

ОГЛАВЛЕНИЕ



организаторы

программный комитет

спонсоры

предисловие

Организаторы



Общественная организация
«Российское акустическое
общество»



Научный совет РАН
по акустике



АО «Акустический институт
имени академика
Н.Н. Андреева»

Спонсоры

Финансовую поддержку конференции оказали:



Генеральный спонсор:
Акционерное общество
«Акустический институт
имени академика Н.Н.
Андреева»



Спонсор:
Группа компаний
«Акустик Групп»

Место проведения конференции: город Москва, ул. Шверника, дом 4.
Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева»

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Егерев Сергей Викторович – сопредседатель, д.ф.-м.н., ИНИОН РАН
Есинов Игорь Борисович – сопредседатель, д.ф.-м.н., АО «АКИН»
Миронов Михаил Арсеньевич – сопредседатель, к.ф.-м.н., АО «АКИН»
Максимов Герман Адольфович – зам председателя, д.ф.-м.н., АО «АКИН»
Гурбатов Сергей Николаевич (ННГУ, Нижний Новгород)
Балакиев Владимир Иванович (МГУ, Москва)
Бибиков Николай Григорьевич (АКИН, Москва)
Бобровницкий Юрий Иванович (ИМАШ РАН, Москва)
Вировлянский Анатолий Львович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Вознесенский Александр Сергеевич (ГИ НИТУ МИСиС, Москва)
Диденкулов Игорь Николаевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Ерофеев Владимир Иванович (ИПМ РАН, Нижний Новгород)
Канев Николай Григорьевич (АКИН, Москва)
Кедринский Валерий Кириллович (ИГЛ СО РАН, Новосибирск)
Копьев Виктор Феликсович (ЦАГИ, Москва)
Кузнецова Ирен Евгеньевна (ИРЭ РАН, Москва)
Куликов Сергей Николаевич (ИФА РАН, Москва)
Лучинин Александр Григорьевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Ляко Елена Евгеньевна (СПбГУ, Санкт-Петербург)
Макаров Денис Владимирович (ТОИ ДВО РАН, Владивосток)
Малеханов Александр Игоревич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Петников Валерий Георгиевич (ИОФ РАН, Москва)
Потапова Родмонга Кондратьевна (МГЛУ, Москва)
Савицкий Олег Анатольевич (АКИН, Москва)
Сапожников Олег Анатольевич (МГУ, Москва)
Серебряный Андрей Нинелович (АКИН, ИО РАН, Москва)
Субботкин Антон Олегович (ИОФ РАН), Москва
Тарасов Сергей Павлович (ИНЭП ЮФУ, Таганрог)
Томилина Татьяна Михайловна (ИМАШ РАН, Москва)
Хохлова Вера Александровна (МГУ, Москва)
Цукерников Илья Евсеевич (НИИСФ РААСН, Москва)
Чижов Виталий Юрьевич (ФГУП КГНЦ, Санкт-Петербург)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Максимов Герман Адольфович (АКИН) – председатель
Юдина Елена Васильевна (РАО, АКИН) – зам. председателя
Григорьев Альберт Генрихович (АКИН); *Корольков Захар Александрович* (АКИН)
Ларичев Владимир Андреевич (АКИН); *Лесонен Дмитрий Николаевич* (АКИН)
Марухин Владимир Юрьевич (АКИН)

УДК 534

ISBN 978-5-89118-890-7

DOI: 10.34756/GEOS.2024.17.38817

Сборник Трудов XXXVI сессии Российского акустического общества. –
М., ГЕОС, 2024, 1232с.

