

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Морокова Егора Степановича
о диссертационной работе Асфандиярова Шамиля Альбертовича
«Использование двумерных антенных решёток 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

Актуальность темы работы

Диссертационная работа Асфандиярова Шамиля Альбертовича посвящена развитию методологических основ применения ультразвуковых двумерных антенных решеток для визуализации элементов в неоднородных средах и воздействия на объекты высокоинтенсивным сфокусированным ультразвуком. Интерес к применению фазированных решеток обусловлен возможностью управления пространственно-временной структурой поля. Контролируемое программирование решетки или постобработка регистрируемых сигналов позволяет нивелировать артефакты и искажения, вызванные распространением ультразвука через акустически неоднородные материалы или слои с неравномерной толщиной. Подобные структуры встречаются при ультразвуковой диагностике головного мозга при сканировании через интактный череп. В работе Асфандиярова Ш.А. предлагается подход к преодолению проблемы визуализации элементов через неоднородный слой, имитирующий геометрию и упругие характеристики черепа. Диссертация содержит в себе аппаратные разработки, в том числе, многоэлементную антенную решетку для создания высокоинтенсивного фокусированного ультразвука в воздухе с ударным волновым профилем, что имеет прямое практическое применение для промышленных целей. Тему диссертации, несомненно, следует признать актуальной.

Научная новизна работы заключается

- в разработке нового метода ультразвуковой транскраниальной визуализации структур головного мозга, исследовании роли сдвиговых волн в формировании фокусированных пучков при прохождении через твердые слои,
- в разработке многоэлементной спиральной фокусирующей решетки для создания высокоинтенсивного акустического излучения в воздухе.

Результаты работы имеют прикладное значение для ультразвуковой диагностики мягких тканей и промышленных приложений ультразвука: пеногашение, акустический пинцет.

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

Во введении диссертации обоснована актуальность исследования, приведена научная новизна и практическая значимость исследуемых тем. Представлен обзор литературы, сформулированы цели и исследовательские задачи. Приведено краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена решению проблем ультразвуковой диагностики мозга через интактный череп, где неоднородность толщинного профиля костей черепа, высокая скорость звука в них и затухание волн приводят к искажениям получаемых изображений. Для компенсации возникающих проблем предложено использование двумерных решеток,

управляющих фазой сигналов на основе сведений о толщинном профиле черепа. Хотя толщинный профиль черепа можно определить с помощью рентгеновской компьютерной томографии, приоритет отдан данным, получаемым ультразвуковыми методами. Сравниваются два метода оценки толщины костей черепа. Первый — А-режим: элементы решетки последовательно излучают короткие импульсные сигналы, а толщина вычисляется по задержкам эхо-сигналов. Однако разрешающая способность такого подхода ограничила точность метода. Второй метод — фокусировка пучка с последующей визуализацией методом формирования луча — обеспечил высокую точность. Ультразвуковой метод позволил воспроизвести толщинный профиль, идентичный профилю, полученному с помощью рентгеновской томографии. Представлена ультразвуковая визуализация рассеивателей за фантомом с коррекцией aberrаций на основе данных о толщинном профиле, полученных с помощью предложенного УЗ метода профилометрии. Компенсация на излучение создавала квазиплоский волновой фронт за поверхностью черепа, а модифицированный алгоритм обработки сигналов учитывал толщинный профиль кости для коррекции aberrаций. Рассмотренный метод позволил уточнить положение рассеивателей.

Во второй главе исследовано влияние сдвиговых волн на формирование сигналов при прохождении через слой, имитирующий кости черепа. Теоретический расчет коэффициентов прохождения продольных и сдвиговых волн с учетом поглощения сопоставлен с экспериментальными данными. Установлено, что при углах фокусировки $>20^\circ$ сдвиговые волны формируют дополнительный фокус, амплитуда которого может превзойти амплитуду фокуса, обусловленного продольными волнами. Описан доплеровский метод измерения упругости мягких биотканей, основанный на сдвиговых волнах. Исследования показали, что применение такого метода в ближнем поле низкочастотного излучателя сдвиговых волн требует более подробного анализа структуры ближнего поля сдвиговых волн. Первым шагом в исследовании особенностей ближнего поля низкочастотного излучателя сдвиговых волн стало проведение лазерной виброметрии сдвиговых смещений в прозрачном фантоме мягкой ткани. Анализ колебаний 26 отражающих пластинок, помещенных в фантом, выявил симметричное распределение амплитуды с пиком при $\pm 45^\circ$, что отличается от углового распределения, полученного для такого излучателя в дальнем поле, где пик наблюдается при $\pm 30^\circ$.

