

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования "Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет"

На правах рукописи

КВАСНИКОВ КОНСТАНТИН ГРИГОРЬЕВИЧ

**АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ФАСОННЫХ ОТЛИВОК С  
МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ АНТЕННОЙ  
РЕШЕТКИ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор А. И. Солдатов

Томск – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....	13
1.1 Описание объекта контроля и характерных дефектов .....	13
1.2 Методы и средства неразрушающего контроля изделий из металла.....	29
1.3 Методы визуализации внутренней структуры объекта контроля .....	45
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ РЕШЕТОК .....	51
2.1 Диаграмма направленности решётки по технологии TFM .....	51
2.2 Разрешающая способность .....	63
2.3 Мультипликативные методы обработки .....	71
2.4 Чувствительность аппаратуры использующей алгоритм TFM .....	76
2.5 Компьютерная модель акустического тракта.....	81
3 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА	107
3.1 Блок электроники ультразвукового дефектоскопа .....	108
3.2 Программный интерфейс дефектоскопа .....	115
3.3 Экспериментальные исследования .....	134
3.4 Конструктивное исполнение установки контроля.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	149
Приложение А .....	162
Приложение Б .....	163
Приложение В.....	164
Приложение Г .....	165
Приложение Д.....	166

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время отечественная космическая отрасль начала возвращать свои утраченные в годы перестройки лидирующие позиции на мировой арене. На орбиту стали выводиться космические аппараты (КА) с гарантийным ресурсом 1...3 года для систем связи, ретрансляции, навигации, радиотехнической разведки и предупреждения о ракетном нападении. Отдельные образцы КА имеют гарантийный ресурс 5...8 и даже 10 лет (при их использовании в пониженных категориях технического состояния или в резерве). Ежегодное число запусков КА весьма высоко. Это обуславливает значительный расход средств на развертывание и восполнение КА в течение 15...20 лет их эксплуатации.

Одним из важнейших факторов, влияющих на долговечность КА, является уровень технологии и культуры производства. Диапазоны разброса сроков активного существования КА, наработок на отказ бортовой аппаратуры весьма значительны, что свидетельствует о недостаточном уровне стабильности качества производства бортовой аппаратуры. Это приводит к преждевременным, до истечения гарантийного САС, отказам КА, использованию резервирования в объектах в основном для парирования дефектности и в меньшей степени для увеличения долговечности.

В нашей стране развернута и активно используется уникальная навигационная система ГЛОНАСС в составе 24 КА. На проведение летных испытаний и развертывание орбитальной группировки было использовано 68 КА. На основе изложенного выше можно сделать вывод о необходимости существенного повышения долговечности КА, используемых в много спутниковых системах, в противном случае решение задачи восполнения много спутниковых космических систем в современных условиях практически невозможно.

Для повышения активного срока эксплуатации необходим контроль всех элементов КА. На АО «НПЦ «Полюс» приняты необходимые меры для обеспечения качества изделий ракетно-космической техники. Разработаны и утверждены технические условия на литье из цветных металлов и сплавов -

ЕИЖА.300000.003 ТУ (ОАТ.599.005), на отливки фасонные из алюминиевых сплавов - ЕИЖА.300000.004 ТУ, на отливки фасонные из магниевых сплавов - ЕИЖА.300000.006 ТУ, отливки фасонные из сплавов чугуна - ЕИЖА.300000.045 ТУ. В соответствии с этими ТУ в поковках не допускаются неметаллические включения размером свыше 0,5 мм в центральной части, и размером свыше 0,2 мм – на периферии. Максимальное допустимое количество мелких неметаллических включений – 15 шт. в центральной части и 10 шт. на периферии.

Обеспечение таких высоких требований возможно только акустическими методами с использованием многоэлементных датчиков. Концептуально применение решеток с когерентной обработкой принятых сигналов хорошо известно в технике. Такой подход позволяет получить высокое отношение сигнал/шум и максимально точно локализовать дефекты. Для визуализации дефектов используют фазовое управление элементами антенной решетки (ФАР), которое получило очень широкое распространение во всем мире, и метод цифровой фокусировки (Total Focusing Method), заключающийся в постобработке принятых А-сканов, который демонстрирует несомненные преимущества перед фазовым управлением элементами антенной решетки. Большие группы ученых из разных стран развивают это направление: Дж.Дэвис и П.Кавлей из исследовательского центра Великобритании, С.Прада из Парижского института Ланжевена, Д.Вилсокс из Бристольского университета Великобритании, Ю.Биркелунд из Норвежского университета Тромсе, А.Булавинов из Фраунгоферовского института неразрушающего контроля, Германия, А.Самокрутов и В.Шевалдыкин из ООО «Акустические Контрольные Системы» г.Москва, Е.Базулин, В.Бадалян и А. Вовилкин из НПЦ неразрушающего контроля «Эхо+», Москва.

Однако проблемы повышения чувствительности, разрешающей способности и отношения сигнал/шум остаются актуальными и сегодня, поэтому исследователи пытаются применить новые алгоритмы обработки исходной информации для решения этих задач. В последнее время были разработаны: «Dynamic Depth Focusing method», «method of Decomposition of the Time Reversal

Operator», «the Cylindrical Phase Shift Migration algorithm», которые хотя и имеют оригинальные алгоритмы обработки, но не дают кардинального улучшения дефектометрических параметров систем контроля. Связано это, прежде всего, с тем, что до сих пор не получено аналитическое выражение для расчета разрешающей способности линейной эквидистантной антенной решетки при аддитивном способе обработки парциальных сигналов. Проведение же теоретического анализа на основе численных методов представляет собой очень трудоемкую задачу. С другой стороны, в технике обработки сигналов известны методы перемножения сигналов для решения различного рода задач. Использование метода мультипликативной обработки акустических сигналов в миграционном алгоритме Кирхгофа может улучшить дефектометрические характеристики систем акустического контроля. Однако на сегодняшний день отсутствуют аналитические выражения для расчета диаграммы направленности, чувствительности и отношение сигнал/шум линейной эквидистантной антенной решетки при мультипликативном способе обработки парциальных сигналов.

Поэтому основная задача данной работы состоит в анализе дефектометрических характеристик системы акустического контроля на основе линейных эквидистантных антенных решеток с мультипликативной обработкой акустических сигналов.

**Объектом исследования** в представленной работе является акустический тракт эхо-импульсного дефектоскопа на основе эквидистантных линейных антенных решеток.

**Цель диссертационной работы:** исследовать возможности акустической визуализации на основе линейных эквидистантных антенных решеток с аддитивной и мультипликативной обработкой сигналов для создания аппаратно-программного комплекса неразрушающего контроля металлических заготовок РЭА.

Достижение поставленных целей потребовало решения следующих **основных задач:**

- Оптимизировать методику реконструкции акустического изображения

зоны контроля с использованием аддитивной и мультипликативной обработки парциальных сигналов эквидистантной линейной антенной решетки.

- Провести теоретические и экспериментальные исследования дефектометрических характеристик акустической визуализации с использованием аддитивной и мультипликативной обработки парциальных сигналов.

- Разработать макетный образец прибора и провести его испытания

**Методы исследований.** Для решения основных задач диссертации использованы частные решения волнового уравнения для граничных условий полупространства, теория геометрической акустики, теория дифракции Кирхгофа, теория вероятности и компьютерное моделирование. Экспериментальные исследования выполнены с использованием метода физического эксперимента с последующей обработкой данных статистическими методами.

**Научная новизна работы.** В работе были получены следующие новые научные результаты:

- Разработана компьютерная модель реконструкции акустического изображения, которая позволяет проводить исследования в широком диапазоне исходных параметров антенной решетки, акустического тракта зоны контроля с использованием методов аддитивной и мультипликативной обработки парциальных сигналов, позволяющая задавать исходную форму эхо-сигнала и исследовать дефектометрические характеристики дефектоскопа.

- Получены аналитические выражения, описывающие разрешающую способность линейной эквидистантной антенной решетки при мультипликативном и аддитивном способах обработки парциальных сигналов.

- Получены аналитические выражения, описывающие диаграмму направленности линейной эквидистантной антенной решетки при мультипликативной обработке парциальных сигналов.

- Получены аналитические выражения, описывающие отношение сигнал\шум при мультипликативной обработке парциальных сигналов.

- Создан акустический дефектоскоп, имеющий лучшие технические характеристики по сравнению с аналогами.

**Практическая значимость.**

- Полученные аналитические выражения разрешающей способности и отношения сигнал/шум использованы при разработке метода мультипликативной обработки парциальных сигналов.

- Предложенная компьютерная модель позволяет определить параметры акустического тракта при проектировании многоканальных эхо-импульсных дефектоскопов без проведения затратных экспериментальных исследований.

- Создан действующий макетный образец акустического эхо-импульсного дефектоскопа, нашедший практическое применение в АО «НПЦ «Полус».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Теоретический анализ синтезированной апертуры, полученной в результате сканирования способом TFM, позволил впервые сформулировать аналитическое выражение диаграммы направленности в гармоническом режиме.

- Угловая разрешающая способность антенной решётки из 9 элементов с аддитивной обработкой парциальной информации методом TFM при частоте акустического излучения 300 кГц составляет не более 6.5 градусов в зоне контроля.

- Диаграмма направленности для мультипликативного способа обработки парциальной информации TFM в более чем в 3 раз меньше аналогичного параметра для аддитивного способа обработки.

- Компьютерная модель акустической реконструкции TFM, описывающая параметры сигнала в произвольной точке зоны контроля в зависимости от конфигурации акустического тракта и характеристик модели дефектов позволяет проводить исследования в «реальном» масштабе времени.

**Личный вклад автора:** участие в постановке задач, разработке модели акустического звуковидения. Автором лично предложен мультипликативный способ обработки сигналов антенной решетки, а также проведено исследование разрешающей способности, чувствительности и отношения сигнал/шум электронно-акустического тракта.

Апробация работы и публикации.

Материалы, вошедшие в диссертацию, доложены и обсуждены на ряде конференций.

- International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, г. Томск, 2015,

- 52nd annual conference of the British institute of non-destructive testing 2013, BINDT 2013,

- 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012, г. Томск, 2012

- 42th International conference NDE for Safety\ Defektoskopie 2012, Chrudimi, Czech Republic

- Modern Technique and Technologies: Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists, Tomsk 2011

- Инновации в неразрушающем контроле: сборник трудов II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле, Томск, 2013

- III Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых , Томск, 2013

- XXI Петербургская конференция «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций», Санкт-Петербург, 2013

- VI научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Современная газотранспортная отрасль: перспективы, проблемы, решения», Томск, 2013.

- XIX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2013

### **Использование результатов работы**

Результаты исследований и разработанный прибор внедрен на АО «НПЦ «Полюс», г.Томск.

### **Публикации.**

По результатам выполненных исследований опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, 2 патента на изобретения, 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ и 6 докладов и тезисов в материалах Международных и Всероссийских научных конференций.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 164 страниц, 79 рисунков и 9 таблиц. Обзор литературных источников содержит 136 наименований.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, обозначено современное состояние исследований в области ультразвукового звуковидения, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ объекта контроля, рассмотрены ТУ объекта контроля, описаны типы дефектов, встречающиеся в изделиях из металла, и приведена их классификация. Рассмотрены методы и средства неразрушающего контроля таких дефектов, приведена их классификация. Обоснован оптимальный выбор метода, который был подвергнут всестороннему анализу. Рассмотрены эхо-импульсный и теневой способы контроля как с одиночными преобразователями, так и с использованием многоэлементных антенных решеток. Показано, что при использовании многоэлементных антенных решеток возможно применение разнообразных алгоритмов обработки исходных данных решетки: Synthetic aperture focusing technique (SAFT), Total focusing method (TFM), Common source method (CSM), Phase Coherent Imaging (PCI), Spatial Compounding Imaging (SCI) и другие, которые позволяют получить лучшие дефектометрические характеристики по сравнению с одиночным преобразователем.

**Во второй главе** проведено теоретическое исследование фундаментальных закономерностей сканирования с помощью линейной эквидистантной

акустической антенной решётки способом TFM. Частное решение волнового уравнения в форме функции Грина и граничными условиями в виде приближений Кирхгофа позволило свести дальнейший анализ к реальным алгебраическим функциям. В результате данной работы была получено аналитическое описание диаграммы направленности антенной решётки с обработкой парциальной информации по методу TFM. Данный параметр лежит в основе определения разрешающей способности систем акустической визуализации. В работе получено приближенное аналитическое выражение разрешающей способности, используя эмпирический критерий Рэля, для многоэлементной антенной решётки. Показано, что возникающая ошибка приближения будет зависеть от величины угла сканирования. Абсолютные различия значений разрешающей способности, рассчитанные по точной и приближенной формуле меняются в пределах зоны сканирования, на 0,2% в центре, достигая 2,2% на краях, что вполне приемлемо для инженерных методов проектирования.

Проведен анализ возможности использования мультипликативного метода обработки для модификации методики TFM. Показано, что ширина основного главного лепестка по уровню 0,5 для мультипликативного метода уменьшается в несколько раз по сравнению с аддитивным способом. Неглавные боковые лепестки становятся очень малыми. Главные боковые лепестки высших порядков не изменяют своей амплитуды, но становятся в два раза ближе к основному лепестку диаграммы направленности, что сужает зону возможного сканирования. Увеличение количества элементов решетки сдвигает главные боковые лепестки диаграммы направленности так, что они исчезают из видимой зоны сканирования.

Чувствительность дефектоскопа, как любой электронной аппаратуры, определяется соотношением сигнал/шум. Результаты данной работы позволяют сделать заключение о поведении отношения сигнал/шум при мультипликативной обработке. Причем, чем больше элементов в антенной решетке, тем меньше отношение сигнал/шум на выходе устройства.

Отдельный раздел посвящён описанию алгоритмов и программного обеспечения компьютерного моделирования дефектов и восстановления

изображения. Приведены результаты восстановления двух моделируемых отражателей при использовании мультипликативного и аддитивного методов. Показано, что результаты моделирования и расчетов с помощью аналитических выражений очень близки, что подтверждает достоверность полученных результатов.

**В третьей главе** описана разработанная установка, ее структурная схема и алгоритмы управления. Показаны результаты и методики экспериментальных исследований, целью которых, являлась проверка результатов теоретических исследований и моделирования. Подтверждено соответствие точности вычислений полученных аналитических выражений и реальных экспериментов. В ходе проведения эксперимента было выполнено несколько циклов исследований для проведения анализа достоверности акустического изображения при изменении положения модели дефекта в акустическом тракте. По результатам испытаний, можно сделать вывод об очень слабой зависимости погрешности определения местоположения модели дефекта в зоне контроля. Сделан вывод о очевидном факте лучшей разрешающей способности при мультипликативной обработке примерно на 20%. Отмечено подавление меньших по амплитуде сигналов-откликов на реконструированном изображении зоны контроля. Происходит выделение самого большого дефекта.

В заключении приводятся основные результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается непротиворечивостью полученных в исследовательской части работы результатов с данными других авторов (там, где таковые имеются), совпадением экспериментальных и расчетных значений предельной чувствительности и разрешающей способности, величины погрешности в определении координат залегания дефектов, работоспособностью изготовленного прибора, результатами лабораторных испытаний. Акты внедрения разработанных приборов приведены в Приложении.

Результаты, используемые в работе получены автором лично и совместно с коллегами – в равном участии, а также при непосредственном участии автора в постановке исследовательских задач и разработок действующего макета прибора.

Автором непосредственно выполнены:

- анализ текущего состояния теоретических исследований и практических разработок приборов для ультразвукового контроля,
- исследования фронтальной и продольной разрешающей способности,
- исследования предельной чувствительности,
- исследования точности определения местоположения дефектов,
- предложен способ мультипликативной обработки данных антенной решетки.
- разработаны алгоритм и программа его реализации.
- При непосредственном участии автора в качестве руководителя разработан и изготовлен дефектоскоп «УУК-16».

Большая часть проведенных исследований и разработок выполнена в творческом содружестве и при непосредственном участии сотрудников кафедры ПМЭ Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета.

## 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Современное развитие различных отраслей техники диктует необходимость создания новых конструкционных материалов, обладающих высокой прочностью, на металлической, керамической и полимерной основах [1,2]. Высокие требования к современной космической технике порождают необходимость резкого увеличения прочностных характеристик изделий при уменьшении их массы. Перспективным направлением, получившим бурное развитие в последние годы, стало использование различного рода сплавов из черных и цветных металлов. Их прочностные характеристики значительно превосходят все другие типы конструкционных материалов [3]. На АО «НПЦ «Полнос» широко применяют фасонные отливки из алюминиевых, магниевых и сплавов чугуна.

Приступая к разработке метода и системы неразрушающего контроля металлических заготовок для корпусов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), в первую очередь нужно изучить объект контроля и установить особенности, которые могут влиять на процедуру проведения контроля.

### 1.1 Описание объекта контроля и характерных дефектов

Объектом контроля в диссертационной работе является металлические заготовки для изготовления крепежных элементов и корпусов РЭА, представляющие собой плоские прямоугольные параллелепипеды размером от 100 до 300 мм в ширину и длину и толщиной в диапазоне от 50 до 100 мм, изготовленные из различных сплавов, именуемыми фасонными отливками.

При изготовлении таких отливок важным моментом является наличие в них различных дефектов, которые могут возникать как в процессе литья, так и в процессе последующей технологической обработки при изготовлении корпусных изделий РЭА [4].

Наличие скрытых дефектов в заготовках может привести к отказу электронной платы, что повлияет на потерю работоспособности всей аппаратуры [5]. Поэтому целесообразным является проведение контроля до момента установки электронных плат в заготовки, чтобы уменьшить в дальнейшем финансовые и трудовые затраты на демонтаж плат и установку новых.

При разработке систем контроля необходимо учитывать особенности контролируемого объекта с целью адаптации систем для наиболее эффективного обнаружения дефектов, присущих конкретному типу объекта. Поэтому особую роль играет тщательный анализ объекта контроля с целью формирования представления о его возможных дефектах.

Дефектом заготовки можно назвать отклонение от нормативной документации показателей качества металлической продукции, нарушающее технологические и эксплуатационные свойства изделия (структура, сплошность и т.п.) [6].

Дефекты бывают явными, скрытыми, критическими, значительными и малозначительными, исправимыми и неисправимыми. Явные дефекты, находящиеся на поверхности, видны человеческим глазом, а внутренние скрытые дефекты, неразличимые глазом, можно выявить специальными средствами неразрушающего контроля [7].

Наличие в изделии критических дефектов приводит к тому, что использовать продукцию становится невозможно из-за несоответствия требованиям безопасности и надежности [8].

Значительные дефекты также влияют на использование продукции, но они не являются критическими. А вот малозначительные дефекты, как правило, не оказывают влияния на долговечность используемой продукции.

Дефекты металлических изделий классифицируют: на производственно-технические, возникающие при обработке; технологические, возникающие во время изготовления и ремонта изделий; эксплуатационные, возникающие после некоторого времени эксплуатации изделия [9].

Классификация дефектов показана на рисунке 1.1. Рассмотрим подробнее указанные виды дефектов металлических заготовок.



Рисунок 1.1 – Классификация дефектов в металлах

Производственно-технические дефекты.

*Усадочные раковины* – относительно большие полости произвольной формы с грубой поверхностью, находящиеся в теле заготовки. Они появляются вследствие неравномерной усадки металла при затвердевании по всему объему металлической заготовки.

*Рыхлота* представляет собой скопление мелких усадочных раковин и располагается обычно над крупной усадочной раковиной.

*Пористость* представляет собой сосредоточение небольших усадочных или газовых раковин и располагается обычно под крупной усадочной раковиной. Газовая пористость встречается в большом объеме заготовки или отдельных ее участках [9].

*Ликвация* – неоднородность химического состава металла в теле заготовки. Она возникает при различной температуре затвердевания металла и содержащихся в нем примесей.

*Точено-пятнистая неоднородность* - сосредоточенные участки с ликвирующими примесями в виде избыточной фазы, встречается у жаропрочных сталей и сплавов с высокой концентрации примесей.

*Ликвационный квадрат* – полость, возникающая в деформированном металле, и представляющая собой структурную неоднородность травящихся различным образом зон.

*Раковины* в металлической заготовке представляют собой полости различной формы с чистой и гладкой окисленной поверхностью. Раковины располагаются произвольно по всему объему образца.

*Вскип* – оксидные раковины, которые образуются при кипении сплава металла.

*Поверхностное окисление* может представлять собой сплошную окисную плену черного или серого цвета; отдельные или групповые раковины, заполненные порошком серого или черного цвета; бугристые наросты черного цвета.

Неметаллические включения бывают двух видов:

- Включения неметаллических частиц, которые попали в металл извне. Чаще всего они располагаются в верхних частях или на поверхности заготовки.

- Включения частиц, которые образовались внутри металла путем химического взаимодействия частиц во время его обработки [10]. Они, как правило, расположены на границах зерен в виде цепочек.

*Корочки* представляют собой участки изделия, которые загрязнены включениями неметаллических частиц. Могут располагаться по всему объему слитка.

*Завороты корки* – дефекты в виде завернувшихся корок металла, расположенные у поверхности заготовок. При деформации дефект наблюдается в виде разрыва или частичного отслоения, образовавшегося вследствие раскатки завернувшихся корок.

*Металлические включения* – инородные металлические объекты в основном теле заготовки.

*Королек* – металлическое включение, полностью окруженное металлом отливки.

*Утяжина* – дефект, представляющий собой углубление с пологими краями на основной части заготовки. Причиной образования утяжин считается усадка металла при затвердевании.

*Ужимины* – узкие длинные вмятины в основном металле заготовки, прослойки металла.

*Плены* – состоящие из окислов пленки, возникающие внутри или на поверхности изделия. Причиной их возникновения является то, что при заполнении формы для заготовки компоненты сплава химически взаимодействуют с воздухом и поверхностью формы, на поверхности сплава из продуктов реакции появляется плотная пленка.

*Спаи* – дефекты, образующиеся не слившимися потоками застывшего преждевременно металла, и представляющие собой сквозные или поверхностные щели с закругленными краями в теле заготовки.

*Пригар* – неоднородные утолщения из пропитанной металлом формовочной смеси, которые располагаются в точках ее соприкосновения с самыми горячими участками формы.

*Литейные подрезы* – дефекты литья - углубления в точках скопления концентраторов напряжений. Появление литейных подрезов происходит по

причине недостаточной текучести металла во время отливки заготовки вследствие снижения температуры.

*Коробление* – это искажение конфигурации и геометрической формы отливки. Обнаруживается после того, как отливка остыла и ее достали из формы [11].

Производственно-технические трещины можно разделить на 4 вида:

- *Горячие трещины* – разрывы, которые наблюдаются на поверхности заготовки. Располагаются по границам кристаллов и имеют бугристую окисленную поверхность. Причиной образования является усадка, которая происходит при остывании расплава в отливочной форме. Типичные признаки - рваные края и существенная ширина.

- *Холодные трещины* – тонкие разрывы поверхности заготовки. Причинами образования являются внутренние напряжения детали или механическое воздействие на заготовку при температуре детали ниже температуры свечения расплава. В противовес горячим трещинам, холодные трещины проходят не по границам зерен, а по самим зернам, и обнаруживаются они в основном в зонах сосредоточения напряжений.

- *Термические трещины* – это глубокие разрывы, которые хорошо видны на поверхности заготовки. Они возникают в изделии после термической обработки [12]. Причиной образования являются высокие значения температурных растягивающих напряжений.

- *Межкристаллические трещины* - тонкие несплошности, которые образуются на границах кристаллов при низкой их прочности. Это связано с наличием прослоек неметаллических включений и ликватов.

Среди технологических дефектов также встречаются *трещины*. Они бывают одиночными или групповыми, расположенными хаотично или в определенном направлении. По глубине они могут достигать до 10-15 мм.

*Флокены* - трещины, которые образуются внутри толстых заготовок (более 30 мм) из перлитной и мартенситной сталей.

*Волосовины* – небольшие внутренние дефекты, которые иногда выходят на поверхность, которые образуются из газовых пузырьков или неметаллических включений при обработке металла [13].

*Расслоения* – крупные несплошности внутри обработанного металла.

*Внутренние разрывы* – относительно крупные внутренние дефекты, которые периодически повторяются по длине заготовки.

*Рванины* - дефекты металла с рваными краями. Располагаются чаще всего на краях листов, профилей.

*Скворечник* - раскрывшаяся при деформации внутренняя поперечная термическая трещина в заготовке [14].

*Закаты* – дефекты в виде заусенец или возвышений (бугорков) на поверхности, образующиеся при предыдущем пропуске заготовки через прокатный стан.

Как и среди производственно-технических дефектов, так и среди технологических встречаются *плёны*. В данном типе они представляют собой относительно тонкие плоские отслоения на поверхности обработанного металла. Причинами возникновения плен является неудовлетворительное качество заготовок и нарушение режимов обработки металла [15].

*Прижоги* – дефекты, которые образуются при местном перегреве материала. Судить о наличии прижогов можно по наблюдаемым на поверхности травленого шлифа участкам, которые остаются белыми, непротравленными.

*Надрывы* – неглубокие дефекты, которые возникают в заготовках в результате холодной и горячей деформации металла (ковка, штамповка, протяжка с большой деформацией) [16].

Особые условия эксплуатации изделий ракетно-космической техники требуют и особого подхода к их изготовлению. Для литья из цветных металлов и сплавов на АО «НПЦ «Полнос» разработаны и утверждены технические условия ЕИЖА.300000.003 ТУ, в соответствии с которыми на необрабатываемых поверхностях отливок допускаются без исправления:

- риски, забоины, вмятины, местные утяжины, задиры от приварки металла к форме и другие механические повреждения поверхности, если размеры отливок в месте дефекта не выходят за пределы допусков;

- наличие сколов кромок и фасок размером до 0,5 мм после пробивки облоя в окнах и отверстиях на отливках, изготавливаемых способом литья под давлением;

- вздутия размером до 2 мм и высотой менее 0,5 мм с плотностью расположения не более 5 штук на 100 см<sup>2</sup>;

- следы надежно слившихся струй металла (спай) при условии, что с противоположной стороны этот дефект отсутствует;

- недоливы глубиной до 0,5 мм и литейные радиусы до 1,5 мм;

- следы от смазки форм;

- неоднородная ликвация, выраженная в виде «серых пятен»;

- точечные или групповые раковины, при этом суммарная поверхность раковин не должна превышать 15 % общей поверхности отливки;

- чистые раковины и раковины, полученные после устранения дефектов глубиной не более 1/3 толщины стенки, в соответствии с нормами таблицы 1.

Таблица 1 – Нормы допустимых дефектов

Способ изготовления отливки	Группа отливки	Средний диаметр раковины, мм	Глубина раковины, мм
Г,З	I – II О	менее 3 менее 5	менее 1,5 менее 2
В,К	I – II	менее 1,5	менее 0,5

Примечания.

- Под точечными раковинами понимаются раковины, вскрытые обдувкой, механической или химической обработкой, глубиной не более 1 мм и диаметром до 2 мм.

- Под групповыми раковинами понимается наличие более двух дефектов, но не более десяти на площади 20 см<sup>2</sup> при расстоянии между дефектами менее 15 мм.

- Под раковинами подразумеваются дефекты диаметром больше 0,5 мм.

- Дефекты меньшего диаметра классифицируются как пористость.

- Под чистой раковиной подразумевается раковина, очищенная от загрязнений.

На необрабатываемой поверхности отливок группы I допускаются раковины группового расположения диаметром до 2 мм и глубиной до 1 мм в количестве не более двух групп для мелкого литья и трех групп для среднего и крупного литья.

На отливках группы II групповые дефекты не допускаются.

Количество дефектов для всех видов литья, при расстоянии между дефектами не менее 10 мм, не должно превышать значений, указанных в таблице 2.

Средний габаритный размер отливки определяется как полусумма максимальных габаритных размеров длины и ширины отливки.

На отливках группы I и II неслитины, трещины, сквозные раковины и сквозные рыхлоты не допускаются.

Для отливок группы I и II на резьбе при шаге 0,5 мм и более и количестве ниток не менее 5 допускаются следующие дефекты:

- несквозные раковины диаметр которых меньше 1,5 мм, а глубина не более 1 мм, плотность расположения не более 1 шт. на 1 см<sup>2</sup> при расстоянии между раковинами более 10 мм;

- задиры на резьбе длиной не более 1/8 нитки на рабочих витках и длиной до 1/3 нитки при выходе резьбы.

Для отливок нулевой группы в резьбовых отверстиях диаметром до 3 мм допускаются раковины диаметром до 2,5 мм и глубиной до 2 мм, при расположении от края на расстоянии не менее диаметра резьбы.

Общее количество раковин не более 3 шт. на длину резьбы.

На отливках нулевой группы в резьбовых отверстиях диаметром более 3 мм допускаются раковины не более 0,8 диаметра резьбы и глубиной до 3 мм при расположении от края на расстоянии не менее 4 мм.

Общее количество раковин не должно быть более 3 шт. на длину резьбы.

Таблица 2 – Допустимое количество дефектов

Категория отливки	Группа отливки	Средний габаритный размер отливки, мм	Число раковин на поверхности с площадью 100 см <sup>2</sup> , шт., не более	Допустимое число раковин на детали, шт., не более
Мелкие	I – II O	до 100	4	4
			6	6
	I – II O	100–300	4 8	6 10
Средние	I – II O	300–600	5	10
			8	15
Крупные	I – II O	Свыше 600	5	15
			8	20

На окончательно обработанной поверхности отливок допускается:

- общая пористость не выше третьего балла и зональная не выше четвертого балла для отливок I группы;
- общая пористость не выше второго балла и зональная не выше третьего балла для отливок II группы;
- общая пористость не выше четвертого балла и зональная не выше пятого балла для отливок нулевой группы.

Допустимое количество пор на 1 см<sup>2</sup> в зависимости от балла приведено в таблице 3.

На обработанных поверхностях посадочных мест и резьбе для всех видов литья допускается пористость не выше третьего балла и следующие дефекты:

- отдельные раковины диаметром до 1,5 мм и глубиной не более 1 мм в количестве не более двух раковин при диаметре отверстия до 30 мм и не более трех раковин при диаметре отверстия более 30 мм у отливок группы I;
- раковины диаметром до 1 мм и глубиной не более 1 мм в количестве не более двух штук для всех отверстий у отливок группы II, К и В.

Таблица 3 – Допустимое количество пор

Балл	1	2	3	4	5
Количество пор на 1 см <sup>2</sup>	До 5	До 10	До 15	До 20	До 25
Диаметр поры	До 0,1 мм – 100 %	До 0,1 мм – 80 % До 0,2 мм – 20 %	До 0,3 мм – 80 % До 0,5 мм – 20 %	До 0,5 мм – 70 % До 1,0 мм – 30 %	До 0,5 мм – 60 % До 1 мм – 30 % До 5 мм – 10 %

- раковины диаметром до 3,5 мм и глубиной до 1/3 толщины стенки в количестве до 5 штук для отливок нулевой группы.

Для фасонных отливок из алюминиевых сплавов на АО «НПЦ «Полюс» разработаны и утверждены технические условия ЕИЖА.300000.004 ТУ, в соответствии с которыми на необрабатываемых поверхностях отливок допускаются без исправления:

- риски, забоины, вмятины, местные утяжины, задиры от приварки металла к форме и другие механические повреждения поверхности, если размеры отливок в месте дефекта не выходят за пределы допусков;

- недоливы глубиной до 0,5 мм и неуказанные в чертеже литейные радиусы до 1,5 мм;

- в отливках, изготавливаемых способом литья под давлением, наличие облоя и сколов в окнах и отверстиях размером до 0,5мм;

- вздутия на поверхностях отливок в количестве 5 штук на площади 100 см<sup>2</sup> размером до 2мм в наибольшем измерении и высотой до 0,5мм.

На необрабатываемой поверхности отливок группы I допускаются раковины группового расположения диаметром до 2 мм и глубиной до 1 мм в количестве не более двух групп для мелкого литья и трех групп для среднего и крупного литья.

На механически обработанных поверхностях отливок допускаются чистые единичные раковины, количество и размеры которых приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Допустимые единичные раковины

Условное обозначение способов литья	Поверхность отливок, см <sup>2</sup>	Приведенный диаметр чистой раковины, мм, не более	Глубина раковины, не более	Единичные раковины		
				Количество раковин на необрабатываемой поверхности площадью 100 см <sup>2</sup> , не более	Расстояние между раковинами, мм, не более	Допустимое количество раковин на отливке, не более
ЗОГК	До 500	2,0	0,3 толщины стенки, но меньше 1,5 мм	2	10	2
	Св.500 до 1500					4
	Св.1500 до 3000	2,5	0,3 толщины стенки, но меньше 2,0 мм	3	20	6
	Св.3000 до 6000					8
	Св.6000 до 12000	3,0			25	10
	Св 12000 до 30000	4,0	0,3 толщины стенки, но не более 3,0 мм	3	25	15
	Св 30000	4,5	0,3 толщины стенки, но меньше 3,5 мм	3	25	20
ПД	До 100	1,0	0,3 толщины стенки, но меньше 1,0 мм	2	3	2
	Св.100 до 300					3
	Св.300 до 800					4
	Св.800	1,5	0,3 толщины стенки, но меньше 1,5 мм	3	3	6
ВД	До 100	1,5	0,3 толщины стенки, но меньше 0,5 мм	2	10	2
	Св.100 до 200			4		3
	Св. 200 до 600			2		4
	Св.600 до 1500	2,0	0,3 толщины стенки, но меньше 1,0 мм	2		6
	Св.1500	2,5	0,3 толщины стенки, но меньше 1,5 мм	3		15

На механически обработанных поверхностях отливок допускаются скопление раковин, количество и размеры которых приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Допустимые скопления раковин

Условное обозначение способов литья	Поверхность отливок, см <sup>2</sup>	Приведенный диаметр раковины, мм, не более	Глубина раковины, не более	Скопление раковин			
				Количество скоплений на отливке, не более	Количество раковин в скоплении, не более		
З О Г К	До 500	2,0	0,3 толщины стенки, но меньше 1,5 мм	2	2		
	Св.500 до 1500						
	Св.1500 до 3000	2,5	0,3 толщины стенки, но меньше 2,0 мм				
	Св.3000 до 6000						
	Св.6000 до 12000	3,0	0,3 толщины стенки, но меньше 2,5 мм			3	
	Св.12000 до 30000	4,0	0,3 толщины стенки, но меньше 3,0 мм			3	3
	Св.30000	4,5	0,3 толщины стенки, но меньше 3,5 мм			5	5
ПД	До 100	1,0	0,3 толщины стенки, но меньше 1,0 мм	2	3		
	Св.100 до 300						
	Св.300 до 800						
	Св.800	1,5	0,3 от толщины стенки, но меньше 1,5мм	3	3		
В Д	До 100	1,5	0,3 толщины стенки, но меньше 0,5 мм	2	3		
	Св.100 до 200						
	Св. 200 до 600	2	0,3 толщины стенки, но меньше 1,0 мм				
	Св.600 до 1500						
	Св.1500	2,5	0,3 толщины стенки, но меньше 1,5 мм			4	3

На литой резьбе отливок, изготовленных при помощи литья под давлением, могут допускаться такие дефекты, которые не мешают свинчиванию с резьбовым проходным калибром:

- уменьшение вершины резьбы от недолива, небольшие щербинки резьбы глубиной до одной трети высоты профиля на длине не более 0,2 длины одного витка;

- сколы на всю глубину профиля длиной до 0,5 длины витка на выходе резьбы;

- отклонения по диаметру отверстия с резьбой не должны превышать норм, приведенных в таблице 6.

Таблица 6 – Предельные отклонения

Шаг резьбы	Предельные отклонения по диаметру резьбы	
	Наружная резьба	Внутренняя резьба
0,75	- 0,40	+ 0,40
1,00	- 0,50	+ 0,50
1,50	- 0,75	+ 0,75
2,00	- 1,00	+ 1,00

На обработанных поверхностях посадочных мест и резьбе для всех видов литья допускаются:

- пористость не выше третьего бала;

- отдельно расположенные раковины меньше 1,5 мм и глубиной менее 1 мм, количество раковин допускается не более двух штук при диаметре отверстия до 3 мм и не более трех штук при диаметре отверстия более 30 мм у отливок группы I;

- диаметром до 1 мм и глубиной менее 1 мм, количество раковин

- допускается не более двух штук для отливок группы II и у отливок К и Д для всех отверстий.

Для отливок группы I и II на резьбе при шаге 0,5 мм и более и количестве ниток не менее 5 допускаются следующие дефекты:

- несквозные раковины, диаметр которых меньше 1,5 мм, а глубина меньше 1 мм при диаметре резьбы до М16 в количестве не более одной на площади в 1 см<sup>2</sup> при расположении раковин на расстоянии не менее 10 мм;

- несквозные раковины диаметром до 3 мм и глубиной до 1,5 мм при диаметре резьбы свыше М16 в количестве не более одной на площади в 1 см<sup>2</sup> при расположении раковин на расстоянии не менее 10 мм;

- задиры на резьбе длиной не более 1/8 длины нитки при суммарной длине не более чем 1/4 нитки на рабочих витках и длиной до 1/3 нитки на выходе резьбы;

- срывы (сколы) длина которых меньше 5 мм, глубина не больше высоты профиля, а количество не превышает двух срывов;

- скол на выходе резьбы на всю глубину профиля длиной до 10 мм.

- В отливках не допускаются:

- общая пористость выше третьего балла для отливок II группы и четвертого балла для отливок I группы;

- зональная пористость выше четвертого балла на площади, составляющей не более 25 % контролируемой зоны.

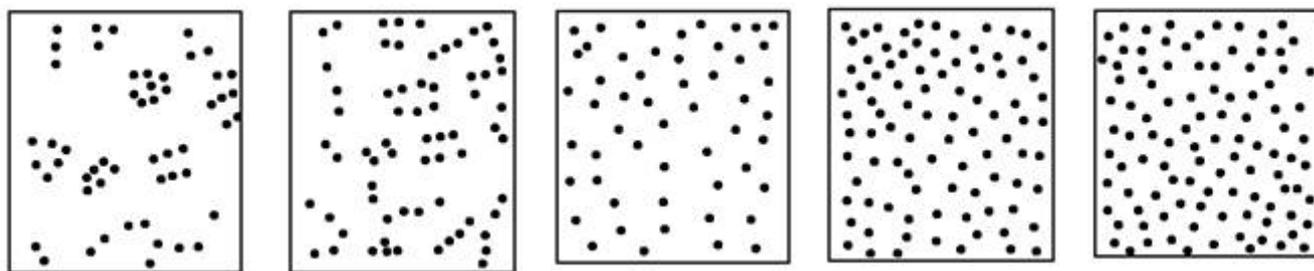
В уплотнительных пазах или на поверхностях, обработанных под уплотнение, общая пористость должна быть не выше второго балла, а зональная – не выше третьего. Зональная пористость не должна превышать 15% площади контролируемой зоны.

Шкалы пористости приведены в ГОСТ 1583 и на рисунке 1.2. На армированных составных частях отливок в местах стыка основного металла или сплава с арматурой, если эти места не являются опасными сечениями и не требуют герметичности, допускаются:

- чистые раковины, диаметр которых меньше 2,5 мм, а глубина меньше 1/3 толщины стенки, и при этом не больше 3 мм, количество раковин допускается не больше 1 раковины на все места стыка;

- расслоение арматуры с отливкой группы I протяженностью не больше 1/3 длины дуги, при этом длиной не больше 30 мм, а шириной меньше 2 мм и

глубиной меньше 6 мм с условием, что с противоположной стороны нет подобного дефекта.



Балл 1

Балл 2

Балл 3

Балл 4

Балл 5

Рисунок 1.2 – Шкала пористости алюминиевых сплавов

Схожие требования предъявляются и к фасонным отливкам из магниевых сплавов, сплавов из чугуна и конструкционной легированной стали в соответствии с ЕИЖА.300000.006 ТУ, ЕИЖА.300000.045 ТУ и ЕИЖА.300000.092 ТУ.

Во время эксплуатации также можно наблюдать появление *трещин*. *Усталостные трещины* - самые распространенные эксплуатационные дефекты, основной причиной образования которых являются высокие переменные напряжения.

*Кавитационное растрескивание* – разрушение в теле металла на границе с жидкостью, производимое лопающими газовыми пузырьками.

*Водородное охрупчивание* – трещины, возникающие под влиянием растворенного водорода в металле при приложении растягивающих напряжений.

*Термическое растрескивание* - разрушение под действием термических напряжений вследствие тепловой разницы температур, без приложения механической нагрузки извне.

*Коррозия* зависит от наличия агрессивной среды, качества защитного покрытия, неблагоприятного сочетания материалов изделия и др.

Рассмотренные выше дефекты металлических заготовок, особенно внутренние скрытые и поверхностные, неразличимые глазом, можно обнаружить только специальными методами и средствами неразрушающего контроля (НК). Практически все известные методы НК применимы для обнаружения таких

дефектов: визуальный, капиллярный, магнитный, вихретоковый, рентгеновский, тепловизионный и ультразвуковой [17].

## 1.2 Методы и средства неразрушающего контроля изделий из металла

Неразрушающий контроль материалов играет существенную роль для оценки качества производственных процессов [17]. Он позволяет на ранней стадии обнаруживать внутренние дефекты изделий, которые могут препятствовать его эффективной эксплуатации, или привести к аварии конструкции во время эксплуатации [18]. Для технической диагностики и оценки обнаруженных дефектов используют ряд методов неразрушающего контроля, использующих различные физические принципы [19].

С точки зрения практического применения неразрушающие методы контроля можно разделить на две основные группы:

- Методы обнаружения дефектов, находящихся на поверхности, или близко к поверхности изделия (трещины, надрезы, непровары и т.д.);
- Методы обнаружения дефектов, расположенных по всему объему изделия (пустоты, несплавления и т.д.)

К первой группе относятся: визуальный, магнитный, капиллярный, вихретоковый методы. Ко второй группе относят: радиографический и ультразвуковой методы.

Наряду с вышеназванными существуют еще несколько методов, имеющих важное практическое значение: течеискание, акустико-эмиссионный метод и термография [20, 21].

Перечисленные методы неразрушающего контроля первой и второй групп позволяют проводить контроль металлических заготовок на наличие дефектов [22, 23]. Для каждого метода разработаны соответствующие устройства и приборы. Рассмотрим области применимости, достоинства и недостатки основных методов и средств неразрушающего контроля металлических изделий.

### **Визуальный метод**

Самым простым, но информативным методом является визуальный контроль [24]. Его применение не требует специального оборудования кроме простых измерительных приборов. Визуальный метод используется при выявлении поверхностных дефектов такие как: поры, трещины, свищи, кратеры, подрезы и др.[25]. Несмотря на простоту, которую можно, несомненно, отнести к достоинствам визуального контроля, он обладает существенными недостатками: невысокая выявляемость мелких поверхностных дефектов, которая зависит от зрения, усталости, опыта проводящего контроль специалиста и окружающих условий.

Несмотря на эти недостатки, визуальный контроль, как правило, предшествует проведению неразрушающего контроля другими методами. Известно [26], что способности человеческого глаза при достаточной освещённости ограничены размером поверхностных дефектов  $\sim 0,15$  мм на расстоянии 250 мм. Однако уже такие дефекты могут указывать на возможные разрушения изделия.

Инструкция по визуальному и измерительному контролю [27] регламентирует проведение визуального контроля. В инструкции приведены требования по квалификации персонала, процессу и средствам контроля, а также к способам оценки и регистрации его результатов.

### **Капиллярный метод**

Суть капиллярного метода контроля (КМК) заключается в капиллярном проникновении специальных жидкостей в полость дефектов заготовки и фиксации появившихся следов индикаторов [24]. КМК обнаруживает поверхностные и сквозные несплошности, которые можно обнаружить также с помощью визуального контроля. Однако капиллярный метод требует при этом меньших затрат по времени [28, 29].

Применение КМК регламентируется ГОСТ 18442 - 80, ГОСТ 28369 - 89 и ГОСТ 24522 – 80.

Рисунок 1.3 иллюстрирует проведение капиллярного контроля в следующей последовательности:

- Поверхность 1 и полость дефекта 2 очищается от загрязнений, что обеспечит хорошую смачиваемость поверхности детали индикаторной жидкостью и проникновение ее в полость дефекта.

- Дефекты пропитываются специальной индикаторной жидкостью – пенетрантом

- Поверхность детали очищают от излишка пенетранта, но он сохраняется в полости дефектов. Для его удаления применяют специальные очистители.

Оставшийся пенетрант визуально выявляют в полости дефекта, иногда для обнаружения используют специальные преобразователи. В этом случае на поверхность заготовки наносят проявители 4, которые извлекут пенетрант из полости дефекта. Пенетрант пропитывает проявитель и образует индикацию 5 на его поверхности.

Заключительная стадия КМК - очистка заготовки от проявителя.

