

Акустическая томография повышенного разрешения на основе обратного распространения волн

Д.Я. Суханов , А.Е. Кузцова

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Россия, г. Томск,
пр. Ленина, 36

Аннотация – Предлагается метод акустической томографии рассеивающих неоднородностей повышенного разрешения на основе метода обратной временной миграции. Рассматривается неоднородная фоновая среда с известным распределением преломляющих неоднородностей, где необходимо обнаружить рассеивающие неоднородности. Зондирование осуществляется широкополосными сигналами произвольной формы. Метод обратной временной миграции дополнен линейной фильтрацией поля прямого распространения, позволяющей повысить разрешение восстанавливаемых изображений. Представлены результаты численного моделирования и эксперимента. Зондирование осуществлялось в воде на частотах от 20 до 350 кГц сигналом с линейной частотной модуляцией. Источник ультразвукового сигнала располагался неподвижно и облучал исследуемые объекты в воде. Рассеянный сигнал измерялся в плоскости у поверхности в воде на прямоугольной области с шагом менее 2 мм. Обработка сигналов предложенным методом позволила восстановить трехмерное изображение рассеивающих неоднородностей с разрешением порядка 7 мм. Сравнение предложенного метода и метода обратной временной миграции, показало, что предложенный метод позволяет получить более высокое разрешение.

Ключевые слова – волновое уравнение; акустическая томография; численное моделирование; метод конечных разностей; обратная временная миграция.

Введение

Акустическая томография используется в медицине для диагностики и визуализации биологических органов [1–2], в неразрушающем контроле для обнаружения дефектов различных сплавов и структур [3–5], при изучении океана [6–7]. Методы акустической томографии также широко применяются в дефектоскопии при решении обратных задач – по измеренному сигналу, рассеянному неоднородностью, для определения ее формы и характеристик [8–11]. Обратные задачи не всегда имеют однозначное решение и крайне чувствительны к шумам измерений и несоответствиям математической модели и условий зондирования.

Метод обратного распространения волн в настоящее время все чаще используется при решении задач мониторинга неоднородных сред и в активной локации [12–13]. Этот метод позволяет учитывать фоновые неоднородности среды для визуализации источника. Также этот метод в литературе носит название The Time Reversal technique (TR). Метод TR можно использовать для обнаружения рассеивателей. Для достаточно малых рассеивателей можно использовать тот факт, что рассеиватели ведут себя как вторичные источники. В статье [14] в контексте неразрушающего контроля конструкций обсуждается вычислительное

использование TR для визуализации точечных рассеивателей на основе обратного распространения поля из области измерений. Поскольку анализ зависит от времени, необходимо применять критерии остановки, чтобы остановить обратное моделирование, когда волны оптимально сфокусированы в месте расположения рассеивателя. Рассмотрены два критерия остановки, оба взяты из области обработки изображений: один основан на энтропии Шеннона, а другой – на норме ограниченной вариации. К аналогичному выводу пришли авторы работы [15], имеющие дело только с точечными рассеивателями, а предложенные ими алгоритмы остановки вообще не способны идентифицировать рассеиватели конечных размеров. В работе [16] авторы показали, что визуализация TR успешна только для эффективных точечных источников (или рассеивателей, которые являются вторичными источниками). Чтобы идентифицировать и охарактеризовать более крупные рассеиватели, в сочетании с TR используются дополнительные вычислительные инструменты.

Большинство методов томографии обратного рассеяния не учитывают фоновые препятствия и неоднородности среды [17–18]. Методы, учитывающие неоднородность среды, работают для частных случаев, например для плоскостойких сред [19]. Для произвольных препятствий могут при-

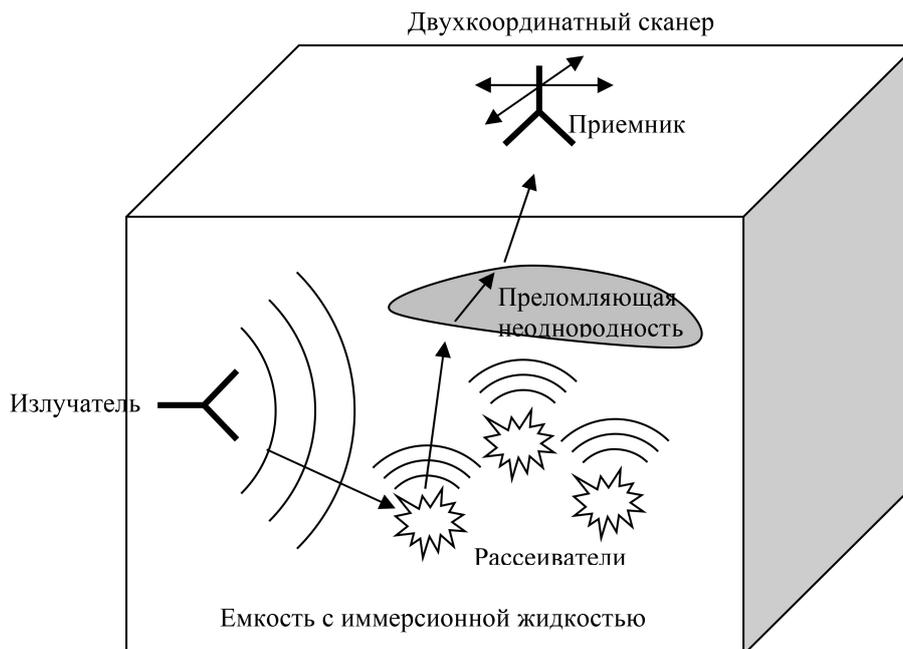


Рис. 1. Схема измерений
Fig. 1. Scheme of measurements

меняться приближенные методы расчета фазовых сдвигов волнового поля в неоднородных средах [20].

