апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях поворачивать и совмещать полученные изображения, перемножая передаточные функции повернутых объектов, то это позволяет ослабить интерференцию до нужных пределов.

3. Операция поворота координатного базиса и поточечного совмещения напоминает операцию обратного проецирования, широко распространенную в томографии, однако эти операции принципиально отличаются.

4. Таким образом, в результате двух операций, таких как многократная свертка зарегистрированного траекторного сигнала с опорными траекторными сигналами совместно с операцией перемножения повернутых матриц, появляется возможность ослабить интерференцию до допустимых пределов, не отказываясь от когерентности.

2.6 Операции с матрицами изображения после синтеза апертуры для устранения интерференции

Материал раздела опубликован в [94]. Там представлен результат устранения интерференции, основанный на повороте матриц изображения и перемножении их элементов. Опишем с помощью математических операторов те действия, которые мы предприняли для восстановления внутренней структуры объекта в сечении.

Задачей раздела является подробное описание этой операции и выяснение, её связи с операцией обратного проецирования (1.29).

Идея метода изложена в [94]. Будем использовать свойство передаточной функции точки, которое можно сформулировать следующим образом. Передаточная функция точки повернется в пространстве ровно на столько, на сколько повернется траектория синтезирования апертуры, но при этом положение точки объекта в пространстве не меняется. То есть ориентация передаточной функции точки привязана к траектории синтезирования апертуры (рисунок 2.34). После поочередной корреляции траекторного сигнала с двумястами пятьюдесятью шестью опорными сигналами получается матрица комплексных чисел размером 256×256 . Будем называть ее матрицей изображения.

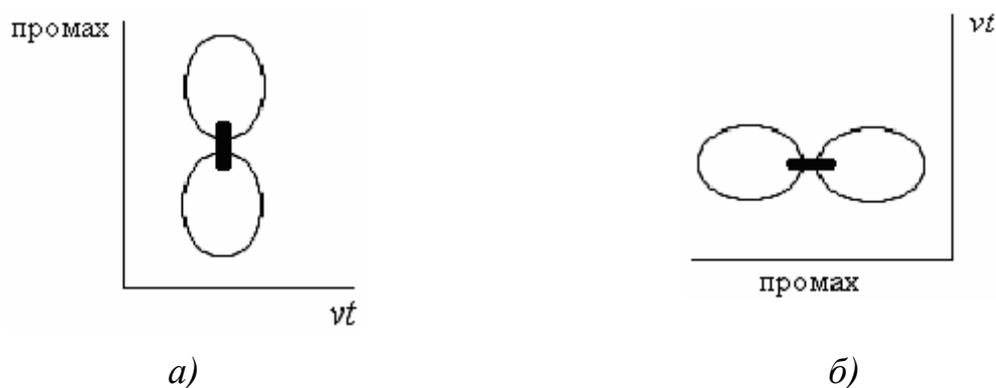


Рисунок 2.34 – Привязка ориентации передаточной функции точки к траектории синтеза апертуры vt : *а)* горизонтальная траектория; *б)* вертикальная траектория

Предположим, что расстояние между элементами матрицы одинаковое, т. е. шаг по промаху равен шагу вдоль траектории $\Delta pr = v\Delta t$. Осуществим апертурный синтез в двух взаимно перпендикулярных направлениях; другими словами, организуем регистрацию информации при движении по оси vt сначала в соответствии с рисунком 2.34, *а*, а затем – в соответствии с рисунком 2.34, *б*. Получим две матрицы изображения размером 256×256 элементов. При наложении повернутых на 90° матриц нужно перемножать совпавшие элементы. Таким образом, элементы строк перемножаются с элементами столбцов. При повороте и наложении двух квадратных матриц с одинаковым шагом никаких

проблем не возникает. В результате наложения будем иметь полное совпадение всех элементов обеих матриц.

Другой результат получается, если матрицы повернуть на 45° . Чтобы у матриц совпало большее число элементов, необходимо уменьшить расстояние между элементами одной из матриц в $\sqrt{2}$ раз. Для этого при регистрации и обработке шаг по промаху и шаг вдоль траектории также надо уменьшить в $\sqrt{2}$ раз. На участке полного перекрытия матриц совпадение элементов достигает 50 %. При этом нужно суммировать только совпавшие элементы матриц и отбрасывать не совпадающие. Объект на повернутой матрице будет занимать такое же положение, что и при не повернутой матрице.

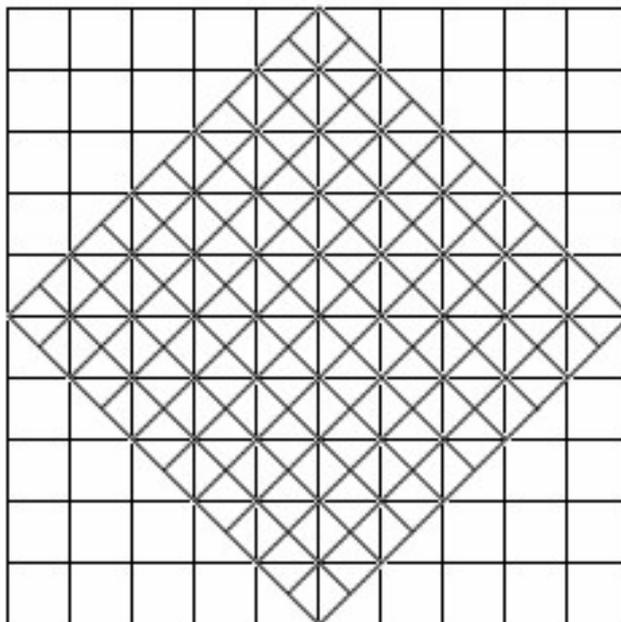


Рисунок 2.35 – Совмещение элементов повернутых матриц

Модель происходящего будет следующей. При повороте координатного базиса изображение, которое несет повернутая матрица, сохраняется в первоначальном, не повернутом положении. Поворот координатного базиса не изменяет положения точек объекта в пространстве, но зато синхронно поворачивает лепестки восьмерок передаточных функций точек. Поэтому элементы матриц, соответствующие одним и тем же точкам объекта на обеих матрицах, будут совпадать и синхронно перемножаться. Лепестки передаточных функций точек

в виде восьмерки не будут так синхронно совпадать при повороте одной матрицы относительно другой, как точки объекта на матрицах, потому что положение передаточных функций не стационарно и каждый раз меняется в соответствии с изменением направления синтеза апертуры. На первый взгляд, поворот матриц с перемножением элементов похож на широко известный алгоритм обратного проецирования. Однако есть отличия, которые не позволяют отнести предлагаемую операцию к методу обратного проецирования. Главное отличие состоит 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 случае повернутых матриц, а значения интегральных сумм вдоль пересекающихся лучей. Другими словами, при обратном проецировании в точке пересечения лучей суммируются лучевые 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». Для операции обратного проецирования математическое выражение будет иметь вид:

$$[B_p](r, \phi) = \int_0^{\pi} p(r \cos(\theta - \phi), \theta) d\theta. \quad (2.27)$$

Из вышепредставленного выражения (2.27) видно, чтобы получить $[B_p](r, \phi)$, нужно собрать проекции по всем лучам в пределах от 0 до 2π для каждой точки объекта. В свою очередь, проекции $p_i(l_i, \theta_i)$ являются интегралом от функции $f(\sqrt{l_i^2 + z^2}, \theta_i + \arctg(z/l_i))$ по лучу. Этот интеграл иногда называют прямым преобразованием Радона:

$$p_i(l_i, \theta_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sqrt{l_i^2 + z^2}, \theta_i + \arctg(z/l_i)) dz, \quad (2.28)$$

где $r = \sqrt{l^2 + z^2}$, $\phi = \arctg(z/l)$. Вспомним, что применение оператора обратного проецирования без других операторов не позволяет достичь хороших результатов, поэтому он применяется совместно с другими операторами. Напри-

мер, оператор обратного проецирования входит как составная часть в обратное преобразование Радона:

$$|BH_Y D_Y p|(r, \phi) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p_1(l, \theta)}{r \cos(\theta - \phi) - l} dl d\theta, \quad (2.29)$$

$$R^{-1} = -\frac{1}{2\pi} BH_Y D_Y. \quad (2.30)$$

Введем понятие корреляционного луча, проходящего через точку (x_i, y_i) . Корреляционный луч, проходящий через точку (x_i, y_i) под углом θ_j , – это реализация взаимно корреляционной функции между траекторным сигналом, снятым на траектории, расположенной под углом θ_j , и опорным траекторным сигналом, сгенерированным (рассчитанным) для траектории, расположенной под тем же углом θ_j и промахом y_i . Промах y_i равен расстоянию от рассматриваемой точки с координатами (x_i, y_i) до траектории по перпендикуляру.

Читая это определение, можно представить себе реализацию взаимно корреляционной функции, амплитуда которой преобразована в цветные пиксели, и эта цветная линия проходит через точку с координатами (x_i, y_i) (рисунок 2.36).

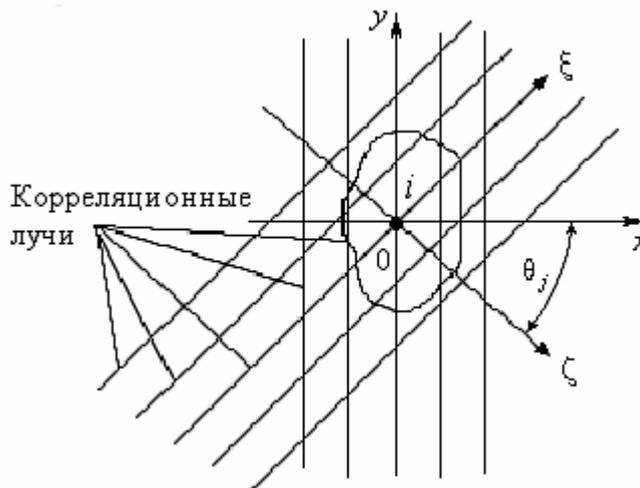


Рисунок 2.36 – Корреляционные лучи при повороте координатной системы

Будем полагать, что угол θ_j мы можем изменять в диапазоне от 0 до 2π . Основываясь на формулах (2.4) и (2.10), воспользуемся формулами пересчета

координат при повороте координатного базиса на угол θ и запишем формулу корреляционного луча $B_{\theta_j}(\tau, y)$:

$$\begin{aligned} \zeta &= x \cos \theta + y \sin \theta, & \xi &= -x \sin \theta + y \cos \theta, \\ x &= \zeta \cos \theta - \xi \sin \theta, & y &= \zeta \sin \theta + \xi \cos \theta, \\ B_{\theta_j}(\tau, y) &= \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^N \frac{a(\zeta_i \cos \theta_j - \xi_i \sin \theta_j, \zeta_i \sin \theta_j + \xi_i \cos \theta_j)}{[R_i^2(\zeta, \xi, \theta_j, t)][R_{op}^2(\zeta, \xi, \theta_j, t - \tau)]} \times \\ &\times \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_i(\zeta, \xi, \theta_j, t) - R_{op}(\zeta, \xi, \theta_j, t - \tau))] d\xi dt, \end{aligned} \quad (2.31)$$

где $R_i(\zeta, \xi, \theta_j, t) = \sqrt{(vt + (\zeta_i \cos \theta_j - \xi_i \sin \theta_j) - C_a/2)^2 + (\zeta_i \sin \theta_j + \xi_i \cos \theta_j)^2}$,

$$R_{op}(\xi, \zeta, \theta_j, t - \tau) = \sqrt{(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (\zeta \sin \theta + \xi \cos \theta)^2}.$$

Чтобы уменьшить интерференцию в лепестках восьмерки передаточных функций точек нужно просуммировать или перемножить значения взаимно корреляционных функций в точках пересечения корреляционных лучей. Таким образом, оценку реконструируемой функции в каждой точке можно представить формулой:

$$B_{\Pi} = \prod_j B_{\theta_j}(\tau, y), \quad (2.32)$$

или

$$B_{\Sigma} = \sum_{j=1}^J B_{\theta_j}(\tau, y), \quad (2.33)$$

или

$$B_{(int)} = \int_0^{2\pi} B_{\theta}(\tau, y) d\theta. \quad (2.34)$$

Лучше расчет корреляционных лучей проводить в спектральной области, тогда появится возможность сократить число вычислительных операций благодаря алгоритмам быстрого преобразования Фурье:

$$B_{\theta_j}(\zeta, \xi) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{S}(\omega_{\zeta}, \omega_{\xi}) \mathbf{K}^*(\omega_{\zeta}, \omega_{\xi}) \exp[j(\omega_{\zeta} \zeta + \omega_{\xi} \xi)] d\omega_{\zeta} d\omega_{\xi}, \quad (2.35)$$

где

$$\mathbf{S}(\omega_\zeta, \omega_\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(\zeta, \xi) \exp[-j(\omega_\zeta \zeta + \omega_\xi \xi)] d\zeta d\xi,$$

$$\mathbf{K}^*(\omega_\zeta, \omega_\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s_0(\zeta, \xi) \exp[j(\omega_\zeta \zeta + \omega_\xi \xi)] d\zeta d\xi.$$

Таким образом, один зарегистрированный траекторный сигнал позволяет получить большое множество параллельных корреляционных лучей. Здесь просматривается какая-то аналогия со схемой получения множества параллельных рентгеновских лучей по схеме Хаунсфилда и Мак-Кормака [72, 22, 27]. Дальнейшая задача состоит в том, чтобы по наборам параллельных корреляционных лучей под разными углами восстановить приемлемое изображение объекта. Поворот и перемножение совпавших элементов матриц является примитивным решением поставленной задачи. Добиться лучшего совпадения элементов повернутых матриц можно варьированием расстояния между элементами одной из перемножаемых матрицы. Это можно сделать, изменяя шаг по промаху и шаг перемещения по траектории. Чтобы использовать не совпавшие элементы матриц, нужно привести их к точке суммирования, используя экстраполяционные алгоритмы.

Возникает проблема выбора центра вращения матриц. Это связано с тем, что, как правило, число столбцов и число строк матрицы четно. Четность диктуется алгоритмами быстрого преобразования Фурье. Поэтому ось вращения должна находиться между близкими к центру элементами матрицы.

Выводы

1. Набор развернутых корреляционных функций можно отождествить с набором лучей.
2. Операция перемножения или суммирования значений пересекающихся корреляционных лучей в точке их пересечения не является операцией обратного проецирования.

3. Суммирование или перемножение значений корреляционных лучей в точке их пересечения эквивалентно суммированию или перемножению совпавших элементов матриц после их поворота.

2.7 Отличия предлагаемого метода от известного метода Радона, метода обратного проецирования и метода обращения по Фурье

Как было показано выше в разделе 2.3, при сопоставлении двух методов когерентной томографии оба метода (метод Менсы и метод взаимных корреляций траекторного сигнала с опорными траекторными сигналами для точечных объектов) при одинаковых условиях дают похожие результаты. В случае одинаковых результатов сразу возникает вопрос: не вытекает ли один метод из другого и имеется ли связь метода взаимных корреляций с методом Радона, или с методом обратного проецирования, или с методом обращения по Фурье?

В предыдущем разделе были приведены результаты сравнения передаточных функций точки и спектров передаточных функций, полученные методом взаимной корреляции и методом Менсы. Сравнение результатов моделирования простейших объектов свидетельствуют о том, что оба метода объективно и почти одинаково отражают физическую реальность. Следует при этом вспомнить, что метод Менсы вытекает из метода обращения по Фурье, используемого в томографии. В свою очередь, метод обращения по Фурье и метод обратного проецирования вытекают из проекционной теоремы, которая устанавливает связь между преобразованием Фурье и преобразованием Радона (1.8).

Д.Менса в [31] применил теорию Радона и в проекциях учел фазовый множитель. Более строгий подход требует рассматривать принимаемый сигнал в каждой точке траектории как сумму проекций всех точек объекта, т. е. как сумму прямых преобразований Радона. Причем при интегрировании по лучам не надо забывать учитывать фазовые множители проекций.

Запишем теорему о центральном сечении с помощью математических операторов: $F_2 = F_y R$, где F_y – одномерное преобразование Фурье по y ; F_2 –

двумерное преобразование Фурье. Взяв обратное двумерное преобразование Фурье от левой и правой частей этой теоремы, получим выражение для реконструкции исходной двумерной функции: $f = F_2^{-1}F_Y Rf$. Будем называть это выражение алгоритмом с отдельными несходящимися лучами или первым классическим алгоритмом, или алгоритмом Радона.

Этим алгоритмом можно пользоваться в том случае, если проекционный луч достаточно тонкий, в идеальном случае – бесконечно тонкий. Эти ограничения введены самим И.Радонам. При апертурном синтезе в точке приема сходится целый веер лучей. Каждый луч осуществляет проекцию внутренней структуры объекта в точку приема, т. е. проекция каждого луча определяется интегралом по лучу от плотности отражения внутренних точек объекта, что является прямым преобразованием Радона. Результирующая проекция в точке регистрации равна сумме проекций, т. е. равна сумме прямых преобразований Радона. Таким образом, более корректная запись алгоритма реконструкции для случая синтезирования апертурны примет вид:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N f_n = \int_0^{N=\infty} f dn = F_2^{-1}F_Y \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (Rf) d\varphi, \quad (2.36)$$

где f_n – многократно n-раз восстановленная функция – сумма обратных преобразований Радона; φ_1, φ_2 – угловые границы объекта при наблюдении его из точки приема, N – число сходящихся проекций в точке приема.

Во втором алгоритме (2.36) интеграл в левой части $\int_0^{N=\infty} f dn$ говорит о накоплении изображения, т. е. имеет место подобие накоплению импульсов в радиолокации. По-видимому, изображение по второму алгоритму будет более мощным в смысле отношения сигнал/шум. Вопрос в том, будет ли оно адекватно изображению, построенному по первому алгоритму?

В случае применения второго алгоритма (2.36) мы конструируем изображение из неразделяемых слагаемых, т. е. объединенных в сумму проекций. Причем в каждой сумме присутствуют лишние, ненужные для данной точки

проекции. Существует ли возможность создать такой алгоритм, чтобы эти лишние проекции складывались нужным образом в тех точках, которым они принадлежат, и не мешали другим точкам накапливать свои проекции? Если второй алгоритм удастся реализовать так, что все проекции будут рассортированы по своим точкам, то во втором случае мы будем иметь дело с суперпозицией идентичных изображений. Опасения для второго случая в том, что с неразделенными в сумме слагаемыми работать трудно и некорректно для алгоритмов на основе обратного преобразования Радона. Под суммой здесь подра-

зумеваются интеграл $\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (Rf)d\varphi$. Получается двойной интеграл: сначала прово-

дится радоновское интегрирование по каждому лучу, а затем берется интеграл или сумма всех сходящихся в пучок лучей.

Лучшие условия для обработки по методу Радона, или по методу свертки и обратного проецирования, или по методу обращения по Фурье тогда, когда для каждой точки имеется отдельный набор независимых проекций, а не набор сходящихся пучков. В идеальном случае лучше сначала собрать проекции для каждой точки, а затем расставлять их по местам. Надо отметить, что в работе Д.Менсы есть интегрирование проекций. Однако это интегрирование ведется не по сходящимся прямым лучам в точке приема, а по катетам к этим лучам. При этом по одному из катетов не учитывается фазовый путь волны. Кроме того, наложены такие ограничения, которые сводят задачу к первому случаю, к случаю узкого пучка, в котором разность хода лучей такова, что не допускается сферический волновой фронт. Таким образом, Д.Менса выполнил ограничения Радона, потеряв зону Френеля для томографии.

Высказанные опасения и сомнения можно рассеять моделированием алгоритма реконструкции по методу Менсы, преодолев достаточно большой объем работ. Большие трудности поджидают тех, кто возьмется за моделирование кольцевого спектра от сложного объекта. Эта задача гораздо сложнее, чем взять обратное преобразование Фурье от пространственного спектра по кольцу.

К сожалению, Д.Менса не заострил свое внимание на этом вопросе, и в его работе не представлены результаты моделирования кольцевого пространственного спектра для сложных многоточечных объектов.

Ограничившись рассмотрением однотоочечных объектов в зоне Фраунгофера, Д.Менса свел случай сходящихся проекций к случаю отдельных проекций, т. е. ушел от пучка сходящихся проекций.

Исследование метода Менсы в зоне Френеля интересно с теоретической точки зрения, однако рассмотрение этого вопроса выводится за рамки настоящей работы.

Вернемся к вопросу о связи алгоритма реконструкции изображения методом взаимных корреляций с другими традиционными алгоритмами, применяемыми в томографии. Обратим внимание на то, каким образом получены широко распространенные алгоритмы.

Все известные алгоритмы выводятся из теоремы о центральном сечении, которая устанавливает фундаментальную связь между преобразованием Радона и двумерным преобразованием Фурье [72 стр. 167].

Сравним цепочки операторов разных алгоритмов реконструкции изображения:

- алгоритм реконструкции методом обращения по Фурье:

$$f = R^{-1}p = F_2^{-1}F_Y p; \quad (2.37)$$

- алгоритм реконструкции методом свертки и обратного проецирования. Этот алгоритм выводится непосредственно из обратного преобразования Радона [72, стр. 141]:

$$f = R^{-1} = (-1/2\pi)BH_Y D_Y, \quad (2.38)$$

где R^{-1} – обратное преобразование Радона, B – оператор обратного проецирования, H_Y – преобразование Гильберта, D_Y – оператор дифференцирования.

В (2.38) преобразование Гильберта заменяется сверткой двух функций:

$$H_Y = [Hp'_\theta](l') = [p'_\theta \times \rho_A](l') = \int_{-\infty}^{\infty} p'_\theta(l) \rho_A(l' - l) dl, \quad (2.39)$$

где p'_θ – производная от проекции по координате l ;

$\rho_A(l) = -2 \int_0^{A/2} F_A(L) \sin(2\pi Ll) dL$ – функция, регуляризирующая (заменяющая)

функцию $\rho(l) = -(1/\pi l)$, входящую в преобразование Гильберта; F_A – вещественная функция, удовлетворяющая трем условиям при $l \geq 0$

– $0 \leq F_A(L) \leq 1, F_A(L) = 0$, если $L \geq A/2$; где A – ширина полосы пропускания;

– $F_A(L)$ – монотонно не возрастающая функция от L ;

– $\lim_{A \rightarrow \infty} F_A(L) = 1$.

Эта регуляризация связана с проблемами вычисления интеграла Гильберта.

Выражение для преобразования Гильберта имеет вид:

$$[Hp'](l, \theta) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p'(l, \theta)}{l' - l} dl. \quad (2.40)$$

Свертку (2.39) можно выполнить в спектральной области:

$$H_Y = [Hp'_\theta](l') = [p'_\theta \times \rho_A](l') = T^{-1}[|L| F_A(L) [Tp'_\theta](L)], \quad (2.41)$$

где $F_A(L) = [T\rho_A](L)$ – функция окна в частотной области, т. е. частотная характеристика полосового пропускающего фильтра; L – частота; $[Tp'_\theta](L)$ – Фурье-образ проекции (спектр проекции).

Учитывая (2.41), выражение (2.38) можно записать в виде:

$$f = R^{-1} = (-1/2\pi) B H_Y D_Y = (-1/2\pi) B \{F^{-1}[|L| F_A(L) [Fp'_\theta](L)]\}. \quad (2.42)$$

На практике метод свертки и обратного проецирования реализуется не в спектральной области, а в области оригиналов. Чтобы получить используемое на практике выражение для метода свертки и обратного проецирования, проинтегрируем выражение в правой части (2.39) по частям и получим:

$$H_Y = [Hp'_\theta](l') = p_\theta(l) \rho(l' - l) - \int_{-\infty}^{\infty} p_\theta(l) \rho'_A(l' - l) dl = [p_\theta \times \rho'_A](l'). \quad (2.43)$$

В выражении (2.43) слагаемое $p_\theta(l)\rho(l' - l) = 0$ после подстановки пределов интегрирования.

Осталось дополнить выражение (2.43) операцией обратного проецирования и умножить на $(-1/2\pi)$, и мы получим другую форму обратного преобразования Радона, содержащую операцию свертки и позволяющую восстановить по проекциям исходную функцию:

$$f = R^{-1} = (-1/2\pi)BH_Y D_Y = (-1/2\pi)B[p_\theta \times \rho'_A](l'), \quad (2.44)$$

где $\rho'_A(l) = \int_{-1/A}^{1/A} |L|F_A(L)\exp(i2\pi Ll)dL$ – сворачивающая функция, L – пространственная частота.

Основываясь на формулах (2.4) и (2.18), запишем в виде цепочки операторов алгоритм реконструкции по методу взаимных корреляций:

$$B_l(\tau) = [s \times s_{op}](\tau), \quad (2.45)$$

$$B_l(\tau) = F^{-1}[Fs](L) \times [Fs_{l,op}](L). \quad (2.46)$$

Формально в предлагаемом методе так же, как и в методе свертки и обратного проецирования, присутствует операция свертки (2.45) и (2.44). Однако смысл этих сверток иной, чем в предлагаемом методе.

Начнем анализ отличий с того, что в выражениях (2.45) и (2.44) сворачиваются разные функции. В выражении (2.44) сворачивается классическая проекция, т. е. прямое преобразование Радона, с регуляризирующей функцией. Делается это только для того, чтобы решить проблемы вычисления интеграла Гильберта. Никаких других целей у этого преобразования нет.

В выражении (2.45) сворачивается траекторный доплеровский сигнал, который, как было показано в разделе 1.5, не является прямым преобразованием Радона. Кроме того, сворачивающая функция s_{op} в выражении (2.45) не является регуляризирующей. Цель свертки в выражении (2.45) – выделить точки объекта, лежащие на одинаковом промахе.

Далее в предлагаемом алгоритме вводится операция интегрирования значений корреляционных лучей, пересекающихся в восстанавливаемой точке объекта:

$$f_B = I[B_l(\tau)] = I\{[s \times s_{op}](\tau)\}, \quad (2.47)$$

где f_B – оценка восстановленной функции, I – оператор интегрирования.

Как было показано в разделе 2.5, эта операция имеет принципиальные отличия от операции обратного проецирования.

Из вышеизложенного следует, что предлагаемый метод взаимных корреляций не вытекает из метода свертки и обратного проецирования. А так как метод свертки и обратного проецирования выводится из обратного преобразования Радона, то можно считать, что метод взаимных корреляций не связан с обратным преобразованием Радона.

Выводы

1. Из совпадения результатов реконструкции одноточечных объектов методом взаимных корреляций и методом Менсы возникает вопрос о связи предлагаемого метода с методом Менсы.

2. Поскольку метод Менсы вытекает из проекционной теоремы, а последняя связана с преобразованием Радона, то возникает необходимость оценить связь предлагаемого метода с известными методами реконструкции, такими как метод свертки и обратного проецирования и метод обращения по Фурье.

3. В настоящем разделе показано, что такая связь отсутствует, несмотря на совпадение результатов реконструкции одноточечных объектов.

4. Метод Менсы содержит существенные ограничения, такие как: требование регистрации кольцевого спектра в дальней зоне, т. е. в зоне Фраунгофера, и требование малости угловых размеров реконструируемого объекта. Эти два условия связаны между собой. Они обеспечивают плоский волновой фронт и узкий проекционный луч. Эти ограничения сделаны для того, чтобы выполнить требование Радона к узости проекционного луча.

5. Предлагаемый метод работоспособен как в зоне Френеля, так и в зоне

Фраунгофера.

6. В дальней зоне нет смысла учитывать радиальное ослабление в соответствии с формулой радиолокации. Оно будет приблизительно одинаковым для всех точек объекта.

7. При регистрации отраженного поля в ближней зоне, при больших угловых размерах объекта, нет условий полагать, что регистрируются проекции в строгом соответствии с требованиями Радона. Поэтому можно считать, что в методе взаимных корреляций регистрируется пучок сходящихся проекций, для которого задача реконструкции проекционными методами не решалась.

8. Вспомогательная операция с интегрированием значений корреляционных функций в точке пересечения корреляционных лучей не эквивалентна операции обратного проецирования.

9. Операция свертки в предлагаемом методе предназначена не для регуляризации сворачиваемой функции, а для сортировки принятого траекторного сигнала по каналам дальности.

10. Оператор реконструкции изображения объекта по предлагаемому методу нельзя вывести из обратного преобразования Радона.

2.8 Сравнение точечной и непрерывной моделей объекта

До настоящего момента мы пользовались многоточечными моделями объектов. Можно подвергнуть сомнению все результаты, полученные с помощью многоточечных моделей, утверждая, что непрерывная модель даст совершенно другие результаты.

Выясним: правомерна ли точечная модель; каковы границы ее применения; в каких случаях многоточечную модель можно считать достаточной для получения достоверных результатов.

Сопоставим линейную многоточечную и линейную непрерывную модели одинаковых размеров и с одинаковой ориентацией (рисунок 2.37).

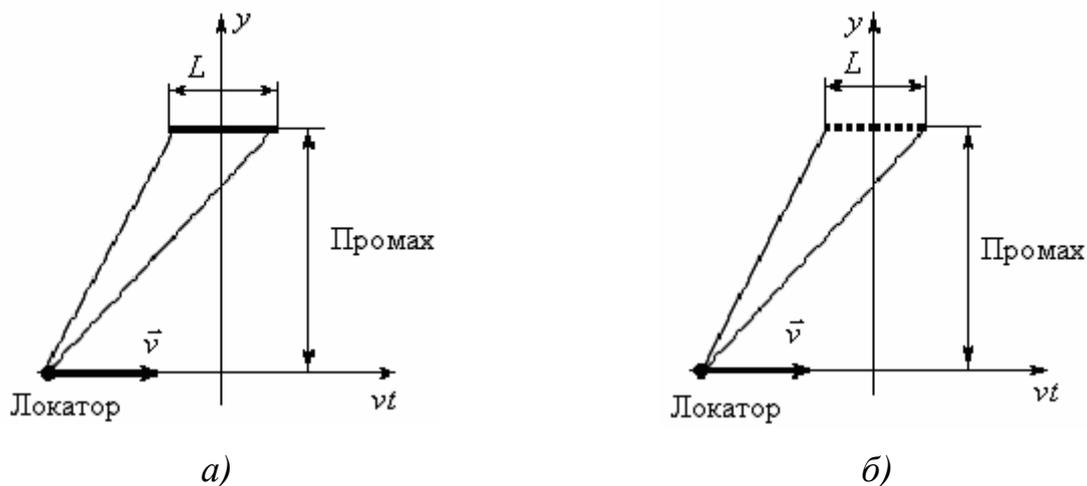


Рисунок 2.37 – Две модели объекта: а) непрерывная; б) дискретная

Математическую запись дискретной модели многоточечного объекта представим в виде:

$$s(k) = \sum_{i=1}^N s_i(k), \quad (2.48)$$

где

$$s_i(k) = \frac{a(x_i, y_i) \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}]}{(v(k\Delta t) + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}. \quad (2.49)$$

Математическую запись непрерывной модели объекта, занимающего некоторую площадь, можно представить так:

$$s(x, y, k\Delta t) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{a(x, y) \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) + x - C_a/2)^2 + y^2}]}{(v(k\Delta t) + x - C_a/2)^2 + y^2} dx dy. \quad (2.50)$$

Чтобы перейти к модели объекта в виде горизонтальной линии, надо в (2.50) зафиксировать $y = y_i = const$. Будем считать, что все точки объекта имеют одинаковую плотность отражения, т. е. $a(x, y) = 1$.

$$s(x, y_i, k\Delta t) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1 \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(v(k\Delta t) + x - C_a/2)^2 + y_i^2}]}{(v(k\Delta t) + x - C_a/2)^2 + y_i^2} dx. \quad (2.51)$$

Непрерывную модель объекта можно рассматривать как предельный случай дискретной модели при шаге дискретизации, стремящемся к нулю. Остает-

ся выяснить, при каком шаге дискретизации можно быть уверенным, что дискретная модель дает результаты близкие к непрерывной модели.

Сравним траекторные сигналы, их спектры и передаточные функции различных моделей объектов. Возьмем первоначально объект в виде линии, ориентированной параллельно траектории синтеза апертуры и удаленной от траектории на 113λ . Длину волны возьмем равной $1,36$ мм. Зададимся скоростью движения локатора $v=0,28$ м/с и шагом по времени $\Delta t = 0,0008$ с.

Траекторный сигнал от многоточечного объекта и его спектр – на рисунке 2.38.

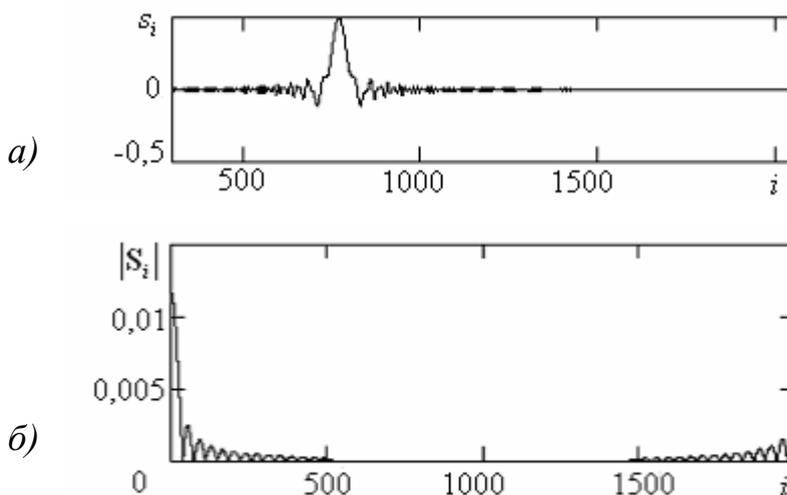


Рисунок 2.38 – Данные расчета: а) сигнал от тридцати двух точек в виде линии, параллельной траектории синтеза апертуры; б) спектр траекторного сигнала

Точки были выстроены в горизонтальную линию параллельно траектории синтеза апертуры на расстоянии 113λ от траектории. Расстояние между точками составляло $0,328\lambda$. Количество точек было взято равным 32. Длина волны составляла $1,36$ мм. Таким образом, длина объекта равнялась $10,5\lambda$. Учитывалось также радиолокационное ослабление сигнала в соответствии с выражением $1/R^2$.

На рисунке 2.39, а представлен траекторный сигнал, а на рисунке 2.39, б – приведен его спектр.

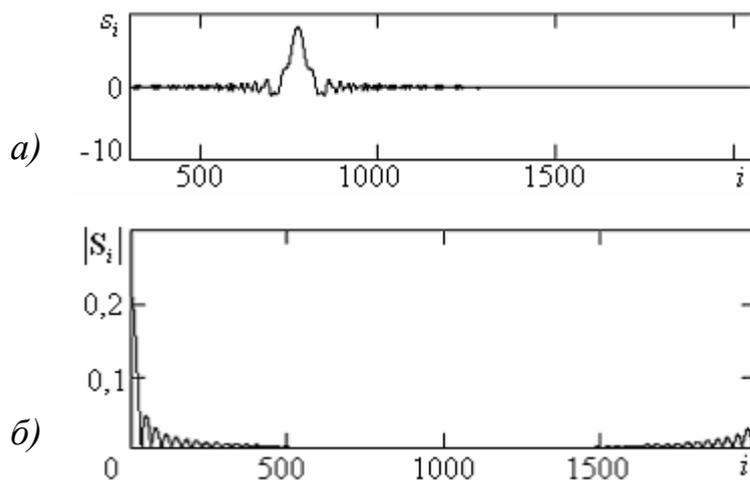


Рисунок 2.39 – Данные расчета: *a)* траекторный сигнал от непрерывной линии; *б)* спектр сигнала

На рисунке 2.40, *a* представлена передаточная функция объекта в виде непрерывной линии длиной $10,5\lambda$, расположенной параллельно траектории синтезирования апертуры. На рисунке 2.40, *б* представлен вид сверху передаточной функции объекта, изображенной на рисунке 2.40, *a*. Нужно считать, что траектория синтезирования апертуры на рисунке 2.40, *б* проходит вертикально.

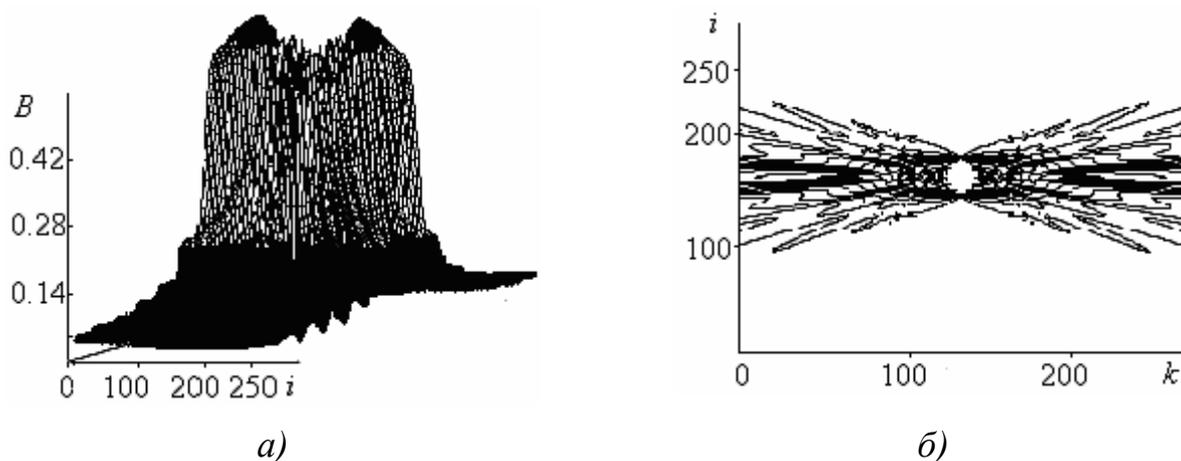


Рисунок 2.40 – Результат моделирования: *a)* передаточная функция непрерывной горизонтальной линии, размером $10,5\lambda$; *б)* вид этой функции в плане

На рисунке 2.41 представлена передаточная функция объекта из тридцати двух точек, расположенного параллельно траектории синтеза апертуры. Расстоя-

ние между точками модели $0,328\lambda$. При таком расстоянии (рисунки 2.38–2.41) отличить непрерывную модель от точечной практически невозможно.

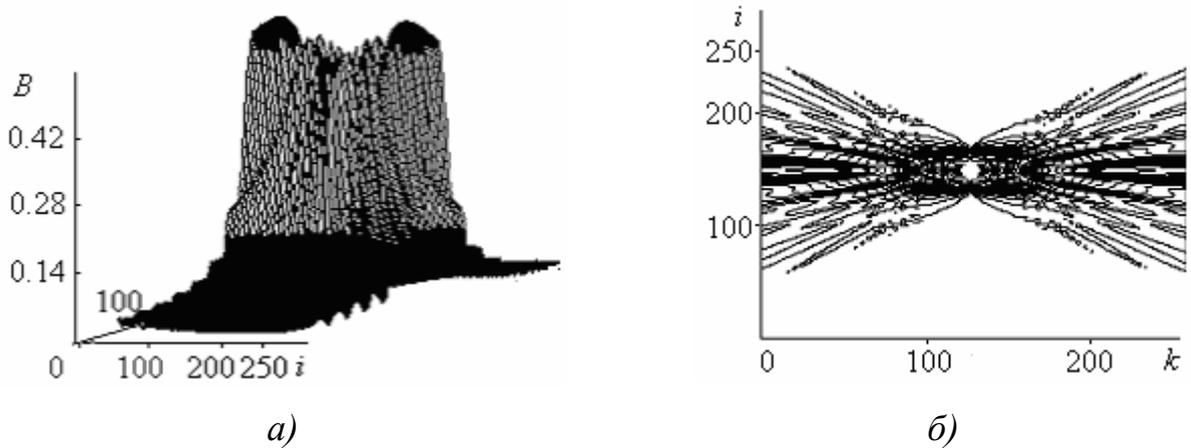


Рисунок 2.41 – Результаты моделирования: *a)* передаточная функция горизонтальной линии размером $10,5\lambda$ из тридцати двух точек; *б)* вид функции в плане

Рассмотрим модель объекта в виде линии, перпендикулярной к траектории синтеза апертуры. Расстояние между точками вертикальной модели такое же, как у горизонтальной модели. На рисунке 2.42, *a* представлен траекторный сигнал от 32-точечной модели объекта, ориентированной вертикально к траектории.

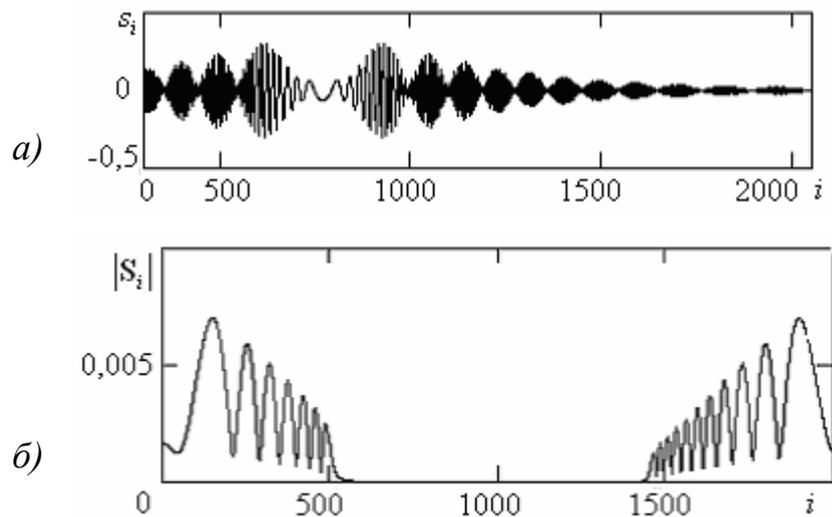


Рисунок 2.42 – Дискретная модель: *a)* траекторный сигнал от вертикальной линии из тридцати двух точек; *б)* спектр траекторного сигнала

Точки модели удалены друг от друга на расстояние $0,328\lambda$. Центр линии из точек удален от траектории синтеза апертуры на 113λ . Траекторный сигнал от

непрерывной модели размером $10,5\lambda$ в виде вертикальной линии представлен на рисунке 2.43, *a*. На рисунке 2.43, *б* представлен спектр этого же сигнала.

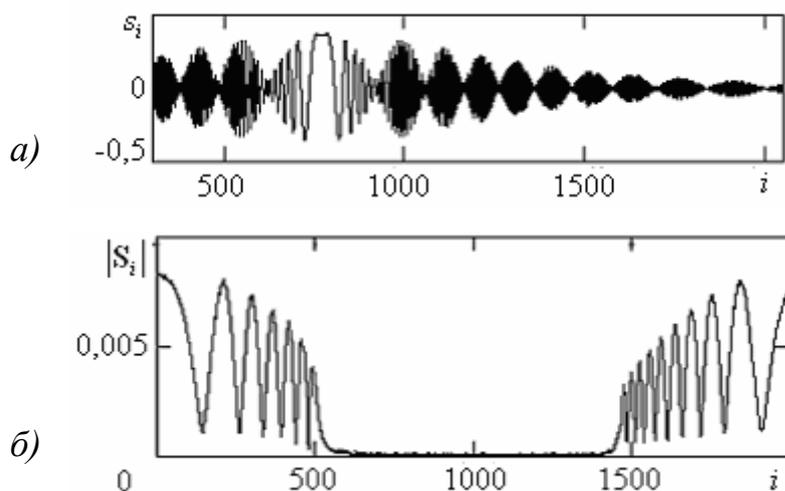


Рисунок 2.43 – Непрерывная модель: *a*) траекторный сигнал от линии, перпендикулярной траектории синтеза апертуры; *б*) спектр траекторного сигнала

При сопоставлении рисунков 2.42 и 2.43 заметны отличия траекторных сигналов и их спектров. Получается, что для горизонтальной модели шаг дискретизации $0,328\lambda$ вполне приемлем, а для вертикальной модели шаг дискретизации необходимо брать меньше, чем $0,328\lambda$. Для окончательных выводов сравним передаточные функции дискретной и непрерывной моделей.

На рисунке 2.44, *a* представлена передаточная функция дискретной модели в виде вертикальной линии к траектории синтеза апертуры.

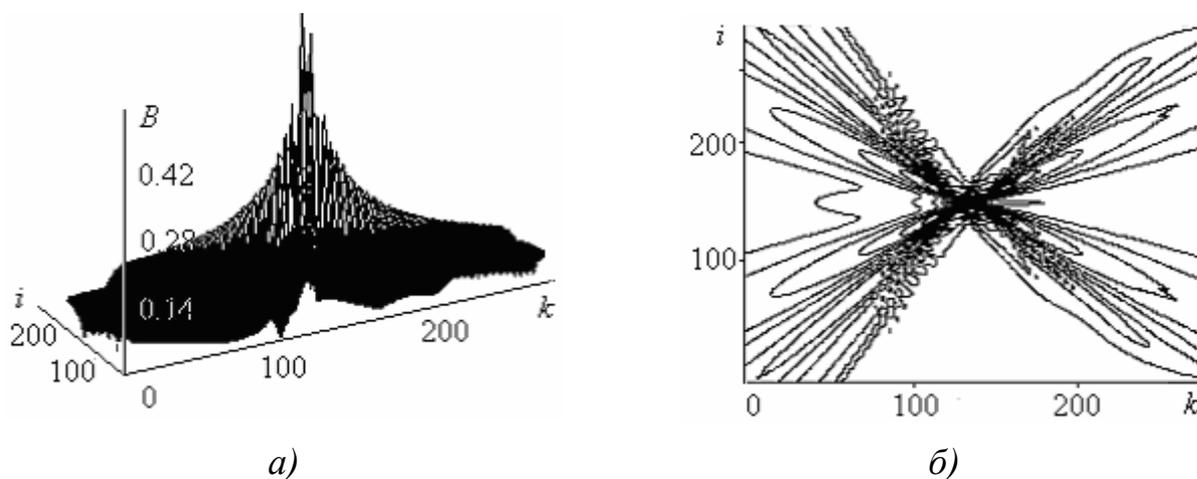


Рисунок 2.44 – Результат корреляционной обработки сигнала (рисунок 2.42, *a*); *a*) передаточная функция дискретной модели; *б*) вид функции сверху

На рисунке 2.45, *a* изображена передаточная функция непрерывной модели объекта в виде линии, расположенной вертикально к траектории синтеза апертур, т. е. передаточная функция модели объекта получена из траекторного сигнала, представленного на рисунке 2.43 *a*.

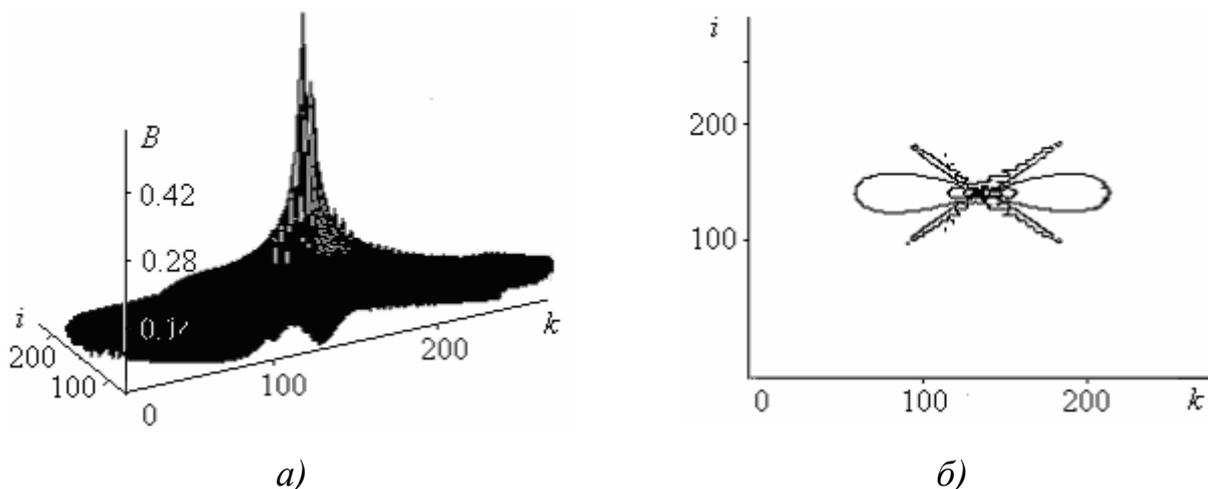


Рисунок 2.45 – Результат корреляционной обработки сигнала (рисунок 2.43, *a*);
a) передаточная функция непрерывной модели; *б*) вид передаточной функции
 сверху

Непрерывная модель имеет такую же ориентацию к траектории синтеза апертур и такие же размеры, как и дискретная модель объекта.

Сопоставляя рисунки 2.44 и 2.45, можно отметить отличия в передаточных функциях дискретной и непрерывной моделей, однако эти отличия не настолько существенны, чтобы перечеркнуть все результаты точечного моделирования. Можно считать, что выше рассмотрены два крайних случая: 1) объект в виде горизонтальной линии к траектории синтеза апертур; 2) объект в виде вертикальной линии к траектории синтеза апертур. Рассмотрим промежуточный случай, при котором линия наклонена к траектории синтеза апертур под углом 45° . При моделировании сохраним в неизменном виде размер объекта, расстояние между точками дискретной модели, длину волны.

На рисунке 2.46, *a* показан траекторный сигнал от многоточечного объекта, наклоненного к траектории, а на рисунке 2.46, *б* дан спектр этого сигнала.

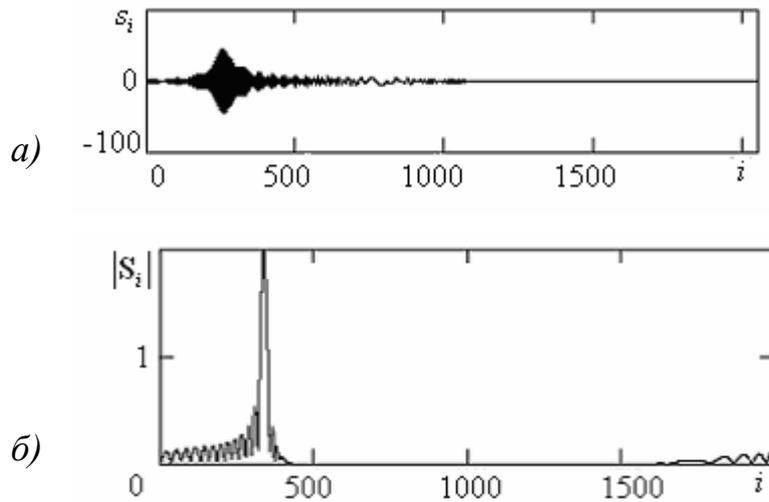


Рисунок 2.46 – Непрерывная модель: *a)* траекторный сигнал от линии, наклоненной к траектории синтеза апертуры под углом 45° ; *б)* спектр сигнала

Точки выстроены в линию под углом 45° к траектории синтеза апертуры. Середина объекта находилась на расстоянии 113λ от траектории. Расстояние между точками составляло $0,328\lambda$. Количество точек было взято равным 32.

На рисунке 2.47, *a* представлен траекторный сигнал от непрерывной модели объекта, ориентированного наклонно к траектории. Центр линии удален от траектории синтезирования апертуры на 113λ .

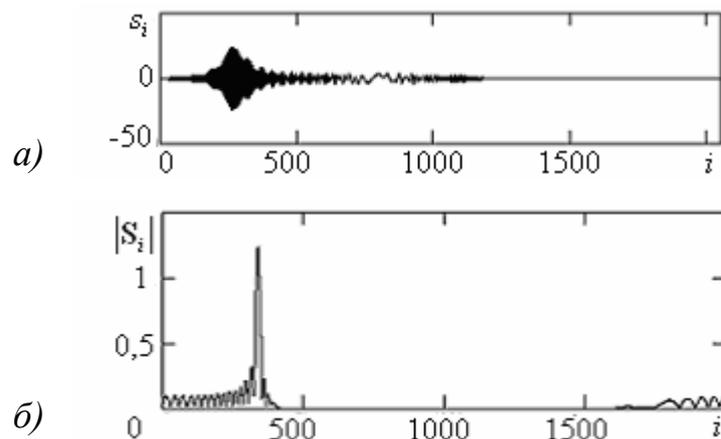


Рисунок 2.47 – Дискретная модель: *a)* траекторный сигнал от 32-точечной линии, наклоненной к траектории синтезирования апертуры под углом 45° ; *б)* спектр траекторного сигнала

Рисунки 2.46 и 2.47 практически не отличаются. Следовательно, точечная модель с шагом расстановки точек $0,328\lambda$, вполне приемлема, и поэтому результаты точечной модели можно распространить на непрерывную модель. Убедимся, что изображения дискретного и непрерывного объектов также практически неразличимы.

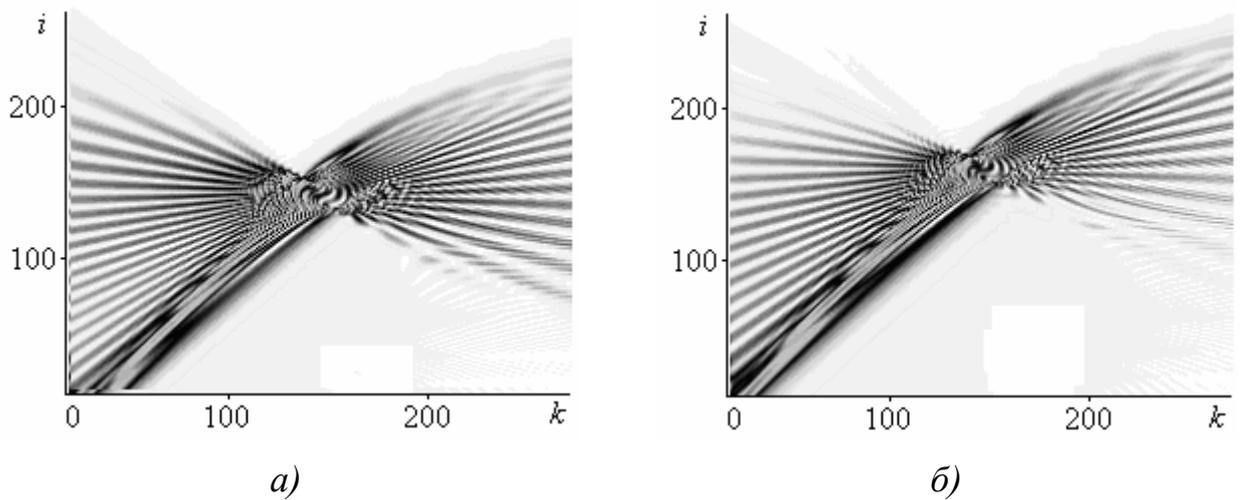


Рисунок 2.48 – Результаты для сопоставления: *a)* изображение дискретной модели объекта; *б)* изображение непрерывной модели объекта

Как видно из рисунка 2.48, изображения непрерывной и дискретной моделей совпадают. Рассмотрим изображения дискретной и непрерывной моделей при синтезировании апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

На рисунке 2.49, *a)* представлено изображение 32-точечной модели горизонтального объекта, полученного перемножением двух матриц изображения от синтезирования апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях.



Рисунок 2.49 – Результаты для сопоставления: *a)* изображение дискретной модели объекта, при синтезе апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях; *б)* изображение непрерывной модели объекта при тех же условиях

Другими словами, каждое изображение на рисунке 2.49 построено по двум траекторным сигналам, которые получены при движении локатора по двум ортогональным траекториям. На рисунке 2.49, б представлено изображение непрерывной модели объекта при тех же условиях моделирования, полученное перемножением двух матриц изображения от синтезирования апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Рассмотрим изображение наклонной линии, построенное путем перемножения двух матриц изображения. Матрицы получены при синтезировании апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

На рисунке 2.50, а представлено изображение дискретной модели объекта в виде наклонной линии, а на рисунке 2.50, б представлено изображение непрерывной линии с тем же наклоном к траектории. Реальное положение объекта в виде наклонной линии на изображениях совпадает с направлением, которое указывает стрелка. К сожалению, линии практически не видно. Все же о положении линии, моделирующей объект, можно догадаться по точке, которая проявилась на изображении (рисунок 2.50, а).



Рисунок 2.50 – Результаты для сопоставления: а) изображение дискретной 32-точечной модели объекта наклоненной к траектории на 45° ; б) непрерывная модель объекта в виде линии при тех же параметрах, что и дискретная модель

Сравнивая изображения дискретной и непрерывной моделей на рисунке 2.61, а и рисунке 2.50, б, а также результаты моделирования на рисунке 2.48, а и рисунке 2.48, б, нельзя отрицать сходство результатов, несмотря на то, что

при синтезировании апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях несколько увеличились различия результатов моделирования.

