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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск — 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: кандидат технических наук
Седнев Дмитрий Андреевич

Официальные оппоненты**:**

Клопотов Анатолий Анатольевич
доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры прикладной механики и материаловедения.

Суханов Дмитрий Яковлевич
доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», обособленное структурное подразделение «Сибирский физико-технический институт», заведующий лабораторией электромагнитных методов контроля

Защита диссертации состоится 22 декабря 2020 года в 15:00 часов на заседании диссертационного Совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года

Ученый секретарь
диссертационного Совета ДС.ТПУ.13
к.т.н., доцент Шевелева Е. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обеспечение надёжности функционирования магистральных трубопроводов является актуальным вопросом газовой промышленности. Это обусловлено тем фактом, что аварии в подобных транспортных системах приводят к значительным экономическим 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.

На сегодняшний день важным вопросом 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.

На сегодняшний день применение матричных АР 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

реализация специальных подходов, обеспечивающих высокую скорость восстановления изображений.

Объект исследования: ультразвуковая томография.

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

Цель работы: 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 компьютерного 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 получение 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.

Личный вклад автора

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

Публикации. По тематике диссертационного исследования опубликована 21 работа, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК и 10 публикаций в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Получен один патент.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 78 наименований. Диссертационная работа содержит 114 страниц, 14 таблиц и 61 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика, обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, определены задачи диссертационного исследования, обозначены основные положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** рассмотрены вопросы формирования структуры стальных отливок, приведена классификация несплошностей в фасонных изделиях, а также рассмотрены основные методы неразрушающего контроля, применяемые для

дефектоскопии стальных отливок. Показано, что акустические методы контроля, наряду с радиационными, могут применяться для выявления внутренних дефектов в стальных отливках. Низкая точность определения реальных размеров дефектов при использовании стандартной аппаратуры ультразвуковой дефектоскопии обуславливает необходимость разработки методов и средств контроля, которые обеспечивают получение результатов с высокой информативностью.

Во **второй главе** рассмотрены методы и средства ультразвуковой томографии с АР как подхода, который обеспечивает высокую информативность результатов контроля. Обоснована актуальность разработки средств пространственно-временной обработки данных матричных АР. Рассмотрены вопросы реализации алгоритмов пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии на основе технологии ЦФА при использовании матричных АР. При автоматизированном контроле важным вопросом подобных алгоритмов является восстановление профиля поверхности объекта контроля. В рамках исследования было предложено восстановление профиля поверхности по времени прихода эхо-сигналов, полученных в совмещенном режиме работы АР, от поверхности объекта контроля.

Для получения профиля поверхности используются сигналы, зарегистрированные в совмещенном режиме, описываемые функцией $p(t,x_n,y_m)$, где t – это время, x_n и y_m – это координаты элемента матричной АР. По заданному уровню S фиксируется время распространения ультразвуковых волн $t_{cut}(x)$ и расстояние от края пьезопластины до поверхности объекта контроля r_{nm}:

$$r_{nm} = \frac{t_{cut}(x_n, y_m) \cdot c_{l1}}{2}, \tag{1}$$

где c_{l1} – скорость распространения ультразвуковых волн в материале акустического контакта.

По полученным значениям r_{nm} восстанавливается профиль поверхности объекта контроля $r_{snm}(x_{sn}, y_{sm})$ с использованием следующих выражений:

$$\begin{cases} x_{sn} = x_n + r_{nm} \cdot \dfrac{\partial r_{nm}}{\partial x_n} \\ y_{sm} = y_m + r_{nm} \cdot \dfrac{\partial r_{nm}}{\partial y_m} \\ z_{snm} = r_{nm} \sqrt{1 - \dfrac{\partial r_{nm}}{\partial x_n} \cdot \dfrac{\partial r_{nm}}{\partial y_m}} \end{cases}, \tag{2}$$

где:

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

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

В полученных значениях оценки поверхности объекта контроля могут присутствовать выбросы, обусловленные проблемами определения времени

задержки эхо-сигналов по заданному уровню. Для получения более точной оценки профиля поверхности может быть проведена аппроксимация полученных значений $r_{snm}(x_{sn}, y_{sm})$ и получена базовая поверхность $r_b(x,y)$. Выбросы могут быть исключены путем определения разности между r_{snm} и r_b. В случае если разность между r_{snm} и r_b превышает четверть длины ультразвуковых волн, распространяющихся в материале акустического контакта, то такое значение считается выбросом. Результатом исключения выбросов является откорректированный набор значений $r_c(x)$, по которому, в свою очередь, проводится повторная аппроксимация и получается уравнение r_f(x), описывающее поверхность объекта контроля.

В главе 2 также рассматриваются вопросы разработки алгоритма восстановления синтезированных изображений с расчетами во временной области для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР. Как правило, в автоматизированном контроле сканирование объекта производится с использованием иммерсионного акустического контакта. В связи с этим должно быть учтено преломление акустических волн на границе раздела сред акустический контакт - объект контроля в соответствии с законом Снеллиуса. Восстановление изображения структуры объекта контроля в одной измерительной позиции может быть осуществлено с использованием следующего выражения:

$$I(x,y,z) = \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} p_{n,k}(\tau_{xyz}), \tag{3}$$

где: $p_{\mathrm{n,k}}$ – эхо-сигнал, полученный в результате зондирования объекта контроля n-ым элементом АР, эхо-сигнал от которого зарегистрирован k-ым элементом АР;

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

N – количество элементов АР, осуществляющих зондирование объекта контроля;

K – количество элементов АР, осуществляющих прием эхо-сигналов.