Всероссийская политематическая научная конференция «XXXVI сессия Российского акустического общества» с успехом состоялась в Москве в октябре 2024 года. На конференции были рассмотрены современные проблемы развития акустики, в частности, в области физической акустики, нелинейной акустики, оптоакустика, акустики океана, геоакустики, акустических метаматериалов, архитектурной и строительной акустики, атмосферной акустики, биоакустики и медицинских приложениях акустических методов, в акустике речи, ультразвуковых технологий, при распространении и дифракции волн, аэроакустики, акустоэлектроники, музыкальной акустики и шумов и вибраций. В научную программу конференции были включены более 180 докладов и приняли участие более 150 ученых, которые представили свои доклады во всех областях акустики. В конференции приняли участие ученые и специалисты из более 50 научных учреждений, предприятий и университетов из более чем 15 городов России.

Представленные в докладах результаты относятся как к фундаментальным, так и к прикладным исследованиям и техническим разработкам, связаны с развитием акустических технологий. Наряду с докладами, представленными на конференции ведущими российскими специалистами, значительная часть результатов получена с участием молодых ученых. Более 70 докладов представлено на конференции молодыми специалистами и аспирантами. Активное участие научной молодежи в конференции указывает на перспективы дальнейшего развития представленных исследований и разработок.

В настоящий сборник трудов конференции включены 180 докладов. Разнообразие тематики и высокий научный уровень представленных материалов свидетельствуют о том, что работы отечественных специалистов в области акустики развиваются весьма успешно и по многим из направлений они сохраняют передовые позиции.

Материалы настоящего сборника будут полезны как для начинающих ученых, аспирантов и студентов соответствующих специальностей обучения, так и для широкого круга специалистов в области акустики и ее приложений.

Материалы сданы в издательство 1-18 сентября 2024 г.

Подписано к тиражированию дисков 18.09.2024

Уч.-изд. 154.0 п.л. Тираж 210 экз.

**Компенсация непостоянства скорости звука при измерении
акустической голограммы ультразвукового излучателя методом
растрового сканирования в условиях переменной температуры**

А.А. Саматов, С.А. Цысарь ^а, О.А. Сапожников

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

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

Исследуется влияние изменения температуры среды при измерении амплитуды и фазы акустического давления (голограммы) поля излучателя путем растрового перемещения приемника. Возможные изменения температуры среды приводят к изменению скорости звука и искажениям голограммы. Особенно существенны эти искажения для голограмм больших волновых размеров, требующих длительной записи. Для компенсации возникающих ошибок в настоящей работе предложен и апробирован метод, основанный на регистрации температуры в процессе записи голограммы и внесении коррекции в скорость звука при использовании интеграла Рэлея в численном алгоритме переноса измеренной голограммы на поверхность излучателя. Эксперименты проводились в воде для фокусированного излучателя мегагерцового диапазона частот сантиметровых размеров. С помощью нагревателя и охладителя температура воды изменялась в процессе записи голограмм в пределах нескольких градусов. Обнаружено, что в случае отклонения температуры до 7 градусов от равновесной, ошибка определения колебательной скорости поверхности источника может превышать 50%. Показано, что при применении предложенного метода компенсации отклонение относительно голограммы, записанной при постоянной температуре, не превышает 10%.

Ключевые слова: акустическая голография, ультразвуковые излучатели, калибровка акустических полей.

PACS: 43.35.Sx, 43.35.Yb, 43.58.Ry

Введение

Пьезоэлектрические излучатели широко применяются в устройствах ультразвуковой визуализации и терапии, неразрушающего контроля и акустической микроскопии. Для теоретического предсказания соответствующих акустических полей требуется знать распределение нормальной компоненты скорости и акустического давления на излучающей поверхности. При этом акустические поля реальных источников часто отличаются от расчетов, сделанных при использовании различных приближений. Одним из широко используемых приближений является «поршневое», когда считается, что все элементы поверхности совершают колебания синфазно с одинаковой нормальной компонентой скорости. Одним из способов измерения скорости колебаний поверхности излучателя является лазерная виброметрия. Однако при помещении источника в жидкость (что актуально для излучателей медицинских

