

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи



Крюков Роман Вячеславович

**ТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ
АКУСТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ
С ПОМОЩЬЮ ТРЁХ ЗОНДИРУЮЩИХ ВОЛН**

Специальность: 01.04.06 — акустика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2020

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

Научный руководитель: **Румянцева Ольга Дмитриевна,**
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Базулин Евгений Геннадиевич,**
доктор технических наук,
заместитель генерального директора по науке и
системе качества Научно-производственного
центра неразрушающего контроля «ЭХО+»

Рычагов Михаил Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
старший менеджер по разработке программного
обеспечения московского филиала корпорации
«Алаин Текнолоджи Ресерч энд Девелопмент,
Инк»

Жостков Руслан Александрович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
фундаментальных проблем экологической
геофизики и вулканологии Института физики
Земли имени О.Ю. Шмидта Российской
академии наук (ИФЗ РАН)

Защита состоится « 28 » декабря 2020 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.08 на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27).

С диссертацией, а также сведениями о регистрации участия в защите в удалённом интерактивном режиме можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/321432105/>

Автореферат разослан «26» ноября 2020 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.01.08
доктор физико-математических наук, доцент
e-mail: kosareva@physics.msu.ru



О.Г. Косарева

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Проблема диагностики онкологических заболеваний стоит очень остро, так как по данным Всемирной Организации Здравоохранения рак является второй из основных причин смерти в мире. У женской половины населения наиболее распространенным оказывается рак молочной железы, которого в год диагностируется более 2 миллионов случаев. Смертность от онкологических заболеваний можно снизить, если выявлять и лечить их на ранних стадиях. При раннем выявлении рака высока вероятность исцеления при эффективном лечении, а также значительно снижается стоимость лечения. В отсутствие ранней диагностики болезнь диагностируется на поздних стадиях, когда даже радикальное лечение зачастую уже не способно помочь. Следовательно, необходима разработка удобных, недорогих и заслуживающих доверия способов ранней диагностики рака молочной железы.

В настоящее время развиваются различные методы диагностики онкологических заболеваний, но наиболее безопасными и относительно недорогими являются исследования, использующие ультразвук. Подавляющее большинство существующих на данный момент ультразвуковых диагностических систем измеряют линейные акустические характеристики среды – скорость звуковых волн, плотность среды и поглощение в ней. Слабое относительное изменение этих величин в больной ткани по сравнению со здоровой затрудняет диагностику. Гораздо больше отличаются нелинейные характеристики тканей, такие как акустические нелинейные параметры второго ϵ_2 и третьего ϵ_3 порядков. Это делает актуальной разработку устройств и методов диагностики на их основе. Однако несмотря на исследования разных научных групп, диагностических систем, способных восстанавливать пространственное распределение количественных значений акустических нелинейных параметров, на данный момент неизвестно.

Пространственное распределение акустических нелинейных параметров среды является важной информацией для медицинской диагностики. Структурные особенности самих биологических тканей и присутствующие в них неоднородности сильно влияют на величину и пространственное распределение нелинейных параметров. Что касается нелинейного параметра второго порядка ϵ_2 , в настоящее время уже имеются экспериментальные данные о его численных значениях в образцах различных биологических сред. Для определения значения ϵ_2 в однородном по структуре образце часто используется вторая гармоника. Акустический нелинейный параметр третьего порядка ϵ_3 влияет на величину третьей гармоники, однако в биотканях он изучен достаточно слабо, так как его измерение связано с большими сложностями: амплитуда третьей гармоники обычно меньше амплитуды второй гармоники и, тем более, зондирующего сигнала; кроме того, возникают сильные мешающие сигналы в результате двукратного взаимодействия второго порядка (что подробно обсуждается в настоящей диссертационной работе). В то

же время, в представляемой диссертационной работе развиваются принципы акустической томографии, использующей нелинейные эффекты третьего порядка. Такая акустическая нелинейная томография, находящаяся в стадии разработки, может обеспечить восстановление количественных значений нелинейных параметров исследуемого объекта в рамках удобной для практической реализации схемы с малым количеством излучателей и приемников. Это позволит более точно различать и классифицировать новообразования в биотканях, в сочетании с методами, базирующимися на линейных эффектах. По этой причине исследование принципов томографирования акустических нелинейных параметров представляет как фундаментальный, так и практический интерес.

