МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Jutt

Николаев Дмитрий Александрович

Импульсная акустическая голография как метод измерения параметров сред и характеризации ультразвуковых источников и приемников

Специальность: 01.04.06 — акустика

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

МОСКВА - 2021

Работа выполнена на кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

<u>Научный руководитель:</u>	Цысарь Сергей Алексеевич,			
	кандидат физико-математических наук,			
	доцент кафедры фотоники и физики микроволн			
	физического факультета Московского государственного			
	университета имени М.В. Ломоносова			
<u>Научный консультант:</u>	Сапожников Олег Анатольевич,			
	доктор физико-математических наук, доцент,			
	профессор кафедры акустики физического факультета			
	Московского государственного университета имени			
	М.В. Ломоносова			
Официальные оппоненты:	Балакший Владимир Иванович,			
	доктор физико-математических наук, профессор,			
	профессор кафедры физики колебаний физического			
	факультета Московского государственного			
	университета имени М.В. Ломоносова			
	Пересёлков Сергей Алексеевич,			
	доктор физико-математических наук, доцент,			
	заведующий кафедрой математической физики			
	физического факультета Воронежского			
	государственного университета			
	Рыбянец Андрей Николаевич,			
	доктор физико-математических наук,			
	главный научный сотрудник отделения			
	сегнетопьезоматериалов, приборов и устройств			
	Научно-исследовательского института физики			
	Южного федерального университета			

Защита диссертации состоится «30» декабря 2021 года в 11.00 на заседании диссертационного совета МГУ.01.08 на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (адрес: 119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27).

С диссертацией в электронном виде, а также со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: https://istina.msu.ru/dissertations/405003768/

Автореферат разослан « » ноября 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.01.08 доктор физико-математических наук, доцент kosareva@physics.msu.ru

Hlocz

О.Г. Косарева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

областей Значительное расширение промышленности И медицины, использующих новые ультразвуковые (УЗ) устройства, ведет к необходимости разработки уточненных стандартов к применяемому оборудованию, работающему в мегагерцовом диапазоне частот. Точность широко используемых в настоящее время методов калибровки часто недостаточна для практических целей, что делает особо актуальным предлагаемый в работе новый способ характеризации акустических преобразователей на основе измерения нестационарной (импульсной) акустической голограммы волнового поля. Особенно полезной является возможность нахождения колебаний пространственно-временной структуры поверхности акустических источников. Это позволяет определить базовые характеристики УЗ преобразователей, такие как чувствительность, диаграмма направленности, АЧХ, ФЧХ и другие. В диссертации разрабатывается подход, основанный на методе акустической голографии, и выявляются основные факторы, влияющие на точность измерений характеристик УЗ преобразователей. Одним из таких факторов является количественная информация о характеристиках приемников акустического сигнала (чувствительность и диаграмма направленности на различных частотах), которые используются для измерения голограмм. На настоящий момент один из наиболее точных методов абсолютной калибровки гидрофонов мегагерцового диапазона частот основан на использовании оптической интерферометрии. Существенным недостатком метода является необходимость применения сложного оптического такого оборудования, которое недоступно для многих акустических лабораторий при проведении регулярной калибровки. В связи с этим актуальной является задача разработки новых способов экспериментального определения характеристик в работе предлагается источников И приемников. Для ЭТОГО проводить комбинирование данных измерений акустической голограммы источника и измерений радиационной силы, с которой излучаемый УЗ пучок действует на поглощающую мишень.

Помимо упомянутых выше задач характеризации УЗ источников и приемников, в актуальной разработки приложениях ультразвука является задача новых прецизионных методов измерения акустических характеристик материалов, в том числе и биологических сред. Для измерения акустических свойств материалов традиционно применяются плоские излучатели; при этом для расчета коэффициента затухания и скорости звука используется плосковолновое приближение, не учитывающее реальную неоднородную структуру акустического пучка в ближней дифракционной зоне. В результате этого могут возникать систематические отклонения, особенно при использовании образцов небольшого объема. Предлагаемый в работе метод, основанный на акустической голографии, учитывает эффект дифракции и поэтому может быть эффективно применен не только для плоских, но и для фокусирующих излучателей. Это делает возможным исследование свойств материалов в образцах небольших размеров, что является актуальным, например, при характеризации биологических образцов, размеры которых обычно ограничены.

1

Целями диссертационной работы являются разработка экспериментальных подходов для новых методов характеризации источников и приемников УЗ излучения мегагерцового диапазона частот, определения влияния неидельности систем позиционирования приемников на точность акустических измерений, а также разработка нового метода по определению акустических параметров различных материалов. Для достижения обозначенных целей решались следующие <u>задачи</u>:

1. Расширить метод акустической голографии на случай импульсных полей. Разработать экспериментальную схему для прецизионного измерения нестационарной акустической голограммы излучателя.

2. Выявить факторы, влияющие на точность характеризации акустических преобразователей. Разработать метод пространственной коррекции акустической голограммы за счет ее поворота и смещения.

3. Экспериментально применить метод импульсной акустической голографии для измерения распределений колебательной скорости на поверхности многоэлементного УЗ преобразователя в широкой полосе частот.

4. Разработать метод измерения углов, определяющих взаимную ориентацию осей системы позиционирования, на основе импульсной акустической голографии. Экспериментально проверить данный метод.

5. Разработать метод измерения чувствительности приемника на основе комбинации измерения импульсной голограммы и измерения радиационной силы, оказываемой акустическим пучком на поглотитель.

6. Измерить чувствительность гидрофонов разных типов с помощью разработанного метода и провести сравнение с данными заводской калибровки.

7. Разработать метод определения акустических характеристик материала с использованием плоскопараллельных образцов в широкой частотной полосе на основе измерения импульсной голограммы акустического поля. Найти акустические характеристики резиноподобного материала и подтвердить возможность использования малых образцов на основе сравнения данных измерений для образцов одинаковой толщины, но разных поперечных размеров.

Объект и предмет исследования

Объектами исследования в диссертационной работе являются источники и приемники УЗ пучков мегагерцового диапазона частот, способные генерировать и принимать как слабые УЗ поля, так и поля терапевтических уровней. Предметами исследования являются пространственно-временная структура УЗ полей, новые принципы калибровки УЗ оборудования и акустической характеризации материалов.

Методология исследования

Для широкополосной характеризации преобразователей по измеряемой акустической голограмме использовались аналитические и численные модели, построенные на основе интеграла Рэлея и метода пространственного (углового) спектра. Измерение чувствительности гидрофона основывалось на решении задачи механического силового воздействия акустического пучка на плоский поглотитель. Методы измерения углов между осями системы микропозиционирования и определения акустических характеристик материалов базировались на спектральном разложении акустического пучка на плоские монохроматические волны и выделении наиболее информативных компонент.

В рамках решения каждой задачи проводились численные расчеты путем создания необходимого алгоритма в среде Matlab, а также осуществлялась экспериментальная проверка с использованием автоматизированных комплексов под управлением программ в среде LabView. Используемые для каждой задачи материалы приводятся и описываются в соответствующих разделах работы.

<u>Научная новизна</u> работы заключается в разработке следующих новых методов в рамках подготовки диссертации.

1. Разработана методика характеризации акустических преобразователей на основе нестационарной (импульсной) акустической голографии, которая позволяет определять пространственно-временной акустический отклик УЗ системы.

