ЦИФРОВАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С РАСЧЕТАМИ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЧНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С НЕЭКВИДИСТАНТНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2022 г. Д.О. Долматов^{1,*}, Н.И. Ермошин^{1,**}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634040 Томск, пр-т Ленина, 30 E-mail: *dolmatovdo@tpu.ru; **nikvan@tpu.ru

Поступила в редакцию 27.07.2022; после доработки 16.08.2022 Принято к публикации 23.08.2022

Задача повышения скорости восстановления изображений дефектов является актуальной проблемой развития промышленной ультразвуковой томографии на основе цифровой когерентной обработки сигналов матричных антенных решеток (AP). В контексте указанной проблемы в рамках данной работы рассмотрено совместное использование вычислительно-эффективных алгоритмов с расчетами в частотной области и матричных AP с неэквидитсантным расположением элементов. Совместное применение указанных подходов по повышению скорости получения результатов обеспечивается за счет применения алгоритма цифровой когерентной обработки на основе неэквидистантного быстрого преобразования Фурье (НБПФ). Эффективность данного алгоритма была подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, ультразвуковая томография, алгоритмы цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области, неэквидистантное быстрое преобразование Фурье, матричные антенные решетки с неэквидистантным расположением элементов.

DOI: 10.31857/S0130308222100025, EDN: BSWHQC

введение

На сегодняшний день ультразвуковая томография с применением цифровой когерентной обработки сигналов AP на основе метода синтезированной апертуры находит все большее применение в практике ультразвукового неразрушающего контроля. Такие технологии как Цифровая фокусировка антенной [1, 2] и Total Focusing Method [3], базирующиеся на подобном подходе, реализуются во все большем количестве современных моделей ультразвуковых дефектоскопов на AP [4—7]. Указанная тенденция обусловлена тем фактом, что применение AP в качестве преобразователя в совокупности с цифровой когерентной обработкой сигналов, обеспечивает возможность получения результатов контроля в форме изображений дефектов высокого разрешения, по которым представляется возможным с высокой точностью оценить параметры выявленных несплошностей.

В общем случае дефекты являются объемными и ориентированы в объектах контроля случайным образом, поэтому трехмерные изображения являются наиболее предпочтительной формой получения результатов в ультразвуковой томографии [8]. В этой связи в рамках задачи оценки параметров дефектов большой интерес представляет использование матричных АР. Применение подобных преобразователей способно обеспечить получение трехмерных результатов высокого разрешения как в одной измерительной позиции, так и при сканировании, но связано с необходимостью цифровой когерентной обработки значительного объема ультразвуковых сигналов. Это приводит к низкой скорости получения результатов, что прямым образом сказывается на производительности контроля. Таким образом, актуальным вопросом более широкого применения матричных АР в совокупности с цифровой когерентной обработкой сигналов является разработка подходов, обеспечивающих высокую скорость получения результатов.

Для повышения скорости получения трехмерных изображений при применении трехмерной когерентной обработки сигналов матричных АР могут быть применены два принципиальных подхода. Первый подход заключается в получении оптимизированного набора сигналов подлежащих цифровой когерентной обработке, что обеспечивается применением разреженных преобразователей и преобразователей с неэквидистантным расположением элементов [9—14]. Второй подход заключается в разработке и использовании вычислительно-эффективных алгоритмов цифровой когерентной обработки, обеспечивающих высокую скорость восстановления изображений дефектов высокого качества. В рамках данного подхода большой интерес представляет применение алгоритмов цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области, которые показали более высокую скорость получения результатов по сравнению с широко применяемыми алгоритмами с расчетами во временной области при использовании одноэлементных преобразователей [15], линейных [16] и матричных [17] АР. Алгоритмы с расчетами в частотной области базируются на применении алгоритма быстрого преобразования Фурье, который подразумевает, что данные заданы на равномерной сетке. Тем не менее применение разреженных преобразователей и преобразователей с неэквидистантным расположением элементов подразумевает необходимость когерентной обработки сигналов, заданных на сетке с непостоянным шагом. Таким образом, в данной работе рассматривается совместное использование алгоритмов с расчетами в частотной области и преобразователей с неэквидистантным расположением элементов за счет реализации вычислений в рамках алгоритма на основе использования НБПФ [18].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Антенные решетки с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона. В ультразвуковой дефектоскопии с АР стандартным подходом является использование преобразователей с постоянным шагом (АР с эквидистантным расположением элементов). При этом требуемый шаг подобной решетки (*h*) определяется в соответствии со следующим критерием:

$$h \le \lambda/2,\tag{1}$$

где *λ* — длина ультразвуковой волны в объекте контроля [19].

