

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ СЛОИСТО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

© 2019 г. Д.О. Долматов^{1,*}, Д.А. Седнев^{1,**}, А.Н. Булавинов^{2,***}, Р.В. Пинчук^{2,****}

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634040 Томск, ул. Ленина, 30*

² *ACS-Solutions GmbH, 66123, Саарбрюккен, Science Pk. 2, Германия*
*E-mail: *dolmatovdo@tpu.ru; **sednev@tpu.ru; ***andrey.bulavinov@acs-international.com;*
*****roman.pinchuk@acs-international.com*

Поступила в редакцию 28.02.2019; после доработки 07.05.2019

Принята к публикации 24.05.2019

Для обеспечения высокой скорости получения синтезированных изображений с использованием матричных антенных решеток (АР) в системах промышленной ультразвуковой томографии требуются вычислительно-эффективные алгоритмы пространственно-временной обработки. В этой связи большой интерес представляют алгоритмы с расчетами в частотной области, основанные на алгоритме быстрого преобразования Фурье. При этом разрабатываемые алгоритмы должны обеспечивать высокое качество получаемых результатов при различных условиях проведения ультразвуковой томографии. В случае ультразвуковой томографии многослойных структур одним из факторов, серьезно снижающих эффективность алгоритма, является непараллельность, а в предельном случае криволинейность границ слоев объекта контроля относительно плоскости сканирования. В данной статье предложен алгоритм расчета трехмерных томографических изображений в частотной области с использованием матричных фазированных решеток с компенсацией наклона объекта контроля относительно плоскости сканирования при использовании иммерсионного контакта. Эффективность предложенного метода подтверждается экспериментально.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, ультразвуковая томография, матричные фазированные антенные решетки, метод синтетической фокусировки апертуры.

DOI: 10.1134/S0130308219070029

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и внедрение в практику ультразвукового неразрушающего контроля систем томографии направлено на решение задачи определения размеров и формы дефектов в объектах контроля с высокой разрешающей способностью. В таких системах задача решается за счет получения синтезированных изображений внутренней структуры объекта контроля с использованием алгоритмов пространственно-временной обработки зарегистрированных ультразвуковых эхосигналов.

Применение в системах ультразвуковой томографии АР получило широкое распространение по причине того, что применение таких преобразователей позволяет получать синтезированные изображения внутренней структуры объектов контроля с высоким разрешением. Это достигается за счет использования соответствующих алгоритмов пространственно-временной обработки в совокупности с применением особых режимов зондирования объекта контроля и регистрации ультразвуковых эхосигналов. На сегодняшний день наибольшее распространение получил алгоритм C-SAFT [1—3], зарубежными аналогами которого является Total Focusing Method, Sampling Phased Array и Inverse Wavefield Extrapolation [4—7]. В качестве режима регистрации данных во всех этих алгоритмах используется режим перебора всех возможных комбинаций индивидуально излучающих и принимающих элементов АР (в англоязычной литературе такой режим называют Full Matrix Capture). Необходимо отметить, что все рассмотренные выше алгоритмы базируются на расчетах во временной области и связаны с интенсивными расчетами [8].

Актуальным вопросом развития систем ультразвуковой томографии является повышение качества и достоверности получаемых синтезированных изображений. В этой связи большой интерес представляет использование в подобных системах матричных АР. Преимуществом их применения перед широко используемыми на сегодняшний день линейными АР является возможность получения трехмерного синтезированного изображения в одной позиции ультразвукового преобразователя и более высокая разрешающая способность полученных изображений. Однако использование матричных АР связано с необходимостью трехмерной пространственно-временной обработки большого объема ультразвуковых данных, что серьезным образом ограничивает возможность получения синтезированных изображений в режиме реального времени. Таким образом, суще-