2. Разработан способ измерения углов между механическими осями системы позиционирования и их компенсации с помощью измеренной голограммы излучателя.

3. Разработан способ широкополосной калибровки гидрофонов на основе комбинации метода импульсной акустической голографии и измерения радиационной силы акустического пучка.

4. Разработан новый метод измерения акустических характеристик материалов с помощью образцов малого объема на основе измерения нестационарной акустической голограммы фокусирующего излучателя.

Практическая значимость работы

1. Импульсная акустическая голография может служить основой построения измерительного комплекса для высокоточной характеризации полей УЗ источников для различных применений в медицине и промышленности.

2. Практическая значимость метода измерения чувствительности гидрофонов заключается в формулировании методики и критериев для построения высокоточных систем калибровки гидрофонов.

3. Разработанный способ измерения акустических характеристик материалов может быть применен при использовании образцов небольшого объема (порядка 1 мл) в рамках различных приложений ультразвука, в том числе для измерения характеристик биологических материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Импульсная голография мегагерцового диапазона частот в жидкости позволяет количественно определять пространственно-временные отклики излучателя, приемника и исследуемой среды на импульсное возбуждение.

2. Двойная импульсная голограмма позволяет определять и компенсировать ошибки установки углов осей системы позиционирования с точностью до 0.1°.

3. Комбинация импульсной голографии с измерением радиационной силы позволяет проводить широкополосную калибровку гидрофонов с точностью 3 – 5%, не уступающей существующим методам калибровки приемников мегагерцового диапазона частот.

3

4. Импульсная акустическая голография позволяет проводить измерения акустических характеристик материалов, используя образцы небольшого размера, без применения плосковолнового приближения.

<u>Достоверность и обоснованность</u> представленных в диссертационной работе результатов подтверждается проверочными численными и физическими экспериментами, а также соответствием результатов экспериментов априорной информации, теоретическим расчетам и результатам, полученным в работах других авторов.

Апробация работы

Вошедшие в диссертацию материалы докладывались на XV, XVI, XVII Всероссийских школах-семинарах «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова (г. Можайск, 5 – 10 июня 2016 г., 27 мая – 1 июня 2018 г., 23 – 28 августа 2020 г.), 7-й Зимней школе по терапевтическом ультразвуку (Лезуш, Франция, 3 – 8 марта 2019 г.), Международном конгрессе по ультразвуку (International Congress оп Ultrasonics, Брюгге, Бельгия, 3 – 6 сентября 2019 г.), 3-й Всероссийской акустической конференции (Санкт-Петербург, 21 – 25 сентября, 2020 г.), XXXII сессии Российского акустического общества (Москва, 14 – 18 октября, 2019 г.) Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020», (Москва, 10 – 27 ноября, 2020 г.).

Работа, представленная автором в рамках настоящей диссертации, была поддержана РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90022 «Конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре» и стипендией Американского акустического общества (ASA International Student Grant).

<u>Публикации</u>

Основные результаты диссертации изложены в 23 печатных работах, в том числе 4 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 3 публикациях в других рецензируемых научных изданиях и 16 публикациях в сборниках трудов и тезисов конференций. Список работ автора приведен в конце автореферата.

<u>Личный вклад автора</u>

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично либо при его определяющем участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из общего вводного раздела, трех глав и заключения. Каждая глава включает в себя краткое введение с обзором литературы в рамках поставленной задачи, оригинальную часть и выводы. Работа содержит 137 страниц, включает 52 рисунка, 2 таблицы и 113 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведен общий обзор литературы, сформулированы цели работы и описано ее краткое содержание по главам.

В первой главе теоретически и экспериментально обосновано применение нестационарной акустической голографии для характеризации УЗ преобразователей, предложен способ ее пространственной коррекции и способ прецизионного определения углов между осями системы позиционирования.

В § 1.1 сформулированы теоретические основы импульсной акустической голографии. Приведен необходимый математический аппарат монохроматической акустической голографии на основе интеграла Рэлея и пространственного

спектрального разложения поля. В силу линейности задачи данные методы легко обобщаются на случай нестационарных (в частности, импульсных) источников. При этом в каждой точке голограммы записывается не амплитуда и фаза сигнала (как это делается при исследовании монохроматических источников), а полный временной профиль волны $p(\mathbf{r}',t)$.

Для расчета поля удобно использовать спектральный подход. Используя спектральное разложение сигнала в каждой точке пространства \mathbf{r}' (Рис. 1), получим комплексную амплитуду волны для частоты ω в виде



Рис. 1. Геометрия задачи.

$$P(\omega, \mathbf{r}') = \int_{-\infty}^{\infty} p(t, \mathbf{r}') e^{i\omega t} dt, \qquad (1)$$

Функция $P(\omega, \mathbf{r}')$, полностью охватывающая акустический пучок, является монохроматической акустической голограммой. Выражение для расчета давления $P(\omega, \mathbf{r})$ на поверхности Σ (рис. 1) из голограммы $P(\omega, \mathbf{r}')$:

$$P(\omega,\mathbf{r}) = \int_{\Sigma'} P(\omega,\mathbf{r}') K_{P_{\Sigma'} \to P_{\Sigma}}(\mathbf{r},\mathbf{r}') d\Sigma', \qquad (2)$$

$$K_{P_{\Sigma'} \to P_{\Sigma}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -\frac{1}{2\pi} (\mathbf{n}' \cdot \mathbf{e}_R) \left(\frac{1}{R^2} + \frac{ik}{R} \right) e^{-ikR}, \qquad (3)$$

где $k = \omega/c$ – волновое число, c – скорость звука в среде, $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, $\mathbf{e}_R = (\mathbf{r} - \mathbf{r}')/R$, \mathbf{r}' и \mathbf{r} – вектор точки на поверхности Σ' и Σ , \mathbf{n}' и \mathbf{n} – единичная нормаль к поверхности Σ' и Σ соответственно. Интегрирование в общем случае необходимо проводить вдоль замкнутой поверхности $\Sigma' + \Delta\Sigma$, но в случае использования источников больших волновых размеров, энергия пучка которых сконцентрирована вблизи акустической оси излучателя z, обычно достаточно провести интегрирование в поперечной оси zплоскости с поперечным размером, немного превышающим апертуру излучателя. Выражение для расчета нормальной составляющей колебательной скорости $V_n(\omega, \mathbf{r})$ к поверхности Σ из голограммы $P(\omega, \mathbf{r}')$:

$$V_n(\omega,\mathbf{r}) = \int_{\Sigma'} P(\omega,\mathbf{r}') K_{P_{\Sigma'} \to V_n}(\mathbf{r},\mathbf{r}') d\Sigma', \qquad (4)$$

$$K_{P_{\Sigma'} \to V_n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2\pi i \omega \rho} \left[(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}') \left(\frac{1}{R^3} + \frac{ik}{R^2} \right) - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_R) (\mathbf{n}' \cdot \mathbf{e}_R) \left(\frac{3}{R^3} + \frac{3ik}{R^2} - \frac{k^2}{R} \right) \right] e^{-ikR}.$$
 (5)

Использование интеграла Рэлея (4) особенно удобно при исследовании неплоских излучающих поверхностей, колеблющихся по гармоническому закону.

Выполнив преобразования (2), (4) для гармоник в спектральной полосе излучаемого сигнала, после чего проведя обратное преобразование Фурье, получим временную зависимость давления и колебательной скорости в точке пространства **r** :

$$p(t,\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\Sigma'} P(\omega,\mathbf{r}') K_{P_{\Sigma'} \to P_{\Sigma}}(\mathbf{r},\mathbf{r}') d\Sigma' e^{-i\omega t} d\omega, \qquad (6)$$

$$V_{n}(t,\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\Sigma'}^{\infty} P(\omega,\mathbf{r}') K_{P_{\Sigma'} \to V_{n}}(\mathbf{r},\mathbf{r}') d\Sigma' e^{-i\omega t} d\omega.$$
(7)

Помимо интеграла Рэлея в ряде случаев (например, для плоских поверхностей голограммы и источника) может быть применен эквивалентный способ расчета распространения акустической волны, основанный на методе разложения волны на пространственные гармоники (метод углового спектра). В рамках указанного метода голограмма $P(\omega, x, y, z)$ может быть сведена к спектральной плотности $S(\omega, k_x, k_y, z)$ путем перехода от пространственных координат (x, y, z) к смешанным координатам (k_x, k_y, z) помощью двумерного пространственного преобразования Фурье:

$$S(\omega, k_x, k_y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega, x, y, z) e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy, \qquad (8)$$

Найденное представление волнового поля $S(\omega, k_x, k_y, z)$ в случае идеальной среды, когда волновое число k является действительной величиной, имеет вид суперпозиции плоских волн вида $S(k_x, k_y) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$, где соответствующий волновой вектор $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2})$.

Выражение для расчета поля p(t, x, y, 0) в плоскости z = 0 на основе голограммы $P(\omega, x, y, z)$ выглядит следующим образом:

$$p(t,x,y,0) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \iint_{\Sigma_k} S(\omega,k_x,k_y,z) e^{-i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z} e^{-i(\omega t - k_x x - k_y y)} dk_x dk_y \right\} d\omega,$$
(9)

Строго говоря, для записи точного решения (9) область интегрирования следует распространить на всю плоскость пространства обратных координат, что позволяет

учесть неоднородные волны. Однако в рамках рассматриваемых задач мегагерцового диапазона они быстро затухают при удалении от излучателя, и, как правило, дают вклад на уровне шумов. Поэтому в задачах больших волновых размеров неоднородные волны исключаются из рассмотрения, что в методе углового спектра достигается использованием только спектральных компонент, находящихся в пределах круга излучения $(k_x, k_y) \in \Sigma_k : k_x^2 + k_y^2 \le k^2$.

Метод углового спектра с использованием операций быстрого преобразования Фурье (БПФ) значительно превосходит метод интеграла Рэлея по скорости численного расчета, что является значительным преимуществом при многочастотном расчете протяженных голограмм.

С помощью измеренной импульсной акустической голограммы калиброванным гидрофоном можно получить голограммы излучателя $V_{n0}(\omega, \mathbf{r})$ и $P_0(\omega, \mathbf{r})$ в абсолютных величинах. Для этого измеренную голограмму следует скорректировать с учетом чувствительности и направленности гидрофона. Наиболее просто такое преобразование можно провести с помощью углового спектра волны:

$$S_0(\omega, k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx dy U(\omega, x, y) e^{-ik_x x - ik_y y} / M(\omega, k_x, k_y), \qquad (10)$$

где $U(\omega, x, y)$ – комплексная амплитуда сигнала в плоскости голограммы в единицах электрического напряжения в монохроматическом режиме работы излучателя на частоте ω , $M(\omega, k_x, k_y)$ – функция, описывающая отклик гидрофона на плоскую гармоническую волну. Данную функцию удобно представить в виде:

$$M(\omega, k_x, k_y) = M_0(\omega) D(\omega, k_x, k_y), \qquad (11)$$

где $M_0(\omega) = M(\omega, 0, 0)$ – чувствительность гидрофона при нормальном падении пробной плоской волны, $D(\omega, k_x, k_y)$ – диаграмма направленности гидрофона, при этом $D(\omega, 0, 0) = 1$, данная функция определена для k_x, k_y : $k_x^2 + k_y^2 \le k^2$. Выполнив обратное преобразование Фурье по пространственным частотам полученного углового спектра $S_0(\omega, k_x, k_y)$, получим скорректированную голограмму в единицах давления:

$$P_0(\omega, x, y) = \frac{1}{\left(2\pi\right)^2} \iint_{\Sigma_k} S_0(\omega, k_x, k_y) e^{ik_x x + ik_y y} dk_x dk_y.$$
(12)

Проводя расчет из данной голограммы на поверхность излучателя одним из методов, описанных выше, получим структуру колебания поверхности излучателя $V_{n0}(\omega, \mathbf{r})$ и $P_0(\omega, \mathbf{r})$ в единицах м/с и Па соответственно.

Для нахождения универсальной характеристики чувствительности излучателя голограмму излучателя следует поделить на спектр подаваемого электрического сигнала. Данная характеристика описывает характер колебаний поверхности при подаче на излучатель монохроматического сигнала на частоте ω с амплитудой 1 В:

$$V_{n00}(\omega,\mathbf{r}) = V_{n0}(\omega,\mathbf{r}) / \int_{-\infty}^{\infty} U_0(t) e^{i\omega t} dt .$$
⁽¹³⁾

В § 1.2 метод импульсной акустической голографии продемонстрирован на примере исследования работы двумерной УЗ решетки, состоящей из 384-элементов с центральной частотой 2 МГц. УЗ датчик опускался в резервуар с дегазированной водой. Напротив него располагался капсульный гидрофон HGL-0200 (рис. 2а). Гидрофон в процессе измерений перемещался с помощью автоматизированной системы позиционирования, позволяющей проводить пространственное трехмерное сканирование с точностью до 6 мкм. Голограмма УЗ поля записывалась путем регистрации сигнала гидрофона (типичный вид в одной из точек голограммы показан на рис. 26) в узлах плоской квадратной сетки с шагом 0.25 мм (рис. 2в), параллельной излучающей поверхности датчика. Количество узлов сетки составляло 241×241.



Рис. 2. (а) Схема проведения измерений. (б) Типичный временной профиль электрического сигнала на гидрофоне в одной из точек голограммы. (в) Распределение пикового значения сигнала вдоль поверхности голограммы.

В соответствии с описанным методом, на основе измеряемых голограмм проводился расчет поля на поверхности преобразователя (рис. 3). Отчетливо выделяется дефектная область, в которой элементы имеют нелинейный отклик (рис. 36,в) на сигнал возбуждения, в отличие от исправных элементов (рис. 3г,д).



Рис. 3. (а) Нормированное распределение пиковых значений поля на поверхности источника. Временные профили сигнала в центрах указанных стрелками элементов излучателя: (б) из дефектной и (г) нормальной областей; (в, д) соответствующие им частотные спектры.

Дополнительно были проведены поэлементные эхо-импульсные измерения с отражением от латунного блока в воде, а также измерения электрической емкости элементов, результаты которых находятся в хорошем соответствии с голограммой поверхности излучателя (рис. 4).



Рис. 4. Сравнение распределений, полученных по результатам: (а) измерения голограммы поля на поверхности двумерной решетки на частоте 2 МГц; (б) поэлементных эхо-импульсных измерений на частоте 2 МГц; (в) поэлементных измерений электрической емкости.