Применение специальных режимов сбора данных направлено на восстановление изображений высокого качества при меньшем по сравнению со стандартным подходом набором сигналов. Это может быть обеспечено путем ограничения числа активных элементов в АР, участвующих в зондировании объектов контроля и приеме эхосигналов. В таком случае говорят о разреженных АР. При этом перечень активных элементов АР, обеспечивающих получение результатов высокого качества может меняться в зависимости от условий проведения контроля. Для поиска оптимальной конфигурации АР может использоваться метод перебора, а также алгоритмы стохастической оптимизации [20—22]. Также сбор оптимизированного набора сигналов может быть обеспечен за счет использования преобразователей с непостоянным шагом между соседними элементами (АР с неэквидистантным расположением элементов). В научной литературе были предложены различные конструкции преобразователей с неэквидистантным расположением элементов, включая спиральные антенные решетки и преобразователи с произвольным расположением элементов [23, 24]. Необходимо отметить, что на сегодняшний день не существует общепринятого подхода к получению оптимизированного объема данных. В научной литературе отсутствует сравнительный анализ различных подходов к определению оптимальной конфигурации разреженной АР и конструкций АР с неэквидистантным расположением элементов.

Одним из подходов для получения оптимизированного набора сигналов является применение преобразователя с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона [24]. Предполагается, что при такой конфигурации элементы располагаются в произвольном порядке, но накладывается ограничение на минимальное расстояние между ними.

Определение расположения элементов в таком преобразователе может быть осуществлено в соответствии со следующим алгоритмом [25]:

1. Входными данными для построения конфигурации матричной AP с неэквидистантным расположением элементов является параметр, определяющий размер апертуры (D), и минимально допустимое расстояние между соседними элементами (r).

2. Задается сетка из точек, которая будет служить базисом для формирования конфигурации элементов в форме диска Пуассона. При этом точки заданной сетки должны располагаться с шагом $r/\sqrt{2}$. Кроме того, формируется массив, который будет содержать координаты точек, в которых будут расположены центры элементов преобразователя с неэквидистантным расположением элементов.

3. Поиск конфигурации разреженной AP является итеративным процессом. На каждой итерации выбирается узел сетки x_n , в окрестности которого выбирается набор точек x_i . На выбор точек накладывается следующие ограничения:

$$\begin{aligned} |x_n - x_i| &< 2r; \\ |x_n - x_i| &> r. \end{aligned}$$

$$\tag{2}$$

Для каждой точки из указанного набора определяются расстояния до ранее определенных элементов матричной AP с неэквидистантным расположением элементов, положение которых описывается данными из массива. Координаты одной из точек, которая находится на расстоянии не менее чем *r* от ранее определенных элементов матричной AP (если такие точки имеются в наборе), заносятся в массив с координатами элементов матричной AP. Впоследствии выбранный узел исключается из дальнейших расчетов. Выполнение алгоритма завершается после рассмотрения всех узлов сетки.

Реализация быстрого преобразования Фурье на нерегулярных сетках. Реализация НБПФ первого рода подразумевает необходимость применения свертки с гауссианом, применение алгоритма быстрого преобразования Фурье и реализацию обратной свертки [26]. Для реализации операции свертки, обеспечивающей высокую точность получаемых результатов, задается регулярная сетка с повышенной относительно требуемой сетки частотой дискретизации. Параметры сетки с повышенной частотой дискретизации определяются с учетом степени передискретизации (oversampling ratio), которая является входным параметром при реализации алгоритма.

