

На правах рукописи

Чан

Чан Цзянлэй

**МАЛОРАКУРСНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность:

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Солдатов Алексей Иванович

**Официальные
оппоненты:**

Суханов Дмитрий Яковлевич,
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Заведующий лабораторией Электромагнитных методов контроля (г.Томск).

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

Защита диссертации состоится «12» октября 2021 года на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «01» сентября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Шевелева Е.А.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

С развитием современной промышленности, металлические материалы и сплавы, используемые ранее, становятся менее пригодными для удовлетворения потребностей практических приложений, особенно в области авиа-, автомобиле- и кораблестроения. Им на смену пришли композитные материалы. В настоящее время композитные материалы широко используются при производстве аэрокосмической техники, судов, автомобилей, медицинского оборудования и других областях, тесно связанных с национальным экономическим строительством, научными разработками и национальной обороной.

Микроструктура композитного материала представляет собой сложную многофазную систему с пространственной анизотропией ее свойств. На стадии производства и использования композитного материала очень высока вероятность возникновения дефектов или повреждений, таких как разрыв волокна и расслоение внутри материала, которые значительно сокращают несущую способность компонентов и вызывает скрытую опасность крупных инженерных аварий, поэтому регулярное тестирование готового продукта и используемого оборудования является наиболее важной частью производственного процесса.

Дефект типа «расслоение» - наиболее распространенный вид дефекта в композитных материалах, он является внутренним дефектом и не может быть обнаружен невооруженным глазом, поэтому используются различные методы контроля, среди которых можно выделить ультразвуковой контроль. Ультразвуковой контроль обладает хорошими положительными свойствами: большая глубина обнаружения, точное определение дефекта, высокая чувствительность обнаружения, низкая стоимость, удобство использования и безвредность для человека.

Теневой метод обладает более высоким отношением сигнал/шум и подходит для обнаружения многослойных структур. При сканировании поверхности тестируемого объекта акустическими преобразователями расположенными по разные стороны получают теневую картину внутренней структуры зоны контроля. Это позволяет обнаруживать внутренние дефекты и размеры их проекции на плоскость приемного преобразователя. Основным недостаток такого тестирования является невозможность определения координат расположения дефектов. Решение этой задачи возможно при наличии набора проекций под разными углами, что широко используется в рентгеновской томографии. Многочисленные попытки разработать и испытать оборудование на основе линейных антенных решеток были сделаны в конце прошлого века, в которых теневой метод был применен для контроля резинотехнических изделий. В последние несколько лет были опубликованы работы по малоракурсной ультразвуковой томографии для решения широкого круга задач. Однако проблемы улучшения дефектометрических характеристик (точности, чувствительности, шума и разрешающей способности) являются актуальными и в настоящее время. Метод мультипликативной обработки и фильтрации сигналов

может улучшить дефектометрические характеристики акустической томографии. Поэтому основная цель данного исследования заключается в повышение качества томограммы на основе малоракурсного зондирования с мультипликативной обработкой сигналов линейной акустической решетки и Гауссовой фильтрации исходной томограммы.

Объектом исследования в данной работе является малоракурсная акустическая томография с использованием линейных решеток.

Цель диссертационной работы: исследование малоракурсной акустической томографии с мультипликативным способом обработки сигналов линейной акустической решетки и Гауссовой фильтрацией томограммы для улучшения характеристик системы акустического контроля теньвым методом.

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

1. Разработать методику акустической малоракурсной томографии с мультипликативной обработкой сигналов линейной акустической решетки.
2. Разработать методику Гауссовой фильтрацией томограммы.
3. Провести теоретические исследования влияния различных параметров Гауссовой фильтрации на результаты томографии.
4. Провести теоретические исследования мультипликативной обработкой сигналов линейной акустической решетки на результаты томографии.
5. Разработать алгоритм реконструкции акустического изображения на основе мультипликативной обработки сигналов линейной акустической решетки.
6. Разработать макетный образец прибора и провести его испытания.

Методы исследований. Для решения основных задач диссертации использовано компьютерное моделирование на основе метода обратных проекций, конечно-элементный анализ и теории дифракции Кирхгофа. Экспериментальные же исследования выполнены с использованием метода физического эксперимента и последующей обработкой данных статистическими методами.

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

1. Разработана компьютерная модель реконструкции зоны контроля, которая позволяет проводить исследования дефектометрических характеристик системы контроля при изменении параметров линейной решетки в широком диапазоне с аддитивной и мультипликативной обработкой сигналов и Гуссовой фильтрацией исходной томограммы.
2. Предложена методика Гауссовой фильтрации томограммы, позволяющая уменьшить среднюю абсолютную ошибку восстановления томограммы.
3. Предложен мультипликативный способ реконструкции томограммы зоны контроля при теньвом методе на основе принципа перемножения сигналов акустической решетки, позволяющий увеличить разрешающую способность, точность определения координат дефекта и чувствительность контроля.
4. Создан многоканальный акустический дефектоскоп на основе малоракурсного

зондирования для контроля композитов, обладающий лучшими техническими характеристиками по сравнению с аналогами.

Теоретическая значимость работы состоит в дальнейшем развитии метода теневой малоракурсной ультразвуковой томографии на основе мультипликативной обработки сигналов акустической решетки и Гауссовой фильтрации исходной томограммы для контроля композитных материалов, исследовании и анализе погрешностей определения координат дефектов, оценке влияние различных параметров линейной акустической решетки на результат контроля.

Практическая значимость.

