

На правах рукописи
УДК 534.2

Пономарев Анатолий Евгеньевич

**НЕЛИНЕЙНЫЕ И ДИФРАКЦИОННЫЕ
ЭФФЕКТЫ В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ**

(01.04.06 – акустика)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2007г.

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

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук, доцент,
Олег Анатольевич Сапожников

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор,
Михаил Николаевич Рычагов,
Московский институт электронной техники

Кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией,
Андрей Петрович Брысев,
Научный центр волновых исследований
Института общей физики имени А.М. Прохорова РАН

Ведущая организация:

Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева

Защита диссертации состоится 21 февраля 2008 года в 16:00 часов на заседании Диссертационного Совета Д 501.001.67 в МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП-2, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет, физическая аудитория им. Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «24» декабря 2007 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 501.001.67
кандидат физико-математических наук

А.Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы обусловлена важностью рассматриваемых задач ультразвуковой диагностики для многих современных медицинских приложений. Качественное улучшение техники в последние годы требует как развития новых методов обработки данных, так и использования для диагностики новых физических эффектов.

Одним из наиболее ярких примеров такого применения новых физических эффектов является разработка режимов диагностики ткани, основанных на акустической нелинейности среды. Указанные режимы уже несколько лет используются на практике. Детальное понимание происходящих физических эффектов при распространении диагностических импульсов в биологических средах представляет особую значимость как для улучшения существующих ультразвуковых систем, так и для разработки новых методик диагностики. Данные задачи актуальны и с общефизической точки зрения, так как связаны с исследованием нелинейно-волновых явлений в фокусированных акустических пучках со сложной геометрией без аксиальной симметрии. Аналитические решения для акустических полей реальных ультразвуковых датчиков удается найти только в исключительных случаях, поэтому большое внимание уделяется развитию численных моделей и их усовершенствованию. Численная модель, предложенная в данной диссертационной работе, не только качественно описывает эффекты, происходящие в акустических пучках, но и позволяет добиться количественного совпадения с экспериментом. Это выводит численное моделирование в задачах медицинской диагностики на принципиально новый уровень: разработанные численные алгоритмы оказываются надежным инструментом количественного анализа полей датчиков при их сертификации перед использованием в клиниках.

Следующей актуальной задачей медицинской диагностики, рассмотренной в данной работе, является изучение колебаний поверхностей импульсных диагностических датчиков. Сложная геометрия реальных

датчиков обычно еще усложняется и неоднородностью колебаний их поверхностей. Для точного предсказания акустических полей реальных импульсных излучателей необходимо знать зависимость колебательной скорости от времени в каждой точке излучающей поверхности. Наиболее известный способ непосредственного измерения колебательной скорости – это метод лазерной виброметрии, однако он имеет ряд ограничений для применения в жидкостях. В данной работе приводится численное обоснование метода нестационарной акустической голографии, который основан на измерении акустического поля с последующим расчетом колебательной скорости на излучателе. Приводится расчет необходимых параметров экспериментальной установки для успешного восстановления колебательной скорости и предлагается метод численной обработки экспериментальных данных. Метод акустической голографии уже зарекомендовал себя как очень эффективный способ определения характера колебаний излучателей непрерывных сигналов. Задача же данной работы была в том, чтобы продемонстрировать, что современная экспериментальная техника и вычислительные методы позволяют добавить временную переменную в данную задачу и использовать голографию для импульсных сигналов.

Последняя часть работы идейно связана с указанной выше задачей нестационарной голографии, хотя и отличается по своей постановке. Она посвящена обращению времени в ультразвуковых системах и возможности временной компрессии и усиления ультразвуковых импульсов. В рассматриваемой задаче импульс специально подобранной формы пропускается через среду с пространственной дисперсией. В работе показано, что если форма импульса соответствующим образом согласована с характеристиками среды, то импульс на выходе из среды может быть более коротким и иметь большее пиковое давление по сравнению с исходным сигналом. В качестве среды с пространственной дисперсией рассматривалась одномерная слоистая среда. Проведено численное моделирование таких

систем, создана методика подбора оптимальных параметров импульса и среды, а также экспериментально продемонстрированы компрессия и усиление импульсов.

Цель работы:

Целью диссертационной работы являлось развитие новых подходов к исследованию распространения и генерации ультразвуковых импульсов. В соответствии с поставленной целью было намечено решение следующих практически важных задач:

- Разработка теоретических моделей и численных алгоритмов для описания акустических фокусированных полей диагностических датчиков без аксиальной симметрии с учетом нелинейных и дифракционных эффектов, поглощения и дисперсии скорости звука.
- Теоретическое исследование диагностики биологических тканей с использованием высших гармоник, возникающих в среде за счет ее акустической нелинейности.
- Теоретическое исследование и разработка численной модели нестационарной акустической голографии.
- Теоретическое исследование необходимых параметров экспериментальных установок для осуществления нестационарной акустической голографии диагностических датчиков.
- Экспериментальное и теоретическое исследование возможности компрессии и усиления ультразвуковых импульсов в неоднородной слоистой среде.

Научная новизна работы:

- Развита новая численная модель, позволяющая рассчитывать поля ультразвуковых диагностических датчиков без аксиальной симметрии с учетом нелинейности, дисперсии скорости звука и произвольного частотного закона поглощения среды.

- Теоретически исследована диагностика с использованием нелинейности среды и численно продемонстрированы преимущества диагностики на второй гармонике, а также впервые численно обоснованы методы выделения нелинейного отклика среды.
- Разработан и теоретически обоснован новый метод акустической голографии для исследования импульсных источников. Выявлены требования к экспериментальным средствам для построения системы нестационарной голографии и проведен демонстрационный эксперимент.
- Предложен и экспериментально опробован новый оригинальный метод компрессии и усиления ультразвуковых импульсов в одномерных слоистых структурах. Построен и обоснован регулярный алгоритм подбора параметров указанных систем компрессии.

Научная и практическая значимость работы:

- Разработанный оригинальный численный метод и соответствующий пакет программ позволяют моделировать акустические поля реальных ультразвуковых датчиков. Результаты расчета количественно согласуются с экспериментом.
- Разработанные методики позволяют проводить анализ сложной пространственной структуры акустического поля для различных геометрических конфигураций и различного порядка пространственной дискретизации ультразвуковых излучателей.
- Предложенный метод нестационарной акустической голографии позволяет проводить детальный анализ характеристик колебаний поверхности реальных импульсных датчиков в системах медицинской диагностики и неразрушающего контроля.
- Предложенный метод компрессии и усиления ультразвуковых пучков открывает новые возможности по созданию источников мощных коротких ультразвуковых импульсов.

- Все результаты теоретических исследований, выполненных в диссертации, доведены до простых численных моделей и на их основе разработаны пакеты программ, позволяющие эффективно моделировать задачи нелинейной диагностики, нестационарной акустической голографии и компрессии ультразвуковых импульсов.

