

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.8

ДИСТАНЦИОННАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ
ЗВУКОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ЧЕРЕЗ ВОЗДУХ

© 2014 г. Д. Я. Суханов, М. А. Калашникова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Национальный исследовательский Томский государственный университет”

634050 Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 25.02.2012 г.

Предлагается метод получения ультразвуковых изображений объектов, излучающих ультразвуковые акустические волны в воздухе. Изображения объектов восстанавливаются путем пространственно-согласованной фильтрации амплитудно-фазового распределения ультразвукового поля, измеренного в плоской прямоугольной области на некотором расстоянии от исследуемого излучающего объекта. Измерения поля производятся на различных частотах в широкой полосе, что позволяет путем обработки в широкой полосе частот снизить уровень шума и артефактов на восстанавливаемых изображениях.

Ключевые слова: акустическая голография, синтез апертуры, звуковидение.

DOI: 10.7868/S0320791914030162

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковой дистанционный контроль качества в иммерсионной среде применяется в случаях, когда объект исследования имеет сложную форму и не допускает плотного контакта с ультразвуковым датчиком. Распространены методы [1] ультразвуковой визуализации и дефектоскопии, использующие погружение объекта в воду или другую звукопроводящую жидкость. Иммерсионные методы не требуют прикладывания датчиков к объекту, однако не все объекты допустимо погружать в иммерсионную жидкость. Перспективным направлением дистанционного ультразвукового контроля является использование атмосферного воздуха в качестве среды передачи волны от объекта к датчикам ультразвукового поля. В работе [2] предложена методика исследования алюминиевой плоскопараллельной пластины бесконтактным локационным способом через воздух; путем численного моделирования показана возможность обнаружения внутреннего дефекта. Данный подход удобен, но коэффициент отражения от границы раздела воздух–твердое тело стремится к единице, поэтому при технической реализации систем, исследующих внутреннюю структуру объекта, возникают сложности измерения маломощного полезного сигнала на фоне сигнала, отраженного от поверхности объекта. В случае если сам объект является источником звука, его внутренние неоднородности будут влиять на колебания его поверхности [3] и излучаемое им поле, что может быть использовано для исследования внутренней структуры.

Восстановление изображения колебаний поверхности объекта на основе дистанционных измерений звукового поля в воздухе позволит осуществлять дистанционную дефектоскопию. Для восстановления изображения вибрирующей поверхности разработан ряд методов звуковой голографии [4–11]. В работах [4–6] предложен метод восстановления изображения излучающего объекта с помощью обращения времени и расчета обратного распространения волнового поля; такой подход позволяет восстанавливать изображения объектов с разрешением, близким к дифракционному пределу. Для получения разрешения, превосходящего дифракционный предел, разработаны методы голографии ближнего поля [7–11]. Преодоление дифракционного предела возможно благодаря фокусировке неоднородных волн, которые имеют значительные амплитуды в ближней зоне, однако в дальней зоне данные методы становятся слабо устойчивыми к шумам измерений. В ряде задач дефектоскопии вполне достаточно визуализировать звукоизлучающий объект с разрешением порядка длины волны. При разработке методов контроля состояния работающих машин и механизмов необходимо решить задачу восстановления изображения нестационарного источника звука. В данном случае существует проблема сохранения временной когерентности и измерения фазы волнового поля. Однако, если измерения поля производятся одновременно в разных точках пространства, то возможно сохранение пространственной коге-

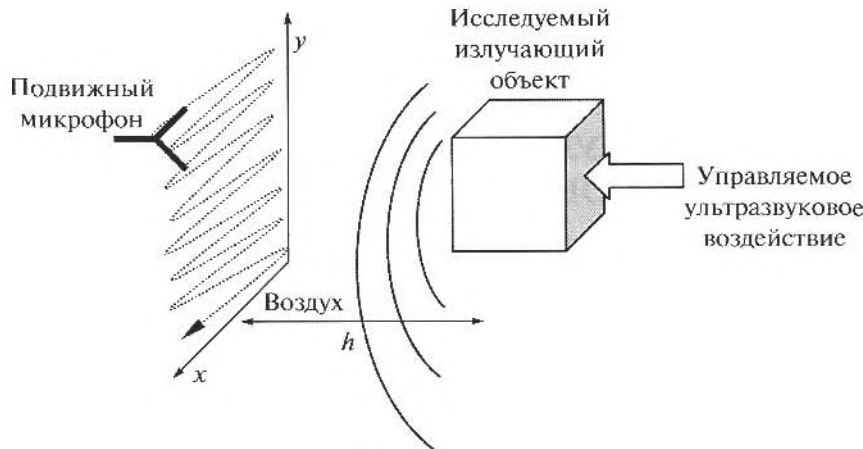


Рис. 1. Измерение поля колебаний воздуха в случае управляемых колебаний звукоизлучающего объекта.