В случае применения иммерсионного акустического контакта время задержки для каждого вокселя может быть определено с использованием следующего выражения:

$$\tau_{xyz} = \frac{\sqrt{(x-x_{sn})^2+(y-y_{sn})^2+(z-z_{sn})^2}}{c_{l2}} + \frac{\sqrt{(x_{sn}-x_n)^2+(y_{sn}-y_n)^2+z_{sn}^{\ 2}}}{c_{l1}} + \\ + \frac{\sqrt{(x-x_{sk})^2+(y-y_{sk})^2+(z-z_{sk})^2}}{c_{l2}} + \frac{\sqrt{(x_{sk}-x_k)^2+(y_{sk}-y_k)^2+z_{sk}^{\ 2}}}{c_{l2}}, \tag{4}$$

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_j, y_j) до вокселя с координатами (x,y,z);

c_{l1} – скорость ультразвуковых волн в материале, обеспечивающем акустический контакт;

c_{l2} – скорость ультразвуковых волн в объекте контроля.

Таким образом, при использовании иммерсионного акустического контакта или применении призм задача нахождения τ_{xyz} сводится к нахождению точки на поверхности объекта контроля, которая обеспечивает в соответствии с принципом Ферма минимальное время распространения между элементом матричной АР 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 (τ_{xyzn}) и нахождение времени распространения от вокселя внутренней структуры объекта контроля (τ_{xyzk}) до принимающего элемента. Пользуясь принципом Ферма, задача нахождения точки с координатами (x_{sn}, y_{sn}, z_{sn}) сводится к решению задачи оптимизации следующей функции:

$$F(x_{sn}, y_{sn}, z_{sn}) = \frac{\sqrt{(x - x_{sn})^2 + (y - y_{sn})^2 + (z - z_{sn})^2}}{c_{l2}} + \frac{\sqrt{(x_{sn} - x_n)^2 + (y_{sn} - y_n)^2 + z_{sn}{}^2}}{c_{l1}} \quad (5)$$

Аналогичным образом задача может быть сформулирована для поиска точки с координатами *(x_{sk}, y_{sk}, z_{sk})*. Результатом восстановления профиля поверхности объекта контроля является зависимость z_{sn} 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 подходом. В рамках данного метода реализуется итеративный расчет, в котором на каждом шаге рассчитываются x_{sn}^{m+1} и y_{sn}^{m+1} по следующим формулам:

$$x_{sn}^{m+1} = x_{sn}^{m} + \alpha^{m} \frac{\partial F(x_{sn}^{m}, y_{sn}^{m}, z_{sn}(x_{sn}^{m}, y_{sn}^{m}))}{\partial x_n},$$
$$y_{sn}^{m+1} = y_{sn}^{m} + \alpha^{m} \frac{\partial F(x_{sn}^{m}, y_{sn}^{m}, z_{sn}(x_{sn}^{m}, y_{sn}^{m}))}{\partial y_n}, \quad (6)$$

где: α_m – скорость градиентного спуска.

Кроме того во второй главе, рассматриваются вопросы разработки алгоритма пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР. Среди всех вариантов реализации алгоритма расчета в частотной области наиболее перспективным с точки зрения вычислительной эффективности является подход, объединяющий метод общей средней точки, метод фазового сдвига и интерполяцию Столта. Данный подход подразумевает преобразование сигналов,

полученных в режиме двойного сканирования при постоянном значении координаты z:

$$p(t, x_{tr}, y_{tr}, \mathrm{x}_r, y_r, z) \rightarrow p(t', x_m, \mathrm{y}_m, z), \quad (7)$$

где: x_{tr}, y_{tr} – координаты зондирующего элемента;

x_r, y_r – координаты принимающего элемента;

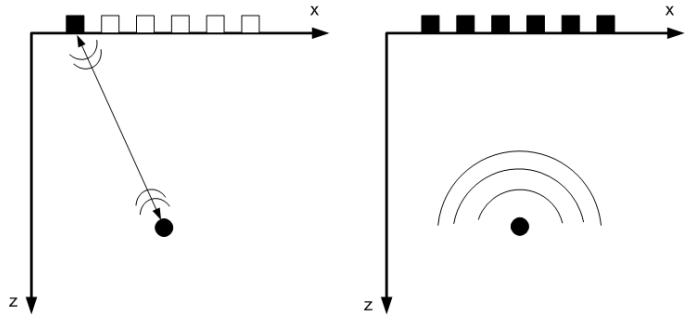
x_m, y_m – координаты средней точки между передающим и принимающим элементом;

z – координата плоскости сканирования;

t –временной отсчет;

t' – откорректированный временной отсчет.

В результате подобного преобразования могут использоваться формулы, применимые для пространственно-временной обработки сигналов полученных в совмещенном режиме работы АР и может быть применен принцип отражающих излучающих границ. Согласно данному принципу предполагается, что отражатели в области восстановления изображения являются источниками ультразвуковых волн в один и тот же момент времени (рис. 1). 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 позволяет упростить процесс пространственно-временной обработки без потери качества получаемых изображений.



а б

Рисунок 1 – Схема прохождения ультразвуковых волн: а – реальное распространение акустических волн в эхо-методе ультразвуковой дефектоскопии; б – распространение волн согласно принципу излучающих отражающих границ

В таком случае алгоритм пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области может быть разделен на следующие этапы:

1. Восстановление профиля объекта контроля.
2. Компенсация непараллельности профиля объекта контроля плоскости сканирования.
3. Экстраполяция акустического поля на границу раздела иммерсионная жидкость-объект контроля методом фазового сдвига.
4. Получение синтезированного изображения в одной измерительной позиции с использованием интерполяции Столта.