Положения, выносимые на защиту:

- Поля ультразвуковых диагностических датчиков без аксиальной симметрии могут быть с высокой точностью количественно исследованы на основе развитой в работе комплексной теоретической и численной модели, описывающей распространение мощных импульсов в среде с учетом акустической нелинейности, дисперсии скорости звука и произвольного частотного закона поглощения среды. Развитая модель позволяет провести сравнительную оценку качества линейных и нелинейных методов диагностики тканей.
- Предложенный новый метод нестационарной акустической голографии позволяет количественно исследовать особенности колебания поверхности источников ультразвука и предсказывать пространственно-временную структуру излучаемых акустических полей. Для достижения высокой точности голографии для каждого конкретного источника необходимо осуществить оптимизацию процесса сбора данных на основе построенного в работе численного алгоритма решения прямой и обратной задач распространения акустических импульсов.
- Одномерные слоистые структуры могут осуществлять временную компрессию и усиление акустических импульсов при условии взаимного согласования формы импульсного сигнала и параметров слоистой среды в соответствии с разработанным в работе алгоритмом. Структуры из 1-3 слоёв позволяют укоротить сигнал и повысить его пиковое значение в 2-3 раза. С ростом количества слоёв эффективность компрессии возрастает.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на 2-й Международной конференции «Фундаментальные проблемы физики» (Саратов, 2000 г); на X, XI, XV, и XVII сессиях Российского Акустического Общества (Москва, 2000 и 2002; Нижний Новгород, 2004; Таганрог, 2006); на Международном симпозиуме по нелинейной акустике - ISNA16 (Москва, 2002); на 3-ем Международном симпозиуме по терапевтическому ультразвуку – ISTU3 (Франция, Лион, 2003); на научной школе "Нелинейные волны-2004" (Нижний Новгород, 2004); на II Евразийском конгрессе по медицинской физике и инженерии "Медицинская физика - 2005" (Россия, Москва, 2005); на международной конференции "Forum Acusticum 2005"(Венгрия, Будапешт, 2005), а также обсуждались на научном семинаре д.ф. – м.н. С.А. Рыбака в Акустическом Институте им. Н.Н. Андреева и на научных семинарах кафедры акустики физического факультета МГУ.

Работа выполнена в рамках исследований, проводимых по грантам РФФИ (№ 98-02-17318, 00-15-96530, 02-02-16999), гранту Правительства РФ НШ-1575.003.2, гранту Европейской Акустической Ассоциации, по программам «Университеты России» (№ 1-5286).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 22 опубликованных печатных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 120 наименований. Общий объем работы составляет 117 страниц, включающих 32 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагается современное состояние проблемы, формулируется общая постановка задач, описывается краткое содержание работы по главам.

В первой главе представлен обзор существующих методов численного расчета импульсных акустических полей. Рассматриваются два основных метода: метод интеграла Рэля и метод решения параболического уравнения теории дифракции. Также рассматривается известная модификация метода интеграла Рэля для плоских излучателей с равномерным распределением колебательной скорости по всей поверхности, что позволяет существенно сократить время расчета, используя интегрирование по дугам. Описываются программы, построенные на основе данных методов. С помощью данных программ производится расчет полей медицинских диагностических датчиков (рис. 1) и демонстрируются области применимости данных алгоритмов.

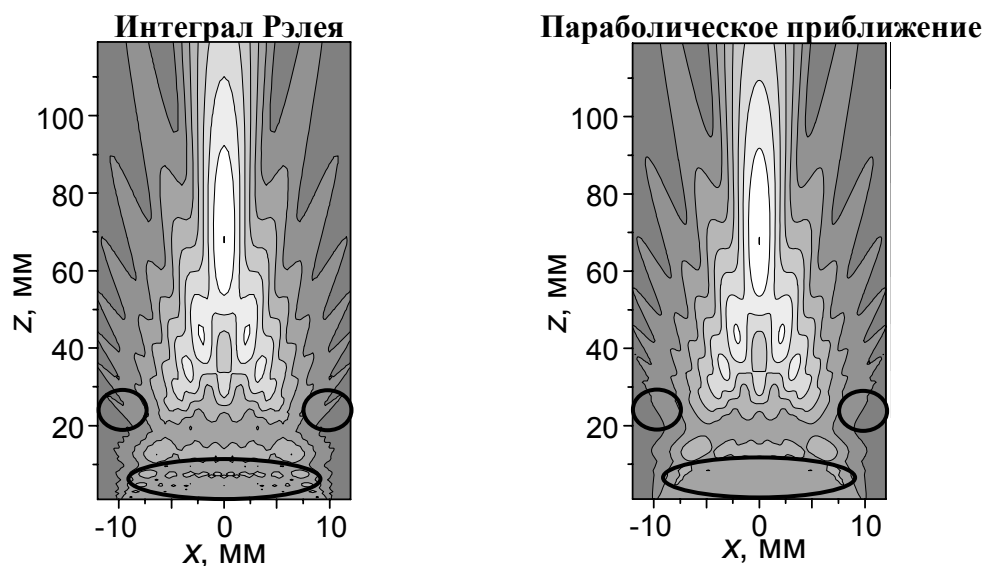


Рис. 1. Поле ультразвукового излучателя, рассчитанное методом интеграла Рэля, (слева) и решение, рассчитанное с использованием параболического приближения (справа). Основные отличия видны в ближнем поле (овальная область) и в количестве боковых максимумов: крайние «лепестки», обведенные кружками на левом распределении, отсутствуют на правом графике.

Вторая глава посвящена построению теоретической модели для расчета импульсных полей прямоугольных фокусированных излучателей. Предложенная модель описывает распространение ультразвука в

биологической среде с учетом нелинейности, произвольного частотного закона поглощения, а также дисперсии. Модель не требует аксиальной симметрии излучателя, а позволяет задавать граничные условия в виде двумерного распределения колебательной скорости по поверхности излучателя. В § 2.1 дана постановка задачи и обосновывается актуальность данной задачи для диагностических ультразвуковых систем. Рассматриваются характерные ультразвуковые излучатели.

В § 2.2 описывается теоретическая модель. Численная модель основана на решении уравнения Хохлова-Заболотской-Кузнецова, модифицированного на случай произвольной частотной зависимости коэффициента поглощения волны в среде:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\varepsilon}{\rho_0 c_0^3} p \frac{\partial p}{\partial \tau} - \tilde{L}(p) \right) = \frac{c_0}{2} \Delta_{\perp} p. \quad (1)$$

Здесь p – акустическое давление, z – координата вдоль оси пучка, $\Delta_{\perp} = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ – поперечный лапласиан, x – поперечная координата в плоскости сканирования zx и y – перпендикулярная ей поперечная координата, $\tau = t - z/c_0$ – «бегущее» время, c_0 – скорость звука. Линейный оператор $\tilde{L}(p)$ задаёт диссипативные свойства среды и позволяет моделировать произвольный частотный закон поглощения. Например, в данной работе для биологических тканей использовался линейный закон поглощения от частоты, а для моделирования распространения в воде использовалась классическая квадратичная зависимость, обусловленная процессами вязкости и теплопроводности.

