

Нелинейная акустическая голография для исследования терапевтических источников мощного ультразвука

С. А. Цысарь^{1,*}, О. А. Сапожников^{1,2,†}, В. Крейдер²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Университет штата Вашингтон, Лаборатория прикладной физики, США, Сиэтл, 1013 NE 40th Street

(Статья поступила 17.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Представлен метод нелинейной акустической голографии для исследования мощных ультразвуковых источников и излучаемых ими полей. Метод основан на измерении двумерных распределений амплитуды и фазы акустического давления для гармоник, присутствующих в спектре сигнала. Полученные распределения используются для расчета обратного распространения акустического поля для математической реконструкции распределения колебательной скорости на поверхности источника. Нелинейные расчеты распространения поля основаны на численном решении волнового уравнения Вестерверльта. Разработанный метод нелинейной акустической голографии является эффективным инструментом для характеристики терапевтических источников ультразвука при работе на высоких мощностях, когда характеристики колебания поверхности источника могут значительно отличаться от вибрационных характеристик на низких уровнях мощности. В работе представлена основа численной модели для расчета нелинейного распространения акустического поля в условиях обращения времени, а также результаты физических экспериментов по нелинейной голографии реальных терапевтических источников.

PACS: 43.60.Sx, 43.60.Tj, 43.60.Wy УДК: 534.6.08

Ключевые слова: акустическая голография, терапевтический ультразвук, нелинейная акустика.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде областей науки, техники и медицины, особенно в задачах терапевтического применения ультразвука, важно знать точные характеристики излучаемого поля. Определение истинного распределения акустического поля на поверхности диагностических преобразователей (работающих при низкой интенсивности порядка единиц Вт/см²) может быть выполнено с использованием линейного метода акустической голографии [1]. Этот метод имеет хорошо развитый математический аппарат, основанный на методах Фурье-акустики [2] или применении интеграла Рэлея [1]. Линейная акустическая голография предполагает отсутствие нелинейных эффектов в среде, т. е. применима лишь для низкоинтенсивных полей, таких как диагностический ультразвук. В задачах ультразвуковой терапии используются источники, работающие при высокой интенсивности, и характер распространения излучаемых ими волн является нелинейным [3]. Иногда допустимо использовать предположение, что распределение акустического поля вдоль поверхности источника является не зависящим от мощности излучаемого сигнала. В этом случае применяется операция масштабирования, при которой проводятся линейные измерения в режиме малой мощности, с помощью процедуры линейной голографии восстанавливается распределение поля вдоль поверхности излучателя, а затем ам-

плитуда поля увеличивается до значений, соответствующих высокой мощности излучения, при сохранении найденной структуры поля на излучателе [4]. Полученные таким образом значения амплитуды и фазы поля в каждой точке на поверхности излучателя могут быть использованы в качестве граничных условий для решения прямой задачи излучения с учетом нелинейных эффектов в среде. Предположение о линейности электромеханического отклика преобразователя справедливо далеко не всегда, и распределение акустического поля вдоль поверхности источника, а, следовательно, и всего излучаемого поля в режиме высокой мощности не могут быть найдены простым масштабированием результатов линейной голографии, полученных в режиме низкой мощности. Причиной тому являются нелинейность электронного тракта и нелинейный отклик самого преобразователя, которые приводят к изменению характера распределения поля вдоль поверхности источника по сравнению с линейным случаем. В настоящей работе предлагается новый метод акустической голографии с нелинейным обратным распространением, называемый нелинейной акустической голографией [5].

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим постановку задачи нелинейной акустической голографии для мощных ультразвуковых источников (рис. 1). Имеется ультразвуковой преобразователь со следующими известными параметрами: форма, размер, положение, резонансная частота, мощность; и с неизвестным распределением акустического по-

*E-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru

†E-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

ля вдоль поверхности. С помощью измерения профиля волны акустического давления вдоль удаленной поверхности в большом количестве точек (голограммы на рис. 1) определяются значения амплитуды и фазы всех гармоник, присутствующих в спектре сигнала (для каждой точки измерения). Критерии выбора параметров поверхности измерений (размер, форма, положение относительно излучателя и др.) аналогичны критериям для случая линейной голографии [6], за исключением ограничения пространственных шагов Δx и Δy , которые определяются длиной волны высшей регистрируемой гармоники и выбираются из условия $\Delta x, y < \lambda/2$.