Восстановление профиля объекта контроля осуществляется в соответствии с формулами 1 и 2. На следующем этапе производится компенсация наклона профиля объекта контроля относительно матричной АР. Наклон объекта контроля относительно плоскости сканирования описывается двумя углами θ (наклон относительно оси X) и φ (наклон относительно оси Y). Компенсация наклона осуществляется с использованием метода фазового сдвига 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. Для этого осуществляется трехмерное преобразование Фурье функции $p(t,x,y,z)$. Для каждого значения x_r и y_v производится экстраполяция акустического поля на глубину Δz_{rv}:

$$P(\omega,k_x,k_y,z+\Delta z_{rv}) = P(\omega,k_x,k_y,z)\cdot \mathrm{e}^{i(k_z\Delta z_{rv})}, \tag{8}$$

$$\Delta z_{rv} = r\cdot\Delta x\cdot\tan(\theta)+v\cdot\Delta y\cdot\tan(\varphi),\ p=\overline{1...R},\ r=\overline{1...V}, \tag{9}$$

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\cos(\theta)}, \tag{10}$$

$$\Delta y' = \frac{\Delta y}{\cos(\varphi)}, \tag{11}$$

где: ω – угловая частота;

k_x,k_y,k_z – компоненты волнового вектора;

Δx, Δy – расстояние между двумя соседними отсчетами функции $p(t,x,y,z)$ по осям X и Y;

R, V – количество отсчетов функции $p(t,x,y,z)$ по осям X и Y.

Обратное преобразование Фурье функции $P(\omega,k_x,k_y,z+\Delta z_{rv})$ дает значение откорректированной функции $p(t,x',y',z')$ в точке x_r, y_v.

Экстраполяция акустического поля на границу раздела иммерсионная среда – объект контроля методом фазового сдвига осуществляется по следующей формуле:

$$P\left(\omega,k'_x,k'_y,z'+\Delta z'\right) = P\left(\omega,k'_x,k'_y,z'\right)e^{ik'_z\Delta z'}, \tag{12}$$

$$k'_z = -\frac{\omega}{|\omega|}\sqrt{\frac{\omega^2}{\hat{c}_l^{\,2}}-k_x'^2-k_y'^2}, \tag{13}$$

где: $\Delta z'$ – толщина слоя воды после проведенной компенсации наклона профиля объекта контроля относительно матричной АР;

$\hat{c}_l$ – половина скорости распространения ультразвуковых волн в объекте контроля.

После этого представляется возможным получить синтезированное изображение в одной измерительной позиции с применением интерполяции Столта, которая реализуется с использованием следующих выражений:

$$I(x',y',z'+\Delta z') = \int_{-\infty}^{\infty}\int\int P(k'_x,k'_y,k'_z,z')\,\mathrm{e}^{ik_z'\Delta z'}\,e^{ik'_xx'}e^{ik'_yy'}dk'_xdk'_ydk'_z, \tag{14}$$

$$P(\mathrm{k}'_x,\mathrm{k}'_y,k'_z,z') = A(k'_x,k'_y,k'_z)\cdot P(\omega(k'_x,k'_y,k'_z),k'_x,k'_y,z'), \quad (15)$$

$$A(k_x,k_y,k_z) = -\frac{k'_z}{|k'_z|}\frac{\hat{c}_l}{\sqrt{1+\dfrac{k'^2_x+k'^2_y}{k'^2_z}}}. \quad (16)$$

В **третьей главе** проведен сравнительный анализ алгоритмов пространственно-временной обработки с расчетами в частотной и временной области. Для проведения сравнительного анализа применялся программный пакет CIVA UT являющийся мощным и универсальным средством моделирования физических процессов в ультразвуковом неразрушающем контроле. 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 наборам эхо-сигналов, являющихся результатами компьютерного моделирования.

При проведении сравнительного анализа параметры моделирования выбирались как можно ближе к параметрам планируемых натурных экспериментов. В качестве объекта контроля использовался стальной блок размерами 90x100x40 мм. Объект контроля содержал плоскодонные отверстия диаметром 3 мм. Расположение дефектов в объекте контроля представлено на рис. 2.

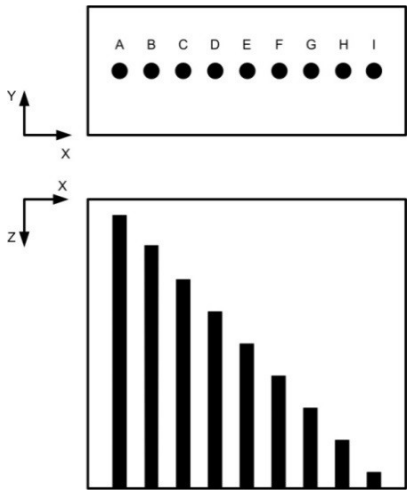


Рисунок 2 –Расположение дефектов в образце

В приведенной на рис. 2 системе координат дефекты имеют параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры дефектов в объекте контроля

Дефект	A	B	C	D	E	F	G	H	I
X, мм	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Y, 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 акустического контакта между преобразователем и объектом контроля использовался слой воды. Получение набора эхо-сигналов обеспечивалось путем двумерного сканирования объекта контроля. При этом шаг сканирования составлял 1 мм в обоих направлениях. В каждой измерительной позиции получение набора эхо-сигналов производилось в режиме двойного сканирования. В рамках сравнительного анализа рассматривалось два случая. В первом случае объект контроля располагался параллельно плоскости сканирования. Во втором случае объект контроля был наклонен на угол 5^{o} относительно плоскости сканирования.

Результатом компьютерного моделирования являлся 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 R2016a для проведения пространственно-временной обработки с использованием рассматриваемых алгоритмов, которые были также реализованы в программном пакете Matlab R2016a. В рамках пространственно-временной обработки в каждой точке сканирования осуществлялось восстановление парциального изображения размерностью 40x40x90 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. Пример подобного объемного изображения представлен на рис. 3.