Цель и задачи диссертационной работы

Основной целью работы является выявление практических возможностей и определение оптимальных параметров томографических систем, предназначенных для восстановления количественных значений акустических нелинейных параметров. Осуществить данную цель предлагается на основе нелинейных эффектов третьего порядка с использованием трех неколлинеарных кодированных волн, зондирующих исследуемый объект. В рамках данной цели решались следующие задачи:

1. Обосновать невозможность использования коллинеарных процессов для целей томографии нелинейных параметров третьего порядка. В рамках этого обоснования – рассмотреть акустические процессы генерации третьей гармоники волны за счет нелинейного коллинеарного взаимодействия с учетом всех механизмов, ответственных за данный эффект.
2. Рассмотреть влияние возмущений энтропии на акустическое давление, возникающее за счет нелинейного взаимодействия третьего порядка. Оценить вклад в возмущение энтропии за счет наличия вязкости и теплопроводности (с помощью общего уравнения переноса тепла), а также за счет нелинейности рассматриваемой среды. Обосновать правомерность изоэнтропийного математического описания нелинейных эффектов третьего порядка в задачах нелинейной акустической томографии.
3. Определить пространственные области, в которых происходит формирование сигналов от двукратного взаимодействия второго порядка и взаимодействия чисто третьего порядка, для томографических схем, использующих в качестве зондирующих две кодированные и одну монохроматическую волну, а также все три кодированные волны. Сравнить уровни сигналов, возникающих за счет различных механизмов в процессе нелинейного взаимодействия трех зондирующих плоских волн.
4. Оценить возможность использования томографических схем, основанных на нелинейном неколлинеарном взаимодействии в случае трех кодированных зондирующих волн, для целей определения количественных значений акустических нелинейных параметров.
5. Обобщить принцип взаимности на процессы нелинейного рассеяния третьего порядка для обеспечения возможности проведения нескольких

экспериментов при фиксированных положениях и рабочих частотах используемых преобразователей.

6. Разработать и реализовать алгоритм поиска схемы томографии, удовлетворяющей обобщенному принципу взаимности для нелинейных эффектов третьего порядка; такая схема использует три кодированные волны в качестве зондирующих.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования в диссертационной работе выбрано явление неколлинеарного нелинейного взаимодействия акустических волн в скалярных средах. Предметом исследования является способ получения пространственных распределений акустических нелинейных параметров.

Методология исследования

При выводе волновых уравнений для акустического давления и колебательной скорости второго и третьего порядков, а также при теоретическом исследовании влияния возмущений энтропии на нелинейные эффекты третьего порядка малости в качестве основного инструмента использовался метод последовательных приближений. Для решения прямой задачи рассеяния волновые уравнения приводились к уравнению типа Липпмана-Швингера, после чего результирующее поле в точке приема получалось путем свертки нелинейных вторичных источников различных типов с функцией Грина на соответствующих частотах. Решение же обратной задачи рассеяния, результатом которой является получение оценки в виде комбинации нелинейных параметров второго и третьего порядков, осуществлялось за счет кодирования зондирующих волн, нелинейно взаимодействующих в исследуемой среде, с последующей обработкой зарегистрированного на приемнике сигнала корреляционными методами типа согласованной фильтрации. Численное моделирование проводилось с помощью программной среды MATLAB.