1. Алгоритм мультипликативной обработки сигналов акустической решетки позволяет получать томограмму высокого качества и может быть применен при разработке дефектоскопов нового поколения.
2. Модель акустической малоракурсной томографии с аддитивной и мультипликативной обработкой сигналов акустической решетки позволяют исследовать акустический тракт трансмиссионного томографа.
3. Создан акустический теневой малоракурсной томограф, нашедший практическое применение в компании HENGJI PROPERTY Co Ltd и в учебном процессе Томского политехнического университета.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель акустического тракта, позволяет исследовать зону контроля на основе аддитивной и мультипликативной обработки сигналов акустической решетки, проводить Гауссову фильтрацию исходной томограммы при изменении параметров акустического тракта в широких пределах.
2. Предложенный способ мультипликативной обработки на основе принципа перемножения сигналов акустической решетки позволяет получить разрешающую способность по дальности 50 мм в центре зоны контроля и 90 мм на ее краях, угловая разрешающая способность 11,5 мм в центре и 15 мм на ее краях. Погрешность определения координат дефектов не более 9% для линейной решетки из 16 элементов и расстоянии между решетками 400 мм
3. Гауссова фильтрация исходной томограммы с оптимальными параметрами окна позволяет получить разрешающую способность по дальности 13.5 мм в центре зоны контроля, и уменьшить среднюю абсолютную ошибку восстановления томограммы с 0.53 до 0.045 для антенной решётки из 16 элементов.

Личный вклад автора: участие в постановке задач. Автором лично предложен мультипликативный способ обработки сигналов акустической решетки для теневых метода контроля и Гауссова фильтрация томограммы при малоракурсной томографии, разработана компьютерная модель и проведено исследование точности, разрешающей способности, чувствительности и средней абсолютной ошибки восстановления томограммы. Изготовлен и внедрен макет ультразвукового дефектоскопа.

Апробация работы.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на международных и

российских конференциях:

- на ИАМП-2018 тринадцатая всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» г. Бийск, 2018
- на "Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий" г. Томск, 2018
- на XXX МЕЖДУНАРОДНАЯ ИННОВАЦИОННАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ (МИКМУС - 2018), г. Москва, 2018
- на 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 г. Томск, 2019
- на «XVI Международной школы-конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Инноватика-2020»» г. Томск, 2020
- на XXI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, г. Томск, 2020
- IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, Altai, Russia, 2021

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 10 работах, из них 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК РФ, 2 статьи в журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science и 7 публикаций в сборниках российских и международных конференций.

Достоверность

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается непротиворечивостью полученных в исследовательской части работы результатов с данными других авторов, совпадением экспериментальных и расчетных значений.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 131 страницу, 66 рисунков и 5 таблиц. Обзор литературных источников содержит 106 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, раскрыто современное состояние исследований в области ультразвукового контроля, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена характеристика современных полимерных композитных материалов (ПКМ), которые особенно привлекательны для применения в авиации и космонавтике из-за их исключительного отношения прочности и жесткости к плотности, а также превосходных физических свойств. На стадии производства и использования ПКМ очень высока вероятность возникновения дефектов или повреждений, например расслоение, включение, трещина, раковина и т.д. Эти дефекты и повреждения часто не имеют видимых следов на поверхности материала, но значительно сокращают несущую способность компонентов и вызывает скрытую опасность крупных инженерных аварий.

Существуют различные методы для неразрушающего контроля ПКМ: метод акустической эмиссии, рентгеновский контроль, вихретоковый контроль, инфракрасная термография, тепловой контроль и т.д. Ультразвуковой контроль является наиболее распространенный методом. На рынке присутствуют ультразвуковые дефектоскопы для контроля композиционных материалов. Основная задача данной работы является разработка способа улучшения дефектометрических характеристик дефектоскопа с использованием линейных решёток.

Во второй главе проведено теоретическое исследование малоракурсной ультразвуковой томографии при теневом методе контроля с использованием линейных решеток. Томография считается малоракурсной, если получен набор данных при угловых ракурсах меньше чем 90 градусов. Приведена модель для исследования малоракурсной томографии, исследован мультипликативный способ реконструкции томограммы и Гауссова фильтрация исходной томограммы. На рис. 2 показан акустический тракт малоракурсной томографии.

Объект контроля расположен между двумя ультразвуковыми решетками приемной и излучающей. Методика контроля заключается в поочередном излучении каждым преобразователем излучающей антенной решетки и приеме сигналов всеми преобразователями приемной решетки. Матрица данных будет состоять из m^2 измерений, где m - количество преобразователей в каждой линейной решетке.

Выявляемость дефектов определяется коэффициентом k_d , который определяется соотношением:

$$k_d = \frac{A_d}{A_0} \quad (1)$$

где A_d – амплитуда приемного сигнала, A_0 – амплитуда приемного сигнала, при отсутствии дефекта.

Следует коэффициент определяется по формуле:

$$k_d = 1 - D_d/D \quad (2)$$

где D_d – площадь акустической тени от дефекта на приемник; D – площадь приёмника.

Для двумерной модели вместо площади используется длина. Из рисунка видно, что первый элемент приемной решетки не находится в акустической тени дефекта при зондировании первым элементом излучающей решетки. Второй приемный элемент частично находится в акустической тени, размер которой равен (D_d). Третий элемент приемной решетки полностью находится в акустической тени. Четвертый элемент приемной решетки частично находится в акустической тени. Подобным образом получается теневая картина дефекта на плоскость приемной решетки для каждого элемента излучающей решетки. Амплитуда пиксела с координатами (x, y) при аддитивной обработке определяется из выражения:

$$A(x, y) = \frac{\sum K_d[t, r]}{N(x, y)} \quad (3)$$

где (x, y) – координаты пикселя в зоне контроля, K_d – амплитуда сигнала на приемнике "r" при зондировании излучателем "t", $N(x, y)$ – количество лучей, проходящих через пиксел с координатами (x, y) .