ствует потребность в разработке и внедрении алгоритмов, обеспечивающих высокую скорость получения синтезированных изображений трехмерного пространства. В этой связи перспективными являются алгоритмы с расчетами в частотной области, которые базируются на использовании алгоритма быстрого преобразования Фурье [9]. В ряде работ был предложен алгоритм пространственно-временной обработки с расчетами в частотной области для ультразвуковой томографии с использованием АР, основанный на методе фазового сдвига и интерполяции Столта [10, 11]. Проверка его эффективности была осуществлена в рамках проведения ультразвукового контроля и томографической обработки данных с использованием матричных и линейных АР [12—14]. Рассмотренный алгоритм может применяться как в случае проведения ультразвуковой томографии с использованием иммерсионного акустического контакта, так и в случае контроля многослойных объектов контроля. Тем не менее, одним из факторов, серьезно снижающим качество получаемых изображений на практике, является непараллельность плоскости ультразвукового сканирования относительно границ слоев объекта контроля, что требует модификации предложенного ранее алгоритма.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание алгоритма расчета в частотной области для ультразвуковой томографии многослойных структур с использованием АР с компенсацией непараллельности плоскости сканирования относительно границ слоев объекта контроля.

Частным случаем томографической реконструкции многослойных сред является использование иммерсионного акустического контакта при ультразвуковом контроле объектов сложной формы. Рассмотрим случай выполнения трехмерной ультразвуковой томографии с использованием матричной фазированной решетки. Регистрация ультразвуковых сигналов при этом осуществляется в режиме ФМС. Двухмерное сканирование объекта и сбор ультразвуковых данных производятся в иммерсионном контакте. В таком случае набор сигналов, регистрируемых элементами решетки, можно представить в виде функции $P(t, x, y, z)$, где t — время; x, y, z — координаты средней точки между элементом АР, который является источником ультразвука, и элементом АР, принимающим отраженный эхосигнал. Ультразвуковое сканирование осуществляется в одной плоскости, следовательно, $z = \text{const}$. Расстояние между соседними координатами x и y является постоянным и равно соответственно Δx и Δy .

Рассматриваемый алгоритм состоит из следующих действий:

1. Компенсация наклона поверхности объекта контроля относительно плоскости сканирования с использованием метода фазового сдвига.
2. Экстраполяция акустического поля на границу раздела вода — объект контроля методом фазового сдвига.
3. Получение синтезированного изображения с использованием интерполяции Столта с последующим обратным преобразованием Фурье.

Рассмотрим частный случай, при котором объект контроля наклонен относительно плоскости сканирования по оси X на угол θ (рис. 1). Тогда задача компенсации наклона плоскости сканирования относительно поверхности объекта контроля заключается в получении из функции $P(t, x, y, z)$ функции $P(t, x', y, z')$, при этом ось X' должна быть параллельна границам образца. Задача компенсации такого наклона может быть решена путем экстраполяции функции $P(t, x, y, z)$ с использованием метода фазового сдвига, при этом глубина осуществляемого сдвига будет зависеть от координаты x функции

$$\Delta z = \Delta x \cdot n \cdot \tan(\theta), \quad n = \overline{1 \dots N}, \quad (1)$$

где N — общее количество отсчетов по оси X .

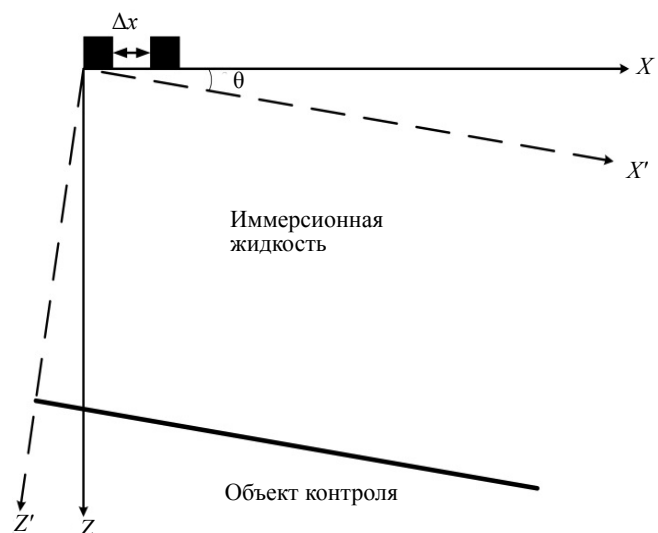


Рис. 1. Компенсация наклона объекта контроля относительно оси X .

