

Метод интеграла Рэлея для исследования импульсных ультразвуковых источников

Д. А. Николаев,* С. А. Цысарь†

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

Для ряда задач при использовании импульсных ультразвуковых пучков важно уметь предсказывать акустическое поле, создаваемое излучателем. В данной работе рассматривается способ восстановления пространственно-временной структуры акустического поля на поверхности импульсных акустических источников.

PACS: 43.60.Sx, 43.60.Tj, 43.20.Ye УДК: 534.6.08, 534-14

Ключевые слова: акустическая голография, нестационарная голография, обращение волнового фронта.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании ультразвуковых пучков и их использовании чрезвычайно важно уметь точно предсказывать акустическое поле, создаваемое излучателем. Самым распространённым способом излучения ультразвуковых пучков является использование колеблющихся поверхностей (мембраны, пьезоэлектрические излучатели) [1]. Распределение колебательной скорости вдоль этой поверхности на практике неравномерно. Причинами этого могут служить дефекты излучателя, его структура, волны Лэмба, возникающие в пьезопластине [2]. Поэтому для того, чтобы узнать, как волна распространяется в пространстве, необходимо определить реальную структуру колебаний поверхности ультразвукового источника. Для ультразвуковых излучателей, работающих в жидкостях, наиболее удобным и точным методом измерения скорости колеблющейся поверхности является акустическая голография [2–4]. В акустике, в отличие от оптики, благодаря относительно низкой частоте колебаний, удаётся производить прямое измерение амплитуды и фазы в каждой точке поверхности, называемой голограммой. И это не единственное преимущество акустической голографии. Одно из них связано с возможностью в ряде случаев проводить измерения на небольших, по сравнению с длиной волны, расстояниях от источника. В этом случае удаётся зарегистрировать неоднородные волны, экспоненциально затухающие при удалении от излучающей поверхности. Данная техника называется акустическая голография «ближнего поля». Она позволяет получить пространственное разрешение, не ограниченное дифракционным пределом. Ещё одним достоинством акустической голографии является возможность её обобщения на случай импульсных источников, широко применяемых в неинвазивной УЗ хирургии [5].

Основная цель работы состоит в определении количественных параметров импульсных акустических полей путём разработки численного алгоритма решения обратной задачи излучения с применением метода нестационарной акустической голографии на основе интеграла Рэлея. В работе осуществляется экспериментальная верификация разработанного алгоритма на примере реального терапевтического фокусированного ультразвукового излучателя, работающего в импульсном режиме. На поверхности источника имеются искусственно созданные неоднородности распределения поля, которые восстанавливаются с разрешающей способностью, ограниченной лишь дифракционным пределом.

1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для определения оптимальных параметров системы сканирования предварительно была создана численная модель и проведены расчёты. При этом численно определяется акустическое давление $P(\mathbf{r}')$ в различных точках контрольной плоскости Σ_H . Исходное распределение нормальной скорости монохроматического излучателя в используемой модели выбирается равной $V_n(\Sigma_S) = 1$ на излучателе и нулю вне его. Полагая, что данные расчёты являются некоторым «виртуальным» экспериментом, по формуле:

$$P(\Sigma_H) = -\frac{i\omega\rho_0}{2\pi} \iint V(\Sigma_S) \frac{e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dS \quad (1)$$

вычислим значение амплитуды давления на поверхности Σ_H .

После получения значений амплитуды и фазы волны на их основе проводится решение обратной задачи излучения и восстановление значений амплитуды и фазы на исходной поверхности Σ_S , содержащей излучатель по формуле Рэлея с обращённым временем:

$$V_n(\mathbf{r}) = \iint P(\mathbf{r}') K(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS, \quad (2)$$

*E-mail: d.nikolaev@yandex.ru

†E-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru

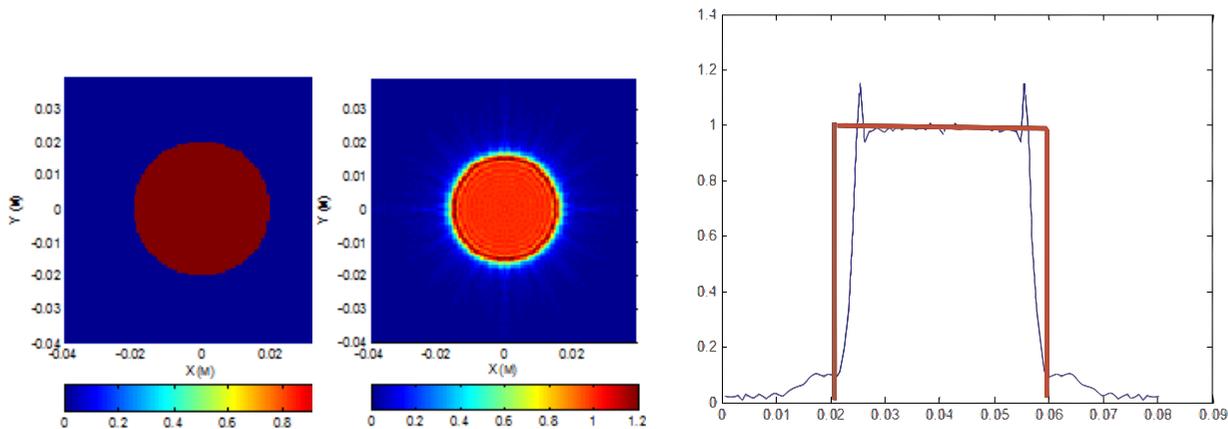


Рис. 1: Исходное распределение нормальной составляющей скорости на сферической излучающей поверхности (слева). Восстановленные значения амплитуды скорости из голограммы с дальности 1 см и с шагом сетки 0.75 мм (в центре). Зависимость амплитуды на диаметре излучателя (справа).