Для каждой точки (x_j, y_j, z_j) функции f(x, y, z) определяются ближайшая точка (ξ_1, ξ_2, ξ_3) на регулярной сетке; при этом $\xi_1 < x_j, \xi_2 < y_j, \xi_3 < z_j$. Для каждой точки функции f(x, y, z) рассчитываются параметры гауссианы:

$$E_{1} = \exp\left[-\frac{(x_{j} - \xi_{1})^{2} + (y_{j} - \xi_{2})^{2} + (z_{j} - \xi_{3})^{2}}{4\tau}\right];$$
(3)

$$E_{2x} = \exp\left[\frac{\pi(x_j - \xi_1)}{M_r \tau}\right]; \tag{4}$$

$$E_{2y} = \exp\left[\frac{\pi(y_j - \xi_2)}{M_r \tau}\right];$$
(5)

$$E_{2z} = \exp\left[\frac{\pi(z_j - \xi_3)}{M_r \tau}\right]; \tag{6}$$

$$E_{3}(k) = \exp\left[\tau k^{2}\right], \left|k\right| < N/2,$$
(7)

где т — параметр, определяющий ширину гауссианы; M_r — количество отсчетов в регулярной сетке с повышенным шагом дискретизации; k — волновое число; N — размеры регулярной сетки, для которой требуется получить преобразование Фурье.

Таким образом, для каждой точки (x_i, y_i, z_i) функции f(x, y, z) рассчитывается:

$$V_{xyz} = f(x_j, y_j, z_j) \cdot E_1 \cdot E_{2x}(n_1) \cdot E_{2y}(n_2) \cdot E_{2z}(n_3);$$
(8)

$$f_{\tau}(m_1 + n_1, m_2 + n_2, m_3 + n_3) = f_{\tau}(m_1 + n_1, m_2 + n_2, m_3 + n_3) + V_{xyz},$$
(9)

где
$$n_1 = \overline{-M_{sp} + 1, M_{sp}}, n_2 = \overline{-M_{sp} + 1, M_{sp}}, n_3 = \overline{-M_{sp} + 1, M_{sp}}, (m_1, m_2, m_3) = \frac{(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \cdot M_r}{2\pi}.$$

Параметр M_{sp} определяет количество точек на регулярной сетке с повышенной частотой дискретизации в окрестности точки (x_i, y_i, z_i) функции f(x, y, z).

Результатом сопряжения являе́тся́ функция $f_{\tau}(m_1, m_2, m_3)$ с регулярной сеткой, для которой с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье получают фурье-образ $F_{\tau}(k_1, k_2, k_3)$. Получение итогового результата обеспечивается применением операции обратной свертки:

$$F(k_1, k_2, k_3) = \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \cdot E_3(k_1) \cdot E_3(k_2) \cdot E_3(k_3) \cdot F_{\tau}(k_1, k_2, k_3).$$
(10)

Алгоритм цифровой когерентной обработки сигналов AP с неэквидистантным расположением элементов с расчетами в частотной области. Рассмотрим совмещенный режим работы

Дефектоскопия № 10 2022

матричной АР. Алгоритм с расчетами в частотной области [15], обеспечивающий высокую скорость восстановления изображений в случае применения иммерсионного акустического контакта требуется адаптировать для случая трехмерной цифровой когерентной обработки на неравномерной сетке, что связано с применением разреженной матричной АР или преобразователя с неэквидистантным расположением элементов.

Набор сигналов, зарегистрированных матричным преобразователем, может быть описан функцией *P*(*t*, *x*, *y*, *z*), где *t* — это время; *x*, *y*, *z* — координаты элемента матричной антенной решетки. Необходимо отметить, что использование преобразователя с неэквидистантным расположением элементов подразумевает, что указанная функция задана на неравномерной сетке, что приводит к необходимости использования на первом этапе алгоритма НБПФ первого рода, реализация которого рассмотрена в формулах (3)—(10). Результатом применения НБПФ является фурье-образ функции $p(\omega, k_x, k_y, z)$, заданный на равномерной сетке:

$$P(t, x, y, z) \xrightarrow{\text{HE}\Pi\Phi} p(\omega, k_x, k_y, z), \tag{11}$$

где ω — угловая частота; k_x, k_y — компоненты волнового вектора. Следующим шагом в рамках алгоритма является экстраполяция функции $p(\omega, k_x, k_z, z)$ на границу раздела объект контроля — иммерсионная жидкость (вода):

$$p(\omega, k_x, k_y, z + \Delta z) = p(\omega, k_x, k_y, z) \cdot e^{ik_z \Delta z},$$
(12)

где Δz — толщина слоя иммерсионной жидкости; k_z — компонента волнового вектора. При этом компонента волнового вектора k_z в формуле (12) определяется с использованием следующего выражения: × 1/2

$$k_{z} = -\frac{\omega}{|\omega|} \left(\frac{\omega^{2}}{\hat{c}_{1}^{2}} - k_{x}^{2} - k_{y}^{2}\right)^{1/2},$$
(13)

где \hat{c}_i — половина скорости продольных волн в иммерсионной среде.

