

На правах рукописи

КВАСНИКОВ КОНСТАНТИН ГРИГОРЬЕВИЧ



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

Специальность:

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

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Томск – 2018

Работа выполнена на кафедре промышленной и медицинской электроники
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет».

Научный доктор технических наук, доцент
руководитель: Солдатов Алексей Иванович

Официальные Хмелёв Владимир Николаевич, доктор
оппоненты: технических наук, профессор, Бийский
технологический институт (филиал) ФГБОУВО
«Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова», заместитель
директора по научной работе, Бийск
Бобров Алексей Леонидович, кандидат
технических наук, доцент, ФГБОУВО
«Сибирский государственный университет путей
сообщения», доцент кафедры «Электротехника,
диагностика и сертификация», Новосибирск

Ведущая Федеральное государственное бюджетное
организация: учреждение науки Институт физики прочности и
материаловедения СО РАН

Защита состоится «15» мая 2018г. в 15:00 на заседании диссертационного
совета Д212.269.09 при федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028,
г. Томск, пер. Савиных, 3, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Национального исследовательского Томского политехнического университета
по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте
<http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета к.т.н.



Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В последнее время отечественная космическая отрасль начала возвращать свои утерянные в годы перестройки лидирующие позиции на мировой арене. На орбиту стали выводиться космические аппараты (КА) с длительным сроком службы для систем связи, ретрансляции, навигации, радиотехнической разведки и предупреждения о ракетном нападении. Одним из важнейших факторов, влияющих на долговечность КА, является уровень технологии и культуры производства. Для повышения активного срока эксплуатации необходим контроль всех элементов КА на этапе производства и испытаний. Наиболее перспективным методом неразрушающего контроля является акустический с использованием многоэлементных антенных решеток. Применение акустических решеток с когерентной обработкой принятых сигналов хорошо известны в технике. Такой подход позволяет получить высокое отношение сигнал-шум и максимально точно локализовать дефекты. Для сканирования объекта контроля и визуализации дефектов используют фазовое управление элементами антенной решетки (ФАР), которое получило широкое распространение в мире, и метод цифровой фокусировки (Total Focusing Method), заключающийся в постобработке А-сканов. ТФМ демонстрирует несомненные преимущества перед фазовым управлением элементами антенной решетки. Большие группы ученых из разных стран развивают это направление: Дж. Дэвис и П. Кавлей из исследовательского центра Великобритании, С.Прада из Парижского института Ланжевена, Д.Вилсокс из Бристольского университета Великобритании, Ю.Биркелунд из Норвежского университета Тромсе, А.Булавинов из Фраунгоферовского института неразрушающего контроля, Германия, А.Самокрутов и В.Шевалдыкин из ООО «Акустические Контрольные Системы» г.Москва, Е.Базулин, В.Бадалян и А. Вopilкин из НПЦ неразрушающего контроля «Эхо+», Москва.

Однако проблемы повышения чувствительности, разрешающей способности и отношения сигнал\шум остаются актуальными и сегодня, поэтому исследователи пытаются применить новые алгоритмы обработки исходной информации для решения этих задач. В последнее время были разработаны: «Dynamic Depth Focusing method», «method of Decomposition of the Time Reversal Operator», «the Cylindrical Phase Shift Migration algorithm», которые хотя и имеют оригинальные алгоритмы обработки, но не дают кардинального улучшения дефектометрических параметров систем контроля. Связано это, прежде всего, с тем, что теоретический анализ выполнен не в полном объеме. Например, не получена аналитическая формула разрешающей способности для линейной антенной решетки при сканировании методом ТФМ и аддитивном способе обработки парциальных сигналов. В то же время,

проведение широкомасштабного теоретического анализа на основе численных методов весьма затруднительно. С другой стороны, в технике обработки информации известны методы умножения сигналов для решения различного рода задач. Использование метода мультипликативной обработки акустических сигналов в миграционном алгоритме может улучшить дефектометрические характеристики систем акустического контроля. Однако, на сегодняшний день отсутствуют аналитические выражения для расчета диаграммы направленности, чувствительности и отношения сигнал/шум линейной эквидистантной антенной решетки при мультипликативном способе обработки парциальных сигналов.

Основная задача данной работы состоит в анализе дефектометрических характеристик системы акустического контроля на основе линейных эквидистантных антенных решеток с мультипликативной обработкой акустических сигналов и применении этого метода обработки для контроля наиболее ответственных изделий ракетно-космического применения.

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

Цель диссертационной работы: исследовать дефектометрические возможности реконструкции акустических изображений с помощью линейных эквидистантных антенных решеток с аддитивной и мультипликативной обработкой сигналов для создания аппаратно-программного комплекса неразрушающего контроля фасонных отливок для изделий ракетно-космического применения.

Для достижения данных целей были решены следующие **основные задачи**:

1) Оптимизация методики реконструкции изображения зоны контроля с использованием аддитивной и мультипликативной обработки парциальных сигналов эквидистантной линейной антенной решетки.

2) Проведение теоретических и экспериментальных исследований дефектометрических характеристик акустической дефектоскопии с использованием аддитивной и мультипликативной обработки парциальных сигналов.

3) Разработка экспериментальной установки и проведение испытаний.

Методы исследований. Для решения основных задач диссертации использованы методы решения уравнений математической физики, частные решения дифференциального уравнения второго порядка, теория геометрической акустики, принцип Гюйгенса и принцип Ферма, теория вероятности и компьютерное моделирование. Экспериментальные исследования выполнены с использованием метода физического эксперимента с последующей статистической обработкой данных.

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

1) Разработана компьютерная модель реконструкции томографического изображения, которая позволяет проводить исследования в широком диапазоне исходных параметров акустического и электронного трактов с использованием методов аддитивной и мультипликативной обработки парциальных сигналов.

2) Получены аналитические выражения, описывающие диаграмму направленности и разрешающую способность линейной эквидистантной антенной решетки при способе сканирования TFM для аддитивного способа обработки парциальных сигналов.

