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

На правах рукописи

Долматов Дмитрий Олегович

### РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАТРИЧНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ФАСОННЫХ ОТЛИВОК

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: к.т.н., доцент Седнев Д.А.

ТОМСК – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК
1.1 Формирование структуры стальных отливок 8
1.2 Характерные дефекты стальных отливок11
1.2.1 Несоответствие по геометрии 12
1.2.2 Дефекты поверхности 13
1.2.3 Несплошности в теле отливки
1.2.4 Включения
1.2.5 Несоответствия по структуре17
1.3 Неразрушающий контроль стальных отливок 18
1.3.1 Магнитный метод неразрушающего контроля 19
1.3.2 Вихретоковый метод неразрушающего контроля 20
1.3.3 Метод контроля проникающими веществами
1.3.4 Оптический метод контроля21
1.3.5 Радиационный метод контроля22
1.3.6 Акустический метод контроля24
1.4 Выводы к главе 1 27
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНЫХ АР
2.1 Ультразвуковая томография с использованием АР 28
2.2 Восстановление профиля поверхности объекта контроля по набору эхо- сигналов
2.3 Разработка алгоритма пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричной АР с расчетами во временной области
2.4 Разработка алгоритма пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричной АР с расчетами в частотной области
2.4.1 Совмещенный режим работы матричной АР 46
2.4.2 Работа матричной АР в режиме двойного сканирования 51
2.4.3 Пространственно-временная обработка с расчетами в частотной области с компенсацией непараллельности плоскости сканирования относительно поверхности объекта контроля

2.5 Выводы к главе 2
ГЛАВА 3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА CIVA UT
3.1 Описание программного пакета CIVA UT 57
3.2 Применение компьютерного моделирования для проведения сравнительного анализа алгоритмов пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР
3.3 Результаты пространственно-временной обработки результатов компьютерного моделирования с использованием предложенных алгоритмов 62
3.4 Выводы к главе 371
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ЭКСПЕРИМЕНТА
4.1 Описание контролируемого образца 72
4.2 Описание экспериментальной установки74
4.3 Методика снятия входных данных для пространственно-временной обработки
4.4 Процедура проведения пространственно-временной обработки ультразвуковых данных матричной АР 80
4.4 Выводы к главе 4
ГЛАВА 5 ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ
Выводы к главе 5 103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 105
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 107

#### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Обеспечение надёжности функционирования трубопроводов магистральных является актуальным вопросом газовой промышленности. Это обусловлено тем фактом, что аварии в подобных транспортных системах приводят значительным экономическим К И экологическим потерям. Одним из направлений обеспечения надежности функционирования магистральных газопроводов является техническая диагностика и неразрушающий контроль их компонентов на этапе производства.

При изготовлении компонентов газовых магистральных газопроводов широко применяется технология литья стали, которая используется, например, при производстве таких изделий ответственного назначения, как запорная арматура. В неразрушающем контроле отливок широкое распространение получил эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии по причине его высокой чувствительности и точности определения координат дефектов.

Ha сегодняшний актуальным вопросом день, развития эхо-метода ультразвукового неразрушающего контроля является разработка методик и аппаратуры, которые позволяют решать не только задачу дефектоскопии, но и задачу дефектометрии несплошностей в объектах контроля. В связи с этим, большой интерес представляют системы ультразвуковой томографии, работа которых основана на применении технологии цифровой фокусировки антенной (ЦФА). В подобных системах используются антенные решетки (АР), а также реализуется когерентная обработка сигналов с использованием специальных алгоритмов. Подобный подход позволяет получать результаты в форме изображений структуры объектов контроля, обладающих высокой разрешающей способностью и высоким отношением сигнал/шум.

Как правило, дефекты являются объемными и могут быть ориентированы в объекте контроля случайным образом. По этой причине, трехмерные изображения являются наиболее предпочтительной формой представления результатов томографии в целях решения задачи дефектометрии. В связи с этим, большой интерес представляет применение матричных АР в системах ультразвуковой томографии. Это обусловлено тем фактом, что при использовании подобных преобразователей представляется возможным получать объемные изображения высокого разрешения при проведении ручного и автоматизированного контроля. Таким образом, внедрение матричных АР в системы ультразвуковой томографии позволит повысить эффективность решения задачи дефектометрии, что является важным вопросом развития методов и аппаратуры ультразвукового неразрушающего контроля.

Ha сегодняшний AP день применение матричных В системах ультразвуковой томографии ограничено. Это обусловлено тем фактом, что при использовании подобных преобразователей для восстановления изображения структуры объекта контроля требуется обработка большого объема данных. Это серьезным образом ограничивает возможности по получению результатов в режиме реального времени. Таким образом, важным вопросом разработки и внедрения систем ультразвуковой томографии с матричными АР является подходов, обеспечивающих реализация специальных высокую скорость восстановления изображений.

Объект исследования: ультразвуковая томография.

<u>Предмет исследования</u>: средства пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР.

<u>Цель работы</u>: разработка средств пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии фасонных отливок с использованием матричных АР, обеспечивающих высокую скорость восстановления изображений структуры объекта контроля.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Моделирование процесса распространения ультразвуковых волн в ультразвуковой томографии с использованием матричных АР;

2. Проведение сравнительного анализа различных подходов в реализации алгоритмов пространственно-временной обработки с применением компьютерноного моделирования;

3. Разработка экспериментального программного обеспечения ультразвуковой томографии с использованием матричных АР, основой которого является разработанный алгоритм пространственно-временной обработки;

4. Создание экспериментального стенда для экспериментальной верификации алгоритма пространственно-временной обработки;

5. Экспериментальная верификация разработанного алгоритма пространственно-временной обработки.

#### Положения, выносимые на защиту:

1. Сравнительный анализ различных подходов в реализации алгоритмов, обеспечивающих процесс обработки информативных сигналов в ультразвуковой томографии с использованием матричных АР.

2. Алгоритмическое программное обеспечение для обработки сигналов для автоматизированной ультразвуковой томографии с использованием матричных АР.

3. Результаты экспериментальной верификации разработанного программного обеспечения.

#### Научная новизна исследования

В работе были получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен алгоритм пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР, основанный на применении метода общей средней точки.

2. Получены результаты сравнительного анализа различных подходов в реализации алгоритма пространственно-временной обработки с использованием программного пакета CIVA.

#### Практическая значимость исследования

Полученные результаты могут быть использованы в разработке систем промышленной ультразвуковой томографии с использованием матричных АР. Подобные системы способны обеспечить высокую производительность контроля изделий и получения синтезированных изображений высокого качества, что

позволит решать не только задачу дефектоскопии, но и задачу дефектометрии несплошностей в объекте контроля.

Практическая значимость также подтверждается выполнением автором в качестве соисполнителя следующих научно-исследовательских работ, посвященных разработке и применению ультразвуковых методов контроля:

1. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» – Разработка технологии интеллектуального производства ответственных пространственно-сложных фасонных деталей, соглашение о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г. № 14.578.21.0251

2. Государственное задание «Наука», проект №11.3683/ПЧ по теме «Разработка технологии исследования образцов из композитных материалов методами неразрушающего контроля», 2017-2019 гг.

3. Государственное задание «Наука», проект №11.6342.2017/БЧ по теме: «Разработка научно-технических основ акустического анализа микроструктуры анизотропных материалов», 2017-2019 гг.

4. Х/д №17706413348180000850/16.02.01-617/2018 от 24.12.2018 г. по теме "Разработка, создание и поставка комплектующих и специализированной оснастки для опытного образца роботизированной установки ультразвукового контроля" (ФГАОУ ВО НИ ТПУ - ООО "ИнТех"), 2018-2020 гг.

#### <u>Личный вклад автора</u>

Проведение сравнительного и экспериментального анализа различных подходов в реализации алгоритма пространственно-временной обработки; разработка компьютерной модели в программном пакете CIVA; разработка программного обеспечения для ультразвуковой томографии с использованием матричных AP; проведение экспериментальной верификация эффективности разработанного ПО.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

#### 1.1 Формирование структуры стальных отливок

Основными способами производства изделий из металла являются обработка давлением в горячем или холодном состоянии, резание, прессование порошков с последующим спеканием, сварка и литье. Среди всех методов изделий получения металлических литье является ОДНИМ ИЗ наиболее применимых способов формообразования деталей. Отливки широко применяются как изделия ответственного назначения в атомной промышленности, аэрокосмической и нефтегазовой отрасли. Широкое применение технологии литья обусловлено ее преимуществами:

1. Высокая точность изготовления изделий сложной формы.

2. Стальные отливки, как правило, обладают высокой свариваемостью, что позволяет получать сварно-литые изделия нужной формы.

3. Широкие возможности по автоматизации процесса литья.

Сплавы, применяемые в технологии литья должны обеспечивать получение требуемых физических, химических и механических свойств в готовом изделии. Это обеспечивается выбором материалов с требуемыми свойствами. Прежде всего, применяемые сплавы должны обладать высокой жидкотекучестью, то есть они должны хорошо заполнять литейную форму при заливке. Кроме того при кристаллизации должно наблюдаться незначительное изменение объема материала (низкая усадка). В жидком состоянии расплав должен иметь низкую газопоглощаемость, под которой понимается слабая способность расплава растворять газообразные вещества. Также в готовом изделии должна наблюдаться незначительная ликвация, то есть достаточно высокая однородность химического состава в различных частях изделия.

В технологии литья применяются чугун, сталь, а также медные, алюминиевые и магниевые сплавы. По сравнению с чугунами сталь обладает более низкими литейными свойствами. Температура плавления стали, как правило, выше температуры плавления чугуна. Кроме того, стали менее жидкотекучи и имеют более высокую усадку. Широкое применение стали в технологии литья обусловлено более высокими механическими свойствами получаемых изделий по сравнению с чугунными отливками. Применяемые в технологии литья стали должны обладать высокой прочностью в совокупности с высокими пластическими свойствами. Таким образом, применяются углеродистые стали 15Л...55Л, легированные стали 25ГСЛ, 20ГЛ, 30ХГСЛ, 110Г13Л, а также нержавеющие стали 10Х13Л, 12Х18Н9ТЛ.

Вне зависимости от особенностей литейного производства и свойств используемой стали структура стальной отливки не является однородной и состоит из трех зон: наружной, промежуточной и центральной [1]. Наружная зона имеет мелкозернистую структуру, в то время как промежуточная зона состоит из столбчатых кристаллов, а центральная – из равноосных кристаллов.

Процесс формирования структуры отливки может быть разбит на пять этапов [2, 3]. Первый этап начинается сразу после заливки литейной формы. При этом температура поверхностного слоя резко снижается, в то время как в остальном металле сохраняется температура перегрева. Кристаллизация в поверхностном слое происходит в условиях наличия большого числа центров кристаллизации. Это обусловлено высокой степенью переохлаждения данной части расплава и приводит к формированию мелкозернистой структуры.

Второй этап начинается сразу после формирования твердой корки в поверхностном слое и характеризуется явлением конвекции между центральным и поверхностным слоем отливки. При этом возможно полное или частичное расплавление поверхностного слоя. Процессы в рамках данной стадии происходят до тех пор, пока происходит конвекция между различными участками расплава.

В начале третьей стадии происходит нарастание твердой фазы в поверхностном слое. Это связано с уменьшением скорости передачи теплоты, которое обусловлено прекращением конвекции между центральным и поверхностным слоем отливки в связи с повышением вязкости расплава. На данной стадии все сечение отливки имеет температуру, необходимую для формирования в металле около 8% твердой фазы, что приводит к значительному

увеличению его вязкости. Кроме того, на данной стадии происходит формирование столбчатых кристаллов, которые будут расти в случае их благоприятного расположения относительно тепловых потоков. На локальных участках боковых поверхностей столбчатых кристаллов, которые контактируют с жидкой фазой, будет происходить формирование дендрита. Третий этап формирования структуры отливки завершается с началом процесса теплопередачи в центральной части отливки.

Четвертая стадия формирования структуры отливок начинается при температуре во всех ее слоях ниже необходимой для формирования 8% твердой фазы. На данной стадии в металле присутствует только твердая или двухфазная область. Особенностью данного этапа является более высокая скорость охлаждения центральной части отливки по сравнению с ее периферией. При этом происходит прекращение разветвления дендритов. Кроме того, на данной стадии возможно повышение концентрации тугоплавких компонент в центральной части затвердеванию ОТЛИВКИ, что может приводить К металла за фронтом кристаллизации (так называемое концентрационное переохлаждение). В совокупности все процессы, происходящие на четвертом этапе, приводят к формированию крупных равноосных зерен в центральной части отливки. Четвертый этап заканчивается при достижении центром отливки температуры солидуса. Таким образом, по завершению четвертого этапа отливка содержит металл исключительно в твердой фазе.

На пятой стадии происходит охлаждение твердого сплава до температуры окружающей среды. На данном этапе происходит окончательное формирование структуры отливки.

Структура стальной отливки определяется протяженностью наружной, промежуточной и центральной зоны и зависит от набора факторов, который включает в себя химический состав стали, температуру заливки жидкого металла в форму, скорость охлаждения отливки, а также толщину стенки отливки.

Химический состав отливки определяет интервал кристаллизации, представляющий собой разность между температурой плавления всех фаз в

отливке и температурой, при которой все компоненты отливки будут находиться в кристаллической форме. Как правило, стали с более широким интервалом кристаллизации будут иметь меньшие размеры наружной мелкозернистой зоны, в то время как протяженность промежуточной и центральной зон будет шире. Скорость охлаждения также будет влиять на структуру отливки. При более высокой скорости охлаждения будет иметь место образование мелкозернистой наружной зоны большей протяженности. Кроме того, более высокая температура охлаждения расплава будет способствовать росту узких дендритов. При более низкой скорости охлаждения наружная зона будет уже, при этом протяжённость центральной зоны будет выше. Еще одним фактором, оказывающим влияние на структуру отливки, является толщина стенки. Увеличение толщины стенки приводит к уменьшению наружной и промежуточной зоны при росте центральной зоны, состоящей из равноосных кристаллов. Повышение температуры расплава при заливке приводит к значительному росту промежуточной зоны, при уменьшении ширины поверхностной и центральной зоны [4].

#### 1.2 Характерные дефекты стальных отливок

Образование и развитие дефектов в стальных отливках является комплексным процессом, который зависит от большого набора факторов. Прежде всего, возникновение дефектов может быть обусловлено литейными свойствами применяемой стали. Несоответствие свойств используемой стали применяемой технологии литья может приводить к формированию таких дефектов как неслитина, усадочная раковина и ликвация. Кроме того, несплошности могут образовываться в результате ошибок в проектировании и выборе параметров технологического процесса. Также влияние на качество получаемых отливок оказывают действия персонала, участвующего в процессе литья.

Все разнообразие возможных дефектов стальных отливок можно разделить на пять групп [5]:

- несоответствие по геометрии;
- дефекты поверхности;

- включения;
- несоответствия по структуре.

1.2.1 Несоответствие по геометрии

Основные виды дефектов отливок, относящихся к несоответствиям по геометрии представлены на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Дефекты типа несоответствия по геометрии

Недолив представляет собой неполное образование контура отливки вследствие незаполнения литейной формы металла при заливке. [8,9]. Неслитина является дефектом отливок в виде отверстий произвольной формы или сквозной щели в стенке отливки, которые образуются вследствие неслияния потоков металла пониженной жидкотекучести при заливке [8]. Обжим - дефект отливки в виде нарушений его конфигурации. Данный дефект образуется в виде прилива и утолщения произвольной формы. Под подутостью (раздутием) понимают местное утолщение стенки, расположенной в малоуплотненных частях литейной формы [8, 10]. Перекос – это дефект, вызванный смещением части отливки относительно осей или поверхности другой части отливки. Отдельно выделяют также стержневой перекос отливки, под которым понимают смещение отверстия, полости или части отливки, происходящие вследствие перекоса стержня. Разностенность представляет собой различие в толщине стенок отливки, не предусмотренное чертежом. Коробление – это искажение конфигурации отливки, не приводящие к нарушению ее целостности. В конкретной отливке размер и форма коробления напрямую зависит от конструкции изделия. Наиболее характерным дефектом подобного типа является выпуклость или вогнутость на плоских участках ОТЛИВКИ. Незалив представляет собой несоответствие конфигурации отливки чертежу, обусловленное износом модельной оснастки или дефектами формы. Зарез – это искажение формы отливки при отрезе литников, обрубке и зачистке. Вылом является откалывающейся частью отливки или трещиной, образование которой не связано с процессом литья. Под прорывом металла подразумевают неполное образование или искажение формы отливки при ее заливке. Как правило, данный вид дефекта обусловлен недостаточной прочностью литейной формы. Уход металла представляет собой пустоту в теле ОТЛИВКИ, которая ограничена тонкой коркой затвердевшего метала, образовавшаяся в результате вытекания металла из формы.

#### 1.2.2 Дефекты поверхности

Основные виды дефектов поверхности отливок представлены на рисунке 1. 2.



Рисунок 1.2 – Дефекты поверхности

В процессе литья возможно взаимодействие металла с материалом формы, при котором по окончании процесса на поверхности отливки остается слой формовочного материала. Подобный дефект классифицируется как пригар. Под спаем понимается трещина на поверхности отливки с закругленными и окисленными концами. Ужимина представляет собой прикрытое слоем металла углубление, содержащее формовочный материал. Наросты имеют произвольную форму и состоят из металла, загрязненного формовочными материалами. Залив представляет собой дефект в виде металлического прилива или выступа. Его возникновение обусловлено проникновением металла в процессе заливки в зазоры по разъемам формы, стержней или по стержневым знакам. Под засорами понимают внедрившийся формовочный материал в поверхность отливки. Плена – это дефект в виде самостоятельного металлического или окисного слоя на поверхности отливки, образовавшегося при недостаточно спокойной заливке. В процессе литья возможно затекание металла в трещины на поверхности формы или стержня, что приводит к образованию просечек, представляющие собой невысокие прожилки на поверхности отливки. Поверхностное повреждение представляет собой дефект в виде нарушения формы поверхности отливки в выбивки изделия результате ИЗ формы, а также при его очистке И

транспортировании [9]. Складчатость возникает в связи с низкой жидкотекучестью металла. Дефект подобного типа состоит из незначительных гладких возвышений и углублений на поверхности отливки. Под грубой поверхностью понимают сферообразные углубления на поверхности отливки, параметры которых превышают установленные нормы. Газовая шероховатость возникает в результате роста газовых раковин на границе между металлом и литейной формой. Подобные дефекты являются сферообразными углублениями на поверхности отливки.

1.2.3 Несплошности в теле отливки

На рисунке 1.3 представлены дефекты, относящиеся к несплошностям в теле отливок.