Получение трехмерного изображения осуществляется с применением преобразования Столта, для чего угловая частота выражается через компоненты волнового вектора:

$$\omega(k_x, k_y, k_z) = -\frac{k_z}{|k_z|} \cdot \hat{c}_2 \cdot \left(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2\right)^{1/2}.$$
(14)

Таким образом, получение изображения реализуется через замену переменной, интерполяцию и применение трехмерного обратного преобразования Фурье:

$$P(\omega, k_x, k_y, z + \Delta z) \longrightarrow P(k_x, k_y, k_z) \xrightarrow{B\Pi\Phi} I(x, y, z).$$
(15)

Экспериментальная часть. Алгоритм цифровой когерентной обработки, базирующийся на расчетах в частотной области и рассмотренный в предыдущих разделах, был реализован в программном пакете Matlab. Входными данными для алгоритма служили наборы сигналов, полученные в результате сканирования объектов контроля. Выходным результатом работы алгоритма являются трехмерные изображения дефектов в используемых тестовых образцах. Также с использованием программного пакета Matlab был создан алгоритм поиска конфигурации матричной АР с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона. Входными параметрами для данного алгоритма служил параметр, определяющий размер апертуры (параметр D), а также минимально допустимое расстояние между соседними элементами (параметр r). Результатом работы данного алгоритма является набор координат, характеризующий расположение элементов в преобразователе.

Для проверки алгоритма цифровой когерентной обработки на основе НБПФ была проведена серия натурных экспериментов на экспериментальном стенде, основой которого служил блок электроники OPTUS (I-Deal Technologies GmbH) (рис. 1).

Для проведения серии экспериментов использовалось два участка тестового образца, содержащие плоскодонные отверстия диаметром 2 мм. Эскиз тестового образца представлен на рис. 2. Взаимное расположение дефектов в тестовых участках представлено на рис. 3. Участок, содержащий одиночный дефект (рис. 3*a*), предназначен для оценки разрешения и отношения сигнал/шум (ОСШ) результатов, полученных с использованием алгоритма с расчетами в частотной области.



Рис. 1. Электронный блок OPTUS.



Рис. 2. Эскиз тестового образца.

Участок с близкорасположенными дефектами (рис. 36) был использован для подтверждения результатов, полученных для одиночного дефекта.

В качестве преобразователя в серии экспериментов применяли матричную AP с эквидистантным расположением элементов Doppler 5M8×8BP1.0 (рис. 4). Для проведения экспериментальной верификации с применением разработанного алгоритма был определен набор матричных AP с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона, параметры которых представлены в табл. 1. Расположение элементов в этих преобразователях представлено на рис. 5.



Рис. 3. Взаимное расположение дефектов в выбранных участках тестового образца: участок с одиночным дефектом (а); участок с множественными дефектами (б).



Рис. 4. Ультразвуковой преобразователь Doppler 5M8×8BP 1.0.

Параметры матричных АР, имеющих неэквидистантное расположение элементов в форме диска Пуассона							
№ AP	Количество элементов в АР	Параметр D, мм	Параметр <i>r</i> , мм				
1	1153	16	0,4				
2	524	16	0,6				
3	297	16	0,8				
4	194	16	1				
5	101	16	1,4				
6	51	16	2				

В процессе экспериментальной верификации использовали первый элемент преобразователя (размер 0,8×0,8 мм, рабочая частота 5,41 МГц). При этом работа преобразователей с неэквидистантным расположением элементов в совмещенном режиме моделировалась за счет перемещения эле-

18

Таблица 1



Рис. 5. Расположение элементов матричных AP с неэквидистантным расположением элементов: AP № 1 (*a*); AP № 2 (*b*); AP № 3 (*b*); AP № 4 (*c*); AP № 5 (*b*); AP № 6 (*e*).

мента используемой матричной AP в заданные точки пространства с использованием двухосного манипулятора с точностью позиционирования 0,1 мм.

Наборы сигналов, полученных в результате сканирования тестовых образцов с применением иммерсионного акустического контакта, являлись исходными данными для алгоритма цифровой когерентной обработки на основе НБПФ. В рамках данной экспериментальной верификации восстанавливали трехмерные изображения размером 16×16×30 мм и разрешением 0,2 мм.