В § 1.3 предлагается метод пространственной коррекции голограммы для В повышения точности определения структуры поля. случае аксиальносимметричного излучателя плоский участок голограммы удобно расположить напротив излучателя по его центру и ориентировать перпендикулярно акустической оси. В реальности неизбежно появление сдвигов и небольших углов между акустической осью и нормалью к плоскости голограммы. В таком случае при пересчете акустического поля на поверхность излучателя возникнет отклонение от реального распределения на поверхности излучателя из-за того, что поверхность, на которую проводится расчет, не совпадает с поверхностью излучателя. Данное отклонение будет влиять на достоверность последующих расчетов из голограммы излучателя.

Суть метода коррекции заключается в определении расположения оси излучателя по измеренной голограмме в приближении симметричности акустического поля, переносе данных голограммы на плоскость, перпендикулярную найденной оси, и центрировании относительно нее.

B § 1.4 предлагается прецизионный способ измерения углов между позиционирования механическими осями системы с помощью импульсной акустической голографии для уменьшения ошибок измерений. При сборке позиционера не всегда можно гарантировать перпендикулярность механических осей с необходимой точностью. Кроме того, за время эксплуатации системы возможно появление дополнительного отклонения осей. На практике неизвестное отклонение осей от ортогональности может привести к появлению систематической ошибки в позиционировании приемника и, как следствие, к неточному пространственному измерению характеристик акустического поля.

Рассматриваются две системы координат (СК): идеальная прямоугольная и реальная (механическая) с перекосами. Перекос механических осей системы позиционирования относительно идеальной СК можно описать тремя углами $\alpha_1 = \angle (y\tilde{z}, yz), \alpha_2 = \angle (x\tilde{z}, xz), \alpha_3 = \angle (\tilde{y}, y)$ (рис. 5а).



Рис. 5. (а) Ортогональная (синие оси) и неортогональная (реальная, черные оси) СК. Красными точками схематично показаны координаты, в которых происходит запись сигнала на двух голограммах в неортогональной СК. (б) Общий вид системы позиционирования. (в) Схема измерений, где две голограммы измерены параллельно плоскости (\tilde{x}, \tilde{y}) , две другие – параллельно плоскости (\tilde{x}, \tilde{z}) . (г) Акустический преобразователь, использованный в эксперименте.

Для определения величин введенных углов проводится измерение двух голограмм одного источника. Отношение угловых спектров голограмм $\Pi(\omega, k_x, k_y)$, измеренных в искривленной СК на плоскости $\tilde{z} = Z_0$ и на параллельной плоскости $\tilde{z} = 0$, является пропагатором для соответствующей компоненты углового спектра и имеет следующий вид:

$$\Pi\left(\omega,\tilde{k}_{x},\tilde{k}_{y}\right) = \tilde{S}_{Z_{0}}\left(\omega,\tilde{k}_{x},\tilde{k}_{y}\right) / \tilde{S}_{0}\left(\omega,\tilde{k}_{x},\tilde{k}_{y}\right) = \exp\left(i\Phi\left(\omega,\tilde{k}_{x},\tilde{k}_{y}\right)\right) = \exp\left(-i\left(\tilde{k}_{x}x_{0}+\tilde{k}_{y}y_{0}\right)+i\sqrt{1-\sin\alpha_{1}^{2}-\sin\alpha_{2}^{2}}\sqrt{k^{2}-\tilde{k}_{x}^{2}-\left(\tilde{k}_{y}/\cos\alpha_{3}-\tilde{k}_{x}\tan\alpha_{3}\right)^{2}}Z_{0}\right), \quad (14)$$

где $x_0 = -(\sin \alpha_1 - \tan \alpha_3 \sin \alpha_2)Z_0$; $y_0 = -\sin \alpha_2/\cos \alpha_3 Z_0$, $\tilde{k}_x = k_x$; $\tilde{k}_y = k_y \cos \alpha_3 + k_x \sin \alpha_3$. Аргументами пропагатора на частоте ω (14) являются угловые частоты в неортогональной СК \tilde{k}_x, \tilde{k}_y . Углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – параметры, которые необходимо определить из пропагатора, расстояние Z_0 между голограммами считается известным.

В работе измерялся перекос механических осей системы позиционирования UMS-3 (рис. 5б). Перекос вносился искусственно, чтобы иметь возможность исследовать точность метода при разных углах перекоса. Проведены три серии измерений, в каждой из которых ось \tilde{y} была отклонена от оси y на различный угол (рис. 5а).

В формуле (14), в отличие от α_1 , α_2 зависимость от параметра α_3 является слабой, и по экспериментальным голограммам, записанным вдоль (\tilde{x}, \tilde{y}) на разных расстояниях z, точное определение α_3 является затруднительным. Чтобы с сопоставимой точностью найти все три угла, следует объединить измерения при разных ориентациях голограммы И излучателя относительно системы позиционирования (рис. 5в). В одной серии измерений с заданным углом α_3 были записаны четыре голограммы: две из них были расположены параллельно плоскости (\tilde{x}, \tilde{y}) при горизонтальном расположении оси источника, две – параллельно плоскости (\tilde{x}, \tilde{z}) при вертикальном расположении оси (рис. 5в). Имея два наиболее точно определенных угла α_1 и α_2 , задающих поперечную голограмме ось при ориентации голограммы параллельно плоскости (\tilde{x}, \tilde{y}) , и углы α'_1 и α'_2 при расположении голограммы параллельно плоскости (\tilde{x}, \tilde{z}) , можно определить угол α_3 :

$$\alpha_{3} = \arcsin \sqrt{\sin \alpha_{1}^{\prime 2} + \sin \alpha_{2}^{\prime 2} - \sin \alpha_{2}^{\ 2}} \,. \tag{15}$$

Углы α_1 , α_2 , α_3 были определены путем минимизации отклонения экспериментальной и теоретической фазы пропагатора в области вблизи нулевых пространственных частот при фиксированных частотах ω , результаты представлены сплошными линиями на рис. 6. Дополнительно углы перекоса были измерены геометрическим способом с использованием лазера (пунктирные линии на рис. 6). Результаты хорошо согласуются друг с другом (см. табл.1).



Рис. 6. Углы α_1 , α_2 , α_3 , полученные из голограмм на разных частотах в трех сериях измерений: (а) без дополнительного перекоса, (б) дополнительный перекос оси $\Delta \alpha_3 \approx 0.8^\circ$, (в) дополнительный перекос $\Delta \alpha_3 \approx 1.1^\circ$. (г) Спектр акустического сигнала в центре ближней голограммы.

		$\alpha_{_1},$ град.	α_2 , град.	$lpha_3$,град.
Измерения из голограммы	Нет доп. перекоса, $\Delta \alpha_3 \approx 0^\circ$	0.91 ± 0.03	0.33 ± 0.03	0.17 ± 0.06
	Перекос $\Delta \alpha_3 \approx 0.8^\circ$	0.96 ± 0.08	0.26 ± 0.09	0.78 ± 0.03
	Перекос $\Delta \alpha_3 \approx 1.1^\circ$	0.87 ± 0.02	0.31 ± 0.02	1.16 ± 0.02
Измерения с	Измерения с Нет доп. перекоса, $\Delta \alpha_3 \approx 0^\circ$	0.9 ± 0.2	0.3 ± 0.2	0 ± 0.2
использованием лазера	Перекос $\Delta \alpha_3 \approx 0.8^\circ$	0.9 ± 0.2	0.3 ± 0.2	0.7 ± 0.2
	Перекос $\Delta \alpha_3 \approx 1.1^\circ$	0.9 ± 0.2	0.3 ± 0.2	1.1 ± 0.2

Таблица 1. Углы перекоса осей системы позиционирования, полученные в трех сериях измерений и полученные геометрическим методом.