Остается выяснить, как часто надо расставлять точки по сравнению с длиной волны, чтобы быть уверенным в достоверности результатов моделирования. Очевидно, число взятых точек для модели и интервал между ними вместе с размерами и конфигурацией объекта определяет интерференционную картину. В качестве критерия достаточности частоты расстановки точек можно выставить требование неизменности интерференционной картины при дальнейшем увеличении числа точек и уменьшении расстояния между ними при сохранении размеров и конфигурации объекта. Интерференционная картина проявляется в траекторном доплеровском сигнале, поэтому критерий неизменности интерференционной картины можно трансформировать в критерий неизменности траекторного доплеровского сигнала. Хотелось бы применить теорему Котельникова, однако возникает вопрос, с чем связать интервал между точками?

С размерами пространственного кольцевого спектра связь не просматривается, так как его радиус не изменен и составляет величину $2/\lambda$. Возможна связь с изрезанностью спектра на кольце, которая обусловлена именно интерференцией. Тогда критерий достаточности числа точек модели и расстояния между точками будет требовать неизменности огибающей пространственного спектра на кольце при дальнейшем уменьшении интервала между точками. В перечисленных критериях излишне жесткие требования, допускающие избыточность точек. Однако более практичный критерий – это сопоставление изображений простейших протяженных объектов, например, изображений прямой линии. Сопоставление изображений прямой линии под разными углами (рисунки 2.49, *a* и 2.49, *б*, а также рисунки 2.50, *a* и 2.50, *б*) говорит о том, что выбранный интервал между точками $0,328\lambda$ можно считать удовлетворительным.

Точнее всего, при выборе расстояния между точками модели объекта надо исходить из разрешающей способности метода синтезирования апертуры. Максимальное разрешение $\lambda/5$ достигается при круговом апертурном синтезе.

Поэтому расстояние между точками, меньшее чем $\lambda/5$, обеспечит непрерывность модели объекта.

2.9 Проверка корреляционного метода синтеза апертуры антенны в задачах траекторного контроля для реальных сигналов

Траекторный контроль подразумевает восстановление параметров перемещения локатора мимо объекта. Представляют интерес следующие параметры: промах, размеры объекта, положение объекта относительно отрезка траектории, на котором осуществляется синтез апертуры антенны. Последний параметр означает реконструкцию изображения объекта в координатах промаха и расстояния вдоль траектории.

Данный раздел имеет прикладное значение в задачах визуализации пролётной ситуации и траекторного контроля при испытаниях. В разделе рассматриваются примеры приложения нового корреляционного метода к обработке натурального траекторного сигнала для извлечения из него информации о параметрах движения локатора относительно цели.

Ранее была показана возможность реконструкции изображения объекта синтезом апертуры антенны с привязкой изображения к отрезку прямолинейной траектории движения локатора на модельных траекторных сигналах для многоточечных объектов. Далее представляются результаты испытания предлагаемого метода восстановления пролётной ситуации по реальным сигналам, полученным методом проездов.

В качестве объекта для исследования взят конус (рисунок 2.51). Таким образом, выбран объект со следующими габаритными размерами: диаметр основания 45 см, высота 1 м 20 см. На расстоянии 58 см от основания находится опоясывающая часть из диэлектрика. Ширина опоясывающей части 37 см.

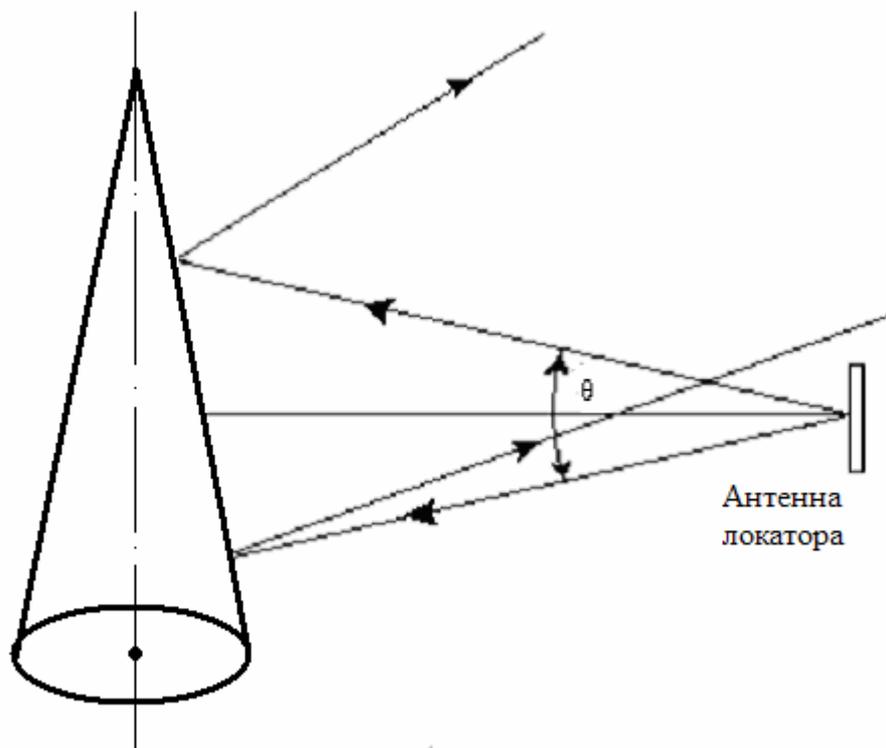


Рисунок 2.51 – Объект для исследования методом проездов

При испытаниях конус крепился на подвеске таким образом, чтобы его ось была перпендикулярна траектории движения локатора. Сигнал от объекта регистрировался доплеровским приемником локатора, работающего с непрерывным монохроматическим сигналом с длиной волны 3 см.

Вид диаграмм направленности антенн доплеровского приемника показан на рисунке 2.52. Траекторные сигналы получены методом проездов на малой дальности. Схема проездов поясняется на рисунке 2.53. Испытуемый объект имеет две особенности, которые необходимо учитывать при выборе расстояния при проездах.

Первая особенность – это конусная форма исследуемого объекта. Ее влияние на отраженный сигнал зависит от расстояния между локатором и испытуемым объектом и состоит в том, что основная часть отраженной энергии волны на больших расстояниях направлена мимо сектора приема локатора (рисунок 2.51).



Рисунок 2.52 – Диаграмма направленности антенной системы локатора

При этом если на расстоянии 0,5 м между объектом и локатором значительная часть отраженной волны попадает в сектор приема, то на расстоянии 1,5 м значительная часть потока энергии отраженной волны направляется мимо сектора приема локатора (рисунок 2.51). Это проявляется в значительном ослаблении сигнала на входе приемника локатора.

Вторая особенность – это диэлектрическая вставка, которая значительно хуже отражает электромагнитную волну, чем часть корпуса конуса из алюминиевого сплава рисунок 2.51

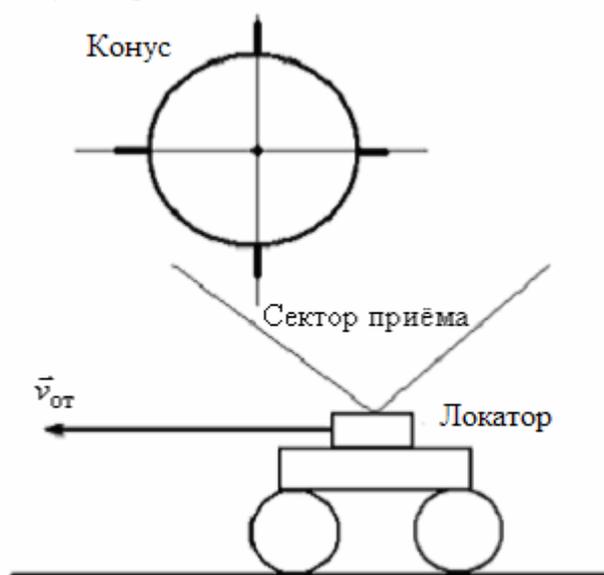


Рисунок 2.53 – Схема проезда локатора мимо исследуемого объекта

Конус был закреплен выше транспортировщика с помощью неотражающей подвески. Имелась возможность регулировки высоты подвески. Таким образом, можно было задавать требуемый для эксперимента промах. Скорость проезда была выбрана равной 2 м/с. Отсчеты траекторного сигнала брались с интервалом 1 мс.

Первый эксперимент. Транспортировщик с установленным на нем локатором двигался под подвешенным объектом со скоростью $v_{от} = 2$ м/с. Промах составлял 0,5 м. Схема эксперимента показана на рисунке 2.53. Во время проезда принятый локатором траекторный сигнал из аналоговой формы с помощью цифровой осциллографической приставки АСК-2150 преобразовывался в цифровые отсчеты и вводился в персональный компьютер.

На рисунке 2.54 представлен траекторный сигнал и его спектр. Отраженный сигнал и его спектр, полученный методом проездов, очень похож на траекторные сигналы и спектры, полученные экспериментально на акустических волнах. Предлагается сопоставить рисунки 2.54 и 5.20.

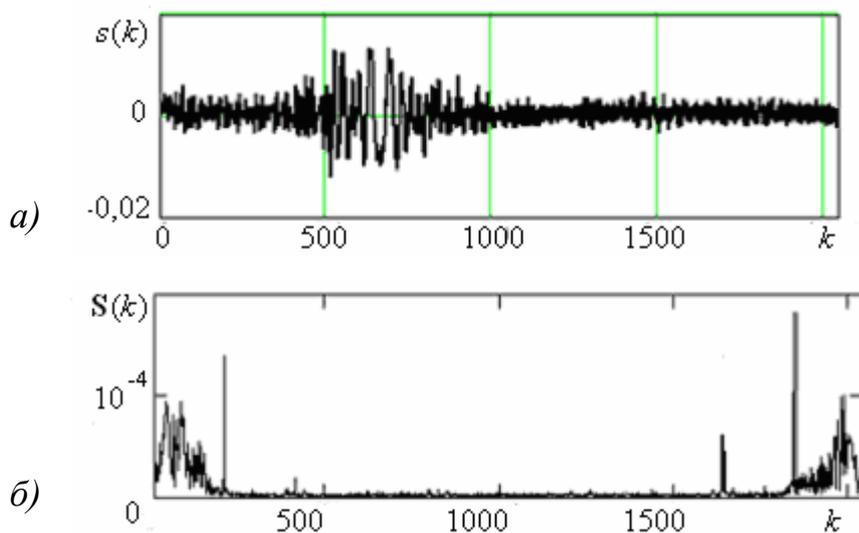


Рисунок 2.54 – Результаты локации объекта при проездах: *а)* траекторный сигнал от объекта; *б)* спектр траекторного сигнала

На рис 2.55 представлена передаточная функция исследуемого объекта и его реконструированное изображение. Результат реконструкции отображается в координатах промаха и расстояния вдоль траектории синтеза апертуры. Поле

реконструкции изображения объекта составляет 4 x 4 м. Объект воспроизводится в виде сгустка повышенной плотности отражения. Этот сгусток находится как раз на расстоянии 0,5 м от траектории (рисунок 2.55, б).

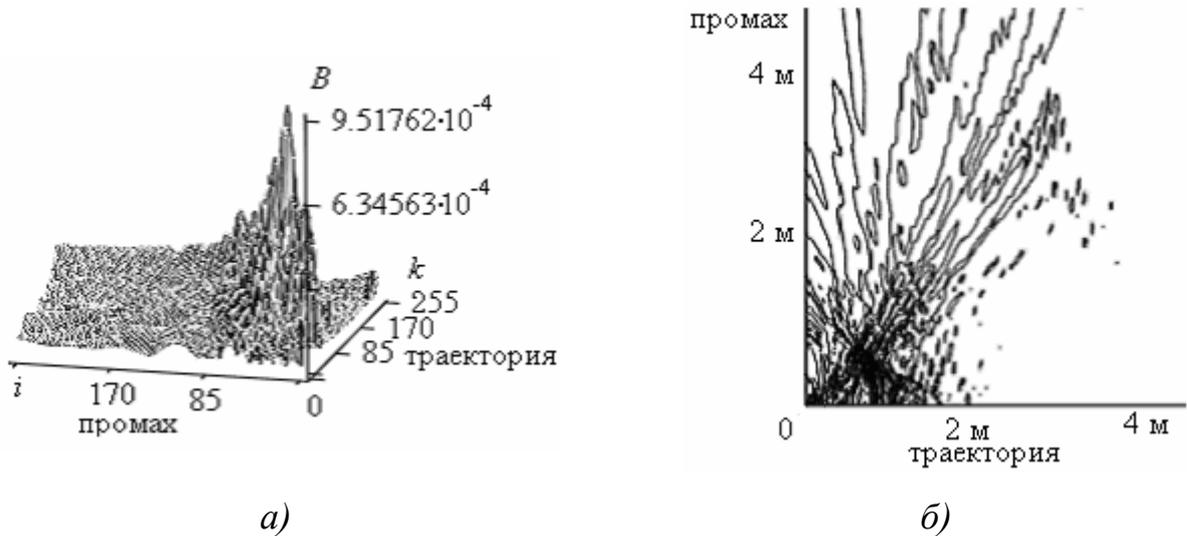


Рисунок 2.55 – Результаты корреляционной обработки траекторного сигнала: а) передаточная функция исследуемого объекта; б) реконструированное изображение объекта в координатах промаха и расстояния вдоль траектории.

Можно проградуировать ось промахов и траекторную ось. Это позволит определять промах и положение объекта на траекторном отрезке синтеза апертуры по координатной сетке. Кроме того, размеры сгустка повышенной плотности отражения по координатной сетке указывают истинные размеры объекта.

Изображение сопровождается интерференцией в виде диаграммы обратного рассеяния электромагнитных волн, которое могло бы быть убрано при двухракурсном синтезе апертуры антенна. Однако в задачах траекторного контроля такой возможности не существует, потому что в нашем распоряжении одна единственная траектория.

Лепестки диаграммы обратного рассеяния ориентированны определенным образом. Они как бы исходят из центра объекта и тем самым помогают локализовать его центр, несмотря на интерференционные лепестки.

Второй эксперимент. Проезд осуществлялся с промахом 1,5 м. Транспортировщик двигался со скоростью 2 м/с. Мощность принимаемого сигнала значительно уменьшилась. Он стал соизмерим с уровнем шумов. Тем не менее синтез апертуры возможен даже при неблагоприятном отношении сигнал/шум. На рисунке 2.56 показан траекторный сигнал и его спектр.

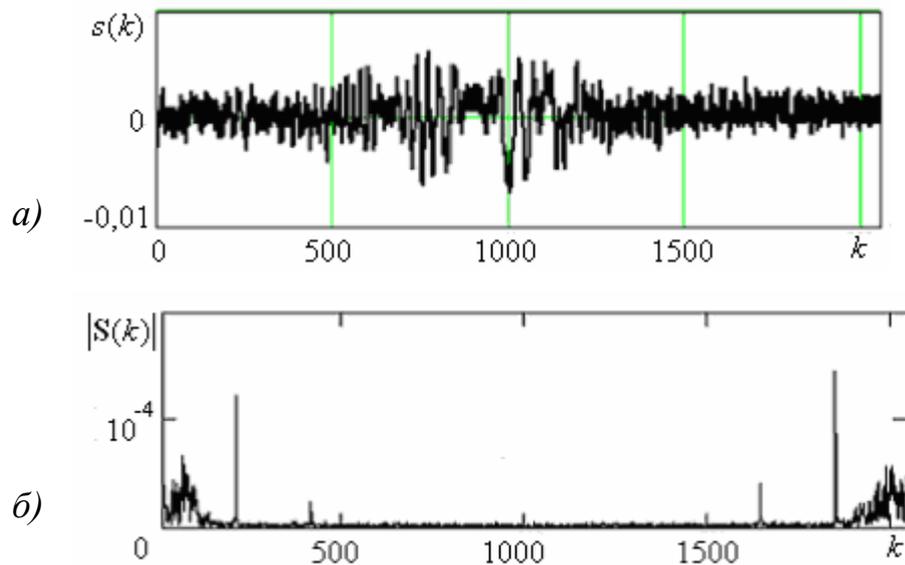


Рисунок 2.56 – Результаты локации объекта при проездах: *а)* траекторная реализация доплеровского сигнала от объекта; *б)* спектр траекторной реализации

Визуальный анализ траекторного сигнала позволяет сделать вывод о том, что промах стал больше. Об этом свидетельствует увеличение длительности траекторной реализации.

На рисунке 2.57 представлен результат реконструкции: *а)* передаточной функции объекта, *б)* изображения объекта в координатах промаха и расстояния вдоль траектории. Как видно из рисунка, изображение жестко привязано к отрезку траектории, на котором синтезируется апертура. Если выборку траекторного сигнала сдвинуть, то сдвинется и картина изображения. Это хорошо видно из сравнения траекторных сигналов (рисунки 2.54 и 2.56) и результатов реконструкции (рисунки 2.55 и 2.57).

На реконструированном изображении (рисунок 2.57, *б)* видна область локализации объекта. Она располагается как раз на промахе 1,5 м. Изображение

объекта на рисунке 2.57 более рассредоточено, чем на рисунке 2.55, т. е. выглядит некомпактно. Возможно, это связано с тем, что при увеличении промаха сказывается влияние отражений от посторонних объектов (рисунок 2.51).

Следует обратить внимание на то, что характер траекторных сигналов и результаты реконструкции очень схожи в экспериментах на акустических и электромагнитных волнах. Из этого следует возможность прибегать к моделированию на акустических волнах процессов траекторного контроля на электромагнитных волнах. Преимущество такого моделирования в том, что его можно перенести в лабораторию.

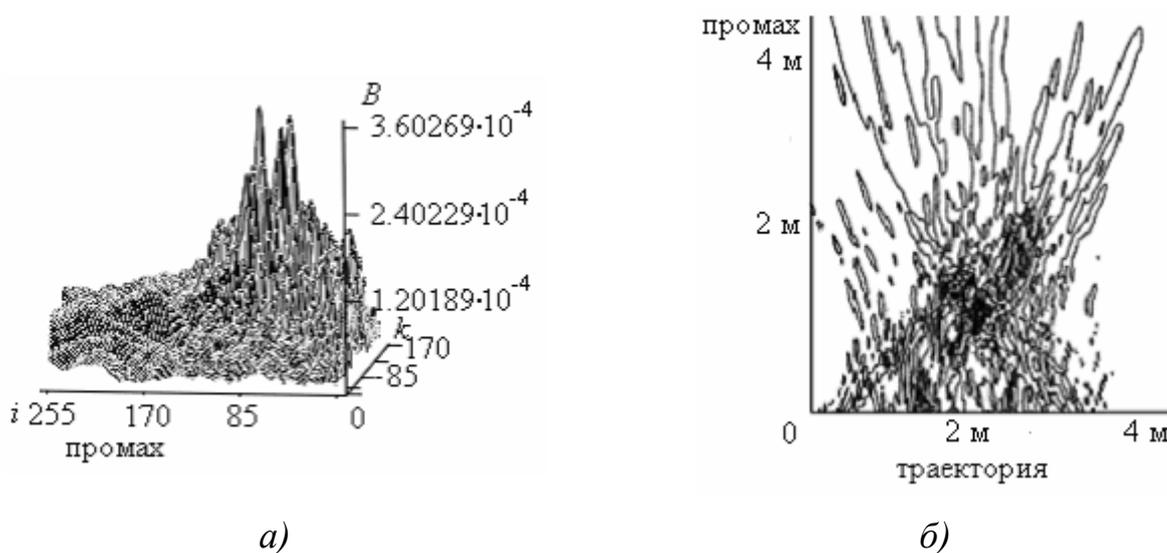


Рисунок 2.57 – Результаты корреляционной обработки траекторного сигнала:

a) передаточная функция объекта; *б)* изображение объекта

Приведенные результаты проверки предложенного метода на натуральных траекторных сигналах свидетельствуют, что теоретические представления о синтезе апертуры антенны, о процессе реконструкции и визуализации результатов траекторной обработки правильны и объективны. Предложенный метод эффективно извлекает информацию из траекторного сигнала о параметрах проезда локатора мимо объекта и удобно визуализирует его для восприятия.

Выводы

1. Непрерывная модель объекта – это тот предел, к которому стремится дискретная модель при неограниченном увеличении числа точек и уменьшения расстояния между ними.

2. Пользоваться точечной моделью можно после ее сопоставления с непрерывной моделью, при выполнении некоторых критериев.

3. Наиболее практичный критерий – это неизменность сопоставляемых изображений протяженных точечных моделей объектов и протяженных непрерывных моделей тех же объектов.

4. При стремлении к непрерывной модели в качестве критерия достаточности расстояния между точками можно брать неизменность траекторного сигнала и неизменность огибающей кольцевого спектра при уменьшении расстояния между точками.

5. При выборе расстояния между точками модели лучше всего исходить из разрешающей способности синтезированной апертуры. Точки надо брать ближе, чем предельный интервал разрешения синтезированной апертуры, т. е. ближе чем $\lambda/5$.

6. Интервал между точками $0,328\lambda$ в большинстве случаев можно считать удовлетворительным, приближающим дискретную модель к непрерывной.

7. Таким образом, реконструкция изображения объекта сводится к многократной свертке объектного траекторного сигнала с опорными траекторными сигналами от точечных объектов.

8. Многократная свертка сведена к получению набора одномерных корреляционных функций между зарегистрированным траекторным сигналом и набором опорных траекторных сигналов от точечных объектов на разных расстояниях от траектории движения локатора.

9. Предложенный метод реконструкции не является следствием проекционных теорем и обратного преобразования Радона.

10. Совпадение передаточных функций, полученных предложенным методом, с передаточными функциями, полученными проекционными методами, свидетельствует о работоспособности предложенного метода.

11. Изображения протяженных объектов сопровождаются интерференцией, которая затрудняет восприятие результатов реконструкции.

12. Интерференция проявляется не только на реконструированных изображениях и передаточных функциях многоточечных объектов, но и на пространственных спектрах по полукольцу.

13. Устранить интерференцию, не отказываясь от монохроматического источника излучения, позволяет многоракурсный апертурный синтез.

14. Прямолинейный апертурный синтез в отличие от кругового синтезирования апертуры не дает «артефактов», т. е. колец Эйри.

15. Установлена связь прямолинейного и кругового синтеза апертуры.

16. Результаты линейного апертурного синтеза согласуются с теоремой о центральном сечении.

17. Результаты испытаний алгоритмов реконструкции изображения объектов и реализующих программ реконструкции свидетельствует, что синтез апертуры на малой дальности применим для траекторного контроля.

18. Изображение объекта реконструируется вместе с диаграммами обратного рассеяния радиоволн, однако локализация объекта хорошо просматривается.

19. Так как поле изображения построено в координатах промаха и расстояния вдоль траектории, то координаты локализации и размеры объекта легко определить.

3 СИНТЕЗ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЛОКАТОРА

3.1 Постановка задачи кругового синтеза апертуры в области пространственных функций

Круговой апертурный синтез в спектральной области известен более 30 лет и хорошо изучен [31]. Поставим перед собой задачу осуществить круговой апертурный синтез в пространственной области,* используя аппарат корреляционных функций для синтеза апертуры и реконструкции изображения объекта. Вероятнее всего, метод взаимных корреляций даст такие же результаты, что и апертурный синтез, осуществляемый в спектральной области. Таким образом, сопоставление результатов, полученных двумя методами, полезно в прикладном плане, а также для осмысления приемов реконструкции с общетеоретических позиций.

В работе [31] проблемы интерференции не были рассмотрены. Возможно, авторы этой работы были уверены в том, что если убрать кольца Эйри, то вопросы интерференции решать не придется. Поэтому основное внимание ими уделено вопросам уничтожения колец Эйри на передаточной функции точки. И они доказали известный из оптики факт, что кольца исчезнут, если отказаться от монохроматической локации и перейти к широкополосным сигналам. В рамках принятой ими концепции исключения проблемы интерференции, попытки развития синтеза апертуры антенны в ближней зоне при монохроматическом зондирующем сигнале становятся не перспективными.

Исследуем возможности синтеза апертуры на малой дальности от объекта при монохроматической локации. Вначале получим передаточные функции точек и их спектры на кольце. Сравним их с результатами, полученными в [31].

* Под пространственной областью подразумевается трехмерное пространство, в котором происходит интерференция падающей и отраженной волны. Доплеровский сигнал есть одномерная развертка во времени результата пространственной интерференции благодаря движению локатора в наблюдаемом пространстве

Выясним, какой будет результат реконструкции многоточечных (протяженных) объектов. Будет ли при этом наблюдаться интерференция на изображениях объектов и как она проявляется на спектрах по кольцу? Что при этом больше мешает восприятию реконструированных объектов – кольца Эйри или интерференция?

На эти вопросы можно получить ответ, если будет предложен и разработан метод синтеза апертуры в полярной системе координат с отображением результатов реконструкции в декартовых координатах.

3.2 Суть кругового синтеза апертуры в области пространственных функций

Для синтеза апертуры организуется перемещение локатора по кругу около картографируемого объекта с регистрацией траекторного доплеровского сигнала. Затем многократно определяется взаимная корреляционная функция зарегистрированного траекторного доплеровского сигнала с разными опорными доплеровскими сигналами, рассчитанными для случая перемещения локатора мимо опорной точки. Если радиальная дальность и тангенсальная скорость для отдельной точки объекта совпадают с радиальной дальностью и тангенсальной скоростью опорной точки, то имеет место фокусировка синтезированной апертуры на локальную область внутри объекта в районе этой точки. Если эта локальная область меньше размеров объекта, то будут различаться отдельные детали объекта. Такая обработка доплеровского сигнала эквивалентна синтезу апертуры протяженной антенны одним-единственным точечным элементом с изотропной диаграммой за счет движения по заданной траектории. Протяженная синтезированная апертура имеет узкую диаграмму направленности, в результате этого достигается высокое угловое разрешение. Кроме того, имеет место фокусировка на определенную радиальную дальность, которая может обеспечить радиальное разрешение.

3.2 Математическое и модельное описание кругового синтеза апертуры с помощью взаимных корреляционных функций

Материал раздела опубликован в [81]. Предлагаемый в этом разделе метод синтеза апертуры по существу является распространением способа синтеза апертуры для прямолинейного движения локатора на круговую траекторию. При изложении данного метода для удобства введем понятие проекции. Под проекцией будем понимать отсчет одного значения траекторного сигнала в точке на круговой траектории, где расположен в данный момент локатор, в которой сходятся лучи, соединяющие точки отражения объекта с локатором. Это понятие совпадает с понятием проекции в смысле прямого преобразования Радона только для точечного объекта. В случае протяженного объекта локатор регистрирует пучок сходящихся проекций, т. е. сумму проекций.

Движущийся локатор задает линию в виде окружности, на которую будет проецироваться отраженное излучение от точек объекта. Параметр круговой линии определяется радиусом R_0 . Точка объекта под номером i с плотностью отражения g_i задается полярными координатами (δ_i, φ_i) . Локатор с изотропной диаграммой направленности антенны движется по круговой траектории и в месте своего нахождения регистрирует проекции $p(n\Delta\psi)$ рисунок 3.1.

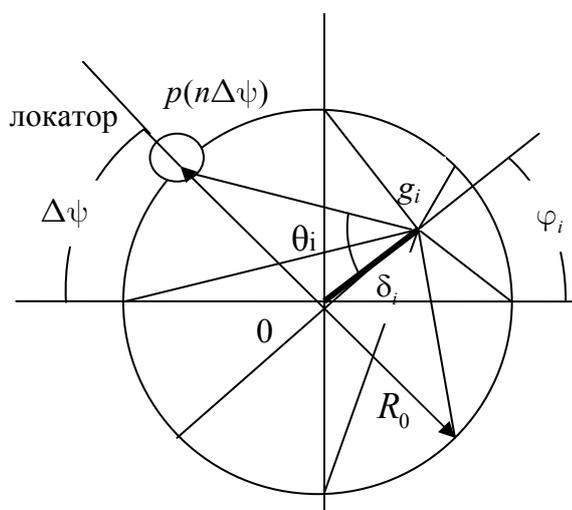


Рисунок 3.1 – Отсчеты проекции плотности отражения одноточечного объекта на круговой линии с равномерным шагом

Предположим, что проекции регистрируются непрерывно во времени. Если потребуется перейти к дискретным отсчетам, то будем регистрировать на круговой траектории проекции отражающих точек объекта в виде плотности отражения g_i через равные угловые промежутки $\Delta\psi = 2\pi/N$, как показано на рисунке 3.1. Отсчеты проекции в дискретном виде $p(n\Delta\psi) = p(\delta_i, \theta_i(n\Delta\psi))$ будут регистрироваться равномерно по дуге окружности*.

Представим рассеивающую способность объекта суммой из I отражающих точек, и запишем их проекции на круговую траекторию как функцию времени

$$p(t) = \sum_{i=1}^I p_i(\delta_i, \theta_i(t)) = \sum_{i=1}^I g_i \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_0^2 + \delta_i^2 - 2R_0\delta_i \cos\theta_i(t)}] \quad (3.1)$$

Выражение под квадратным корнем – это текущее расстояние от точки с плотностью отражения g_i до локатора. Обозначим его как $R_i(t)$ или $R_i(n\Delta\psi)$ для дискретных отсчетов. Расстояние от i -й отражающей точки до локатора, находящегося на круговой траектории, определяется в соответствии с геометрической схемой (рисунок 3.1).

Запишем проекцию опорной точки на круговую траекторию с единичной плотностью отражения для любого момента времени. Эта проекция по существу является опорным сигналом.

$$p_{op}(\delta, \theta(t)) = \exp[j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_0^2 + \delta^2 - 2R_0\delta \cos\theta(t)}] \quad (3.2)$$

Следует обратить внимание на то, что опорный сигнал (3.2) является комплексно сопряженным для анализируемого сигнала (3.1), поэтому в показателе экспоненты в выражении (3.2) стоит знак «плюс». Взаимную корреляционную функцию между опорной проекцией (3.2) и проекцией объекта (3.1) можно записать следующим образом:

$$B(\delta', \theta') = \int_{\delta} \int_{\theta} \sum_{i=1}^I p(\delta_i, \theta_i) p_{op}(\delta - \delta', \theta - \theta') d\delta d\theta = \int_{\delta} \int_{\theta} \sum_{i=1}^I g_i \exp[-j\psi(\delta, \theta)] d\delta d\theta, \quad (3.3)$$

* Переход к новым обозначениям в формулах связан со стремлением перейти к общепринятым в круговом апертурном синтезе обозначениям [31, 72]

где $\psi(\delta, \theta) = \frac{4\pi}{\lambda} \{ \sqrt{R_0^2 + \delta_i^2 - 2R_0\delta_i \cos\theta_i} - \sqrt{R_0^2 + (\delta - \delta')^2 - 2R_0(\delta - \delta') \cos(\theta - \theta')} \}$.

Пределы интегрирования: δ изменяется от 0 до R_0 , θ изменяется от 0 до 2π . В выражении (3.3) время t опущено. В данном случае сдвиг по времени эквивалентен сдвигу по углу θ . Поэтому можно считать, что θ – исходное значение угла, а θ' – соответствует значению угла после сдвига по времени.

Предлагается пользоваться формулой (3.3) в измененном виде:

$$B(\delta', \theta') = \int_{\delta} \int_{\theta} \sum_{i=1}^I p(\delta_i, \theta_i) p_{op}(\delta', \theta - \theta') d\delta d\theta = \int_{\delta} \int_{\theta} \sum_{i=1}^I g_i \exp[\psi(\delta, \theta)] d\delta d\theta, \quad (3.4)$$

где $\psi(\delta, \theta) = -j \frac{4\pi}{\lambda} \{ \sqrt{R_0^2 + \delta_i^2 - 2R_0\delta_i \cos\theta_i} - \sqrt{R_0^2 + (\delta')^2 - 2R_0(\delta') \cos(\theta - \theta')} \}$.

Выражение (3.4) можно назвать вырожденной или нетипичной двумерной взаимной корреляционной функцией. К каким результатам приводит применение выражения (3.4), можно посмотреть в Приложении Д.

При реконструкции изображения по траекторному сигналу можно также применять набор одномерных взаимных корреляционных функций вида

$$B(\delta', \theta') = \int_{\theta} \sum_{i=1}^I p(\delta_i, \theta_i) p_{op}(\delta', \theta - \theta') d\theta = \int_{\theta} \sum_{i=1}^I g_i \exp[\psi(\theta)] d\theta, \quad (3.5)$$

где $\psi(\theta) = -j \frac{4\pi}{\lambda} \{ \sqrt{R_0^2 + \delta_i^2 - 2R_0\delta_i \cos\theta_i} - \sqrt{R_0^2 + (\delta')^2 - 2R_0(\delta') \cos(\theta - \theta')} \}$

Результаты применения выражения (3.5) к расчету передаточной функции точки приведены в Приложении Е. Сравнивая результаты Приложений Д и Е, можно видеть, что двумерная вырожденная взаимная корреляционная функция (3.4) дает меньший уровень боковых лепестков, чем одномерная (3.5), однако требует больших затрат времени на вычисления.

Чтобы исследовать формулу (3.3), рассмотрим частный случай, когда реконструируется точечный объект, расположенный в начале координат. В этом случае $i = 1$, $\delta_i = 0$ и взаимно корреляционная функция (3.3) примет вид:

$$B(\delta', \theta') = g_1 \int_{\delta} \int_{\theta} \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} (\sqrt{R_0^2} - \sqrt{R_0^2 + \delta'^2 - R_0\delta' \cos(\theta - \theta')})] d\delta d\theta \quad (3.6)$$

Полученное выражение несколько отличается от функции Бесселя, однако по характеру принадлежит к этому классу функций (ср. (3.6) с каноническим выражением Бесселевой функции (3.7), взятом из [6, стр. 466]):

$$J_n(x) = \frac{(-i)^n}{\pi} \int_0^\pi \exp(ix \cos \varphi) \cos n\varphi d\varphi. \quad (3.7)$$

В выражении (3.7) в отличие от выражений (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) $\sqrt{-1} = i$, а не j . Такие временные изменения в обозначениях введены из-за того, что символ j уже занят и обозначает саму функцию Бесселя.

Передающая функция точки, расположенной в начале координат, построенная по формуле (3.6), и ее вид сверху представлены на рисунке 3.2, *a* и *b*. Следует отметить, что передающая функция точки, построенная методом корреляции (3.6), неотличима от передающей функцией точки, построенной по кольцевому спектру с помощью функции Бесселя (ср. рисунки 3.2 и 1.2, а также выражения для расчета (3.6) и (1.7)).

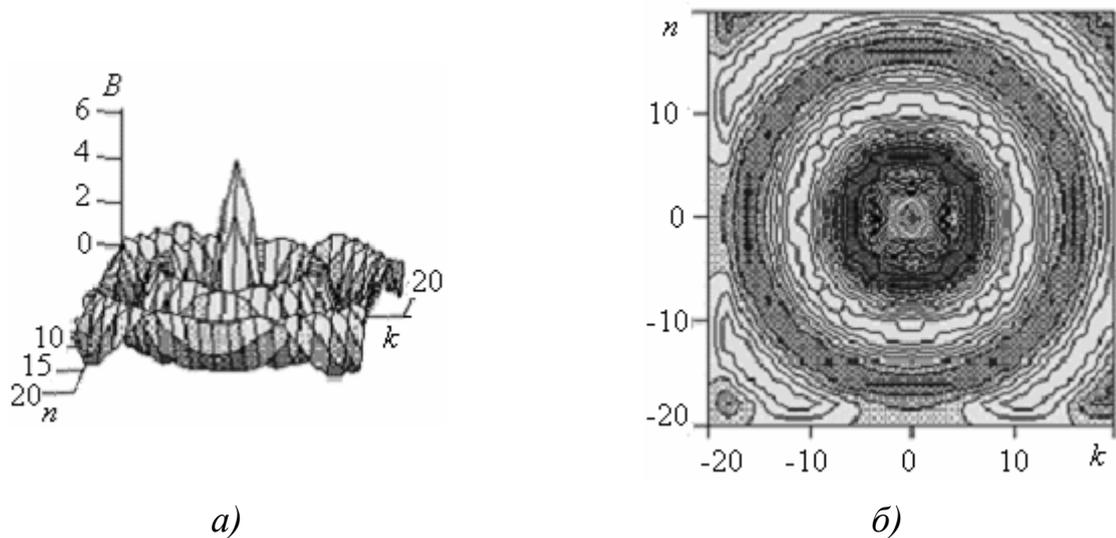


Рисунок 3.2 – Реконструкция изображения точки, расположенной в начале координат и построенной методом взаимной корреляции траекторного сигнала с опорными сигналами: *a*) передающая функция; *б*) вид функции в плане

При расчете были заданы следующие параметры: $R_0 = 10\lambda$, $\lambda = 0,0013$ м. Размер рисунка $2\lambda \times 2\lambda$. Если отсчет разрешающей способности вести по минимуму главного лепестка, то диаметр образованного главным максимумом

кольца составит $\lambda/2$. Если отсчет разрешающей способности вести по уровню 0,7 от максимума, то образуется кольцо с диаметром приблизительно $\lambda/5$, что совпадает с результатами Д.Менсы [31].

Представленный ниже алгоритм дискретной обработки вытекает из формулы (3.5). Для того чтобы использовать алгоритмы быстрого преобразования Фурье, дискретную обработку экспериментально полученных данных лучше производить в спектральной области. Ниже предлагается именно такой алгоритм нахождения взаимно корреляционных функций.

Предполагается, что локатор с изотропной диаграммой движется по круговой траектории, облучая монохроматическим сигналом отражающую точку, смещенную относительно центра на расстояние δ_k , и регистрирует траекторный доплеровский сигнал. Дискретные отсчеты сигнала регистрируются с угловым шагом $\Delta\phi = (2\pi/N)$, что соответствует шагу по дуге окружности $\Delta s \approx (2\pi/N)R_0$, где N – число отсчетов, а R_0 – радиус круговой траектории, по которой синтезируется апертура. Легко показать, что в этом случае расстояние от реконструируемой точки до локатора будет изменяться согласно формуле:

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

где δ_k – радиальное удаление реконструируемой точки от центра синтезированной апертуры; i – номер отсчета проекции точки 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 текущих отсчетов. Эти границы изменения угла соответствуют полному обходу реконструируемого объекта по круговой траектории в полярных координатах.

Если поступить, как в работе [31], т. е. не учитывать радиального затухания, то траекторный сигнал $s(i)$ от одной точки можно рассчитать по формуле:

$$s(i) = (1) \cos \varphi(i) \quad (3.8)$$

Для достоверности данных более правильным будет учет радиального затухания, которое изменяется обратно пропорционально второй степени $R(i)$:

$$s(i) = (1/R^2(i)) \cos \varphi(i), \quad (3.9)$$

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

При большом количестве точек отраженный от них сигнал $s(i)$ в соответствии с принципом суперпозиции можно рассчитать по формуле:

$$s(i) = \sum_M s_m(i), \quad (3.10)$$

где M – общее число реконструируемых точек, принадлежащих объекту; m – порядковый номер реконструируемой точки объекта; $s_m(i)$ – траекторный доплеровский сигнал, отраженный от m -й точки и рассчитанный по формуле (3.8) или (3.9).

Для пространственной селекции точек необходимо просканировать принятый доплеровский сигнал вида (3.10) перестраиваемым дисперсионным фильтром,* поочередно настраиваемым на разные дальности внутри круговой апертуры. Процесс сканирования, а точнее процесс фильтрации, сведется к определению взаимно корреляционной функции $B_k(i1)$, расчет которой для применения быстрых преобразований Фурье лучше выполнять в спектральной области. Теорему о свертке, которая используется в выражении, приведенном ниже, можно найти в [9]:

$$B_k(i1) = \sum_{i=1}^{2N} s(i)s_k(i+i1) = \sum_{n=1}^{2N} \mathbf{S}(n)\mathbf{K}_k(n) \exp(j\frac{2\pi}{N}i1n) \quad \text{при } i1=1,2,\dots,2N, \quad (3.11)$$

$$\text{где } \mathbf{S}(n) = \sum_{i=1}^{2N} s(i) \exp(-j\frac{\pi}{N}in) \quad \text{при } i=1,2,\dots,N, \quad (3.12)$$

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

$$\mathbf{K}_k(n) = \sum_{i=1}^{2N} s_k(i) \exp(-j\frac{\pi}{N}in) \quad \text{при } i=N+1,N+2,\dots,2N, \quad (3.13)$$

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

* Дисперсионным будем называть фильтр с нелинейной фазовой характеристикой. У такого фильтра задержка сигнала зависит от частоты. Дисперсионные фильтры применяются в радиолокации для сжатия ЛЧМ сигналов.

В выражениях (3.11), (3.12), (3.13) приняты следующие обозначения:

$\mathbf{S}(n)$ – отсчеты спектра сигнала (3.10); $\mathbf{K}_k(n)$ – отсчеты частотной характеристики дисперсионного фильтра, настроенного на дальность δ_k ; $s_k(i)$ – отсчеты опорного сигнала, рассчитанные по формуле (3.8) или (3.9) для одной точки, удаленной от центра синтезирования апертуры на расстояние δ_k ; n – номера отсчетов частоты; i – номера отсчетов сигнала; $i1$ – номера отсчетов взаимно корреляционной функции.

С помощью выражения (3.11) определяют $2N$ отсчетов взаимно корреляционной функции, в то время как у траекторного сигнала их всего N . Поэтому недостающие отсчеты траекторного сигнала дополняются нулями до $2N$. Так же поступают и с опорным сигналом при определении частотной характеристики, выраженной формулой (3.13). Это делается потому, что корреляционная функция требует в два раза больше отсчетов, чем сигнал.

Таким образом, процесс синтезирования апертуры и построения изображения сводится к многократной свертке траекторного сигнала вида (3.10) с опорными сигналами вида (3.8) или (3.9), рассчитанными при различных удалениях опорной точки от центра δ_k и развертке центральных, т. е. N -х отсчетов взаимно корреляционной функции, перекодированных в тоновые или цветовые пиксели, в декартовых координатах. Каждый центральный отсчет взаимно корреляционной функции соответствует полярным координатам $\delta_{i,k}$ и $\psi_{i,k}$. Для перехода от декартовой к полярной сетке координат используются формулы:

$$\delta_{i,k} = \Delta s \sqrt{i^2 + k^2}, \quad (3.14)$$

$$\psi_{i,k} = \arctg \frac{i}{k}, \quad (3.15)$$

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.

При дискретных отсчетах процедура перехода от декартовых координат к полярным вносит некоторую погрешность в реконструируемое изображение. Проблему уменьшения погрешности решает в какой-то мере метод интерполя-

ции отсчетов функции по ее значениям в конечном числе точек, в которых она известна. Существует много методов интерполяции, позволяющих переходить от декартовой сетки к полярной и обратно. С этими методами можно ознакомиться в литературе по томографии [27].

Если развернуть перекодированные в пиксели отсчеты взаимных корреляционных функций в полярных координатах, то проблем интерполяции не будет. Однако в этом случае на смену проблемам интерполяции приходит ряд других проблем, среди которых наиболее важной является проблема неодинаковой плотности изображения. Это связано с особенностями полярной сетки.

Недостаток полярной сетки в том, что она имеет неравномерную плотность. Изображение, развернутое в полярных координатах, имеет излишне большую плотность в центре полярной системы координат и сильно разрежено при удалении от начала координат. Чтобы сделать изображение более качественным, потребуются специальные программные приемы, которые может предложить любой квалифицированный программист.

В данной работе для построения изображения выбрана декартова система координат. Однако из-за круговой симметрии синтеза апертуры при расчетах не возможно избежать перехода к полярной системе координат. Задавая равномерное перемещение локатора по круговой траектории и начальную точку синтеза апертуры на окружности, мы невольно переходим к полярной системе координат. При этом любой отсчет регистрируемого траекторного сигнала мы можем привязать к полярной сетке. При реконструкции изображения используют только центральные отсчеты взаимных корреляционных функций, полярные координаты которых также известны.

В данном случае в качестве исходной была задана декартова сетка в дискретном виде с шагом Δs и номерами дискретных отсчетов по координатам i и k . Каждый отсчет декартовой сетки являлся опорной точкой, для которой необходимо рассчитать опорный траекторный сигнал. Затем для каждого отсчета декартовой сетки определялись в соответствии с (3.14) и (3.15) поляр-

ные координаты опорных точек. Найденные полярные координаты $\delta_{i,k}$ и $\psi_{i,k}$ по формулам (3.8) или (3.9) позволили рассчитать отсчеты опорного траекторного сигнала при движении по кольцевой траектории (рисунок 3.3). При этом положение первого отсчета на кольце (рисунок 3.3) определялось полярным углом опорной точки $\psi_{i,k}$, а значит ее декартовыми координатами.

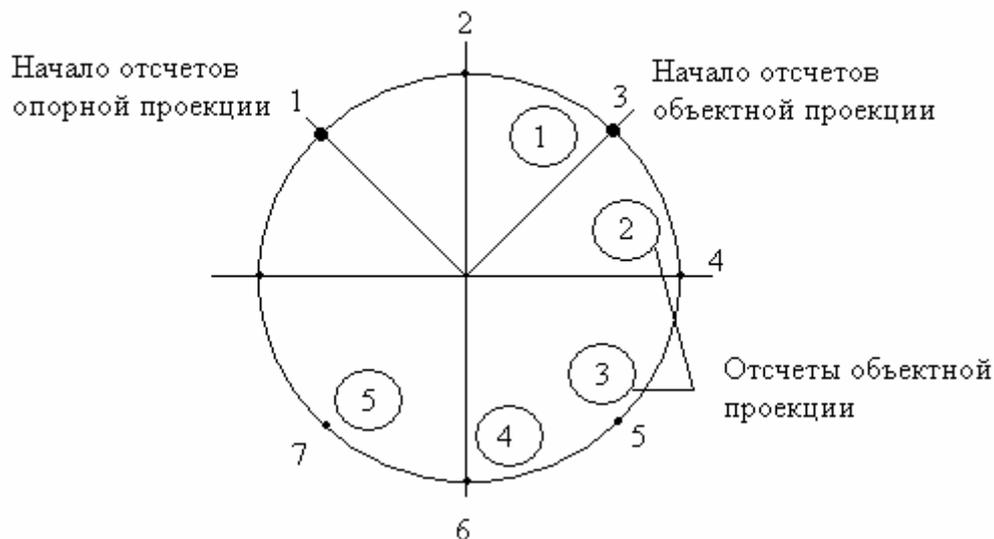
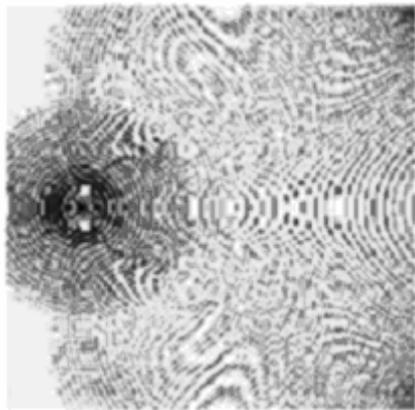


Рисунок 3.3 – Не совпадающие отсчеты опорного и объектного траекторных сигналов (такая картина имеет место при несовпадении координат опорной и объектной точек)

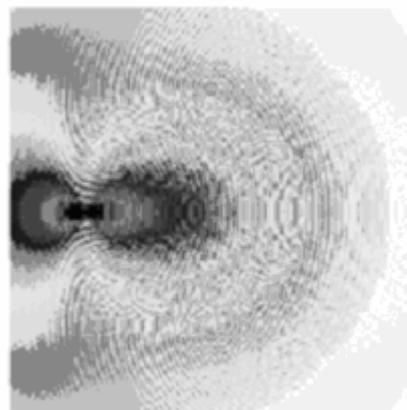
Предположим, что объект состоит из одной отражающей точки. Если координаты объектной точки и координаты опорной точки не совпадают, то не совпадают и их отсчеты по кольцу (рисунок 3.3). При совпадении координат отсчеты по кольцевой траектории от первого до последнего совпадают, и N -й отсчет взаимной корреляционной функции будет с максимальной амплитудой.

Число сгенерированных опорных сигналов составляло 256×256 . Набором опорных сигналов сканируется все пространство внутри круговой апертуры, а N -е отсчеты взаимных корреляционных функций, перекодированные в цветные пиксели и развернутые по координатам, дают изображение.

Смоделированное по вышеизложенному алгоритму и развернутое изображение представлено на рисунках 3.4, *а* и *б*.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Реконструкция изображения точки: а) изображение одноточечного объекта при неучтенном радиальном ослаблении сигнала; б) изображение одноточечного объекта при учтенном радиальном ослаблении сигнала

Рисунок 3.4, а отображает изображение одноточечного объекта, полученное в результате движения локатора по кругу с синтезом апертуры. При этом реконструируемая точка была удалена на $5,6\lambda^*$ от центра круговой траектории движения локатора. Радиус синтезирования апертуры в этом случае составлял $R_0=12,67\lambda$. Радиальное затухание не учитывалось. Расчеты траекторного сигнала проводились по формуле (3.6). На рисунке 3.4, б представлена эта же точка, но уже с учетом радиального затухания в соответствии с формулой (3.9). При учете радиального затухания в программе расчета была предусмотрена так называемая система автоматической регулировки усиления. Эта система после корреляционной обработки регулировала амплитуду откликов в соответствии с удаленностью опорной точки от траектории синтеза апертуры.

Сравнивая рисунки 3.4, а и б, можно видеть, как при учете радиального затухания передаточная функция точки в сечении горизонтальной плоскостью приобретает вид восьмерки, которая характерна для линейного апертурного синтеза [78]. Этот результат очевиден, так как для точки, удаленной от центра и приближенной к траектории, при учете радиального затухания эффективное

* Во всех модельных экспериментах длина волны задавалась равной 1,3 мм.

синтезирование апертуры происходит лишь на отрезке дуги окружности, приближенной к точке. Этот кусок окружности можно принять за отрезок прямой линейной траектории.

Обсуждение результатов моделирования

Рассмотрим свойства вышеизложенного метода реконструкции изображения, т. е. обсудим полученные результаты моделирования. Для примера возьмем точку, удаленную от центра синтезирования апертуры на $1,4 \times 10^{-6} \lambda$ при радиусе синтезирования апертуры $25,3 \lambda$.

На рисунке 3.5, *a* представлен траекторный сигнал, полученный при обходе этой точки по круговой траектории с постоянной скоростью, а на рисунке 3.5, *б* представлен спектр этого же сигнала.

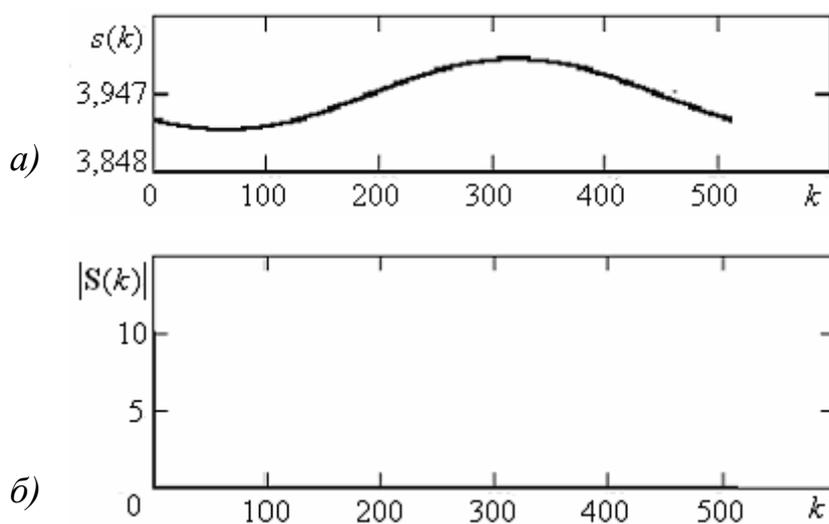


Рисунок 3.5 – Результаты сбора данных от точечного объекта: *a*) траекторный сигнал для точки, помещенной в центре синтезирования апертуры, т. е. в начале координат; *б*) спектр этого же сигнала

Спектр сосредоточен в районе нулевой частоты. Это естественный результат, так как при обходе объекта по кругу радиальное сближение отсутствует, и нет также радиальной скорости сближения локатора и точечного объекта. Траекторный сигнал, отраженный от точки, удаленной на 14λ от центра, и его спектр, полученный при движении локатора по той же траектории с прежней скоростью приведены на рисунке 3.6. Сопоставление рисунков 3.5 и 3.6 позво-

ляет убедиться в том, что удаление реконструируемой точки от центра синтезирования апертуры по кругу приводит к резкому расширению спектра траекторного сигнала. Это объясняется появлением радиальной составляющей скорости движения локатора относительно точечного объекта.

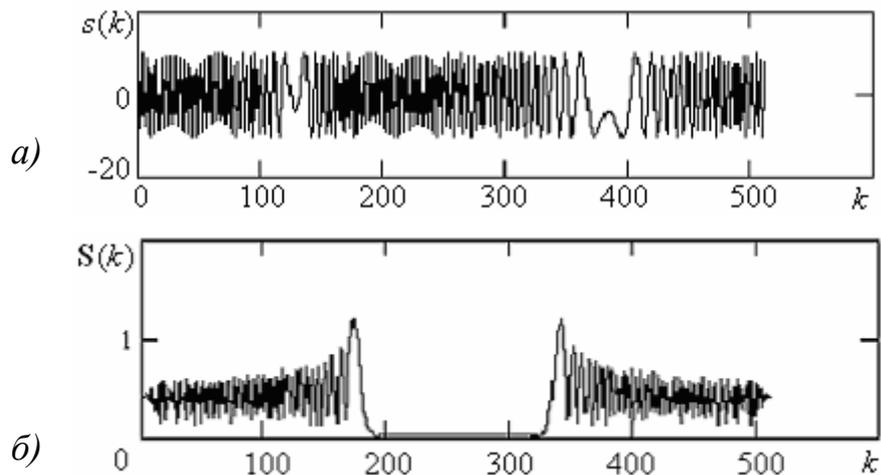


Рисунок 3.6 – Результаты сбора данных для точки: *а)* траекторный сигнал для точки, удаленной от центра на 14λ ; *б)* спектр приведенного выше сигнала

Если исходить из теории радиолокационных сигналов, то следует ожидать сужение взаимно корреляционной функции для точек объекта, удаленных от центра, так как расширяется база сигнала (произведение ширины спектра на длительность сигнала).

На рисунке 3.7, *а* представлена передаточная функция точки, находящейся в центре синтезирования апертуры, а на рисунке 3.8, *а* показана ее изображение, т. е. вид сверху этой же передаточной функции, с перекодированной в тоновые пиксели амплитудой. Расчет проведен без учета радиального затухания. Это позволяет производить сопоставление полученных результатов с результатами, полученными в работе [31].

На рисунке 3.7, *б* представлена передаточная функция точки, которая удалена на 14λ от центра синтеза апертуры, а на рисунке 3.8, *б* показано ее изображение.

Радиус синтезирования апертуры R_0 составлял 25λ . Здесь тоже не учитывалось радиальное ослабление сигнала в соответствии с формулой локации (3.9). Неожиданным оказалось то, что для точки, расположенной в центре синтезирования апертуры и дающей траекторный сигнал с нулевым доплеровским спектром, передаточная функция точки оказалась такой же, как и для удаленной от центра точки, дающей сигнал с широким спектром. Отсюда следует, что круговая апертура дает одинаковое разрешение внутри круговой области для всех точек независимо от их удаления от центра синтезирования апертуры.