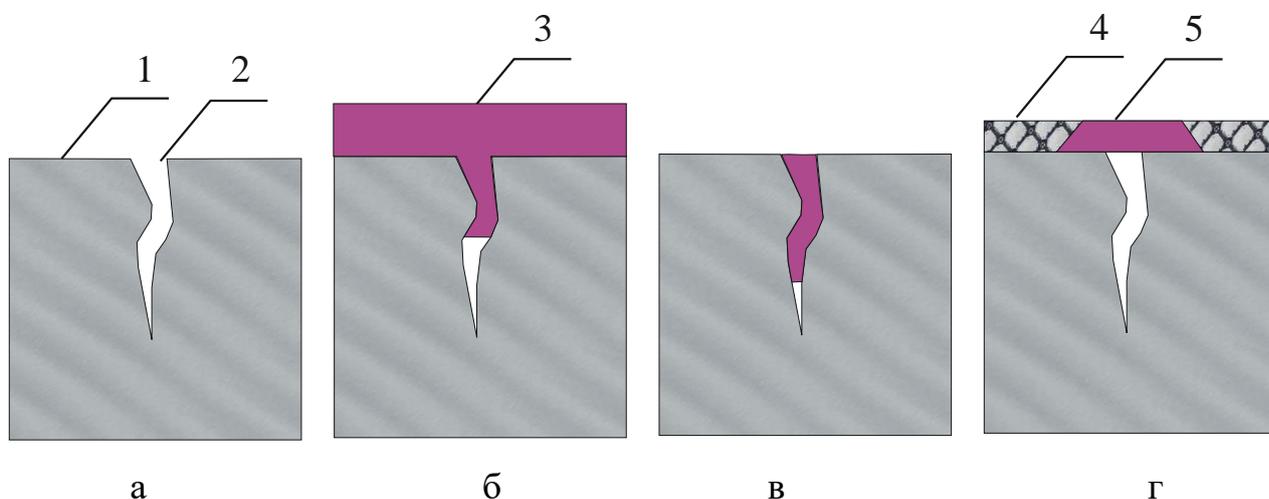


Рисунок 1.3 — Процесс капиллярной дефектоскопии

Несмотря на простоту, капиллярный метод обладает рядом существенных недостатков: невозможность определения внутренних дефектов, не выходящих на поверхность, сложность автоматизации контроля [30], наличие стационарного оборудования с вентиляцией, ограничения по температурному режиму и влажности, необходимость очистки и подготовки поверхности к процессу контроля, вредность для персонала некоторых дефектоскопических веществ.

## Термография

Тепловой контроль (термография) – метод неразрушающего контроля, основанный на фиксации неоднородностей в тепловых потоках [31].

По типу воздействия тепловой неразрушающий контроль (ТНК) делят на пассивный и активный.

Для пассивного ТНК нет необходимости в источнике теплового воздействия. При этом увеличение температуры от дефекта наблюдается на тепловом инфракрасном изображении.

Для активного контроля, необходим нагрев детали внешними источниками (ультразвуковая стимуляция, индукционный нагрев) [32]. Тепловой импульс от источника направляется на объект контроля. Находящийся в объекте дефект изменяет потока тепла, что наблюдается на изображении рисунка 1.4 [33].

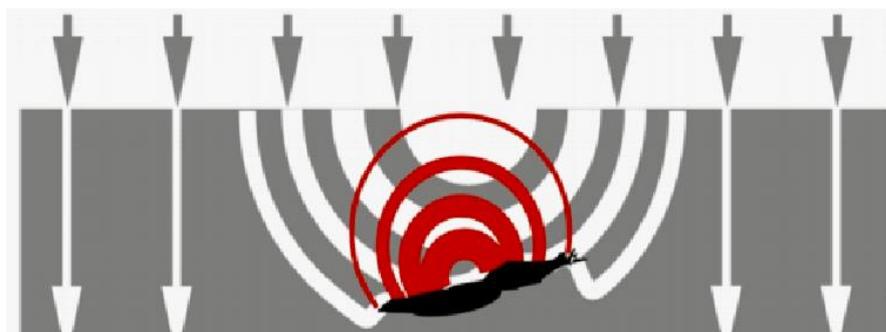


Рисунок 1.4 – Схемы обнаружения дефекта активной термографией

С помощью термографии в зависимости от типа конструкции и материала изделия можно обнаружить следующие дефекты: расслоения, непрочлеи, пустоты, трещины, поры, включения, примеси, изменения геометрии изделия и др. [34].

К достоинствам теплового контроля можно отнести: оперативность, высокая производительность, универсальность, точность и дистанционность. Главным недостатком метода является зависимость корректности измерений от окружающей среды и погодных условий.

Проведение теплового контроля регламентируют следующие документы:

- РД-13-04-2006 «Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах».

- ГОСТ 23483-79 «Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования».

### **Магнитный метод**

Данный метод основан на выявлении полей магнитного рассеяния, который образуются при намагничивании изделий в местах дефектов [35]. Методы магнитного контроля, в зависимости от метода выявления потоков рассеяния, разделяют на следующие виды: метод магнитного порошка [36, 37], магнитографический и индукционный метод [38].

При индукционном методе в контролируемой детали с помощью электромагнита переменного тока наводят магнитный поток. С помощью искателя обнаруживают дефекты. В катушке искателя, под воздействием поля рассеяния, индуцируется ЭДС, вызывающая звуковой или оптический сигнал на индикаторе [39].

К плюсам магнитных методов можно отнести высокую чувствительность, низкую трудоемкость контроля и простоту.

Недостатки методов в том, что они могут использоваться только при контроле изделий из ферромагнитных материалов.

### **Вихретоковый (электромагнитный) метод**

При воздействии на контролируемую деталь переменного электромагнитного поля, в металле появляются вихревые токи, создающие собственное электромагнитное поле, направленное в противовес внешнему полю [40]. С помощью измерительной катушки можно зарегистрировать это поле вихревых токов. При наличии дефектов в контролируемом изделии увеличивается электрическое сопротивление поверхностного слоя металла, за счет этого происходит ослабление вихревых токов.

Вихретоковый контроль дает возможность регистрировать дефекты, расположенные близко к поверхности - на глубине до 4 мм. [41, 42]

Вихретоковые дефектоскопы, различают по широте исследуемого диапазона, области применения и функциональной направленности (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Вихретоковый дефектоскоп

Вихретоковый метод контроля имеет следующие преимущества:

- Проверка большого числа параметров изделия;
- Возможность проверка изделия небольшой толщины;
- Не требует электрического и механического контакта датчика с контролируемой деталью, возможность проверки движущихся изделий;
- Хорошее выявление микроскопических дефектов, расположенных близко к поверхности или непосредственно на поверхности контролируемой детали;
- Высокая производительность контроля;
- Контроль деталей со сложной геометрией;
- Отсутствие воздействия на здоровье оператора.

Два основных ограничения вихретоковых методов:

- Возможен контроль только электропроводящих изделий;
- Небольшая глубина контроля.

### **Радиационный метод**

Принцип обнаружения дефектов при радиационных методах основан на различном поглощении гамма-излучения зонами металла с дефектами и без них [43]. Детали просвечивают специальными приборами [44, 45]. С одной стороны изделия располагают источник излучения, с другой - плотно придавливают кассету с фотопленкой. Проходя через деталь рентгеновские лучи облучают фотопленку. В местах, где имеются дефекты, на пленке образуются темные пятна.

Пленку сравнивают с эталонными снимками и определяют вид и размеры дефектов [46].

Недостатком радиационного контроля является то, что не выявляются трещины и непровары с раскрытием меньше 0,1 мм; если плоскость раскрытия непровара или трещины не совпадает с линией просвечивания; дефекты, если их представление на снимке накладывается на изображение других деталей, острых углов или перепадов толщин.

Недостатком метода является необходимость обеспечить радиационную безопасность сотрудников.

### **Ультразвуковой метод**

Анализ литературных источников показывает [47 ... 51], что наиболее перспективными, применительно к системам неразрушающего контроля металлических заготовок (МЗ) являются системы, базирующиеся на использовании ультразвукового метода контроля, как метода обладающего наибольшей чувствительностью и информативностью по отношению к характерным технологическим и эксплуатационным дефектам в металле. Получаемая с использованием данного метода контроля информация о размере, площади и ориентации дефекта в пространстве, даёт возможность построения качественного изображения для последующей оценки работоспособности и ресурса металлической заготовки [52]. Несомненным достоинством применения систем ультразвукового метода неразрушающего контроля является возможность построения автоматизированных систем контроля, используя при этом достаточно известные на практике решения. Поэтому, акустические методы и системы контроля на их базе, для неразрушающего контроля качества МЗ являются наиболее перспективными [53 ... 58].

Доля акустических методов в объеме неразрушающего контроля, составляют более 60% по отношению к другим методам контроля [59]. Это связано с рядом преимуществ данного метода, таких как: высокая скорость и точность исследования, высокая чувствительность, возможность контроля при одностороннем доступе к изделию, безопасность для здоровья оператора,

возможность использования портативных аппаратов, осуществление контроля без остановки технологических процессов, возможность передачи ультразвуковых волн в движущиеся объекты без непосредственного контакта с ними преобразователя.

Однако, несмотря на достаточно широкое применение акустических методов контроля, они имеют ряд ограничений:

- низкая выявляемость одиночных объемных дефектов;
- низкая эффективность контроля материалов с большим затуханием акустических колебаний.

Разрешающая способность метода связана с длиной упругой волны: чем она короче, тем меньше дефекты, которые можно обнаружить.

Из большого набора методов акустического контроля для контроля металлических заготовок применяют эхо-импульсный и теневой.

#### **Эхо-импульсный метод**

Суть эхо-импульсного метода заключается в том, что УЗ преобразователь при подаче электрического импульса генерирует колебания, которые передаются объекту контроля. Этот же преобразователь принимает эхо-сигналы, отражённые от дефектов [60, 61]. Данный метод широко используется в промышленности из-за своей простоты, ведь для проведения обследования детали нужен только один преобразователь, поэтому нет необходимости в специальных конструкциях для фиксации и совмещения акустических осей, которые нужны если использовать два преобразователя [62, 63]. Этот метод ультразвуковой дефектоскопии также позволяет довольно точно определить положение дефекта, глубину залегания и расположение в контролируемом объекте относительно преобразователя. Метод можно использовать при одностороннем доступе к исследуемому объекту.

К характеристикам метода относят: максимальную глубину прозвучивания, минимальную глубину ("мертвую" зону), чувствительность, разрешающую способность, точность измерения положения, производительность [64].

Кроме преимущества одностороннего доступа, эхо-метод, имеет еще наибольшую чувствительность к определению внутренних дефектов и хорошей

точностью определения расположения дефектов. По величине амплитуды отраженного сигнала можно определить размер дефекта, а по спектральному составу отраженного импульса, можно определить тип и форму дефекта.

Схема прохождения фронта ультразвуковой волны по толщине контролируемого объекта представлена на рисунке 1.6. На рис. 1.6.а показан участок без дефекта, а на рис. 1.6.б - участок с дефектом, от которого происходит отражение сигнала. Путь, который проходит УЗ импульс от излучателя до отражателя и обратно, составляет:

$$2 \cdot D = C \cdot t_3,$$

где  $t_3$  - время задержки прихода отражённого импульса,

$D$  - дистанция от дефекта до излучателя,

$C$  - скорость ультразвуковой волны в контролируемом материале.

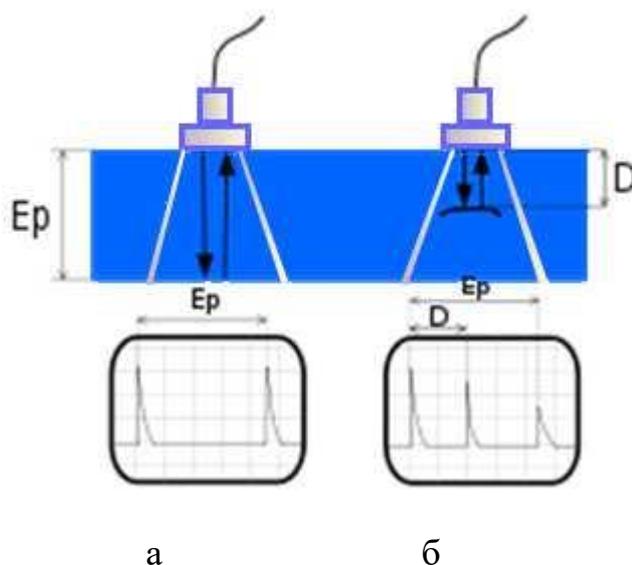


Рисунок 1.6 - Схема прохождения УЗ волны при использовании эхо - метода  
Аппаратура, реализующая эхо-импульсный метод, позволяет определить характер дефектов, классифицировать их по размеру, форме и положению.

Ведущие мировые производители ультразвуковой техники в номенклатуре своих изделий имеют аппараты для контроля металлических изделий. Компания Sonotron выпускает ультразвуковой дефектоскоп *ISonic AUT 16*, позволяющий контролировать металлические заготовки. Он показан на рисунке 1.7. Фотография взята с сайта [95].



Рисунок 1.7 - Ультразвуковой дефектоскоп *Sonotron ISONIC AUT 16*

Дефектоскоп представляет собой переносной многоканальный прибор, предназначенный для работы в составе высокоскоростных автоматических ультразвуковых испытательных машин и систем мониторинга. Прибор содержит 16 независимых каналов, каждый из которых оснащен собственным приемопередатчиком и цифровым преобразователем сигналов с частотой дискретизации 100 МГц. Каждый канал может управлять одним или двумя элементами антенной решетки.

Визуализация области сканирования может быть представлена в виде А-, В-, С- и D-Scan, 3D-View и т.д. Значительное увеличение скорости сканирования обеспечивается за счет различных специализированных зондов, имеющих 2 решетки, каждая из которых подключена через собственный канал к одному контрольному модулю. Пример использования в таком режиме показан на рисунке 1.8.

Компания STARMANS electronics, s.r.o. выпускает ультразвуковой дефектоскоп DIO 1000 PA. В этом дефектоскопе реализован вывод изображений дефектов в виде различных сканов (А, В, С, S и W - сканов). При использовании фазированной решетки значительно повышается скорость сканирования. ФАР могут использоваться как в ручном режиме, так и в механизированном (накопление массива данных с выводом в виде редактируемого С-scan) с использованием сканеров. Он представлен на рисунке 1.9 [66].



Рис.1.8. Пример использования ультразвукового дефектоскопа *Sonotron ISonic AUT 16*



Рисунок 1.9 - Ультразвуковой дефектоскоп DIO 1000 PA

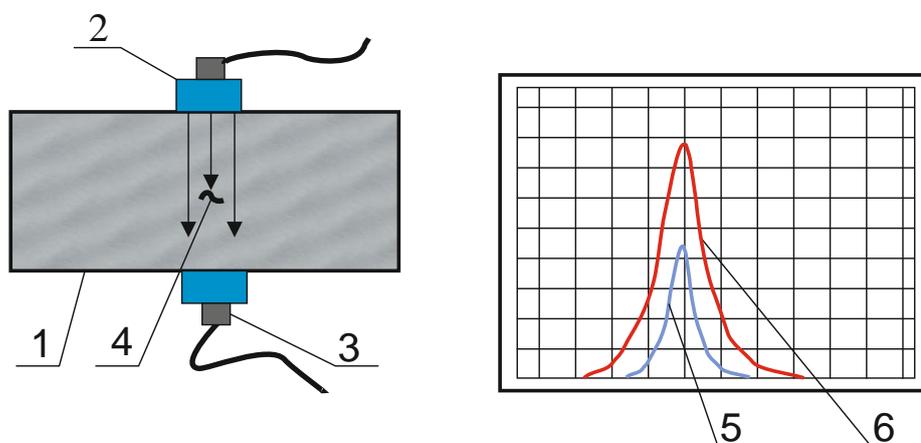
Дефектоскоп DIO 1000 PA сертифицирован в Российской Федерации. Область применения данного прибора – контроль изделий из металлов, композитов, пластмасс.

### **Теневой метод**

Теневой метод контроля [67, 68] - это метод, где применяются два ультразвуковых преобразователя. На рисунке 1.10 они помечены цифрами 2 и 3, которые располагаются по обе стороны от контролируемого изделия 1 на одной оси: преобразователь 2 возбуждает ультразвуковые волны, а преобразователь 3 принимает их. При наличии дефекта 4 амплитуда принятого ультразвукового

сигнала существенно снижается или ультразвуковой сигнал полностью теряется, так как дефект образует акустическую тень.

Теневой контроль для исследования металлических материалов может обнаруживать более мелкие дефекты при больших толщинах заготовки по сравнению с эхо-импульсным методом. Он основан на ослаблении дефектами интенсивности упругих колебаний ультразвуковой частоты. Теневой метод применяют для обнаружения расслоений, инородных включений, раковин и прочих дефектов [69].



1 – контролируемый объект; 2, 3 – преобразователи: излучающий и приемный; 4 – дефект; 5, 6 – донные сигналы при наличии и отсутствии дефекта.

Рисунок 1.10 - Схема прохождения ультразвуковой волны по толщине контролируемого объекта при применении теневого метода

Для работы теневого метода необходимо обеспечить двусторонний доступ к контролируемой детали. Проблемой метода являются его сложность. Прежде всего это связано с проблемой ориентации двух преобразователей относительно их центральных лучей диаграммы направленности, невозможность точной оценки положения дефектов. К достоинствам можно отнести небольшую корреляцию уровня сигнала от расположения несплошности, высокий уровень помехоустойчивости, а также отсутствие мертвой зоны. [70].

Используя теневой метод работают ряд низкочастотных ультразвуковых отечественных дефектоскопов, УСД-60, УД-22 УМ, УД2Н-ПМ [71 ... 73], а также

изготовленные за рубежом: *USN-60*, *RapidScan2* *DryScan 410* (рис.1.11), *MasterScan 380M*[74 ... 77]. Один из них показан на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 - Пример применения ультразвукового дефектоскопа *DryScan 410*.

Эти дефектоскопы используют специальные совместимые с данными приборами датчики [78]: низкочастотные прямые-раздельные, совмещённые, наклонные-раздельные, раздельно-совмещённые, совмещённые, иммерсионные.

Отечественная промышленность также выпускает ряд ультразвуковых дефектоскопов серии УД. Например, основное назначение ультразвукового дефектоскопа УД4-76, показанного на рисунке 1.12, - это выявление дефектов типа нарушения сплошности и однородности материалов, в готовых изделиях, полуфабрикатах и сварных (паяных) соединениях [79].



Рисунок 1.12 - Ультразвуковой дефектоскоп УД4-76.

УД4-76 используют для контроля деталей на наличие несплошностей и однородности материалов, контроль сварных соединений, глубины и положения дефектов. Данный томограф позволяет визуализировать и сохранять результаты контроля с привязкой к положению датчика при сканировании в виде В-сканов.

Несмотря на то, что теоретические исследования и практическое использование в неразрушающем контроле теневого метода с применением ультразвука уже известно давно [80, 81], его применение ограничивалось только одиночным акустическим трактом - один излучатель и один приёмник.

### **Метод фазированных антенных решёток (ФАР)**

Основным преимуществом данного метода является высокая производительность контроля по сравнению с одиночным каналом. Работы по ультразвуковому звуковидению основаны на получении изображения за счет отражения упругих волн от неоднородностей, что эквивалентно получению С-скана. Применение реконструкции акустического изображения с помощью эквидистантных линейных антенных решёток позволяет выявить взаимное расположение нескольких дефектов, расположенных в зоне контроля, с достаточно высокой разрешающей способностью [82 ... 84].

Применение фазированных решеток позволяет находить несплошности, по разному ориентированные относительно акустической оси. Одноэлементный преобразователь с большой вероятностью будет пропускать дефекты, которые расположены в стороне от ультразвукового луча под большим углом к акустической оси датчика [85].

В зависимости от количества и расположения пьезокерамических элементов, фазированные решетки делятся на следующие типы:

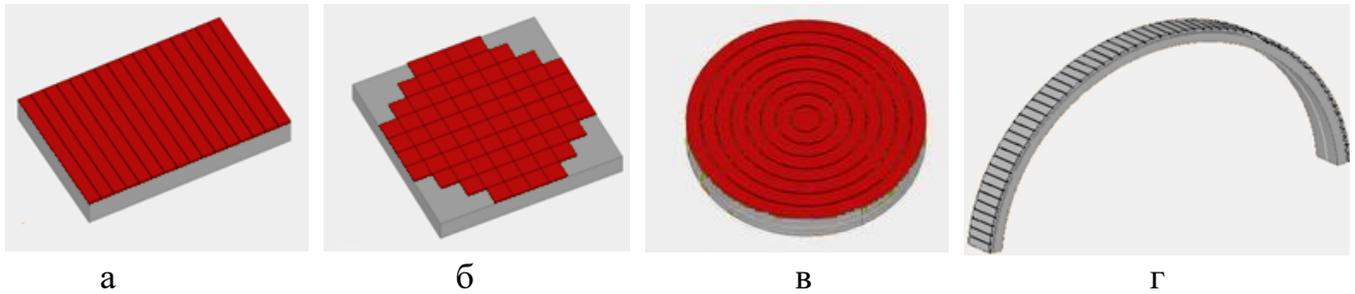
Линейные решетки – один ряд элементов, обычно создается разрезанием большой прямоугольной пьезокерамической пластины. Луч управляется в одной плоскости (рис. 1.13,а).

Матричные решетки – элементы расположены в виде решетки, которая может быть криволинейной. Луч управляется в трех измерениях (рис. 1.13,б).

Круговые решетки – элементы представляют собой окружности, обычно создаются вырезанием из пьезокерамической пластины (рис. 1.13,в).

Секторные (выпуклые, вогнутые) решетки – один ряд элементов, который выполнен криволинейным, для создания требуемой формы луча или соответствия

геометрии детали, подвергаемой контролю. Луч управляется в одной плоскости (рис. 1.13,г).



а б в г  
Рисунок 1.13 – Типы преобразователей ФАР

Существует три основных способа управления лучом фазированной решетки [86]:

- Электронное сканирование: один фокальный закон переключается в пределах группы элементов. Сканирование выполняется с постоянным углом и вдоль длинной стороны решетки. Этот процесс эквивалентен механическому перемещению обычного одноэлементного преобразователя.

- Динамическая фокусировка по глубине (вдоль акустической оси): сканирование выполняется посредством изменения фокусного расстояния. На практике для излучения используется один и тот же импульс, а в режиме приема решетка перефокусируется последовательно на различные значения глубины.

- Секторное сканирование (азимутальное, или угловое сканирование): излучение производится одной и той же группой элементов с сохранением одного и того же фокусного расстояния, но последовательно под различными углами.

В качестве примера можно привести ООО «Акустические контрольные системы» (АКС), г. Москва, которое выпускает ряд ультразвуковых томографов различного назначения [87 ... 89]:

- Низкочастотный ультразвуковой томограф A1040 MIRA.
- Низкочастотный ультразвуковой сканер-топограф A1050 PlaneScan.
- Высокочастотный ультразвуковой томограф A1550 IntroVisor.

Например, A1550 IntroVisor - ультразвуковой дефектоскоп с цифровой фокусировкой антенной решетки и томографической реконструкцией зоны

контроля предназначен для контроля металлов и пластмасс. Обеспечивает поиск дефектов в виде изображения сечения в режиме реального времени.

Преимущества томографии:

- Оперативный поиск несплошностей в изделиях из металлов, пластмасс и композитов с качественной визуализацией полученных результатов.

- Быстрота и эффективность.

- Визуализация зоны контроля в виде томограммы в режиме реального времени с высокой частотой обновления.

- Большая апертуры антенных решеток и за счет этого возможен контроль вдоль линии сварного шва без поперечного сканирования.

- Высокая частота кадра, при этом обеспечивается высокая скорость сканирования вдоль сварного соединения до 50 мм/с.

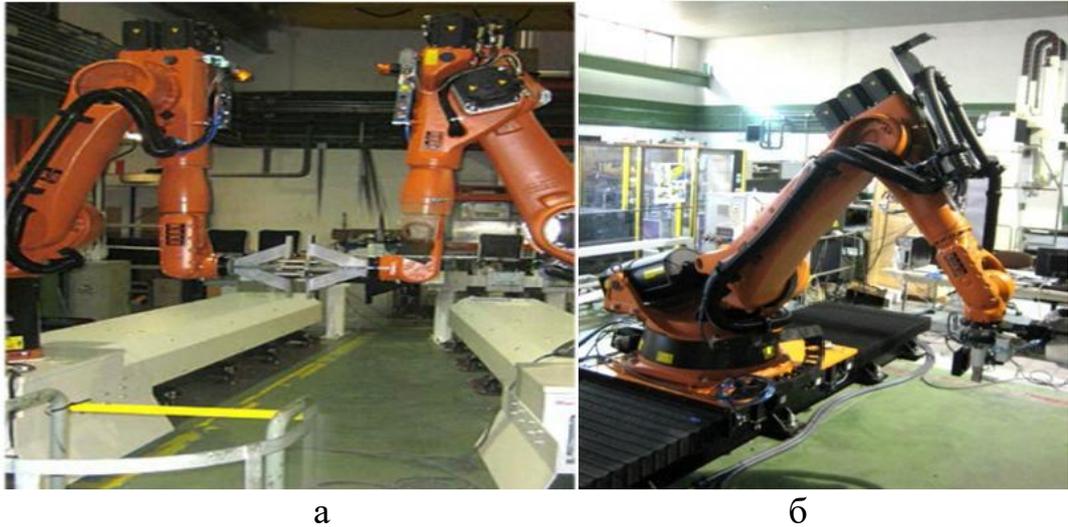
Все акустические томографы фирмы «АКС» работают только в эхо-импульсном режиме и поэтому реконструируют томограмму только по отраженным сигналам.

Технические характеристики ультразвукового томографа *A1550 IntroVisor* показаны в таблице 7.

Таблица 7 – Технические характеристики A1550

Параметр	Значение
Допустимое число элементов ФАР, шт.	16 ÷ 64
Применяемые типы волн	Поперечные, продольные
Скорость реконструкции изображения	15 ÷ 35 кадров в секунду
Размер томограммы, пикселей	256 × 256
Размер области реконструкции, мм	±256 × 256 по горизонтали, по глубине
Шаг реконструкции томограммы, мм	0,1 - 1
Рабочие частоты, МГц	1,0;1,2;1,5;1,8; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0
Возможные скорости ультразвука, м/с	От 300 до 15000
Тип дисплея	TFT SVGA 640x480
Рабочие температуры	от -10°C до +45°C
Время автономной работы	до 8 часов

В настоящее время существует ряд импортных автоматизированных установок для проведения УЗ контроля конструкций из металлических материалов, таких как оборудование фирмы «Теснатом» (Испания), использующее теневой и эхо-метод с вводом ультразвуковой волны через слой контактной жидкости [90].



а - теневой метод, б - эхо-метод

Рис. 1.14. Оборудование фирмы «Теснатом»:

Несмотря на высокие показатели достоверности и качества контроля импортных аналогов, они имеют ряд недостатков:

- недостаточная информативность результатов контроля с точки зрения оценки потенциальной опасности выявленных дефектов (при проведении эксплуатационного контроля);

- применяется как правило способ ввода упругих колебаний с использованием контактных жидкостей.

### 1.3 Методы визуализации внутренней структуры объекта контроля

В последние годы методы фазированной акустической решетки (ФАР) находят все большее число применений для контроля промышленных компонентов [91, 92]. Среди преимуществ перед одиночными датчиками ФАР обладает следующими особенностями [93]:

- более быстрый процесс контроля,

- легкость интерпретации ультразвукового изображения, что требует минимальное обучение оператора,
- дефекты могут быть сразу же обнаружены и оценены,
- несколько видов контроля может осуществляться на одном оборудовании
- возможность получения объемного изображения

Для получения четкого изображения внутренней структуры образца требуется фокусировка звуковой энергии в каждую точку зоны контроля. Фокусировка может осуществляться либо на этапе излучения, где применяются соответствующие законы задержки, с тем, чтобы каждый элемент излучал с некоторой задержкой и поэтому максимальная энергия направляется в сторону исследуемой точки; либо фокусировка может быть применена синтетически путем сдвига и отбора А-сканов на этапе постобработки. Если используется полный набор данных решетки, то такой способ называется методом полной фокусировки (Total focusing method - TFM), который был впервые предложен в конце прошлого столетия [94, 95] и основан на миграционном алгоритме Кирхгофа, широко используемым в сейсморазведке. Дальнейшее развитие этот метод получил с появлением многоядерных компьютеров, способных распараллеливать вычислительный процесс. Было показано [96], что этот метод имеет самую высокую выявляемость дефектов среди других методов за счет улучшенной фокусировки. Этот метод был назван "золотой стандарт" [97], с которым нужно сравнивать другие методы.

Для реализации алгоритма TFM требуется полный набор данных во временной области из любой возможной комбинации излучатель-приемник акустической решетки и вычисления амплитуды сигнала в каждой точке зоны контроля путем суммирования амплитуд сдвинутых А-сканов во времени, что позволяет провести фокусировку на этапе постобработки.

Пусть имеется линейная решетка из  $n_e$  элементов. Каждый элемент решетки излучает один за другим независимо, а все элементы антенной решетки принимают сигнал одновременно и независимо один от другого. Полученный

набор данных из полной комбинации излучатель-приемник образуют матрицу размером:

$$[n_e \times n_e \times n_s], \quad (1.1)$$

где  $n_s$  – количество временных отсчетов в каждом сигнале.

Однако, данные удобно представлять в виде матрицы  $S_{ij}(t)$  для  $1 \leq i \leq n_e$  и  $1 \leq j \leq n_e$ :

$$S_{ij}(t) = \begin{matrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{21n} \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{matrix} \quad (1.2)$$

где  $A_{ij}$  – А-скан, полученный  $j$ -ым приемником при излучении  $i$ -ым излучателем.

Законы задержки уникальны для каждой фокальной точки зоны контроля. Матрица расстояний  $D_{ikl}$  от излучателя до каждой точки зоны контроля будет иметь размерность  $n_x \times n_y \times n_e$ . Матрица расстояний  $D_{jkl}$  от каждой точки зоны контроля до приемника будет иметь ту же размерность  $n_x \times n_y \times n_e$ . Индексы каждого члена матрицы подчиняются условиям:

$$1 \leq i \leq n_e, 1 \leq j \leq n_e, 1 \leq k \leq n_x, 1 \leq l \leq n_y,$$

$x, y$  – координаты точки фокусировки.

Чтобы получить матрицу изображения  $I_{kl}$ , фокусировку в каждую точку зоны контроля осуществляют следующим образом,:

$$I_{kl} = |\sum_i \sum_j S_{ij}(D_{ikl} + D_{jkl})|. \quad (1.3)$$

Кроме TFM алгоритма используются еще две его разновидности. Первый метод это метод общего источника (Common Source Method - CSM). Различие с TFM заключается в том, что алгоритм CSM не имеет зависимости от излучающего элемента, так как излучатель является общим для всех приемников и матрица будет иметь вид  $S_j(t)$ . Индекс  $j$  обозначает номер принимающего элемента. Матрица изображения создается из выражения:

$$I_{kl} = |\sum_j S_j(D'_{kl} + D_{jkl})|, \quad (1.4)$$

где  $D'_{kl}$  указывает на законы задержки для общего источника, который зависит только от расположения точки изображения.

Второй метод это - метод синтезированной апертуры SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique), по-другому известный как метод обратного рассеяния, широко использовался в радиолокации. Применить этот метод в области обработки акустических данных впервые предложил Й. Крауткремер [98]. Его сущность заключается в том, что тот элемент, который принимает, он же и излучает. Таким образом, набор данных может быть записан как  $S_i(t)$ , где  $i$  обозначает индекс излучающего элемента. Соответствующий алгоритм восстановления изображения:

$$I_{kl} = \left| \sum_j 2S_i(D_{ikl}) \right| \quad (1.5)$$

Таким образом, все три метода отличаются только с точки зрения их комбинаций излучатель-приемник, как показано на рисунке 1.15. Оба этих метода требуют  $n_e$  вычислений и, поэтому, способны восстанавливать изображение в более короткий промежуток времени, так как для TFM требуется  $n_e^2$  вычислений. CSM имеет гораздо меньшее время восстановления изображения, т.к. требуется только один цикл, в то время как для SAFT и TFM – необходимо  $n_e$  циклов.

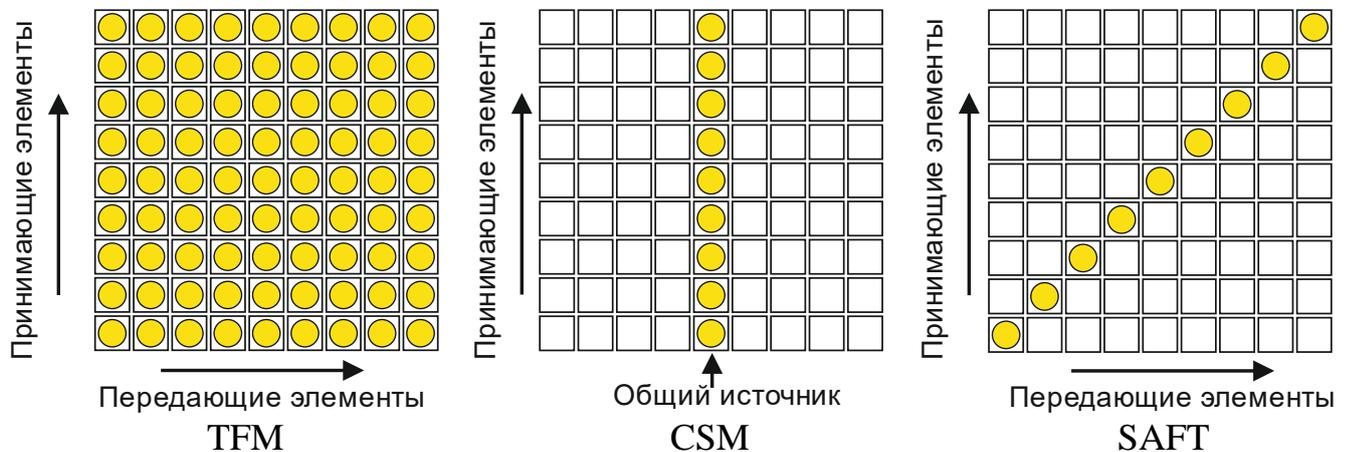


Рисунок 1. 15 - Три алгоритма восстановления изображения

Теоретически чувствительность CSM и TFM изображений ниже, чем у TFM [99], отчасти потому, что используют меньшее количество данных, тем самым снижая отношение сигнал/шум.

Еще один широко используемый алгоритм обработки изображений со сверхвысоким разрешением это time-reversal multiple signal classification algorithm [100 ... 108]. Этот метод начинается с определения временной матрицы  $T$ :

$$T(\omega_c) = H_{tx,rx}^{*t}(\omega_c) H_{tx,rx}(\omega_c) \quad (1.6)$$

где  $\omega_c$  - центральная частота преобразователя

«\* t» - комплексно-сопряженная транспонированная матрица.

Из полной матрицы сигналов приема-передачи через разложение единичных значений получают единичные значения  $\sigma_i$  и единичные векторы  $\mu_i$  матрицы  $T(\omega_c)$ , которые составляют основу визуализации этого алгоритма. Так как матрица  $T(\omega_c)$  - это Эрмитова матрица, то единичные значения являются действительными, а единичные векторы являются ортогональными. Каждый вектор состоит из двух составляющих: сигнала  $U_S$  и шума  $U_N$ :

$$U_S = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m], \quad (1.7)$$

$$U_N = [\mu_{m+1}, \mu_{m+2}, \dots, \mu_N], \quad (1.8)$$

где m-количество ненулевых единичных значений.

На практике, из-за наличия шума, все единичные значения больше нуля, поэтому пороговое значение определяется на уровне 10% от максимального. Все что меньше считается шумом. Стоит отметить, что значение этого порога является произвольным и поэтому подбирается в зависимости от структуры изделия и дефектов, представляющих интерес.

Изображение восстанавливается через вектор, который для каждой точки изображения  $r$ , дается из выражения:

$$g(r) = [G(R_1, r), G(R_2, r), \dots, G(R_N, r)], \quad (1.9)$$

где  $R_l(l=1, 2, \dots, N)$  - это элемент массива в центральной позиции,

G – целевая функция Грина.

Тогда интенсивности  $I(r)$  точки изображения будут равны:

$$I(r) = \frac{1}{\sum_{j=m+1}^N [\mu_j^* g(r)]^2}, \quad (1.10)$$

где угловые скобки обозначают скалярное произведение.

Следует заметить, что выражение (1.10) это алгоритм поиска, который возвращает большее значение, когда  $g(r)$  ортогонально к единичным векторам в шумовом пространстве.

Несмотря на широкое применение этих методов, аналитических выражений

для диаграммы направленности, разрешающей способности и чувствительности до сих пор не было получено. Это затрудняет анализ дефектометрических характеристик систем контроля использующих эти методы. В основном приходится прибегать к численным методам анализа, которые применимы только для частных случаев.

## ВЫВОДЫ.

- Существует достаточный набор методов контроля для поиска дефектов металлических заготовок, что позволяет, осуществлять практически полную диагностику изделий.

- Одним из наиболее перспективных методов является ультразвуковой метод контроля, который обладает целым набором преимуществ по сравнению с другими методами.

- Существенным недостатком существующей аппаратуры ультразвукового контроля является большие трудозатраты из-за невысокой скорости обследования. Вследствие этого, разработка аппаратуры, сочетающей высокую разрешающую способность и высокую скорость проведения контроля, является в настоящее время актуальной задачей.

- Применение техники фазированных решеток позволяет обеспечить высокую выявляемость дефектов, информативность результатов контроля и возможность идентификации топологии выявленных дефектов.

- Наиболее перспективным направлением для решения задач контроля фасонных отливок ракетно-космического назначения является использование многоэлементной акустической антенной решетки. Применение новых методов постобработки А-сканов может привести к увеличению разрешающей способности по сравнению с классическими методами постобработки.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Исследованию работы акустических линейных антенных решёток посвящено большое, и всё возрастающее, количество научных исследований. Однако, как показано в первой главе, подавляющее большинство этих работ посвящено алгоритмизации обработки полученного массива информации. В то же время, анализ дефектоскопических и дефектометрических характеристик того или иного метода обработки демонстрирует явную ограниченность. В результате, порою, возникают фантастические предположения о чудесных характеристиках предлагаемых способов реконструкции акустических изображений. В полной мере такая ситуация характерна для технологии TFM. Поэтому, анализ разрешающей способности, который базируется на понятии диаграммы направленности, а также чувствительности метода TFM является весьма актуальной задачей.

### 2.1 Диаграмма направленности решётки по технологии TFM

Анализ работы антенн и антенных систем основан на закономерностях теории волновых полей. Фундаментальной основой аналитики акустических волновых полей является решение дифференциального уравнения второго порядка в частных производных, которое описывает поведение акустического излучения. Это хорошо известное волновое уравнение [109], многочисленные частные решения которого подробно изучены различными исследователями [110]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

где  $p$  – звуковое давление,

$c$  – скорость звука,

$x$  – геометрическая координата, совпадающая с направлением распространения звука,

$t$  – время.

Выражение (2.1) описывает поведение плоских волн в зоне дифракции Фраунгофера, что соответствует акустике малых излучателей, размеры которых меньше длины волны в среде распространения. Известно [111] решение для граничных условий полупространства. Это функция Грина для безграничного пространства. Она имеет вид:

$$\Phi = \frac{e^{-j \cdot k \cdot r}}{4 \cdot \pi \cdot r}, \quad (2.2)$$

где  $\Phi$  – потенциал колебательной скорости в данной точке поля,

$k$  – волновое число,

$r$  – радиус-вектор данной точки поля.

Выражение (2.2) справедливо для источника с единичной объёмной скоростью, поэтому амплитудный коэффициент опущен. Отметим, что потенциал колебательной скорости связан со звуковым давлением соотношением [111]:

$$\Phi = \frac{p}{j \cdot k \cdot \rho \cdot c}, \quad (2.3)$$

где  $\rho$  - плотность среды распространения звука,

$j$  – мнимая единица.

Комплексный характер выражения (2.3) указывает всего лишь на фазовое соотношение между звуковым давлением и колебательной скоростью.

Нахождение амплитуды и фазы звукового давления в произвольной точке волнового поля по известным параметрам излучателей относится к классу прямых задач. Важным результатом расчёта структуры поля является зависимость акустического давления от угловых геометрических параметров и расстояния до точки контроля. Такая зависимость при неизменном расстоянии называется диаграммой направленности антенны по давлению.

Теория антенн [112] указывает на исключительную важность этой характеристики. Диаграмма направленности определяет чувствительность локационной системы, её возможности по обнаружению объектов с предельно малыми размерами, разрешающую способность при сканировании протяжённой

зоны контроля аппаратуры звуковидения, точность фиксации местоположения объекта в той или иной системе координат и целый ряд других параметров. Существует большое количество работ, посвящённых исследованию диаграмм направленности различных излучателей [103 ... 115]. Получены аналитические выражения, описывающие диаграммы направленности антенн разнообразной конфигурации [116].

Базовым инструментом анализа излучателей разнообразных форм является интеграл Гюйгенса-Релея, который иллюстрирует математическую интерпретацию принципа Гюйгенса. Согласно этому принципу, каждая точка поверхности излучателя является центром расходящейся сферической волны, интенсивность которой пропорциональна первичному волновому возмущению. Расчёт волнового поля с помощью интеграла Гюйгенса-Релея, как правило, приводит к локализации двух характерных зон. Первая – ближняя зона или зона дифракции Френеля - характеризуется резкими флуктуациями звукового давления вдоль линии распространения упругой волны. Работа в данной зоне приборов акустической дефектоскопии применяется весьма и весьма редко. Вторая – дальняя зона или зона дифракции Фраунгофера – обладает свойством апериодической зависимости интенсивности акустического поля от расстояния до точки контроля. Другими словами, звуковое давление плавно изменяется (уменьшается) при увеличении расстояния. Большинство приборов акустической локации используются именно в этой зоне [117].

Практически все антенные решётки составлены из парциальных излучателей, работающих именно в зоне дифракции Фраунгофера. Самой распространённой, ввиду своей простоты, является линейная эквидистантная антенная решётка. Она представляет собой набор излучателей малых размеров, расположенных вдоль прямой линии на одинаковых расстояниях друг от друга. Достаточно хорошо изучена фазированная антенная решётка, диаграмма направленности которой формируется либо аппаратно, либо синтезируется с помощью вычислительного алгоритма [118]. В последнем случае аппаратура

необходимо должна включать в себя устройства аналого-цифрового преобразования (АЦП) и цифровой оперативной памяти.

Математический анализ диаграммы направленности акустической антенной решётки, парциальная информация которой обрабатывается с помощью алгоритма TFM, предусматривает некоторые формальные начальные условия и допущения.

- 1) Антенная решётка состоит из точечных пьезопреобразователей, не имеющих геометрических размерностей.
- 2) Акустические сигналы являются гармоническими и непрерывными.
- 3) Акустический тракт является линейным, поэтому принцип Ферма реализуется в прямолинейной нотации.
- 4) Отражатели являются точечными, а коэффициент отражения не зависит от геометрических размеров.

Будем также считать, что все точки рассматриваемой области имеют одинаковые по длине радиус-векторы. Поэтому сигналы всех излучателей, составляющих эквидистантную антенную решётку, имеют совершенно одинаковую амплитудную зависимость, которая в дальнейших расчётах будет опущена. Тем более что диаграмма направленности - это величина, нормированная к единице, и от расстояния до произвольной точки поля не зависит. С учётом данного замечания выражение (2.2) существенно упрощается.

Следует также подчеркнуть, что исходные аналитические выражения, использованные для вывода конечной формулы, показывают абстрактные временные зависимости и не имеют размерности акустического давления или амплитуды колебательной скорости. Правомерность такого подхода основана на линейном характере механизма преобразования электрических сигналов в акустические и обратно. Именно поэтому размерности вообще опущены, что не влияет на правомерность конечного результата.

Парциальные сигналы единичной амплитуды, в соответствии с выражением (2.2) и сделанными допущениями, в вещественной форме будут равны:

$$A_n(t) = A_0 \cos(\omega \cdot t - \Psi_n), \quad (2.4)$$

где  $\omega$  - круговая частота волнового поля,

$t$  – текущее время,

$\Psi_n$  – фаза сигнала приёмника с номером  $n$ .

Расположение элементов акустического тракта в декартовой системе координат приведено на рисунке 2.1.

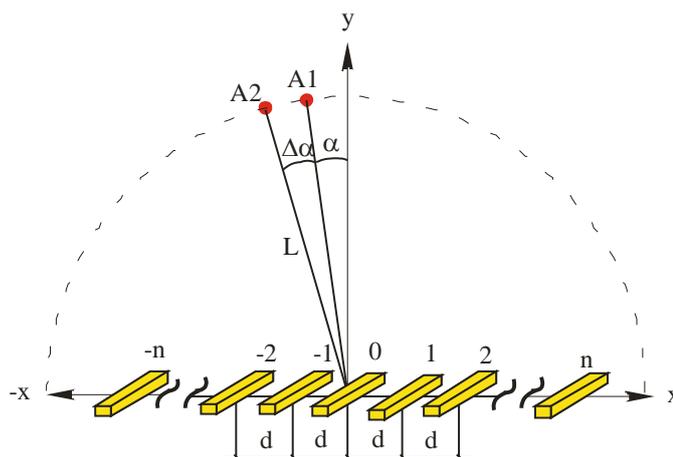


Рисунок 2. 1 - Конфигурация расположения акустической решётки в декартовых координатах.

