

УДК 534.6

Д.Я. СУХАНОВ, Н.Н. ЕРЗАКОВА

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗВУКОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ ПО МНОГОПОЗИЦИОННЫМ ШИРОКОПОЛОСНЫМ ДИСТАНЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ¹

Предлагается метод визуализации широкополосного источника звука по дистанционным многопозиционным измерениям акустических сигналов в воздухе, основанный на методе пространственно-согласованной фильтрации. Рассматривается возможность определения дальности до объекта. Приводятся результаты экспериментальных исследований по визуализации вибрирующей прямоугольной пластинки в диапазоне частот 10–30 кГц, которые подтверждают возможность визуализировать форму источника акустических волн.

Ключевые слова: ультразвук, видение, вибродиагностика.

Введение

В связи с развитием средств автоматизации производства требуется внедрение технологий автоматизированного контроля качества производимой продукции, а также контроля состояния технологического оборудования. Одним из наиболее простых методов контроля состояния технологических линий является метод виброакустической диагностики [1–3]. Данный метод позволяет определять состояние работающих механизмов по спектрам акустических сигналов, излучаемых ими. Если спектр сигнала начинает меняться, то это говорит об отклонении режима работы механизма от нормы в результате поломки или износа деталей. Однако существующие технологии, в основном, требуют контактного измерения колебаний объекта и не позволяют дистанционно визуализировать звукоизлучающий объект.

В данной работе предлагается бесконтактный метод визуализации источника акустических волн в воздухе по дистанционным многопозиционным сверхширокополосным измерениям звукового поля.

Постановка задачи и математическая модель

Рассмотрим следующую схему измерений (рис. 1). Считаем, что область измерения звукового поля плоская и находится на некотором расстоянии от звукоизлучающего объекта.

Измерения поля происходят одновременно на всей области. Под полем понимается отклонение давления воздуха. В результате измеряется сигнал $U(x, y, t)$, содержащий информацию о колебаниях давления воздуха в зависимости от времени в различных точках области измерений. Запишем поле в точке измерения, исходя из решения в запаздывающих потенциалах [4].

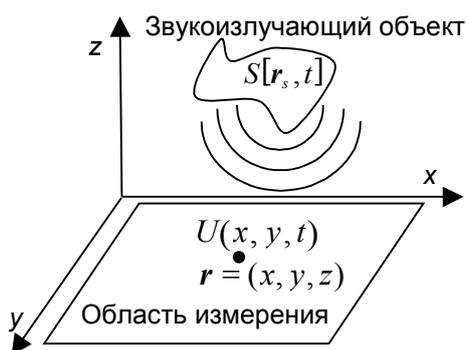


Рис. 1. Схема измерений

$$U(x, y, t) = \int \int \int_{x_s, y_s, z_s} \frac{S\left[r_s, t - \frac{r}{c}\right]}{r} dr_s, \quad (1)$$

где $S[r_s, t]$ – сигнал, излучаемый различными точками

объекта; $r = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s| = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}$ – расстояние от рассматриваемой точки объекта до точки

измерения; $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, z_s)$ – точка объекта; $\mathbf{r} = (x, y, z)$ – точка измерения на плоскости $z = \text{const}$;

$U(x, y, t)$ – поле в приёмнике. В выражении (1) не учитываются постоянные множители.

На основе обработки многомерного сигнала $U(x, y, t)$ необходимо восстановить изображение звукоизлучающего объекта. В общем случае различные точки объекта излучают различные сигналы, более того, форма сигнала априорно не известна. Введём некоторые допущения. Будем счи-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ в рамках проекта № 12-02-31470 мол_а.

тать, что объект плоский и расположен параллельно области измерений. Тогда запишем спектр сигнала в области измерений через интеграл Релея [4] с точностью до постоянных множителей:

$$\tilde{U}(x, y, \omega) = \iint_{x_s, y_s} \tilde{S}[x_s, y_s, \omega] \frac{\exp[ikr]}{r} dx_s dy_s, \quad (2)$$

где $\tilde{S}[x_s, y_s, \omega]$ – спектр сигнала в точке $(x_s, y_s, z_s = \text{const})$ излучателя; $k = \omega/c$ – волновое число; $r = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}$; $(z - z_s) = \text{const} = h$.