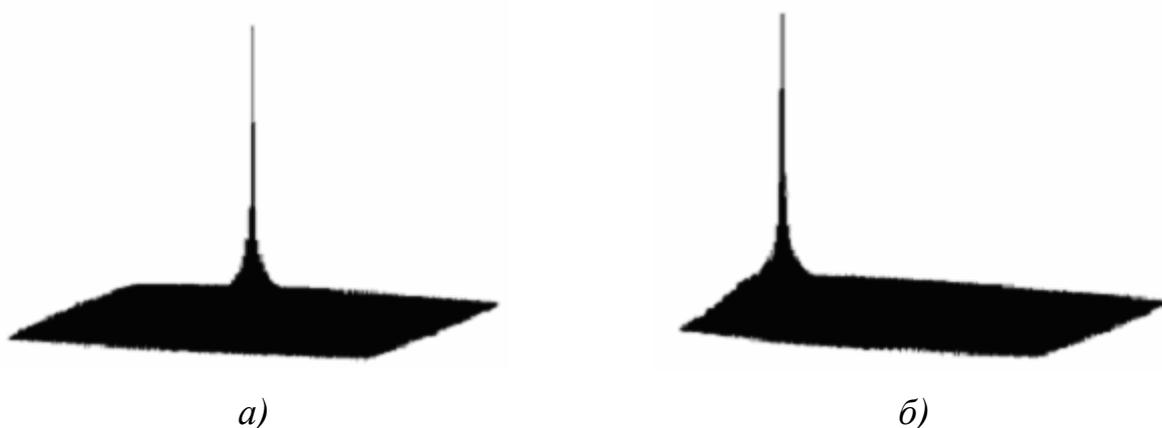


Рисунок 3.7 – Результаты реконструкции изображения точечного объекта:
a) передаточная функция центральной точки; *б)* передаточная функция точки, удаленной от центра синтезирования апертуры на 14λ

В этом можно убедиться, сравнивая передаточную функцию точки, расположенную в центре рисунка 3.7, *a*, или ее изображение в плане на рисунке 3.8, *a* с передаточной функцией точки, удаленной от центра синтезирования апертуры (рисунок 3.7, *б*) или ее изображение в плане (рисунок 3.8, *б*).

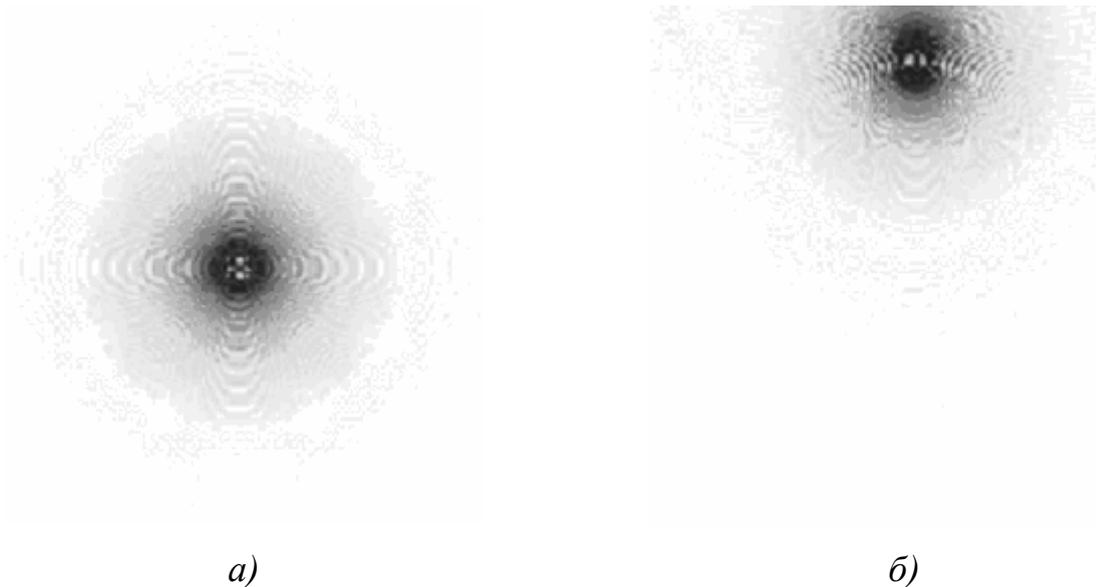


Рисунок 3.8 – Результаты реконструкции изображения точечного объекта:
a) изображение центральной точки; *б)* изображение удаленной от центра точки

Следует обратить внимание на «пьедестал» (основание) передаточной функции точки (рисунок 3.7). В плане этот «пьедестал» имеет вид концентрических окружностей, которые напоминают кольца Эйри [69] (рисунок 3.9).

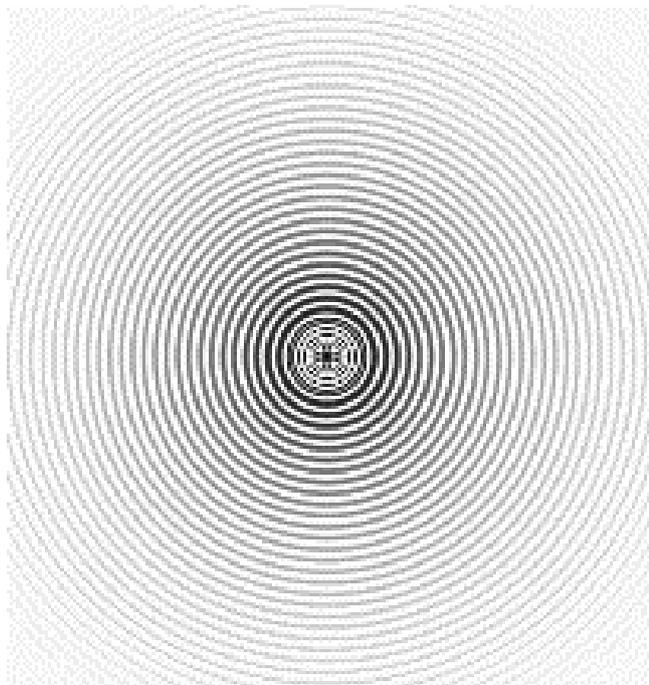


Рисунок 3.9 – Вид передаточной функции точки в плане

Эти кольца Д.Менса называл боковыми лепестками или артефактами [31]. Появление этих колец при реконструкции точечных объектов предложенным ме-

тодом говорит о том, что рассматриваемый метод и метод Менсы дают эквивалентные результаты при реконструкции одноточечных объектов. Распространить этот вывод на многоточечные объекты не представляется возможным, так как многоточечные объекты в работе [31] не рассматривались.

Проблемой также являются другие концентрические круги на некотором удалении от пика передаточной функции точки (рисунок 3.10, *а*). Эти круги не связаны с кольцами Эйри. Кроме того, они раздваиваются при удалении реконструируемой точки от центра синтезирования апертуры (рисунок 3.10, *б*). При увеличении числа отсчетов траекторного сигнала по кругу в два раза, во столько же раз увеличиваются радиусы этих кругов. В этом можно убедиться, сравнивая рисунки 3.10, *а* и 3.10, *в*.

Объяснить появление концентрических кругов можно тем, что у опорного сигнала быстро растет ширина спектра по мере удаления опорной точки от центра синтезирования апертуры. Для удаленных от центра точек спектр траекторного сигнала расширяется до таких пределов, что после дискретизации имеет место перехлест периодически повторяющихся компонентов спектра.

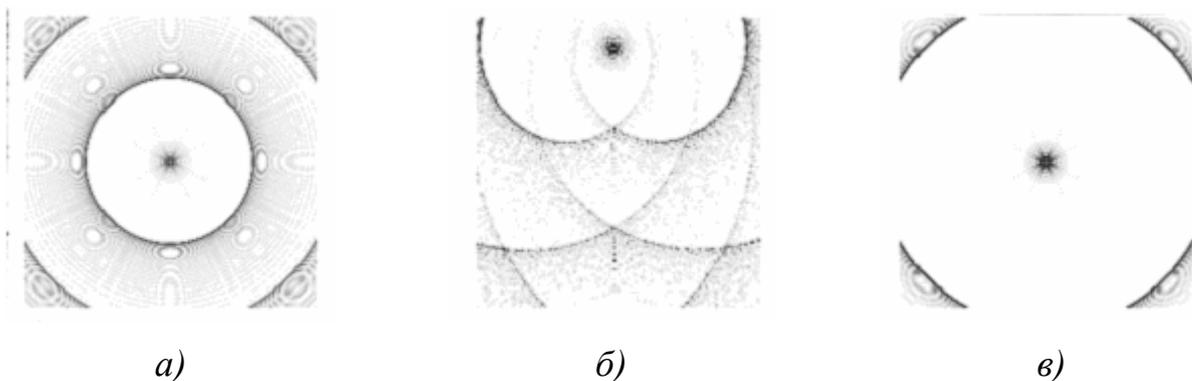


Рисунок 3.10 – Результаты реконструкции изображения одноточечного объекта без учета радиального затухания: *а*) точка в центре круговой траектории при 256 отсчетах траекторного сигнала; *б*) точка удалена от центра круговой траектории на 14λ при 256 отсчетах траекторного сигнала; *в*) точка в центре круговой траектории при 512 отсчетах траекторного сигнала.

Для устранения перехлеста спектра необходимо скорректировать частоту отсчетов опорного и анализируемого сигналов в соответствии с теоремой Ко-

тельникова или ограничить спектр до дискретизации, введя функцию окна в частотной области. После такой корректировки, т. е. после удвоения числа отсчетов, радиус кругов удваивается и круги покидают поле изображения. В этом можно убедиться, сравнивая рисунки 3.10, *а* и 3.10, *в*.

Раздвоение кругов при удалении реконструируемой точки от центра синтезирования апертуры связано с неточностью совмещения полярной и декартовой координатных сеток при переходе к дискретным отсчетам рассматриваемых функций. Это можно назвать погрешностями интерполяции декартовых отсчетов по полярным отсчетам реконструируемой функции. Результат такого раздвоения хорошо виден на рисунке 3.10, *в*.

Следует также обратить внимание на то, что при учете радиального затухания для удаленных от центра синтезирования апертуры многоточечных объектов (рисунки 3.11, *а* и 3.11, *б*) проявляются интерференционные явления.

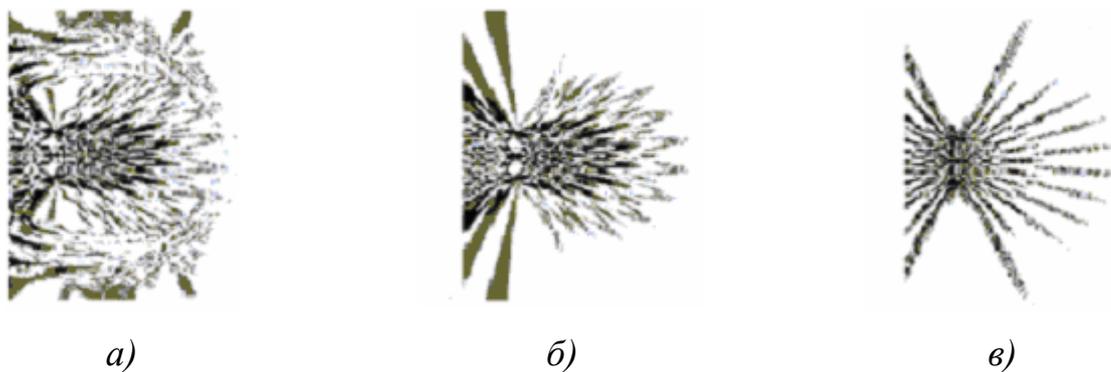


Рисунок 3.11 – Изображения трехточечного объекта, удаленного от центра синтезирования апертуры на 11λ при радиусе синтезирования круговой апертуры 25λ : *а*) при реконструкции учтено радиальное затухание и взято по кругу 256 отсчетов траекторного доплеровского сигнала; *б*) при реконструкции учтено радиальное затухание и взято по кругу 512 отсчетов траекторного доплеровского сигнала; *в*) при реконструкции не учтено радиальное затухание и взято по кругу 512 отсчетов траекторного доплеровского сигнала. Габаритный размер каждого изображения составляет $2R_0 = 50\lambda$

Многоточечные объекты на изображениях отображаются вместе со своими диаграммами обратного рассеяния. При этом преобразование амплитуды

корреляционной функции в тоновые пиксели производилось в диапазоне амплитуд от максимума до нуля. Если отсечь «пьедестал» передаточной функции точки, т. е. интервал кодирования амплитуды передаточной функции в тоновые цвета, взять от U_{\max} до $0,1U_{\max}$, то изображения точечных объектов будут более узнаваемы (рисунок 3.12).

Условия реконструкции на рисунке 3.12 ничем не отличаются от условий реконструкции рисунка 3.11 за исключением того, что «пьедестал» передаточной функции отсечен по уровню $0,1U_{\max}$. Из-за удвоения числа отсчетов по кругу до 512 (см. рисунок 3.11, б) диаметр кругов, охватывающих три точки, увеличился в два раза по сравнению с кругами для 256 отсчетов траекторного сигнала (рисунок 3.11, а), и круги ушли за границы рисунка. Результат реконструкции трех точек (рисунок 3.11, в) без учета радиального затухания амплитуды траекторного сигнала при 512 отсчетах по кругу также не имеет мешающих кругов. Однако интерференционные явления остаются, но проявляются слабее, чем при учете радиального затухания амплитуды траекторного сигнала (ср. рисунки 3.11, б и 3.11, в, а также рисунки 3.12, б и 3.12, в).

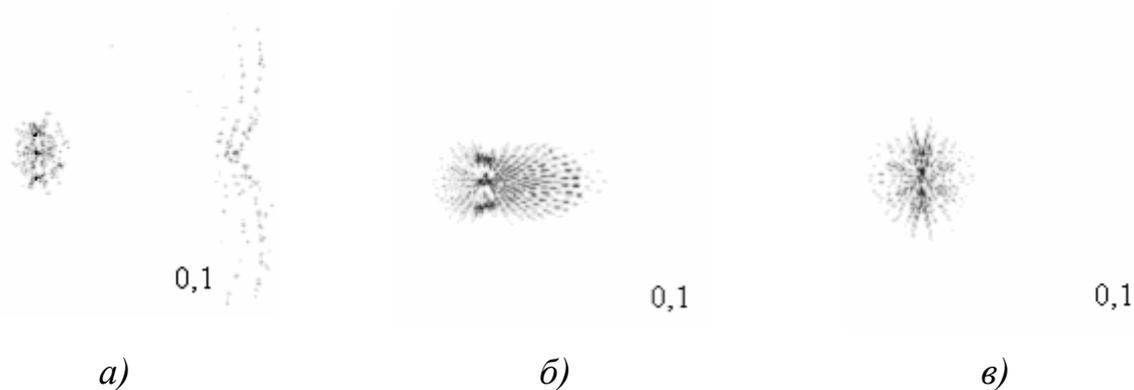


Рисунок 3.12 – Проекция передаточной функции трех точек с отсеченным пьедесталом по уровню $0,1U_{\max}$: а) при 256 отсчетах траекторного сигнала по кругу; б) при 512 отсчетах; в) при 512 отсчетах и без учета радиального затухания

Все полученные результаты следует рассматривать под углом зрения применения их в томографии. Из представленных результатов видно, что круговая

апертура дает хорошее и одинаковое разрешение по всей области внутри круга. Однако крайние точки объекта, приближенные к круговой траектории синтеза апертуры, при учете радиального затухания подвергаются скорее линейному апертурному синтезу, вследствие которого происходит деформация передаточных функций точек. Они теряют круговую симметрию и приобретают вид восьмерки, в кольцах которой ярче проявляются интерференционные явления.

Удивительным является то, что два разных метода реконструкции, предлагаемый и проекционный, дают одинаковые передаточные функции точки при условии, если не учитывать радиального затухания сигнала в соответствии с формулой локации. Очевидно, следует ожидать совпадения и спектральных функций. Вспомним, что Д.Менса при реконструкции регистрировал пространственный спектр на кольце. Нам, чтобы перейти от передаточной функции точки к пространственному спектру на кольце, надо взять двумерное преобразование Фурье от передаточной функции точки.

Возьмем точечный объект, расположенный в начале координат. Траекторный сигнал такого объекта представлен на рисунке 3.5, *а*. Передаточная функция точки, построенная методом взаимных корреляций с опорными траекторными сигналами, приведена на рисунке 3.7, *а*. Пространственный спектр передаточной функции точки, расположенной в начале координат, представлен на рисунке 3.13, *а*. На рисунке 3.13, *б* представлен этот же спектр в плане, т. е. вид кольцевого спектра сверху. На рисунке 3.13, *б* представлена фазочастотная

характеристика 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 $F(f_x, f_y)$; $B(f_x, f_y)$ – мнимая часть спектральной функции; k – номера отсчетов пространственной частоты f_x ; p – номера отсчетов пространственной частоты f_y .

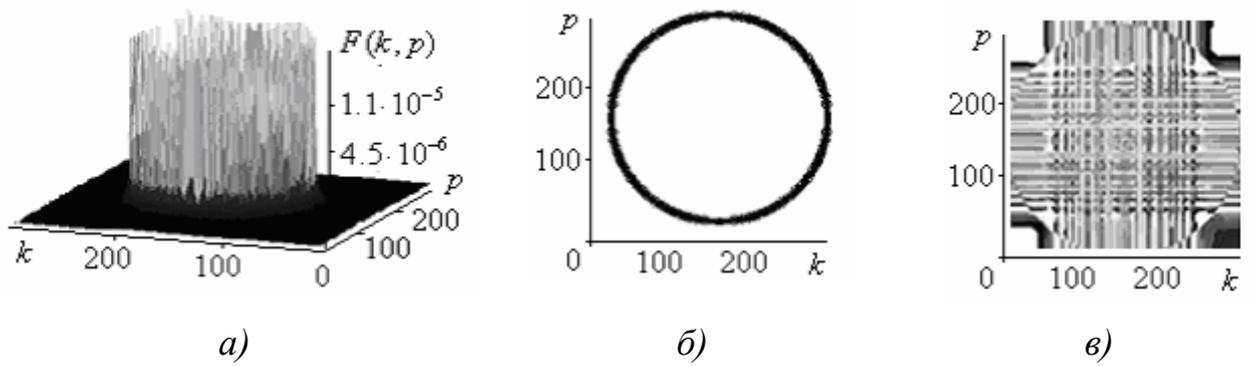


Рисунок 3.13 – Спектральные характеристики: *a)* амплитудный спектр передаточной функции точки, расположенной в начале координат; *б)* вид этого же спектра в плане; *в)* фазочастотный спектр передаточной функции

Рассмотрим, как изменятся спектральные характеристики передаточной функции точки при сдвиге точечного объекта в пространственной области на 14λ . Радиус синтезирования апертуры оставим прежним, т. е. $R_0 = 50,6\lambda$. Число отсчетов траекторного сигнала возьмем равным 512.

На рисунке 3.14 представлены спектральные характеристики передаточной функции точки, удаленной от центра синтезирования апертуры на расстояние равное 14λ .

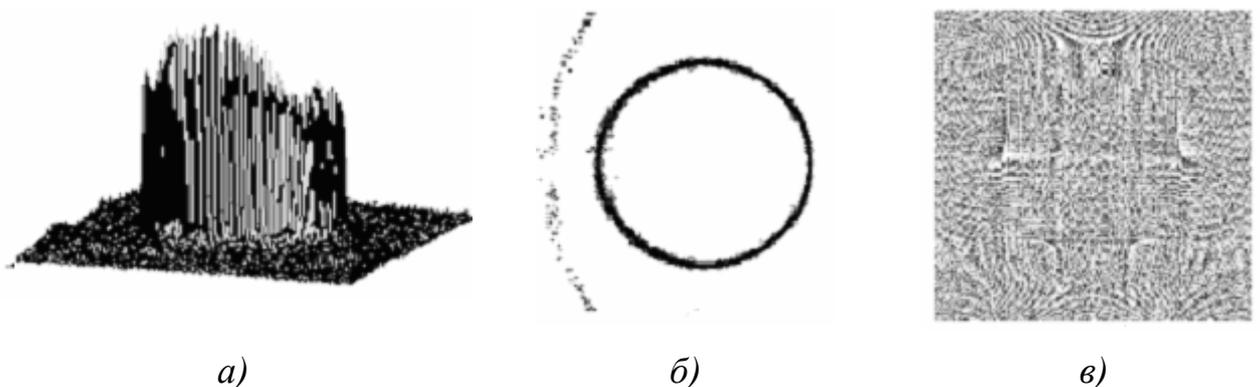


Рисунок 3.14 – Спектральные характеристики: *a)* амплитудный спектр передаточной функции точки, сдвинутой на 14λ относительно начала координат; *б)* вид этого же спектра в плане; *в)* фазочастотный спектр передаточной функции

Как видно из рисунков 3.14, *a* и *б*, амплитудный спектр практически не изменился. Однако фазовый спектр (рисунок 3.14, *в*) претерпел существенные

изменения. Этого и следовало ожидать в соответствии со спектральной теоремой о сдвиге [9].

Следует отметить, что небольшое отклонение от окружности при регистрации кольцевого спектра приводит к большим погрешностям реконструкции изображения. Возможно, этим объясняется то, что Д.Менса предпочел вращать реконструируемый объект, чтобы избежать погрешностей, которые неизбежно появляются при обходе объекта с отклонениями от круговой траектории.

На рисунке 3.15, *а* изображен реконструированный по траекторному сигналу трехточечный объект. Точки удалены от центра синтезирования апертуры на 14λ . Расстояние между точками равно $2,8\lambda$.

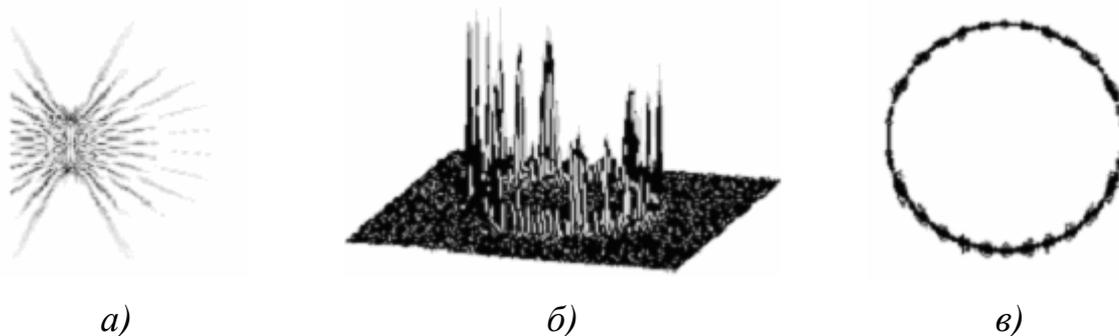


Рисунок 3.15 – Реконструированный трехточечный объект: *а*) изображение; *б*) кольцевой спектр трехточечного объекта; *в*) вид кольцевого спектра в плане

Как видно из рисунка 3.15, *б*, спектральная функция на кольце сильно изрезана. Эту изрезанность можно рассматривать как результат интерференции трех спектров от каждой точки. Интересно отметить, что интерференционные процессы ограничиваются кольцом и не выходят за его пределы. Следует отметить, что получить такие же спектры непосредственным расчетом рассеянного поля на кольцевой области – задача довольно сложная. Поэтому в работе [31] спектры не исследуются.

Выводы

1. Круговой апертурный синтез методом корреляционной обработки траекторного сигнала дает возможность получить спектр на кольце, который регистрировался в работе [31] при сборе данных в процессе реконструкции.

2. При учете радиального затухания круговой апертурный синтез приобретает свойства прямолинейного апертурного синтеза, ухудшается разрешение в радиальном направлении и ярче проявляется интерференция.

3. Круговой апертурный синтез дает хорошую и одинаковую фокусировку по всем областям внутри круговой апертуры, т. е. передаточная функция точки одинакова как в центре круга, так и по его краям.

4. При круговой апертуре быстро растет ширина спектра траекторного сигнала по мере удаления томографируемых точек от центра синтезирования апертуры. Это требует использовать большое количество отсчетов траекторного сигнала при томографировании крупных объектов.

3.4 Синтезирование апертуры для квадратной траектории

Материал раздела опубликован в [89]. На первый взгляд, в рассмотрении синтеза апертуры по квадратной траектории нет большой необходимости. Можно синтезировать апертуру, двигаясь по эллиптической траектории, или выбрать другую экзотичную линию. Однако нужно исходить из практической целесообразности.

Выбор траектории определяется конструкторскими требованиями, в которых в первую очередь исходят из простоты технической реализации и удобства выбранной конструкции для работы с объектом. Синтез апертуры по квадратной траектории интересен с общетеоретических позиций. Рассмотрение этого вопроса позволит не только усовершенствовать методику синтеза апертуры, но и выявить новые полезные особенности и свойства квадратной апертуры.

Следует отличать синтез апертуры по квадратной траектории от синтеза апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Отличие состоит в следующем. При синтезе апертуры по квадратной траектории регистрируется непрерывный траекторный сигнал при движении по всему замкнутому квадрату. Опорные траекторные сигналы также генерируются для точечных объектов при непрерывном движении по замкнутой квадратной траектории.

При синтезе апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях траекторные сигналы регистрируются по отдельности в двух ортогональных направлениях. Опорные сигналы генерируются также отдельно для каждого ортогонального направления. После взаимно корреляционной обработки зарегистрированных сигналов с опорными сигналами получают две взаимно ортогональные корреляционные матрицы, которые затем накладываются друг на друга при сохранении ортогональности. При этом предлагается не суммирование, а перемножение значений двух взаимно ортогональных матриц.

Рассмотрим синтез апертуры при движении по квадратной траектории [89]. Запишем траекторный сигнал, принимаемый локатором. Диаграмма локатора считается изотропной. Прибегнем к помощи функций, задаваемых кусоч-

ными областями изменения аргумента. Возьмем 1024 отсчета траекторного сигнала. Тогда амплитуду опорного сигнала, принимаемого локатором, движущимся по квадратной траектории можно записать в виде:

$$A = \frac{C}{R^2(2KV\Delta T)^b}, \text{ где } R = 2V\Delta T\sqrt{(I - I_1)^2 + K^2} \quad (3.16)$$

при $I_1 = 1, 2, \dots, 256$.

$$A = \frac{C}{R^2[2(256 - I)V\Delta T]^b}, \text{ где } R = 2V\Delta T\sqrt{(K - I_1 + 256)^2 + (256 - I)^2} \quad (3.17)$$

при $I_1 = 256, \dots, 512$.

$$A = \frac{C}{R^2[2(256 - K)V\Delta T]^b}, \text{ где } R = 2V\Delta T\sqrt{(768 - I - I_1)^2 + (256 - K)^2} \quad (3.18)$$

при $I_1 = 512, \dots, 768$.

$$A = \frac{C}{R^2(2IV\Delta T)^b}, \text{ где } R = 2V\Delta T\sqrt{(1024 - K - I_1)^2 + I^2} \quad (3.19)$$

при $I_1 = 768, \dots, 1024$.

Будем полагать, что опорные точки, задаваемые параметрами I и K , распределены равномерно по всему пространству, ограниченному квадратной траекторией с шагом $2V\Delta T$, где V – скорость перемещения локатора; ΔT – дискретный шаг по времени.

Объектный сигнал записывается так же, как и сигнал от опорной точки. Любую опорную точку можно взять в качестве объектной точки.

Теперь определим действительную и мнимую части комплексного траекторного сигнала с учетом набега фазы из-за распространения волны в пространстве от локатора до отражающей точки и обратно.

$$s_{re} = A \cos\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right), \quad s_{im} = A \sin\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right), \quad I=1, 2, \dots, 256; \quad K=1, 2, \dots, 256$$

Комплексный траекторный сигнал, отраженный от n -й точки объекта, представим суммой действительной и мнимой частей:

$$s_n = s_{re} + js_{im}. \quad (3.20)$$

В вышеприведенных формулах приняты следующие обозначения:

I, K – номера столбцов и строк элементов матрицы изображения, а также являются параметрами, определяющими координаты опорных точек; I_1 – номер отсчета траекторного сигнала; R – текущее расстояние от точки объекта до локатора; C – постоянная величина; V – скорость локатора по траектории; ΔT – шаг дискретизации по времени; s_{re} – действительная часть траекторного сигнала; s_{im} – мнимая часть траекторного сигнала; s_n – комплексный траекторный сигнал; λ – длина волны; b – показатель степени, выравнивающий сигналы с разных дальностей.

По вышеприведенным формулам можно рассчитать опорные траекторные сигналы для каждого элемента матрицы изображения. По таким же формулам рассчитываются сигналы от каждой точки многоточечного объекта. Полный сигнал от объекта согласно принципу суперпозиции находится как сумма сигналов от каждой точки объекта.

$$s_{ob} = \sum_{n=1}^N s_n, \quad (3.21)$$

где s_{ob} – полный сигнал, отраженный от всех точек объекта; n – порядковый номер отражающей точки объекта; N – общее число точек объекта; s_n – сигнал, отраженный от n -й точки объекта.

Взаимно корреляционную функцию объектного сигнала s_n и опорного сигнала $s_{op,I,K}$ запишем в общем виде, так как расшифровка функций s_n , $s_{op,I,K}$ в выражении для взаимно корреляционной функции займет много места и приведет к неудобному и громоздкому выражению:

$$B_{s_{ob},s_{op}}(\Delta x, \Delta y) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} s_{ob}(x, y) s_{op}(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy, \quad (3.22)$$

где $B_{s_{ob},s_{op}}(\Delta x, \Delta y)$ – взаимная корреляционная функция; Δx , Δy – координатный сдвиг опорной точки относительно объектной точки; x , y – координаты объектной точки; x_1 , x_2 , y_1 , y_2 – пространственная область, включающая границы объекта.

Свертку функций s_n , $s_{op,I,K}$ лучше делать в дискретном виде в спектральной области, сведя ее к набору одномерных корреляционных функций, используя алгоритмы быстрого преобразования Фурье.

$$B_k(i1) = \sum_{n=1}^{2N} \mathbf{S}(n) \mathbf{K}_k(n) \exp(j \frac{2\pi}{N} in), \quad (3.23)$$

$$\text{где } \mathbf{S}(n) = \sum_{i=1}^N s(i) \exp(-j \frac{2\pi}{N} in) \quad \text{при } n=1,2,\dots,N, \quad (3.24)$$

$$\mathbf{S}(n) = 0 \quad \text{при } n=N+1, N+2 \dots 2N;$$

$$\mathbf{K}_k(n) = \sum_{i=1}^N s_{op}(i) \exp(-j \frac{2\pi}{N} in) \quad \text{при } n=N+1, N+2 \dots 2N, \quad (3.25)$$

$$\mathbf{K}_k(n) = 0 \quad \text{при } n=1,2,\dots,N;$$

$$i1=1,2,\dots,2N, \quad i=1,2,\dots,2N.$$

В выражениях (3.23), (3.24), (3.25) приняты следующие обозначения:

$\mathbf{S}(n)$ – отсчеты спектра сканируемого сигнала; $\mathbf{K}_k(n)$ – отсчеты частотной характеристики дисперсионного фильтра, настроенного на дальность, заданную элементом (I,K) матрицы изображения, которая тождественна спектру опорного сигнала; $S_{op}(i)$ – отсчеты опорного сигнала, рассчитанные по формуле (3.16), (3.17), (3.18), (3.19) для заданного элемента (I,K) матрицы изображения; n – номера отсчетов частоты; i – номера отсчетов сигнала; $i1$ – номера отсчетов взаимно корреляционной функции.

Чтобы восстановить точки объекта, т. е. получить изображение объекта, нужно найти взаимно корреляционные функции объектного траекторного сигнала с каждым опорным траекторным сигналом и из центральных отсчетов взаимных корреляционных функций создать матрицу изображения, перекодировав амплитуды отсчетов в цветовые пиксели. По представленному выше алгоритму были получены изображения простейших моделей объектов.

Сопоставим полученные результаты с круговым синтезом апертуры, так как в обоих случаях синтез осуществляется по замкнутой траектории. Рассмотр-

рение начнем с траекторных сигналов и их спектров. На рисунке 3.16 представлен траекторный сигнал от одноточечного объекта и спектр этого сигнала.

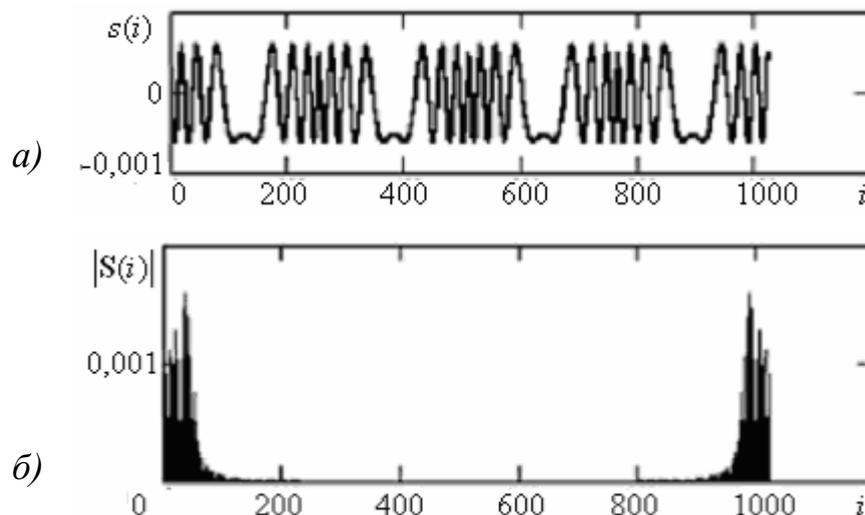


Рисунок 3.16 – Данные моделирования: *а)* траекторный сигнал для одноточечного объекта при движении по квадратной траектории; *б)* спектр сигнала

Условия моделирования были следующие: длина волны $\lambda=0,0136$ м, шаг по времени $\Delta T=0,0008$ с, относительная скорость движения $V=0,28$ м/с, шаг в радиальном направлении $\Delta a=2\Delta TV=2\times 0,0008\times 0,28=0,448$ мм, промах, т. е. удаление траектории от центра по перпендикуляру $a=128\Delta a=57,3$ мм.

На рис 3.17 представлена передаточная функция точки, расположенной в центре траекторного квадрата.

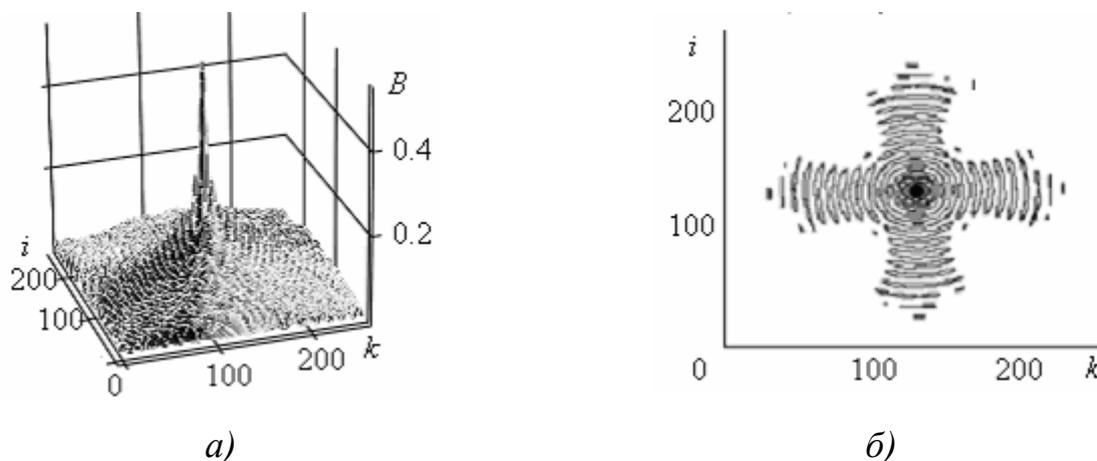


Рисунок 3.17 – Результаты реконструкции: *а)* передаточная функция точки, полученная из траекторного сигнала (рисунок 3.16, *а)*; *б)* ее вид в плане

Передаточная функция точки при синтезе апертуры по квадратной траектории похожа на передаточную функцию точки при круговом синтезе апертуры (рисунки 3.17; 3.8, *a*; 3.9). В обоих случаях присутствуют кольца Эйри.

На рисунке 3.18 представлены спектральные характеристики передаточной функции точки, изображенной на рисунке 3.17.

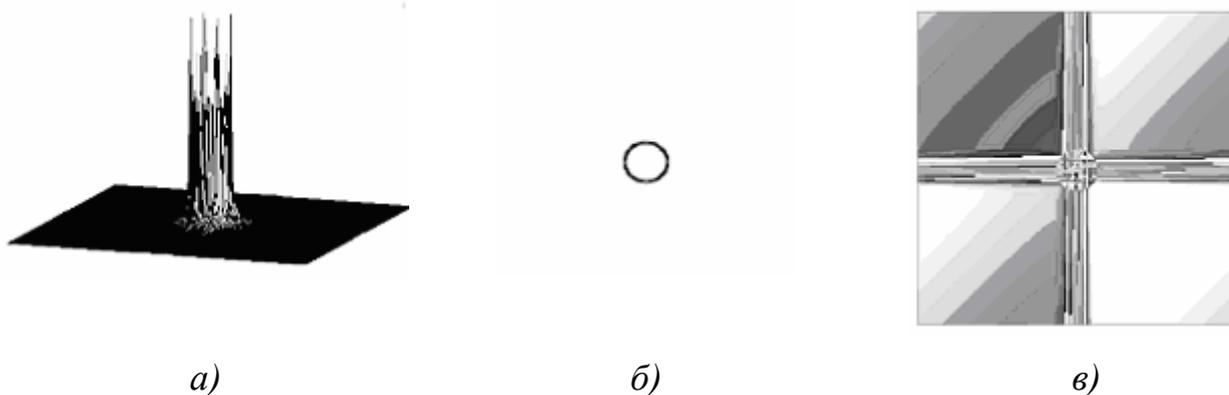


Рисунок 3.18 – Спектральные характеристики: *a*) спектр передаточной функции точки, изображенной на рисунке 3.17; *б*) вид спектральной функции в плане; *в*) фазовый спектр

Из рисунка 3.18 следует, что кольцевой спектр сохраняет свой вид и не зависит от траектории синтеза апертуры. Выясним, чему равен диаметр кольцевого спектра и соответствует ли он результату $4/\lambda$, как это показано в [31].

Из оптики известно, что пространственный спектр имеет размерность $1/\text{мм}$. Размер картинке с передаточной функцией точки (рисунк 3.17, *б*) равен стороне траекторного квадрата $l=114,6$ мм. Этот размер задавался при моделировании. Учитывая, что число отсчетов было равно 256, найдем длину шага, приходящегося на один отсчет $\Delta l = 114,6/256 = 0,447$ мм. Найдем размер поля пространственных частот на рисунке 3.18, *б*. $\Delta F = 1/\Delta l = 2,234$ $1/\text{мм}$. Найдем шаг, соответствующий одному отсчету пространственной частоты $\Delta f = \Delta F/256 = 0,0087$ $1/\text{мм}$. Из рисунка 3.18, *б* определим число отсчетов, приходящихся на диаметр кольцевого спектра. Все поле частот состоит из 256 отсчетов и составляет 57 мм, а диаметр круга состоит из x отсчетов и простирается на 8 мм. Отсюда $x = (256/57)8 = 35,9$ отсчетов. Диаметр кольца в единицах

пространственной частоты равен $x \cdot \Delta f = 35,9 \cdot 0,0087 = 0,312$ 1/мм. Такой же результат $4/\lambda = 4/13,6 = 0,29$ 1/мм вытекает из выводов работы Д.Менсы [31].

Рассмотрим изображение точки, удаленной от центра на $3,28\lambda$. Траекторный сигнал от удаленной точки представлен на рисунке 3.19, *а*.

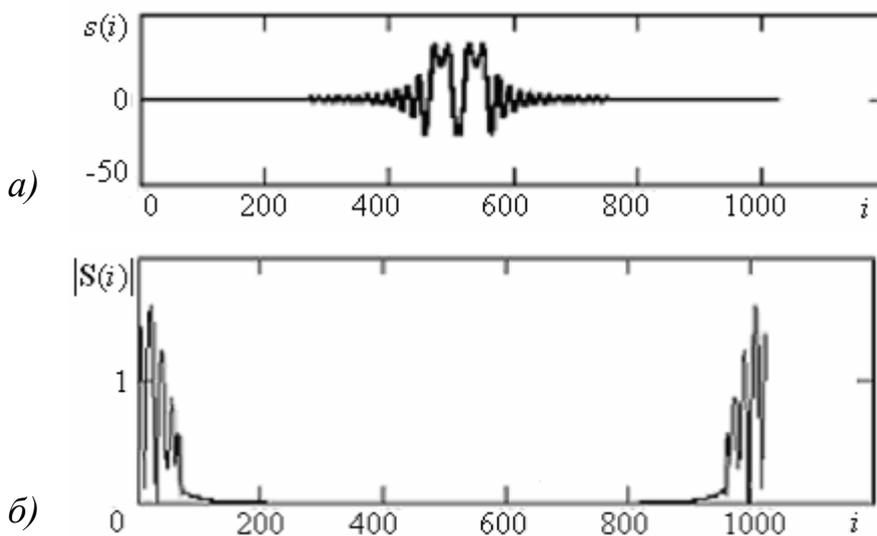


Рисунок 3.19 – Результаты моделирования: *а*) траекторный сигнал точечного объекта, смещенного от центра на $3,28\lambda$; *б*) спектр траекторного сигнала

На рисунке 3.19, *б* представлен спектр этого же сигнала. Из рисунка 3.19 видно, что смещение точки из центра не приводит к существенному изменению спектра (рисунки 3.19, *б* и 3.16, *б*). На рисунке 3.20, *а* представлена передаточная функция смещенной точки. На рисунке 3.20, *б* показан ее вид сверху.

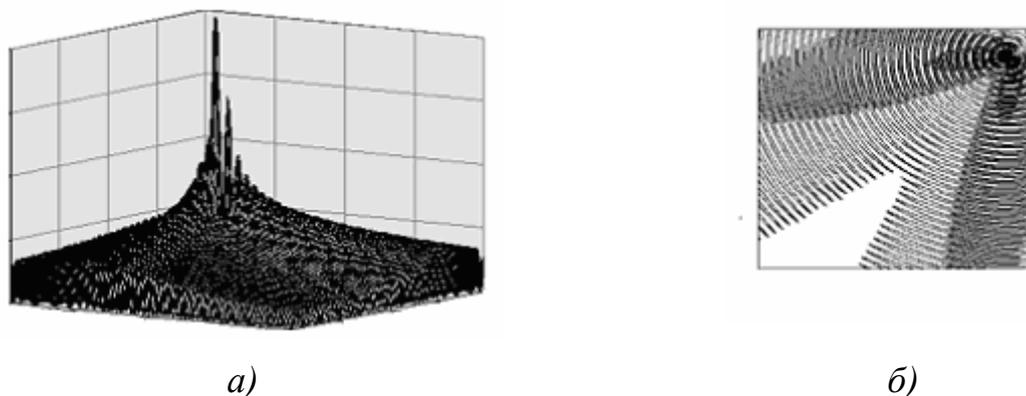


Рисунок 3.20 – Результаты реконструкции: *а*) передаточная функция смещенной точки; *б*) вид этой функции сверху

Как видно из рисунков 3.20 и 3.17, вид передаточной функции точки значительно изменился. Она теперь состоит из двух вытянутых передаточных функций, наложенных друг на друга. В данном случае получилась ситуация, близкая к синтезированию апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рисунки 3.20 и 2.30).

На синтезирование апертуры влияют два ближайших взаимно перпендикулярных участка траектории, а два других практически не влияют, так как значительно удалены от реконструируемой точки.

На рисунке 3.21 представлены спектральные характеристики смещенной передаточной функции точки, показанной на рисунке 3.20, *а* и *б*.

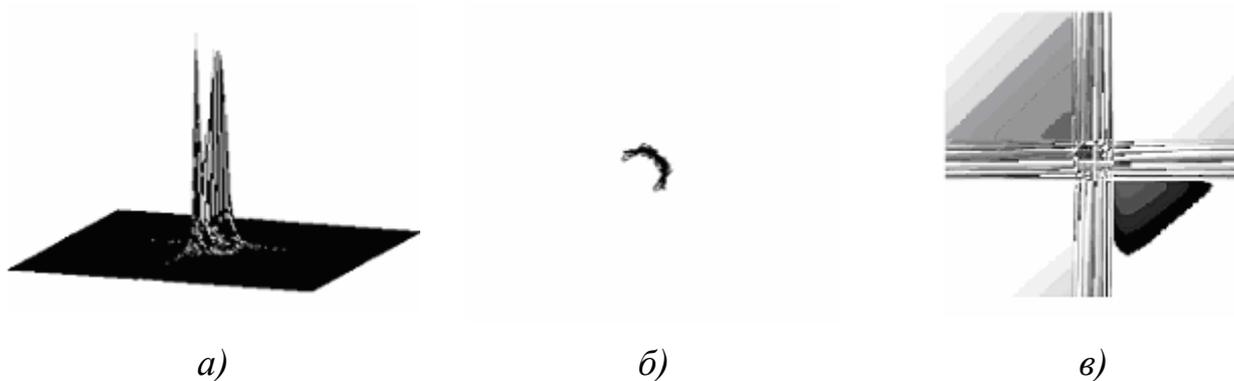


Рисунок 3.21 – Спектральные характеристики: *а*) кольцевой спектр передаточной функции точки (рисунок 3.20) при синтезировании апертуры по сторонам квадрата; *б*) вид кольцевого спектра в плане; *в*) фазовый спектр

Полукольцевой спектр (рисунок 3.21, *в*) говорит о том, что синтезирование апертуры получилось не по замкнутому периметру.

Сместим реконструируемую точку из центра не по диагонали, а в перпендикулярном направлении к одной из четырех траекторий (рисунок 3.22). Учтем локационное ослабление сигнала. В этом эксперименте следует ожидать приближение условий к прямолинейному апертурному синтезу. Синтез апертуры будет происходить в основном по одной, близко расположенной траектории. Остальные три участка траектории (три стороны квадрата) при учете радиального ослабления в соответствии с формулой локации не будут оказывать практически никакого влияния на синтез апертуры из-за удаленности.

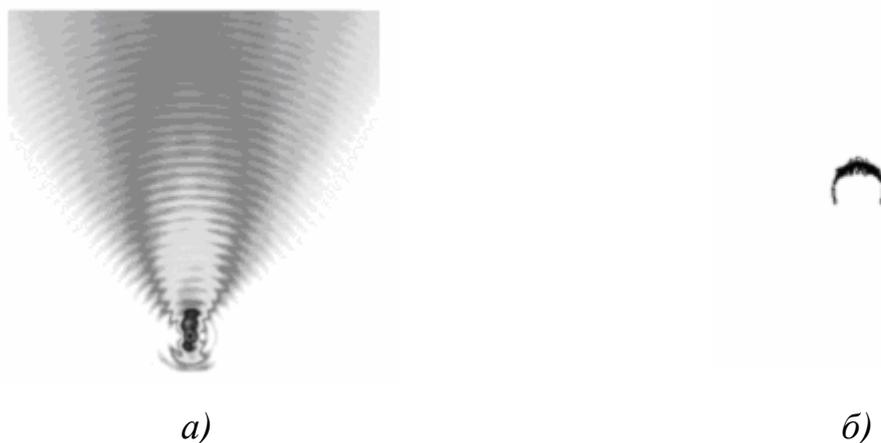


Рисунок 3.22 – Результаты реконструкции: *а)* вид сверху на передаточную функцию точки, которая приближена к одной из четырех траекторий, расположенных по квадрату; *б)* полукольцевая форма пространственного спектра свидетельствует о том, что имеет место прямолинейный апертурный синтез

Результаты синтеза апертуры, приведенные на рисунке 3.22, демонстрируют переход к синтезу апертуры по прямой линии при приближении реконструируемой точки к одной из четырех сторон траекторного квадрата. О том, что наступил прямолинейный синтез апертуры, свидетельствует передаточная функция точки в виде восьмерки и полукольцевой спектр (рисунок 3.22, *б*).

Рассмотрим результаты реконструкции трехточечного объекта. Для начала расположим три точки в центре траекторного квадрата.

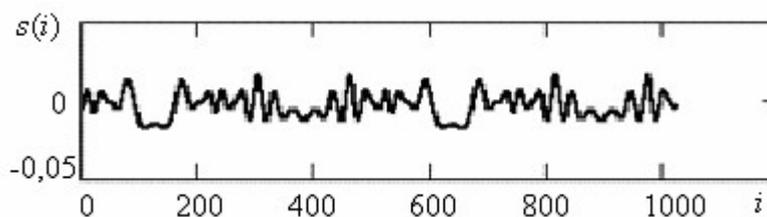


Рисунок 3.23 – Траекторный сигнал от трехточечного объекта

На рисунке 3.23 представлен траекторный сигнал от трех точек при обходе их локатором по квадратной траектории с постоянной скоростью.

Полученный сигнал носит флюктуирующий характер. Частота флюктуаций траекторного сигнала зависит от длины волны, расстояния между точками и общей длины модели объекта. В данном модельном эксперименте $\lambda = 13,6$ мм,

точки расставлены на расстоянии 13,4 мм друг от друга по прямой линии, параллельной траектории синтеза апертуры. Скорость перемещения локатора была выбрана равной $V=0,28$ м/с. Шаг по времени составлял $\Delta T=0,0008$ с.

Рассмотрим изображение трехточечного объекта. В дальнейшем вид передаточной функции точки или группы точек в плане будем называть изображением объекта. На нижеследующих изображениях также применялась перекодировка амплитуды передаточной функции в цветовые пиксели.

На рисунке 3.24, *а* представлена передаточная функция трехточечного объекта, а на рисунке 3.24, *б*, – его изображение. На нём каждая из трех точек окружена кольцами Эйри и, кроме того, имеет место интерференция на уровне «пьедестала». Следует отметить, что при прямолинейном синтезировании апертуры кольца Эйри почти не проявляются (рисунки 3.24, *б* и 2.7). Если отсечь пьедестал по уровню $0,6U_{\max}$, то останутся три узнаваемые точки. По их размеру можно судить о разрешающей способности рассматриваемого метода реконструкции.

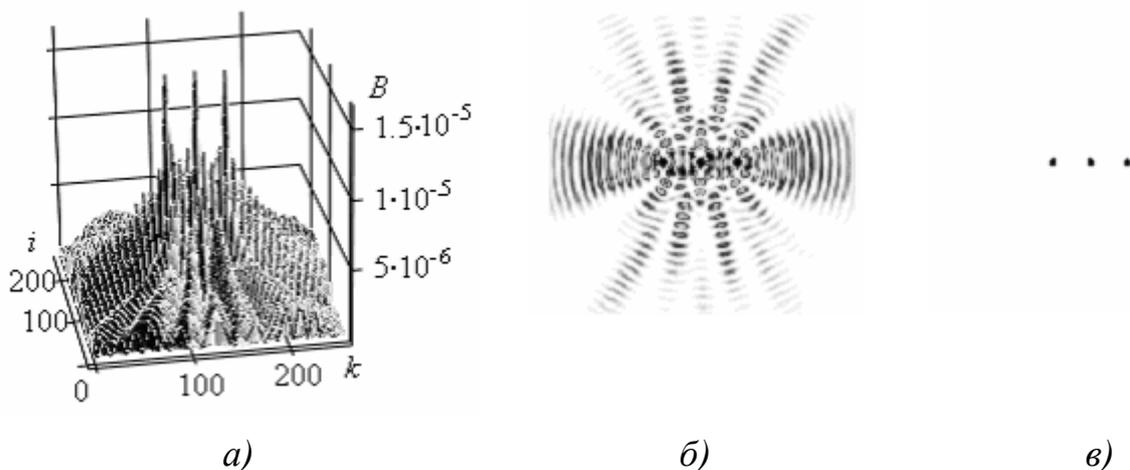


Рисунок 3.24 – Результаты реконструкции: *а*) передаточная функция трехточечного объекта; *б*) изображение трехточечного объекта; *в*) изображение трехточечного объекта со срезанным «пьедесталом»

На рисунке 3.25 приведены спектральные характеристики передаточной функции трехточечного объекта.

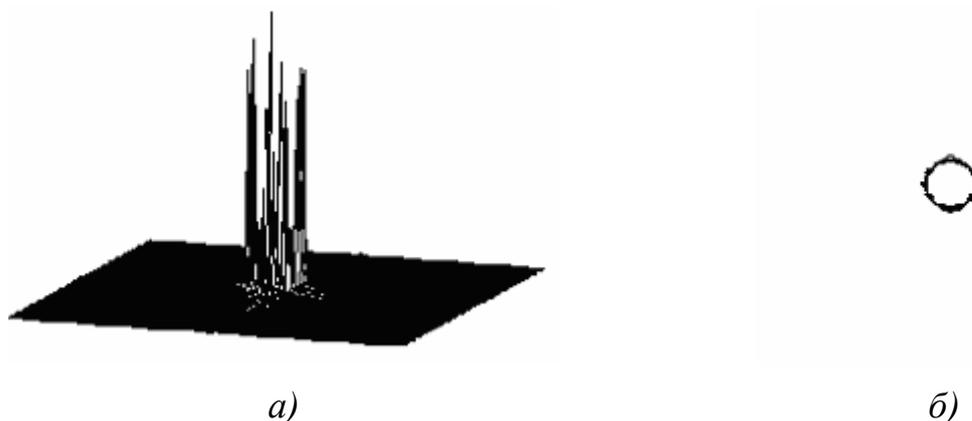


Рисунок 3.25 – Спектральные характеристики: *a)* кольцевой спектр передаточной функции трехточечного объекта; *б)* вид кольцевого спектра сверху

Как видно из рисунков 3.25, *a* и 3.24, *б*, три точки привели к интерференции не только в пространственной области (рисунок 3.24, *б*), но и вызвали интерференцию в спектральной области. Это проявилось в изрезанности кольцевого спектра. При этом интерференционные процессы не покидают пределы кольца. Диаметр кольца (рисунок 3.25, *б*) остается по-прежнему равным $4/\lambda$. В этом можно убедиться, сопоставляя диаметр спектрального кольца с размерами спектральной области, как это было сделано ранее.

Уменьшим длину волны в пять раз, сохранив прежними остальные условия эксперимента. На рисунке 3.26, *a* представлено изображение трехточечного объекта. Здесь же приведено изображение трех точек со срезанным «пьедесталом».

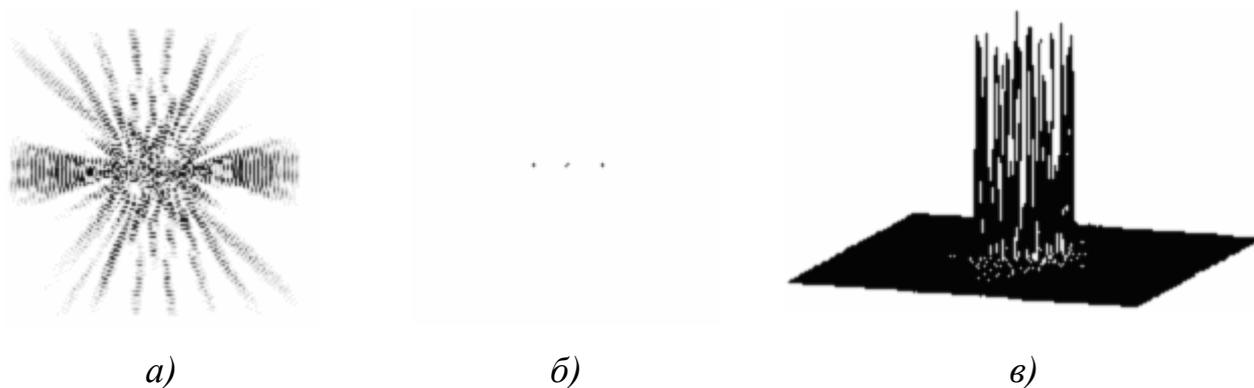


Рисунок 3.26 – Результаты реконструкции: *a)* изображение трех точек; *б)* изображение при отсеченном пьедестале; *в)* спектр передаточной функции

Уменьшение длины волны привело к увеличению числа интерференционных лепестков, и к тому же они стали тоньше (рисунок 3.26, *а*). При этом в пять раз увеличилась разрешающая способность (рисунок 3.26, *б*). Точки стали в пять раз меньше. Увеличение диаметра кольцевого спектра в 5 раз (рисунок 3.26, *в*) также свидетельствует об уменьшении длины волны.