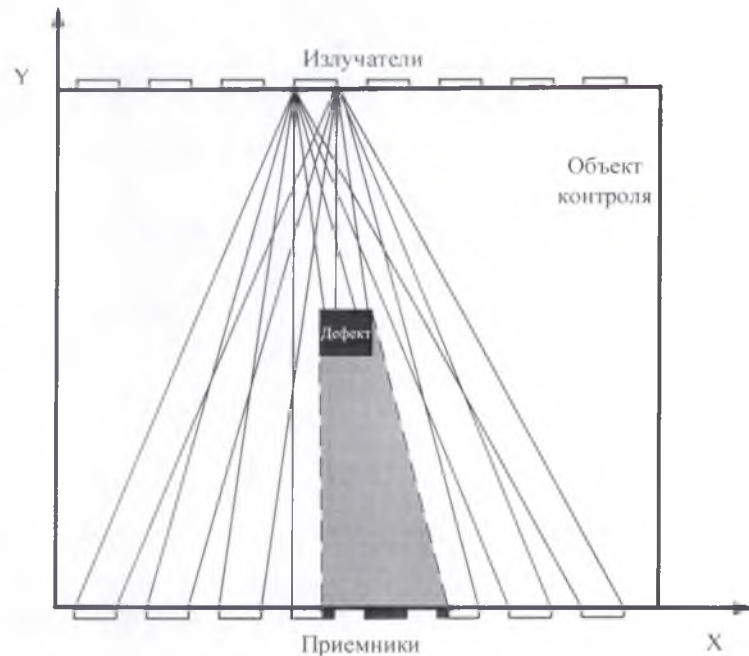


Рис. 2 Акустический тракт зоны контроля теневого метода

С учётом выражения (3) можно записать алгоритм реконструкции томограммы (рис.3).

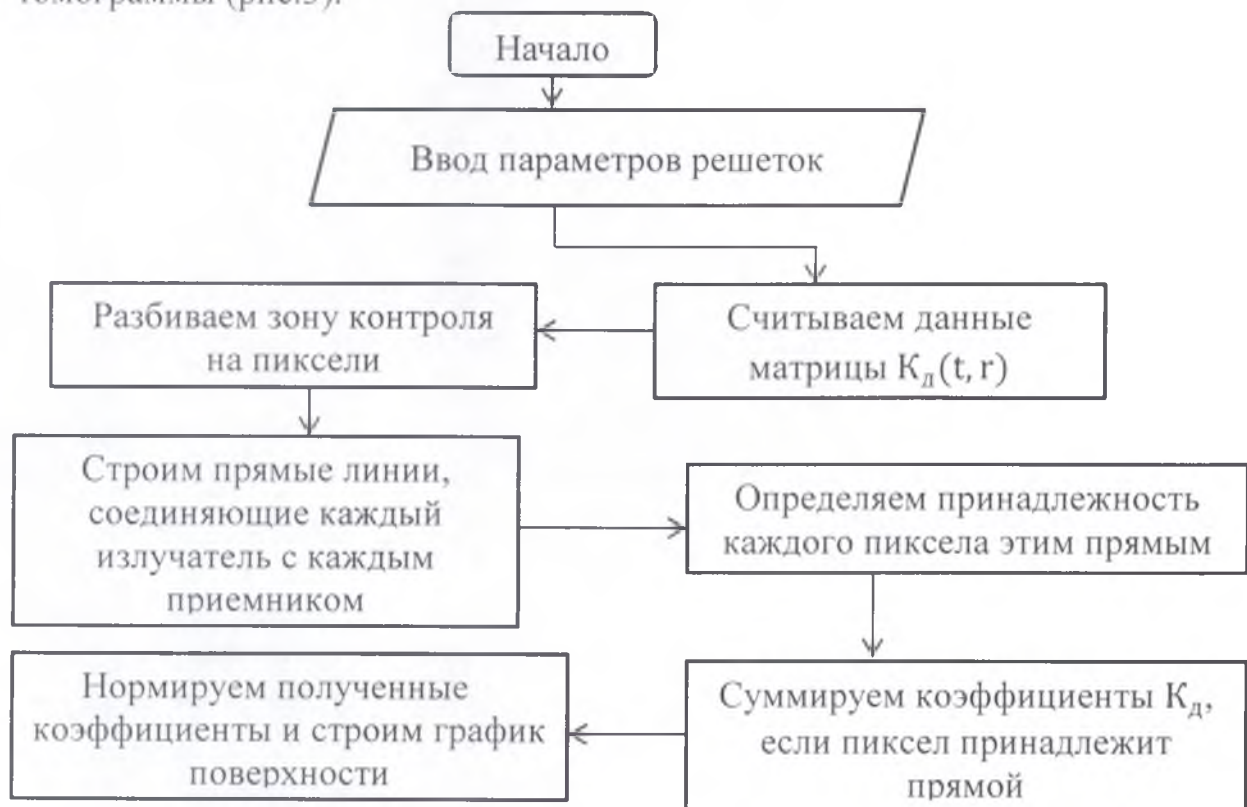


Рис. 3. Алгоритм реконструкции зоны контроля аддитивным способом

По описанному алгоритму была разработана модель на основе пакета прикладных программ MathCad. Программа позволяет получить томограмму зоны

контроля при аддитивной и мультипликативной обработке исходных сигналов приемной антенной решетки. Мультипликативная обработка сигналов для решения технических задач имеет свое преимущество. Амплитуда пиксела в точке (x, y) при этом методе определяется из выражения:

$$A(x, y) = N(x, y)^k \prod K_d[t, r] \quad (5)$$

где (x, y) координаты пиксела в зоне контроля, K_d – амплитуда сигнала на приемнике "r" при зондировании излучателем "t".