где

$$K(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-ikR}}{2\pi i \omega \rho_0} \left[(\mathbf{n}, \mathbf{n}') \left(\frac{1}{R^3} + \frac{i\omega}{cR^2} \right) - (\mathbf{n}, \mathbf{e}_R)(\mathbf{n}', \mathbf{e}_R) \left(\frac{3}{R^3} + \frac{3i\omega}{cR^2} - \frac{\omega^2}{c^2 R} \right) \right]. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены характерные результаты численного моделирования. Исходя из численного расчета, можно выбрать оптимальные параметры для снятия голограммы. Большее влияние на качество восстановления оказывает шаг сетки. Восстановление происходит достаточно хорошо при шаге сетки $h = 1$ мм (длина волны 1.5 мм). Расстояние до поверхности голограммы имеет меньшее влияние на качество восстановления. Восстановление одинаково удовлетворительно при расстояниях между плоскостями Σ_S и Σ_H порядка линейного размера излучателя. Размер поверхности измерений при этом составляет две апертуры излучателя.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе исследуется пьезокерамический вогнутый излучатель с нанесенным на его поверхность дефектом (рис. 2). Фокус излучателя $F = 10$ см. На преобразователь подается прямоугольный радиоимпульс с несущей частотой равной резонансной частоте излучателя $f = 1,092$ МГц и длительностью $\tau = 35.6$ мкс.

Схема установки представлена на рис. 3. Сигнал через усилитель подается на излучающую поверхность. С помощью гидрофона собирается информация о волне в плоскости голограммы. Далее с помощью интеграла Рэлея рассчитывается поле на излучателе.

В результате работы была разработан численный алгоритм решения обратной задачи излучения в случае нестационарных (импульсных) сигналов методом интеграла Рэлея. Работоспособность метода была провере-



Рис. 2: Пьезокерамический излучатель.

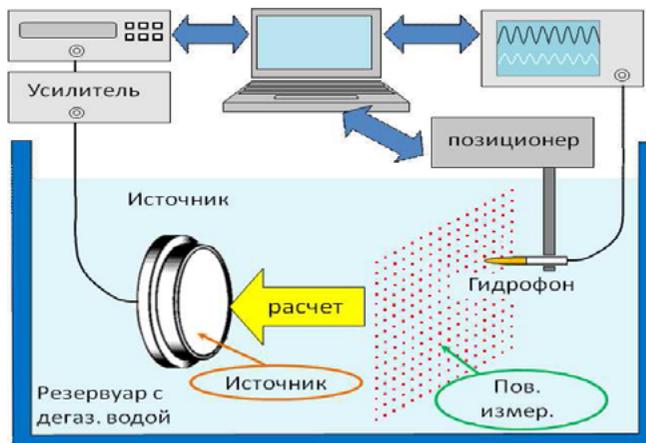


Рис. 3: Схема экспериментальной установки.

на как на численной модели, так и на реальном УЗ преобразователе.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-15-00665.

- [1] Шендеров Е. Л. Излучение и рассеяние звука. (Л.: Судостроение, 1989).
- [2] Сапожников О. А. Акуст. журн. **49**, № 3. С. 416. (2003).
- [3] Цысарь С. А. Акуст. журн. **57**, № 1, С. 104. (2011).
- [4] Зельдович Б. Я. Обращение волнового фронта. (М.: Наука, 1985).
- [5] Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Под ред. К. Хилла, Дж. Бэмбера, Г. Тер Хаар. Пер. с англ. под ред. Л. Р. Гаврилова, В. А. Хохловой, О. А. Сапожникова. (М.: Физматлит, 2008).

Rayleigh integral method for pulsed ultrasonic transducers characterization

D. A. Nikolaev^a, S. A. Tsysar^b

*Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^ad.nikolaew@yandex.ru, ^bsergey@acs366.phys.msu.ru

For a number of tasks when using pulsed ultrasonic beams it is important to be able to predict the acoustic field generated by the transducer. In this paper the method of reconstruction the space-time structure of the acoustic field on the surface of the acoustic pulse sources is proposed.

PACS: 43.60.Sx, 43.60.Tj, 43.20.Ye.

Keywords: acoustic holography, transient holography, wavefront reversal.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Николаев Дмитрий Александрович — студент; тел.: (985) 637-11-57, e-mail: d.nikolaew@yandex.ru.
2. Цысарь Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru.