

ТРЕХМЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ РАССЕИВАЮЩИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ ЗОНДИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

© 2023 г. Д.Я. Суханов^{1,*}, А. Халил^{1,**}

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия 634040 Томск, ул. Ленина, 36
E-mail: *sdy@mail.tsu.ru; **atmoon.khalil16@gmail.com*

Поступила в редакцию 25.01.2023; после доработки 16.02.2023
Принята к публикации 17.02.2023

Предлагается метод трехмерной ультразвуковой томографии на основе многостороннего зондирования с множеством излучателей и множеством приемников на цилиндрической поверхности в широкой полосе частот. Излучатели и приемники размещаются на кольце, которое перемещается по вертикальной оси. Обработка сигналов основана на применении согласованной фильтрации и сведена к вычислению циклической свертки по углу и вертикальной оси, что позволяет реализовать быстрый алгоритм восстановления трехмерных изображений. Для проверки метода разработана экспериментальная установка из 32 излучателей и 64 приемников, равномерно размещенных на кольце радиусом 205 мм. В ходе экспериментов осуществлялось зондирование в воздухе на частотах от 38 до 43 кГц. В результате визуализирован трехмерный объект сложной формы, что подтверждает применимость предложенного метода.

Ключевые слова: ультразвуковая томография, MIMO, согласованная фильтрация.

DOI: 10.31857/S0130308223030053, **EDN:** OPDGZN

ВВЕДЕНИЕ

Системы визуализации ближнего действия (ультразвуковые и радиоволновые миллиметрового диапазона) представляют большой интерес для широкого круга приложений, таких как дефектоскопия, безопасность, визуализация скрытых объектов и медицинская диагностика [1—6].

Методы визуализации на основе волнового зондирования (электромагнитного или ультразвукового) позволяют добиться восстановления изображения исследуемого объекта с помощью рассеянного сигнала, и по существу основаны на решении обратной задачи рассеяния волн. Наиболее известными методами реконструкции изображений, основанными на приближении однократного рассеяния, являются миграция во временной области [7], синтез апертуры [6] и метод Столта [8].

Для восстановления рассеивающих и преломляющих неоднородностей применяют другие методы [9], к которым относится трансмиссионная томография. Эти методы основаны на вычислении прямого и обратного распространения волн в итеративном процессе.

В случае моностатического зондирования, в силу теоремы взаимности, задача обнаружения рассеивателей может быть заменена на задачу обнаружения синфазных источников, излучающих на удвоенной частоте, поскольку волна от источника до рассеивателя и от рассеивателя до приемника проходит один и тот же путь [10]. В таком случае, в приближении однократного рассеяния восстановление рассеивателей сводится к вычислению поля обратного распространения на удвоенных частотах. Для ускорения вычислений поля обратного распространения задача решается в области пространственных частот на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). В случае мультистатического плоского однородного зондирования с применением множества излучателей и множества приемников применение БПФ тоже возможно [11].

В данной статье рассматривается зондирующая система с равномерным распределением источников и приемников по круговой апертуре, что позволяет свести задачу восстановления рассеивателей к циклической свертке по углу. Кроме того, за счет однородности измерений по вертикальной оси при сканировании кольцевой апертурой обеспечивается возможность применения свертки по вертикали. В итоге, предложенный метод восстановления трехмерных изображений позволяет ускорить вычисления за счет применения двумерной свертки, которая реализуется через алгоритм быстрого преобразования Фурье. Разработанный метод экспериментально проверен для ультразвуковых волн в воздухе. Но, кроме того, данный подход применим для зондирования в иммерсионной жидкости в целях дефектоскопии и медицинской диагностики или для радиоволнового зондирования в задачах радиотомографии и обнаружения скрытых объектов.

ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ УЛЬТРАЗУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Рассмотрим томографическую систему, состоящую из множества излучателей и множества приемников, равномерно распределенных по окружности радиуса R в одной плоскости XOY . Эта окружность может смещаться как вверх, так и вниз по оси z (рис. 1).