С учётом выражения (5) можно записать алгоритм реконструкции томограммы (Рис. 4.).



Рис. 4. Алгоритм реконструкции зоны контроля при мультипликативной обработке

Результаты моделирования представлены в виде двумерного изображения, а амплитуда сигнала закодирована цветом (рис.5.а). При исследовании использовали 3 типа решеток с количеством элементов 8, 16 и 32. При этом размеры решетки не изменялись, изменялось расстояние между элементами. Анализ результатов исследования показал, что качество томограммы тем лучше, чем больше количество элементов в решетке. Однако при количестве элементов в решетке 16 и более качество томограммы меняется незначительно, и очевидно что чем больше количество элементов в решетке, тем больше требуются вычислительные ресурсы. При неизменном расстоянии между элементами изменялся размер решеток: 80, 150 и 300мм. Чем больше размер решетки, тем

больше угловой ракурс, тем лучше томография. Но при длине решетки 300 мм, угол падения увеличивается и необходимо учитывать погрешность, вызванную рефракцией.

Для улучшения качества изображения реконструированной зоны контроля была применена гауссова фильтрация. Конкретная операция гауссовой фильтрации: использовать шаблон (маску) для сканирования каждого пикселя в изображении и использовать средневзвешенное значение амплитуд пикселей в окрестности, определенных шаблоном, для замены амплитуды центрального пикселя шаблона:

$$G(x, y) = e^{-[(u-x)^2 + (v-y)^2] / (2\sigma^2)} \quad (4)$$

где u и v – координаты пикселя с максимальной амплитудой, а σ – стандартное отклонение распределения Гаусса, x и y – координаты произвольного пикселя на томограмме.

На рис.5 показан результат моделирования. При моделировании использовалась модель дефекта имеющая форму диска радиусом 3 мм. Координаты и размер дефекта на томограмме определены автоматически с помощью программы, которая написана в пакете MathCad.

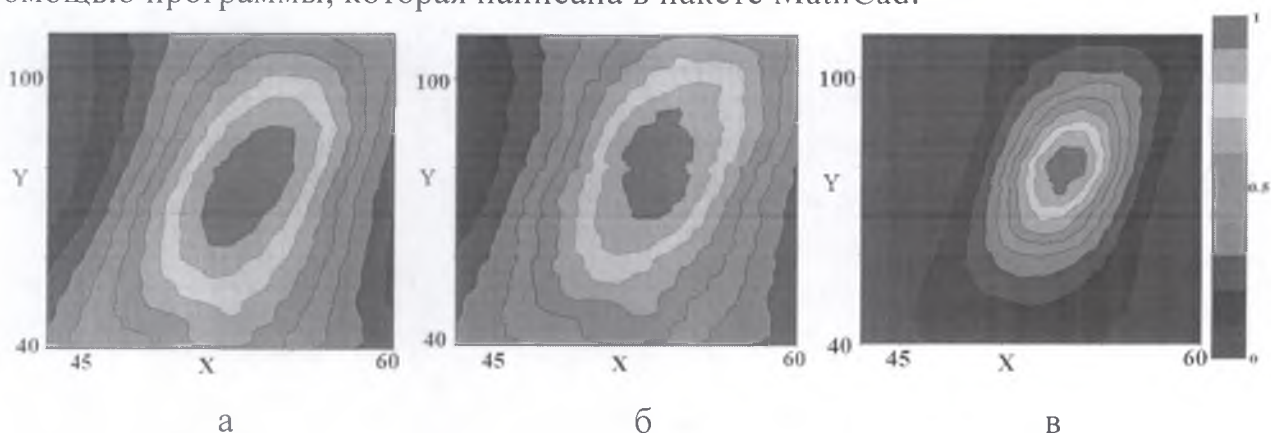


Рис. 5. Результат расчета положения дефекта радиусом 3 мм при расстоянии между элементами равно 10 : а – аддитивная обработка; б – мультипликативная обработка; в – разработка Гауссовой фильтрации;

Каждый пиксел томограммы, размером M строк и N столбцов представляется K битами. Для оценки качества изображения используем среднюю абсолютную ошибку (MAE), которая служит критерием сравнения степени близости томограммы к исходному изображению:

$$MAE = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |I_{(m,n)} - I'_{(m,n)}|}{MN} \quad (5)$$

где $I_{(m,n)}$ – реальный сигнал, $I'_{(m,n)}$ – сигнал реконструкции изображения, полученный после моделирования, q – количество точек изображения.

Результат расчета средней абсолютной ошибки по выражению 5 для зоны контроля с одним дефектом представлен на рис.6.

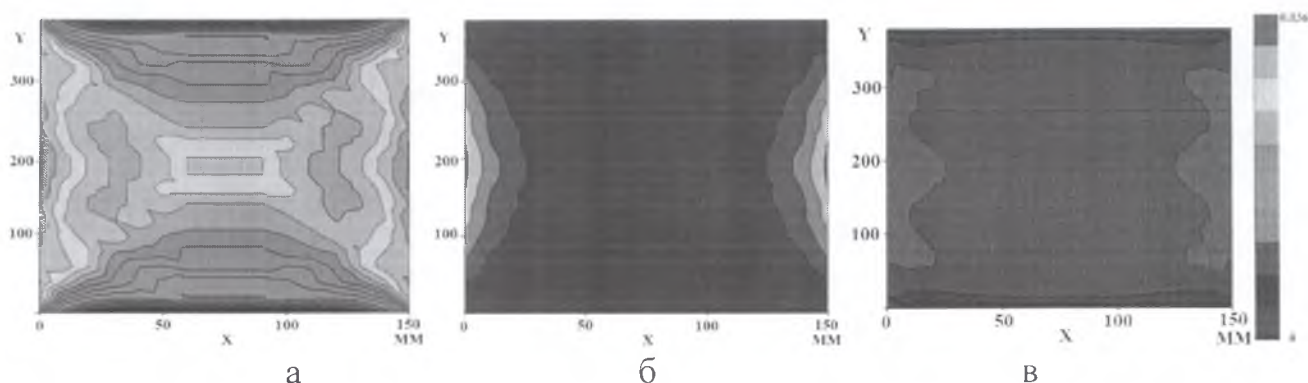


Рис. 6. Результат расчета средней абсолютной ошибки дефекта радиусом 3 мм в зоне контроля а) при аддитивной обработке б) при мультипликативной обработке в) при обработке гауссовой фильтрации