Рисунок 1.3 – Несплошности в теле отливки

Трещины в отливке образуются в случае если возникающие в ней напряжения превышают прочность металла. Трещины представляют собой разрыв отливки, возникающий при усадке металла [11]. Возникновение горячих

трещин происходит при кристаллизации отливки. Трещины подобного типа характерны для толстостенных отливок. Поверхность подобных дефектов сильно окислена [6]. Холодные трещины возникают в затвердевших отливках вследствие внутренних напряжений или внешнего воздействия [7]. Межкристаллические трещины возникают на границах первичных зон аустенита в температурном интервале распада.

Газовые раковины представляют собой полости в теле отливки, которые образовались за счет выделившегося из металла или внедрившегося в металл газа. Они представляют собой круглую полость диаметром 3-5 мм, находящуюся в теле отливки или выходящую на поверхность [9, 10]. Газовая раковина может располагаться как отдельно, так и группами. Дефект подобного типа имеет чистую и гладкую, иногда окисленную поверхность [12]. Ситовидные раковины – это вытянутые раковины, находящиеся под литейной коркой и расположенные перпендикулярно поверхности ОТЛИВКИ. Их возникновение обусловлено повышенным содержанием водорода в кристаллизующемся слое. Диаметр ситовидных раковин, как правило, не превышает 2-3 мм. Под усадочной раковиной понимают дефект в виде открытой или закрытой полости с грубой шероховатой иногда окисленной поверхностью, образовавшейся вследствие усадки при затвердевании металла. В свою очередь, скопление микроскопических раковин классифицируется как рыхлота. Песчаная усадочных раковина представляет собой полость, которая заполнена формовочным материалом. Дефект, представляющий собой полость, заполненную шлаком, называют шлаковой раковиной. Под залитым шлаком понимают дефект, возникающий в результате заполнения литейной формы шлаком.

Усадочная и газовая пористость представляют собой скопление мелких полостей обусловленных, соответственно, процессами усадки отливки и выделения газа при кристаллизации. Непровар жеребеек – это дефект, представляющий собой несплошность соединения металла отливки с поверхностью жеребеек. Возникновение дефекта подобного типа может быть

связано с загрязнением жеребеек, несоответствием масс, а также понижением температуры заливаемого металла.

Вскипы возникают в результате порообразования, обусловленного переувлажнением литейной формы или проникновением газов из стержней в полость линейной формы, и представляют собой скопление раковин и наростов. Утяжина представляет собой пологое углубление на поверхности отливки, имеющее гладкие стенки.

1.2.4 Включения

Дефектами типа включения являются:

- металлическое включение,
- неметаллическое включение,
- королек

Металлическое включение имеет структуру, отличную от структуры основного металла. Неметаллические включения в отливке образуются вследствие наличия примесей в шихте в процессе разливки металла или его обработке. Под корольками понимают шарики металла, сходные по структуре с материалом отливки, но кристаллизовавшиеся отдельно от основного материала отливки.

#### 1.2.5 Несоответствия по структуре

К несоответствиям по структуре стальных отливок относят ликвацию и флокен. Под ликвацией понимают неоднородность химического состава отливки, которая возникает после ее кристаллизации. В результате в теле отливки возможно образование зон повышенной концентрации различных элементов. При этом выделяют микроликвацию, которая наблюдается в пределах отдельно взятого кристалла, и макроликвацию, имеющую место в пределах всей отливки. Флокены возникают в результате повышенного содержания в металле водорода и возникают под действием внутренних напряжений. Дефект подобного типа представляет собой матовое пятно с гладкой поверхностью.

1.3 Неразрушающий контроль стальных отливок

Возможность дефектов возникновения значительного количества В стальных отливках обуславливает необходимость организации технологического контроля на производстве. Технологический контроль представляет собой проверки продукции процедуру соответствия параметров требованиям нормативной документации [3, 13, 14]. Соответственно, технологический контроль включает в себя получение первичных данных об изделиях и принятие решения о годности продукции на основании сопоставления полученных данных с информацией из нормативной документации.

В рамках проведения технологического контроля для получения первичных данных об изделии могут применяться методы разрушающего и неразрушающего контроля. Использование неразрушающих методов контроля предполагает дальнейшую эксплуатацию объектов. Суть всех методов неразрушающего контроля заключается в анализе взаимодействия физических полей или излучений с объектами контроля.

Методы контроля различаются физическими явлениями, применяемыми для проверки качества изделия. По ГОСТ Р 56542-2015 [15] методы неразрушающего контроля подразделяют на девять видов:

- магнитный;
- электрический;
- вихретоковый;
- радиоволновой;
- тепловой;
- радиационный;
- оптический;
- проникающими веществами;
- акустический.

Для контроля отливок чаще всего применяют шесть методов из перечисленных, а именно оптический, радиационный, вихретоковый, магнитный, акустический метод, а также контроль проникающими веществами [16].

Выбранный метод контроля должен быть оценен по степени его влияния на качество, долговечность и надежность отливки. Это значит, ЧТО перед применением любого метода, проводят разрушающие испытания, и по их результатам определяют эффективность неразрушающих Также методов. неразрушающие методы имеют некоторые особенности, которые могут вызвать трудности при расшифровке результатов. Поэтому предприятия должны быть оборудованы специальной аппаратурой, а также иметь обученный персонал, обладающий высоким уровнем подготовки.

1.3.1 Магнитный метод неразрушающего контроля

Магнитный метод основан на обнаружении локальных возмущений поля, создаваемых дефектами в намагниченном ферромагнетике. При намагничивании отливки магнитный поток протекает по объекту контроля. В случае нахождения несплошности на пути магнитного потока, возникают поля рассеивания, форма и амплитуда которых несет информацию о размере, характере, и глубине залегания дефекта.

На производстве литейных изделий данный вид контроля используют для обнаружения поверхностных и приповерхностных несплошностей. По магнитным свойствам отливки оценивают структуру и эксплуатационные свойства изделия, а также определяют толщину немагнитных покрытий на поверхности отливки. Магнитный метод показывает высокую чувствительность и точность. Метод достаточно прост и показывает высокую производительность контроля. Однако данный метод не может быть применен для определения внутренних дефектов в отливке.

Основным методом магнитного контроля отливок является магнитнопорошковый метод [17]. В рамках данного метода намагниченная деталь помещается в ванну с магнитной суспензией или посыпается магнитным

порошком. При этом намагничивание детали осуществляется продольным, циркуляционным или комбинированным способом. Частицы магнитного порошка оседают на поверхности объекта контроля вблизи дефектов. Магнитопорошковые дефектоскопы позволяют определять поверхностные и приповерхностные дефекты, раковины, а также крупные неметаллические включения.

Еще одним методом магнитного контроля, который может применяться для контроля стальных отливок, является феррозондовый метод. Данный метод основан на использовании феррозондовых преобразователей для определения параметров магнитного поля, создаваемого в объекте контроля. При этом решение о наличии или отсутствии дефектов осуществляется на основании сопоставления полученных данных с эталонными данными, полученными в бездефектной области. Основным достоинством данного метода является его высокая чувствительность. Феррозондовый метод контроля позволяет определить поверхностные дефекты толщиной до 0,1 мм [17]. Феррозондовые дефектоскопы позволяют определять поверхностные несплошности, коррозионные образования и пористость.

#### 1.3.2 Вихретоковый метод неразрушающего контроля

В технологическом контроле литейного производства вихретоковый метод может использоваться для решения следующих задач:

выявление поверхностных и приповерхностных дефектов;

измерение физико-химических свойств сплава;

измерение толщины неметаллических защитных покрытий на отливках
[16].

Таким образом, данный вид контроля позволяет одновременно решать несколько задач в рамках технологического контроля. Кроме того, метод отличает высокая производительность.

Как правило, вихретоковый контроль применяется для диагностики серийного и массового производства. Для решения задач вихретокового неразрушающего контроля отливок применяют проходные и накладные

преобразователи. Применимость данного метода контроля ограничена глубиной проникновения вихревых токов в стальную отливку.

1.3.3 Метод контроля проникающими веществами

В методе контроля проникающими веществами (или капиллярный метод) применяется специальная жидкость, которая наносится на очищенную поверхность, где она заполняет полости поверхностных дефектов. Затем жидкость удаляют, а оставшуюся в полостях дефектов часть обнаруживают путем нанесения проявителя, который адсорбирует жидкость, образуя индикаторный рисунок.

Капиллярный метод применим исключительно для контроля качества поверхности изделий. Он позволяет достоверно выявлять дефекты размером 1 мкм у поверхности и глубиной более 10 мкм. Также преимуществами метода являются простота технологии контроля, доступность материалов и наглядность результатов контроля. Однако на результаты дефектоскопии может влиять чистота поверхности отливки, а некоторые дефектоскопические материалы токсичны и пожароопасны. Кроме того, процедуры контроля проникающими веществами являются достаточно длительными и трудоемкими.

1.3.4 Оптический метод контроля

Оптический контроль обладает простотой выполнения и дешевизной. Он основан на применении электромагнитного излучения оптического диапазона. дефекты Крупные поверхностные можно определить визуально, также определяют отклонение от формы, цвета, размера. Более мелкие отклонения и быть обнаружены несплошности МОГУТ С помощью профилометров И увеличительных устройств – лупы, эндоскопа (в случае появления дефектов внутри полостей). Оптический метод обладает невысокой чувствительностью и достоверностью.

Оптический метод контроля может быть использован для различных типов отливок на всех стадиях их изготовления. Он позволяет обнаружить поверхностные и дефекты в открытых и труднодоступных местах, а также нарушение сплошности и геометрических размеров отливок [4].

1.3.5 Радиационный метод контроля

Радиационный метод основан на взаимодействии проникающих излучений с контролируемым объектом. Проникающие излучения (рентгеновское, потока нейтронов, γ- и β-лучей), проходя через толщу материала детали и взаимодействуя с его атомами, несут различную информацию о внутреннем строении вещества и наличии скрытых дефектов внутри контролируемых объектов. Метод основан на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение.

На практике в радиационных методах контроля применяется рентгеновское И гамма-излучение. Основным источником рентгеновского излучения в радиационных методах контроля является рентгеновская трубка. Как правило, применяются рентгеновские трубки с напряжением на аноде от 10 до 400 кэВ. Для генерации жесткого рентгеновского излучения требуется использование ускорителей заряженных частиц, таких как бетатроны и линейные ускорители. Рентгеновское излучение, генерируемое данными ускорителями, позволяет осуществлять контроль стальных отливок толщиной вплоть до 500 мм [16]. В источниках гамма-излучения жесткое электромагнитное излучение генерируется в результате распада радиоактивных изотопов. Для этой цели в дефектоскопии применяются изотопы кобальта-60, цезия-137, иридия-192.

Методы радиационного контроля различаются принципами регистрации прошедшего излучения. Выделяют радиографические, радиоскопические и радиометрические методы контроля [18]. Радиографические методы контроля предполагают получение статического изображения внутренней структуры объекта после его облучения. Отличием радиоскопического метода контроля является возможность получения изображения объекта контроля непосредственно во время его облучения. В радиометрическом методе контроля вывод о наличии дефектов в объекте контроля осуществляется за счет измерения интенсивности ионизирующего излучения путем его преобразования детектором в электрический сигнал.

Существует несколько детекторов, применяемых В радиационном неразрушающем контроле. Радиационная пленка на сегодняшний день является наиболее используемым типом детектора [19]. В компьютерной радиографии вместо рентгеновской пленки могут применяться запоминающие пластины, конструкция которых предусматривает использование слоя химического соединения, имеющую фотостимулирующую память. Кроме того, возможно использование детекторов непрямого преобразования рентгеновского излучения. Конструкция подобных детекторов содержит сцинтилляторы, которые при взаимодействии с ионизирующим излучением генерируют световое излучение. Впоследствии данное световое излучение попадает на фотоэлектронный умножитель, преобразуется в электрический сигнал и усиливается [20]. Также могут применяться цифровые детекторы прямого преобразования рентгеновского излучения. В данных детекторах используются полупроводники. При попадании кванта рентгеновского или гамма-излучения происходит образование электронно-В дырочной пары. результате приложенного напряжения возникает электрический ток, который впоследствии может быть усилен для получения результатов контроля.

В отличие от методов рассмотренных ранее, радиационные методы контроля позволяют выявлять внутренние дефекты стальных отливок (раковины шлаковые включения, рыхлоты, трещины и т.д.). Чувствительность радиационных методов контроля зависит от толщины отливки. Повышение толщины изделия приводит к увеличению интенсивности рассеянного излучения, которое ухудшает чёткость и контрастность изображениий. Радиационный контроль с использованием рентгеновских трубок уже малоэффективен при толщине стенки отливки 100 мм [16]. В таком случае задача радиационного контроля отливок может быть выполнена с использованием ускорителей заряженных частиц, но требуется принятие дополнительных мер по обеспечению радиационной безопасности.

1.3.6 Акустический метод контроля

Акустический метод неразрушающего контроля основан на регистрации параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте. Для анализа изделий применяют акустические волны в звуковом и ультразвуковом диапазонах.

Ультразвуковые методы используют акустические волны с частотой колебаний выше 20 кГц. Эти волны возбуждаются и принимаются, как правило, пьезопреобразователями. Учитывая сильное отражение ультразвука от тончайших воздушных зазоров, для передачи волн от пьезопреобразователя к изделию используют жидкостный контакт [21].

С помощью акустического НК:

 выявляют дефекты типа нарушения сплошности (поры, неметаллические включения, трещины различных видов);

контролируют геометрические размеры изделий;

оценивают физические свойства сплавов.

Акустический контроль обладает многими преимуществами: он не так опасен, как радиационный или капиллярный метод; у акустических волн большая проникающая способность, поэтому метод позволяет обнаруживать глубокорасположенные дефекты; метод достаточно чувствителен для выявления мелких дефектов.

К недостаткам акустических методов контроля можно отнести необходимость подготовки объекта перед проведением контроля, а также сложности определения реальных размеров дефектов в объекте, обусловленных низкой разрешающей способностью акустических методов. При использовании стандартной аппаратуры ультразвукового неразрушающего контроля решение о дефектности объекта контроля делаются на основе информативных параметров эхо-сигналов (время задержки сигнала и его амплитуда). Обнаруживаемые в процессе контроля дефекты описываются такими параметрами как условные размеры дефекта и эквивалентная площадь. Данные параметры не в полной мере соответствуют реальным размерам дефектов. Ошибки в 1,5 – 2 раза в оценке небольших дефектов признаются вполне удовлетворительным величины результатом, соответствующим возможностям метода [22]. Все это приводит к повышенным нормам отбраковки изделий, принятым в нормативно-технической документации [23]. Для повышения достоверности результатов контроля могут применяться системы с когерентной обработкой сигнала. Как правило, в подобных системах для повышения информативности результаты представляются в форме изображения внутренней структуры объекта контроля. В таком случае говорят о системах ультразвуковой томографии.

Все разнообразие ультразвуковых методов контроля можно разделить на активные и пассивные методы. Активные методы предполагают создание акустических волн в объекте контроля за счет воздействий извне. В свою очередь, активные методы контроля могут быть разделены на следующие группы:

 Методы отражения, включающие в себя эхо-метод, эхо-зеркальный метод, дифракционно-временной метод и дельта-метод.

 Методы прохождения, к которому относятся амплитудный метод прохождения, временной метод прохождения, метод многократной тени, велосимитрический метод.

 Комбинированные методы контроля. Методами данной группы являются зеркально-теневой метод, эхотеневой, эхосквозной и ревебрационносквозной методы.

Методы собственных колебаний.

– Импедансные методы.

В пассивных методах контроля источником акустических колебаний является сам объект контроля. К пассивным методам контроля относится

акустико-эмиссионный метод, вибрационно-диагностический метод и шумодиагностический метод.

При контроле отливок одним из наиболее широко применяемых методов является эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии [24]. Его используют для обнаружения грубых дефектов в слитках из различных металлов и сплавов, предназначенных для изготовления ответственных деталей [22]. В эхо-методе преобразователь является генератором И одновременно приемником ультразвуковых волн. Это позволяет проводить контроль объектов, к которым отсутствует двусторонний доступ. Суть метода состоит в TOM. чтобы «прозвучить» объект контроля ультразвуковыми импульсами и зарегистрировать эхо-сигнал от дефектов. Признаком наличия такового служит появление эхосигнала на экране дефектоскопа.

Также для контроля отливок может применяться теневой метод. Теневой метод основан на ослаблении звуковых волн, проходящих через дефекты в теле объекта. Дефекты в этом случае создают ультразвуковую «тень». В данном методе используются два преобразователя, один ИЗ которых излучает ультразвуковые волны, а второй принимает их. Однако данный метод малоэффективен, так как, во-первых при небольшом дефекте изменение интенсивности сигнала незначительно, и может не проявится в преобразователеприемнике (дефект заметен при изменении сигнала на 15-20%), а во-вторых невозможно определить глубину залегания дефекта. Кроме того, контроль затруднен при изменяющейся толщине объекта контроля [25].

Для обнаружения вертикально расположенных дефектов может использоваться модификация эхо-метода – эхо-зеркальный метод. В нем применяется два детектора, расположенных под углом к поверхности объекта. Так как площадь дефекта в сечении, перпендикулярном вводимому наклонному лучу значительно превышает площадь нормального к поверхности сечения дефекта, то повышается вероятность обнаружения и чувствительность контроля [25].

1.4 Выводы к главе 1

 Применение методов неразрушающего контроля является важной составляющей технологического контроля производства стальных отливок.
Существующий набор методов неразрушающего контроля позволяет определять в стальных отливках все основные типы дефектов.

 Наряду с радиационными методами, ультразвуковые методы контроля имеют высокую эффективность по выявлению внутренних дефектов объектов контроля.

 Недостатком применения стандартной аппаратуры ультразвукового неразрушающего контроля является низкая эффективность определения реальных размеров дефектов в объекте контроля. Этим обусловлен интерес к разработке и использованию систем ультразвуковой томографии.

# ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНЫХ АР

2.1 Ультразвуковая томография с использованием АР

Достижения в производстве микроэлектронных компонент, вычислительной технике и точной механике сделало возможным внедрить AP в практику ультразвукового контроля в девяностые года XX века. AP представляют собой многоэлементные ультразвуковые преобразователи, в которых генерация и прием ультразвуковых волн осуществляется с использованием многоканальных блоков электроники. Преимуществами применения AP в системах ультразвукового контроля за совете с использованием многоканальных блоков электроники. Преимуществами применения AP в системах ультразвукового контроля являются:

высокая скорость проведения контроля;

– многоэлементная конструкция такого преобразователя, позволяющая решать различные задачи в области ультразвукового неразрушающего контроля;

малые размеры таких преобразователей;

возможность представления результатов в форме изображений в одной измерительной позиции;

– высокое отношение сигнал/шум результатов [26].