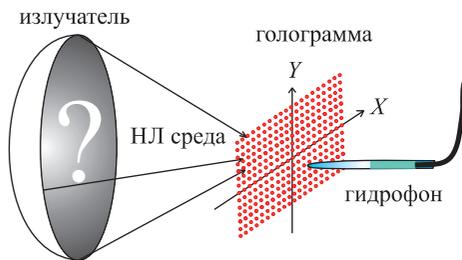


Рис. 1: Схема задачи

А. Теория

Далее задача сводится к тому, чтобы на основе измеренных комплексных амплитуд регистрируемых гармоник рассчитать неизвестное распределение акустического поля вдоль поверхности излучателя. Решение обратной нелинейной задачи излучения предлагается проводить численным образом с использованием трехмерного уравнения Вестервелта

$$\Delta p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\varepsilon}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} - \frac{b}{c_0^2 \rho_0} \Delta \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (1)$$

Здесь p — акустическое давление, t — время, $\Delta = \partial^2/\partial z^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial x^2$ — оператор Лапласа, x , y и z — пространственные координаты, ε — показатель нелинейности, $b = \xi + 4/3\eta$ — диссипативный коэффициент, ρ_0 — плотность среды, c_0 — скорость звука. Хорошо видно, что в отсутствие поглощения нелинейное уравнение (1) является инвариантным относительно процедуры обращения времени $t \rightarrow -t$, т. е. одинаковым образом описывает процессы как прямого, так и обратного распространения волны. С учетом поглощения уравнение уже не обладает инвариантностью относительно обращения времени. Это обстоятельство можно учесть в знаке диссипативного коэффициента, формально заменяя $b \rightarrow -b$ при обращении времени $t \rightarrow -t$. Заметим, что необходимость учёта поглощения не возникает, если голограмма измеряется на относительно небольших расстояниях от излучателя, до образования ударных фронтов. Такая ситуация имеет

место в большинстве практически интересных случаев. В этом случае последний член в уравнении (1) можно опустить.

В. Численная реализация метода

Таким образом, измеренные комплексные амплитуды гармоник являются граничными условиями для обратной задачи. Численное решение нелинейного уравнения (1) строится последовательно, переходя от плоскости $(x, y, z = z_1)$ к плоскости $(x, y, z = z_1 + \Delta z)$ с шагом Δz , следуя методу расщепления по физическим факторам [7]. На каждом шаге уравнение разбивается на уравнение для дифракции:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \tau \partial z} = \frac{c_0}{2} \Delta p, \quad (2)$$

нелинейности:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\varepsilon}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p^2}{\partial \tau}, \quad (3)$$

и поглощения:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2}, \quad (4)$$

где $\tau = t - z/c_0$ — время с учётом линейной задержки, соответствующей скорости звука c_0 .

С. Проверка метода на численной модели

Перед проведением экспериментальных исследований осуществлялась численная проверка всей процедуры нелинейной голографии при различных режимах генерации и распространения акустического поля. Для этого использовались модельные распределения акустического поля на поверхности «виртуальных» излучателей с различным спектральным составом. На основе этих данных проводился численный расчет нелинейного распространения вперед до некоторой заданной поверхности. Результаты расчета на контрольной поверхности после обращения фазы использовались в качестве граничных условий для обратной задачи. После этого проводилось численное решение обратной задачи (2)–(4) вплоть до исходной поверхности виртуального источника. Сравнение полученных результатов с исходными позволило выбрать оптимальные параметры расчета и оценить их влияние на точность восстановления исходного распределения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА

Экспериментальное исследование проводилось с использованием реальных терапевтических излучателей,