3) Получена форма диаграммы направленности и график зависимости разрешающей способности линейной эквидистантной антенной решетки при мультипликативной обработке парциальных сигналов методом математического моделирования.

4) Получены аналитические выражения, описывающие соотношение сигнал/шум при мультипликативной обработке парциальных сигналов.

5) Создан дефектоскоп “УУК-16” для контроля металлических материалов, имеющий лучшие технические характеристики по сравнению с аналогами.

Практическая значимость.

1) Получены аналитические выражения, пригодные для использования инженерного проектирования ультразвуковых дефектоскопов с повышенной разрешающей способностью и чувствительностью.

2) Предложена компьютерная модель, которая позволяет оптимизировать параметры акустического тракта для эхо-импульсных сканирующих дефектоскопов в ходе проведения НИР и ОКР без затратных экспериментальных исследований.

3) Создан акустический эхо-импульсный дефектоскоп “УУК-16”, нашедший практическое применение в АО «НПЦ «Полус».

Основные положения, выносимые на защиту:

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

2) Реконструкция изображения акустического тракта и аналитическое выражение разрешающей способности позволяют выявлять топологию зоны контроля с точностью не хуже 9%.

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

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

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

Апробация работы и публикации.

Материалы, вошедшие в диссертацию, были обсуждены на следующих российских и международных конференциях:

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

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

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

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

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

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

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

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

- VI научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов Современная газотранспортная отрасль: перспективы, проблемы, решения, Томск, 17-18 Апреля 2013.

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

Использование результатов работы

Результаты исследований и разработанный дефектоскоп “УУК-16” внедрен на АО «НПЦ «Полюс», г.Томск.

Публикации.

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

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 145 страниц, 77 рисунков и 5 таблиц. Обзор литературных источников содержит 132 наименования.

Основное содержание работы

Во введении проведено обоснование актуальности выбранной темы, рассмотрено современное состояние исследований и разработок в области ультразвуковой томографии, обозначены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая применимость результатов работы. Описаны основные положения, которые выносятся на защиту.

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

Во второй главе проведено теоретическое исследование фундаментальных закономерностей сканирования с помощью линейной эквидистантной акустической антенной решетки способом TFM. Частное решение волнового уравнения в форме функции Грина и граничными условиями в виде приближений Кирхгофа позволило свести дальнейший анализ к реальным алгебраическим функциям. Парциальный сигнал имеет вид

$$U_n(t) = U_0 \cos(\omega \cdot t - \Psi_n), \quad (1)$$

где ω - круговая частота волнового поля, t – текущее время, Ψ_n – фаза сигнала на приёмнике с номером n .

Расположение элементов акустического тракта в декартовой системе координат приведено на рисунке 1. Считая среду распространения акустического излучения гомогенной и используя геометрию рисунка 1, функцию парциального эйконала можно записать в виде:

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

где l_n – эйконал от отражателя до элемента решетки с произвольным номером n , d – расстояние между соседними элементами решетки.

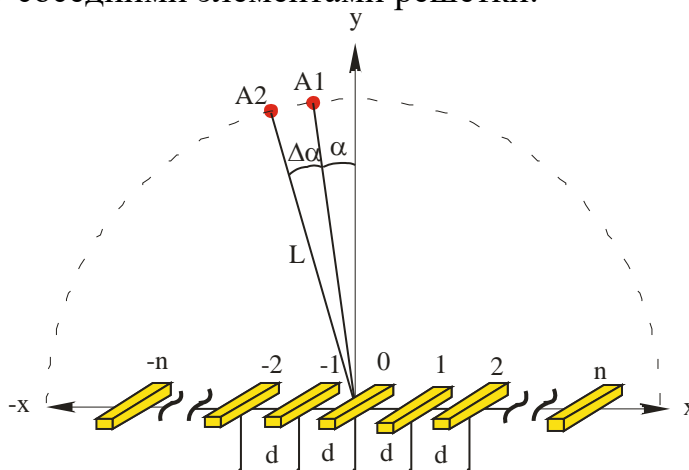


Рисунок 1 – Акустический тракт в декартовых координатах.

Тогда фаза сигнала, пришедшего от отражателя, будет равна:

$$\Psi_n = k \cdot (l_p + l_m), \quad (3)$$

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

Используя формулы (1), (2) и (3) и разлагая результат в ряд Тейлора, принятый сигнал $U(t)$ произвольного приёмника, нормированный к единичной амплитуде, приобретает вид:

$$U(t) = U_0 \cdot \cos \left\{ \omega \cdot t - k \cdot L \cdot \left[2 + 0,5 \cdot \left(\frac{d}{L} \cdot p + \frac{d}{L} \cdot m \right)^2 + \left(\frac{d}{L} \cdot p + \frac{d}{L} \cdot m \right) \cdot \sin \alpha \right] \right\} \quad (4)$$

Из выражения (4) нетрудно видеть, что все мгновенные значения сигналов, отражённых от точки A1, выбранные характерным для TFM образом, будут максимальными и равны единице. Соответственно, сумма такой выборки также будет максимальна. Произойдёт интерференционная фокусировка. Для соседних точек поля разность фазы сигнала и мгновенной фазы выборки уже не будет равна нулю. Произойдёт пространственное распределение амплитуды и точка A1 отобразится в сигнатуре некоторой областью. Аналитическое описание этой области, по определению, есть функция рассеяния точки (PSF), или, с некоторыми допущениями, диаграмма направленности антенной решётки с обработкой парциальной информации по методу TFM. Конечный результат представляет собой сумму всех парциальных мгновенных выборок:

$$A_{\Delta\alpha} = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n \cos \{ k \cdot d \cdot [i \cdot \sin \alpha + j \cdot \sin \alpha - i \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) - j \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha)] \} \quad (5)$$

После преобразований, предложенных А. Анго, и нормировки, окончательно формула приобретает вид:

$$R_{\alpha, \Delta\alpha} = \left(\frac{\sin\{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \cdot (n + 0,5)\}}{\sin\left(\frac{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2}\right) \cdot (2 \cdot n + 1)} \right)^2 \quad (6)$$

Характерный вид полученной зависимости показан на рисунке 2. Кривая построена для частоты акустического излучения 300 кГц, а среда распространения волнового поля – вода.