Выводы

1. У синтеза апертуры по квадратной траектории много общего с круговым апертурным синтезом.
2. Синтез апертуры по квадратной траектории, так же как и любой апертурный синтез по замкнутой траектории, сопровождается кольцами Эйри на передаточных функциях точек.
3. Передаточная функция точки, расположенная в центре квадрата, обладает симметрией, однако при ее удалении от центра симметрия нарушается, особенно при учете радиолокационного затухания сигнала.
4. При приближении реконструируемой точки к середине стороны траекторного квадрата передаточная функция точки приобретает вид восьмерки, которая характерна для прямолинейного синтеза апертуры.
5. Если реконструируемая точка приближается к углу траекторного квадрата, то ее передаточная функция приобретает черты передаточной функции точки, получаемой при синтезировании апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях.
6. При смещении точки из центра проекция кольцевого спектра принимает форму полукольца.
7. В случае реконструкции изображения многоточечных объектов помимо колец Эйри проявляются интерференционные явления.
8. В случае протяженных объектов интерференция проявляется также в спектральной области. Появляется характерная изрезанность спектральной функции на кольце.

3.5 Сопоставление алгоритма реконструкции на основе взаимных корреляционных функций с алгоритмами реконструкции изображения по проекциям

Совпадение передаточных функций и кольцевых спектров, полученных проекционным методом [31], с результатами реконструкции точечных объектов, полученных путем взаимной корреляции зарегистрированного сигнала и опорных траекторных сигналов, ставит новые вопросы. Один из таких вопросов можно сформулировать следующим образом. Не является ли метод взаимных корреляций следствием метода Д. Менсы, т. е. следствием способа реконструкции изображения методом обращения по Фурье. Но так как этот метод вытекает из проекционной теоремы (1.8), а последняя устанавливает фундаментальное соотношение между преобразованием Радона и двумерным преобразованием Фурье [72], то встает вопрос: не вытекает ли метод взаимных корреляций из обратного преобразования Радона или из теоремы о центральном сечении. Сразу виден математический путь, дающий возможность получить ответ на этот вопрос. Если идти этим путем, то необходимо сравнить формулы реконструкции или математические операторы двух методов. Самый убедительный путь – это взять обратное преобразование Радона и с помощью формальных математических преобразований получить из него формулы реконструкции для метода взаимных корреляций. Другой путь – получение метода взаимных корреляций из проекционной теоремы.

Сначала выясним, можно ли считать траекторный сигнал проекцией, т. е. прямым преобразованием Радона. По определению [22] преобразованием Радона функции $f(\vec{x})$, $\vec{x} \in R^n$ называется следующий интеграл

$$[Rf](\vec{\theta}, s) = \int_{\theta^\perp} f(s\vec{\theta} + \vec{y}) d\vec{y}, \quad \vec{y} \in \theta^\perp, \quad (3.26)$$

в котором $\vec{\theta}$ - единичный вектор в n -мерном пространстве R^n , исходящий из начала координат. Множество концов таких векторов описывают единичную сферу S^{n-1} в R^n пространстве. Через θ^\perp обозначена гиперплоскость,

ортогональная направляющему вектору $\vec{\theta}$ и находящаяся на расстоянии s от начала координат.

На рисунке 3.27, *а* приведена поясняющая геометрия к интегралу (3.26) для трехмерного случая, а на рисунке 3.27, *б* рассматривается двумерный случай.

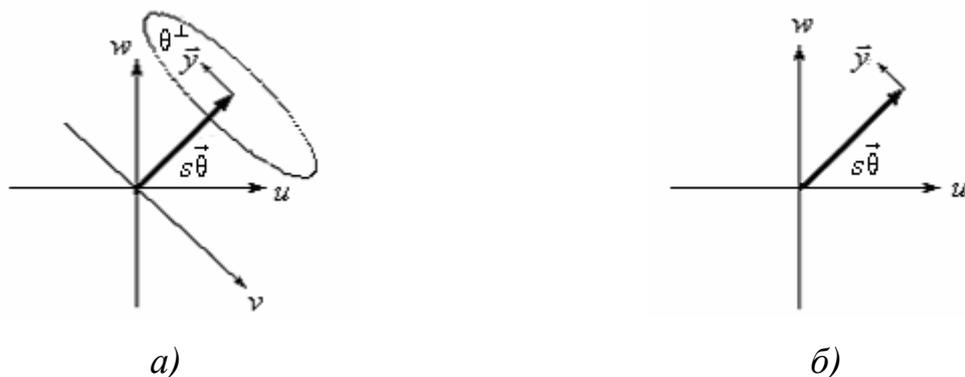


Рисунок 3.27 – Поясняющая геометрия: *а*) для трехмерного прямого преобразование Радона; *б*) для прямого двумерного преобразования Радона

Преобразование Радона есть проинтегрированное значение функции $f(u,v,w)$ по плоскости θ^\perp спроектированное на вектор $s\vec{\theta}$ (рисунок 3.27, *а*), или проинтегрированное значение функции $f(u,w)$ по лучу \vec{y} и спроектированное на вектор $s\vec{\theta}$ (рисунок 3.27, *б*). Сравним поясняющую геометрию рисунка 3.27, *б* с поясняющей геометрией апертурного синтеза (рисунок 3.28). Будем рассматривать картину в плоскости сечения объекта, т. е. двумерный случай при апертурном синтезе по круговой траектории.

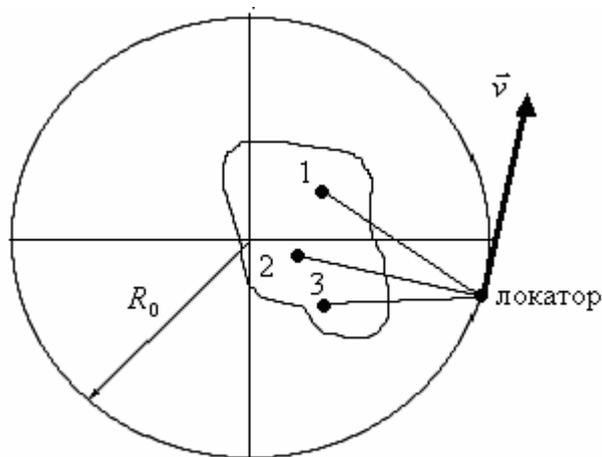


Рисунок 3.28 – Поясняющая геометрия синтезирования круговой апертуры

При апертурном синтезе с изотропной диаграммой направленности в локаторе собирается веер лучей. Конус веера охватывает весь объект. Веер сходящихся лучей не вписывается в определение проекции Радона (3.26). В литературе известен сверточный алгоритм для веерного пучка расходящихся лучей [3]. Излучение источника естественным образом распадается на веерный пучок лучей при регистрации излучения линейкой точечных детекторов.

К сожалению, алгоритм для веерного пучка сходящихся лучей не рассмотрен. Это связано с тем, что рентгеновское излучение практически не рассеивается, поэтому не возникает задача регистрации сходящегося пучка рассеянного излучения. В связи с этим бессмысленно обращаться к веерному преобразованию Радона.

Попробуем детально изучить применение томографических проекций в методе Д.Менсы [31], для того чтобы найти пути, связывающие метод реконструкции с помощью взаимной корреляции с проекционной теоремой.

Начнем рассмотрение с замечания о том, что не имеет существенного значения при синтезе апертуры: вращать ли объект вокруг собственной оси или обходить его по кругу. На рисунке 3.29 показаны два момента времени t_1 и t_2 сбора информации по методу [31]. Точки, находящиеся на линии 1–1 будут в момент t_2 иметь нулевую поперечную скорость относительно локатора. Точки, находящиеся на линии 2–2, будут иметь одинаковую, ненулевую, поперечную скорость относительно локатора $V_{от} = const$ и, следовательно, одинаковый доплеровский сдвиг частоты.



Рисунок 3.29 – Линии одинаковых поперечных скоростей при перемещении локатора по кругу. Прямая 1–1 – линия нулевых скоростей

Плотности отражения всех точек с одинаковым доплеровским сдвигом Д.Менса проецирует на ось v . Таким образом, формируется проекция в соответствии с определением Радона, т. е. берется интеграл по каждому лучу.

$$p(v, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{\theta}(u, v) du, \quad (3.27)$$

где $g_{\theta}(u, v)$ – плотность отражения в точке при фиксированном положении проекционного луча θ , $p(v, \theta)$ – проекция плотности отражения на ось v .

На этапе формирования проекции при взятии интеграла (3.27) по лучу ab (рисунок 3.29) фазовый множитель в виде экспоненты с угловым показателем степени не учитывается. Далее Д.Менса берет интеграл (3.28) при фиксированной по углу θ проекции, т. е. по линии $b0$ (рисунок 3.29), и при этом уже учитывает фазовый множитель. Возможно, Д.Менса полагает, что этим множителем он учел, в том числе, фазовый путь от отражающих точек до оси v вдоль проекционного луча ab .

$$G(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} p(v, \theta) \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} v) dv = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\theta}(u, v) \exp(-j \frac{4\pi v}{\lambda}) dudv, \quad (3.28)$$

где $G(\theta)$ – сигнал, принимаемый локатором.

У Д.Менсы нет обоснования того, что фазовый путь можно выбирать не по гипотенузе $a0$ (рисунок 3.29), а по катетам, и это не повлияет на конечный результат. Д.Менса правильно поступает только при условии дальней зоны, когда один катет ab , считающийся проекционным лучом, гораздо меньше катета $b0$, который считается проекцией. Тогда путь, проходимый волной от отражающей точки до локатора по гипотенузе и по наибольшему катету, будет одинаков. Следует помнить, что проекционный луч и проекция взаимно перпендикулярны. Таким образом, метод Д.Менсы не работает в ближней зоне.

Далее Д.Менса переходит к декартовой системе координат с осями X, Y :

$$G(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-j(\frac{4\pi}{\lambda})(y \cos \theta - x \sin \theta)] dx dy. \quad (3.29)$$

Формулы для перехода от системы координат U, V к системе X, Y приведены ниже:

$$v = y \cos \theta - x \sin \theta, \quad (3.30)$$

$$u = y \cos \theta + x \sin \theta. \quad (3.30')$$

В выражении (3.29) Д.Менса вводит обозначения:

$$f_x = \frac{2}{\lambda} \sin \theta, \quad (3.31)$$

$$f_y = -\frac{2}{\lambda} \cos \theta \quad (3.31')$$

и тогда формула (3.29) принимает вид двумерного преобразования Фурье:

$$G(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy. \quad (3.32)$$

Таким образом, Д.Менса показал, что рассеиваемое объектом поле представляет собой ни что иное, как пространственный спектр. В связи с этим возникает вопрос: как регистрировать пространственную функцию, т. е. не спектр, а траекторный сигнал. Вопрос решается очень просто. Если мы будем регистрировать значения амплитуды принимаемого сигнала в рассеиваемом пространстве вокруг объекта, привязывая зарегистрированные значения к декартовой сетке, то мы получим пространственную функцию, но никак не спектр. Однако если мы будем осуществлять регистрацию амплитуды и фазы волны на кольце любого радиуса, отвечающего требованию дальней зоны, а потом отнесем собранные данные к спектральной области, т. е. к кольцу радиусом $2/\lambda$, то получим спектр пространственных частот на кольце $2/\lambda$.

Процесс восстановления плотности отражения, т. е. функции $g(x, y)$, сводится к обратному преобразованию Фурье от выражения (3.32):

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(f_x, f_y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y. \quad (3.33)$$

Таким образом, введя требование дальней зоны, Д.Менсе удалось привлечь аппарат проекций для решения задачи реконструкции изображения с по-

мощью синтезированной апертуры. Если привлекать метод проекций для решения задачи реконструкции в пространственной области, т. е. к методу взаимных корреляций, то задачу придется ставить следующим образом.

Пусть локатор с изотропной диаграммой движется по круговой или прямой траектории. Диаграмма локатора в любой точке траектории охватывает весь объект. Все центры отражения объекта испускают проекционные лучи, которые собираются локатором в точке приема (рисунок 3.28). Поставленная таким образом задача не требует дальнейшей зоны. Решение такой задачи одинаково подходит и для зоны Френеля, и для зоны Фраунгофера. Однако такая постановка задачи противоречит определению проекции Радона.

Предлагается для начала сопоставить алгоритмы реконструкции изображения и последовательности математических операторов метода Д.Менсы и метода взаимных корреляций. Такое формальное сопоставление позволит убедиться в том, что метод взаимных корреляций невозможно вывести из метода Д.Менсы. Запишем алгоритмы реконструкции в форме математических операторов. Рассмотрим сначала алгоритм Д.Менсы:

$$p(v, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{\theta}(u, v) du = Rg_{\theta} = [Rg_{\theta}](u, v). \quad (3.34)$$

Интеграл по лучу (3.34) в заданном направлении θ это есть ни что иное, как проекция, т. е. преобразование Радона от функции g_{θ} .

Вторая операция, производимая Д.Менсой, это взятие интеграла от проекции $p(v, \theta)$ по линии проекции вдоль координаты v . Обозначим этот оператор через $J(Rg_{\theta})$. Следует при этом помнить, что θ – угол поворота координатного базиса (u, v) , задающий направление интегрирования.

$$G(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} p(v, \theta) \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} v) dv = \int_{-\infty}^{\infty} Rg_{\theta} dv = J(Rg_{\theta}) \quad (3.35)$$

Далее Д.Менса вводит обозначения (3.31) и (3.31'), которые позволяют перейти от спектра функции $g_{\theta}(u, v)$ в полярных координатах (3.35) к декартовым координатам, т. е.

$$G(\theta) \Rightarrow G(f_x, f_y).$$

Заключительной операцией в реконструкции изображения по методу Д.Менсы [31], позволяющей восстановить реконструируемую функцию, является операция обратного преобразования Фурье от функции $G(f_x, f_y)$. Таким образом, все перечисленные операторы можно записать в виде цепочки:

$$g_\theta(u, v) = F_2^{-1}G(f_x, f_y) = F_2^{-1}J(Rg_\theta). \quad (3.36)$$

Запишем формулу реконструкции изображения при круговом синтезе апертуры с помощью метода взаимных корреляций с использованием математических операторов:

$$\begin{aligned} B(\delta', \theta') &= \int_{\delta} \int_{\theta} \sum_{i=1}^N p(\delta_i, \theta_i) p_{op}(\delta - \delta', \theta - \theta') d\delta d\theta = \int_{\delta} \int_{\theta} \sum_{i=1}^N g_i \exp[\psi(\delta, \theta)] d\delta d\theta = \\ &= \left[\sum_{i=1}^N p(\delta_i, \theta_i) \right] p_{op}(\delta - \delta', \theta - \theta') = F^{-1} \left\{ F \left[\sum_{i=1}^N p(\delta_i, \theta_i) \right] \times F [p_{op}(\delta - \delta', \theta - \theta')] \right\}, \end{aligned} \quad (3.37)$$

где

$$\psi(\delta, \theta) = -j \frac{4\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{R_0^2 + \delta_i^2 - 2R_0\delta_i \cos\theta_i} - \sqrt{R_0^2 + (\delta - \delta')^2 - 2R_0(\delta - \delta') \cos(\theta - \theta')} \right\}.$$

Сопоставим цепочки операторов для метода Д.Менсы и метода взаимных корреляций. А так как они дают похожие результаты реконструкции, мы их формально приравняем. При этом не будем принимать во внимание то, что траекторные сигналы противоречат радоновскому определению проекции. Прогнозируем требование дальней зоны в методе [31].

Проинтегрируем пучок сходящихся проекций, т. е. сумму в выражении (3.37) заменим двойным интегралом, и тогда метод взаимной корреляции можно представить цепью операторов:

$$\begin{aligned} B(\delta', \theta') &= \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} p(\delta, \theta) d\delta d\theta \right] \times p_{op}(\delta - \delta', \theta - \theta') = [JJ(R)] \times (R_{op}) = \\ &= F^{-1} \left\{ F \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} p(\delta, \theta) d\delta d\theta \right] \times F [p_{op}(\delta - \delta', \theta - \theta')] \right\} = F^{-1} \left\{ F [JJ(R)] \times F [R_{op}] \right\}. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Осталось решить вопрос, можно ли ставить знак тождества между этими двумя цепочками математических операторов, основываясь на сходстве конечных результатов, т. е. на сходстве передаточных функций точки и сходстве кольцевых спектров. С точки зрения математики тождество ставится в том случае, если одна цепочка операторов получается из другой путем строгих математических преобразований. Поэтому между цепочками операторов не поставлен знак равенства:

$$[JJ(R)] \times (R_{op}) \neq F_2^{-1} J(Rg_\theta), \quad (3.39)$$

$$F^{-1} \{F[JJ(R)] \times F[R_{op}]\} \neq F_2^{-1} J(Rg_\theta). \quad (3.40)$$

Если все же поставить знак равенства между этими двумя цепочками математических операторов и принять во внимание, что правая часть в (2.90) и (2.91) получена из проекционной теоремы о центральном сечении, то можно считать, что предложенная цепочка математических операторов подобно обратному преобразованию Радона решает задачу реконструкции изображения объекта по траекторным сигналам.

Сравним цепочку операторов метода обращения по Фурье с цепью операторов метода взаимных корреляций.

$f = F_2^{-1} F_Y R f$ – цепь операторов метода реконструкции путем обращения по Фурье (1.18).

$B(\delta', \theta') = [JJ(R)] \times (R_{op}) = F^{-1} \{F[JJ(R)] \times F[R_{op}]\}$ – цепь операторов метода реконструкции путем взаимных корреляций.

Приведенные цепочки операторов также формально не совпадают, т. е. одну цепочку операторов нельзя вывести из другой с помощью строгих математических преобразований.

Сопоставим цепочки операторов реконструкции по проекциям с помощью обратного преобразования Радона и цепь операторов метода реконструкции путем взаимных корреляций с опорными функциями. Здесь же приводятся формулы преобразования Радона:

$$[R^{-1}p](r, \phi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-E}^E \frac{1}{r \cos(\theta - \phi) - l} p_1(l, \theta) dl d\theta \quad - \text{ обратное преобразо-}$$

вание Радона;

$$[R_i f](l_i, \theta_i) = p_i(l_i, \theta_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sqrt{l_i^2 + z^2}, \theta_i + \arctg(z/l_i)) dz \quad - \text{ прямое преобра-}$$

зование Радона;

$$[Bt](r, \phi) = \int_0^\pi t(r \cos(\theta - \phi), \theta) d\theta \quad - \text{ обратное проецирование.}$$

Т.к.
$$t(r \cos(\theta - \phi), \theta) = [H_Y D_Y p] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_1}{r \cos(\theta - \phi) - l} dl,$$

то с учётом обратного проецирования можно записать:

$$|BH_Y D_Y p|(r, \phi) = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p_1(l, \theta)}{r \cos(\theta - \phi) - l} dl d\theta.$$

$$R^{-1} = -\frac{1}{2\pi} BH_Y D_Y \quad - \text{ цепь операторов обратного преобразования Радона;}$$

$B(\delta', \theta') = [JJ(R)] \times (R_{op}) = F^{-1} \{F[JJ(R)] \times F[R_{op}]\}$ – цепь операторов метода реконструкции путем взаимных корреляций.

Цепь операторов Радона также не совпадает с цепью операторов реконструкции путем взаимных корреляций с опорными функциями.

Сопоставим цепь операторов метода реконструкции путем свертки и обратного проецирования [73, 27] с предлагаемой цепочкой операторов.

Сверточный алгоритм реконструкции получается из обратного преобразования Радона путем замены преобразования Гильберта сверткой функций.

$$H\phi(v) = \phi(u) \times \rho(u) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\phi(u)}{v - u} du, \quad (3.41)$$

где $\rho(u) = -(1/\pi u)$, $\phi(u) = [D_Y p](u, \theta) = [D_Y Rf](u, \theta)$.

Вычисление интеграла Гильберта (3.41) – непростая задача. Для упрощения вычислений используется метод регуляризации, который предполагает за-

мену функции $\rho(u)$ какой-либо другой функцией из множества функций $\{\rho_A, A > 0\}$. Функцию $\rho_A(u)$ подбирают такой, чтобы выполнялось равенство вида $\lim_{A \rightarrow \infty} \phi \times \rho_A = H\phi$. Эту операцию часто называют аппроксимацией функции ρ другой функцией ρ_A . Как правило, эту операцию производят в частотной области, умножая спектр функции ρ на функцию окна W .

$$\rho_A = F^{-1}[\hat{\rho} \cdot W], \text{ где } \hat{\rho} - \text{Фурье образ функции } \rho.$$

Сверточный алгоритм можно также получить из теоремы о центральном сечении (1.34) – (1.41).

Таким образом, учитывая (3.41), обратное преобразование Радона можно преобразовать в сверточный алгоритм следующим образом:

$$R^{-1} = -\frac{1}{2\pi} B H_y D_y = -\frac{1}{2\pi} B [\lim_{A \rightarrow \infty} \phi \times \rho_A] D_y = -\frac{1}{2\pi} B [\phi \times \{F^{-1}[\hat{\rho} \cdot W]\}] D_y \quad (3.42)$$

Сопоставляя цепи операторов в выражении (3.42) с цепочкой операторов для метода реконструкции изображения по взаимным корреляционным функциям $B(\delta', \theta') = [JJ(R)] \times (R_{op}) \neq F^{-1}\{F[JJ(R)] \times F[R_{op}]\}$, можно видеть, что сравниваемые методы реконструкции изображения объектов отличаются.

Выводы

1. Формально цепочки операторов ни для одного из известных методов реконструкции не совпадают с цепью математических операторов для метода взаимных корреляций.

2. Траекторный сигнал не соответствует определению проекции, т. е. нельзя назвать траекторный сигнал прямым преобразованием Радона. На самом деле это веер сходящихся проекционных лучей, каждый из которых представляет собой прямое преобразование Радона.

3. Учитывая хорошее совпадение передаточных функций точки и пространственных спектров для метода реконструкции путем взаимных корреляций с опорными траекторными сигналами и для метода томографии путем об-

ращения по Фурье, можно считать развертку центральных отсчетов корреляционных функций оценкой восстанавливаемой функции.

4. Методом взаимных корреляций можно синтезировать апертуру по любой замкнутой траектории, например круговой или квадратной с разверткой изображения в декартовых координатах.

5. При удалении реконструируемой точки от центра синтеза апертуры резко возрастает ширина спектра траекторного сигнала.

6. Передаточные функции точки, полученные с помощью предложенного алгоритма реконструкции похожи на известные передаточные функции, полученные по кольцевому спектру в [31].

7. Вид и параметры передаточных функций точек не зависят ни от их положения внутри круговой апертуры, ни от их удаленности от центра синтеза апертуры, ни от ширины спектра траекторного сигнала.

8. Круговая апертура одинаково хорошо фокусируется на все области внутри траекторного круга, т. е. обладает одинаковым разрешением, равным $\lambda/5$.

9. При учете радиального ослабления в соответствии с формулой локации круговой апертурный синтез принимает черты линейного апертурного синтеза, т. е. передаточная функция точки, имеющая круговую симметрию, превращается в функцию с лепестками в виде восьмерки.

10. Появление кругов на изображениях объектов связано с неверным выбором частоты дискретных отсчетов опорного траекторного сигнала, т. е. в несоответствии с теоремой Котельникова.

11. При круговом синтезе апертуры по сигналу от протяженных объектов имеет место проявление интерференции на изображениях объектов.

12. Смещение реконструируемой точки относительно центра синтеза апертуры отражается только на фазовом спектре.

13. Интерференция проявляется на кольцевом спектре в виде изрезанности огибающей спектральной функции.

14. На изображении одноточечного объекта помимо образовавшегося креста из-за квадратной траектории проявляются кольца Эйри.

15. Если учитывать радиальное затухание, то при смещении реконструируемой точки из центра в угол квадратной траектории, кольцевой спектр превращается в полукольцевой. При этом фазовый спектр отображает диагональное смещение объекта.

16. Если учитывать радиальное затухание при смещении реконструируемой точки из центра к середине стороны траекторного квадрата, синтез апертуры по квадратной траектории приобретает черты прямолинейного апертурного синтеза.

17. При синтезировании апертуры по квадратной траектории из-за протяженности объектов появляется интерференция, как на передаточных функциях объектов, так и на кольцевом спектре этих функций.

18. Сопоставление формул реконструкции, математических операторов и алгоритмов реконструкции предлагаемого метода с известными методами реконструкции не позволили считать, что предлагаемый метод вытекает из проекционных методов реконструкции.

19. Представленный метод реконструкции, основанный на взаимной корреляции траекторных сигналов, успешно работает в зоне Френеля, что является его преимуществом по сравнению с проекционными методами реконструкции.

20. Апертурный синтез в зоне Френеля не отвечает требованиям Радона к проекционному лучу. Из-за этого ограничения метод Д.Менсы в зоне Френеля не работоспособен.

4 МОДЕЛЬНОЕ ТОМОГРАФИРОВАНИЕ ГОМОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ВКЛЮЧЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

4.1 Существо вопроса и постановка задачи

В разделе 4 результаты модельного синтеза апертуры антенны рассматриваются под углом зрения применения их в томографии. Данный раздел представляет результаты, показывающие, что с помощью синтезированной апертуры можно томографировать гомогенные объекты, содержащие неоднородности, используя монохроматический источник излучения для локации, не прибегая при этом к модуляции зондирующего сигнала [76 ап].

До настоящего момента был представлен материал, демонстрирующий передаточные функции точек и их реконструированное изображение. Представлялись также результаты реконструкции изображения малоточечных объектов. Демонстрировались результаты интерференционных проявлений на изображениях протяженных объектов с ограниченным числом точек.

Представленные ранее результаты для одноракурсного синтеза апертуры вполне подходят для задач траекторного контроля. При рассмотрении представленных ранее результатов под углом зрения задач томографии, невольно возникает вопрос о том, как будет выглядеть результат реконструкции в случае сплошных сред. Представляет также интерес увидеть результаты реконструкции реальных объектов, например гомогенную среду с включенной в нее неоднородностью. В этом случае одноракурсного синтеза апертуры будет недостаточно.

4.2 Выбор метода томографирования

Несколько слов о методе, с помощью которого будет производиться томография. В нашем распоряжении четыре метода синтеза апертуры. Первый, давно известный метод, предполагает синтез апертуры по кругу в спектральной области (метод Д.Менсы). Теоретические корни метода находятся в классической томографии, которая решает задачу восстановления изображе-

ния по проекциям. Метод имеет сложности в реализации, так как требует малых угловых размеров томографируемого объекта и дальней зоны. При этом дальность зоны определяется не апертурой антенны, а размерами или апертурой объекта. Другими словами, регистратор должен находиться на расстоянии не ближе чем $R = D^2 / \lambda$ [31], где D – апертура объекта. Кроме того, метод очень сложен в моделировании. Поэтому предварительных результатов на этапе модельной проработки проекта практически не получить. Модельный расчет пространственного спектра на кольце для гомогенной области – непростая задача. Легче зарегистрировать кольцевой спектр практически, чем его рассчитать по модельным представлениям.

Три других предлагаемых здесь метода предполагают синтез апертуры в области пространственных функций. Апертуру при этом можно синтезировать, перемещая локатор по круговой, квадратной или прямолинейной траектории. Отдадим предпочтение прямолинейному апертурному синтезу в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Такой выбор позволяет обойти проблему артефактов, т. е. не иметь дело с кольцами Эйри, и, кроме того, метод дает возможность подавить интерференцию в случае протяженных объектов. В этом случае апертура синтезируется путем взаимных корреляций траекторного сигнала с набором опорных сигналов. Кроме того, в этом случае понятно, как моделировать траекторные сигналы от гомогенной области.

4.3 Модель гомогенной области

Материал раздела опубликован в [76 ап]. Модель гомогенной области похожа на дискретную, т. е. на точечную модель объекта. Отличие состоит в том, что точки гомогенной области расположены равномерно, а точнее – на одинаковом и достаточно близком расстоянии друг от друга. Математически это можно описать следующим образом. Сигнал от i -й точки гомогенной области с координатами (x_i, y_i) , принимаемый приемопередатчиком при движении мимо этой точки по прямолинейной траектории с постоянной скоростью v и промахом y_i , можно записать следующим образом:

$$f_i(t) = \frac{a(x_i, y_i)}{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}), \quad (4.1)$$

где $a(x_i, y_i)$ – комплексная амплитуда рассеяния в i -й точке, C_a – длина синтезированной апертуры, t – время, v – постоянная скорость перемещения приемника с излучателем относительно исследуемого объекта, λ – длина волны зондирующего сигнала. Поясняющая геометрия процесса сбора информации при реконструкции приведена на рисунке 4.1.

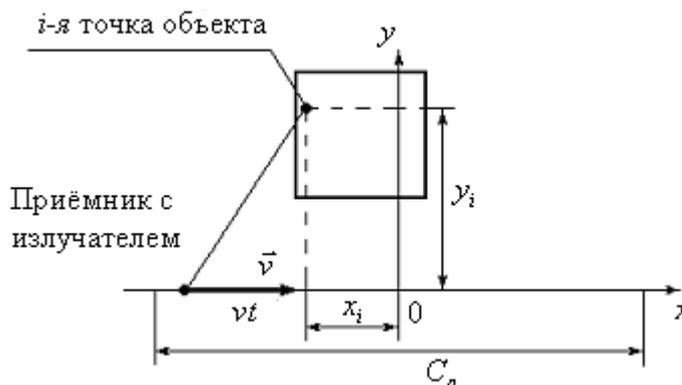


Рисунок 4.1 – Сбор информации от гомогенной области

Сигнал, отраженный от всей области, состоящей из I точек, можно представить в виде:

$$f(t) = \sum_{i=1}^I f_i(t), \quad (4.2)$$

где $f(t)$ – суммарный сигнал, отраженный от всех I точек области.

Пусть гомогенная область ограничена квадратом. Модель этой области представим отражающими точками с одинаковыми комплексными амплитудами рассеяния $a(x_i, y_i)$. При этом точки распределим внутри квадрата равномерно с одинаковым шагом по координатам x и y , равным $\lambda/7$. При выборе шага будем исходить из следующих рассуждений. Предельное разрешение синтезированной апертуры составляет $\lambda/5$ [31]. Точки, расположенные ближе чем $\lambda/5$, не будут различаться локатором и будут сливаться в сплошную гомогенную среду. Предполагается, что фаза при отражении не изменяется, точки не затеняют, т. е. не экранируют друг друга.

Траекторный сигнал от гомогенной области представлен на рисунке 4.2.

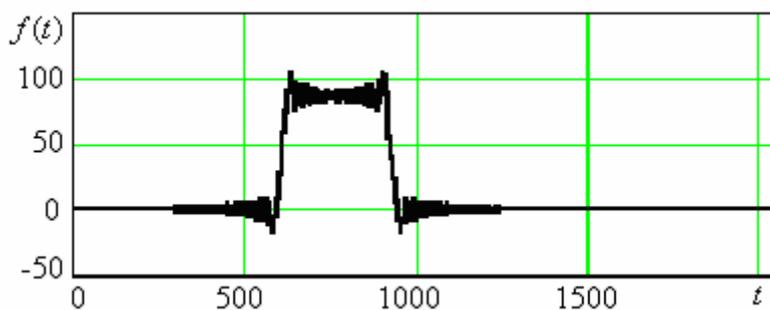


Рисунок 4.2 – Траекторный сигнал от гомогенной области

Для обработки суммарного траекторного сигнала от гомогенной области потребуются опорные траекторные сигналы от точечных объектов, расположенных на разном удалении от траектории регистрации с некоторым шагом.

Опорный сигнал, отраженный от точечного объекта, можно записать так:

$$f_o(t) = \frac{1}{(vt - C_a/2)^2 + (\Delta y)^2} \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt - C_a/2)^2 + (\Delta y)^2}), \quad (4.3)$$

где Δy – удаление опорной точки от траектории.

Тогда набор взаимных корреляционных функций для разных значений Δy между опорным сигналом $f_o(t)$ и сигналом $f(t)$ может быть представлен в виде:

$$B(\tau, \Delta y) = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^I \frac{a(x_i, y_i)}{[(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2][(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (\Delta y)^2]} \times \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} (\sqrt{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} - \sqrt{(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + (\Delta y)^2})] dy dt. \quad (4.4)$$

Используя соотношение $\Delta x = \tau v$, можно перейти от временного сдвига τ к пространственному сдвигу Δx и построить двумерную взаимно корреляционную функцию.

Как и ранее, в разделах 2 и 3 при реконструкции изображения объектов в качестве оценки восстановленной функции $a(x_i, y_i)$ будем использовать саму взаимно корреляционную функцию.

4.4 Результаты модельного томографирования гомогенной области с включенной неоднородностью

Материал раздела опубликован в [76]. Построенная взаимно корреляционная функция для гомогенной области в соответствии с выражением (2.4) представлена на рисунке 4.3, *a*.

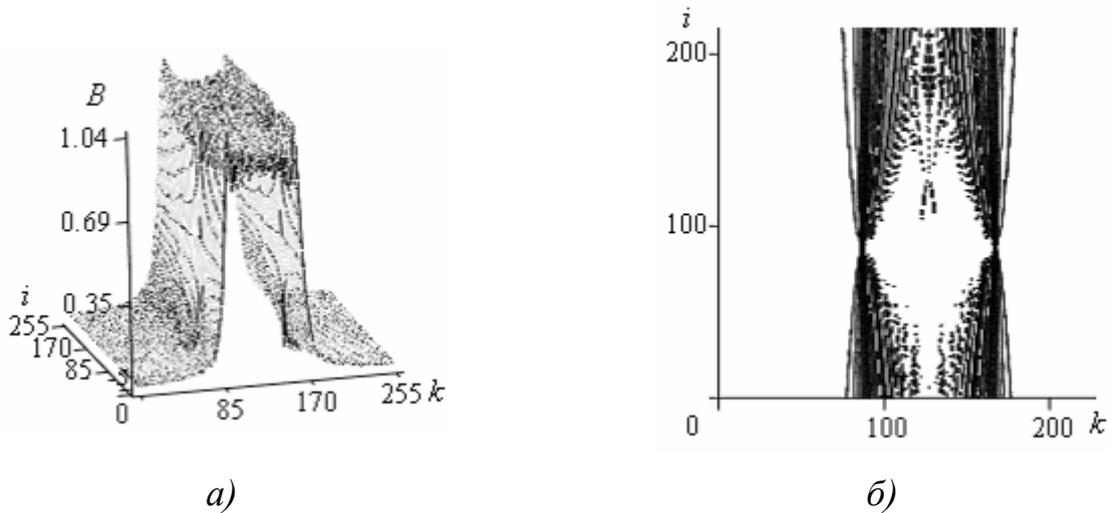


Рисунок 4.3 – Результаты реконструкции изображения гомогенной области по одному траекторному сигналу: *a*) передаточная функция гомогенной области; *б*) вид передаточной функции в плане

Далее осуществим перемещение локатора мимо гомогенной области с тем же промахом y , но траекторию зададим перпендикулярно первоначальной. После корреляционной обработки траекторного сигнала получим такую же передаточную функцию гомогенной области, как та, что представлена на рисунке 4.3, *a*, но повернутую на 90° . Совместим эти передаточные функции и перемножим их значения. Получим новую передаточную функцию гомогенной области для апертурного синтеза в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 4.4, *a*). Передаточная функция гомогенной области теперь имеет приемлемый узнаваемый вид без следов интерференции.

Полученная на томограмме гомогенная область, как и ожидалось, имеет вид квадрата. Все точки области имеют одинаковую комплексную амплитуду рассеяния и распределены равномерно по области с одинаковым шагом $\lambda/7$,

$\lambda = 1,3$ мм, размер гомогенной области 36 x 36 мм, длина синтезированной апертуры 24 см. Расстояние от траектории до центра гомогенной области 12 см.

На рисунке 4.4, *б* представлен вид передаточной функции гомогенной области в плане.

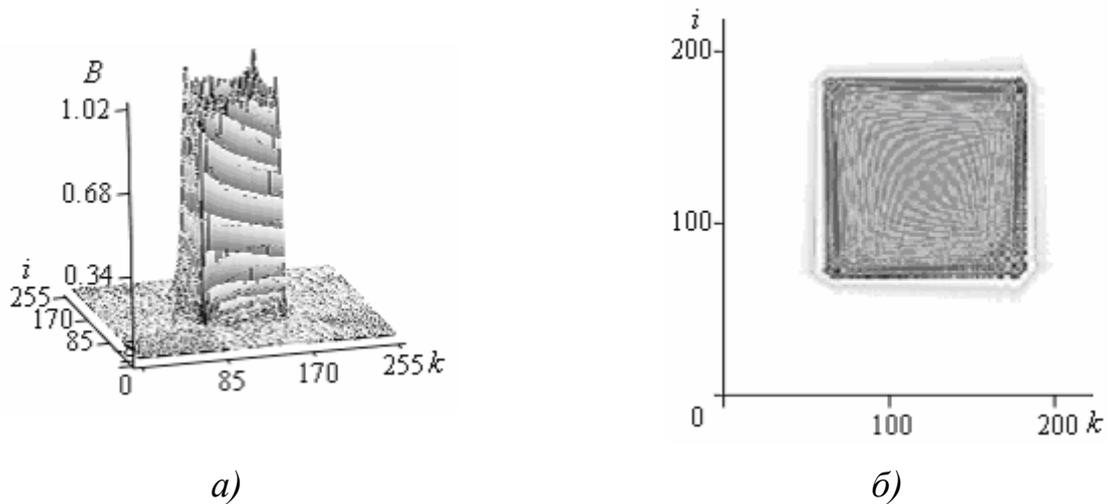


Рисунок 4.4 – Результаты томографии гомогенной области методом синтеза апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях: *а*) передаточная функция гомогенной области; *б*) вид передаточной функции в плане

На рисунке 4.5, *а* представлен вид этой же гомогенной области с квадратной полостью. Комплексные амплитуды рассеяния точек внутри этой области равны нулю. Размеры полости 9 x 9 мм.



Рисунок 4.5 – Томограммы гомогенной области с включенной неоднородностью: *а*) неоднородность в виде пустоты; *б*) неоднородность в виде гомогенной области с большими модулями комплексной амплитуды рассеяния точек

На рисунке 4.4, б полость заполнена гомогенным веществом с модулем комплексной амплитуды рассеяния в каждой точке в пять раз большей, чем модуль комплексной амплитуды рассеяния точек в охватывающей гомогенной области. Расстояние между точками такое же, как в охватывающей гомогенной области.

В данном модельном эксперименте не применялся дополнительный поворот на 45° матрицы изображения, полученной при синтезировании апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях с повернутым на 45° базисом (см. раздел 2.6). Это связано с трудоемкостью моделирования траекторных сигналов от гомогенной области при повернутом на 45° базисе. Результат был бы, несомненно, более качественным при использовании дополнительных матриц изображения, повернутых на 45° , потому что чем больше ракурсов синтеза апертуры, тем лучше результат. Однако, представленный результат дву-ракурсного синтеза апертуры, можно считать удовлетворительным.

4.5 Устойчивость к шумам непроекционного метода реконструкции изображения объектов

Материал раздела опубликован в [76]. Устойчивость к шумам – один из важнейших показателей любого метода томографии. В реальной системе результаты измерений имеют некоторую степень неопределенности, обусловленную наличием шума. В системах, использующих электромагнитное излучение, энергия, приходящаяся на один квант, относительно мала*, аддитивный гауссов шум тепловых источников и усилителей преобладает над квантовым шумом [31]. Здесь число квантов на один информационный элемент настолько велико, что наиболее важным параметром является отношение сигнал/шум, которое доминирует над остальными параметрами. В рентгеновских системах справед-

* Здесь используется соотношение де Бройля из квантовой механики $p = h/\lambda$, где p – импульс энергии или квант, h – постоянная Планка, λ – длина волны.

ливо обратное, т. е. в них шум не превышает число квантов, приходящихся на один информационный элемент.

В системах реконструктивной томографии (здесь имеется в виду восстановление изображения по проекциям) шум в каждом реконструируемом элементе равен сумме шума для каждой проекции, проходящей через данный информационный элемент, и шума, обусловленного вкладом в реконструируемый элемент ядра свертки $h(R)$ [30]. Результирующая дисперсия оценки коэффициента поглощения рентгеновского излучения μ , равна

$$\sigma_{\mu}^2 = \frac{M}{\bar{n}t} \int_{-\infty}^{\infty} h^2(R) dR, \quad (4.5)$$

где M – число ракурсов, t – толщина слоя сечения, \bar{n} – средняя плотность прошедших квантов. Ядро свертки $h(R)$ нормируется для получения правильной реконструкции распределения коэффициента поглощения. R – расстояние, отсчитываемое вдоль линии, перпендикулярной направлению проекции. Используя выражение (4.5), получаем следующую формулу реконструкции отношения сигнал/шум:

$$SNR = \frac{\Delta\mu}{a_{\text{ш}}} = K \Delta\mu \sqrt{\bar{N}M} \omega, \quad (4.6)$$

где K – константа порядка единицы, зависящая от ядра свертки; $\Delta\mu$ – изменение коэффициента поглощения в исследуемой области; \bar{N} – среднее число квантов, поступивших на детектор; ω – ширина детектора вдоль сечения, величина которой полагается обратно пропорциональной частоте среза фильтра, используемого при реконструкции; $a_{\text{ш}}$ – средняя амплитуда шума.

Изыщная математическая формулировка, положенная в основу реконструктивной томографии, обеспечивает высококачественную реконструкцию изображений, если имеется полный набор линейных интегралов. Однако в реальных системах результаты измерения этих линейных интегралов нередко ухудшаются из-за наличия нелинейностей, воздействия шума и недостаточности данных, что приводит к различным погрешностям и искажениям при реконструкции [30]. Таким образом, проекционная томография критична к шумам.

Наша задача – выяснить, как влияют шумы, присутствующие в траекторном сигнале, на результаты реконструкции изображения предлагаемым методом.

К траекторным сигналам будем добавлять шумы, наблюдая степень разрушения передаточной функции точки и томограмм точечных объектов в зависимости от отношения сигнал/шум. Кроме того, рассмотрим разрушение модельной томограммы гомогенной области с полостью внутри под воздействием шума. Для модельного эксперимента нам потребуются траекторные сигналы, которые рассчитываются в соответствии с формулами (4.1), (4.2), (2.2).

Шумы легко генерируются программой RANDOM, входящей в состав библиотеки языка программирования FORTRAN. Аддитивное добавление шума выражается формулой

$$s_{\Sigma}(t) = s(t) + n(t), \quad (4.7)$$

где $s(t)$ – суммарный сигнал (2.2), отраженный от всех I точек объекта; $n(t)$ – шумовой процесс с некоррелированными отсчетами.

Для обработки суммарного траекторного сигнала $s(t)$ потребуются опорные траекторные сигналы от точечных объектов, расположенных на разном удалении y от траектории. Опорный сигнал $s_0(t)$, соответствующий точечному объекту, записывается в соответствии с выражением (2.3). Далее следует найти взаимно корреляционную функцию между опорным сигналом $s_0(t)$ и сигналом $s_{\Sigma}(t)$:

$$\begin{aligned} B(\tau, \Delta y) &= \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^I s_i(vt, y) s_0(v(t - \tau), (y - \Delta y)) dt = \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} \mathbf{S}(\omega) \mathbf{K}^*(\omega) \exp[j(\omega\tau)] d\omega, \end{aligned} \quad (4.8)$$

где

$$\mathbf{S}(\omega) = \int_{-\omega_m}^{\omega_m} \sum_{i=1}^I s_i(t) \exp[-j(\omega t)] dt, \quad (4.9)$$

$$\mathbf{K}^*(\omega) = \int_{-\omega_m}^{\omega_m} s_0(t, \Delta y) \exp[j(\omega t)] dt. \quad (4.10)$$

Здесь $\omega_m = 2v/\lambda$ – максимальная доплеровская частота; $\mathbf{S}(\omega)$ – спектр реконструируемой пространственной функции $s(x, y)$; $x = vt$ – абсцисса точки вдоль конечного участка траектории; y – ордината точки в направлении перпендикулярном траектории движения локатора (промах); τ – сдвиг по времени; Δy – сдвиг по промаху; $\mathbf{K}^*(\omega)$ – комплексно сопряженный спектр опорной пространственной функции $s_0(x, y)$; $\mathbf{K}^*(\omega)$ – можно также назвать частотной характеристикой дисперсионного фильтра, перестраиваемого на разные дальности.

4.6 Результат томографии точечных объектов, наблюдаемых в адитивном гауссовом шуме

Материал раздела опубликован в [76]. Если взять одноточечный объект, т. е. в выражении (2.2) положить $I = 1$, то выражение (4.8) позволит рассчитать и построить двумерную взаимную корреляционную функцию для одноточечного объекта (рисунок 4.6, а). Ее принято называть передаточной функцией точки. Она характеризует разрешающую способность метода томографии. Лучше всего, если она будет в виде дельта-импульса (рисунок 4.6, б), тогда не будет проблем с интерференцией. Такую передаточную функцию точки позволяет получить многоракурсный апертурный синтез.

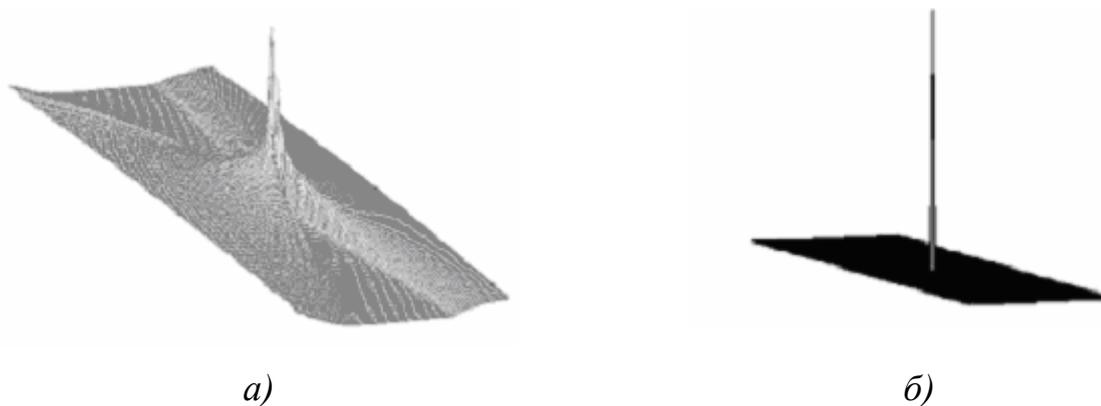


Рисунок 4.6 – Передаточные функции точек: а) при синтезировании апертуры по одной прямолинейной траектории; б) при синтезировании апертуры по двум взаимно перпендикулярным траекториям

Ограничимся синтезированием апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях. То есть при сборе данных нужно зарегистрировать два траекторных сигнала, выбрав две взаимно перпендикулярные траектории. Сущность многокурсного апертурного синтеза можно пояснить формулой:

$$B_{\Sigma} = \prod_{n=1}^N B((\Delta x_n, \Delta y_n), \theta_n). \quad (4.11)$$

Выражение (4.11) указывает на то, что для осуществления многокурсного синтеза апертуры нужно просто перемножить двумерные взаимно корреляционные функции, повернутые на угол θ_n относительно исходной корреляционной функции. Для этого траектории синтеза апертуры также необходимо поворачивать на угол θ_n относительно исходной траектории. На рисунке 4.6, б представлен результат перемножения исходной корреляционной функции (рисунок 4.6, а) и повернутой на 90° в плоскости основания такой же корреляционной функции.

Приступим к рассмотрению влияния шума на передаточную функцию точки и на ее вид в плане. Вид в плане можно получить из передаточной функции, сделав ее сечения плоскостями разного уровня и представив совмещенные планы этих сечений. Для лучшего восприятия площади сечения раскрашиваются в разные тона или цвета.

Шумовому воздействию подвергается только регистрируемый траекторный сигнал. Опорные сигналы шумовому воздействию не подвергаются.

На рисунке 4.7, а показан траекторный сигнал точечного объекта без шума. На рисунке 4.7, б представлена его передаточная функция, а на рисунке 4.7, в – его томограмма, т. е. вид совмещенных сечений передаточной функции в плане.

В нижеследующей серии рисунков оси координат исключены, так как количественные значения передаточной функции точки и ее вида в плане не имеют принципиального значения. Важным является только их вид. В дальнейшем

координаты будут включаться там, где это будет способствовать лучшему восприятию и пониманию.

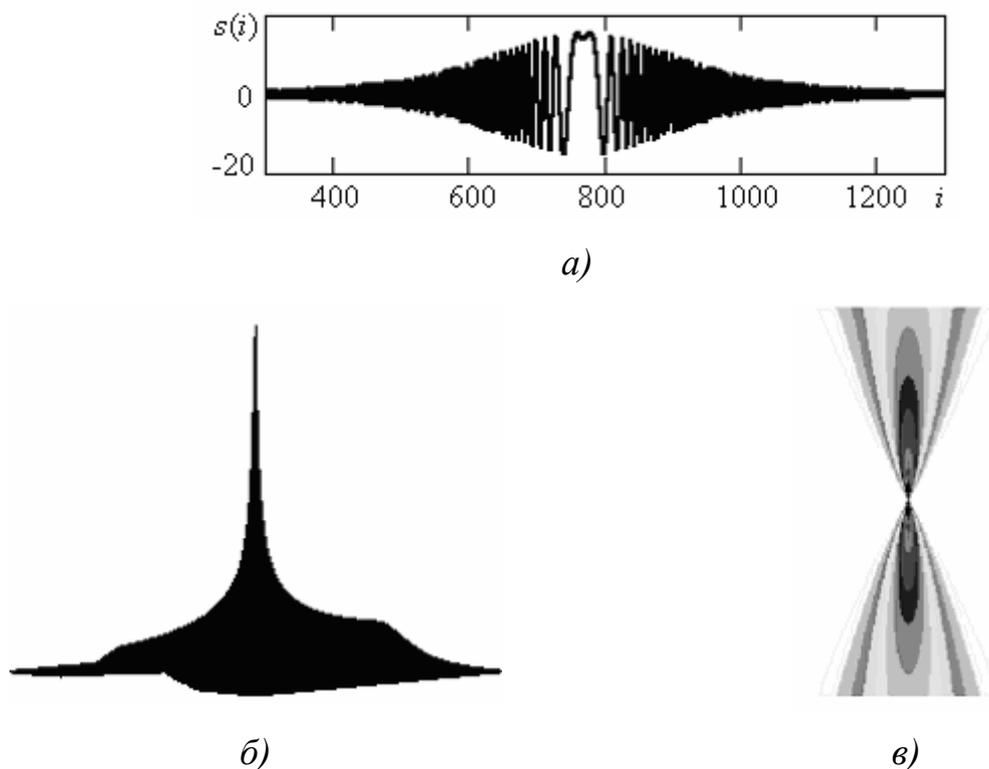


Рисунок 4.7 – Результаты томографирования точечного объекта без шумов: а) траекторный сигнал; б) передаточная функция точки; в) вид передаточной функции в плане (томограмма точки)

На рисунке 4.8, а представлен траекторный сигнал точечного объекта с шумом, среднее квадратическое отклонение которого в два раза меньше максимального значения сигнала. На рисунке 4.8 б показана его передаточная функция, а на рисунке 4.8, в представлена его томограмма. Сравнивая рисунки 4.7 и 4.8, можно пронаблюдать динамику разрушения изображения шумом.

Результаты, представленные на рисунках 4.7 и 4.8, демонстрируют устойчивость к шумам предлагаемого метода реконструкции. Это и следовало ожидать, так как коррелятор является по существу оптимальным фильтром для сигнала с частотной модуляцией, каким является траекторный сигнал. Такой фильтр максимизирует отношение сигнал/шум, накапливая и сжимая обраба-

тываемый сигнал. При этом значительно возрастает его пиковое значение, и сигнал начинает доминировать над шумом.

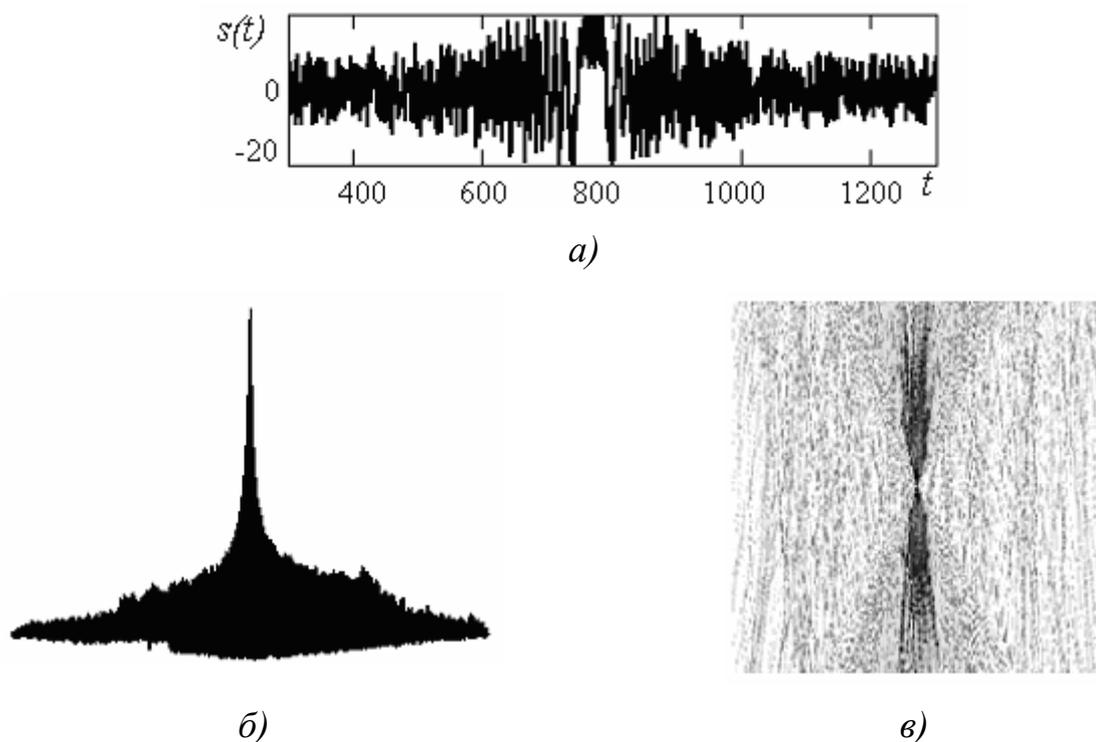


Рисунок 4.8 – Результаты томографирования точечного объекта в шумах: а) траекторный сигнал; б) передаточная функция точки; в) вид передаточной функции в плане (томограмма точки)

4.7 Результат томографирования гомогенных объектов с включенной пустотой при наличии гауссова шума

Материал раздела опубликован в [76 ап]. Хорошая устойчивость к шумам передаточной функции точки еще не означает, что результаты томографии реальных объектов будут такими же хорошими при наличии шума. Рассмотрим реконструкцию в шумах гомогенной области с полостью внутри. Параметры модели гомогенной области выбирались из следующих соображений. Отражающие точки гомогенной области имели одинаковую комплексную амплитуду рассеяния и были распределены равномерно с шагом $\lambda/7$ вдоль обеих координат. Шаг выбран с учетом максимальной разрешающей способности синтезированной

апертуры $\lambda/5$ [31]. Точки, расположенные ближе чем $\lambda/5$, сольются в гомогенную структуру. Гомогенная область представлена квадратом 36×36 мм, а пустота внутри также имеет квадратную форму разметом 9×9 мм. Длина синтезированной апертуры составляла 24 см, а расстояние от траектории до центра гомогенной области равнялось 12 см, $\lambda = 1,3$ мм. На рисунке 4.9, *a* показан траекторный доплеровский сигнал от гомогенной области с пустотой внутри.

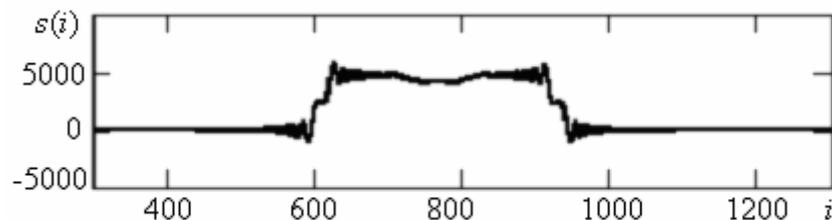
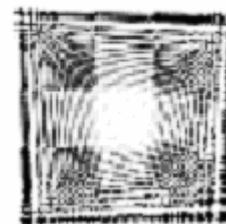
*a)**б)**в)*

Рисунок 4.9 – Результаты реконструкции изображения гомогенной области с пустотой без шумов: *a)* траекторный сигнал; *б)* передаточная функция области; *в)* вид передаточной функции в плане

На рисунке 4.9, *б* дана передаточная функция всей гомогенной области с пустотой при синтезировании апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях. На рисунке 4.9, *в* представлено изображение гомогенной области с пустотой внутри.