В Главе 2 предлагается метод широкополосной калибровки гидрофонов, основанный на регистрации акустической голограммы волнового пучка в импульсном режиме и измерении частотной зависимости акустической радиационной силы, действующей на поглотитель большого диаметра.

Идея предлагаемого метода основана на том, что измерение нестационарной голограммы позволяет получить большой набор монохроматических голограмм, характеризующих пространственную структуру поля при возбуждении излучателя гармоническим электрическими сигналами в определенном диапазоне частот. Регистрация нестационарной голограммы в импульсном режиме тем самым позволяет найти чувствительность гидрофона для большого набора частот, если наряду с измерением голограммы на указанных частотах провести измерение радиационной силы $F_z(\omega)$, оказываемой акустическим пучком на поглотитель большого диаметра.

При проведении калибровки гидрофонов с использованием метода акустической голографии важно учитывать, что угловой спектр реального акустического пучка может быть достаточно широким, особенно в случае использования фокусирующих излучателей. В этих условиях акустическая голограмма может заметно исказиться из-за неоднородной направленности гидрофона. Учет диаграммы направленности $D(\omega, k_x, k_y)$ гидрофона (10), (12) позволяет этого избежать.

Комбинируя результаты измерения радиационной силы и голограммы $U(\omega, x, y)$, можно получить выражение для чувствительности гидрофона:

$$M_{0}(\omega) = \sqrt{\frac{1}{8\pi^{2}\rho c^{2}F_{z}(\omega)} \iint_{\Sigma_{k}} \left(1 - \frac{k_{x}^{2} + k_{y}^{2}}{k^{2}}\right) \left|\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega, x, y)e^{-ik_{x}x - ik_{y}y} dxdy}{D(\omega, k_{x}, k_{y})}\right|^{2} dk_{x}dk_{y}, \quad (16)$$

где $U(\omega, x, y)$ – монохроматическая голограмма, полученная из импульсной голограммы по формуле (1), $F_z(\omega)$ – радиационная сила, действующая на поглотитель при возбуждении излучателя монохроматическим сигналом с амплитудой, равной амплитуде спектральной компоненты подаваемого на излучатель электрического импульса (рис. 96).

Для экспериментальной демонстрации предлагаемого метода было проведено определение частотных характеристик чувствительности игольчатого HNA-0400 и HGL-0200 гидрофонов капсульного С диаметрами чувствительного элемента 0.4 и 0.2 мм, соответственно. Процедура калибровки включает в себя два типа измерений: 1) измерение радиационной силы в зависимости от частоты сигнала и амплитуды подаваемого на излучатель электрического напряжения (рис. 7); 2) измерение импульсной голограммы того калибруемым преобразователя же гидрофоном. Дополнительно измеряется диаграмма направленности гидрофона.



Рис. 7. Схема установки для измерения радиационной силы.

Проведено измерение радиационной силы, действующей на поглотитель в зависимости от частоты и напряжения сигнала, подаваемого с генератора. Радиационная сила линейно зависит от квадрата амплитуды напряжения на излучателе, при этом зависимость проходит через точку (0,0) (рис.8а), следовательно ее можно задать угловым коэффициентом $k(\omega)$ (рис.8б), тем самым связав для каждой частоты радиационную силу и напряжение на излучателе.



Рис. 8. (а) Зависимость радиационной силы от квадрата напряжения для 6 частот. Черными точками показаны измерения. (б) Частотная зависимость коэффициента наклона полученных зависимостей.

Измерение нестационарной голограммы излучателя проводилось описанным выше методом. Основные элементы измерительной установки показаны на рис. 9. В каждой точке голограммы выделялись гармоники на частотах, на которых перед этим проводились измерения радиационной силы. Таким образом, для каждой частоты были получены монохроматические голограммы излучателя. Систему «электронный блок излучателя – пьезоэлектрический преобразователь – акустический путь сигнала в воде» при используемых уровнях можно считать линейной, поэтому рассчитанные голограммы соответствовали случаю, когда на излучатель подается

монохроматический сигнал с амплитудой, равной модулю спектра сигнала на излучателе на рассматриваемой частоте (рис. 9).



Рис. 9. (а) Схема экспериментальной установки. (б) Спектр сигнала на излучателе.

На рис. 10. приведены голограммы и амплитуда углового спектра для основной частоты работы преобразователя (2 МГц) при измерении игольчатым (вверху) и капсульным (внизу) гидрофонами.



Рис. 10. (а) Амплитуда и (б) фаза сигнала в центральной области голограммы на частоте 2 МГц, (в) соответствующая амплитуда углового спектра для измерений игольчатым гидрофоном (верхний ряд) и капсульным гидрофоном (нижний ряд).

Различие в структуре голограммы и углового спектра в первую очередь вызвано значительным различием диаграмм направленности использованных гидрофонов. Для корректировки полученных результатов проводилось измерение диаграмм направленности: гидрофон на поворотной раме помещался на акустической оси плоского излучателя на значительном расстоянии от него (в дальней зоне). На излучатель подавался сигнал в виде длинного радиоимпульса. Частота заполнения изменялась с шагом 100 кГц в диапазоне от 1 до 3 МГц. Гидрофон поворачивался относительно акустической оси излучателя в диапазоне углов от –90° до 90° с шагом 1°. На рис. 11 приведена частотная зависимость диаграммы направленности капсульного и игольчатого гидрофонов.



Рис. 11. Частотные зависимости диаграмм направленности (а) капсульного и (б) игольчатого гидрофонов.

Используя полученный угловой коэффициент линейной зависимости между радиационной силой и квадратом напряжения (рис. 9б), а также спектр подаваемого на излучатель электрического сигнала (рис. 9б), можно найти частотную зависимость радиационной силы F_z , которая входит в знаменатель формулы (16). Комбинируя измерения радиационной силы и голограммы с учетом измеренных диаграмм направленности (рис. 11), были получены калибровочные кривые для чувствительности игольчатого и капсульного гидрофонов (рис. 12а, б).

Полезно отметить, что голограмма одного преобразователя измерена двумя гидрофонами при одинаковом режиме излучения, поэтому можно дополнительно связать чувствительность и диаграммы направленности двух гидрофонов по формуле:

$$M_{HNA}(\omega) = \frac{S_{HNA}(\omega, k_x, k_y)}{D_{HGL}(\omega, k_x, k_y)} \frac{D_{HNA}(\omega, k_x, k_y)}{S_{HGL}(\omega, k_x, k_y)} M_{HGL}(\omega), \qquad (17)$$

где $M_{HNA}(\omega), M_{HGL}(\omega)$ – чувствительность игольчатого и капсульного гидрофонов, соответственно, $D_{HNA}(\omega, k_x, k_y)$ и $D_{HGL}(\omega, k_x, k_y)$ – их диаграммы направленности. При этом результат аналитически не зависит от используемой комбинации аргументов (k_x, k_y) при условии, что $k_x^2 + k_y^2 \le k^2$. Для устранения шумов в экспериментальных данных следует усреднить угловой спектр по всем пространственным частотам. В случае, если диаграмма направленности калибруемого гидрофона неизвестна, усреднение следует проводить В небольшом δk круге вокруг нулевых пространственных частот:

$$M_{HNA}(\omega) = M_{HGL}(\omega) \frac{\sum_{k_x^2 + k_y^2 \le \delta k^2} S_{HNA}(\omega, k_x, k_y)}{\sum_{k_x^2 + k_y^2 \le \delta k^2} S_{HGL}(\omega, k_x, k_y)}.$$
(18)

Полученная таким образом калибровка игольчатого гидрофона (рис. 126) согласуется с абсолютным измерением, полученным в данной работе.