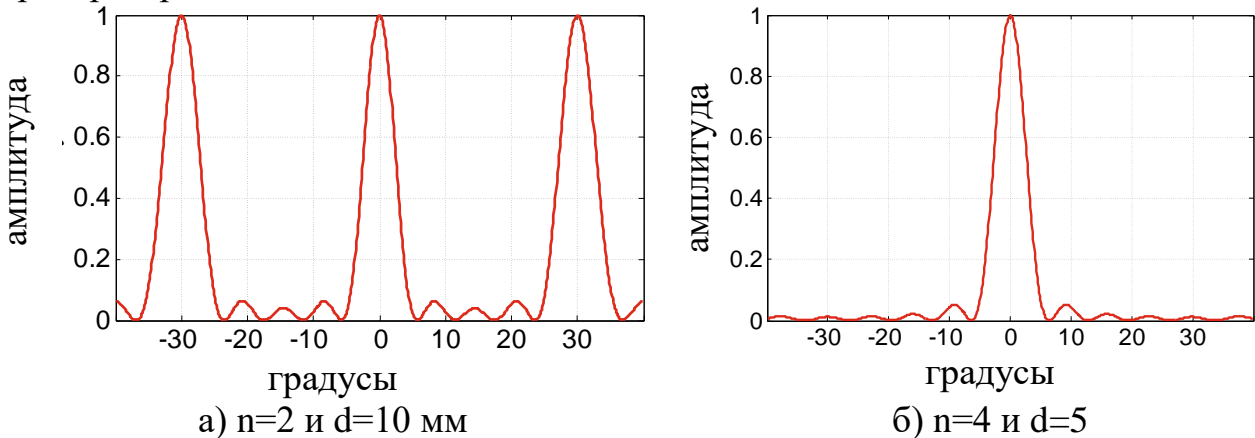


Рисунок 2 – Диаграмма направленности

На графике видно, что при углах сканирования, равных 30° и минус 30° возникают главные боковые лепестки, создающие помехи синтезированного изображения объекта контроля. Устранение данного недостатка требует уменьшения расстояния между элементами, а для сохранения ширины ДН нужно увеличить их количество. Это иллюстрирует рисунок 2б. Он рассчитан для $n=4$ и $d=5$.

Важным дефектометрическим параметром систем акустической визуализации служит разрешающая способность. При использовании линейных антенн принято выделять угловую (фронтальную) и лучевую (продольную) разрешающие способности. Теоретической основой формирования лучевой разрешающей способности является длительность сигнала-отклика, которая определяется формой зондирующего сигнала.

Механизм образования фронтальной разрешающей способности основан на дифракционных процессах парциальных сигналов антенной решётки. В оптике, в качестве оценки разрешающей способности, принято использовать эмпирический критерий Рэля. В нашем случае, чтобы вычислить угловой промежуток, представляющий численное выражение фронтальной разрешающей способности, достаточно определить положение первого нуля диаграммы направленности, решая уравнение (7):

$$\left(\frac{\sin \{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)] \cdot (n + 0,5)\}}{\sin \left(\frac{k \cdot d \cdot [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\alpha)]}{2} \right) \cdot (2 \cdot n + 1)} \right)^2 = 0 \quad (7)$$

Обозначив угловую разрешающую способность буквой $\alpha_{\text{раз}}$, получаем формулу в общем виде:

$$\alpha_{\text{раз}} = \arcsin \left(\frac{\lambda}{d \cdot n_{\text{общ}}} + \sin(\alpha) \right) - \alpha, \quad (8)$$

где λ – длина волны акустического излучения, $n_{\text{общ}} = (2 \cdot n + 1)$ – количество элементов в решётке, α – угол сканирования диаграммы направленности.

При $\alpha=0$ и $n_{\text{общ}} > 10$ выражение (8) упрощается.

$$\alpha_{\text{раз}}^{\perp} = \frac{\lambda}{d \cdot n_{\text{общ}}}. \quad (9)$$

Величина ошибки, возникающая за счет упрощения формулы (8), зависит от величины $\alpha_{\text{раз}}^{\perp}$. Например, при значении $\frac{\lambda}{d \cdot n_{\text{общ}}} = 0,1$ радиан, ошибка не будет превышать 0,2%. Поэтому, использование выражения (9) можно считать вполне приемлемым.

Выражение (8) можно преобразовать к более простому виду, учитывая формулу (9). Для этого достаточно разложить функцию \arcsin в ряд Тейлора и оставить только три первых члена. Получим:

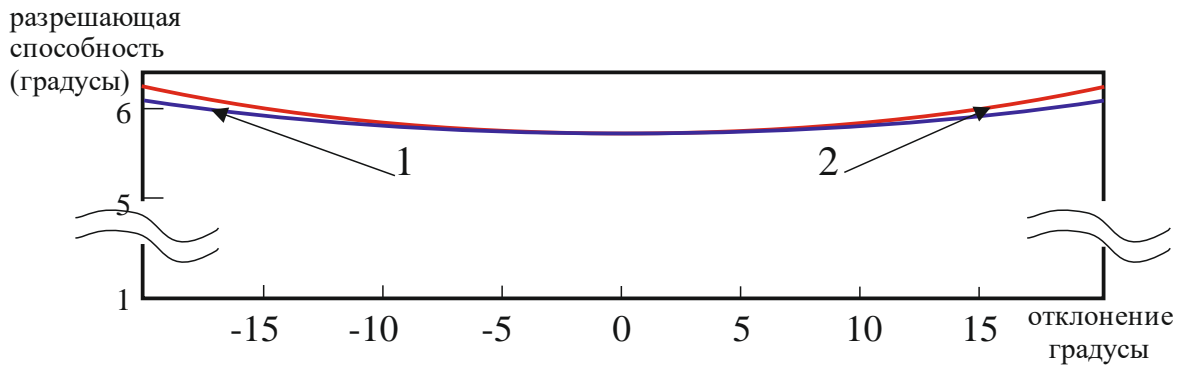
$$\alpha_{\text{раз}} = \frac{\alpha_{\text{раз}}^{\perp}}{\cos \alpha} \quad (10)$$