Рассмотрим влияние шумов на результаты реконструкции гомогенной области с пустотой. На рисунке 4.10, *a* показан траекторный доплеровский сигнал от гомогенной области с пустотой внутри с добавленными шумами. Отношение

сигнал/шум, а точнее – отношение максимального значения сигнала к средне-квадратическому отклонению шумового процесса составляло $5/1$. На рисунке 4.10, б дана передаточная функция всей гомогенной области с пустотой при синтезировании апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях при наличии шума. На рисунке 4.10, в представлено изображение гомогенной области с пустотой внутри при наличии шума с отношением $u_c/u_n = 5/1$.

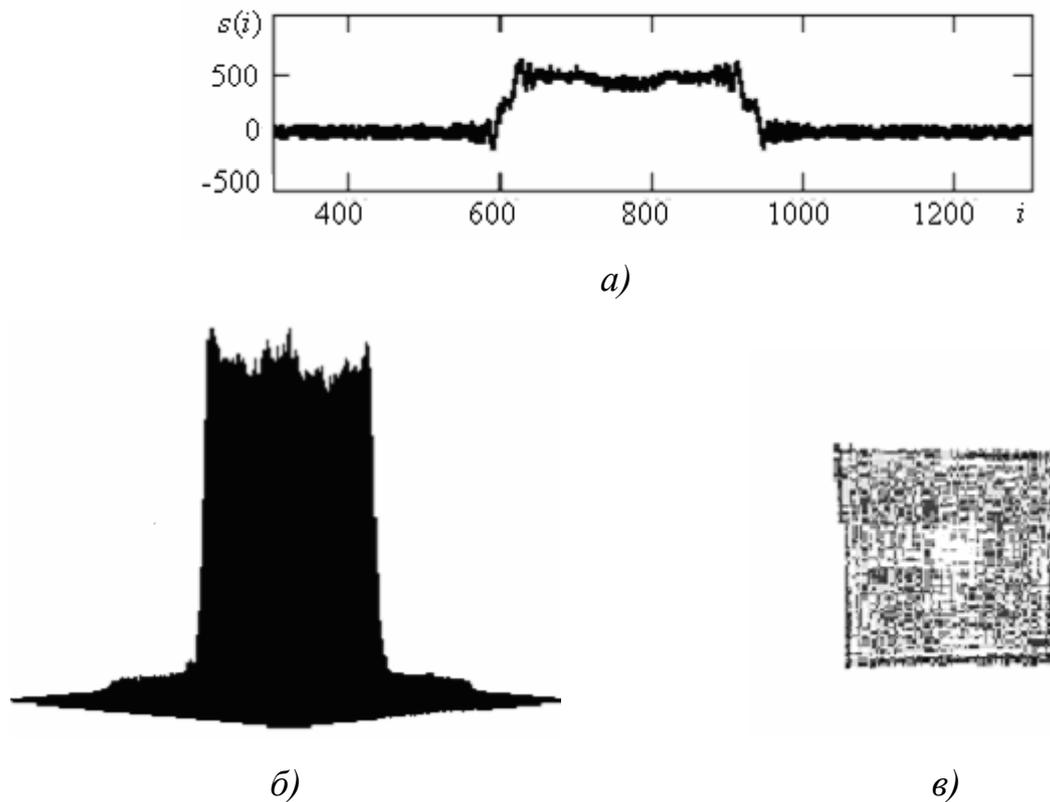


Рисунок 4.10 – Результаты реконструкции гомогенной области с пустотой при наличии шума: а) траекторный сигнал; б) передаточная функция области; в) вид передаточной функции в плане

Результаты реконструкции гомогенной области (рисунок 4.10) показывают, что шумовой сигнал, меньший максимального значения полезного сигнала в пять раз, способен практически скрыть пустоту в гомогенной области. Надо учитывать, что суммарный сигнал от всей реконструируемой области гораздо мощнее, чем сигнал от точечного объекта. Поэтому результат, представленный на рисунке 4.10, является маловероятным.

Обобщая результаты реконструкции в шумах, можно отметить следующее. Представленный способ реконструкции обладает хорошей устойчивостью к шумам, т. е. не требует большого превышения сигнала над шумами. По мере увеличения мощности шума происходит постепенное разрушение изображения на изображениях. Нет порогового эффекта, т. е. резкого разрушения картины изображения, начиная с определенного порогового отношения сигнал/шум.

4.8 Количественная мера оценки качества изображения в шумах

Выше, на рисунках 4.9 и 4.10, были представлены результаты качественной оценки искажения изображения, вызванные шумами. Ее можно отнести к субъективной оценке. В конце концов, наблюдатель решает, искажено ли изображение до неузнаваемости или еще можно разобрать что-то и опознать объект. Субъективная оценка предпочтительна для человека. Обратимся теперь к количественной или объективной оценке качества изображения.

Будем экспериментировать с изображением гомогенной области с пустотой внутри, рисунок 4.9, в. Это изображение получено из квадратной матрицы модулей комплексных чисел. Матрица изображения содержит $M=256$ столбцов и $N=256$ строк, т. е. состоит из 256×256 элементов. Для оценки степени искажения изображения, восстановленного из зашумленного сигнала, используется среднеквадратичное отклонение модуля амплитуды элемента изображения σ от модуля амплитуды элемента изображения, восстановленного при отсутствии шума в траекторном сигнале, усредненное по всем элементам изображения [24].

$$\sigma^2(k) = \frac{\sum_i^N \sum_j^M [|a_{i,j}| - |a_{i,j} + n_{i,j}(k)|]^2}{NM} \quad (4.12)$$

В выражении (4.12) приняты следующие обозначения:

$a_{i,j}$ – элемент матрицы изображения, представляющий собой комплексное число; i – номер строки матрицы; j – номер столбца матрицы; k – число, задающее амплитуду шумового процесса, генерируемого программой RANDOM

на Фортране; N – общее число строк матрицы изображения; M – общее число столбцов матрицы изображения.

Зависимость $\sigma(k)$ представлена на рисунке 4.11.

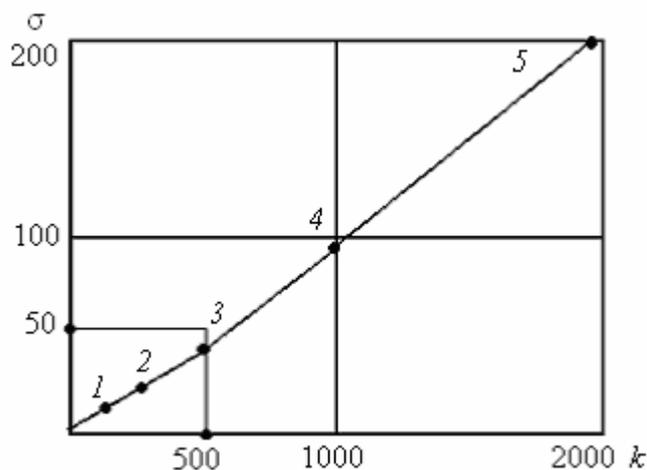


Рисунок 4.11 – Зависимость средней дисперсии элемента изображения от амплитуды шумового процесса

Как следует из рисунка 4.11, увеличение амплитуды шумового процесса k ведет к увеличению среднеквадратичного отклонения изображения σ . При этом наблюдается прямо пропорциональная зависимость между σ и k . Расчетные данные, по которым построен график, представлены в таблице 4.1.

Точка 4 на графике (рисунок 4.11) соответствует отношению сигнал/шум, равному 5/1. Вид процесса, который соответствует этому отношению, представлен на рисунке 4.10, *a*.

Таблица 4.1

Зависимость дисперсии элемента изображения от амплитуды шума

k	125	250	500	1000	2000	10000
σ	11	22,7	47,2	98,7	205	1182

Таким образом, точка 4 на графике функции $\sigma(k)$ (рисунки 4.11 и 4.10) позволяет связать объективные и субъективные характеристики шумоустойчивости реконструированных изображений.

В заключении отметим ситуацию, при которой можно столкнуться с шумами при реконструкции. Будем исходить из очевидного факта, что чем меньше мощность зондирующего сигнала, тем меньше от него вреда для здоровья пациента. Поэтому, уменьшая мощность излучателя, неизбежно будем приближаться к уровню шумов электронных схем. Безусловно, в конце концов, встанет вопрос, какой уровень шума является допустимым.

4.9 Характеристика контрастного разрешения для метода томографии при синтезе апертуры в двух ортогональных направлениях

Контрастная чувствительность относится к важнейшим показателям томографа. Под контрастной чувствительностью или контрастным разрешением будем подразумевать различимость на изображениях двух гомогенных областей с незначительно отличающейся отражающей (рассеивающей) способностью. Для модельной оценки контрастной чувствительности сформируем две гомогенные области (одна внутри другой), отличающиеся рассеивающей способностью волн. Пусть модули комплексных амплитуд рассеяния точек внутренней области отличаются от модулей комплексных амплитуд рассеяния точек охватывающей области в 1,05; 1,1; 1,3; 1,5; 2,5; 5; 10 раз. Ряд изображений с указанными отличиями гомогенных областей приведены на рисунке 4.12.

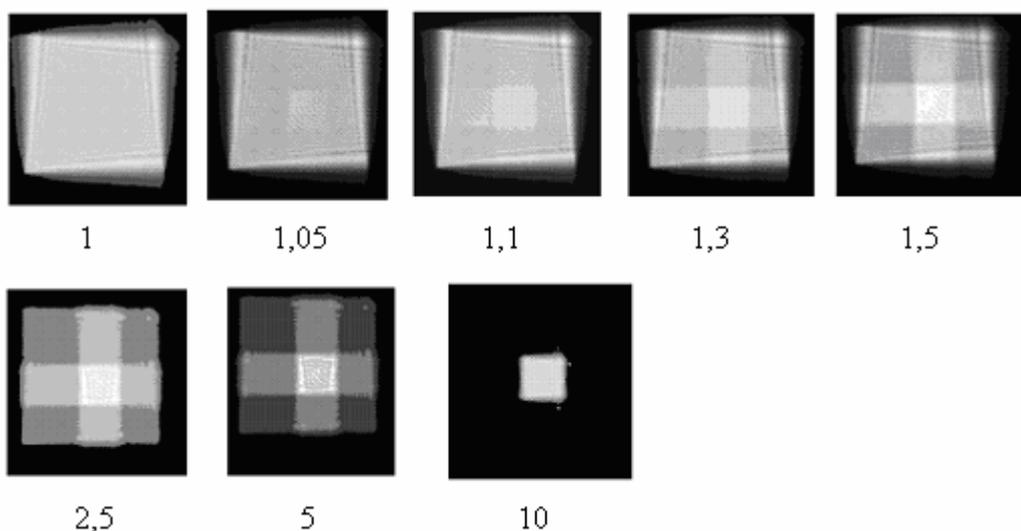


Рисунок 4.12 – Контрастная чувствительность предлагаемого метода реконструкции

Подпись под каждым рисунком показывает, во сколько раз отличаются модули комплексных амплитуд рассеяния точек в сравниваемых областях. При этом в пределах одной области все точки имеют одинаковый модуль комплексной амплитуды рассеяния. Серия изображений, представленных на рисунке 4.12, дает полное представление о контрастном разрешении предлагаемого метода реконструкции. Из второй картинке (рисунок 4.12) видно, что отличие рассеивающей способности на 5 % уже заметно на изображении.

Следует отметить, что серия изображений на рисунке 4.12 получена с помощью программы MathCad 2000 без каких-либо мер, повышающих контрастную чувствительность. Особенность программы MathCad 2000 состоит в том, что она точки с большей интенсивностью отображает более светлыми тонами, чем точки с меньшей интенсивностью, поэтому изображение на рисунке 4.12 получается инвертированным.

Выводы

1. Модельная реконструкция изображения гомогенных областей говорит о возможности томографии реальных объектов.
2. Результаты реконструкции могут быть значительно улучшены, если базис синтезирования апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях повернуть на 45° , а затем перемножить наложенные матрицы изображения в соответствии с методикой, представленной в [90, 94].
3. Предлагаемый метод реконструкции устойчив к шумам.
4. Хорошая устойчивость предложенного метода реконструкции к шумам связана с оптимальной фильтрацией траекторного сигнала, т. е. частотно модулированная структура траекторного сигнала дает возможность его накопления и сжатия, что повышает отношение сигнал шум.
5. Представленный метод реконструкции обладает хорошим контрастным разрешением.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Цели и задачи эксперимента, возможные пути получения экспериментальных результатов

Ранее с помощью моделирования были получены передаточные функции одноточечных и многоточечных объектов, их кольцевые спектры при разных траекториях синтеза апертуры. Модель, отражающая процесс синтеза апертуры строилась в соответствии с нашими представлениями о предмете исследования. Результаты моделирования требуют экспериментального подтверждения. При выборе подхода к проведению экспериментов, а также при оценке качества экспериментальных результатов следует иметь в виду следующее.

1. Программа и методика экспериментов составлялась таким образом, чтобы минимизировать материальные затраты.

2. Искажения информации при сборе данных, вызванные ограниченными возможностями аппаратуры, компенсировались всесторонним дополнительным моделированием.

Перечислим основные задачи эксперимента.

1. Проверка правильности теоретических представлений о физике процессов синтеза апертуры в ближней зоне от регистрации до реконструкции.

2. Выявление противоречий между результатами модельной реконструкцией изображения простейших объектов и результатами реконструкции простейших объектов по экспериментальным траекторным сигналам.

3. Обнаружение трудностей на пути практической реализации предлагаемого метода синтеза апертуры в томографии и траекторном контроле.

4. Получение практического опыта синтеза апертуры на малой дальности. Для проведения экспериментов необходимо решить следующие задачи:

- создать доплеровский локатор;
- создать систему сбора информации, т. е. организовать движение локатора, его «контакт» с объектом через среду, и реализовать контроль над пара-

метрами движения локатора;

- устранить влияние турбулентности на результаты локации;
- преобразовать входные данные в формат для дискретной обработки;
- разработать дополнительное программное обеспечение для обработки собранной информации и ее визуализации.

Остановимся подробнее на вопросе сбора данных. Все зависит от того, что предполагается регистрировать для последующего синтезирования апертуры, и в какой области будет собираться информация. Будет ли это спектральная (Фурье) область (рисунок 5.1, *а*, *б*, *в*) или это будет область пространственных функций (область траекторных сигналов), как на рисунке 5.2.

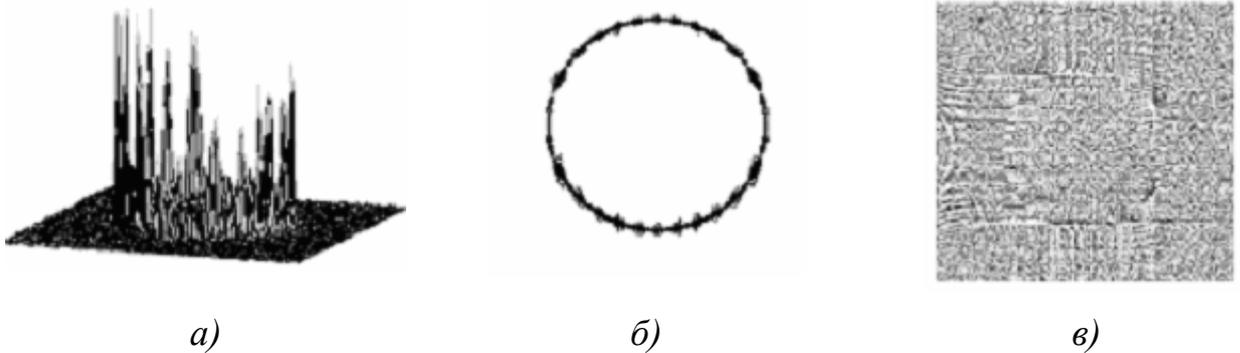


Рисунок 5.1 – Спектральные характеристики: *а*) кольцевой спектр объекта; *б*) вид этого же спектра сверху; *в*) распределение фазы кольцевого спектра в пространстве

Сравнивая рисунки 5.1 и 5.2, убеждаемся, что кольцевой спектр не заметит траекторный сигнал, и что процесс сбора информации для регистрации кольцевого спектра не подходит для регистрации траекторного сигнала.

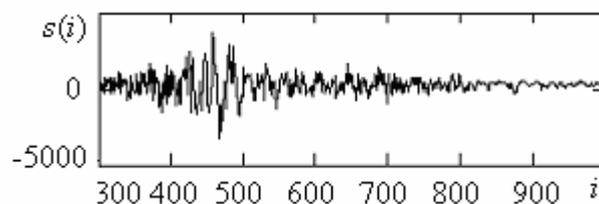


Рисунок 5.2 – Траекторный сигнал от реального объекта, зарегистрированный доплеровским локатором

При сборе информации в спектральной области необходимо регистрировать значения спектральной функции на кольце (рисунок 5.1, а), значения фазы на кольце (рисунок 5.1, в) и угловые (полярные) координаты перемещения локатора.

Траекторный сигнал регистрировать проще, чем кольцевой спектр. Для этого надо просто зарегистрировать дискретные отсчеты принимаемого доплеровского сигнала при движении по какой-либо заранее определенной траектории. Выберем прямолинейную траекторию. Это позволит отнести полученные результаты как к траекторному контролю, так и к томографии.

Будем синтезировать апертуру, двигаясь по прямолинейной траектории, как показано на рисунке 5.3.

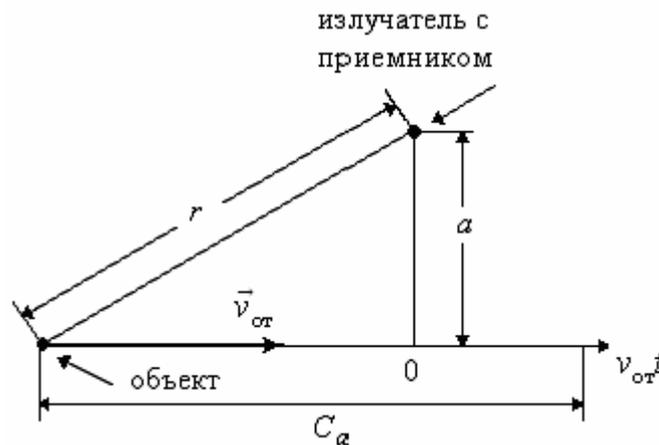


Рисунок 5.3 – Геометрия регистрации траекторного сигнала при прямолинейном синтезировании апертуры

Экспериментальный траекторный сигнал, полученный с помощью доплеровского локатора при движении по прямолинейной траектории, представлен на рисунке 5.2. Кольцевой спектр и траекторный доплеровский сигнал представлены здесь для того, чтобы показать, как сильно отличаются сами объекты регистрации. Очевидно, и методики регистрации кольцевого спектра и траекторного сигнала также будут значительно отличаться.

Чтобы убедиться в этом, кратко рассмотрим экспериментальную методику регистрации кольцевого спектра [31]. Выясним, нельзя ли использовать этот опыт для экспериментов с траекторными сигналами.

5.2 Сущность экспериментов Д.Менсы

Основной задачей Д.Менсы было подтвердить возможность синтеза апертур в спектральной области. Так как обоснование возможности синтеза апертур в спектральной области основано на принципах классической томографии, т. е. по методу восстановления изображения объекта по проекциям, то положительные экспериментальные результаты, представленные Д.Менсой, доказывают томографическую природу апертурного синтеза. Чтобы соответствовать всем требованиям Радона к проекциям, в [31] введены ограничения, которые следуют из требований Радона к проекционному лучу. Первое ограничение состоит в требовании регистрировать кольцевой спектр в дальней зоне, т. е. в зоне Фраунгофера, где фронт волны считается плоским. Второе требование состоит в том, чтобы угловые размеры объекта из точки, где расположен локатор, воспринимались наблюдателем как достаточно малые. Так, например, Д.Менса не случайно точки двухточечного объекта расположил на расстоянии 6 см, а регистрацию спектра по кольцу производил с расстояния 5 м.

На рисунке 5.4 представлена схема томографирования по методике [31].

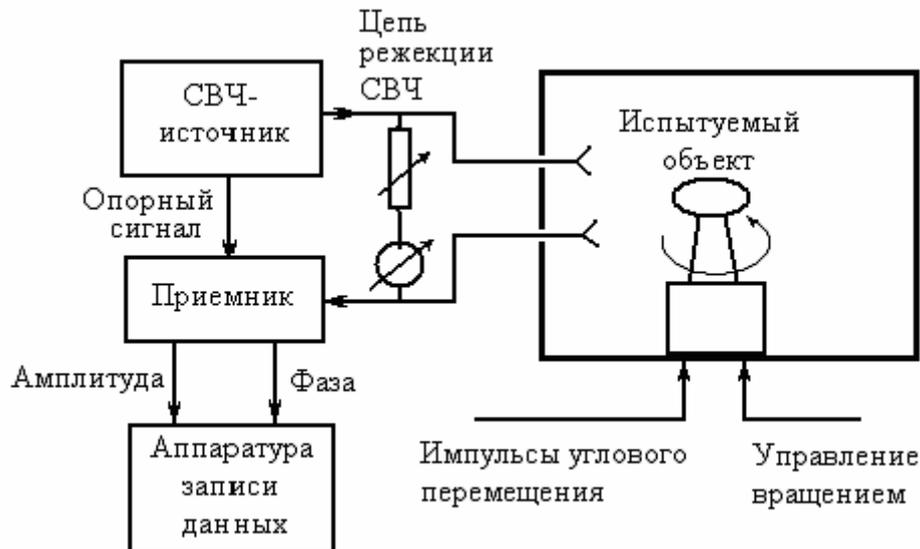


Рисунок 5.4 – Система сбора данных для доплеровской СВЧ-томографии по методу Д.Менсы

Главное, что можно отметить в экспериментальной установке - это вра-

щающийся объект на поворотной платформе, помещенный в безэховую камеру. Если посмотреть на кольцевой спектр (рисунок 5.1, б), то становится понятным, почему Д.Менса выбрал вращение объекта, а не обход его локатором по кругу. Ведь в принципе безразлично для кругового апертурного синтеза, вращать объект или обходить его по кругу. Предпочтение отдано вращению потому, что при регистрации кольцевого спектра, в случае небольшого отклонения от кольца, эксперимент приводит к недопустимым погрешностям, которые не позволят осуществить реконструкцию объекта.

Поворотная платформа выполнена из прозрачного материала для трехсантиметрового диапазона. Прием и передача излучения осуществлялась разными антеннами, хотя, как отмечается в [31], возможно использование одной антенны. Схема одноантенного блока приведена на этом же рисунке внизу.

Объект медленно вращается. Амплитуда и фаза принимаемых сигналов измеряются по командам устройства считывания углового положения. Если для полного поворота объекта необходимо N угловых приращений, измеряемые данные будут состоять из N пар чисел, каждое из которых характеризует амплитуду и фазу принятого сигнала. Эти числа в цифровой форме записываются на магнитную ленту для дальнейшей обработки. Каждая пара чисел описывает некоторый фазор, который можно эквивалентным образом определить, измеряя его синфазную и квадратурную составляющие. В любом случае это измерение дает комплексное число [31], соответствующее каждому отсчету. Это важное замечание Д.Менсы следует учесть в создаваемой экспериментальной установке для регистрации траекторного сигнала.

Таким образом, в планируемом эксперименте потребуются комплексные отсчеты траекторного сигнала. Есть два пути решения этой проблемы. Первый путь – это регистрировать действительный (физический) сигнал, а необходимую квадратурную составляющую получить с помощью преобразования Гильберта на персональном компьютере. Второй путь – это реализовать в планируемой экспериментальной установке квадратурный канал. Остановимся на

втором варианте.

Реализация первого варианта невозможна, потому что, как показали эксперименты и результаты моделирования, квадратурная компонента не является преобразованием Гильберта от исходной компоненты.

Для приема сигнала в [31] использовался приемник для антенных измерений с линейным динамическим диапазоном не менее 62 дБ. Кроме того, приемник должен был обеспечивать разрешение по амплитуде и фазе, равное 0,1 дБ и 0,1 град. Под фазой принимаемого сигнала подразумевался фазовый сдвиг принимаемого сигнала относительно излучаемого сигнала. Перед началом эксперимента приемник калибровался по эталонному отражателю. Информация об изображении содержалась в зависимости амплитуды и фазы сигнала от угла.

Шаг дискретизации по углу выбирался по критерию Найквиста, т. е. по Котельникову. Это означает, что приращения угла должны быть достаточно малыми, для того чтобы фаза сигналов, отраженных от периферийных точек объекта, изменялась от отсчета к отсчету не более чем на π рад. Фаза сигналов с длиной волны λ , отраженных от точек объекта, расположенных на расстоянии r от оси вращения, будет сдвинута максимум на $4\pi r \sin \Delta\Theta / \lambda$ рад при угловом приращении $\Delta\Theta$. Следовательно, для объекта диаметром D максимальная величина углового приращения будет равна $\Delta\Theta \cong \lambda / 2D$.

Расстояние, на котором производилось измерение, выбиралось таким образом, чтобы обеспечить выполнение условий в дальней зоне, иными словами, требовалось выполнить условия, при которых фронты волн, падающих на объект, будут относительно плоскими. Сферические фронты падающих волн можно считать достаточно плоскими, если максимальное отклонение от плоского фронта на объекте диаметром D не превышает $0,125 \lambda$. Для обеспечения этого условия необходимо, чтобы расстояние, на котором производится измерение, было равно $R = D^2 / \lambda$. При выполнении этого условия наблюдаемые поля характеризуются дифракцией Фраунгофера. На меньших расстояниях они будут характеризоваться дифракцией Френеля [31].

Оценим угловые размеры объекта. Угловой размер объекта θ определяется формулой:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{D}{R} = \operatorname{arctg} \frac{D}{D^2 / \lambda} = \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{D} = \operatorname{arctg} \frac{\lambda}{n\lambda} = \operatorname{arctg} \frac{1}{n}, \quad (5.1)$$

где $D = n\lambda$, здесь n – число длин волн, укладываемых на габаритном размере объекта.

Из формулы (5.1) следует, чем больше длин волн укладывается на габаритном размере объекта, тем меньше должны быть угловые размеры объекта, наблюдаемые из точки локации. Если габариты объекта составляют 10λ , то угловые размеры должны быть меньше $5,7^\circ$, а при 100λ – $0,57^\circ$. Таким образом, требование дальней зоны автоматически приводит к требованию Радона, чтобы локатор принимал не веерный пучок сходящихся лучей, а по возможности один проекционный луч.

Д.Менса подробно комментирует, как развязать приемный и передающий тракт и избавиться от паразитных сигналов. Эти проблемы также нельзя оставлять без внимания в планируемом эксперименте. Приведем этот комментарий [31].

Процедура, используемая для уменьшения уровня паразитных сигналов, основана на применении когерентной компенсации, реализуемой с помощью режекторной цепи, показанной на рисунке 5.4, и осуществляемой следующим образом. Сначала система возбуждается при отсутствии объекта. Отсчет переданного сигнала объединяется с отсчетом принятого сигнала, пропущенного через фазовращатель и аттенюатор, как показано на рисунке 5.4. Фазовращатель и аттенюатор настраиваются при отсутствии объекта, чтобы минимизировать уровень паразитных сигналов. Их настройка после установки испытуемого объекта не меняется. Временная нестабильность такой компенсации зависит от механической стабильности компонентов СВЧ-устройств и частотной стабильности СВЧ-генератора. Как правило, такой способ компенсации обеспечивает ослабление паразитных сигналов на 40 дБ.

Последовательность комплексных чисел, полученных при считывании фазы и амплитуды принятых сигналов в процессе равномерного углового поворота объекта, представляет собой дискретный вариант кольцевого спектра, изображенного на рисунке 5.1. Эта последовательность характеризует данные, которые далее должны использоваться для обработки. Поскольку независимой переменной здесь является угол, испытываемый объект вовсе не обязательно поворачивать с постоянной скоростью для того, чтобы получить отсчеты через равные угловые промежутки.

Полученная последовательность измеренных данных обеспечивает получение отсчетов двумерного пространственного спектра, равномерно расположенных на кольце радиусом $2/\lambda$.

5.3 Выбор типа волн и среды томографирования

Монохроматические колебания нужной длины волны можно получать на электромагнитных волнах в диапазоне сверхвысоких частот, а также на акустических волнах ультразвукового диапазона. Длина волны выбирается из соображений получения требуемого разрешения при синтезе апертуры. Разрешающая способность синтезированной апертуры составляет $\lambda/5$. Поэтому для траекторного контроля подойдут волны дециметрового и метрового диапазона, а для томографии подходит диапазон волн от 3 см и ниже.

Изучение литературы и сайтов свидетельствуют, что для траекторного контроля и томографии подходят как акустические волны, так и колебания электромагнитной природы. Вот некоторые источники, найденные в основном на сайтах, подтверждающие это утверждение.

1. Караман М., Тавили Б. Эффективное формирование УЗ-изображений с использованием апертурного синтеза [111]

2. Тарабрин Ю.К., Журавлев В.А, Якубов В.П., Юрьев И.А, Дураков В.Г. Применение СВЧ-томографии в медицине // LII Научная сессия, посвященная

Дню радио: <http://res.tsu.ru/Lyapunov-2001/reports/2364/index.html> – 24К – 03.10.2001.

3. Баранов В.Ю. Физические методы в биологии. СВЧ-томография: <http://kiae.polyn.kiae.su/rus/inf/bar98.htm>

В статье Баранова В.Ю. «Физические методы в биологии СВЧ-томография» сообщается, что в диапазоне СВЧ можно восстановить пространственное распределение комплексной диэлектрической проницаемости. Совместные исследования, проводимые с 1992 г. по настоящее время сотрудниками РНЦ «Курчатовский институт» (ТРИНИТИ) и Каролингского медицинского центра (г. Шарлотта, США), показали, что в указанном диапазоне частот диэлектрические свойства здоровых и ишемических (или инфарктных) участков сердечной мышцы отличаются на величину до 20%.

Из статьи Баранова В.Ю. следует, что СВЧ-излучение хорошо проникает в тело пациента и обладает хорошими диагностическими возможностями. Из публикации видно, что СВЧ-томография перспективна.

Представленный перечень публикаций свидетельствует о накопленном практическом опыте в использовании акустических и СВЧ-колебаний. Также хорошо изучены диагностические свойства этих волн в диапазоне 3 см и ниже.

Рассмотрим сначала возможность практической реконструкции изображения объектов на акустических волнах в водной среде, а затем перейдем к реконструкции на электромагнитных волнах в диапазоне частот 8–10 ГГц.

5.4 Эксперименты по реконструкции акустического изображения объекта в задачах траекторного контроля

5.4.1 Выбор способов проведения экспериментов и построение экспериментальной установки

Описание экспериментальной установки было представлено в [78].

Для акустических волн подходит водная среда, которая создает хороший

контакт с исследуемым объектом и дает возможность организовать перемещение локатора относительно него [46, 5, 63]. Акустические волны также хорошо подходят для задач траекторного контроля движущихся объектов в водной среде. Синтез апертуры осуществлялся в результате перемещения гидролокатора по прямолинейной траектории. Круговое перемещение локатора организовать сложнее. Длина волны составляла 1,3 мм. Для этого излучающий генератор должен вырабатывать частоту $f = c/\lambda = \frac{1400 \text{ м/с}}{1,3 \text{ мм}} = 1,075 \text{ МГц}$. В качестве безэховой камеры использовался пластмассовый резервуар с водой.

Сбор данных и синтез апертуры осуществлялся в области пространственных функций, т. е. регистрировались траекторные доплеровские сигналы, а не спектры, расположенные по кольцу. Синтез апертуры осуществлялся методом взаимной корреляции зарегистрированного траекторного сигнала с заранее рассчитанными опорными траекторными сигналами для односточечных объектов. Полученная матрица комплексных чисел визуализировалась программой «MathCad» или превращалась в изображение с помощью специально разработанной программы. Чтобы обработать матрицу и построить изображение, программа должна выполнять следующие функции.

1. Поиск максимума (путем перебора всех элементов двумерного массива).
2. Разбивку интервала от нижнего порога до найденного максимума на шестнадцать равных интервалов (установка 16 пороговых уровней).
3. Определение градаций цветности каждого элемента массива и присвоение ему одного из шестнадцати цветовых оттенков. Для этого сравнивался модуль каждого элемента массива с шестнадцатью пороговыми уровнями. Таким образом, производилась перекодировка модуля комплексного элемента массива в цветовой пиксель.
4. Развертка элементов массива из цветовых пикселей в декартовой системе координат.

Эксперименты проводились с простейшими объектами, например, лопаткой обыкновенной отвертки или ее ручкой. Использовался также биологический объект, палец пациента. Это позволило легче разобраться с результатами томографии. При этом перемещались объекты относительно локатора. В случае неподвижного локатора отсутствуют паразитные траекторные сигналы, полученные в результате отражения от стенок резервуара с водой. Паразитные отражения от неподвижных предметов сворачиваются на нулевую доплеровскую частоту и фильтруются. Таким образом, движущийся испытуемый объект подвергается дополнительной доплеровской селекции.

Другой причиной стационарной фиксации локатора являлась конструктивная сложность его перемещения из-за того, что он связан проводами с источником питания и регистрирующим устройством. Разумеется, в случае использования синтеза апертуры для реальной томографии надо идти на некоторые конструктивные трудности для обеспечения комфорта пациента. Перемещаться должен локатор, а не пациент.

Следующим необходимым усложнением экспериментальной установки была организация второго квадратурного канала. Квадратурная составляющая траекторного сигнала нужна для получения комплексного сигнала, который позволит получить огибающую взаимной корреляционной функции.

Получить доплеровский сигнал на нулевой промежуточной частоте можно, если смешать отраженный сигнал с зондирующим сигналом на нелинейном элементе и отфильтровать биения. Однако это является не лучшим решением, так как принимающим пьезодатчиком помимо траекторного доплеровского сигнала будут восприниматься турбулентности, спектр которых лежит как раз на низкой частоте. В дальнейшем невозможно будет выделить траекторный сигнал на фоне турбулентных помех, так как их спектры перекрываются. Проблему решает перенос принятого траекторного сигнала с выхода принимающего пьезодатчика на высокую промежуточную частоту. Таким образом, спектр турбулентности остается на низкой частоте и, не попав

на высокую промежуточную частоту, фактически отфильтровывается.

Траекторный сигнал, оказавшись на высокой промежуточной частоте, благополучно усиливается. Так как основное усиление тракта предусмотрено на высокой промежуточной частоте, то чувствительность доплеровского локатора будет определяться, в основном, коэффициентом усиления этого тракта. Таким образом, траекторный сигнал усилится на промежуточной частоте, а турбулентные помехи окажутся достаточно хорошо подавленными.

Еще одной проблемой при проведении эксперимента являются диаграммы излучения и приема пьезодатчиков, а также развязка между датчиками. На вход принимающего датчика поступают слабый отраженный сигнал от объекта и сильный сигнал подсвета от излучателя. Подсвечивающий сигнал после серии преобразований сворачивается на нулевую частоту, т. е. дает постоянную составляющую на выходе приемника. При этом величина и знак постоянной составляющей будет зависеть от фазы прихода в приемник прямой волны от излучателя и волн, отраженных от неподвижных мешающих объектов. Настройкой расстояния между излучающим и принимающим датчиком можно свести постоянную составляющую к нулю.

Спектр доплеровских частот расположен от нуля до $2v/\lambda$, где v – скорость локатора относительно объекта, при разнесении их на бесконечно большое расстояние. Поскольку низкие частоты траекторного сигнала несут больше информации, чем высокие частоты, то не следует где-нибудь в тракте потерять низкие частоты из-за разделительных межкаскадных конденсаторов.

Остановимся на требованиях к диаграммам приема и излучения. Необходимо иметь изотропную диаграмму в плоскости, проходящей через траекторию относительного движения и центр объекта. А в плоскости, перпендикулярной траектории, хотелось бы иметь диаграмму с возможно меньшим углом расхождения. Следовательно, апертура пьезодатчиков должна быть бесконечно малой в направлении вдоль траектории относительного движения и размер апертуры датчика надо увеличивать до нескольких λ в

направлении, перпендикулярном траектории движения локатора.

В качестве безэховой камеры использовался пластмассовый резервуар с водой. Водная среда обеспечивает хороший контакт с объектом. Кроме того, в воде можно легко организовать движение локатора или объекта при сохранении акустического контакта между ними через водную среду.

Пластмассовый резервуар выбран потому, что из-за близости волновых сопротивлений воды и пластмассы на границе стенок резервуара с водой не будет отражений. Это приближает эксперимент к опытам в безэховой камере.

Водная среда подобно гелю обеспечивает безэховый контакт локатора с биологическим объектом. Разница в коэффициентах преломления водной среды и человеческого тела незначительна, поэтому отражения на границе двух сред практически отсутствуют и акустические сигналы через водную среду без препятствий проникают к диагностируемым областям объекта.

Водная среда создает хороший акустический контакт ультразвукового локатора с металлическими объектами. Металл в водной среде дает очень хорошее отражение на границе двух сред, т. е. является идеальным объектом для локации. Результаты локации металлических предметов с синтезом апертуры можно отнести к задачам траекторного контроля движущихся объектов.

Функциональная схема гидролокатора представлена на рисунке 5.5. На нем приняты следующие обозначения:

1 – пьезоизлучатель; 2 – принимающий пьезодатчик; 3 – генератор зондирующего сигнала с частотой 1,075 МГц; 4, 6, 9, 10 – преобразователи частоты; 5 – фильтр 465 КГц ($\Delta f = 8$ КГц); 7 – вспомогательный генератор, производящий промежуточную частоту 610 КГц; 8 – усилитель промежуточной частоты $(f_s + F_d - 465 \text{ КГц})$, где f_s – излучаемая частота 1,075 МГц, $F_d = 2v_{\text{от}}/\lambda$ – доплеровская частота; 11 – фазовращатель, поворачивающий фазу сигнала на 90° ; 12, 13 – усилители низкой частоты для усиления доплеровского сигнала; 14, 15 – аналого-цифровые преобразователи; 16 – персональный компьютер.

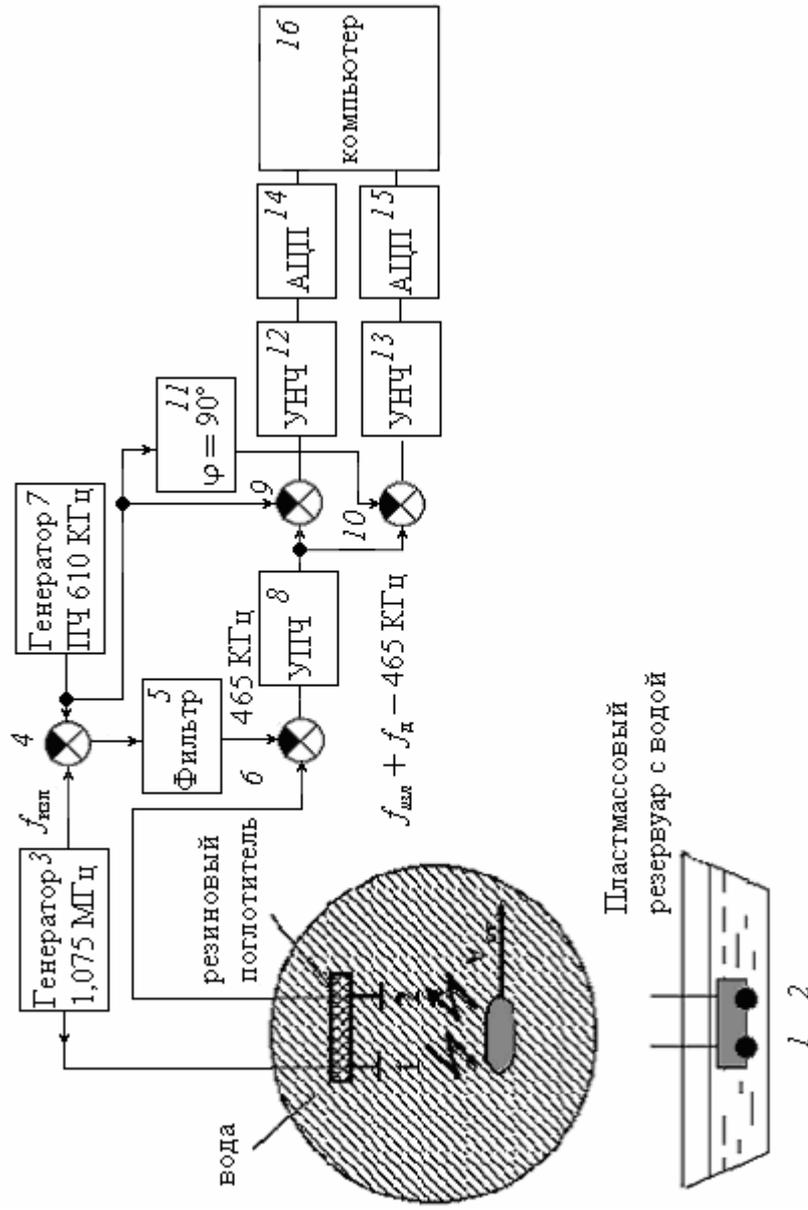


Рисунок 5.5 – Функциональная схема доплеровского гидролокатора

На выходе гидролокатора получаются два доплеровских сигнала, сдвинутых по фазе на 90° . Про такие сигналы говорят, что они находятся в квадратуре. Из них образуется комплексный сигнал, необходимый для свертки, в которую входят операции прямого и обратного преобразования Фурье, работающие с комплексными числами.

Монохроматический зондирующий сигнал представлял собой акустические колебания с длиной волны $\lambda = 1,37$ мм, распространяющиеся в воде при температуре 23° С. Размеры пьезоизлучателя и принимающего пьезоэлемента в направлении траектории движения составляли 1 мм.

Излучающий и принимающий пьезоэлементы были зафиксированы неподвижно на поглощающей звук резине на расстоянии 6 мм друг от друга.

Передвижение предметов производилось со скоростью, близкой к 0,3 м/с.

Доплеровский приемник переносил принятый сигнал на высокую промежуточную частоту $f_z = 610$ МГц, и после фильтрации и усиления принятый сигнал возвращался на нулевую частоту.

5.4.2 Устройство экспериментальной установки

Излучающий и принимающий пьезодатчики

В задачах траекторного контроля нет особых требований к диаграмме направленности антенной системы. Желательно иметь антенну с изотропной диаграммой направленности. Требования к направленности диаграммы могут уточняться в связи со спецификой задач работы неконтактного взрывателя.

При томографии требования к антенне были сформулированы в разделе 2.2. Для практики томографирования антенна должна иметь ширину основного лепестка 5° в плоскости, перпендикулярной траектории движения локатора. Диаграмма антенны не должна обладать направленностью в плоскости, проходящей через траекторию. Ориентация главного лепестка должна быть такой, чтобы он рассекал томографируемый объект и давал требуемое сечение. Для обеспечения угловой ширины лепестка 10° апертура антенны в плоскости, пер-

пендикулярной траектории, должна иметь размер $D = \lambda / \theta = 1,3 / 0,17 = 7,4$ мм, где θ – угловая ширина диаграммы в радианах. 10° соответствуют $0,17$ рад.

Определим размеры дальней зоны. Она определяется размером наибольшей апертуры антенны [44], который равен $7,4$ мм.

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot 7,4^2}{1,3} = 85 \text{ мм} = 8,5 \text{ см.} \quad (5.2)$$

Это конструктивно приемлемое расстояние.

В настоящее время все ультразвуковые томографы осуществляют контакт с пациентом без учета дальней зоны. Расстояние до границы дальней зоны может превышать размер томографируемой области. Как правило, томографирование ведется в ближней зоне. При этом диаграмма антенны напоминает луч прожектора с поперечным размером, равным апертуре антенны.

В методе Д.Менсы необходимо учитывать дальнюю зону, связанную с апертурой (размерами) объекта. Эта зона не является ограничением для предлагаемого метода томографии. Она создает проблемы при томографировании лишь в спектральной области [31].

Если апертура томографируемого объекта (пациента) составляет 30 см, то размеры дальней зоны для проекционного метода определяются как $2D^2 / \lambda = 2(300)^2 / 1,3 = 183$ м.

Если синтезировать апертуру в трех взаимно перпендикулярных направлениях, потребуется изотропная диаграмма во всех плоскостях. Значит размеры апертуры антенны в любой плоскости не превысят $\lambda/2$. При такой апертуре антенны размер зоны Фраунгофера сокращается до $\lambda/2$ и проблема дальней зоны исчезает вообще.

Пьезодатчики нужных размеров были изготовлены из пьезокерамических пластин толщиной $0,5$ мм с металлизированной поверхностью. Общий вид пьезодатчиков представлен на рисунке 5.6. При конструировании датчиков полагалось, что ширина диаграммы направленности определяется размерами его апертуры [37, 44, 45, 50] в соответствии с формулой:

$$\theta = \lambda / D , \quad (5.3)$$

где θ – угловая ширина диаграммы излучения или приема в радианах, D – размер апертуры датчика в плоскости диаграммы.

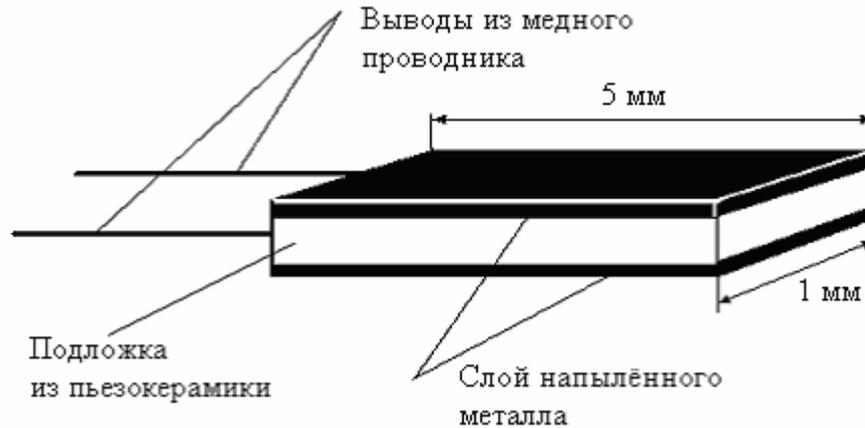


Рисунок 5.6 – Конструкция пьезодатчика

В эксперименте датчик располагался таким образом, что его апертура вдоль траектории составляла 1 мм. Угловой сектор излучения по уровню 0,707 в плоскости, проходящей через траекторию относительного движения, в соответствии с формулой (5.3) составлял 70° . В плоскости, перпендикулярной траектории относительного движения, проекция апертуры излучателя составляла 5 мм. Таким образом, в этой плоскости, согласно формуле (5.3), угловая ширина сектора излучения составляла 15° .

Приемник и передатчик локатора

Блоки приемника и передатчика связаны между собой в соответствии со структурной схемой, приведенной на рисунке 5.5. На рисунке 5.7 представлен генератор зондирующего сигнала. Выходной каскад генератора собран по двухтактной схеме на транзисторах КТ 603 и является буфером между задающим генератором и излучающим датчиком. При погружении излучающего датчика в воду значительно изменялись его параметры, а именно, увеличивалась входная емкость датчика и уменьшалось его входное сопротивление.

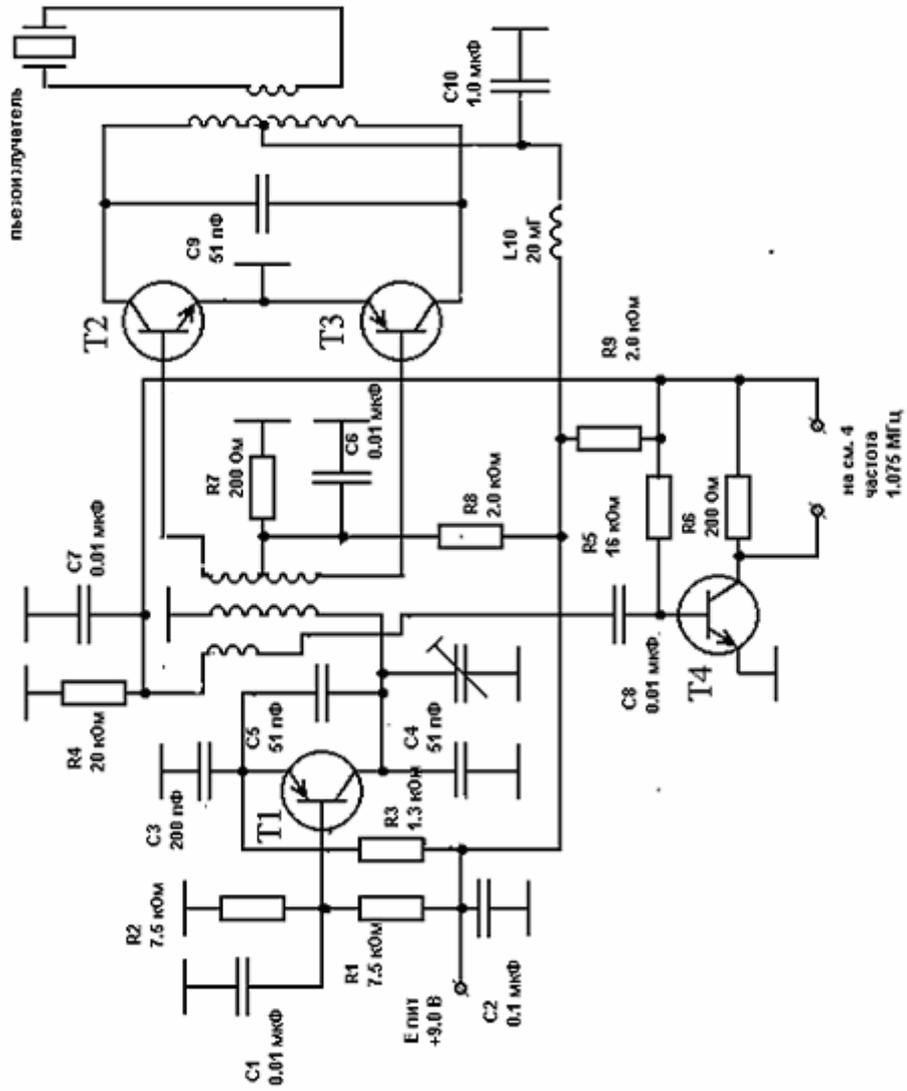


Рисунок 5.7 – Генератор зондирующего сигнала

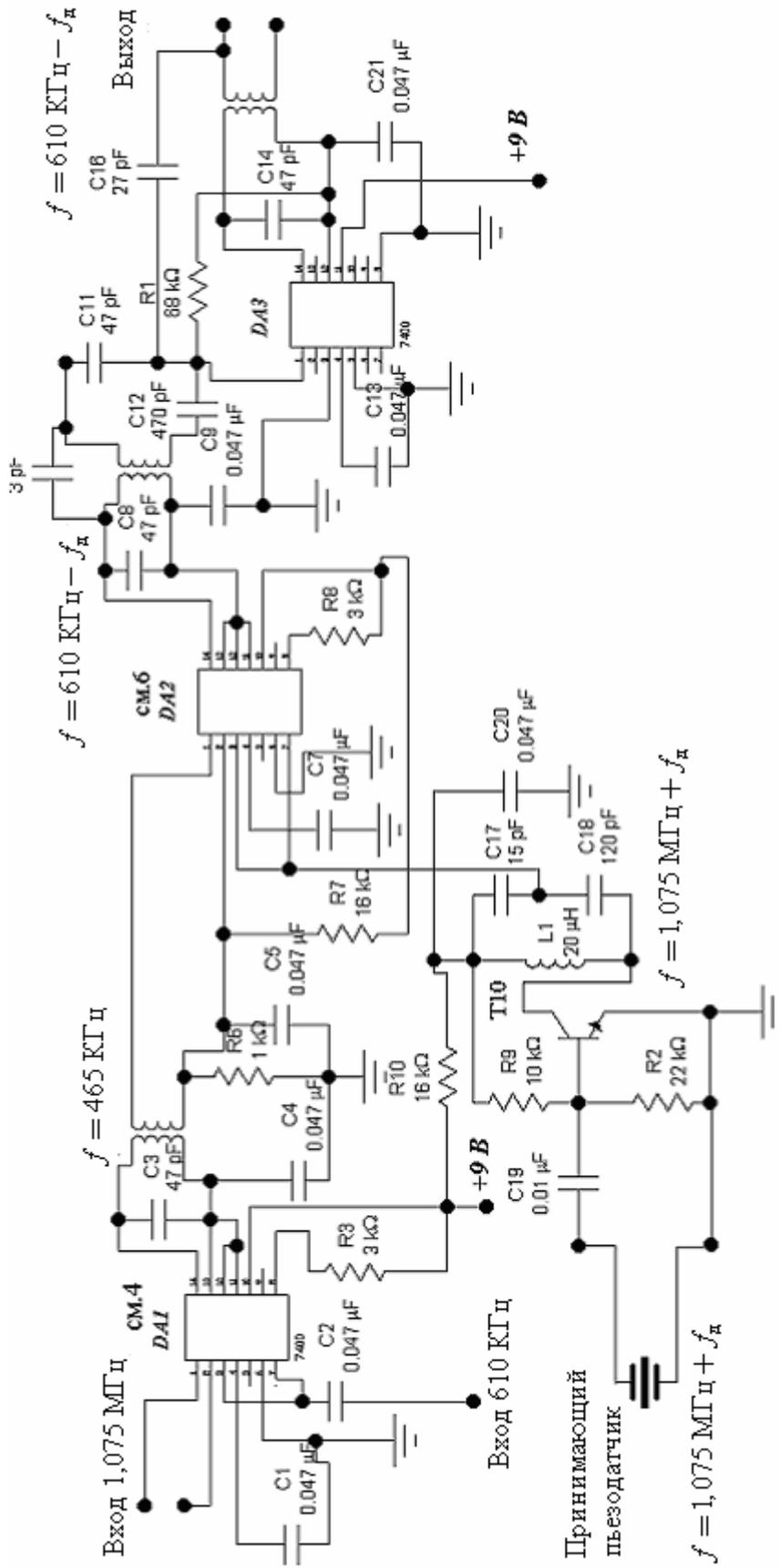


Рисунок 5.8 – Основная часть приемника гидролокатора

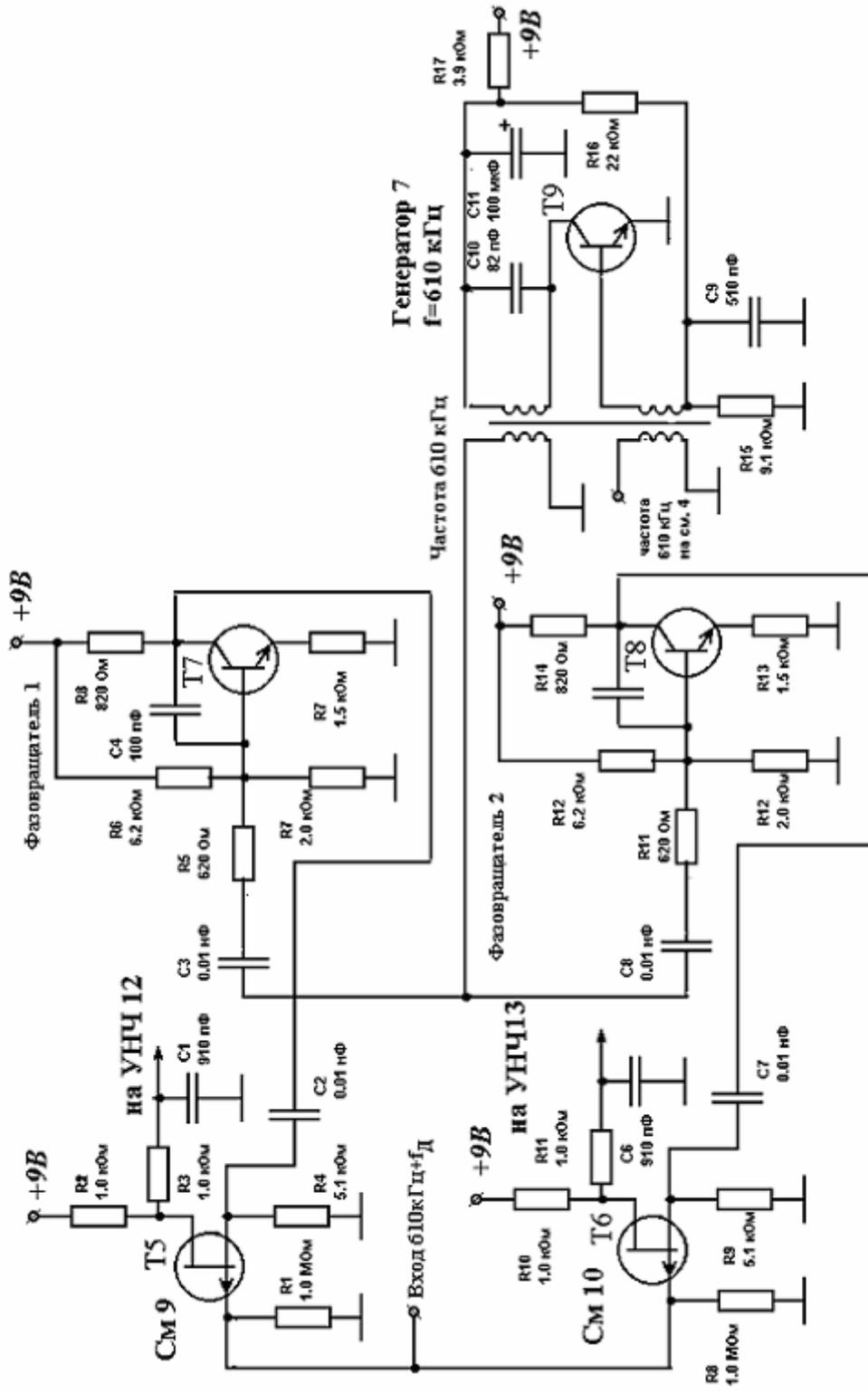


Рисунок 5.9 – Блок квадратурных каналов с переносом принятого сигнала на нулевую частоту

Двухтактный буферный каскад позволил исключить влияние датчиков на задающий генератор (транзистор Т1, рисунок 5.7) и повысил стабильность частоты задающего генератора, а также увеличил мощность зондирующего сигнала. Задающий генератор, выполненный на транзисторе 1Т 308 совместно с генератором подставки 610 КГц (транзистор Т9, рисунок 5.9), использовался для создания дополнительной разностной частоты $1,075 \text{ МГц} - 610 \text{ КГц} = 465 \text{ КГц}$. Частота 1,075 МГц снималась с задающего генератора через отдельный буферный каскад на транзисторе Т4 (КТ 361) и подавалась на смеситель 4 (рисунок 5.8), который выполнен на микросхеме 2 УС 282. Разностная частота 465 КГц с вывода смесителя 4 фильтровалась высокодобротным контуром и поступала на смеситель 6 (рисунок 5.8). На второй вход смесителя 6 поступал принятый сигнал, предварительно отфильтрованный от турбулентных помех и усиленный резонансным усилителем на частоте 1,075 МГц.

