

**АКУСТИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД
С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЧНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С НЕЭКВИДИСТАНТНЫМ
РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ**

Д.О. ДОЛМАТОВ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: dolmatovdo@tpu.ru

Технология цифровой фокусировки антенной (зарубежный аналог – Total Focusing Method) требует использования антенных решеток в качестве преобразователей и обеспечивает получение результатов акустического контроля в форме изображений высокого разрешения [1]. Применение матричных антенных решеток позволяет получать трехмерные результаты в одной измерительной позиции, но использование таких преобразователей в акустическом контроле с применением технологии Цифровой фокусировки антенной связано с необходимостью обработки значительного объема сигналов. В этой связи интерес представляет использование неэквидистантных матричных антенных решеток, в которых элементы преобразователя расположены с непостоянным шагом. Подобные преобразователи способны обеспечить высокое качество восстанавливаемых изображений внутренних структур контролируемых изделий при меньшем количестве элементов по сравнению с эквидистантными датчиками. Частным случаем неэквидистантных преобразователей являются разреженные антенные решетки, которые реализуются за счет ограничения количества активных элементов, участвующих в зондировании и приеме акустических сигналов.

Слоисто-неоднородные материалы, состоят из слоев с разными акустическими свойствами и представляют интерес в атомной, авиационной и других областях промышленности. Акустический контроль подобных материалов с применением технологии Цифровой фокусировки антенной требует применения специальных алгоритмов цифровой когерентной обработки, учитывающих их сложную структуру.

Качество результатов акустического контроля с применением неэквидистантных, в том числе разреженных, антенных решеток зависит от их конфигурации. Таким образом, целью данной работы являлась проверка разработанной ранее методики поиска оптимальной конфигурации разреженной матричной антенной решетки [2] в случае акустического контроля слоисто-неоднородных объектов

В экспериментах использовалась матричная антенная решетка Doppler 5M8x8-1.0x1.0 состоящая из 64 элементов с рабочей частотой 5 МГц и шагом 1 мм. Элементы преобразователя формировали матричную структуру размерностью 8x8 элементов. В качестве объекта контроля применялся образец из алюминия толщиной 30 мм, в котором на глубине 5 мм было засверлено плоскодонное отверстие диаметром 3 мм. Для получения слоисто-неоднородной структуры тестовый образец был помещен в воду и акустический контроль осуществлялся с применением иммерсионного акустического контакта.

В рамках расчетов с применением разработанной методики определялись конфигурации разреженного преобразователя с 48, 40 и 32 активными элементами с учетом условий проведения акустического контроля. Получение набора сигналов при использовании всех конфигураций разреженного преобразователя осуществлялось в несколько циклов. На каждом цикле один из активных элементов конфигурации зондировал объект контроля, в то время как все активные элементы конфигурации разреженной антенной решетки принимали отраженные эхо-сигналы. Наборы сигналов подвергались цифровой когерентной обработке с использованием алгоритма, учитывающего наличие слоев с различными акустическими свойствами на пути распространения акустических волн. Результатами цифровой когерентной обработки служили трехмерные изображения внутренней структуры контролируемого изделия. При этом для данного случая наиболее информативной формой представления

результатов являлись проекции полученных трехмерных изображений на плоскость XY. Результаты для каждой рассмотренной конфигурации разреженной матичной антенной решетки представлены на рисунке 1.

