

4. Lin W, Wang H., Zhang Y., Qi D., Wang J.Z., Chang V. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments. *Information Sciences*, 2018, vol. 468, pp. 47–62.
5. Jones, S (2015). Cloud computing procurement and implementation: Lessons learnt from a United Kingdom case study. *International journal of information management*, 35 (6), 712-716.
6. Разумников С.В. Некомпенсаторное агрегирование и рейтингование провайдеров облачных услуг // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Т. 21. № 4. С. 63-69.
7. Разумников С.В. Оценка эффективности и рисков применения облачных ИТ-сервисов // Научные труды Вольного экономического общества России. - 2014 - Т. 184. № 4. - С. 294-304.
8. Разумников С.В. Планирование развития облачной стратегии на основе применения многокритериальной оптимизации и метода STEM // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2020. Т. 23. № 1. С. 53-61.
9. Разумников С.В. Разработка программного обеспечения агрегированных рейтингов на основе метода порогового агрегирования // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 2. С. 138-152.
10. Разумников С.В. Модели, алгоритмы и программное обеспечение поддержки принятия стратегических решений к переходу на облачные технологии: монография / С.В. Разумников; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 176 с.

РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В РОБОТИЗИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Д.О. Долматов, к.т.н., инженер,

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: dolmatovdo@tpu.ru

Аннотация. Работа посвящена проблеме получения результатов высокой информативности в роботизированном ультразвуковом контроле. В контексте указанной проблемы рассматривается применение цифровой когерентной обработки сигналов антенных решеток на основе метода синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique). В данной работе предложен алгоритм цифровой когерентной обработки сигналов антенных решеток для роботизированного ультразвукового контроля. Результаты верификации, полученные с применением компьютерного моделирования, свидетельствуют об эффективности разработанного алгоритма.

Ключевые слова: Ультразвуковой неразрушающий контроль, роботизированные системы ультразвукового контроля, антенные решетки, метод синтезированной апертуры, объекты сложной формы.

Abstract. The paper is devoted to the problem of obtaining results of high information content in robotic ultrasound control. In the context of this problem, the application of digital coherent signal processing of antenna arrays based on the Synthetic Aperture Focusing Technique is considered. In this paper, an algorithm for digital coherent signal processing of antenna arrays for robotic ultrasound control is proposed. The verification results obtained using computer modeling indicate the effectiveness of the developed algorithm.

Keyword: Ultrasonic non-destructive testing, robotic ultrasound control systems, antenna arrays, synthesized aperture method, objects of complex shape.

Важным вопросом развития ультразвукового неразрушающего контроля является повышение его производительности. Этим фактом обусловлен интерес к разработке и использованию автоматизированных систем ультразвукового неразрушающего контроля. При этом в последнее время большой интерес представляет создание и эксплуатация роботизированных систем, что связано с потенциальными преимуществами использования подобного оборудования. Во-первых, автоматизированные системы ультразвукового контроля на базе роботизированных манипуляторов обладают гибкостью к изменяющейся номенклатуре контролируемых изделий. Во-вторых, подобные системы способны обеспечить высокую повторяемость контроля объектов сложных форм. В-третьих, роботизированные манипуляторы способны обеспечить высокую скорость сканирования объектов различной формы и, соответственно, высокую производительность контроля. Наконец, роботизированный контроль может осуществлен удаленно, без непосредственного присутствия оператора возле объекта, что имеет значение при дефектоскопии в опасных производственных условиях.

Проблемы получения и представления результатов, являются актуальными вопросами исследований и разработок в области роботизированного ультразвукового контроля [1, 2]. В этой связи представляет интерес применение метода синтезированной апертуры (Synthetic Aperture Focusing Technique), который обеспечивает получение результатов контроля в форме изображений дефектов высокого разрешения. Ранее в [3] была предложена реализация метода синтезированной апертуры для роботизированного ультразвукового контроля с применением одноэлементного преобразователя. Широкое внедрение в практику ультразвукового контроля антенных решеток делает актуальной проблему адаптации подходов, разработанных в [3] для роботизированного ультразвукового контроля с антенными решетками. Это требует разработки новых подходов для восстановления парциальных изображений в одной измерительной позиции. При этом подразумевается, что регистрация сигналов осуществляется в режиме двойного сканирования [4]. Указанный режим предполагает, что зондирование объекта контроля осуществляется поочередно каждым элементом антенной решетки, а отраженные эхо-сигналы при этом регистрируются всеми элементами преобразователя. В таком случае восстановление изображения в одной измерительной позиции осуществляется с применением следующего выражения:

$$I(x, z) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K p_{n,k}(\tau_{xz}), \quad (1)$$

где: $p_{n,k}$ – эхо-сигнал, полученный в результате использования элементов n и m антенной решетки в качестве зондирующего и принимающего элемента;

τ_{xz} – временной отсчет в А-скане, который соответствует определенной точке в области восстановления изображения;

N – общее количество элементов антенной решетки, зондирующих объект контроля;

K – общее количество элементов антенной решетки, принимающих отраженные эхо-сигналы.