Согласно формуле (2), было проведено численное моделирование поля источника формы, изображённой на рис. 2, а. В численной модели предполагалась частота излучения 40 кГц. Также предполагалось, что фаза излучения в каждой точке различна и хаотично равномерно распределена от $-\pi$ до $+\pi$. Результат численного моделирования поля на расстоянии 15 см от излучателя представлен на рис. 2, б.

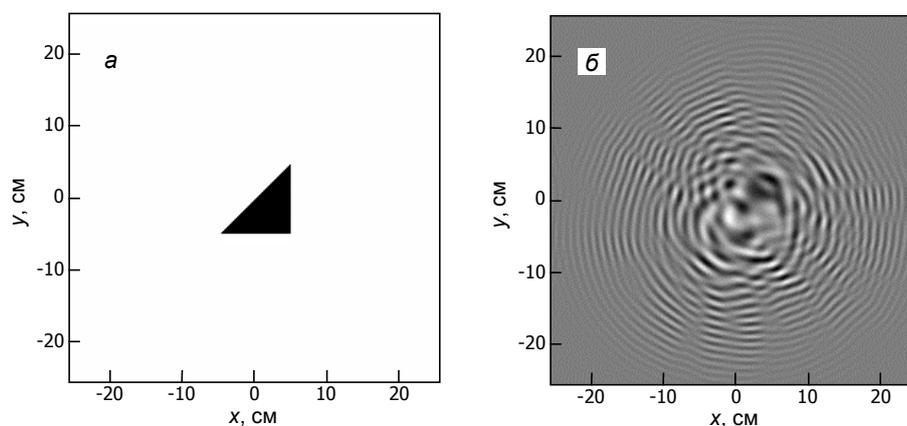


Рис. 2. Изображение тестового объекта и результат решения прямой задачи на частоте 40 кГц: а – изображение моделируемого звукоизлучающего объекта; б – поле на расстоянии 15 см от звукоизлучающего объекта

Восстановление изображения звукоизлучающего объекта

Под изображением звукоизлучающего объекта подразумевается двумерная пространственная функция $P(x_s, y_s)$, уровни которой показывают наличие или отсутствие объекта в точке пространства (x_s, y_s) рассматриваемой плоскости z_s . То есть чем больше значения функции, тем вероятнее наличие объекта в рассматриваемой точке. В данном случае нельзя точно определить наличие или отсутствие звукоизлучающего объекта, поскольку объект негарантированно излучает звук в направлении измерительной системы или в диапазоне частот измерения. Колебания объекта на одной частоте, как правило, имеют характер стоячей волны, и, следовательно, имеются области узлов и пучностей. В областях узлов колебания минимальны и не передаются в воздушную среду. Эти области не могут быть визуализированы. Однако на других частотах области узлов и пучностей смещаются, что должно позволить визуализировать объект при использовании множества частот. Для восстановления изображения объекта на одной частоте предлагается использовать метод пространственно-согласованной фильтрации [3]:

$$\tilde{P}(x_s, y_s, \omega) = \iint_{x, y} \tilde{U}(x, y, \omega) \frac{\exp[-ikr]}{r} dx dy, \quad (3)$$

где интегрирование ведётся по области измерений поля. Результат восстановления изображения на частоте 40 кГц представлен на рис. 3, а. Можно видеть, что на изображении объекта имеются минимумы и максимумы – это связано с хаотичностью фазы колебаний объекта в пространстве. Выражение (3) может быть применено для различных частот и на каждой частоте будет получено изображение объекта. Необходимо объединить эти изображения таким образом, чтобы визуализировать объект без интерференционных минимумов и максимумов. Предлагается суммировать амплитуды изображений на различных частотах без учёта фазы:

$$P(x_s, y_s) = \sum_n \left| \tilde{P}(x_s, y_s, \omega_n) \right|, \tag{4}$$

где ω_n – n -я частота, на которой производилось измерение поля. Суммирование по амплитуде позволяет избежать необходимости синхронизовать фазу колебаний на различных частотах к общей точке отчёта времени, а также позволяет повысить однозначность изображения объекта. Было проведено численное моделирование хаотических колебаний объекта на 64 частотах в диапазоне 10–40 кГц. Результат применения формулы (4) представлен на рис. 3, б.

Формула (4) позволяет получить разрешение в плоскости сканирования при известной дальности до объекта. Возможно ли определить дальность до объекта по многопозиционным сверхширокополосным измерениям при отсутствии синхронизации между излучателем и приёмником? Если бы присутствовала синхронизация, то расстояние определялось бы просто по задержке распространения волны в воздухе, при известной скорости звука легко определяется дальность. Однако в рассматриваемой схеме измерений не предполагается наличие синхронизации. Сделаем несколько допущений относительно формы объекта, будем считать, что он плоский и параллелен плоскости измерений. Для определения расстояния до объекта предполагается использовать то свойство восстанавливаемых изображений, что при фокусировке на дальность, отличающуюся от расстояния до объекта, изображение объекта размывается, то есть его пространственный спектр сужается. Таким образом, расстояние до объекта можно определить перебором расстояний фокусировки, т.е. расстояние, при котором пространственный спектр будет самым широким, и будет являться расстоянием до объекта.

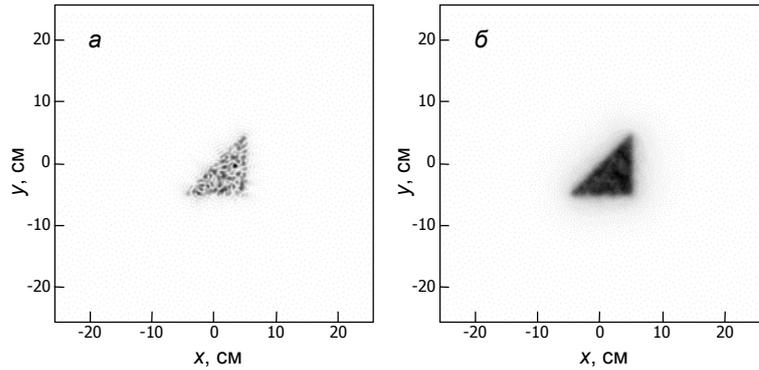


Рис. 3. Результат восстановления изображения объекта: а – восстановление изображения излучателя на частоте 40 кГц; б – восстановление изображения излучателя в полосе частот 10–40 кГц на 64 частотах

В качестве оценки ширины пространственного спектра предлагается выбрать величину

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \tilde{P}(k_x, k_y) \right| dk_x dk_y / \max \left(\left| \tilde{P}(k_x, k_y) \right| \right), \tag{5}$$

где $\tilde{P}(k_x, k_y)$ – пространственный спектр восстановленного изображения объекта; $\max(|\tilde{P}(k_x, k_y)|)$ – максимум модуля пространственного спектра.

Согласно формуле (5), была рассчитана зависимость ширины пространственного спектра от дальности фокусировки. Результаты расчётов представлены на рис. 4. Можно видеть отчётливый единственный максимум на дальности 15 см, которая соответствует дальности до объекта.

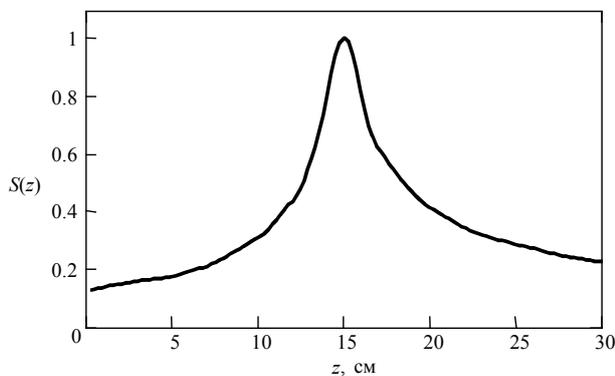


Рис. 4. Зависимость ширины пространственного спектра от дальности фокусировки

Представленный численный эксперимент показывает возможность визуализации звукоизлучающего объекта в широкой полосе частот, а так же возможность определения дальности до объекта. Заметим, что дальность до объекта будет возможно определить предложенным методом только до дальностей порядка размеров апертуры системы, поскольку на больших расстояниях разрешение системы ухудшается и даже при фокусировке на правильную дальность пространственный спектр восстановленных изображений будет узким.

