

На правах рукописи

Смагин Михаил Александрович

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕТОДАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ
ГОЛОГРАФИИ И ОПТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

Специальность 01.04.06 – акустика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена на кафедре акустики физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ).

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Сапожников О.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Гаврилов Л.Р.

кандидат физико-математических наук

Демин И.Ю.

Ведущая организация:

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)
(МИФИ)

Защита диссертации состоится «24» мая 2007 года в 16 часов на заседании Диссертационного Совета Д.501.001.67 в МГУ им. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория ЦФА.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ).

Автореферат разослан «23» апреля 2007 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета Д.501.001.67

кандидат физико-математических наук, доцент

Королев А.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Применение ультразвуковых технологий в медицине имеет почти полувековую историю. На сегодняшний день наиболее широкими областями применения ультразвука являются медицинская диагностика и терапия. Пьезокерамические преобразователи, применяемые в различных областях медицины, имеют различную конструкцию, форму и структуру рабочей поверхности: от простейших плоских одноэлементных преобразователей до сложных многоэлементных антенных решеток. Соблюдение свойств и структуры, создаваемых преобразователями акустических полей в пространстве, необходимо для повышения качества ультразвуковой диагностики и сохранения высокой избирательности воздействия в ультразвуковой терапии. Очевидно, что любая неточность или ошибка в медицине связаны с риском для здоровья. Поэтому требуется знать истинное распределение полей медицинских преобразователей в пространстве; в частности, для многоэлементных диагностических антенных решеток необходимо отслеживать возникновение и характер нежелательных боковых лепестков и паразитных максимумов, для устройств, применяемых в терапии и хирургии, необходимо точно знать интенсивность ультразвука, а также размеры фокальной перетяжки. Акустическое поле, создаваемое многоэлементными диагностическими датчиками, имеет достаточно сложную структуру. Оно изменяется во времени, испытывает фокусировку, может иметь боковые лепестки помимо основного формируемого луча. Необходимо также знать, каким образом будет изменяться поле такого акустического пучка в присутствии различных объектов сложной формы, отличающихся по акустическим свойствам от среды распространения, как, например, в биологических тканях.

Часто предсказать изменения полей во времени и их тонкую пространственную структуру невозможно без знания характера колебаний поверхности преобразователя. Производители медицинской техники всё ещё не обладают надежными методами контроля работы акустических преобразователей и не в состоянии предоставлять пользователям важные характеристики колеблющейся поверхности, такие как, например, распределение колебательной скорости. Обычно руководствуются простыми априорными предположениями о колебаниях поверхности преобразователей, например, предполагают соответствие колебаний поршневой моде. На практике поверхности преобразователей могут колебаться неравномерно. Причинами этого может быть как структура излучателя, например для многоэлементных датчиков, повреждения на его поверхности или возбуждение волн Лэмба в пьезопластине. Для диагностических датчиков также важно знать количество

излучающих элементов, быть уверенным в равномерности их работы и в отсутствии пропусков из-за неработающих элементов.

Важно также знать, каким образом конструктивные особенности диагностической системы влияют на структуру создаваемого акустического поля. Например, дискретный характер задания временных задержек возбуждающих сигналов, подаваемых на элементы датчика в цифровых системах, вносит значительные изменения в формируемый фазовый фронт и оказывает негативное влияние на структуру ультразвукового пучка и качество его фокусировки.

Существуют различные методы исследования полей ультразвуковых преобразователей.

Численное моделирование позволяет точно производить расчет пространственного распределения параметров поля при заданных граничных условиях на поверхности преобразователя. Однако, это требует точных сведений о характере колебаний поверхности их изменении во времени.

Метод лазерной виброметрии позволяет точно измерять параметры колебаний поверхности и обладает высоким пространственным и временным разрешением при измерениях смещения и колебательной скорости поверхности в газах. Однако данный метод имеет ограничения при проведении измерений в жидкости.

Исследование пространственного распределения акустического поля в жидкости традиционно проводится при помощи *прямых измерений гидрофонами*. Данная методика позволяет получить распределение акустического давления в пространстве с высоким разрешением. Сложность структуры поля медицинских преобразователей, стремление к увеличению пространственной области и высокому разрешению ведет к возрастанию времени измерений до нескольких часов. Для проведения измерений требуется сложное оборудование, зачастую дорогостоящее, - гидрофоны на ПВДФ пленках с малыми размерами чувствительных участков, что обусловлено мегагерцовым диапазоном излучения диагностических датчиков. Требуются также системы микропозиционирования, позволяющие перемещать гидрофон в пространстве с высокой точностью. Кроме того, для получения картины поля необходима обработка данных, полученных с гидрофона.

Метод *теневого оптической визуализации* не является прямым методом измерений, однако позволяет получить картину пространственного распределения акустического поля преобразователя без многочасовых сканирований гидрофонами и не требует какой-либо последующей обработки результатов. Метод позволяет получить информацию о размерах поля и фокальных перетяжек, о длине волны излучения, наличии боковых лепестков, выявить тонкие особенности пространственной структуры.

Видно, что все вышеописанные методы имеют достоинства и недостатки. Данная работа посвящена созданию комплексной экспериментальной методики исследования полей ультразвуковых преобразователей, использующихся в медицине. В частности, примененный в работе экспериментальный метод нестационарной акустической голографии позволяет выявлять тонкую структуру и динамику колебаний поверхности преобразователя, работающего в импульсном режиме (типичный режим работы медицинских диагностических датчиков). Данный метод сочетает измерения поля гидрофоном и последующий численный расчет для восстановления колебаний поверхности. Вместе с тем, оптическая шлирен-визуализация позволяет быстро выявить результат влияния неравномерности колебаний поверхности на пространственную структуру акустического поля преобразователя. Применение совокупности методов исследования позволяет эффективно решать задачу исследования полей медицинских диагностических преобразователей.