После смесителя 6 принятый сигнал оказывался перенесенным на промежуточную частоту 610 КГц, равную разности частот 1,075 МГц и 465 КГц. Эта частота называется частотой подставки. На ней производилось основное усиление принятого сигнала. Усиленный сигнал с доплеровским смещением частоты поступал на два смесителя 9 и 10, которые выполнены на полевых транзисторах КП 307. На истоки этих транзисторов подавались гетеродинные напряжения с частотой подставки, т. е. 610 КГц. На смеситель 9 (транзистор Т 5) гетеродинное напряжение поступало сдвинутым по фазе на 90° относительно гетеродинного напряжения, поступавшего на смеситель 10. Сдвиг обеспечивался фазовращателями, выполненными на транзисторах Т7 и Т8. В фазовращателях применялись транзисторы типа КТ 301.

Нагрузкой смесителей 9 и 10 являлись RC-фильтры нижних частот, пропускающие постоянную составляющую. С RC-фильтров доплеровские траекторные сигналы поступали на усилители низкой частоты, пропускающие постоянную составляющую. Требуемая полоса пропускания усилителей низкой частоты от 0 до $2\nu/\lambda$. При скорости $\nu = 0,3 \text{ м/с}$ максимальная частота Доплера

составляла 600 Гц. Максимальная полоса УНЧ не превышала двух килогерц.

Напряжения с двух квадратурных каналов поступали на аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и вводились в персональный компьютер.

Эксперименты проводились в пластмассовом резервуаре. Положенная на края резервуара доска служила платформой, на которой располагался приемник и передатчик локатора с элементами питания. Датчики, закрепленные на резиновой полоске, опускались в воду и фиксировались неподвижно в центре резервуара на деревянной платформе (рисунок 5.10).

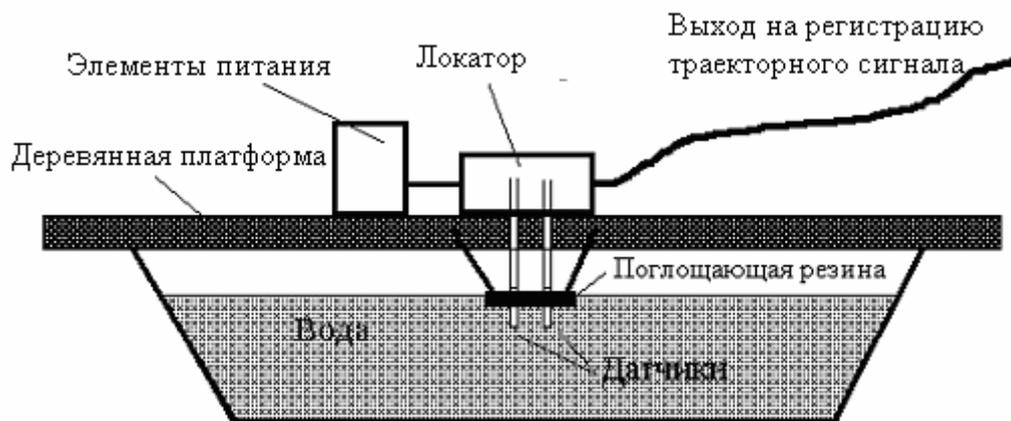


Рисунок 5.10 – Установка для проведения экспериментов

Движение предметов производилось параллельно деревянной платформе на некотором расстоянии от датчиков. Сигнал записывался на бытовой стереомагнитофон «Комета 206». Частотная характеристика указанного магнитофона имела полосу пропускания от 40 Гц до 16 КГц при скорости ленты 19 см/с. Далее сигнал с магнитофона через АЦП вводился в персональный компьютер. Ниже приводятся характерные траекторные сигналы для простейших объектов.

5.4.3 Экспериментальные траекторные сигналы и их спектры, сопоставление с модельными траекторными сигналами, результаты реконструкции

Материал раздела опубликован в [78]. На рисунке 5.11 в верхней части представлен траекторный сигнал, отраженный от лопатки тонкой отвертки. Ширина лопатки 5 мм. Относительная скорость перемещения отвертки 0,28 м/с. $\lambda = 1,3$ мм, шаг отсчетов по времени 0,0004 с. В нижней части рисунка пред-

ставлен спектр траекторного сигнала.

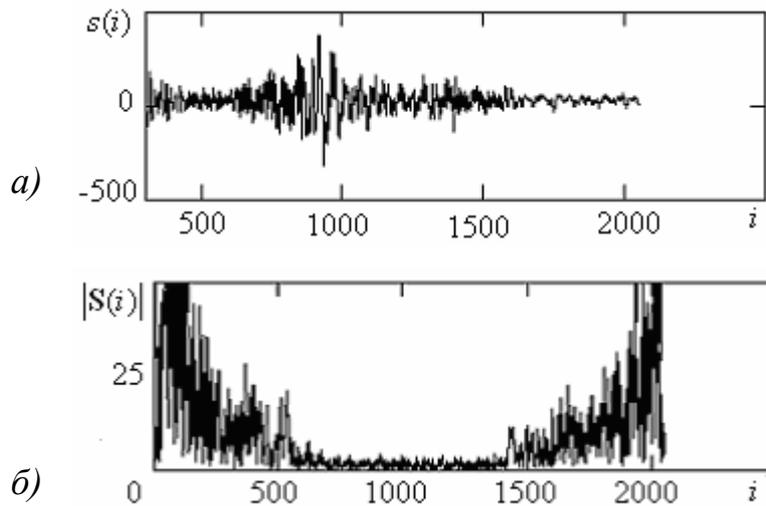


Рисунок 5.11 – Лопатка тонкой отвертки: *a)* траекторный сигнал, *б)* его спектр

В области нулевых частот (рисунок 5.11, *б)* значения спектра уменьшаются до нуля. По этому провалу спектра можно судить о частотной характеристике тракта. Постоянная составляющая и область частот от 0 до 40 Гц были потеряны в магнитофоне, не пропускающем эти частоты. Оценим, к каким последствиям может привести такое усечение спектра. Для этого проведем модельный эксперимент с одноточечным объектом. На рисунке 5.12, *a)* представлен траекторный сигнал от одноточечного объекта, а на рисунке 5.12, *б)* изображен его спектр.

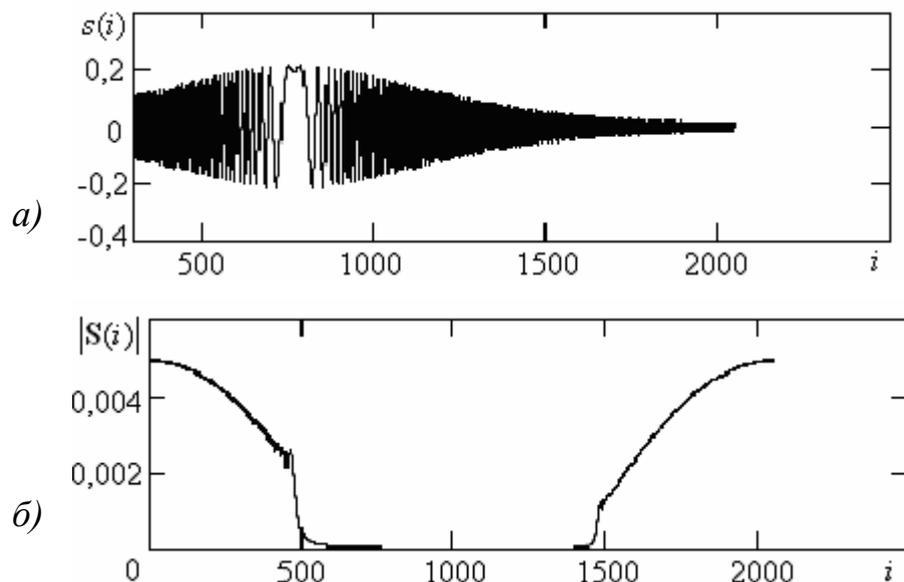


Рисунок 5.12 – Расчетные данные: *a)* траекторный сигнал одноточечного объекта; *б)* спектр траекторного сигнала

На спектре траекторного сигнала хорошо видна постоянная составляющая в области нулевых частот. Отсечем низкочастотную часть спектра. Отсечение полосы частот от 0 до 40 Гц означает, что мы отказываемся принимать сигнал в тот момент, когда локатор находится на малой дальности от объекта, т. е. как раз на промахе. В районе промаха принимается самая большая амплитуда сигнала и регистрируются самые низкие частоты вместе с постоянной составляющей.

Случай приема без низких частот можно назвать синтезом апертуры с исключенной центральной областью. Можно прибегнуть к оптической аналогии, представив себе линзу, у которой заклеен центр непрозрачным пятном.



Рисунок 5.13 – Изображение одноточечного объекта.

Посмотрим, как будет выглядеть изображение одноточечного объекта после отсечения низких частот спектра траекторного сигнала, т. е. после прохождения сигналом тракта стереомагнитофона. Смоделируем прохождение сигнала через магнитофонный тракт. Для этого отсечем низкочастотную часть спектра с помощью фильтра, частотная характеристика которого представлена на рисунке 5.14.

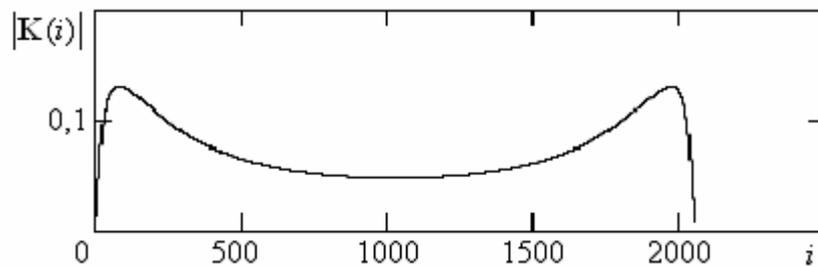


Рисунок 5.14 – Модель частотной характеристики магнитофона

Такую характеристику дает рекурсивный цифровой фильтр, разностное

уравнение которого имеет вид:

$$s(k) = a_0 s_{bx}(k) + a_1 s_{bx}(k-1) + a_2 s_{bx}(k-2) + b_1 s(k-1) + b_2 s(k-2), \quad (5.4)$$

где $s(k)$ – отсчеты выходного сигнала; $s_{bx}(k)$ – отсчеты входного сигнала; $k = 3, 4, 5, \dots, 2050$; $a_0 = 1$; $a_1 = -2$; $a_2 = 1$; $b_1 = 1,43$; $b_2 = -0,47$.

На рисунке 5.15, *a* представлен траекторный сигнал одноточечного объекта, прошедший магнитофонный тракт, т. е. траекторный сигнал от одноточечного объекта с усеченным спектром в районе от 0 до 40 Гц.

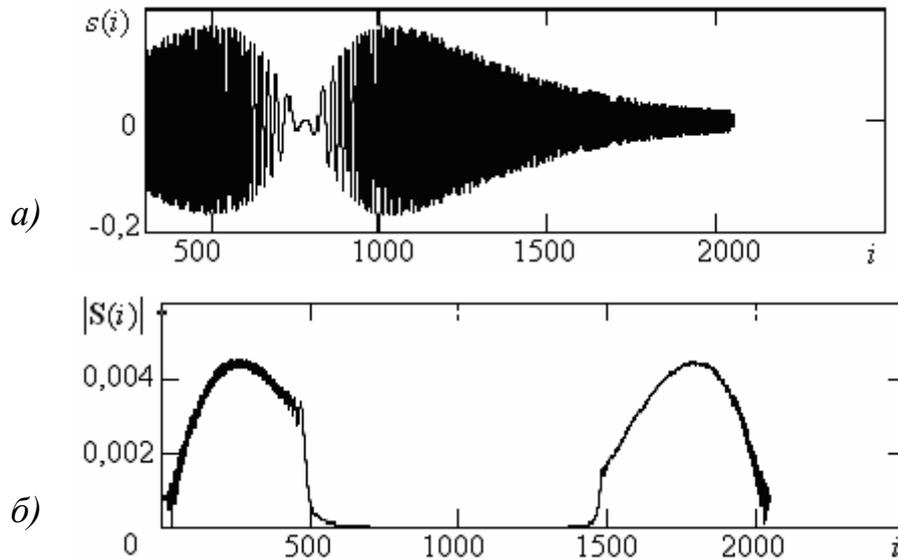


Рисунок 5.15 – Результаты моделирования: *a*) вид траекторного сигнала после подавления нижних частот и постоянной составляющей в тракте магнитофона; *б*) спектр траекторного сигнала одноточечного объекта, с подавленными нижними частотами

Сравнив рисунки 5.15, *a* и 5.12, *a*, убеждаемся, что усечение спектра в области низких частот приводит к искажению формы траекторного сигнала. На рисунке 5.16 представлено изображение одноточечного объекта, спектр сигнала которого был подавлен в области нижних частот в тракте магнитофона. Теперь на изображении одноточечного объекта проявились четыре лепестка вместо двух (ср. рисунки 5.13 и 5.16), а это является искажением передаточной функции точки. Результаты моделирования (рисунки 5.13 и 5.16) показывают, что не следует терять низкочастотную часть спектра траекторного сигнала.

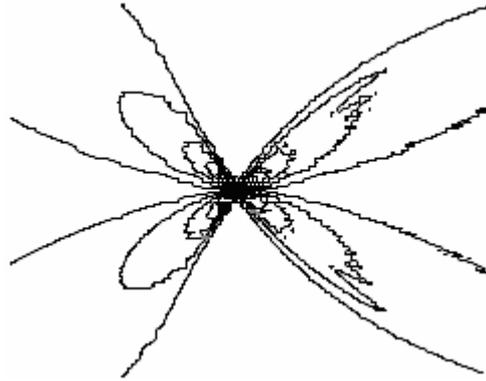


Рисунок 5.16 – Изображение одноточечного объекта после усечения спектра в области нижних частот.

На рисунке 5.17, *a* представлен траекторный сигнал от плоской части отвертки после коррекции.

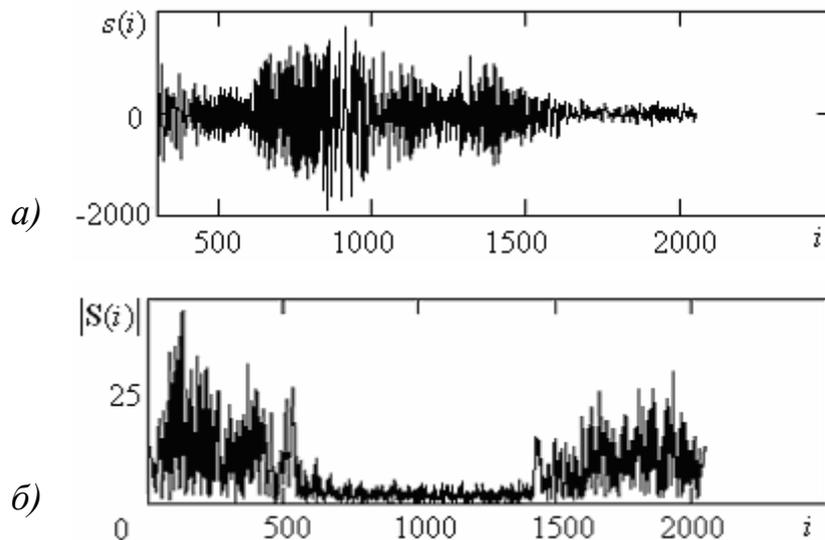


Рисунок 5.17 – Экспериментальные данные: *a*) траекторный сигнал от лезвия отвертки в районе лопатки после низкочастотной коррекции; *б*) спектр траекторного сигнала после низкочастотной коррекции

Из сопоставления рисунков 5.17, *a* и 5.11, *a* хорошо видно появление длинных флюктуаций на рисунке 5.17, *a*. Длинные флюктуации свидетельствуют о появлении низкочастотных составляющих спектра после коррекции. Частотная характеристика корректирующего фильтра, поднимающая низкие частоты, представлена на рисунке 5.18.

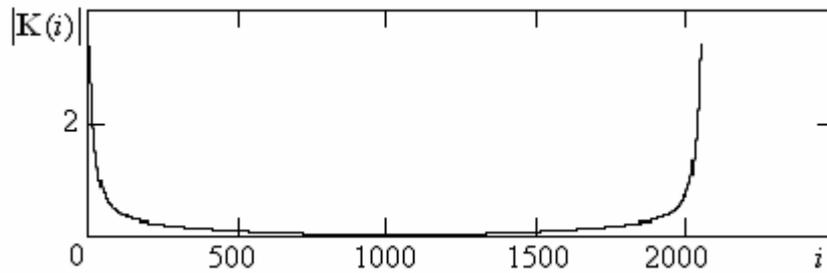
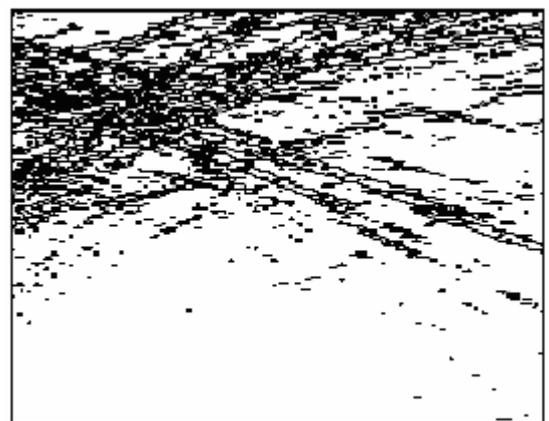


Рисунок 5.18 – Фильтр, частично компенсирующий завал частотной характеристики в области нижних частот у магнитофона

На рисунке 5.19, *а* представлена картина сечения стержня отвертки, построенная по нескорректированному траекторному сигналу. На рисунке 5.19, *б* представлена картина сечения этого же объекта, но после низкочастотной коррекции спектра траекторного сигнала с магнитофона.



а)



б)

Рисунок 5.19 – Результаты эксперимента: *а)* картина сечения стержня тонкой отвертки в районе лопатки без коррекции спектра траекторного сигнала в области нижних частот; *б)* картина сечения стержня тонкой отвертки в районе лопатки с коррекцией спектра траекторного сигнала в области нижних частот

На обеих картинах хорошо видны сгустки плотности отражения ультразвуковой волны в месте расположения стержня отвертки. Так как при линейном апертурном синтезе объекты на картинах отображаются вместе со своими диаграммами обратного рассеяния, то не следует ожидать четкого изображения сечения стержня отвертки. Гораздо лучшие результаты получаются при синтезе апертуры в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Картина плотности отражения на изображениях (рисунки 5.19, *а* и *б*) напоминает по форме такую же «бабочку» как та, что представлена на рисунке 5.16. Такое расщепление диаграммы обратного рассеяния на лепестки, возможно, происходит из-за отсутствия постоянной составляющей и подавленных низких частот, которые не удалось полностью восстановить при коррекции. Однако возможна и другая причина расщепления изображения на лепестки – это ориентация лопатки отвертки относительно траектории. Если плоскость лопатки во время эксперимента была ориентирована перпендикулярно к траектории движения, то также возможно расщепление диаграммы обратного рассеяния на лепестки (см. рисунок 2.55, *б*). Такое расщепление объясняется тем, что лопатка, плоскость которой ориентирована перпендикулярно траектории движения, практически не излучает в направлении, перпендикулярном к траектории движения. Значение амплитуды траекторного сигнала в момент промаха стремится к нулю. В этот момент стремится к нулю и частота траекторного сигнала (см. рисунок 2.52). При этом исчезает постоянная составляющая спектра, а также низкие частоты в районе постоянной составляющей. Такой сигнал пройдет через магнитофонный тракт без искажений. При эксперименте плоскость лопатки была наклонена к траектории и угол между плоскостью лопатки и линией траектории составлял приблизительно 20° . Этим наклоном и объясняется несимметрия лепестков изображения в виде бабочки на экспериментальных изображениях (рисунок 5.19). Возможно, при угле 90° была бы некоторая симметрия лепестков.

В первом эксперименте ввод отсчетов траекторного сигнала в персональный компьютер начался с опозданием (рисунок 5.11). Поэтому объект на изображении смещен вверх. Во втором эксперименте диаграммный диск пьезодатчиков «рассекал» металлический стержень отвертки в средней части. Лопатка отвертки находилась за пределами диаграммы направленности пьезодатчиков. Траекторный сигнал для второго эксперимента и его спектр показаны на рисунке 5.20. В этом эксперименте потеряна часть начальных отсчетов из-за несвоевременного начала ввода аналогового сигнала в персональный компьютер.

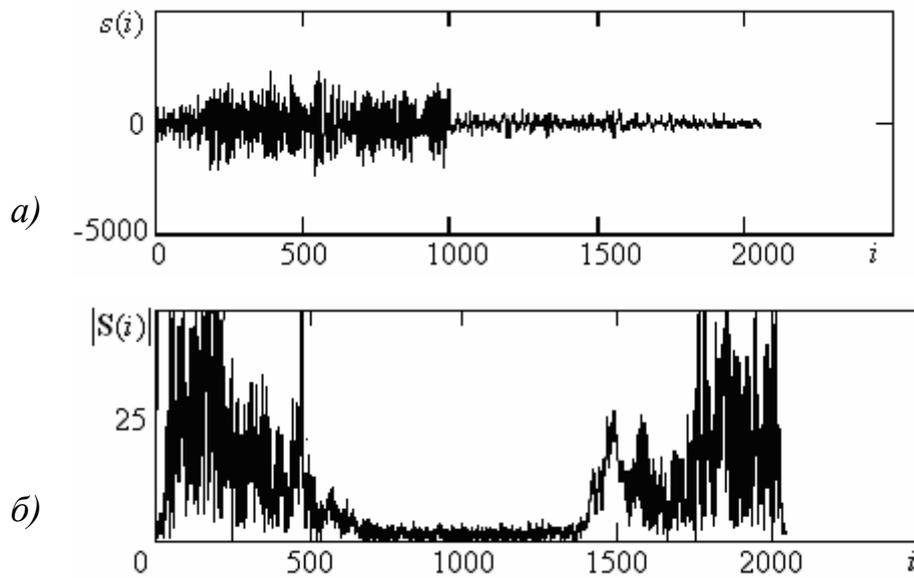
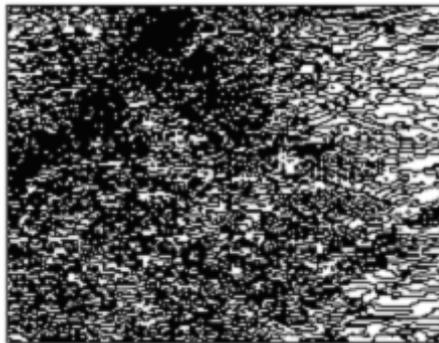


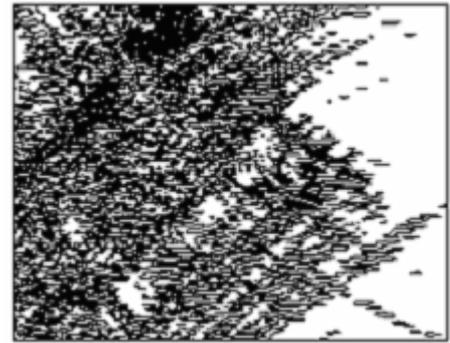
Рисунок 5.20 – Экспериментальные данные: *а)* траекторный сигнал; *б)* спектр траекторного сигнала

Шаг отсчетов траекторного сигнала по времени составлял 0,0006 с, а относительная скорость локатора и отвертки равнялась 0,28 м/с.

На рисунке 5.21, *а)* представлена картина сечения металлического стержня диаметром 5 мм, построенная по нескорректированному сигналу.



а)



б)

Рисунок 5.21 – Результаты реконструкции изображения: *а)* картина сечения стержня отвертки, полученная по нескорректированному сигналу; *б)* картина сечения, построенная по скорректированному траекторному сигналу

На рисунке 5.21, *б)* представлена картина сечения стержня, построенная по скорректированному сигналу, т. е. после подъема нижних частот спектра.

На изображении (рисунок 5.21) хорошо видна область с высокой плотностью отражения, дающая картину сечения стержня. На ней проявилась также диаграмма обратного рассеяния акустических волн, отдаленно напоминающая бабочку. Это результат частичного восстановления низкочастотного спектра и постоянной составляющей. При вводе траекторного сигнала в персональный компьютер отсчеты брались с избытком через 200 мкс. В процессе обработки сигнала была возможность прореживать отсчеты. На рисунке 5.22 представлены картины, полученные по прореженным в полтора раза отсчетам.

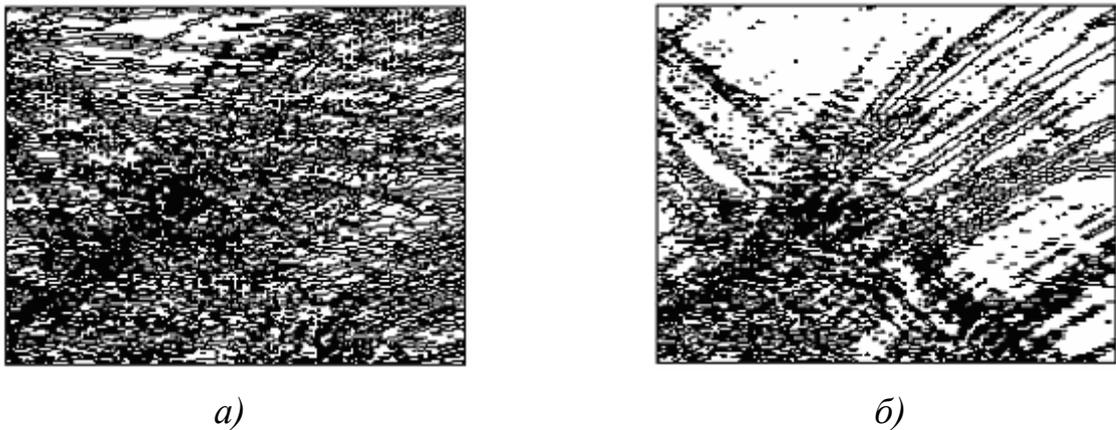


Рисунок 5.22 –Картина сечения стержня, полученные при прореженных отсчетах траекторного сигнала: а) коррекция траекторного сигнала не проводилась; б) картина построена после низкочастотной коррекции сигнала

Таким образом, прореживая отсчеты траекторного сигнала, можно уменьшать размер изображения.

Перейдем к экспериментам со слабо отражающими предметами, такими как ручка отвертки из пресс-порошка К–1832 и палец пациента. Как правило, слабо отражающие предметы состоят из материала, в котором скорость распространения ультразвуковой волны мало отличается от скорости распространения ультразвуковой волны среды, в которую помещен исследуемый предмет. Коэффициент отражения ультразвуковой волны на границе двух сред определяется формулой:

$$k_{otr} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \quad (5.5)$$

где z_1, z_2 – волновые сопротивления первой и второй среды.

В таблице 5.1, взятой из [14], представлены скорости распространения акустических волн и волновое акустическое сопротивление z в различных средах.

Таблица 5.1

Характеристики сред распространения акустической волны

Среда	Скорость распространения УЗ-волны, С м/с	Волновое акустическое сопротивление, $z \cdot 10^6$ с/м ³
Неорганические среды		
Воздух	343	$0,44 \cdot 10^{-3}$
Дистиллированная вода	1484	1,48
Морская вода	1510	1,51
Фтор пласт	1340	2,94
Стекло	5400	13,00
Железо	5850	45,60
Алюминий	6260	16,90
Органические среды		
Жировая ткань	1476	1,40
Мозг	1541	1,60
Кровь	>1570	1,61
Мягкие ткани	1540	1,64
Сердце	1568	1,66
Почка	1561	1,68
Селезенка	1566	1,69
Печень	1549	1,70
Мышца	1590	1,70
Камни печени	1400-2200	1,3-2,4
Кость черепа	3660-4080	6,20

Согласно вышеприведенной таблице и формуле (5.5), коэффициент отражения от железного стержня отвертки составляет 94%. Пользуясь таблицей 5.1 и формулой (5.5), оценим коэффициент отражения от стенок полихлорвинилового резервуара и ручки отвертки из пресс-порошка К-1822. Ориентировочно будем считать, что резервуар выполнен из фторопласта. Тогда коэффициент отражения от стенок резервуара с водой составит 30%. Примерно на такой же показатель коэффициента отражения следует рассчитывать при локации ручки отвертки. Коэффициент отражения от границы сред вода – мягкая ткань составляет 3–6%. Зато коэффициент отражения от границы сред мышца – кость составляет 64% [14, 34, 75]. По-видимому, при локации пальца пациента мягкие ткани будут плохо видимы на томограммах.

На рисунке 5.23 приведены действительная и мнимая части траекторного сигнала и показан спектр комплексного траекторного сигнала.

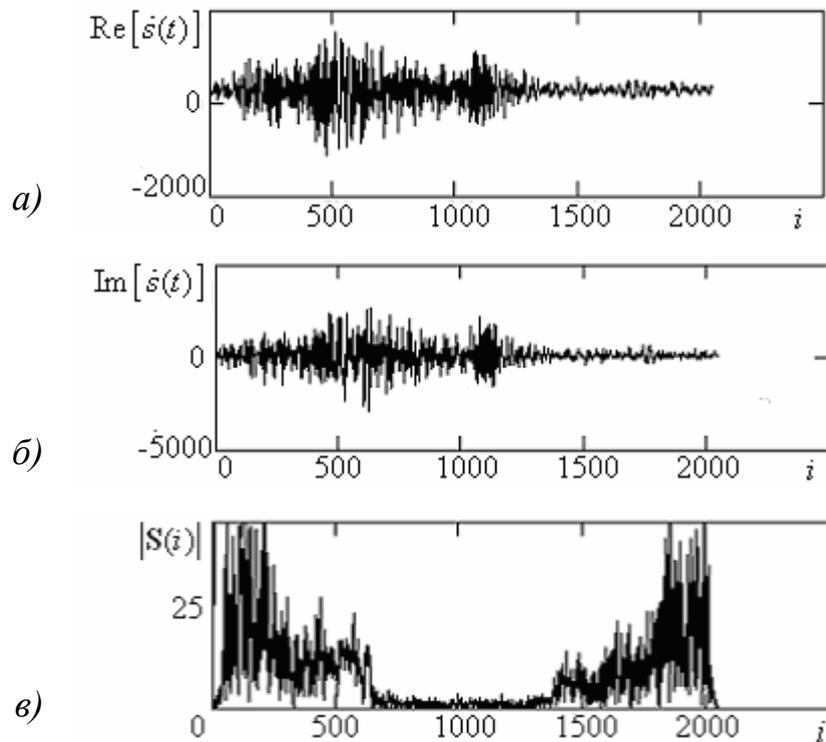


Рисунок 5.23 – Реальные сигналы: а) действительная часть траекторного сигнала; б) мнимая часть траекторного сигнала; в) спектр траекторного сигнала

В представленных ранее результатах мнимая часть траекторного сигнала опущена, чтобы не перегружать изложение материала мало полезной информа-

цией. В настоящий момент демонстрация мнимой части делается с тем, чтобы показать, что она находится в квадратуре с действительной частью траекторного сигнала. Мнимая, т. е. квадратурная часть траекторного сигнала, должна быть сдвинута по фазе относительно действительной части на 90° . Там, где имеет место максимум действительной части траекторного сигнала, в тот же момент времени должен быть «ноль» у квадратурной части сигнала. В этом легко убедиться, рассматривая рисунки 5.24, *a* и *б*, где показана начальная часть сигнала (рисунки 5.23, *a* и *б*), но при этом значительно увеличен масштаб по оси времени. Из этих рисунков видно, что мнимая часть траекторного сигнала опережает действительную на 90° .

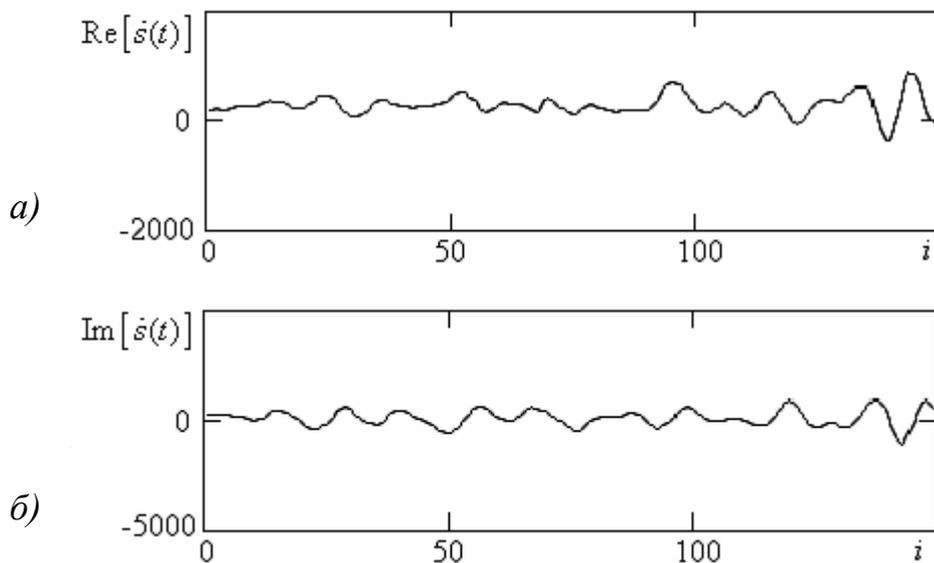


Рисунок 5.24 – Свидетельство квадратурности сигналов: *a*) действительная часть траекторного сигнала; *б*) гильбертова часть траекторного сигнала

На рисунке 5.25, *a* приведена картина сечения ручки отвертки полученная с помощью нескорректированного траекторного сигнала. На рисунке 5.25, *б* приведена картина, построенная по траекторному сигналу после низкочастотной коррекции.

Условия проведения эксперимента с ручкой отвертки следующие.

Диаметр ручки отвертки 25 мм. На ручке отвертки сделаны ребра жесткости. Представление о сечении ручки отвертки дает рисунок 5.26. Перемещение ручки отвертки производилось со скоростью 0,29 м/с.

На изображении (рисунки 5.25, *a* и *b*) видны области повышенной плотности отражения, однако они не так резко очерчены, как в случае экспериментов с железным стержнем.

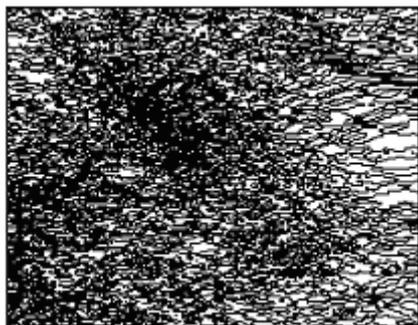
*a)**б)*

Рисунок 5.25 – Результаты реконструкции: *a)* картина сечения ручки отвертки до НЧ-коррекции сигнала; *б)* картина сечения после НЧ-коррекции

Это объясняется большей интенсивностью отражения на границе водная среда–металл по сравнению с границей раздела вода–пластмасса.

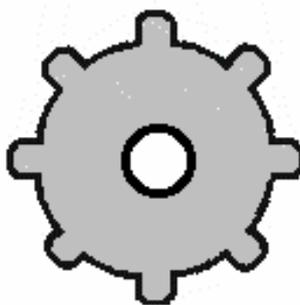


Рисунок 5.26 – Сечение ручки отвертки

Низкочастотная коррекция увеличила амплитуду передаточной функции восстановленного объекта и улучшила изображение объекта. Для плохо отражающих объектов сгусток плотности отражения выражен на реконструированном изображении более размыто, чем в случае сильно отражающих объектов.

Кроме того, границы этого сгустка плохо очерчены (ср. рисунки 5.25 и 5.22). К сильно отражающим объектам можно отнести металлический стержень.

Чтобы лучше понять результаты эксперимента, нужно учесть угловую ширину диаграммы направленности пьезодатчика в плоскости, перпендикулярной к траектории относительного движения. В идеальном случае она должна быть нулевой и эта диаграмма подобно тонкому диску должна рассекать объект плоскостью этого диска. Однако используемый датчик имеет далеко не дискообразную диаграмму. Сектор излучения в плоскости, перпендикулярной траектории относительного движения составлял около 20° (рисунок 5.27).

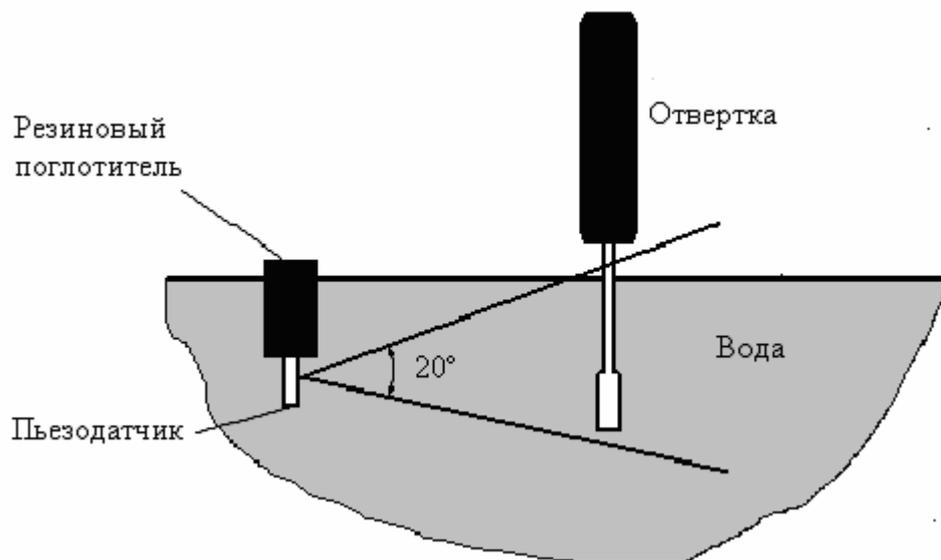


Рисунок 5.27 – Учет угловой ширины диаграммы направленности пьезодатчиков в плоскости, перпендикулярной траектории

В соответствии с рисунком 5.27 вид траекторного сигнала и его спектр будут зависеть от глубины погружения отвертки. Смоделируем влияние глубины погружения отвертки. Представим стержень отвертки многоточечной моделью длиной 5 см, у которой точки расположены в ряд вдоль стержня отвертки через $1,3\lambda$. При этом не будем учитывать отражение ультразвуковой волны от границы двух сред воздуха и воды. Этот дополнительный отрицательный фактор можно исключить или ослабить за счет сужения сектора излучения пьезодатчика с 20° до 5° . Другой путь заключается в том, чтобы эксперименты проводить на глубине, подальше от поверхности воды.

Вернемся к модели, учитывающей недискообразный вид диаграммы пьезодатчика. Если бы диаграмма была дискообразной, то при сечении ею стержня отвертки картина сечения имела бы вид круга, диаметр которого равен толщине стержня. Но так как модель стержня отвертки представляет собой тонкую нить из близко расположенных точек, то картина сечения будет представлять собой точку. Результаты реконструкции точечного объекта известны (рисунки 5.12, 5.13, 5.15, 5.16). Изображение точки имеет вид восьмерки. На рисунке 5.28 представлен траекторный сигнал и его спектр, полученные с помощью многоточечной модели стержня отвертки, в виде вертикально выстроенных точек.

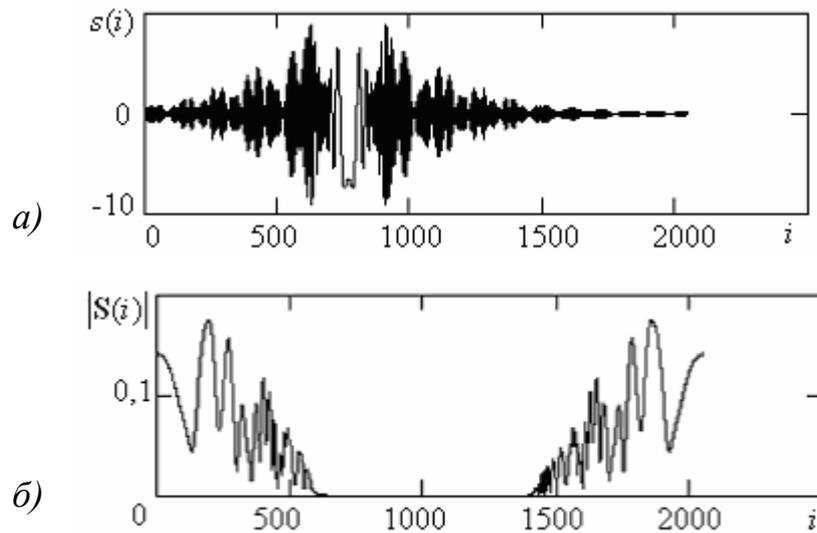


Рисунок 5.28 – Результаты моделирования: а) траекторный сигнал от стержня отвертки, рассчитанный по многоточечной модели; б) спектр траекторного сигнала

Траекторный сигнал для модели можно рассчитать по формулам:

$$s(t) = \sum_{i=1}^I \frac{A}{R_i^2} \cos\left(\frac{4\pi R_i}{\lambda}\right); \quad (5.6)$$

$$R_i = \sqrt{(x_c - vt)^2 + a^2 + (\Delta i)^2}, \quad (5.7)$$

где A – непринципиальная постоянная; x_c – длина синтезированной апертуры; a – промах; Δ – расстояние между точками многоточечной модели стержня

отвертки; v – относительная скорость; $i = 1, 2, 3, \dots, 30$ – номера точек модели; t – текущее время, R_i – текущее расстояние от i -й точки модели до локатора.

Таким образом, учтена длина стержня отвертки и «недискообразная» диаграмма пьезодатчика. На траекторном сигнале и его спектре по результатам моделирования протяженности стержня появилась заметная изрезанность. Эту изрезанность можно назвать флюктуациями. Сигнал с флюктуациями (рисунок 5.28, *a*) стал походить на реальный сигнал (рисунок 5.11).

На рисунке 5.29, *a* приводится траекторный сигнал, рассчитанный по многоточечной модели стержня отвертки по формулам (5.6), (5.7) с учетом частотной характеристики магнитофонного тракта, а на рисунке 5.29, *б* приведен спектр этого сигнала.

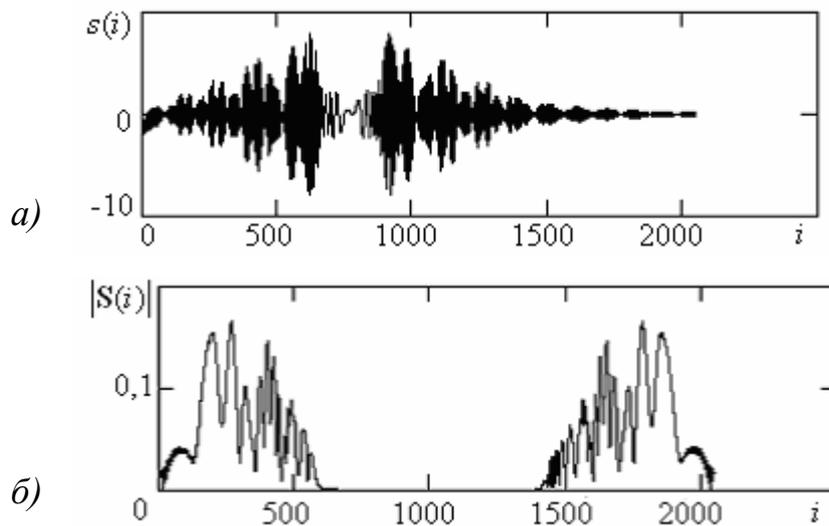


Рисунок 5.29 – Результаты моделирования: *a*) траекторный сигнал от стержня отвертки, рассчитанный по многоточечной модели с учетом усечения НЧ-спектра в тракте магнитофона; *б*) спектр моделированного траекторного сигнала

Теперь осталось выяснить, как скажется протяженность стержня отвертки на изображении его сечения. На рисунке 5.30, *a* показано изображение модели стержня отвертки в сечении.

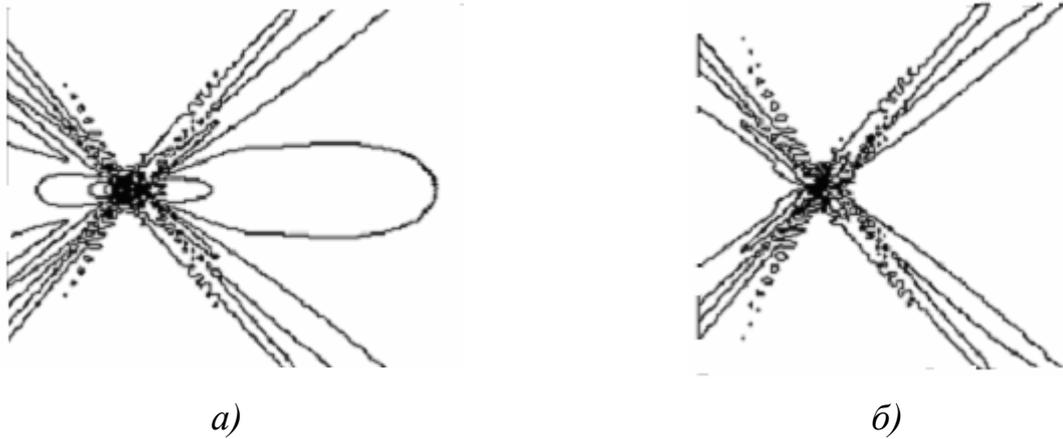


Рисунок 5.30 – Результаты модельной реконструкции: *a)* сечение стержня отвертки, построенная по траекторному сигналу (рисунок 5.28, *a)*; *б)* картина сечения стержня отвертки, построенная по траекторному сигналу (рисунок 5.29, *a)*, т. е. с учетом частотной характеристики магнитофонного тракта

Результаты моделирования стержня отвертки (рисунки 5.28 – 5.30) показали, что его протяженность приводит к флюктуациям огибающей траекторного сигнала и к размыванию границ изображения объекта. Эти результаты распространяются на слабо отражающие предметы, такие как ручка отвертки и палец пациента. На их картинах сечения сгусток плотности отражения выражен слабее, чем у сильно отражающих предметов. Кроме того, этот сгусток размыт из-за протяженности ручки отвертки или пальца пациента.

На рисунке 5.31, *a)* показан траекторный сигнал пальца пациента, а на рисунке 5.31, *б)* – спектр этого траекторного сигнала. При проведении эксперимента скорость перемещения пальца относительно локатора составляла 0,29 м/с. В этом можно убедиться по верхней частоте спектра траекторного сигнала (рисунок 5.31, *б)*). Отсчеты траекторного сигнала берутся через интервал $T=0.6$ мс. В этом случае на спектральном графике (рисунок 5.31, *б)*) ось частот простирается от 0 до $1/0,6$ мс, то есть до частоты 1,666 КГц. При продолжении оси частот в сторону бесконечности спектр будет периодически повторяться через каждые 1,666 КГц.

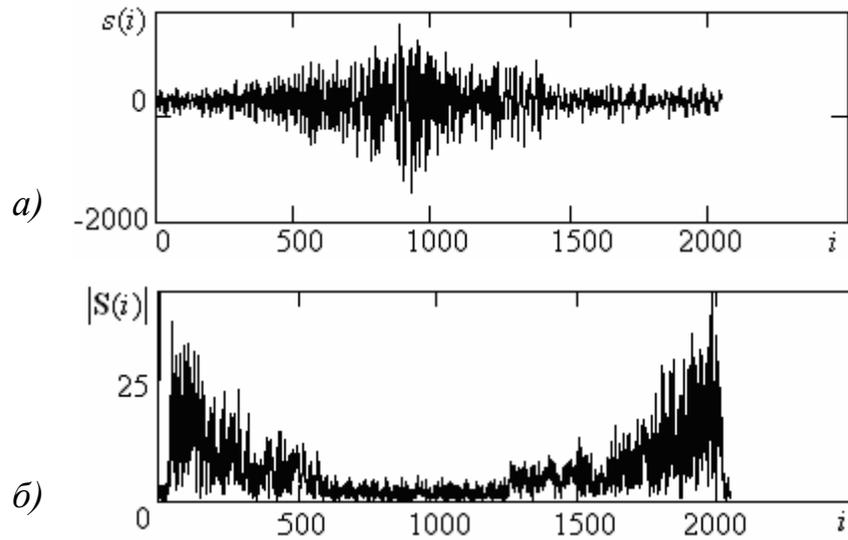


Рисунок 5.31 – Результаты эксперимента: *а)* траекторный сигнал от пальца пациента; *б)* спектр траекторного сигнала

Реальная часть спектра считается в интервале от 0 до $1,666/2$. Интервал частот от $1,666/2$ до $1,666$ КГц относят обычно к отрицательным частотам. В этом случае цена деления на оси частот будет равна $(1,666 \text{ КГц})/2048$. Тогда границе спектра доплеровских частот на делении 550 будет соответствовать частота $f = (1,666/2044)550 = 0,447 \text{ КГц}$. По этой частоте можно определить относительную скорость перемещения локатора:

$$v = \frac{f\lambda}{2 \cos \varphi} . \quad (5.8)$$

На бесконечном удалении локатора от объекта $\varphi = 0$, где φ – угол между линией визирования локатор–объект и траекторией относительного движения. Будем полагать, что наш локатор начинает принимать сигнал на угле $\varphi = 10^\circ$. Тогда согласно формуле (5.8) $v = 0,295 \text{ м/с}$.

Из рассмотренного выше примера видно, что относительную скорость можно контролировать по спектру принимаемого траекторного сигнала.

Особенностью спектра траекторного сигнала пальца пациента является то, что максимум спектра лежит в области постоянной составляющей, которая подавлена трактом магнитофона, а верхние частоты плавно нисходят до нуля,

т. е. до уровня шумов. Поэтому потеря постоянной составляющей и прилегающих нижних частот в тракте магнитофона связана с большими потерями информации и искажениями изображения.

На рисунке 5.32, *а* представлена картина сечения пальца до низкочастотной коррекции траекторного сигнала. На рисунке 5.32, *б* представлена та же картина после низкочастотной коррекции траекторного сигнала.

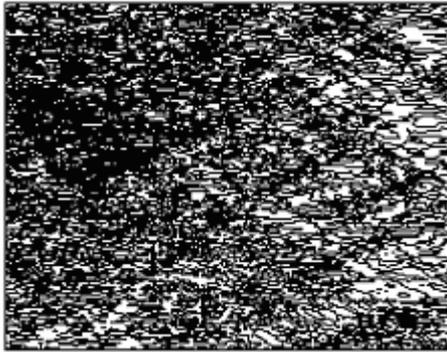
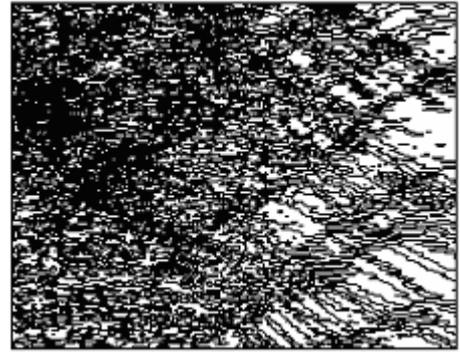
*а)**б)*

Рисунок 5.32 – Результаты реконструкции изображения: *а)* картина сечения пальца пациента до низкочастотной коррекции траекторного сигнала; *б)* картина сечения пальца пациента после низкочастотной коррекции сигнала

Сгустки плотности отражения, т. е. более темные области на картинках, указывают место локализации пальца. Рисунки 5.25 и 5.32 показывают, что плохо отражающие предметы не дают на изображениях резко очерченных границ. Сгустки плотности отражения на изображениях получаются размытыми.

5.4.4 Обсуждение экспериментальных результатов ультразвуковой локации

Рассматривая представленные картины реконструкции простейших объектов, нельзя сказать, что их сечения хорошо узнаваемы. Из-за интерференции одноракурсный синтез апертуры не позволяет получить узнаваемых сечений предметов, однако позволяет выявить локализацию объекта в лоцируемой среде. Поэтому данный синтез апертуры подходит в основном для задач траектор-

ного контроля. Например, позволяет определить промах или момент окончания взаимодействия.

На этапе экспериментов не стояла задача получения узнаваемых сечений. Главной целью была проверка, нет ли расхождений между теоретическими представлениями и практическими результатами, требуют ли коррекции наши теоретические представления о процессе когерентной реконструкции.

В целом можно констатировать, что результаты моделирования простейших ситуаций и экспериментальные результаты не противоречат друг другу. Это свидетельствует о правильности накопленных теоретических представлений о синтезе апертуры в ближней зоне.

Перечислим и обсудим основные результаты экспериментальной части.

1. Существенным недостатком экспериментов была потеря в магнитофонном тракте постоянной составляющей и прилежащих к ней низких частот спектра. В результате этой потери проявился эффект апертуры с исключенным центром. Это явление промоделировано, а его результаты помогли объяснить экспериментальные картины реконструкции и несколько их улучшить благодаря низкочастотной коррекции траекторного сигнала. Последствия апертуры с исключенным центром проявляются в том, что передаточная функция точки становится размытой. Максимум передаточной функции опускается на более низкий уровень и становится менее острым. Кроме того, передаточная функция точки при заклеенной апертуре на реконструированном изображении из восьмерки превращается в «бабочку» (рисунок 5.16). После суммирования ДОР отдельных точек протяженных объектов структура ДОР в виде «бабочки» проявляется на изображениях в виде диагональной сетки (рисунки 5.19, 5.22, 5.25), и при этом размазываются границы объекта. Следует отметить, что к диагональной сетке на изображениях приводит также протяженность объекта в направлении, перпендикулярном траектории. Это явление будет обсуждено ниже.

2. Объяснены и промоделированы интенсивные флюктуации траекторного сигнала и установлены последствия их влияния на резкость изображения.