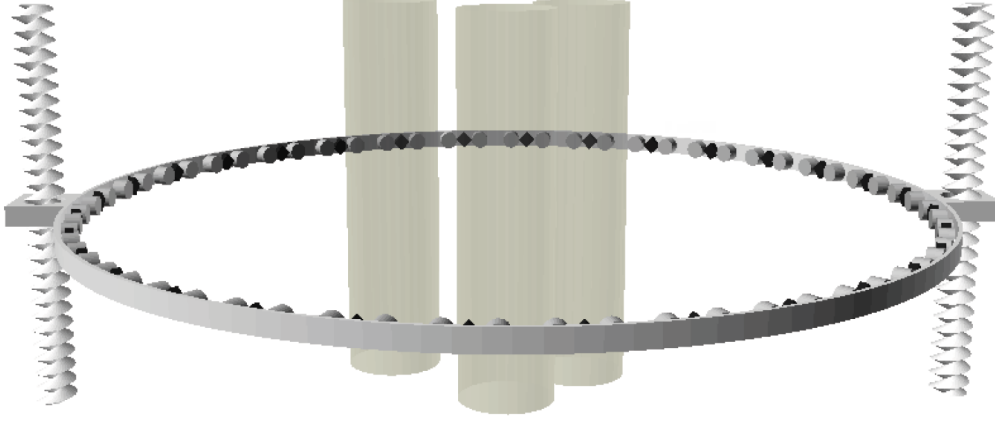


Рис. 1. Рассматриваемая схема системы зондирования на основе множества излучателей и множества приемников, размещенных на окружности: $\blacklozenge$ — излучатели; $\bullet$ — приемники.

Прямую задачу мультистатической системы зондирования в приближении однократного рассеяния можно описать следующим образом:

$$U(\varphi_n, \psi_m, z', k) = \iiint_V \rho(\mathbf{r}) \frac{\exp(ik(|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}| + |\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|))}{4\pi|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}||\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|} d\mathbf{r}, \quad (1)$$

где $\mathbf{T}_n = (R\cos\varphi_n, R\sin\varphi_n, z')$ — координата n -го излучателя; φ_n — угол, под которым лежит n -й излучатель; $\mathbf{R}_m = (R\cos\psi_m, R\sin\psi_m, z')$ — координата m -го приемника; ψ_m — угол, под которым лежит m -й приемник (рис. 2); $\mathbf{r} = (r\cos\eta, r\sin\eta, z)$ — точка наблюдения; $|\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|$ — расстояние между излучателем и точкой наблюдения; $|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}|$ — расстояние между точкой наблюдения и приемником; k — волновое число.

Восстановление изображения рассеивающих неоднородностей (обратную задачу) без учета убывания амплитуды с расстоянием можно осуществить с помощью согласованной фильтрации следующим образом [12]:

$$\hat{\rho}(\mathbf{r}) = \int \int \sum_k \sum_n \sum_m U(\varphi_n, \psi_m, z', k) \exp(-ik(|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}| + |\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|)) dz' dk = \int_k \rho(r, \eta, z, k) dk, \quad (2)$$

где

$$\rho(r, \eta, z, k) = \int_{z'} \sum_n \sum_m U(\varphi_n, \psi_m, z', k) \exp(-ik(|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}| + |\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|)) dz' dk. \quad (3)$$

Перейдем от рассмотрения дискретного множества излучателей и приемников к непрерывному представлению и заменим суммирование в (3) на интегрирование.