Экспериментальные исследования

Для проверки предложенного метода и результатов численного моделирования было проведено экспериментальное исследование по визуализации звукоизлучающего объекта в воздухе (рис. 5). Звукоизлучающий объект представлял собой стеклотекстолитовую пластинку размерами 15×11 см с закреплённым на ней электродвигателем. На электродвигатель был закреплён металлический стержень, который при вращении двигателя периодически соударялся с пластинкой. Поскольку не было технической возможности проводить одновременные измерения звукового поля с помощью матрицы микрофонов, был применён механический сканер с подвижным микрофоном и один опорный микрофон. Подвижный микрофон перемещался в двумерной области 40×40 см и измерял звуковые колебания с шагом 5 мм. Одновременно с этим измерялся сигнал на выходе опорного микрофона. Из измеренных сигналов с помощью преобразования Фурье вычислялись амплитудно-фазовые значения поля на частотах от 10 до 30 кГц. Далее компоненты Фурье предметного поля умножались на комплексно-сопряжённые компоненты опорного поля, что, по сути, эквивалентно одновременным измерениям.

В результате эксперимента было измерено звуковое поле на 32 частотах от 10 до 30 кГц. На рис. 6 представлено измеренное поле на частоте 23 кГц.

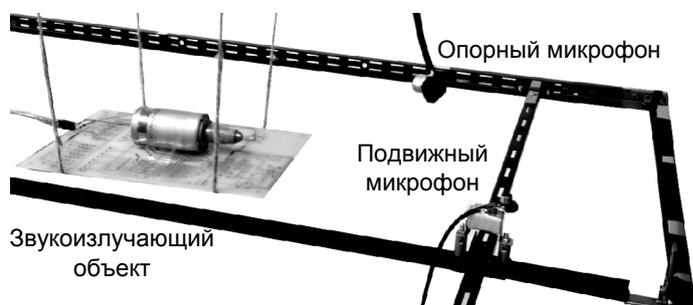


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки

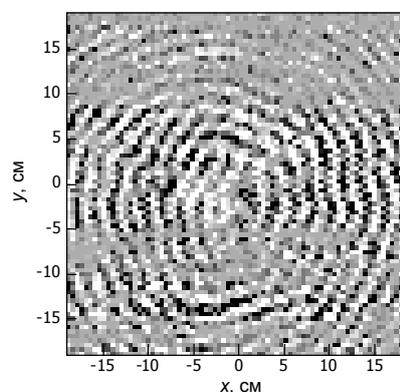


Рис. 6. Измеренное поле на частоте 23 кГц

С помощью формул (3) – (4) была проведена обработка данных измерений. На рис. 7, *а* представлен результат применения формулы (3) на частоте 23 кГц, а на рис. 7, *б* – результат применения формулы (4) в полосе частот 10–30 кГц.