приложений) большую роль играет акустооптическое взаимодействие, приводящее к искажению показаний виброметра. Метод акустической голографии, суть которого заключается в измерении амплитуды и фазы акустического давления вдоль некоторой контрольной поверхности и расчете акустического поля на излучателе путем соответствующего интегрирования с использованием интеграла Рэлея, является наиболее полным методом измерения пространственной структуры акустического пучка. На основе измеренной голограммы акустического поля и известных свойств среды, в которой происходит распространение звуковой волны, можно количественно определить как структуру поля акустического давления, так и нормальную составляющую колебательной скорости излучающей поверхности. Запись голограммы осуществляется путем растрового перемещения приемника вдоль некоторой контрольной поверхности. Если в процессе такого сканирования изменяется температура среды, из-за непостоянства скорости звука возникают искажения голограммы. Для компенсации возникающих ошибок в настоящей работе проверен метод, основанный на регистрации температуры в процессе записи голограммы и внесении коррекции в скорость звука и плотность среды при использовании интеграла Рэлея в численном алгоритме переноса измеренной голограммы на поверхность излучателя.

1 Теория

Для начала рассмотрим случай распространения звука со скоростью c_0 в среде с плотностью ρ_0 с постоянной температурой. Пусть акустический излучатель расположен на поверхности Σ_1 (рис. 1). Поле монохроматической звуковой волны в однородной среде удовлетворяет уравнению Гельмгольца:

$$(\Delta + k^2)A(\mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

где $A(\mathbf{r})$ – комплексная амплитуда акустического давления в точке $\mathbf{r}$, $k = \omega/c_0$ – волновое число, ω – угловая частота.

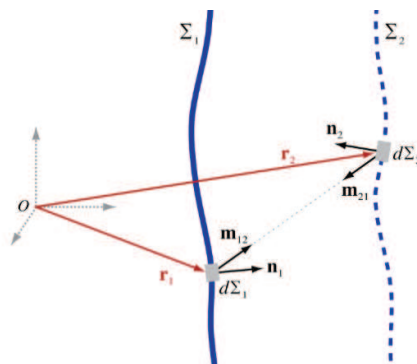


Рис. 1. Геометрия задачи. Σ_1 – поверхность источника, Σ_2 – поверхность измерения (голограммы)

Если Σ_1 – плоская поверхность источника с внешней единичной нормалью $\mathbf{n}_1$, ориентированной в направлении распространения волны, то точное решение уравнения Гельмгольца (1) в любой точке $\mathbf{r}_2$ перед источником выражается с помощью интеграла Рэлея [1]:

$$A(\mathbf{r}_2) = -i \frac{\rho_0 \omega}{2\pi} \iint_{\Sigma_1} \frac{V_n(\mathbf{r}_1) e^{ik|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|}}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|} dS, \quad (2)$$

где $V_n(\mathbf{r}_1)$ – нормальная компонента колебательной скорости источника в точке $\mathbf{r}_1$.

Следует заметить, что решение Рэлея (2) математически точно только для источников звука, расположенных на плоской поверхности. В работе [2] экспериментально показано, что ошибки в использовании формулы Рэлея при расчетах полей реальных вогнутых излучателей с радиусом кривизны, значительно превышающим длину волны в среде, обычно несущественны, и сделан вывод о возможности его применения.

Для нахождения распределения колебательной скорости на поверхности источника по измеренному полю акустического давления вдоль поверхности Σ_2 для решения обратной задачи излучения можно получить следующее выражение [3]:

$$V_n(\mathbf{r}_1) = \iint_{\Sigma_2} A(\mathbf{r}_2) K(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1) d\Sigma_2,$$

где

$$K(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1) = \frac{1}{2\pi i k \rho_0 c_0} \left\{ (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2) \left(\frac{ik}{R} + \frac{1}{R^2} \right) + (\mathbf{m}_{12} \cdot \mathbf{n}_1)(\mathbf{m}_{21} \cdot \mathbf{n}_2) \times \left(\frac{3ik}{R} + \frac{3}{R^2} - k^2 \right) \right\} \frac{e^{-ikR}}{R}. \quad (3)$$

При этом выражение для $K(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1)$ зависит от геометрии поверхностей Σ_1 и Σ_2 .