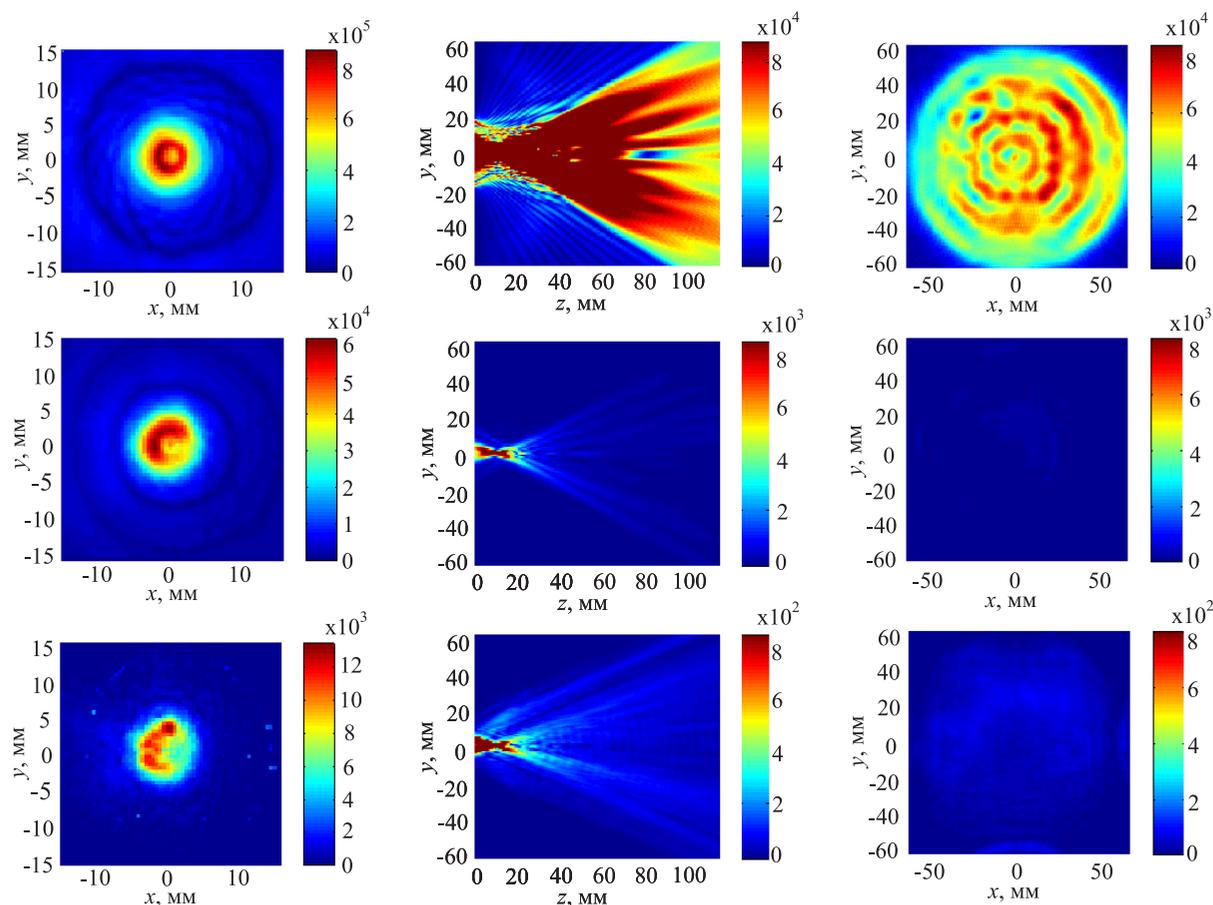


Рис. 2: Слева: распределения амплитуд акустического давления для первой, второй и третьей гармоник (сверху вниз), измеренные в плоскости XY на расстоянии 110 мм от излучателя; в центре: рассчитанные распределения амплитуд давления в плоскости YZ для 3-х гармоник; справа: рассчитанные распределения амплитуд акустического давления на поверхности излучателя для 3-х гармоник