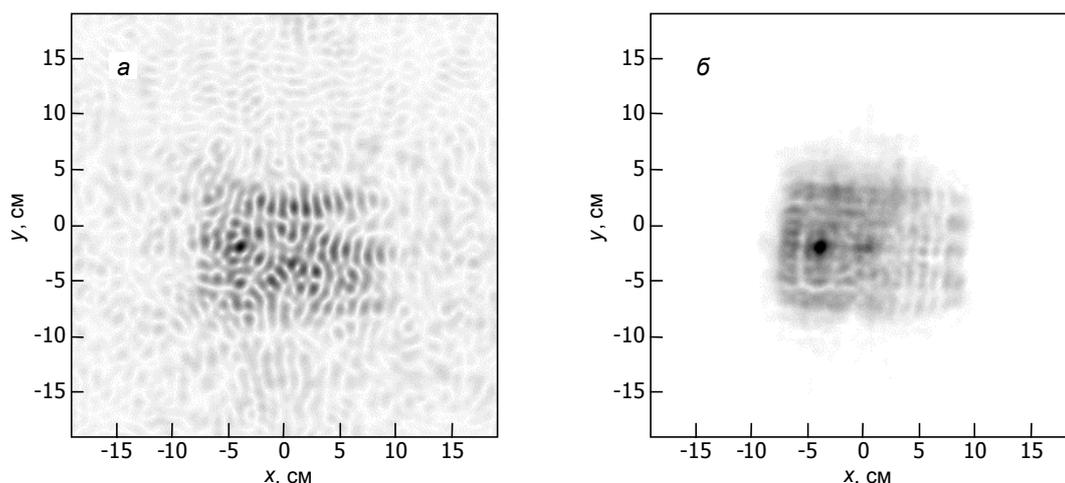


Рис. 7. Восстановленное изображение текстолитовой пластинки:
а – на частоте 23 кГц; *б* – в диапазоне 10–30 кГц на 32 частотах

Видно, что при восстановлении изображения источника на одной частоте получено распределение стоячих волн в пластине, которые имеют узлы и пучности. В узлах пластина не излучает, и там видны минимумы. На других частотах положение узлов и пучностей меняется, следовательно,

после суммирования по частотам будет получено изображение, где все звукоизлучающие части объекта визуализированы. Также на рис. 7, б видна точка воздействия электродвигателя на пластину. Разрешение полученного изображения оценивается по ширине области точечного воздействия двигателя и составляет 1 см.

С помощью формул (3) – (5) была рассчитана ширина пространственного спектра восстанавливаемых изображений при фокусировке на различные дальности (рис. 8). По графику видно, что максимум ширины пространственного спектра достигается на дальности 11,5 см, полученный результат совпадает с настоящей дальностью до объекта с точностью до 5 мм. Отметим, что в данном случае максимум единственный, но по нему можно судить о разрешающей способности по дальности. Если взять в качестве критерия разрешения полуширину реакции системы на точечный рассеиватель, то разрешающая способность по дальности составляет порядка 10 см. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность визуализации звукоизлучающего объекта, а также возможность определения дальности до объекта предложенным методом.

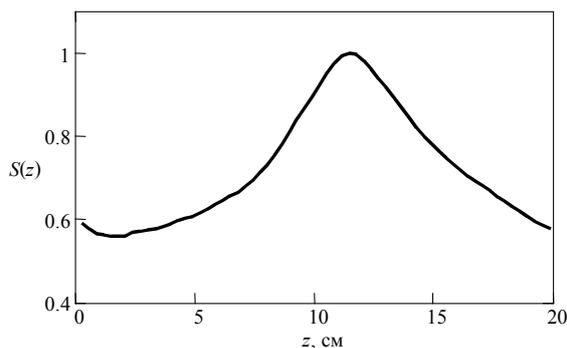


Рис. 8. Зависимость ширины пространственного спектра от дальности фокусировки для экспериментальных данных

Заключение

Предложен метод визуализации звукоизлучающих объектов в воздухе в широкой полосе частот. Также предложен метод определения дальности до объекта. Разработана численная модель метода, подтверждающая его применимость. Экспериментально подтверждена способность метода восстанавливать изображения звукоизлучающего объекта и дальность до него на примере вибрирующей стеклотекстолитовой пластинки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Алешин Н. П., Лупачев В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия: справочное пособие. – М.: Высшая школа, 1987. – 271 с.
3. Грегус П. Звуковидение: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
4. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. – М.: Наука, 1990.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: sdy@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.07.13.

Суханов Дмитрий Яковлевич, к.ф.-м.н., доцент;
Ерзакова Надежда Николаевна, студентка.

D.Y. SUKHANOV, N.N. YERZAKOVA

RECONSTRUCTION OF SOUND SOURCES USING MULTIPOSITION WIDEBAND REMOTE MEASUREMENTS OF THE SOUND FIELD

Proposed a method of visualization of broadband sound source for remote multi measure of acoustic signals in the air based on the analysis of space-matched filtering. The possibility of obtaining a permit for range. The results of experimental studies of visualization, vibrating rectangular plate in the frequency range of 10-30 kHz, which confirm the ability to visualize the shape of the source of acoustic waves.

Keywords: *ultrasound, vibrodiagnostics.*