Наиболее перспективно развитие метода обратной временной миграции (Reverse Time Migration, RTM) [21–22]. Этот метод широко используется в сейсмологии и позволяет учитывать заранее известные фоновые преломляющие препятствия. Существующие методы RTM основаны на использовании короткоимпульсного зондирования при условии высокой локализации зондирующей волны в пространстве.

В данной работе предлагается развитие метода RTM для исследования сигналов произвольной широкополосной формы. Этот метод позволяет получать более высокое разрешение восстановленных изображений по сравнению с классическим методом RTM. Путем численного моделирования и экспериментальных исследований с зондированием сигналами с линейной частотной модуляцией показана возможность получения изображений высокого разрешения.

1. Схема измерений

Предлагается рассмотреть следующую схему измерений (рис. 1). Исследуемый объект погружается в емкость с водой на определенную глубину. На боковой стенке емкости с водой размещен ультразвуковой излучатель, который облучает исследуемый объект ультразвуковыми волнами. Волновое поле, рассеянное на объекте, регистрируется при-

емником в воде, размещенным на двухкоординатном сканере, перемещающемся над объектом контроля. Будем считать, что зондирующий сигнал является широкополосным. Сигнал может быть короткоимпульсным, шумоподобным, или любой другой формы, но иметь широкую полосу частот.

2. Метод решения обратной задачи

Задача состоит в том, чтобы визуализировать рассеивающий объект в среде по измеренному полю, прошедшему через фоновые преломляющие неоднородности. Предлагается применить метод обратной временной миграции (Reverse Time Migration – RTM), включающий обратное распространение волн (метод обратного времени) в сочетании с дополнительной фильтрацией поля прямой волны от излучателя. Для зондирования короткими импульсами метод RTM предполагает, что произведение акустического давления поля волны обратного распространения на поле прямой волны позволит визуализировать рассеиватели в среде. Для случая произвольного зондирующего сигнала предлагается включить в алгоритм RTM дополнительную фильтрацию во временной области.

Рассмотрим известное решение для поля дифракции на экране с отверстием в приближении Кирхгофа. В частотной области для дальней зоны поле за отверстием приближенно можно записать в виде

$$\tilde{P}(\mathbf{r}) = \int \int_{x_m y_m} \tilde{U}(x_m, y_m, \omega) \times \quad (1)$$

$$\times \frac{z}{2\pi r^2} ik_0 \exp(ik_0 r) dx_m dy_m,$$

где $r = \sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2 + z^2}$; $\mathbf{r} = (x, y, z)$ – точка наблюдения дифракционного поля; (x_m, y_m) – эквивалентный точечный источник в плоскости $z = 0$.

По формуле (1) можно восстановить дифракционное поле за экраном с отверстием, если измерить поле в отверстии $\tilde{U}(x_m, y_m, \omega)$. В методе RTM необходимо изменить фронт волны на экране (зоне измерения), обратив время в обратную сторону. Рассмотрим обратное распространение поля от отверстия в экране (зона измерения) для восстановления поля источников в среде на основе формулы (1). Для этого предлагается инвертировать время, что эквивалентно замене мнимой единицы в (1) с $+i$ на $-i$. В результате после перехода во временную область получаем поле обратных волн:

$$P(\mathbf{r}, t) = \int \int_{-\infty x_m y_m} \int \tilde{U}(x_m, y_m, \omega) \frac{z}{2\pi r^2} (-ik_0) \times \quad (2)$$

$$\times \exp(-ik_0 r) dx_m dy_m e^{-i\omega t} d\omega =$$

$$= \frac{z}{2\pi} \int \int_{x_m y_m} \frac{1}{r^2 c} \frac{\partial}{\partial t} U\left(x_m, y_m, \frac{r}{c} + t\right) dx_m dy_m.$$

Предлагается метод RTM высокого разрешения на основе дополнительной фильтрации поля прямого распространения. Для случая произвольного зондирующего сигнала $S(t)$ линейную фильтрацию можно осуществлять следующим образом:

$$B(\mathbf{r}) = \int_{t=0}^T P(\mathbf{r}, t) |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0| \cdot W\left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{c}\right) dt, \quad (3)$$