Цели работы

Основная цель работы состоит в определении количественных параметров импульсных акустических полей медицинских ультразвуковых преобразователей с различной конфигурацией рабочей поверхности и различными частотами с применением методов нестационарной акустической голографии, оптической визуализации и численного расчета. В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:

- Создание экспериментальных установок, основанных на использовании методов нестационарной акустической голографии и оптической шлирен-визуализации для исследования акустических полей и колебательных свойств медицинских ультразвуковых преобразователей.
- Экспериментальная демонстрация возможности применения метода нестационарной акустической голографии для исследования колебаний поверхностей как простых одноэлементных, так и сложных многоэлементных диагностических источников в импульсных режимах работы. Исследование разрешающей способности метода, его возможностей по выявлению тонкой структуры поля колебаний поверхности источника в импульсном режиме.
- Экспериментальное доказательство применимости шлирен-метода для исследования низкоинтенсивных акустических полей диагностических источников. Выявление возможностей шлирен-метода при работе с источниками слабых полей ультразвукового диапазона и с источниками со сложной конфигурацией излучающей поверхности.

- Экспериментальное и теоретическое исследование тонкой структуры излучаемых акустических полей и структуры полей колебаний поверхности для одно- и многоэлементных источников различной формы, на разных частотах в режиме излучения коротких импульсов на основе использования методов акустической голографии и оптической визуализации.
- Исследование влияния дискретизации временной задержки возбуждающих импульсов в диагностических системах с цифровым формированием зондирующих импульсов на структуру акустического поля многоэлементного преобразователя.

Научная новизна работы

- Впервые экспериментально реализован метод нестационарной акустической голографии для восстановления поля колебаний медицинских диагностических преобразователей (в том числе многоэлементных) мегагерцового диапазона частот. Продемонстрированы возможности метода при работе с диагностическими преобразователями, определена его разрешающая способность. Метод применен для восстановления распределения колебательной скорости излучающей поверхности, визуализации многоэлементной структуры датчика, размера и положения элементов, показана возможность измерения степени фокусировки акустического поля в двух плоскостях.
- Доказана возможность применения оптической теневой визуализации для анализа импульсных акустических полей медицинских диагностических преобразователей. Экспериментально исследованы параметры акустического поля: длина волны излучения, размеры фокальных перетяжек, характер и положение бокового излучения. Показана эффективность теневого метода при исследовании распространения ультразвуковых импульсов в среде, содержащей неоднородные включения типа акустических неоднородностей биологических тканей.
- Показана эффективность импульсного теневого метода для количественного измерения параметров ультразвуковых полей. В частности, измерены дисперсионные кривые для различных мод Лэмба в пластине из пьезокерамики типа ЦТС в диапазоне 0,3 – 1,6 МГц в воде. Теневой метод также применён для измерения в импульсном режиме скорости поверхностной волны утечки на границе «твёрдое тело - жидкость».
- Проведено численное исследование пространственного распределения акустических полей многоэлементных импульсных преобразователей в условиях дискретного

изменения задержек сигналов, подаваемых на отдельные элементы. Для типичных ультразвуковых диагностических медицинских приборов изучено влияние величины шага дискретизации временной задержки на видимые поперечные размеры объектов, визуализируемых в В-режиме.

Практическая значимость работы

- Предложенная методика исследования импульсных ультразвуковых преобразователей при помощи акустической голографии и теневой оптической визуализации является эффективным и надежным инструментом контроля преобразователей, используемых в медицине, характеристики свойств их полей. Зная свойства преобразователей и их полей, возможно повышать качество медицинской диагностики, избегать нежелательного и опасного воздействия ультразвука на биологические ткани.
- Метод оптической теневой визуализации является эффективным способом не только качественного экспресс-анализа, но и количественного исследования параметров ультразвуковых полей различных интенсивностей и частот, в том числе импульсных. Метод отличается простотой, удобством и скоростью получения экспериментальных результатов.
- Проведенное численное моделирование позволило по рассчитанным диаграммам, аналогичным черно-белым изображениям, формируемым диагностическими устройствами, оценить изменение качества ультразвуковой картины в зависимости от величины шага дискретизации временной задержки сигналов, подаваемых на отдельные излучающие элементы датчика. Результаты проведенного исследования позволяют выработать рекомендации производителям диагностических устройств с целью улучшения качества ультразвуковой визуализации.

Положения, выносимые на защиту

- Экспериментальное применение метода нестационарной акустической голографии для исследования колебаний медицинских ультразвуковых диагностических преобразователей мегагерцового диапазона частот. Экспериментальный анализ разрешающей способности метода, его возможностей по выявлению тонкой структуры поля колебаний поверхности источника в импульсном режиме.
- Экспериментальное применение метода оптической теневой визуализации для исследования акустических полей медицинских диагностических преобразователей.

Выявление возможностей теневого метода при работе с источниками слабых полей ультразвукового диапазона и с источниками со сложной конфигурацией излучающей поверхности. Экспериментальное доказательство применимости теневого метода для количественного исследования параметров ультразвуковых полей. Экспериментальное исследование взаимодействия акустических импульсов, создаваемых диагностическим преобразователем, с фантомами биологических тканей.

- Исследование влияния дискретизации временной задержки возбуждающих импульсов в диагностических системах с цифровым формированием зондирующих импульсов на структуру акустического поля многоэлементного преобразователя.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается совпадением данных, полученных в эксперименте, с результатами численного моделирования, проведенного автором, специальными проверочными экспериментами, использованием высокоточного экспериментального оборудования, а также физической и математической обоснованностью теоретических расчетов и экспериментальных схем.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры акустики физического факультета МГУ, Акустического института им. акад. Н.Н. Андреева (АКИН), а также на следующих конференциях и симпозиумах: на XI Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам “Ломоносов-2004” (Москва, 2004), на XV сессии Российского Акустического Общества (Нижний Новгород, 2004), на XVI сессии Российского Акустического Общества (Москва, 2005), на XVIII сессии Российского Акустического Общества (Таганрог, 2006), на X Всероссийской школе – семинаре “Волны – 2004” (Звенигород, Моск. обл., 2004 г.), на II Евразийском конгрессе по медицинской физике и инженерии “Медицинская физика - 2005” (Москва, 2005).