Из рис.6 видно, что для мультипликативной и аддитивной обработок ошибка очень большая, когда дефект расположен на краю зоны контроля. Это связано с тем, что на краю меньше ультразвуковых лучей, участвующих в реконструкции томограммы. Ошибка при обработке гауссовой фильтрацией намного меньше.

Акустический тракт для исследования разрешающей способности показан на рис.7. В предельном случае когда невозможна раздельная регистрация дефектов, минимальное расстояние между дефектами l_p можно определить из формулы:

$$l_p \approx (D_{\text{ц}} + D) / \cos \theta \quad (6)$$

Для нашей модели $\theta \geq \arctg(\frac{h}{l - 2D_{\text{ц}}})$, при $D=3$ мм, $D_{\text{ц}} = 10$ мм, $h = 400$ мм, $l = 150$ мм, $(43 \geq l_p \geq 13)$ мм.

Если дефект расположен близко к боковой границе зоны контроля, угол θ увеличивается, что приводит к возрастанию l_p и соответственно к ухудшению разрешающей способности. Результат исследования на модели разрешающей способности по дальности в разных областях зоны контроля, представлен на рис.8, из которого видно что, во-первых, разница в разрешающей способности по дальности между аддитивной и мультипликативной обработкой небольшая, при мультипликативной обработке разрешающая способность по дальности в центре лучше, чем при аддитивной обработке. На краях зоны контроля ситуация противоположная.



Рис. 7. Акустический тракт для исследования разрешающей способности, θ - угол между линией соединяющей два дефекта и нормалью к линии, соединяющей излучатель с приемником, D - размер дефекта

Во-вторых, при сравнении теоретических расчетов с результатами моделирования можно сделать вывод, что они хорошо согласуются. Разрешающая способность по дальности в центре зоны контроля по результатам расчета составила 43 мм, а по результатам моделирования 50 мм, отклонение составило 14%. Это показывает, что полученное аналитическое уравнение согласуется с моделью и может быть использовано в теоретических исследованиях разрешающей способности по дальности.

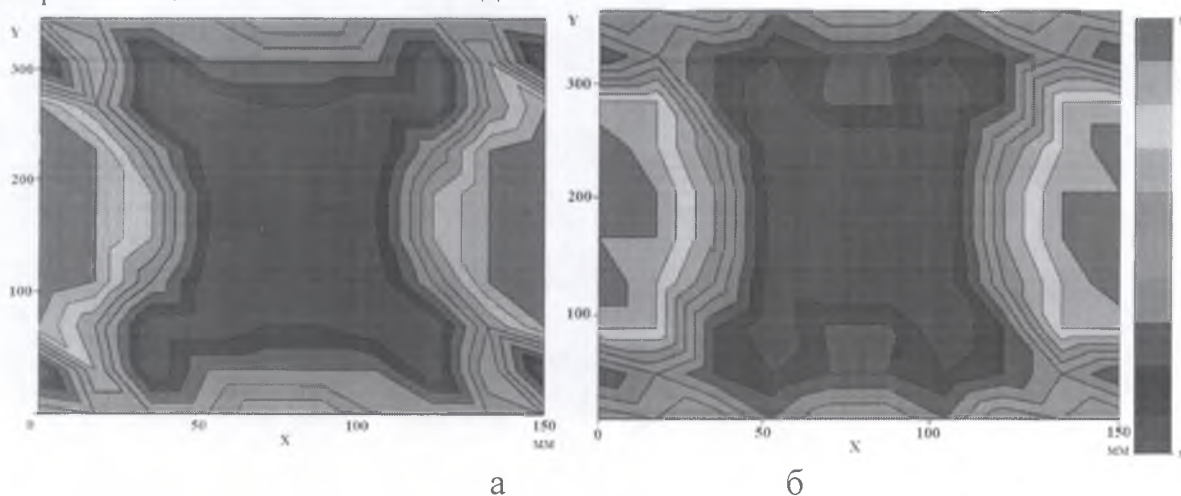


Рис. 8. Результат расчета разрешающей способности по дальности в зоне контроля а) при аддитивной обработке, б) при мультипликативной обработке

Результат исследования угловой разрешающей способности на модели в разных областях зоны контроля, представлен на рис.9. Из рис. 9 видно что, во-первых, разница в угловой разрешающей способности между аддитивной и мультипликативной обработкой небольшая, при мультипликативной обработке разрешающая способность немного хуже во всех областях зоны контроля, чем при аддитивной обработке.