В том случае, когда температура среды изменяется, изменяется ее плотность, а также скорость звука в среде. Зависимость скорости звука в воде от температуры достаточно точно описывается формулой Лероя [4], которая для пресной воды имеет вид:

$$c_0(T) = 1492.9 + 3(T - 10) - 0.006(T - 10)^2 - 0.04(T - 18)^2 - 35(1.2 + 0.01(T - 18)). \quad (4)$$

При изменении температуры также меняется и плотность среды, что для воды дает значительно меньший вклад в искажение голограммы, но тоже может быть учтено:

$$\rho_0(T) = 1000.3 - 0.06T - 0.0036T^2, \quad (5)$$

где T – температура в °С.

Для расчета колебательной скорости на поверхности акустического излучателя в случае переменной температуры следует перевести эти зависимости в зависимости от

координаты $\mathbf{r}_2$ на поверхности измерений и подставить их в окончательную формулу (3) для $V_n(\mathbf{r}_1)$ в виде $c_0(T(\mathbf{r}_2)) = c_0(\mathbf{r}_2)$ и $\rho_0(T(\mathbf{r}_2)) = \rho_0(\mathbf{r}_2)$.

2. Эксперимент

Был проведен эксперимент по измерению распределения амплитуды и фазы поля вдоль плоскости на удалении от излучателя при постоянной температуре и с переменной температурой. В резервуар с водой (рис. 2) помещались излучатель, приемник и датчики температуры. С помощью системы позиционирования путем перемещения приемника измерялась голограмма поля в контрольной плоскости. В качестве приемника использовался капсульный гидрофон ONDA HGL-0200. Многоканальным цифровым термометром раз в 2 секунды по с трех герметичных датчиков по протоколу 1-wire снимались показания температуры с дискретностью 0.0625°C . Два датчика были расположены на корпусе излучателя, один – на держателе гидрофона.

Проводилось сканирование поля в плоскости, перпендикулярной оси излучателя, на расстоянии 110 мм от центра излучателя. Одно из таких измеренных распределений амплитуды и фазы акустического давления для многоэлементного излучателя Imasonic диаметром 200 мм, фокусным расстоянием 150 мм, центральной частотой 1.2 МГц с мозаичным расположением элементов [5] показано на рис. 3. Двумерные изображения показывают характер распределения амплитуды и фазы акустического давления. На фазовом распределении заметны горизонтальные артефакты, сбивающие структуру концентрических колец вследствие вводимых перепадов температуры воды (с отклонением до 7°C) в процессе измерений.



Рис. 2. Экспериментальный стенд. Слева – система управления излучателем; в центре – резервуар с дегазированной водой, в которую помещены излучатель, гидрофон и датчики температуры; справа – система сбора и обработки сигналов.