Кроме того, результаты были представлены на 2 международных конференциях: на Международном симпозиуме “Проблемы нелинейной волновой физики” (International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics” NWP-2005), на Международном симпозиуме по ультразвуку IEEE (2006 IEEE International Ultrasonics Symposium Vancouver, Canada, 2006).

Публикации

Основные результаты изложены в 10 опубликованных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 125 наименований. Общий объем работы составляет 118 страниц, включающие 40 рисунков.

Содержание работы

Во **введении** приводится обзор литературы и современного состояния проблемы, отраженной в теме диссертации. Описана история применения ультразвука в медицине, обозначены основные области применения ультразвука. Выделены трудности, возникающие при характеристике ультразвуковых диагностических источников. Показана важность точного предсказания полей, излучаемых источниками ультразвука. Показана актуальность создания надежных методик контроля колебаний преобразователей и анализа создаваемых ими акустических полей. Рассмотрены различные существующие методы исследования колебаний поверхности акустических преобразователей. Кратко описаны достоинства и недостатки прямого метода лазерной виброметрии по сравнению с непрямые методами. Рассмотрен метод акустической голографии, описаны области применения метода, а также его достоинства и недостатки по сравнению с другими техниками.

Также во **введении** рассмотрены методы исследования пространственного распределения акустического поля диагностических преобразователей. Описаны метод численного моделирования, метод прямого измерения гидрофонами и метод теневой оптической визуализации или шлирен-метод. Выделены достоинства и недостатки вышеописанных методов. В частности, шлирен-метод имеет определенные преимущества при исследовании акустических полей в присутствии модельных объектов, имитирующих биологические ткани и органы; при исследовании неизвестных заранее акустических полей, создаваемых акустическими преобразователями.

Приведено теоретическое описание шлирен-метода. Рассмотрен процесс формирования шлирен-изображения, влияние положения оптического ножа на формируемую картину. Описано применение в шлирен-системах когерентных и некогерентных источников света,

соответствующие типы применяемых оптических ножей. Проведен обзор ряда работ, посвященных шлирен-визуализации ультразвука.

Рассмотрена проблема влияния дискретизации временной задержки в диаграммоформирующих устройствах ультразвуковых диагностических систем на структуру акустического поля, создаваемого многоэлементными датчиками. Описан механизм формирования фазового фронта диаграммо-формирующим устройством, при этом дискретизация временной задержки возбуждающих импульсов не позволяет создать ровный волновой фронт требуемой кривизны, что ухудшает качество фокусировки, оказывая негативное влияние на получаемое изображение в целом. Проведено сравнение специфики данной задачи и сходных задач, решаемых в радиолокации. Доказана актуальность исследования акустических полей многоэлементных диагностических датчиков в зависимости от дискретизации временных задержек сигналов на элементах датчика. Также во **введении** сформулированы цели и задачи работы.

Первая глава посвящена экспериментальному применению метода нестационарной акустической голографии (НАГ) для исследования структуры колебаний поверхности ультразвуковых преобразователей в импульсном режиме.

В **параграфе 1.1** представлено теоретическое описание НАГ для реконструкции распределения колебательной скорости на поверхности источников. Акустической голографией называют способ восстановления источника звука по измерениям акустического давления вдоль некоторой поверхности, расположенной перед этим источником. Обычно измеряется амплитуда и фаза акустической волны. Однако, если источник имеет импульсный характер, частотный спектр сигналов широк и понятие фазы некорректно. В этом случае измеряется вся форма колебания в каждой точке. Периодичность процесса излучения акустических импульсов дает возможность синтезировать поверхность измерений, перемещая при помощи системы позиционирования гидрофон последовательно в узлы сетки измерений и производя измерения в каждой точке. Из-за обратимости волнового уравнения во времени поверхность измерений можно мысленно заменить обращаемым время зеркалом. Тогда отраженная от поверхности измерений волна будет распространяться назад и, дойдя до источника, восстановит свои исходные характеристики. Процесс отражения от обращаемого время зеркала и распространения волны назад является виртуальными (численными). Показано, что временная зависимость нормальной компоненты ускорения в каждой точке поверхности

источника может быть восстановлена, если известна форма акустической волны во всех точках поверхности измерений.

Далее выделены требования, предъявляемые при практической реализации метода НАГ к экспериментальным измерительным средствам.

В **параграфе 1.2** рассмотрено экспериментальное применение метода НАГ для восстановления колебательной скорости на поверхности источников с различной конфигурацией. В **пункте 1.2.1** описана экспериментальная установка, на которой реализуется метод НАГ. Далее подробно описаны основные компоненты установки и их характеристики, а также типы и параметры исследованных преобразователей.

В **пункте 1.2.2** обсуждается предварительное численное моделирование для оценки параметров эксперимента. При подготовке к эксперименту необходимо предварительно оценить некоторые параметры, такие как, – размер области и пространственный шаг между точками измерения. Описаны дифракционные соображения, из которых следуют оптимальное расстояние от излучателя до сетки измерений и размер сетки измерений в зависимости от длины волны излучения в воде и требуемого пространственного разрешения при восстановлении колебательной скорости. Далее определено соотношение, характеризующее зависимость пространственного шага сетки от длины волны излучения в случае максимального отдаления «двойника» восстановления (максимума первого порядка

дифракционной решетки, под которой понимается сетка измерений) от искомого распределения колебательной скорости (максимума нулевого порядка).