рентности. Задача визуализации импульсного источника решена в работе [12] на основе принципа обращения времени и интеграла Рэля. В работе [13] рассматривается случай излучателя шумового сигнала. Широкий спектр шумового сигнала позволяет минимизировать уровень артефактов. Источником такого сигнала может являться любой процесс, вызывающий вибрации исследуемого объекта. Восстановление изображений шумоподобных источников находит применение в бесконтактной диагностике работающих двигателей [14].

В настоящей работе предлагается метод для бесконтактной визуализации колеблющихся областей на поверхности звукоизлучающего объекта по измерениям поля в дальней зоне в широкой полосе частот. Восстановление изображения производится на основе пространственно-согласованной фильтрации результатов измерений амплитудно-фазового распределения ультразвукового волнового поля в воздухе на некотором расстоянии от объекта с добавлением нелинейной обработки широкополосного сигнала. Преодоление дифракционного предела не предполагается.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Предлагается измерять временную зависимость поля колебаний воздуха на некотором расстоянии h от звукоизлучающего объекта в плоской прямоугольной области. В случае если колебания исследуемого звукоизлучающего объекта возбуждаются с помощью контролируемого источника ультразвуковых колебаний (рис. 1), допустимо измерять ультразвуковое поле последовательно в различных точках плоской прямоугольной области, используя единственный приемник. При этом в каждой позиции приемника необходимо повторять ультразвуковое воздействие на объ-

ект, что должно позволить сохранить пространственную когерентность в измеряемых сигналах.

В случае если ультразвуковыми колебаниями излучающего объекта невозможно управлять, необходимо производить одновременные измерения ультразвукового поля в воздухе с применением матрицы приемников для обеспечения пространственной когерентности измеренных сигналов.

Результатом измерения являются временные зависимости ультразвуковых колебаний давления воздуха $P(\mathbf{r}, t)$ в различных точках прямоугольной области, удаленной на расстояние h от исследуемого объекта, где $\mathbf{r} = (x, y, 0)$ – координаты измерения поля.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Для восстановления изображений звукоизлучающих объектов по измеренному акустическому полю в воздухе на расстоянии h от объекта предлагается перейти в частотную область и рассматривать вместо $P(\mathbf{r}, t)$ комплексную амплитуду поля в области измерений, которую обозначим функцией

$$U(\mathbf{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\mathbf{r}, t) \exp(i\omega t) dt.$$

Восстановление изображения звукоизлучающего объекта можно осуществить с помощью метода обратного распространения волн, описанного в работе [5]. Для упрощения решения допустимо пренебречь медленно меняющимися амплитудными множителями в функции Грина, поскольку основное влияние на результат обработки оказывают фазовые соотношения. Таким образом, восстанов-

ленно изображение звукоизлучающего объекта на частоте ω можно записать в виде

$$W(\mathbf{r}', \omega) = \iint_S U(\mathbf{r}, \omega) \exp(-ik|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|) dx dy, \quad (1)$$

где $k = \omega/c$, c — скорость звука в воздухе, $\mathbf{r}' = (x', y', h)$ — точка фокусировки в области размещения объекта, $W(\mathbf{r}', \omega)$ — величина, пропорциональная комплексной амплитуде колебаний давления воздуха вблизи исследуемого объекта.

Выражение (1) по сути является операцией пространственно-согласованной фильтрации, где $\exp(-ik|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|)$ — это согласованный фильтр — функция, сопряженная реакции на точечный источник.

Выражение (1) является изображением объекта на одной частоте. Однако на одной частоте на вибрирующих поверхностях, как правило, имеются узлы и пучности стоячих волн. В области узлов излучение объекта в воздух минимально, а значит, эти области объекта не будут визуализированы. Но на других частотах появляется другая картина узлов и пучностей. Необходимо совмещение результатов восстановления изображений звукоизлучающего объекта на различных частотах таким образом, чтобы все звукоизлучающие области объекта были визуализированы. Если просто проинтегрировать $W(\mathbf{r}', \omega)$ по частоте, то будет визуализирована только точка управляемого ультразвукового воздействия, если фаза отсчитывается от сигналов излучателя. Остальные точки объекта не будут визуализированы, поскольку для них суммирование на различных частотах будет несинфазным.