Полученные результаты оценивали по полученному разрешению, для чего использовали величину Array Performance Indicator (API) [27]. Для трехмерных изображений указанная величина может быть рассчитана для отражателя по следующей формуле:

$$API = \frac{V_{-6\,\mu B}}{\lambda^3},\tag{16}$$

где $V_{-6, \pi 5}$ — объем отражателя, в которой амплитуда синтезированного изображения выше порога в -6 дБ от максимальной амплитуды, соответствующей этому отражателю на синтезированном изображении.

Кроме того, оценивали ОСШ полученных результатов, что осуществляли с применением следующей формулы [28, 29]:

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right), \tag{17}$$

где I_1 — максимальная амплитуда вокселя, соответствующего отражателю на синтезированном изображении; I_2 — максимальная амплитуда вокселя в области на синтезированном изображении, не содержащей отражателя.

Дефектоскопия № 10 2022

Таблица 2

№ AP	Количество элементов в АР	Размер апертуры, мм	Шаг АР, мм	
1	1600	16×16	0,4	
2	729	16,2×16,2	0,6	
3	400	16×16	0,8	
4	256	16×16	1	
5	144	16,8×16,8	1,4	
6	64	16×16	2	

Параметры матричных AP с эквидистантным расположением элементов, рассматриваемых при проведении экспериментов

Для оценки результатов, полученных с использованием алгоритма на основе НБПФ и АР с неэквидистантным расположением элементов для тестового образца с одиночным отражателем, сравнивали с изображениями дефектов, полученных с использованием стандартного подхода, который подразумевает использование преобразователей с эквидистантным расположением элементов и применения алгоритмов с расчетами во временной области. При этом цифровую когерентную обработку с расчетами во временной области применяли в соответствии с [30]. В рамках экспериментальной верификации рассматривали АР с эквидистантным расположением элементов, представленные в табл. 2. Моделирование работы указанных преобразователей также осуществляли за счет перемещения элемента матричной АР с использованием двухосного манипулятора с точностью позиционирования 0,1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как было сказано ранее, результатом цифровой когерентной обработки экспериментальных данных являлись трехмерные изображения дефектов в участках тестового образца (рис. 6).



Рис. 6. Пример результата трехмерной цифровой когерентной обработки.

Результаты для участка тестового образца с одиночным дефектом в форме проекций на ось *XY* представлены на рис. 7 и рис. 8. На рис. 7 показаны результаты при использовании преобра-



Рис. 7. Результаты цифровой когерентной обработки с применением алгоритма на основе НБПФ и матричной АР с неэквидистантным расположением элементов: АР № 1 (*a*); АР № 2 (*б*); АР № 3 (*b*); АР № 4 (*c*); АР № 5 (*d*); АР № 6 (*e*).



Рис. 8. Результаты цифровой когерентной обработки с применением алгоритма с расчетами во временной области и АР с эквидистантным расположением элементов: АР № 1 (*a*); АР № 2 (*б*); АР № 3 (*b*); АР № 4 (*c*); АР № 5 (*d*); АР № 6 (*e*).

зователей с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона и применении цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области. Аналогичные результаты при использовании стандартного подхода представлены на рис. 8. Обозначения АР на рис. 7 даны в соответствии с табл. 1, а обозначение преобразователей на рис. 8 даны в соответствии с табл. 2.

Полученные изображения оценивали по разрешению и ОСШ в соответствии с формулами (16) и (17). Результаты оценки величины АРІ представлены в табл. 3, а результаты оценки ОСШ — в табл. 4 и в графиках на рис. 9.

Таблица 3

АР с неэквидистантным расположением элементов		АР с эквидистантным расположением элементов				-		
Nº AP	Количество элементов АР	Параметр <i>г</i> , мм	API	Nº AP	Количество элементов АР	Параметр <i>h</i> , мм	API	Разница, %
1	1153	0,4	0,809	1	1600	0,4	0,808	0,1
2	524	0,6	0,807	2	729	0,6	0,814	-0,9
3	297	0,8	0,811	3	400	0,8	0,823	-1,5
4	194	1	0,865	4	256	1	0,841	2,8
5	101	1,4	0,949	5	144	1,4	0,893	5,9
6	51	2	2,580	6	64	2	0,668	74,1