Рассмотрено численное моделирование, необходимое для уточнения параметров измерений. Численная схема использует прямой и обращенный интеграл Релея. Задается конфигурация источника и скорость на его поверхности, рассчитывается поле на плоскости измерения в дискретных точках, затем решается обратная задача по восстановлению распределения скорости на источнике. При сравнении результата восстановления с первоначально заданным

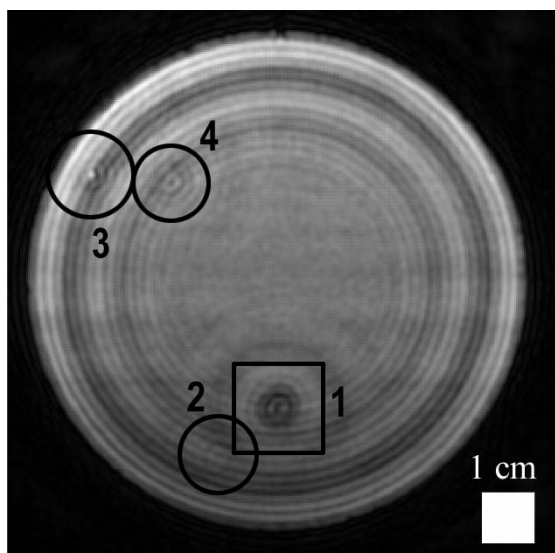


Рис. 1 Пространственное распределение колебательной скорости на поверхности излучателя. Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены области неоднородности колебательной скорости, связанные с дефектами пьезокерамики. Видны кольцевые неоднородности, соответствующие двум модам Лэмба.

распределением оценивается правильность выбранных параметров эксперимента.

В пункте 1.2.3 приведено описание эксперимента и экспериментальные результаты. Предварительно методика НАГ была отработана на более простом излучателе по сравнению с многоэлементными медицинскими датчиками. Для этого был выбран плоский круглый преобразователь диаметром 100 мм и резонансной частотой 1,12 МГц. Измерения проводились в импульсном режиме. В результате восстановления были получены изображения, иллюстрирующие пространственное распределение колебательной скорости на поверхности излучателя и динамику изменения структуры колебаний. Наблюдалось появление кольцевых структур, вызванное генерацией волн Лэмба на поверхности излучателя.

На рис. 1 изображено пространственное распределение максимума колебательной скорости на поверхности излучателя представляющее собой усредненное во времени поршневое колебание, промодулированное кольцевыми неоднородностями. Кольцевые неоднородности имеют разный масштаб и соответствуют различным модам Лэмба. Таким образом, в результате проведенных измерений получено четкое восстановление колебаний поверхности излучателя во времени с учетом тонкой структуры, связанной с различными неоднородностями колебательной скорости.

Далее описан эксперимент по восстановлению колебаний на поверхности многоэлементной диагностической решетки. Поверхность представляла собой дугу цилиндрического сектора радиусом кривизны 60 мм с размещенными на ней 96 излучающими элементами с размерами 12x0,44 мм. В эксперименте излучающая

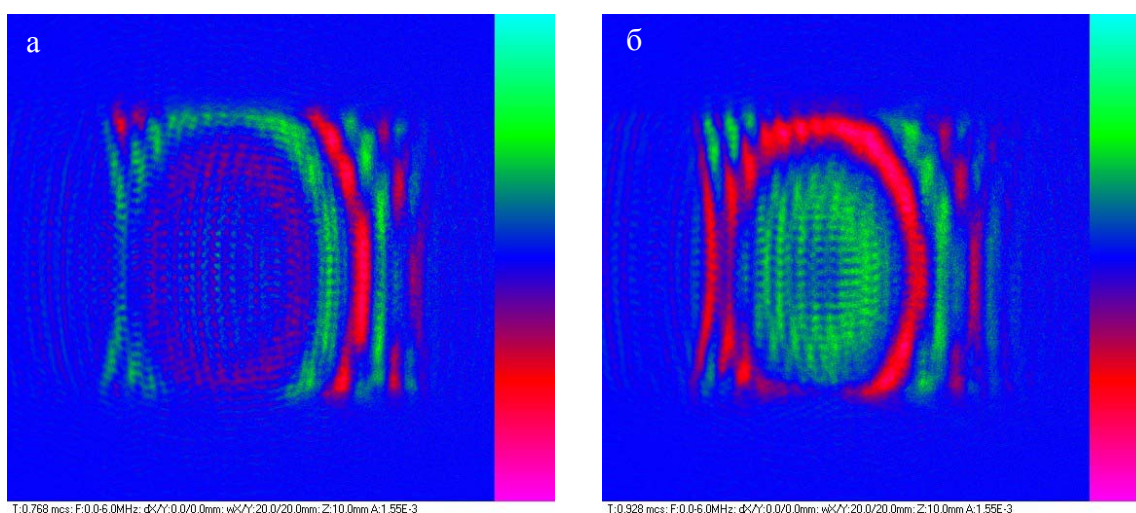


Рис. 2 Восстановленные распределения колебательной скорости на поверхности многоэлементного диагностического датчика в импульсном режиме. Случаи а-б соответствуют различным моментам времени после начала излучения. Эллипсы соответствуют различной фокусировке в перпендикулярных плоскостях.

поверхность была ограничена 19 элементами. На излучающие элементы подавались возбуждающие сигналы с диаграммо-формирующего устройства диагностического сканера, имеющие вид радиоимпульса длительностью 1-2 цикла основной частоты 3,5 МГц. На рис. 2а,б представлены распределения колебательной скорости на поверхности многоэлементного преобразователя в различные моменты времени после начала излучения.

Результаты восстановления показывают, что дискретная структура антенной решетки восстанавливается, количество элементов совпадает с заданным, размеры элементов и расстояния между ними также соответствуют значениям, известным по информации от производителя. Эллипсы на восстановленной поверхности свидетельствуют о фокусировке излучаемого акустического поля в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По параметрам данных эллипсов были рассчитаны положения фокусов.