Можно переписать расстояния $|\mathbf{T}_n - \mathbf{r}|$ и $|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}|$ следующим образом:

$$|\mathbf{T}_n - \mathbf{r}| = \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\varphi_n - \eta) + (z' - z)^2},$$

$$|\mathbf{R}_m - \mathbf{r}| = \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\psi_m - \eta) + (z' - z)^2}.$$

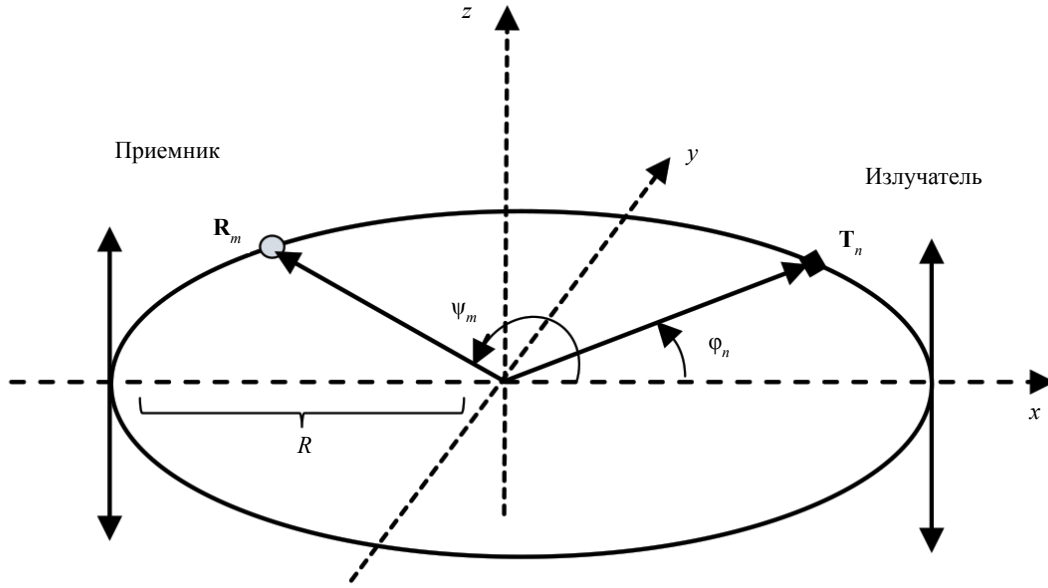


Рис. 2. Схема мультистатистического зондирования с цилиндрической апертурой.

Подставляя эти два соотношения в уравнение (3), получим:

$$\rho(r, \eta, z, k) = \iiint_{\varphi_n, \psi_m, z'} U(\varphi_n, \psi_m, z', k) E_1(r, \psi_m - \eta, z' - z) E_2(r, \varphi_n - \eta, z' - z) dz' d\psi_m d\varphi_n, \quad (4)$$

где

$$E_1(r, \psi_m - \eta, z' - z) = \exp\left(-ik\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos(\psi_m - \eta) + (z' - z)^2}\right),$$

$$E_2(r, \varphi_n - \eta, z' - z) = \exp\left(-ik\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos(\varphi_n - \eta) + (z' - z)^2}\right).$$

Применим двумерное преобразование Фурье к уравнению (4) по z и η следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(r, \kappa_\eta, \kappa_z, k) &= \iiint_{\varphi_n, \psi_m, z'} U(\varphi_n, \psi_m, z', k), \\ &\left(\iint_{\eta, z} E_1(\psi_m - \eta, z' - z) E_2(\varphi_n - \eta, z' - z) \exp(i\kappa_\eta \eta) \exp(i\kappa_z z) d\eta dz \right) dz' d\varphi_n d\psi_m. \end{aligned} \quad (5)$$

Заменим переменные в предыдущем уравнении в соответствии с выражениями $\psi_m - \eta = \Phi$, $z' - z = Z$, $\varphi_n - \psi_m = \Delta\varphi$. После алгебраических преобразований выражение (5) примет вид:

$$\tilde{P}(r, \kappa_\eta, \kappa_z, k) = - \int_{\Delta\varphi} \tilde{U}(\Delta\varphi, k, \kappa_\eta, \kappa_z) \tilde{Q}(r, k, \Delta\varphi, -\kappa_\eta, -\kappa_z) d\Delta\varphi, \quad (6)$$