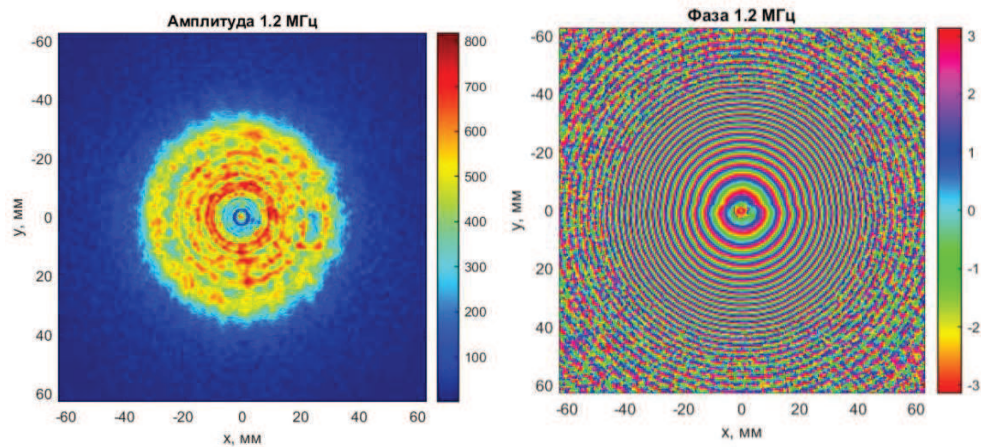


Рис. 3. Измеренные распределения амплитуды и фазы акустического давления в плоскости $z = 107.5$ мм

После измерений распределения амплитуды и фазы акустического давления в контрольной плоскости по формуле (3) в предположении постоянной скорости звука и плотности воды численно восстанавливалось распределение комплексной амплитуды и фазы скорости на поверхности излучателя. На рис. 4 приведен полученный результат. Отчетливо видны артефакты реконструкции в виде горизонтальных полос.

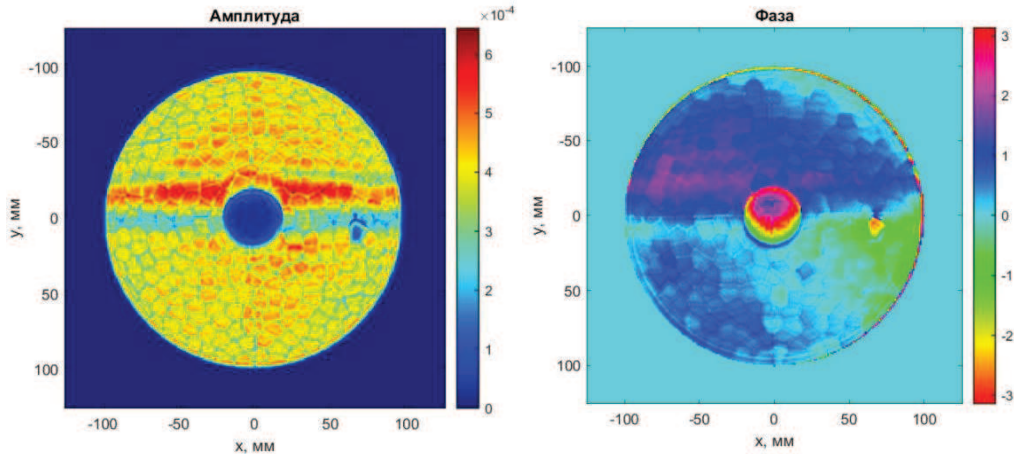


Рис. 4. Восстановленные распределения комплексной амплитуды и фазы скорости на поверхности излучателя в предположении постоянных значений скорости звука и плотности воды.

При расчете скорости звука и плотности воды по формулам (4) и (5) данные температуры сопоставлялись каждой точке голограммы и усреднялись по трем датчикам. После внесения соответствующих поправок в интеграл Рэлея отклонение голограммы заметно уменьшилось. Результат с температурной компенсацией представлен на рис. 5.