Акустическая решётка размещена таким образом, что её центр совмещён с началом координат. Ось «у» составляет перпендикуляр к поверхности излучения, а ось «х» совпадает с образующей решётки. Рабочая область совпадает с положительными значениями оси «у». Каждому парциальному элементу присвоен индекс. Совокупность индексов составляет множество натуральных чисел, принимающих значение от  $n$  до  $-n$ , включая ноль. Таким образом, общее количество элементов в решётке равно  $2 \cdot n + 1$ . Эквидистантный характер реализуется взаимным расположением элементарных излучателей вдоль образующей на одинаковых расстояниях, равных  $d$ . В точке  $A1$  расположен точечный отражатель на расстоянии от начала координат, равном  $L$ . Радиус-вектор составляет произвольный угол  $\alpha$  с осью «у».

Прежде чем перейти к непосредственному анализу акустической системы, изображённой на рис.2.1, следует указать на алгоритмическую особенность реконструкции изображения TFM. Дело в том, что величина каждого эйконала

вычисляется как сумма излучённого и принятого лучей одновременно. Невозможность разделения режимов излучения и приёма делает понятие диаграммы направленности нестрогим. Больше соответствует физике процесса понятие функции рассеяния точки (PSF), введённое в научную практику английским астрономом и математиком G.B.Airy [119].

В общем виде можно записать:

$$F(x, y, z) = R(x, y, z) \otimes L(x, y, z), \quad (2.5)$$

где  $x, y, z$  – декартовы координаты,

$F(x, y, z)$  – акустический образ объекта, представленный сигналом-откликом,  
 $R(x, y, z)$  – импульсная пространственная функция рассеяния точки в режиме эхолокации данной миграционной решётки,

$L(x, y, z)$  – отражательная характеристика объекта контроля,

$\otimes$  – символ свёртки.

Учитывая сделанное выше четвёртое допущение, можно утверждать, что сигнатура точечного отражателя совпадает с точностью до константы с функцией  $R(x, y, z)$ . Сравнивая выражение (2.5) с аналогичным по смыслу выражением из общей теории антенн [113], можно видеть, что PSF есть свёртка диаграмм направленности в режиме излучения и в режиме приёма. Таким образом, вычислив сигнатуру точки, показанной на рисунке. 2.1, получим формулу комплексной диаграммы направленности антенной решётки с обработкой парциальной первичной информации по алгоритму TFM.

Фаза отражённого сигнала в выражении (2.4) определяется суммарной длиной пути распространения зондирующего сигнала от излучателя до отражателя и, затем, от отражателя до приёмника. На основании геометрических построений рисунка.2.1 можно записать:

$$l_n = \sqrt{[L \cdot \sin(\alpha) - n \cdot d]^2 + [L \cdot \cos(\alpha)]^2}, \quad (2.6)$$

где  $l_n$  –эйконал от отражателя до элемента матрицы с произвольным номером  $n$ .

Тогда фаза сигнала этого элемента будет равна:

$$\Psi_n = k \cdot (l_p + l_m), \quad (2.7)$$

где  $m, p$  – произвольные индексы излучающего и приёмного элементов линейной антенной решётки.

С учётом формулы (2.7) принятый парциальный сигнал  $U(t)$  произвольного приёмника приобретает вид:

$$U(t) = \cos\left\{\omega \cdot t - k \cdot \left(\sqrt{(L \cdot \sin \alpha - p \cdot d)^2 + (L \cdot \cos \alpha)^2} + \sqrt{(L \cdot \sin \alpha - m \cdot d)^2 + (L \cdot \cos \alpha)^2}\right)\right\} \quad (2.8)$$

Разложим в ряд Тейлора радикалы, входящие в выражение для фазы сигнала, и заменим их первыми двумя членами ряда. Тогда выражение (2.8) примет вид:

$$U(t) = \cos\left\{\omega \cdot t - k \cdot L \cdot \left[2 + 0,5 \cdot \left(\frac{d}{L} \cdot p + \frac{d}{L} \cdot m\right)^2 + \left(\frac{d}{L} \cdot p + \frac{d}{L} \cdot m\right) \cdot \sin \alpha\right]\right\} \quad (2.9)$$

Ошибка, возникающая при такой замене, будет тем меньше, чем больше расстояние  $L$  превосходит продольный размер матрицы. Численные величины ошибки будут оценены ниже.

Напомним, что принципиальная особенность процедуры обработки парциальной информации по методу TFM заключается в суммировании мгновенных значений специальной выборки по времени из этих сигналов. Время будет определяться скоростью звука упругой волны в контролируемой среде и длиной пути до данной точки поля от каждого конкретного элемента антенной решётки, т.е. эйконалом. Из выражения (2.9) нетрудно видеть, например, что все мгновенные значения сигналов, отражённых от точки А1, выбранные подобным образом будут максимальными и равны единице. Соответственно, сумма такой выборки также будет максимальной. Произойдёт интерференционная фокусировка. Для соседних точек поля разность фазы сигнала и мгновенной фазы выборки, в соответствии с алгоритмом TFM, в выражении (2.9) уже не будет равна нулю. Произойдёт пространственное распределение амплитуды и точка А1 отобразится в сигнатуре некоторой области. Аналитическое описание этой области, по определению, есть PSF, или, с некоторыми допущениями, диаграмма направленности антенной решётки с обработкой парциальной информации по методу TFM.

Пусть по-прежнему отражатель находится в точке А1. Эйконали именно этой точки будут определять сигналы приёмников. Но выборка мгновенных фаз пусть определяется точкой А2, смещённой на произвольный угол  $\Delta\alpha$ . Запишем в явном виде значения мгновенной фазы и реальной фазы сигнала:

$$\Psi_{\Delta\alpha} = k \cdot L \cdot \left[ 2 + 0,5 \cdot \left( \frac{d}{L} \cdot p + \frac{d}{L} \cdot m \right)^2 + \left( \frac{d}{L} \cdot p + \frac{d}{L} \cdot m \right) \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) \right], \quad (2.10)$$

$$\Psi_{\alpha} = k \cdot L \cdot \left[ 2 + 0,5 \cdot \left( \frac{d}{L} \cdot p + \frac{d}{L} \cdot m \right)^2 + \left( \frac{d}{L} \cdot p + \frac{d}{L} \cdot m \right) \cdot \sin \alpha \right] \quad (2.11)$$

Значение мгновенной выборки произвольных пар излучателя и приёмника, с учётом выражений (2.10) и (2.11), будет равно:

$$a_{pm} = \cos \{ k \cdot d \cdot [ p \cdot \sin \alpha + m \cdot \sin \alpha - p \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) - m \cdot \sin(\alpha - \Delta\alpha) ] \} \quad (2.12)$$

Конечный результат представляет собой сумму всех парциальных мгновенных выборок:

$$A_{\alpha\Delta\alpha} = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n \cos \{ k \cdot d \cdot [ i \cdot \sin \alpha + j \cdot \sin \alpha - i \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) - j \cdot \sin(\alpha - \Delta\alpha) ] \} \quad (2.13)$$

где переменные суммирования  $i, j$  принимают значения из диапазона от  $n$  до  $-n$ , включая 0.

Выражение (2.13) представляет угловое, синтезированное с помощью алгоритма TFM, распределение сигнала, при условии размещения отражателя в точке А1.

Возвращаясь к вопросу правомерности разложения радикала в выражении (2.8) следует указать, что итоговая ошибка будет определяться не только отброшенной частью ряда Тейлора, соответствующего фазе сигнала-отклика от точки А1, и даже не столько этой величиной, но прежде всего разностью фаз, а, следовательно, разностью этих отброшенных частей. На основании формулы Лагранжа для «остатка» ряда Тейлора можно записать:

$$\frac{P_L^2}{2 \cdot (P_L^2 - 2 \cdot P_L \cdot \sin(\xi) + 1)^{3/2}} \cdot [(\sin \alpha)^2 - (\sin(\alpha + \Delta\alpha))^2], \quad (2.14)$$

где  $P_L$  – отношение общей длины антенной решётки к расстоянию до отражателя,

$\xi$  – некоторая величина, лежащая между 0 и  $\alpha$ .

Для большинства случаев практического применения угол сканирования лежит в пределах до  $30^\circ$ , а расстояние до зоны контроля, по меньшей мере, вдвое больше длины линейной антенной решётки. Для этих конкретных условий ошибка составляет примерно 2%. Увеличение расстояния до отражателя ещё в два раза сопровождается уменьшением погрешности до величины, меньше 0,4%.

Применим формулу сложения аргументов тригонометрических функций к выражению (2.13) и разделим его на два слагаемых, которые удобно анализировать по отдельности. Для упрощения написания оставим только индексы для знаков сумм. Первое слагаемое будет равно:

$$\sum_i \sum_j \cos\{k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]\} \cdot \cos\{k \cdot d \cdot j \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]\} \quad (2.15)$$

Второе слагаемое будет равно:

$$- \sum_i \sum_j \sin\{k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]\} \cdot \sin\{k \cdot d \cdot j \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]\} \quad (2.16)$$

Проведём вначале преобразования выражения (2.15). Для этого разделим его на два сомножителя:

$$\sum_j \cos\{k \cdot d \cdot j \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]\} \cdot \sum_i \cos\{k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]\} \quad (2.17)$$

Заметим, что каждый член этих сумм с индексом  $i=j=0$  равен 1. Кроме того, принимая во внимание, что косинус является чётной функцией, можем записать выражение (2.17) в виде:

$$\left(2 \cdot \sum_{i=1}^n \cos\{k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]\} + 1\right)^2, \quad (2.18)$$

где индекс  $n$  соответствует обозначению на рисунке 2.1.

Нетрудно заметить, что аргумент тригонометрической функции представляет собой арифметическую прогрессию. Это даёт возможность использовать известное соотношение, полученное Андре Анго [120], и свернуть сумму в выражении (2.18) в более простую аналитическую функцию. Авторская форма имеет вид:

$$\sum_{n=0}^{N-1} \cos(a + n \cdot \delta) = \cos \left[ a + (N-1) \cdot \frac{\delta}{2} \right] \cdot \frac{\sin \left( N \cdot \frac{\delta}{2} \right)}{\sin \left( \frac{\delta}{2} \right)}. \quad (2.19)$$

Для преобразования выражения (2.18) к виду выражения (2.19) заменим нижний предел суммирования нулём. Получим:

$$\left( 2 \cdot \sum_{i=0}^n \cos \{ k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \} - 1 \right)^2. \quad (2.20)$$

Теперь можно заменить сумму выражения (2.20) аналитической функцией вида:

$$\left( 2 \cdot \cos \left[ \frac{n \cdot k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2} \right] \cdot \frac{\sin \left( \frac{(n+1) \cdot k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2} \right)}{\sin \left( \frac{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2} \right)} - 1 \right)^2 \quad (2.21)$$

После некоторых тригонометрических преобразований получаем:

$$\left( \frac{\sin \{ k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \cdot (n + 0,5) \}}{\sin \left( \frac{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2} \right)} \right)^2. \quad (2.22)$$

Второе слагаемое (2.16) в выражении (2.13) состоит из нечётных тригонометрических функций, аргументы которых также представляют арифметическую прогрессию. Заметим, что каждый член этих сумм с индексом  $i=j=0$  равен 0. После замены нижнего предела суммирования на 1 можно убедиться, что слагаемое (2.16) будет равно 0. Действительно, после преобразований, выражение (2.16) приобретает вид:

$$\left( \sum_{i=1}^n \sin \{ k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \} - \sum_{i=1}^n \sin \{ k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \} \right) \times \\ \times \left( \sum_{i=1}^n \sin \{ k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \} - \sum_{i=1}^n \sin \{ k \cdot d \cdot i \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \} \right) \equiv 0 \quad (2.23)$$

Поэтому можно записать окончательную формулу углового распределения сигнала (сигнатуру) антенной решётки при расчёте изображения объекта контроля по алгоритму TFM.

$$A_{\alpha, \Delta\alpha} = \left( \frac{\sin \{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \cdot (n + 0,5)\}}{\sin \left( \frac{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2} \right)} \right)^2. \quad (2.24)$$

Формула (2.24) имеет почти канонический вид множителя антенной решётки [121], только возведённый в квадрат. Угол  $\alpha$  выступает как параметр, а текущее значение обозначено  $\Delta\alpha$ . Кроме того, необходимо провести нормировку функции (2.24) к единице. Для этого необходимо поделить её на квадрат числа элементов в антенной решётке. Окончательно формула приобретает вид:

$$R_{\alpha, \Delta\alpha} = \left( \frac{\sin \{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \cdot (n + 0,5)\}}{\sin \left( \frac{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2} \right) \cdot (2 \cdot n + 1)} \right)^2 \quad (2.25)$$

- Характерный вид полученной зависимости показан на рисунке 2.2.

Кривая построена для следующих конкретных параметров:

- Расстояние  $d$  между центрами элементов решётки равно 10 мм;
- Частота акустического излучения равна 300 кГц;
- Угол  $\alpha$  равен 0 радиан;
- Среда распространения волнового поля – вода.

Количество элементов антенной решётки равно 5, т.е.  $n=2$ ;

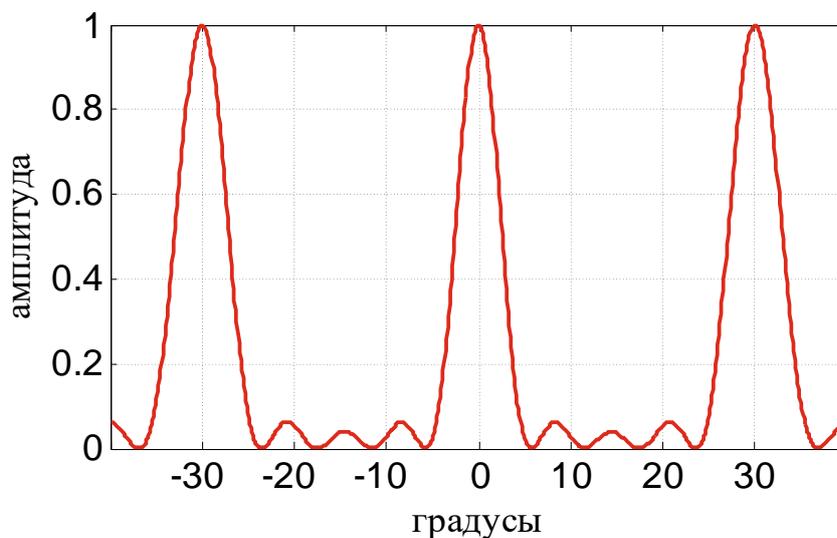


Рис. 2.2. Диаграмма направленности для  $n=2$  и  $d=10$  мм.

На графике видно, что при углах сканирования, равных  $30^\circ$  и минус  $30^\circ$  возникают главные боковые лепестки, создающие помехи синтезированного изображения объекта контроля. Связано это с расположением элементов в решётке. Устранение данного недостатка требует уменьшения расстояния между элементами, а для сохранения ширины ДН нужно увеличить их количество. Это иллюстрирует рисунок 2.3. Он рассчитан для  $n=4$  и  $d=5$ .

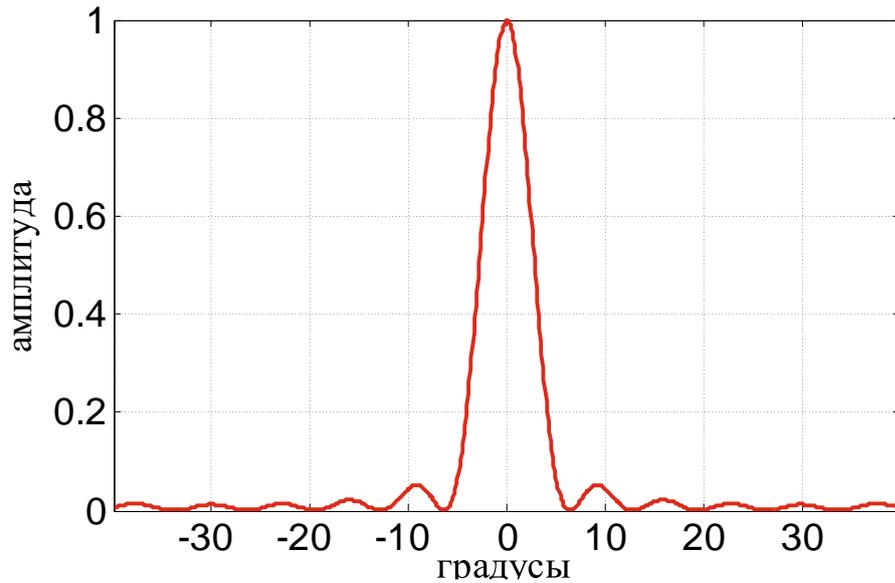


Рис. 2.3. Диаграмма направленности для  $n=4$  и  $d=5$  мм.

Использование режима сканирования позволяет смещать главный лепесток диаграммы направленности на заданный угол. На рисунке 2.4 показана ситуация, когда диаграмма направленности смещена на  $15^\circ$  в положительную сторону.

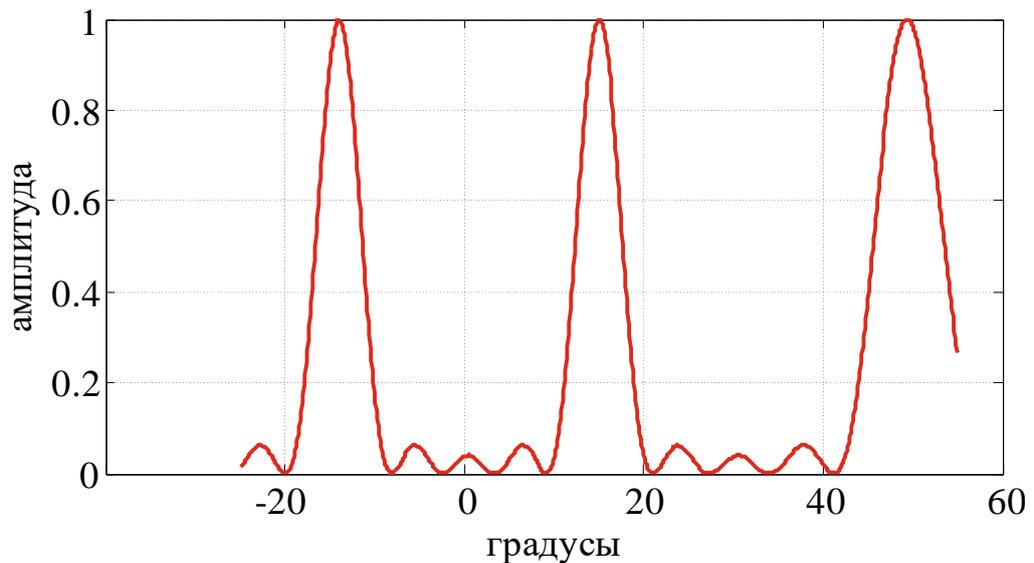


Рисунок 2.4 - Диаграмма направленности смещена на  $15^\circ$ .

Видно, что боковые лепестки не изменяют своего расположения относительно основного лепестка, но форма их претерпевает незначительные изменения. Это говорит о том, что ширина диаграммы направленности не остаётся постоянной в пределах углового диапазона сканирования. В показанном примере увеличение ширины составляет 3,7%.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

- Аналитическое выражение, описывающее PSF для системы TFM, совпадает по виду с формулой, описывающей диаграмму направленности фазированной антенной решётки, только возведённую в квадрат.

- Наличие главных лепестков высших порядков, наряду с основным лепестком, может искажать достоверность синтезированного акустического изображения и, поэтому, они должны быть исключены из зоны контроля.

- Управление формой диаграммы направленности эквидистантной решётки в зоне сканирования осуществляется оптимальным выбором количества элементов и расстоянием между ними.

## 2.2 Разрешающая способность

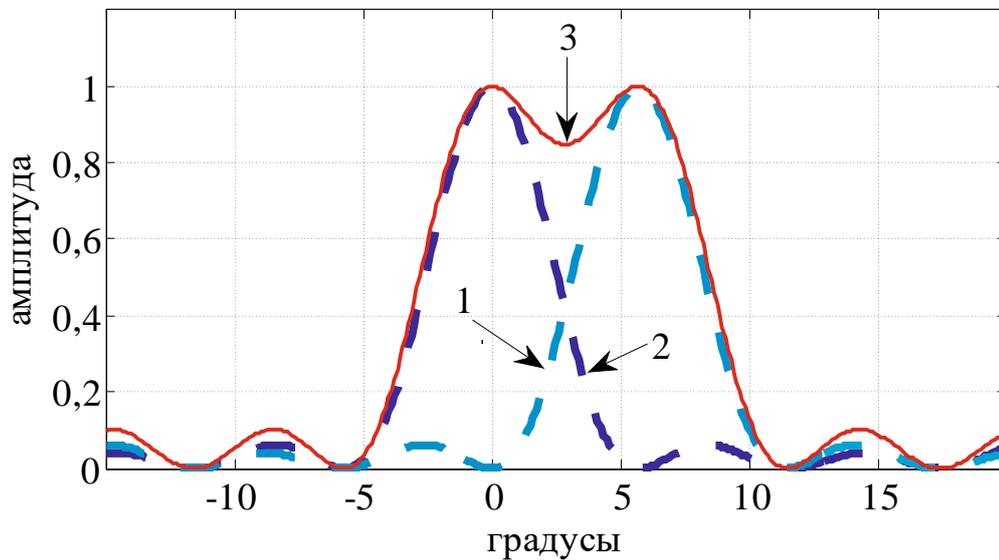
Важным дефектометрическим параметром систем акустической визуализации служит разрешающая способность, которая определяется, в основном, характеристикой синтезированной апертуры. В историческом плане понятие разрешения пришло из оптики, как наиболее исследованной области науки. Определено, что разрешение оптических приборов характеризует способность этих приборов давать отдельные изображения двух близких друг к другу точек объекта. Наименьшее линейное или угловое расстояние между двумя точками, начиная с которого их изображения сливаются, называется линейным или угловым пределом разрешения, т.е. разрешающая способность. Впоследствии, данный параметр начали широко использовать в других областях. В радиолокации, например, выделяют разрешающую способность по азимуту и углу места, а также по дальности. В радиотехнике говорят о разрешении двух видеоимпульсов, составляющих суммарную комбинацию. В спектроскопии

разрешающая способность относится к возможностям аппаратуры разделять две близкие частоты [122 ... 124].

В акустической эхо-локации при использовании линейных антенн принято выделять фронтальную и продольную разрешающие способности. Теоретической основой формирования второй является длительность сигнала-отклика, которая целиком определяется формой зондирующего сигнала. Для улучшения этой характеристики разработчики, как правило, стремятся сделать зондирующий сигнал максимально коротким. Сложности, возникающие в ходе реализации такого стремления, объясняются резонансным характером механизма преобразования электрического сигнала в акустический импульс [125]. Существует большое количество работ, посвящённых исследованию, разработке и изготовлению максимально аperiodических пьезопреобразователей [126]. С другой стороны, фазовое управление работой антенной решётки требует наличия нескольких периодов частоты зондирования. Важным фактором также является снижение эффективности прямого и обратного пьезоэффекта с уменьшением степени добротности системы. Учитывая вышеизложенное можно констатировать, что продольная разрешающая способность практически составляет несколько длин волн данной ультразвуковой частоты в контролируемой среде. Более подробный анализ выходит за рамки данной работы, поскольку лежит в сфере технологии изготовления линейных пьезокерамических антенных решёток.

Механизм образования фронтальной разрешающей способности основан на дифракционных процессах парциальных сигналов антенной решётки. Со всей очевидностью возникает аналогия этого явления с волновым процессом в оптических системах. Первые подробные теоретические исследования в этой области были проведены Дж. В. Стреттом (лорд Рэлей) [127, 128], который предложил эмпирический критерий разрешающей способности. Раздельное изображение двух точек можно с уверенностью зафиксировать, если центр первой зоны Френеля дифракционной картины одной точки совпадает с первым нулём, т.е. с началом второй зоны Френеля другой точки. Рисунок 2.5 поясняет

содержание эмпирического критерия Рэлея. На рисунке цифрой 1 отмечена кривая PSF в ситуации, когда в акустическом тракте находится только один точечный отражатель, расположенный, например, в точке A1 рисунка 2.1. Кривая 2 соответствует PSF точки, расположенной рядом, например, A2. Кривая, помеченная цифрой 3, изображает результирующую реакцию системы при одновременном расположении точечных отражателей в акустическом тракте. Взаимное расположение отражателей выбрано таким образом, чтобы оно соответствовало эмпирическому критерию Рэлея для разрешающей способности акустической системы. На рисунке 2.5 отчётливо заметна впадина между двумя максимумами.



1 – первая точка, 2 – вторая точка, 3 – суммарный сигнал.

Рисунок 2.5 - Изображение эмпирического критерия Рэлея.

Таким образом, для того, чтобы вычислить угловой промежуток, представляющий численное выражение фронтальной разрешающей способности, достаточно определить положение первого нуля диаграммы направленности.

Приравняем к нулю выражение (2.25):

$$\left( \frac{\sin \left\{ k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \cdot (n + 0,5) \right\}}{\sin \left( \frac{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2} \right) \cdot (2 \cdot n + 1)} \right)^2 = 0. \quad (2.26)$$

Очевидно, что уравнение (2.26) будет выполняться только в том случае, если числитель левой части будет равен нулю. Поэтому можно записать:

$$\sin \{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \cdot (n + 0,5)\} = 0. \quad (2.27)$$

Функция  $\sin$  будет равна нулю в том случае, если аргумент принимает величины, кратные  $\pi$ , включая и нулевое значение. Однако, последнее значение нужно исключить из рассмотрения, поскольку знаменатель левой части уравнения (2.26) при этом также равен нулю. Раскрытие этой неопределённости даёт единицу. Следовательно,

$$k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \cdot (n + 0,5) = p \cdot \pi, \quad (2.28)$$

где индекс  $p$  принимает значения  $\pm 1, \pm 2, \dots$ , т.е. значения натурального ряда целых чисел.

Естественно, первый нуль будет соответствовать значению  $p = \pm 1$ . Разные знаки указывают только на направление отсчёта вправо или влево по оси углов. Для оценки разрешающей способности это не имеет значения. Тогда, обозначив угловую разрешающую способность буквой  $\alpha_{\text{раз}}$ , получаем формулу в общем виде:

$$\alpha_{\text{раз}} = \arcsin \left( \frac{\lambda}{d \cdot n_{\text{общ}}} + \sin(\alpha) \right) - \alpha, \quad (2.29)$$

где  $\lambda$  – длина волны акустического излучения,

$n_{\text{общ}} = (2 \cdot n + 1)$  – количество элементов в решётке,

$\alpha$  – угол отклонения диаграммы направленности в секторе сканирования.

При контроле в строго ортогональном направлении по отношению к образующей линейной антенной решётке угол  $\alpha$  можно принять равным нулю. Тогда выражение (2.29) упрощается и принимает вид:

$$\alpha_{\text{раз}}^{\perp} = \arcsin \left( \frac{\lambda}{d \cdot n_{\text{общ}}} \right). \quad (2.30)$$

Если количество элементов антенной решётки превышает 10, то угловую разрешающую способность такого устройства можно представить в виде:

$$\alpha_{раз}^{\perp} = \frac{\lambda}{d \cdot n_{общ}}. \quad (2.31)$$

Величина ошибки, сопровождающая упрощение формулы (2.30), зависит от величины  $\alpha_{раз}^{\perp}$ . Например, при значении  $\frac{\lambda}{d \cdot n_{общ}} = 0,1$  радиана, ошибка не будет превышать 0,2%. Чем меньше это значение, тем меньше ошибка упрощения формулы (2.30). Нужно отметить, что такая разрешающая способность является невысокой и, в практически значимых случаях, требования, как правило, существенно выше. Поэтому, использование выражения (2.31) можно считать вполне приемлемым.

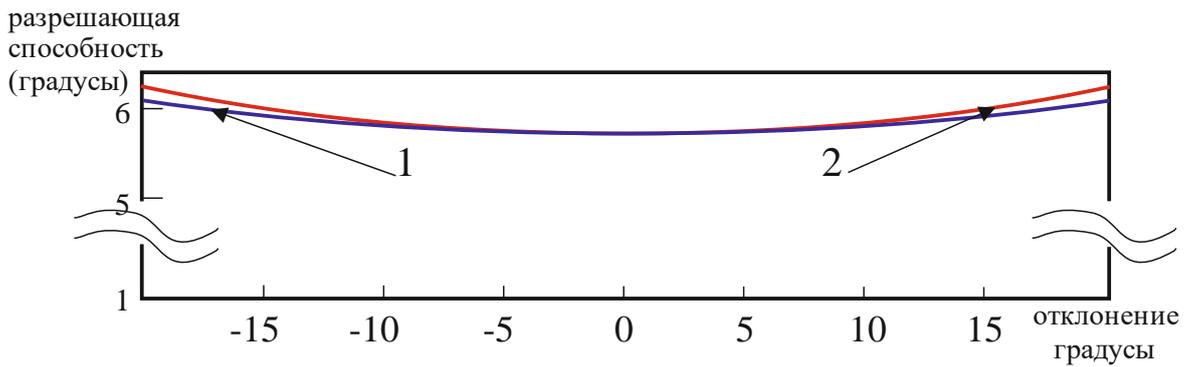
Выражение (2.29) можно преобразовать к более простому виду, учитывая формулу (2.31). Для этого достаточно разложить функцию  $\arcsin$  в ряд Тейлора и оставить только три первых члена. Получим:

$$\alpha_{раз} = \frac{\alpha_{раз}^{\perp}}{\cos \alpha}. \quad (2.32)$$

Возникающая при этом ошибка будет зависеть от величины угла сканирования. На рисунке 2.6 показаны две кривые, которые представляют собой зависимость угловой фронтальной разрешающей способности от угла поворота диаграммы направленности антенной решётки, синтезированной по методу TFM. Видно, что наилучшее разрешение наблюдается в центре симметричной зоны сканирования. При перемещении диаграммы направленности к краям этой зоны возможности антенной решётки снижаются.

Конкретные параметры акустического тракта, использованные для рисунка 2.6, аналогичны параметрам, использованным для рисунка 2.2.

Абсолютные различия значений разрешающей способности, рассчитанные по выражениям (2.29) и (2.32) меняются в пределах зоны сканирования, на 0,2% в центре, достигая 2,2% на краях. Это позволяет использовать более простую приближённую аналитическую формулу с достаточной для инженерных расчётов точностью.



1 - по формуле (2.32); 2 – по формуле (2.29).

Рисунок 2.6 - Угловая разрешающая способность антенной решётки по методу TFM.

Более подробный анализ формулы (2.29) показывает, что неравномерность фронтальной разрешающей способности в зоне сканирования слабо зависит от конкретных параметров решётки. В качестве примера на рисунке 2.7 приведены графики зависимости фронтальной угловой разрешающей способности для двух антенных решёток, число элементов в которых различается почти в два раза. Для кривой, помеченной индексом 1,  $n=2$ . Для кривой 2  $n=4$ . По оси ординат отложена величина:

$$\delta = \frac{\alpha_{раз} - \alpha_{раз}^{\perp}}{\alpha_{раз}^{\perp}} \cdot 100\% .$$

Рисунок 2.7 показывает, что неравномерность разрешающей способности в зоне сканирования, равной  $\pm 15^{\circ}$ , примерно 6,5%, причём различие данного параметра для антенных решёток с числом элементов, равным 5 и 9, всего  $\pm 0,5\%$ .

Правомерность применения расчётных соотношений и точность соответствия их экспериментальным данным были проверены с помощью линейной эквидистантной ультразвуковой антенной решётки, составленной из пяти элементов. Каждый элемент представлял собой круглый пьезопреобразователь, диаметром 6 мм, толщиной 4 мм, изготовленный из материала ЦТС-19. Расстояние между центрами элементов в решётке составляло 10 мм. Резонансная частота преобразователей, с учётом влияния демпфера и протектора, составила 325 кГц. Измерения проводились в воде при температуре

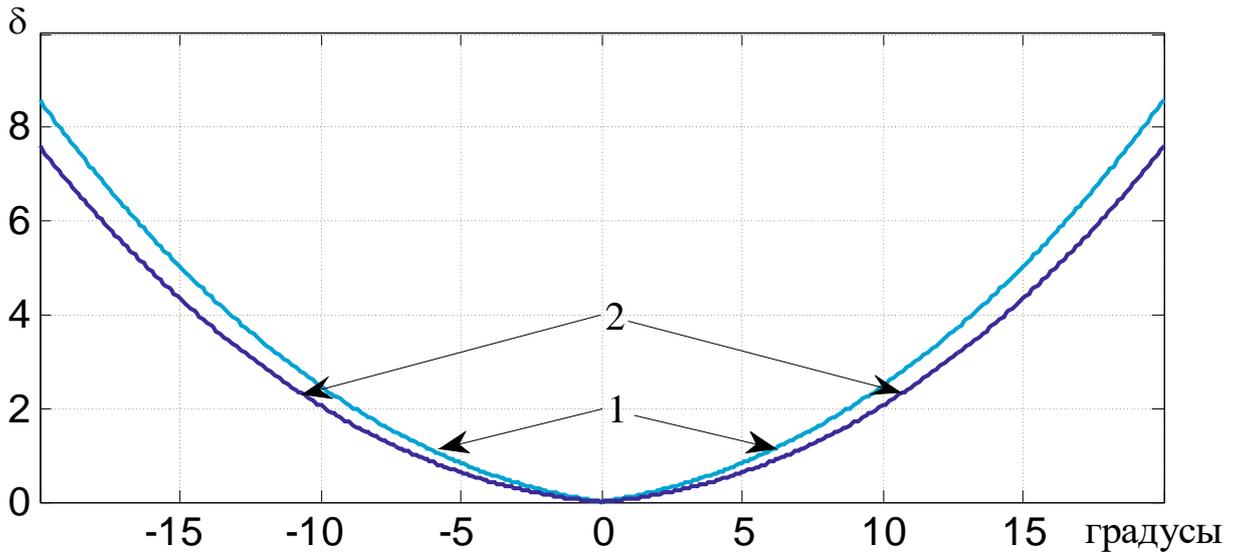


Рисунок 2.7 - Изменение разрешающей способности в пределах зоны сканирования.

23°C., поэтому длина волны в среде распространения равнялась 4,6 мм. В качестве объектов контроля использовались два металлических цилиндра, диаметром около 10 мм, длиной 5 см. Они размещались на расстоянии 40 см от антенной решётки. Расстояние между их центрами равнялось примерно 4 см. Переводя эти данные в радианную меру можно утверждать, что угловое расстояние между образцами составляло 0,1 рад.

Фрагмент сигнатуры, синтезированной с помощью алгоритма TFM, показан на рисунке 2.8. Он представлен в форме псевдообъёмной графики. На рисунке можно отчётливо видеть, что в акустическом тракте располагается именно два объекта. Их центры соответствуют максимумам сигнатуры. Расстояние по фронту составляет примерно 4 см, т.е. 0,1 рад. Расчёт по формуле (2.31) даёт значение разрешающей способности, равное 0,092 рад., что позволяет утверждать о достаточно точном совпадении расчётных и экспериментальных данных.

Полученные результаты свидетельствуют о вполне ожидаемых закономерностях зависимости фронтальной разрешающей способности для алгоритма TFM. Для сравнения приведём выражение, описывающее величину диаграммы направленности фазированной антенной решётки по нулевому уровню [122]:

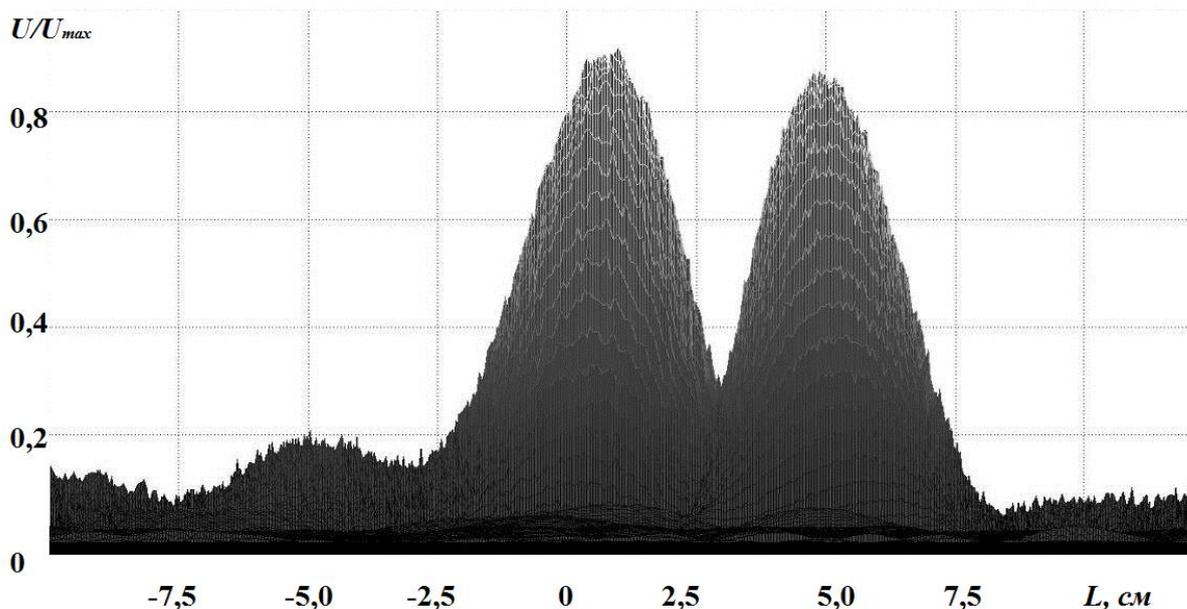


Рис. 2.8. Фрагмент экспериментальной сигнатуры.

$$\theta_0 = A_N^0 \cdot \frac{\lambda}{N \cdot d}, \quad (2.27)$$

где  $\theta_0$  – полуширина диаграммы направленности по нулевому уровню антенной решётки,

$N$  – число излучателей,

$d$  – расстояние между элементами эквидистантной антенной решётки,

$\lambda$  – длина волны излучения,

$A_N^0$  – коэффициент, слабо зависящий от числа излучателей.

Физический смысл последнего коэффициента состоит в переводе радианной меры в градусы. Видно, что приведённая формула практически совпадает с выражением (2.31). Следовательно, фронтальная разрешающая способность синтезирующего алгоритма TFM практически совпадает с фронтальной разрешающей способностью фазированной антенной решётки в нотации эмпирического критерия Релея.

Необходимо указать на существование несколько иной трактовки критерия Релея. Два дефекта классифицируются отдельно, если амплитудный «провал» между их сигнатурами равен или превышает 20% от максимума, а точное

равенство этим процентам характеризует разрешающую способность. Такой подход позволяет зафиксировать небольшое отличие TFM и «простого» фазирования. Оказывается, что разрешающая способность в данной трактовке для TFM становится лучше в 1,45 раза по сравнению с фазированной решёткой. Такое незначительное изменение не может служить основанием для использования данного алгоритма с целью значительного повышения качества сигнатуры сложных объектов контроля.

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы.

- Полученное аналитическое выражение показывает, что фронтальная разрешающая способность акустической антенной решётки с обработкой по алгоритму TFM совпадает по порядку величины с фронтальной разрешающей способностью фазированной антенной решётки.

- Изменение фронтальной разрешающей способности в пределах зоны сканирования, равной  $\pm 20^\circ$ , оказывается незначительным и не превышает  $\pm 2,2\%$  от величины разрешающей способности в направлении, перпендикулярном образующей решётки.

### 2.3 Мультипликативные методы обработки

В истории изучения фазированных антенных решёток в качестве предположения появлялись упоминания о возможности использования мультипликативных методов обработки парциальной информации. Практически непреодолимой трудностью вставал вопрос о необходимости и возможности перемножения зондирующих сигналов, а также создания точных аналоговых перемножителей приёмного тракта. Только достаточное развитие цифровых технологий обработки электрических сигналов открыло широкие возможности применения нетрадиционных способов совершенствования дефектометрических характеристик антенных решёток. Применение аналого-цифровых преобразователей позволяет хранить сигналы в цифровой форме, производить вычисления с использованием не только аддитивных алгоритмов, но также

мультипликативных операций. В результате формируются синтезированные диаграммы направленности, обладающие весьма высокими характеристиками.

В качестве одной из модификаций методики TFM предлагается использовать операцию перемножения парциальных сигналов антенной решётки.

С учётом выражения (2.12) можно записать:

$$A_{\alpha\Delta\alpha} = \prod_{i=-n}^n \prod_{j=-n}^n \cos\{k \cdot d \cdot [i \cdot \sin \alpha + j \cdot \sin \alpha - i \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) - j \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha)]\} \quad (2.28)$$

Учитывая чётность функции  $\cos$  и одинаковые пределы изменения переменных  $i, j$  выражение (2.28) можно переписать в виде:

$$A_{\alpha\Delta\alpha} = \prod_1^{2 \cdot n} \cos^{2 \cdot p} \{k \cdot d \cdot [p \cdot (\sin \alpha - \sin(\alpha + \Delta\alpha))]\}, \quad (2.29)$$

где  $p$  – переменная произведения, принимающая значения натурального ряда чисел от 1 до  $2 \cdot n$ .

Любые преобразования выражения (2.29) не приводят к его упрощению. Заметим, что оно нормировано к единице. Таким образом, формула (2.29) фактически представляет собой диаграмму направленности антенной решётки с алгоритмом получения парциальной информации по методу TFM, но с последующей мультипликативной обработкой. В окончательном виде можно записать:

$$R_{\alpha\Delta\alpha} = \prod_1^{2 \cdot n} \cos^{2 \cdot p} \{k \cdot d \cdot [p \cdot (\sin \alpha - \sin(\alpha + \Delta\alpha))]\}. \quad (2.30)$$

Дальнейший анализ проведём с помощью численных методов представления диаграммы направленности, полученной мультипликативным способом. На рисунке 2.9 показана диаграмма направленности для тех же параметров антенной решётки, что и на рисунке 2.2, но рассчитанная с помощью формулы (2.30). Визуальное сравнение рисунка 2.2 и рисунка 2.9 выявляет наличие существенных различий. Во-первых, ширина основного главного лепестка оказывается заметно меньше. Например, ширина по уровню 0,5 для аддитивного способа равна  $5,16^\circ$ , а для мультипликативного всего  $1,66^\circ$ . Во-вторых, неглавные боковые лепестки становятся очень малыми и на представленном графике не видны. Главные боковые лепестки высших порядков

не изменяют своей амплитуды, но становятся в два раза ближе к основному лепестку диаграммы направленности, что сужает зону возможного сканирования. Устранение данного нежелательного явления возможно тем же самым способом, что и для аддитивного метода обработки, т.е. увеличением количества элементов при неизменной общей длине решётки.

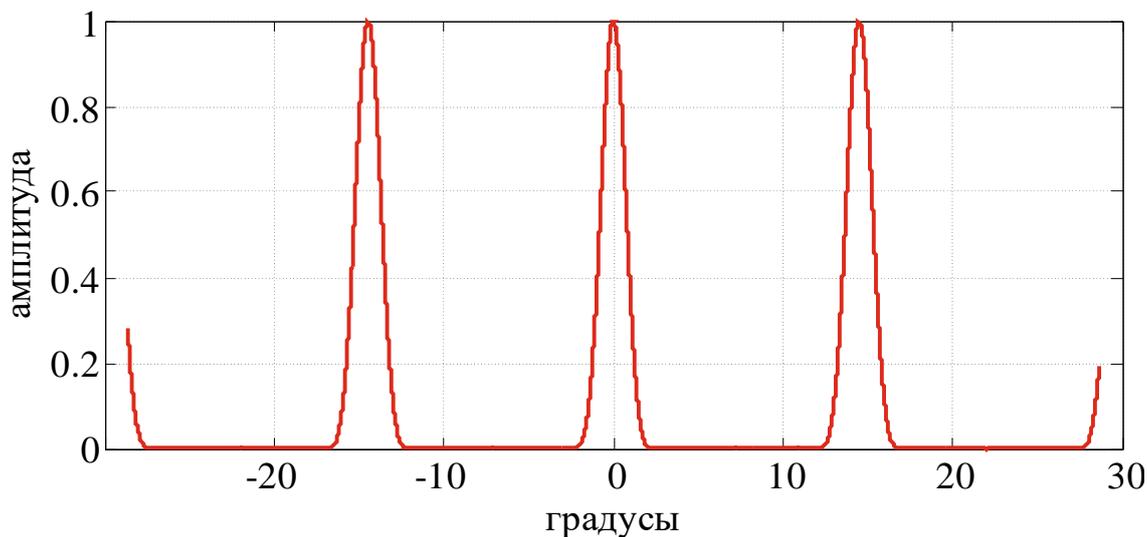


Рисунок 2.9 - Диаграмма направленности антенной решётки при мультипликативном методе обработки.

На рисунке 2.10 показана диаграмма направленности антенной решётки, параметры которой совпадают с параметрами аналогичного устройства, диаграмма направленности которого представлена на рисунке 2.3.

Количество элементов в ней удвоено, а расстояние между ними стало в два раза меньше. Видно, что главные боковые лепестки диаграммы направленности исчезли из видимой зоны сканирования на рисунке 2.10. При этом ширина основного лепестка стала ещё меньше и составила по уровню 0.5 всего  $0,83^\circ$ .