помещённых в дегазированную воду. Ультразвуковое поле измерялось в импульсно-периодическом режиме. Для иллюстрации рассмотрим сфокусированный излучатель диаметром 100 мм с фокусным расстоянием 100 мм, на который подавались длинные (до 100 периодов) тональные импульсы (частота заполнения соответствовала резонансной частоте излучателя 1,092 МГц) с прямоугольной огибающей с периодом повторения 50–300 Гц. Мощность излучения подбиралась таким образом, чтобы уже на расстоянии в несколько сантиметров от поверхности источника образовалось заметное искажение профиля сигнала вследствие нелинейного характера распространения. Полная акустическая мощность при этом находилась в пределах 10 Вт. Для измерений амплитуды и фазы акустического поля каждой регистрируемой гармоники применялся широкополосный гидрофон (SEA PVDF HGL0100, США) с размером чувствительного участка 100 мкм. Перемещение гидрофона для сканирования вдоль заданной поверхности осуществлялось микропозиционной установкой с тремя пространственными и одной поворотной степенями свободы (Velmex UniSlide VP9000,

США). Сканирование гидрофона осуществлялось автоматически с помощью управляемых компьютером шаговых двигателей системы микропозиционирования. Электрический сигнал гидрофона поступал на вход осциллографа (Tektronix TDS 520A), где в заданном окне стабильная по амплитуде часть сигнала усреднялась для уменьшения шумов. Далее сигнал с осциллографа передавался в компьютер, где из него выделялись сигналы всех гармоник и для каждой из них определялись значения амплитуды и фазы в текущей точке пространства.

Результаты измерений и расчета поля акустического давления на поверхности сфокусированного сферического пьезокерамического преобразователя диаметром 100 мм, фокусным расстоянием 100 мм, работающего на частоте 1,092 МГц, представлены на рис. 2. Измерение поля первых 10 гармоник (показаны только первые 3, левая колонка) проводилось на плоскости XY, удаленной от поверхности излучателя на 110 мм, т. е. за фокусом, где уже заметны нелинейные эффекты. Средняя колонка на рис. 2 соответствует распределению амплитуд акустического давления в плоскости

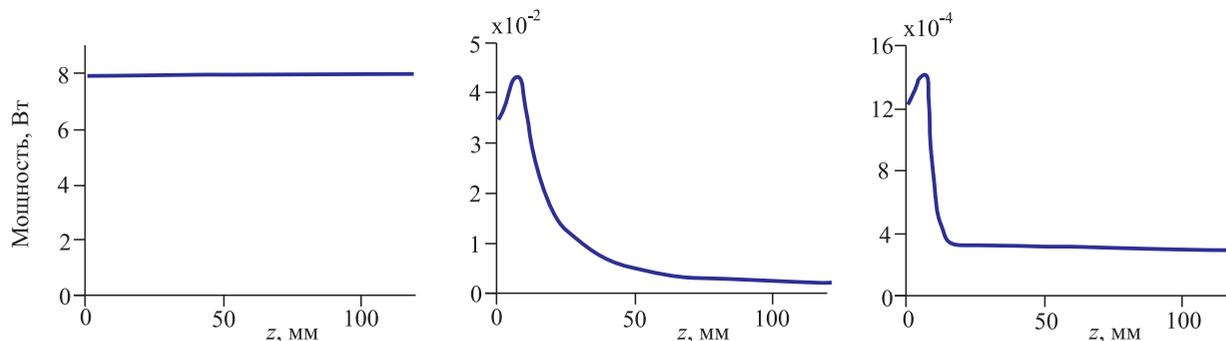


Рис. 3: Значения акустической мощности в поперечном сечении пучка в зависимости от расстояния до поверхности измерений (излучатель находится в точке $z = 110$ мм) для 3-х первых гармоник (слева 1я, справа 3я)

УЗ. В правой колонке содержатся распределения амплитуд акустического давления для 1, 2 и 3й гармоник (сверху вниз).