Научная новизна

1. Проведено детальное теоретическое исследование полей третьего порядка, возникающих при коллинеарном нелинейном взаимодействии в случае трех зондирующих волн. Показано, что мешающий квадратично нарастающий с расстоянием вклад в третью гармонику (или волну комбинационной частоты третьего порядка, в общем случае) становится соизмеримым с информативным линейно нарастающим вкладом уже на очень малых (~ 0.1 длины волны на частоте ~ 1 МГц) волновых расстояниях.
2. Впервые рассмотрено влияние возмущений энтропии на акустическое давление, возникающее за счет нелинейного взаимодействия третьего порядка. Оценен вклад в возмущение энтропии за счет наличия вязкости и теплопроводности (с помощью общего уравнения переноса тепла), а также за счет нелинейности рассматриваемой среды.
3. Проведено исследование пространственных областей формирования комбинационного сигнала в томографических схемах, использующих в качестве зондирующих две кодированные и одну монохроматическую

волну. Впервые 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.

4. 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 объекта.

Практическая значимость

Теоретически и численным моделированием продемонстрирована возможность практической реализации нелинейного акустического томографа, использующего именно три кодированные волны, неколлинеарно зондирующие исследуемый объект. В то же время показано, что использование только двух кодированных и одной монохроматической зондирующих волн не может, в общем случае, гарантировать высокую достоверность восстанавливаемой картины акустических нелинейных параметров. Результаты настоящей диссертационной работы могут непосредственно использоваться в томографических установках [A16, A17].

Положения, выносимые на защиту

1. Томографические схемы, основанные на коллинеарном нелинейном взаимодействии волн, неперспективны для восстановления пространственного распределения акустического нелинейного параметра третьего порядка.
2. Вклад в акустическое давление третьего порядка, обусловленный возмущениями плотности в зондирующих волнах, по сделанным оценкам, более чем на два порядка превосходит вклад, вызванный возмущениями энтропии при учете всевозможных факторов, ответственных за изменение энтропии.
3. Правомерно изоэнтропийное математическое описание нелинейных эффектов третьего порядка в задачах нелинейной акустической томографии.
4. Для томографических схем, использующих две кодированные и одну монохроматическую зондирующие волны, невозможно разделить комбинационные сигналы с заданным кодом, порождаемые локальным взаимодействием чисто третьего порядка и нелокальным двукратным взаимодействием второго порядка и, тем самым, невозможно определить точные значения нелинейных параметров в фиксированном элементе разрешения.
5. Восстановление пространственного распределения комбинированного акустического нелинейного параметра третьего порядка возможно с помощью томографических схем, в которых все три зондирующие волны являются кодированными.

6. Принцип взаимности, примененный к процессам нелинейного рассеяния третьего порядка, позволяет получать дополнительную экспериментальную информацию о томографируемом объекте при фиксированных положениях и рабочих частотах преобразователей.

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.

Апробация работы

Вошедшие в работу материалы докладывались на XVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2010» (12–15 апреля 2010 г., Москва), на XXII сессии Российского Акустического Общества и сессии Научного совета РАН по акустике (5–17 июня 2010 г., Москва), на III Евразийском конгрессе по медицинской физике и инженерии «Медицинская Физика – 2010» (21–25 июня 2010 г., Москва), на 54-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе» (24–27 ноября 2010 г., Долгопрудный), на семинаре Лаборатории геометрических методов математической физики им. Н.Н. Боголюбова механико-математического факультета МГУ (март 2012 г., Москва), на 5-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (18–19 сентября 2012 г., Суздаль), на XV Всероссийской школе-семинаре «Физика и применение микроволн» (1–6 июня 2015 г., Красновидово), на XXIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017» (10–14 апреля 2017 г., Москва), на XXV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018» (9–13 апреля 2018 г., Москва), на XVI Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» (27 мая – 1 июня 2018 г., Красновидово). Результаты исследований обсуждались на научных семинарах кафедры акустики физического факультета МГУ.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 17 печатных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 1 статье в научном журнале, не входящем в перечень рецензируемых изданий, 9 публикациях в сборниках трудов и тезисов конференций и 2 патентах на изобретения. Список работ автора приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты по развитию теоретических моделей, получению предварительных оценок, разработке численных алгоритмов и программного обеспечения выполнены автором лично, либо при его определяющем участии.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из общей вводной части, четырех оригинальных глав и заключения. Список цитируемой литературы содержит 112 наименований, включая публикации автора, приведенные отдельным списком. Общий объем работы составляет 183 страницы текста, включая 33 рисунка.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели работы, и приведено краткое содержание работы по главам.

