

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Карабутова Александра Алексеевича
о диссертационной работе Асфандиярова Шамиля Альбертовича
«Использование двумерных антенных решеток для ультразвуковой визуализации и
физического воздействия на объекты в неоднородной среде»,
представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика

Диссертационная работа Ш.А. Асфандиярова посвящена исследованию особенностей применения двумерных антенных решеток в неоднородных средах для решения задач ультразвуковой визуализации и физического воздействия на объекты. Актуальность работы обусловлена рядом нерешенных проблем в ультразвуковой визуализации структур головного мозга через интактный череп (транскраниальная диагностика) и в промышленных приложениях ультразвука в газовых средах. В работе предложен метод ультразвуковой транскраниальной визуализации структур головного мозга, который может быть использован для развития методов диагностики кровотока в сосудах головного мозга. Уникальность предложенного метода заключается в том, что для визуализации структур головного мозга предлагается использовать исключительно ультразвук, не прибегая к дополнительным исследованиям КТ или МРТ. Интерес также представляет разработанная 128-элементная антенная решетка для излучения фокусированного высокоинтенсивного ультразвука в воздухе. Наличие ударного фронта и экстремально высокие пиковые давления, создаваемые решеткой, могут найти различные применения как в ультразвуковых технологиях промышленности, так и научных исследованиях взаимодействия интенсивного ультразвука со средой.

Диссертация состоит из введения, трех оригинальных глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 134 страницы, 60 рисунков и 127 библиографических ссылок.

Во **введении** к диссертационной работе обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость исследуемой проблемы, приводится краткий обзор современных достижений, сформулированы цели и задачи работы, а также описывается ее краткое содержание по главам.

В **первой главе** исследуются проблемы ультразвуковой (УЗ) визуализации структур головного мозга через интактный череп. Основные сложности связаны с неоднородностью толщины кости, значительной разницей скорости звука в костной и мягких тканях, а также сильным затуханием акустических волн, что приводит к искажениям сигнала и рефракционным эффектам. Для компенсации этих искажений предложено использовать двумерные антенные решетки, управляющие фазовой задержкой излучаемых сигналов. Такой расчет задержек может проводиться на основе данных о толщинном профиле черепа, полученных методами компьютерной томографии (КТ). Однако в этой работе акцент сделан на разработке методов, где оценка толщины и построение изображений выполняются исключительно с помощью УЗ-оборудования. Представлено два подхода к определению толщинного профиля черепа. Первый метод основан на поэлементном сканировании в А-режиме: каждый элемент решетки излучает короткий импульс, а толщина определяется по задержкам отраженных сигналов. Точность такого метода ограничена из-за невозможности

четко различить импульсы при малой толщине объекта или при их отражении под углом. Второй метод — УЗ-визуализация с формированием луча и фокусировкой зондирующего пучка — обеспечил более высокую точность. Фокусировка осуществлялась в 100 точек сетки (шаг 3 мм) на поверхности фантома черепа, имитирующего акустические свойства реальной кости. Полученные толщинные профили совпали с данными КТ. После представления метода УЗ толщинометрии рассмотрен метод визуализации сферических рассеивателей за фантомом черепа с компенсацией аберраций на излучение и прием. Коррекция на излучение формировала квазиплоский волновой фронт после прохождения кости, а модифицированный алгоритм формирования луча учитывал неоднородность среды. Результаты показали, что без компенсации изображения рассеивателей искажались, тогда как применение алгоритмов позволило точно определить их положение, хотя очертания оставались менее четкими по сравнению с эталонными данными.

Вторая глава посвящена анализу роли сдвиговых волн в транскраниальной диагностике и оценке упругости мягких тканей. Исследованы особенности распространения ультразвука через твердотельные слои, имитирующие костные структуры. Представлены теоретические зависимости коэффициентов прохождения для продольных и сдвиговых волн через упругий слой с учетом поглощения. Экспериментальные измерения на образце из материала, аналогичного костям черепа, подтвердили теоретические зависимости: при малых углах фокусировки доминируют продольные волны, а с увеличением угла сдвиговые волны формируют дополнительный фокус, чья амплитуда может превышать исходную при отсутствии поглощения. Во второй половине второй главы рассмотрены особенности применения сдвиговых волн для диагностики мягких биотканей. Рассмотрен доплеровский метод оценки упругости мышц через возбуждение сдвиговых волн низкочастотным вибратором (150–250 Гц). УЗ-импульсы, отражаясь от рассеивателей в ткани, регистрировали фазовые сдвиги, позволяющие определить скорость волн. Однако измерения на глубине 2–4 см выявили высокую погрешность, связанную с необходимостью уточнения структуры ближнего поля излучателя и моделирования поведения волн в фантомах. Описаны эксперименты по лазерной виброметрии сдвиговых волн в желатиновом фантоме. Колебания алюминиевых пластинок (импульсный и непрерывный режимы) показали симметричное распределение амплитуды с максимумом при $\pm 45^\circ$ при возбуждении сдвиговых волн с помощью вибратора в виде бруска.

