

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Крюкова Романа Вячеславовича «Томографическое восстановление акустических нелинейных параметров с помощью трех зондирующих волн», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 — акустика

Диссертационная работа Крюкова Р.В. посвящена теоретическому исследованию и компьютерному моделированию процессов, возникающих при нелинейном рассеянии трех зондирующих акустических волн. На основе этих процессов предлагается осуществить томографическое восстановление акустических нелинейных параметров третьего порядка, прежде всего – для использования при ранней диагностике рака молочной железы. Большинство акустических диагностических устройств основано на измерении линейных параметров. Нелинейные же параметры биологических сред изучены значительно слабее. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при создании опытного образца томографа, что показывает актуальность проведенного исследования.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, результатов и выводов диссертационной работы. Работа завершается списком литературы, который включает в себя 112 работы, включая публикации автора, приведенные отдельным списком. Объем диссертации составляет 183 страницы и включает в себя 33 рисунка.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна диссертационной работы и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту. Также во введении приведены сведения об апробации диссертационной работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по вопросам восстановления акустических нелинейных характеристик среды. Рассмотрены существующие методы и подходы к измерению акустических нелинейных параметров второго и третьего порядков и описана роль нелинейных акустических параметров в медицинской диагностике. Представляемая диссертация является продолжением и развитием диссертационных работ С.Н. Евтухова и А.А. Шмелева по томографии нелинейных акустических параметров с помощью волнового подхода и использования кодированных зондирующих волн.

Во **второй главе** работы обсуждается возможность томографии нелинейного акустического параметра третьего порядка по результатам измерения третьей гармоники зондирующей волны. Дана общая постановка задачи, и рассмотрены механизмы генерации третьей гармоники. Такой подход представляется целесообразным для выбора наиболее перспективных, в практическом отношении, путей к решению поставленных задач. Представлено описание нелинейных коллинеарных процессов третьего порядка приближенными аналитическими решениями уравнения Бюргерса и решением уравнения Римановых волн. Приведенные результаты численного моделирования этих решений свидетельствуют о том, что томографические схемы, основанные на коллинеарном взаимодействии, не представляются перспективными для восстановления пространственного распределения акустического нелинейного параметра третьего порядка ε_3 .

В **третьей главе** обсуждаются проблемы томографии акустических нелинейных параметров с помощью двух кодированных и одной монохроматической неколлинеарных зондирующих волн. Для обоснования правомерности изоэнтропийного математического описания эффектов третьего порядка сначала приведены оценки влияния возмущений энтропии на акустическое давление третьего порядка. В последующих параграфах данной главы исследованы области нелинейного взаимодействия при формировании комбинационного сигнала от взаимодействия чисто третьего порядка и от двукратного взаимодействия второго порядка в случае томографической схемы, использующей в качестве зондирующих две кодированные волны и одну монохроматическую волну. Численным моделированием показана невозможность разделения в данных схемах сигналов, порождаемых в разных точках пространства этими двумя различными механизмами взаимодействия. Сделан вывод о целесообразности перехода к томографическим схемам, в которых все три первичные волны являются кодированными.

Четвертая глава посвящена анализу и численному моделированию процесса томографии на основе трех кодированных зондирующих волн, являющихся неколлинеарными. Особое внимание уделяется поиску возможных параметров томографической системы, приемлемых для ее практической реализации. Выполнено обобщение принципа взаимности на процессы нелинейного рассеяния третьего порядка малости с целью получения дополнительных экспериментов без излишнего увеличения числа преобразователей в томографической системе. Описан алгоритм поиска излучаемых частот и углов, под которыми происходит излучение в

томографической системе, предназначенной для выделения количественных значений акустических нелинейных параметров. Приведены результаты численного моделирования процесса восстановления с помощью найденных параметров различных пространственных распределений комбинированного нелинейного параметра. Кроме того, с помощью компьютерного моделирования проанализированы различные способы кодировки первично излучаемых сигналов. Помимо этого, предложен способ коррекции оценки комбинированного нелинейного параметра, получаемой при восстановлении, путем нормировки пространственного спектра восстанавливаемого изображения. В конце главы разбираются основные сложности, возникающие при численном моделировании волновой прямой задачи рассеяния с учетом разных типов нелинейных вторичных источников для зондирующих сигналов с произвольным спектром.

