

ОТЗЫВ официального оппонента  
о диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Крюкова Романа Вячеславовича

на тему: «Томографическое восстановление акустических нелинейных параметров с помощью трёх зондирующих волн» по специальности 01.04.06 — «Акустика»

Представленная диссертационная работа посвящена разработке математических методов обработки и анализа явления коллинеарного и неколлинеарного нелинейного взаимодействия акустических волн в скалярных средах, методологии получения пространственных распределений акустических нелинейных параметров, алгоритмической и программной реализациям задач томографической биомедицинской реконструкции на основе ультразвукового многопозиционного сканирования.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность работы и кратко перечисляются рассматриваемые в работе задачи.

Первая глава посвящена обзору литературы по вопросам восстановления акустических нелинейных характеристик среды, при этом вводятся основные определения и обсуждается роль нелинейных акустических параметров в медицинской диагностике. Описываются существующие методы измерения акустических нелинейных параметров второго и третьего порядков. Отдельный параграф посвящён обсуждению нелинейных эффектов третьего порядка и механизмам формирования полей третьего порядка. В первой главе следует особо отметить разделение лучевого и волнового подходов к определению нелинейных параметров. В частности, указывается, что лучевой подход имеет свои недостатки. Например, разрешающая способность лучевых схем зависит от того, насколько узок акустический луч; т.е. существует предел допустимой разрешающей способности, не всегда достаточный для поставленных диагностических целей. Кроме того, анализ работ, относящихся к способам измерения нелинейного параметра, основанных на получении и решении одномерного волнового уравнения, обнаруживает зависимость эффектов третьего порядка от нелинейного параметра второго порядка для органических и биологических сред: в зависимости амплитуды третьей гармоники от расстояния присутствует как линейный, так и квадратичный рост. Автор творчески анализирует полученные ранее в группе проф. Букова В.А. работы, посвящённые процессу генерации в пространстве произвольной размерности комбинационных волн третьего порядка, а также возможность их использования для целей

медицинской томографии.

Во второй главе работы проводится детальный анализ полей третьего порядка малости, возникающих при коллинеарном взаимодействии трех волн. Это необходимо для обсуждения возможности использования коллинеарных томографических схем для целей восстановления пространственных распределений акустических нелинейных параметров. Дается постановка задачи и рассматриваются механизмы генерации третьей гармоники. Описаны нелинейные процессы третьего порядка и обсуждаются результаты численного моделирования этих решений. Нелинейные коллинеарные процессы третьего порядка анализируются с помощью уравнения Римановых волн. Одним из важных практических итогов такого рассмотрения во второй главе является вывод о предпочтительном использовании *неколлинеарных* томографических схем.

В третьей главе анализируется роль возмущений энтропии в задачах нелинейной акустической томографии третьего порядка. Определяется область взаимодействия волн при формировании комбинационного сигнала чисто третьего порядка. Находится область взаимодействия волн при формировании комбинационного сигнала от двукратного взаимодействия второго порядка. Путем численного моделирования сравниваются уровни сигналов третьего порядка и сигналов от двукратного взаимодействия второго порядка при неколлинеарном взаимодействии двух кодированных и одной монохроматической зондирующих волн. В целом, в главе всесторонне обсуждаются проблемы томографии акустических нелинейных параметров с помощью двух кодированных и одной монохроматической зондирующих волн, являющихся неколлинеарными.