где умножение на $|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ вводится для компенсации убывания поля зондирующего излучателя; $W(t)$ – импульсная реакция линейного фильтра, вычисляемая на основе обратной свертки с регуляризацией из зондирующего сигнала:

$$W(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{S}^*(\omega)}{\tilde{S}(\omega)\tilde{S}^*(\omega) + \alpha} \exp(i\omega t) d\omega, \quad (4)$$

где $\tilde{S}(\omega)$ – спектр зондирующего сигнала; $\tilde{S}^*(\omega)$ – комплексно сопряженное значение $\tilde{S}(\omega)$; α – параметр регуляризации, значение которого подбирается для каждого типа зондирующих сигналов и определенного уровня шума. Желательно выбирать $\alpha > 0$ в зависимости от дисперсии шума

$\alpha = \sigma^2 / \Delta\omega$, где σ^2 – дисперсия шума в измеряемом сигнале, $\Delta\omega$ – ширина полосы частот. Если $\sigma^2 = 0$, то в любом случае α следует выбирать больше 0, чтобы избежать деления на 0 в (4).

Функция $B(\mathbf{r})$ является решением обратной задачи в приближении однократного рассеяния. По сути, (3) и (4) реализуют обратную свертку с регуляризацией сигнала и обеспечивают преобразование зондирующего сигнала в эквивалентный короткий дельта-подобный импульс. Классическая реализация RTM по существу выполняет согласованную фильтрацию сигнала, которая максимизирует уровень интенсивности восстановленного изображения, но не обеспечивает наилучшего разрешения. В предлагаемом методе спектр зондирующего сигнала выравнивается по всем частотам, что позволяет значительно повысить разрешающую способность восстанавливаемого изображения. Таким образом, предлагаемый метод дает возможность повысить разрешающую способность по сравнению с классическим методом RTM.

3. Решение обратной задачи в неоднородной фоновой среде

Наличие фоновых преломляющих неоднородностей в среде приводит к искажению волнового поля, рассеянного объектами. Предполагается, что форма и свойства препятствий известны, но неизвестны рассеивающие объекты, скрытые за препятствиями. Скорость распространения волн в препятствиях отличается от скорости фоновой среды, что приводит к преломлению волн и изменению времени прихода рассеянных импульсов. Необходимо учитывать влияние преломляющих неоднородностей на задержку распространения волны для восстановления корректных изображений рассеивающих объектов.

Рассмотрим метод численного моделирования акустических процессов (решение прямой задачи), основанный на волновом уравнении для жидкой неоднородной среды:

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = S, \quad (5)$$

где $p(x, y, z, t)$ – давление в среде; $c(x, y, z)$ – пространственное распределение скорости звука в среде; $S(x, y, z, t)$ – функция, описывающая источники. Численное решение этого уравнения осуществляется методом конечных разностей во временной области.

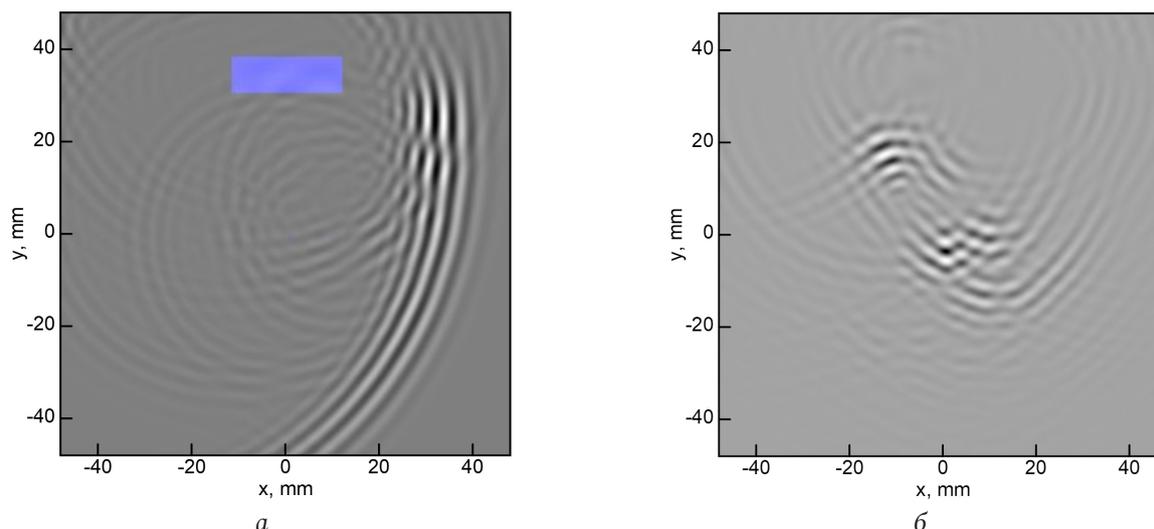


Рис. 2. Численное моделирование зондирования объектов через прямоугольную неоднородность (*a* – прямое распространение волны от источника и рассеянное на исследуемых объектах; *b* – обратное распространение поля от рассеивателей)
Fig. 2. Numerical modeling of object probing through a rectangular inhomogeneity (*a* – direct wave propagation from the source and scattered on the objects under study; *b* – back propagation of the field from scatterers)