В § 2.3 описывается численная схема. Представляемая в данной работе конечно-разностная численная модель интегрирования уравнения (1) является комбинацией временного и частотного подходов. Учитывая эволюционный характер уравнения (1), решение для акустического давления p рассчитывается последовательно с шагом Δz от слоя z к слою $z + \Delta z$ вдоль оси излучателя в узлах двумерной пространственной сетки поперечных плоскостей xu . На

каждом шаге по z эффекты дифракции, поглощения и нелинейности учитываются независимо, используя метод расщепления по физическим факторам. Дифракционный интеграл в правой части (1) рассчитывается во временном представлении с помощью двух различных схем второго порядка точности по поперечным координатам x и y . Вблизи излучателя ($z/F_x < 0.1$, F_x – фокусное расстояние в плоскости zx) используется более устойчивая абсолютно неявная схема первого порядка точности по координате z , что необходимо для более точного учета особенностей в виде резких краев в пространственном поршневом распределении амплитуды сигнала по поверхности излучателя. При удалении от излучателя ($z/F_x \geq 0.1$) пространственные поперечные особенности поля сглаживаются, что позволяет увеличить шаг сетки Δz за счет перехода к более точной (второго порядка по z) продольно-поперечной схеме. Нелинейный оператор рассчитывается для каждого узла поперечной сетки на основе точного неявного аналитического решения уравнения простых волн. Расчет частотно-зависимого поглощения и дисперсии скорости звука в представляемой схеме проводится в частотном представлении. Переход между временным и частотным представлениями производится с использованием быстрого преобразования Фурье.

В § 2.4 приводятся результаты численного моделирования, полученные с использованием разработанного пакета программ. Расчет проводился для фазовой решетки марки P4-2, используемой в ультразвуковой системе Philips HDI-5000 в режиме визуализации на второй гармонике. Решетка имела следующие характерные параметры: частота $f_0 = 1.55$ МГц, размер 20.16 мм на 13 мм, фиксированное вдоль одной плоскости фокусное расстояние $F_y = 80$ мм, в другой плоскости имелась возможность изменять фокусное расстояние F_x от 60 до 120 мм, максимальное давление на преобразователе $p_0 = 0.45$ МПа. Для данного датчика было продемонстрировано, что по сравнению с квадратичной зависимостью учет более близкой к реальной среде линейной зависимости коэффициента поглощения от частоты приводит к увеличению уровня второй

гармоники более чем на 20% и к еще более существенному увеличению высших гармоник (рис. 2). Это подтверждает, что предложенный алгоритм адекватно описывает распространение импульсов в биологических тканях при наличии нелинейных эффектов.

В работе численно продемонстрированы преимущества современного метода звуковидения на основе второй гармоники. Построение диагностических изображений в этом методе производится с использованием не основной (излучаемой) частоты, а второй гармоники, которая образуется в среде за счет нелинейности. Это позволяет создать более узкую фокальную перетяжку из-за повышения частоты, а также избавиться от переотражений ближнего поля, так как вторая гармоника в ближней зоне источника практически отсутствует. Данные эффекты были продемонстрированы численно, путем исследования пространственных распределений основной (рис. 3а) и второй гармоник (рис. 3б).

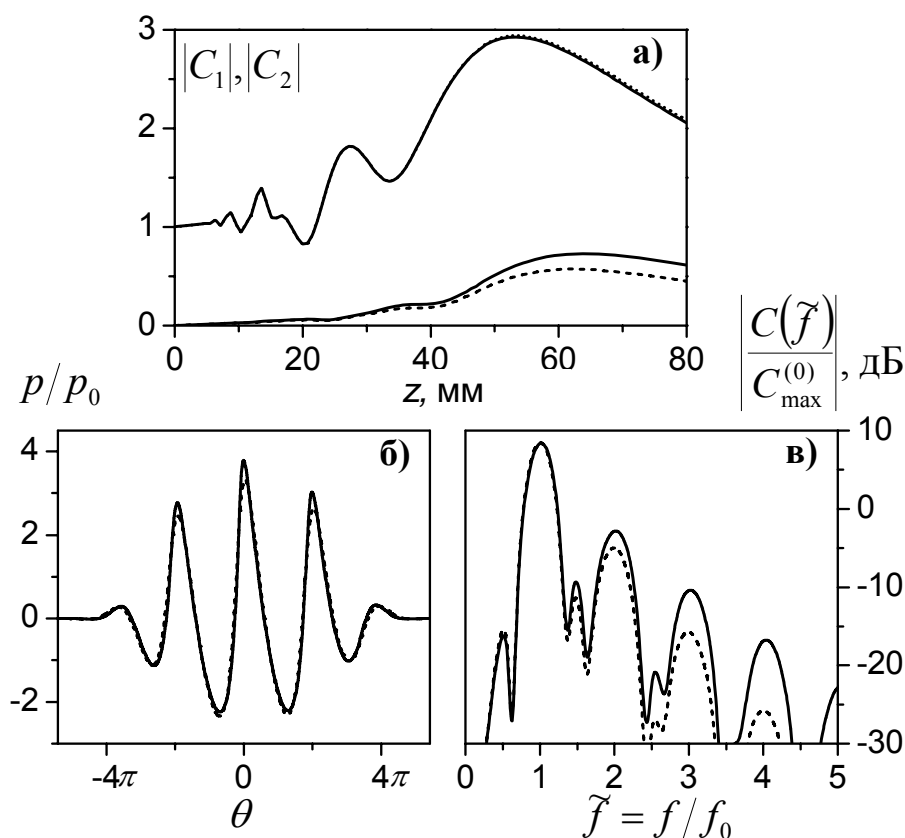


Рис. 2. Зависимости амплитуд первой C_1 и второй C_2 гармоник от расстояния вдоль оси пучка z (верхний график); профили давления и спектры волны, рассчитанные на расстоянии $z = 64$ мм для линейной (сплошные линии) и квадратичной (пунктирные линии) зависимостей поглощения от частоты. Фокусные расстояния $F_x = F_y = 80$ мм.

При обсуждении преимуществ визуализации на второй гармонике часто возникает вопрос: «Не лучше ли вместо использования второй гармоники, возникшей в среде из-за нелинейности, просто повысить частоту излучения и приёма в 2 раза?» Действительно, хорошо известно, что повышением частоты ультразвука можно добиться улучшения разрешения диагностических систем. Чтобы ответить на указанный вопрос, в ходе численного эксперимента было проведено сравнение поля второй гармоники, возникающей за счет нелинейности при излучении основной частоты (рис. 3б), с акустическим полем, возникающим при прямом излучении удвоенной частоты (рис. 3в).