Первая глава посвящена обзору литературы по вопросам восстановления акустических нелинейных характеристик среды. Акустические нелинейные параметры вводятся из рассмотрения уравнения состояния, при разложении акустического давления в ряд Тейлора по возмущениям плотности.

Вводятся безразмерные величины $A = \frac{\rho_0}{P_0} \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{s, \rho=\rho_0} = \frac{\rho_0 c^2}{P_0}$, $B = \frac{\rho_0^2}{P_0} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_{s, \rho=\rho_0}$

и $C = \frac{\rho_0^3}{P_0} \left(\frac{\partial^3 P}{\partial \rho^3} \right)_{s, \rho=\rho_0}$ (ρ , ρ_0 – мгновенная и невозмущенная плотность; P , P_0 –

мгновенное и невозмущенное давление; c – фазовая скорость звука; s – энтропия), ответственные за линейный, квадратичный и кубичный члены в ряде, соответственно. Акустические нелинейные параметры второго и третьего порядков обозначаются, соответственно, как

$$\varepsilon_2 = 1 + B/(2A), \quad \varepsilon_3 = C/(6A).$$

Экспериментально измеренные значения ε_2 для различных биологических образцов (включая здоровые биоткани и биоткани с патологией) показывают, что участки ткани, содержащие патологические изменения, имеют более высокие значения ε_2 , нежели соответствующие значения в здоровой ткани. Кроме того, имеющиеся результаты свидетельствуют о том, что акустический нелинейный параметр более чувствителен к патологическим изменениям ткани, чем скорость звука и плотность. В то же время достоверные данные по измерению нелинейного акустического параметра третьего порядка ε_3 отсутствуют. Тем самым ε_3 – новая для медицинской диагностики величина; ее измерение способно предоставить дополнительную информацию об исследуемых объектах.

Данная диссертационная работа продолжает развитие неколлинеарного подхода к томографическому измерению нелинейных параметров. Он основан на эффекте рассеяния звука на звуке и рождении волн на комбинационных частотах. Так, с помощью всего трех излучателей, работающих на частотах

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$, и одного приемника возможна регистрация на комбинационных частотах $\Omega_{\pm\pm} = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$ сигналов, зависящих от нелинейных акустических параметров ε_2 и ε_3 . Для теоретического описания этих эффектов необходимо получить волновое уравнение, описывающее нелинейное взаимодействие в случае трех волн, зондирующих исследуемый объект. Исходя из системы уравнений гидродинамики, описывающей распространение акустических волн в скалярных непоглощающих средах (уравнения движения, непрерывности и состояния), и применяя метод последовательных приближений, можно получить волновое уравнение для звукового давления $p = P - P_0$ с точностью до членов третьего порядка малости:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2(\mathbf{r})} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = F_0 + Q^{(\text{II})} + Q^{(\text{III})}, \quad (1)$$