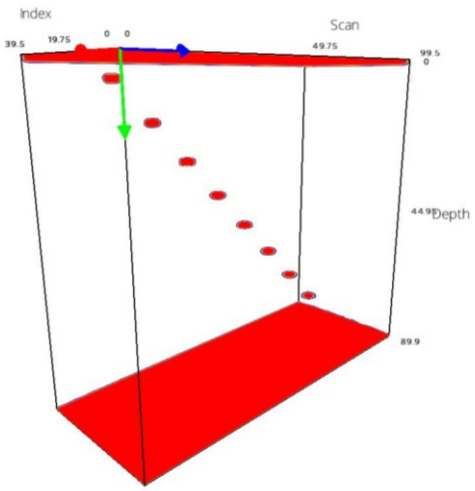


Рисунок 3 – Пример трехмерного синтезированного изображения

Для оценки качества результатов, полученных 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 при использовании данного модуля были выбраны аналогично параметрам, определенным при восстановлении изображения с использованием 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.

В рамках оценки качества изображений, полученных с использованием алгоритмов пространственно-временной обработки, ключевым вопросом является фронтальная разрешающая способность полученных результатов. Оценка фронтальной разрешающей способности может быть проведена на основании оценки диаметров плоскодонных отверстий по полученным синтезированным изображениям методом половины амплитуды (-6 dB drop method). В рамках подобной оценки изображения отражателей на полученных синтезированных изображениях использовались для получения профилей несплошностей на оси X и Y. С использованием полученных профилей находились координаты крайних точек, в которых амплитуда была не менее -6 дБ от максимальной амплитуды соответствующей данному отражателю (рис. 4).

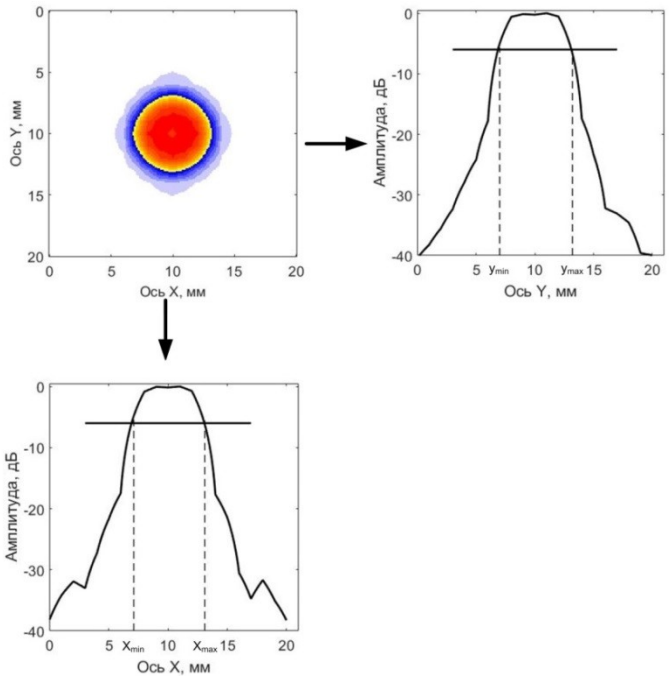


Рисунок 4 – Получение профилей несплошности из синтезированного изображения и оценка размеров дефекта методом половины амплитуды

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

$$d_x = x_{\max} - x_{\min}, \tag{17}$$

$$d_y = y_{\max} - y_{\min}. \tag{18}$$

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

$$d_{est} = \frac{d_x + d_y}{2}. \tag{19}$$

Кроме того, для каждого из плоскодонных отверстий вычислялась относительная погрешность определения его диаметра по следующей формуле:

$$\delta_d = \frac{|d_{est} - d_{real}|}{d_{real}} \cdot 100\%, \quad (20)$$

где: d_{real} –реальный размер дефекта.

Результаты подобной оценки для различных алгоритмов представлены в таблице 2 в случае, когда объект контроля расположен параллельно плоскости сканирования и 3 для случая, когда объект расположен под наклоном.

Таблица 2 – Результаты оценки размеров дефектов по синтезированным изображениям, полученных с использованием различных алгоритмов (поверхность объекта расположена параллельно плоскости сканирования)

Алгоритм	Параметр	Дефект								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
Алгоритм расчета во временной области	Диаметр, мм	3,2	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	2,8	2,8	2,7
	Относительная погрешность, %	6,7	3,3	3,3	0	0	3,3	6,7	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

Таблица 3 – Результаты оценки размеров дефектов по синтезированным изображениям, полученных с использованием различных алгоритмов (объект контроля расположен под наклоном)

Алгоритм	Параметр	Дефект								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
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 отклонении оценки размеров дефектов при

использовании различных подходов в обоих рассмотренных случаях не превышала 3,4%.

Отдельным вопросом в рамках использования матричных АР является вычислительная эффективность 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, затрачиваемое алгоритмом на его восстановление. Результаты проведенного сравнительного анализа представлены на рис. 5.