Анализ распределений показывает основные преимущества использования второй гармоники по сравнению с использованием удвоенной частоты излучения: отсутствие ближнего поля и эффективное подавление

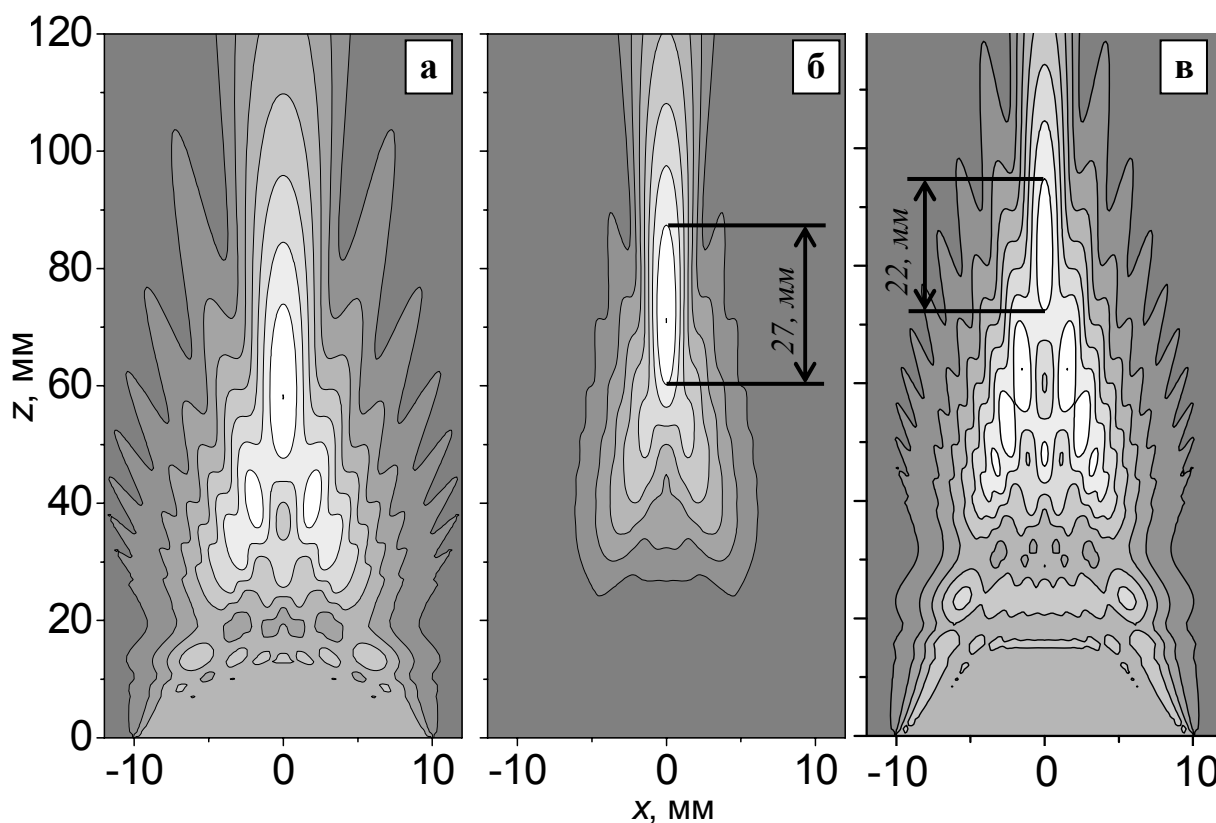


Рис. 3. Пространственные распределения амплитуды (а) - основной гармоники, (б) - второй гармоники, возникающей в среде при нелинейном распространении импульса основной частоты, (в) - второй гармоники в случае излучения импульса удвоенной частоты. Параметры излучателя $F_x = 120$ мм, $F_y = 80$ мм. Линейный масштаб с восьмью равными уровнями.

боковых лепестков в фокальной области. Следует также заметить, что размеры фокальных областей в поперечном направлении отличаются слабо, а вот в продольном направлении распределение второй гармоники имеет больший размер (рис. 3б) по сравнению с фокальной областью для удвоенной частоты (рис. 3в). Данное свойство является положительным для ультразвуковой диагностики, так как это позволяет использовать меньшее количество динамических фокусов, необходимых для озвучивания всей исследуемой области.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию метода нестационарной акустической голографии для восстановления колебательной скорости импульсных ультразвуковых источников. § 3.1 представляет собой введение в проблему. Акустической голографией обычно называют метод восстановления параметров источника звука по измерениям акустического давления вдоль некоторой поверхности, расположенной перед этим источником. Ранее этот метод использовался для анализа источников гармонических волн. В данной работе производится обобщение метода на импульсные сигналы, что открывает большие возможности применения методики для исследования колебаний импульсных диагностических датчиков. Пример геометрии задачи голографии для датчика с неизлучающей полоской, моделирующей область повреждения датчика, представлен на рис. 4.

В § 3.2 описывается теоретическая модель расчета, основанная на использовании 2-го интеграла Рэлея. Окончательная формула для расчета ускорения на излучателе $w(\mathbf{r}, t)$ приведена ниже:

$$w(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{2\pi\rho_0} \int_{\Sigma_H} ds'(\mathbf{n}, \mathbf{n}') \left(\frac{1}{R^3} - \frac{1}{c_0 R^2} \frac{\partial}{\partial t} \right) p_H \left(\mathbf{r}', t + \frac{R}{c_0} \right) + \\ + \frac{1}{2\pi\rho_0} \int_{\Sigma_H} ds'(\mathbf{n}, \mathbf{e}_R)(\mathbf{n}', \mathbf{e}_R) \left[3 \cdot \left(\frac{1}{R^3} - \frac{1}{c_0 R^2} \frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{1}{c_0^2 R} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] p_H \left(\mathbf{r}', t + \frac{R}{c_0} \right).$$

Здесь $p_H(\mathbf{r}', t)$ – акустическое давление в точке \mathbf{r}' , Σ_H – поверхность измерения, ds' – элемент поверхности Σ_H , \mathbf{r} и \mathbf{r}' – радиус-векторы точки