где

$$\tilde{U}(\Delta\varphi, k, \kappa_\eta, \kappa_z) = \iint_{\psi_m, z} U(\Delta\varphi, \psi_m, z', k) \exp(i\kappa_\eta \varphi_m) \exp(i\kappa_z z) dz d\psi_m,$$

$$\begin{aligned}\tilde{Q}(r, k, \Delta\varphi, -\kappa_\eta, -\kappa_z) &= \iint_{\varphi, Z} E_1(r, k, \Phi, Z) E_2(r, k, \Delta\varphi + \Phi, Z) \exp(-i\kappa_\eta \Phi) \exp(-i\kappa_z Z) d\varphi dZ = \\ &= \iint_{\varphi, Z} Q(r, k, \Delta\varphi, \Phi, Z) \exp(-i\kappa_\eta \Phi) \exp(-i\kappa_z Z) d\varphi dZ.\end{aligned}$$

Применим двумерное обратное преобразование Фурье к уравнению (6) по κ_z и κ_η и проинтегрируем по k следующим образом:

$$\begin{aligned}\hat{\rho}(r, \eta, z) &= \int_k \left(\iint_{\kappa_\eta, \kappa_z} \tilde{P}(r, \kappa_\eta, \kappa_z, k) \exp(-i\kappa_\eta \varphi) \exp(-i\kappa_z z) d\kappa_\eta d\kappa_z \right) dk = \\ &= - \int_k \int_{\Delta\varphi} \left(\iint_{\kappa_\eta, \kappa_z} \tilde{U}(\Delta\varphi, k, \kappa_\eta, \kappa_z) \tilde{Q}(r, k, \Delta\varphi, -\kappa_\eta, -\kappa_z) \exp(-i\kappa_\eta \varphi) \exp(-i\kappa_z z) d\kappa_\eta d\kappa_z \right) d\Delta\varphi dk\end{aligned}$$

или

$$\hat{\rho}(r, \eta, z) = - \int_k \int_{\Delta\varphi} \left(IFT_{2D} \left[FT_{2D} \left(U(\Delta\varphi, \psi_m, z', k) \right) \cdot FT_{2D} \left(Q(r, k, \Delta\varphi, \Phi, Z) \right) \right] \right) d\Delta\varphi dk, \quad (7)$$

где $FT_{2D}(\cdot)$ — двумерное преобразование Фурье; $IFT_{2D}(\cdot)$ — двумерное обратное преобразование Фурье.

Таким образом, трехмерное изображение рассеивающих неоднородностей можно восстановить с помощью множества двумерных преобразований Фурье, а, значит, ускорить процесс восстановления. Остается интегрирование для различных частот и различных разностей угловых положений излучателей и приемников, но такой объем вычислений приемлем для современных компьютеров.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Рассмотрим широкополосную систему зондирования из 32 излучателей и 64 приемников, которые размещаются равномерно по окружности радиуса $R = 205$ мм в одной плоскости XOY и двигаются вверх и вниз по оси z с шагом 3,5 мм. Применим зондирующий ультразвуковой широкополосный сигнал в полосе частот от 38 до 43 кГц. Скорость звука предполагается равной 342 м/с.

Было проведено моделирование для визуализации четырех точечных рассеивателя в разных координатах: первый — (0, -100, 120) мм; второй — (0, 100, 150) мм; третий — (-100, 0, 40) мм; четвертый — (100, 0, 120) мм. Изображение рассеивающих объектов восстановлено предложенным методом (рис. 3). Для заполнения апертуры однородным множеством точек по углу, данные были дополнены нулями до 128 приемников и 128 излучателей. На реконструированном изображении можно видеть наличие четырех точек в позициях, совпадающих с размещением рассеивателей. Наблюдаются артефакты, связанные с разреженным размещением датчиков.