Рис. 12. Заводская (кривая 1), полученная предлагаемым методом без учета диаграммы направленности (кривая 2) и с ее учетом (кривая 3) чувствительность (а) капсульного и (б) игольчатого гидрофонов. Серая область показывает ошибку заводской калибровки. Красная область показывает ошибку измерения предлагаемого в работе метода. Кривая 4 (б) показывает рассчитанную чувствительность по формуле (18).

В Главе 3 в рамках известного метода введения образца предлагается новый подход к измерению акустических параметров сред. Он основан на использовании метода акустической голографии, позволяющего экспериментально записать полную информацию о структуре волнового пучка и использовать ее для нахождения параметров плоских волн, из которых этот пучок состоит. Это позволяет косвенным образом реализовать режим зондирования исследуемого образца плоской волной, при этом заменяя ограниченный в поперечном направлении образец бесконечно широким слоем из того же материала, т.е. сводя реальную задачу к точно решаемой задаче о прохождении плоской волны через плоскопараллельный слой исследуемой среды.

Акустические свойства сред принято задавать скоростью звука и коэффициентом затухания. Эти параметры вводятся для плоской гармонической волны с комплексным профилем вида $\exp(-i\omega t + ikz)$. Специфика среды при этом задается законом дисперсии $k = \omega/c + i\alpha$. Зависимости $c = c(\omega)$, $\alpha = \alpha(\omega)$ и плотность среды ρ полностью задают акустические свойства однородных изотропных сред.

Поскольку идеализированная плоская гармоническая волна не может быть создана в эксперименте, при измерениях c и α обычно создаются условия, приближающие акустическое поле к желаемому плосковолновому виду.

Рассмотрим интересующую нас ситуацию, когда в эталонную среду помещается плоскопараллельный бесконечный слой толщины H из исследуемого материала, причем плоские поверхности указанного слоя перпендикулярны оси z. Отношение измеренных в одном и том же месте со слоем и без угловых спектров, пропагатор $\Pi(\omega, k_x, k_y)$, зависит лишь от толщины и акустических свойств слоя:

$$\Pi(\omega, k_x, k_y) = T_{\text{in-out}}(\omega, k_x, k_y) e^{i\left(\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} - \sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}\right)H} = A_{\Pi}(\omega, k_x, k_y) e^{i\Phi_{\Pi}(\omega, k_x, k_y)},$$
(19)

где $T_{\text{in-out}} = T_{\text{in}}T_{\text{out}}$ – коэффициент прохождения продольной волны.

Учитывая затухание в первом порядке малости при условии $\alpha c/\omega <<1$, получим:

$$A_{\Pi}\left(\omega,k_{x},k_{y}\right) \approx \hat{T}_{\text{in-out}} \exp\left[-\omega H\left(\frac{\alpha/c}{\sqrt{(\omega/c)^{2}-k_{x}^{2}-k_{y}^{2}}}-\frac{\alpha_{0}/c_{0}}{\sqrt{(\omega/c_{0})^{2}-k_{x}^{2}-k_{y}^{2}}}\right)\right], \quad (20)$$

$$\Phi_{\Pi}\left(\omega,k_{x},k_{y}\right) \approx \left(\sqrt{(\omega/c)^{2}-k_{x}^{2}-k_{y}^{2}}-\sqrt{(\omega/c_{0})^{2}-k_{x}^{2}-k_{y}^{2}}\right)H$$

$$+\frac{\hat{Z}-\hat{Z}_{0}}{\hat{Z}+\hat{Z}_{0}}\left(\frac{\alpha\,\omega/c}{\left(\omega/c\right)^{2}-k_{x}^{2}-k_{y}^{2}}-\frac{\alpha_{0}\,\omega/c_{0}}{\left(\omega/c_{0}\right)^{2}-k_{x}^{2}-k_{y}^{2}}\right).$$
(21)

Здесь $\alpha_0 = \alpha_0(\omega)$ – коэффициент поглощения в эталонной среде, который предполагается известным, $\hat{Z}_0 = \rho_0 c_0 / \sqrt{1 - (k_x^2 + k_y^2) / (\omega/c_0)^2}$,

 $\hat{Z} = \rho c / \sqrt{1 - (k_x^2 + k_y^2) / (\omega/c)^2}$ – нормальные импедансы сред при пренебрежении затуханием, $\hat{T}_{\text{in-out}} = 4\hat{Z}_0 \hat{Z} / (\hat{Z}_0 + \hat{Z})^2$ – коэффициент прохождения через две границы раздела. В качестве эталонной среды удобно выбирать воду. Для нее дисперсией скорости звука можно пренебречь, а поглощение считать пренебрежимо малым по сравнению с поглощением в исследуемой среде $\alpha_0 = 0$.

В реальном эксперименте при нахождении $c(\omega)$ и $\alpha(\omega)$ неизбежны ошибки, связанные с погрешностями при измерении голограмм, которые можно уменьшить, если проводить усреднение по статистически независимым измерениям. Пропагатор $\Pi(\omega, k_x, k_y)$ дает такую возможность. Действительно, пропагаторы для разных (k_x, k_y) могут считаться независимыми величинами, при этом в каждом из них содержится информация о параметрах среды $c^{(k_x,k_y)}(\omega)$ и $\alpha^{(k_x,k_y)}(\omega)$.

С точностью до квадратичных по пространственным частотам членов при условии $\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \ll \omega/c_0$, ω/c скорость звука и коэффициент поглощения выражаются следующим образом:

$$\frac{1}{c^{(k_x,k_y)}(\omega)} \approx \frac{1}{c_0} + \frac{\Phi_{\Pi}(\omega,k_x,k_y)}{\omega H} \left[1 - \frac{c_0 c}{2\omega^2} \left(k_x^2 + k_y^2\right) \right], \tag{22}$$

$$\alpha^{(k_x,k_y)}(\omega) \approx \frac{1}{H} \left\{ \ln[T_{\text{in-out}}] - \ln[A_{\Pi}(\omega,k_x,k_y)] + \frac{(c^2 - c_0^2)(\rho_0 c_0 - \rho c)}{2\omega^2(\rho_0 c_0 + \rho c)} (k_x^2 + k_y^2) \right\}, \quad (23)$$

где $c = c^{(0,0)}$, $T_{\text{in-out}} = \hat{T}_{\text{in-out}} \left(k_x = 0, k_y = 0 \right)$. Таким образом, анализ пространственного спектра акустического пучка, пропускаемого через плоскопараллельный слой исследуемой среды, позволяет определить акустические свойства материала слоя. Поскольку пропагатор (19) не зависит от конкретного вида пространственного спектра,

получившийся результат справедлив для любого пучка, в том числе для пучка малого диаметра.