Предлагается восстанавливать волновое поле в среде (для решения обратной задачи) методом обратного распространения волн (техникой обращения времени). Этот метод инвариантен относительно замены времени, t на $-t$, что позволяет сфокусировать волновое поле в окрестности локализованного источника колебаний, «переизлучая» принятые сигналы в обратном направлении. Согласно методу обратного распространения волн, в численной модели в области измерения задается множество источников, каждый из которых излучает сигнал, принятый в данной точке, но в обратном направлении. При распространении волн от таких источников они складываются в фазе в тех точках среды, где в определенный момент времени находятся рассеиватели. В области расположения источника сигнала волна обратного распространения сходится, что позволяет визуализировать изотопный источник в среде. Для проверки возможности восстановления поля обратного распространения было проведено численное моделирование. В качестве фоновой среды исследовалась вода (скорость звука 1440 м/с, плотность 1000 кг/м³). В качестве рассеивающих объектов рассматривались 4 точечных источника расположенных на разном расстоянии и высоте друг от друга (скорость звука 5500 м/с, плотность 4000 кг/м³). На верхней границе расчетной области располагались приемники, которые регистрировали дошедший до них сигнал. Рассеивающие объекты зондировались сферическим волновым пучком. Источник волнового пучка располагался сбоку и излучал волну в виде короткого импульса. При численном моделировании пространствен-

ный шаг составлял 0,25 мм, шаг по времени – 10 нс. В градациях серого на рис. 2, *a* показано смоделированное акустическое давление волны прямого распространения в момент времени после того, как произошло рассеяние. Прямоугольником обозначено препятствие плотностью 500 кг/м³ и скоростью звука 2880 м/с. Препятствие было введено для демонстрации возможности учета его влияния предлагаемым методом. На рис. 2, *б* показано поле обратных волн с учетом прямоугольного препятствия в момент прохождения волнами места расположения рассеивателей.

Трудность возникает при выборе момента времени, когда максимум поля обратного распространения будет точно сходиться в точке, где находятся рассеивающие объекты. Выбор этого момента времени связан с задержкой распространения прямого сигнала от зондирующего излучателя. Для восстановления томографического изображения рассеивающих объектов предлагается учитывать преобразованное по формуле (4) поле прямой волны от зондирующего излучателя. Первоначально считаем, что среда не содержит рассеивателей, и моделируем в ней распространение волны от источника. Далее проводится моделирование обратного распространения волн от приемников с обращением времени. Поле от обратной волны умножается на модифицированную прямую волну и интегрируется по времени, как в (3), для получения изображения рассеивателей. В области расположения рассеивателей прямая и обратная волны перекрываются, что при их наложении (путем умножения) позволяет визуализировать рассеивающий объект. На рис. 3, *a* показано восста-

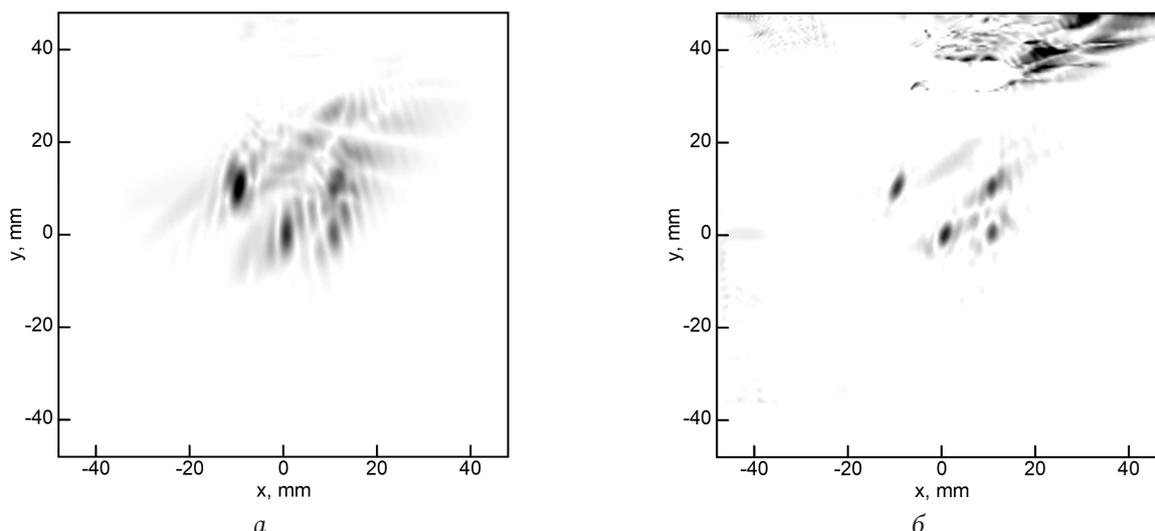
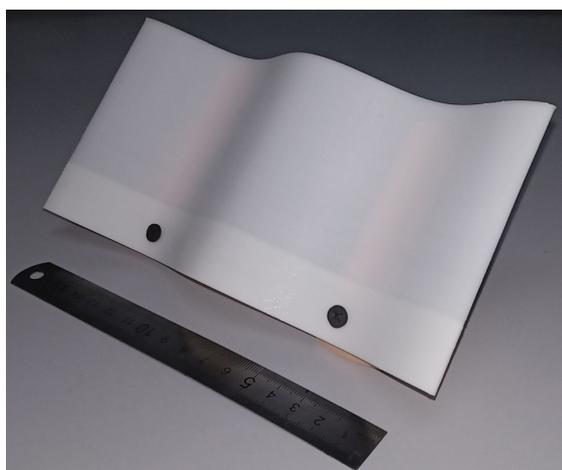
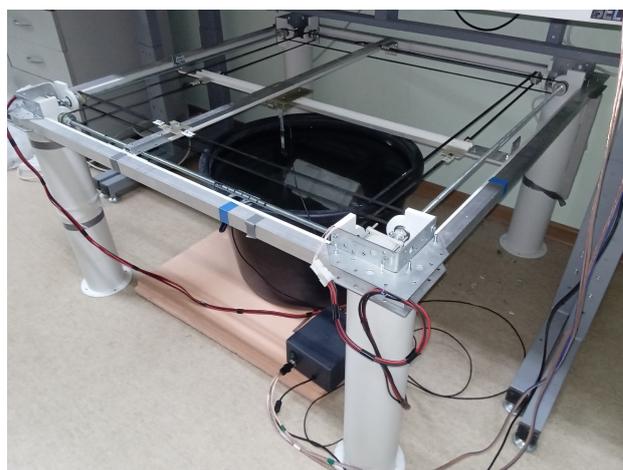