Разрешающая способность системы в плоскости (x, y) определяется половиной длины волны $(\lambda/2)$ самой высокочастотной компоненты сигнала, а разрешение в центре системы по вертикали

Δz зависит от соотношения высоты H и радиуса зондирующей системы: $\Delta z = \frac{R\lambda}{H}$. Простран-

ственное разрешение по оси z хуже, так как размер апертуры по вертикали H сравним с радиусом кольца R , т.е. $\Delta z \approx \lambda$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для экспериментальной проверки системы визуализации с множеством излучателей и множеством приемников была разработана экспериментальная установка на основе микроконтроллера STM32F407, который использовался для генерирования зондирующих сигналов и для оцифровки принятых рассеянных сигналов. Зондирование проводилось в воздухе линейно-частотно модулированным сигналом в диапазоне частот от 38 до 43 кГц. Для излучения и приема применялись пьезокерамические сенсоры Murata MA40S4R/S. В микроконтроллер STM32F407 имеется

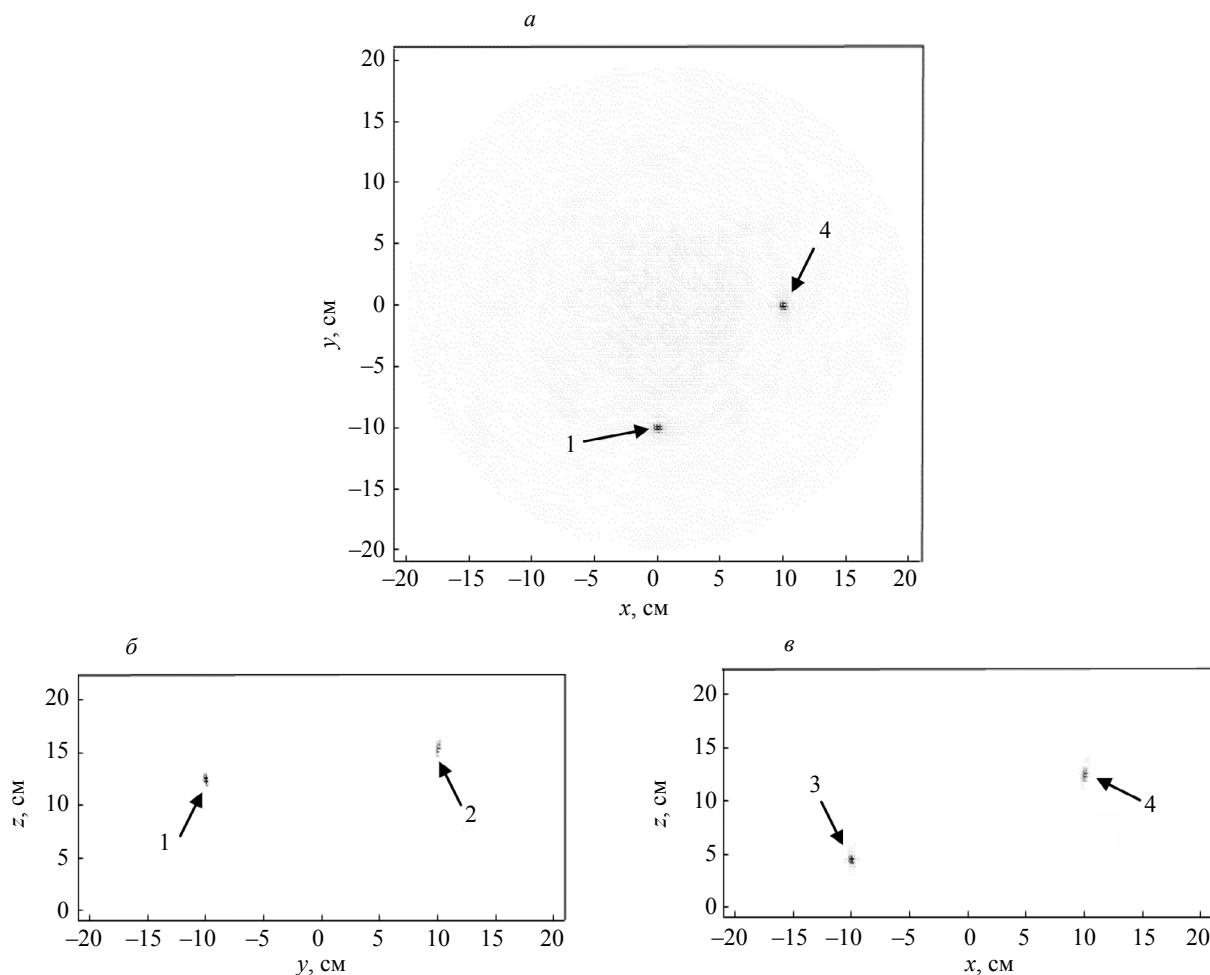


Рис. 3. Восстановленное изображение точечных рассеивателей по данным численного моделирования:
 а — проекция XOY при $z = 120$ мм; б — проекция YOZ при $x = 0$ мм; в — проекция XOZ при $y = 0$ мм.