Возникающая при этом ошибка будет зависеть от величины угла сканирования. На рисунке 3 показаны две кривые, которые представляют собой зависимость угловой фронтальной разрешающей способности от угла сканирования диаграммы направленности антенной решётки, синтезированной по методу TFM. Видно, что наилучшее совпадение наблюдается в центре. Параметры акустического тракта, использованные для рисунка 3, аналогичны параметрам, использованным для рисунка 2.

Абсолютные различия значений разрешающей способности, рассчитанные по выражениям (8) и (10) меняются в пределах зоны сканирования, на 0,2% в центре, достигая 2,2% на краях.

Более подробный анализ формулы (8) показывает, что неравномерность фронтальной разрешающей способности в зоне сканирования слабо зависит от конкретных параметров решётки. Так неравномерность разрешающей способности в зоне сканирования, равной $\pm 20^\circ$, равно примерно 8%, причём

различие данного параметра для антенных решёток с числом элементов, равным 5 и 9, всего $\pm 0,5\%$.



1 – по формуле (10); 2 – по формуле (8).

Рисунок 3 – Разрешающая способность антенной решётки,

Мультипликативный метод обработки

В качестве одной из модификаций методики TFM предлагается использовать операцию перемножения парциальных сигналов антенной решётки. Учитывая это, а также чётность функции \cos и одинаковые пределы изменения переменных i, j выражение (5) можно переписать:

$$A_{\alpha\Delta\alpha} = \prod_1^{2 \cdot n} \cos^{2 \cdot p} \{k \cdot d \cdot [p \cdot (\sin \alpha - \sin(\alpha + \Delta\alpha))]\}, \quad (11)$$

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

Формула (11) фактически представляет собой диаграмму направленности антенной решётки с алгоритмом получения парциальной информации по методу TFM, но с мультипликативной обработкой.

Дальнейший анализ проведём с помощью численных методов представления диаграммы направленности, полученной мультипликативным способом. На рисунке 4 показана диаграмма направленности для тех же параметров антенной решётки, что и на рисунке 2, но рассчитанная с помощью формулы (11). Сравнение рисунка 2а и рисунка 4а выявляет наличие существенных различий. Во-первых, ширина основного главного лепестка по уровню 0,5 для аддитивного способа равна $5,16^\circ$, а для мультипликативного всего $1,66^\circ$. Во-вторых, неглавные боковые лепестки становятся очень малыми и на представленном графике не видны. Главные боковые лепестки высших порядков не изменяют своей амплитуды, но становятся в два раза ближе к основному лепестку диаграммы направленности, что сужает зону возможного сканирования.

При увеличении n главные боковые лепестки диаграммы направленности исчезли из видимой зоны сканирования на рисунке 4б. При этом ширина основного лепестка стала ещё меньше и составила по уровню 0.5 всего $0,83^\circ$.

При аддитивном методе обработки ширина основного лепестка оставалась неизменной.

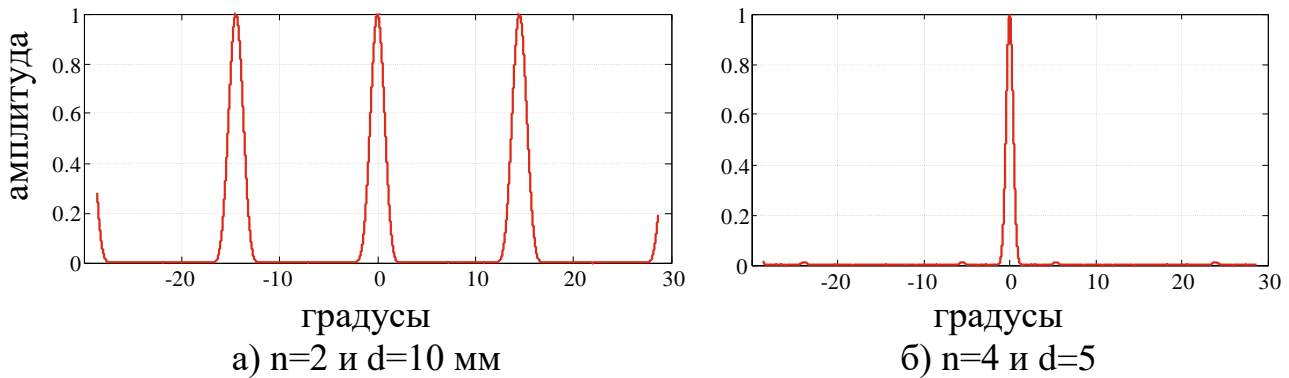
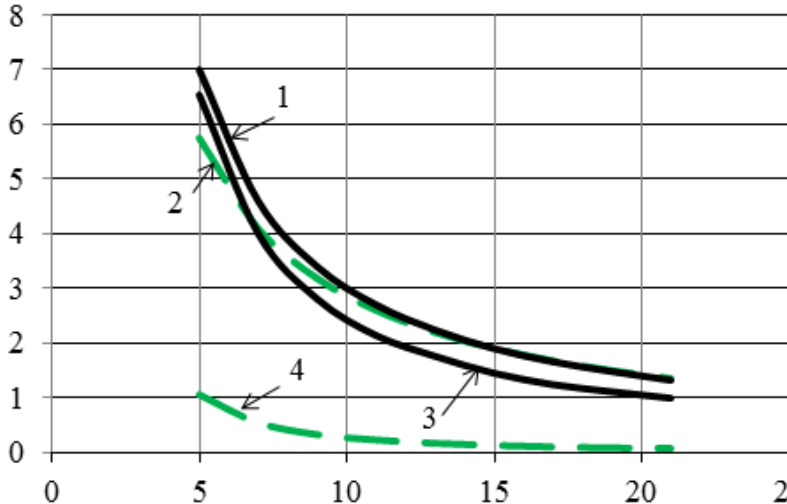


Рисунок 4 – Диаграмма направленности антенной решётки при мультипликативном методе обработки.