Показано, что интенсивные флюктуации обусловлены протяженностью объекта в направлении, перпендикулярном траектории относительного движения, и шириной диаграммы направленности пьезодатчика в плоскости, перпендикулярной траектории относительного движения. Для целей томографии в идеальном случае диаграмма пьезодатчика должна быть дискообразной и лежать в плоскости, проходящей через траекторию относительного движения, рассекая объект там, где нужно получить сечение. Для траекторного контроля эти требования не обязательны. На изображениях обсуждаемая в этом пункте протяженность проявляется в виде диагональных «усов» (рисунок 5.30). На экспериментальных изображениях реальных объектов эти «усы» проявляются в виде диагональной сетки (рисунок 5.32).

3. Реконструкция картины сечения объекта не может быть качественно выполнена по одному траекторному сигналу. Дальнейший путь повышения качества изображения – это многоракурсный апертурный синтез.

4. Полученные результаты при одноракурсном синтезе апертуры подходят больше для задач траекторного контроля, чем для задач томографии. Изображение реконструированного объекта, построенное по экспериментальным траекторным сигналам, позволяет оценить его промах относительно доплеровского локатора и протяженность, а также направление перемещения и момент окончания взаимодействия локатора и объекта. Чтобы получить более качественные изображения для целей томографии, надо использовать многоракурсный синтез апертуры и иметь узкую диаграмму направленности в плоскости перпендикулярной траектории относительного движения.

5.5 Эксперименты по томографированию в диапазоне частот 8-10 ГГц электромагнитного излучения

Материал раздела опубликован в [129]. Данный раздел посвящен приложению многоракурсного синтеза апертуры антенны в СВЧ-томографии.

СВЧ-томография уже не один десяток лет является объектом пристального внимания специалистов, однако практические результаты в этой области не соответствуют нашим ожиданиям. Известно, что отраженная или прошедшая сквозь объект СВЧ-волна несет полезную для диагностики информацию. Так, например, в исследованиях, проведенных в 1992–2000 г. совместно с сотрудниками РНЦ «Курчатовский институт» ТРИНИТИ и Каролингского медицинского центра (г Шарлотта США), выявлено [28, 47], что патологические ткани изменяют свою диэлектрическую проницаемость, и это должно отражаться в параметрах принятой СВЧ-волны.

Вплоть до настоящего времени реально действующих радиотомографов, пригодных для использования на практике, не создано [129].

В СВЧ-томографии применяют как импульсные, так и монохроматические сигналы гигагерцового диапазона. Выбор диапазона и типа сигнала зависит от метода томографии, а также определяется степенью проникновения электромагнитной волны в ткани биологического объекта. Большое значение при выборе длины волны имеет способность томографа различать мелкие детали объекта. Чем короче волна, тем лучше разрешающая способность, но тем хуже проникающая способность излучения в биологическую ткань.

Сначала кратко рассмотрим томографию, в основе которой лежит импульсный метод локации. Этот метод получил широкое распространение в ультразвуковых сканерах, но практически не используется на СВЧ-радиоволнах. Причин этому несколько.

Главной причиной отказа от электромагнитных волн с импульсной модуляцией является то, что биологические ткани имеют резко отличающуюся относительную диэлектрическую проницаемость по сравнению с воздушной средой. Для мышечной ткани относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon' \approx 50$, для жировой ткани $\epsilon' \approx 7$. Это означает, что скорость распространения электромагнитных волн $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon' \epsilon_0 \mu' \mu_0}}$ будет не одинаковой в разных тка-

нях. Для мышечной ткани она будет в $\sqrt{50}$ раз меньше, чем в воздухе, а в жировой ткани она составит $V_{\text{жира}} = \frac{c}{\sqrt{7}}$. При этом можно полагать, что относительная магнитная проницаемость $\mu' = const$, т. е. одинакова как в воздушной среде, так и в тканях пациента. При таком диапазоне скоростей распространения электромагнитных волн в тканях невозможно реконструировать изображение внутренней структуры объекта по запаздыванию сигнала.

Известные способы реконструкции предполагают постоянную скорость распространения зондирующего сигнала. С подобной проблемой сталкиваются в геолокации при стремлении отобразить результаты импульсного зондирования в виде картины сечения земного участка. Для устранения неопределенности из-за неодинаковой скорости распространения электромагнитной волны в различных породах делают тарировочное бурение. Однако это не дает полной уверенности в том, что реконструированная картина сечения земной поверхности будет правильно построена по результатам локации и тарировки.

Еще одним препятствием на пути к практической СВЧ-томографии является сильное отражение зондирующего сигнала на границе сред воздух–тело пациента. Сигнал на входе приемника, отраженный от границы этих сред, значительно преобладает над сигналом, пришедшим от внутренних тканей пациента. Чтобы уменьшить отражения на границе двух сред, применяют СВЧ-локацию пациента в водной среде [47]. Поскольку вода и ткани пациента имеют близкие относительные диэлектрические проницаемости, то СВЧ-сигнал меньше будет претерпевать отражений на границе двух сред. Из-за малых отражений большая его часть проникнет к внутренним тканям и вернется назад к приемному устройству с полезной информацией. Но при этом приходится мириться с неудобствами, вызванными помещением пациента в водную среду.

Возможно, перспективным является метод томографии, основанный на реконструкции изображения по проекциям с применением монохроматических радиоволн СВЧ-диапазона [96, 97, 126]. В указанных работах не предполагается

помещение исследуемого объекта в водную среду. К сожалению, в качестве исследуемого выбран не биологический объект. В связи с тем, что относительная диэлектрическая проницаемость испытуемого объекта сильно отличается от относительной диэлектрической проницаемости биологической ткани, трудно отнести хорошие результаты реконструкции внутренней структуры [96, 97, 126] к биологическому объекту.

В настоящем разделе оценивается возможность томографирования биологических объектов с применением электромагнитных волн на частоте 8–10 ГГц, используя апертурный синтез, не помещая пациента в водную среду.

Для синтеза апертуры необходимо организовать перемещение передатчика с приемником относительно пациента. Из-за существенного различия скоростей распространения электромагнитной волны в тканях и в воздушной среде спектры траекторных сигналов от границы двух сред и от внутренних тканей значительно отличаются по ширине (рисунок 5.33).

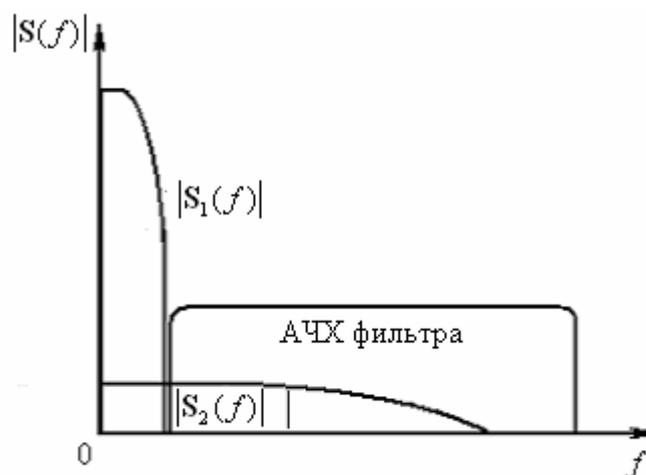


Рисунок 5.33 – Подавление спектра S_1 принадлежащего сигналу, отраженному от границы двух сред

На этом рисунке приняты следующие обозначения: f – частота; $S_1(f)$ – спектр сигнала от границы двух сред; $S_2(f)$ – спектр сигнала от внутренних тканей пациента; АЧХ – амплитудно-частотная характеристика фильтра.

Спектр траекторного сигнала, отраженного от границы двух сред, имеет превосходящую плотность и сосредоточен в районе низких частот, в то время

как спектр сигнала от внутренних тканей имеет меньшую плотность и распространяется достаточно далеко в сторону высоких частот. Значительная его часть не перекрыта спектром сигнала, отраженного от границы двух сред.

Настроив соответствующим образом активный фильтр, как показано на рисунке 5.33, можно подавить сигнал от границы двух сред и выделить сигнал от внутренних тканей пациента, но, потеряв при этом незначительную часть спектра в области низких частот. Последствия такой потери были рассмотрены ранее в разделе 5.4.2.

5.5.1 Синтез апертуры с учетом границы двух сред

Материал раздела опубликован в [129]. Синтез апертуры с учетом границы раздела двух сред можно описать математически следующим образом, исходя из геометрии перемещения локатора относительно объекта (рисунок 5.34).

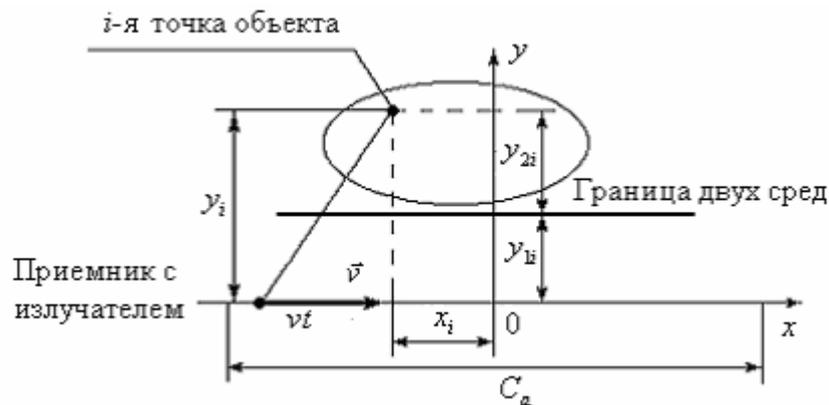


Рисунок 5.34 – Геометрия, поясняющая процесс реконструкции

Сигнал от i -й точки объекта с координатами (x_i, y_i) , принимаемый локатором при движении мимо этой точки по прямолинейной траектории с постоянной скоростью v и промахом y_i , можно записать следующим образом:

$$f_i(t) = \frac{a(x_i, y_i) \left[\frac{y_{1i}}{y_i} + \frac{k(y_{2i})y_{2i}}{y_i} \right]^{-1}}{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} \exp(-j4\pi(\frac{y_{1i}}{\lambda y_i} + \frac{y_{2i}}{\lambda_1 y_i})\sqrt{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2}), \quad (5.9)$$

где $a(x_i, y_i)$ – комплексная амплитуда рассеяния в i -й точке; C_a – длина синтезированной апертуры; t – время; v – постоянная скорость перемещения приемника с излучателем относительно исследуемого объекта; λ – длина волны зон-

дирующего сигнала в воздухе; λ_1 – длина волны зондирующего сигнала в среде объекта; $k(y_{2i})$ – множитель, учитывающий дополнительное поглощение сигнала в объекте. Затухание в тканях нарастает по закону:

$$k(y_{2i}) = \left[\frac{y_{2i}}{\Delta l} \right] e,$$

где $e = 2,718$; Δl – глубина проникновения излучения в ткань. Например, для мышечной ткани на частоте 10 ГГц глубина проникновения излучения составляет 3 мм. Таким образом через каждые 3 мм волна затухает в e раз [49].

Будем называть y_i полным промахом, подразумевая кратчайшее расстояние от точки объекта до траектории движения локатора по перпендикуляру; y_{1i} – составляющая промаха, равная расстоянию от траектории до границы двух сред; y_{2i} – составляющая промаха, равная расстоянию от i -й точки до границы двух сред. Причем $y_i = y_{2i} + y_{1i}$.

Из выражения (5.9) видно, что каждая точка дает сигнал, который состоит из двух компонент или двух составляющих. На это указывает показатель экспоненты, который содержит сумму двух фазовых путей с разной длиной волны. По выражению (5.9) можно построить траекторный сигнал от отдельной точки объекта с учетом распространения волны в двух средах (рисунок 5.35, а), а если взять преобразование Фурье от траекторного сигнала, то можно получить его спектральный состав (рисунок 5.35, б).

Из этого рисунка видно, что в спектре присутствуют две компоненты. Первая низкочастотная компонента обусловлена распространением сигнала в воздушной среде, а вторая – высокочастотная компонента с меньшей спектральной плотностью – соответствует распространению волны в тканях. Эта математическая модель отраженного сигнала от одной точки объективно описывает реальный физический процесс распространения волны в двух средах, разделенных границей.

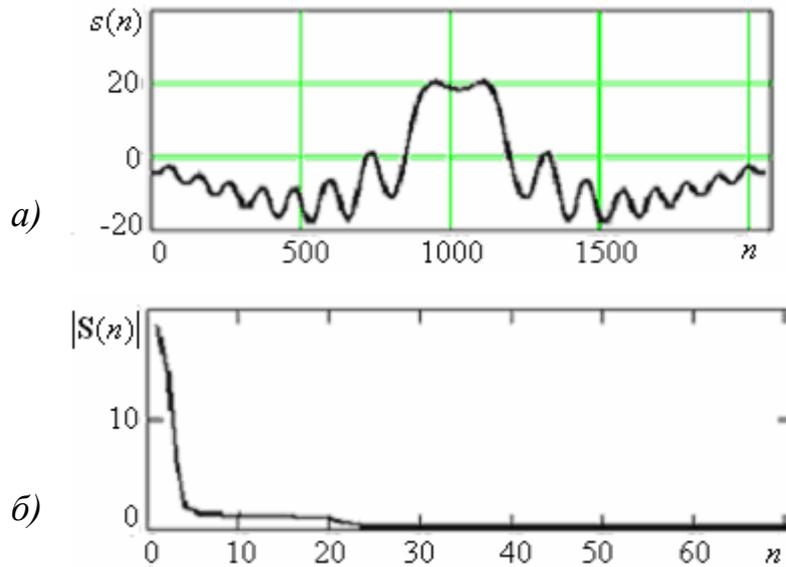


Рисунок 5.35 – Результаты моделирования: а) траекторный сигнал в случае распространения волны в двух средах; б) двухкомпонентный спектр сигнала

На рисунке 5.35 приняты следующие обозначения: $s(n)$ – траекторный сигнал; $\mathbf{S}(n)$ – спектр траекторного сигнала; n – номера отсчетов времени или частоты.

Сигнал, отраженный от всего объекта, состоящего из I точек, можно представить в виде суммы сигналов, отраженных от всех точек:

$$f(t) = \sum_{i=1}^I f_i(t), \quad (5.10)$$

где $f(t)$ – суммарный сигнал, отраженный от всех I точек объекта.

Опорный сигнал, отраженный от точечного объекта, можно записать как:

$$f_o(t) = \frac{1}{(vt - C_a/2)^2 + y^2} \exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(vt - C_a/2)^2 + y^2}). \quad (5.11)$$

Если целью томографирования является получение конфигурации границы двух сред без анализа сигнала, проникающего во внутрь объекта, то берется длина волны в воздушной среде λ . Если же требуется получить картину внутренней структуры объекта, то берем λ_1 .

Тогда взаимно корреляционная функция между опорным сигналом $f_o(t)$ и сигналом $f(t)$ может быть представлена в виде:

$$B(\tau, y) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^I \frac{a(x_i, y_i) \left[\frac{y_{1i}}{y} + \frac{k(y_{2i})y_{2i}}{y} \right]^{-1} \exp[-\psi(y, t)]}{[(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2][(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + y^2]} dy dt, \quad (5.12)$$

где

$$\psi(y, t) = j4\pi \left(\frac{y_{1i}}{\lambda y_i} + \frac{y_{2i}}{\lambda_1 y_i} \right) \sqrt{(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2} - \frac{1}{\lambda_1} \sqrt{(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + y^2};$$

y – промах конкретной опорной точки из всего диапазона опорных точек.

Используя соотношение $\Delta x = \tau v$, можно перейти от временного сдвига к пространственному. В дальнейшем мы будем пользоваться не двумерной взаимно корреляционной функцией (5.12), а набором одномерных корреляционных функций (5.13). Этот набор так же, как и выражение (5.12) позволяет построить двумерную поверхность, которая является передаточной функцией объекта. Выражения (5.12) и (5.13) дают практически одинаковые результаты. Если сделать сечения передаточной функции объекта горизонтальными плоскостями на разной высоте, то получим линии сечения одинакового уровня, которые после раскраски их в разные тона дадут томограмму объекта.

$$B(\tau, y) = \int_0^T \sum_{i=1}^I \frac{a(x_i, y_i) \left[\frac{y_{1i}}{y} + \frac{k(y_{2i})y_{2i}}{y} \right]^{-1} \exp[-\psi(y, t)]}{[(vt + x_i - C_a/2)^2 + y_i^2][(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + y^2]} dt, \quad (5.13)$$

где $T = C_a/v$ – время синтеза апертуры. Соотношение $x = \tau v$ позволяет перейти от временного сдвига к пространственному и построить взаимно корреляционную функцию в координатах промаха y и дальности по траектории x .

Чтобы получить передаточную функцию точки, нужно в функции $f(t)$ для одноточечного объекта, т. е. в выражениях (5.9) и (5.10) принять $I=1$, $x_1 = 0$, $y_1 \neq 0$, $a(x_1, y_1) = 1$, и тогда набор взаимно корреляционных функций примет вид:

$$B(\tau, y) = \int_0^T \frac{\left[\frac{y_{11}}{y} + \frac{k(y_{21})y_{21}}{y} \right]^{-1} \exp[-\psi(y, t)]}{[(vt + x_1 - C_a/2)^2 + y_1^2][(v(t + \tau) - C_a/2)^2 + y^2]} dt. \quad (5.14)$$

Выражение (5.14) позволяет построить передаточную функцию точки. Этот термин взят из [31]. Можно пользоваться терминами «импульсная характеристика», «тело неопределенности», или «функция рассеяния точки» (термин из оптики). Однако это будет не совсем правильно. Ведь выражение не является полноценной двумерной автокорреляционной функцией, с помощью которой обычно строится двумерная импульсная характеристика. Это всего лишь набор одномерных взаимно корреляционных функций.

Удивительным является тот факт, что поверхность, построенная из набора одномерных корреляционных функций, почти такая же, как поверхность двумерной корреляционной функции (ср. приложения В и Г). Конечно, полного тождества этих поверхностей нет, хотя они очень похожи. Замечено, что существенно отличаются их фазочастотные характеристики. В связи с этим результаты математических операций над ними будут значительно отличаться. Взять хотя бы применение теоремы о сдвиге в пространстве оригиналов. После перехода в область изображений можно обнаружить существенные отличия свойств этих двумерных функций.

Для того чтобы выявить, как граница двух сред влияет на результаты реконструкции точечного объекта, проведем модельный эксперимент. Точечный объект расположим на расстоянии 15 см от траектории локатора. Зондирование будем производить монохроматическим сигналом с длиной волны 3 см. Границу двух сред проведем посередине между точкой и траекторией движения локатора, т. е. на расстоянии 7,5 см от траектории. В первой среде, состоящей из воздуха и расположенной ближе к траектории, длина волны равна 3 см. Во второй среде, где расположен точечный объект, длину волны возьмем равной 4 мм.

Если опорные сигналы сформированы на длине волны 3 см, то передаточная функция точки будет иметь вид (рисунок 5.36).

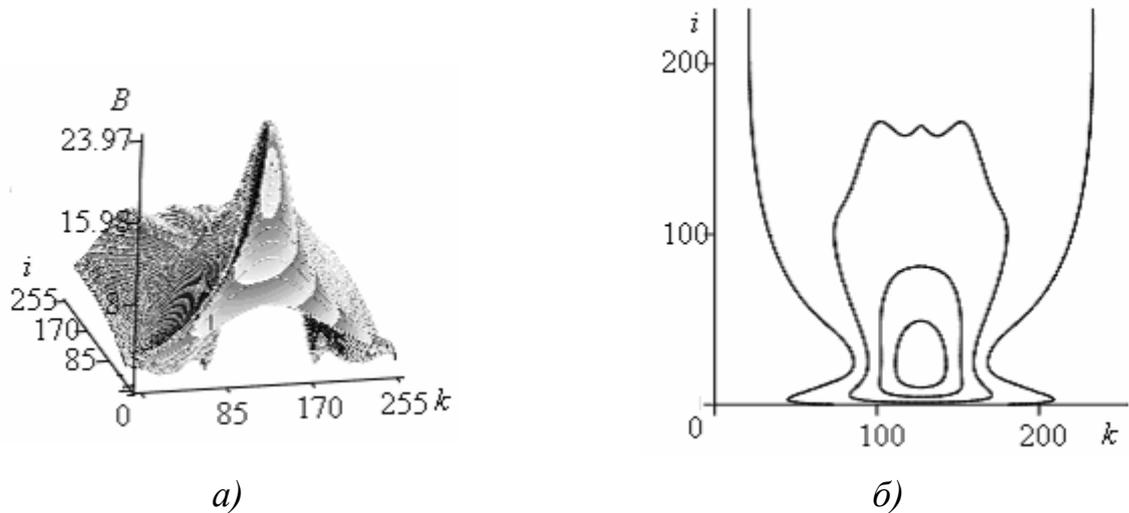


Рисунок 5.36 – Результаты моделирования: *a)* передаточная функция точки при опорном сигнале, сформированном при $\lambda=3$ см; *б)* вид этой функции в плане

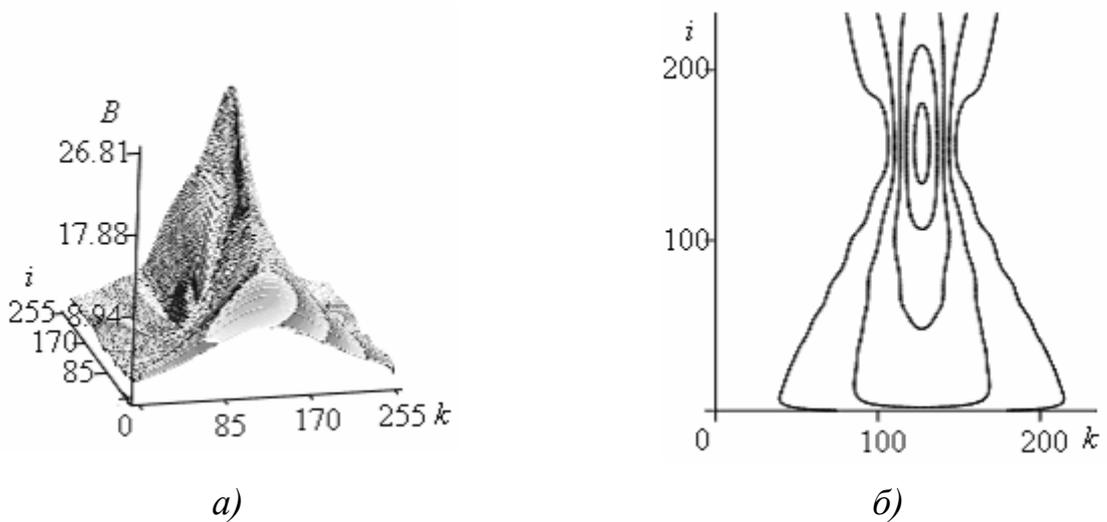


Рисунок 5.37 – Результаты моделирования: *a)* передаточная функция точки при опорном сигнале, сформированном при $\lambda=4$ мм; *б)* вид этой функции в плане

Если же опорные сигналы сформировать на длине волны 4 мм, то передаточная функция точки примет вид (рисунок 5.37). Если границу двух сред опустить на траекторию, а опорные траекторные сигналы сформировать на длине волны 4 мм, то передаточная функция точки будет иметь вид (рисунок 5.38).

Представленные результаты (рисунки 5.36, 5.37, 5.38) свидетельствуют о том, что наличие воздушной прослойки влияет на результаты реконструкции.

Чем меньше воздушная прослойка, тем острее передаточная функция точки и тем лучше разрешающая способность томографа (ср. рисунки 5.37 и 5.38).

Длину волны при генерации опорных траекторных сигналов следует выбирать такой, какой она образуется в объектной среде, а не в воздушной прослойке. При этом надо всеми возможными способами сокращать фазовый путь волны в воздушной среде. Все это позволит получить приемлемое разрешение в объектной среде.

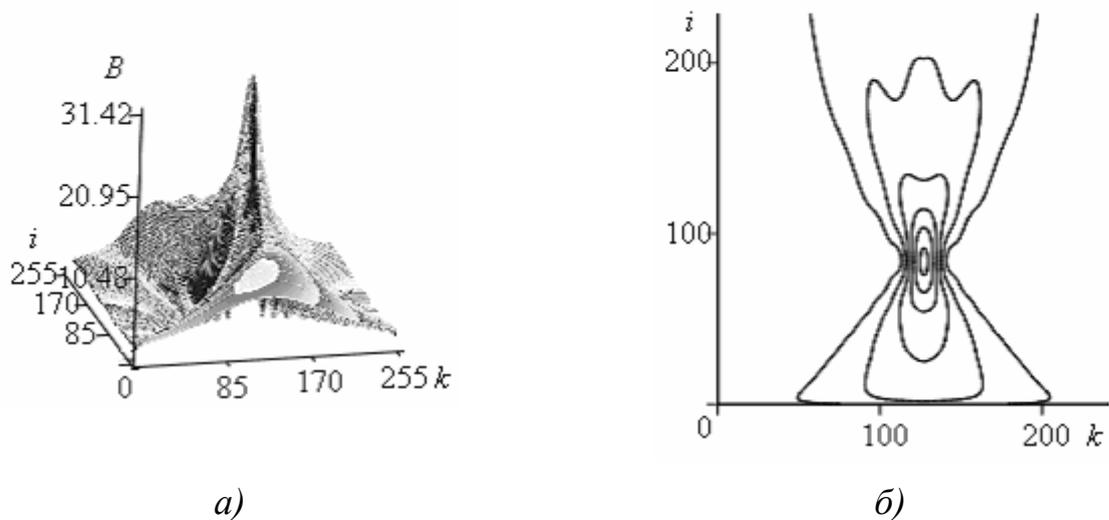


Рисунок 5.38 – Результаты моделирования: *а)* передаточная функция точки при реконструкции без воздушной прослойки; *б)* вид этой функции в плане

Таким образом, разрешение в тканях человека при использовании апертурного синтеза может достигать 1 мм при частоте зондирующего сигнала 10 ГГц. При этом надо исходить из того, что синтезированная апертура дает разрешение $\lambda/5$ [31]. Если в воздушной среде $\lambda = 3$ см, то после проникновения излучения в ткани длина волны сократится до 5 мм [49]. Учитывая разрешающую способность апертуры, в итоге получаем разрешение $\delta = \lambda/5 = 5/5 = 1$ мм

5.5.2 Результаты экспериментов по томографированию

Материал раздела опубликован в [129]. Перейдем к экспериментальной томографии на СВЧ. Томографирование осуществлялось на частоте 8,175 ГГц.

Излучаемая мощность была 10 мВт. Вид установки представлен на рисунке 5.39.

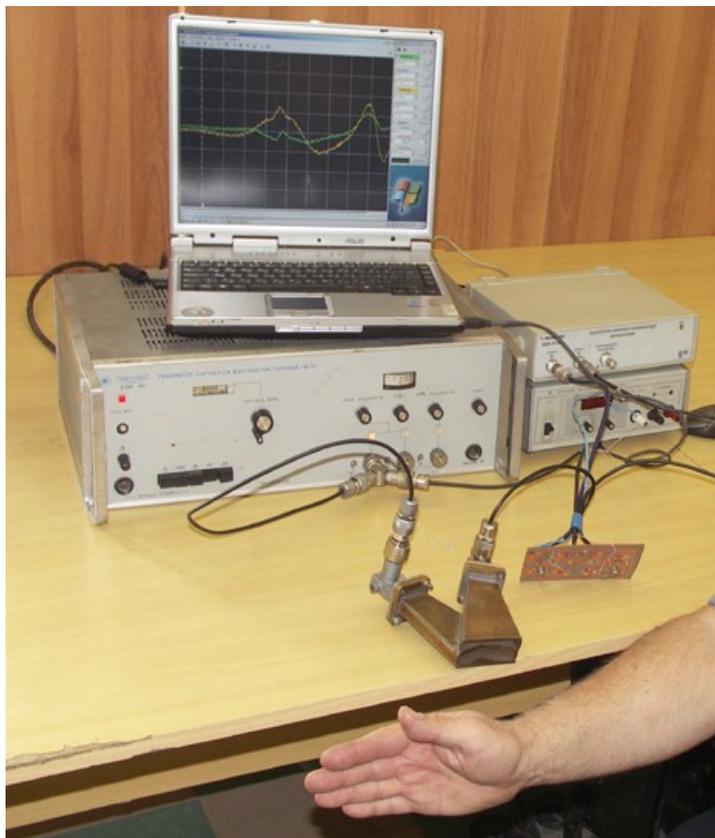


Рисунок 5.39 – СВЧ-установка для томографии конечностей

Излучающий и принимающий рупоры совмещены. Доплеровский приемник выполнен с двумя каналами, находящимися в квадратуре. Два траекторных сигнала, находящиеся в квадратуре, давали возможность сформировать комплексный сигнал.

Прежде чем переходить к экспериментальной части, нужно провести тестирование разработанной экспериментальной установки (рисунок 5.39). Целью тестирования является получение передаточной функции точки экспериментальным путем.

Тестирование проводилось в воздушной среде. В качестве точечного объекта был использован металлический шарик диаметром 0,7 см. Шарик закреплялся на деревянном стержне диаметром 0,5 см, который является практически прозрачным материалом для радиоволны $\lambda = 3,6$ см

При тестировании шарик перемещался мимо рупорной антенны на расстоянии 7 см от плоскости раскрыва рупора. Скорость перемещения составляла 80 см/сек. Размер апертуры антенны D в направлении, совпадающем с траекторией, составлял 1 см. При такой апертуре размер ближней зоны l был равен $l = \frac{D^2}{\lambda} = \frac{1^2}{3,6} \approx 0,3$ см.

Таким образом, регистрация доплеровского сигнала производилась в дальней зоне антенны, т. е. в зоне Фраунгофера. Зарегистрированный траекторный сигнал с его квадратурной компонентой представлен на рисунке 5.40.

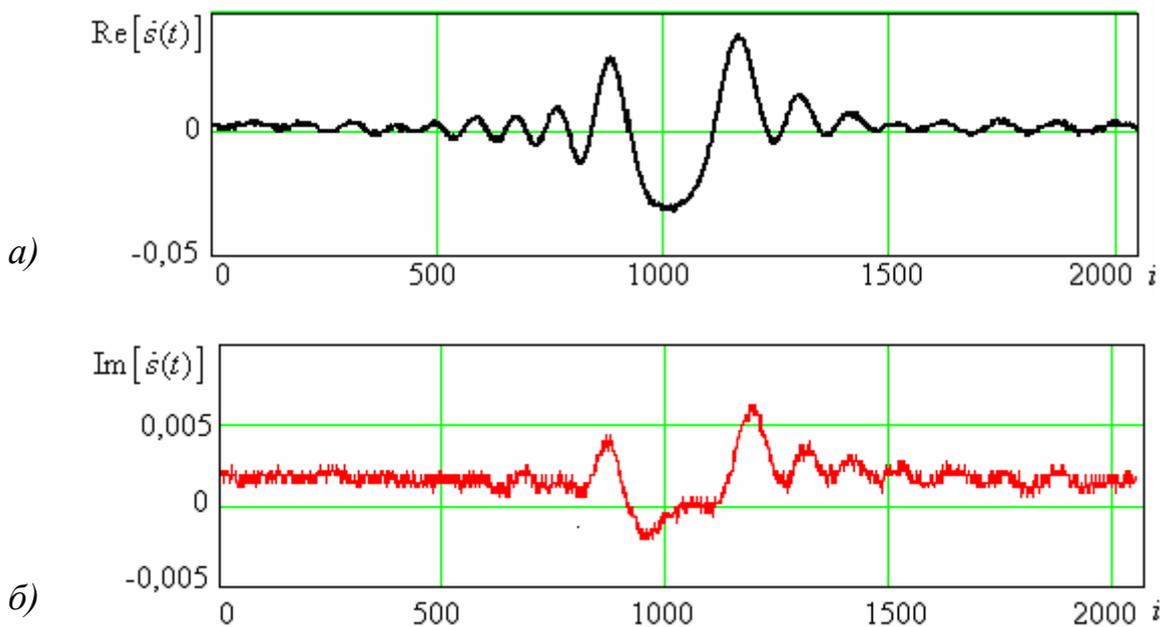


Рисунок 5.40 – Экспериментальные траекторные сигналы от шарика, находящиеся в квадратуре: а) реальная часть; б) мнимая часть

На рисунке 5.41 представлены смоделированные компоненты траекторного сигнала, отраженного от точечного объекта. Реальная и мнимая часть находятся в квадратуре по отношению друг к другу (см. рисунки 5.41, а и б). Реальная и мнимая компоненты являются составными частями комплексного траекторного сигнала. Они получены расчетным путем с учётом геометрических соотношений и кинематики перемещения локатора относительно точечного объекта.

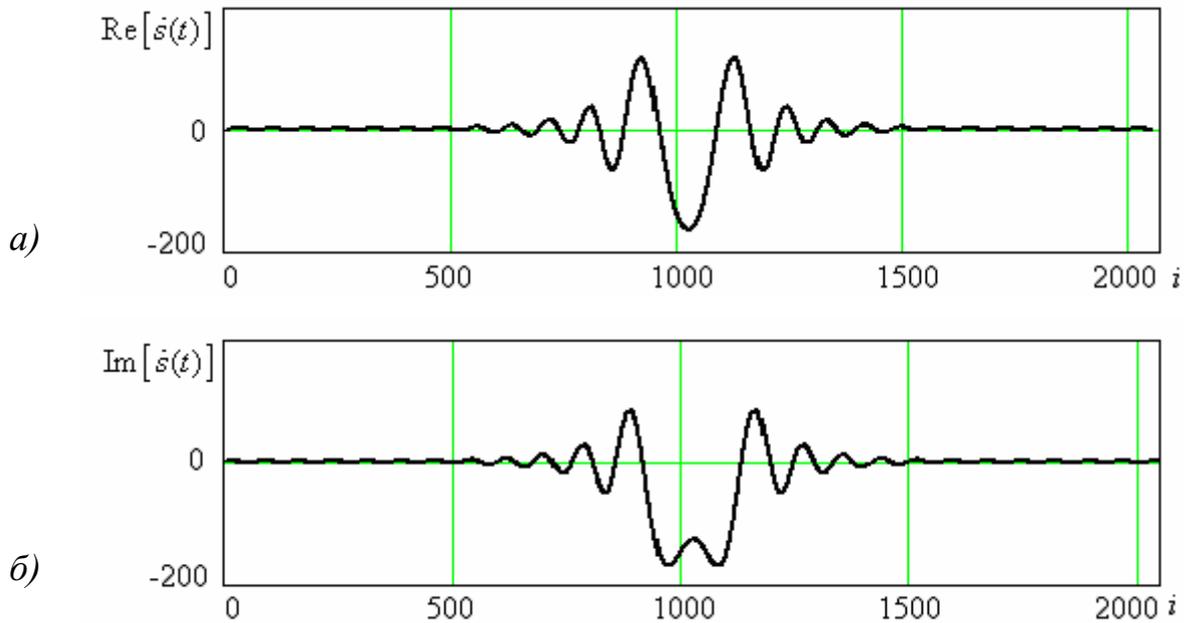


Рисунок 5.41 – Траекторные сигналы от точечного объекта, полученные в результате расчета: а) реальная часть; б) мнимая часть

Сопоставляя рисунки 5.40 и 5.41, можно констатировать то, что результаты моделирования не расходятся с экспериментальными результатами.

Передачная функция шарика, построенная по экспериментальному сигналу, приведена на рисунке 5.42.

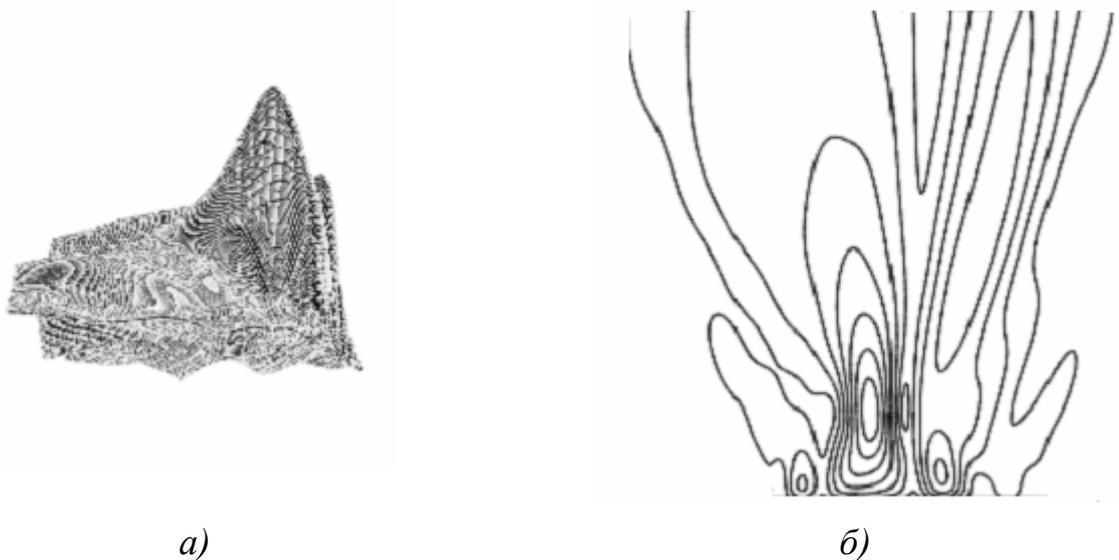


Рисунок 5.42 – Результаты реконструкции изображения по реальному сигналу: а) передачная функция шарика; б) сечения этой функции плоскостями разной

ВЫСОТЫ

Передаточная функция точки, построенная по расчетному сигналу, изображенному на рисунке 5.40, представлена на рисунке 5.43.

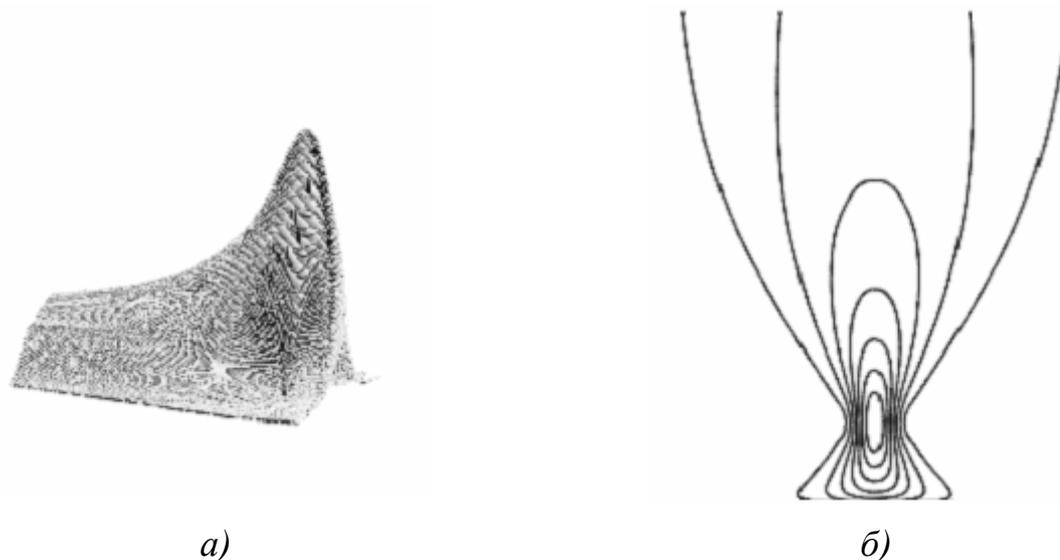


Рисунок 5.43 – Результаты моделирования: *а)* передаточная функция точки; *б)* ее сечения плоскостями разной высоты

Сопоставление передаточных функций шарика и точки (рисунки 5.42 и 5.43) свидетельствует, что экспериментальная реконструкция изображения объекта соответствует и во многом совпадает с теоретической, т. е. с модельной реконструкцией изображения объекта.

В заключение на рисунке 5.44 приведем экспериментально полученную передающую функцию шарика при двухракурсном синтезе апертуры.



Рисунок 5.44 – Результат эксперимента по синтезу апертуры антенны в двух взаимно перпендикулярных направлениях: *а)* передающая функция шарика; *б)* сечения этой функции плоскостями разной высоты

Тестирование показало, что установка работоспособна и отвечает задачам и целям эксперимента. Перейдем непосредственно к экспериментам с биологическими объектами.

Траекторный доплеровский сигнал от пальца пациента на выходе одного из двух квадратурных каналов представлен на рисунке 5.45.

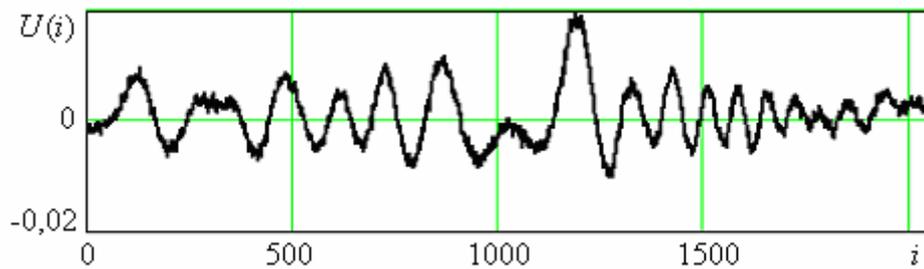


Рисунок 5.45 – Траекторный доплеровский сигнал, отраженный от пальца

На рисунке по оси ординат отложено напряжение U в вольтах, а по оси абсцисс отложены номера отсчетов i , следующих с интервалом 0,001 с.

Передаточная функция пальца, восстановленная по двум траекторным сигналам, снятым при движении по двум взаимно перпендикулярным траекториям, представлена на рисунке 5.46, *a*. На рисунке 5.46, *б* показано изображение пальца в сечении. Оно получено из передаточной функции пальца (рисунок 5.46, *a*) в результате его сечения горизонтальными плоскостями на разной высоте.



Рисунок 5.46 – Результат реконструкции изображения по реальному сигналу: *a*) передаточная функция пальца; *б*) сечение этой функции плоскостями разной высоты

Этот результат свидетельствует о том, что двухракурсный синтез апертуры пригоден для томографии. В данном случае мы имеем дело только с сигналом, отраженным от границы двух сред. Одной средой является воздух. Второй средой является ткань пальца. Сигнал от границы двух сред значительно превышает сигнал от внутренних тканей. Поэтому палец представлен на изображении (рисунок 5.46, б) как непрозрачный предмет.

Следует отметить большой уровень «артефактов», т. е. помех на изображении пальца. Они могут быть обусловлены тремя причинами.

Одной из них может быть проблема ближней зоны антенны. Траектория прямолинейного перемещения пальца находилась в 7 сантиметрах от рупора. Наибольший размер апертуры рупорной антенны равнялся 6 см. Расстояние от антенны до границы дальней зоны 12 см. Нахождение пальца в ближней зоне могло деформировать диаграмму направленности антенны и привести к дополнительным флюктуациям траекторного сигнала.

Второй причиной «артефактов» могли оказаться прижатые соседние пальцы, захваченные диаграммой направленности антенны, и, наконец, третья причина – это отсутствие квадратуры в каналах.

Только моделирование может показать, какого результата можно достичь в идеальном случае, т. е. при отсутствии деформации диаграммы направленности антенны от пальца, находящегося в ближней зоне, при отсутствии захвата прижатых пальцев и при сдвиге фаз в квадратурных каналах на 90° . На рисунке 5.47 представлен траекторный сигнал от модели пальца для идеального случая.

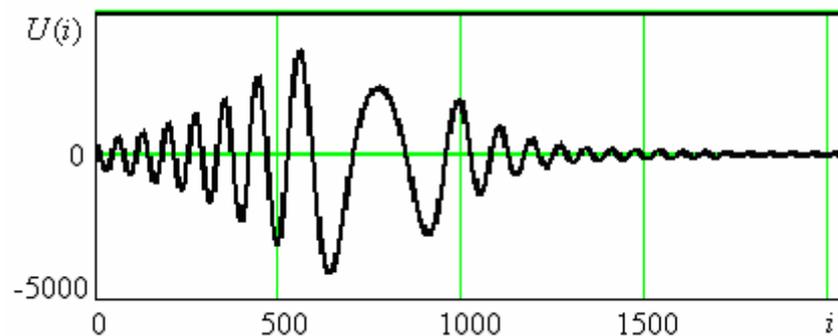


Рисунок 5.47 – Траекторный сигнал от модели пальца, полученный в результате расчета

На рисунке 5.48 представлен результат реконструкции изображения сечения модели пальца по двум траекторным сигналам, рассчитанным для двух ортогональных траекторий.

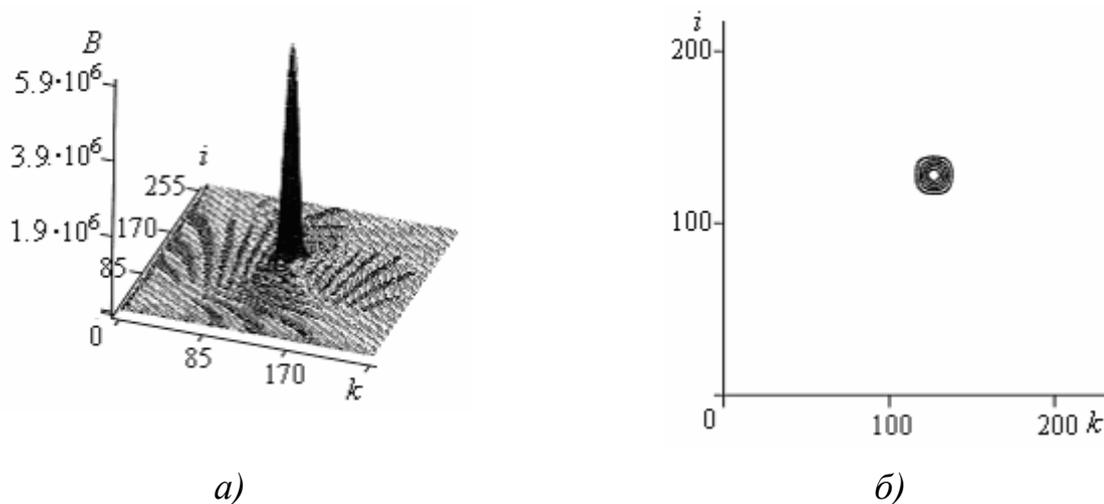


Рисунок 5.48 – Результат реконструкции изображения модели пальца: *а)* передаточная функция модели пальца, *б)* сечение этой функции плоскостями разной высоты

Передаточная функция модели пальца, удаленного от двух траекторий движения локатора на 7 см, приведена на рисунке 5.48, *а*. Модель представляла собой полый прямоугольный параллелепипед, дающий в сечении прямоугольник со сторонами 1 см.

В этом модельном эксперименте предполагалось, что модель облучается монохроматической волной, длина которой 3 см. Относительная скорость движения составляла 0,3 м/с

Результаты эксперимента и моделирования (рисунки 5.46, 5.48) говорят о том, что реконструкция изображения для воздушной среды при $\lambda = 3$ см мало интересна для практики. Учитывая разрешающую способность метода томографии с синтезом апертуры $\delta = \lambda/5 = 0,6$ см, можно видеть, что полученного разрешения 0,6 см недостаточно, чтобы наблюдать детали объекта. На томограмме палец представляется практически в виде точки.

Более интересные результаты следует ожидать при обработке сигналов принятых приемником от тканей, расположенных внутри биологического объекта. Но для этого нужно сначала подавить сигнал от границы двух сред и усилить очень слабый сигнал от внутренних тканей, уровень которого соизмерим с шумами квантования. В связи с этим прежде чем брать цифровые отсчеты аналогового сигнала, необходимо сделать так, чтобы мощная низкочастотная компонента от границы двух сред не препятствовала квантованию слабого высокочастотного сигнала, полученного от внутренних тканей. Здесь не обойтись без аналоговой фильтрации двухкомпонентного сигнала. После фильтрации сигнал от внутренних тканей, его следует обрабатывать опорными сигналами при длине волны $\lambda_1 = \lambda/6 = 3 \text{ см}/6 = 0,5 \text{ см}$, где 6 - это коэффициент уменьшения длины волны в тканях биологического объекта.

Чтобы оценить возможность выделения сигнала от внутренних тканей и определить пути подавления сигнала от границы двух сред, рассмотрим спектр экспериментально полученного траекторного сигнала от запястья руки.

Из рисунка 5.49, б можно видеть, что спектр траекторного сигнала состоит из двух компонент.

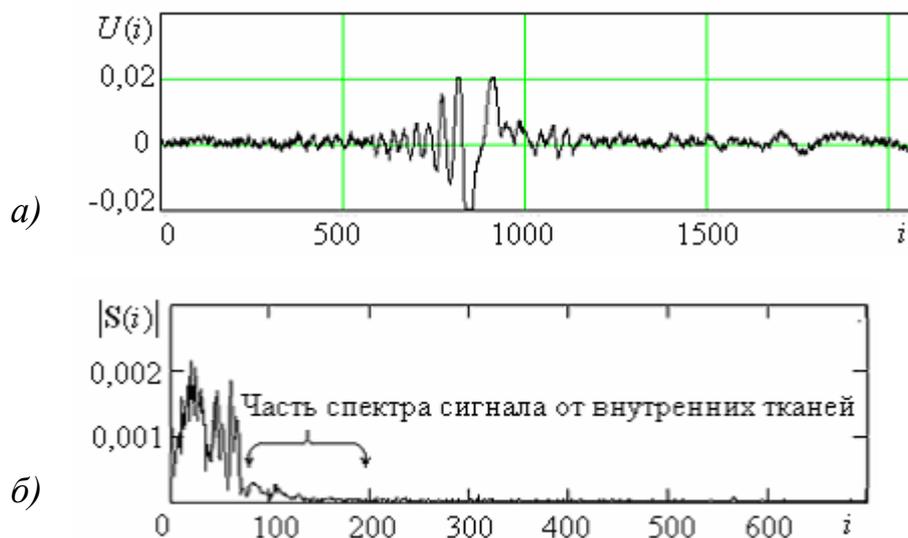


Рисунок 5.49 – Экспериментальный результат: *а)* траекторный сигнал от запястья руки на выходе одного из квадратурных каналов; *б)* спектр, построенный по сигналам двух квадратурных каналов

Первая компонента заканчивается примерно на семидесятом отсчете, что соответствует частоте $f = \frac{1}{TN} 70 = \frac{1}{0,001 \times 2048} \times 70 = 37$ Гц, где T – временной интервал между отсчетами, N – общее количество отсчетов.

Найдем граничную частоту второй компоненты спектра, обусловленной сигналом от внутренних тканей. Доплеровская частота сигнала от внутренних тканей на входе приемника локатора определяется по известной формуле:

$f_d = [(2V_{от})/\lambda] \cos \varphi = (2 \times 0,9/0,005) \times \cos 30^\circ = 155$ Гц, где $V_{от}$ – относительная скорость движения объекта мимо локатора; λ – длина волны в тканях пациента; φ – угол между траекторией движения локатора и направлением на объект, меньше которого сигнал не принимается приемником локатора (ограничение, связанное с диаграммой направленности антенны локатора). Найденная частота соответствует триста девятнадцатому отсчету на оси частот (рисунок 5.49, б).

Таким образом, из вышеизложенного видно, что вторая компонента спектра, соответствующая сигналу от внутренних тканей, лишь немного превышает шумы в районе от 70-го до 130-го отсчетов (рисунок 5.49, б). Такое неблагоприятное отношение сигнал/шум не дает возможности получить приемлемую картину реконструкции сечения объекта.

Подавление мощного сигнала, отраженного от границы двух сред, и усиление второй компоненты траекторного сигнала до уровня, обеспечивающего преобладание сигнала над шумом квантования, задача техническая. В этом случае цифровая фильтрация не поможет, так как вторая полезная компонента спектра соизмерима с шумами квантования. К положительным результатам приведет только аналоговая фильтрация, которую необходимо использовать перед преобразованием сигнала из аналогового к цифровому виду. Для этой цели был применен активный аналоговый фильтр, подавляющий частоты от 0 до 24 Гц. Крутизна спада частотной характеристики составляла 24 дБ на октаву. Коэффициент передачи активного фильтра в полосе пропускания был равен 1.

После подавления низкочастотной части спектра, обусловленной отражением 3-сантиметровой волны от границы двух сред, проявилась вторая часть спектра на фоне шумов квантования, обусловленная отражением шестимиллиметровой волны от внутренних тканей.

Для обработки сигналов от внутренних тканей опорные сигналы формировались для шестимиллиметровой волны. При этом не ставилась задача получения качественной картины внутренней структуры объекта. На данном этапе исследований предусматривалось получение сигнала от внутренних тканей, и изучалась возможность реконструкции внутренней структуры объекта по полученному сигналу. Позже, после представленных экспериментальных данных, будут обсуждены вопросы получения качественной картины реконструкции внутренней структуры объекта.

На рисунке 5.50, *a* представлен траекторный сигнал от движущегося пальца, в котором подавлена часть спектра, обусловленная отражением от границы двух сред. Теперь мы имеем сигнал, в котором преобладают отражения от внутренних тканей.

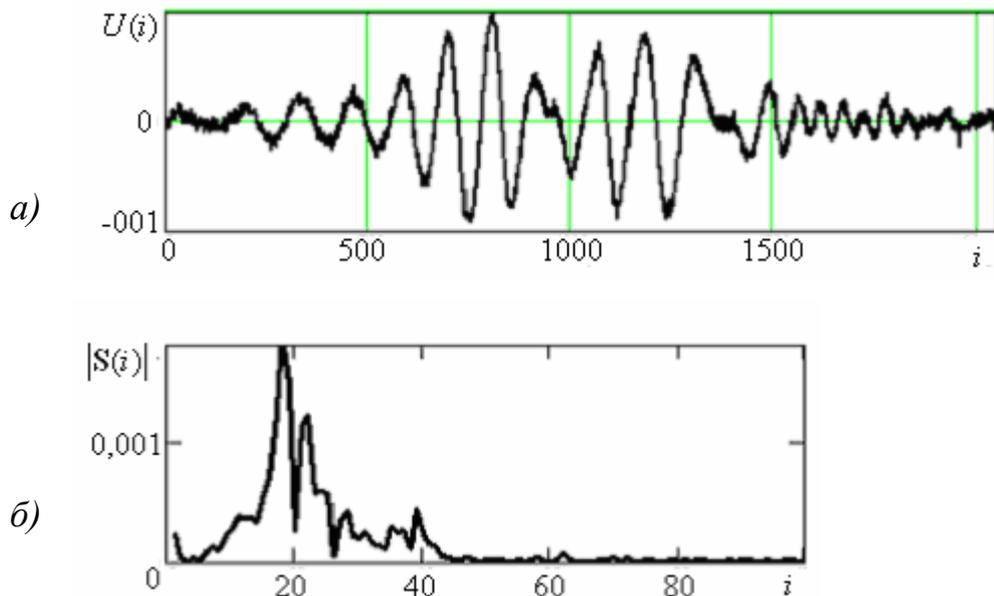


Рисунок 5.50 – Экспериментальные данные: *a*) траекторный сигнал от движущегося пальца; *б*) спектр этого сигнала

На графике спектральной плотности (рисунок 5.50, б) хорошо виден диапазон частот, подавленный активным фильтром. Подавление заканчивается на пятнадцатом отсчете, что соответствует полосе подавленных частот от 0 до 26,8 Гц. Верхняя частота подавляемых частот определяется следующим образом. Полный график (рисунок 5.50, б) состоит из 2048 отсчетов, следующих с интервалом 2,44 Гц. Интервал между отсчетами спектра найден как $\Delta f = 1/(T \cdot 2048)$, где T – интервал между отсчетами времени на графике (рисунок 5.50, а). График на рисунке 5.50, б получен в результате быстрого преобразования Фурье от графика на рисунке 5.50, а, поэтому они имеют одинаковое число отсчетов, равное 2048. Зная интервал между отсчетами, нетрудно найти наивысшую граничную $f_{гр}$ частоту подавления активным фильтром. Она равна $f_{гр} = \Delta f \cdot 11 = 26,8$ Гц, где 11 – номер отсчета частоты, на котором кончается подавление частот.

Теперь нужно оценить, насколько подавлен спектр сигнала, отраженного от границы двух сред при длине волны 3,67 см. Воспользуемся повторно известной формулой для определения доплеровской частоты. Определим ее максимальное значение: $f_d = 2V_{от} / \lambda = 2 \cdot 30 / 3,67 = 16,3$ Гц. Так как 16,3 Гц < 26,8 Гц, то из этого следует, что спектр от границы двух сред надежно подавлен активным фильтром. В результате эксперимента полоса подавления активным фильтром получилась больше, чем требуется. Это отрицательно сказалось на качестве восстановленного изображения внутренней структуры объекта.