Таким образом, решение поставленной задачи включает в себя:

1. Трехмерное преобразование Фурье функции $P(t, x, y, z)$

$$P(\omega, k_x, k_y, z) = \int \int \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x, y, z) \cdot \exp[-i(k_x x + k_y y - \omega t)] dx dy dt, \quad (2)$$

где ω — угловая частота; k_x, k_y, k_z — компоненты волнового вектора.

2. Экстраполяция функции $P(\omega, k_x, k_y, z)$ на глубину $\Delta z_n = n \Delta x \tan(\theta)$

$$P(\omega, k_x, k_y, z + \Delta z_n) = P(\omega, k_x, k_y, z) \cdot \exp[i(k_z \Delta z_n)], \quad (3)$$

где компонента k_z волнового вектора выражается как

$$k_z = -\frac{\omega}{|\omega|} \left(\frac{\omega^2}{\hat{c}_1^2} - k_x^2 - k_y^2 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где $\hat{c}_1$ — половина скорости звука в иммерсионной жидкости.

3. Обратное преобразование Фурье и получение откорректированной функции $P(t, x', y', z')$ в точке x'_n

$$P(t, x, y, z + \Delta z_n) = \int \int \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega, k_x, k_y, z + \Delta z_n) \exp[i(k_x x + k_y y + \omega t)] d\omega dk_x dk_y, \quad (5)$$

$$P(t, x'_n, y, z') = P(t, x_n, y, z + \Delta z_n). \quad (6)$$

Результатом применения предложенного подхода является функция $P(t, x', y, z')$, скорректированная относительно поверхности объекта контроля по оси X , где

$$x' = \frac{x}{\cos \theta}. \quad (7)$$

На следующем шаге метод фазового сдвига используется для экстраполяции скорректированного акустического поля $P(t, x', y, z')$ на границу раздела иммерсионная жидкость — объект контроля. Прежде всего, к данной функции применяется преобразование Фурье функции $P(t, x', y, z')$ и экстраполяция методом фазового сдвига:

$$P(\omega, k'_x, k_y, z') = \int \int \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x', y, z') \cdot \exp[-i(k'_x x' + k_y y - \omega t)] dx' dy dt, \quad (8)$$

$$P(\omega, k'_x, k_y, z' + \Delta z') = P(\omega, k'_x, k_y, z') \cdot \exp[i(k'_z \Delta z')], \quad (9)$$

где $\Delta z'$ — толщина слоя иммерсионной жидкости.

Для получения синтезированного изображения с использованием преобразования Столта требуется трехмерное преобразование Фурье функции $P(t, x, y, z' + \Delta z)$ аналогично (2). Для реализации пространственно-временной обработки необходимо выразить угловую частоту через компоненты волнового вектора

$$\omega(k'_x, k_y, k'_z) = -\frac{k'_z}{|k'_z|} \cdot \hat{c}_2 \cdot (k'^2_x + k_y^2 + k'^2_z)^{1/2}, \quad (10)$$

где $\hat{c}_2$ — половина скорости продольных акустических волн в объекте контроля.