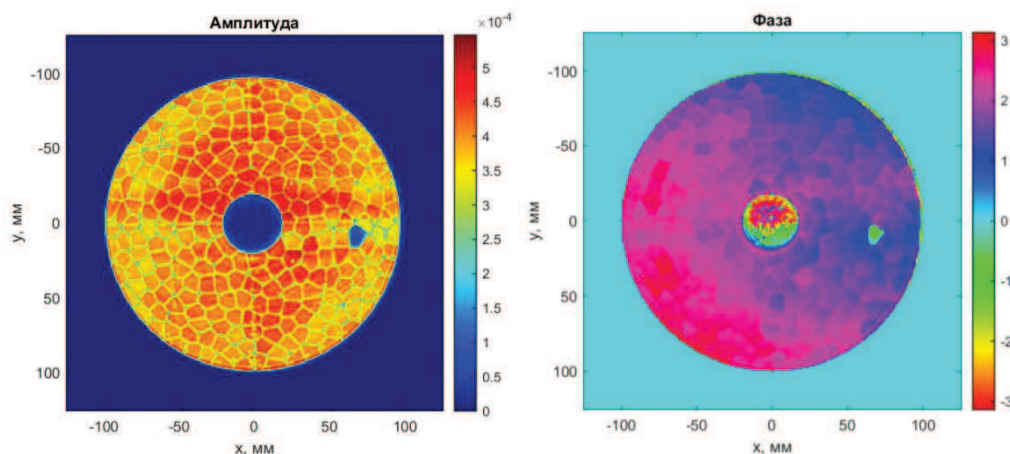


Рис. 5. Восстановленные распределения комплексной амплитуды и фазы скорости на поверхности излучателя с учетом непостоянства скорости звука и плотности воды

Заключение

В результате работы установлено, что при сканировании поля методом апертурного синтеза в условиях изменяющейся температуры среды могут возникать заметные искажения голограммы, особенно при использовании излучателей больших волновых размеров. Предложен и экспериментально проверен метод компенсации искажений, основанный на регистрации температуры в процессе записи голограммы и внесении поправок в скорость звука и плотность воды при численной реконструкции колебаний поверхности источника методом интеграла Рэлея. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности восстановления распределения нормальной компоненты колебательной скорости на поверхности излучателя предложенным методом. В дальнейшем планируется проверить метод при реконструкции полей излучателей разных форм и волновых размеров.

Список литературы

1. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989.
2. Катиньоль Д., Сапожников О.А. // Акуст. журн. 1999. **45**, № 6. С. 816.
3. Sapozhnikov O. A., Tsysar S. A., Khokhlova V. A., Kreider W. // J. Acoust. Soc. Am. 2015. **138**, № 3. P. 1515.
4. Leroy C. C., Robinson S. P., Goldsmith M. J. // J. Acoust. Soc. Am. 2008. **124**, № 5. P. 2774.
5. Tsysar, S. A., Rosnitskiy, P. B., Asfandiyarov, S. A., Petrosyan, S. A., Khokhlova, V. A., and Sapozhnikov, O. A. // Acoust. Phys. 2024. **1**, № 70. P. 82.

Сведения об авторах

1. Саматов Андрей Александрович – студент 3-го курса кафедры акустики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: mr.samatovan@gmail.com
2. Цысарь Сергей Алексеевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: sergeyt@physics.msu.ru
3. Сапожников Олег Анатольевич – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры акустики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru

**НАЗАД К СОДЕРЖАНИЮ
СЕКЦИИ**

Compensation of the sound speed deviations in the ultrasonic transducer acoustic hologram measurements by the raster scanning method under conditions of variable temperature

A.A. Samatov, S.A. Tsysar^a, O.A. Sapozhnikov

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

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

The influence of temperature variations in the propagation medium during measurement of amplitude and phase of acoustic pressure (hologram) of the ultrasonic transducer field by raster movement of the receiver is investigated. Possible variations of temperature of the medium lead to variations of sound speed and the hologram distortions. These distortions are especially significant for holograms of large wave sizes requiring long-term recording. In order to compensate for arising errors the method based on registration of temperature during recording of the hologram and introduction of correction to sound speed by using Rayleigh integral in numerical algorithm of transferring of the measured hologram to the transducer surface is proposed and tested. Experiments were conducted in water for focused transducer of megahertz frequency range of centimeter sizes. Using the heater and cooler the temperature of water was changed during recording of holograms within several degrees. It was found that in case of temperature deviation up to 7 degrees the error of determination of oscillatory speed of the source surface can exceed 50%. It is shown that using the proposed compensation method the deviation relative to the hologram recorded at constant temperature does not exceed 10%.

Keywords: acoustic holography, ultrasonic transducers, calibration of acoustic fields.

Back to the Content