два цифроаналоговых преобразователя (ЦАП). Каждый канал ЦАП подключался к 16-канальным мультиплексорам 74НС4067, что в итоге обеспечило 32 канала передачи, которые активируются по очереди. Прием сигналов осуществлялся с помощью восьми аналого-цифровых преобразователей (АЦП) микроконтроллера STM32F407, которые подключались к восьми 16-канальным мультиплексорам 74НС4067 для обеспечения 64 приемных каналов. Переключение мультиплексоров приемного тракта синхронизировано с работой АЦП, что позволило почти одновременно оцифровывать сигналы с 64 каналов. Передача данных в компьютер проводилась по интерфейсу Ethernet, протокол UDP.

Зондирующая система состоит из 32 излучателей, равномерно расположенных по окружности радиусом $R = 205$ мм и углом размещения $\varphi_n = \left(n + \frac{1}{4}\right) \frac{2\pi}{32}$, и 64 приемников, которые равномерно размещаются по той же окружности с углом $\psi_m = m \frac{2\pi}{64}$. Эта окружность перемещается по оси z с

помощью двух шаговых двигателей (рис. 4). При движении эта окружность описывает виртуальный цилиндр, в котором размещается исследуемый объект. Количество шагов по оси z равно 64, длина шага равна 3,5 мм. Процесс сканирования занимает 317 с, включая измерение отраженных сигналов и движение окружности по оси z , а процесс восстановления изображения с помощью параллельного программирования занимает 180 с.

Разработанный метод рассчитан на визуализацию рассеивающих неоднородностей и применим для восстановления изображения внешнего контура исследуемых объектов. Был проведен