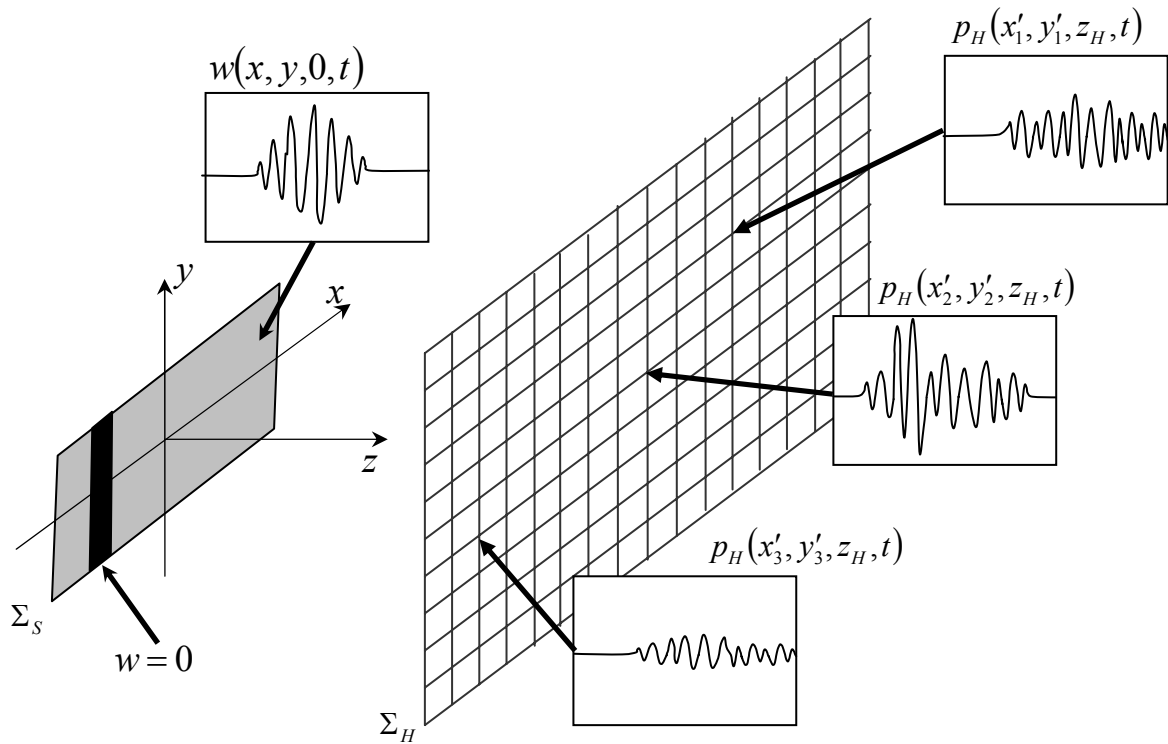


Рис. 4. Геометрия задачи для нестационарной голографии. Слева показан прямоугольный источник акустических импульсов, часть которого не излучает (черная полоса). Голографическая информация $p_H(\mathbf{r}', t)$ записывается в узлах плоской прямоугольной сетки. На вставках показаны примерные формы волны в трех таких узлах.

восстановления и элемента ds' соответственно, t – время, ρ_0 – плотность среды, c_0 – скорость звука, $\mathbf{n} = \mathbf{n}(\mathbf{r})$ – единичная внешняя нормаль к поверхности источника в точке восстановления \mathbf{r} , $\mathbf{n}' = \mathbf{n}'(\mathbf{r}')$ – единичная нормаль к элементу $ds' \in \Sigma_H$, ориентированная в направлении источника, а также $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ и $\mathbf{e}_R = (\mathbf{r} - \mathbf{r}')/R$.

В § 3.3 производится сравнение предложенного метода интегрирования по поверхности со спектральным подходом для решения той же задачи. Спектральный подход (называемый также методом Фурье-акустики и методом углового спектра) позволяет сократить время расчета, однако он накладывает ряд ограничений на экспериментальную установку: излучающая поверхность и поверхность измерения давления должны быть плоскими, а также измерение давления должно производиться на равномерной сетке. Данные ограничения являются существенными для рассматриваемой задачи, так как, во-первых,

большинство диагностических датчиков не являются плоскими, а во-вторых, использование неравномерной сетки иногда позволяет существенно уменьшить время измерения, что является более важным параметром, чем время расчета, которое обычно существенно меньше времени измерений. По указанным выше причинам в данной работе спектральный подход не использовался, и рассмотрение базировалось на интеграле Рэлея.

В § 3.4 описывается демонстрационный эксперимент. Эксперимент подтвердил принципиальную работоспособность метода и показал важность численного предсказания параметров эксперимента, таких как размер и шаг сетки измерения давления, расстояние от излучателя до измеряемой поверхности, дискретизация измеряемого давления, размер окна измеряемого давления.

В § 3.5 описывается реализация численной модели для метода нестационарной акустической голографии. По сравнению с голографией для периодических сигналов данная задача добавляет в модель расчета еще одну переменную – время. В результате объемы данных, которыми оперирует программа расчета, возрастают в несколько раз и при исследовании ультразвуковых систем мегагерцового диапазона могут составить несколько гигабайт. Такие расчеты стали возможны только в последние годы благодаря росту вычислительных мощностей персональных компьютеров.

Разработанный программный пакет позволяет полностью промоделировать эксперимент по нестационарной акустической голографии. Входными параметрами расчета являются геометрия излучателя и форма излучаемого акустического импульса. На первом этапе производится расчет акустического поля излучателя в предположении известного распределения колебательной скорости по поверхности. Далее задаются параметры эксперимента: выбирается предполагаемая плоскость измерения акустического давления, задается сетка измерения, шаг дискретизации измеряемого сигнала и окно измерения сигнала. По этим данным производится обратный пересчет

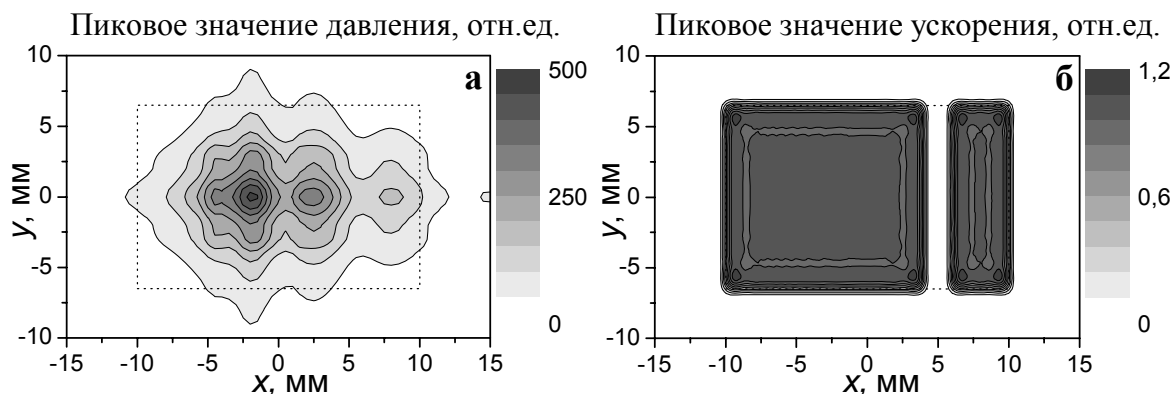


Рис. 5. Двумерные распределения пикового значения давления измеряемых импульсов (а) и пикового значения рассчитанного ускорения на излучателе (б) для фокусированного излучателя с фокусным расстоянием 80 мм. Расстояние между источником и измерительной сеткой $z_H = 30$ мм. Штриховой линией показаны границы проекции излучателя.

давления в колебательную скорость на излучателе. Пример восстановления приведен на рис. 5. В результате сравнения исходного и рассчитанного распределений колебательной скорости по поверхности излучателя делается вывод о достижимой точности восстановления. Таким образом, программа позволяет находить оптимальные параметры экспериментальной установки. В качестве демонстрации производится расчет для излучателя с дефектом (неработающей областью) и показывается, при каких параметрах эксперимента и с какой точностью удастся определить наличие и характеристики данного дефекта.