На рисунке 5 показаны зависимости разрешающей способности и ширины диаграммы направленности по уровню 0,5 для аддитивного и мультипликативного способов обработки парциальных данных линейной эквидистантной антенной решётки с расстоянием между элементами, равном 10 мм. Данные получены путём численного моделирования. Представленные зависимости показывают, что разрешающая способность для этих двух методов различается незначительно по абсолютной величине. В то же время, видно, что ширина диаграммы направленности может отличаться в несколько раз.

градусы



1, 3 – разрешающая способность для аддитивного и мультипликативного способов соответственно,

2, 4 – ширина диаграммы направленности для аддитивного и мультипликативного способов соответственно

количество элементов

Рисунок 5 - Зависимость разрешающей способности и ширины диаграммы направленности от количества элементов антенной решётки.

Для решения задачи по восстановлению изображения на основе ультразвуковой локации была принята упрощенная компьютерная модель акустического тракта, со следующими допущениями:

- Длина акустической волны больше размеров излучателя. В этом случае можно пренебречь дифракционными явлениями.
- Скорость звука в зоне контроля не меняется.
- Влияние переотражений считаем не существенным
- Зона контроля расположена в дальней зоне ультразвукового поля.

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

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

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

- Получение А-скана для i -го преобразователя от точечного отражателя образуется сдвигом цифрового описания модели отражённого эхо-сигнала на сумму времени прохождения сигнала от излучателя до точечного отражателя и обратно к приемнику. Затем полученные данные суммируются по всем заданным точечным отражателям. Полученные А-сканы сохраняются в файл для последующей процедуры восстановления изображения зоны контроля. Формат файла идентичен тому, который используется при сохранении реальных А-сканов.

- Область контроля (рисунок 6) разбивается на локальные области небольшого размера (выбор размера определяет качество визуализации – чем меньше, тем лучше качество, но больше расчетов) и каждая из локальных областей выступает в качестве точечного отражателя. Последовательно генерируется N импульсов от пьезопреобразователей антенной решетки, где N – количество элементов решетки. Отраженные эхо-сигналы

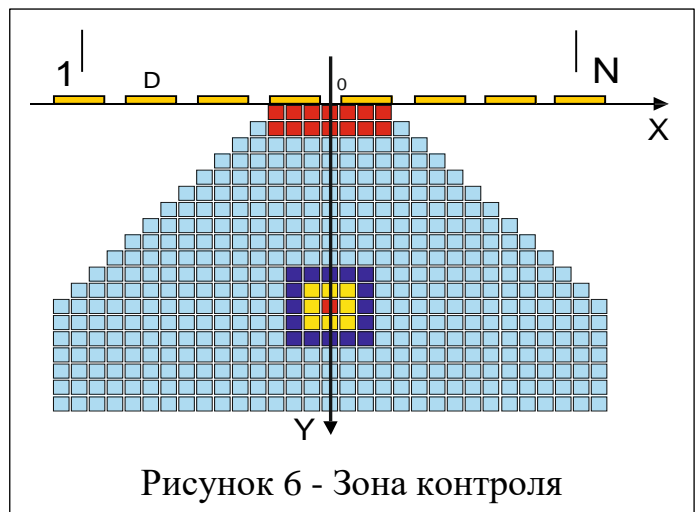


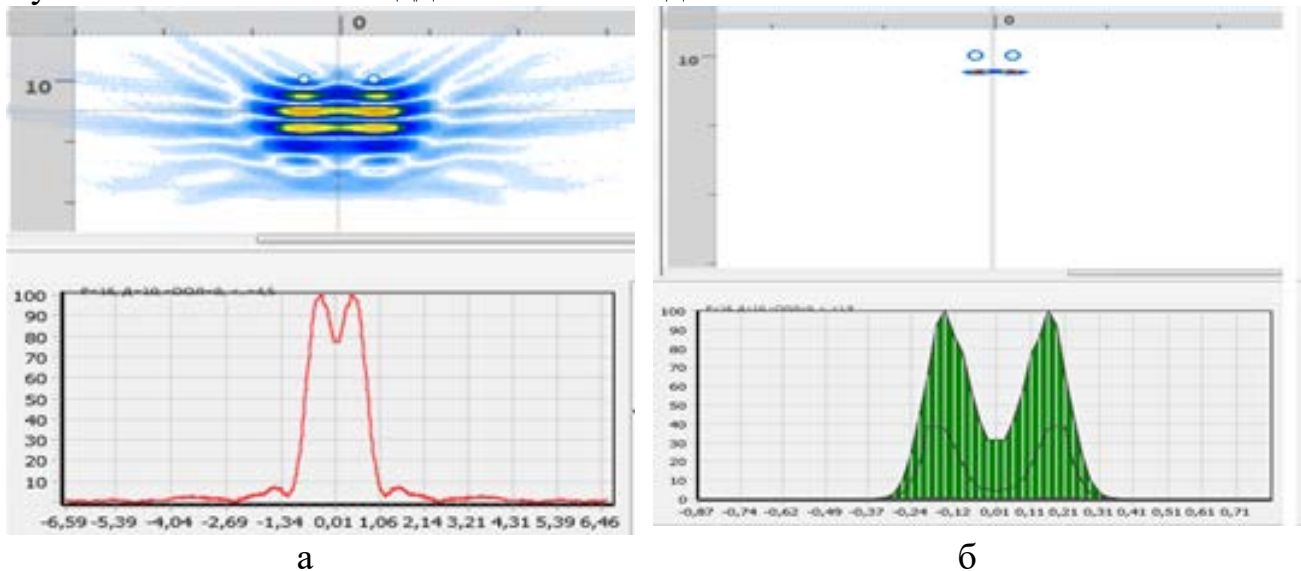
Рисунок 6 - Зона контроля

принимается всеми элементами антенной решетки и сохраняются в памяти компьютера в виде А-сканов отдельно для каждой комбинации передающего и принимающего элемента в количестве N^2 А-сканов.