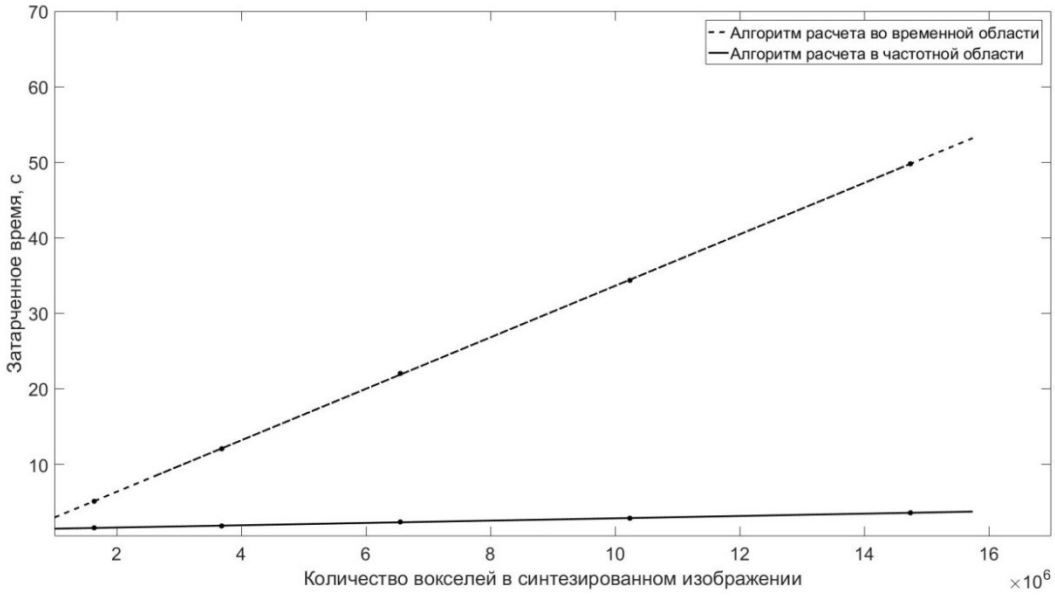


Рисунок 5 – Зависимость времени, затрачиваемого на пространственно-временную обработку, от количества вокселей в синтезированном изображении

Полученные результаты свидетельствуют о более высокой вычислительной эффективности алгоритма с расчетами в частотной области. Оба алгоритма имеют сходную разрешающую способность полученных синтезированных изображений, но при этом алгоритм расчета в частотной области обладает более высокой производительностью. Выигрыш в производительности при использовании данного алгоритма перед алгоритмом расчета во временной области растет при увеличении количества вокселей в восстанавливаемом синтезированном изображении. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности выбора алгоритма расчета в частотной области при разработке средств пространственно-временной обработки данных матричных АР.

В **четвертой главе** рассматривается методика и аппаратура эксперимента. В состав лабораторной установки входит преобразователь, манипулятор, блок управления манипулятором, блок ультразвуковой электроники и управляющий компьютер (рис. 6).

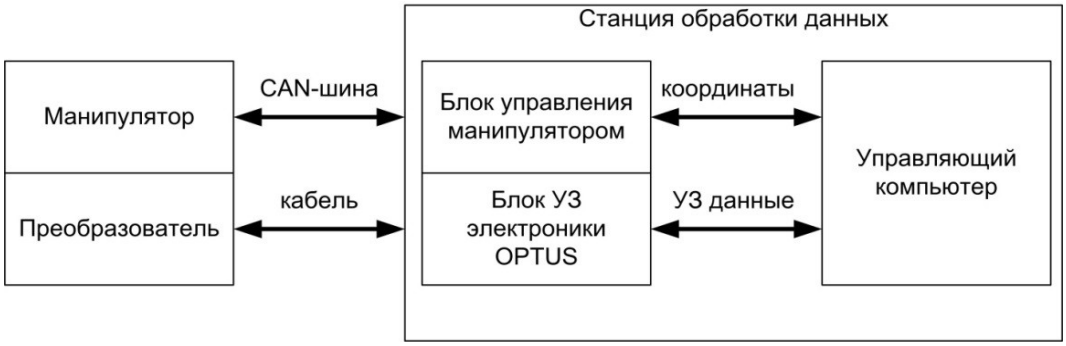


Рисунок 6 – Структурная схема экспериментальной установки

Для проведения серии экспериментов был изготовлен тестовый образец с плоскопараллельными границами, изготовленный из стали (рис. 7). Объект контроля содержал плоскодонные отверстия, имеющие различные форму и размеры. Плоскодонные отверстия имеют круглую и форму прямоугольника со скругленными углами.

Рисунок 7 – Тестовый образец

Для сканирования объекта контроля применялась матричная AP Doppler 5M8×8BP 1.0 (рис. 8). Двумерное сканирование объекта контроля осуществлялось с шагом 1 мм. В рамках экспериментальной верификации рассматривалось два случая. В первом случае поверхность тестового образца располагалась параллельно плоскости сканирования. Второй случай был направлен на исследование качества получаемых результатов при непараллельности профиля объекта контроля относительно плоскости сканирования. Для этой цели тестовый образец был наклонен на угол около 5^{o}. Для каждого из рассматриваемых случаев проводилось четыре серии измерений. В каждой измерительной позиции получение набора эхо-сигналов осуществлялось с использованием режима двойного сканирования. В процессе сканирования ультразвуковой преобразователь перемещался с помощью манипулятора экспериментальной установки, при этом на жестком диске управляющего компьютера сохранялись наборы эхо-сигналов и координаты измерительной позиции, в которых они были получены.

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

Для проведения пространственно-временной обработки было разработано программное обеспечение (ПО) для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР, основой которого является разработанный алгоритм с расчетами в частотной области (рис. 9). Для восстановления изображения внутренней структуры объекта контроля в ПО необходимо загрузить набор эхо-сигналов с указанием требуемых параметров пространственно-временной обработки. Результатом работы ПО является трехмерное изображение внутренней структуры объекта контроля.