Метод НАГ обладает высокой разрешающей способностью, позволяя при выбранных параметрах сетки измерений разрешать даже промежутки между элементами, ширина которых приблизительно в 2 раза меньше длины волны излучения на основной частоте в воде. Показано, что метод НАГ позволяет обнаружить и исследовать тонкие особенности в пространственно временной структуре колебаний поверхности акустических преобразователей, используемых в медицинской диагностике.

В параграфе 1.3 приведены выводы к **первой главе**.

Во **второй главе** рассмотрена шлирен-визуализация акустических полей, излучаемых пьезокерамическими источниками мегагерцового диапазона.

В **параграфе 2.1** приведена схема экспериментальной шлирен-установки, подробно описаны основные ее компоненты. Эксперименты по шлирен-визуализации акустических полей проводились для различных ультразвуковых источников. Использовались как простые одноэлементные преобразователи, так и многоэлементные диагностические датчики. Далее описаны типы и характеристики используемых преобразователей.

В **параграфе 2.2** приведены экспериментальные результаты шлирен-визуализации ультразвуковых полей. В **пункте 2.2.1** описаны результаты исследования акустического поля плоского одноэлементного преобразователя. Целью эксперимента являлось выявление дополнительных акустических возмущений, излучаемых непоршневыми упругими модами пьезопластины. Результатом эксперимента являлись теневые изображения, полученные в различные моменты времени после начала излучения.

Акустическое поле представлено в виде периодических неоднородностей, расстояние между которыми совпадает с длиной волны на основной частоте излучателя в воде. Заметно

присутствие неоднородностей, являющихся результатом интерференции краевых волн и излучения поршневой моды. Были выявлены неоднородности, соответствующие излучению поверхностных мод Лэмба. По углу наклона фронтов неоднородности к оси преобразователя была рассчитана скорость поверхностной волны.

В пункте 2.2.2 описаны результаты исследования акустического поля сферически вогнутого одноэлементного преобразователя. Полученные изображения позволяют выделить излучение поршневой моды колебаний преобразователя, при этом периодические линии, соответствующие волновым фронтам, имеют криволинейный характер, что отражает фокусированность излучения. Также удается обнаружить область фокуса, неоднородности, являющиеся результатом интерференции краевых волн и излучения поршневой моды, неоднородности, соответствующие излучению поверхностных мод Лэмба. По полученным данным рассчитаны скорости поверхностных волн, выяснено, что скорости этих волн на частоте 1 МГц для данного типа керамики соответствуют фазовым скоростям асимметричных мод Лэмба a_1 и a_0 .

В пункте 2.2.3 проводится исследование волн Лэмба, возникающих при возбуждении вогнутого одноэлементного преобразователя. Важность исследования связана с тем, что моды Лэмба являются паразитными и вносят значительные искажения в предполагаемое акустическое поле преобразователя, что может негативно сказаться на результатах диагностики и, что очень важно, терапии. Целью исследования являлась зависимость фазовой скорости различных мод волн Лэмба от частоты возбуждения пьезопластины. Сферически вогнутый одноэлементный преобразователь с радиусом кривизны поверхности 92,1 мм возбуждался в квазинепрерывном режиме. Данный режим был выбран для того, чтобы колебания пьезопластины представляли собой только вынужденные колебания с частотой, заданной генератором, и чтобы возможно было наблюдать значительную часть создаваемого поля. Возбуждаемая в пластине волна Лэмба распространяется вдоль поверхности преобразователя с постоянной скоростью, излучая в жидкость волну, причем угол между фронтом излученной волны и касательной к поверхности в каждой точке является постоянным. Вследствие этого в среде появляются каустики, каждая из которых соответствует излучению определенной моды Лэмба. Структура каустики имеет простой геометрический вид: это дуга окружности радиуса $F \frac{c_0}{c}$, центр которой совпадает с фокусом излучателя. Здесь c_0 - скорость звука в жидкости, c - фазовая скорость волны Лэмба, F - радиус кривизны поверхности излучателя. Указанное свойство позволяет использовать положение каустики для измерения скорости соответствующей волны Лэмба.

По полученным в ходе эксперимента изображениям были проведены расчеты, результаты которых приведены на рис. 3. На данном рисунке изображены дисперсионные кривые для шести различных мод Лэмба, рассчитанные теоретически по формулам Рэля-Лэмба, и построенные по полученным изображениям экспериментальные точки. При расчете теоретических кривых использовалось значение скоростей $c_t = 1,94$ мм/мкс и $c_l = 4,64$ мм/мкс, найденные из измеренных частот отсечки моды a_1 (0,45 МГц) и частоты толщинного резонанса (1,08 МГц), соответственно, с учётом известной толщины пластины (2,15 мм). Экспериментальная погрешность, показанная на рис. 3, соответствует характерной ширине тени каустики в самой тонкой её части. Как видно, точность измеренных значений скоростей в среднем высока, поэтому хорошее совпадение с теорией характеризует шпирен-метод как весьма точный и эффективный применительно к данной задаче.

Подобные исследования могут быть проведены для преобразователей различной конфигурации и размеров. Не стоит также забывать, что временные затраты на подобного эксперимента в разы меньше, чем для стандартных методик исследования полей

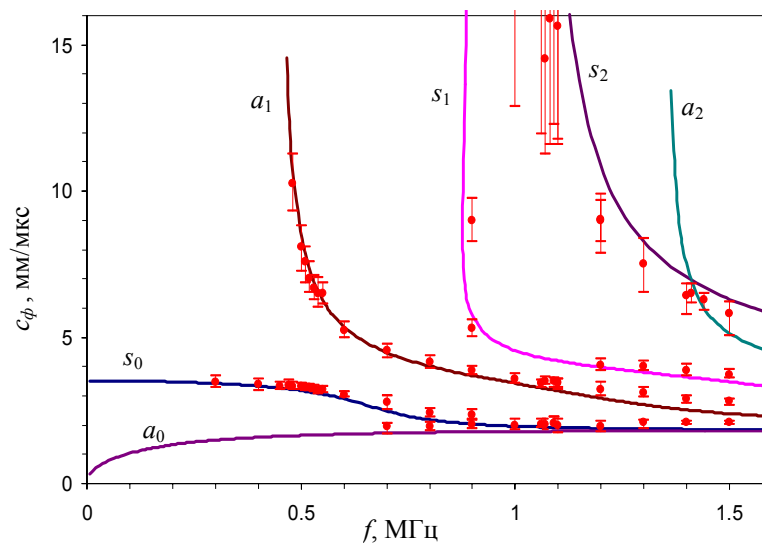


Рис. 3. Дисперсионные кривые для различных мод волн Лэмба в пьезокерамической пластине. Точки соответствуют экспериментальным теневым картинам. Теоретические кривые представляют решения уравнений Рэля-Лэмба.

сканирующими гидрофонами. Таким образом, шпирен-метод является удобным и эффективным инструментом количественного исследования свойств акустических преобразователей.

В пункте 2.2.4 описаны результаты исследования акустического поля выпуклого многоэлементного диагностического преобразователя, который представлял собой многоэлементный ультразвуковой датчик, работающий на центральной частоте 3,5 МГц в

импульсном режиме. Особенностью работы данного преобразователя было наличие многоканального управляющего устройства – ультразвукового диагностического прибора. Благодаря управляемой задержке между электрическими сигналами, подаваемыми на элементы датчика, создаваемое им акустическое поле могло фокусироваться на различные расстояния, при этом поле было локализовано в некоторой пространственной области – пучке.

Часть экспериментов проводилась в присутствии поверхности, способной вызывать отражение ультразвукового импульса (пластины из дюралюминия, толщиной 6,5 мм). На полученных изображениях четко виден акустический импульс, создаваемый диагностическим датчиком, представленный в виде чередующихся темных и светлых полос, расстояние между которыми составляет около 0,44 мм, что соответствует длине волны излучения на частоте 3,5 МГц в воде. Удаётся четко различить четыре периода колебаний на основной частоте. Отчетливо виден импульс в пределах основного лепестка диаграммы излучения, а также более слабые возмущения, соответствующие боковому лепестку антенной решетки. Был исследован поперечный размер импульса и характер изменения этой величины из-за фокусировки при распространении волн в среде. На изображениях представлен процесс отражения импульса от пластины, причем показано, что угол падения волны равен углу отражения. Показано, что в отражающей пластине распространяется волна рэлеевского типа, излучающая в жидкость волну, фронт которой отчетливо регистрируется на изображениях. Исходя из угла наклона фронта головной волны, была проведена оценка скорости рэлеевской волны в алюминии. Полученная величина, в пределах погрешности измерений, совпала со справочным значением. При этом впервые подобная визуализация была проведена при работе излучателя в импульсном режиме.

Была проведена визуализация перпендикулярного падения акустического импульса, создаваемого диагностическим датчиком, на поверхность отражающей пластины. При этом наблюдались многочисленные импульсы, следующие за первым отраженным и вызванные переотражениями падающего импульса внутри пластины. При толщине пластины $L=6,5$ мм можно оценить скорость акустической волны в материале пластины. Расстояние между соседними импульсами соответствует двойному прохождению через алюминиевую пластину, т.е. соответствующий временной интервал можно записать как $x/c_0 = 2L/c_l$, где c_0 - скорость звука в воде, c_l - скорость продольных волн в алюминии. Отсюда $c_l = c_0 \cdot 2L/x = (6050 \pm 300)$ м/с, что в пределах погрешности совпадает с табличным значением 6260 м/с.

Для иллюстрации способности шлирен-метода визуализировать процесс рассеяния акустических волн, было проведено исследование отражения ультразвуковых импульсов от неплоских твердотельных объектов. В качестве отражающего объекта использовался стальной шарик диаметром 10 мм. Объект располагался в точке электронного фокуса преобразователя, при этом поперечный размер импульса в фокусе составляет значение, равное 2,8 мм. Результат отражения представляет собой расходящуюся волну со сферическим фронтом. Также были исследованы эхо-сигналы, порождаемые боковыми лепестками, рассеянными на объекте. Интенсивность ультразвука в боковом лепестке приблизительно в 20 раз меньше интенсивности в основном импульсе. Как и при зондировании основным лепестком, хорошо заметна отраженная сферическая волна. Таким образом, была продемонстрирована высокая чувствительность теневого метода, позволяющая визуализировать акустические поля с амплитудой порядка Па.

Для моделирования изменений, возникающих при взаимодействии акустических полей ультразвуковых диагностических преобразователей с биологическими тканями, была проведена серия экспериментов по теневой визуализации ультразвуковых полей с модельными объектами из гелевого материала. Обычно задача распространения ультразвука в средах с неоднородностями акустического импеданса решается при помощи численного моделирования, однако при сложном характере акустического поля и сильно неоднородных средах распространения ультразвука подобный расчет затруднителен. В работе использовались цилиндрический и клиновидный объекты, изготовленные из материала, близкого по акустическим свойствам к биологическим тканям. Было показано влияние присутствия цилиндрического объекта на акустическое поле преобразователя, в частности на поперечные размеры акустического импульса. Было отмечено возникновение вторичных возмущений с цилиндрически расходящимся фронтом. Было исследовано касательное падение ультразвукового импульса на боковую поверхность цилиндра. Было отмечено изменение формы импульса, разделение на две части с одновременным увеличением поперечного размера импульса. Отмечено также появление вторичных волн сложной формы в результате отражения и преломления импульса на границе вода-гель. Измерен угол между первоначальным направлением и направлением распространения преломленного импульса составляет около $3,5^\circ$, показано, что данное значение в пределах погрешности соотносится с результатом теоретического расчета. При падении акустического импульса на поверхность клина наблюдается изменение направления распространения импульса, прошедшего через клин, по сравнению с первоначальным. Исходя из геометрии эксперимента и измеренных

значений углов распространения преломленных и непреломленных волн были сделаны оценки скорости звука в геле.