На практике условие плоскопараллельности и однородности слоя не всегда можно обеспечить с достаточной точностью. В этом случае представление волнового поля в виде суперпозиции невзаимодействующих плоских волн разных направлений не представляется возможным. Неоднородность среды приводит к взаимодействию компонент пространственного спектра. Однако при слабой и плавной неоднородности каждая поперечная мода порождает моды с близкими пространственными частотами. Поскольку на малом шаге $z \rightarrow z + dz$ перемешивание мод из-за неоднородности не меняет полной мощности волны, а диссипация каждой из мод происходит по закону поглощения плоской волны, то можно считать, что зависимость полной мощности от расстояния описывается формулой $W(\omega, z) \sim e^{-2\alpha(\omega)z}$. Следовательно, коэффициент поглощения может быть найден на основе измерения полной мощности пучка:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{2H} \left\{ \ln \left[\frac{W_{\text{without layer}}(\omega, z)}{W_{\text{with layer}}(\omega, z)} \right] + 2\ln \frac{4\rho_0 c_0 \rho c}{\left(\rho_0 c_0 + \rho c\right)^2} \right\}.$$
(24)

Входящие в эту формулу величины полной мощности пучка выражаются через угловой спектр волны:

$$W(\omega, z) = \frac{1}{8\pi^2 \rho_0 c_0} \iint_{\Sigma_k} \sqrt{1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{k_0^2}} \left| S(\omega, k_x, k_y, z) \right|^2 dk_x dk_y.$$
(25)

Для экспериментальной проверки метода использовались плоскопараллельные образцы, изготовленные из силиконовой резины (полидиметилсилоксан) марки RTV-2 (табл. 2).

Расположение основных экспериментальной элементов установки показано на рис. 13. Исследуемый образец размещался напротив излучателя в области перед фокусом. Излучатель возбуждался импульсным сигналом. Прием акустического сигнала осуществлялся гидрофоном игольчатого типа HNA-0400.

Дополнительно

Обозначение	Форма	Толщина,	Апертура,
образца		ММ	ММ
D10	диск	9.68±0.05	диам. 108
D15	диск	14.62±0.05	диам. 108
D20	диск	19.55±0.05	диам. 108
C20	кубоид	19.55±0.05	20×17
	-		

Таблица 2. Геометрические характеристики образцов из силиконовой резины марки RTV-2.



Рис. 13. Экспериментальная установка.

описываемому в работе методу проведено измерение акустических характеристик материала методом замещения. Для этого два плоских преобразователя были выставлены соосно, на один из них подавался импульсный сигнал, второй при этом

к

являлся приемником акустического сигнала. Запись сигнала проводилась без образцов и при помещении широкоапертурных образцов (табл. 2) между двумя преобразователями перпендикулярно оси, соединяющей преобразователи.

На рис. 14 показано поперечное распределение амплитуды и фазы голограммы на частоте 1 МГц, углового спектра указанной голограммы и пропагатора. На рис. 15 изображено рассчитанное на основе голограммы распределение амплитуды давления в поперечной плоскости, схематично показано расположение образцов на фоне структуры акустического пучка, которым зондировался образец.



Рис. 14. Вверху: амплитуда и фаза голограммы на частоте 1 МГц в присутствии образца D10. В середине: соответствующий угловой спектр. Окружность радиуса k помечает границу области распространяющихся плоских волн. Внизу: пропагатор.



Рис. 15. Распределение амплитуды акустического давления в поперечной плоскости на частотах: 0.5 МГц (вверху) и 1.5 МГц (внизу). Белая дуга соответствует поверхности излучателя. Пунктирная линия отмечает плоскость измерения голограммы.

Результаты измерения скорости коэффициента поглощения и фазовой скорости акустических волн показаны на рис. 16. Значения акустических параметров материала были получены путем усреднением величин $1/c^{(k_x,k_y)}$ и $\alpha^{(k_x,k_y)}$, представленных формулами, по компонентам углового спектра в пределах круга радиуса $k_{\max} \left[\text{MM}^{-1} \right] \approx 1.26 \cdot f \left[\text{M} \Gamma \text{I} \right]$. На рис. 16а изображены частотные зависимости коэффициента поглощения, найденные для всех четырех образцов с использованием пропагатора. Для образца D20 добавлен результат на основе полной акустической мощности. На рис. 16б показаны частотные зависимости скорости звука.

Приведенные на рис. 16 результаты для частотной зависимости коэффициента поглощения указывают на высокую повторяемость результатов измерения при изменении толщины образца – в пределах частотного диапазона от 0.4 до 1.6 МГц.

Показательным результатом, иллюстрирующим работоспособность предложенного метода измерения коэффициента α , является совпадение кривых поглощения для протяженного в поперечном направлении образца D20 и небольшого по размерам образца C20, имеющего ту же толщину. Измеренное поглощение описывается степенной зависимостью $\overline{\alpha}(f) = \alpha_0 (f/f_0)^n$, где $f_0 = 1$ МГц, $\alpha_0 = 20.92$ м⁻¹ – коэффициент поглощения на частоте f_0 и $\eta = 1.59$.

Результаты для фазовой скорости волны для разных образцов отличаются друг от друга (рис. 16б). Различия между результатами для разных образцов сводятся главным образом к небольшому сдвигу вдоль оси ординат. Сам характер зависимости от частоты в интервале от 0.4 до 1.6 МГц для разных образцов практически одинаков. Вертикальный сдвиг может быть объяснен ограниченной точностью измерения их толщины, а выбросы в областях 0.7 и 1.3 МГц, а также на краях диапазона обуславливаются низким отношением сигнал/шум на указанных частотах.



Рис. 16. Частотные зависимости (а) коэффициента поглощения и (б) фазовой скорости и для различных исследованных образцов.

При использовании метода замещения для измерения характеристик материалов предполагается, что от излучателя распространяется плоская волна, которая падает нормально к образцу и приемнику. Следовательно для расчета скорости звука и поглощения следует использовать формулы (22), (23) при $(k_x = 0, k_y = 0)$, которые выражают данные характеристики через нормальный к поглотителю пропагатор. Результаты, полученные методом замещения с помощью широкоапертурных образцов согласуются с результатами, полученными с помощью предлагаемого в работе метода, (рис. 16) в пределах точности измерений.

Характерной особенностью экспериментальных частотных зависимостей скорости звука является их растущий характер. Дисперсия фазовой скорости, согласно принципу причинности, взаимосвязана с дисперсией коэффициента затухания. На рис. 17 приведены найденные из измеренного пропагатора зависимости для коэффициента поглощения и фазовой скорости для образца D20. Сплошная кривая соответствует степенной зависимости. С учетом плавности поведения дисперсионных кривых, интегральные дисперсионные соотношения можно заменить приближенно локальными соотношениями. В случае степенной зависимости коэффициента

поглощения $\alpha = \alpha_0 (f/f_0)^{\eta}$ при $0 \le \eta \le 2$ локальные дисперсионные соотношения позволяют с высокой точностью выразить фазовую скорость по следующей формуле:

$$c(f) = c(f_0) / \left\{ 1 + \frac{\alpha(f_0)c(f_0)}{2\pi f_0} \tan\left(\frac{\pi}{2}\eta\right) \left[\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\eta-1} - 1 \right] \right\}.$$
 (26)

На рис. 176 пунктирная кривая построена на основе выражения (26) с использованием параметров степенной зависимости, представленной сплошной кривой на рис. 17а. Видно хорошее совпадение результатов эксперимента с зависимостью, предсказанной из принципа причинности.