Четвертая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию компрессии и усилению ультразвуковых импульсов, отраженных от одномерных слоистых структур. Целью работы было создание пассивной слоистой системы, после отражения от которой, импульс становился бы больше по амплитуде и короче во времени. В § 4.1 рассматриваются различные акустические системы, работающие на принципе временного обращения волн (ВОВ). В рассматриваемой задаче показывается, что если короткий импульс, отраженный от слоистой структуры, превращается в длинный импульс меньшей амплитуды, то обращенный во времени длинный импульс после отражения должен превратиться в короткий.

В § 4.2 обосновывается выбор плоскослоистой среды в качестве отражателя. Рассматриваются основные дисперсионные закономерности, которые необходимо учитывать при построении системы эффективной компрессии импульсов.

В § 4.3 описывается созданная экспериментальная установка (рис. 6). Основой ее является плоский широкополосный преобразователь Panametrics V194 диаметром 25мм и отражающая система, состоящая из одной или нескольких пластин из искусственного сапфира толщиной около 1 мм. В качестве импульсов рассматривались сигналы с гауссовой огибающей.

В § 4.4 рассматривается простейшая система с использованием одной пластины и приводится аналитическое решение, показывающее принципиальную возможность компрессии и необходимые для этого

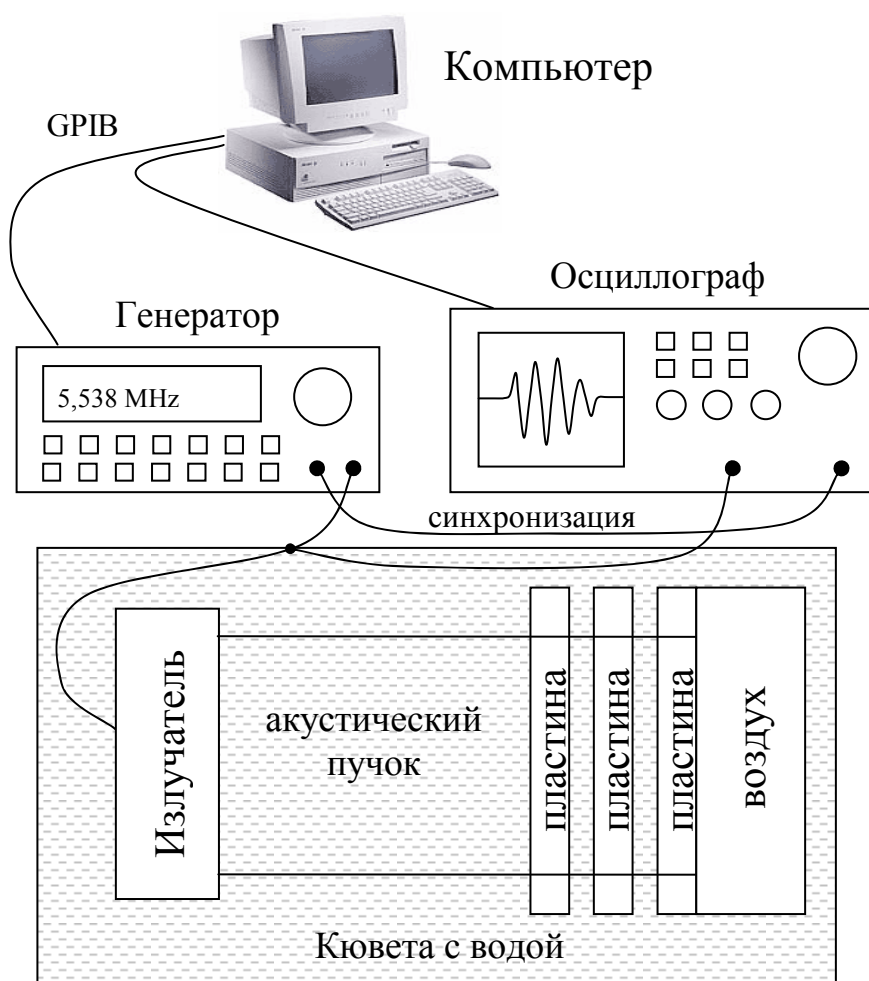


Рис. 6. Схема экспериментальной установки, созданной для исследования компрессии импульсов в плоскослоистой среде.

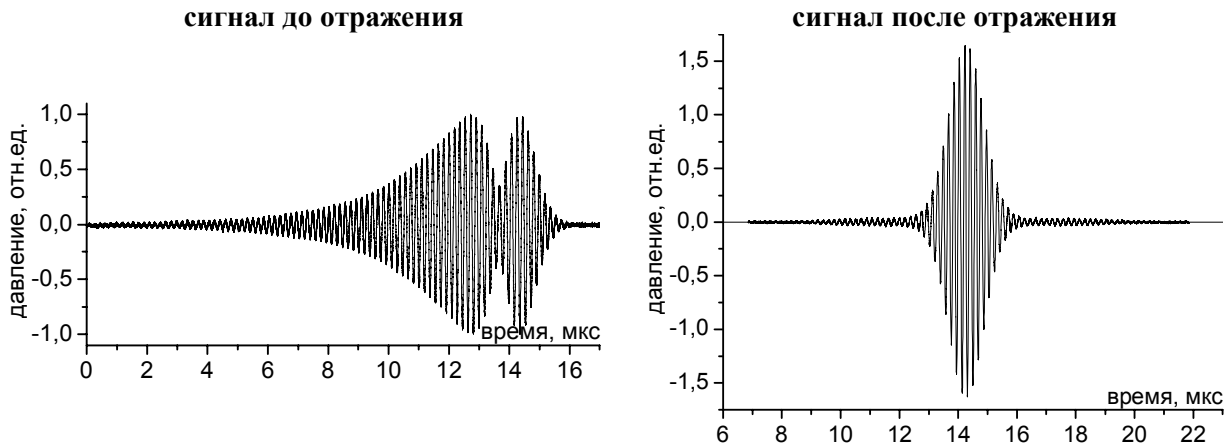


Рис. 7. Результаты эксперимента по компрессии импульса в случае одной отражающей пластины. Слева исходный импульс до отражения от пластины, справа – после отражения. Видно, что после отражения импульс укоротился во времени и усилился.

параметры системы. На основе расчета была создана экспериментальная установка и проведен эксперимент, который подтвердил компрессию сигнала в системе с одной пластиной и его усиление в 1.6 раза по амплитуде после отражения (рис. 7). Также было проведено независимое оптическое подтверждение временной компрессии с использованием установки визуализации на основе шпирен-метода.