В случае если результаты ультразвукового неразрушающего контроля представляются в форме изображения внутренней структуры объекта контроля, то говорят об ультразвуковой томографии. Ультразвуковая томография с использованием АР может быть реализована с использованием следующих подходов:

механическое сканирование;

электронное сканирование;

– виртуальное сканирование [27].

Механическое сканирование заключается в перемещении преобразователя по объекту контроля и его зондирование в каждой точке траектории сканирования.

При использовании электронного сканирования осуществляется фокусирование в требуемой области за счет физически сформировано пучка ультразвуковых волн, созданного элементами АР. Электронное сканирование может быть осуществлено тремя разными способами:

1. Линейное сканирование;

2. Секторное сканирование;

3. Динамическая фокусировка по глубине.

При линейном сканировании задается один фокальный закон, и он используется для переключаемой группы работающих элементов (так называемая виртуальная апертура). Такое сканирование осуществляется под одним углом и подобно механическому сканированию с использованием одноэлементных преобразователей (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Принцип линейного сканирования

При секторном сканировании используется одна и та же группа активных элементов при этом луч направляется под различными углами с сохранением заданного фокусного расстояния. Для создания необходимой фокусировки в точке элементы АР должны испускать ультразвуковые волны с некоторой задержкой друг относительно друга для синфазного наложения в точке фокусировки (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Принцип секторного сканирования

При использовании динамической фокусировки по глубине сканирование осуществляется путем изменения фокусного расстояния. При излучении используется один несфокусированный луч. При приеме эхо-сигналов элементы АР перефокусируются на разные значения глубины (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Принцип динамической фокусировки по глубине

Принципиальным отличием виртуального сканирования от электронного является фокусировка уже зарегистрированных эхо-сигналов в выбранных точках внутренней структуры объекта контроля. Данная задача обеспечивается за счет применения алгоритмов пространственно-временной обработки. Таким образом, виртуальное сканирование состоит из двух процессов:

– Осуществление зондирования объекта контроля и прием эхо-сигналов.

 Получение изображения внутренней структуры объекта контроля за счет использования алгоритмов пространственно-временной обработки зарегистрированных эхо-сигналов [28-31].

Многоэлементная конструкция AP позволяет реализовывать различные режимы зондирования объекта контроля и регистрации ультразвуковых сигналов. Примерами таких подходов являются совмещенный режим, режим общего источника, режим двойного сканирования [32] (рисунок 2.4).





#### сканирования

Рисунок 2.4 – Режимы сканирования

В режиме двойного сканирования (режиме полноматричного захвата, Full Matrix Capture) зондирование выполняется поочередно каждым элементом антенной решетки от первого до последнего. Прием сигналов производится сразу всеми элементами антенной решетки при каждом зондировании [33]. Таким образом, набор данных содержит сигналы, полученные при всех возможных

сочетаниях излучающего и принимающего элементов антенной решетки. Именно такой режим сканирования обеспечивает исчерпывающий объем первичных данных о внутренней структуре объектов контроля. В режиме общего источника генерация ультразвуковых волн производится одним элементом AP и регистрация эхо-сигналов осуществляется всеми элементами AP. В совмещенном режиме ультразвукового сканирования при каждом цикле работы AP генерация и прием ультразвуковых волн осуществляется с использованием одного и того же элемента.

Пространственно-временная обработка зарегистрированных эхо-сигналов основана на использовании алгоритмов, базирующихся на методе синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique), который основан на создании сфокусированного акустического поля в заданных областях объекта контроля путем сканирования его преобразователем с широкой диаграммой направленности и когерентной обработки принятых сигналов [34-36].

Таким образом, на сегодняшний день было разработано два принципиальных подхода в ультразвуковой томографии с использованием AP: фокусирующая антенная решетка и цифровая фокусировка антенной (ЦФА). Первый подход базируется на использовании электронного сканирования. Метод ЦФА основан на использовании виртуального сканирования.

Преимуществами технологии ЦФА по сравнению с технологией фокусирующей антенной решетки являются:

1. Возможность получения высокой фронтальной разрешающей способности во всей области визуализации.

2. Возможность когерентного сложения изображений, полученных в разных положениях АР, что позволяет получить изображение с однородной и высокой разрешающей способностью во всем его объеме.

3. Легкость адаптации как для двумерного, так и для трехмерного случая.

4. Возможность сравнения изображений полученных с использованием различного оборудования (АР, призмы и т.д.) в единой системе координат [37].

На сегодняшний день в системах ультразвуковой томографии применяются преимущественно линейные АР, в которых элементы расположены вдоль одной оси. Относительно других типов АР линейные АР обладают простотой И изготовления, низкой стоимостью конструкции И универсальностью. Существуют также матричные и кольцеобразные АР (рисунок 2.5) [38, 39]. Кольцеобразные АР, как правило, проектируются для обеспечения возможности управления фокусным расстоянием в процессе проведения контроля [40]. В матричных АР элементы расположены в двух направлениях. Преимуществом их применения перед широко используемыми на сегодняшний день линейными АР является возможность получения трехмерного синтезированного изображения в одной позиции ультразвукового преобразователя и более высокая разрешающая способность синтезированных изображений.



а – линейная АР; б – матричная АР; в – кольцеобразная АР Рисунок 2.5 – Основные конструкции АР

Фактором, ограничивающим использование матричных АР в системах ультразвуковой томографии, работающих с использованием технологии ЦФА, является необходимость осуществления трехмерной пространственно-временной обработки большого объема ультразвуковых данных, что серьезным образом ограничивает возможность получения синтезированных изображений с высокой разрешающей способностью в режиме реального времени.

На сегодняшний день на рынке оборудования для ультразвукового неразрушающего контроля существует ограниченный набор систем на основе технологии ЦФА, способных работать с матричными АР. Одним из примеров подобной системы является портативный ультразвуковой дефектоскоп Gekko (рисунок 2.6). Данный ультразвуковой дефектоскоп обеспечивает работу как с одноэлементными преобразователями, так и с АР с применением технологий антенной решеткой и ЦФА. Основные фокусировки параметры работы ультразвукового дефектоскопа Gekko c ∐ФА применением технологии представлены в таблице 2.1.



Рисунок 2.6 – Портативный ультразвуковой дефектоскоп Gekko

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики ультразвукового дефектоскопа Gekko в режиме работы ЦФА (Total Focusing Method) [41]

Максимальное чи	исло активных	элементо	BB	64	
апертуре					
Максимальное	количество	точек	В	65000	
получаемом синтезированном изображении					
Максимальная	частота	обновления		30	
изображения, Гц					

Другой системой, обеспечивающей трехмерную ультразвуковую томографию с использованием технологии ЦФА с применением матричных АР, является ультразвуковой дефектоскоп TOPAZ 64 (рисунок 2.7). Аналогично системе Gekko при использовании матричных АР TOPAZ 64 работает как на основе технологии фокусировки антенной решеткой, так и на основе технологии ЦФА. Основные технические характеристики работы дефектоскопа TOPAZ 64 с применением технологии ЦФА представлены в таблице 2.2.



Рисунок 2.7 – Ультразвуковой дефектоскоп ТОРАΖ 64

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики ультразвукового дефектоскопа TOPAZ 64 в режиме работы ЦФА (Total Focusing Method) [42]

Максимальное чи	исло активных	элементов	В	64
апертуре				
Максимальное	количество	точек	В	65000
получаемом синтезированном изображении				
Максимальная	частота	обновлен	ИЯ	110
изображения, Гц				

Таким образом, существующие системы ультразвуковой томографии способны обеспечить получение трехмерных результатов с количеством точек не более 65000. Вследствие данного ограничения трехмерные изображения имеют достаточно низкое разрешение, и они не всегда будут эффективными для решения задач ультразвукового неразрушающего контроля. Исходя из этого, актуальным

вопросом развития методов и аппаратуры ультразвукового неразрушающего контроля является разработка подходов, направленных на увеличение скорости получения результатов и повышения их разрешающей способности. Данная проблема является комплексной и должна решаться как с помощью разработки и внедрения новых алгоритмических подходов, так и за счет применения вычислений аппаратной оптимизации, например, переноса В рамках пространственно-временной обработки графические на процессоры И программируемые логические интегральные схемы. Алгоритмически задача повышения скорости получения результатов в ультразвуковой томографии с использованием матричных АР может быть решена с использованием следующих подходов:

Оптимизация объема ультразвуковых данных подлежащих пространственно-временной обработке;

 Использование высокоскоростных алгоритмов пространственновременной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР.

Оптимальный режим сканирования предполагает сбор ограниченного по сравнению с режимом двойного сканирования объема данных без потери качества получаемых синтезированных изображений. В общем случае существует два данной задачи. В первом подхода для решения случае предполагается использование неполного набора элементов АР при зондировании объекта контроля и регистрации отраженных эхо-сигналов. В таком случае говорят о разреженной АР. При подобном подходе важнейшим вопросом является выбор корректной конфигурации разреженной АР, т.е. элементов преобразователя, участвующих в зондировании объекта контроля и приеме эхо-сигналов. Это обусловлено тем фактом, что такой подход связан с риском искажения результирующей диаграммы направленности, получением диаграммы направленности с побочными С широким основным лепестком И дифракционными максимумами, а также высоким уровнем боковых лепестков, что приводит к получению синтезированных изображений низкого качества [43].
Для решения задачи выбора конфигурации линейных и матричных АР предложено несколько подходов. Простейшим методом является метод перебора элементов, рассмотренный в [44]. При использовании матричных АР, из-за большого количества элементов, данный подход будет требовать большего времени, необходимого для вычислений. Другим подходом поиска конфигурации АР является применение стохастических алгоритмов оптимизации. Для этого определяется целевая функция, задача минимизации которой может быть решена с использованием предложенного алгоритма. В свою очередь, полученное решение определяет требуемую конфигурацию АР. В связи с этим, большой [45]. интерес представляет использование генетического алгоритма Для конфигурации повышения точности нахождения разреженной решетки предлагается также использование генетического алгоритма в совокупности с другими подходами, обеспечивающими повышение эффективности решения: MRL (Minimum Redundancy Linear-Array) [46] и ADS (Almost Different Sets) [47].

Кроме того, задача оптимизации данных может быть решена путем создания и использования неэквидистантных преобразователей. При корректном выборе конфигурации такого преобразователя представляется возможным получить результирующую диаграмму направленности, обеспечивающих восстановление синтезированных изображений выского качества. При этом подобные характеристики будут получены при меньшем количестве элементов по сравнению с АР с периодическим расположением элементов. В работах [48,49] предлагается использование матричных АР со спиральным расположением элементов. Кроме того, в работе [50] предлагается использовать матричную АР, в которой расположение элементов описывается диском Пуассона. В подобном преобразователе элементы располагаются случайным образом, но накладывается ограничение на минимальное расстояние между соседними элементами.

Таким образом, несмотря на широкий набор подходов, направленных на оптимизацию объема данных при использовании матричных AP, на сегодняшний день не существует общепринятых подходов для решения задачи оптимизации данных при использовании матричных AP.

Алгоритмы пространственно-временной обработки в технологии ЦФА базируются на методе синтезированной апертуры. Все разнообразие подобных алгоритмов может быть разделено на алгоритмы с расчетами в частотной и временной области [51]. Расчеты во временной области базируются на том факте, что положение эхо-импульсов на А-скане, соответствующие дефектам, зависит от преобразователя относительно несплошности. образом, положения Таким осуществляя сдвиг по времени А-скана для каждой точки из визуализируемой области и суммируя все А-сканы, можно получить синтезированное изображение внутренней структуры объекта контроля. Пространственно-временная обработка с расчетами в частотной области основана на использовании Быстрого Преобразования Фурье и последующими операциями в частотной области для получения комплексных значений акустического поля для каждой точки из визуализированной области. Применение алгоритмов ультразвуковой томографии на основе расчетов в частотной области представляется возможным за счет того, что пространственные Фурье-компоненты можно рассматривать как плоские волны, которые распространяются в различных направлениях [52]. Выбор подхода при разработке алгоритма зависит от требований по качеству получаемых изображений и времени, затрачиваемого на пространственновременную обработку.

Алгоритмы пространственно-временной обработки направлены на решение обратной задачи [53]. Разработка алгоритмов решения акустических обратных задач является актуальной задачей в сейсмологии и дефектоскопии, медицинской диагностике и акустике океана. В каждой из данных областей разработка подобных алгоритмов связана со своими особенностями. В контексте ультразвуковой дефектоскопии эти особенности связаны с возможным наличием на пути распространения ультразвуковых волн сред с различными акустическими свойствами, что может быть вызвано типом применяемого акустического контакта и анизотропией объекта контроля. В результате на границе раздела отражение, преломление таких сред происходит ультразвуковых волн, что ведет к необходимости использования преобразование типа волны,

алгоритмов, учитывающих данные процессы. Кроме того, объект контроля представляет собой ограниченную область пространства, которая, в общем случае, имеет сложную форму. Еще одной особенностью является частая ограниченность доступа к объектам контроля.

Таким образом, задача разработки алгоритма пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР соображениях. должна базироваться нескольких Прежде на всего, разрабатываемый алгоритм должен быть вычислительно эффективным, т.е. обеспечивать высокую скорость восстановления трехмерного синтезированного изображения внутренней структуры объекта контроля. Также получаемые результаты должны обладать высокой разрешающей способностью, под которой в ультразвуковом контроле понимается способность раздельно фиксировать близко расположенные [52]. Восстановление дефекты, друг К другу синтезированных изображений должно осуществляться с учетом формы поверхности объекта контроля. Таким образом, требуется разработка подходов, обеспечивающих получение профиля поверхности контролируемого объекта. Разработка алгоритма отвечающего всех указанным требованиям может быть осуществлена путем сравнительного анализа различных подходов, разработанных в ультразвуковой томографии и смежных областях (при учете особенностей ультразвуковой дефектоскопии)

При реализации алгоритмов пространственно-временной обработки, основанных на методе синтезированной апертуры, следует принимать ряд допущений:

 Распространение ультразвуковых волн рассматривается в рамках геометрической акустики. Соответственно, применяется принцип наименьшего времени Ферма, согласно которому ультразвуковые волны распространяются между двумя точками по кратчайшему расстоянию;

 Отражатели являются точечными, коэффициент отражения не зависит от их геометрических размеров (принцип Гюйгенса);

Акустические сигналы являются гармоническими и непрерывными;

39

 Применяется Борновское приближение, согласно которому не учитывается многократное рассеяние акустических волн.

2.2 Восстановление профиля поверхности объекта контроля по набору эхосигналов

Важным условием проведения ультразвуковой томографии является стабильность обеспечения акустического контакта между преобразователем и объектом контроля. В СВЯЗИ С ЭТИМ, В автоматизированных системах ультразвуковой томографии широкое распространение получил иммерсионный акустический контакт, при котором объект контроля помещается в ванну, заполненную водой. Также в случае если помещение объекта контроля в иммерсионную ванну не представляется возможным, могут применяться устройства, обеспечивающие локальный иммерсионный контакт [54].

В случае использования иммерсионного акустического контакта учет профиля поверхности объекта контроля является обязательным условием получения результатов ультразвуковой томографии высокого качества. Получение профиля поверхности объекта контроля может быть осуществлено путем анализа эхо-сигналов зарегистрированных элементами матричной AP. В этом случае в расчетах из всего набора данных могут быть использованы сигналы, полученные в совмещенном режиме работы антенной решётки.

В случае проведения трехмерной ультразвуковой томографии набор эхосигналов, зарегистрированный в совмещённом режиме, может быть описан функцией  $p(t,x_n,y_m)$ , где t – это время,  $x_n$  и  $y_m$  – это координаты элемента матричной AP. На первом этапе устанавливается уровень S, по которому фиксируется время распространения ультразвуковых волн  $t_{cut}(x)$  и расстояние от края пьезопластины до поверхности объекта контроля r(x).

$$r_{nm} = \frac{t_{cut}(x_n, y_m) \cdot c_{imm}}{2} \tag{2.1}$$

где *с<sub>imm</sub>* – скорость распространения ультразвуковых волн в материале акустического контакта.

Значения  $r_{nm}$  используются для получения профиля поверхности  $r_{snm}(x_{sn}, y_{sm})$ [55]. Это может быть осуществлено с использованием следующих выражений:

$$\begin{cases} x_{sn} = x_n + r_{nm} \cdot \frac{\partial r_{nm}}{\partial x_n} \\ y_{sm} = y_m + r_{nm} \cdot \frac{\partial r_{nm}}{\partial y_m} \\ z_{snm} = r_{nm} \sqrt{1 - \frac{\partial r_{nm}}{\partial x_n} \cdot \frac{\partial r_{nm}}{\partial y_m}} \end{cases}, \qquad (2.2)$$

где:

$$\frac{\partial r_{nm}}{\partial x_n} = \frac{r_{(n+1)m} - r_{nm}}{x_{n+1} - x_n},$$
$$\frac{\partial r_{nm}}{\partial y_m} = \frac{r_{n(m+1)} - r_{nm}}{y_{m+1} - y_m}.$$

Для получения более точной оценки профиля поверхности может быть проведена аппроксимация полученных значений и получена базовая поверхность  $r_b(x,y)$ . Подобный подход способен исключить из процедуры восстановления профиля поверхности выбросов, которые обусловлены проблемами определения времени задержки эхо-сигналов по заданному уровню (Рисунок 2.8 б) [56]. Для исключения выбросов при восстановлении профиля поверхности определяется разность между  $r_{snm}$  и  $r_b$ . В случае если эта разность превышает четверть длины ультразвуковых волн, распространяющихся в материале акустического контакта, то такое значение отсеивается. Результатом расчетов является откорректированный набор значений  $r_c(x)$ , по которому, в свою очередь, проводится аппроксимация и получается уравнение плоскости поверхности объекта контроля  $r_f(\mathbf{x})$ .



а – В–скан, полученный в совмещенном режиме работы АР; б – восстановление базовой поверхности; в – получение откорректированной поверхности
 Рисунок 2.8 – Восстановление поверхности объекта контроля для случая двумерной ультразвуковой томографии

2.3 Разработка алгоритма пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричной АР с расчетами во временной области

Как было сказано ранее, все возможные подходы в разработке алгоритмов пространственно-временной обработки базируются на расчетах во временной или в частотной областях. На сегодняшний день алгоритмы расчета во временной области широко применяются в практике ультразвуковой томографии и легко могут быть адаптированы для случая использования матричных AP. В алгоритмах пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричной AP с расчетами во временной области объект контроля разбивается на воксели и изображение рассчитывается по следующей формуле.

$$\mathbf{I}(x, \mathbf{y}, z) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} p_{n,k}(\tau_{xyz})$$
(2.3)

Где:  $p_{n,k}$  – это эхо-сигнал, полученный в результате зондирования объекта контроля n-ым элементом AP, эхо-сигнал от которого зарегистрирован k-ым элементом AP;

42

 $au_{xyz}$  - временной отсчет в А-скане, соответствующий конкретному вокселю области реконструкции;

N – количество элементов AP, осуществляющих зондирование объекта контроля;

*К* – количество элементов AP, осуществляющих прием эхо-сигналов.