В третьей главе представлен процесс разработки и исследования 128-элементной фокусирующей решетки для создания высокоинтенсивных ультразвуковых пучков в воздухе. Элементами решетки являются пьезокерамические преобразователи с центральной частотой излучения 35.5 кГц. С целью подавления паразитных дифракционных максимумов элементы расположены вдоль спиралей. Представлена схема устройства решетки и результаты оценки акустического поля, создаваемого решеткой. Измерения методом голографии выявили амплитудные и фазовые неоднородности: на частоте 35.5 кГц большинство элементов имело схожие значения амплитуды и фазы. Однако часть элементов на центральной частоте излучала слабо из-за смещённой резонансной частоты этих элементов. При моделировании поля разработанной решетки с учетом нелинейных эффектов получены ударные профили акустической волны в фокусе с амплитудой давления, достигавшей 176 дБ, а экспериментальные измерения формы волны с помощью гидрофона подтвердили численные расчеты. Также в главе представлен метод фазовой коррекции элементов 256-элементной ультразвуковой терапевтической решетки,

который позволяет создавать акустические поля с предсказуемыми пространственными характеристиками, что играет критическую роль в задачах ультразвуковой терапии. Метод акустической голографии позволила рассчитать компенсирующие задержки для элементов терапевтической решетки, что выровняло фазу на поверхности решетки и улучшило форму фокального пятна. Сравнение до и после коррекции показало рост пикового значения давления и снижение искажений формы фокального пятна.

Заключение диссертации содержит сведения об основных результатах работы, благодарности, список публикаций автора по теме диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа Асфандиярова Ш.А. является законченной научной квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, обладает актуальностью, значимостью и высокой практической ценностью. Исследование соответствует современным стандартам научных исследований, о чем свидетельствуют публикации в рецензируемых научных журналах и активное участие во всероссийских и международных конференциях. Полученные в работе аналитические и экспериментальные результаты, сформулированные выводы и защищаемые научные положения являются обоснованными и достоверными.

Автореферат корректно отражает содержание представленной диссертационной работы.

Замечания и вопросы по диссертационной работе:

1. На рисунке 1.18 представлены изображения рассеивателей при регистрации сигналов через фантом кости черепа. Интересным видится сопоставление искажениями отображения элементов на изображении с топографией неоднородности толщины фантома черепа.

2. Расстояние между фазированной решеткой и фантомом кости черепа составляет 20 мм. Чем обусловлено расстояние, и изменится ли принцип визуализации и регистрации сигналов, если источник/приемник ультразвука будет размещен вплотную к фантому?

3. На рисунке 2.10 не приведен спектр сигнала, обусловленного прохождением сдвиговых волн через образец. Сигнал t_t , соответствующий эхограмме на рисунке 2.18 г.

Указанные замечания не являются критичными и не снижают общего положительного впечатления от представленных Асфандияровым Ш.А. исследований.

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,
старший научный сотрудник лаборатории акустической микроскопии
Института биохимической физики имени Н.М. Эмануэля
Российской академии наук

Мороков Егор Степанович

«22» мая 2025 года

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-71-71

E-mail: ibcp@sky.chph.ras.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики
(по физико-математическим наукам)

Адрес места работы:

119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук»
(ИБХФ РАН)

Телефон: +7 (499) 137-64-20; e-mail: ibcp@sky.chph.ras.ru

Подпись Морокова Егора Степановича ЗАВЕРЯЮ:

учёный секретарь ИБХФ РАН, к.б.н.

Скалацкая С.И.