Таким образом, осуществляется замена переменной

$$\omega \rightarrow k'_z, \quad (11)$$

$$d\omega = -\frac{k'_z}{|k'_z|} \cdot \hat{c}_2 \cdot \left(1 + \frac{k_x'^2 + k_y'^2}{k_z'^2}\right) dk'_z. \quad (12)$$

Получение синтезированного изображения внутренней структуры объекта контроля проводится по следующей формуле:

$$I(x', y, z' + \Delta z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} P(k'_x, k'_y, k'_z, z') \cdot \exp[i(k'_z \Delta z)] \cdot \exp[i(k'_x x' + k'_y y)] dk'_x dk'_y dk'_z, \quad (13)$$

где:

$$P(k'_x, k'_y, k'_z, z') = A(k'_x, k'_y, k'_z) \cdot P(\omega(k'_x, k'_y, k'_z), k'_x, k'_y, z'), \quad (14)$$

$$A(k'_x, k'_y, k'_z) = -\frac{k'_z}{|k'_z|} \cdot \hat{c}_l \cdot \left(1 + \frac{k_x'^2 + k_y'^2}{k_z'^2}\right)^{-1/2}. \quad (15)$$

Наклон объекта контроля относительно плоскости сканирования по двум осям является более общим случаем и описывается двумя углами θ (наклон относительно оси X) и φ (наклон относительно оси Y). В данном случае компенсация наклона происходит аналогично и заключается в получении функции $P(t, x', y', z')$ из функции $P(t, x, y, z)$, при этом оси X' и Y' должны быть параллельны поверхности объекта контроля. Компенсацию наклона объекта контроля, пространственно-временную обработку и получение синтезированного изображения можно осуществить с использованием (1—14). Отличие заключается в зависимости координат до осуществления компенсации наклона (x, y, z) и после нее (x', y', z'):

$$\Delta z = n \cdot (\Delta x \cdot \tan(\theta) + \Delta y \cdot \tan(\varphi)), \quad n = \overline{1 \dots N}; \quad (16)$$

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\cos(\theta)}; \quad (17)$$

$$\Delta y' = \frac{\Delta y}{\cos(\varphi)}. \quad (18)$$

Экспериментальная часть.

Предложенный алгоритм проверяли экспериментально. В качестве объекта контроля применялся стальной блок размерами 50×50×90 мм с тремя плоскодонными отверстиями диаметром 3 мм. Расположение плоскодонных отверстий представлено на рис. 2.

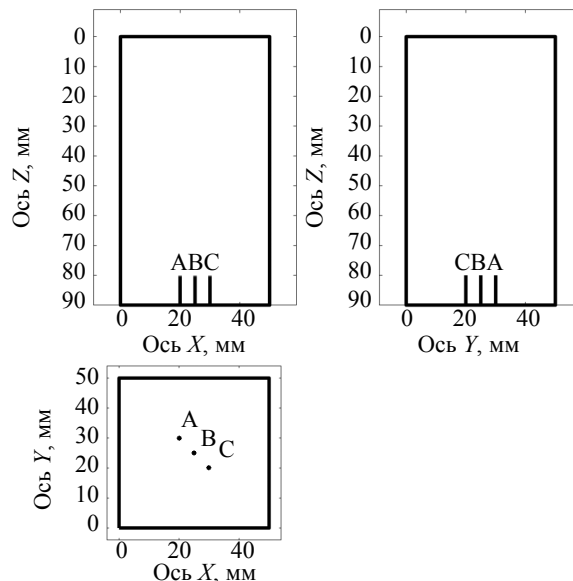


Рис. 2. Расположение дефектов в образце.

Таким образом, координаты дефектов следующие: А(20; 30; 80), В(25; 25; 80), С(30; 20; 80). Во всех случаях глубина сверления плоскодонных отверстий составляла 10 мм. В рамках экспериментальной проверки предложенного алгоритма объект контроля был наклонен под углом 4° относительно одной из осей сканирования.

В качестве ультразвукового преобразователя применялась 64-элементная матричная АР, центральная частота каждого элемента — 5 МГц, расстояние между центрами соседних элементов 1 мм (рис. 3). Регистрация ультразвуковых данных осуществлялась при режиме двойного сканирования работы АР и ее перемещении с шагом 1 мм.



Рис. 3. Матричная АР Doppler 5M8×8BP 1.0.