Следует напомнить, что при аддитивном методе обработки подобного изменения не наблюдалось и ширина основного лепестка оставалась неизменной. На рисунке 2.10 оказались заметными побочные лепестки. Их максимальное значение составило 1,3%. Путём численного анализа установлена графическая зависимость ширины диаграммы направленности от количества элементов в

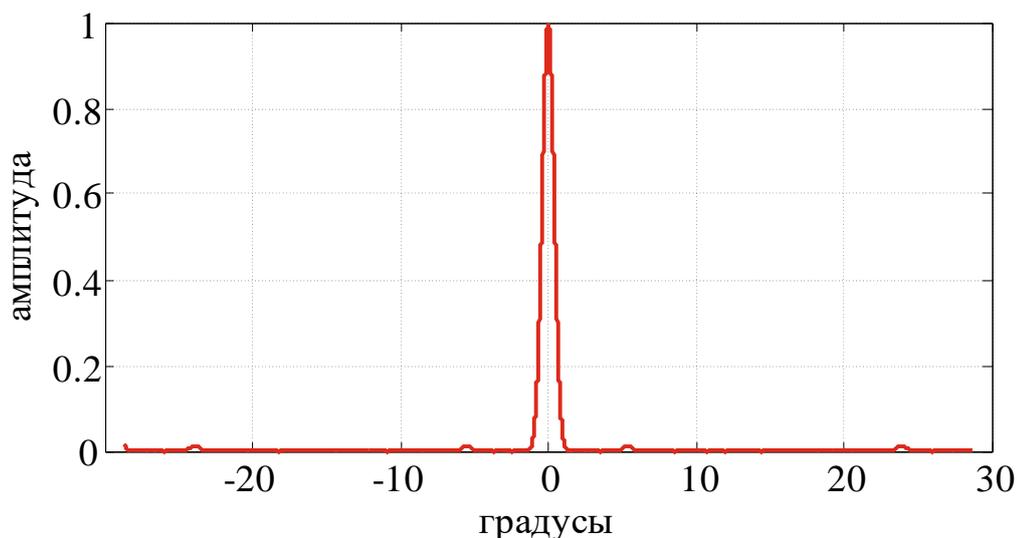


Рисунок 2.10 - Диаграмма направленности антенной решётки с мультипликативной обработкой  $n=4$  и  $d=5$  мм

линейной антенной решётке.

На рисунке 2.11 приведены такие зависимости для аддитивного и мультипликативного способов обработки. Кривые иллюстрируют монотонное уменьшение ширины основного лепестка диаграммы направленности при увеличении количества составляющих антенну элементов. Скорость этого изменения для кривой 2 оказывается выше.

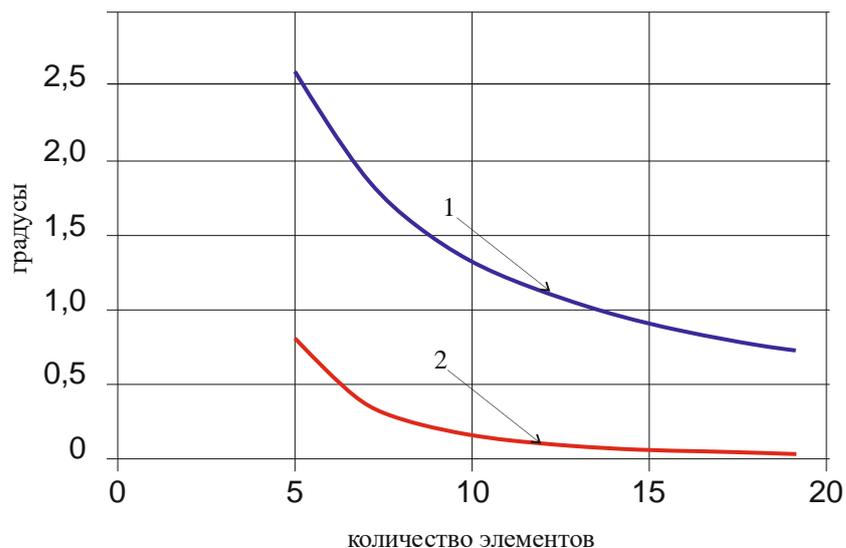
На рисунке 2.12 показана зависимость отношения ширины диаграмм направленности для этих методов в соответствии с выражением:

$$\text{отношение} = \frac{R_{0.5}^{ad}}{R_{0.5}^{mu}}, \quad (2.31)$$

где  $R_{0.5}^{ad}$ ,  $R_{0.5}^{mu}$  - ширина диаграммы направленности по уровню 0,5 для аддитивного и мультипликативного способов соответственно.

Со всей очевидностью проявляется тенденция к более быстрому сужению диаграммы направленности для мультипликативного метода обработки парциальной информации акустической линейной эквидистантной антенной решётки по мере роста числа элементарных преобразователей.

Связь разрешающей способности с шириной диаграммы направленности при мультипликативном способе обработки парциальной информации линейной



1 – аддитивный способ, 2 – мультипликативный способ.

Рисунок 2.11 - Зависимости полуширины диаграммы направленности антенной решётки от количества элементов

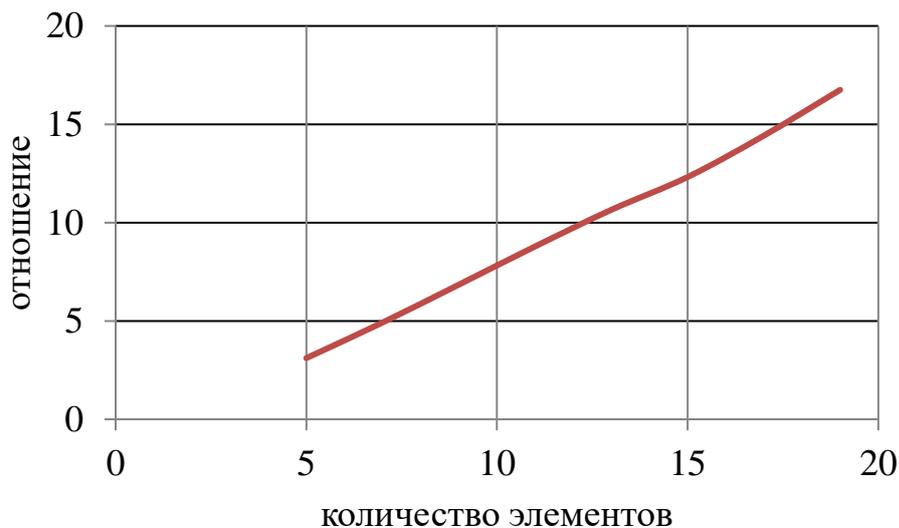
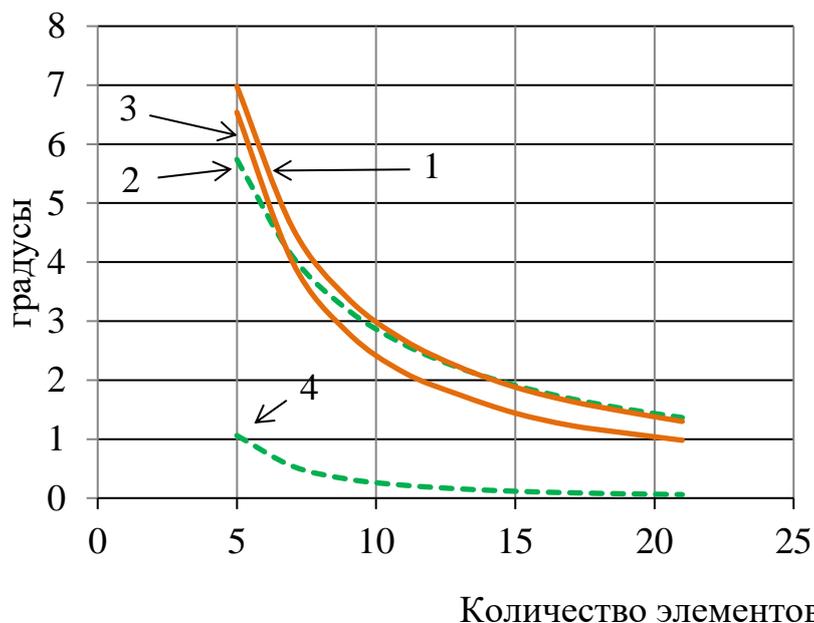


Рисунок 2.12 - Зависимость отношения ширины диаграмм направленности по уровню 0,5 для мультипликативного и аддитивного методов обработки.

эквидистантной антенной решётки не столь очевидна как в случае аддитивного метода. Перемножение суммарного сигнала, отражённого одновременно от двух близко расположенных отражателей, приводит к тому, что в процессе формирования сигнатуры одной точки участвует компонента сигнала, отражённого от другой точки. В результате, разрешающая способность, определённая в соответствии с эмпирическим критерием Релея, меняется

непропорционально ширине диаграммы направленности. На рисунке 2.13 показаны зависимости разрешающей способности и ширины диаграммы направленности по уровню 0,5 для аддитивного и мультипликативного способов обработки парциальных данных линейной эквидистантной антенной решётки с расстоянием между элементами, равном 10 мм.



1, 3 – разрешающая способность для аддитивного и мультипликативного способов соответственно, 2, 4 – ширина диаграммы направленности для аддитивного и мультипликативного способов соответственно.

Рисунок 2.13 - Зависимость разрешающей способности и ширины диаграммы направленности от количества элементов антенной решётки

Данные получены путём численного моделирования с помощью программы, описанной в пятом разделе главы. Представленные зависимости показывают, что разрешающая способность для этих двух методов различается незначительно по абсолютной величине. В то же время, видно, что ширина диаграммы направленности может отличаться в несколько раз.

#### 2.4 Чувствительность аппаратуры использующей алгоритм TFM

Чувствительность любой электронной аппаратуры определяется соотношением сигнал/шум. В нашем случае, при аддитивной обработке акустических сигналов, увеличение отношения сигнал/шум происходит

пропорционально корню квадратному из количества элементов антенной решётки [129]. Это связано с тем, что при сложении сигналов одной частоты и фазы значения амплитуд просто суммируются в соответствии с выражением:

$$U_{c.pez} = U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U_2 \sin(\omega t + \varphi_2) + \dots + U_n \sin(\omega t + \varphi_n) = nU \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.32),$$

где  $U_1$  - амплитудное значение сигнала,

$\varphi$  - фаза сигнала,

$\omega$  - круговая частота,

$n$  - количество каналов приема сигнала.

При сложении широкополосных стохастических сигналов, к которым относится шум, непосредственное сложение амплитуд невозможно, поэтому суммируются мощности [130], а из суммарной мощности вычисляется амплитуда сигнала, путем извлечения квадратного корня:

$$U_{ш.pez} = \sqrt{U_{ш1}^2 + U_{ш2}^2 + \dots + U_{шn}^2} = U_{ш} \sqrt{n}, \quad (2.33)$$

где  $U_{ш1}^2$  - мощность шума первого канала.

Используя формулы (2.32) и (2.33) получим отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio - SNR) при аддитивной обработке.

$$SNR_{pez} = SNR_{ex} \sqrt{n}. \quad (2.34)$$

где  $SNR_{ex}$  - отношение сигнал\шум одного канала.

Выражение (2.34) показывает, что SNR увеличивается в  $\sqrt{n}$  раз.

При мультипликативной обработке  $N$  сигналов результирующий сигнал будет иметь вид:

$$U_{pez} = (U_c + U_{ш})^n \quad (2.35)$$

где  $n$  - количество перемножаемых сигналов,

$U_c$  - полезный сигнал,

$U_{ш}$  - сигнал шума.

Применим формулу бинома Ньютона и представим выражение (2.35) в виде:

$$P = C_n^0 S^n + C_n^1 S^{n-1} N + C_n^2 S^{n-2} N^2 + \dots + C_n^k S^{n-k} N^k \dots + C_n^n N^n \quad (2.36)$$

где:  $P$  - результирующая мощность,

$C_n^k$  - биномиальный коэффициент,

$S$  - мощность сигнала,

$N$  - мощность шума.

Биномиальный коэффициент определяется выражением:

$$C_n^k = \frac{n!}{(n-k)!k!} \cdot \quad (2.37)$$

где  $n$  - количество каналов мультипликативной обработки сигналов,

$k = 1, 2, \dots, (n-1)$ .

Анализ выражения (2.36) показывает, что полезным сигналом будет только первый член выражения, а остальные представляют собой шум.

С точки зрения теории вероятности, отношение сигнал/шум характеризует способность обнаружения сигнала данным устройством. SNR определяется отношением среднего значения сигнала к стандартному отклонению [110, 131, 132]. Для определения среднего значения необходимо использовать выборку из  $m$  значений. Перепишем выражение (2.36) в виде:

$$P = \sum_1^m (C_n^0 S^n + C_n^1 S^{n-1} N + C_n^2 S^{n-2} N^2 + C_n^k S^{n-k} N^k \dots + C_n^n N) \quad (2.38)$$

Среднее значение мощности полезного сигнала, выделенное из выражения (2.38), будет иметь вид:

$$\mu^2 = m \cdot S^n, \quad (2.39)$$

где  $n$  - количество пар датчиков,

$m$  - объем выборки.

Остальные слагаемые имеют стохастический характер и их среднее значение равно нулю. Так как дисперсии складываются, то результирующее значение будет иметь вид:

$$\sigma^2 = 2m \cdot (C_n^1 S^{2(n-1)} N + C_n^2 S^{2(n-2)} N^2 + C_n^k S^{2(n-k)} N^k + \dots + C_n^n N^{2n}) \quad (2.40)$$

С учетом (2.39) и (2.40) получаем:

$$(SNR_{mul})^{-1} = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{2m \cdot (C_n^1 S^{2(n-1)} N + C_n^2 S^{2(n-2)} N^2 + C_n^k S^{2(n-k)} N^k + \dots + C_n^n N^{2n})}}{m \cdot S^n} \quad (2.41)$$

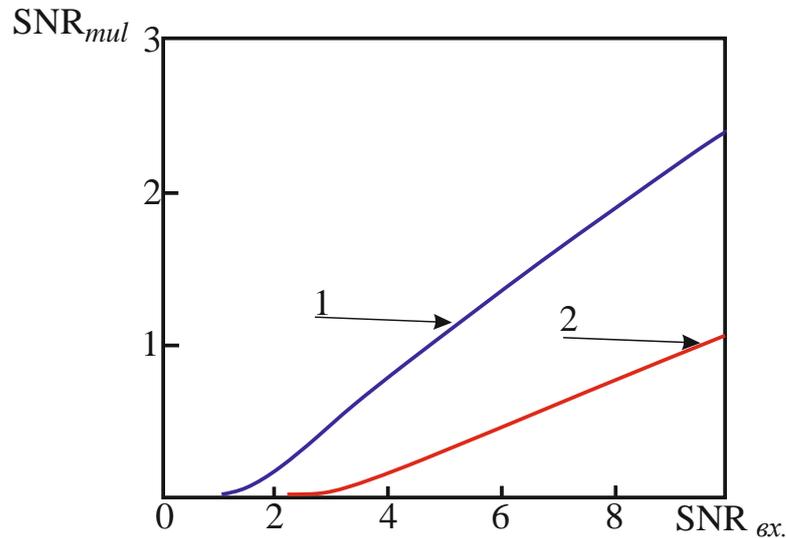
Обозначим  $\rho^2 = \frac{N}{S}$ . Тогда выражение (2.41) примет вид:

$$(SNR_{mul})^{-1} = \frac{\sqrt{2 \cdot (1 + C_n^1 \rho^2 + C_n^2 \rho^4 + C_n^k \rho^{2k} + \dots + C_n^n \rho^{2(n-1)})}}{\rho^n \sqrt{m}} \quad (2.42)$$

Выражение (2.42) можно записать в виде:

$$SNR_{mul} = \frac{\rho^n \sqrt{m}}{\sqrt{2 \cdot (1 + \sum C_n^{n-k} \rho^{2(n-k)})}} \quad (2.43)$$

Результаты расчета отношения сигнал/шум, по выражению (2.43) приведены на рисунке 2.14. В расчетах использовались следующие данные: количество элементов в антенной решетке 8 и 4, количество сигналов усреднения  $m = 1$ .



1 – решётка 4 элемента, 2 – решётка 8 элементов

Рисунок 2.14 - Зависимость отношения сигнал/ шум при мультипликативной обработке

Анализ выражения (2.43) позволяет сделать заключение о снижении отношения сигнал/шум при мультипликативной обработке. Причем, чем больше элементов в антенной решетке, тем меньше отношение сигнал/шум на выходе устройства.

При использовании классической операции усреднения по некоторому количеству выборок можно увеличить отношение сигнал/шум. Результаты такого

расчета приведены на рисунке 2.15. Основные параметры соответствуют рисунку 2.14, кроме  $m = 64$ . Из рисунка 2.15 видно, что отношение сигнал/шум при таком усреднении возрастает в 8 раз.

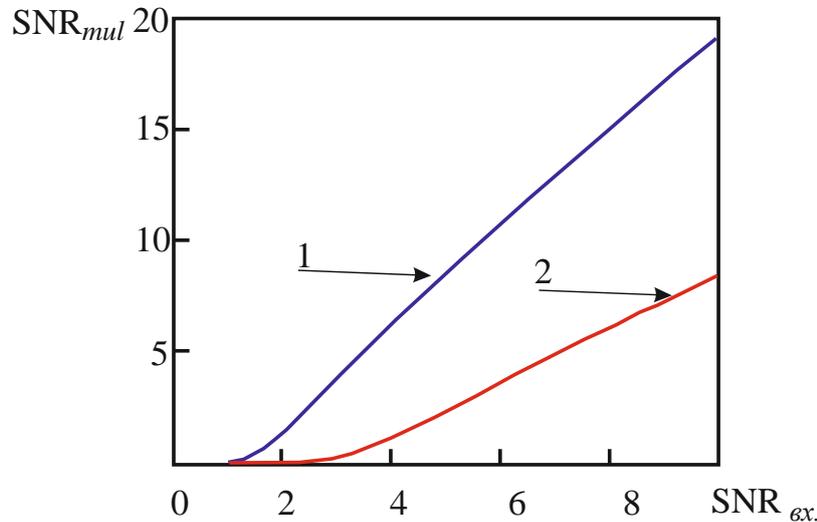


Рисунок 2.15 - Зависимость отношения сигнал/шум при мультипликативной обработке от отношения сигнал/шум на входе (линия 1 для 4 элементов антенной решетки, линия 2 для 8 элементов)

Приведённый анализ позволяет сделать следующие выводы.

- Дефектоскопическая аппаратура, построенная с применением метода TFM и аддитивной когерентной обработке парциальных сигналов, обладает увеличенным соотношением сигнал/шум.

- Степень увеличения SNR практически равно количеству элементов эквидистантной линейной антенной решётки.

- SNR при мультипликативной обработке парциальных сигналов снижается пропорционально увеличению количества элементов антенной решётки.

- Применение мультипликативной обработки целесообразно при больших соотношениях сигнал/шум с целью выделения самого большого дефекта и увеличении точности фиксации его координат.

-

## 2.5 Компьютерная модель акустического тракта

Проблема теоретического анализа механизма реконструкции акустического реконструированного изображения не может быть решена исключительно методом волновых полей. Процесс формирования оптического изображения заданной области контроля, способ индикации в той или иной системе координат, очевидно, подчиняются иным физическим закономерностям. Кроме того, дискретизация, органически присущая способу TFM, порождает свои, весьма специфические проблемы.

Переход от дефектоскопии к дефектометрии сопровождается возникновением задач определения координат дефектов в зоне контроля с помощью визуализированного изображения, точности соответствия объекта контроля реконструированному образу, искажениями, возникающими на границах зоны контроля, которые ограничивают её размеры. Одним из комплексных способов решения поставленной проблемы, и весьма эффективным, является разработка и создание компьютерной модели исследуемого процесса.

Для решения проблем по восстановлению изображения на основе ультразвуковой локации нужно выбрать модель формирования ультразвуковых волн при отражении. Можно пытаться строить модель на основе точных решений волнового уравнения (2.1). Т.е. учитывать многократные отражения волн, дифракцию и интерференцию, возбуждение затухающих и бегущих волн на границе разделов, трансформацию типа волны при отражении и т.д. Однако такой подход является труднореализуемым на практике в реальных приборах, по следующим причинам: математическое решение является очень сложным, часто является оригинальным для ограниченного набора условий. При этом, теряется универсальность, что резко снижает ценность разработки. Следует также отметить, что большинство указанных выше явлений имеют значения второго порядка малости.

Для проведения работ созданию компьютерной модели была принята упрощенная математическая модель, со следующими допущениями:

- Длина акустической волны больше размеров излучателя и контролируемых дефектов. В этом случае можно пренебречь дифракционными явлениями.

- Скорость звука в зоне контроля не меняется.

- Влияние переотражений считаем не существенным

- Зона контроля расположена в дальней зоне ультразвукового поля.

Такие допущения, конечно, не совсем точно описывают реальные волновые процессы, но в условиях многоакурсной локации и применения аддитивных и мультипликативных методов пост-обработки, свойственных TFM, показывают хорошую степень приближения.

Для приведенных выше допущений применимы принципы геометрической акустики, при использовании которой представляется, что акустическая энергия распространяется вдоль каждой лучевой трубки независимо от остальных лучей. При этом распространение акустического луча происходит, согласно принципа Ферма, по наикратчайшему маршруту. В однородных средах – по прямой линии, а в неоднородных средах они преломляются на границе сред.

Алгоритм модели основан на формировании А-сканов, эмулирующих отражение сигнала от выбранных в зоне контроля точечных дефектов. Алгоритм построения, следующий:

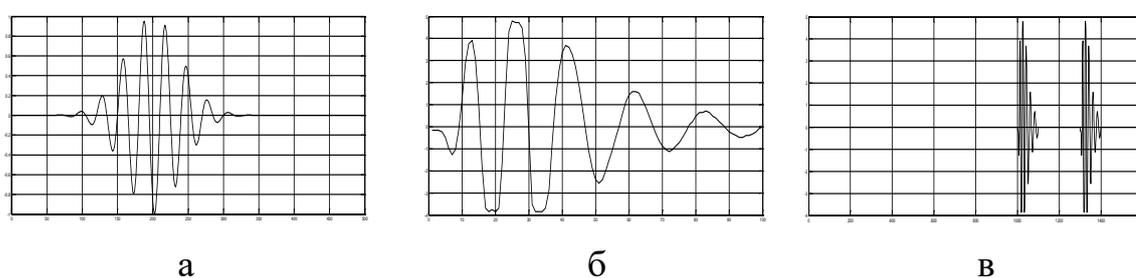
- Для выбранных в зоне контроля точечных отражателей рассчитывается время прохождения зондирующего сигнала до каждого элемента акустической решётки с учётом моделируемой среды – наличие или отсутствие призмы, свойств материала и т.д.

- Получение А-скана для  $i$ -го преобразователя от точечного отражателя образуется сдвигом цифрового описание модели отражённого эхо-сигнала на сумму времени прохождения сигнала от излучателя до точечного отражателя и обратно к приемнику.

- Затем полученные данные суммируются по всем заданным точечным отражателям.

- Модель отражённого эхо-сигнала учитывает добротность излучателей и приемников

Полученные А-сканы сохраняются в файл для последующей процедуры восстановления изображения зоны контроля. Формат файла идентичен тому, который используется при сохранении реальных А-сканов. На рисунке 2.16 приведены примеры последовательного формирования различных А-сканов.



а – моделированный эхо-импульс, б – экспериментальный эхо-импульс, в – А-скан двух отражателей

Рисунок 2.16 - Формирование А-скана от двух отражателей.

На рисунке 2.16а показан результат моделирования, когда огибающая радиоимпульса рассчитана с помощью функции Гаусса, а на рисунке 2.16б приведён реальный зондирующий сигнал.

Работу алгоритма восстановления изображения поясняет рисунок 2.17. Область контроля разбивается на локальные области небольшого размера (выбор размера определяет качество визуализации – чем меньше, тем лучше качество, но больше расчетов) и каждая из локальных областей выступает в качестве точечного сосредоточенного отражающего элемента. Последовательно генерируется  $N$  импульсов от пьезопреобразователей антенной решетки, где  $N$  – количество элементов решетки.

Отраженный эхо-сигнал принимается всеми элементами антенной решетки и сохраняются в памяти компьютера в виде А-сканов отдельно для каждой

комбинации передающего и принимающего элемента, т.е. необходимо хранение  $N^2$  А-сканов.

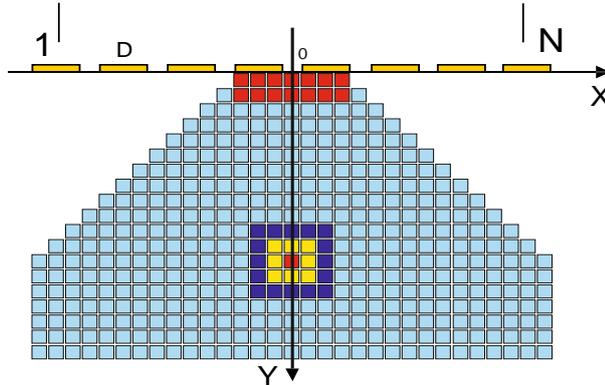


Рисунок 2.17 - Зона контроля

Для каждого пьезопреобразователя рассчитывается путь прохождения эхо-сигнала от излучающего элемента до выбранной локальной области и обратно до принимающего элемента. Алгоритм расчета будет представлен ниже. В случае контактного метода контроля (рисунок 2.18а) время будет определяться выражением:

$$t_n = \frac{l_{D-P}}{c}, \quad (2.44)$$

где  $l_{D-P}$  - расстояние от пьезопреобразователя до выбранной локальной области,  $c$  - скорость звука в контролируемом материале .

При использовании призмы (рисунок 2.18б) расчет будет более сложный:

$$t_n = \frac{l_{D-X}}{c_1} + \frac{l_{P-X}}{c_2}, \quad (2.45)$$

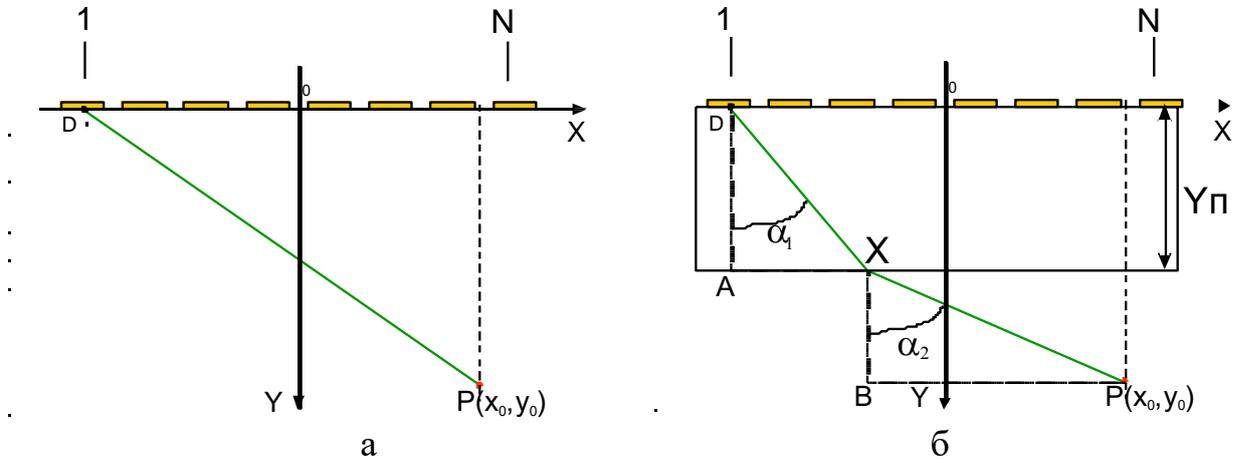
где  $l_{D-X}$  - расстояние от пьезопреобразователя до точки падения X на границу сред,  $l_{P-X}$  - расстояние от выбранной локальной области до точки падения X на границу сред,

$c_1$  - скорость звука в призме,

$c_2$  - скорость звука в контролируемом материале.

Реконструкция зоны контроля осуществляется поточно. В каждом А-скане для рассчитанного временного сдвига выбирается уровень сигнала. Эта процедура повторяется для всех  $N^2$  комбинаций А-сканов. Затем выбранные значения

амплитуд эхо-сигналов в классическом случае суммируются, ниже будет рассмотрен и другой вариант – мультипликативный способ восстановления



а – контактный метод, б – наличие призмы.

Рисунок 2.18 - Расположение акустического тракта в декартовой системе координат

изображения. Результирующая амплитуда кодируется цветом. Таким образом, получается визуальная картинка зоны контроля – рисунок 2.17.

Для реализации алгоритма необходимо вычислить длину пути от каждого пьезопреобразователя до каждой точки зоны контроля. Например, для зоны контроля, размерами 80 мм на 60 мм, с размером точки 0,1 миллиметр необходимо провести расчеты для вычисления  $800 \times 600 \times 16 = 7680000$  путей. Впечатляющее число для такой небольшой зоны контроля. Для обеспечения высокой скорости расчетов необходимо использовать распараллеливание расчетов. При распараллеливании очень важно обеспечить независимость расчетов в каждой точке друг от друга. Только в этом случае можно обеспечить максимальную скорость вычислений на многопроцессорных платформах. Данный алгоритм идеально подходит для распараллеливания, и, как будет показано ниже, обеспечивает очень высокую скорость расчетов.

Рассмотрим расчет пути от одной локальной области, которую можно считать точечной, до одного элемента антенной решётки. Начало координат

поместим в центр акустической решётки. Ось «у» составляет перпендикуляр к поверхности излучения, а ось «х» совпадает с образующей решётки. В случае, когда многоэлементная антенная решетка непосредственно контактирует с исследуемым объектом и шириной промежуточного слоя иммерсионной среды можно пренебречь (рисунок 2.18а) расчет расстояний от излучателя, который помечен на рисунке точкой D, до заданной точки зоны контроля, которая обозначена буквой P, сводится к расчету выражения:

$$l_{D-P} = \sqrt{(x_0 - x_d)^2 + y_0^2} \quad (2.46)$$

где  $x_0, y_0$  – координаты точки P зоны контроля;

$x_d$  – расстояние от центра матрицы до преобразователя.

В случае же, когда между антенной решеткой и контролируемым материалом, находится промежуточная среда, например, вода или призма, то необходимо учитывать преломление на границе раздела сред (рисунок 2.18б).

Закон Снеллиуса описывает процесс преломления волн, пересекающих границу сред, и выражается уравнением:

$$c_2 \cdot \sin \alpha_1 = c_1 \cdot \sin \alpha_2 \quad (2.47)$$

где  $c_1$  – скорость звука в призме;

$c_2$  – скорость звука в объекте контроля;

$\alpha_1$  – угол падения волны в призме;

$\alpha_2$  – угол преломления звукового луча.

Для нахождения координаты точки X выразим функцию  $\sin(\alpha_1)$  как отношение катета AX к гипотенузе DX, а  $\sin(\alpha_2)$  как отношение катета BP к гипотенузе PX (рисунок 2.18б). Подставим полученные значения в формулу (2.45) и возведем правую и левую часть в квадрат. В этом случае получаем:

$$c_2^2 \cdot \frac{(x - x_d)^2}{(x - x_d)^2 + y_n^2} = c_1^2 \cdot \frac{(x_0 - x)^2}{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y_n)^2} \quad (2.48)$$

где  $y_n$  – высота призмы или промежуточного слоя;

$x$  – координата точки преломления на границе сред, в которой углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  соответствуют закону Снеллиуса.

Приведя выражение (2.48) к общему знаменателю и сгруппировав коэффициенты по степени  $x$ , получаем следующее уравнение в числителе:

$$\begin{aligned}
 & x^4 \cdot (c_2^2 - c_1^2) + \\
 & 2 \cdot x^3 \cdot (-c_2^2 \cdot x_0 - c_2^2 \cdot x_d + c_1^2 \cdot x_0 + c_1^2 \cdot x_d) + \\
 & x^2 \cdot (c_2^2 \cdot x_0^2 + c_2^2 \cdot (y_0 - y_n)^2 + c_2^2 \cdot 4x_d \cdot x_0 + c_2^2 \cdot x_d^2 - c_1^2 \cdot x_0^2 - c_1^2 \cdot x_d^2 - c_1^2 \cdot y_n^2 - c_1^2 \cdot 4x_0 \cdot x_d) + \\
 & x \cdot (-c_2^2 \cdot 2x_d \cdot x_0^2 - c_2^2 \cdot 2x_d \cdot (y_0 - y_n)^2 - c_2^2 \cdot 2x_d^2 \cdot x_0 + c_1^2 \cdot 2x_0^2 \cdot x_d + c_1^2 \cdot 2x_0 \cdot x_d^2 + c_1^2 \cdot 2x_0 \cdot y_n^2) + \\
 & c_2^2 \cdot x_d^2 \cdot x_0^2 + c_2^2 \cdot x_d^2 \cdot (y_0 - y_n)^2 - c_1^2 \cdot x_0^2 \cdot y_n^2 - c_1^2 \cdot x_0^2 \cdot x_d^2 = 0
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

В дальнейшем для упрощения выражения, обозначим коэффициенты полученного уравнения при переменной  $x$  как  $a, b, c, d, e$ . Тогда получаем:

$$x^4 \cdot a + 2 \cdot x^3 \cdot b + x^2 \cdot c + x \cdot d + e = 0 \tag{2.50}$$

Из условия неравенства знаменателя нулю, имеем:

$$(x - x_d)^2 + y_n^2 \neq 0, \tag{2.51}$$

$$(x_0 - x)^2 + (y_0 - y_n)^2 \neq 0 \tag{2.52}$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{8ac - 3b^2}{8a^2}; \\
 q &= \frac{8a^2d + b^3 - 4abc}{8a^3};
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

$$r = \frac{b^2c}{16a^3} - \frac{bd}{4a^2} - \frac{3b^4}{256a^4} + \frac{e}{a},$$

Решая уравнение четвертой степени (2.49) методом Феррари [133], получаем корни.

$$x_{1,2,3,4} = \frac{\pm \sqrt{2z_1} \pm \sqrt{2z_1 - 4 \left( \frac{p}{2} + z_1 + \frac{q}{2\sqrt{2z_1}} \right)}}{2} - \frac{b}{4a}, \tag{2.54}$$

где  $z_1$  – первый действительный корень уравнения:

$$z^3 + pz^2 + \frac{p^2 - 4r}{4}z - \frac{q^2}{8} = 0.$$

Реализация вычисления такого сложного уравнения требует больших вычислительных ресурсов и занимает много времени, даже при применении распараллеливания. Также нужно заметить, что реализация сложных вычислений на графических адаптерах существенно увеличивает время вычислений. Поэтому можно предположить, что численный способ решения окажется более быстродействующим, поскольку он реализуется большим количеством довольно простых вычислений. Для проверки этого предположения запишем числитель (2.49) в виде:

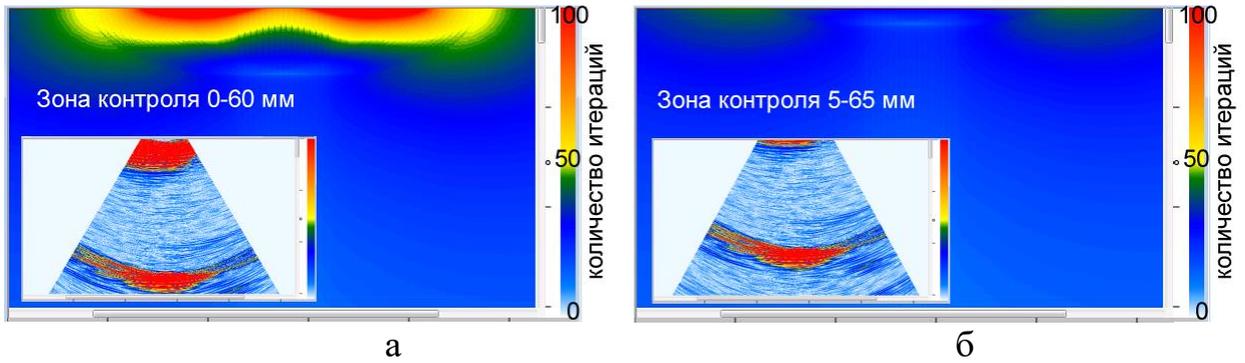
$$f1(x) = c_2^2 \cdot (x - x_d)^2 \cdot ((x_0 - x)^2 + (y_0 - y_n)^2) - c_n^2 \cdot (x_0 - x)^2 \cdot ((x - x_d)^2 + y_n^2) \quad (2.55)$$

Численным методом найдем такое значение  $x$ , при котором значение функции  $f1$  будет меньше 10% от выбранного размера точки контроля.

В случае, если, скорость звука в призме меньше, чем скорость звука в контролируемом материале, то угол  $\alpha_2$  будет больше угла  $\alpha_1$ . Следовательно, искомая точка  $X$  будет находиться между  $x_d$  и  $x_0$ . Будем использовать эти точки в качестве стартовых для поиска методом хорд [134].

На рисунке 2.19а изображено распределение количества итераций, необходимых для вычисления расстояний от датчика до выбранной точки зоны контроля. Количество итераций закодировано цветом, принцип кодирования представлен на рисунке справа в виде гистограммы.

На рисунке видно, что наибольшее количество итераций (красная зона – более 100 итераций на точку) находится на границе сред. Здесь же находится так называемая «мертвая зона». Если сдвинуть зону контроля на некоторое расстояние вглубь материала, то количество точек с большим количеством итераций значительно уменьшается, что иллюстрирует рисунок 2.19б. Это приводит к сокращению времени расчета без ущерба полезного объема информации



а – зона контроля 0-60 мм; б – зона контроля 5-65 мм.

Рисунок 2.19 - Распределение количества итераций при разных зонах контроля.

В таблице 8 представлено сравнение времени расчета путей ультразвуковых волн в зависимости от метода расчета: аналитический и численный. Расчет производился на платформе OpenCL с использованием видеокарты RADEON 7870 (GPU) и шестиядерного, двенадцатипотокового процессора Intel i7 3960X (CPU). Заданные параметры расчета: размер зоны контроля – 80x60 мм, призма из органического стекла высотой 20 мм, контролируемый материал – алюминий, линейная решетка из 16 элементов.

Таблица 8 - Сравнение времени расчета путей

Размер зоны контроля (количество точек)	Время расчета путей аналитическим методом (сек.)		Время расчета путей итерационным методом (сек.)	
	GPU	CPU	GPU	CPU
800x600	0,0105	0,134	0,0086	0,209
1000x750	0,0146	0,183	0,0122	0,317
1600x1200	0,0317	0,481	0,0264	0,751

В результате произведенных вычислений оказалось, что аналитический метод быстрее по времени, затраченному на вычисления, на 80% на центральном процессоре (CPU) и проигрывает на 20% на графическом процессоре (GPU). Как и предполагалось, более простые вычисления на графическом процессоре, не смотря на больший объем вычислений, имеют преимущество в скорости. Это связано с большим числом универсальных процессоров (например, у RADEON 7870 их количество равно 1280) и возможностями параллельной работы.

Расчеты для плоскостной решетки можно вести аналогичным образом как для линейной антенной решетки. Однако, в этом случае возникают сложности, связанные с колоссальным объемом памяти, необходимым для расчетов таких решеток. Обычный подход, используемый при работе с линейными решетками, заключается в том, что один раз рассчитываются полупуть (выражение «полупуть» означает, что определяется расстояние от излучателя до точки в зоне контроля, предполагая, что обратная половина пути от точки контроля до приемника находится аналогичным образом) для всей зоны контроля. Затем, на основании этих данных, достаточно быстро реконструируется изображение для любых входных данных.

Для плоскостной антенной решетки такой подход использовать не рационально. В качестве примера рассмотрим плоскостную антенную решетку с количеством  $8 \times 8$  элементов. Пусть зона контроля составляет  $100 \times 100 \times 600$  мм и произведем расчет для шага, равного  $0,5$  мм. Тогда, количество элементарных точек будет составлять 48 млн. ( $200 \times 200 \times 1200$ ). При этом, для каждой точки необходимо запомнить полупуть до 64 пьезоэлементов. Если хранить информацию о полупутьях с одинарной точностью, необходимо 4 байта на один полупуть. Таким образом, объём памяти только для хранения значений полупутей составляет  $200 \times 200 \times 1200 \times 64 \times 4 = 12,288$  ГБайт. Видеокарт с таким объемом памяти в настоящее время в мире не существует. В этом случае при вычислениях можно использовать CPU, но тогда производительность будет весьма низкой. Для решения этой проблемы предлагается следующий подход.

- Расчет полупутей и реконструкцию изображения делать одновременно. Тогда, для примера, рассмотренного выше, потребуется объем памяти  $200 \times 200 \times 1200 = 48$  Мбайт, что вполне приемлемо для современных видеокарт.

- Для уменьшения количества расчетов, начало координат следует выбирать таким образом, чтобы решетка располагалась симметрично относительно координатной оси X и Z.

На рисунке 2.20 показано такое расположение. При наличии указанной симметрии имеется возможность в 4 раза уменьшить количество расчетов и объем памяти для хранения длины путей прохождения ультразвука

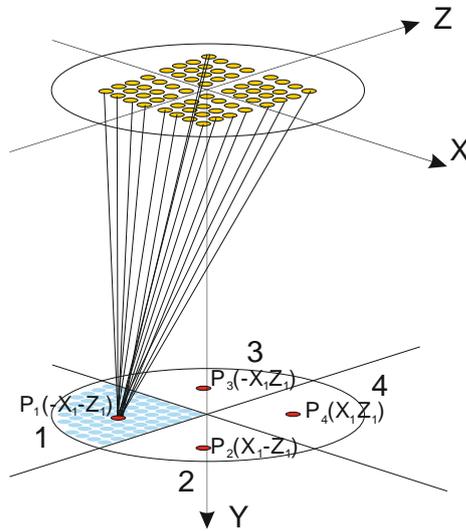


Рисунок 2.20 - Акустический тракт с плоскостной решёткой

В зоне контроля рассчитываются пути всех элементов только для точек первой четверти зоны контроля. Например, только с отрицательными координатами по осям  $X$  и  $Z$ . Для остальных четвертей расчет пути можно произвести, комбинируя данные из первой четверти. Таким образом, рассчитывая пути от точки  $P_1(-X_1, -Z_1)$ , можно реконструировать изображение не только для точки  $P_1(-X_1, -Z_1)$ , но и для точек  $P_2(X_1, -Z_1)$ ,  $P_3(-X_1, Z_1)$ ,  $P_4(X_1, Z_1)$ , зеркальных исходной относительно осей  $X$  и  $Z$  (рис. 2.). При этом нужно учитывать, что зеркально отображаются не только точки зоны контроля, но и сами элементы решётки.

Расчет полупути от датчика  $d_l$  до точки  $P_l$  можно свести к расчету линейной антенной решеткой. Для этого необходимо перевести точки  $d_l$  и  $P_l$  из трехмерной системы координат в двумерную таким образом, чтобы путь прохождения ультразвука остался прежним. Для этого от точки  $d_l$  опускается перпендикуляр в точку  $d_{lp}$ , расположенную на нижней стороне призмы так, как это показано на

рисунке 2.21. Через эти две точки и точку контроля  $P_1(-X_1, -Z_1)$  проводится плоскость  $ABC$ . Новое начало координат помещается в точку  $d_1$ . Координаты

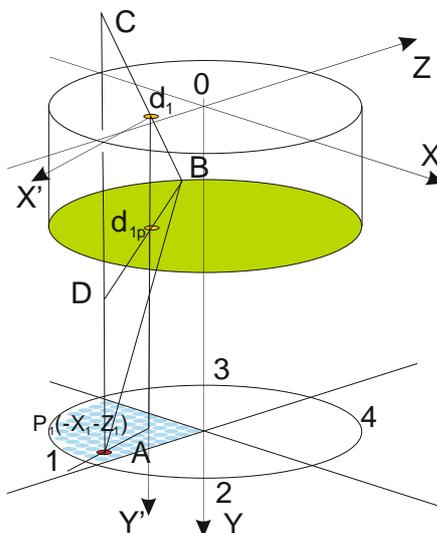


Рисунок 2.21 – Дополнительная система координат

точек  $d_1$  и  $P_1$  по оси  $Y'$  не изменятся. Новые координаты точки  $P_1(-X_1, -Z_1)$  по оси  $X'$  будут составлять  $(-X_1 - X_{d1}, -Z_1 - Z_{d1})$ . Уже на этой плоскости и в новых координатах решается уравнение Снеллиуса одним из методов, используемых для линейных решеток.

На основе вышеизложенных алгоритмов была разработана программа генерации А-сканов и восстановления изображения. На рисунке 2.22 представлен скриншот программы, демонстрирующий А-сканы и восстановленное изображение для модели зоны контроля представленной на рисунке 2.17.