Рис. 3. Восстановленное томографическое изображение рассеивающих объектов (а – результат, полученный методом RTM; б – результат, полученный предложенным методом высокого разрешения)
Fig. 3. Reconstructed tomographic image of scattering objects (a – result obtained by the RTM method; b – result obtained by the proposed high-resolution method)



а



б

Рис. 4. Фотография тестового объекта (а) и экспериментальной установки (б)
Fig. 4. Photograph of the test object (a) and experimental setup (b)

новленное изображение рассеивающего объекта в виде точечных объектов по результатам численного моделирования методом RTM. На рис. 3, б отражен результат восстановления изображения предложенным методом высокого разрешения.

Видно, что рассеивающие объекты визуализируются как методом RTM, так и предложенным методом высокого разрешения. Однако визуализированное изображение рассеивающих объектов предлагаемым методом имеет более высокое разрешение (рис. 3, б).

4. Экспериментальная проверка метода

Для экспериментальной проверки предложенного метода восстановления томографического изображения рассеивающего объекта в воде была

собрана экспериментальная установка, состоящая из двухкоординатного сканера с установленным на нем ультразвуковым приемным датчиком. В емкость с водой помещались излучатель ультразвуковых сигналов с центральной частотой 200 кГц и рассеивающий объект в виде изогнутой синусоидальной поверхности из PLA пластика. Ультразвуковой приемник погружался в воду и перемещался по плоскости сканирования посредством сканера. В каждой точке пространственного сканирования с шагом 1,875 мм сигнал в приемном датчике измерялся в течение 10 мс. Сканирование осуществлялось сигналами с линейной частотной модуляцией в диапазоне частот от 20 до 350 кГц. Фотография исследуемого объекта представле-

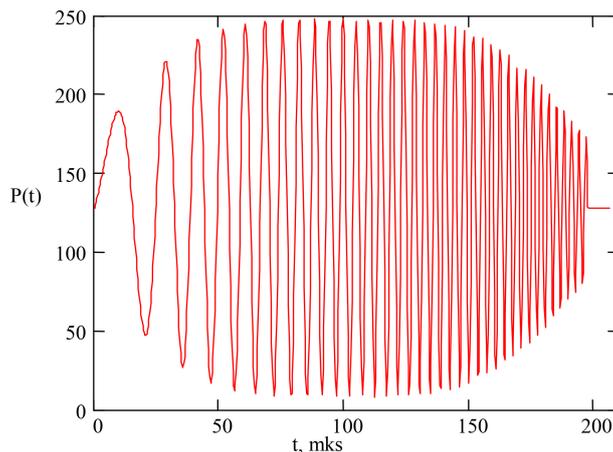


Рис. 5. Форма зондирующего сигнала (широкополосный сигнал в диапазоне частот от 20–350 кГц)
Fig. 5. Probing signal shape (broadband signal in the frequency range from 20–350 kHz)