Чтобы визуализировать все области звукоизлучающего объекта, предлагается осуществлять нелинейную обработку сигнала путем интегрирования модуля восстановленных монохроматических изображений $|W(\mathbf{r}, \omega)|$ по всей полосе частот возмущающего воздействия (от ω_{\min} до ω_{\max}):

$$A(\mathbf{r}) = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |W(\mathbf{r}, \omega)| d\omega. \quad (2)$$

При интегрировании в выражении (2) не учитывается фаза комплексной амплитуды $W(\mathbf{r}, \omega)$, что позволяет выделить области, где происходят колебания и где нет колебаний на всех частотах. На отдельных частотах в узлах стоячих волн колебания будут отсутствовать, однако для каждой частоты положение узлов и пучностей различно, поэтому при интегрировании (2) области узлов стоячих волн на одних частотах будут складываться с пучностями стоячих волн на других частотах. Таким образом, на изображении $A(\mathbf{r})$ значения большой амплитуды представляют области объекта, которые вибрируют, а значения малой ам-

плитуды представляют области, до которых вибрации не доходят вследствие разрывов в материале или других особенностей. Трещины и разрезы в тонких пластинах, напротив, вибрируют сильнее центральных областей и будут видны на $A(\mathbf{r})$ как области большой амплитуды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования производились в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1. Для измерения поля использовался ультразвуковой пьезокерамический микрофон MuRata MA40S4R диаметром 1 см с рабочей полосой частот от 37 до 43 кГц, который был установлен на двухкоординатное позиционирующее устройство с областью сканирования 30 см × 30 см (рис. 2а) и шагом сканирования 1 мм. В качестве тестового объекта использовались две пластины из латуни (рис. 2б, 2в) размером 75 мм × 120 мм, толщиной 0.5 мм, на одной из пластин был сделан надрез длиной 43 мм, на рис. 3в надрез выделен окружностью. Исследуемые объекты размещались на расстоянии 150 мм от области измерений звукового поля. Влиянием отражений от посторонних объектов можно пренебречь, поскольку они находятся вне диаграммы направленности микрофона.

Для возбуждения колебаний пластины использовался ультразвуковой излучатель MuRata MA40S4S, который был прижат к пластине в центре. На излучатель подавался непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией с полосой линейного нарастания частоты от 37 до 43 кГц с периодом повторения 200 мс. Было измерено поле, излучаемое пластиной без дефекта, в прямоугольной области на расстоянии 15 см от объекта в полосе частот от 37 до 43 кГц. Результат измерений поля колебаний воздуха на расстоянии 15 см для пластины без дефекта на частоте 40 кГц представлен на рис. 3 (представлена косинусная квадратура). Данные измерений в полосе 37–43 кГц были обработаны с помощью формулы (2). Результат обработки представлен на рис. 4. Можно видеть, что особо выделяются края пластины, а также область приложения ультразвукового излучателя. Полученный результат свидетельствует о возможности обнаружения вибрирующих частей объекта с помощью предложенного метода.

В следующем эксперименте в качестве тестового объекта использовалась пластина с надрезом. Результат измерения поля колебаний воздуха на расстоянии 15 см на частоте 40 кГц представлен на рис. 5. После обработки согласно формуле (2) было получено изображение (рис. 6).

На восстановленном изображении можно видеть появление неоднородности в области надреза пластины. Область надреза вибрирует анало-