Третья глава посвящена разработке и анализу 128-элементной антенной решетки для генерации высокоинтенсивного фокусированного ультразвука в воздухе, а также методам коррекции фазовых искажений в многоэлементных системах. Представлена конструкция решетки: 128 пьезоэлементов УП-3-01 (центральная частота 35.5 кГц) спирально расположены на сферической акриловой чаше (диаметр 500 мм). Элементы соединены параллельно через согласующее устройство, обеспечивающее синфазное излучение. Эффективность электроакустического преобразования составила 10–13%, подтверждена измерениями акустической радиационной силы. Метод импульсной голографии выявил неоднородность амплитуды колебаний: 70% элементов работали оптимально на частоте 35.5 кГц, тогда как на 36 кГц фазировка нарушалась. Численное моделирование в ПО «HIFU beam» и измерения поля гидрофоном продемонстрировали нелинейные искажения волн в фокусе при высоких напряжениях, включая формирование ударных фронтов с пиками до 176 дБ. Во

второй части главы рассмотрена фазовая коррекция 256-элементной мозаичной решетки (1.2 МГц) методом акустической голографии. Изначальное синфазное возбуждение приводило к асимметрии фокального пятна. Проведенная с помощью акустической голографии реконструкция распределений амплитуды и фазы позволила скорректировать задержки сигналов, устранив асферичность поверхности. После коррекции фокус стал симметричным, а пиковое давление увеличилось. Мозаичная структура решетки снизила уровень боковых лепестков, повысив эффективность использования площади излучателя.

В заключении кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, благодарности, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в соответствующих исследовательской области научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и докладами на конференциях различного уровня. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить очень хорошую проработанность автором темы диссертации, логическую структурированность диссертационной работы, глубокое понимание автором физики исследуемых акустических процессов, умение автора анализировать получаемые результаты и намечать пути дальнейшего их развития. Текст диссертации написан аккуратно, ясно и понятно, без видимых грамматических ошибок и опечаток.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Оппонент имеет следующие замечания по содержанию диссертационной работы:

1. В начале Главы 1 подробно описан процесс изготовления реалистичного фантома черепа человека. Однако после этого описания приведены результаты экспериментов по ультразвуковой толщинометрии и визуализации с использованием фантома, где одна из граней плоская. Такой фантом плохо моделирует настоящий череп. Непонятно, почему сразу не использовался реалистичный фантом черепа, представленный в Главе 1.

2. Формула 2.52 в Главе 2 позволяет рассчитать фазовую скорость сдвиговых волн в дальнем поле в приближении квазиплоской бегущей волны. Однако все измерения сдвиговой упругости, описанные в главе, проводятся в ближнем поле. Несмотря на то, что автор регулярно подчеркивает, что измерения проводятся в ближнем поле, сложную структуру которого необходимо учитывать, расчет скорости сдвиговых волн в §2.2 все равно проведен по формуле 2.52.

3. В Главе 3 для расчета акустической мощности излучаемой воздушной антенной решеткой используются данные о поле, полученные из голограммы размером 400×400 мм. На Рис. 3.3 (в), представляющем распределение акустического давления, видно, что на границах голограммы давление совсем не является нулевым, поэтому очевидно, что часть акустической энергии не проходит через измеренную голограмму, а потому результат измерения акустической мощности возможно занижен.

Указанные замечания не являются критическими и не влияют на общую положительную оценку диссертации оппонентом.

Считаю, что диссертация «Использование двумерных антенных решеток для ультразвуковой визуализации и физического воздействия на объекты в неоднородной среде» соответствует специальности 1.3.7. «Акустика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Асфандияров Шамиль Альбертович — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. «Акустика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник лаборатории лазерного ультразвука
Научного центра волновых исследований Института общей физики
имени А.М. Прохорова Российской академии наук

Карабутов Александр Алексеевич

«05» мая 2025 года

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 503-87-77 (доб. 1-91)

E-mail: aak@optoacoustic.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.21 — «Лазерная физика»

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Вавилова, д 38.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Федеральный исследовательский центр

«Институт общей физики имени А.М. Прохорова

Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Телефон: +7 (499) 503-8734; e-mail: office@gpi.ru

Подпись Карабутова Александра Алексеевича ЗАВЕРЯЮ:

Зам. директора НЦВИ ИОФ РАН (филиал)

Абрашин М.Н.