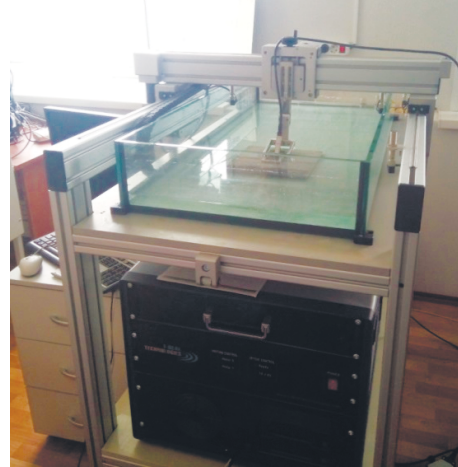


Рис. 4. Лабораторная установка.

Для регистрации ультразвуковых данных применялась лабораторная установка, основой которой является блок ультразвуковой электроники OPTUS (I-Deal Technologies GmbH) (рис. 4). Данный блок электроники имеет 128 каналов, реализующий как совмещенный режим, так режим двойного сканирования работы АР.

Эхосигналы, полученные в результате сканирования объекта контроля, являлись исходными данными для предложенного алгоритма, который был реализован в программном пакете Matlab R2016b. Результатом применения алгоритма к зарегистрированным данным является синтезированное изображение внутренней структуры объекта контроля. Для проверки качества результатов, полученных с использованием предложенного алгоритма, проводилось их сравнение с результатами, полученными при использовании алгоритма расчета во временной области при использовании матричных решеток. Вопросы реализации такого алгоритма рассмотрены в [15].

Сравнение результатов пространственно-временной обработки с применением двух алгоритмов осуществлялось на основании оценки разрешения полученных изображений и затраченного времени на получение результатов. Оценка разрешения полученных синтезированных изображений была выполнена с использованием параметра Angular Performance Indicator (API) [16], который определяется отдельно для каждого отражателя и для случая трехмерной томографии может быть сформулирован следующим образом:

$$API = \frac{V_{-6\text{дБ}}}{\lambda^3}, \quad (19)$$

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

Также в рамках работы оценивалось время, необходимое для получения синтезированного изображения с использованием алгоритмов расчета во временной и частотной областях. Все расчеты в реализованных алгоритмах осуществлялись на ЭВМ с четырехядерным и восьмипоточным процессором Intel Core i7-4790K и ОЗУ 16 Гб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 представлены результаты, полученные в ходе реализации пространственно-временной обработки с использованием предложенного алгоритма расчета в частотной области.

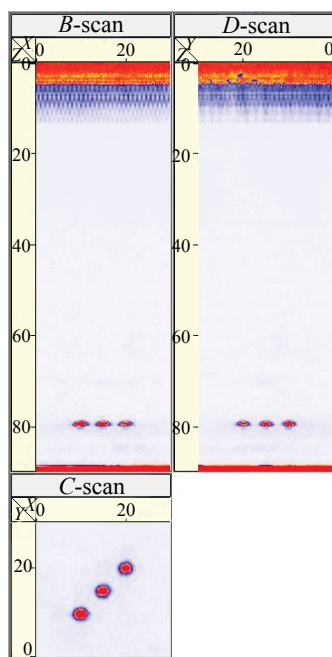


Рис. 5. Три проекции объемного синтезированного изображения, полученного с использованием предложенного алгоритма расчета в частотной области.

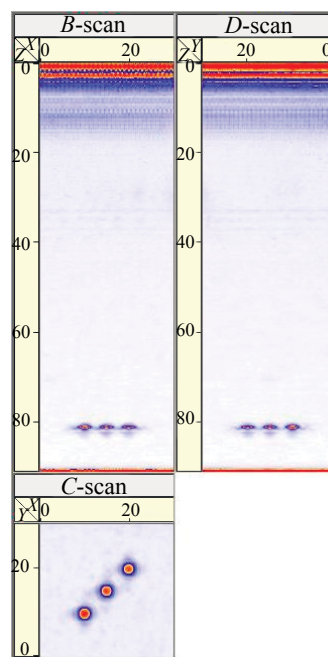


Рис. 6. Три проекции объемного синтезированного изображения, полученного с использованием алгоритма расчета во временной области.