Значения АРІ полученных результатов

Таблица 4

Значения ОСШ полученных результатов

АР с неэквидистантным расположением элементов		АР с эквидистантным расположением элементов				December of		
№ AP	Количество элементов АР	Параметр <i>r</i> , мм	ОСШ, дБ	№ AP	Количество элементов АР	Параметр <i>h</i> , мм	ОСШ, дБ	Разница, дв
1	1153	0,4	28,2	1	1600	0,4	24,1	4,1
2	524	0,6	26,1	2	729	0,6	21,7	4,4
3	297	0,8	23,1	3	400	0,8	18,6	4,5
4	194	1	20,9	4	256	1	16,2	4,7
5	101	1,4	17,1	5	144	1,4	10,2	6,9
6	51	2	12,2	6	64	2	4,5	7,7



Минимальное расстояние между соседними элементами, мм

Рис. 9. Зависимость ОСШ от минимального расстояния между элементами матричных АР.

Таким образом, исходя из полученных данных, применение AP с неэквидистантным расположением элементов в совокупности с цифровой когерентной обработкой с расчетами в частотной области на основе НБПФ способно обеспечить восстановление изображений со сходным разрешением относительно стандартного подхода при более высоком ОСШ полученных результатов. При этом необходимо отметить, что при минимальном расстоянии между элементами (задаются параметром r для AP с неэквидистантным расположением элементов и параметром h для преобразователя с эквидистантным расположением элементов), равном 2 мм, в обоих случаях изображение высокого качества получить не удалось. При использовании AP с неэквидистантным расположением элементов и алгоритма на основе НБПФ получается низкое разрешение изображения дефекта, в то время как при использовании стандартного подхода восстанавливаемое изображение имеет низкое ОСШ.

На рис. 10 представлены результаты цифровой когерентной обработки с расчетами в частотной области на основе НБПФ для участка тестового образца, содержащего несколько близкорасположенных дефектов. Обозначение AP с неэквидистантным расположением элементов дается в соответствии с табл. 1.



Рис. 10. Результаты цифровой когерентной обработки с применением алгоритма на основе НБПФ и матричной АР с неэквидистантным расположением элементов: АР № 1 (*a*); АР № 2 (*б*); АР № 3 (*в*); АР № 4 (*г*); АР № 5 (*д*).

Результаты оценки значения АРІ и ОСШ представлены в табл. 5. Нумерация дефектов в табл. 5 приводится в соответствии с рис. 3.

В целом, результаты, полученные с применением алгоритма на основе НБПФ для участка тестового образца с несколькими дефектами, коррелируют с результатами, полученными ранее для участка образца с одиночным дефектом. Получено сходное разрешение изображений дефектов, которое оценивалось с применением величины API при высоком ОСШ. Это показывает потенциальную эффективность применения алгоритма на основе НБПФ совместно с использованием AP с неэквидистантным расположением элементов.

Таблица 5

		-	-	-	-
№ AP	Количество элементов АР	Параметр <i>г</i> , мм	№ дефекта	API	ОСШ, дБ
1	1153	0,4	1	0,827	25,9
			2	0,818	26,6
			3	0,805	27,0
			4	0,832	24,5
	524	0,6	1	0,833	22,5
n			2	0,821	24,2
2			3	0,801	24,5
			4	0,844	21,7
	297	0,8	1	0,840	20,1
2			2	0,823	21,7
3			3	0,816	21,9
			4	0,864	18,9
4	194	1	1	0,903	17,2
			2	0,855	18,2
			3	0,837	18,6
			4	0,932	16,4
5	101	1,4	1	0,974	12,4
			2	0,976	14,5
			3	0,963	15,3
			4	1,051	12,2