Временной параметр τ_{xz} рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$\tau_{xz} = \frac{\sqrt{(x_{tr} - x_{s1})^2 + (z_{tr} - z_{s1})^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_{s1} - x)^2 + (z_{s1} - z)^2}}{c_2} + \frac{\sqrt{(x_r - x_{s2})^2 + (z_r - z_{s2})^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_{s2} - x)^2 + (z_{s2} - z)^2}}{c_2}, \quad (2)$$

где: x_{tr}, z_{tr} – координаты зондирующего элемента антенной решетки;

x_r, z_r – координаты принимающего элемента антенной решетки;

x, z – координаты пикселя области восстановления изображения, для которого ведется расчет;

x_{s1}, z_{s1} – координаты поверхности объекта контроля, соответствующие точке из области восстановления изображения и положению зондирующего элемента антенной решетки;

x_{s2}, z_{s2} – координаты поверхности объекта контроля, соответствующие точке из области восстановления изображения и положению принимающего элемента антенной решетки (Рисунок 1);

c_1 – скорость продольных акустических волн в материале акустического контакта;

c_2 – скорость продольных акустических волн в объекте контроля.

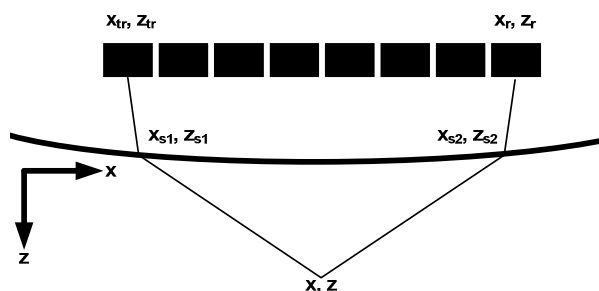


Рис. 1. Координаты, необходимые для восстановления изображений дефектов

Важным вопросом восстановления изображений является определение координат x_{s1} , z_{s1} , x_{s2} , z_{s2} , для чего применяется закон Снеллиуса и принцип наименьшего времени Ферма. Впоследствии из изображений, полученных в каждой измерительной позиции, формируется полное изображение в соответствии с [3].

Проверка разработанного алгоритма осуществлялась с применением компьютерного моделирования в программном пакете CIVA UT. В рамках моделирования рассматривался стальной образец вогнутой формы. Радиус кривизны образца составлял 50 мм. Образец содержал боковые цилиндрические отверстия радиусом 1 мм. Расположение несплошностей в объекте контроля представлено на Рисунке 2а. В рамках моделирования рассматривалась антенная решетка с рабочей частотой 5 МГц, содержащая 32 элемента. В рамках моделирования предполагалось, что объект контроля располагался в воде. Сканирование объекта контроля осуществлялась с шагом 1 мм. В каждой точке траектории сканирования антенная решетка позиционировалась относительно объекта контроля таким образом, чтобы обеспечивать ввод ультразвуковых волн в объект контроля с наименьшими потерями.

Результатом моделирования являлись наборы эхо-сигналов, зарегистрированные элементами антенной решетки в режиме двойного сканирования. Данные наборы являлись входными данными для разработанного алгоритма. Результатом работы алгоритма является изображение дефектов в контролируемом образце. На рисунке 2б представлен результат, полученный в одной измерительной позиции, а на рисунке 2в представлено полное изображение, полученное путем суммирования изображений, полученных в каждой измерительной позиции.

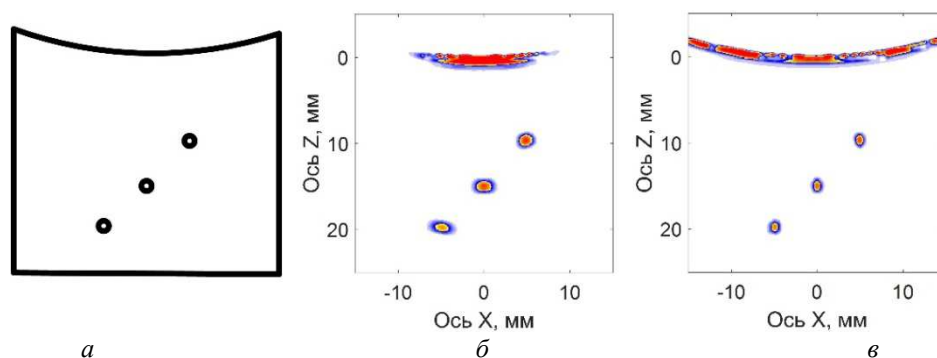


Рис. 2. Исходные данные и результаты проведенной верификации

В результате применения разработанного алгоритма цифровой когерентной обработки получены изображения дефектов высокого разрешения как в одной измерительной позиции, так и при сканировании. Полученные результаты подтверждают эффективность разработанного алгоритма. Следующим этапом разработок и исследований является проверка разработанного алгоритма с применением натуральных экспериментов.

Исследование выполнено за счет гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук (проект № МК-1679.2022.4)

Список используемых источников:

1. Introducing a new method for efficient visualization of complex shape 3D ultrasonic phased-array C-scans/ C. Mineo et al// 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium, Washington, DC, USA, 2017
2. Index-based triangulation method for efficient generation of large three-dimensional ultrasonic C-scans/ C. Mineo et al// Insight – Nondestructive Testing and Condition Monitoring. – 2018. – Vol. 60. – P. 183–189.
3. 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/ D. Dolmatov, V. Zhvyrblya, D. Sednev, M. Kroening// Computer Methods in Materials science. – 2018. – Vol. 18. – № 2. – P. 49-57.
4. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхосигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефектов / Базулин Е.Г., Коколев С.А., Голубев А.С. / Дефектоскопия. – 2009. – №. 2. – С. 18-32.