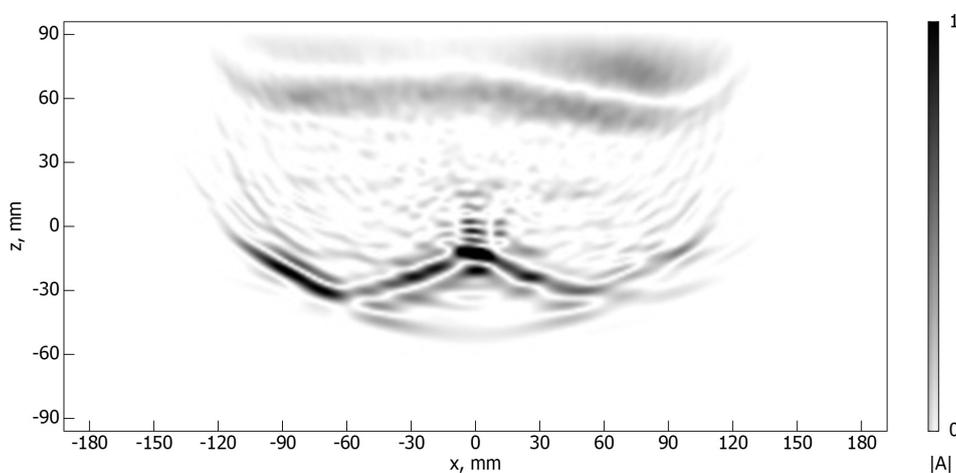


Рис. 6. Восстановленное томографическое изображение рассеивающего объекта в виде криволинейной синусоидальной поверхности
Fig. 6. Reconstructed tomographic image of a scattering object in the form of a curvilinear sinusoidal surface

на на рис. 4, а, а фотография экспериментальной установки – на рис. 4, б.

В качестве источника ультразвуковых сигналов в воду был помещен пьезокерамический излучатель диаметром 10 мм. Форма зондирующего сигнала показана на рис. 5.

Приемник, перемещаясь в области 240×240 мм, регистрировал рассеянное от исследуемого объекта поле. Измеренные данные вносились в разработанную численную модель. При комбинировании решения с положительным и отрицательным ходом времени (3) было восстановлено томографическое изображение рассеивающей неоднородности. На рис. 6 показан результат восстановления томографического изображения рассеивающего объекта по экспериментальным данным.

На изображении визуализируется криволинейная синусоидальная поверхность. Искажение изображения вызвано неточным согласованием

зондирующего сигнала с математически смоделированным. Тем не менее экспериментальные результаты подтверждают принципиальную применимость предложенного метода.

Заключение

Предложен метод акустической томографии высокого разрешения на основе обратной временной миграции, дополненного специальной предварительной фильтрацией сигнала поля прямого распространения. Метод учитывает влияние фоновых преломляющих неоднородностей среды. Поскольку рассматривается зондирование среды широкополосными сигналами, возможно получение трехмерных изображений рассеивающих объектов. Преимуществом предлагаемого метода является повышение разрешающей способности относительно метода RTM. Проведены экспериментальные исследования по визуализации

объекта, помещенного в воду, показавшие применимость предлагаемого метода. Зондирование проводилось в диапазоне частот от 20 до 350 кГц. Предложенный метод улучшает разрешение томо-

графических изображений и позволяет учитывать влияние препятствий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 20-32-90074.