Данные результаты представлены в виде трех проекций объемного изображения. Аналогичные результаты в случае применения алгоритма с использованием расчетов во временной области представлены на рис. 6. Необходимо отметить, что оба результата получены с применением одинаковых параметров реконструкции. В одной измерительной позиции восстанавливалось изображение размерами $2,5 \times 2,5 \times 9$ см с разрешениями $0,2 \times 0,2 \times 0,2$ мм по соответствующим осям. Парциальные изображения, полученные в различных измерительных позициях, когерентно складывались для получения полного синтезированного изображения. При этом в процессе сканирования шаг перемещения преобразователя составлял 1 мм.

На основании полученных результатов был определен API для каждого отражателя при использовании алгоритмов пространственно-временной обработки с помощью алгоритмов расчета в частотной и временной областях (табл. 1).

Таблица 1

Значения API отражателей в случае использования алгоритмов расчета во временной и частотной областях

Дефект	Алгоритм расчета в частотной области	Алгоритм расчета во временной области	Разница, %
A	26,39	26,04	1,32
B	28,17	28,48	1,10
C	26,39	26,30	0,34

Обнаружена высокая корреляция между разрешениями изображений, полученных с использованием двух алгоритмов. На следующем этапе для оценки вычислительной эффективности предложенного алгоритма осуществлялось сравнение времени получения результатов по сравнению с аналогичными значениями алгоритма расчета во временной области. Для этой цели варьировалось количество вокселей в восстанавливаемом синтезированном изображении. Зависимость времени получения результатов от количества вокселей в синтезированном изображении представлено в рис. 7.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой вычислительной эффективности разработанного алгоритма с расчетами в частотной области. При сходном с алгоритмом расчета во временной области разрешением получаемых синтезированных изображений предложенный алгоритм

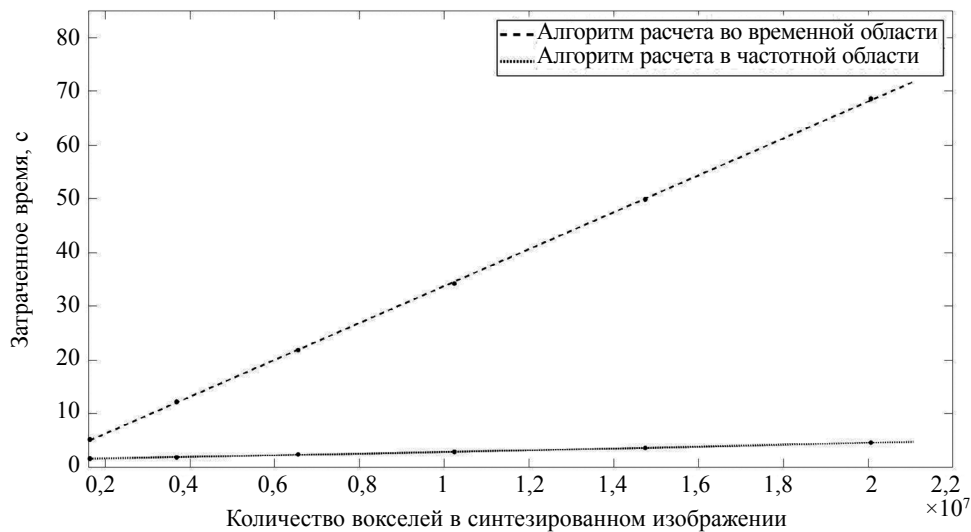


Рис. 7. Зависимость времени, затрачиваемого на пространственно-временную обработку, от количества вокселей в синтезированном изображении.

обладает более высокой производительностью. При этом выигрыш в производительности при использовании предложенного алгоритма перед алгоритмом расчета во временной области растет при увеличении количества вокселей в восстанавливаемом синтезированном изображении.