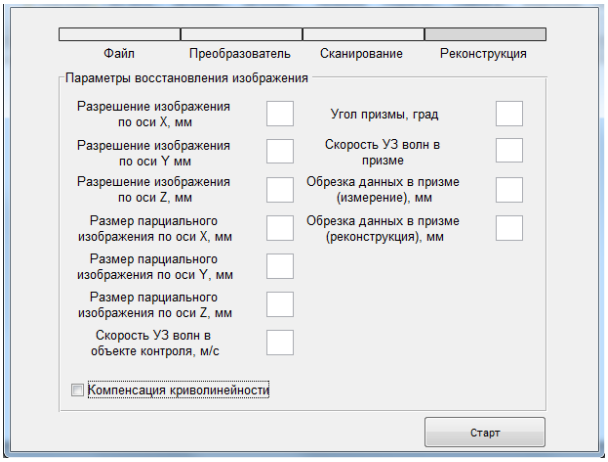


Рисунок 9 – Общий вид ПО пространственно-временной обработки для ультразвуковой томографии с использованием матричных АР

В рамках проведенной пространственно-временной обработки сигналы, полученные в одной точке траектории сканирования, использовались для получения парциального изображения размерностью 40x40x90 мм и разрешением 0.25 мм по трем осям. В процессе проведения пространственно-временной обработки полученные парциальные изображения когерентно суммировались для восстановления итогового изображения внутренней структуры тестового образца.

В **пятой главе** проводится экспериментальная верификация разработанного алгоритма и созданного на его основе ПО. Трехмерный результат для случая,

когда поверхность объекта контроля располагается параллельно плоскости сканирования, представлен на рис. 10. Аналогичный результат, когда тестовый образец расположен под наклоном, представлен на рис. 11.

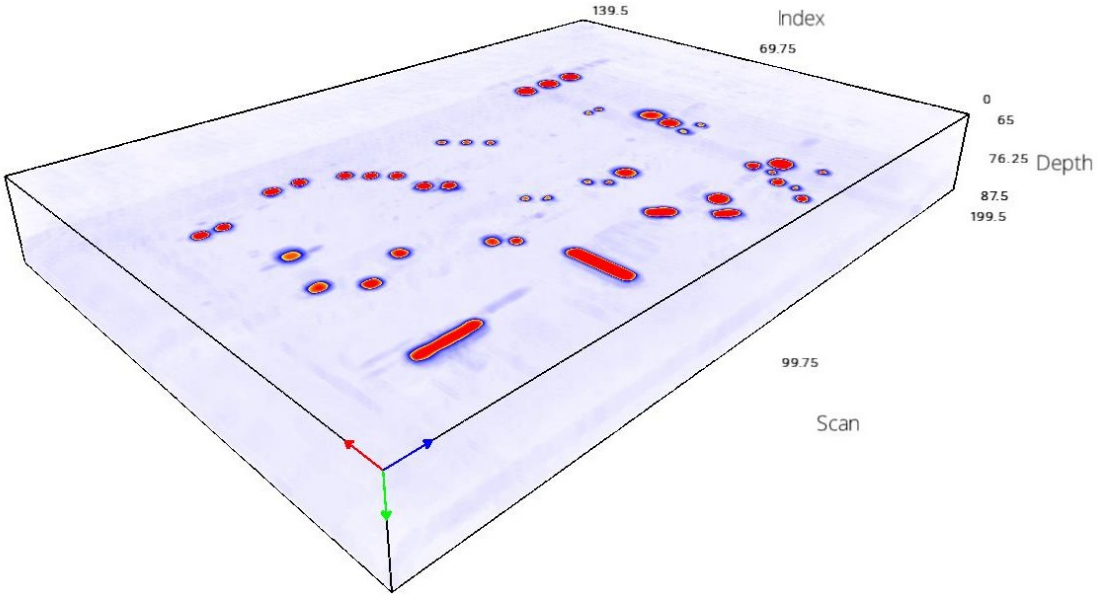


Рисунок 10 – Трехмерное синтезированное изображение тестового образца, полученное с применением разработанного алгоритма (поверхность объекта расположена параллельно плоскости сканирования)