Если в процессе проведения ультразвуковой томографии осуществляется механическое сканирование, то полное изображение может быть получено путем суммирования всех изображений, полученных в различных точках траектории сканирования:

$$I(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \left| \sum_{m=1}^{M} I_m(x, \mathbf{y}, z) \right|, \qquad (2.4)$$

где *М* – это общее количество измерительных позиций в траектории сканирования.

Таким образом, задача получения синтезированного изображения сводится к определению соответствующего времени задержки в эхо-сигнале для каждого вокселя с учетом положения зондирующего и принимающего элементов. Задача поиска временного отсчета  $\tau_{xyz}$  решается в рамках геометрической акустики, при которой акустическое поле рассматривается как набор лучей, которые расположены по нормали к волновой поверхности. В случае контактной ультразвуковой томографии, при которой АР размещается на объекте, временной отсчет  $\tau_{xyz}$  может быть определен с использованием следующего выражения:

$$\tau_{xyz} = \frac{\sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + z^2}}{c_l} + \frac{\sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + z^2}}{c_l}, \qquad (2.5)$$

где: *x<sub>n</sub>*, *y<sub>n</sub>* – координаты элемента решетки, являющегося источником ультразвуковых волн;

*x<sub>k</sub>*, *y<sub>k</sub>* – координата элемента решетки, являющегося приемником ультразвуковых волн;

 $c_l$  – скорость продольных ультразвуковых волн в объекте контроля.

При использовании иммерсионного акустического контакта или контроля с использованием призм имеет место преломление акустических волн на границе раздела сред в соответствии с законом Снеллиуса (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Преломление акустических волн на границе раздела сред

На рисунке 2.9 точки A и B соответствует центрам элементов AP, участвующим в зондировании и приеме эхо-сигналов, координаты которых  $(x_n, y_n, 0)$  и  $(x_k, y_k, 0)$ . Точки C и D расположены на поверхности объекта контроля и соответствуют распространению ультразвуковых волн от элементов матричной AP до вокселя, для которого проводится расчет. Данные точки имеют координаты  $(x_{sn}, y_{sn}, z_{sn})$  и  $(x_{sk}, y_{sk}, z_{sk})$ . Точка E соответствует вокселю, для которого ведется расчет и имеет координаты (x, y, z).

В этом случае, время задержки может быть определено с использованием следующего выражения:

$$\tau_{xyz} = \frac{\sqrt{(x - x_{sn})^2 + (y - y_{sn})^2 + (z - z_{sn})^2}}{c_{l2}} + \frac{\sqrt{(x_{sn} - x_n)^2 + (y_{sn} - y_n)^2 + z_{sn}^2}}{c_{l1}} + \frac{\sqrt{(x - x_{sk})^2 + (y - y_{sk})^2 + (z - z_{sk})^2}}{c_{l2}} + \frac{\sqrt{(x_{sk} - x_k)^2 + (y_{sk} - y_k)^2 + z_{sk}^2}}{c_{l2}},$$
(2.6)

где:  $x_{sn}$ ,  $y_{sn}$ ,  $z_{sn}$  – координаты точки на поверхности объекта контроля, соответствующей распространению ультразвуковых волн от элемента матричной АР с координатами ( $x_n$ ,  $y_n$ ) до вокселя с координатами (x,y,z);

 $x_{sk}$ ,  $y_{sk}$ ,  $z_{sk}$  — координаты точки на поверхности объекта контроля, соответствующей распространению ультразвуковых волн от элемента матричной АР с координатами ( $x_i$ ,  $y_i$ ) до вокселя с координатами (x,y,z);

*c*<sub>11</sub> — скорость акустических волн в материале, обеспечивающем акустический контакт;

 $c_{l2}$  – скорость акустических волн в объекте контроля.

Таким образом, при использовании иммерсионного акустического контакта или применении призм задача нахождения  $\tau_{xyz}$  сводится к нахождению точки на поверхности объекта контроля, обеспечивающей в соответствии с принципом Ферма минимальное время распространения между элементом матричной AP и вокселем внутренней структуры объекта контроля. Данная задача может быть рассмотрена как совокупность двух задач: нахождение времени распространения от зондирующего элемента до вокселя внутренней структуры объекта контроля ( $\tau_{xyzn}$ ) и нахождение времени распространения от вокселя внутренней структуры объекта контроля ( $\tau_{xyzn}$ ) до принимающего элемента. Пользуясь принципом Ферма, задача нахождения точек с координатами ( $x_{sn}$ ,  $y_{sn}$ ,  $z_{sn}$ ) и ( $x_{sk}$ ,  $y_{sk}$ ,  $z_{sk}$ ) сводится к решению задачи оптимизации следующей функции:

$$F(x_{sn}, y_{sn}, z_{sn}) = \frac{\sqrt{(x - x_{sn})^2 + (y - y_{sn})^2 + (z - z_{sn})^2}}{c_{l2}} + \frac{\sqrt{(x_{sn} - x_n)^2 + (y_{sn} - y_n)^2 + z_{sn}^2}}{c_{l1}}$$
(2.7)

46

При наличии уравнения описывающего поверхности объекта контроля, можно считать, что  $z_{sn}$  зависит от  $x_{sn}$  и  $y_{sn}$ .Таким образом, задача сводится к минимизации функции двух переменных  $F(x_{sn}, y_{sn}, z_{sn}(x_{sn}, y_{sn}))$ . В рамках решения задачи многомерной оптимизации численными методами применение метода градиентного спуска является эффективным и универсальным методом [57]. В рамках данного метода реализуется итеративный расчет, в котором на каждом шаге расчитываются  $x_{sn}^{p+1}$  и  $y_{sn}^{p+1}$  по следующим формулам:

$$x_{sn}^{p+1} = x_{sn}^{p} + \alpha^{p} \frac{\partial F(x_{sn}^{p}, y_{sn}^{p}, z_{sn}(x_{sn}^{p}, y_{sn}^{p}))}{\partial x_{n}},$$
(2.8)

$$y_{sn}^{p+1} = y_{sn}^{p} + \alpha^{p} \frac{\partial F(x_{sn}^{p}, y_{sn}^{p}, z_{sn}(x_{sn}^{p}, y_{sn}^{p}))}{\partial y_{n}},$$
(2.9)

где  $\alpha^{p}$  – скорость градиентного спуска [58].

Для повышения скорости пространственно-временной обработки возможно применение нескольких подходов. Первый подход связан с тем фактом, что расчеты временных значений для каждого из элементов будут одинаковыми вне зависимости от того, является он зондирующим или принимающим элементом. В связи с этим, целесообразно проводить расчет временных задержек для каждого из элементов AP при распространении ультразвуковых волн в одном направлении и последующее хранение полученных значений для использования их в расчетах для всех возможных комбинаций зондирующего и принимающего элемента.

2.4 Разработка алгоритма пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричной АР с расчетами в частотной области

### 2.4.1 Совмещенный режим работы матричной АР

Алгоритмы с расчетами в частотной области базируются на использовании Быстрого преобразования Фурье, что способно обеспечить высокую вычислительную эффективность. Алгоритмы, основанные на расчетах В частотной области успешно применяются в областях, базирующихся на сходных с эхо-методом ультразвуковой дефектоскопии принципах, например в сейсмологии [59-61] и радиолокации [62-64].

В сейсмологии для реализации алгоритмов пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области используется принцип отражающих излучающих границ [65]. Согласно данному принципу предполагается, что отражатели в зондируемой области являются источниками ультразвуковых волн в один и тот же момент времени (рисунок 2.10). Таким образом, в рамках данной концепции считается, что упругие волны распространяются от отражателя к приемнику со скоростью, равной половине скорости этих упругих волн в среде. Применение такого подхода обусловлено возможностью упростить процесс пространственно-временной обработки без потери качества получаемых изображений.



 а- реальное распространение акустических волн в эхо-методе ультразвуковой дефектоскопии; б – распространение волн согласно принципу излучающих

#### отражающих границ

Рисунок 2.10 – Схема прохождения ультразвуковых волн

Рассмотрим случай проведения ультразвуковой томографии с использованием ультразвукового преобразователя, работающего в совмещенном набор режиме. В трехмерном случае сигналов, зарегистрированных преобразователем при его перемещении в процессе сканирования можно представить в виде функции p(t, x, y, z), где x, y и z – координаты, в которой произошла регистрация эхо-сигнала преобразователем, а *t* – это время. В этом случае волновое уравнение можно записать в следующем виде:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{\hat{c}_l}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right]p(\mathbf{t}, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = 0, \qquad (2.10)$$

где:  $\hat{c}_l$  – половина скорости продольных ультразвуковых волн в среде в соответствии с принципом излучающих отражающих границ.

Частное решение дифференциального уравнения 2.10 может быть представлено в следующем виде:

$$p(t, x, y, z) = Pe^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)},$$
(2.11)

где: *w*-угловая частота;

 $k_x, k_y, k_z$  – компоненты волнового вектора.

Подставляя 2.11 в 2.10 можно получить следующую зависимость:

$$\frac{\omega^2}{\hat{c}_l^2} = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2.$$
(2.12)

Примем компоненту волнового вектора  $k_z$  в качестве зависимой величины и перепишем выражение:

$$k_{z} = -\frac{\omega}{|\omega|} \sqrt{\frac{\omega^{2}}{\hat{c}_{l}^{2}} - k_{x}^{2} - k_{y}^{2}}.$$
 (2.13)

Полное решение уравнения 2.10 есть линейная комбинация частных решений:

$$p(t,x,y,z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \int P(\omega,k_x,k_y) e^{i(k_x x + k_y y + k_z(\omega,k_x,k_y)z - \omega t)} dk_x dk_y d\omega.$$
(2.14)

Приняв:

$$P(\omega, k_x, k_y, z) = P(\omega, k_x, k_y) e^{ik_z(\omega, k_x, k_y)z}.$$
(2.15)

Выражение можно переписать в следующем виде:

$$p(t, x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega, k_x, k_y, z) e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} dk_x dk_y d\omega.$$
(2.16)

Интеграл представляет собой трехмерное обратное преобразование Фурье функции комплексного переменного  $P(\omega, k_x, k_y, z)$ . Используя выражение 2.15 можно описать акустическое поле на глубине  $z + \Delta z$ :

$$P(\omega, k_x, k_y, z + \Delta z) = P(\omega, k_x, k_y, z) e^{ik_z \Delta z}$$
(2.17)

Используя выражение 2.17 можно переписать интеграл 2.16 в следующем виде:

$$p(t, x, y, z + \Delta z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int P(\omega, k_x, k_y, z) e^{ik_z(\omega, k_x, k_y)\Delta z} e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} dk_x dk_y d\omega \qquad (2.18)$$

Применение выражения 2.18 позволяет осуществлять экстраполяцию на требуемую глубину в объекте контроля. Акустическое изображение на глубине  $z + \Delta z$  возможно получить, используя следующее условие, налагаемое в соответствии с концепцией отражающих излучающих границ:

$$I(x, y, z + \Delta z) = p(t = 0, x, y, z + \Delta z).$$
(2.19)

Подставляя выражение 2.19 в 2.18, получаем формулу для получения акустического изображения для слоя  $z + \Delta z$ :

$$I(x, y, z + \Delta z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int P(\omega, k_x, k_y, z) e^{ik_z(\omega, k_x, k_y)\Delta z} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y d\omega.$$
(2.20)

Таким образом, последовательно получая слой за слоем с разрешением  $\Delta z$ изображение внутренней структуры объекта контроля, представляется возможным получение полного изображения. Рассмотренный подход получил название алгоритма фазового сдвига [66]. Подобный алгоритм обеспечивает возможность проводить пространственно-временную обработку при наличии на пути распространения ультразвуковых волн сред с различными акустическими свойствами, что реализуется за счет использования различной скорости ультразвуковых волн  $\hat{c}_{i}$ при восстановлении слоев синтезированного изображения.

В случае если скорость распространения ультразвуковых волн в области восстановления изображения постоянна, то представляется возможным использовать более вычислительно эффективный подход с использованием преобразованием Столта [67]. Согласно данному подходу в выражении 2.13, угловая частота выбирается в качестве зависимой величины:

$$\omega(k_x, k_y, k_z) = -\frac{k_z}{|k_z|} \cdot \hat{c}_l \cdot \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \,. \tag{2.21}$$

Подставляя выражение 2.21 в выражение 2.20, получаем:

$$I(x, y, z + \Delta z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int P(k_x, k_y, k_z, z) e^{ik_z \Delta z} e^{ik_x x} e^{ik_y y} dk_x dk_y dk_z , \qquad (2.22)$$

где:

$$P(k_{x}, k_{y}, k_{z}, z) = A(k_{x}, k_{y}, k_{z}) \cdot P(\omega(k_{x}, k_{y}, k_{z}), k_{x}, k_{y}, z), \qquad (2.23)$$

$$A(k_{x},k_{y},k_{z}) = -\frac{k_{z}}{|k_{z}|} \frac{\hat{c}_{l}}{\sqrt{1 + \frac{k_{x}^{2} + k_{y}^{2}}{k_{z}^{2}}}}$$
(2.24)

Подобный подход позволяет получить полное синтезированное изображение внутренней структуры объекта контроля без необходимости его получения по слоям, что обеспечивает более высокую по сравнению с алгоритмом фазового сдвига скорость пространственно-временной обработки. Тем не менее, получение корректных синтезированных изображений возможно только в случае постоянной скорости распространения ультразвуковых волн области В восстановления изображения.

В случае ультразвукового контроля с использованием иммерсионного акустического контакта или призм целесообразным является объединение алгоритма фазового сдвига и преобразования Столта. Подобный подход состоит из нескольких шагов:

1. Преобразование Фурье функции p(t,x,y,z);

2. Экстраполяция акустического поля на границу раздела иммерсионная среда-объект контроля методом фазового сдвига;

3. Получение синтезированного изображения с использованием интерполяции Столта с последующим обратным преобразованием Фурье.

2.4.2 Работа матричной АР в режиме двойного сканирования

Использование AP требует адаптации алгоритма пространственновременной обработки с расчетами в частотной области для раздельных режимов зондирования объекта контроля и приема эхо-сигналов, к которым в том числе, относится режим двойного сканирования. Это обусловлено отличным пространственным спектром сигналов, зарегистрированных с использованием режима двойного сканирования по сравнению с совмещенным режимом [68].

Существуют различные подходы для реализации пространственновременной обработки с расчетами в частотной области при использовании раздельных схем регистрации ультразвуковых данных, которые нашли применение в ультразвуковом контроле и смежных областях.

Один из подходов заключается в применении преобразования Столта для набора эхо-сигналов, полученных в режиме двойного сканирования [28]. В двумерном случае набор эхо-сигналов может быть описан функцией  $p(t,x_k,x_n)$ , где  $x_k$  – координата зондирующего элемента, а  $x_n$  – координата принимающего элемента. Реализация подхода подразумевает применение трехмерного преобразования Фурье к функции  $p(t, x_k, x_n)$ :

$$P(\omega, k_{xk}, k_{xn}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x_k, x_n) \cdot e^{-i(k_{xk}x_k + k_{xn}x_n - \omega t)} dx_n dx_k dt, \qquad (2.25)$$

Дальнейшая пространственно-временная обработка осуществляется для каждого слоя трехмерной функции  $P(\omega, k_{xk}, k_{xn})$  при  $k_x^n = const$ . Следующий шаг заключается в замене переменных  $k_{xk}$  и  $k_{xn}$  и связанная с ней необходимость интерполяции функции:

$$P_n(\omega, k_{xk}(k_{xn})) \to P_n(k_z, k_x), \qquad (2.26)$$

где:

$$k_{x} = k_{xk} + k_{xn}; \qquad (2.27)$$

$$k = \frac{W}{c} =$$

$$= \frac{\pm (k_{z}^{4} + 2 \cdot (\mathbf{k}_{xn}^{2} + (\mathbf{k}_{x} - \mathbf{k}_{xn})^{2}) \cdot k_{z}^{2} + \mathbf{k}_{xn}^{4} + (k_{x} - \mathbf{k}_{xn})^{4} - 2 \cdot \mathbf{k}_{xn}^{2} \cdot (k_{x} - \mathbf{k}_{xn})^{2})^{1/2}}{2 \cdot k_{z}} \qquad (2.28)$$

Полученные для разных циклов работы АР парциальные изображения складываются для получения полного изображения:

$$P(k_z, k_x) = \sum_{i=1}^{N} P_i(k_z, k_x)$$
(2.29)

После этого применяется двумерное преобразование Фурье для получения окончательного результата:

$$\operatorname{Im}(x,z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(k_z,k_x) \cdot e^{k_x x + k_z z} dk_x dk_z$$
(2.30)

В контексте вопроса создания вычислительно-эффективного алгоритма недостатком предложенного подхода является необходимость осуществления трехмерного преобразования Фурье при получении двумерного изображения. образом, Таким пространственно-временная обработка С использованием AP матричных В трехмерном пространстве будет требовать уже соответствующего многомерного преобразования Фурье. Это приводит к потере вычислительной эффективности по сравнению с пространственно-временной обработкой с расчетами в частотной области для преобразователей, работающих в с совмещенном режиме.

В связи с этим, более перспективным с точки зрения вычислительной эффективности является идея о применении принципа общей средней точки [65]. В рамках ультразвукового контроля данный принцип заключается в определении сигналов, зарегистрированных элементами AP, дискретной функцией p(t,x,y), где x и y –координаты средней точки между зондирующим и принимающим элементом. Применение подобного подхода преимущественно нашло применение в области сейсмологии, но его использование рассматривается и в других областях, связанных с решением обратных задач, например в радарной технике

[69] и в ультразвуковой томографии с использованием линейных АР [70]. В связи с этим, для режима двойного сканирования требуется преобразование набора эхосигналов:

$$P(t_b, x_k, y_k, \mathbf{x}_n, y_n) \to P(t_m, x_m, \mathbf{y}_m), \qquad (2.31)$$

где:  $x_k, y_k$  – координаты зондирующего элемента;

*x*<sub>n</sub>, *y*<sub>n</sub> – координаты принимающего элемента,

*x<sub>m</sub>*, *y<sub>m</sub>* – координаты средней точки между передающим и принимающим элементом,

 $t_b$  – временной отсчет,

*t*<sub>*m*</sub> – корректированный временной отсчет.

Реализация подобной корректировки может быть осуществлена с использованием следующей формулы [71]:

$$t_m = t_b - \frac{1}{t_b} \frac{((x_k - x_n)^2 + (y_k - y_n)^2)}{2c^2},$$
(2.32)

где с – скорость распространения ультразвуковых волн в среде.