Необходимо также отметить, что реализация и анализ эффективности предложенного алгоритма осуществлялся на базе персонального компьютера с использованием программного пакета Matlab. Вопросы аппаратной оптимизации предложенного алгоритма требуют отдельного рассмотрения и не являются темой данной работы. Перспективным продолжением данного исследования является перенос вычислений на базе предложенного алгоритма на программируемые логические интегральные схемы или графические процессоры, обеспечивающие выполнение параллельных вычислений и повышение скорости получения результатов соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фактором, серьезно влияющим на качество и производительность промышленной ультразвуковой томографии, является слоистая неоднородность реконструируемых объектов контроля. В данной статье предложен алгоритм с расчетами в частотной области, учитывающий сложность среды на примере ультразвукового контроля и трехмерной реконструкции объекта в иммерсионном контакте с применением матричных АР. Алгоритм основан на использовании метода фазового сдвига и интерполяции Столта. Результаты, полученные с использованием предложенного алгоритма, сравнивались с результатами, полученными с использованием алгоритма расчета во временной области. Более высокая скорость получения синтезированных изображений в одной измерительной позиции при сходном разрешении получаемых синтезированных изображений свидетельствуют о высокой эффективности предложенного алгоритма. Применимость алгоритма не ограничивается исключительно случаем, рассмотренным в статье, и он может быть адаптирован для других условий контроля, к которым можно отнести ультразвуковое сканирование с использованием наклонных призм и контроль объектов сложных форм в иммерсионном контакте.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания «Наука», проекты № 11.3683.2017/4.6 и № 11.6342.2017/8.9, а также Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Яковлев Н.Н., Ковалев А.В., Шевалдыкин В.Г. Акустическая В- и С-томография крупнотектурных материалов импульсным эхометодом // Приборы и системы управления. 1989. № 7. С. 21—24.

2. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Алгоритм численного восстановления дефектов в акустической голографии // Дефектоскопия. 1985. № 4. С. 32—36.
3. Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT, с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 39—56.
4. 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.
5. Bernus L. von, Bulavinov A., Dalichow M., Joneit D., Kröning M., Reddy K.M. Sampling Phased Array A New Technique for Signal Processing and Ultrasonic Imaging / In: European Conference for Non-destructive Testing, Berlin, September 2006.
6. Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // NDT & e International. 2005. V. 38. No. 8. P. 701—711.
7. Verkooyen J., Boulavinov A. Sampling phased array a new technique for ultrasonic signal processing and imaging // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2008. V. 50. No. 3. P. 153—157.
8. 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.
9. Бархатов В.А. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 28—55.
10. Stolt R.H. Migration by Fourier transform // Geophysics. 1978. V. 43. No. 1. P. 23—48.
11. Gazdag J. Wave equation migration with the phase-shift method // Geophysics. 1978. V. 43. No. 7. P. 1342—1351.
12. Dolmatov D.O., Demyanyuk D.G., Ozdiey A.H., Pinchuk R.V. Fourier-domain post-processing technique for Digital Focus Array imaging with Matrix phased array for ultrasonic testing of ITER components // Fusion Engineering and Design. 2018. V. 126. P. 124—129.
13. Dolmatov D., Salchak Y., Sednev D., Pinchuk R. Application of Fourier-Domain Post-Processing Technique for Ultrasonic Imaging with Matrix Phased Arrays in Advanced Manufacturing of Details and Machines // Materials Science Forum. Trans Tech Publications. 2018. V. 938. P. 81—88.
14. Dolmatov D.O., Demyanyuk D.G., Sednev D.A., Pinchuk R.V. Applying the Algorithm of Calculation in the Frequency Domain to Ultrasonic Tomography // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 4. P. 232—236.
15. Квасников К.Г., Солдатов А.И., Болотина И.О., Кренинг М., Потапенко А.А. Применение метода геометрической акустики для решения задач визуализации // Дефектоскопия. 2013. № 11. С. 21—26.
16. 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.