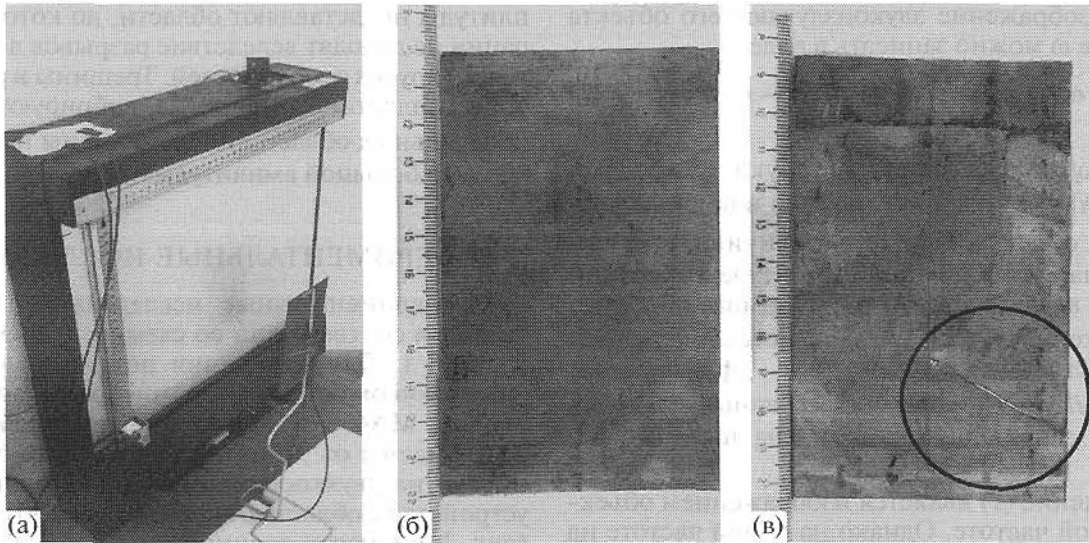


Рис. 2. Фотографии экспериментальной установки и тестовых объектов (пластины из латуни толщиной 0.5 мм), (а) экспериментальная установка, (б) пластина без дефекта, (в) пластина с надрезом.

гично краям пластины, в результате чего ее можно обнаружить, восстанавливая амплитуду поля колебаний воздуха вблизи пластины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследован метод получения изображений звукоизлучающих объектов через воздух в широкой полосе частот. Восстановление изображения осуществляется на основе обратного распространения волн для амплитудно-фазового распределения колебаний воздуха на

некотором расстоянии от вибрирующего объекта и суммирования амплитуд восстановленного поля на различных частотах. Экспериментально показана возможность восстановления звукового изображения распределения колебаний вибрирующей пластины на примере пластин из латуни толщиной 0.5 мм с надрезом и без надреза. На восстановленных изображениях можно различить вибрирующие области, в том числе область надреза. Таким образом, предложенный метод в ряде случаев может быть использован для дистан-

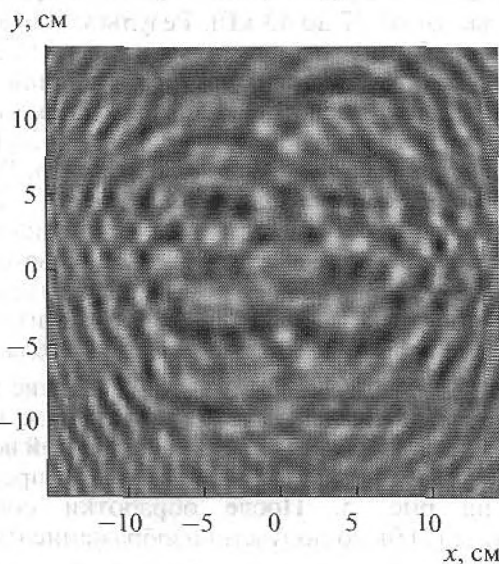


Рис. 3. Косинусная квадратура поля в области измерений на частоте 40 кГц для пластины без дефектов.

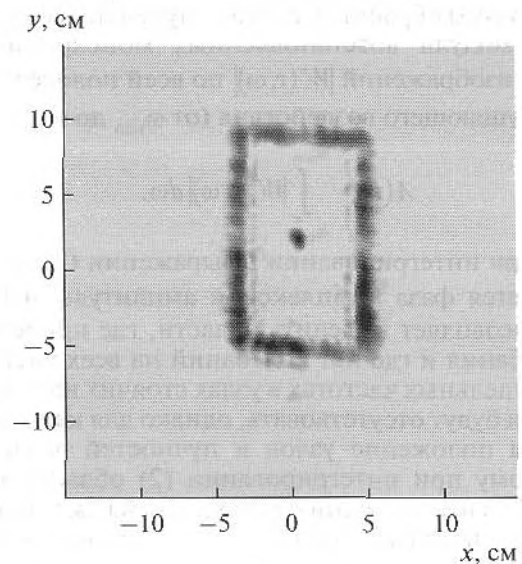


Рис. 4. Восстановленное изображение пластины без дефектов.