- Для каждого пьезопреобразователя рассчитывается путь прохождения эхо-сигнала от излучающего элемента до выбранной локальной области и обратно до принимающего элемента.

На основе вышеизложенных алгоритмов была разработана программа генерации А-сканов и восстановления изображения на их основе, согласно описанным выше алгоритмам.

Используя разработанное программное обеспечение было проведено моделирование влияния положения отражателей, формы зондирующего сигнала на разрешающую способность. На рисунке 7 представлен результат восстановления двух моделируемых отражателей при использовании мультипликативного и аддитивного методов.



а – аддитивный метод, б – мультипликативный метод

Рисунок 7 – Восстановление изображения двух отражателей

Анализ рисунка 7а позволяет утверждать, что разрешающая способность 16-ти элементной линейной эквидистантной акустической антенной решётки, работающей на частоте 2 МГц в водной среде, составляет примерно $4,5^\circ$. Для сравнения – разрешающая способность, рассчитанная по формуле (10), равна $4,77^\circ$. Это подтверждает достоверность полученных результатов. Для мультипликативного метода разрешающая способность составила $3,7^\circ$. Таким образом разрешающая способность возросла по сравнению с аддитивным способом обработки парциальной информации примерно на 20%.

В третьей главе описана разработанная установка “УУК-16”, также представлены результаты экспериментов. В состав установки входят: 16-ти канальная эквидистантная акустическая антенная решётка, блок контроля акустического тракта, блок мультипликативной обработки, блок аддитивной обработки, блок отображения.

На блок мультипликативной обработки данных получен патент РФ [28]. Разработанная структурная схема легла в основу создания оригинальной дефектометрической аппаратуры, новизна которой защищена патентами РФ.

Управление блоком электроники осуществляется персональным компьютером. Интерфейс оператора позволяет выбирать амплитуду зондирующего импульса, параметры временной регулировки чувствительности,

начальное значение коэффициента усиления, частоту преобразования АЦП, параметры зоны контроля.

Реконструкция изображения с использованием метода TFM основана на оригинальном программном обеспечении, которое ориентировано на мобильные компьютеры с производительной видеокартой, которые способны отображать результаты, в реальном масштабе времени. Это, с одной стороны, обеспечивает мобильность дефектометрической аппаратуры, а использование мощного графического адаптера позволяет производить наиболее сложные с вычислительной точки зрения операции на GPU. Это в свою очередь, позволяет добиться визуализации с частотой более 30 кадров в секунду - режим «реального» времени, для изображения размером более миллиона точек.

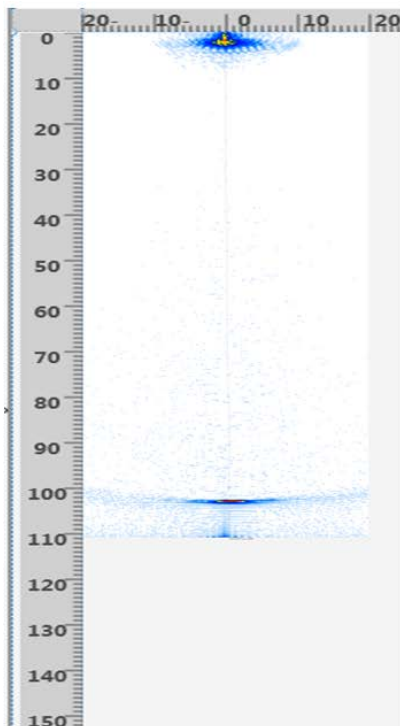
В качестве инструмента разработки оригинального программного обеспечения использовался гибридный подход: для разработки пользовательского интерфейса была выбрана Embarcadero RAD Studio, а для сложных расчётов в рамках данной работы была разработана низкоуровневая библиотека EOCL, которая представляет собой программную библиотеку на основе Open CL API с набором функций для быстрых расчетов с использованием GPU. Данная библиотека обеспечивает простое взаимодействие с языками высокого уровня, такими как Delphi или C++. Позволяет сделать код основной программы более кратким и лаконичным, беря на себя большинство рутинных задач, по созданию, управлению и высвобождению ресурсов, оптимальному запуску вычислительной задачи на видео карте.

Проведение экспериментальных исследований преследовало цель проверки результатов теоретических исследований и моделирования. В качестве дефектов использовались стальные стержни, диаметром 1,6 мм, которые располагались в водной среде. Поверхностью отражения служил плоский торец стержней, нормально ориентированный к оси симметрии антенной решётки. На рисунке 8 показан результат эксперимента по обнаружению дефекта в виде одного стержня, расположенного на расстоянии 100 мм на оси симметрии решётки. На рисунке 8а изображён фрагмент скриншота главного окна программного интерфейса дефектоскопа, на котором видна реконструкция изображения акустического тракта. Сверху и слева показаны линейки с ценой деления один миллиметр. На дальности, примерно, 100 мм расположен «отклик» от модели дефекта. На рисунке 9б в увеличенном масштабе показано поперечное сечение сигнала-отклика. Видно, что ширина по уровню 0,5 составляет примерно 3,35 мм. Вычисления по формуле (6) приводят к результату, равному 3,49 мм. Таким образом, подтверждается допустимая точность вычислений полученных аналитических выражений и, кроме того, устанавливается факт несоответствия размеров модели дефекта и его реконструированного акустического изображения.