Список литературы

- Recent advances in optical coherence tomography for the diagnoses of lung disorders / R. Hou [et al.] // *Expert Review of Respiratory Medicine*. 2011. Vol. 5, no. 5. P. 711–724. DOI: <https://doi.org/10.1586/ers.11.59>
- Detection of noncalcified and mixed plaque by multirow detector computed tomography / G. Foster [et al.] // *Expert Review of Cardiovascular Therapy*. 2009. Vol. 7, no. 1. P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.1586/14779072.7.1.57>
- Яцышен В.В., Слюсарев М.В. Ультразвуковая диагностика дефектов зоны сплавления в слоистых композиционных материалах // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2011. Т. 14, № 4. С. 103–105.
- Maev R.G., Green R.E., Siddiolo A.M. Review of advanced acoustical imaging techniques for nondestructive evaluation of art objects // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2006. Vol. 17, no. 4. P. 191–204. DOI: <https://doi.org/10.1080/09349840600981088>
- Methodology of nondestructive identification of defective concrete zones in unilaterally accessible massive members / T. Gorzelańczyk [et al.] // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2013. Vol. 19, no. 6. P. 775–786. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.812577>
- Passive ocean acoustic tomography in shallow water / F. Li [et al.] // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2019. Vol. 145, no. 5. P. 2823–2830. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.5099350>
- Andreeva T., Durgin W. Experimental investigation of the travel-time variance of an acoustic wave propagating through the grid-generated turbulence // *Waves in Random and Complex Media*. 2005. Vol. 15, no. 3. P. 365–374. DOI: <https://doi.org/10.1080/17455030500284170>
- Kozlov V.N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V.G. Thickness measurements and flaw detection in concrete using ultrasonic echo method // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 1997. Vol. 13, no. 2. P. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.1080/02780899708953020>
- Костин М.С. Моделирование системы радиолокационной виброметрии // *Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт*. 2013. № 3. С. 97–101.
- Виноградов В.Ю., Анфиногентов В.И. Восстановление параметров акустических полей, измеренных волоконной многосенсорной системой, на срезе сопла турбомшины // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2019. Т. 22, № 4-2. С. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.4.145-150>
- Антипенский Р.В., Любавский А.П., Разиньков С.Н. Применение вейвлет-преобразований для анализа рассеяния сверхширокополосных сигналов объектами сложной формы // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2018. Т. 21, № 2. С. 39–43. URL: <https://journals.ssau.ru/pwpp/article/view/7034>
- Зверев В.А. Принцип распространения акустических волн и голография // *Акустический журнал*. 2004. Т. 50, № 6. С. 792–801. URL: http://www.akzh.ru/pdf/2004_6_792-801.pdf
- Артельный П.В., Коротин П.И. Фокусировка колебательного поля в упругих системах конечных размеров методом обращения времени // *Акустический журнал*. 2010. Т. 56, № 1. С. 3–9. URL: http://www.akzh.ru/pdf/2010_1_3-9.pdf
- Derveaux G., Papanicolaou G., Tsogka C. Time reversal imaging for sensor networks with optimal compensation in time // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2007. Vol. 121, no. 4. P. 2071–2085. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.2536888>
- Time-reversal refocusing for point source in randomly layered media / J.-P. Fouque [et al.] // *Wave Motion*. 2005. Vol. 42, no. 3. P. 238–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2005.03.001>
- Exploring the potentials and limitations of the time-reversal imaging of finite seismic sources / S. Kremers [et al.] // *Solid Earth*. 2011. Vol. 2, no. 1. P. 95–105. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-2-95-2011>
- Stolt R.H. Migration by Fourier transform // *Geophysics*. 1978. Vol. 43, no. 1. P. 23–48. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440826>
- Andrade P.N., Pestana R.C., Revelo D.E. Reverse time migration in the frequency domain by the rapid expansion method // *Revista Brasileira de Geofísica*. 2017. Vol. 35, no. 4. P. 287–306. DOI: <https://doi.org/10.22564/rbgf.v35i4.916>
- Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Сверхширокополосная трехмерная радиоголография в стратифицированной среде // *Техническая физика*. 2014. Т. 59, № 12. С. 1854–1858.
- Суханов Д.Я., Завьялова К.В. 3D-радиотомография объектов, скрытых за диэлектрически неоднородными экранами // *Техническая физика*. 2015. Т. 60, № 10. С. 1529–1534.
- Baysal E., Kosloff D.D., Sherwood J.W.C. Reverse time migration // *Geophysics*. 1983. Vol. 48, no. 11. P. 1421–1560. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1441434>
- Depth imaging enhancement using reverse time migration / S.Y. Moussavi Alashloo [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 88, no. 1. P. 012017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/88/1/012017>

References

- Hou R. et al. Recent advances in optical coherence tomography for the diagnoses of lung disorders. *Expert Review of Respiratory Medicine*, 2011, vol. 5, no. 5, pp. 711–724. DOI: <https://doi.org/10.1586/ers.11.59>
- Foster G. et al. Detection of noncalcified and mixed plaque by multirow detector computed tomography. *Expert Review of Cardiovascular Therapy*, 2009, vol. 7, no. 1, pp. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.1586/14779072.7.1.57>

3. Yatsyshen V.V., Slyusarev M.V. Ultrasonic diagnostics of fusion zone defects in laminated composite materials. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2011, vol. 14, no. 4, pp. 103–105. (In Russ.)
4. Maev R.G., Green R.E., Siddiolo A.M. Review of advanced acoustical imaging techniques for nondestructive evaluation of art objects. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2006, vol. 17, no. 4, pp. 191–204. DOI: <https://doi.org/10.1080/09349840600981088>
5. Gorzelańczyk T. et al. Methodology of nondestructive identification of defective concrete zones in unilaterally accessible massive members. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, vol. 19, no. 6, pp. 775–786. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.812577>
6. Li F. et al. Passive ocean acoustic tomography in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, vol. 145, no. 5, pp. 2823–2830. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.5099350>
7. Andreeva T., Durgin W. Experimental investigation of the travel-time variance of an acoustic wave propagating through the grid-generated turbulence. *Waves in Random and Complex Media*, 2005, vol. 15, no. 3, pp. 365–374. DOI: <https://doi.org/10.1080/17455030500284170>
8. Kozlov V.N., Samokrutov A., Shevaldykin V.G. Thickness measurements and flaw detection in concrete using ultrasonic echo method. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1997, vol. 13, no. 2, pp. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.1080/02780899708953020>
9. Kostin M.S. Simulation of a radar vibrometry system. *T-Comm – Telekommunikatsii i transport*, 2013, no. 3, pp. 97–101. (In Russ.)
10. Vinogradov V.Yu., Anfingentov V.I. Reconstruction of the parameters of acoustic fields measured by a fiber multisensor system at the exit of a turbomachine nozzle. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2019, vol. 22, no. 4-2, pp. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.4.145-150> (In Russ.)
11. Antipenskiy R.V., Lyubavskiy A.P., Razin'kov S.N. Application of wavelet transforms to analyze the scattering of ultrawideband signals by objects of complex shape. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 39–43. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7034> (In Russ.)
12. Zverev V.A. Principle of propagation of acoustic waves and holography. *Akusticheskiy zhurnal*, 2004, vol. 50, no. 6, pp. 792–801. URL: http://www.akzh.ru/pdf/2004_6_792-801.pdf (In Russ.)
13. Artel'nyy P.V., Korotin P.I. Focusing of an oscillatory field in elastic systems of finite dimensions by the time reversal method. *Akusticheskiy zhurnal*, 2010, vol. 56, no. 1, pp. 3–9. URL: http://www.akzh.ru/pdf/2010_1_3-9.pdf (In Russ.)
14. Derveaux G., Papanicolaou G., Tsogka C. Time reversal imaging for sensor networks with optimal compensation in time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, vol. 121, no. 4, pp. 2071–2085. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.2536888>
15. Fouque J.-P. et al. Time-reversal refocusing for point source in randomly layered media. *Wave Motion*, 2005, vol. 42, no. 3, pp. 238–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2005.03.001>
16. Kremers S. et al. Exploring the potentials and limitations of the time-reversal imaging of finite seismic sources. *Solid Earth*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 95–105. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-2-95-2011>
17. Stolt R.H. Migration by Fourier transform. *Geophysics*, 1978, vol. 43, no. 1, pp. 23–48. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440826>
18. Andrade P.N., Pestana R.C., Revelo D.E. Reverse time migration in the frequency domain by the rapid expansion method. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2017, vol. 35, no. 4, pp. 287–306. DOI: <https://doi.org/10.22564/rbgf.v35i4.916>
19. Sukhanov D.Ya., Zav'yalova K.V. Ultra-wideband three-dimensional radioholography in a stratified environment. *Tekhnicheskaya fizika*, 2014, vol. 59, no. 12, pp. 1854–1858. (In Russ.)
20. Sukhanov D.Ya., Zav'yalova K.V. 3D radio tomography of objects hidden behind dielectrically inhomogeneous screens. *Tekhnicheskaya fizika*, 2015, vol. 60, no. 10, pp. 1529–1534. (In Russ.)
21. Baysal E., Kosloff D.D., Sherwood J.W.C. Reverse time migration. *Geophysics*, 1983, vol. 48, no. 11, pp. 1421–1560. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1441434>
22. Moussavi Alashloo S.Y. et al. Depth imaging enhancement using reverse time migration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 88, no. 1, p. 012017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/88/1/012017>