Проведенная коррекция позволяет учесть различное расположение зондирующего и принимающего элементов для различных эхо-сигналов, принадлежащих одной общей средней точке. Впоследствии эхо-сигналы, принадлежащие одной общей средней точке, могут быть просуммированы для увеличения амплитуды полезного сигнала.

2.4.3 Пространственно-временная обработка с расчетами в частотной области с компенсацией непараллельности плоскости сканирования относительно поверхности объекта контроля

Одним из факторов, на практике серьезно снижающим качество восстанавливаемых синтезированных изображений, является непараллельность плоскости ультразвукового сканирования относительно границ объекта контроля. Подобный фактор возникает в случае, когда объект контроля имеет сложную форму или применяются наклонные призмы. Таким образом, в данном случае требуется модификация рассмотренных ранее подходов.

В случае если объект контроля имеет небольшой радиус кривизны, то в одной позиции ультразвукового преобразователя профиль его поверхности можно считать наклоненным относительно плоскости сканирования. Рассмотрим частный случай, при котором объект контроля наклонен относительно плоскости сканирования по оси X на угол  $\theta$  (рисунок 2.11). Тогда задача компенсации наклона плоскости сканирования относительно поверхности объекта контроля заключается в получении из функции p(t,x,y,z) функции p(t,x',y',z'), при этом ось X' должна быть параллельна границам образца. Задача компенсации такого наклона может быть решена путем экстраполяции функции p(t,x,y,z) с использованием метода фазового сдвига, при этом глубина осуществляемого сдвига будет зависеть от координаты x функции:

$$\Delta z = \Delta x \cdot n \cdot \tan(\theta), \ n = 1...N,$$
(2.33)

где *N* – общее количество отсчетов по оси *X*.



Рисунок 2.11 – Компенсация наклона объекта контроля относительно оси Х

Таким образом, решение поставленной задачи включает в себя:

1. Трехмерное преобразование Фурье функции P(t, x, y, z):

$$P(\omega, k_x, k_y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x, y, z) \cdot e^{-i(k_x x + k_y y - \omega t)} dx dy dt.$$
(2.34)

2. Экстраполяция функции  $P(\omega, k_x, \mathbf{k}_y, \mathbf{z})$  на глубину  $\Delta z_n$ :

$$P(\omega, k_x, k_y, z + \Delta z_n) = P(\omega, k_x, k_y, z) \cdot e^{i(k_z \Delta z_n)}.$$
(2.35)

3. Обратное преобразование Фурье и получение откорректированной функции P(t, x', y, z'), в точке  $x'_n$ .

Результатом применения предложенного подхода является функция P(t, x', y, z') скорректированная относительно поверхности объекта контроля по оси *X*, где:

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\cos \theta} \tag{2.36}$$

Дальнейшая пространственно-временная обработка может быть осуществлена с использованием функции p(t, x', y, z') и подходом, рассмотренным в разделе 2.4.1.

Наклон объекта контроля относительно плоскости сканирования по двум осям является общим случаем и описывается двумя углами  $\theta$  (наклон относительно оси X) и  $\varphi$  (наклон относительно оси Y). В данном случае компенсация наклона осуществляется аналогично и заключается в получении функции p(t,x',y',z') из функции p(t,x,y,z), при этом оси X' и Y' должны быть параллельны поверхности объекта контроля. Компенсацию наклона объекта контроля, пространственно-временную обработку и получение синтезированного изображения можно осуществить с использованием формул 2.34 и 2.35. Отличие заключается в зависимости координат до осуществления компенсации наклона (x,y,z) и после нее (x',y',z'):

$$\Delta z_{nk} = n \cdot \Delta x \cdot \tan(\theta) + k \cdot \Delta y \cdot \tan(\varphi), \ n = \overline{1...N}, \ k = \overline{1...K},$$
(2.37)

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\cos(\theta)},\tag{2.37}$$

$$\Delta y' = \frac{\Delta y}{\cos(\varphi)}.\tag{2.40}$$

2.5 Выводы к главе 2

1. Создание алгоритмов пространственно-временной обработки является актуальным вопросом разработки и внедрения систем ультразвуковой томографии с использованием матричных АР.

2. Разрабатываемые алгоритмы должны обеспечивать высокую скорость восстановления синтезированных изображений высокого качества.

3. На основании анализа научной и технической литературы, посвященной вопросам пространственно-временной обработки в ультразвуковой томографии и смежных областях, были разработаны алгоритмы с расчетами в частотной и временной области. Данные алгоритмы способны корректно учитывать пространственный спектр зарегистрированных сигналов при использовании раздельных режимов регистрации данных, а также учитывать сложную форму объектов контроля.

4. Для определения наиболее оптимального алгоритма пространственновременной обработки требуется их экспериментальное сравнение при различных условиях проведения ультразвуковой томографии.

# ГЛАВА 3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА CIVA UT

3.1 Описание программного пакета CIVA UT

Программный пакет CIVA UT является одним из наиболее универсальных средств моделирования физических процессов, имеющих место при проведении ультразвукового неразрушающего контроля. Программный пакет CIVA UT способен решать широкий спектр задач, к которым можно отнести:

Моделирование различных схем ультразвукового неразрушающего контроля;

Оптимизация параметров методики контроля (выбор оптимальных схем контроля, выбор оптимальных преобразователей);

Проверка пригодности продукции для неразрушающего контроля до производства;

Расчет кривых вероятности обнаружения дефектов;

Помощь в интерпретации результатов контроля;

- Возможность сравнения результатов контроля и моделирования;

 Визуальная поддержка при подготовке сложных технических предложений и презентации новых инновационных решений;

– Поддержка при утверждении документации и методики.

Для решения рассмотренных задач в программном пакете CIVA реализованы модули расчета акустического поля создаваемого преобразователем (Beam computation module), и модуль симуляции ультразвукового контроля, в котором моделируется взаимодействие ультразвуковых волн с дефектами в объекте контроля (Inspection simulation).

В обоих модулях реализованы следующие инструменты:

- Определение формы и структуры объекта контроля;

- Выбор ультразвукового преобразователя и определение его параметров.

Форма объекта контроля может быть определена как с помощью набора стандартных фигур, так и с использованием CAD-моделей, которые могут быть загружены в программный пакет. При этом объект контроля может быть гомогенным или гетерогенным. Возможно осуществление симуляций не только для металлических объектов, но и для композитных материалов, для которых в программном пакете реализована специальная модель. Для анализа влияния микроструктуры объекта контроля на параметры структурного шума в CIVA 2016 реализована поликристаллическая модель. Для моделирования распространения ультразвуковых волн и их взаимодействия с дефектами в материалах с крупнозернистой структурой, в программном пакете можно пользоваться моделью Coarse grain, специально разработанной для решения данной задачи.

В программном пакете CIVA UT возможно моделирование с использованием широкого набора ультразвуковых преобразователей, который могут быть разделены на следующие группы:

 Совмещенные, раздельно-совмещеные ультразвуковые преобразователи, AP;

- Пьезоэлектрические и электромагнитные акустические преобразователи;

Ультразвуковые преобразователи для иммерсионного и контактного контроля;

 Ультразвуковые преобразователи прямоугольной, круглой или эллиптической формы;

– Фокусированные и нефокусированные преобразователи.

Для АР представляется возможным задать произвольный фокальный закон, что позволяет получить требуемый режим сканирования внутренней структуры объекта контроля.

В режиме симуляции ультразвукового контроля также можно определить форму и размер дефектов в объекте контроля. К дефектам, которые могут быть определены, относятся: Дефекты, используемые в стандартных образцах (плоскодонные и боковые отверстия);

Плоские дефекты (прямоугольные и эллиптические);

- Трещины;

- Объемные дефекты (поры и включения).

Несомненным преимуществом программного пакета CIVA UT при проверке возможностей разрабатываемых алгоритмов является наличие в нем модуля Total Focusing Method (TFM), который может быть применен к результатам компьютерного моделирования. Алгоритм, являющийся основой модуля TFM, базируется на расчетах во временной области [72].Таким образом, возможности разработанных алгоритмов могут быть проверены путем сравнения результатов, полученных с их использованием, и результатов, полученных при использовании модуля TFM в CIVA UT при одном и том же наборе эхо-сигналов.

3.2 Применение компьютерного моделирования для проведения сравнительного анализа алгоритмов пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР

Таким образом, сравнительный анализ алгоритмов, рассмотренных в предыдущих разделах, проводился с использованием программного пакета CIVA UT. При этом параметры моделирования выбирались как можно ближе к параметрам планируемых натурных экспериментов. Для этой цели применялся модуль Inspection simulation. В качестве объекта контроля использовался стальной блок размерами 90х100х40 мм. Скорость продольных ультразвуковых волн в объекте контроля составляла 5900 м/с, а поперечных волн – 3230 м/с. Объект контроля содержал плоскодонные отверстия диаметром 3 мм. Расположение дефектов в объекте контроля представлено на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Расположение дефектов в образце

В приведенной на рисунке 3.1 системе координат дефекты имеют параметры, представленные в таблице 3.1.

Рисунок 3.1 – Параметры дефектов в объекте контроля

Дефект	А	В	С	D	Е	F	G	Н	Ι
Х, мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Ү, мм	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Глубина сверления, мм	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Диаметр, мм	3	3	3	3	3	3	3	3	3

В качестве ультразвукового преобразователя использовалась AP, состоящая из 64 элементов. AP имела матричную структуру размерностью 8х8 элементов. Рабочая частота каждого элемента составляла 5 МГц, шаг преобразователя был равен 1 мм.

В качестве акустического контакта между преобразователем и объектом контроля использовался слой воды толщиной 30 мм (скорость продольных волн 1480 м/с). Для получения первичных данных о структуре объекта контроля

осуществлялось его двумерное сканирование. Траектория сканирования характеризуется шагом между двумя последовательными измерительными позициями и шагом между двумя соседними линиями сканирования. В рамках компьютерного моделирования оба этих шага были выбраны равными 1 мм. В каждой измерительной позиции получение набора эхо-сигналов производилось в режиме двойного сканирования. При этом рассматривалось два случая. В первом случае поверхность объекта контроля была параллельна плоскости сканирования. Во втором случае для имитации сложной формы объекта контроля, стальной блок был наклонен на угол 5° относительно плоскости сканирования.

Результатом проведения компьютерного моделирования является набор эхо-сигналов с указанием координат измерительных позиций, в которых сигналы были получены. Данный набор был импортирован из программного пакета CIVA в программный пакет Matlab R2016а для проведения пространственно-временной обработки с использованием рассматриваемых алгоритмов. В рамках пространственно-временной обработки осуществляется восстановление изображений структуры объекта контроля в каждой измерительной позиции. Таким образом, в каждой точке сканирования осуществлялось восстановление парциального изображения размерностью 40х40х90 мм и разрешением 0.25 мм по всем трем осям. Впоследствии полученные парциальные изображения когерентно суммировались для получения полного изображения, которое и является итоговым результатом работы алгоритма. Все расчеты в рамках пространственновременной обработки С использованием рассматриваемых алгоритмов осуществлялись на ЭВМ с четырехядерным и восьмипоточным процессором Intel Соге і7-4790К и ОЗУ 16 Гб.

Для результатов, полученных оценки качества С использованием алгоритмов расчета в частотной и временной области, осуществлялась пространственно-временная обработка набора эхо-сигналов с использованием модуля TFM в CIVA. Параметры пространственно-временной обработки с использованием модуля TFM были выбраны аналогично параметрам, определенным при восстановлении изображения С использованием

61

рассматриваемых алгоритмов. Результатом применения модуля TFM к набору эхо-сигналов является полное изображение внутренней структуры объекта контроля, которое для проведения анализа было импортировано из программного пакета CIVA в программный пакет Matlab R2016a.

результатов, Анализ полученных с использованием разработанных с алгоритмов, проводился В соответствии качеством полученных синтезированных изображений, а также времени, затраченного на их получение. Скорость получения результатов может быть оценена путем определения времени, затрачиваемого алгоритмом на восстановление синтезированного изображения в одной измерительной позиции. В рамках оценки качества изображений, полученных с использованием алгоритмов пространственновременной обработки, ключевым вопросом является фронтальная разрешающая способность полученных результатов [73]. Оценка фронтальной разрешающей способности может быть проведена на основании определения поперечных размеров дефектов в полученных синтезированных изображениях.

3.3 Результаты пространственно-временной обработки результатов компьютерного моделирования с использованием предложенных алгоритмов

Результатом применения пространственно-временной обработки к результатам компьютерного моделирования является трехмерное синтезированное изображение внутренней структуры объекта контроля (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Пример трехмерного изображения

Для обеспечения большей информативности полученных результатов целесообразно представлять трехмерные результаты в форме их проекций на три ортогональные плоскости (В-, С- и D-сканы).

На рисунке 3.3 представлены три проекции объемного результата, полученного с использованием алгоритма пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области в случае параллельности поверхности объекта контроля плоскости сканирования. Аналогичные результаты для алгоритма с расчетами во временной области, и модуля TFM, реализованного в программном пакете CIVA представлены на рисунках 3.4 и 3.5 соответственно.



Рисунок 3.3 – Три проекции полученного трехмерного результата плоского блока при использовании алгоритма пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области



Рисунок 3.4– Три проекции полученного трехмерного результата плоского блока при использовании алгоритма пространственно-временной обработки с расчетами во временной области



Рисунок 3.5 – Три проекции полученного трехмерного результата плоского блока при использовании алгоритма TFM в программном пакете CIVA

Полученные синтезированные изображения могут быть использованы для оценки поперечных размеров отражателей. Повышение точности определения размеров несплошностей с помощью синтезированных изображений является актуальной задачей развития технологий ультразвуковой томографии на основе метода синтезированной апертуры [74,75]. Для оценки размеров плоскодонных отверстий может быть использован метод половины амплитуды (-6 dB drop method) [76]. В связи оценки размеров отражателей С ЭТИМ, ДЛЯ на синтезированных изображениях восстанавливались профили отражателей на оси Х и Ү. С использованием полученных профилей находились координаты крайних точек, в которых амплитуда была не менее -6 дБ от максимальной амплитуды соответствующей данному отражателю (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Получение профилей несплошности из синтезированных изображений и оценка размеров дефекта методом половины амплитуды

После этого определялись поперечные размеры отражателей  $d_x$  и  $d_y$  на синтезированных изображениях:

$$d_x = x_{\max} - x_{\min} \tag{3.1}$$

$$d_{y} = y_{\max} - y_{\min} \tag{3.2}$$

Диаметр плоскодонного отверстия оценивался как среднее арефмитическое между поперечными размерами отражателя:

66

$$d_{est} = \frac{d_x + d_y}{2}.$$
(3.3)

Кроме того, с использованием полученных размеров дефектов определялась относительная погрешность определения диаметров отверстий по формуле:

$$\delta_d = \frac{|d_{est} - d_{real}|}{d_{real}} \cdot 100\%, \qquad (3.4)$$

где: *d<sub>real</sub>* – реальный размер дефекта

Диаметры, полученные с использованием метода половины амплитуды, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты оценки дефектов по синтезированным изображениям, полученным с использованием различных алгоритмов

Алгоритм	Параметр	Дефект									
		А	В	С	D	Е	F	G	Η	Ι	
Алгоритм	Диаметр, мм	3,2	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	2,8	2,8	2,7	
расчета во временной области	Относительная погрешность, %	Iьная сть,       6,7       3,3       3,3       0       0       3,3       6,7       6         мм       2,9       3,1       3,0       3,0       3,0       3,0       2,9       2         пьная сть       6,7       3,3       0       0       0       3,3       6,7       6	6,7	10							
Алгоритм расчета в частотной области	Диаметр, мм	2,9	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,8	2,8	
	Относительная погрешность, %	6,7	3,3	0	0	0	0	3,3	6,7	6,7	
Алгоритм TFM в CIVA	Диаметр, мм	2,9	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,8	
	Относительная погрешность, %	3,3	3,3	3,3	3,3	0	0	3,3	6,7	6,7	

Исходя из полученных значений, можно сделать вывод о том, что разработанные алгоритмы обеспечивают получение результатов со сходной фронтальной разрешающей способностью. Кроме того, размеры дефектов на синтезированных изображениях при использовании данных алгоритмов оказались близки к значениям, полученным с использованием алгоритма TFM, реализованного в коммерческом программном пакете CIVA UT. Разница в оценке размеров дефектов при использовании различных подходов не превышала 3,3%.

На рисунке 3.7 представлены три проекции объемного результата, полученного с использованием алгоритма пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области в случае, когда объект контроля располагается под наклоном относительно плоскости сканирования. Аналогичные результаты для алгоритма с расчетами во временной области, и алгоритма TFM, реализованного в программном пакете CIVA представлены на рисунках 3.8 и 3.9 соответственно.



Рисунок 3.7 – Три проекции полученного трехмерного результата блока под наклоном при использовании алгоритма расчета в частотной области



Рисунок 3.8 – Три проекции полученного трехмерного результата блока под наклоном при использовании алгоритма расчета во временной области



Рисунок 3.9 – Три проекции полученного трехмерного результата блока под наклоном при использовании алгоритма TFM в программном пакете CIVA

Аналогично случаю, когда поверхность объекта контроля располагалась параллельно плоскости сканирования, проводилась оценка диаметров плоскодонных отверстий на полученных синтезированных изображениях (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Результаты оценки дефектов по синтезированным изображениям, полученным с использованием различных алгоритмов

Алгоритм	Параметр	Дефект									
		А	В	С	D	Е	F	G	Н	Ι	
Алгоритм расчета во временной области	Диаметр, мм	2,9	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,8	2,7	
	Относительная погрешность, %	3,3	3,3	3,3	0	0	0	3,3	6,7	10	
Алгоритм расчета в частотной области	Диаметр, мм	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,8	2,7	2,7	
	Относительная погрешность, %	0	0	0	0	0	0	6,7	10	10	
Алгоритм TFM в CIVA	Диаметр, мм	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9	2,8	
	Относительная погрешность, %	3,3	3,3	0	0	0	0	3,3	3,3	6,7	

Таким образом, размеры дефектов на синтезированных изображениях, полученные с использованием алгоритмов с расчетами в частотной и временной области, а также с применением модуля TFM в программном пакете CIVA оказались сходными. Разница в оценке размеров дефектов при использовании различных подходов не превышала 3,3%.