где F_0 – источники зондирующих волн, $Q^{(\text{II})}$ и $Q^{(\text{III})}$ – нелинейные вторичные источники второго и третьего порядков. Вторичные источники $Q^{(\text{III})} = Q^{(3)} + Q^{(2 \times 2)}$ подразделяются, в свою очередь, на источники чисто третьего порядка $Q^{(3)}$, порождающие поля $p^{(3)}$, и источники двукратного взаимодействия второго порядка $Q^{(2 \times 2)}$, порождающие поля $p^{(2 \times 2)}$. Это разделение связано с тем, что поля третьего порядка формируются двумя конкурирующими механизмами. Первый – локальный механизм, соответствующий взаимодействию чисто третьего порядка. Он представляет собой одновременное взаимодействие трех зондирующих волн в одной точке (одном элементе разрешения) с образованием волн на комбинационных частотах третьего порядка $\Omega_{\pm\pm}$, регистрируемых приемником. Вклад от данного эффекта в сигнал на приемнике является информативным, так как он содержит в себе информацию не только о нелинейном параметре второго порядка ε_2 , но и о практически не исследованном параметре третьего порядка ε_3 для конкретного элемента разрешения томографической системы. Второй механизм – нелокальный, соответствующий двукратному взаимодействию второго порядка. Он представляет собой нелинейное взаимодействие в одном элементе разрешения сначала двух зондирующих волн с образованием волн на комбинационных частотах второго порядка $\Omega_{\pm} = \omega_i \pm \omega_j$ ($i, j = 1, 2, 3$), которые затем, после распространения в среде, взаимодействуют с третьей зондирующей волной уже в другом элементе разрешения. Вклад в поле на приемнике от данного эффекта является мешающим, так как в представляемой диссертации показано (в последующих главах), что в этом вкладе нельзя разделить информацию, приходящую от различных элементов разрешения. «Борьба» с мешающим эффектом от двукратного взаимодействия второго порядка является одной из основных задач рассматриваемых томографических

схем, основанных на неколлинеарном взаимодействии и кодировании трех зондирующих волн.

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 (которые ранее предлагались другими научными коллективами) для целей восстановления пространственных распределений акустических нелинейных параметров. Для анализа возникающих в этом случае полей, одномерное волновое уравнение, аналогичное (1), было получено для колебательной скорости v . При граничном условии $v^{(1)}(x=0, t) = v_0 \cos(\omega t - k_0 x)|_{x=0}$ ($k_0 = \omega/c_0$ – волновое число на частоте ω для среды, однородной по скорости звука c_0 и плотности ρ_0 ; $v_0 = p_0/(\rho_0 c_0)$, p_0 – амплитуда звукового давления), оно приводит к выражению для третьей гармоники колебательной скорости:

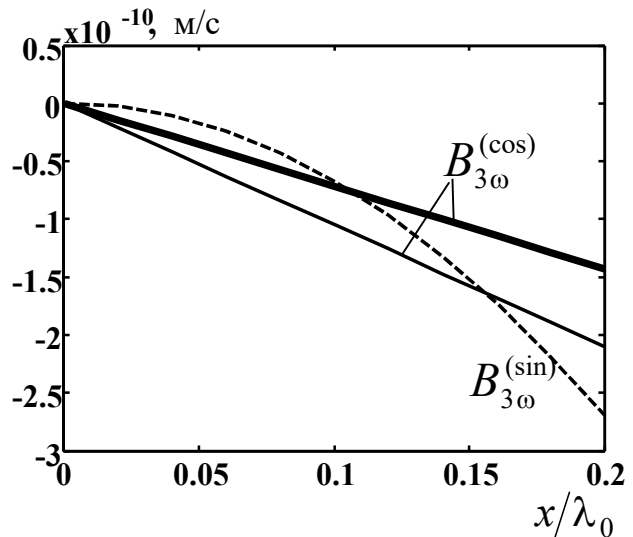
$$v^{(III)}(x, t) = B_{3\omega}^{(\cos)} + B_{3\omega}^{(\sin)} \equiv -D_1(x) \cos(3\omega t - 3k_0 x) + D_2(x) \sin(3\omega t - 3k_0 x), \quad (2)$$

$$\text{где } D_1(x) = \frac{\pi p_0^3}{4\rho_0^3 c_0^5} \{4(\varepsilon_2)^2 - 5\varepsilon_2 - 3\varepsilon_3 + 3\} \frac{x}{\lambda_0}, \quad D_2(x) = -\frac{3(\varepsilon_2)^2 \pi^2 p_0^3}{2\rho_0^3 c_0^5} \left(\frac{x}{\lambda_0}\right)^2; \quad \lambda_0 = \frac{c_0}{f},$$

f – линейная частота. Выделяются два слагаемых, одно из которых зависит от пройденного волной в среде расстояния x линейно, а второе – квадратично, причем слагаемые отличаются друг от друга по фазе.