Для многослойных систем не удастся найти точного аналитического решения, поэтому была построена численная модель для описания слоистой среды. В § 4.5 рассматриваются детали разработанной модели, основанной на известном методе переходных матриц. Влияние каждого слоя описывается соответствующей матрицей:

$$\begin{pmatrix} P_{n-1}^+ \\ P_{n-1}^- \end{pmatrix} = \hat{M}_{n-1,n} \cdot \begin{pmatrix} P_n^+ \\ P_n^- \end{pmatrix}, \quad \hat{M}_{n-1,n} = \begin{pmatrix} \frac{z_n + z_{n-1}}{2z_n} e^{-ik_n h_n} & \frac{z_n - z_{n-1}}{2z_n} e^{ik_n h_n} \\ \frac{z_n - z_{n-1}}{2z_n} e^{-ik_n h_n} & \frac{z_n + z_{n-1}}{2z_n} e^{ik_n h_n} \end{pmatrix}.$$

Результат работы всей системы определяется как перемножение матриц для всех слоев:

$$\begin{pmatrix} P_0^+ \\ P_0^- \end{pmatrix} = \hat{M} \begin{pmatrix} P_N^+ \\ P_N^- \end{pmatrix}, \quad \hat{M} = \hat{M}_{0,1} \cdot \hat{M}_{1,2} \cdot \dots \cdot \hat{M}_{N-2,N-1} \cdot \hat{M}_{N-1,N}.$$

В формулах выше N – количество слоев, n – номер слоя, а P_n^+ и P_n^- – комплексные амплитуды волн в слое n , распространяющихся вправо и влево

соответственно, $\hat{M}_{n-1,n}$ – матрица перехода от слоя $n-1$ к слою n , зависящая от акустических импедансов z_n , скоростей звука c_n , толщин h_n слоев и циклической частоты ω , $k_n = \omega/c_n$ – волновое число. На основе данной модели была написана программа, решающая задачу отражения импульса от многослойной системы.

Важной задачей было нахождение таких пар «сигнал – слоистая система», которые давали бы значительное усиление сигнала и его временную компрессию. Для решения этой задачи был разработан конструктивный алгоритм построения многослойной системы эффективной компрессии для получения сигнала заданной формы. Входными параметрами расчета являются количество и характеристики материала пластин, а также количество периодов в требуемом сигнале. По этим параметрам алгоритм рассчитывает толщины пластин и оптимальные расстояния между ними для эффективной компрессии заданного сигнала. Подробное описание алгоритма проведено в § 4.6. С использованием разработанного программного пакета в § 4.7 были построены зависимости максимально возможного уровня усиления сигнала от количества периодов в сигнале, а также необходимого количества пластин для достижения данного уровня усиления.

В заключительной части данной главы, в § 4.8, описывается проведенный эксперимент с системой из трех пластин, построенной на основе результатов расчета. Расчет предсказывал усиление по амплитуде в 2.7 раза для данной системы, однако в эксперименте было получено несколько меньшее усиление – в 2.3 раза, что было обусловлено, как мы предполагаем, некоторой непараллельностью пластин, которая приводила к занижению регистрируемой амплитуды многократно переотраженных импульсов. Также дополнительную погрешность вносит и дифракция, которая не была учтена при расчете. В § 4.9 приводится качественный анализ данных погрешностей и обсуждается их влияние на результаты.

В заключении диссертационной работы приводятся основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для исследования нелинейных режимов ультразвуковой диагностики разработан и программно реализован новый численный алгоритм, позволяющий моделировать трехмерные импульсные ультразвуковые пучки произвольной геометрии в нелинейной среде с произвольным законом поглощения от частоты. Численная модель основана на решении уравнения Хохлова-Заболотской, модифицированном на случай произвольной частотной зависимости поглощения в среде распространения.
2. С использованием созданного программного пакета проведено исследование распространения короткого акустического импульса в нелинейной среде типа биологической ткани с линейным и квадратичным по частоте поглощением. Показано, что при проведении расчётов с использованием квадратичного закона поглощения для используемых на практике режимов диагностических устройств уровень второй гармоники занижается более чем на 20%, а уровни высших гармоник могут быть недооценены в несколько раз, т.е. правильный учёт закона поглощения является принципиально важным при моделировании нелинейных эффектов в диагностике.
3. Численно исследованы поля широко применяемых в медицинской практике диагностических ультразвуковых сканеров с прямоугольной излучающей областью, работающих в режиме визуализации по второй гармонике. Показано, что режим с использованием высших гармоник позволяет улучшить качество визуализации тканей. Преимущества такого подхода заключаются в отсутствии сигналов ближнего поля, снижении уровня боковых лепестков, а также в образовании более узкой, плавной и длинной фокальной области. Показано, что рассчитанные параметры

ультразвуковых полей с высокой точностью совпадают с результатами экспериментов, проведенных разработчиками фирмы Philips, что позволяет сделать важный вывод о том, что разработанная модель может быть использована для расчета параметров безопасности при сертификации диагностических ультразвуковых машин.

4. Для эффективного расчета диагностических систем, работающих в линейном режиме, разработаны три различных численных алгоритма и созданы программные модули для моделирования импульсных акустических полей. Алгоритмы основаны на методе интеграла Рэля, методе параболического уравнения и методе интегрирования по дугам для плоских излучателей. Проведено сравнение методов и выявлена область применимости параболического приближения при анализе полей, создаваемых преобразователями современных ультразвуковых диагностических систем.
5. Предложен и теоретически обоснован метод нестационарной акустической голографии. На основе нестационарного интеграла Рэля реализован численный алгоритм, позволяющий восстанавливать колебания импульсного излучателя по результатам измерения формы акустической волны вдоль участка поверхности, расположенного перед источником. Исследовано влияние шага и размера области голограммы на качество восстановления колебаний импульсного ультразвукового излучателя, и построен программный модуль, позволяющий вычислять значения указанных параметров, обеспечивающих заданную точность. Проведен демонстрационный эксперимент по восстановлению колебаний плоского круглого диагностического датчика.
6. Предложен метод компрессии акустических импульсов, основанный на использовании инвариантности недиссипативных акустических систем относительно изменения знака времени. Метод заключается в использовании дисперсии, возникающей при отражении акустического

импульса от многослойной структуры. На основе метода передаточных матриц реализована численная модель, описывающая распространение одномерного импульса в плоскостойкой среде. Разработан алгоритм построения эффективных многослойных компрессирующих структур, а также рассчитаны соответствующие коэффициенты усиления.