Другим вопросом в рамках использования матричных АР является скорость восстановления изображений внутренней структуры объектов с применением различных алгоритмов пространственно-временной обработки. Для сравнительного анализа вычислительной эффективности алгоритмов расчета во временной и частотной области рассматривалась пространственно-временная обработка в одной измерительной позиции. В рамках сравнения изменялось количество вокселей в синтезированном изображении и определялось время,

69

затрачиваемое алгоритмом на его восстановление. Результаты проведенного сравнительного анализа представлены на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Зависимость времени, затрачиваемого на пространственновременную обработку, от количества вокселей в синтезированном изображении

Полученные результаты свидетельствуют о более высокой вычислительной эффективности алгоритма с расчетами в частотной области. При сходной с временной области фронтальной алгоритмом расчета BO разрешающей способности полученных синтезированных изображений алгоритм расчета в частотной области обладает более высокой производительностью. При этом выигрыш в производительности при использовании предложенного алгоритма перед алгоритмом расчета во временной области растет при увеличении вокселей восстанавливаемом синтезированном количества В изображении. Необходимо отметить, что реализация алгоритмов пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР осуществлялся базе персонального компьютера использованием на С программного пакета Matlab R2016а. Отдельным вопросом в рамках реализации

алгоритмов пространственно-временной обработки является их аппаратная оптимизация, которая не рассматривалась в данной работе.

3.4 Выводы к главе 3.

1. Оптимальный алгоритм пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР должен обеспечивать высокую скорость восстановления синтезированных изображений высокого качества. Для этого требуется проведение сравнительного анализа подходов к реализации подобного алгоритма при различных условиях проведения ультразвуковой томографии.

2. Проведенный сравнительный анализ с использованием компьютерного моделирования в программном пакете CIVA показал, что алгоритмы пространственно-временной обработки с расчетами в частотной и временной области способны обеспечить сходную фронтальную разрешающую способность при различных условиях проведения ультразвуковой томографии.

3. Также проведенный сравнительный анализ показал, что алгоритм расчета в частотной области способен обеспечить более высокую скорость восстановления изображений по сравнению с алгоритмом расчета во временной области. Выигрыш во времени при использовании алгоритма расчета в частотной области растет тем сильнее, чем больше вокселей содержит синтезированное изображение.

4. На основании проведенного сравнительного анализа представляется возможным сделать вывод о том, что алгоритм расчета в частотной области является наиболее оптимальным подходом, обеспечивающим восстановление синтезированных изображений с высокой скоростью и фронтальной разрешающей способностью.

## ГЛАВА 4. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ЭКСПЕРИМЕНТА

## 4.1 Описание контролируемого образца

Для проведения серии экспериментов был подготовлен контрольный образец (рисунок 4.1). Тестовый образец представляет собой стальной блок с плоскопараллельными границами. Скорость продольных акустических волн в данном образце составляла 5900 м/с. Объект контроля содержал плоскодонные отверстия, имеющие различные форму и размеры. Плоскодонные отверстия имеют круглую (дефекты 1.1-1.40) и прямоугольную форму (дефекты 2.1 – 2.4). Расположение дефектов показано на рисунке 4.2.



Рисунок 4.1 – Тестовый образец


Рисунок 4.2 – Расположение дефектов в образце

Согласно приведенной в рисунке 4.2 системе координат параметры плоскодонных отверстий круглой формы представлены в таблице 4.1.

Дефект	Расположение	Расположение	Диаметр	Глубина
	центра по оси	центра по оси		сверления, мм
	Х, мм	Ү, мм		
1.1	30	70	3	20
1.2	30	110	3	10
1.3	36	70	3	10
1.4	36	110	3	10
1.5	50	70	3	5
1.6	50	110	3	15
1.7	58	70	3	10
1.8	58	110	3	15
1.9	72,2	77,8	3	20
1.10	75	115	3	10
1.11	76,5	73,5	3	20

Таблица 4.1 – Параметры круглых плоскодонных отверстий в тестовом образце

# Продолжение таблицы 4.1

1.12	80	110	3	10
1.13	83,5	66,5	3	5
1.14	85	105	3	10
1.15	87,7	62,2	3	5
1.16	107,2	77,8	2	5
1.17	110	115	2	10
1.18	111,5	73,5	2	5
1.19	115	110	2	10
1.20	118,5	66,5	2	10
1.21	120	105	2	10
1.22	122,8	62,2	2	10
1.23	134,7	35,3	5	10
1.24	140	70	5	5
1.25	140	110	5	20
1.26	145,3	24,7	5	20
1.27	150	70	5	20
1.28	150	110	5	20
1.29	150	35	3	15
1.30	155	30	3	10
1.31	160	25	3	5
1.32	160	70	5	15
1.33	160	110	5	20
1.34	160	35	2	10
1.35	165	30	2	5
1.36	168	70	2	10
1.37	170	25	2	10
1.38	170	110	2	5
1.39	175	110	2	5
1.40	176	70	2	10

## 4.2 Описание экспериментальной установки

Эксперименты проводились на экспериментальной установке, структурная схема которой представлена на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Структурная схема экспериментальной установки

Манипулятор экспериментальной установки обеспечивает перемещение преобразователя в процессе сканирования по двум осям и управляется с помощью блока управления. В процессе сканирования текущие координаты преобразователя передаются на блок управления манипулятором, а впоследствии – на управляющий компьютер. Блок управления манипулятором представляет собой отдельное устройство, интегрированное в систему проведения измерений, и получает данные посредством кабельного соединения.

(преобразователя) Для управления элементами матричной AP И регистрации наборов эхо-сигналов в экспериментальной установке используется блок УЗ электроники (I-Deal Technologies GmbH). Блок является 128-канальным модулем, обеспечивающим работу как с использованием одноканальных преобразователей, так и с применением АР. Для скоростного обмена данными с ультразвуковым преобразователем блок оснащен оптическим каналом данных с пропускной способностью до 2 Гбит/с. Основные технические характеристики блока УЗ электроники OPTUS соответствуют требованиям ГОСТ 26266-90 и EN-12668-1 «Неразрушающий контроль Характеристика — И верификация ультразвукового контрольного оборудования. Часть 1: Контрольные устройства». Основные параметры электронного блока представлены в таблице 4.2.

	Количество излучателей	128
	Напряжение зондирующего	-50 до -180 Вольт на нагрузку 50 Ом
	импульса	
	Форма зондирующего импульса	прямоугольный, отрицательный
	Ширина зондирующего	от 12,5 нс до 800 нс, регулируется с
	импульса	шагом 2 нс
	Длительность фронта	9 нс $\pm$ 3 нс (нарастание амплитуды от 10 % до 90 %)
Излучатель	Длительность спада	20 нс ± 5 нс (спад амплитуды от 90 % ло 10 %)
	Выхолной импеланс	50 OM
	Частота следования	ло 15 КГц. в зависимости от ширины
		импульса, зондирующего напряжения,
		частоты дискретизации и диапазона
		контроля
	Задержка зондирующего	от 0 нс до 12,8 мкс с шагом 0,25 нс
	импульса	
	Количество приёмников	128 (16 MUX 8)
	Пороговое значение входного	100 мкВ
	напряжения	
	Макс. значение входного	10 BSS
	напряжения	
	Динамика усилительного тракта	> 100 дБ
	Значения усиления	0 – 100 дБ, с шагом 0,1 дБ
	Тип усилительного тракта	линейный
Усилительный	Линейность вертикального	<±1% высоты экрана
блок	тракта усилителя	500 KE 20 ME
	Частотный диапазон	от 500 КІ ц до 20 МІ ц
	усилительного тракта	(по уровню – 3 дв)
	Аналоговые фильтры	2 полосовых фильтра на выоранных
	Режимы работы	Эхо-импульсный разлельно-
		совмешённый
	Установка задержки сигнала в	Точная установка: от 3.2 нс до 14.8 нс с
	канале	шагом 10 пкс, Грубая установка: от
		12,5 нс до 819 мкс с шагом 12,5 нс
	АЦП	14 бит (13 бит + знаковый бит), 80 МГц
	Динамический диапазон АЦП	> 72 дБ при частоте оцифровки 80 МГц
	Частота оцифровки	80, 40, 20, 10 МГц, регулируемо для
		такта измерения
<b>**</b> 1	Временное разрешение	12.5, 25, 50, 100 нс в зависимости от
Цифровой		частоты оцифровки
олок	Длина данных в канале	до 65535 сэмплов
	АЦП	14 бит (13 бит + знаковый бит), 80 МГц
	Динамический диапазон АЦП	> 72 дБ при частоте оцифровки 80 МГц
	Частота оцифровки	80, 40, 20, 10 МГц, регулируемо для
		такта измерения

Продолжение таблицы 4.2

Цифровой	Временное разрешение	12.5, 25, 50, 100 нс в зависимости от
блок		частоты оцифровки
	Длина данных в канале	до 65.535 сэмплов
	АЦП	14 бит (13 бит + знаковый бит), 80 МГц

Сохранение набора эхо-сигналов и координат преобразователя, а также управление зондированием объекта контроля и перемещением преобразователя осуществляется с использованием управляющего компьютера. Основные параметры управляющего компьютера представлены в таблице 4.3.

Название	составного	Модель/значение
элемента/характеристики		
Чипсет материнской платы		Intel® C602
Процессор		E5-2630v2
Видеоплата		Asus GTX680-DC2-2GD5 NVIDIA GTX
		680
Тактовая частота		6х2,60 ГГЦ
Размер оперативной памяти		4 Гб
Технология оперативной пам	ЯТИ	DDR3 ECC
Тактирование оперативной па	амяти	РСЗ 12800 (1600 МГц)
Объём жесткого диска HDD		1 Тб
Тип интерфейса жесткого дис	ска	S-ATA 6.0Гб/с
Блок питания		1120 Вт

Таблица 4.3 – Параметры управляющего компьютера

4.3 Методика снятия входных данных для пространственно-временной обработки

Для обеспечения стабильного акустического контакта объект контроля размещался в иммерсионной ванне. Для сканирования объекта контроля применялась матричная AP Doppler 5M8×8BP 1.0 (рисунок 4.4). Преобразователь состоит из 64 элементов, формирующих матрицу размерностью 8x8. Шаг матричной AP составляет 1 мм, размер каждого элемента при этом составляет 0.8x0.8 мм. Номинальная частота преобразователя – 5 МГц. На рисунке 4.5

представлены рабочие частоты элементов матричной АР, а на рисунке 4.6 –полоса пропускания каждого из них.



Рисунок 4.4 – Ультразвуковой преобразователь Doppler 5M8×8BP 1.0



Рисунок 4.5 – Рабочие частоты элементов АР



Рисунок 4.6 – Полоса пропускания элементов АР

Матричная АР размещалась на манипуляторе экспериментальной установки, который осуществлял перемещение преобразователя в процессе проведения сканирования.

Сканирование объекта контроля осуществлялось по траектории меандра (рисунок 4.7). Подобная траектория характеризуется двумя параметрами: шагом сканирования между двумя ближайшими измерительными позициями, и шагом между двумя соседними линиями сканирования. В двух сериях измерений шаг между соседними измерительными позициями и шаг между соседними линиями сканирования был принят равным 1 мм. В каждой измерительной позиции набор эхо-сигналов регистрировался в режиме двойного сканирования. В результате сканирования все наборы эхо-сигналов были записаны в файл с указанием координат в которых эти сигналы были получены.



Рисунок 4.7 – Сканирование объекта контроля по траектории меандра

4.4 Процедура проведения пространственно-временной обработки ультразвуковых данных матричной АР

Полученные в результате сканирования файлы с измерениями загружались в программное обеспечение, разработанное для пространственно-временной обработки ультразвуковых сигналов матричной AP с использованием алгоритма расчета в частотной области, целесообразность применения которого была подтверждена в главе 3. ПО интегрировано в экспериментальную установку, а для его разработки применялся программный пакет Matlab R2016a.

Разработанное экспериментальное ПО включает в себя следующие модули:

модуль считывания наборов эхо-сигналов;

- модуль восстановления изображения в одной измерительной позиции;

 модуль когерентного сложения парциальных изображений для получения полного синтезированного изображения;

– модуль записи результатов пространственно-временной обработки.

Общий вид ПО состоит из четырех вкладок. Во вкладке «Файл» (рисунок 4.8) требуется указать путь к папке, где хранятся результаты измерения, а также определить расположение и имя файла, в который будут записаны результаты пространственно-временной обработки.

Файл	Преобразователь	Сканирование	Реконструкция
Файлы			
Путь к файлам	с данными:		
Сохранение ре файл	вультатов в		

Рисунок 4.8 – Вкладка «Файл» экспериментального ПО

Во вкладке «Преобразователь» (рисунок 4.9) требуется указать параметры АР, которые использовались при проведении измерения (количество элементов, шаг и рабочая частота АР).

Файл	Преобразователь	Сканирование	Реконструкция
Параметры прео	бразователя	•	
Количество эл оси	ементов по Х		
Количество эл оси	ементов по Y		
Шаг преобраз оси X,	ователя по ММ		
Шаг преобраз оси Y,	ователя по ММ		
Рабочая ч преобразова	астота теля, МГц		

Рисунок 4.9 – Вкладка «Преобразователь» экспериментального ПО

Вкладка «Сканирование» (Рисунок 4.10) предполагает определение параметров, которые были использованы при сканировании объекта контроля. К перечню подобных параметров относится шаг сканирования, ориентация преобразователя в процессе контроля, частота оцифровки.

Файл Пр	еобразователь	Сканирование	Реконструкция
Параметры сканирован	ия объекта контро	ля	
Шаг сканирования по Х, мм	оси		
Шаг сканирования по Ү, мм	оси		
Частота оцифровкі МГц	1,		
Расположение преобразователя по с	+ ▼		
Расположение преобразователя по о	н т		
Направление сканирования по ос	и Х 🕂 🔻		
Направление сканирования по ос	и Ү →		

Рисунок 4.10 – Вкладка «Сканирование» экспериментального ПО

Во вкладке «Реконструкция» (рисунок 4.11) требуется задать параметры, необходимые для осуществления корректного восстановления изображения внутренней структуры объекта контроля. Прежде всего, к таким параметрам относится разрешение парциального изображения, размеры изображения, которые восстанавливаются в одной позиции ультразвукового преобразователя. Кроме того, важными величинами является скорость ультразвуковых волн в объекте контроля, а также параметры материала, используемого для обеспечения акустического контакта. Опция «Компенсация криволинейности» позволяет осуществлять пространственно-временную обработку с учетом профиля объекта контроля, и применим в случае, когда он имеет сложную форму.

Файл Преобр	азователь	Сканирование	Реконструкция
Тараметры восстановления	изображения	a	
Разрешение изображения по оси X, мм		Угол призмы, гр	ад
Разрешение изображения по оси Y мм		Скорость УЗ воли призме	нв
Разрешение изображения по оси Z, мм		Обрезка данных в п (измерение), м	ризме м
Размер парциального изображения по оси X, мм		Обрезка данных в п (реконструкция),	ризме мм
Размер парциального изображения по оси Y, мм			
Размер парциального изображения по оси Z, мм			
Скорость УЗ волн в объекте контроля, м/с			
🔲 Компенсация криволине	йности		

Рисунок 4.11 – Вкладка «Реконструкция» экспериментального ПО

После определения в экспериментальном ПО всех необходимых параметров представляется возможным начать пространственно-временную обработку нажатием кнопки «Старт». Результатами работы экспериментального ПО является файл с результатом в формате .mat, который может быть открыт в программном пакете Matlab R2016a для проведения анализа полученных результатов, а также файл в формате .spt, предназначенный для визуализации результатов пространственно-временной обработки. Файл в формате .spt может быть открыт в ПО IDEALviewer, которое входит в состав экспериментальной установки.

4.5 Выводы к главе 4.

– Необходимо провести экспериментальную верификацию разработанного алгоритма пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР с применением натурных экспериментов. В рамках данной экспериментальной верификации должны быть рассмотрены различные условия проведения ультразвуковой томографии. В связи с этим, было проведено две серии измерений, различавшихся расположением объекта контроля относительно плоскости сканирования.

83

– Был создан экспериментальный стенд, предназначенный для проведения верификации, основой которого являлся блок ультразвуковой электроники OPTUS.

– Было разработано программное обеспечения для обработки набора эхосигналов, полученных в результате сканирования тестового образца. Данное программное обеспечение включает в себя разработанный алгоритм ультразвуковой томографии с расчетами в частотной области, а также модули считывания наборов эхо-сигналов и записи результатов пространственновременной обработки.

#### ГЛАВА 5 ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведен анализ результатов, полученных с использованием алгоритма пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных AP с расчетами в частотной области. Теоретические основы алгоритма рассмотрены в главе 3. Результаты получены в случае расположения поверхности объекта контроля параллельно и под наклоном относительно плоскости сканирования. Для обоих случаев сканирование объекта контроля проводилось четыре раза. Для каждого набора данных проводилась отдельная пространственно-временная обработка с последующим анализом полученных результатов.

Пример трехмерного изображения структуры объекта контроля в случае, когда объект контроля располагался параллельно плоскости сканирования, представлен на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Трехмерное изображение структуры контролируемого образца

Для большей информативности целесообразно представить результаты контроля в форме проекций на ортогональные плоскости (В и С-скан), представленные на рисунках 5.2 – 5.5. В-сканы представлены по отдельности для трех групп дефектов. Принадлежность дефектов к каждой из групп следующая:

1 группа: дефекты 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 1.10, 1.12, 1.14, 1.17, 1.19, 1.21, 1.25, 1.28, 1.33, 1.38, 1.39.

2 группа: дефекты 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9, 1.11, 1.13, 1.15, 1.16, 16, 1.18, 1.20, 1.22, 1.24, 1.27, 1.32, 1.36, 1.40.

3 группа: дефекты 2.1 – 2.4, 1.23, 1.26, 1,29, 1.30, 1.31, 1.34,1.35, 1.37.



Рисунок 5.2 – В-скан трёхмерного результата (группа 1)



Рисунок 5.3 – В-скан трёхмерного результата (группа 2)



Рисунок 5.4 – В-скан трёхмерного результата (группа 3)



Рисунок 5.5 – С-скан полученного трёхмерного результата

Полученные результаты пространственно-временной обработки могут быть использованы для определения размеров дефектов в объекте контроля с использованием метода половины амплитуды. Для каждой оценки размеров дефектов оценивалась абсолютная погрешность определения размеров дефектов:

$$\Delta d = d_{est} - d_{real}, \qquad (5.1)$$

где: *d<sub>est</sub>* – оценка размера дефекта по полученному синтезированному изображению;

*d*<sub>*real*</sub> – реальный размер дефекта.

Результаты оценки дефектов, полученные при пространственно-временной обработке различных наборов эхо-сигналов, использовались для определения среднего значения:

$$\overline{d} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{esti}}{n},$$
(5.2)

где: п – общее количество измерений.