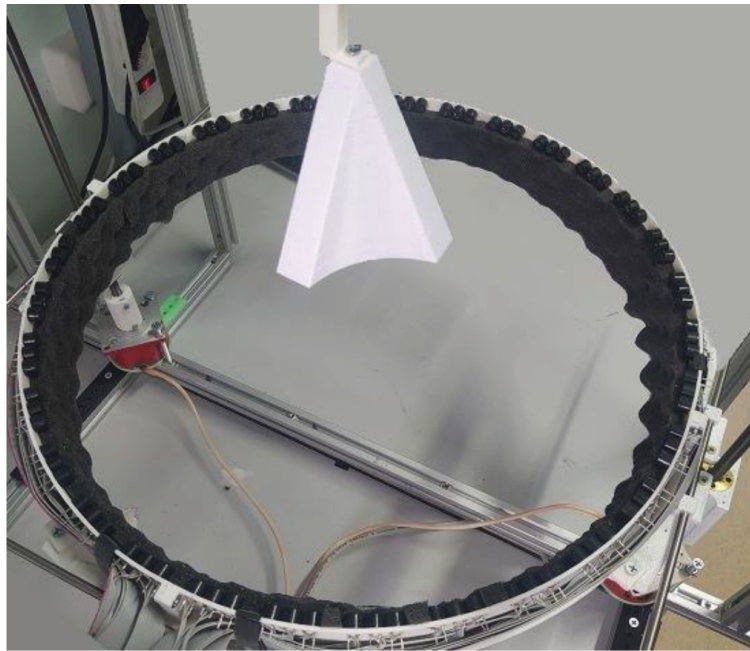


Рис. 4. Фото эксперимента по ультразвуковому зондированию тестового объекта, расположенного внутри цилиндра.

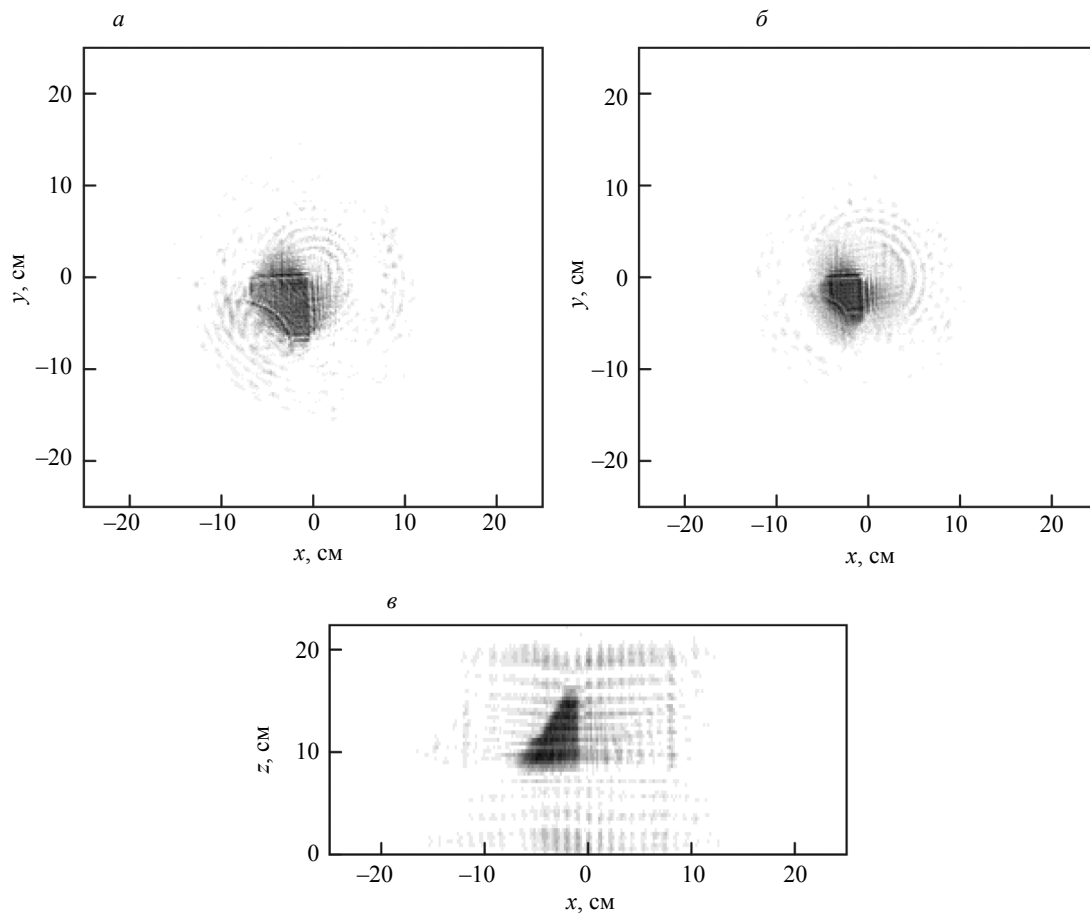


Рис. 5. Плоские сечения восстановленного трехмерного изображения:
 a — в плоскости XOY при $z = 10$ см; b — при $z = 13$ см; v — плоскость XOZ при $y = 0$ см.