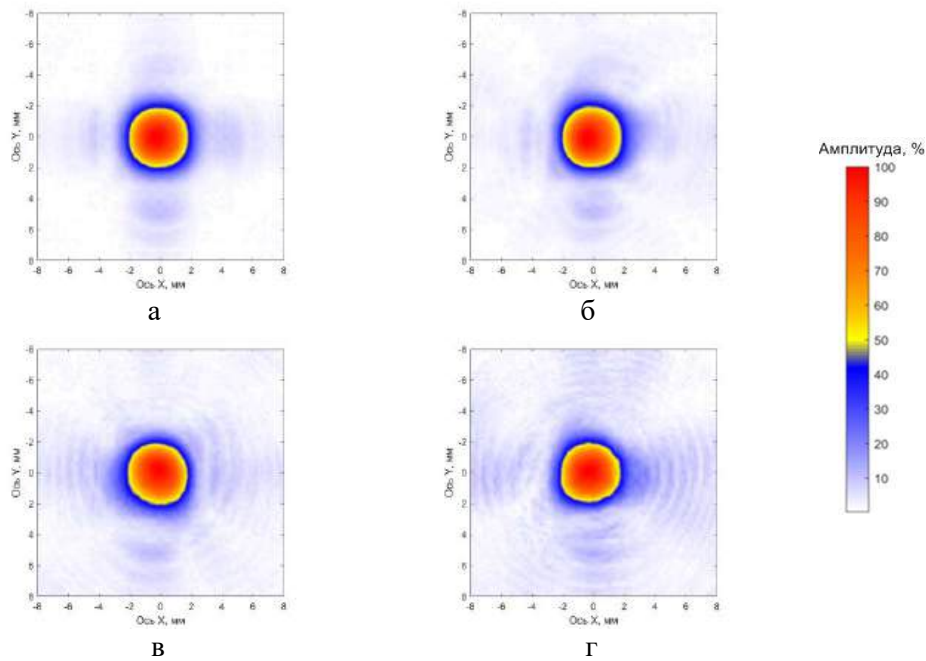


Рисунок 1. Результаты акустического контроля в форме проекции трехмерных изображений на плоскость XY:

- а) стандартная матичная антенная решетка; б) разреженная решетка из 48 элементов; в) разреженная решетка из 40 элементов; г) разреженная решетка из 32 элементов

В полученных результатах проводилась оценка разрешения и отношения сигнал/шум. Размеры дефектов на полученных изображениях и их разрешение оценивалось с применением величины Array Performance Indicator (API). Значение рассчитывалось для каждого из отражателей с применением следующего выражения:

$$API = \frac{N_{-6dB} D_x D_y D_z}{\lambda^3}, \quad (1)$$

где D_x , D_y , D_z – разрешение трехмерного изображения по осям X, Y и Z; N_{-6dB} - количество вокселей с амплитудой, превышающей порог – 6 дБ, где 0 дБ соответствует максимальной полученной амплитуде дефекта; λ – длина продольной акустической волны, которая распространяется в объекте контроля.

Отношение сигнал/шум (ОСШ) оценивалось с применением следующего выражения:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_s}{A_n} \right), \quad (2)$$

где A_s – максимальная амплитуда сигнала от дефекта; A_n – максимальная амплитуда шума на глубине расположения дефекта. В экспериментах значение A_n было получено при сканировании алюминиевого тестового образца толщиной 30 мм, который не содержал дефектов.

Параметры изображений, полученных с использованием разреженных решеток, сравнивались с аналогичными значениями результата, полученного с использованием стандартного преобразователя, где для регистрации акустических сигналов применялись все элементы преобразователя. Параметры полученных результатов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры результатов, полученных с использованием различных конфигураций матричных антенных решеток

Количество элементов в конфигурации	Количество сигналов в наборе	API	Разница относительно стандартной, %	ОСШ, дБ	Разница относительно стандартной, дБ
64	4096	1,46		31,13	
48	2304	1,50	2,93	30,50	0,64
40	1600	1,50	2,56	29,78	1,35
32	1024	1,45	0,37	28,64	2,49

При сравнении изображений, полученных с использованием оптимальных конфигураций разреженных антенных решеток, и стандартного изображения, можно сделать следующие выводы:

– Использование оптимальной конфигурации разреженной антенной решетки с сокращением набора сигналов в 1,7 раза относительно стандартного набора обеспечило получение изображения с разницей в оценке размеров дефектов 2,93 % и разнице в отношении сигнал/шум не более 0,64 дБ по сравнению с изображением, полученным с использованием стандартного набора сигналов.

– Оптимальная конфигурация разреженной матричной антенной решетки, обеспечивающая получение набора сигналов объемом в 2,6 раза меньшим относительно стандартного набора, позволила получить изображения, размер отражателей на которых отличался от изображений стандартной конфигурации на 2,56 % и на 1,35 дБ по отношению сигнал/шум.

– Оптимальная конфигурация, состоящая из 32 элементов (сокращение объема сигналов в 4 раза) позволила получить изображение, отличающиеся от стандартного изображения на 0,37 % в оценке разрешения и размеров дефектов и на 2,49 дБ по отношению сигнал/шум.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что оптимальные конфигурации разреженных матричных антенных решеток, обеспечивают восстановление изображений со сходным разрешением относительно стандартного изображения при акустическом контроле слоисто-неоднородных сред. Дальнейшим направлением исследований разработок в данной области может являться разработки определения конфигураций не только разреженных, но и произвольных неэквидистантных антенных решеток.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00248, <https://rscf.ru/project/24-79-00248/>

Список литературы

1. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки // Дефектоскопия. – 2011. – № 1. – С. 21–38.
2. Dolmatov D.O., Zhvyrblya V.Y. Optimal Design of Sparse Matrix Phased Array Using Simulated Annealing for Volumetric Ultrasonic Imaging with Total Focusing Method // Sensors. – 2024. – Vol. 24 (6). – Article number: 1856.