В **Заключении** приведены основные результаты и выводы диссертации, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Соискатель Крюков Р.В. проявил себя, как учёный, способный проводить нетривиальный теоретический анализ в таком сложном разделе акустики, как нелинейная акустика. Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, апробирована публикациями в журналах из списка Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки РФ и докладами на международных конференциях. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Получены аналитические выражения для амплитуд рассеянных волн второго и третьего порядка, справедливость которых подтверждена сравнением с решением уравнения Бюргерса и решением уравнения Римановых волн. Сделан вывод, что при использовании коллинеарных пучков в экспериментальных данных полезный линейно нарастающий с расстоянием вклад (а только в нем содержится информация о параметре ε_3) практически полностью подавляется мешающим квадратичным вкладом, содержащим информацию только о параметре ε_2 .
- Проведено аналитическое сравнение локально рассеянного поля $p^{(3)}(\mathbf{y})$ и поля от двукратного взаимодействия второго порядка $p^{(2 \times 2)}(\mathbf{y})$, что позволило оптимизировать выбор излучателей и приёмник томографа.
- Для повышения отношения сигнал/шум предложен способ выбора минимально перекрывающихся частотных диапазонов излучателей и приёмника.

Результаты диссертации обладают **новизной**. Так, впервые рассмотрено влияние на возмущения акустического давления третьего порядка малости возмущений энтропии, возникающих в томографических задачах рассматриваемого типа за счет наличия вязкости, теплопроводности и нелинейности рассматриваемой среды. Впервые показано, что результаты восстановления нелинейных характеристик исследуемого объекта, которые получены от различных томографических схем, удовлетворяющих обобщенному принципу взаимности, несут одинаковую информацию о пространственном спектре томографируемого объекта, что позволит восстановить отдельно параметры ϵ_2 и ϵ_3 . Это лишь некоторые из значимых оригинальных результатов.

Достоверность представленных в работе результатов подтверждается физической обоснованностью используемых теоретических моделей и методов решения поставленных задач, а также соответствием результатов численных экспериментов теоретическим расчетам и результатам других авторов.

Однако, необходимо отметить, что диссертация не лишена недостатков.

1. К основному недостатку можно отнести отсутствие обработки экспериментальных эхосигналов. А численные эксперименты были бы более убедительны, если эхосигналы рассчитывались с использованием метода конечных элементов или метода конечных разностей, а не по аналитическим формулам, по которым же рассчитывались и эхосигналы для корреляционного метода восстановления нелинейного параметра ϵ_3 .
2. В диссертации Шмелёва А.А. есть раздел, посвящённый изучению амплитуд полей $p^{(3)}(y)$ и $p^{(2 \times 2)}(y)$. Что нового в работе соискателя?
3. Для неподготовленного читателя довольно непонятно изложена идея про кодирование трёх плоских волн, «освещающих» объект в томографическом эксперименте. Сложно понять, почему кодирование позволяет обойтись без сканирования приёмником и излучателями.

Указанные замечания не отражаются на общем восприятии диссертации и не снижают заслуг соискателя в получении важных и интересных результатов, равно как и их высокой оценки. В диссертационной работе теоретически и с привлечением компьютерного моделирования исследованы и выявлены не только принципиальные возможности, но и принципиальные трудности, процесса нелинейного томографирования с помощью кодированных волн в практических условиях.

На основании вышеизложенного можно заключить, что научные результаты, представленные в диссертации, вносят достойный вклад в развитие принципов нелинейного ультразвукового томографирования, прежде всего – в целях диагностики патологий в мягких биотканях.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

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, а ее автор – Крюков Роман Вячеславович – заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, заместитель генерального директора по науке и системе качества Научно-производственного центра неразрушающего контроля «ЭХО+»

Базулин Евгений Геннадиевич

123458, г. Москва, ул. Твардовского, д.8

Телефон: +7(495)780-92-50, e-mail: bazulin@echoplus.ru

15.12.2020

Подпись Евгения Геннадиевича Базулина УДОСТОВЕРЯЮ.

Генеральный директор
НПЦ «ЭХО+»



Вонякин Алексей Харитонович

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр «ЭХО+»
(ООО «НПЦ «ЭХО+»)

Адрес: Россия, 123458, Москва, ул. Твардовского д. 8, «Технопарк «СТРОГИНО»

Телефон / Факс (495) 780-92-50

E-mail: echo@echoplus.ru

Web: www.echoplus.ru