Значения АРІ и ОСШ результатов, полученных для участка тестового образца с несколькими дефектами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен алгоритм цифровой когерентной обработки сигналов с расчетами в частотной области на основе НБПФ, реализующий расчеты в частотной области и учитывающий непостоянный шаг между активными элементами матричной АР, что актуально при использовании разреженных преобразователей и АР с неэквилистантным расположением элементов. В рамках сравнительного анализа данный алгоритм рассматривался совместно с матричной АР с неэквидистантным расположением элементов в форме диска Пуассона. Результаты, полученные с применением подобного подхода, сравнивали с результатами, полученными с применением стандартного для цифровой когерентной обработки подхода (алгоритм с расчетами во временной области в совокупности с использованием матричной АР с эквидистантным расположением элементов). Полученные результаты свидетельствуют, что оба подхода обеспечивают получение изображений дефектов со сходным разрешением. Разница в значении АРІ для результатов, полученных с применением двух подходов, во всех случаях не превышала 6 %. При этом применение решетки с неэквидистантным расположением элементов в совокупности с алгоритмом на основе НБПФ обеспечивает получение результатов с более высоким ОСШ. Во всех рассмотренных случаях алгоритм на основе НБПФ обеспечивал получение изображений дефекта с более высоким ОСШ (разница составляла от 4,1 до 7,7 дБ). Также восстановление изображений с применением АР с неэквидистантым расположением элементов осуществлялась меньшим по объему сигналов относительно стандартного подхода. При одинаковом ограничении на минимальное расстояние между соседними элементами набор сигналов АР с неэквидистантным расположением элементов был ниже на значение от 20 до 30 %, что является важным фактором для решения задачи повышения скорости восстановления изображений. Результаты, полученные с применением алгоритма на основе НБПФ для участка тестового образца с одним дефектом, были подтверждены результатами, полученными с использованием указанного алгоритма для участка образца с несколькими близкорасположенными дефектами. Во всех рассмотренных случаях получены изображения с высоким ОСШ и разрешением, сходным с тем, что были получены для участка образца с одиночным дефектом.

Полученные результаты являются базисом для дальнейших исследований и разработок в области цифровой когерентной обработки сигналов матричных антенных решеток для решения задач ультразвукового неразрушающего контроля. Важным вопросом является аппаратная оптимизация алгоритма на основе НБПФ, например, перевод расчетов в рамках данного алгоритма на программируемые логические интегральные схемы или графические процессоры, что должно обеспечить высокую скорость получения результатов. Кроме того, в работе рассмотрен алгоритм для работы матричной АР в совмещенном режиме. Тем не менее в контексте использования АР наибольший интерес представляет использование режима двойного сканирования, обеспечивающего получение максимального набора данных о внутренней структуре контролируемого изделия. Таким образом, адаптация алгоритма на основе НБПФ для работы матричной АР в режиме двойного сканирования также является актуальным и важным вопросом дальнейших исследований и разработок.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bazulin E.G.* Comparison of systems for ultrasonic nondestructive testing using antenna arrays or phased antenna arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. No. 7. P. 404—423.

2. Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Ultrasonic tomography of metal structures using the digitally focused antenna array method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. V. 47. No. 1. P. 16–29.

3. *Holmes C., Drinkwater B., Wilcox P.* The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2004. V. 46. No. 11. P. 677–680.

4. M2M Gekko Specifications Sheet [Электронный ресурс]// Eddyfi Режим доступа: https://eddyfi.com/ doc/Downloadables/201906_M2M-GEKKO-specifications-sheet_A4-01.pdf, свободный. Загол. с экрана (дата обращения: 20.07.2022).

5. OmniScan X3 64 [Электронный ресурс] // Olympus Режим доступа: https://www.olympus-ims.com/ ru/phasedarray/omniscan-x3/, свободный. Загол. с экрана (дата обращения: 20.07.2022).

6. АВГУР-АРТ [Электронный ресурс]// НПЦ ЭХО+ Режим доступа: https://echoplus.ru/products/ defektoskopy/augur-art/, свободный. Загол. с экрана (дата обращения: 20.07.2022).

7. Высокочастотный ультразвуковой дефектоскоп-томограф a1550 introvisor [Электронный ресурс]// Акустические контрольные системы. Режим доступа: https://acsys.ru/vyisokochastotnyij-ultrazvukovojdefektoskop-tomograf-a1550-introvisor/, свободный. Загол. с экрана (дата обращения: 20.07.2022).

8. Dolmatov D.O., Tarrazó-Serrano D., Filippov G.A., Minin I.V., Minin O.V., Sednev D.A. Application of Phase-Reversal Fresnel Zone Plates for Improving The Elevation Resolution in Ultrasonic Testing with Phased Arrays // Sensors. 2019. V. 19. No. 23. Article number: 5080.

9. *Bazulin E.G.* Ultrasonic testing on a singly reflected beam using sparse antenna arrays and 3D echosignal processing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 1. P. 1—13.