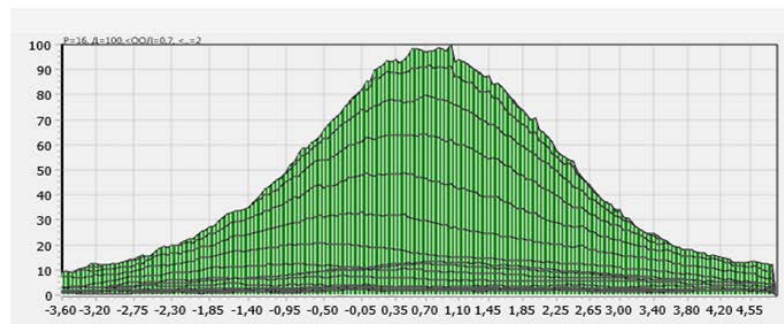
На рисунке 9в показано в увеличенном масштабе продольное сечение реконструированного изображения дефекта. Форма реконструированного

сигнала-отклика совпадает, в пределах погрешности квантования, с формой зондирующего сигнала.

В ходе проведения эксперимента было выполнено несколько циклов исследований для проведения анализа соответствия реконструкции при изменении положения модели дефекта в направлении изменения дальности от линейной антенной решётки, а также в направлении параллельном образующей антенной решётки. По результатам испытаний, можно сделать вывод об очень слабой зависимости погрешности определения декартовых координат модели дефекта от его положения в зоне контроля.



а



б



в

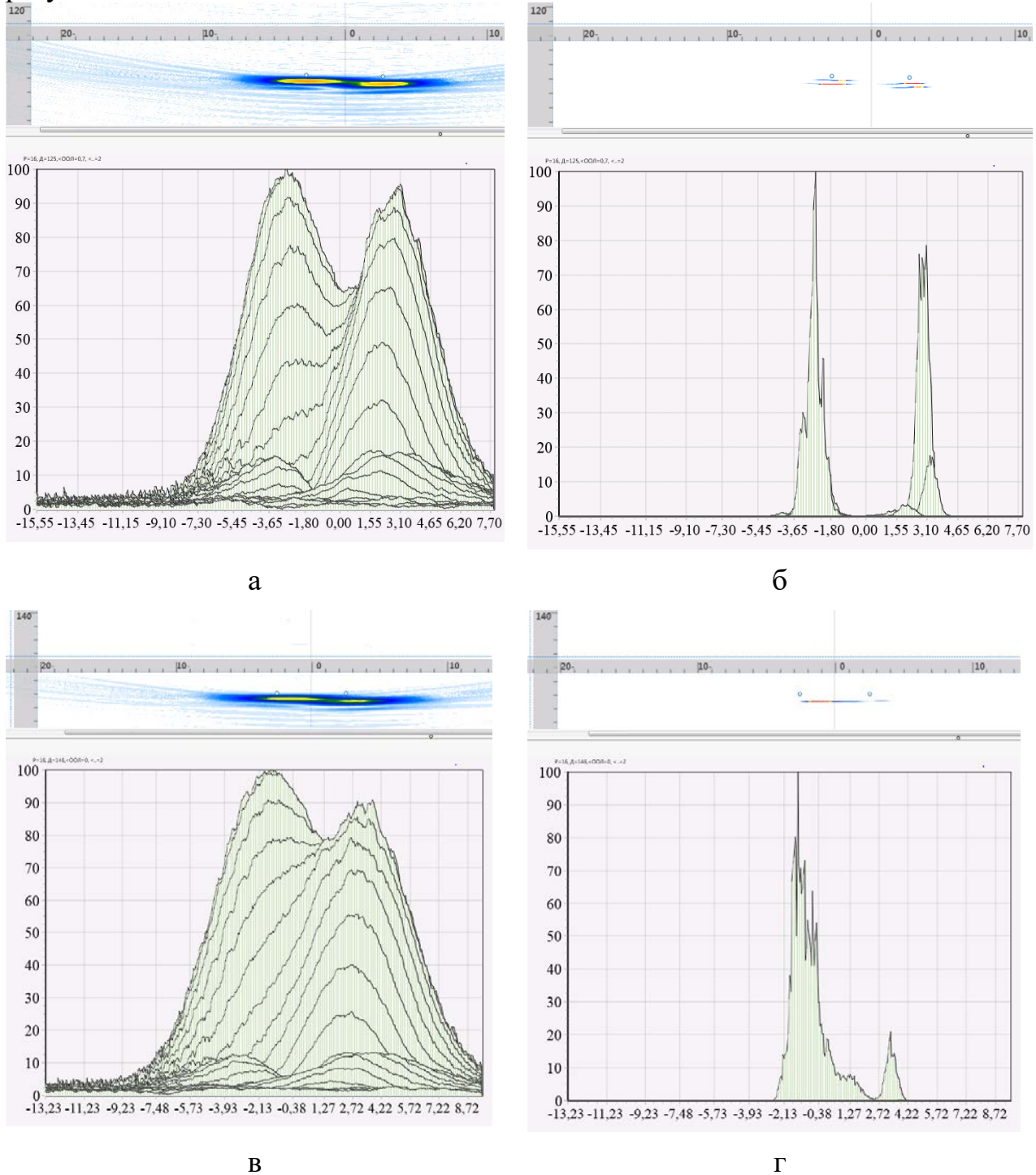
а – томограмма зоны контроля, б – поперечное сечение дефекта, в – эхо-сигнал,

Рисунок 8 – Скриншот главного окна программного интерфейса дефектоскопа

При этом наблюдается уменьшение горизонтального размера образа отражённого сигнала. Одновременно снижается контрастность изображения. И то и другое указывает на заметное уменьшение амплитуды реконструированного сигнала-отклика. Расчёты показывают, что крайнее правое положение модели дефекта находится под углом приблизительно $11,5^\circ$ относительно оси симметрии антенной решётки. Тогда, с учётом симметрии, рабочий сектор зоны контроля будет составлять не менее 23° . При этом наблюдается уверенное обнаружение дефектов, сравнимых по порядку величины с длиной волны излучения. Можно утверждать, что сделанный ранее вывод об ограничении рабочего сектора зоны контроля диапазоном углов от

минус 15° до $+15^\circ$ относительно оси симметрии антенной решётки, вполне правомерен.