Рис. 17. (а) Коэффициент поглощения. (б) Фазовая скорость. Точками на (а) и (б) показаны экспериментальные значения.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

1. Выполнена характеризация ряда излучателей с помощью предложенного метода нестационарной акустической голографии. Исследованы основные факторы, влияющие на достоверность измерений, такие как ошибка в позиционировании голограммы относительно излучателя и перекос механических осей системы позиционирования. Разработан способ определения положения плоскости голограммы относительно осесимметричного излучателя для точного восстановления характера колебаний поверхности излучателя. Разработан способ определения отределения отклонения осей системы позиционирования от ортогональности методом акустической голографии.

2. Разработана экспериментальная установка для измерения чувствительности гидрофонов определения радиационной методом силы акустического пучка, действующего на поглотитель, и регистрации нестационарной акустической голограммы. Достигнута относительная точность измерений чувствительности гидрофонов в 3-5% в широкой частотной полосе. Проведено измерение направленности и чувствительности игольчатого И капсульного гидрофонов.

3. Разработан новый способ измерения акустических характеристик материалов (скорость звука, поглощение) на основе нестационарной акустической голографии. Реализована экспериментальная установка для измерения акустических характеристик с помощью образцов малого объема. Проведено исследование материала схожего по акустическим и механическим свойствам тканям организма.

21

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

- A1. Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., Kreider W., Sapozhnikov O.A. Holographic extraction of plane waves from an ultrasound beam for acoustic characterization of an absorbing layer of finite dimensions // Journal of the Acoustical Society of America. 2021. V. 149. No. 1. P. 386 – 404. IF = 1.78 (WoS)
- А2. Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Определение и компенсация перекоса осей трехкоординатных систем позиционирования с помощью метода акустической голографии // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 6. С.854 862. IF = 0.48 (Scopus)
- А3. Цысарь С.А., Николаев Д.А., Сапожников О.А. Широкополосная виброметрия двумерной ультразвуковой решетки методом нестационарной акустической голографии // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 3. С. 328 337. IF = 0.782 (WoS)
- А4. Калоев А.З., Николаев Д.А., Хохлова В.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Пространственная коррекция акустической голограммы для восстановления колебаний поверхности аксиально-симметричного ультразвукового излучателя // Акустический журнал. 2022. Т. 68. № 1.С. 1 – 13. IF = 0.782 (WoS)

Публикации в других рецензируемых научных изданиях:

- А5. Николаев Д.А., Цысарь С.А. Метод интеграла Рэлея для исследования импульсных ультразвуковых источников // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2015. № 4. С.154355-1 – 154355-3. IF = 0.065 (РИНЦ)
- A6. Nikolaev D., Tsysar S., Krendeleva A., Sapozhnikov O., Khokhlova V. Using acoustic holography to characterize absorbing layers // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2019. V. 38. № 045012. P. 1 5. IF = 0.19 (Scopus)
- А7. Николаев Д.А., Цысарь С.А., Хохлова В.А., Сапожников О.А. Определение характеристик поглощающих слоев с использованием акустической голографии // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2020. № 1. С. 2011602-1 2011602-6. ІF = 0.065 (РИНЦ)

Публикации в сборниках и тезисы докладов:

A8. Tsysar S., Nikolaev D., Khokhlova V., Kreider W., Sapozhnikov O. Acoustic holography combined with radiation force balance measurements for high-intensity field characterization // Book of Abstracts of the 21st International Symposium on Nonlinear Acoustics. 2018. P. 19.

- А9. Хасанова М.В., Медведева Е.В., Николаев Д.А., Росницкий П.Б., Цысарь С.А., Хохлова В.А., Сапожников О.А. Исследование акустических характеристик гелевых фантомов биологической ткани путем создания плоской волны в ближней зоне излучателя конечного размера // Сборник трудов XVI Всероссийской школы-семинара «Волны в неоднородных средах» имени профессора А.П. Сухорукова. 2018. С. 61 – 64.
- А10. Дорофеева А.А., Сапожников О.А., Цысарь С.А., Николаев Д.А. Плоский пьезоэлектрический преобразователь как устройство по созданию эталонного поля // Сборник трудов XVI Всероссийская школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова. 2018. С. 13 15.
- А11. Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Широкополосная калибровка гидрофонов с использованием методов акустической голографии и измерения радиационной силы // Сборник трудов XVI Всероссийская школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова. 2018. С.34 36.
- A12. Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., Sapozhnikov O.A. Acoustic characterization of an absorptive layer using acoustic holography // Abstract Book of 2019. International Congress on Ultrasonics. 2019. P. 213.
- A13. Sapozhnikov O.A., Kreider W., Tsysar S.A., Nikolaev D.A., Khokhlova V.A. Acoustic holography for calibration of ultrasound sources and in situ fields in therapeutic ultrasound (ASA Meeting abstract) // Journal of the Acoustical Society of America. 2019. V. 145. № 3 (Pt. 2). P. 1857.
- A14. Tsysar S.A., Nikolaev D.A., Sapozhnikov O.A. Characterization of a two-dimensional ultrasound array using transient acoustic holography // Abstract Book of 2019 International Congress on Ultrasonics. 2019. P. 212.
- A15. Sapozhnikov O.A., Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., Kreider W. *Experimental verification of the theoretical relationship between the acoustic power and corresponding radiation force for an ultrasonic beam //* Abstract Book of 2019 International Congress on Ultrasonics. 2019. P. 277.
- А16. Котельникова Л.М., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Использование характеристик рассеяния ультразвуковой волны на упругом шаре для определения его акустических параметров // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова. 2019. С. 36 – 39.
- А17. Петросян С.А., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Свет В.Д., Сапожников О.А. Звуковидение в жидкости с приемом эхо-импульсных сигналов посредством многоканального волновода и зеркально-линзовой акустической системы // Сборник трудов Всероссийской акустической конференции. 2020. С. 179 – 185.

- А18. Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Определение и компенсация перекоса осей трехкоординатных систем позиционирования с помощью метода акустической голографии // Сборник трудов Всероссийской акустической конференции. 2020.С.421 – 428
- А19. Котельникова Л.М., Николаев Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Определение упругих свойств твердотельного шара по результатам рассеяния на нем акустического пучка // Сборник трудов Всероссийской акустической конференции. 2020. С. 34 – 38.
- А20. Калоев А.З., Николаев Д.А., Хохлова В.А. Управление параметрами фазированных кольцевых решеток для терапевтического воздействия на биологические ткани // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова. 2020. С. 9 – 10.
- A21. Sapozhnikov O.A., Nikolaev D.A., Tsysar S.A., Khokhlova V.A., Kreider W. Improved characterization of ultrasound sources by radiation force balance using acoustic holography in place of plane-wave and geometric approximations (ASA Meeting abstract) // Journal of the Acoustical Society of America. 2020. V. 148. № 4. P. 2517.
- А22. Кренделева А.Д., **Николаев** Д.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Характеризация поглощающих слоев с использованием акустической голографии и компьютерного моделирования // Труды «Ломоносов-2020». 2020. С. 10.
- А23. Кренделева А.Д., **Николаев Д.А.**, Петросян С.А., Цысарь С.А., Сапожников О.А. Акустическая голография в приложениях ультразвуковой характеризации и визуализации // Сборник трудов «Ломоносов -2021». 2021.