В рамках оценки размеров дефектов также определялась среднеквадратическое отклонение определения размеров дефектов, которое оценивалось по следующей формуле:

$$S_{n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (d_{esti} - \overline{d})^{2}}{(n-1)}}$$
(5.3)

В таблице 5.1 представлены результаты оценки размеров, полученных для плоскодонных отверстий, имеющих круглую форму. Приведены значения абсолютной погрешности и среднеквадратического отклонения определения размеров. Аналогичные результаты для дефектов прямоугольной формы представлены в таблице 5.2 (оценка поперечных размеров несплошностей) и 5.3 (оценка продольных размеров несплошностей).

Таблица 5.1 – Результаты оценки размеров плоскодонных отверстий круглой формы по синтезированному изображению, полученного с использованием рассматриваемого алгоритма

Дефект	Оценка диаметра дефекта, мм				Абсолютная погрешность, мм				<i>d<sub>ср</sub></i> , мм	<i>S</i> <sub><i>n</i></sub> , мм
	Номер измерения				Номе	р изме				
	1	2	3	4	1	2	3	4		
1.1	2,8	2,7	2,7	2,8	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	2,75	0,06
1.2	2,9	2,9	2,9	3,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	2,93	0,04
1.3	2,7	2,8	2,8	2,8	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	2,78	0,04
1.4	3,0	3,0	2,8	3,0	0,0	0,0	-0,2	0,0	2,95	0,09
1.5	2,9	2,9	2,9	3,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	2,93	0,04
1.6	2,9	2,8	2,9	3,0	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	2,90	0,07
1.7	2,8	2,7	2,9	2,7	-0,2	-0,3	-0,1	-0,3	2,78	0,08
1.8	3,1	2,9	2,9	3,0	0,1	-0,1	-0,1	0,0	2,98	0,08
1.9	2,8	2,8	2,8	2,8	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	2,80	0,00
1.10	2,9	2,9	2,8	2,9	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	2,88	0,04
1.11	3,1	3,1	3,0	3,0	0,1	0,1	0,0	0,0	3,05	0,05
1.12	3,0	3,0	3,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,1	3,03	0,04
1.13	3,2	3,2	3,2	3,0	0,2	0,2	0,2	0,0	3,15	0,09

Продолжение таблицы 5.1

1.14	3,0	2,9	2,9	3,1	0,0	-0,1	-0,1	0,1	2,98	0,08
1.15	3,1	3,0	2,9	3,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	3,00	0,07
1.16	2,2	2,1	2,2	2,1	0,2	0,1	0,2	0,1	2,15	0,05
1.17	2,2	2,3	2,4	2,4	0,2	0,3	0,4	0,4	2,33	0,08
1.18	2,2	2,1	2,2	2,2	0,2	0,1	0,2	0,2	2,18	0,04
1.19	2,2	2,3	2,4	2,5	0,2	0,3	0,4	0,5	2,35	0,11
1.20	2,3	2,4	2,4	2,4	0,3	0,4	0,4	0,4	2,38	0,04
1.21	2,3	2,3	2,4	2,4	0,3	0,3	0,4	0,4	2,35	0,05
1.22	2,2	2,3	2,4	2,5	0,2	0,3	0,4	0,5	2,35	0,11
1.23	4,9	4,6	5,2	5,1	-0,1	-0,4	0,2	0,1	4,95	0,23
1.24	5,4	5,1	5,4	5,5	0,4	0,1	0,4	0,5	5,35	0,15
1.25	5,0	4,7	5,0	5,0	0,0	-0,3	0,0	0,0	4,93	0,13
1.26	4,8	4,7	5,0	5,0	-0,2	-0,3	0,0	0,0	4,88	0,13
1.27	5,3	5,2	5,3	5,3	0,3	0,2	0,3	0,3	5,28	0,04
1.28	5,1	4,7	5,1	5,1	0,1	-0,3	0,1	0,1	5,00	0,17
1.29	2,8	2,7	2,9	3,0	-0,2	-0,3	-0,1	0,0	2,85	0,11
1.30	3,0	2,8	2,9	3,0	0,0	-0,2	-0,1	0,0	2,93	0,08
1.31	2,9	2,7	2,9	3,0	-0,1	-0,3	-0,1	0,0	2,88	0,11
1.32	5,2	4,7	5,2	5,3	0,2	-0,3	0,2	0,3	5,10	0,23
1.33	5,1	4,7	5,0	5,0	0,1	-0,3	0,0	0,0	4,95	0,15
1.34	2,2	2,3	2,4	2,4	0,2	0,3	0,4	0,4	2,33	0,08
1.35	2,3	2,4	2,3	2,2	0,3	0,4	0,3	0,2	2,30	0,07
1.36	2,3	2,4	2,5	2,3	0,3	0,4	0,5	0,3	2,38	0,08
1.37	2,2	2,3	2,3	2,4	0,2	0,3	0,3	0,4	2,30	0,07
1.38	2,3	2,4	2,3	2,3	0,3	0,4	0,3	0,3	2,33	0,04
1.39	2,4	2,4	2,3	2,3	0,4	0,4	0,3	0,3	2,35	0,05
1.40	2,4	2,5	2,4	2,5	0,4	0,5	0,4	0,5	2,45	0,05

Таблица 5.2 – Результаты оценки поперечных размеров плоскодонных отверстий, имеющих форму прямоугольника со скругленными углами, по синтезированному изображению, полученного с использованием рассматриваемого алгоритма

	Оц	енка ј	разме	ров		Абсол	_			
Пафакт	Д	ефект	тов, м	М	ПС	грешн	[M	$d_{cv}$ ,	$S_n$ ,	
дефект	Ног	мер из	змере	ния	Но	омер из	MM	ММ		
	1	2	3	4	1	2	3	4		
2.1	2,9	2,9	3	2,8	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	2,90	0,08
2.2	3,3	3,4	3,3	3,4	0,3	0,4	0,3	0,4	3,35	0,06
2.3	2,9	3,1	2,9	3,2	-0,1	0,1	-0,2	0,2	3,03	0,16
2.4	3,2	3,1	3,4	3,3	0,2	0,1	0,4	0,3	3,25	0,13

Таблица 5.3 – Результаты оценки продольных размеров плоскодонных отверстий, имеющих форму прямоугольника со скругленными углами, по синтезированному изображению, полученного с использованием рассматриваемого алгоритма

	0	ценка ј	размер	ов		Абсол	1			
Пафакт		дефект	ов, мм	[	ПО	грешн	$d_{cp}$	Sn,		
дефект	He	омер из	змерен	ИЯ	Ho	мер из	, мм	MM		
	1	2	3	4	1	2	3	4	IVIIVI	
2.1	17,5	17,3	17,4	17,3	-0,5	-0,8	-0,6	-0,7	17,34	0,10
2.2	17,4	17,4	17,5	17,4	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6	17,43	0,05
2.3	7,6	7,6	7,5	7,5	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	7,55	0,06
2.4	7,6	7,5	7,7	7,6	-0,4	-0,5	-0,3	-0,4	7,60	0,08

Для более наглядной оценки погрешностей определения размеров дефектов может быть построена гистограмма, показывающая отклонение размеров дефектов на синтезированных изображениях от реальных размеров несплошностей для всех проведенных измерений. Для дефектов диаметром 5, 3 и 2 мм подобные гистограммы представлены на рисунках 5.6, 5.7 и 5.8 соответственно. Гистограммы для прямоугольных дефектов представлены на рисунках 5.9 (оценка поперечных размеров) и 5.10 (оценка продольных размеров).



Рисунок 5.6 – Абсолютная погрешность оценки размеров дефектов (диаметр 5 мм) по полученному синтезированному изображению



Рисунок 5.7 – Абсолютная погрешность оценки размеров дефектов (диаметр 3 мм) по полученному синтезированному изображению



Рисунок 5.8 – Абсолютная погрешность оценки размеров дефектов (диаметр 2 мм) по полученному синтезированному изображению



Рисунок 5.9 – Абсолютная погрешность оценки размеров прямоугольных дефектов (поперечное направление) по полученному синтезированному изображению



Рисунок 5.10 – Абсолютная погрешность оценки размеров прямоугольных дефектов (продольное направление) по полученному синтезированному изображению

Отдельный анализ результатов оценки дефектов может быть проведен для плоскодонных отверстий, имеющих круглую форму. На рисунке 5.11 показана зависимость оценки размеров дефектов 5 мм от глубины, на которую несплошность была засверлена. Аналогичные значения для дефектов диаметром 3 и 2 мм представлены на рисунках 5.12 и 5.13 соответственно.



Рисунок 5.11 – Зависимость оценки размеров дефектов диаметром 5 мм от

глубины их залегания



Рисунок 5.12 – Зависимость оценки размеров дефектов диаметром 3 мм от глубины их залегания



Рисунок 5.13 – Зависимость оценки размеров дефектов диаметром 2 мм от глубины их залегания

Таким образом, для всех дефектов в тестовом образце абсолютная погрешность определения размеров дефектов не превышает 1 мм. Для круглых плоскодонных отверстий диаметром 3 и 5 мм относительная погрешность определения размеров дефектов не превышает 10% от реальных размеров несплошностейй. Аналогичные значения для круглых плоскодонных отверстий диаметром 2 мм не превышает 25% и могут быть уменьшены путем повышения разрешения восстанавливаемого синтезированного изображения. Это, в свою привести увеличению времени, очередь, может к затрачиваемого на пространственно-временную обработку. Для дефектов, имеющих форму прямоугольника скругленными углами, co максимальные относительные погрешности определения размеров дефектов составляют 7,5% (в продольном направлении) и 13,3% в поперечном направлении.

Целесообразно также оценить полученные результаты с точки зрения их повторяемости. Под повторяемостью понимают степень близости друг к другу результатов измерения полученного при одинаковых условиях. [77]. Согласно требованиям документации в области ультразвукового неразрушающего контроля стальных отливок [78] среднеквадратичное отклонение эквивалентной площади

или размеров дефектов не должно превышать 30 % процентов от среднего значения оценки площади или размера несплошности. Максимальным подобное значение оказалось для дефектов 1.19 и 1.22 и составило 4,8%. Таким образом, можно сделать вывод, что пространственно-временная обработка с применением рассматриваемого алгоритма обладает высокой повторяемостью, соответствующей требованиям нормативной документации.

Пример трехмерного изображения структуры объекта контроля в случае, когда объект контроля располагался под наклоном относительно плоскости сканирования, представлен на рисунке 5.14.



Рисунок 5.14 – Трехмерное изображение структуры контролируемого образца

На рисунках 5.15-5.17 представлены В-сканы объемного изображения для дефектов группы 1,2 и 3. На рисунке 5.18 представлен С-скан полученного объемного результата.



Рисунок 5.15 – В-скан трёхмерного результата (группа 1)



Рисунок 5.16 – В-скан трёхмерного результата (группа 2)



Рисунок 5.17 – В-скан трёхмерного результата (группа 2)



Рисунок 5.18 – С-скан полученного трёхмерного результата

Аналогично случаю, когда объект контроля располагался параллельно плоскости сканирования, размеры дефектов могут быть оценены с использованием метода половины амплитуды. Кроме того, по формулам 5.1 – 5.3

может быть определен средний размер несплошности, абсолютная погрешность определения размеров, а также среднеквадратическое отклонение определения размеров дефектов. Для плоскодонных отверстий круглой формы полученные результаты представлены в таблице 5.4, а для прямоугольных несплошностей в таблице 5.5 (поперечные размеры) и 5.6 (продольные размеры).

Таблица 5.4 – Результаты оценки размеров круглых плоскодонных дефектов по синтезированному изображению, полученного с использованием рассматриваемого алгоритма

	Оце лефе	нка екта. 1	диам мм	етра	Абсол погре	пютная шност	$d_{cn}$	Sn.		
Дефект	Ном	ер из	мерен	ия	Номе	р изме	<i>c<sup>p</sup></i> ,	MM		
	1	2	3	4	1	2	3	4	ММ	
1.1	3,2	3,1	3,3	3,2	0,2	0,1	0,3	0,2	3,20	0,08
1.2	3,2	3,1	3,0	3,0	0,2	0,1	0,0	0,0	3,08	0,10
1.3	3,3	3,5	3,4	3,3	0,3	0,5	0,4	0,3	3,38	0,10
1.4	3,1	3,1	3,1	3,1	0,1	0,1	0,1	0,1	3,10	0,00
1.5	3,0	2,9	3,0	3,1	0,0	-0,1	0,0	0,1	3,00	0,08
1.6	3,0	3,1	3,0	3,1	0,0	0,1	0,0	0,1	3,05	0,06
1.7	3,5	3,5	3,5	3,4	0,5	0,5	0,5	0,4	3,48	0,05
1.8	3,0	3,1	3,0	3,1	0,0	0,1	0,0	0,1	3,05	0,06
1.9	2,9	3,0	3,0	3,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	3,00	0,08
1.10	3,1	3,1	3,0	3,1	0,1	0,1	0,0	0,1	3,08	0,05
1.11	3,0	3,1	3,1	3,1	0,0	0,1	0,1	0,1	3,08	0,05
1.12	3,1	3,0	3,0	3,2	0,1	0,0	0,0	0,2	3,08	0,10
1.13	3,3	3,3	3,2	3,3	0,3	0,3	0,2	0,3	3,28	0,05
1.14	3,1	3,0	3,1	3,1	0,1	0,0	0,1	0,1	3,08	0,05
1.15	3,0	3,1	3,1	3,1	0,0	0,1	0,1	0,1	3,08	0,05
1.16	2,4	2,2	2,3	2,4	0,4	0,2	0,3	0,4	2,33	0,10
1.17	2,5	2,3	2,3	2,3	0,5	0,3	0,3	0,3	2,35	0,10
1.18	2,3	2,2	2,3	2,4	0,3	0,2	0,3	0,4	2,30	0,08
1.19	2,4	2,3	2,3	2,4	0,4	0,3	0,3	0,4	2,35	0,06
1.20	2,2	2,2	2,2	2,3	0,2	0,2	0,2	0,3	2,23	0,05
1.21	2,3	2,2	2,2	2,5	0,3	0,2	0,2	0,5	2,30	0,14
1.22	2,2	2,2	2,2	2,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2,20	0,00
1.23	5,1	5,1	5,2	5,0	0,1	0,1	0,2	0,0	5,10	0,08
1.24	5,3	5,4	5,5	5,3	0,3	0,4	0,5	0,3	5,38	0,10
1.25	4,9	5,1	5,1	5,1	-0,1	0,1	0,1	0,1	5,05	0,10

Продолжение таблицы 5.4

1.26	5,0	5,1	5,0	5,1	0,0	0,1	0,0	0,1	5,05	0,06
1.27	5,5	5,5	5,3	5,4	0,5	0,5	0,3	0,4	5,43	0,10
1.28	5,1	5,0	5,0	5,2	0,1	0,0	0,0	0,2	5,08	0,10
1.29	3,0	3,2	2,9	3,1	0,0	0,2	-0,1	0,1	3,05	0,13
1.30	3,0	3,0	2,9	3,2	0,0	0,0	-0,1	0,2	3,03	0,13
1.31	3,0	3,0	3,1	3,1	0,0	0,0	0,1	0,1	3,05	0,06
1.32	5,2	5,1	5,0	5,1	0,2	0,1	0,0	0,1	5,10	0,08
1.33	5,1	5,3	5,1	5,1	0,1	0,3	0,1	0,1	5,15	0,10
1.34	2,1	2,2	2,2	2,3	0,1	0,2	0,2	0,3	2,20	0,08
1.35	2,4	2,2	2,3	2,4	0,4	0,2	0,3	0,4	2,33	0,10
1.36	2,4	2,3	2,4	2,5	0,4	0,3	0,4	0,5	2,40	0,08
1.37	2,3	2,2	2,2	2,4	0,3	0,2	0,2	0,4	2,28	0,10
1.38	2,3	2,3	2,2	2,5	0,3	0,3	0,2	0,5	2,33	0,13
1.39	2,3	2,3	2,3	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	2,35	0,10
1.40	2,4	2,4	2,4	2,5	0,4	0,4	0,4	0,5	2,43	0,05

Таблица 5.5 – Результаты оценки поперечных размеров прямоугольных дефектов по синтезированному изображению, полученного с использованием рассматриваемого алгоритма

	Оцен дефен	ка стов, м	раз м	меров	Абсол погре	пютная шності	Б, ММ		$\overline{d}$ ,	$S_n$ ,
Дефект	Номе	р измеј	рения		Номе	р измеј	рения		ММ	ММ
	1	2	3	4	1	2	3	4		
2.1	3,1	2,9	3,1	3,2	0,1	-0,1	0,1	0,2	3,08	0,13
2.2	3,3	3,2	3,3	3,1	0,3	0,2	0,3	0,1	3,23	0,10
2.3	3,2	3	3,2	3,3	0,2	0	0,2	0,3	3,18	0,13
2.4	3,3	3	3,2	3,1	0,3	0	0,2	0,1	3,15	0,13

Таблица 5.6 – Результаты оценки продольных размеров прямоугольных дефектов по синтезированному изображению, полученного с использованием рассматриваемого алгоритма

Дефект	Оцен	ка	раз	меров	Абсо.	пютная				
	дефек	стов, м	М		погре	шност	$\overline{d}$	$S_n$ .		
	Номе	р измеј	рения		Номе	р измеј	м MM	MM		
	1	2	3	4	1	2	3	4		
2.1	17,1	17,2	17,1	17,3	-0,9	-0,8	-0,9	-0,7	3,08	0,13
2.2	17,3	17,4	17,5	17,4	-0,7	-0,6	-0,5	-0,6	3,23	0,10

Продолжение таблицы 5.6

2.3	7,2	7,2	7,2	7,4	-0,8	-0,8	-0,8	-0,6	3,18	0,13
2.4	7,4	7,3	7,1	7,4	-0,6	-0,7	-0,9	-0,6	3,15	0,13

Для анализа полученных абсолютных погрешностей определения размеров дефектов могут быть построены гистограммы. Для дефектов диаметром 5, 3 и 2 мм подобные гистограммы представлены на рисунках 5.19, 5.20 и 5.21 соответственно. Гистограммы для прямоугольных дефектов представлены на рисунках 5.22 (оценка поперечных размеров). и 5.23 (оценка продольных размеров).



Рисунок 5.19 – Абсолютная погрешность оценки размеров дефектов (диаметр 5 мм) по полученному синтезированному изображению



Рисунок 5.20 – Абсолютная погрешность оценки размеров дефектов (диаметр 3 мм) по полученному синтезированному изображению



Рисунок 5.21 – Абсолютная погрешность оценки размеров дефектов (диаметр 2 мм) по полученному синтезированному изображению



Рисунок 5.22 – Абсолютная погрешность оценки поперечных размеров прямоугольных дефектов по полученному синтезированному изображению



Рисунок 5.23 – Абсолютная погрешность оценки продольных размеров прямоугольных дефектов по полученному синтезированному изображению

На рисунках 5.24–5.26 представлена зависимость полученных размеров круглых плоскодонных отверстий от глубины их сверления.