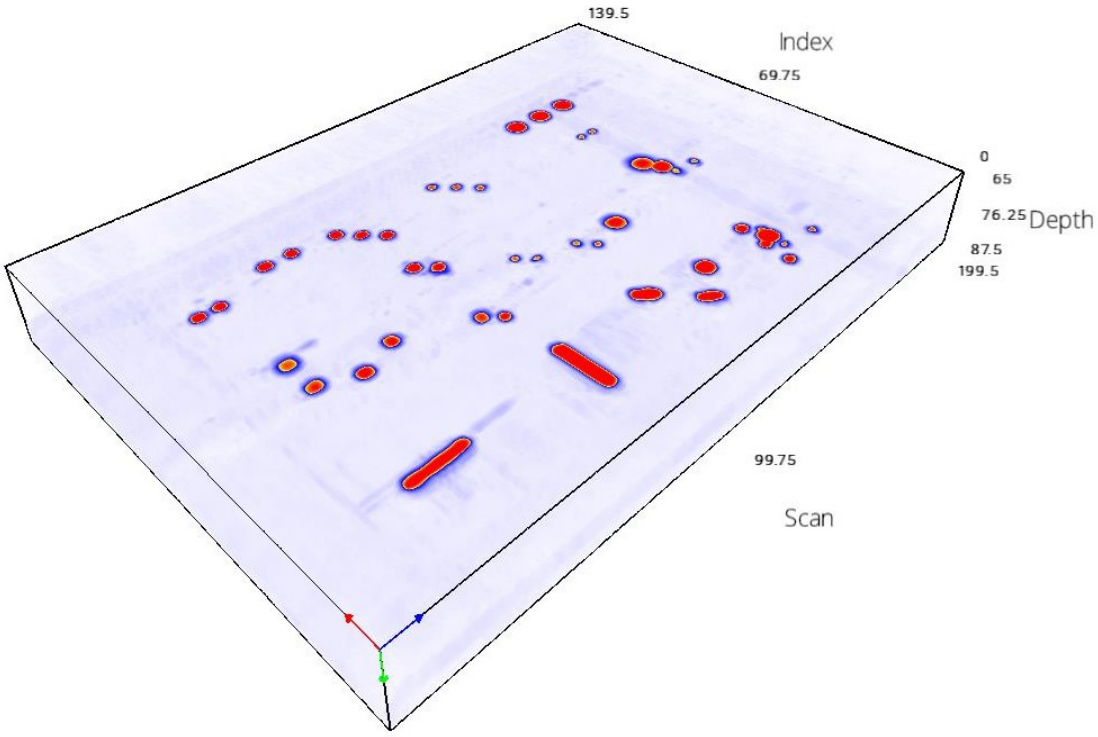


Рисунок 11 – Трехмерное синтезированное изображение тестового образца, полученное с применением разработанного алгоритма (объект расположен под наклоном)

Полученные трехмерные синтезированные изображения использовались для определения размеров дефектов с использованием метода половины амплитуды. Для случая, когда объект контроля расположен параллельно плоскости сканирования, абсолютная погрешность определения размеров дефектов не превышала 1 мм. Для круглых плоскодонных отверстий диаметром 3 и 5 мм относительная погрешность определения размеров дефектов не превышала 10% от реальных размеров несплошностей. Аналогичные значения для круглых плоскодонных отверстий диаметром 2 мм не превышали 25% и могут быть уменьшены путем повышения разрешения восстанавливаемого синтезированного изображения. Это, в свою очередь, может привести к увеличению времени, затрачиваемого на пространственно-временную обработку. Для дефектов, имеющих форму прямоугольника со скругленными концами, максимальные относительные погрешности определения размеров дефектов составляли 7,5% в продольном направлении и 13,3% в поперечном направлении.

В случае, когда объект контроля расположен под наклоном относительно плоскости сканирования, абсолютная погрешность определения размеров дефектов также не превышала 1 мм. Для круглых плоскодонных отверстий диаметром 5 мм относительная погрешность определения размеров не превышала 10% от реального размера дефектов. Аналогичные значения для несплошностей диаметром 3 мм не превышали 16,7%, а для дефектов диаметром 2 мм – 25%. Для дефектов, имеющих форму прямоугольника со скругленными концами, максимальные относительные погрешности определения размеров дефектов составляли 11,3% (в продольном направлении) и 10% в поперечном направлении.

Проведение нескольких серий измерений тестового образца для разных случаев позволяет определить среднеквадратическое отклонение определения размеров дефектов и, тем самым, оценить повторяемость результатов. В случае, когда объект контроля расположен параллельно плоскости сканирования, отношение среднеквадратического отклонения оценки размеров дефектов к среднему значению оценки размеров дефектов не превышало 4,8%. Аналогичное значение для случая, когда тестовый объект располагался под наклоном, составляло 6,1%. Данные значения соответствуют требованиям по повторяемости результатов контроля, отраженным в нормативной документации.

В **заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен сравнительный анализ различных подходов в реализации алгоритмов пространственно-временной обработки с применением моделирования в программном пакете CIVA UT. Сравнительный анализ включал в себя оценку разрешающей способности полученных результатов и скорости получения изображений структуры объектов контроля при использовании алгоритмов пространственно-временной обработки с расчетами в частотной и временной области. Разница в оценке размеров дефектов по трехмерным синтезированным изображениям, которые были получены с использованием двух

рассматриваемых подходов, не превышала 3,4 %. Это свидетельствует о сходной разрешающей способности результатов, получаемых с использованием двух рассмотренных алгоритмов. В свою очередь, применение алгоритма с расчетами в частотной области обеспечивает более высокую скорость получения синтезированных изображений по сравнению с алгоритмом с расчетами во временной области. Таким образом, проведенный сравнительный анализ показал, что алгоритм с расчетами в частотной области является наиболее эффективным для решения задач ультразвуковой томографии с использованием матричных АР.

2. Было разработано экспериментальное ПО, основой которого является разработанный алгоритм с расчетами в частотной области. Данное ПО обеспечивает восстановление синтезированных изображений при различных условиях проведения ультразвуковой томографии.

3. Был создан экспериментальный стенд, предназначенный для экспериментальной верификации разработанного алгоритма пространственно-временной обработки. Основными узлами экспериментального стенда являются манипулятор, многоканальный блок электроники, и управляющий компьютер. Экспериментальный стенд позволяет осуществлять проверку разработанного алгоритма при различных условиях проведения ультразвуковой томографии. Экспериментальная верификация включала в себя параллельное расположение поверхности объекта контроля относительно плоскости сканирования, а также расположение тестового образца под наклоном.

4. Была проведена экспериментальная верификация разработанного алгоритма пространственно-временной обработки. В рамках экспериментальной верификации рассматривался случай размещения объекта контроля параллельно плоскости сканирования и расположение образца под наклоном. Значения абсолютной погрешности определения размеров дефектов во всех случаях не превышали 1 мм. Максимальная относительная погрешность определения размеров различных дефектов варьировалась от 10% (плоскодонные отверстия диаметром 5 мм) до 25% (плоскодонные отверстия диаметром 2 мм).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Dolmatov D. O. Application of Phase-Reversal Fresnel Zone Plates for improving the elevation resolution in ultrasonic testing with phased arrays / Dolmatov D. O., Tarrazó-Serrano D., Filippov G. A., Minin I. V., Minin O. V., Sednev D. A.// Sensors. – 2019 – Vol. 19 – №. 23 – Article number: 5080.