10. *Hu H., Du J., Ye C., Li X.* Ultrasonic phased array sparse-TFM imaging based on sparse array optimization and new edge-directed interpolation // Sensors. 2018. V. 18. No. 6. Article number: 1830.

11. Yang P., Chen B., Shi K.R. Novel method to design sparse linear arrays for ultrasonic phased array // Ultrasonics. 2006. V. 44. P. e717—e721.

12. de Souza J.C.E., Parrilla Romero M., Higuti R.T., Martínez-Graullera O. Design of Ultrasonic Synthetic Aperture Imaging Systems Based on a Non-Grid 2D Sparse Array // Sensors. 2021. V. 21. No. 23. Article number: 8001.

13. *Martínez-Graullera O., de Souza J.C.E., Parrilla Romero M., Higuti R.T.* Design of 2D Planar Sparse Binned Arrays Based on the Coarray Analysis // Sensors. 2021. V. 21. No. 23. Article number: 8018.

14. Ramalli A., Boni E., Savoia A.S., Tortoli P. Density-tapered spiral arrays for ultrasound 3-D imaging // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2015. V. 62. No. 8. P. 1580—1588.

15. *Skjelvareid M.H., Olofsson T., Birkelund Y., Larsen Y.* Synthetic aperture focusing of ultrasonic data from multilayered media using an omega-k algorithm // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2011. V. 58. No. 5. P. 1037–1048.

16. *Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2008. V. 55. No. 11. P. 2450—2462.

17. Dolmatov D.O., Sednev D.A., Bulavinov A.N., Pinchuk R.V. Applying the algorithm of calculation in the frequency domain to ultrasonic tomography of layered inhomogeneous media using matrix antenna arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 7. P. 499—506.

18. *Capozzoli A., Curcio C., Liseno A.* Optimized Nonuniform FFTs and Their Application to Array Factor Computation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. V. 67. No. 6. P. 3924—3938.

19. Moreau L., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Ultrasonic imaging algorithms with limited transmission cycles for rapid nondestructive evaluation // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2009. V. 56. No. 9. P. 1932—1944.

20. *Bannouf S., Robert S., Casula O., Prada C.* Data set reduction for ultrasonic TFM imaging using the effective aperture approach and virtual sources // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2013. V. 457. No. 1. Article number: 012007.

21. *Hu H., Du J., Xu N., Jeong H., Wang X.* Ultrasonic sparse-TFM imaging for a two-layer medium using genetic algorithm optimization and effective aperture correction // NDT & E International. 2017. V. 90. P. 24—32.

22. Dolmatov D.O., Ermoshin N.I., Koneva D.A., Sednev D.A. Application of Nonuniform Fourier Transform to Solving Ultrasonic Tomography Problems with Antenna Arrays // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 8. P. 603—610.

23. Martínez-Graullera O., Martín C. J., Godoy G., Ullate L.G. 2D array design based on Fermat spiral for ultrasound imaging // Ultrasonics. 2010. V. 50. No. 2. P. 280–289.

24. Velichko A., Wilcox P.D. Characterisation of Complex Defects Using Two-Dimensional Ultrasonic Arrays // Proceedings of the ECNDT. 2010. V. 1. P. 18.

25. Bridson R. Fast Poisson disk sampling in arbitrary dimensions // ACM SIGGRAPH. 2007.

26. *Greengard L., Lee J.Y.* Accelerating the nonuniform fast Fourier transform // SIAM review. 2004. V. 46. No. 3. P. 443—454.

27. Fan C., Caleap M., Pan M., Drinkwater B.W. A comparison between ultrasonic array beamforming and super resolution imaging algorithms for non-destructive evaluation // Ultrasonics. 2014. V. 54. No. 7. P. 1842—1850.

28. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D., Hunter A.J. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method // NDT&E International. 2010. V. 43. P. 123–133.

29. Dolmatov D. O., Tarrazó-Serrano D., Filippov G.A., Uris A., Sednev D.A. Application of Phase-Reversal Fresnel Zone Plates for High-Resolution Robotic Ultrasonic Non-Destructive Evaluation // Sensors. 2021. V. 21. No. 23. Article number: 7792.

30. *Kvasnikov K.G., Soldatov A.I., Bolotina I.O., Krening K.M., Potapenko A.A.* The use of geometrical acoustics for the solution of visualization problems // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. No. 11. P. 625–630.