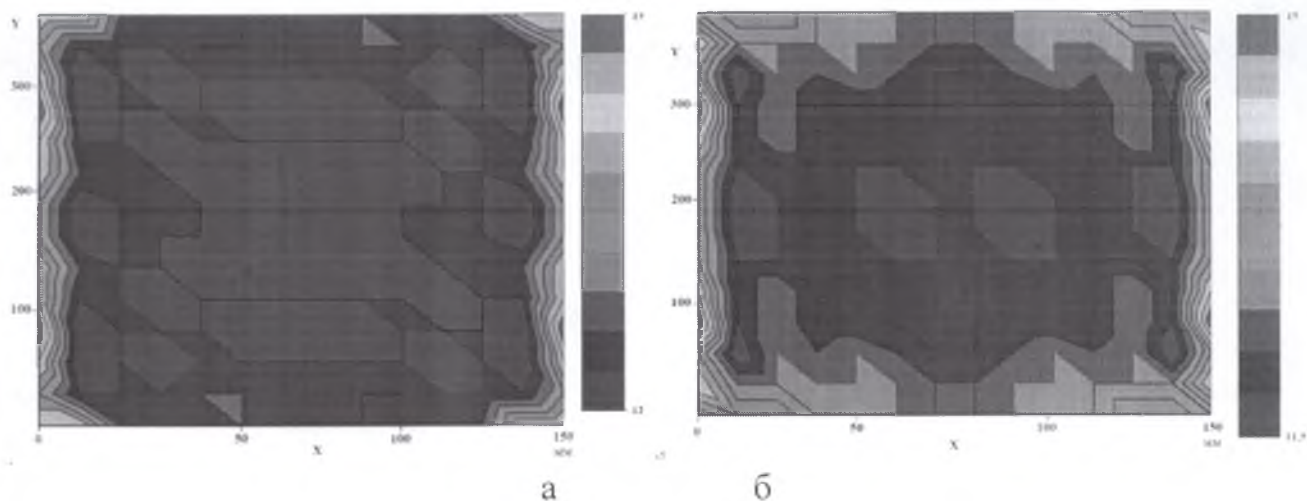


Рис.9. Результат расчета угловой разрешающей способности в зоне контроля а) при аддитивной обработке, б) при мультипликативной обработке

Во-вторых, при сравнении теоретических расчетов с результатами моделирования можно сделать вывод, что они согласуются. Разрешающая способность по углу в центре зоны контроля по результатам расчета составила 13 мм, а по результатам моделирования 12 мм, отклонение составило 8,3 %.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований. Цилиндр диаметра 3 мм, 6 мм, 9 мм были выбраны как дефекты. В эксперименте дефект располагался в центре зоны контроля в иммерсионной ванне, и расстояние между излучающей и приемной решетками - 400 мм. Результаты исследования приведены на рис.10, на котором показана томограмма зоны контроля с одним дефектом диаметром 9 мм.

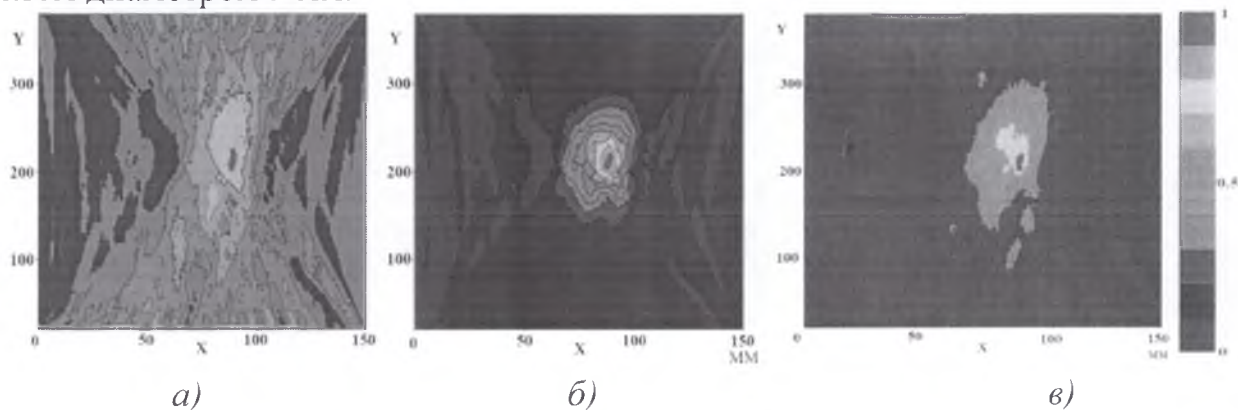


Рис. 10.Результат томограмма зоны контроля соотражателем размером 6 мм, а – при аддитивной обработке; б – после Гауссовой фильтрации; в – при мультипликативной обработке

На рис 10.а представлена томограмма, построенная при аддитивной обработке, на рис.10.б – на основе Гауссовой фильтрации, при этом для обработки экспериментальных данных использовали $\sigma = 20$. На рис 10.в показана томограмма, построенная на основе мультипликативной обработки. На всех томограммах дефект хорошо выявляется.

На рис. 11 показан результат относительной погрешности.

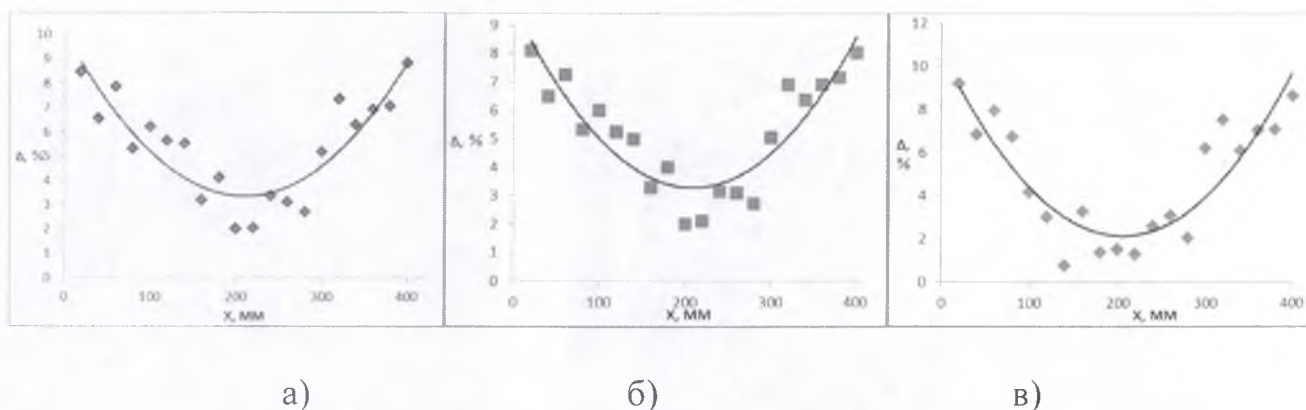


Рисунок 11. Зависимость погрешности определения продольной координаты дефекта диаметром 6 мм, а – при аддитивной обработке; б – обработке Гауссовой фильтрации; в – при мультипликативной обработке.