Ещё один цикл экспериментальных исследований непосредственно касался оценки разрешающей способности аппаратуры, использующей метод TFM, на основании эмпирического критерия Релея. На рисунке 10 приведены результаты данных исследований.



а, б – дистанция 125 мм, в, г – дистанция 145 мм

Рисунок 9 – Фрагменты скриншотов для двух дефектов.

Расстояние между дефектами сохранялось всегда постоянным и равным 5 мм. Дальность до дефектов от антенной решётки на рисунке 9 а, б – 125 мм, а на рисунке 9 в, г – 145 мм. На рисунке 9 а, в отображена визуализация с использованием аддитивного метода, а на рисунке 9 б и рисунке 10 г – мультипликативного метода. Расчёт разрешающей способности, основанной на критерии Рэля, произведённый с помощью аналитического выражения (10) для гармонического режима работы дает значение, равное $2,55^\circ$. Анализ экспериментальных данных, показывает, что наибольшим соответствием критерию Рэля обладает результаты эксперимента, изображенные на рисунке 9а,б, и соответствующее угловому расстоянию, равному $2,4^\circ$. Незначительное расхождение экспериментальных и теоретических результатов является следствием импульсного режима экспериментальных исследований.

Аналогичный вывод о соотношении теоретических и экспериментальных исследованиях можно сделать в результате анализа нижнего ряда изображений рисунка 9. Очевидным является факт лучшей разрешающей способности при мультипликативной обработке исходных данных, примерно, на 20%. Необходимо, также, отметить подавление меньших по амплитуде сигналов-откликов на реконструированном изображении зоны контроля. Происходит выделение самого большого дефекта.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

В приложении приведены результаты внедрения проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполненной работы получила дальнейшее развитие теория ультразвуковой томографии, основанная на методе TFM с аддитивным и мультипликативным алгоритмами обработки исходных данных. На основе созданной модели проведен анализ влияния формы и длительности сигнала зондирования на реконструкцию изображения зоны контроля, предельной чувствительности, разрешающей способности, отношения сигнал/шум и точности определения координат дефектов. Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие результаты:

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

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

3) Выявлены закономерности формирования дефектометрических характеристик для мультипликативного метода синтеза акустического изображения с использованием алгоритма TFM.

- 4) Показаны границы применимости мультипликативного и аддитивного методов с точки зрения чувствительности дефектометрической аппаратуры.
- 5) Разработана компьютерная модель акустического тракта дефектоскопа с применением алгоритма ТФМ, которая позволила уточнить дефектометрические параметры в импульсном режиме работы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в центральных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

- 1) К.Г.Квасников. Система количественного учета жидких продуктов в герметичных резервуарах / Д.В.Буй, П.В. Сорокин, А.И. Солдатов, Д.А. Солдатов, Е.С.Хаскова, К.Г.Квасников // Контроль. Диагностика. 2014, №13, с 136-141.
- 2) К.Г.Квасников. Особенности ультразвуковой 3D-визуализации в современных средствах контроля / Болотина И.О., Квасников К.Г., Макаров В.С., Солдатов А.И.// Контроль. Диагностика. 2013. № 13. С. 154-157.
- 3) К.Г.Квасников. Метод анализа акустического тракта с помощью динамической визуализации волновых полей изображения / Квасников К.Г., Макаров В.С., Солдатов А.И., Сорокин П.В., Солдатов А.А., Селезнев А.И., Кренинг Х.-М., Сурненко Е.А. // Контроль. Диагностика. 2013. № 13, с. 41-44.
- 4) К.Г.Квасников. Применение метода геометрической акустики для решения задач визуализации / Квасников К.Г., Солдатов А.И., Болотина И.О., Кренинг М., Потапенко А.А. // Дефектоскопия. 2013. № 11, с. 21-26.
- 5) К.Г.Квасников. Диаграмма направленности антенной решетки при сканировании по методу SAFT / Квасников К.Г., Макаров В.С., Солдатов А.И., Сорокин П.В., Солдатов А.А., Кренинг Х.М.В.А., Рябушкин А.П. // Контроль. Диагностика. 2012. № 13, с. 62-66.
- 6) Bolotina, I., Kazazaeva, A., Kvasnikov, K., Kazazaev, A. Application of mathematical modelling methods for acoustic images reconstruction. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, V.124 (1), 012018.
- 7) Bolotina, I.O., Kvasnikov, K.G., Steinbrecher, A.A., Kroening, H.-M., Osokin, G.E. Simulation of the acoustic field of antenna arrays. Key Engineering Materials, V/ 685, 2016, pp. 70-74
- 8) Bolotina, I.O., Kroening, H.-M., Kvasnikov, K.G., Sednev, D.A., Sumtsova, O.V. Acoustic field simulation of an antenna array at scanning by the SPA method for modern ultrasonic testing technologies. Advanced Materials Research. V. 1040, 2014, pp 959-964

Патенты

- 1) Способ визуализации ультразвуковой дефектоскопии трехмерного изделия: патент РФ № 2532597 / Квасников К.Г. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. - опубл. 10.11.2014.

2) Устройство визуализации ультразвуковой дефектоскопии трехмерного изделия: патент РФ № 2532606 / Квасников К.Г. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. - опубл. 10.11.2014.

3) Реконструкция томограммы зоны контроля методом аддитивной и мультипликативной цифровой фокусировки: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017612380 / Квасников К.Г. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. - опубл. 20.02.2017.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ

Типография ТПУ г. Томск

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30