Оценим по доплеровскому смещению, до каких пределов должна простираться вторая часть спектра, соответствующая сигналу от внутренних тканей:

$$f_d = 2V_{от} / \lambda = 2 \cdot 30 / 0,61 = 98,1 \text{ Гц, где } 0,61 = \frac{3,67 \text{ см}}{6}; \quad 6 \text{ – коэффициент}$$

уменьшения длины волны во внутренних тканях по сравнению с длиной электромагнитной волны в воздушной среде.

Полученное значение частоты примерно совпадает с верхней границей спектра, которая равна $40 \cdot 2,44 = 97,6$ Гц. Отрицательным является тот факт,

что в результате режекции спектра сигнала от границы двух сред мы потеряли четвертую часть полезного спектра сигнала от внутренних тканей, расположенную в области нижних частот. В данном случае опять возникла ситуация синтеза апертуры с заклеенным центром. Последствия этой ситуации рассматривались при синтезе апертуры на ультразвуковых волнах.

Улучшить результат можно, увеличив скорость перемещения пальца в два раза. Это могло бы привести к равенству максимальной частоты спектра от границы двух сред и верхней частоты подавления в активном фильтре. При этом мы бы потеряли значительно меньшую часть полезного спектра. Тем не менее сформируем опорные траекторные сигналы от точечных объектов на волне 0,61 см и с их помощью получим набор корреляционных функций с зарегистрированным объектным траекторным сигналом (рисунок 5.50, *a*). Далее полученную двумерную матрицу из набора корреляционных функций с помощью программы MathScad преобразуем в отображение поверхности в виде линий равной высоты, полученных в результате сечения поверхности горизонтальными плоскостями на разной высоте.

На рисунке 5.51 изображена томограмма пальца в сечении, которая представляет собой структуру в виде ячеек.

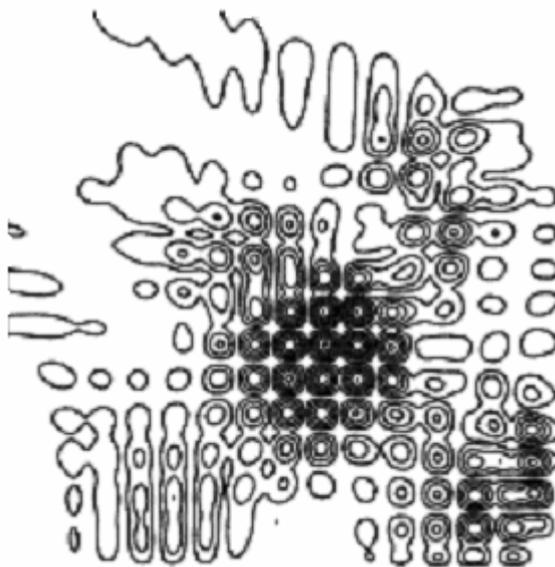


Рисунок 5.51 – Томограмма пальца

Такая структура, вероятнее всего, является результатом того, что траекторные сигналы в каналах оказались не в квадратуре по отношению друг к другу. Отсутствие квадратуры ведет к возрастанию боковых лепестков передаточной функции точки и, в конечном счете, к образованию ячеек после наложения матриц изображения. Потеря низкочастотной части спектра при режекции сигнала от границы двух сред приводит к появлению диагональных усов на томограммах, но ячеек при этом не образуется (см. рисунки 5.22 и 5.25). Появление ячеек на томограмме также возможно в результате дополнительных флюктуаций траекторного сигнала из-за динамической деформации диаграммы направленности антенны движущимся пальцем в ближней зоне антенны.

Оценим размеры поля изображения и размеры томографируемого объекта. Все поле изображения построено по матрице размером 256×256 элементов. Расстояние между элементами матрицы определяется следующим образом: $\Delta l = V_{от} \cdot T \cdot 4 = 30 \cdot 0,0002 \cdot 4 = 0,024$ см, где 4 – коэффициент прореживания матрицы. Умножив число элементов в строке и в столбце матрицы на расстояние между элементами, получаем размер поля томографической картинке (рисунк 5.51). Размеры поля картинке оказались равными $6,14 \times 6,14$ см. В этом случае диаметр центрального пятна, т. е. диаметр пальца, согласно картинке рис 5.51 составит 1,8 см, что вполне реально.

5.5.3 Объяснение ячеистой структуры изображения

Естественно, что на томограммах объектов недопустима ячеистая структура изображения. В предыдущем разделе были названы предполагаемые причины этого явления. Однако наиболее вероятной причиной ячеистой структуры следует считать отсутствие квадратуры между сигналами в каналах и влияние квадратурных каналов друг на друга из-за паразитных связей на СВЧ. На рисунке 5.52 представлены зарегистрированные траекторные сигналы в каналах.

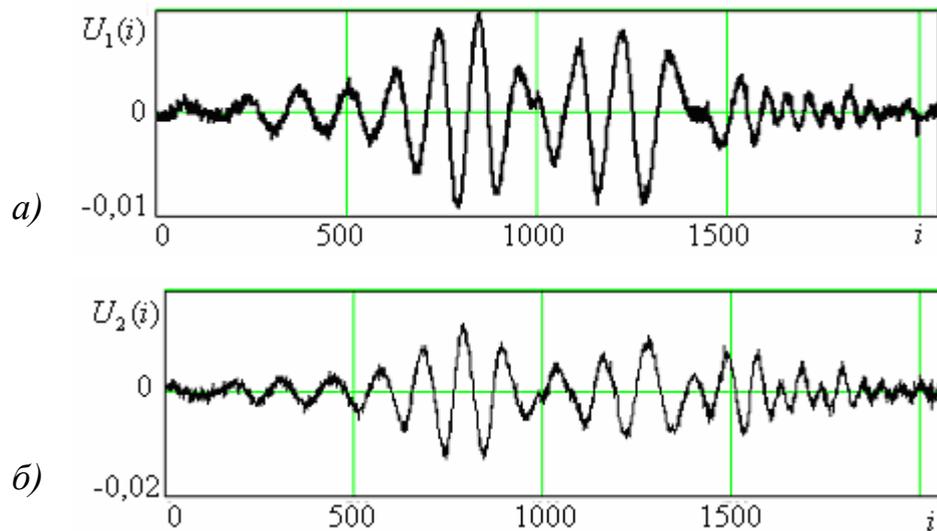


Рисунок 5.52 – Экспериментальные сигналы от пальца в каналах:

а) реальная часть, *б)* мнимая часть

Сравнивая сигналы $U_1(i)$ и $U_2(i)$, можно видеть, что они находятся в противофазе, т. е. сдвиг между ними составляет 180° . Сигналы в каналах должны находиться в квадратуре, т. е. фазовый сдвиг между ними должен составлять 90° .

5.5.4 Анализ результатов эксперимента

Результаты, полученные в процессе проведения эксперимента, положительны и полезны. Четкой картины с деталями внутренней структуры объекта получить не удалось, однако представленные результаты говорят о том, что предлагаемый метод томографии работает. Обозначим и поясним причины, которые не дали возможности получить четкой картины изображения и здесь же сформулируем предложения по преодолению возникших проблем.

Первая причина – это ближняя зона рупорной антенны. В данном случае ее размер 12 см. Из-за малой мощности зондирующего сигнала и слабой чувствительности приемника, чтобы не потерять полезный сигнал от внутренних тканей, приходилось работать в ближней зоне. Если бы диаграммы направленности рупорных антенн сохраняли свою стабильность при присутствии предметов в ближней зоне, то результат был бы значительно лучше. Движущиеся

предметы в ближней зоне вызывают динамическое рассогласование антенн, т. е. изменение их входного сопротивления в течение эксперимента.

Кроме того, поля приемной и передающей антенн подвергаются динамической деформации перемещающимися предметами в ближней зоне. В связи с этим траекторный сигнал обогащается флюктуациями, которые невозможно учесть при формировании опорных сигналов. В этой ситуации, чтобы избежать ненужных флюктуаций траекторного сигнала, можно идти по пути проектирования антенн, которые сохраняют стабильность своих параметров при внедрении в ближнюю зону движущихся предметов. Возможно, такими свойствами обладают антенны с фокусирующими линзами или коммутируемые антенные решетки.

Коммутируемые антенные решетки позволяют синтезировать апертуру без перемещения предметов. При этом каждый элемент антенной решетки имеет мизерную апертуру. Следовательно, его дальняя зона стремится к нулю. Таким образом, коммутируемые антенные решетки снимут проблему дальней зоны и необходимость относительного перемещения антенны и пациента.

Вторая причина, не позволившая достичь четкой картины реконструкции, – неподходящие диаграммы направленности антенн. В идеальном случае хотелось бы иметь диаграмму в виде бесконечно тонкого диска, который, рассекая предмет, дает картину его сечения. Работая в ближней зоне, мы имели диск, толщина которого равна апертуре антенны. В данном случае апертура рупора составляла 5 см. То есть мы пытались «рассечь» палец, длина которого 7 см, диском толщиной 5 см. Это также отрицательно сказалось на результатах томографии.

Третья причина ухудшения качества изображения – это потеря низкочастотной части спектра в результате подавления спектра сигнала от границы двух сред воздух–ткань пациента. В связи с этим не следует отказываться от томографирования пациента в дистиллированной воде. Преимущество такого томографирования в том, что нет резкой разницы в диэлектрической проницаемости

воды и тканей пациента. Поэтому не будет значительных отражений на границе двух сред. Кроме того, из-за уменьшения длины волны в водной среде в восемь раз можно значительно увеличить направленности излучения и приема антенн при уменьшении их апертуры и размера дальней зоны. Это также позволит повысить качество изображения.

Вышесказанное не означает, что нужно совсем отказаться от «сухого» томографирования. Нужно просто решить некоторые технические задачи, которые не являются неразрешимыми.

Выводы

1. Синтез апертуры на малой дальности применим для траекторного контроля и для томографии.

2. Теоретические представления о физике процессов синтеза апертуры в ближней зоне подтверждаются результатами экспериментов. Одним из таких подтверждений является объясненный и подкрепленный моделированием эффект частично заклеенной апертуры.

3. Не расходится с теоретическими представлениями и подтверждается экспериментально эффект сильных флюктуаций амплитуды траекторного сигнала, вызванный недопустимо широким сектором приема отраженной волны в плоскости, перпендикулярной траектории относительного движения.

4. Акустические волны и водная среда подходят для томографии и траекторного контроля с помощью синтезированной апертуры.

5. Синтез апертуры антенны на малой дальности успешно реализуется на акустических и электромагнитных волнах.

6. Эксперименты с электромагнитными волнами показали возможность томографии биологических объектов в воздушной среде на частоте 8–10 ГГц.

7. Эксперименты также показали, что отраженный от биологического объекта сигнал состоит из суммы двух сигналов: первый сигнал с узким спектром в районе нулевой частоты и большой спектральной плотностью образован отражениями от границы двух сред – воздух–биологическая ткань, второй сиг-

нал с широким спектром и с малой спектральной плотностью образован отражениями от внутренних тканей.

8. Корреляционная обработка первого сигнала с помощью опорных сигналов, сформированных для длины волны в воздушной среде, позволяет получить изображение непрозрачного биологического объекта с низким разрешением, что не представляет интереса для томографии.

9. Чтобы осуществить корреляционную обработку второго сигнала, несущего информацию о внутренней структуре биологического объекта, необходимо сформировать опорные сигналы для корреляционной обработки объектного сигнала при λ , с которой распространяется электромагнитная волна в тканях биологического объекта. Эта волна в 6–7 раз короче длины волны в воздушной среде и равна примерно 4 мм.

10. Корреляционная обработка сигнала от внутренних тканей с опорными сигналами, сформированными при $\lambda = 4$ мм, позволяет получить разрешение при томографии объектов, равное 0,8 мм. Эта разрешающая способность вполне приемлема для медицинских исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны теоретические положения реконструкции радиолокационного изображения цели по траекторному доплеровскому сигналу, полученному от монохроматического зондирования цели. Координатная привязка реконструированного изображения к конечному участку траектории полета летательного аппарата позволяет с высокой точностью извлечь информацию о пролетной ситуации и восстановить ее после пролёта локатора рядом с объектом. Достижимая при этом высокая информативность и точность испытаний позволяет разрабатывать высокоточные и эффективные системы ближней локации.

Результаты теоретической проработки реконструкции изображения, а также результаты моделирования и экспериментальные данные указывают на возможность приложения полученных результатов в томографии, интроскопии.

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработаны научные основы непроекционных методов реконструкции изображения объектов по траекторному сигналу при локации объекта монохроматическим сигналом с синтезом апертуры антенны, и на их базе создан способ высокоточного восстановления параметров перемещения локатора на малой дальности от объекта.

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.

3. Разработанные алгоритмы реконструкции изображения объекта и программное обеспечение реализованы в методике измерений пролетных параметров локатора вблизи объекта по реальному траекторному сигналу.

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.

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.

6. Доказаны следующие свойства изображений точечных объектов:

– отсутствие колец Эйри при синтезе апертуры по прямолинейной траектории;

– возможность перехода кругового апертурного синтеза в синтез апертуры по прямолинейной траектории при учете радиального ослабления отраженного сигнала;

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

7. Предложен метод устранения интерференции при использовании монохроматического зондирующего сигнала с применением многокурсного синтеза апертуры антенны.

8. Разработаны приёмы для обработки наложенных и развернутых на произвольный угол квадратных матриц изображения. Показано, что эта опера-

ция не эквивалентна операции обратного проецирования.

9. В результате моделирования многоракурсного синтеза апертуры показана возможность томографирования гомогенных областей с включенной неоднородностью.

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

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 лепестков.

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

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 вполне приемлемо для использования в медицине.

Представляется, что выполненная работа будет способствовать повышению достоверности и снижению затрат при траекторных измерениях, а также создаст основу для разработки конкурентно способных средств диагностики

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Абакумов, А. А. ЯМР-интроскопия [Текст] / А. А. Абакумов. – Обнинск : Изд-во Обнин. ин-та атомной энергетики, 1992. – 230 с.
3. Аксел, Л. Применение реконструктивной вычислительной томографии в рентгенодиагностике [Текст]: пер. с англ. / Л. Аксел, П. Х. Аджер, Р. А. Зиммерман // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 3. – С. 8–13.
4. Белоконев, В. М. Оценка информационных характеристик оптикоэлектронной системы автоматического определения координат цели по световой вспышке в ИК диапазоне [Текст] / В. М. Белоконев, Ю. И. Завадский, В. В. Чернокожин // Современные проблемы геодезии и оптики : материалы VIII МНТК. – Новосибирск : Изд-во СГГА, 2003. – Ч. III. – С. 37–40.
5. Бергман, Л. Ультразвук [Текст] : пер. с нем. / В. С. Григорьев, Л. Д. Розенберг. – М. : Изд-во иностран. лит., 1957. – 728 с.
6. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1965. – 608 с.
7. Введение в МР-томографию [Текст] / М. Г. Якобсон [и др.]. – Новосибирск, 1991. – 91с.
8. Волосюк, В. К. Формирование изображений подповерхностных неоднородностей и восстановление их электрофизических параметров [Текст] / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко, В. М. Веласко Эррера // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1999. – Т. 4, № 5. – С. 38–47.
9. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И. С. Гоноровский. – М. : Радио и связь, 1986. – 511 с.
10. Горюнов, А. А. Обратные задачи рассеяния в акустике [Текст] / А. А. Горюнов, А. В. Сосковец. – М. : Изд-во МГУ, 1989. – 151 с.

11. Гринберг, Я. С. Физические основы применения ядерного магнитного резонанса в медицине [Текст] : учеб. пособие / Я. С. Гринберг. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1998. – 54 с.
12. Даджион, Д. Цифровая обработка многомерных сигналов [Текст] : пер. с англ. / Д. Даджион, Р. Мерсеро. – М. : Мир, 1988. – 488 с.
13. Долганов, В. В. Исследование нелинейного нормирования в методах синтезированной апертуры при реконструкции акустических изображений [Текст] / В. В. Долганов, А. В. Осетров // Дефектоскопия. – 1995. – № 8. – С. 43–56.
14. Домаркас, В. Й. Ультразвуковая эхоскопия [Текст] / В. Й. Домаркас, Э. Л. Пилецкас. – Л. : Машиностроение, 1988. – 276 с.
15. Иванов, В. А. Внутривидение (ЯМР-томография) [Текст] / В. А. Иванов. – Л., 1989. – 29 с.
16. Исмаев, И. Э. Введение в ЯМР-томографию : учеб. пособие [Текст] / И. Э. Исмаев. – Казань, 2000. – 51 с.: ил.
17. 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.
18. Кок, В. Голографическая РЛС с синтезированной антенной продольного излучения [Текст] / В. Кок // ТИИЭР. – 1970. – Т. 58, № 11. – С. 43–54.
19. Кок, В. Применение голографических методов в разнесенных радиолокационных системах непрерывного излучения [Текст] / В. Кок // ТИИЭР. – 1970. – Т. 58, № 11. – С. 22–40.
20. Кондратенков, Г. С. Проблемы и перспективы развития радиовидения [Текст] / Г. С. Кондратенков // Радиотехника. – 2000. – № 1. – С. 3–13.
21. Кравчук, А. С. О методе импедансной томографии [Текст] / А. С. Кравчук // Физика и радиоэлектроника в медицине и биотехнологии : III междунар. конф. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 1998.

22. Кравчук, А. С. Основы компьютерной томографии [Текст] : пособие для студентов вузов / А. С. Кравчук. – М. : Дрофа. – 2001. – 239 с.: ил.
23. Кравчук, А. С. Развитие диагностического метода импедансной томографии [Текст] / А. С. Кравчук // Нечеткая логика, интеллектуальные системы и технологии : междунар. конф. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 1997.
24. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Б. Р. Левин. – М. : Сов. радио, 1969. – Кн. 1. – 752 с.
25. Лосев, Д. В. Томография неоднородных сред с использованием некогерентного радиоизлучения [Текст] / Д. В. Лосев, В. П. Якубов // II научная сессия, посвященная Дню Радио : тез. докл. – 1997. – Ч. I. – С. 237–238.
26. Луисс, А. К. Математические проблемы реконструктивной томографии [Текст] : пер. с англ. / А. К. Луисс, Ф. Наттерер // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 3. – С. 111–125.
27. Луитт, Р. М. Алгоритмы реконструкции с использованием интегральных преобразований [Текст] : пер. с англ. / Р. М. Луитт // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 3. – С. 125–147.
28. Львова, Л. В. Объект внимания [Текст] / Л. В. Львова // Провизор. – 2004. – № 20. – С. 78–84.
29. Львова Л. В. Объект внимания [Электронный ресурс] / Л. В. Львова. – Режим доступа : http://www.provisor.com.ua/archive/2004/N20/art_09.htm. – Загл. с экрана.
30. Маковски, А. Физические проблемы реконструктивной томографии : пер. с англ. [Текст] / А. Маковски // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 3. – С. 104–111.
31. Менса, Д. Л. Применение методов когерентной доплеровской томографии для получения изображения на СВЧ [Текст] / Д. Л. Менса, Ш. Халеви, Г. Уэйд // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 2. – С. 76–84.
32. Мерсеро, Р. Цифровое восстановление многомерных сигналов по их проекциям [Текст] / Р. Мерсеро, Б. Оппенгейм // ТИИЭР. – 1974. – Т. 62, № 10. – С. 29–51.

33. Микроволновая томография неоднородных сред [Текст] / В. П. Якубов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 12. – С. 1500–1507.
34. Миллер, Э. Применение ультразвука в медицине: физические основы [Текст] : пер. с англ. / Э. Миллер, К. Хилл, Дж. Бэмпер, Р. Дикинсон ; под ред. К. Хилла. – М. : Мир, 1989. – 567 с.
35. Многорежимные РСА – перспективное направление космической радиолокации [Текст] / С. Л. Внотченко, Т. Г. Мусинянц, И. С. Нейман, С. И. Смирнов // Исследование земли из космоса. – 1999. – № 3. – С. 53–58.
36. 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.
37. Морозов, А. И Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств [Текст] / А. И. Морозов, В. В. Проклов. – М. : Радио и связь, 1981. – 184 с.
38. Назаров, Л. Е. Алгоритмы классификации типов лесов на основе анализа радиолокационных изображений [Текст] / Л. Е. Назаров // Исследование земли из космоса. – 1999. – № 4. – С. 56–62.
39. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник [Текст] / под ред. В. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 1995. – 487 с.
40. Орлов, Д. А. Измерение характеристик приемных антенных решеток в условиях мелкого моря [Текст] / Д. А. Орлов, В. И. Турчин // Акуст. журн. – 2001. – Т. 47, № 5. – С. 698–705.
41. Осетров, А. В. Математические методы в акустической томографии протяженных неоднородностей [Текст] : дис. ... докт. техн. наук : 05.13.16 ; 01.04.06 : защищена 03.02.1999 : утв. 18.11.1999 / Осетров Александр Владимирович. – СПб., 1999. – 342 с. - Библиогр.: с.325-337.
42. Оппенгейм, А.В. Цифровая обработка сигналов [Текст] : пер. с англ / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер / под ред. С.Я. Шаца – М. : Мир, 1980. - 550 с.

43. Патент 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.
44. Петухов, Ю. В. Теория гидроакустических антенн. Аддитивные апертурные антенны [Текст] : учеб. пособие / Ю. В. Петухов. – Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 1999. – Ч. I. – 144 с.
45. Пистолькорс, А. А. Разрешающая способность голограммы и теория антенн [Текст] / А. А. Пистолькорс // Антенны : сб. статей / под ред. А. А. Пистолькорса. – 1967. – Вып. 2. – С. 55–70.
46. Подводная акустика и обработка сигналов [Текст] : пер. с англ. / под ред. Л. Бьерне. – М. : Мир, 1985. – 486 с.
47. Получение изображений внутренних органов человека с помощью СВЧ-томографии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.imp.kiae.ru/tehn/tomogr.htm> – Загл. с экрана.
48. Построение акустических изображений источников звука [Текст] / Д. А. Орлов [и др.]. – Н. Новгород, 1996. – 24 с. – Библиогр.: с. 23–24. – (Препринт / ИПФ РАН ; № 408).
49. Пресман, А. С. Действие микроволн на живые организмы и биологические структуры [Текст] / А. С. Пресман // Успехи физ. наук. – 1965. – Т. 86, Вып. 2. – С. 263–302.
50. Применение методов когерентной оптики и голографии к задачам антенной техники и обработки информации [Текст] / Л. Д. Бахрах [и др.] // Антенны : сб. статей / под ред. А. А. Пистолькорса. – 1967. – Вып. 2. – С. 33–45.
51. Применение СВЧ-томографии в медицине [Текст] / Ю. К. Тарабрин [и др.] // VII научная сессия, посвященная Дню Радио : тез. докл. – 1997. – Ч. II. – С. 151–152.
52. Проявления процессов на поверхности Ладожского озера по данным ра-

- диолокатора с синтезированной апертурой спутников [Текст] / А. Ю. Иванов [и др.] // Исследование земли из космоса. – 1999. – № 4. – С. 63–75.
53. Радиолокационная система беспилотного летательного аппарата [Текст] / В. Н. Антипов [и др.] // Радиотехника. – 2006. – № 7. – С. 14–20.
54. Радиолокационные методы исследования Земли [Текст] / Ю. А. Мельник, С. Г. Зубкович, В. Д. Степаненко ; под ред. Ю. А. Мельника. – М. : Сов. радио, 1980. – 264 с.
55. Радиолокационные станции воздушной разведки [Текст] / А. А. Комаров, Г. С. Кондратенков, Н. Н. Курилов ; под ред. Г. С. Кондратенкова. – М. : Воениздат, 1983. – 152 с.
56. Радиолокационные станции обзора земли [Текст] / Г. С. Кондратенков, В. А. Потехин, А. П. Реутов, В. А. Феоктистов ; под ред. Г. С. Кондратенкова. – М. : Радио и связь, 1983. – 272 с.
57. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны [Текст] / В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов, А. Н. Кулин, В. В. Мансуров. – М. : Радио и связь, 1988. – 302 с.
58. Рамм, А. Г. Многомерные обратные задачи рассеяния [Текст] / А. Г. Рамм. – М. : Мир, 1994. – 495 с.
59. Савельев, И. В. Курс общей физики [Текст] / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1982. – Т. 2. – 496 с.
60. Сафронов, Г. С. Введение в радиоголографию [Текст] / Г. С. Сафронов, А. П. Сафронова. – М. : Сов. радио, 1973. – 288 с.
61. Сейсмическая томография: с приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике [Текст] : пер. с англ. / Г. Нолет [и др.]. – М. : Мир, 1990. – 450 с.
62. Симонов, Е. Н. Рентгеновская компьютерная томография [Текст] / Е. Н. Симонов. – Снежинск : Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. – 364 с.
63. Скучик, Е. Основы акустики [Текст] / Е. Скучик. – М. : Мир, 1976. – Т. 2. – 542 с.

64. Смаришев, М. Д. Гидроакустические антенны [Текст] / М. Д. Смаришев, Ю. Ю. Добровольский. – Л. : Судостроение, 1984. – 302 с.
65. Трехкоординатный комплекс радиотехнической разведки 85В6-В [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rusarmy.com/pvo/pvo_vvs/rtr_85v6v.html. – Загл. с экрана.
66. Турчин, В. И. Многокурсовый апертурный синтез [Текст] / В. И. Турчин, И. Ш. Фикс. – Н. Новгород, 1997. – 23 с. – (Препринт / ИПФ РАН ; № 431).
67. Турчин, В. И. Многокурсовый апертурный синтез для широкополосных источников [Текст] / В. И. Турчин, И. Ш. Фикс ; РАН ИПФ. – Н. Новгород, 2001. – 26 с. – (Препринт № 583).
68. Федоров, Г. А. Вычислительная эмиссионная томография [Текст] / Г. А. Федоров, С. А. Терещенко. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 183 с.
69. Франсон, М. Голография [Текст] / М. Франсон ; пер. с фр. С. И. Балашовой ; под ред. Ю. И. Островского. – М. : Мир, 1972. – 246 с.
70. Хелгасон, С. Преобразование Радона [Текст] / С. Хелгасон. – М. : Мир, 1983. – 150 с.
71. Хелгасон, С. Дифференциальная геометрия, группы Ли и симметрические пространства [Текст] : / С. Хелгасон. – Серия `XX век. Математика и механика . Вып. 11. М.: Факториал Пресс, 2005. – 608 с.
72. Хермен, Г. Восстановление изображений по проекциям: основы реконструктивной томографии [Текст] : пер. с англ. / Г. Хермен. – М. : Мир, 1983. – 231 с.
73. Хермен Г. Т. Реконструктивная вычислительная томография : пер. с англ. [Текст] / Г. Т. Хермен // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 3 (темат. вып.). – С. 5–7.
74. Штейншлейгер, В. Б. Способы обработки сигналов радиолокационных станций с синтезированной апертурой при решении народнохозяйственных задач [Текст] / В. Б. Штейншлейгер, П. С. Лифанов // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, № 2. – С. 193–213.

75. Шутилов, В. А. Основы физики ультразвука [Текст] : учеб. пособие / В. А. Шутилов. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1980. – 280 с.
76. Ющенко, В. П. Восстановление внутренней структуры гомогенных объектов с включенной неоднородностью [Текст] / В. П. Ющенко // Автометрия. – 2005. – Т. 41, № 1. – С. 50–57.
77. Ющенко, В. П. Два метода когерентной томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Сб. науч. тр. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – № 3 (25). – С. 24–30.
78. Ющенко, В. П. Доплеровское сканирование структуры объекта с помощью синтезированной апертуры [Текст] / В. П. Ющенко // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 2. – С. 41–45.
79. Ющенко, В. П. Интерференцию можно устранить [Текст] / В. П. Ющенко // Науч. вест. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000. – № 1 (8). – С. 185–192.
80. 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.
81. Ющенко, В. П. Круговой апертурный синтез для целей томографии / В. П. Ющенко // Автометрия. – 2002. – Т. 38, № 6. – С. 28–33.
82. 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.
83. 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.
84. 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
85. 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 : международн. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – Т. 1. – С. 158–162 .
86. 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.
87. 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.
88. 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.
89. Ющенко, В. П. Синтезирование апертуры по квадратной траектории для когерентной томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2004. – № 2. – С. 18–27.
90. Ющенко, В. П. Сопоставление двух методов когерентной томографии [Текст] / В. П. Ющенко // Радиотехника и электроника. – 2004. – № 2. – С. 196–205.
91. 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.

92. 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.
93. 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.
94. 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.
95. Якубов, В. П. Восстановление внутренней структуры сильно поглощающих сред по ослаблению прошедшего излучения [Текст] / В. П. Якубов, Д. В. Лосев // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 10. – С. 1367–1372.
96. Якубов, В. П. Метод двойной фокусировки для когерентной томографии неоднородных сред [Текст] / В. П. Якубов, М. Л. Машаруев // Изв. вузов. Сер. Физика. – 1997. – № 4. – С. 87–92.
97. Якубов, В.П. Информационные перспективы радиоволновой томографии [Электронный ресурс] / В. П. Якубов, С. А. Славгородский, Д. В. Лосев. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2001. – <http://www.ict.nsc.ru/ws/Lyap2001/2364/>. – Загл. с экрана.
98. Adams, M. I. Synthetic aperture tomographic (SAI) imaging for microwave diagnostics [Текст] / M. I. Adams, A. P. Andersen // Proc. Inst. Elec. Eng., pt. H. – 1982. – Vol. 129, № 2. – P. 83–88.
99. Aleksoff, C. C. Holographic Doppler imaging of rotating objects [Текст] / C. C. Aleksoff, C. R. Christensen // Applied Optics. – 1975. – Vol. 14. – P. 134–141.
100. Alliney, S. Digital reconstruction of images from their projections in polar coordinates [Текст] / S. Alliney // Sig., Proces. – 1981. – Vol. 3, № 2. – P. 135–145.
101. Aperture synthesis $C_{18}H_0$ ($J = 1-0$) observations of L1551 IRS 5: Detailed

- structure of the infalling envelope [Текст] / Momose Munetake [et al.] // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 504, № 1. – P. 314–333.
102. ASAR-Antenna synthetic aperture radar imaging [Текст] / Ozdemir Caner, Bhalla Raj an, Trmtinalia Luiz C., Ling Hao // *SO IEEE Trans. and Propag.* – 1998. – Vol. 46, № 12. – P. 1845–1852.
103. Chen, C. C. Multifrequency imaging of radar turntable data [Текст] / C. C. Chen, H. C. Andrews // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* – 1980. – Vol. 16(1), № 1. – P. 15–22.
104. Czerwinski, Richard N. Line and boundary detection in speckle images [Текст] / N. Czerwinski Richard, L. Jones Douglas, D. (Jr).O'Brien William // *IEEE Transactions on Image Processing.* – 1998. – Vol. 7, № 12. – P. 1700–1714.
105. ERS-1 SAR sea ice catalogue [Текст] / O. M. Johannessen, S. Sandven, A. Drottning, K. Kloster. – Noordwijk : ESA SP. – 1997. – 89 p. – Bibliogr.: p. 83–84.
106. Gan, D. High-order fractal characterisation of sea-scattered signals detection of sea-surface target [Текст] / D. Gan, Z. Shouhong // *IEE Electronics Letters.* – 1999. – Vol. 35, № 5. – P. 424–425.
107. Halevy, S. Tomographic Radar Imaging Techniques [Текст] / S. Halevy // *Signals, Systems and Computers. Twenty-Second Asilomar Conference on.* – 1988. – Vol. 2. – P. 668–672.
108. Halman, J. I. SAR processing of ground-penetrating radar data for buried UXO detection: Results from a surface-based system [Текст] / J. I. Halman, K.A .Shubert, G. T. Ruck. // *Trans. Antennas and Propag.* – 1997. – Vol. 46, № 7. – P. 1023–1027.
109. Hohmann, M. Eine neue Methode zur dreidimensionalen Radarabbildung von Oberflächen [Текст] / M. Hohmann. – Munchen : Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1998. – 114 s. – Bibliogr.: s. 105–111.
110. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz [Текст] / Ishimaru Akira [et al.] // *Science Citation Index.* – 1999. – Vol. 34, № 1. – P.

- 257–268.
111. Karaman, M. Efficient ultrasonic aperture image [Текст] / M. Karaman, B. Tavli // Electronics Letters. – 1999. – Vol. 35, № 16. – P. 1319–1320.
 112. Kimble, H. Die Rolle des Doppler-Effektes in der Holographischen Schwingungsanalyse [Текст] / H. Kimble, J. Ost // Opt. Comm. – 1970. – Vol. 2. – P. 35–42.
 113. Lombardmi, F. Ocean surface velocity stimation in multichannel ATI-SAR systems [Текст] / F. Lombardmi, H. D. Gnfthts, F. Gini // Electronics Letters. – 1998. – Vol. 34, № 25. – P. 2429–2431.
 114. Mensa, D. Aperture synthesis by object rotation in coherent imaging [Текст] / D. Mensa, G. Heidbreder, G. Wade // IEEE Trans. Nuel. Sci. – 1980. – Vol. 27, № 2. – P. 989–998.
 115. Propagation prediction calculation used tor SAR imaging urban area [Текст] / S. Meric, G. Chassay, O. Bechu, T. Tenoux // Electronics Letters. – 1998. – Vol. 34, № 11. – P. 1147–1149.
 116. SAR ocean feature catalogue [Текст] / J. A. Johannessen, G. Digranes, H. Espedal, O. M. Johannessen // ESA SP/Europ. space agency. – Noordwijk, 1994. – P. 96–98. – (ESA SP-1174).
 117. Sherman, J. Properties of focused apertures in the fresnel region [Текст] / J. Sherman // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1962. – Vol. 10. – P. 399–408.
 118. Small, D. Validation of Height Models from ERS Interferometry [Текст] / D. Small, D. Nüesch // Proc. of ESA-FRINGE'96 Workshop, Sept. 30–Oct. 2. – Zürich : Switzerland, 1996.
 119. Stergiopoulos, S. Implementation of adaptive synthetic-aperture processing schemes in integrated active-passive sonar [Текст] / S. Stergiopoulos // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 86, № 2. – P. 358–396.
 120. Voles, R. Plan resolution of a surface-penetrating synthetic aperture radar / R. Voles // Electronics Letters. – 1997. – Vol. 33, № 25. – P. 2159–2160.

121. Walker, J. L. Range – Doppler imaging of rotating objects [Текст] / J. L. Walker // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1980. – Vol. 16 (1), № 1. – P. 23–52.
122. Webb Jennifer, L.H. High-resolution planetary imaging via spotlight-mode synthetic aperture [Текст] / L. H. Webb Jennifer, C.(Jr) Munson, J. S. Stacy Nick // Trans. Image Process. – 1998. – Vol. 7, № 11. – P. 1571–1582.
123. Wong, D. Analysis processing of ultra wide-band SAR imagery for buried landmine detection [Текст] / D. Wong, L. Carin // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1998. – Vol. 46, № 11. – P. 1747–1748.
124. Wu, Xiaoqing. Anwendungen der Satellitengestutzten - Radarinterferometrie zur Bestimmung von Topographie und Geschwindigkeitsfeldern [Текст] / Xiaoqing Wu // Dt. geod. Kommiss. bei der Bayerischen Akad. der Wiss. R. C, Diss. – Munchen, 1998. – 103 s.
125. Xia, Y. Bestimmung geodynamischer Effekte mit Hilfe der Radarinterferometrie [Текст] / Y. Xia // Dt. geod. Kommiss. bei der Bayerischen Akad. der Wiss. – Munchen, 1997. – № 467. – 92 s. – Bibliogr.: s. 89–91.
126. Yakubov, V. P. Method of double focusing for microwave tomography [Текст] / V. P. Yakubov, M. L. Masharuev // Microwave and optical technology letters. – 1996. – V. 13, № 4. – С. 187–189.
127. Yongijan, Yu. CFAR detector for high-resolution multi-look SAR image [Текст] / Yongijan Yu, Yan Lu, Shun-ji Huang // Physical Review Letter. – 1998. – Vol. 35, № 19. – P. 1668–1669.
128. Yushchenko, V. P. A Circular Aperture synthesis for Tomography [Текст] / V. P. Yushchenko // The 6th Russian-Korean International Symposium On Science and Technology KORUS-2002, June 24-30.02. – Novosibirsk : NSTU, 2002. – Vol. 1. – P. 374–378.
129. 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.

130. 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.
131. 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>
132. 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. 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.
133. 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.
134. Исследование алгоритмов и систем признаков детального распознавания воздушных целей: отчет о НИР / НП СибНЦ «Безопасность»; рук. В.Н.Легкий; исполнители: Ющенко В.П., Борисова И.В., Санков О.В. – Новосибирск, 2012г. – 196с.

ПРИЛОЖЕНИЯ**ПРИЛОЖЕНИЕ А****Список сокращений**

- СА - синтезированная апертура
АС - апертурный синтез
СБР - система ближней радиолокации
АЧС - амплитудно-частотный спектр
ФЧС - фазочастотный спектр
АЧХ - амплитудно-частотная характеристика
ФЧХ - фазочастотная характеристика
ДПФ - дискретное преобразование Фурье
БПФ - быстрое преобразование Фурье
ОПФ – обратное преобразование Фурье
ОБПФ - обратное быстрое преобразование Фурье
ВСА - время синтезирования апертуры
ИС - интервал синтезирования
ИХ - импульсная характеристика
ТДС - траекторный доплеровский сигнал
ДОР - диаграмма обратного рассеяния
ЭОП - эффективная отражающая поверхность
ССВ - скользящая свертка
ЗУР - зенитная управляемая ракета
ЗРК – зенитный ракетный комплекс
СПЦ - станция подсвета цели
ап - авторская публикация

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Символы операций

$F \{ \}$ - преобразование Фурье

$F^{-1} \{ \}$ - Обратное преобразование Фурье

$\text{Re} \{ \}$ - реальная часть

$\text{Im} \{ \}$ - мнимая часть

$H \{ \}$ - преобразование Гильберта

$\Phi \{ \}$ - дискретное преобразование Фурье

$\Phi^{-1} \{ \}$ - обратное дискретное преобразование Фурье

R - прямое преобразование Радона

R^{-1} - обратное преобразование Радона

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программа и результаты расчета двумерной взаимной корреляционной функции для точечного объекта

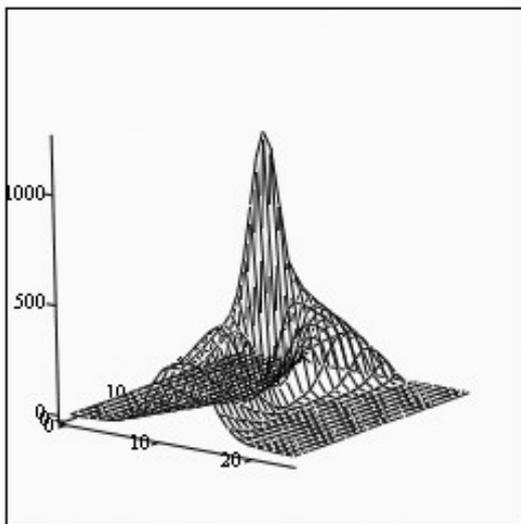
$i := 0..24$ $k := 0..24$ $y3 := 0.15$
 $C := 0.15$ $\tau := 0.083333333$ $\pi := 3.1415$ $\Delta := 0.0125$ $v := 0.3$ $\lambda := 0.025$
 $t := 0, 0.1..1$ $y := 0, 0.03..0.3$

$$t_i := \begin{cases} 0 & \text{if } i \leq 12 \\ \tau \cdot |12 - i| & \end{cases} \quad t1_i := \begin{cases} \tau \cdot i & \text{if } i \leq 12 \\ \tau \cdot 12 & \end{cases}$$

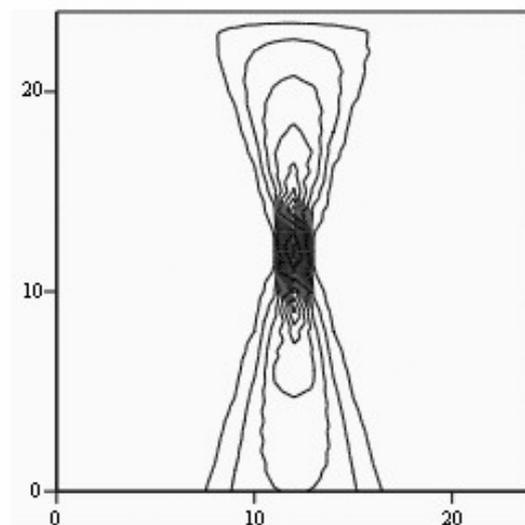
$$y_k := \begin{cases} 0 & \text{if } k \leq 12 \\ \Delta \cdot |12 - k| & \end{cases} \quad y1_k := \begin{cases} \Delta \cdot k & \text{if } k \leq 12 \\ \Delta \cdot 12 & \end{cases}$$

$$d(t, y, i, k) := \frac{(24 - k)^{1.2}}{\left[\left[(v \cdot t - C)^2 + (y + y3)^2 \right] \cdot \left[v \cdot [t + \tau \cdot (12 - i)] - C \right]^2 + [y + y3 + \Delta \cdot (12 - k)]^2 \right]} \cdot e^{-j \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{\sqrt{(v \cdot t - C)^2 + (y + y3)^2} - \sqrt{[v \cdot [t + \tau \cdot (12 - i)] - C]^2 + [y + y3 + \Delta \cdot (12 - k)]^2}}{\lambda}}$$

$$M_{i, k} := \left| \int_0^{0.15} \int_0^1 d(t, y, i, k) dt dy \right|$$



M



M

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Программа и результаты расчета передаточной функции точки

$$i := 0..24 \quad k := 0..24 \quad y3 := 0.15$$

$$C := 0.15 \quad \tau := 0.08333333 \quad \pi := 3.1415 \quad \Delta := 0.0125 \quad v := 0.3 \quad \lambda := 0.025$$

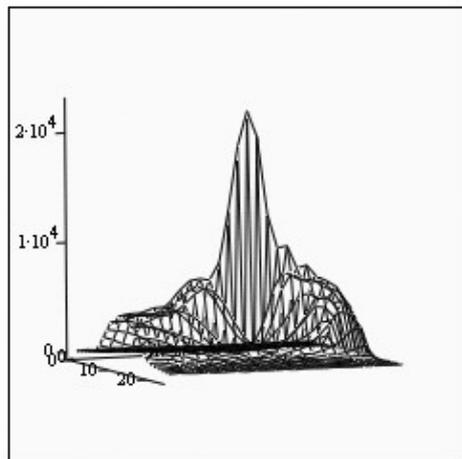
$$t := 0, 0.001..1 \quad y := 0, 0.03..0.3$$

$$t_i := \begin{cases} 0 & \text{if } i \leq 12 \\ \tau \cdot |12 - i| & \end{cases} \quad t1_i := \begin{cases} \tau \cdot i & \text{if } i \leq 12 \\ \tau \cdot 12 & \end{cases}$$

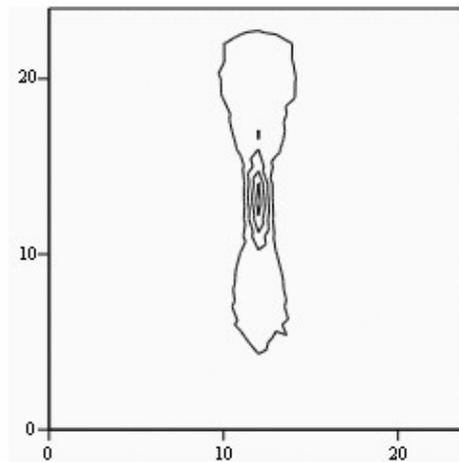
$$d(t, y, i, k) := \frac{(24 - k)^{1.2}}{\left[(v \cdot t - C)^2 + (y3)^2 \right] \cdot \left[[v \cdot [t + \tau \cdot (12 - i)] - C]^2 + [y3 + \Delta \cdot (13 - k)]^2 \right]}$$

$$e^{-\frac{j \cdot 4\pi \left[\sqrt{(v \cdot t - C)^2 + (y3)^2} - \sqrt{[v \cdot [t + \tau \cdot (12 - i)] - C]^2 + [y3 + \Delta \cdot (13 - k)]^2} \right]}{\lambda}}$$

$$M_{i, k} := \left| \int_0^1 d(t, y, i, k) dt \right|$$



M



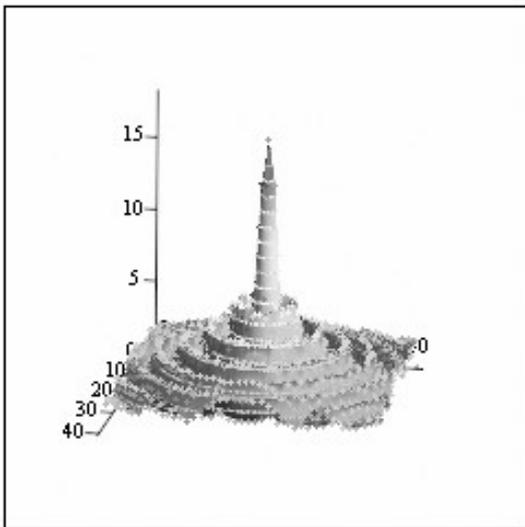
M

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

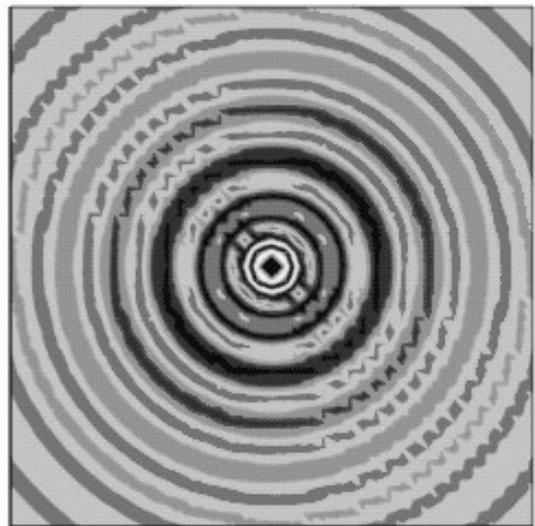
**Программа и результаты расчета двумерной корреляционной функции
для точечного объекта при синтезе апертуры антенны по круговой траек-
тории движения.**

$$\begin{aligned}
 i &:= 0..40 & j &:= \sqrt{-1} & \lambda &:= 1.5 & s1 &:= 0.1 & s2 &:= 0.1 & R0 &:= 2.8284271 \\
 k &:= 0..40 & x_i &:= 20 - i & y_k &:= 20 - k & r_{i,k} &:= \sqrt{(x_i \cdot s1)^2 + (y_k \cdot s2)^2} \\
 Q_{i,k} &:= \operatorname{atan}\left(\frac{y_k}{x_i + 0.0000001}\right) & \delta &:= 0, 0.2828..2.828 & \phi &:= 0, 0.31415..6.28318 \\
 & & \pi &:= 3.1415
 \end{aligned}$$

$$M_{i,k} := \left| \int_0^{2\pi} \int_0^{R0} \left[\exp\left[\frac{-j \cdot 4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \left[R0 - \sqrt{(R0)^2 + (r_{i,k})^2 - 2 \cdot (r_{i,k}) \cdot R0 \cdot \cos(Q_{i,k} - \phi)} \right] \right] \right] d\delta d\phi \right|$$



M



M

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Программа и результаты расчета передаточной функции точки при синтезе апертуры антенны по круговой траектории движения.

$i := 0..40$ $j := \sqrt{-1}$ $\lambda := 1.5$ $s1 := 0.1$ $s2 := 0.1$ $R0 := 2.828427$
 $k := 0..40$

$x_i := 20 - i$ $y_k := 20 - k$

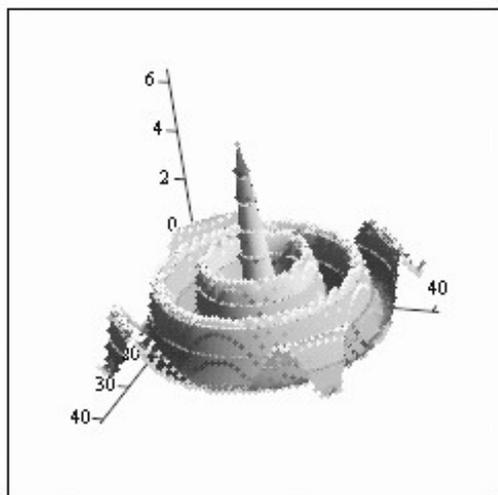
$$r_{i,k} := \sqrt{(x_i \cdot s1)^2 + (y_k \cdot s2)^2}$$

$$Q_{i,k} := \operatorname{atan}\left(\frac{y_k}{x_i + 0.0000001}\right)$$

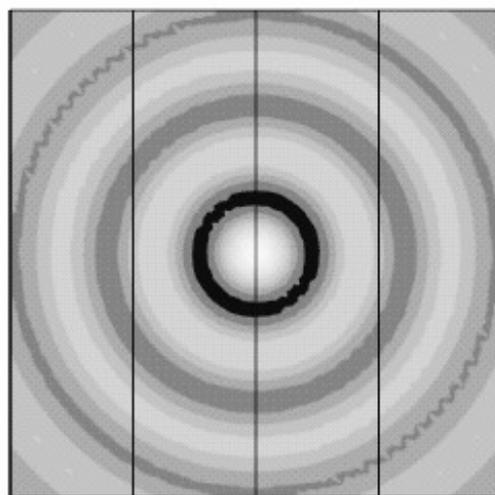
$$\delta := 0,0.2828.2.828 \quad \phi := 0,0.31415.6.28318$$

$$\pi := 3.1415$$

$$M_{i,k} := \int_0^{6.28318} \left[\exp\left[\frac{-j \cdot 4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \left[R0 - \sqrt{(R0)^2 + (r_{i,k})^2 - 2 \cdot (r_{i,k}) \cdot R0 \cdot \cos(Q_{i,k} - \phi)} \right] \right] \right] d\phi$$



M



M

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Сведения о практическом использовании результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ОАО «НИИЭП», к.э.н.



А.Э.Алямов

10 июля 2013

А К Т

о внедрении результатов докторской диссертации Ющенко Валерия Павловича «Непроекционная реконструкция изображений объектов при монохроматическом зондировании пространства и синтезе апертуры»

Мы, нижеподписавшиеся представители ОАО «Научно-исследовательский институт электронных приборов» начальник лаборатории В.Б. Ромодин, старший научный сотрудник М.В. Орлова, составили настоящий акт в том, что разработанные Ющенко Валерием Павловичем алгоритмы обработки сложных локационных сигналов и реализующие их программные блоки используются в ОАО «НИИЭП» при оценке результатов натурных испытаний доплеровских систем ближней радиолокации, а также в комплексах физико-математического моделирования.

Указанные алгоритмы и программные блоки предназначены для восстановления параметров пролета ракеты мимо цели после их взаимодействия. При этом визуализируется картина взаимодействия, на которой цель отображается вместе с диаграммой обратного рассеяния с координатной привязкой к отрезку траектории взаимодействия.

Восстановление и визуализация информации испытаний необходима для оценки эффективности ракетных комплексов и оптимизации основных параметров доплеровских бортовых систем ближней радиолокации.

В.П.Ющенко разрешено использовать в докторской диссертации материалы, касающиеся алгоритмов траекторного контроля и согласованных схемотехнических решений приема траекторного сигнала.

Начальник лаборатории,
к.т.н., с.н.с.

В.Б. Ромодин

Старший научный сотрудник,
к.т.н., доцент

М.В. Орлова

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор
ОАО «Новосибирское производст-
венное объединение «Луч»



А.Н.Макогонов

апреля 2013г.

А К Т

о внедрении результатов докторской диссертации Ющенко Валерия Павловича «Непроекционная реконструкция изображений объектов при монохроматическом зондировании пространства и синтезе апертуры»

Главный конструктор ОАО «НПО «Луч» Пирожников В.Г., начальник плано-диспетчерского отдела Волков В.П. составили настоящий акт в том, что разработанный Ющенко Валерием Павловичем в рамках выполнения диссертационной работы программно-алгоритмический комплекс используется ОАО «НПО «Луч» при испытаниях доплеровских радиолокационных датчиков для определения промаха или отклонения траектории движения объектов от заданной.

Предложенная Ющенко В.П. методика обработки траекторных сигналов и метод реконструкции радиолокационного изображения с координатной привязкой к участку дистанции позволяет анализировать причины несвоевременного формирования исполнительной команды и дорабатывать изделия предприятия.

Научные и практические результаты диссертационных исследований Ющенко В.П. опубликованы в научных изданиях и используются специалистами ОАО «НПО «Луч» при разработке контрольно-испытательной аппаратуры. Измерение обратного рассеяния волн в процессе взаимодействия датчиков цели с отражающими объектами позволяет совершенствовать методику полигонных испытаний для объективного оценивания особенностей воздействия на цель, а в результате – повысить эффективность средств поражения и комплексов в целом.

Главный конструктор

Начальник ПДО

Пирожников В.Г.

Волков В.П.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФКП «НОЗИП»
 _____ А.Г.Бухаров
 _____ 2011 г.



А К Т

о внедрении результатов докторской диссертации Ющенко Валерия Павловича

Начальник отдела ФКП «НОЗИП» Шароватов В.В., консультант Шитиков В.Ю. составили настоящий акт в том, что разработанный Ющенко Валерием Павловичем в рамках выполнения диссертационной работы программно-алгоритмический комплекс используется на предприятии ФКП «НОЗИП» при анализе причин несвоевременного срабатывания доплеровских радиолокационных датчиков цели (ДЦ).

Программно-алгоритмический комплекс позволяет по доплеровскому сигналу определить ориентацию диаграммы обратного рассеяния волн, а также пространственное положение центра цели в момент формирования исполнительной команды.

Положения диаграммы обратного рассеяния на построенном изображении образа цели в процессе взаимодействия ДЦ с отражающими объектами позволяет установить причины преждевременного формирования исполнительной команды, а определение центра макета цели на картине изображения позволяет оценить особенности воздействия на цель, а значит, и эффективность всего комплекса.

Методика формирования и обработки траекторных сигналов доплеровских датчиков цели, а также результаты, зафиксированные при проведении испытаний радиолокационных ДЦ методом проездов на базе ФКП «НОЗИП», получили признание специалистов отрасли, опубликованы в научных изданиях и могут быть использованы в докторской диссертации Ющенко В.П.

Начальник отдела



В.В. Шароватов

Консультант



В.Ю. Шитиков

"Утверждаю"

Ректор НГТУ профессор

Пустовой Н.В.

20 05

2011 г.



АКТ

о внедрении результатов докторской диссертации В.П. Ющенко

г. Новосибирск

" 20 " мая 2011 г.

Комиссия Новосибирского государственного технического университета в составе: декан факультета летательных аппаратов д.т.н., профессор Матвеев К.А., заведующий кафедрой Автономных информационных и управляющих систем (АИУС) д.т.н., доцент Легкий В.Н., ученый секретарь кафедры Автономных информационных и управляющих систем к.т.н., доцент Орлова М.В. составили настоящий АКТ о внедрении результатов диссертационной работы профессора кафедры АИУС НГТУ Ющенко Валерия Павловича.

Вид внедрения: использование результатов диссертационной работы в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности "Автономные информационные и управляющие системы", магистров и бакалавров по направлению "Автоматизация и управление".

Конкретные результаты внедрения

Материалы диссертационной работы используются в НГТУ с 1989г.:

- при преподавании дисциплин: "Методы обработки сигналов и изображений", "Радиоэлектронные информационно-управляющие системы", "Системы и сети", "Теоретические основы радиотехники", "Теория информации", а также при выполнении дипломных проектов и магистерских диссертаций;
- в учебно-методических работах: "Теория обработки информации", "Радиотехника", "Радиоприемные устройства";
- в процессе руководства аспирантами по специальности 05.11.16 "Информационно-измерительные и управляющие системы";
- в процессе курсового проектирования и НИР студентов при разработке компьютерных программ для моделирования траекторных сигналов лоцируемых и томографируемых объектов с реконструкцией их изображения;
- в лабораторных работах по ближней локации и томографии с апертурным синтезом.

Декан факультета летательных аппаратов

К.А. Матвеев.

Заведующий кафедрой АИУС

В.Н. Легкий

Ученый секретарь кафедры АИУС

М.В. Орлова