эксперимент для визуализации пластикового объекта из полилактида — ПЛА (см. рис. 4). Плотность ПЛА составляет 1240 кг/м^3 , скорость звука в этом материале 2246 м/с . Поскольку контраст ПЛА с воздушной средой слишком велик, то почти все падающие ультразвуковые волны отражаются от поверхности. При обработке из измеренных данных вычитались фоновые сигналы, которые были измерены при отсутствии тестового объекта. Было восстановлено трехмерное изображение по формуле (7). Восстановленное изображение показано в разных проекциях на рис. 5.

Можно видеть, что изображение объекта восстановлено. По сути, оно состоит из двух изображений: восстановленного по отраженным волнам и восстановленного по прошедшим на просвет волнам. За счет отраженных волн визуализируются резкие контуры объекта, а за счет проходящих волн получено теневое изображение всего объекта в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод трехмерной ультразвуковой томографии на основе мультистатистического зондирования с цилиндрической поверхности. Излучатели и приемники равномерно размещаются на кольце, которое перемещается по вертикальной оси. Предложен быстрый алгоритм восстановления трехмерных изображений на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье. Разработана экспериментальная установка из 32 излучателей и 64 приемников для воздушной среды, работающая в диапазоне частот от 38 до 43 кГц. Численное моделирование и эксперименты подтвердили возможность получения трехмерных изображений рассеивающих объектов предложенным методом.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheen D.M., McMakin D.L., Hall T.E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2001. V. 49. No. 9. P. 1581—1592.
2. Zhuge X., Yarovoy A.G. Three-dimensional near-field MIMO array imaging using range migration techniques // IEEE Trans. Image Process. 2012. V. 21. No. 6. P. 3026—3033.
3. Li J., Stoica P. MIMO Radar Signal Processing. Hoboken, N.-J.: Wiley-IEEE Press, 2008. P. 472.
4. 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 // Russ. J. Nondestruct. Test. 2020. V. 56. P. 603—610.
5. Суханов Д.Я., Халил А. Получение трехмерных акустических изображений на основе широкополосного зондирования системой из множества излучателей и множества приемников // Радиотехника. 2022. № 12. С. 137—146.
6. Суханов Д.Я., Халил А. Волновая зондирующая система с оптимальной взаимной ориентацией решетки излучателей и решетки приемников для визуализации рассеивающих объектов // Техника радиосвязи. 2022. № 3. С. 62—70.
7. Goldsmith P.F., Hsieh C., Huguenin G.R., Kapitzky J., Moore E.L. Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1993. V. 41. No. 10. P. 1664—1675.
8. Stolt R. Migration by Fourier transform techniques // Geophys. 1978. V. 43. No. 1. P. 23—48.
9. Bazulin E.G., Goncharsky A.V., Romanov S.Ya., Seryozhnikov S. Yu. Inverse Problems of Ultrasonic Tomography in Nondestructive Testing: Mathematical Methods and Experiment // Russ. J. Nondestruct. Test. 2019. V. 55. P. 453—462.
10. Lopez-Sanchez J.M., Fortuny-Guash J. 3-D radar imaging using range migration techniques // IEEE Trans. Antennas. Propag. 2000. V. 48. No. 5. P. 728—737.
11. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акустический журнал. 2001. Т. 47. № 6. С. 741—745.
12. Khalil A. Implementation of Ultrasonic Tomography of Scatterers Based on a Circular Array / 2022 International Siberian Conference on Control and Communications. Tomsk, Russian Federation. 2022. P. 1—4.