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2023, vol. 26, no. 1, pp. 70–78

DOI 10.18469/1810-3189.2023.26.1.70-78

Received 24 November 2022
Accepted 26 December 2022

High resolution acoustic tomography based on backpropagation of waves

Dmitry Ya. Sukhanov , Anzhela E. Kuzovova

National Research Tomsk State University
36, Lenin Ave.,
Tomsk, 634050, Russia

Abstract – A method of high-resolution acoustic tomography of scattering inhomogeneities based on the method of reverse time migration is proposed. An inhomogeneous background medium with a known distribution of refractive inhomogeneities is

considered, where it is necessary to detect scattering inhomogeneities. Probing is carried out by broadband arbitrary waveforms. The method of reverse time migration is supplemented with linear filtering of the direct propagation field, which makes it possible to increase the resolution of reconstructed images. The results of numerical modeling and experiment are presented. Sounding was carried out in water at frequencies from 20 to 350 kHz using a signal with linear frequency modulation. The source of the ultrasonic signal was fixed and irradiated the objects under study in the water. The scattered signal was measured in a plane near the surface in water on a rectangular area with a step of less than 2 mm. Signal processing by the proposed method made it possible to reconstruct a three-dimensional image of scattering inhomogeneities with a resolution of about 7 mm. Comparison of the proposed method and the reverse time migration method showed that the proposed method allows obtaining a higher resolution.

Keywords – wave equations; acoustic tomography; numerical simulation; finite difference time methods; reverse time migration.

Информация об авторах

Суханов Дмитрий Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия.

Область научных интересов: волновая томография, акустика, цифровая обработка сигналов.

E-mail: sdy@mail.tsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0805-4543>

Кузцова Анжела Евгеньевна, аспирант кафедры радиофизики Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия.

Область научных интересов: акустическая томография, акустика, восстановление изображений.

E-mail: ang_kuz93@mail.ru

Information about the Authors

Dmitry Ya. Sukhanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of the Department of Radiophysics, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

Research interests: wave tomography, acoustics, digital signal processing.

E-mail: sdy@mail.tsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0805-4543>

Anzhela E. Kuzovova, postgraduate student of the Department of Radiophysics, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

Research interests: acoustic tomography, acoustics, image restoration.

E-mail: ang_kuz93@mail.ru

РЕКЛАМА

Неганов, В.А.

Теория и применение устройств СВЧ: учебн. пособие для вузов / В.А. Неганов, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.



ISBN 5-256-01812-4

УДК 621.396.67

ББК 32.840

Н 41

В учебном пособии рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, согласующих и трансформирующих устройств, фильтров, фазовращателей, аттенюаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах (умножителей, смесителей, переключателей, выключателей). Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, измерительной аппаратуре и т. д. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Учебное пособие может использоваться как справочник по устройствам СВЧ.

Для специалистов в области теории и техники СВЧ, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов старших курсов радиотехнического и радиофизического профиля.