2. Dolmatov D. O. Fourier-domain post-processing technique for Digital Focus Array imaging with Matrix phased array for ultrasonic testing of ITER components / Dolmatov D. O., Demyanyuk D. G., Ozdiev A. H., Pinchuk R. V. //// Fusion Engineering and Design. – 2018 . – Vol. 126 . – P. 124–129 .

3. Dolmatov D. O. Applying the Algorithm of Calculation in the Frequency Domain to Ultrasonic Tomography of Layered Inhomogeneous Media Using Matrix Antenna Arrays / Dolmatov D. O., Sednev D. A., Bulavinov A. N., Pinchuk R. V. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019 – Vol. 55 – №. 7. – P. 499–506.

4. Dolmatov D. O. Applying the Algorithm of Calculation in the Frequency Domain to Ultrasonic Tomography / Dolmatov D. O., Demyanyuk D. G., Sednev D. A., Pinchuk R. V. // Russian Journal of Nondestructive Testing . – 2018 . – Vol. 54, iss. 4 . – P. 232-236 .

5. Dolmatov D. O. The imaging algorithm for the ultrasonic evaluation of metal castings by the application of automated testing systems based on a six degree of freedom robotic manipulators / Dolmatov D.O. , Zhvyrblya V. Yu., Sednev D. A., Kroening M. // Computer Methods in Materials Science. – 2018 – Vol. 18 – №. 2. – P. 49-57

6. Dolmatov D. O. Application of Fourier-Domain Post-Processing Technique for Ultrasonic Imaging with Matrix Phased Arrays in Advanced Manufacturing of Details and Machines / Dolmatov D. O., Salchak Y. A., Sednev D. A., Pinchuk R. V. // Materials Science Forum Scientific Journal. – 2018. – Vol. 938 – P. 81-88 .

7. Dolmatov D. O. The Frequency-Domain Algorithm for Ultrasonic Imaging of Complex-Shaped Objects / Dolmatov D. O., Sednev D. A., Pinchuk R.V.// Key Engineering Materials Scientific Journal . – 2018 . – Vol. 769– P.262-268 .

8. Dolmatov D. O. Advanced ultrasonic testing of complex shaped composite structures / Dolmatov D. O., Zhvyrblya V. Yu., Filippov G. A, Salchak Y. A., Sedanova E. P.// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering . – 2016 . – Vol. 135 – Article number: 012010.

9. Dolmatov D. O. Application of frequency-domain algorithms in ultrasound imaging of composite materials / D. O. Dolmatov, V. Abramets // MATEC Web of Conferences . – Les Ulis : 2016 . – Vol. 48 – Article number:03004.

10. Petrov I. The implementation of post-processing algorithm for ultrasonic testing of welds / Petrov I. S., Vdovenko A. Yu., Dolmatov D. O., Sednev, D. A. //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 510. – №. 1. – Article number: 012004.

11. Долматов Д.О. Применение алгоритма расчета в частотной области для ультразвуковой томографии слоисто неоднородных сред с использованием матричных антенных решеток/ Долматов Д.О. и др.// Дефектоскопия – 2019– №7 – С. 12 – 19

12. Долматов Д.О. Применение алгоритма расчета в частотной области для ультразвуковой томографии/ Долматов Д.О., Седнев Д.А., Булавинов А.Н., Пинчук Р.В.// Дефектоскопия – 2018– №4 – С. 12 – 17

13. Долматов Д. О. Применение неэквидистантного преобразования Фурье для решения задач ультразвуковой томографии с использованием антенных решеток / Долматов Д. О., Ермошин Н. И., Конева Д. А. , Седнев Д. А. //Дефектоскопия. – 2020. – №. 8. – С. 3-11.

14. Вдовенко А.Ю. Применение методов синтезированной апертуры в ультразвуковой дефектоскопии с использованием ФАР/ Вдовенко А.Ю., Долматов Д.О., Седнев Д.А.// Известия высших учебных заведений. Физика – 2018 –Т. 61 –№ 12-2 (732) –С. 12-15

Публикации в других научных изданиях

1. Пат. 2723368 Российская Федерация, G01N 29/04 (2006.01). Способ ультразвукового контроля дефектности металлического изделия / Седнев Д.А. [и др.]. – № 2019137309. заявл. 21.11.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 16. – 26 с.

2. Долматов Д.О. Алгоритм пространственно-временной обработки в частотной области для ультразвуковой томографии с использованием матричных антенных решеток/ Долматов Д.О.// SIBTEST – 2019: Сборник тезисов докладов V Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле – 2019 – С. 24-25.

3. Вдовенко А.Ю. Применение компьютерных симуляций для разработки алгоритма ультразвуковой томографии компонентов атомной энергии/ Вдовенко А.Ю., Долматов Д.О.// Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий Научная сессия НИЯУ МИФИ. Материалы конференции – 2019 – С. 81

4. Долматов Д.О. Применение алгоритма расчета в частотной области для ультразвуковой томографии с использованием матричных ФАР в производстве деталей и машин/ Долматов Д.О., Седнев Д.А.// Инновационные технологии в машиностроении Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции – 2018 – С. 118-120.

5. Применение алгоритма пространственно-временной обработки в ультразвуковой томографии с использованием ФАР/ Долматов Д.О., Седнев Д.А.// Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2018) Сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов – 2018 – С. 187-188

6. Вдовенко А.Ю. Применение методов синтезированной апертуры в ультразвуковой дефектоскопии с использованием ФАР/ Вдовенко А.Ю., Долматов Д.О.// Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий научная сессия НИЯУ МИФИ, материалы конференции – 2018 – С. 32

7. Долматов Д.О. Применение частотных алгоритмов в ультразвуковой томографии объектов сложных форм/ Долматов Д.О.// Высокие технологии в современной науке и технике Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов – 2017 – С. 300.