Из выше рисунок видно, что в центре зоны контроля погрешность самая маленькая и увеличивается при дефекте близко к край, но не превышает 10 %.

При экспериментальном исследовании фронтальной погрешности расстоянии между излучающей и приемной решетками равно 400 мм, дефект перемещался вдоль решётки с шагом 5 мм. На рис. 12 показана результат. Из рис. 12 видно, что максимальная погрешность не превышает 5%.

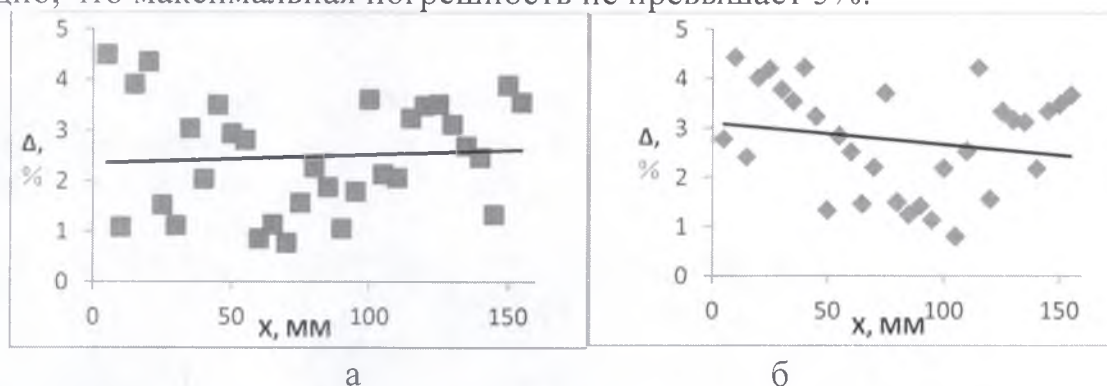


Рисунок 12. Результат погрешности определения фронтальной координаты дефекта диаметром 6 мм; а – аддитивная обработка; б – мультипликативной обработки.

Экспериментальное исследование разрешающей способности проводилось путем размещения двух одинаковых дефектов в разных местах зоны контроля, при этом использовались два цилиндра диаметром 6 мм на расстоянии 13 мм друг от друга, расположенные в зоне контроля при расстоянии между решетками 400 мм. Мультипликативная обработка исходных данных позволила уменьшить уровень шумов в зоне контроля (рис 13.б), которые наблюдаются на исходных данных (рис 13.а). Поэтому координаты дефекта могут быть определены более точно. Разрешающая способность при аддитивной обработке составила 15.5 мм, а при мультипликативной обработке - 13 мм по критерию Релея при расстоянии между решётками равно 400 мм (рис.13.в).

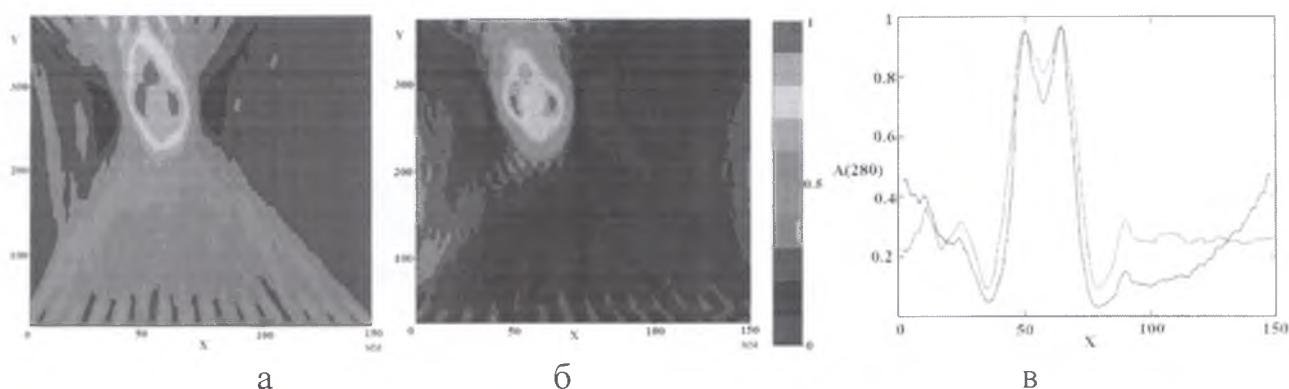


Рис. 13. Томограмма зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм и расстояние между дефектами 15 мм расположенными в верхней части зоны контроля, а-аддитивная обработка; б - мультипликативная обработка; в – поперечный срез при $Y=280$ в области расположения дефектов, синяя линия - мультипликативная обработка, красная линия - аддитивная обработка.

Гауссова фильтрация исходной томограммы позволила уменьшить уровень шумов в зоне контроля, которые наблюдаются на исходных данных (рис 14).

Сравнительный анализ показал, что разрешающая способность при аддитивной обработке составила 15.5 мм, после Гауссовой фильтрации – 13,5 мм. Средняя ошибка реконструкции томограммы составила $MAE=0.53$ при аддитивной обработке и $MAE=0.045$ после гауссовой фильтрации.