Таким образом, в ходе данного эксперимента было наглядно проиллюстрировано влияние простых преломляющих и рассеивающих объектов, имеющих акустические параметры, сходные с параметрами биологических тканей, на распространение диагностического ультразвукового импульса и структуру его акустического поля. Также было показано, что помимо очевидных изменений, вызванных простыми процессами преломления и рассеяния волн, имеются также более тонкие изменения акустического поля, вызванные конечными размерами импульса и неидеальной геометрической формой исследуемых объектов, что позволяет считать данный эксперимент близким к реальным процессам распространения подобного ультразвукового излучения в биологических средах.

В **пункте 2.2.5** описаны эксперименты по теневой визуализации акустических полей в непрерывном режиме. В эксперименте использовался источник непрерывного белого света и оптический нож в виде градиентного спектрального светофильтра. Благодаря вышеописанной конструкции оптического ножа, было возможно получать шлирен-изображения, зависящие от амплитуды ультразвукового поля. Были исследованы пьезокерамические преобразователи различных форм и частот. Проведенные эксперименты позволили выявить некоторые особенности структуры акустического поля исследованных излучателей, в частности отчетливо заметное боковое излучение, не присущее поршневой моде колебаний, которой обычно упрощенно описывают колебания пластины преобразователя.

Таким образом, было подтверждено, что шлирен-изображения позволяют выявлять особенности тонкой структуры поля, предсказание которых затруднительно без информации о реальном распределении колебательной скорости на поверхности колеблющегося излучателя.

В **параграфе 2.3** приведены выводы ко **второй главе**.

Третья глава посвящена исследованию влияния дискретизации временной задержки в диаграммо-формирующих устройствах диагностических систем на структуру акустического поля, создаваемого многоэлементным диагностическим датчиком и качество фокусировки.

В **параграфе 3.1** приводится теоретическое описание модельного эксперимента. Решаемая задача имеет определенные специфические особенности, состоящие в следующем: излучение имеет импульсный характер, излучатель имеет многоэлементную структуру, поверхность излучателя может иметь сложную конфигурацию, временная задержка в

реальных системах может иметь не любое точное значение, а задаваться с точностью до определенного дискрета. При решении указанной задачи проводилось численное моделирование излучения ультразвуковых датчиков, используемых в диагностических сканерах. Моделировалась геометрия антенной решетки и отдельных излучателей, вид возбуждающих импульсов, временная задержка возбуждающих импульсов на различных элементах решетки моделировалась с различной точностью. В ходе моделирования рассчитывалось двумерное пространственное распределение акустического поля многоэлементного датчика. Расчет производился методом импульсного отклика. При этом рассчитывалось акустическое давление в каждой точке пространства при заданном профиле скорости на поверхности каждого элемента и функции импульсного отклика излучающего элемента $h(\mathbf{r}, t)$. Распределение скорости вдоль поверхности элемента предполагается равномерным. Это приближение для пьезоизлучателей соответствует толщинной моде колебаний и обычно выполняется с хорошей точностью. Функция импульсного отклика задает потенциал при δ -образном (по скорости) возбуждении излучающего элемента и

выражается, согласно интегралу Рэлея, следующим образом $h(\mathbf{r}, t) = \int_{\sigma} \frac{\delta(t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c_0)}{2\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dS'$, где

c_0 – скорость звука в среде, σ - поверхность излучающего элемента. Граничным условием являлось задание профиля колебательной скорости на поверхности каждого i – го элемента в виде $u_i(t) = u_0(t - t_{зад})$, где $u_0(t)$ – форма сигнала, заданная как $u_0(t) = U_0 e^{-\frac{t^2}{\tau^2}} \sin \omega_0 t$, а $t_{зад}$ – временная задержка, которая задается дискретно, т.е. с конечным шагом изменения.

В параграфе 3.2 приведены результаты расчетов. Были рассчитаны поперечные распределения акустического поля для различных многоэлементных датчиков в области фокуса в зависимости от величины дискрета временной задержки. Показано, что уменьшение шага дискретизации приводит к некоторому росту основного лепестка, а уровень бокового излучения изменяется в сторону уменьшения. Было замечено, что существует некоторое значение шага, которое уже не влияет существенно на уровень боковых лепестков. Так, для датчика конвексного типа частотой 3,5 МГц это значение составляет 7-8 нс, а для датчика линейного типа частотой 7,5 МГц – 4-5 нс. Это объясняется достижением адекватной точности фокусировки при заданной длине волны излучения. Кроме этого, были получены двумерные распределения акустического поля датчика в плоскости сканирования. Затем рассчитывалась диаграмма приема сигнала от точечного рассеивателя, пропорциональная квадрату диаграммы излучения в соответствующую точку.

По этим данным при помощи логарифмирования были построены черно-белые изображения, аналогичные черно-белым картинам ультразвуковых сканеров. Показано, что с увеличением шага дискретизации временной задержки происходит увеличение общего уровня бокового излучения, появляются четко различимые побочные максимумы в виде ложных точек справа и слева от истинного изображения точечного рассеивателя. При нелинейной компрессии принимаемых сигналов (стандартная функция обработки сигналов в ультразвуковом диагностическом аппарате), соответствующий операции повышения контраста, присутствие данных паразитных сигналов грозит потерей полезного сигнала от слабого рассеивателя, если тот расположен близко к основному, или интерпретацией паразитного сигнала как истинного. Сделан вывод о том, что правильный выбор шага временной задержки наряду с аподизацией – умножением сигнала в каждом канале перед суммированием на свой весовой коэффициент, может значительно снизить уровень бокового излучения, тем самым, улучшая один из важнейших параметров диагностической системы – пространственное разрешение.