7. Создана экспериментальная установка для получения коротких интенсивных импульсов с использованием предложенного метода компрессии. Результаты экспериментов подтвердили, что предложенный метод позволяет добиться существенного укорочения и усиления ультразвукового импульса при отражении от многослойной структуры в режиме плоской волны. С использованием структуры в виде набора сапфировых пластин, расположенных в воде, достигнуты уменьшение длительности импульса (по уровню e^{-1}) в 9 раз и усиление импульса по амплитуде в 2.3 раза, что находится в хорошем соответствии с результатами расчета. Эффект компрессии ультразвуковых импульсов подтвержден наблюдениями теневых картин с помощью импульсной шпирен-системы оптической визуализации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. О.А. Сапожников, А.Е. Пономарев, М.А. Смагин, Нестационарная акустическая голография для реконструкции колебательной скорости поверхности акустических излучателей, Акуст. журн, 2006, т. 52, №3, с. 385-392.
2. В.А. Хохлова, А.Е. Пономарев, М.А. Аверкью, Л.А. Крам, Нелинейные импульсные поля прямоугольных фокусированных источников диагностического ультразвука, Акуст. журн, 2006, т. 52, №4, с. 560-570.
3. А.Е. Пономарев, С.И. Булатицкий, О.А. Сапожников, Компрессия и усиление ультразвукового импульса, отраженного от одномерной слоистой структуры, Акуст. журн, 2007, т. 53, №2, с.157-167.

4. А.Е. Пономарёв, М.А. Смагин, С.И. Булатицкий, О.А. Сапожников, Временное обращение волн в задачах компрессии импульсов и нестационарной акустической голографии, – В сб. «Акустика неоднородных сред», под ред. С.А. Рыбака, М., 2005, с. 69-89.
5. В.А. Хохлова, О.А. Сапожников, А.Е. Пономарёв, О.В. Руденко, Численное моделирование нелинейных и дифракционных эффектов в звуковых пучках. – В сб. «Нелинейные волны в средах с поглощением и дисперсией. Методическое пособие кафедры акустики», под ред. А.И. Коробова, М.: Физический факультет МГУ, 2006, с. 53-81.
6. А.Е. Пономарев, Ю.А. Пищальников, О.А. Сапожников, Т.В. Синило, Экспериментальное исследование зависимости полной мощности фокусированного акустического пучка от расстояния в условиях проявления нелинейных эффектов, Труды VII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», Красновидово, 22-28 мая, 2000, т.1, с. 36-38.
7. А.Е. Пономарев, В.А. Хохлова, О.А. Сапожников, Задача акустического практикума «Численное моделирование нелинейных и дифракционных эффектов в звуковых пучках», Физическая акустика. Распространение и дифракция звука. Сборник трудов X сессии Российского акустического общества, т.1, с. 13-16,- М.: ГЕОС, 2000.
8. T.V. Sinilo, A.E. Ponomarev, O.A. Sapozhnikov, V.A. Khokhlova, Spatial Dependence of the Total Power of an Ultrasound Beam in the Presence of Acoustic Nonlinearity and Diffraction, "Progress in Nonlinear Science", Proceedings of the International Conference dedicated to the 100th Anniversary of A.A. Andronov (Institute of Applied Physics RAS and University of Nizhny Novgorod, 2002), v.2, pp. 545-549.
9. А.Е. Пономарев, О.А. Сапожников, Т.В. Синило, В.А. Хохлова, Исследование зависимости полной мощности ультразвукового пучка от расстояния в условиях проявления эффектов акустической нелинейности и

- дифракции, Сборник трудов XI сессии Российского акустического общества, Москва, ноябрь 19-23, 2001, т.1, с. 218-221.
10. V.G. Andreev, A.E. Ponomarev, A.A. Karabutov, A.A. Oraevsky, Detection of Optoacoustic Transients with a Rectangular Transducer of Finite Dimensions, Proceedings of the SPIE 2002, Conference, Biomedical Optoacoustics III, San Jose, California, USA, v.4618, pp. 153-162.
11. V.A. Khokhlova, M.A. Averkiou, A.E. Ponomarev, L.A. Crum, Generation of Nonlinear Signals by Rectangular Ultrasound Sources in Biological Media, Abstracts 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Moscow, Russia, August 19-23, 2002, p.26.
12. V.A. Khokhlova, A.E. Ponomarev, M.A. Averkiou, L.A. Crum., Effect of absorption on nonlinear propagation of short ultrasound pulses generated by rectangular transducers. , J. Acoust. Soc. Am., 2002, v. 112(5), Pt. 2, p. 2370. (144th Meeting of the Acoustical Society of America).
13. V.G. Andreev, A.E. Ponomarev, P.M. Henrichs, M. Motamedi, E. Orihuela, E. Eyzaguirre, A.A. Oraevsky, Detection of Prostate Cancer with Optoacoustic Tomography: Feasibility and Modeling, Proceedings of the SPIE 2003, v.4960, pp.45-57.
14. A.E. Ponomaryov, V.A. Khokhlova, M.A. Averkiou, L.A. Crum, Nonlinear Propagation of Short Ultrasound Pulses Generated by Rectangular Diagnostic Transducers, Proceedings of 3rd International Symposium on Therapeutic Ultrasound, Lyon, France, June 22-25, 2003, pp.309-315.
15. В.Г. Андреев, А.Е. Пономарев, Регистрация опто-акустических сигналов решеткой приемников конечных размеров, Тезисы докладов научной школы "Нелинейные волны-2004", Нижний Новгород, 29 февраля – 7 марта, 2004, с. 91-92.
16. А.Е. Пономарев, О.А. Сапожников, Компрессия ультразвукового импульса, отраженного от одномерной слоистой структуры, Сборник трудов XV сессии

Российского акустического общества. Нижний Новгород, 15-18 ноября, 2004, Т. 1. - М.: ГЕОС.- с. 246-249.

17. А.Е. Пономарев, В.А. Хохлова, М.А. Аверкью, Л.А. Крам, Нелинейные импульсные ультразвуковые пучки для диагностики биологических тканей, Сборник трудов XV сессии Российского акустического общества. Нижний Новгород, 15-18 ноября, 2004, Т. 3. - М.: ГЕОС.- с. 76-79.

18. М.А. Смагин, Н.Е. Нагулин, А.Е. Пономарев, О.А. Сапожников, Влияние шага дискретизации временной задержки на качество фокусировки многоэлементного ультразвукового датчика, Тезисы докладов II Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии "Медицинская физика - 2005", Москва, 21-24 июня, 2005.

19. А.Е. Пономарев, В.А. Хохлова, М.А. Аверкью, Л.А. Крам, Особенности формирования акустического поля диагностических устройств в нелинейном режиме, Тезисы докладов II Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии "Медицинская физика - 2005", Москва, 21-24 июня, 2005.

20. А.Е. Пономарев, С.И. Булатицкий, О.А. Сапожников, Компрессия и усиление ультразвуковых импульсов, отраженных от одномерной многослойной структуры, Сборник трудов конференции "Forum Acusticum 2005". Будапешт, Венгрия, 29 августа – 2 сентября, 2005.

21. O.A. Sapozhnikov, A.E. Ponomarev, and M.A. Smagin, Transient acoustic holography for diagnostic transducer characterization. - Book of Abstracts of the 2006 IEEE International Ultrasonics Symposium (Vancouver, Canada, 2006),

22. М.А. Смагин, А.Е. Пономарев, О.А. Сапожников, «Голографическое восстановление колебаний ультразвуковых диагностических источников и ширен-визуализация слабых акустических полей», Сборник трудов XVII сессии РАО, Таганрог, 2006, с. 12-15.