На рис. 3. представлены зависимости акустической мощности в поперечном сечении пучка от расстояния до поверхности измерений ($z = 0$) для первых трех гармоник. Излучатель находится справа на отметке 110 мм. Полная акустическая мощность составляет порядка 8 Вт, при этом нелинейные эффекты являются слабыми. Хорошо видно, что мощность первой гармоники практически постоянна, что соответствует приближению заданного поля. Вторая гармоника имеет максимум в фокальной плоскости, а на поверхности источника практически отсутствует. Третья гармоника также имеет максимальную мощность в фокусе, однако на поверхности источника не стремится к нулю. Полученные результаты хорошо согласуются со спектральным составом электрического сигнала в цепи аку-

стического преобразователя, который контролировался в процессе измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод нелинейной акустической голографии, позволяющий определить реальную структуру акустического поля на поверхности мощного ультразвукового преобразователя, работающего в нелинейном режиме. Метод является очень перспективным для характеристики реальных терапевтических преобразователей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-15-00665.

- [1] Сапожников О.А., Пищальников Ю.А., Морозов А.В. Акуст. журн. **49**, № 3. С. 416. (2003).
- [2] Williams E.G. Fourier acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography. (Academic Press, London, 1999).
- [3] Hamilton M.F., Blackstock D.T. Nonlinear Acoustics. (Academic Press, San Diego, 1998).
- [4] Kreider W., Yuldashev P.V., Sapozhnikov O.A., Farr N., Partanen A., Bailey M.R., Khokhlova V.A. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, **60**, № 8. P. 1683. (2013).
- [5] Tsysar S., Khokhlova V., Kreider W., Sapozhnikov O.

- Book of Abstracts of the 12th International Symposium on Therapeutic Ultrasound. P. 255. (University of Heidelberg, Germany 2012).
- [6] Tsysar S., Sapozhnikov O., Lafon C., Charrel T., Canney M. Book of Abstracts of the International Congress on Ultrasonics ICU 2011, ed. by Linde B.B., Markiewicz A., and Ponikwicki N. P. 337. (University of Gdansk Publishing, Gdansk, Poland, 2011)
- [7] Tavakkoli J., Cathignol D., Souchon R., Sapozhnikov O.A. J.Acoust.Soc.Am. **104**, № 4. P. 2061. (1998).

Nonlinear acoustic holography for characterization of therapeutic transducers

S.A. Tsysar^{1,a}, O.A. Sapozhnikov^{1,2,b}, W. Kreider²

¹Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

²Center for Industrial and Medical Ultrasound, Applied Physics Laboratory-University of Washington, 1013 NE 40th Street, Seattle, WA 98105-6698, USA

E-mail: ^asergey@acs366.phys.msu.ru, ^boleg@acs366.phys.msu.ru.

A method is presented for nonlinear acoustic holography for the study of powerful ultrasound sources and the corresponding radiated fields. The approach is based on measuring two-dimensional distributions of amplitude and phase of acoustic pressure for harmonics present in the signal spectrum. The obtained distributions are used to calculate the back-propagation of the acoustic field for a mathematical reconstruction of the vibrational velocity on the surface of the source. Calculation of the nonlinear propagation is based on the numerical solution of the Westervelt wave equation. The developed method of nonlinear acoustic holography is an effective tool for the characterization of therapeutic ultrasound sources operating at high power levels, when the source vibration characteristics may differ significantly from the vibration characteristics at low power levels. The paper presents the basis of a numerical model for the calculation of the nonlinear propagation of the time-reversed acoustic field. Physical experiments on nonlinear holography of real therapeutic sources are also described.

PACS: 43.60.Sx, 43.60.Tj, 43.60.Wy

Keywords: acoustic holography, therapeutic ultrasound, nonlinear acoustics.

Received 17.11.2014.

Сведения об авторах

1. Цысарь Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru.
2. Сапожников Олег Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.
3. Wayne Kreider — Ph.D., Senior Engineer, тел.: 206-897-1814, e-mail: wkreider@u.washington.edu