Одним из вариантов восстановления изображения в разработанном программном обеспечении является мультипликативный способ. Применение данного способа позволило существенно улучшить контрастность получаемого

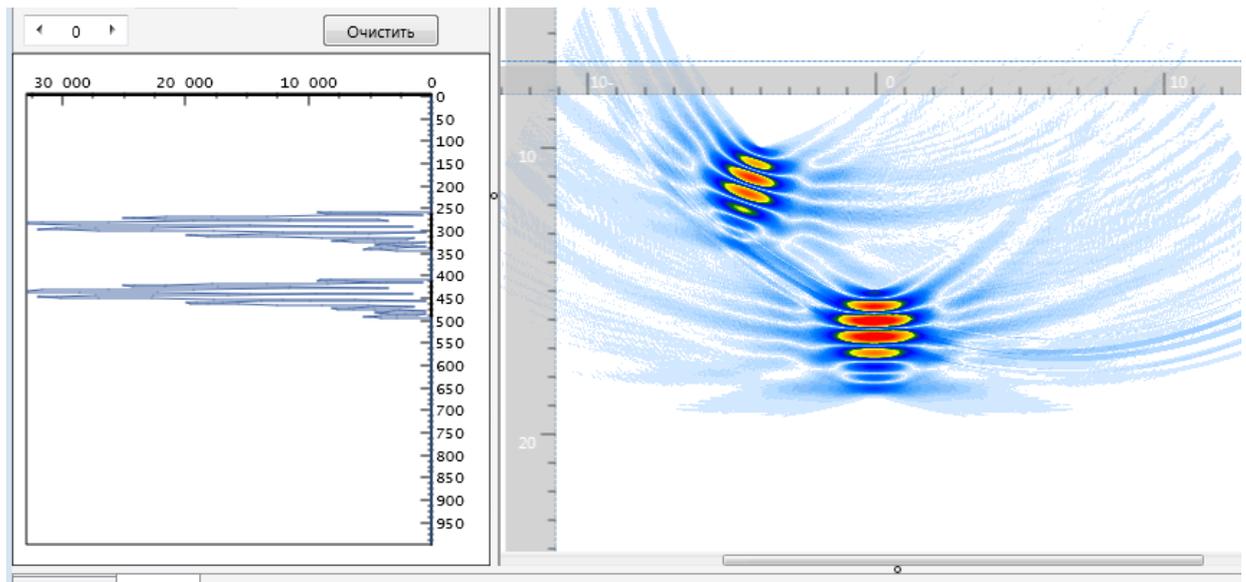


Рисунок 2.22 – Изображение двух моделируемых отражателей.

изображения. На рисунке 2.23 показано реконструированное изображение зоны контроля с теми же двумя моделями дефектов.

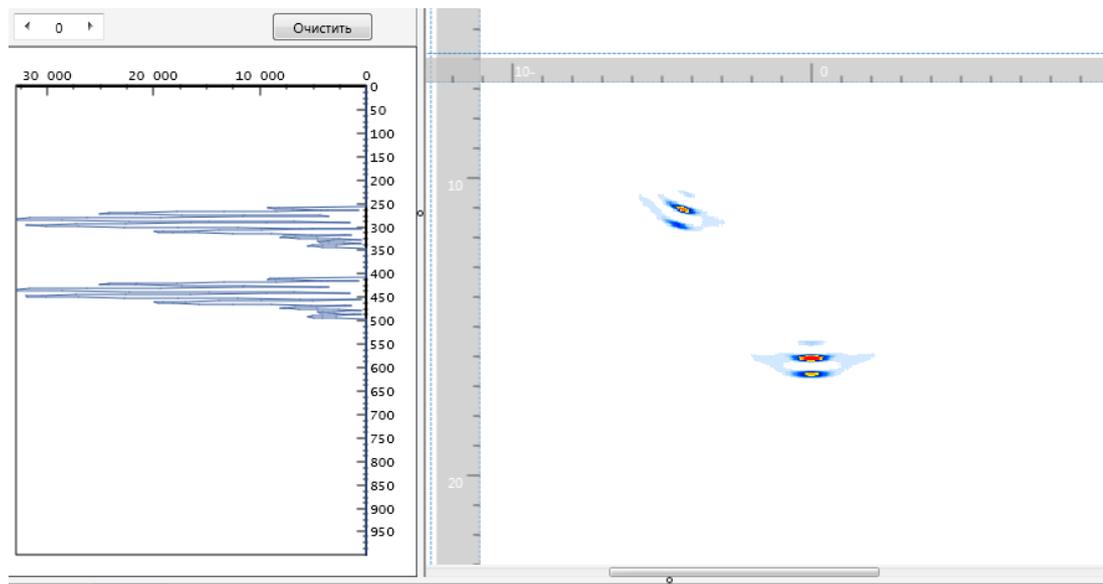


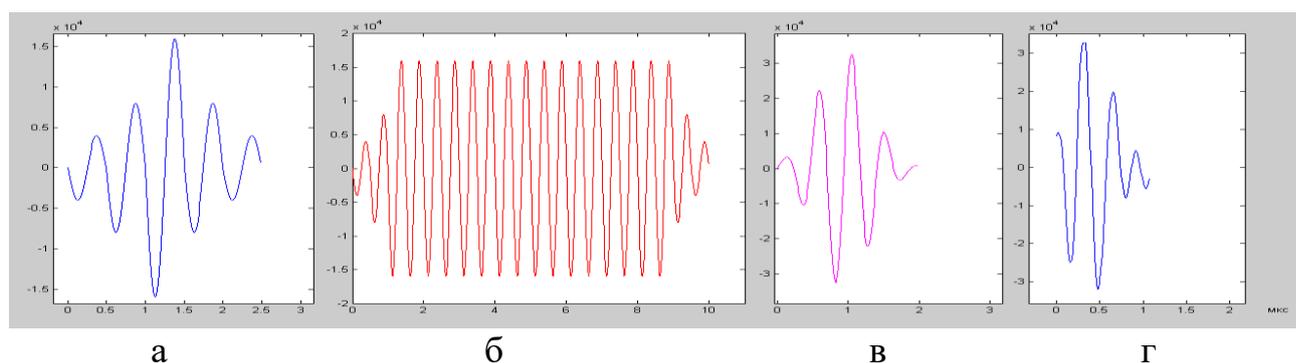
Рисунок 2.23 - Восстановление изображения двух моделируемых отражателей с использованием умножения.

При реализации модифицированного алгоритма, кроме замены оператора сложения на оператор умножения, была добавлена нормализация.

Дополнительное действие и усложнение алгоритма было сделано для того, чтобы

исключить появления вычислительных ошибок, связанных с переполнением. Важным моментом в реализации данного алгоритма является выбор значения, по которому будет осуществляться нормирование. В условиях произвольного значения амплитуды эхо-сигнала целесообразно применить автоматический подбор коэффициента нормирования по фактическим данным. Добавляется оператор поиска максимума для каждого набора А-сканов. Таким образом, простое изменение оператора приводит к существенному усложнению алгоритма и, практически, двукратному увеличению времени расчетов. Только применение в качестве расчетной платформы GPU с большим количеством процессоров обеспечивает приемлимое время расчетов.

Для моделирования в качестве эмуляции зондирования использовались три вида сигналов, изображенных на рисунке 2.24. На рисунке 2.24а приведен короткий синусоидальный сигнал, частотой 2 Мгц и длительностью 5 периодов. Пометим его аббревиатурой СК. На рисунке 2.24б приведен тот же сигнал, экстраполированный до 20 периодов. Далее будем называть его СД. На рисунке 2.24в представлен смоделированный синусоидальный сигнал в 4 периода с нормальным распределением по формуле Гауса. Далее будем называть его СГ4. На рисунке 2.24г приведен сигнал ультразвукового преобразователя реального дефектоскопа. Далее будем называть его СР



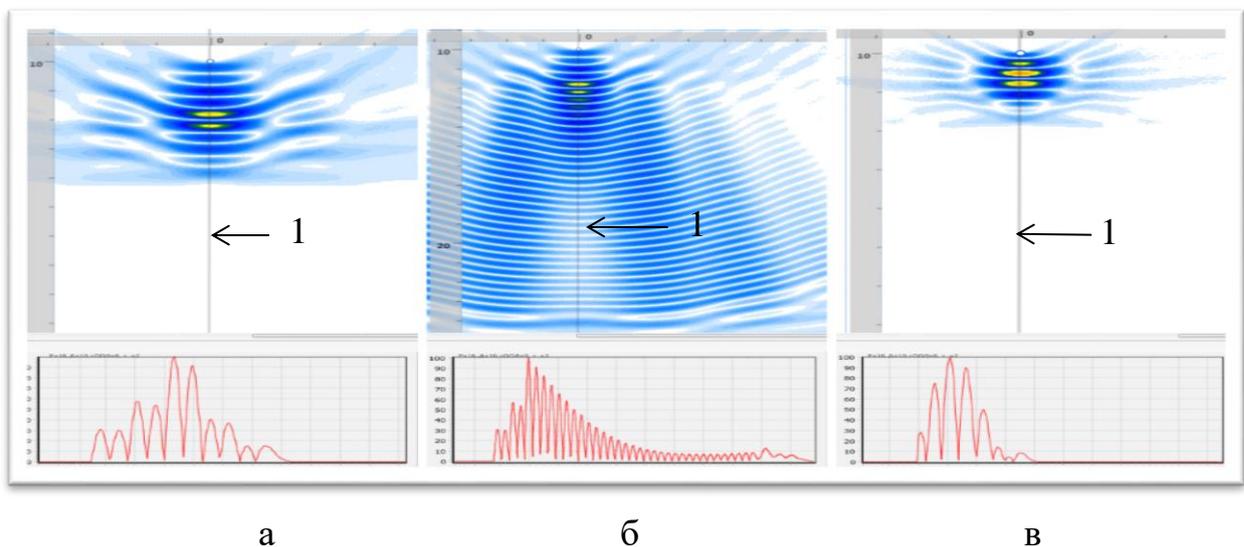
а - сигнал СК, б - сигнал СД, в – сигнал СГ4, г – сигнал СР

Рисунок 2.24 - Сигналы, используемые при моделировании

На рисунке 2.25 представлен результат моделирования точечного отражателя ТО1 расположенного на расстоянии 10 мм. Для зондирования использовались сигналы СК, СД, СР.

В нижней части рисунка приведена диаграмма распределения модуля амплитуд, соответствующая сечению по линии 1. Видно, что максимум сигнала не совпадает с координатой моделируемого дефекта. Величина смещения находится в районе третьего периода колебаний от начала, что соответствует смещению на 1,2 мкс. При скорости 1500 м/с смещение составляет 1,8 мм.

Сравнение формы сигнала, представленного на рисунке 2.24а, с диаграммой распределения модуля амплитуд показывает, что именно на этом смещении



а - сигнал СК, б - сигнал СД, в - сигнал СР

Рисунок 2.25 - Результат моделирования дефекта, расположенного на оси симметрии решётки, на расстоянии 10 мм

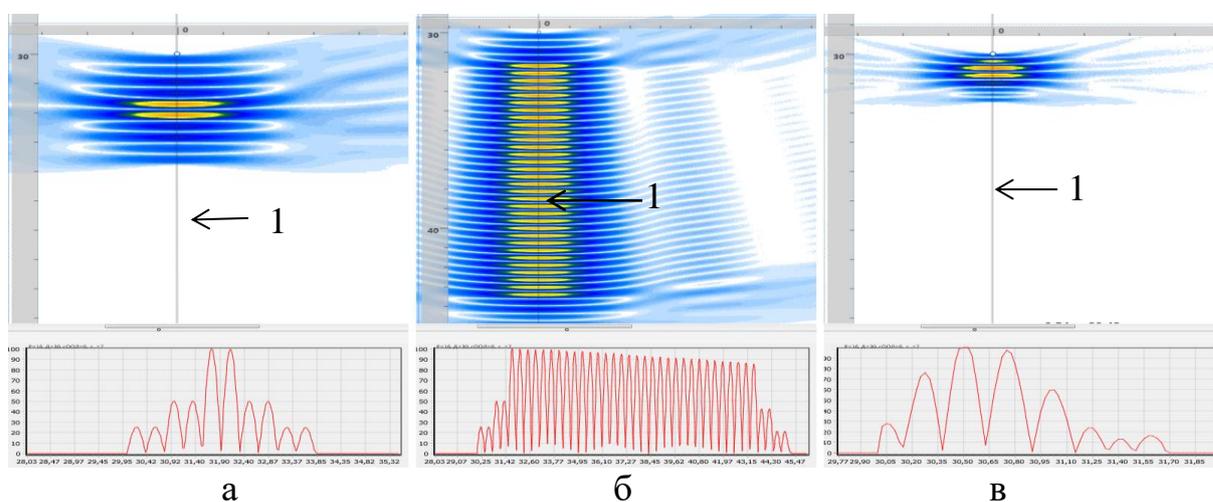
находится максимум зондирующего сигнала.

На рисунке 2.25б приведен результат моделирования при тех же условиях, но зондирование осуществляется сигналом СД. Диаграмма распределения модуля амплитуды, построенная по сечению 1 для этого сигнала, имеет аналогичный сдвиг координат моделируемого дефекта, но отличается продолжительностью. На этом рисунке хорошо видно, что после третьего периода начинается уменьшение амплитуды сигнала, вызванное, очевидно, нарушением условий фокусировки.

Аналогичные совпадения наблюдаются на рисунке 2.24в. Вновь положение максимума огибающей смещено относительно положения модели дефекта.

На рисунке 2.26 представлены результаты моделирования точечного отражателя ТО1 расположенного на расстоянии 30 мм. В качестве зондирующих использовались сигналы СК, СД, и СР. Как и прежде, модель дефекта располагалась на оси симметрии антенной решётки.

Результат моделирования показал, что положение реконструированного изображения соответствует положению модели дефекта в зоне контроля с таким же смещением, как и предыдущем случае. Кроме того, на рисунке 2.26б можно наблюдать значительно меньшее снижение амплитуды. Это подтверждает связь



а - сигнал СК, б - сигнал СД, в - сигнал СР

Рисунок 2.26 - Результат моделирования дефекта на расстоянии 30 мм

данного явления с фазовыми условиями фокусировки.

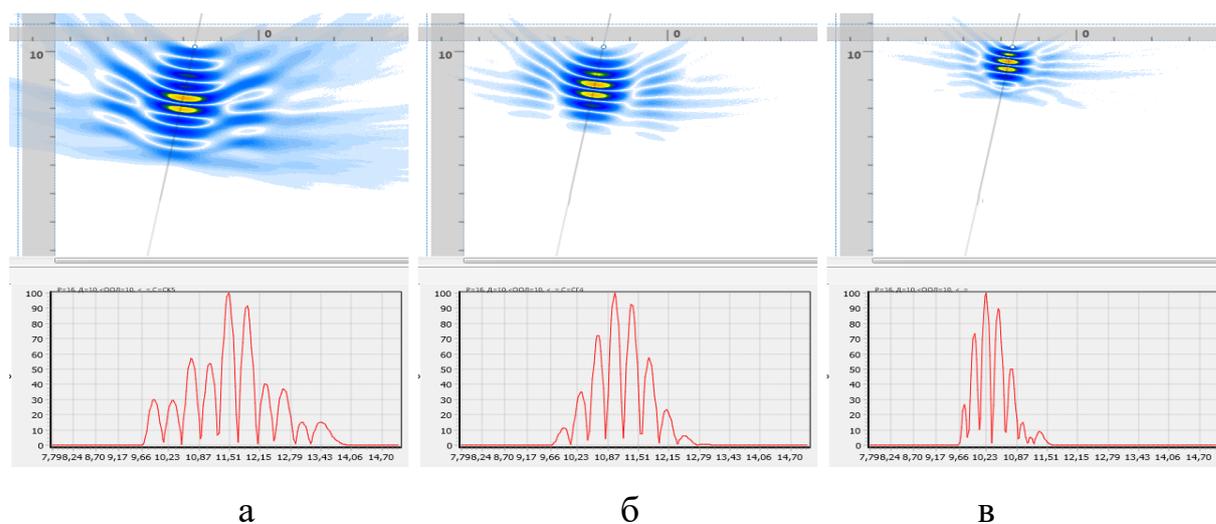
На рисунках 2.27 и 2.28 приведены результаты моделирования реконструкции, когда модель дефекта расположена на некотором расстоянии от оси симметрии антенной решётки. Это смещение измерялось в угловых единицах и в данном случае составляет  $10^\circ$  для обоих рисунков. В единицах длины это составляет 1,8 мм и 5,3 мм соответственно.

Наличие вертикальной и горизонтальной линеек, с единицей деления, равной одному миллиметру, позволяет определить значение декартовых координат модели дефекта в зоне контроля. На рисунке 2.27в видно, что

дальность расположения модели дефекта составляет 10,1 мм, а смещение от оси симметрии равно 1,8 мм.

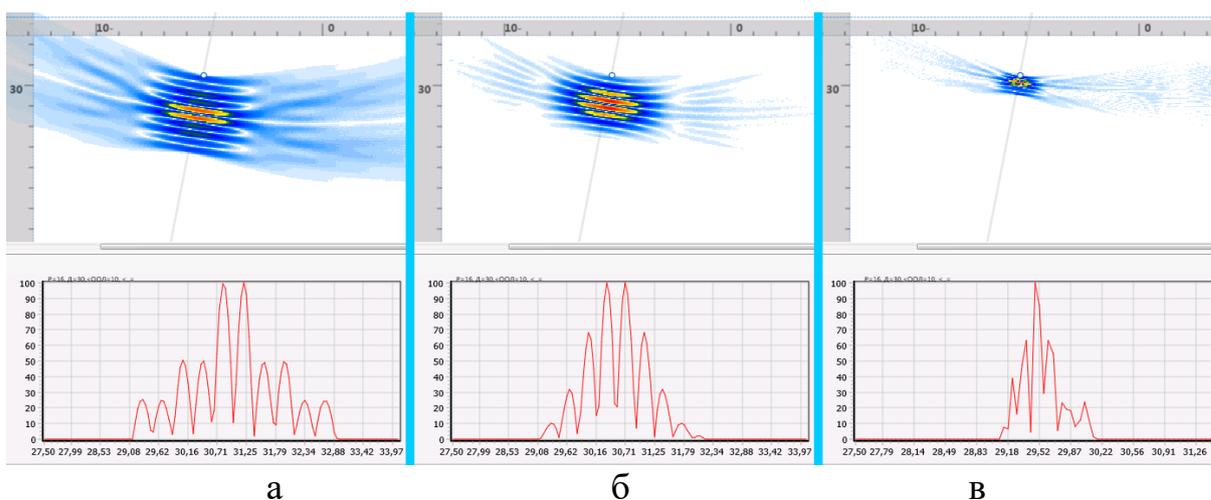
На рисунке 2.28 аналогичные параметры составляют 30 мм и 5,2 мм соответственно. Таким образом, алгоритм обработки парциальной информации линейной решётки TFM позволяет с достаточной точностью измерять местоположение дефектов.

В разделе 2.2 проведён анализ разрешающей способности в гармоническом



а - сигнал СК, б - сигнал СГ4, в - сигнал СР

Рисунок 2.27 - Результат моделирования дефекта расположенного на расстоянии 10 мм, угол отклонения равен  $10^0$



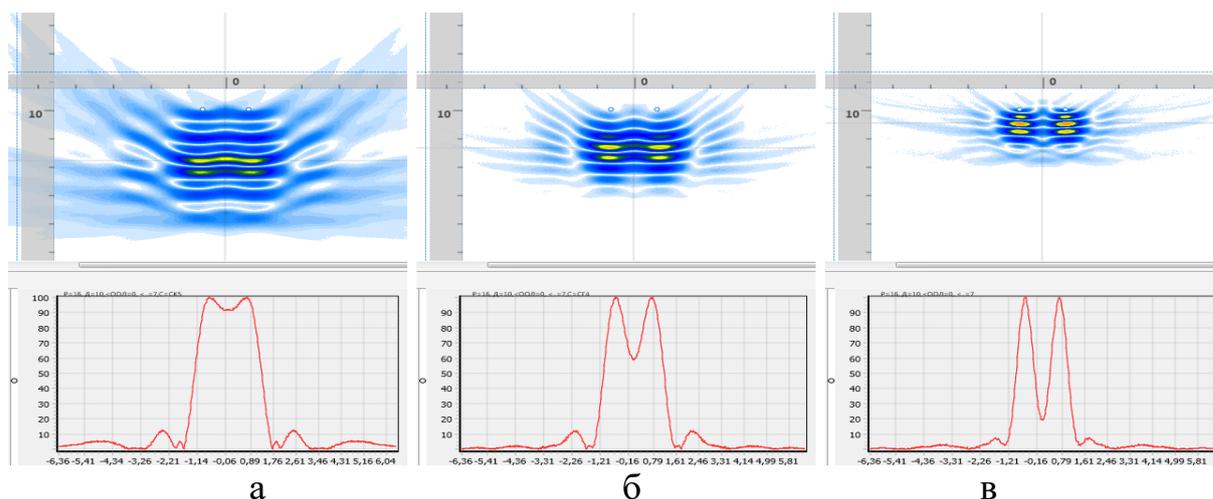
а - сигнал СК, б - сигнал СГ4, в - сигнал СР

Рисунок 2.28 - Результат моделирования одного дефекта расположенного на расстоянии 30 мм и угле отклонения  $10^0$  от оси симметрии решётки

режиме. Практическое же применение предусматривает импульсный режим работы. Теоретические исследования в этом случае должны опираться на принцип суперпозиции и преобразование Фурье. Трудности таких исследований очевидны.

Многообразие возможных импульсных модуляций сигнала зондирования не позволяет получить максимальные обобщения, которые несут конкретную полезную информацию. Значительно проще, сохраняя при этом достаточную степень достоверности, исследовать влияние формы модулирующих сигналов на разрешающую способность.

На рисунке 2.29 приведены результаты моделирования с зондирующими сигналами различной формы. Угловое расстояние между дефектами, расположенными на расстоянии 10 мм от антенной решётки, составляет  $7^\circ$ .



а – сигнал СК , б - сигнал СГ4, в - сигнал СР

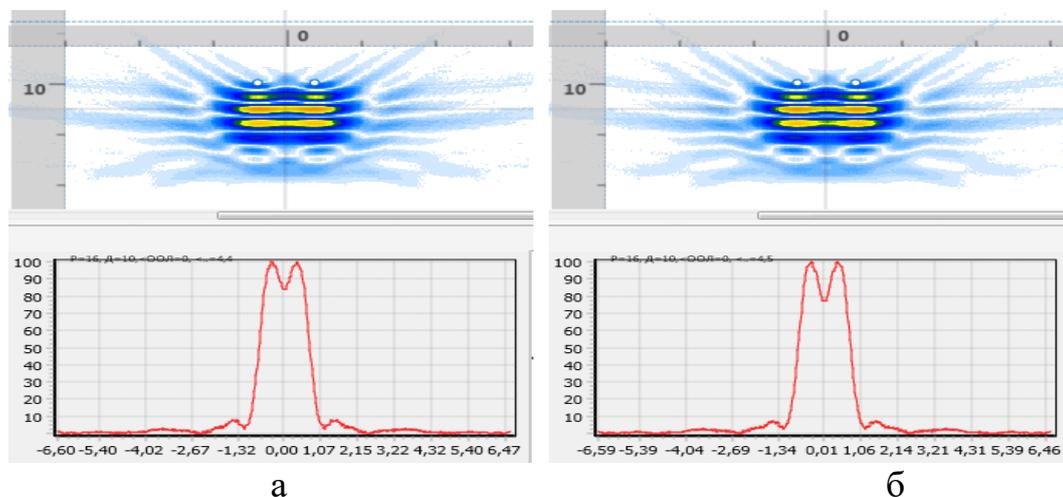
Рисунок 2.29 - Результат моделирования двух отражателей, расположенных на расстоянии 10 мм на оси симметрии решётки

Видно, что качество разрешения двух отражателей зависит от формы сигналов. Используя эмпирический критерий Релея, можно утверждать, что синусоидальный сигнал СК при угле в  $7^\circ$  не разрешается, но при тех же условиях сигнал СГ4 с нормальным распределением разрешается очень уверенно, а сигнал СР разрешается с большим запасом.

В дальнейшем для определения качества разрешения двух отражателей будем использовать сигнал СР. На рисунке 2.30 показан результат реконструкции

изображения моделей двух дефектов, расположенных на расстоянии 10 мм от антенной решётки симметрично относительно её оси симметрии. Положение дефектов показано условно небольшими кружками.

Анализ рисунка позволяет утверждать, что разрешающая способность 16-ти элементной линейной акустической антенной решётки, с шагом 0,6 мм, работающей на частоте 2 МГц в водной среде, составляет примерно  $4,5^\circ$ . Для сравнения – разрешающая способность, рассчитанная по формуле (2.31), равна  $4,77^\circ$ . Это подтверждает достоверность полученных результатов.



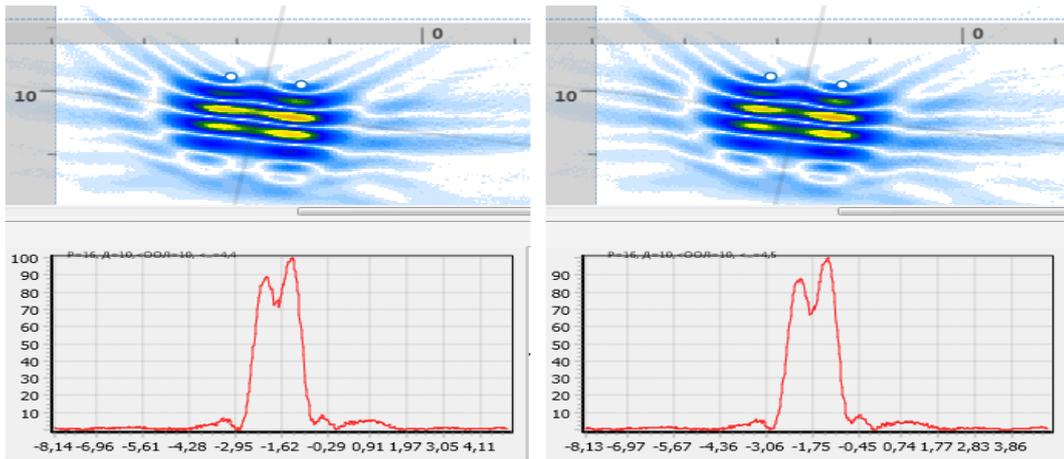
а – угол между отражателями  $4,4^\circ$ , б - угол между отражателями  $4,5^\circ$

Рисунок 2.30 - Результат моделирования двух отражателей, расположенных на расстоянии 10 мм симметрично оси симметрии решётки

Рисунок 2.31 иллюстрирует зависимость разрешающей способности от местоположения дефектов в акустическом тракте дефектоскопа. Сдесь модели дефектов расположены в стороне от оси симметрии решётки под углом, равным  $10^\circ$ . Угловое расстояние между ними осталось неизменным.

Визуальный анализ не выявил заметных различий между изображениями, показанными на рисунках 2.30 и 2.31. Это подтверждает сделанный ранее вывод о незначительной зависимости разрешающей способности от местоположения в зоне контроля и проиллюстрированный рисунком 2.7.

На рисунках 2.32 и 2.33 показаны результаты моделирования и реконструкции изображений моделей дефектов, расположенных на значительно



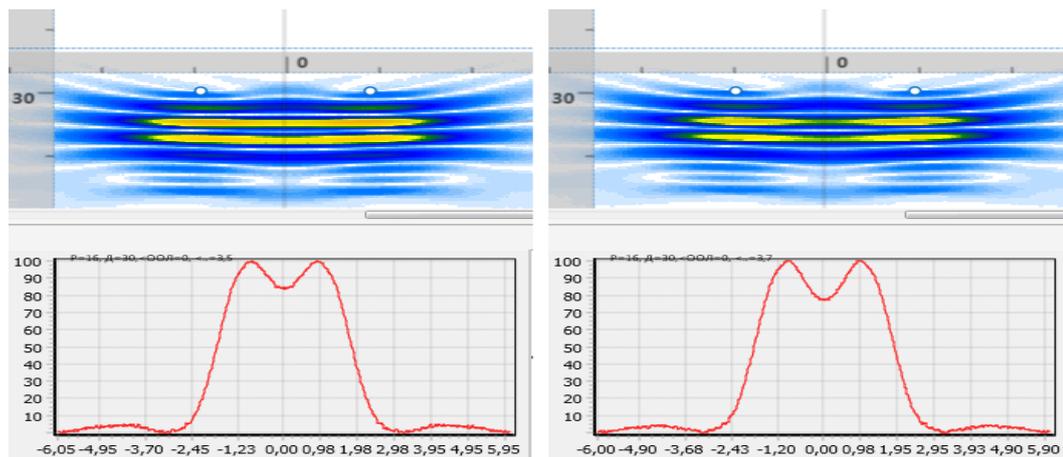
а

б

а – угол между отражателями  $4,4^{\circ}$ , б - угол между отражателями  $4,5^{\circ}$

Рисунок 2.31 - Результат моделирования двух дефектов, расположенных на расстоянии 10 мм, угол отклонения  $10^{\circ}$

большем расстоянии от антенной решётки. Это расстояние составляет 30 мм.



а

б

а – угол между отражателями  $4,4^{\circ}$ ; б - угол между отражателями  $4,5^{\circ}$

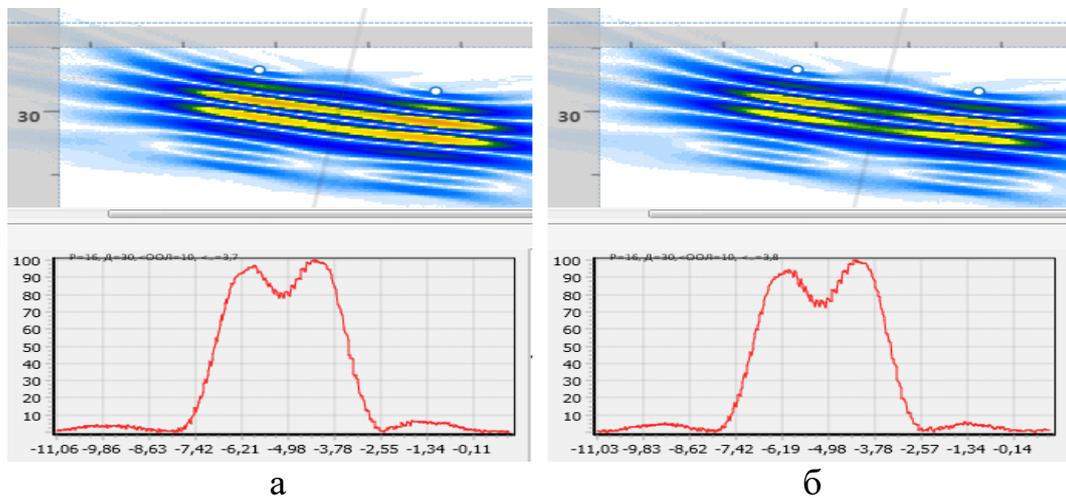
Рисунок 2.32 - Результат моделирования двух дефектов, расположенных на расстоянии 30 мм, угол отклонения  $0^{\circ}$

Видно, что поперечный ход акустического луча линейный размер сигнатуры возрос, приблизительно, в три раза. Однако, измерение поперечных размеров в градусах осталось прежним. Следовательно, разрешающая способность, практически, не зависит от местоположения в акустическом тракте.

Следует отметить, что цветовая гамма представленных изображений даёт возможность отдельной фиксации двух дефектов при наличии снижения амплитуды между их образцами на 20%.

На рисунке 2.34 показан результат моделирования работы антенной решётки со значительно меньшим количеством элементов. В данном случае использовалось 4 элемента, которые размещались таким образом, чтобы общая длина антенной решётки осталась неизменной.

Видно, что разрешающая способность осталась прежней, равной  $4,5^\circ$ . Качество реконструированного изображения снизилось в результате заметного



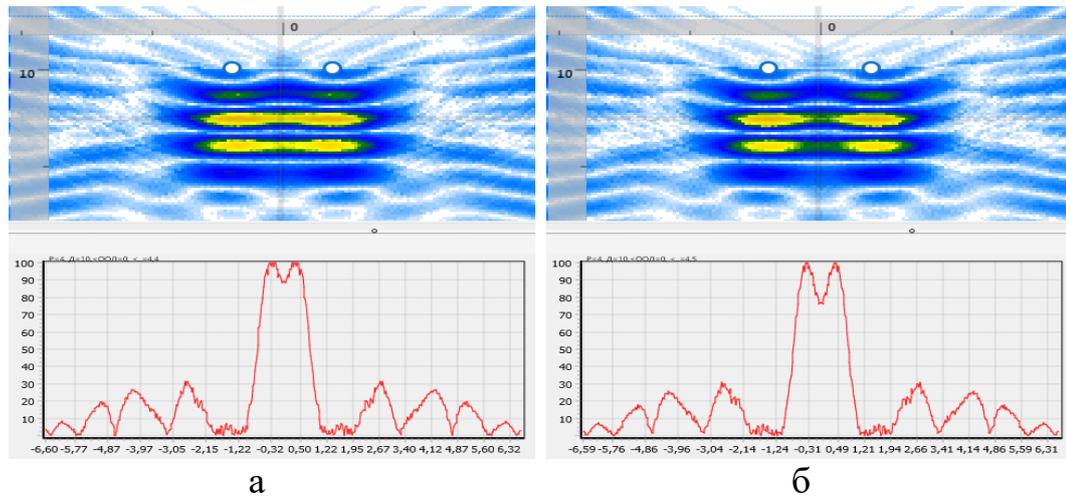
а – угол между отражателями  $4,4^\circ$ ; б - угол между отражателями  $4,5^\circ$

Рисунок 2.33 - Результат моделирования двух дефектов, расположенных на расстоянии 30 мм, угол отклонения  $10^\circ$

увеличения боковых лепестков.

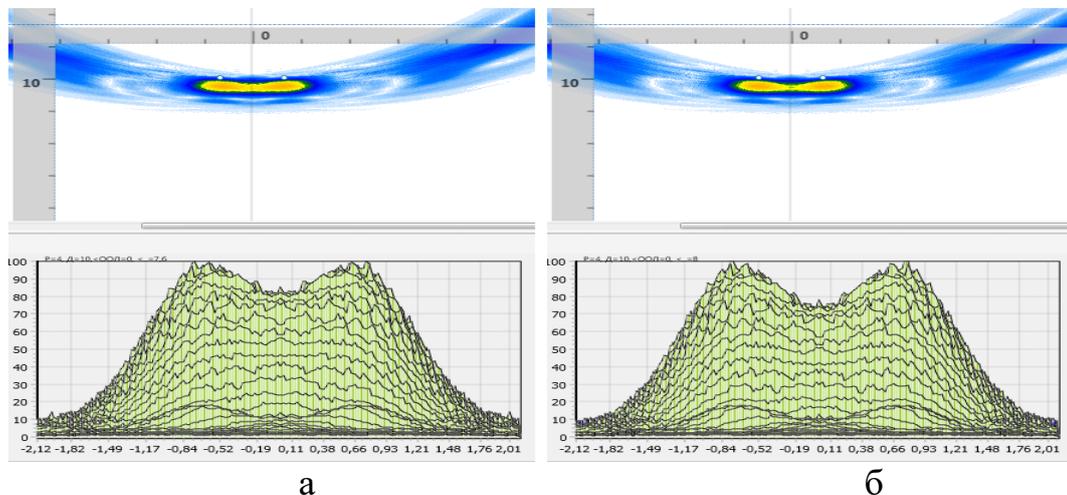
На рисунке 2.35 показана реконструкция, полученная с помощью 4-х элементной антенной решётки, но расстояние между элементами сохранилось таким же как и в случае 16-ти элементной антенной решётки. Кроме того, было использовано преобразование Гильберта для двумерного множества, что позволило получить монотонную огибающую акустического изображения.

Визуальный анализ рисунка 2.35 позволяет утверждать, что разрешающая способность снижается пропорционально уменьшению общей длины линейной эквидистантной антенной решётки. Качество изображения, определяемое



а – угол между отражателями  $4.4^{\circ}$ , б - угол между отражателями  $4.5^{\circ}$

Рисунок 2.34 - Результат моделирования 4-ёх элементной решетки и двух отражателей, расположенных на расстоянии 10 мм, угол отклонения  $0^{\circ}$



а – угол между отражателями  $7.6^{\circ}$ ; б - угол между отражателями  $8^{\circ}$

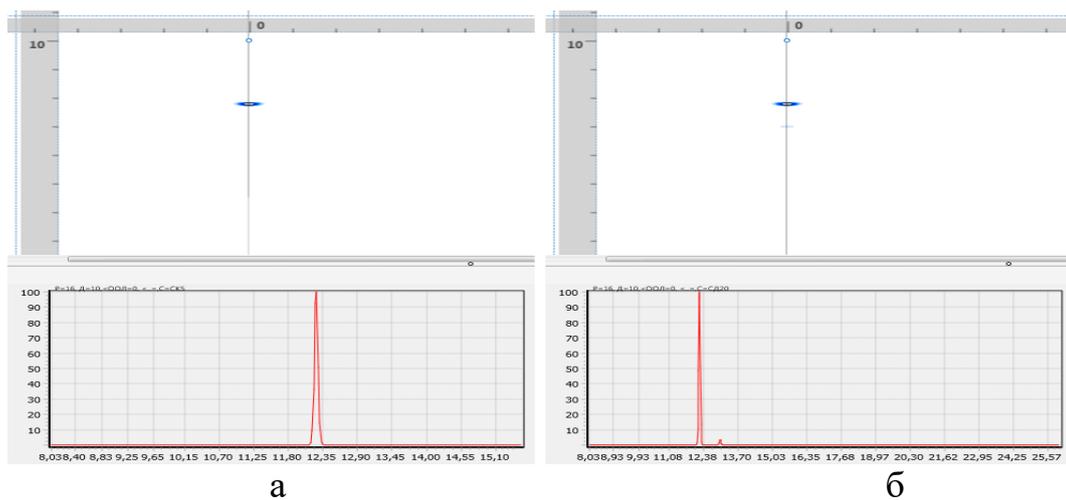
Рисунок 2.35 - Результат моделирования 4-ёх элементной решетки и двух отражателей расположенных на расстоянии 10 мм, угол отклонения  $0^{\circ}$

зашумлённостью и уровнем боковых лепестков, зависит исключительно от общего количества элементов. Такое положение даёт возможность целенаправленной оптимизации параметров дефектометрической аппаратуры в процессе проектирования.

Мультипликативный метод обработки парциальной информации в соединении со способом сканирования TFM должен обладать потенциальными возможностями для существенного снижения ширины диаграммы направленности. Полученные результаты моделирования подтверждают сделанные выше предположения.

На рисунке 2.36 показана реконструкция акустического изображения полученного 16-ти элементной антенной решёткой с элементами, расположенными на расстоянии 1 мм, модели точечного дефекта, который помещается на расстоянии 10 мм от решётки на оси её симметрии.

Сравнение с рисунком 2.26 показывает, что ширина диаграммы направленности уменьшилась в несколько раз. Одновременно с этим весьма



а – сигнал СК, б - сигнал СД

Рисунок 2.36 - Результат моделирования 16-ти элементной решетки с использованием мультипликативной обработки и одного отражателя, расположенного на расстоянии 10 мм на оси симметрии

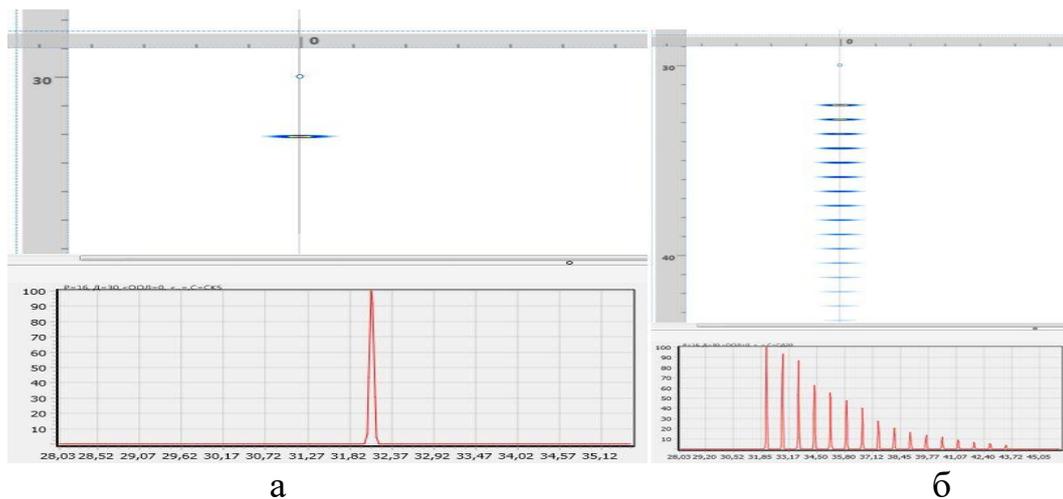
значительно упали амплитуды боковых лепестков. Они вообще не заметны на реконструированном изображении.

На рисунке 2.37 представлены результаты реконструкции при расположении модели дефекта на расстоянии 30 мм. Сравнение с рисунком 2.26 позволяет констатировать снижение ширины диаграммы направленности,

примерно, в 3 раза. Однако, при большой длительности зодирующего сигнала продольная разрешающая способность также снижается. Отличие в этом случае от результатов аддитивной обработки не является определяющим.

Исследования зависимости диаграммы направленности от местоположения модели дефекта в акустическом тракте не установили особенностей мультипликативной обработки, поэтому их результаты не приводятся.

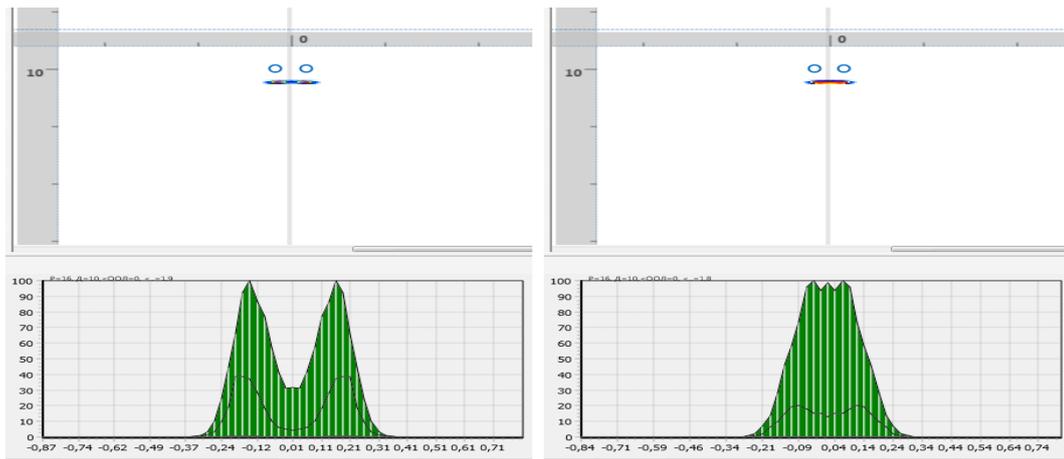
Очень узкая диаграмма направленности предполагает высокую разрешающую способность. Однако, эксперименты, проведённые на модели акустического тракта, показали совершенно иные закономерности. На рисунках 2.38 и 2.39 приведены результаты моделирования двух точечных дефектов на расстоянии 10 мм, при расположении их на оси симметрии решётки и при смещении от оси на  $10^\circ$ .



а – сигнал СК, б - сигнал СД

Рисунок 2.37 - Результат моделирования 16-ти элементной решетки с использованием мультипликативной обработки и одного отражателя, расположенного на расстоянии 30 мм на оси симметрии

Во-первых, видно, что разрешающая способность возросла по сравнению с аддитивным способом обработки парциальной информации примерно на 20%. Во-вторых, можно отметить очень узкую область перехода от состояния разрешения дефектов к состоянию невозможности их разделения. Это примерно  $0,1^\circ$ . В-третьих, смещение дефектов от оси симметрии решётки приводит к

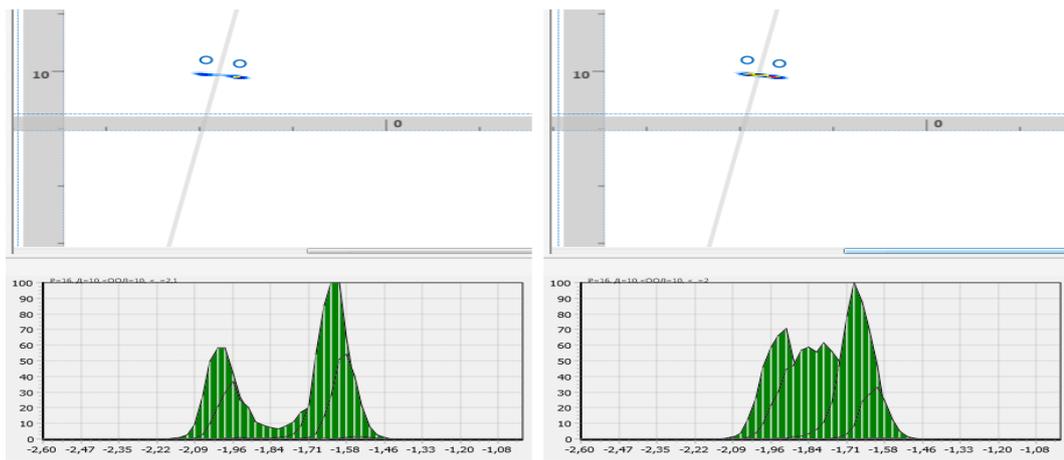


а

б

а – угол между отражателями  $3,7^{\circ}$ ; б - угол между отражателями  $3,6^{\circ}$

Рисунок 2.38 – Результат моделирования 16-ти элементной решётки и двух отражателей, расположенных на расстоянии 10 мм на оси симметрии



а

б

а – угол между отражателями  $3,8^{\circ}$ ; б - угол между отражателями  $3,7^{\circ}$

Рисунок 2.39 – Результат моделирования 16-ти элементной решётки и двух отражателей, расположенных на расстоянии 10 мм, угол отклонения  $10^{\circ}$

резкому уменьшению амплитуды реконструкции изображения дефекта, расположенного дальше от оси. В целом, можно констатировать, что радикального улучшения разрешающей способности при переходе от аддитивных методов обработки к мультипликативным не происходит.

Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие выводы.

- Получено аналитическое выражение, описывающее PSF как аналог диаграммы направленности решётки в гармоническом режиме работы при использовании алгоритма TFM.

- Получено аналитическое выражение для гармонического режима работы, описывающее разрешающую способность, определённую эмпирическим критерием Рэля.

- Выявлены закономерности формирования дефектометрических характеристик для мультипликативного метода синтезирования акустического изображения с использованием алгоритма TFM.

- Показаны границы применимости мультипликативного и аддитивного методов с точки зрения чувствительности дефектометрической аппаратуры.

- Разработана компьютерная модель акустического тракта дефектоскопа с применением алгоритма TFM, которая позволила уточнить дефектометрические параметры в импульсном режиме работы.

### 3. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

Многоканальные ультразвуковые дефектоскопы с акустическими решетками и когерентной обработкой принятых сигналов хорошо известны в технике. Такой подход позволяет получить высокое отношение сигнал-шум и максимально точно локализовать дефекты. Для визуализации дефектов используют фазовое управление элементами антенной решетки, которое получило очень широкое распространение во всем мире, и метод цифровой фокусировки, в зарубежной литературе он получил название Sampling Phased Array (SPA) в немецкой интерпретации или Total Focusing Method (TFM) в американской интерпретации. Метод основан на использовании миграционного алгоритма Кирхгофа:

$$U_{x,y} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m U_{i,j}(t - t_d) \quad (3.1)$$

где  $U_{x,y}$  – амплитуда сигнала в точке с координатами  $x, y$ ,

$i$  – номер излучателя,

$j$  – номер приемника,

$n$  – количество излучателей,

$m$  – количество приемников,

$U_{i,j}(t)$  – эхо-сигнал принятый  $j$  элементом антенной решетки при условии, что излучающим был элемент с номером  $i$ ,

$t_d$  – задержка эхо-сигнала.

Из выражения (3.1) видно, что основу миграционного алгоритма Кирхгофа составляет аддитивная обработка матрицы А-сканов размерностью  $n$  строк и  $m$  столбцов. Такая обработка позволяет увеличить соотношение сигнал/шум в  $\sqrt{n \cdot m}$  раз по сравнению с одиночным элементом. При равенстве количества элементов в приемной и передающей антенных решетках, когда  $n = m$ , соотношение сигнал/шум увеличивается в  $n$  раз. При использовании фазового управления элементами антенной решетки соотношение сигнал шум увеличивается только в

$\sqrt{n}$  раз. Однако, даже при использовании аддитивной обработки акустических сигналов не всегда удается получить качественное изображение зоны контроля. Например, при контроле металлических изделий из крупнозернистой стали или при контроле бетонных конструкций уровень структурных помех оказывается очень высоким, что объясняется большим уровнем отраженного сигнала от границ зерен. В этом случае целесообразно использовать мультипликативную обработку акустических сигналов:

$$U_{x,y} = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m U_{i,j}(t - t_d), \quad (3.1)$$

На способ мультипликативной обработки акустических сигналов был получен патент РФ [135]. Техническая реализация такой обработки представлена ниже.

### 3.1 Блок электроники ультразвукового дефектоскопа

Дефектоскоп состоит из трёх частей: электронного блока, персонального компьютера для обработки сигналов и визуализации зоны контроля и акустического тракта. В свою очередь, структурная схема блока электроники состоит из нескольких, функционально законченных узлов:

- шестнадцати канального усилителя сигналов,
- шестнадцати канального генератора ультразвуковых сигналов, нагрузкой которого является акустическая решетка, состоящая из шестнадцати элементов,
- шестнадцати канального аналого-цифрового преобразователя с блоком памяти,
- микроконтроллера,
- блока обработки данных и блока связи с персональным компьютером.

Структурная схема показана на рисунке 3.1. Цифрами на схеме обозначены следующие функционально законченные узлы и элементы:

- 1 – эквидистантная акустическая антенная решётка,
- 2 – пьезокерамические преобразователи, составляющие линейную

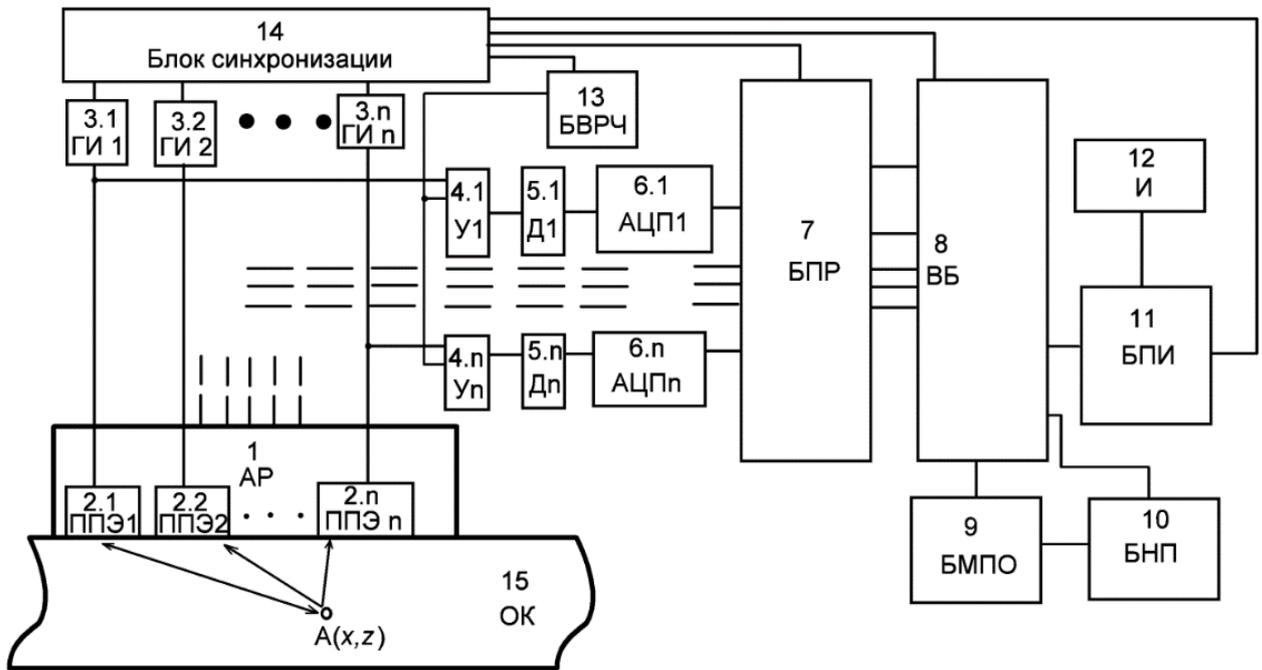


Рисунок 3.1. - Структурная схема электронного блока

акустическую решётку,

- 3 – генератор высоковольтных импульсов,
- 4 – 16-ти канальный усилитель,
- 5 – 16-ти канальный согласующий детектор,
- 6 – 16-ти канальный быстродействующий аналого-цифровой преобразователь,

преобразователь,

- 7 – блок памяти реализаций,
- 8 – вычислительный блок,
- 9 – блок мультипликативной обработки
- 10 – блок накопительной памяти,
- 11 – блок памяти изображений,
- 12 – индикатор,
- 13 – блок временной регулировки чувствительности,
- 14 – блок синхронизации,
- 15 – объект контроля.

Управление блоком электроники осуществляется с персонального компьютера. Интерфейс оператора позволяет выбирать амплитуду зондирующего импульса, параметры временной регулировки чувствительности усилителя, начальное значение коэффициента усиления, частоту преобразования АЦП, параметры зоны контроля. После загрузки выбранных параметров блок электроники начинает работу под управлением программы, записанной в микроконтроллер. В соответствии с алгоритмом работы в первоначальный момент микроконтроллер разрешает автономную работу блока управления модулем памяти, что позволяет запоминать данные в модуле памяти с частотой преобразования АЦП, превосходящей частотный диапазон микроконтроллера. После этого микроконтроллер выдает разрешение на работу генератора первого канала. Зондирующий сигнал первого канала распространяется в объекте контроля, отражается от неоднородностей, донной поверхности и принимается эхо-сигнал всеми приемными каналами одновременно. Принятые сигналы преобразуются в цифровой вид в блоке АЦП и сохраняются в модуле памяти. После этого микроконтроллер выдает разрешение на работу генератору второго канала. Зондирующий сигнал второго канала распространяется в объекте контроля, отражается от неоднородностей, донной поверхности и принимается эхо-сигнал всеми приемными каналами одновременно. Принятые сигналы также преобразуются в цифровой вид в блоке АЦП и сохраняются в модуле памяти. Цикл продолжается до тех пор, пока не будут выработаны зондирующие сигналы от всех шестнадцати генераторов и приняты эхо-сигналы.

Для компенсации затухания эхо-сигнала в усилителе предусмотрена временная регулировка чувствительности. Аппаратура позволяет формировать характеристику ВРЧ с перегибом в 256 точках. Это позволяет проводить настройку аппаратуры для конкретного объекта контроля с различной характеристикой затухания. Примерный вид характеристики приведен на рисунке 3.2.

Преобразованные данные сохраняются в модуле памяти и под управлением микроконтроллера поступают в блок мультипликативной обработки данных. Блок

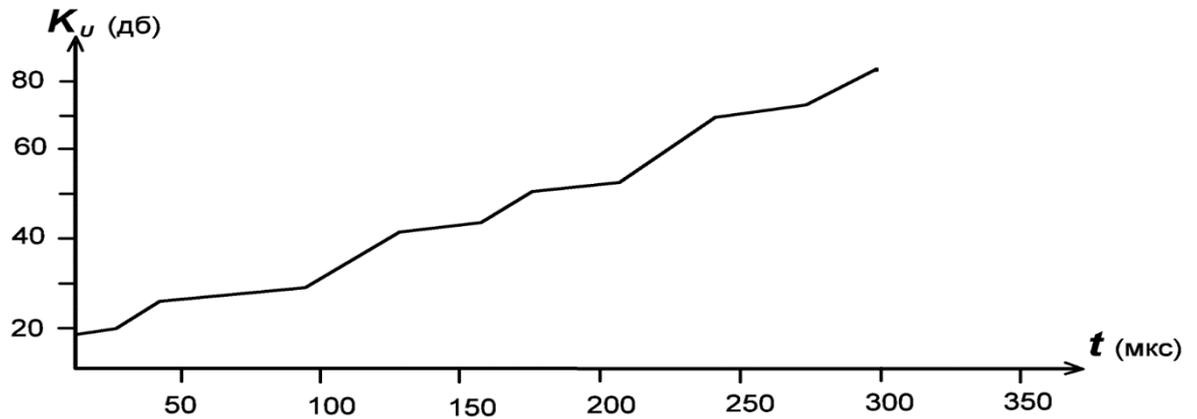


Рисунок 3.2 - Характеристика изменения коэффициента усиления

мультипликативной обработки состоит из  $(2^n - 1)$  идентичных блоков умножения ( $n$ - количество приемо-передающих элементов антенной решетки), соединенных пирамидально. Структурная схема блока изображена на рисунке 3.3. Первый уровень содержит  $n/2$  блоков умножения 16.1 (БУ1.1), ..., 16. $n/2$  (БУ1. $n/2$ ), входы которых соединены с вычислительным блоком 8. Выходы двух блоков умножения первого уровня 16.1 (БУ1.1) и 16.2 (БУ1.2) связаны с входами одного блока умножения второго уровня 17.1 (БУ2.1). Выходы двух блоков умножения первого уровня 16.3 (БУ1.3) и 16.4 (БУ1.4) связаны с входами одного блока умножения второго уровня 17.2 (БУ2.2). Выходы двух блоков умножения первого уровня 16. $(n/2-1)$  (БУ1. $(n/2-1)$ ) и 16. $n/2$  (БУ1. $n/2$ ) связаны с входами одного блока умножения второго уровня 17. $n/4$  (БУ2. $n/4$ ). Выходы двух блоков умножения второго уровня 17.1 (БУ2.1) и 17.2 (БУ2.2) связаны с входами одного блока умножения третьего уровня 18.1 (БУ3.1) и т.д. Выходы блоков умножения третьего уровня 18.1 (БУ3.1) и 18. $n/8$  (БУ3. $n/8$ ) связаны с входом блока умножения 16-го уровня 19.1 (БУ $n/2$ .1), выход которого является выходом блока мультипликативной обработки 9.

Структурная схема всех блоков умножения, обозначенных цифрами от 16 до 19, одинакова и представлена на рисунке 3.4. Например, в блоке умножения 16.1 (БУ1.1) вход регистра первого числа 20 связан с вычислительным блоком 8,

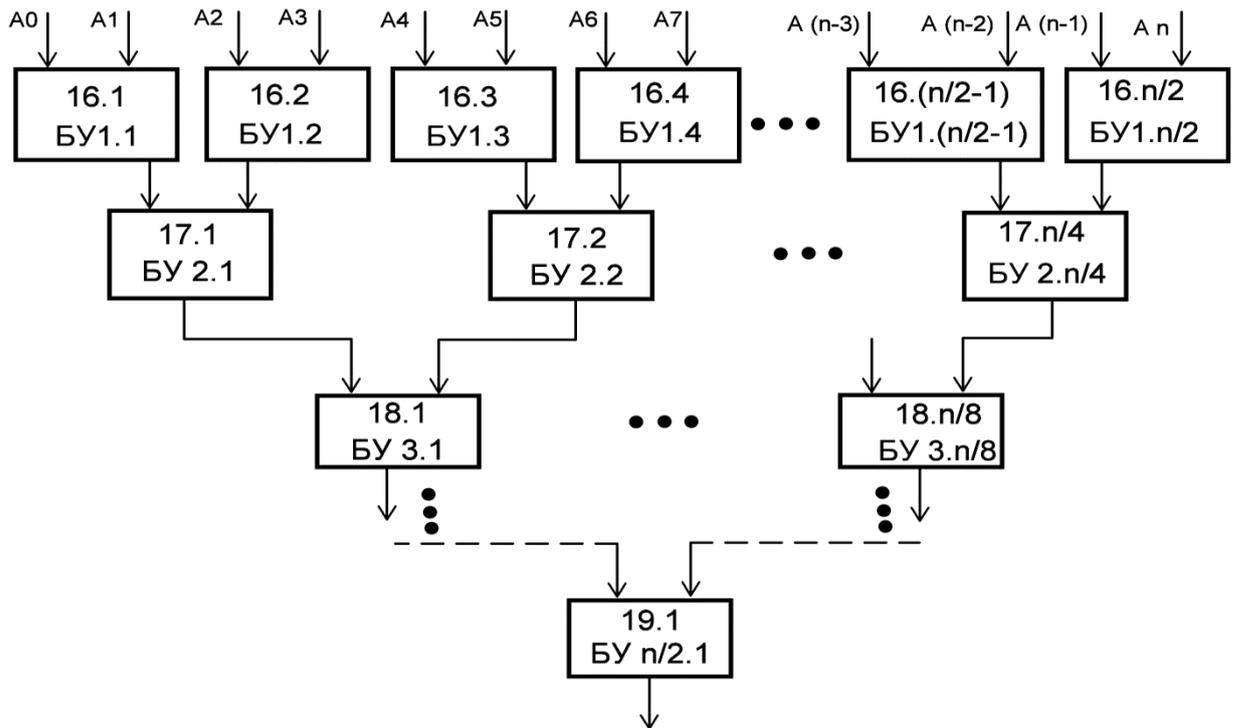


Рисунок 3.3 - Блок мультипликативной обработки

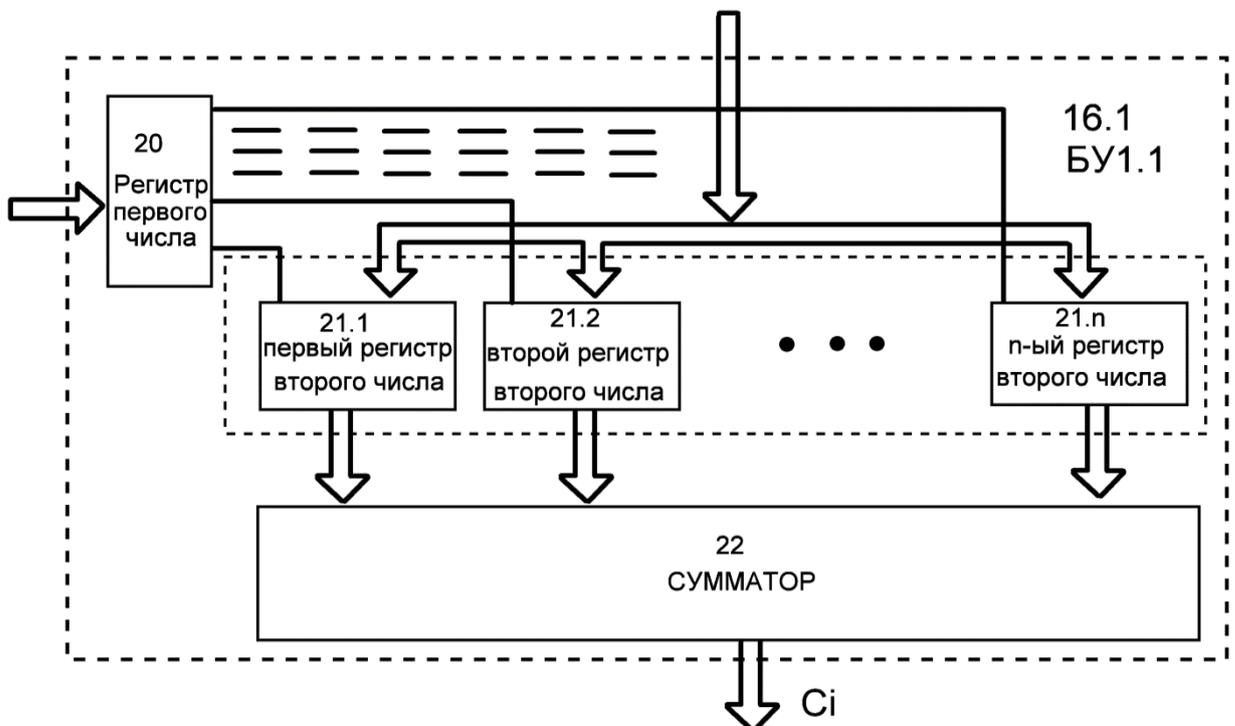


Рисунок 3.4 - Структурная схема блока умножения

а первый выход регистра первого числа 20 соединен с входом первого регистра

второго числа 21.1. Второй выход регистра первого числа 20 соединен с входом второго регистра второго числа 21.2, а n-й выход регистра первого числа 20 соединен с входом n-го регистра второго числа 21.n. Входы всех регистров второго числа 21 связаны с вычислительным блоком 8. Выходы всех регистров второго числа 21 соединены с входами сумматора 22. Выход сумматора 22 является выходом каждого из блоков умножения 16, 17, 18 и 19.

После записи всех 256 реализаций в блоке памяти реализаций 7 начинается реконструкция изображения внутренней структуры объекта контроля 15 поочередно для каждой визуализируемой точки. Количество визуализируемых точек определяется зоной контроля и расстоянием между точками. Вычислительный блок 8 рассчитывает время распространения ультразвуковой волны до каждой визуализируемой точки в соответствии выражением:

$$t_{Ai,j} = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + z^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + z^2}}{c},$$

где  $x_i$  - координата приемно-передающего элемента антенной решетки 1, работающего в режиме излучения,

$x_j$  - координата приемно-передающего элемента антенной решетки 1, работающего в режиме приема;

$x, z$  - координаты визуализируемой точки;

$c$  - скорость распространения УЗ волн в материале объекта контроля 15.

Затем в блоке 9 перемножаются цифровые коды, выбранные из блока памяти реализаций 7 в соответствии со временем распространения от i-го приемно-передающего элемента антенной решетки, работающего в режиме излучения, до j-го приемно-передающего элемента антенной решетки, работающего в режиме приема, через точку визуализации с координатами  $x, z$ . Результат перемножения сохраняется в блоке накопительной памяти 10.

Мультипликативная обработка заключается в следующем. На вход блока мультипликативной обработки 9 из вычислительного блока 8 поступает одновременно  $n$  выбранных значений  $A_0 - A_n$  цифровых кодов (в нашем примере

$n=16$ ), которые перемножаются попарно в блоках умножения первого уровня 16, данные с выходов которых поступают на входы блоков умножения второго уровня 17 и перемножаются. Данные с выходов блоков умножения второго уровня 17 поступают на вход блоков умножения третьего уровня 18 и перемножаются и т.д. Последнее перемножение осуществляется в блоке умножения  $n/2$  уровня 19.1 (БУ $n/2.1$ ). Блок умножения, например 16.1, работает следующим образом. В регистр первого числа 20 записывается первое число. На входы всех регистров второго числа 21 поступает второе число. Причем, на вход первого регистра второго числа 21.1 поступает второе число без изменения, на вход второго регистра второго числа 21.2 поступает второе число, сдвинутое на один разряд влево, на вход третьего регистра второго числа 21.3 поступает второе число, сдвинутое на два разряда влево и т.д.. На вход  $n$ -го регистра второго числа 21. $n$  поступает второе число, сдвинутое на  $n$  разрядов влево. Запись данных в регистры второго числа 21.1 ... 21. $n$  производится по единичным данным, записанным в регистр первого числа 20. Если в регистре первого числа 20 в каком-либо разряде будет ноль, то в соответствующий регистр второго числа 21.1 ... 21. $n$  запись второго числа не произойдет. В таблице 9 показан пример сдвига пятиразрядного числа 11011 на входах регистров второго числа 21.1 ... 21. $n$ .

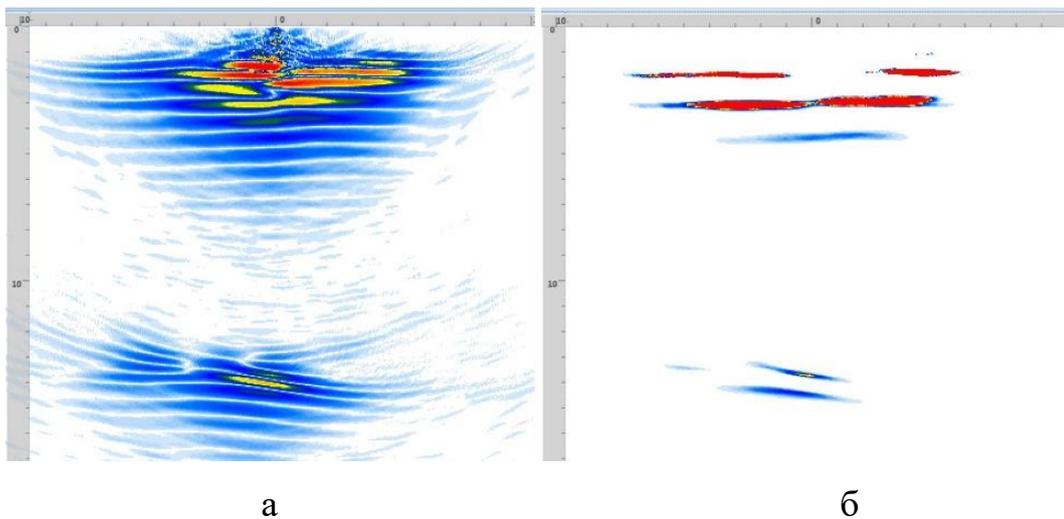
Таблица 9 – Пример перемножения

Регистр/разряд	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		Регистр первого числа
Регистр 21.1						1	1	0	1	1		1
Регистр 21.2					0	0	0	0	0			0
Регистр 21.3				0	0	0	0	0				0
Регистр 21.4			0	0	0	0	0					0
Регистр 21.5		1	1	0	1	1						1
Сумма		1	1	1	0	0	1	0	1	1		

В столбце регистра первого числа приведено значение первого числа, в котором единицы имеются только в первом и пятом разрядах, поэтому запись второго числа произошла только в регистры 21.1 и 21.5. В остальных регистрах второго числа 21.2, 21.3, 21.4 записались нули. Пустые клеточки в таблице заполняются нулями.

Затем полученный результат из блока накопительной памяти 10 пересылается в вычислительный блок 8, в котором полученному значению (числу) присваивается определенный цвет, который сохраняется в блоке памяти изображений 11. Индикатор 12 отображает результат контроля в виде цветного изображения. Пример такого изображения показан на рисунке 3.5.

На блок мультипликативной обработки данных получен патент РФ [135].  
Разработанная структурная схема легла в основу создания оригинальной



а – аддитивная обработка, б – мультипликативная обработка

Рисунок 3.5 - Сектор-скан зоны контроля с дефектом;

дефектометрической аппаратуры, новизна которой защищена патентами РФ.

### 3.2 Программный интерфейс дефектоскопа

Для настройки блока электроники дефектоскопа используется интерфейс оператора, основное окно которого приведено на рисунке 3.6. Основное окно содержит несколько вспомогательных окон и дополнительные закладки. Рассмотрим основные из них, которые определяют настройки и режим работы

блока электроники. В левой верхней части основного окна расположены управляющие элементы: «Гр1»... «Гр16» для выбора А-сканов, которые будут отображены в центральном окне «График». Это позволяет проводить контроль принятых данных в режиме настройки аппаратуры. Правее этих элементов, под надписью «Скан = 0», расположен вспомогательный элемент цифрового ввода данных, в котором устанавливается длительность оцифровки А-скана в микросекундах. Изменяя параметр этого элемента можно изменять длительность А-скана и тем самым изменять зону контроля по глубине. Правее этого окна расположена кнопка «Work». Активизация этой кнопки приводит в действие алгоритм автоматического сканирования элементами антенной решетке в зоне

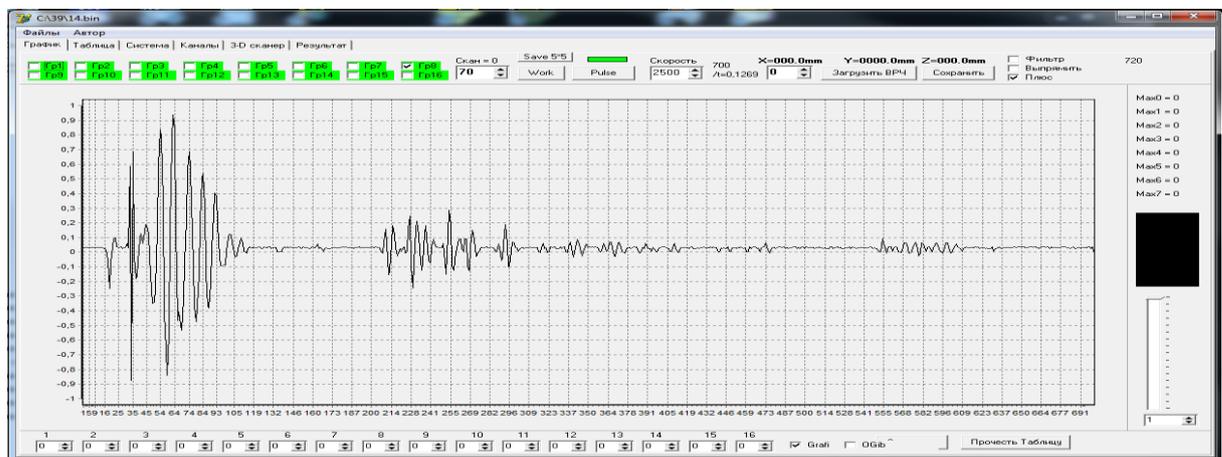


Рисунок 3.6 - Основное окно управляющей программы.

контроля. Еще правее этой кнопки расположена кнопка «Pulse». Активизация этой кнопки приводит в действие алгоритм ручного сканирования элементами антенной решетке в зоне контроля. При первом нажатии излучает первый элемент акустической решетке, при втором – второй элемент и т.д. Одновременно с этим в окне «Элемент» отображается номер работающего элемента. Таким образом осуществляется ввод набора данных для дальнейшей математической обработке по методу TFM. Рядом с кнопкой «Pulse» расположено вспомогательное окно «Скорость». В этом окне устанавливается скорость распространения упругих волн в объекте контроля. Используя информацию о скорости измеряются координаты дефектов по оси X в графическом окне в микросекундах или в миллиметрах.

Правее окна «Элемент» расположена кнопка «Загрузить ВРЧ». При активизации этой кнопки в электронный блок дефектоскопа загружается характеристика временной регулировки чувствительности, которая позволяет компенсировать потери энергии упругих волн при распространении в объекте контроля и получить одинаковый уровень эхо-сигнала от одинаковых отражателей, залегающих на разных расстояниях. Параметры характеристики ВРЧ устанавливаются в закладке «Система». Для сохранения полученных данных предусмотрена кнопка «Сохранить». После нажатия на эту кнопку программа предложит оператору выбрать папку, название файла и формат данных. Программное обеспечение позволяет сохранять данные в двух форматах: bin и txt. Первый формат удобен для обработки данных в пакете C++ или Delphi. Второй формат удобен для обработки данных в пакете Excel. В правом верхнем углу основного окна расположены три вспомогательных окна «Фильтр» для цифровой фильтрации данных, «Выпрямить» - для получения детектированного сигнала и «Плюс» для автоматического перехода на следующий канал. В середине располагается окно для отображения А-сканов, пример которого показан на рисунке 3.6. Снизу от графического окна располагается вспомогательное окно с управляющими элементами для каждого ультразвукового преобразователя антенной решётки. Как показала практика, ультразвуковые элементы в ультразвуковом датчике имеют разные параметры, отличающиеся друг от друга на 4 - 5 дБ. Для компенсации различий в чувствительности и предназначено данное управляющее поле. Для каждого из датчиков задается величина, корректирующая коэффициент передачи усилителя. Таким образом, осуществляется выравнивание коэффициентов передачи всех каналов аналоговой части. Кнопкой «Прочсть таблицу» производится считывание таблицы корректирующих значений каждого элемента решётки.

Закладка «Таблица» используется для контроля работы блока электроники и блока приема-передачи данных в персональный компьютер. На рисунке 3.7 приведено изображение закладки «Таблица» с отображением пакетов данных, поступающих с выбранного элемента антенной решетки. Номер элемента

антенной решетки задается в вспомогательном окне «Элемент» закладки «График».

На рисунке 3.8 приведено изображение закладки «Система». В этой закладке сгруппированы управляющие элементы обеспечивающие задание параметров для работы блока электроники УЗД. В левой верхней части окна расположены два вспомогательных окна «Прием» и «Передача» в которых в динамике отображается процесс обмена пакетами данных между ПК и блоком электроники. Правее этих окон расположено окно «USB», в котором отображается текущее состояние блока приема-передачи данных. Если отображается «USB=ok» - блок работает в нормальном режиме. Если

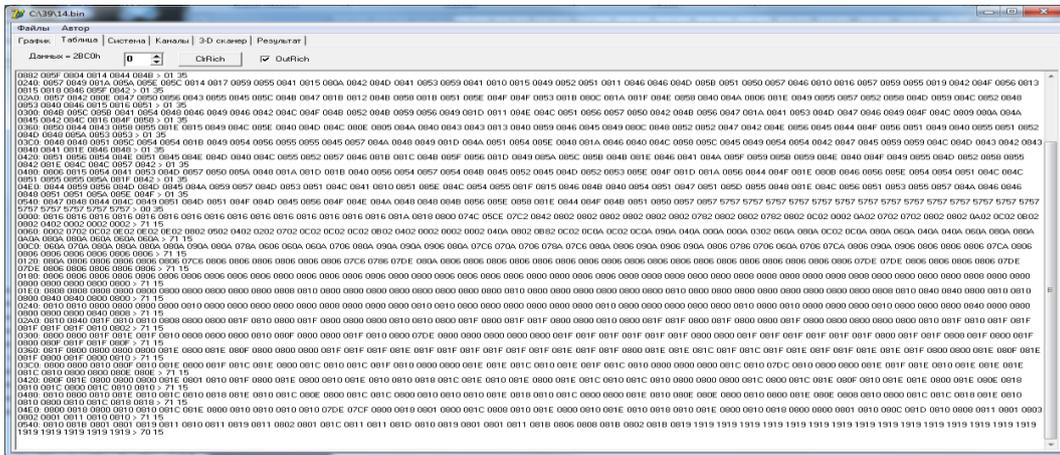


Рисунок 3.7 - Закладка «Таблица»

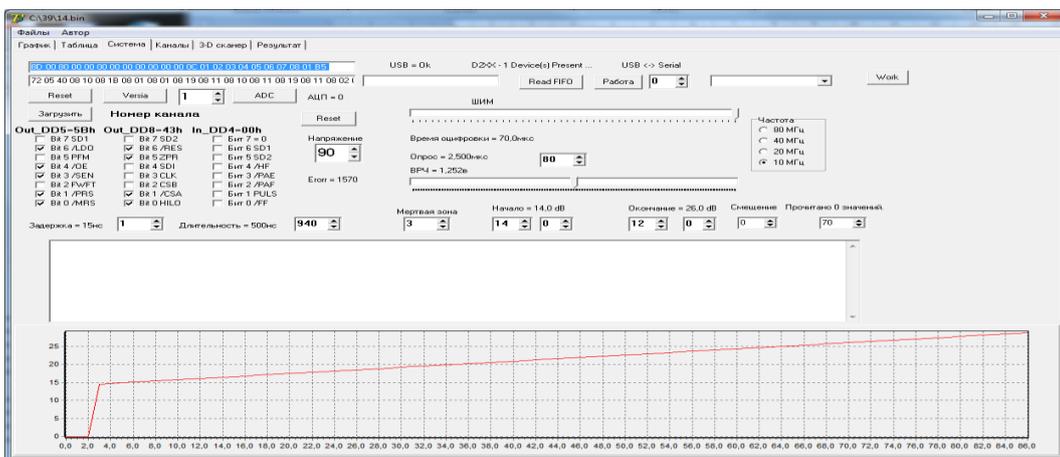


Рисунок 3.8 - Закладка «Система».

отображается «USB=off» - связи с блоком электроники нет. В правой части окна расположено вспомогательное окно «Частота» с набором чисел 10, 20, 40 и 80.

Выбор одного из предложенных вариантов позволяет настроить частоту преобразования АЦП на нужное значение в зависимости от условий и объекта контроля. В центре окна расположено вспомогательное окно «Напряжение», которое позволяет установить амплитуду зондирующего импульса сигнала. В центре окна в левой его части расположено вспомогательное окно «Задержка», которое позволяет выбрать длительность временного интервала, в течении которого после подачи зондирующего сигнала входной усилитель отключен от антенной решетки, для исключения выхода его из строя за счет подачи высокого уровня зондирующего сигнала на его вход. Правее этого окна расположено окно «Длительность», которое позволяет изменять длительность зондирующего сигнала и подбирать оптимальное значение для антенных решеток разной частоты. Правее этого окна расположено окно «Мертвая зона». Это окно позволяет изменять время от запуска зондирующего сигнала до момента включения ВРЧ. Окно «Начало» определяет начальное значение коэффициента усиления усилителя в момент включения блока ВРЧ. Окно «Окончание» определяет конечное значение коэффициента усиления усилителя на дальней границе зоны контроля. В нижней части окна отображается характеристика ВРЧ. Кнопкой «Загрузить ВРЧ», расположенной в основном окне программы, осуществляется загрузка в контроллер данных ВРЧ сформированных в данном окне.

На рисунке 3.9 приведено изображение закладки «Каналы». В данной закладке производится индивидуальная настройка аналоговой части устройства по каждому каналу под конкретные параметры каждого пьезоэлемента антенной решетки. Изменение чувствительности осуществляется корректировкой смещения характеристики ВРЧ. В окне «Смещение ВРЧ» можно установить необходимое начальное значение коэффициента усиления. В окне «Длительность» можно изменять длительность зондирующего импульса с учетом характеристик конкретного пьезоэлемента антенной решетки. В окне «Задержка» можно

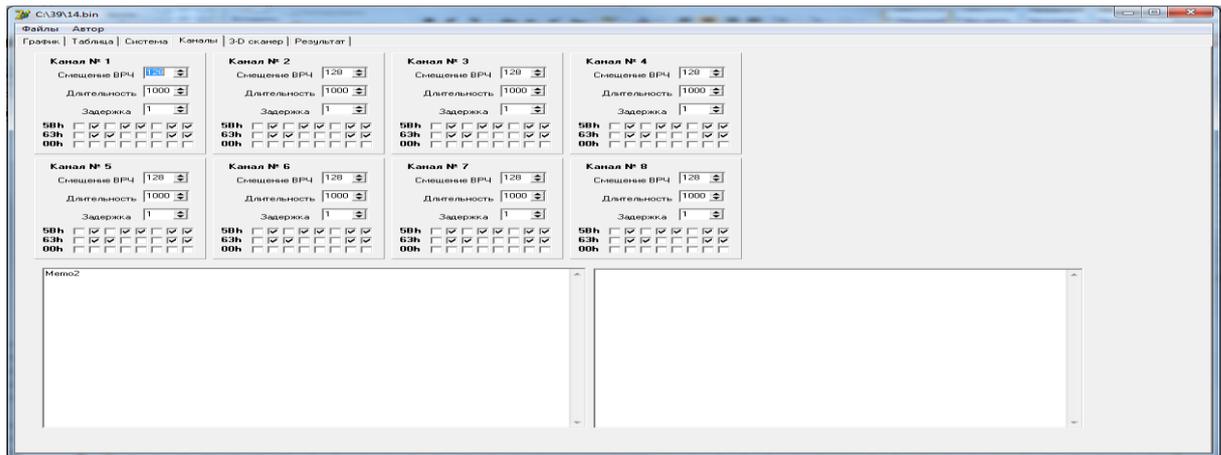


Рисунок.3.9 - Закладка «Каналы»

изменять величину задержки подачи зондирующего импульса на пьезопреобразователь в режиме электронного сканирования лучом. Временные параметры задержки и длительности зондирующего импульса выставляются с точностью 0,25нс. Для удобства чтения информации это окно разделено на две одинаковые части. Первая часть позволяет настраивать с первого по восьмой каналы, а вторая часть – с девятого по шестнадцатый.

На рисунке 3.10 приведено изображение закладки '3-D сканер'. В данной

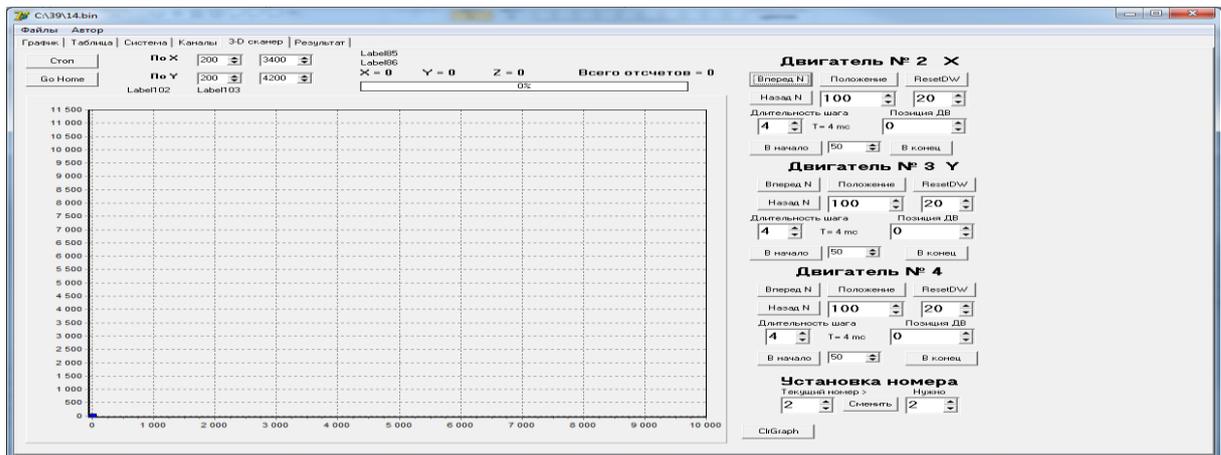


Рисунок 3.10 - Закладка «3-D сканер»

закладке осуществляется программирование 3-D сканера. Во вспомогательных окнах «Координата «X» и «Координата «Y» задается начальное и конечное значение положения датчика. Кнопка «Go Home» позволяет вернуть датчик в исходное положение после сканирования. Кнопка «Старт/Стоп» включает

процесс сканирования в автоматическом режиме. Кроме того, перемещением датчика можно управлять вручную используя окна, расположенные в правой части и обозначенные «Двигатель X», «Двигатель Y» и «Двигатель Z». Каждое из этих окон имеет кнопки «Вперед» и «Назад», которые позволяют перемещать датчик на один шаг. Величина шага задается в окне «Длительность шага». Кнопками «В начало» и «В конец» можно переместить датчик в начало или конец зоны контроля. В окне «Позиция ДВ» отображается текущее положение датчика. При перемещении датчика, его траектория будет отображаться в центральном окне. Кнопка «Reset DW» позволяет зафиксировать текущее положение датчика как начало зоны контроля. В центральном графическом окне, во время работы, отображается текущее положение манипулятора датчика в относительных координатах. В графическом окне каждая точка зондирования отображается 'жирной' точкой на линии перемещения манипулятора. Так как координаты положения манипулятора известны, то в название файла данных включаются координаты места, в котором они получены. В дальнейшем, при проведении расчета, это позволяет связать различные области контроля в единую объемную картину. Перекрывающиеся области отдельных измерений дополняют друг друга и повышают достоверность полученной общей картины.

Дальнейшая реконструкция изображения с использованием метода TFM основана на оригинальном программном обеспечении, которое ориентировано на мобильные компьютеры относительно не высокой производительности, но отображающее результаты, по возможности, в реальном масштабе времени. В качестве аппаратно-программной платформы был выбран ноутбук с высокопроизводительной видеокартой. Это, с одной стороны, обеспечивает мобильность дефектометрической аппаратуры, а использование мощного графического адаптера позволяет производить наиболее сложные с вычислительной точки зрения операции на GPU, что, в свою очередь, позволяет добиться высокой производительности.

Основные операции, требующие высокопроизводительных вычислений:

- нахождение путей волны до каждой точки в заданной зоне контроля для

гомогенного или гетерогенного пространства с заданной дискретностью от излучателя до приёмника,

- вычисление значений суммарного (мультипликативного) сигнала от разных приёмо-передающих каналов для каждой точки в зоне сканирования,

- реконструкция изображения отдельного участка сканирования с применением различных методик «окраса» сигнатуры, построение комбинированного, в том числе объемного, изображения сканируемой области с применением дополнительных методик и правил консолидации.

В качестве инструмента разработки использовался гибридный подход: для дальнейшей разработки пользовательского интерфейса была выбрана Embarcadero RAD Studio, а для сложных расчётов проведён сравнительный анализ ряда программных платформ.

Были рассмотрены следующие варианты платформ для разработки, описание которых приведены ниже:

- Open MP
- NVIDIA CUDA
- Open CL
- C++ AMP
- Intel MIC/Intel Xeon Phi

Сразу отметим, что две последние платформы на момент написания данной работы находились в экспериментальном виде, имели очень высокую стоимость и выпускались ограниченными партиями «по заказу». Вследствие этого они были исключены из дальнейшего анализа.

Open MP является открытым стандартом для распараллеливания программ на языках Си, Си++ и Фортран. Он предназначен для программирования многопоточных приложений на многопроцессорных системах с общей памятью.

К его достоинствам можно отнести простоту, скорость, как разработки, так и отладки, поскольку компилятор всего лишь дополняет и преобразует исходный код программы по строгим правилам, вставками на «исходном» коде (к примеру, C/C++) программы, не нарушая и не разделяя процесс создания программы.

Взаимодействие кода основной и вычислительной части программы прямое, контексты исполнения не разделены, накладные расходы на взаимодействие и запуск отсутствуют. Все это позволяет применять на ней те же штатные инструменты, что и в цикле разработки обычной, классической последовательной программы. Стандарт поддерживается и продвигается крупными компаниями, игроками рынка, координируется и развивается международным комитетом ARB. Являясь «зрелой» и отработанной технологией, использование Open MP гарантирует стабильный и предсказуемый цикл разработки.

К существенным недостаткам можно отнести ограничение контекста исполнения только одним классом устройств — ЦП, который и так является самым нагруженным в ОС, а также наиболее сложный по удовлетворяемому функциональному спектру, что в свою очередь делает его менее производительным нежели устройства, специализирующиеся, в основном, на вычислениях.

Nvidia CUDA – это программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений, которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность благодаря использованию графических процессоров фирмы Nvidia. CUDA SDK позволяет программистам реализовывать на специальном упрощённом диалекте языка программирования Си алгоритмы, выполнимые на графических процессорах Nvidia. В качестве основного и единственного контекста исполнения используется класс устройств ускорения графики и сопутствующих вычислений, отличающийся высокой специализированной направленностью на математические вычисления. Достоинством служит простота вычисляющей единицы (потокowego процессора), а значит их концентрации на единицу площади устройства и в целом естественно сложившийся параллелизм архитектуры ускорителей и обслуживаемого ей класса алгоритмов, совпадающего с заданным в рамках проекта. «Зрелость» технологии, отсутствие «детских болезней». Богатый спектр инструментов отладки, профилировки и метрик производительности. Однако, код основной программы отделен логически от кода генерируемого CUDA, хоть и с возможностью физического нахождения в том же

исполняемом файле. Основная программа взаимодействует с кодом CUDA через функции и инструменты набора разработчика, поэтому контексты исполнения соответственно различны и несут дополнительные накладные расходы. В качестве физической платформы возможно использование только оборудования Nvidia.

Open CL представляет собой открытый язык вычислений «Фреймворк» для написания компьютерных программ, связанных с параллельными вычислениями на различных графических и центральных процессорах, а также FPGA. Open CL обеспечивает параллелизм на уровне инструкций и на уровне данных и является реализацией техники GPGPU. Open CL является полностью открытым стандартом, его использование не облагается лицензионными отчислениями. Разрабатывается и поддерживается некоммерческим консорциумом, в который входят много крупных компаний. По своим принципам организации, архитектуре и использованию очень близок к Nvidia CUDA. В тоже время обладает большей гибкостью как выбора контекста исполнения вычислительного кода (устройства исполнения), так и широтой покрытия классов контекста (разные типы устройств).

К другим достоинствам можно отнести широкий спектр покрытия классов устройств, доступных в качестве вычисляющих ускорителей, и самих устройств. Большое количество поддерживающих стандарт, а значит и весь Фреймворк, крупных игроков рынка. Возможность одновременного применения нескольких ускорителей разного класса, для решения одной и той же или разных задач. Например, центральный процессор (ЦП) под промежуточные вычисления с преобладанием булевой математики и процессов общего назначения, а графический процессор (ГП) под высокопроизводительные математические вычисления с почти полным или малым наличием булевых вычислений.

Динамическая компиляция, позволяет производить уникальный класс оптимизаций для конкретной специфики задачи и даже параметров вычислительного устройства, учитывая его особенности. В качестве простейшего примера может служить таблица предварительно вычисленных значений, которая в зависимости от конечных условий может быть встроена в исходный код

«налету» и иметь определенный размер, оптимальный для данного конкретного устройства и параметров задачи, в тоже время для другого устройства и/или параметров задачи, она напротив может быть удалена, а вычисления ее значений будут производиться «налету». Простота модификации кода.

Важным недостатком следует признать то, что код основной программы отделен логически от кода генерируемого. Это, безусловно, усложняет контроль «целостности» и версий.

Динамическая компиляция, являясь преимуществом, так же является и недостатком, внося дополнительные расходы ресурсов, особенно времени, в процессе запуска вычислений на исполнение. Частичное решение данной проблемы требует предварительной компиляцией и позже «кэшем» объектов. Основная программа взаимодействует с кодом через функции и инструменты набора разработчика, через средства драйвера, компилятора/компоновщика и производителя устройства. Если контексты исполнения кода разные, то появляются дополнительные накладные расходы, как при взаимодействии с основной программой, так и между вычислительными модулями.

На основе проведенного анализа было выбрано оптимальное решение о выборе платформы Open CL в качестве инструмента сложных расчётов и операций.

Основная программа, реализующая интерфейс пользователя, описание которой будет приведено ниже, скомпонована с интерфейсной библиотекой Open CL и содержит в своих ресурсах код Open CL C. В операционной системе, в которой запускается программа, должна быть установлена реализация функций интерфейсной библиотеки Open CL в «достаточной» комплектации. Главная программа, используя вызовы функций Open CL библиотеки, производит ее инициализацию, опрашивает доступные платформы. Пользователь или главная программа, на основании полученных данных, может выбрать платформу для вычислений из доступных устройств.

Запуск вычислительных функций основной программы, может быть, как синхронным, так и асинхронным. В случае синхронного запуска, главная

программа ожидает завершения исполнения в точке его вызова по средствам Open CL API функций. Во втором варианте, поток основной программы «не замораживается» в месте вызова, а может продолжить исполнение и к примеру, вызвать эту же самую функцию, но с другими данными на другом вычислительном устройстве из имеющихся в системе.

Разработанная в рамках данной работы Open CL API - EOCL представляет из себя библиотеку с низкоуровневой организацией функциональности и соответствующим менеджментом ресурсов. Данная библиотека обеспечивает простое взаимодействие с языками высокого уровня, такими как Delphi или C++. Позволяет сделать код основной программы более кратким и лаконичным, беря на себя большинство рутинных задач, по созданию, управлению и высвобождению ресурсов, оптимальному запуску вычислительной задачи, вычисления оптимального плана исполнения, упростив сбор информации об устройствах и в целом сделав более компактной модель программирования, кроме того дополнив стандартный API Open CL, функциями манипуляции с данными поддержкой регулярных языковых типов.

Библиотека EOCL предоставляет все сущности, базирующиеся на сущностях Open CL в объектно-ориентированном виде. Позволяет оперировать, в итоге, объектами «функция и аргумент», предоставляющих всю связанную функциональность соответствующими методами, а также интроспекцию к родительским и дочерним объектам.

Весь процесс программирования под Open CL, теперь свелся к работе с объектами и их экземплярами, при помощи присущих им операций (методы и свойства).

В рамках дальнейшего развития проекта, была реализована «привязка» к языку Delphi и среде разработки Embarcadero® RAD Studio™. Они используются для создания главной программы, реализующей пользовательский интерфейс по управлению источниками данных сканирования, настройки их обработки и отображения результатов реконструкции и визуализации. В результате, создание и использование ядра Open CL, равно как и устройства исполнения (оценки

устройств и выбора наиболее подходящей стратегии их использования), стало довольно тривиальной задачей, уместающейся в несколько строк кода:

```

cl := Teocl.Create(default_pfm, default_dev, PrgSrc); //создание контекста
dl := cl.dev_list; //список устройств контекста
dname := dl[i].name; //название устройства
dtype := dl[i].dtype; //тип устройства, константа ваида Dev_Type_GPU
итп.
cl.cur_dev.prg_obj.fun_list.Add(Teocl_fun.Create(cl.cur_dev.prg_obj,
'img_3d_amplitude_asymmetric_trscgrid_onfly')); //создание функции/ядра
Open CL
b := cl.cur_dev.prg_obj.funByName
['img_3d_amplitude_asymmetric_trscgrid_onfly'];
b.arg_list.AddRange([Teocl_arg.Create(b, 'a_XSzMax_pt', incr(i),
Arg_Type_Custom, Arg_Mode_Read, sizeof(PointCoordIntDir)).....]); //создание
«аргументов» ядра
b.ArgByIndex[i].Clear; //удаление i-того аргумента
b.ArgByName['a_UseDynamicXZRange'].SetVal(ImgProp.UseDynamicXZRang
e); //присвоение значения аргумента функции, по его имени
b.ArgByName['a_Paths3d_img'].SetValArray(PathsImg3d, PathsImg3dSz);
//аналогично, за тем исключением, что этот аргумент, массив в режиме
доступа на запись-чтение
clfun_aexec(b); //запуск ядра Open CL на исполнение, в режиме
автоматического подбора оптимальных параметров исполнения
b.ArgByName['a_Paths3d_img'].GetVal; //получение значения аргумента,
обратно
path := PathsImg3d[0]; //получение главной программой 0-ого значения из
вычисленного массива

```

Представленная часть программы показывает, что теперь тот набор требуемых операций от Open CL, занимавший ранее сотни строк и, порой, не тривиальных алгоритмов на ряду с рутинными, теперь уместается в несколько

строк кода. Создание этой библиотеки, существенно ускорило дальнейшую разработку, позволив сосредоточиться на написании именно самого кода вычислений Open CL C/C++, а не сопутствующего ему обрамлений.

Код для выполнения основных операций, указанных выше, написан на Open CL C. Изначально, операции вычислений реализовывали алгоритмы расчетов только для 2-х мерного пространства. Позже все они были переработаны для расчетов в 3-х мерном пространстве. На основании тестирования и замеров производительности в будущем предусматриваются новые, переработанные по общей новой базе кода специализированные 2-х мерные алгоритмы, работающие на тех же по объему вычислений задачах, быстрее 3-х мерных за счет экономии вычислительных ресурсов как по количеству регистров, так и по количеству инструкций.

Вот некоторые моменты оптимизации алгоритмов на практике. Это пример «малых» циклов и легкое мета-программирование с динамической генерацией динамически изменяемого кода:

```
#if USE_LOOP_UNROLL
#pragma unroll
#endif
for(i = 0; i < SIGNAL_STATISTIC_DISTR_SZ; ++i)
    SigStat.DValCntPerc_arr[i] += DvalCntPerc_arr[thtrsc_idx][i];
```

В данном примере, при относительно малом числе итераций (определяется инструментально и подтверждается тестированием), определяемом значением константы SIGNAL\_STATISTIC\_DISTR\_SZ и при отсутствии прочих статически не вычисляемых на момент компиляции условий, будет выгодней выполнить цикл, изъяв из него условие ветвления. Хотя дивергентная ветвь потока практически невозможна, все же цикл сам по себе исполняется потоковым процессором ГП медленнее, нежели серия последовательных инструкций. Речь именно о потоковом процессоре, элементе ГП, а не о ГП в целом, в отличие от ЦП из-за разной природы организации вычислений.

Методом профилирования под целевые устройства, программист устанавливает такое значение `SIGNAL_STATISTIC_DISTR_SZ`, которое будет достаточно, чтобы ресурсов файла регистров хватило для того, чтобы ядро программы «в целом» выполнялось без использования компилятором «локальной» памяти - обычно размеченной в регион глобальной памяти — самый медленный тип памяти, под данные которые планировалось в оригинале держать в регистровом файле - наибо́льшей скорости типа памяти. Тестами, в дополнение к статическому анализу профилированием, устанавливается оптимальное значение не задействованного размера файла регистров. В этом случае достигается оптимальное, не конкурирующее со скоростью исполнения одного потока, количество одновременно исполняемых как потоков в группе, так и групп. Иначе говоря, одновременно исполняемого пикового количества потоков.

Выполнив перечисленные выше условия и учитывая естественную возможность динамической компиляции Open CL кода, можно применить оптимизацию на уровне модификации исходного кода под определенные условия. В данном примере все свелось к изменению перед запуском, учитывая определенные параметры задачи (задаваемые в настройках приложения) значения константы `SIGNAL_STATISTIC_DISTR_SZ`. Сама оптимизация применялась/задействовалась только в том случае, если главная программа «считала» ее оправданной, изменяя значение константы `USE_LOOP_UNROLL`. Это приводило к применению или наоборот, блокированию кода, огражденного условием препроцессора языка Open CL C/C++, расположенного непосредственно перед циклом. Следует напомнить, что код, огражденный условием препроцессора, является инструментом, исполняющимся до компилятора, в очереди инструментов, используемых при построении и способный модифицировать исходный код программы, некоторое подобие мета программированию в «легкой форме». В свою очередь, компилятор, либо применял оптимизацию цикла, либо нет.

Основная функция расчета 2-х или 3-х мерной матрицы амплитуд была разработана в нескольких вариантах.

- Функция, реализующая универсальный алгоритм, работающий с любыми характеристиками приёмно-излучающей матрицы.

- Функция, реализующая универсальный алгоритм, вычисляющая значение путей на лету, работающая с любыми характеристиками приёмно-излучающей матрицы.

- Функция, реализующая специализированный алгоритм, работающий с симметричными матрицами приемо-передатчиков.

- Функция, реализующая специализированный алгоритм, работающий с симметричными приёмно-излучающими матрицами.

Использование специализированного алгоритма для частного случая строения акустического тракта, симметрично расположенного в системе координат, приносит существенное ускорение относительно более медленных, но универсальных алгоритмов. Использование алгоритма, предварительно вычисляющего таблицу путей, выгодней их постоянного вычисления. Но только до определенного размера вычисляемого пространства. Для большой зоны контроля с большим количеством точек визуализации или матриц с большим количеством элементов выгоднее использовать постоянный расчет путей.

Главная программа, оценивает сделанные пользователем настройки и выбирает оптимальный вариант алгоритма вычислений.

Выбор основных параметров реконструкции производится в специальном окне интерфейса. Он показан на рисунке 3.11. Здесь можно выбрать доступные вычислительные устройства – обычно это графический (ГП) и центральный процессор (ЦП). Определяется количество элементов антенной решетки. При этом можно задать линейную эквидистантную решетку. В этом случае количество столбцов будет равно одному. А можно сформулировать требования на плоскостную эквидистантную решётку. Тогда количество столбцов должно быть больше единицы.

Поле «Расстояние между элементами» определяет дистанцию между пьезопреобразователями. Поле «Частота снятия показаний» определяет тактовую частоту дискретизации АЦП. Поле «Смещение приема сигнала» определяет

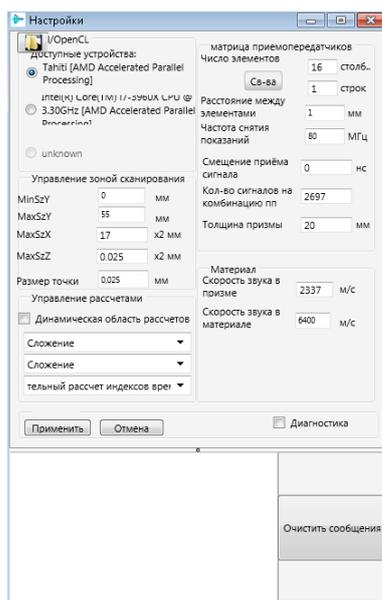


Рисунок 3.11 – Закладка «Настройки»

«мёртвую зону» А-скана. По умолчанию оно равно нулю. Поле «Кол-во сигналов на комбинацию пп» определяет число отсчётов амплитуды в А-скане. Поле “Толщина призмы” определяет размер призмы по ходу УЗ луча в том случае, если она используется. В разделе «Материал» необходимо задать значение скорости звука в призме и скорость звука в материале. В разделе “Управление зоной контроля” задаются максимальные значения X, Y, Z декартовых координат зоны контроля. В случае использования линейной матрицы максимальное значение Z равно размеру элемента геометрической дискретизации. Поле «Размер точки» определяет степень детализации изображения. Чем меньше это значение, тем больше объем вычислений и лучше качество восстановленной картинки. Поле «MinSzY» служит для определения неиспользуемой части зоны контроля. Там может располагаться, например, «мертвая зона» или заведомо бездефектная область контролируемого изделия. Благодаря этому параметру можно несколько уменьшить объем вычислений. В блоке «Управление расчетами» можно задать тип расчетов (сложение, без знакового сложения, умножение), а также метод расчета путей. Предварительный расчет пути от каждого элемента матрицы до каждой точки зоны контроля или комбинированный, когда расчет пути происходит каждый раз. Комбинированный способ используется, обычно, для

большой зоны контроля и матриц с большим количеством пьезопреобразователей, когда соответствующая матрица путей становится слишком большой для хранения в памяти.

Разработанная программа имеет несколько режимов работы. В режиме «A-Scan» происходит считывание информации из блока электроники в режиме on-line. При этом сразу отображаются как отдельные А-сканы, так и результат восстановления изображения. При этом имеется возможность отобразить любой из А-сканов, просто указав его порядковый номер. Также имеется возможность сравнения двух выбранных А-сканов.

Контрастность изображения регулируется с помощью «бегунка» в левой верхней части окна интерфейса программы. Пример интерфейса показан на рисунке 3.12.

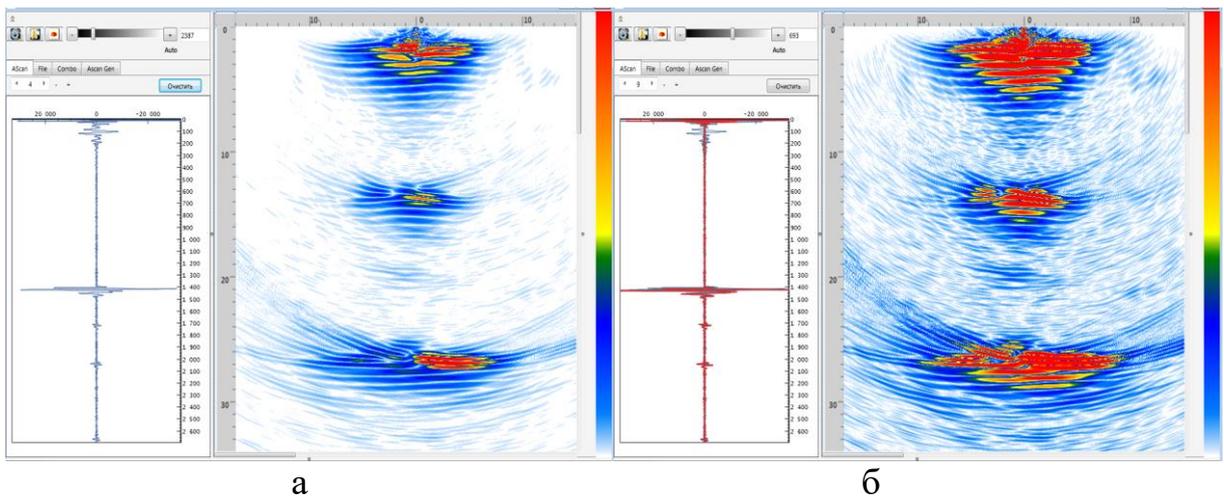


Рисунок 3.12 - Интерфейс программы в режиме «A-Scan»

При работе в режиме «A-Scan» происходит автоматическое сохранение данных в файлах, которые затем могут использоваться для дальнейших исследований. Визуализация сохранённых файлов происходит при переключении на закладку «File». В этом режиме выводится список сохраненных файлов и двойным нажатием левой кнопки мыши можно визуализировать любой из них. Функциональность регулирования контрастности изображения также доступна в этом режиме. При автоматической записи файла в режиме «A-Scan» в имени

файла указывается координаты положения сканера при которых были получены данные. На рисунке 3.13 показаны примеры визуализации двух различных

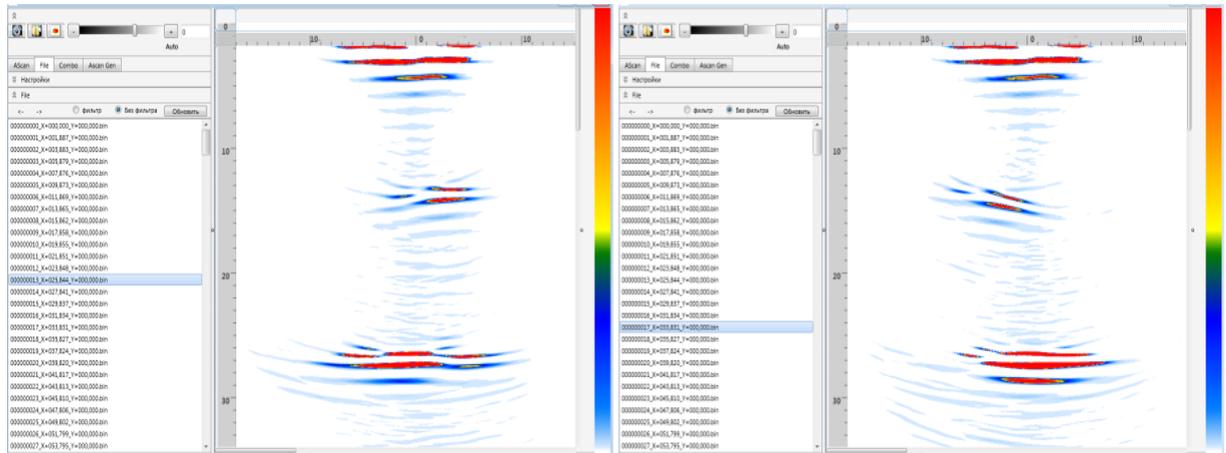


Рисунок 3.13 - Интерфейс работы программы в режиме «File»

сеансов контроля.

Благодаря наличию этой информации, появляется возможность визуализировать всю зону контроля, сканированную с помощью 2-D сканера. Для построения комбинированного изображения используется режим работы «Combo». В этом режиме восстановленные картинки от отдельных А-сканов «склеиваются» в соответствии с информацией о координатах, при которых этот А-скан был сделан. На рисунке 3.14 приведён пример такой реконструкции.

Объектом контроля послужил стальной брусок с отверстием, диаметром 15 мм. На реконструированном изображении можно увидеть часть этого отверстия, оценить форму дефекта и даже определить диаметр дефекта и его местоположение. Кроме того, можно наблюдать верхнюю и нижнюю грани объекта контроля и установить, что они параллельны.

Полный текст разработанной программы опубликован в [136].

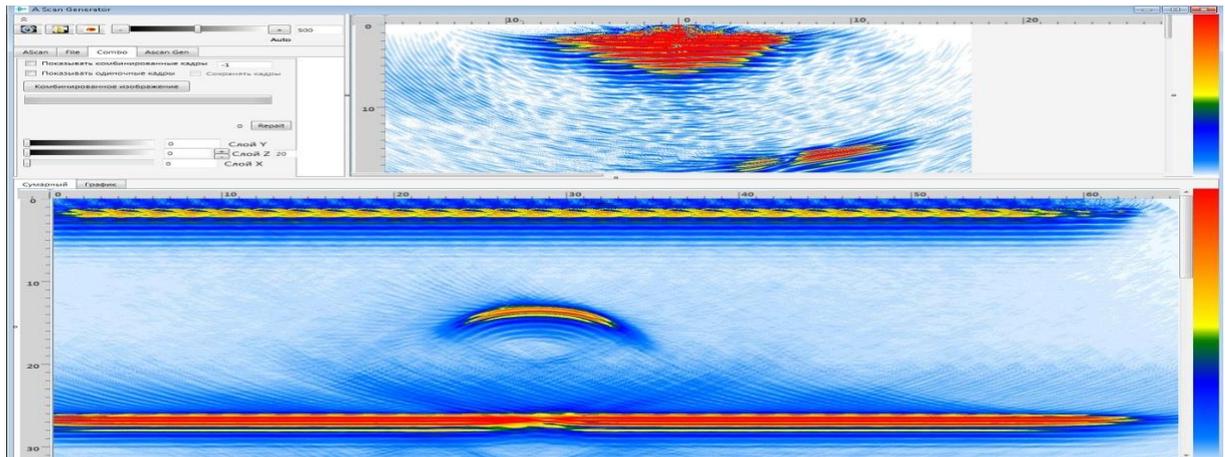


Рисунок 3.14 - Интерфейс программы в режиме «Combo»

### 3.3 Экспериментальные исследования

Проведение экспериментальных исследований преследовало цель проверки результатов теоретических аналитических соотношений и результатов моделирования технологии реконструкции синтезированных изображений по методу TFM. Для достижения поставленной цели создана экспериментальная установка, состоящая из следующих основных узлов.

- 1 Акустический тракт в составе:
  - 1.1 Пьезокерамическая линейная эквидистантная акустическая антенная решётка типа
  - 1.2 Механизм перемещения с закреплённым на нём держателем.
  - 1.3 Ванна с жидкостной средой (вода) для распространения акустических волн.
  - 1.4 Объекты, имитирующие дефекты.
2. Электронный блок в составе:
  - 2.1 16-ти каналный блок ультразвуковых генераторов.
  - 2.2 16-ти каналный блок приёмных усилителей.
  - 2.3 16-ти каналный АЦП.
  - 2.4 Блок оперативной памяти.
  - 2.5 Аппаратный интерфейс связи с персональным компьютером.
3. Персональный компьютер.
4. Монитор.

Общий вид установки показан на рисунке 3.15. На фотографии цифрой 1 отмечен электронный блок со снятыми верхней и нижней крышками, цифрой 2 – механизм перемещения с закрепленным объектом контроля. Направляющие

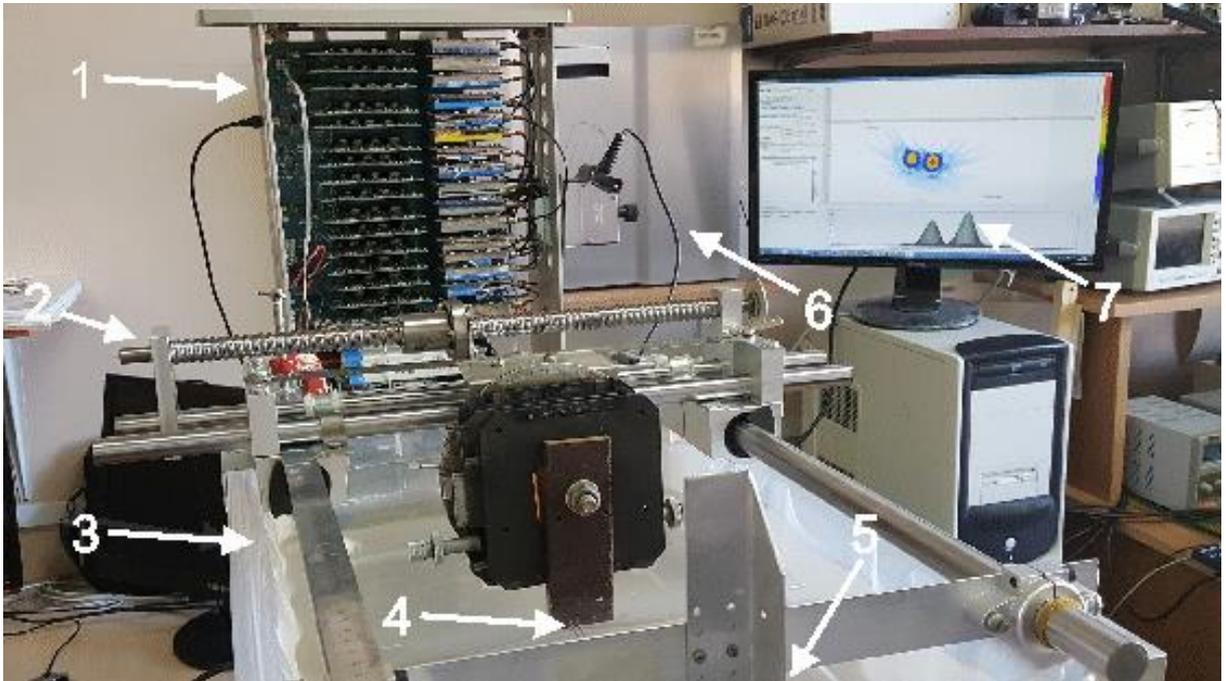


Рисунок 3.15 – Общий вид экспериментальной установки

механизма перемещения позволяют позиционировать положение контролируемого объекта в двух измерениях. Цифрой 3 обозначен резервуар с водой, где размещаются объекты контроля. Цифрой 4 отмечен держатель макетов дефекта, которые используются в эксперименте. Цифра 5 указывает на кронштейн с закреплённой на нём акустической решёткой. Цифрой 6 обозначен компьютер, к которому подключена установка «УУК-16». Цифрой 7 обозначен монитор, на экране которого видно главное окно интерфейса программного обеспечения.

Акустическая антенная решётка показана на рисунке 3.16. Общая рабочая длина составляет 12,8 мм, резонансная частота равна 2 МГц. Решётка изготовлена фирмой «OLIMPUS», Китай. Фирменное наименование – «2L16 – A1».

Объект контроля, который служил моделью дефекта, изображён на рисунке 3.17. Он представляет собой стальные стержни, диаметром 1,6 мм. В ходе эксперимента поверхностью отражения служил плоский торец стержней, нормально ориентированный к оси симметрии антенной решётки. Можно

утверждать, что отражателем является абсолютно непрозрачный для данного акустического излучения круг, диаметром 1,6 мм.

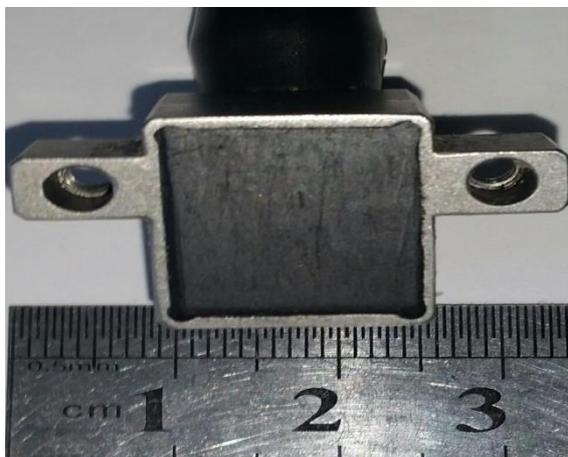


Рисунок 3.16 – Акустическая решётка

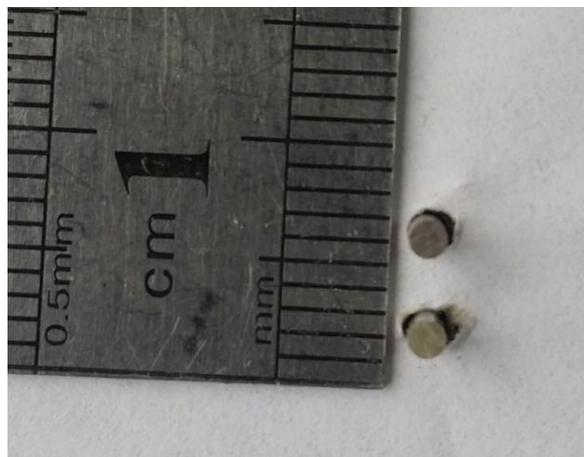
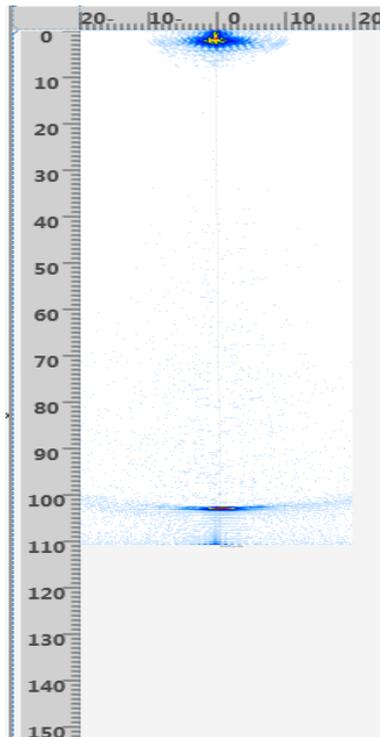


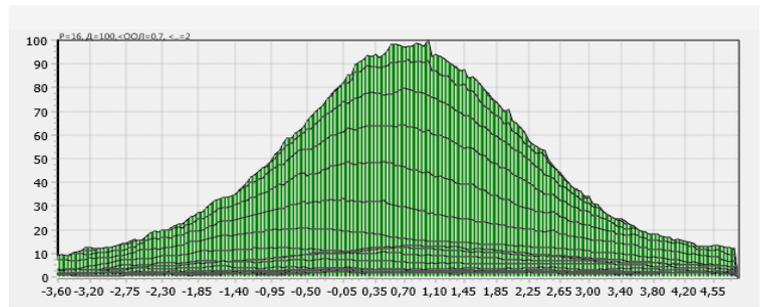
Рисунок 3.17 – Модель объекта

На рисунке 3.18 показан результат эксперимента по обнаружению модели дефекта в виде одного стержня, расположенного на расстоянии 100 мм на оси симметрии решётки. На рисунке 3.18а изображён фрагмент скриншота главного окна программного интерфейса дефектоскопа, на котором видна реконструкция изображения акустического тракта. Сверху и слева показаны линейки с ценой деления один миллиметр. В верхней части изображения возле нулевых отметок по вертикали и по горизонтали располагается помеховый сигнал от импульса зондирования. Это, так называемая, «мёртвая зона», в которой фиксация дефектов невозможна. Ниже, на дальности, примерно, 100 мм расположен «отклик» от модели дефекта. На рисунке 3.18б в увеличенном масштабе показано поперечное сечение по отношению к направлению излучения сигнала-отклика. Видно, что ширина по уровню 0,5 составляет примерно 3,35 мм.

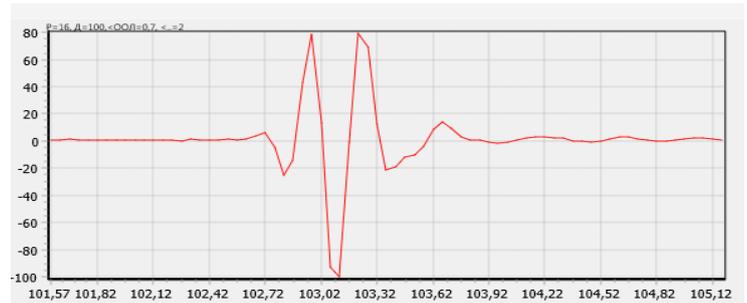
Вычисления по формуле (2.25) приводят к результату, равному 3,49 мм. Таким образом, подтверждается допустимая точность вычислений полученных аналитических выражений и, кроме того, устанавливается факт несоответствия



а



б



в

Рисунок 3.18 – Один дефект на расстоянии 100 мм.

размеров модели дефекта и его реконструированного акустического изображения.

На рисунке 3.18в показано в увеличенном масштабе продольное сечение реконструированного изображения модели дефекта. Форма реконструированного сигнала-отклика совпадает, в пределах погрешности квантования, с формой зондирующего сигнала.

Сигналы-отклики всех 16 каналов показаны на рисунке 3.19. На осциллограммах заметно некоторое различие амплитудных значений, которое, тем не менее, не оказывает заметного влияния на конечный результат. Заметны также аппаратные и эфирные помехи, обусловленные работой тактового генератора АЦП и мобильной радиосвязью. В ходе эксперимента установлено, что уровень помех, соответствующий соотношению сигнал/помеха, превышающему 3, практически не влияет на вид реконструированного изображения.

В рамках проведения экспериментальных исследований выполнено

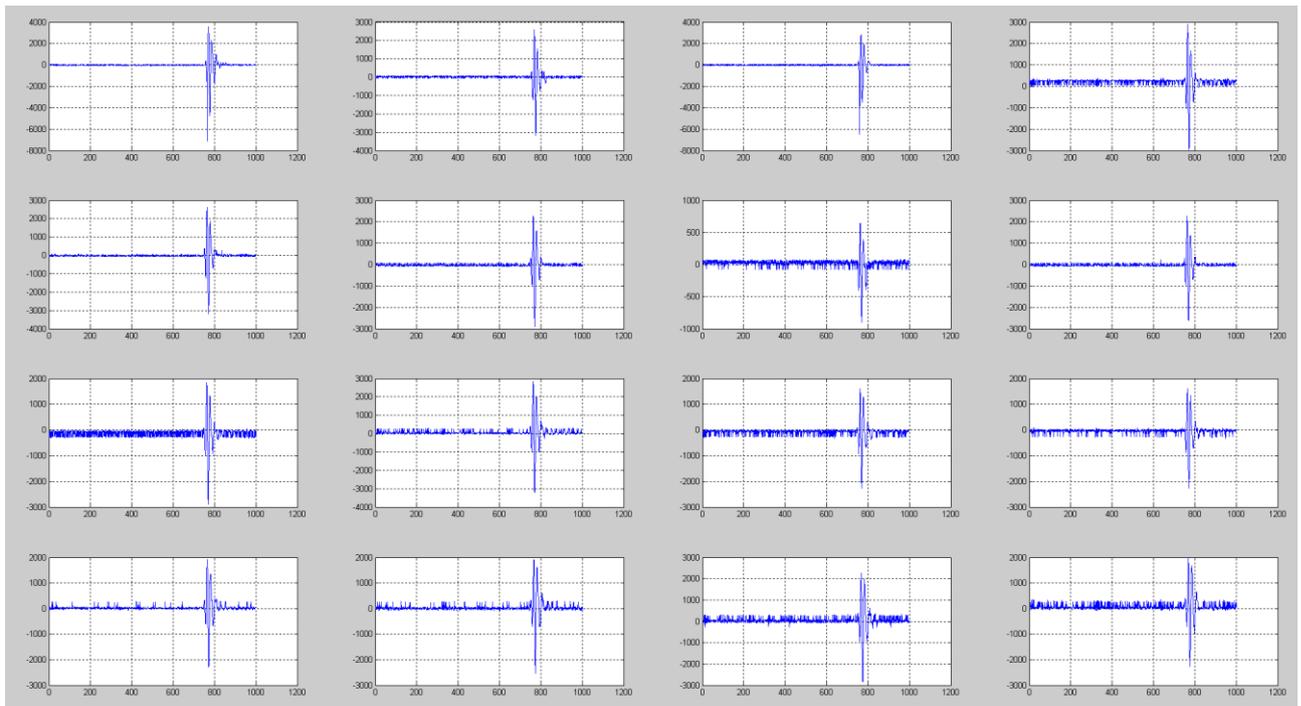


Рисунок 3.19 – А-сканы 16-ти каналов.

зондирование зоны контроля, в которой модель дефекта размещалась на различных расстояниях в диапазоне от 40 мм до 140 мм. Шаг перемещения составлял 20 мм. На рисунке 3.20 показаны фрагменты скриншотов экрана программного интерфейса с реконструированными изображениями этих положений дефекта. Моделью дефекта служит одиночный металлический стержень, закреплённый в ориентации, когда торцовая поверхность параллельна образующей линейной антенной решётки. Таким образом, зондирующее акустическое излучение падало, практически, нормально к отражающей поверхности.

На изображениях отчётливо читаются декартовы координаты размещения модели дефекта. Реконструированное изображение в виде цветового пятна весьма точно последовательно перемещается на 20 мм. Продольный размер этого изображения определяется длительностью зондирующего сигнала, а поперечный размер – шириной диаграммы направленности по некоторому уровню, зависящему от контрастности. Хорошо заметно увеличение этого размера с увеличением дальности. Однако угол, под которым видны края образа из центра

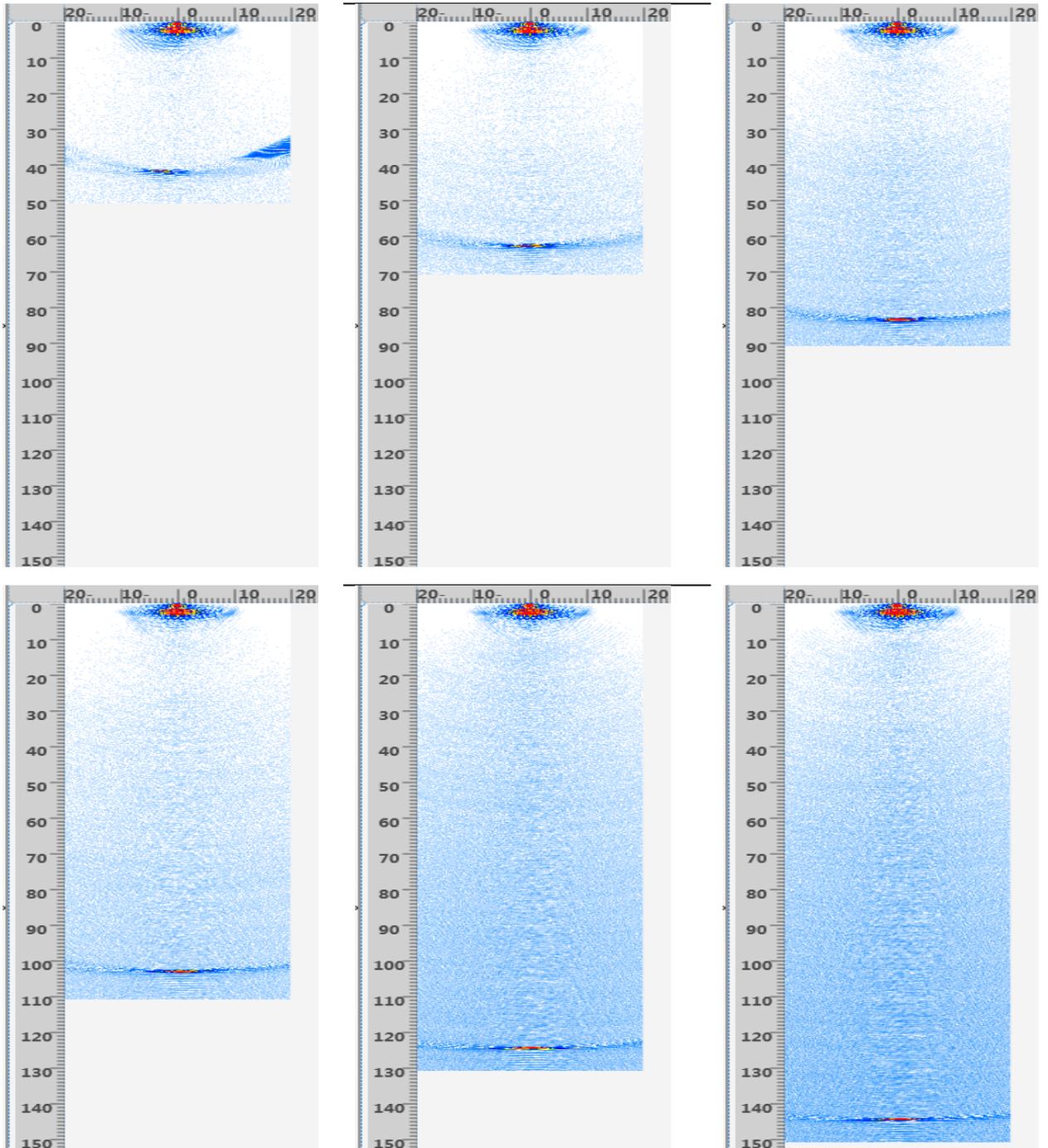


Рисунок 3.20 – Фрагменты скриншотов измерения дальности.

решётки, остаётся неизменным.

Заметно возрастание фона помех вследствие снижения уровня полезного сигнала при увеличении расстояния. Кроме основного лепестка диаграммы направленности видны также боковые лепестки в виде дугообразного продолжения. Следует отметить наличие систематической ошибки расположения

модели дефекта и его реконструированного изображения. Это связано с двумя факторами. Во-первых, неточное определение скорости ультразвука в водной среде приводит к нарастанию ошибки с увеличением расстояния. Во-вторых, максимум отклика реконструированного изображения достигается не мгновенно с появлением сигнала, а примерно через один период колебаний. Длина волны акустического излучения на частоте 2 МГц в воде составляет приблизительно 0,75 мм. Именно эта величина систематически присуща данному эксперименту.

Следующий цикл экспериментальных исследований выполнен с целью анализа закономерностей реконструкции изображений, полученных с помощью метода TFM, при изменении положения модели дефекта в направлении, параллельном образующей линейной антенной решётки. Дальность до объекта контроля при этом оставалась неизменной и равной 100 мм. Результаты испытаний показаны на рисунке 3.21. На нём изображены фрагменты скриншотов в последовательном порядке при изменении расстояния от оси симметрии решётки до одиночной модели дефекта в диапазоне от нуля до 20 мм. Шаг перемещения составил примерно 4 мм.

На рисунке 3.21 видно, что реконструированный образ модели дефекта также смещается на 4 мм. Данный шаг сохраняется во всём диапазоне перемещений. Можно сделать вывод об очень слабой зависимости погрешности определения декартовых координат модели дефекта от его положения в зоне контроля.

На представленном рисунке наблюдается уменьшение горизонтального размера образа отражённого сигнала. Одновременно снижается контрастность изображения. И то и другое указывает на заметное уменьшение амплитуды реконструированного сигнала-отклика. Аналогичные эксперименты по смещению модели дефекта влево демонстрируют такие же результаты. Поэтому они в данной работе не приведены.