Рисунок 5.24 – Зависимость оценки размеров дефектов диаметром 5 мм от

глубины их залегания



Рисунок 5.25 – Зависимость оценки размеров дефектов диаметром 3 мм от

глубины их залегания



Рисунок 5.26 – Зависимость оценки размеров дефектов диаметром 3 мм от глубины их залегания

Таким образом, в случае наклона объекта контроля относительно плоскости сканирования на угол около 5°, абсолютная погрешность оценки размеров дефектов не превышала 1 мм. Для круглых плоскодонных отверстий диаметром 5 мм относительная погрешность определения размеров не превышала 10% от размера дефектов. Аналогичное значение для несплошностей реального диаметром 3 мм не превышала 16,7%, а для дефектов диаметром 2 мм – 25%. Для скругленными дефектов, имеющих форму прямоугольника co углами, максимальные относительные погрешности определения размеров дефектов составляют 11,3% (в продольном направлении) и 10% в поперечном направлении. Наибольшее отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению оценки размера дефекта было получено для дефекта 1.21 и составило 6,1%, что удовлетворяет требованию повторяемости результатов контроля, отраженного в нормативной документации.

5.1 Выводы к главе 5.

 Проведена верификация алгоритма пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР. Для экспериментальной верификации применялся тестовый образец, содержащий дефекты различной формы и размеров.

\_ верификация показала способность Экспериментальная алгоритма пространственно-временной обработки восстанавливать изображения структуры объекта контроля, позволяющих решать задачу определения размеров дефектов с высокой точностью. Абсолютная погрешность определения размеров дефектов не превышала 0,5 мм для плоскодонных отверстий диаметром 5 мм как при параллельном, так и при наклонном расположении поверхности объекта контроля относительно плоскости сканирования. Для отверстий диаметром 3 мм абсолютные погрешности определения размеров в двух случаях не превышали 0,3 и 0,5 мм, а для дефектов диаметром 2 мм эти значения в обоих случаях расположения объекта контроля не превышали 0,5 мм. При расположении объекта контроля параллельно плоскости сканирования модуль абсолютной погрешности определения размеров прямоугольных дефектов в продольном направлении не превышал 0,8 мм, а в поперечном – 0,4 мм. Аналогичные значения для прямоугольных дефектов при расположении объекта контроля под наклоном в поперечном направлении составляют 0,9 мм и 0,3 мм.

 Полученные результаты демонстрируют высокую повторяемость.
 Среднеквадратические отклонения оценки размеров дефектов для всех несплошностей не превышают установленных в нормативно-технической документации пределов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная работа посвящена развитию средств ультразвуковой томографии фасонных отливок. Актуальным вопросом развития методов и средств ультразвукового контроля является повышение достоверности его результатов. Одним из перспективных подходов является ультразвуковая томография на основе технологии ЦФА с использованием матричных АР, позволяющая получать трехмерные результаты с высокой разрешающей способностью, что делает возможным эффективно решать задачу дефектометрии несплошностей в объектах контроля. Использование матричных АР и технологии ЦФА необходимостью пространственно-временной обработки связано с значительного объема данных при восстановлении изображений структуры контролируемых объектов. Таким образом, важным вопросом является разработка средств, направленных на восстановление изображений внутренней высокого качества с высокой скоростью.

Основные результаты исследования, проведенного в диссертационной работе, приведены ниже:

1. Проведен сравнительный анализ различных подходов в реализации пространственно-временной обработки алгоритмов с применением компьютерного моделирования. Сравнительный анализ включал оценку качества скорости получения изображений структуры объектов И контроля при использовании различных подходов в реализации алгоритмов пространственновременной обработки. Проведенный сравнительный анализ показал, что алгоритм с расчетами в частотной области является наиболее эффективным для решения задач ультразвуковой томографии с использованием матричных АР. Данный алгоритм включает в себя использование метода общей средней точки, метода фазового сдвига и интерполяцию Столта.

2. На основе полученных результатов сравнительного анализа был разработан алгоритм пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области, обеспечивающий восстановление изображений АР при

различных условиях проведения ультразвуковой томографии. Данный алгоритм являлся основой экспериментального программного обеспечения пространственно-временной обработки сигналов для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР.

3. Для проведения экспериментальной верификации разработанного алгоритма пространственно-временной обработки был создан экспериментальный стенд. Основными узлами экспериментального стенда является манипулятор, многоканальный блок электроники, и управляющий компьютер. Данный экспериментальный стенд позволяет проводить проверку разработанного алгоритма при различных условиях проведения ультразвуковой томографии.

4 Была проведена экспериментальная верификация разработанного пространственно-временной обработки. Полученные алгоритма результаты экспериментальной верификации свидетельствуют о том, что разработанный алгоритм пространственно-временной обработки способен обеспечивать изображений восстановление синтезированных высокой разрешающей С способностью. Соответственно, такие изображения позволяют эффективно решать задачу дефектометрии несплошностей в объектах контроля.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Михайлов А. М. Литейное производство / Михайлов А. М., Бауман Б.
 В. – М.: Машиностроение. 1987. – 256 с.

 Куманин И. Б. Вопросы теории литейных процессов / Куманин И. Б. – М.: Машиностроение. – 1976. –216 с.

3. Белов В.Д., Литейное производство : учеб. / Белов В.Д. - М. : МИСиС, 2015. - 487 с.

4. Козлов Л. Я. Производство стальных отливок/ Козлов Л. Я., Вдовин К. Н. – М: МИСИС, 2005. – 352 с.

5. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. – М: Изд-во стандартов, 1980.

 Тодоров Р. П. Дефекты в отливках из черных сплавов / Тодоров Р. П., Пешев П. Ц. – М.: Машиностроение. – 1984. – 184 с.

7. Чернышов, Е.А. Литейные дефекты. Причины образования. Способы предупреждения и исправления: учеб. пособие / Е.А.Чернышов, А.И., Евстигнеев, А.А.Евлампиев. - М.: Машиностроение, 2008. - 282 с.

8. Технология металлов/ Архипов В. В. и др. – М: Высшая школа. – 1978. – 769 с.

Литейные дефекты и способы их устранения / Лакедемонский А. В. и др. – М.: Машиностроение. – 1972. – 184 с.

10. Литейные процессы / Батышев А. И. и др. – М: Изд. дом НИТУ «МИСиС», 2019 – 219 с.

Марукович, Е. И. Литейные сплавы и технологии / Е. И. Марукович,
 М. И. Карпенко. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 442 с.

12. Ушаков В.М. Неразрушающий контроль и диагностика горношахтного и нефтегазового оборудования/ Ушаков В.М. – М: Издательство «Мир горной книги». – 2016. – 318 с.

13. Вальтер А.И., Протопопов А. А. Основы литейного производства: учебник/ Вальтер А.И., Протопопов А. А. – М: Инфра- Инженерия, 2019. – 332 с.

 Чернышов, Е. А. Теоретические основы литейного производства.
 Теория формирования отливки : учебник / Е. А. Чернышов, А. И. Евстигнеев. — Москва : Машиностроение, 2015. — 480 с.

15. ГОСТ Р 56542-2015 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М: Стандартинформ, 2016 г.

16. Макарин, В. С. Средства неразрушающего контроля отливок : Учеб. пос. для СПТУ / В. С. Макарин. – М. : Высшая школа, 1988. – 72 с.

 Коротин И. М. Контроль качества термической обработки металла / Коротин И. М. – М.: Высшая школа. – 1980. – 192 с.

Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства. В 2 ч. Ч.
 Технология изготовления отливок в разовых формах : учебник / Д. М. Кукуй, В.
 А. Скворцов, Н. В. Андрианов. — Минск : Новое знание, 2011. — 406 с.

 Современные системы радиационного неразрушающего контроля / Троицкий В. А. и др. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2015. – №. 1. – С. 23-35.

20. Майоров А. А. Цифровые технологии в радиационном контроле / Майоров А. А. –В мире неразрушающего контроля. – 2009. – №. 3. – С. 45.

21. Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль: учеб. пособие / Н.П. Алешин,
В.Т. Бобров, Ю.В. Ланге, В.Г. Щербинский. под общ. ред. В.В. Клюева. – М.:
Издательский дом «Спектр» – 2011. – 224 с.

22. Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений / Троицкий В. А. – Киев: Феникс. — 2006. – 320 с.

23. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов / В.Г. Бадалян [и др.]; под. ред. А.Х. Вопилкина. – М.: Машиностроение, 2008. – 368 с

24. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении: учебное пособие/ Кретов Е. Ф. – СПб.: Радиовионика. – 1995. – 336 с.

25. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия/ Выборнов Б. И. – М.: Металлургия, 1985 г. – 256 с.
26. Moles, M. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. R/D Tech Guideline./ M. Moles. - Olympus NDT, 2004. - 348 p.

27. Самокрутов А. А. Сканирование в ультразвуковой томографии / Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. //В мире неразрушающего контроля. – 2010.
 – №. 3. – С. 7-10.

28. Holmes C. The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method / Holmes C., Drinkwater B., Wilcox P.//Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring.  $-2004. - V.46. - N_{\odot}.11. - P.677-680.$ 

29. Holmes C. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation / Holmes C., Drinkwater B. W., Wilcox P. D. //NDT & e International. – 2005. – V. 38. – No. 8. – P. 701-711.

30. Sampling Phased Array. A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging/ Bernus von L. et al..— In: 9th ECNDT.— Berlin. September 25—29, 2006.

31. Самокрутов А. А. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки. /Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г. /Дефектоскопия. – 2011. – №. 1. – С. 21-38.

32. Hunter A. J. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array / Hunter A. J., Drinkwater B. W., Wilcox P. D. //IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control.  $-2008. - V.55. - N_{\odot}. 11. - P. 2450-2462.$ 

33. Базулин Е. Г. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов / Базулин Е. Г., Коколев С. А., Голубев А. С.//Дефектоскопия. – 2009. – №. 2. – С. 18-32.

З4. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля./ Бирюкова
 Н.П. и др. – М: ГУП Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности
 Госгортехнадзора России, 2003 – 392 с.

35. Doctor S. R. SAFT—the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing / Doctor S. R., Hall T. E., Reid L. D.//NDT international. – 1986. – V. 19. –  $N_{2}$ . 3. – P. 163-167.

36. Synthetic aperture focusing technique signal processing / Langenberg K. J. et al. //NDT international. – 1986. – V. 19. – №. 3. –P. 177-189.

37. Базулин Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки / Базулин Е. Г. //Дефектоскопия. – 2013. – №. 7. – С. 51-75.

38. Drinkwater B. W. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review / Drinkwater B. W., Wilcox P. D. //NDT & e International.  $-2006. - V. 39. - N_{\odot}. 7. - P. 525-541.$ 

39. Phased Array technology : Concepts, probes and applications / J. Poguet et. al. // 8th European Congress on NDT, 17–21 June, 2002, Barcelona, Spain.

40. Friedl J. H. Ultrasonic phased array inspection of seeded titanium billet / Friedl J. H. et al. //AIP Conference Proceedings. – AIP, 2004. – V. 700. – №. 1. – P. 809-816.

41. Gekko [Электронный ресурс]//Эхо+ - Режим доступа: http://www.echoplus.ru/engine/download.php?id=35, свободный. - Загол. с экрана (дата обращения: 20.05.2020)

42. Ультразвуковой дефектоскоп TOPAZ 64 от ZETEC [Электронный pecypc]//ABЭК - Режим доступа: https://avek.ru/production/nerazrushayushiy\_ kontrol/ul\_trazvukovoy\_kontrol/ultrazvukovoy\_defektoskop/ul\_trazvukovoy\_defektosk op\_TOPAZ\_64\_ot\_ZETEC.html, свободный. - Загол. с экрана (дата обращения: 20.05.2020)

43. Boehm R., Simulation of sparse matrix array designs / Boehm R., Heckel T. //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Vol. 1949. – №. 1. – Article number: 080003

44. Data set reduction for ultrasonic TFM imaging using the effective aperture approach and virtual sources / Bannouf S. et al. //Journal of Physics: Conference Series.
– IOP Publishing, 2013. – V. 457. – №. 1. – Article number: 012007.

45. Hu, H. Ultrasonic phased array sparse-TFM imaging based on sparse array optimization and new edge-directed interpolation / Hu, H., Du, J., Ye, C., Li, X.//Sensors.  $-2018. - V. 18. - N_{\odot}. 6. - Article number: 1830.$ 

46. Yang P. A novel method to design sparse linear arrays for ultrasonic phased array / Yang P., Chen B., Shi K. R.//Ultrasonics. – 2006. – V. 44. – P. e717-e721

47. Hu, H. Ultrasonic sparse-TFM imaging for a two-layer medium using genetic algorithm optimization and effective aperture correction / Yang P., Chen B., Shi K. R. et al.//NDT & E International. – 2017. – V. 90. – P. 24-32.

48. Martínez-Graullera, O. 2D array design based on Fermat spiral for ultrasound imaging / Martínez-Graullera, O., Martín, C. J., Godoy, G., Ullate, L. G.. //Ultrasonics.  $-2010. - V. 50. - N_{\odot} 2. - P. 280-289$ ,

49. Ramalli, A. Density-tapered spiral arrays for ultrasound 3-D imaging / Ramalli, A., Boni, E., Savoia, A. S., Tortoli, P.//IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control.  $-2015. - V. 62. - N_{\odot} . 8. - P. 1580-1588$ 

50. Velichko A. Quantitave Characterisation of Complex Defects Using Two-Dimensional Ultrasonic Arrays / Velichko A., Wilcox P. D.//Proceedings of the ECNDT. -2010. - V. 1. - P. 18.

51. Zhang J. Comparison of ultrasonic array imaging algorithms for nondestructive evaluation / Zhang J., Drinkwater B. W., Wilcox P. D. //IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. -2013. - V. 60. - No. 8. - P. 1732-1745

52. Ермолов И. Н. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник) / Ермолов И. Н., Вопилкин А. Х., Бадалян В. Г. – М.: ООО НПЦ НК «Эхо+».,2003 – 109 с.

53. Горюнов А. А. Обратные задачи рассеяния в акустике. / Горюнов А.
 А., Сасковец А. В. – М:Изд-во Московского университета, 1989 – 152 с.

54. Russell J. Development of a membrane coupled conformable phased array inspection capability / Russell J., Long R., Cawley P. //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2010. – V. 1211. –  $N_{2}$ . 1. – P. 831-838.

55. Surface estimation methods with phased-arrays for adaptive ultrasonic imaging in complex components / Robert S. et al. //AIP Conference proceedings. – American Institute of Physics, 2015. – V. 1650. –  $N_{\odot}$ . 1. – P. 1657-1666.

56. Базулин Е.Г. Разработка системы эксплуатационного ультразвукового неразрушающего контроля повышенной информативности с применением антенных решеток: дис. ... канд./д-ра техн. наук. НПЦ «Эхо+». – Москва, 2014.

57. Aschy A. Enhancement of the total focusing method imaging for immersion testing of anisotropic carbon fiber composite structures / Aschy A. et al. //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2017. – V 1806. –  $N_{2}$ . 1. – N. 040005.

58. Амосов А. А. Вычислительные методы для инженеров./ Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. – М: Изд-во МЭИ, 2003 –544 с.

59. Virieux J, An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Virieux J., Operto S. /Geophysics. – 2009. – V. 74. – №. 6. – P. WCC1-WCC26.

60. Hale D. Dip-moveout by Fourier transform / Hale D. //Geophysics. – 1984. – V. 49. – №. 6. – P. 741-757.

61. Yilmaz O., Doherty M.S. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data/ Yilmaz O., Doherty M.S. – Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2001 – 2027 p.

62. Curlander J. C. Synthetic aperture radar/ Curlander J. C., McDonough R. N. – New York: John Wiley & Sons, 1991. –396 p.

63. Callow H. J. Wavenumber domain reconstruction of SAR/SAS imagery using single transmitter and multiple-receiver geometry / Callow H. J., Hayes M. P., Gough P. T. //Electronics Letters. – 2002. – V. 38. – №. 7. – P. 336-338.

64. Bamler R. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms / Bamler R. A //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.  $-1992. - V. 30. - N_{\odot}. 4. - P. 706-713.$ 

65. Клаербоут Д. Ф. Сейсмическое изображение земных недр / Клаербоут
 Д. Ф. – М.: Недра. – 1989 – 408 с.

66. Gazdag J. Wave equation migration with the phase-shift method / Gazdag J. //Geophysics.  $-1978. - V. 43. - N_{\odot}. 7. - P. 1342-1351.$ 

67. Stolt R. H. Migration by Fourier transform / Stolt R. H. //Geophysics. – 1978. – V. 43. – № 1. – P. 23-48.

68. Nahamoo D. Synthetic aperture diffraction tomography and its interpolation free implementation. / Nahamoo D., Pan B.X., Kak A.S. // IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics –  $1984 - V.31 - N_{\odot} 4 - P.218-229$ 

69. D'Aria D. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out / D'Aria D., Guarnieri A. M., Rocca F. //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.  $-2004. - V. 42. - N_{\odot}. 7. - P. 1362-1376$ 

70. Lukomski T. Full-matrix capture with phased shift migration for flaw detection in layered objects with complex geometry / Lukomski T. //Ultrasonics. – 2016. – V. 70. – P. 241-247.

71. Chinta P. K. Ultrasonic Nondestructive Testing of Inhomogeneous Isotropic and Anisotropic Media: Modeling and Imaging. / Chinta P. K. – Kassel: Kassel University Press GmbH, 2013 – 161 p.

72. Implementation of a GPU accelerated total focusing reconstruction method within CIVA software / Rougeron G. et al. //AIP Conference Proceedings. -2014. - V.1581.  $- N_{2}. 1. - P. 1983-1990$ 

73. Synthetic aperture focusing of ultrasonic data from multilayered media using an omega-k algorithm / Skjelvareid M. H. et al. //IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2011. – V. 58. – No. 5. – P. 1037-1048.

74. Quantitative Defect Sizing on Components with Different Wall Thickness using UT-SAFT / Brekow G. et al. //17th WCNDT, China, Shanghai. – 2008.

75. Amplitude-based Defect Sizing of SAFT-Results-From Imaging to Quantitative Measurement/ Mooshofer H. et al.// 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden. – 2018.

76. Pitkänen J. SAFT-is it a tool for improved sizing in ultrasonic testing / Pitkänen J., Oy P. //Olkiluoto, Finland, ECNDT. – 2006.

77. Современные подходы к аттестации методик ультразвукового контроля / Коншина В. Н. и др. //Дефектоскопия. – 2008. – №. 2. – С. 3-14.

78. ГОСТ Р 50.05.05-2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Ультразвуковой контроль основных материалов (полуфабрикатов). М: Стандартинформ, 2018 г.