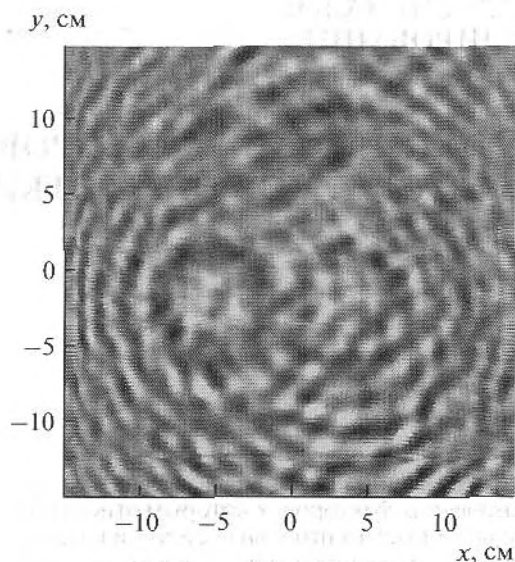


Рис. 5. Косинусная квадратура поля в области измерений на частоте 40 кГц для пластины с дефектом в виде надреза.

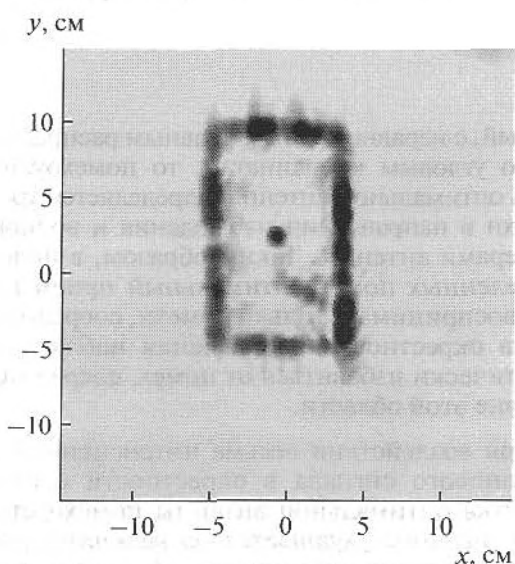


Рис. 6. Восстановленное изображение пластины с дефектом.

ционного контроля качества и исследования состояния звукопроводящих конструкций.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы в рамках мероприятия 1.2.2 (НК-104П/2) и 1.3.1 (НК-181П/6), а также при поддержке АВЦП “Развитие научного потенци-

ала высшей школы” мероприятие 2, проект № 2.1.2/3339, и при поддержке ФЦП, мероприятие 1.1 “Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров”, ГК № 14.740.11.0076 от 06.09.2010 (2010–2012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грегуш П. Звуковидение. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 232 с.
2. Delrue S., Abeele K., Blomme E., Deveugele J., Lust P., Bou Matar O. Two-dimensional simulation of the single-sided air-coupled ultrasonic pitch-catch technique for non-destructive testing // Ultrasonics. 2010. V. 50. P. 188–196.
3. Данилов В.Н., Ямщиков В.С. О возможностях использования поверхностных волн на дефекте для целей ультразвуковой дефектоскопии // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 6. С. 754–760.
4. Зверев В.А. Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.
5. Сапожников О.А., Пищальников Ю.А., Морозов А.В. Восстановление распределения нормальной скорости на поверхности ультразвукового излучателя на основе распределения акустического давления вдоль контрольной плоскости // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 3. С. 416–424.
6. Stepanishen P.R., Benjamin K.S. Forward and backward projection of acoustic fields using FFT methods // J. Acoust. Soc. Am. 1982. V. 71. P. 803–812.
7. Williams E.G., Maynard J.D. Holographic imaging without the wavelength resolution limit // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 554–557.
8. Williams E.G. Fourier Acoustics: Sound Radiation and NAH. London: Academic, 1999.
9. Hald J. STSD – a unique technique for scan-based near-field acoustic holography without restrictions on coherence // Brüel & Kjaer Technical Review. 1989. № 1.
10. Williams E.G., Houston B.H., Herdic P.C., Raveendra S.T., Gardner B. Interior near-field acoustical holography in flight // J. Acoust. Soc. Am. 2000. V. 108. P. 1451–1463.
11. Kang S.-C., Ih J.-G. Use of non-singular boundary integral formulation for reducing errors due to near-field measurements in the boundary element method based near-field acoustic holography // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 109, P. 1320–1328.
12. Сапожников О.А., Пономарев А.Е., Смагин М.А. Нестационарная акустическая голография для реконструкции скорости поверхности акустических излучателей // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 3. С. 385–392.
13. Gardner B.K., Bernhard R.J. A noise source identification technique using an inverse Helmholtz integral equation method // ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design. 1988. V. 110. P. 84–90.
14. Hald J. Use of Non-Stationary STSF for the analysis of transient engine noise radiation // Brüel & Kjaer Skodsborgvej 307, DK-2850 Naerum, Denmark, 1999.