Расчёты показывают, что крайне правое положение модели дефекта находится под углом приблизительно  $11,5^\circ$  относительно оси симметрии

антенной решётки. Тогда, с учётом симметрии, рабочий сектор зоны контроля

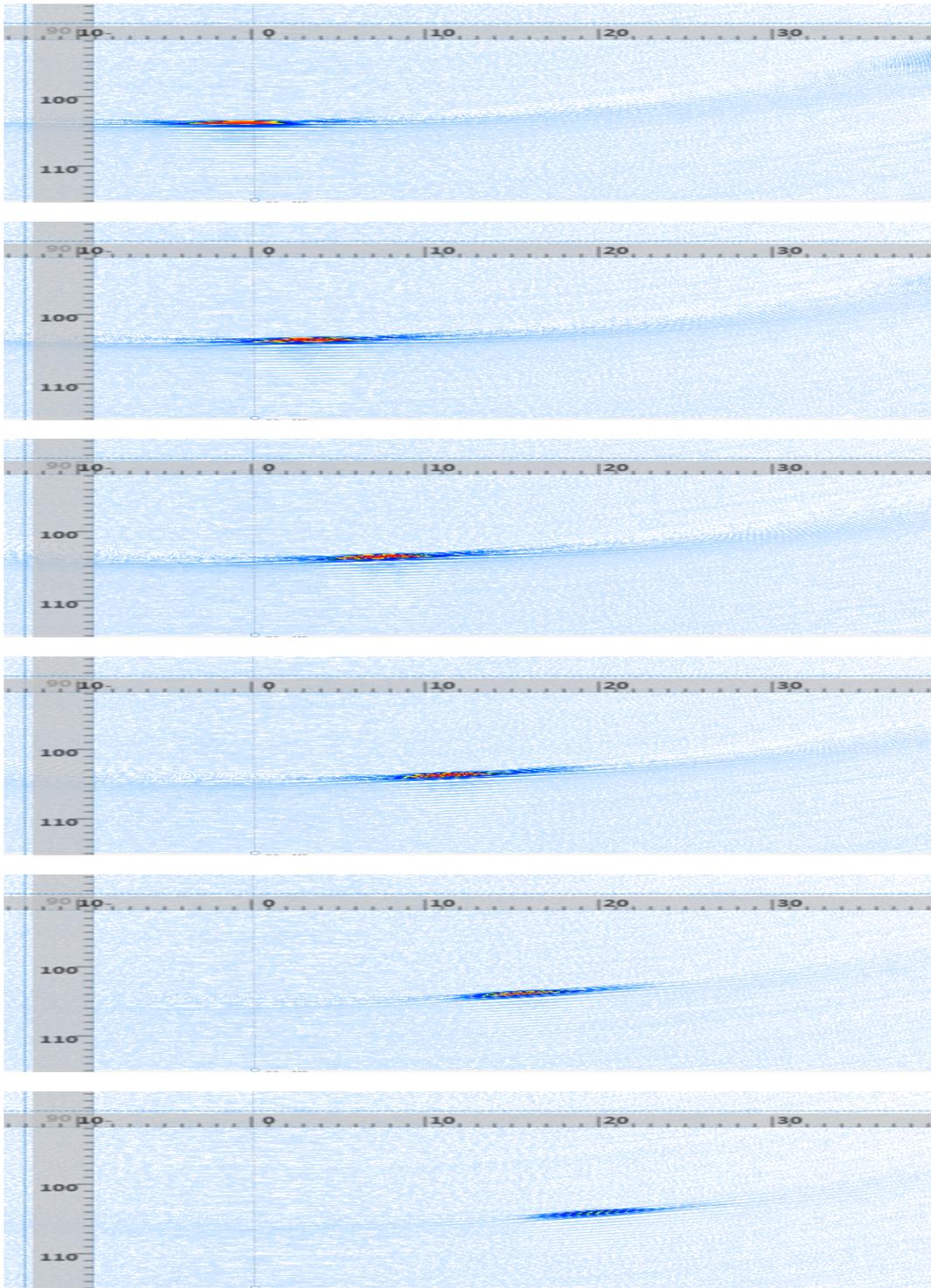


Рисунок 3.21 – Фрагменты скриншотов при угловом смещении объекта

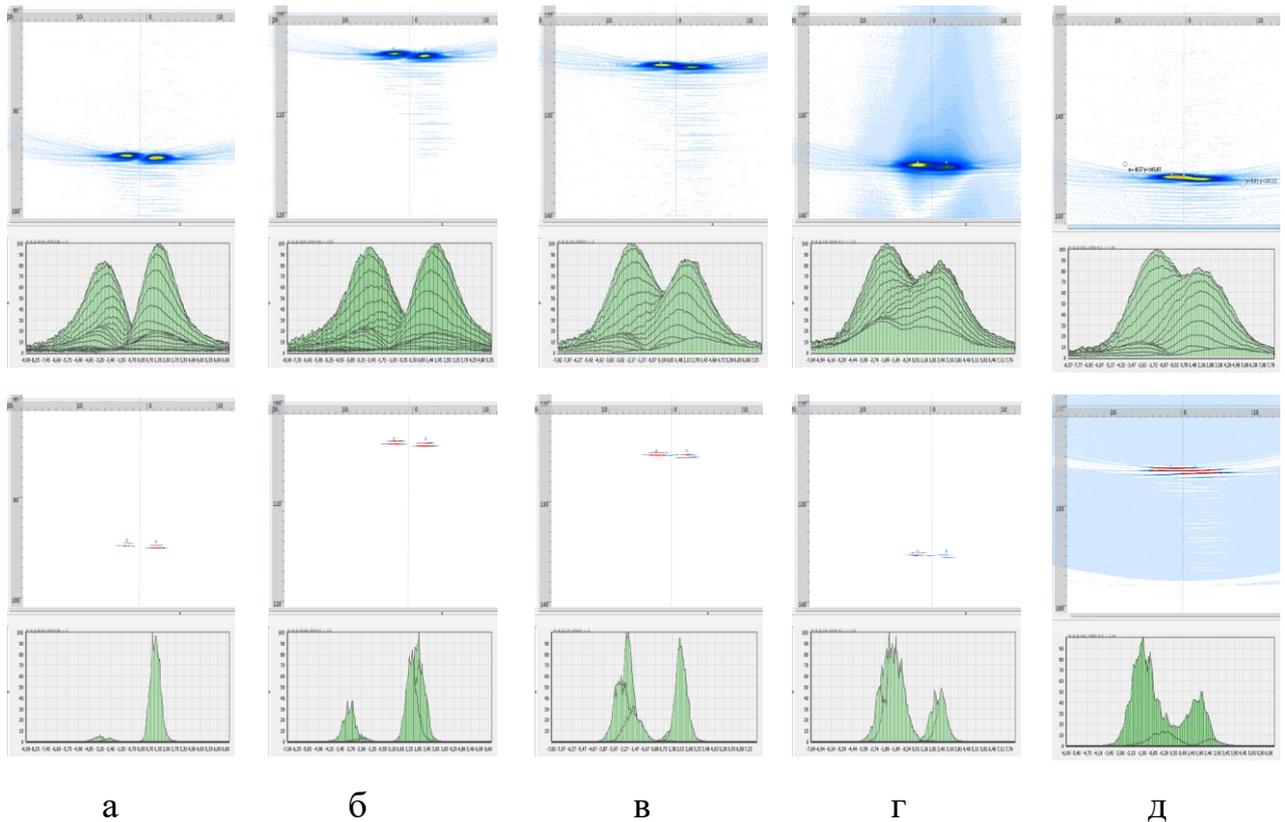
будет составлять не менее  $23^\circ$ . При этом наблюдается уверенное обнаружение дефектов, сравнимых по порядку величины с длиной волны излучения. Можно утверждать, что сделанный ранее вывод об ограничении рабочего сектора зоны

контроля диапазоном углов от минус  $15^\circ$  до  $+15^\circ$  относительно оси симметрии антенной решётки, вполне правомерен.

Ещё один цикл экспериментальных исследований непосредственно касался оценки разрешающей способности аппаратуры, использующей метод TFM, на основании эмпирического критерия Релея. На рисунке 3.22 приведены результаты данных исследований.

В процессе эксперимента фронтальное расстояние между дефектами сохранялось постоянным и равным 5 мм. Дальность расположения антенной решётки от каждого из них была одинаковой, но последовательно изменялась в каждом сеансе реконструкции. Столбцы изображений на рисунке 3.22 в последовательности слева направо соответствует набору расстояний 94 мм, 103 мм, 120 мм, 130 мм, 140 мм. Угловое расстояние между моделями дефектов, измеренное относительно центра антенной решётки, соответственно составляет  $3^\circ$ ,  $2,8^\circ$ ,  $2,4^\circ$ ,  $2,2^\circ$ ,  $2^\circ$ . Верхний ряд рисунка 3.22 представляет вид «сверху» реконструированного изображения зоны контроля. Вертикальная линейка позволяет убедиться в том, что указанная комбинация моделей дефектов действительно расположена на декларированных выше расстояниях. Второй ряд сверху представляет собой сечение каждого акустического изображения, в плоскости, параллельной образующей антенной решётки, т.е. перпендикулярно направлению распространения ультразвукового луча. Эти первые два ряда иллюстрируют аддитивную обработку парциальной информации. На двух нижних рядах изображений рисунка 3.22 показаны результаты мультипликативной обработки.

Расчёт разрешающей способности, основанной на критерии Рэлея, произведённый с помощью аналитического выражения (2.31) для гармонического режима работы дает значение, равное  $2,55^\circ$ . Анализ экспериментальных данных, представленных во втором сверху ряду изображений рисунка 3.22, показывает, что наибольшим соответствием критерию Рэлея обладает изображение, расположенное в середине горизонтального ряда и соответствующее угловому



а б в г д

а – 90 мм, б – 103 мм, в – 120 мм, г – 130 мм, д – 140 мм.

Рисунок 3.22 – Фрагменты скриншотов двух моделей дефектов.

расстоянию, равному  $2,4^\circ$ . Незначительное расхождение экспериментальных и теоретических результатов является, по-видимому, следствием импульсного режима экспериментальных исследований.

Аналогичный вывод о соотношении теоретических и экспериментальных исследованиях можно сделать в результате анализа двух нижних рядов изображений рисунка 3.22. Очевидным является факт лучшей разрешающей способности при мультипликативной обработке исходных данных, хотя и незначительно. В данном случае, примерно, на 20%. Необходимо, также, отметить подавление меньших по амплитуде сигналов-откликов на реконструированном изображении зоны контроля. Происходит выделение самого большого дефекта.

Последняя группа измерений выполнена с целью подтверждения факта высокой чувствительности аппаратуры TFM по сравнению с традиционным одноканальным дефектоскопом. В качестве объекта контроля использовался

металлический шарик, диаметром 0,5 мм, закреплённый на конце иглы от медицинского шприца. Он показан на рисунке 3.23. Фотография сделана под микроскопом. Результаты эксперимента приведены на рисунке 3.24.

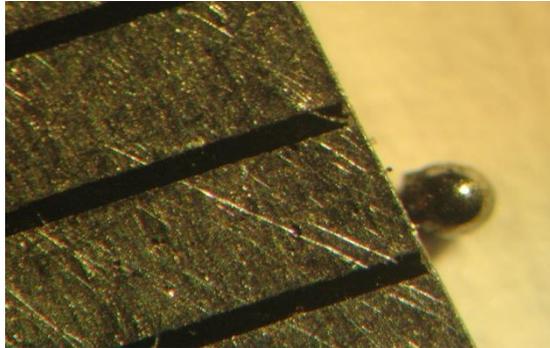


Рисунок 3.23 – Модель дефекта при измерении чувствительности

Верхний ряд изображений является реконструкцией зоны контроля. На левом изображении дефект расположен на расстоянии, примерно, 100 мм от антенной решётки и наблюдается весьма отчётливо. На среднем изображении эта же модель дефекта отнесена на расстояние 150 мм, что сопровождалось снижением амплитуды в несколько раз. Наконец, на правом изображении показан результат снижения уровня зондирующего сигнала в 4 раза.

Второй сверху ряд представляет сечение изображения модели дефекта.

Видно последовательное снижение соотношения сигнал/шум, которое, тем не менее, остаётся значительно больше единицы. В случае, который иллюстрируется правым изображением, SNR немного больше 10 дБ и дефект надёжно фиксируется.

Два нижних ряда представляют собой один из парциальных А-сканов, причём нижний ряд – это увеличенный временной масштаб того же А-скана. Эллипсы на рисунке показывают место расположения сигнала-отклика. На левом рисунке виден отражённый сигнал от держателя модели дефекта. На правой осциллограмме сигнал практически не выявляется, а его SNR имеет отрицательное значение, измеренное в децибелах.

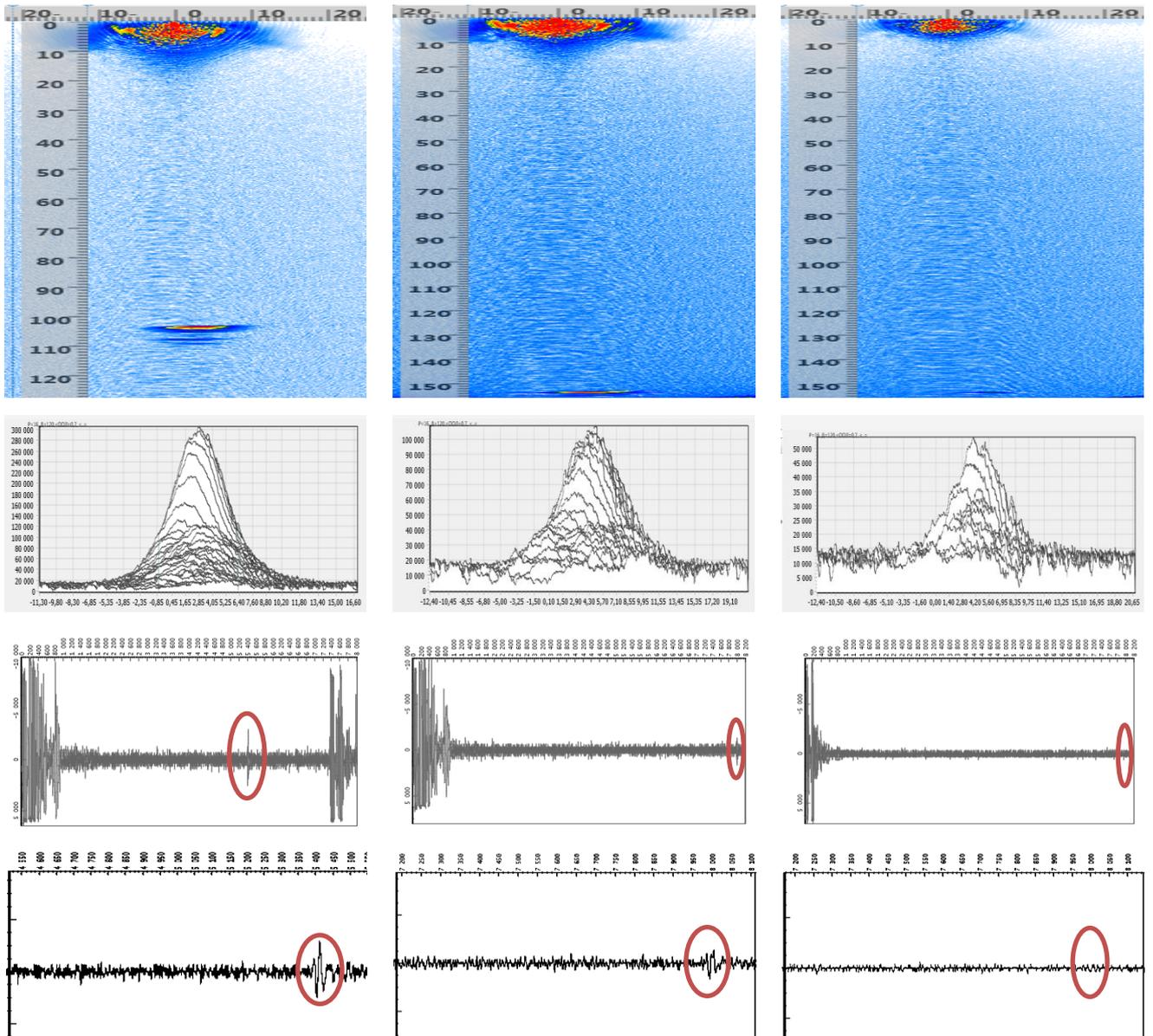


Рисунок 3.24 – Чувствительность реконструированного изображения.

Анализ результатов, представленных на рисунке 3.24, позволяет сделать вывод о высокой чувствительности аддитивного способа обработки парциальной информации метода TFM. Экспериментально показано, что выявляются даже те дефекты, сигнал-отклик которых имеет амплитуду меньшую, чем суммарный уровень тепловых шумов, внутренних аппаратурных помех и эфирных наводок.

### 3.4 Конструктивное исполнение установки контроля

Внешний вид ультразвуковой установки контроля (УУК - 16) показан на рисунке 3.25. В данном конструктиве сосредоточены все электронные узлы оригинальной разработки. В первую очередь, это 16 приёмо-излучающих блоков, включённых параллельно, т.е. работающих одновременно. Их можно увидеть на рисунке 3.15 в правой части фрагмента, обозначенного цифрой 1. Каждый из них заключен в индивидуальный электромагнитный экран с целью защиты от эфирных помех. На задней стенке блока установлен много контактный разъём фирмы LEMO, предназначенный для соединения с ультразвуковой антенной решёткой. На лицевой панели можно видеть линейку светодиодных индикаторов. Они позволяют оператору контролировать работоспособность аппаратуры без



Рисунок 3.25 – Внешний вид установки.

использования компьютера. В правом нижнем углу установлен тумблер включения питания.

В блоке также установлены 16 отдельных каналов АЦП, которые работают одновременно. Их можно видеть в левой части блока, показанного на рисунке 3.15 и отмеченного цифрой 1. Модульное исполнение электронного тракта ультразвуковой установки обеспечивает легкий доступ к каждому отдельному узлу схемы в процессе настройки.

Питание осуществляется от сети переменного тока 50 Гц, 220 вольт. Мощность потребления не превышает 30 ватт. Габариты блока составляют 480x300x120 мм. Вес прибора около 5 кг.

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие выводы и результаты.

- Разработана оригинальная структурная схема ультразвуковой установки контроля, реализующая методику TFM.

- Разработано программное обеспечение способа реконструкции изображений для контроля изделий ракетно-космического назначения.

- Установка защищена двумя патентами и государственной регистрацией программ для ЭВМ.

- Экспериментальные исследования подтвердили высокую чувствительность способа сканирования TFM и возможность применения его для целей дефектометрии.

- Создана действующая ультразвуковая установка УУК-16.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы получила дальнейшее развитие теория ультразвуковой томографии, основанная на методе TFM с аддитивным и мультипликативным алгоритмами обработки исходных данных антенной решетки. На основе созданной модели проведен анализ влияния формы и длительности эхо-сигнала на результат реконструкции томограммы зоны контроля, предельной чувствительности, разрешающей способности, отношения сигнал шум и точности определения координат залегания дефектов в объекте контроля. Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие выводы

1. Получено аналитическое выражение, описывающее PSF как аналог диаграммы направленности решётки в гармоническом режиме работы при использовании алгоритма TFM.

2. Получено аналитическое выражение для гармонического режима работы, описывающее разрешающую способность, определённую эмпирическим критерием Рэля.

3. Выявлены закономерности формирования дефектометрических характеристик для мультипликативного метода синтезирования акустического изображения с использованием алгоритма TFM.

4. Показаны границы применимости мультипликативного и аддитивного методов с точки зрения чувствительности дефектометрической аппаратуры.

5. Разработана компьютерная модель акустического тракта дефектоскопа с применением алгоритма TFM, которая позволила уточнить дефектометрические параметры в импульсном режиме работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Беликов Д.В. Обзор предложений экспертов научно-технической сферы по приоритетным направлениям развития новых материалов и нанотехнологий для создания перспективных образцов ВВСТ // Инновационные материалы и технологии : сборник докладов научно-практической конференции, 18 апреля 2017 г. – М.: Полигон, 2017. – 136 с..
- 2) Зубарев Я.В. Сегнетоэлектрические высокотемпературные материалы на основе слоистых соединений в качестве компонентов в устройствах аэрокосмической техники // Современные технологии и материалы новых поколений : Сборник трудов международной конференции с элементами научной школы для молодежи, 9-13 октября 2017 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – 347 с.
- 3) Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П.Гуляев, А.А.Гуляев. - 7-е изд.перераб. и доп. – М.:Альянс, 2011. – 644 с.
- 4) Валетов В.А. Основы производства радиоэлектронной аппаратуры: учебное пособие /В.А Валетов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007 – 112с
- 5) Гормаков А.Н., Воронина Н.А. Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы: Учебное пособие / А.Н. Гормаков, Н.А.Воронина. - Томск: Изд-во ТПУ, 2006. - 164 с.
- 6) ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 27 с.
- 7) Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1 – М.: Машиностроение, 2003 – 656 с.
- 8) ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2016. – 28 с.
- 9) Расщупкин В.П. Дефекты металла: Учебное пособие по дисциплине “Металловедение и ТКМ” / В.П Расщупкин., М.С Кoryтов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 37 с.
- 10) Мутылина И.Н. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / И.Н. Мутылина. – Владивосток: Из-во ДВГТУ, 2007. – 167 с.

- 11) Непрерывная разливка сортовой заготовки: Монография. / Смирнов А.Н. [и др.] – Донецк: Из-во Цифровая типография, 2012. – 417 с.
- 12) Малинкина Е.И., Образование трещин при термической обработке стальных изделий. – М.: Машиностроение, 1965. – 176 с.
- 13) Дефекты стали: Справочник / Под ред. С.М. Новокщеновой, М.И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. - 199 с
- 14) Калиниченко Н.П. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебное пособие / Н.П. Калиниченко, М.А. Васильева, А.Ю. Радостев; ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 71 с.
- 15) Мазур В.Л., Добронравов А.И., Чернов П.П. Предупреждение дефектов листового проката. – К.: Техника, 1986. – 141 с.
- 16) Атлас дефектов стали / Пер. с немецкого под редакцией М.Л.Бернштейна. –М.: Металлургия, 1979. –188 с.
- 17) Федеральные нормы и правила в области промышленной “Правила проведения экспертизы промышленной безопасности” : утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.11.2013 г. № 538
- 18) Иванов В.И., Власов И.Э Современные требования к методам и средствам неразрушающего контроля //Тезисы докладов 7-й Международной конференции “Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности” – М., 2008. – С. 129.
- 19) Федосов А.В. Гайнуллина Л.А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексные системы. - № 2, Т.11, - 2015. С. 73-78.
- 20) Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн. 1 – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
- 21) Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Изд-во Спектр, 2009. – 544 с: ил.

22) Пат. 251077 СССР. Устройство для ультразвукового контроля движущихся горячих металлических заготовок / В.Г.Шаханов и В.И.Никитин // Бюл. – 1981. – № 11. – С. 136.

23) Пат. 2011195 РФ. Способ ультразвукового контроля поверхностных дефектов в четырехгранных изделиях / В.Л. Сивирюк, И.В. Грамотник // Бюл. – 1994. – № 3. – С. 6.

24) Калиниченко Н.П. Визуальный и измерительный контроль : учебное пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня. / Н.П. Калиниченко, А.Н. Калиниченко. –Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 299 с.

25) Абрамов В.А. Визуальный и измерительный контроль сварных соединений. – М.: Спектр, 2014. – 124 с

26) Насонов В.А. Оценка допустимости эксплуатации сосудов давления с дефектами сварных соединений: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 21 с.

27) Инструкция по визуальному и измерительному контролю. РД 03-606-03. – М.:ДЕАН, 2010. – 312 с.

28) А.К.Гурвич, И.Н.Ермолов, С.Г.Сажин. Неразрушающий контроль. /под ред. В.В.Сухорукова. кн.1. Общие вопросы. Контроль проникающими веществами. – М.: Высшая школа, 1992 – 241 с. : ил.

29) Боровиков А.С., Прохоренко П.П., Дежкунов Н.В. Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии. –Минск : Наука и техника, 1983. – 256 с.: ил.

30) Сайфутдинов С.М. Капиллярный контроль: история и современное состояние //В мире неразрушающего контроля. – 2008. - №. 1. – с. 14-18

31) Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988 г. – 420 с.

32) Вавилов В.П. Индукционный ИК термографический контроль усталостных трещин в массивных стальных изделиях / В.П. Вавилов, Д.А. Нестерук, Т.С. Домненко // Технология машиностроения. - 2015. - № 1. - С. 48-51

33) Мойсейчик Е.А., Мойсейчик Е.К. Выявление дефектов в стальных элементах конструкций с использованием инфракрасных технологий неразрушающего контроля // Проблемы механики современных машин. – 2012. – Т. 3. – С. 5-10

34) Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика : учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 104 с.

35) Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Контроль качества сварочных работ. – М.: Высшая школа, 1981. – 144 с

36) Шелихов, Г. С. Магнитопорошковый контроль за 45 лет / Г. С. Шелихов // Контроль. Диагностика. - 2009. – N 4. – С. 30-34.

37) Горкунов Э.С. Магнитопорошковая дефектоскопия и магнитная структуроскопия. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 140 с

38) Щербинин, В. Е. Магнитный контроль качества металлов / В. Е. Щербинин, Э. С. Горкунов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 264 с.

39) Толмачев И.И. Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие /. И.И. Толмачев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 216 с.

40) Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Ключева, т.2, Кн. 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.

41) Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М. : Спектр, 2014 . – 288 с.

42) Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий : монография / А. И. Потапов, В. А. Сясько, П. В. Соломенчук, А. Е. Ивкин, Д. Н. Чертов, Т. 2: Электромагнитные и магнитные методы дефектоскопии и контроля свойств материалов. Санкт-Петербург : Нестор-История –2015. – 438 с. : ил.

43) Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Ключева, т.1, Кн. 2: Радиационный контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.

44) Приборы радиационного неразрушающего контроля [Электронный ресурс]// СпецТехноРесурс. – Режим доступа: <http://www.measurement.ru/gk/>

nerazrush /04.htm, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

45) Федеральный каталог высокотехнологичного оборудования и объектов научного потенциала России [Электронный ресурс]//NST.- Режим доступа: <https://www.xn----7sbambaiqfm.xn--p1ai/index.php>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

46) Радиографический контроль [Электронный ресурс]//НТЦ «Эксперт» - Режим доступа: <http://www.ntcexpert.ru/rk>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

47) Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Клюева, т.3: Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение,2003. – 864 с.

48) Использование фазированных антенных решеток в сочетании с виртуальной динамической фокусировкой для ультразвуковой томографии металлоконструкций / Алехин С.Г. [и др.] // Контроль. Диагностика. –2008. –№ 7. С. 42-44

49) Пьянков В.А., Круглов К.П. Обзор: состояние и пути совершенствования ультразвукового контроля заготовок дисков из гранулируемых сплавов // В мире неразрушающего контроля. –2012. –№ 1 – С. 82-84

50) Базулин Е. Г. Контроль заварок Ду800 антенными решетками методом тройного сканирования // Дефектоскопия – 2010 – № 7 – С. 30 - 41.

51) Особенности применения метода <фокусировка в точку> при ультразвуковой томографии изделий из сложно структурных материалов / Качанов В.К. [и др.] // Дефектоскопия – 2010 – № 4 –С. 30-45

52) Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия – 2014 – № 3 – С. 12-22

53) Системы автоматизированного контроля [Электронный ресурс]//НТЦ НК "КРОПУС" - Режим доступа: <http://www.kropus.ru/products/systems/>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

54) Установки автоматизированного контроля проката [Электронный ресурс]// ЗАО "Ультракraft" - Режим доступа: <http://www.ultrakraft.ru/ru/> , свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

55) Автоматизированный контроль [Электронный ресурс]//АС - Режим доступа: <http://aprioris.ru/shop/shop/ultra/avtomatizirovannyij-kontrol/> , свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

56) Автоматизированные линии УЗ контроля [Электронный ресурс]//ООО "Неразрушающий контроль" - Режим доступа: <http://www.ncontrol.ru/catalog/Ultrazvukovoj-kontrol/Avtomatizirovannye-linii-UZ-kontrolya> , свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

57) Автоматизированные установки для неразрушающего контроля [Электронный ресурс]//АО "НПО "Интротест" - Режим доступа: <http://www.introtest.com/index.php?page=products&pid=170> , свободный.- Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

58) Автоматизированные установки УЗК [Электронный ресурс]//ООО АНК - Режим доступа: <http://ank-ndt.ru/produkcziya/ultrazvukovoj-kontrol/avtomatizirovannye-linii-ultrazvukovogo-kontrolya/>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

59) Алешин Н.П. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ / Н.П. Алешин, М. В. Григорьев, Н. А. Щипаков // Инженерный вестник – 2015 –№1 – С. 533 - 538.

60) Самокрутов А.А. Ультразвуковая эхо-томография металлоконструкций. Состояние и тенденции / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2007. -Т. 73. - № 1. - С. 50-59.

61) Козлов В.Н. Акустическая В- и С-томография крупноструктурных материалов импульсным эхометодом / В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, Н.Н. Яковлев, А.В. Ковалев, В.Г. Шевалдыкин // Приборы и системы управления – 1989. – №7. – с. 21-23

62) Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении – СПб.: СВЕН, 2007. – 296 с.

63) Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М.Баранов, А.И.Гриценко, А.М.Карасевич и др. – М.: Наука, 1998. – 304 с.

64) Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2006. – 368 с.

65) **iSonic AUT 16/32** [Электронный ресурс]//Ndt Supply - Режим доступа: <http://ndtsupply.com/sonotron-isonic-aut-16/32>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

66) **DIO 1000 PA** [Электронный ресурс]//STARMANS - Режим доступа: [https://www.expertnk.ru/catalog/ultrasound/flaw\\_high\\_freq/dio1000pa.html](https://www.expertnk.ru/catalog/ultrasound/flaw_high_freq/dio1000pa.html), свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

67) Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Том 3: Ультразвуковой контроль. / Под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с: ил.

68) ГОСТ 23829-85 Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения

69) Буй Ван Донг. Акустический контроль композитных материалов малоракурсным теневым методом : дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 145 с.

70) Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений – М.: Изд-во "Тиссо", 2005. – 326 с.

71) **УСД-60** [Электронный ресурс]//НПЦ НК Кропес - Режим доступа: <http://www.kropus.ru/products/usound/ucd60.php>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

72) **УД22-УМ** [Электронный ресурс]//Kip-Guide - Режим доступа: <http://www.kip-guide.ru/info/5744-76>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

73) **УД2Р-ПМ** [Электронный ресурс]//НПЦ НК Кропес - Режим доступа: <http://www.kropus.ru/products/usound/ud2np.php>, свободный.- Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

74) USN 60 [Электронный ресурс]//Geo NDT - Режим доступа: <http://www.geo-ndt.ru/pribor-203-yltrazvykovoii-defektoskop-usn-60.htm>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

75) RapidScan 2 [Электронный ресурс]//ГК НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ - Режим доступа: <http://sonatest.nt-rt.ru/images/manuals/Rapidscan.pdf>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

76) DryScan [Электронный ресурс]//Системы неразрушающего контроля - Режим доступа: <http://pvp-snk.ru/ultrazvukovoy-defektoskop-dryscan-410> , свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

77) MasterScan 350M/380M [Электронный ресурс]//Панатест Режим доступа: <http://www.panatest.ru/items?id=100030>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

78) Преобразователи для дефектоскопии. [Электронный ресурс]// ЗАО "Константа".- Режим доступа: [www.constant-us.com/catalog/pep-def/](http://www.constant-us.com/catalog/pep-def/) , свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

79) УД4-76. [Электронный ресурс]//НПП промприбор - Режим доступа: <https://www.ndtprompribor.ru/product/ultrasonic-testing/ud4-76-ultrasonic-flaw-detector-tomograph> , свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

80) Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1965. – 416с.

81) Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия – М.: "Металлургия" – 1974.

82) Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки / Контроль. Диагностика – 2011 – № 10 – с. 63-69.

83) Пьянков В.А., Михайлов И.И. Автоматизированная система ультразвукового контроля дисков с применением фазированных решеток / Дефектоскопия – 2005 – №9 – С. 3-9.

84) Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки / Дефектоскопия – 2011 – № 1 – С. 21-38.

85) Introduction to phased array ultrasonic technology applications: R/D Tech Guideline: Guideline coordinator Noel Dube. – Quebec, Canada: R/D Tech Inc., 2004, – 348 p.

86) Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / Воскресенский Д.И. [и др.] – М. : Радио и связь, 1981. – 744 с.

87) A1040-MIRA [Электронный ресурс]//АКС - Режим доступа: <http://www.acsys.ru/production/detail/a1040-mira/>, свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

88) A1050 PlaneScan [Электронный ресурс]//АКС - Режим доступа: <http://www.acsys.ru/production/detail/a1050-planescan/>, свободный. - Загол. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

89) A1550 IntroVisor [Электронный ресурс]//АКС - Режим доступа: <http://www.acsys.ru/production/detail/a1550-introvisor/>, свободный. - Загол. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

90) Автоматизированные системы Tecnatom [Электронный ресурс]//Локус - Режим доступа: [http://www.locus.spb.ru/produkcija\\_i\\_uslugi/ultrazvukovoj\\_kontrol/](http://www.locus.spb.ru/produkcija_i_uslugi/ultrazvukovoj_kontrol/)

91) [robotizirovannye\\_sistemy\\_tecnatom/](http://www.locus.spb.ru/produkcija_i_uslugi/ultrazvukovoj_kontrol/robotizirovannye_sistemy_tecnatom/), свободный. - Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2017).

92) Ultrasonic Arrays for Quantitative Nondestructive Testing an Engineering Approach / Bolotina I. O. , Djyakina M. E. , Krening M. K. , Mokhr F. , Reddi K. M. , Soldatov A. I. , Zhantlesov E. // Russian Journal of Nondestructive Testing . - 2013 - Vol. 49 - №. 3. - p. 145-158 .

93) Измерение фактической высоты непроваров в обносторонних стыковых сварных соединениях с помощью ультразвуковых дефектоскопов с антенными решетками / Коновалов Н.Н., Мелешко Н.В. // В мире неразрушающего контроля. –2013. –№3. –с.45–47.

94) Berke M., Bechler J. Ultrasonic imaging in automatic and manual testing. // ECNDT 2006 - We.3.1.5

95) Mustafa Karaman, Pai Chi Li, Matthew O'Donnell. Synthetic Aperture Imaging for Small Scale Systems. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1995, V. 42, Issue 3, pp. 429-442.

96) A. Elgarem Multidepth synthetic aperture processing of ultrasonic data. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control , 1989, Volume: 36, Issue: 3 , pp. 384 - 385.

97) Hunter, A.J., Drinkwater, B.W. and Wilcox, P.D. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array. // Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, 2008; 55(11):2450-2462

98) Thomenius, K. Evolution of Ultrasound Beamformers // IEEE Ultrasonics Symposium, 1996; 2, 1615-1622

99) Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справочник / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.

100) Chiao, R.Y. and Thomas, L.J. Analytical evaluation of sampled aperture ultrasonic imaging techniques for NDE. // Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, 1994; 41(4):484-493

101) Y. Labyed, L. Huang, Ultrasound time-reversal MUSIC imaging with diffraction and attenuation compensation // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Frequency Control 59 (2012) 2186-2200.

102) F.K. Gruber, E.A. Marengo, A.J. Devaney Time-reversal imaging with multiple signal classification considering multiple scattering between the targets, J. Acoust. Soc. Am. 115 (2004) 3042-3047.

103) E.A. Marengo, F.K. Gruber, F. Simonetti, Time-reversal MUSIC imaging of extended targets // IEEE Trans. Image Process. 16 (2007) 1967-1984.

104) R. Schmidt, Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. Anten. P. 34 (1986) 276-280.

105) J.W. Odendaal, E. Barnard, C.W.I. Pistorius, Two-dimensional super resolution radar imaging using the MUSIC algorithm // IEEE Trans. Anten. P. 42 (1994) 1386-1391.

106) T. Iwata, Y. Goto, H. Susaki, Application of the multiple signal classification (MUSIC) method for one-pulse burst-echo Doppler sonar data // Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 2178-2184.

107) C. Prada, J.-L. Thomas, Experimental subwavelength localization of scatterers by decomposition of the time reversal operator interpreted as a covariance matrix // J. Acoust. Soc. Am. 114 (2003) 235-243.

108) M. Davy, J.G. Minonzio, J. de Rosny, C. Prada, M. Fink, Influence of noise on subwavelength imaging of two close scatterers using time reversal method: theory and experiments // Prog. Electromagn. Res. 98 (2009) 333-358.

109) E.G. Asgedom, L.-J. Gelius, A. Austeng, S. Holm, M. Tygel, Time-reversal multiple signal classification in case of noise: a phase-coherent approach // J. Acoust. Soc. Am. 130 (2011) 2024-2034.

110) Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику (2-е издание). - М.: Физматлит, 1959. – 572 с.

111) Скучик Е. Основы акустики. В 2 т. Т. 1. – М.: Мир, 1976. – 520 с.

112) Скучик Е. Основы акустики. В 2 т. Т. 2. – М.: Мир, 1976. – 542 с.

113) Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. – М.: Советское радио, 1974. – 536 с.

114) Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. – М.; Связьиздат, 1962. – 815 с.

115) Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. – М.: Советское радио, 1974. – 224 с.

116) Зелкин Е.Г., Петрова Р.Л. Линзовые антенны. – М.: Советское радио, 1974. – 275 с.

117) Зелкин Е.Г. Построение излучающей системы по заданной диаграмме направленности. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.

- 118) Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решёток; Пер. с англ. под ред. А.Ф. Чаплина. – М.: Мир, 1974. – 455 с.
- 119) G.V.Airy. Mathematical Tracts On The Indulatory Theory Of Optics. - Cambridge. – 1842. – 412 p.
- 120) Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров; Пер. с франц. под ред. К.С.Шифрина.- М.: Наука, 1965. – 780 с.
- 121) Справочник по элементам радиоэлектронных устройств; Под ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. – М.: Энергия, 1977. – 576 с.
- 122) Справочник по радиолокации; Пер. с англ. / Под ред. М. Сколника. Т. 4. – М.: Советское радио, 1978. – 376 с.
- 123) Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Советское радио, 1975. – 317 с.
- 124) Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. – М.: Наука, 1976. – 392 с.
- 125) Ультразвуковые преобразователи / Под ред. Е. Кикучи; Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 424 с.
- 126) Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
- 127) Стретт Дж. В. (лорд Рэлей) Теория звука. – М.: ГИТТЛ, 1955. – Т. 1. – 503 с.
- 128) Стретт Дж. В. (лорд Рэлей) Теория звука. – М.: ГИТТЛ, 1955. – Т. 2. – 474 с.
- 129) Воскресенский Д.И., Канащенков А.И. Активные фазированные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2004, 488 с.
- 130) С.В.Кунегин. Системы передачи информации. Курс лекций. М., 1997, - 317 с
- 131) И.М.Гвоздева. Сравнительная оценка помехоустойчивости каналов аддитивной и мультипликативной обработки акустических сигналов // Авиационно-космическая техника и технология, 2014, №6, с80-83.

132) Верлань, А. Ф. Мультипликативная обработка угловых спектров акустических когерентных изображений [Текст] / А. Ф. Верлань, И. М. Гвоздева, // Электронное моделирование. – 2005. – Т. 27, №5. – С. 53 – 62

133) Корн Г. , Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) М.:Наука 1970. 720 с.

134) В.М.Вержбицкий. «Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения)». Москва «Высшая школа», 2001

135) Пат. 2532597 РФ. Способ визуализации ультразвуковой дефектоскопии трехмерного изделия / К.Г. Квасников, А.И. Солдатов // Бюл. – 2014. – № 31.

136) Пат. 2532606 РФ. Устройство визуализации ультразвуковой дефектоскопии трехмерного изделия / К.Г. Квасников, А.И. Солдатов // Бюл. – 2014. – № 31.

137) Квасников К.Г., Солдатов А.И. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017612380 от 20.02.2017. Реконструкция томограммы зоны контроля методом аддитивной и мультипликативной цифровой фокусировки.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

## АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Квасникова К.Г.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник управления персоналом АО «НПЦ «Полюс» Шульгин Е.М., составили настоящий акт в том, что в АО «НПЦ «Полюс» внедрен ультразвуковой дефектоскоп для неразрушающего контроля корпусных изделий РЭА, в котором использованы результаты научных исследований по диссертационной работе Квасникова К.Г.:

1. Способ визуализации ультразвуковой дефектоскопии трехмерного изделия, обеспечивающая в сравнении с известными аналогами лучшие метрологические характеристики и защищенная патентом РФ №.2532597
2. Устройство визуализации ультразвуковой дефектоскопии трехмерного изделия, защищенное патентом РФ №2532606
3. Методика контроля заготовок для производства корпусных изделий РЭА

От АО «НПЦ «Полюс»  
начальник управления персоналом \_\_\_\_\_ (Шульгин Е.М.)



# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)



Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia  
Tel. (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,  
Fax (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):  
02069303,  
Company Number: 1027000890168,  
VAT / KPP (Code of Reason for Registration)  
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (ТПУ)  
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия  
тел.: (3822) 60 63 33, (3822) 70 17 79,  
факс: (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОИПО 02069303, ОГРН 1027000890168,  
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИШНКБ ТПУ,  
д-р профессор,

В.Н.Бориков

» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Квасникова Константина Григорьевича

Комиссия в составе:

председатель: зав. кафедрой ПМЭ, к.ф.-м.н., доцент Губарев Ф.А., члены комиссии: доцент кафедры ПМЭ, Аристов А.А., доцент кафедры ПМЭ, к.т.н. Буркин Е.Ю. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Квасникова К.Г. «Акустический контроль фасонных отливок для изделий ракетно-космического применения», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, используются в учебном процессе на кафедре промышленной и медицинской электроники Томского политехнического университета в методических материалах дисциплины: «Электронные промышленные устройства», а также при выполнении магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами кафедры.

Председатель комиссии

Ф.А. Губарев

Члены комиссии

А.А. Аристов

Е.Ю. Буркин

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 532 606** <sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
G01N 29/04 (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013130229/28, 03.07.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
03.07.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.07.2013

(45) Опубликовано: 10.11.2014 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2458342C1, 10.08.2012. SU 1817019A1, 23.05.1993. SU 1746219A1, 07.07.1992. SU 983531A1, 23.12.1982. JP 2009153573A, 16.07.2009. US 2005054924A1, 10.03.2005

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр-кт Ленина, д. 30, ФГБОУ  
ВПО НИ ТПУ, отдел правовой охраны  
результатов интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

Солдатов Алексей Иванович (RU),  
Квасников Константин Григорьевич (RU),  
Солдатов Андрей Алексеевич (RU),  
Селезнев Антон Иванович (RU),  
Болотина Ирина Олеговна (RU),  
Сорокин Павел Владимирович (RU),  
Макаров Виктор Степанович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет" (RU)

(54) УСТРОЙСТВО УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

(57) Реферат:

Использование: для визуализации ультразвуковой дефектоскопии трехмерного изделия. Сущность изобретения заключается в том, что устройство ультразвуковой томографии содержит антенную решетку с  $n$  приемно-передающими элементами, каждый из которых соединен с выходом соответствующего генератора импульсов и входом соответствующего усилителя,  $n$  аналого-цифровых преобразователей соединены с соответствующими входами блока памяти реализации, количество выходов которого -  $N$  определено формулой  $N=n \cdot (n+1)/2$ . Выходы блока памяти реализации соединены с соответствующими входами вычислительного блока, связанного с индикатором через блок памяти изображений и с блоком накопительной

памяти. Входы синхронизации каждого генератора импульсов, блока памяти реализации, вычислительного блока и блока памяти изображений соединены с соответствующими выходами блока синхронизации. Блок временной регулировки чувствительности соединен с блоком синхронизации и всеми усилителями. Блок мультипликативной обработки соединен с вычислительным блоком и блоком накопительной памяти. К выходу каждого усилителя подключен детектор, выход которого связан с аналого-цифровым преобразователем. Технический результат: улучшение четкости визуализации полученного изображения контролируемого изделия за счет увеличения разрешающей способности. 5 ил., 1 табл.

RU 2 5 3 2 6 0 6 C 1

RU 2 5 3 2 6 0 6 C 1

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** (11) **2 532 597** (13) **C1**(51) МПК  
G01N 29/04 (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013130203/28, 03.07.2013

(24) Дата начала отчета срока действия патента:  
03.07.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.07.2013

(45) Опубликовано: 10.11.2014 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2008120366A, 10.12.2009. SU  
1817019A1, 23.05.1993. SU 1746219A1,  
07.07.1992. SU 983531A1, 23.12.1982. JP  
2009153573A, 16.07.2009. US 2005054924A1,  
10.03.2005

Адрес для переписки:

634050, г. Томск, пр-кт Ленина, д. 30, ФГБОУ  
ВПО НИ ТПУ, отдел правовой охраны  
результатов интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):

Солдатов Алексей Иванович (RU),  
Квасников Константин Григорьевич (RU),  
Солдатов Андрей Алексеевич (RU),  
Селезнев Антон Иванович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет" (RU)(54) СПОСОБ ВИЗУАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ТРЕХМЕРНОГО  
ИЗДЕЛИЯ

(57) Реферат:

Использование: для визуализации ультразвуковой дефектоскопии трехмерного изделия. Сущность изобретения заключается в том, что размещают пьезопреобразователи антенной решетки на объекте контроля, причем расстояние между соседними положениями антенной решетки, при которой получают одно В-изображение, превышает половину длины ультразвуковой волны, производят циклическое ультразвуковое облучение объекта контроля поочередно каждым пьезопреобразователем антенной решетки и одновременный прием ультразвуковых волн и их преобразование в электрические сигналы всеми преобразователями антенной решетки, усиливают и преобразуют в цифровые коды полученные электрические сигналы, проводят когерентную обработку сохраненных цифровых кодов, при которой разбивают объект контроля на локальные

области, которые рассматривают в качестве локального сосредоточенного отражающего элемента. Сохраненные цифровые коды сдвигают назад во времени на величину, равную времени распространения отраженной волны от рассматриваемой локальной области до соответствующего пьезопреобразователя антенной решетки. Затем перемножают сдвинутые во времени цифровые коды соответственно для каждой из локальных областей, сохраняют полученные произведения цифровых кодов и используют их для реконструкции изображения и его визуализации. Технический результат: улучшение четкости визуализации полученного изображения контролируемого изделия за счет увеличения разрешающей способности для раздельной визуализации нескольких рядом расположенных дефектов, а также увеличение отношения сигнал/шум. 3 ил.

RU 2 532 597 C1

RU 2 532 597 C1

# ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ


**RU 2017612380**

 ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства): 2017612380	Авторы: Солдатов Алексей Иванович (RU), Квасников Константин Григорьевич (RU)
Дата регистрации: 20.02.2017	Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)
Номер и дата поступления заявки: 2016664579 28.12.2016	
Дата публикации: 20.02.2017	
Контактные реквизиты: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ, отдел правовой охраны РИД; abataba@tpu.ru; +7 (3822) 563-950, +7 (3822) 606-494	

Название программы для ЭВМ:

**Реконструкция томограммы зоны контроля методом аддитивной и мультипликативной цифровой фокусировки**
**Реферат:**

Программа предназначена для визуализации внутренней структуры объекта в зоне контроля методом аддитивной и мультипликативной цифровой фокусировки с использованием акустических антенных решеток и может применяться в области неразрушающего контроля материалов и изделий. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет распределения амплитуды сигнала в зоне контроля; визуализацию внутренней структуры объекта в зоне контроля в виде томограммы; сохранение результатов расчета в базе данных.

<b>Тип реализующей ЭВМ:</b>	IBM PC-совмест. ПК
<b>Язык программирования:</b>	Delphi, C
<b>Вид и версия операционной системы:</b>	Windows XP/2003/Vista/7
<b>Объем программы для ЭВМ:</b>	473 Кб