В параграфе 3.3 приведены выводы к **третьей главе**.

Основные результаты работы

- Создана автоматизированная измерительная установка, на которой впервые реализован метод нестационарной акустической голографии применительно к исследованию колебаний ультразвуковых диагностических источников мегагерцового диапазона частот.
- Экспериментально показано, что с использованием метода нестационарной акустической голографии удаётся восстановить пространственно-временное распределение колебательной скорости на поверхности медицинских диагностических датчиков. Для типичных многоэлементных диагностических сканеров продемонстрирована возможность измерения степени фокусировки акустического поля в двух плоскостях, размера и положения элементов преобразователя, распределения амплитуды и временной задержки их сигналов.
- Методом импульсного отклика проведено численное моделирование ультразвуковых полей многоэлементных импульсных преобразователей в условиях дискретного изменения задержек сигналов, подаваемых на отдельные элементы. Для типичных диагностических медицинских сканеров изучено влияние величины шага дискретизации временной задержки на видимые поперечные размеры объектов, визуализируемых в В-режиме. Установлено, что при значении шага дискретизации, равном 0,1 периода сигнала на центральной частоте, уровень амплитуды боковых лепестков не превышает -20 дБ относительно уровня амплитуды основного лепестка, а при шаге дискретизации меньшем 0,02-0,03 периода сигнала уровень бокового излучения перестаёт зависеть от величины этого шага.
- Создана высокочувствительная установка для импульсной теневой визуализации слабых неоднородностей плотности в прозрачных жидкостях. С её помощью продемонстрированы возможности применения теневого метода визуализации для проведения экспериментального экспресс-анализа импульсных акустических полей ультразвуковых преобразователей с пространственным разрешением равным 0,1 мм и временным разрешением равным 10 нс при диагностических уровнях амплитуды акустического давления $p < 0,1$ МПа.
- Показана эффективность импульсного теневого метода для количественного измерения параметров ультразвуковых полей. В частности, измерены дисперсионные кривые для различных мод Лэмба в пластине из пьезокерамики типа ЦТС в диапазоне 0,3 – 1,6 МГц в воде и показано, что в пределах погрешности измерений они описываются решениями

уравнений Рэлея-Лэмба. Теневой метод также применён для измерения в импульсном режиме скорости поверхностной волны утечки на границе «твёрдое тело - жидкость».

- Показано, что теневой метод является эффективным инструментом исследования распространения ультразвуковых импульсов в среде, содержащей неоднородные включения типа акустических неоднородностей биологических тканей, исследуемых в задачах медицинской диагностики. Метод позволяет эффективно исследовать изменение траекторий распространения и формы диагностических импульсов при взаимодействии их с фантомами биологических тканей.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Смагин М.А., Морозов А.В., Сапожников О.А.. Исследование структуры акустического поля многоэлементного медицинского акустического датчика. - Сб. трудов XV сессии РАО, Москва: ГЕОС, 2004, т.3, с.74-75.
2. Смагин М.А., Нагулин Н.Е., Пономарев А.Е., Сапожников О.А. Влияние шага дискретизации временной задержки на качество фокусировки многоэлементного ультразвукового датчика. – Сборник материалов 2-го Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика - 2005» (21-24 июня 2005 г., Москва), с. 230-231.
3. Смагин М.А., Морозов А.В., Нагулин Н.Е., Сапожников О.А. Методика исследования структуры акустического поля многоэлементного ультразвукового датчика. – Сборник материалов 2-го Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика - 2005» (21-24 июня 2005 г., Москва), с. 232-233.
4. Смагин М.А., Нагулин Н.Е., Пономарев А.В., Сапожников О.А. Влияние дискретизации задержки в диаграммо-формирующих устройствах ультразвуковых диагностических систем на качество фокусировки. – Сб. трудов XVI сессии РАО, Москва: ГЕОС, 2005, т.3, с.128-131.
5. Смагин М.А., Нагулин Н.Е., Пономарёв А.Е., Сапожников О.А. Влияние дискретизации задержки в диаграммоформирующих устройствах ультразвуковых диагностических систем на качество фокусировки. – Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2006, №1-2, с.85-88.

6. Сапожников О.А., Пономарев А.Е., Смагин М.А. Нестационарная акустическая голография для реконструкции скорости поверхности акустических излучателей. – Акуст. ж., 2006, т.52, №3, с. 385–392.
7. Смагин М.А., Пономарев А.Е., Сапожников О.А. Голографическое восстановление колебаний ультразвуковых диагностических источников и шлирен-визуализация слабых акустических полей. – Сб. трудов XVIII сессии РАО (Таганрог, 2006) , Москва: ГЕОС, 2006, т.2, с.12-16.
8. Sapozhnikov, O.A., Morozov, A.V., Ponomarev, A.E., and Smagin, M.A. Characterization of therapeutic and diagnostic ultrasound sources using acoustic holography and optical schlieren method. – Proceedings of International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics” NWP-2005, Russian Academy of Sciences, Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 2005,pp. 91-92.
9. Sapozhnikov, O.A., Ponomarev, A.E., and Smagin, M.A. Transient acoustic holography for diagnostic transducer characterization. - Book of Abstracts of the 2006 IEEE International Ultrasonics Symposium (Vancouver, Canada, 2006).
10. Смагин М.А., Булатицкий С.И., Пономарёв А.Е., Сапожников О.А. Шлирен-визуализация низкоинтенсивных ультразвуковых полей. – Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2006, №8-9, с.44-49.