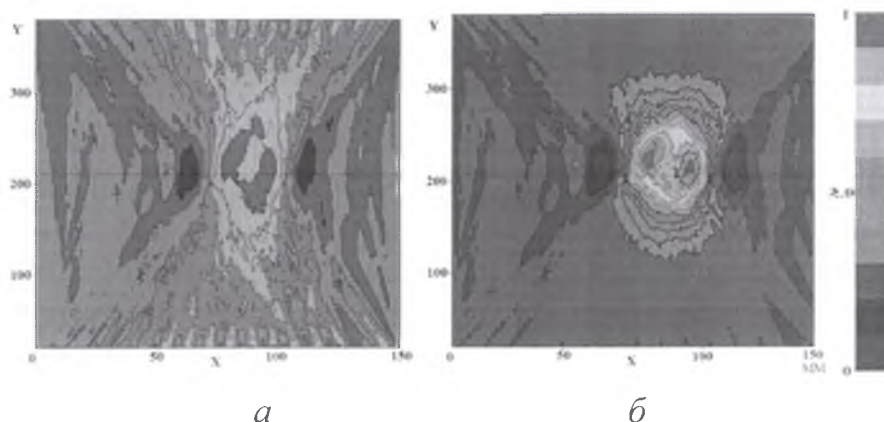


Рис. 14. Томограмма зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расстояние между дефектами 13.5 мм расположенными в зоне контроля, а – аддитивная обработка; б – после гауссовой фильтрации, в – поперечный срез в области расположения дефектов, синяя линия – после гауссовой фильтрации, красная линия – аддитивная обработка.

Таким образом, определены пределы изменения радиуса окна гауссовой фильтрации и при выборе оптимального размера окна, предложенный алгоритм гауссовой фильтрации позволяет увеличить разрешающую способность примерно на 10% и повысить точность определения координат дефекта. Кроме того, гауссова фильтрация позволяет уменьшить уровень шумов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполненной работы получила дальнейшее развитие теория малоракурсной акустической томографии на основе аддитивной обработки с гауссовой фильтрацией и мультипликативной обработкой сигналов акустической решетки. На основе созданной модели проведен анализ разрешающей способности и точности определения координат дефектов в объекте контроля. Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие результаты:

Получил дальнейшее развитие теневой метод контроля, основанный на применении фильтрации и мультипликативной обработки, позволяющий повысить точность и разрешающую способность при детектировании дефектов.

Получено аналитическое выражение, описывающее зависимость разрешающей способности малоракурсного теневого дефектоскопа на основе эквидистантных линейных решеток от его геометрических и акустических характеристик.

Предложена компьютерная модель акустической малоракурсной томографии, которая позволяет определить параметры акустического тракта в зоне контроля при проектировании многоканальных малоракурсных трансмиссионных дефектоскопов без проведения затратных экспериментальных исследований

Разработан макетный образец акустического малоракурсного трансмиссионного дефектоскопа.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях индексируемые в базах SCOPUS, Web of Science

1. J. Chang. The Resolution Capability of the Through-Transmission Method of Testing of Composites Using Linear Array / J. Chang, A. I. Soldatov, A. A. Abouellail, A. A. Soldatov and I. I. Obach // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2019, pp. 1-3,
2. Jianglei Chang. Gaussian Filtered Small-Angle Ultrasonic Computed Tomography Using Linear Arrays / Jianglei Chang, Aleksey Soldatov, Pavel Sorokin, Mariya Kostina, Andrey Soldatov, Shupeng Xu, and Anatoly Chiriev// Progress in Material Science and Engineering, 2021, pp. 29-38,
3. Jianglei Chang. Application of Elliptical Properties in Building a Tomographic Image of an Inspected Object Using Multi-Element Ultrasonic Sensor Data / Yuliya Shulgina, Evgeny Shulgin, Ahmed Abouellail, Mariya Kostina, Oksana Terentyeva, and Jianglei Chang// Progress in Material Science and Engineering, 2021, pp. 17-27,
4. Jianglei Chang. Bilateral Filter for Small-angle Ultrasonic Tomography Using Linear Arrays/ Jianglei Chang, A.I.Soldatov, M.A.Kostina, A.A.Soldatov, Lin Li, A.A.Abouellail// IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, Altai, Russia, 2021(accept)

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Чан Цзянлэй. Ультразвуковая компьютерная томография линейными решетками при теневом контроле / Солдатов А. и., Чан Цзянлэй, Костина М. А. и др. // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 3. С. 40 – 49.

Публикации в других изданиях

1. Чан Цзянлэй. Разрешающая способность теневого метода контроля композитов при использовании линейных решеток / Чан Цзянлэй, А.И.Солдатов. // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2018) Год издания: 2018, с 87-89.
2. Chang, J. Small-angle ultrasonic tomography with mills cross array for NDT: a simulation study / Chang, J., A. I. Soldatov. // Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий сборник тезисов IV Всероссийского научного семинара с международным участием, 2018, с. 15-16
3. Чан Цзянлэй. Моделирование разрешающей способности линейных решеток при теневом методе контроля / Чан Цзянлэй, А.И.Солдатов. // Южно-сибирский научный вестник, 2018, с 79-82.
4. Чан Цзянлэй, А.И.Солдатов. Моделирование малоракусной ультразвуковой теневой томографии с матричной решеткой / Чан Цзянлэй, А.И.Солдатов. // XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов, 2019, с 220-222.
5. Ч. Цзянлэй. Инновационный подход при исследовании ультразвукового теневого метода контроля / Ч. Цзянлэй, А.И.Солдатов // XVI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 2020, с 116-118.