В 4-й, заключительной главе обсуждаются особенности практической реализации плоских первичных фронтов, а также делается обобщение принципа взаимности на процессы нелинейного рассеяния третьего порядка. Описывается алгоритм поиска схемы томографии, предназначенной для выделения количественных значений акустических нелинейных параметров второго и третьего порядков. Анализируются различные способы кодировки первично излучаемых сигналов, и приводятся результаты численного моделирования процесса восстановления пространственного распределения комбинации нелинейных параметров. Обсуждается способ коррекции оценки нелинейных параметров, получаемой при восстановлении, путем нормировки пространственного спектра восстанавливаемого изображения. Разобраны основные сложности, возникающие при численном моделировании волновой прямой задачи рассеяния с учетом разных типов нелинейных вторичных источников для зондирующих сигналов с произвольным спектром. Можно обобщить: 4-я глава посвящена процессу томографии на основе неколлинеарного взаимодействия в случае трех кодированных

зондирующих волн и его численному моделированию.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в том, что а) рассмотрено влияние возмущений энтропии на акустическое давление, возникающее за счет нелинейного взаимодействия третьего порядка; б) показано, что область, в которой формируется комбинационный сигнал с определенным кодом, не локализована в пределах элемента разрешения томографической системы, а распределена по всей области пересечения трех зондирующих волн; в) показано, что результаты восстановления нелинейных характеристик исследуемого объекта, которые получены от различных томографических схем, удовлетворяющих обобщенному принципу взаимности, несут одинаковую информацию о пространственном спектре объекта.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена широкой теоретической базой, строгой математической обоснованностью алгоритмов, многочисленными вычислительными экспериментами и сравнением разработанных алгоритмов с имеющимися литературными данными по аналогичной тематике.

В качестве замечаний по содержанию и оформлению данной работы можно отметить следующее:

1) В главе 2 на рис. 2, представляющем зависимость полной колебательной скорости волны от времени в точке излучения вблизи длины образования разрыва, приводится оценка  $x/\lambda=1492$ . Учитывая условия моделирования:  $f = 1\text{ MHz}$ , длина волны  $\sim 1,5$  мм, имеем оценку длины образования разрыва  $\sim 223,8$  см. Хотелось бы сопоставить данную оценку с размерами области томографирования в конкретном биомедицинском диагностическом эксперименте.

2) Для моделирования задачи акустического томографического сканирования рассматривались три вида сред: вода и две модельные мягкие биологические ткани, отличающиеся от воды только повышенными значениями нелинейных параметров. При этом применялись следующие значения акустического нелинейного параметра второго порядка  $\epsilon_2 = 5,4$  и третьего порядка  $\epsilon_3 = 19,36$  для второй среды, а также  $\epsilon_2 = 6$  и  $\epsilon_3 = 25$  для третьей (глава 3, стр. 103-104). Там же приводится ссылка на полученную в работе [82] оценку  $\epsilon_3 \cong (\epsilon_2 - 1)^2$ . Требуется пояснение, насколько эта оценка правомерна для мягких биотканей.

3) В последнем параграфе главы 4 утверждается, что разработано и численно промоделировано решение прямой задачи нелинейного рассеяния в импульсном режиме, принимая во внимание все типы нелинейных вторичных источников, приводящих к формированию полей третьего порядка. Естественно ожидать, что для выбранной томографической схемы будут представлены данные об амплитудах и фазах, об интенсивностях для одной из выбранной схем томографического

эксперимента. Тем не менее, эти данные в работе не приводятся.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Представленная диссертация «Томографическое восстановление акустических нелинейных параметров с помощью трех зондирующих волн» соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09. 2013 г., редакция от 29.05.2017 № 650, а также критериям, определенными пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Крюков Роман Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 — «Акустика».

Официальный оппонент:

Рычагов Михаил Николаевич

Уч. степень, уч. звание: доктор физ.-мат. наук, профессор

Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация: 01.04.06 – акустика

Место работы, подразделение и должность: Московский филиал корпорации «Алаин Текнолоджи Ресерч энд Девелопмент, Инк», старший менеджер по разработке программного обеспечения

Индекс, почтовый адрес места работы: 117105, Москва, Варшавское шоссе, д.9, стр. 1Б

Рабочий e-mail, рабочий телефон: [mrychagov@aligntech.com](mailto:mrychagov@aligntech.com)

Рычагов М.Н.

14 декабря 2020 г.

Подпись Рычагова Михаила Николаевича удостоверяю:

неутверждает по  
работе с  
персоналом  
Захарова А.И.