Рис. 1. Поведение коэффициентов генерации косинусной ($B_{3\omega}^{(\cos)}$) и синусной ($B_{3\omega}^{(\sin)}$) составляющих третьей гармоники колебательной скорости при малых волновых расстояниях. Коэффициент $B_{3\omega}^{(\cos)}$ в отсутствие физической нелинейности третьего порядка $\varepsilon_3 = 0$ (сплошная тонкая линия) и в присутствии этой нелинейности $\varepsilon_3 = 5$ (сплошная толстая линия); коэффициент $B_{3\omega}^{(\sin)}$ в обоих случаях совпадает (пунктир). Параметры моделирования: $f = 1$ МГц,

$$p_0 = 6 \times 10^4 \text{ Па}, \quad \rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3, \\ c_0 = 1500 \text{ м/с}, \quad \varepsilon_2 = 4.$$



Для независимой проверки достоверности полученного в диссертационной работе выражения (2) оно было сопоставлено с известными решениями. Одно из них – решение уравнения Римановых волн $\partial v / \partial t + (v + c_{\text{nonl}}) \partial v / \partial x = 0$. Для описания эффектов третьего порядка малости необходимо было учесть в выражении для скорости звука c_{nonl} поправки, не только линейные по колебательной скорости $\sim v$, но и квадратичные $\sim v^2$: $c_{\text{nonl}} = c_0 + (\varepsilon_2 - 1)v + [-(\varepsilon_2 - 1)(2\varepsilon_2 - 3) + 3\varepsilon_3]v^2 / (2c_0)$. Сравнение соотношения (2), полученного из волнового уравнения, и соотношения третьего порядка малости, получаемого из решения уравнения Римановых волн $v(x, t) = -v_0 \sin[\omega(t - x/(c_{\text{nonl}} + v))]$, показывает полное их совпадение. Кроме того, моделирование решения (рис. 1) показывает, что линейная по расстоянию $B_{3\omega}^{(\cos)}$ составляющая третьей гармоники возникает даже в отсутствие физической нелинейности третьего порядка (т.е. при $\varepsilon_3 = 0$), что доказывает зависимость линейной составляющей не только от ε_3 , но и от ε_2 . Однако можно видеть, что полезный (содержащий информацию о ε_3) линейно нарастающий с расстоянием вклад $B_{3\omega}^{(\cos)}$ в третью гармонику подавляется мешающим квадратичным вкладом $B_{3\omega}^{(\sin)}$ уже на очень малых волновых расстояниях $\sim 0.1\lambda_0$. За счет этого томографические схемы, основанные на коллинеарном взаимодействии, не представляются перспективными для восстановления пространственного распределения акустического нелинейного параметра третьего порядка ε_3 . В схемах же, основанных на *неколлинеарном* взаимодействии, данная сложность может быть преодолена путем кодирования зондирующих сигналов.

В **третьей главе** обсуждаются проблемы томографии акустических нелинейных параметров с помощью двух кодированных и одной монохроматической зондирующих волн, являющихся неколлинеарными. Предварительно анализируется роль возмущений энтропии в задачах нелинейной акустической томографии третьего порядка. Результаты нелинейных взаимодействий третьего порядка, рассматриваемые в задачах нелинейной акустической томографии, являются малыми по амплитуде, так что заранее было неизвестно, влияют ли слабые изменения энтропии на поля давления третьего порядка, измеряемые в томографическом эксперименте.

Влияние энтропии на амплитуду акустического давления третьего порядка оценивалось из уравнения состояния, с учетом слагаемых, пропорциональных возмущениям плотности ρ' и

энтропии s' :

$$P(\rho, s) = P_0 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{s, \rho=\rho_0} \times \rho' + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right)_{s, \rho=\rho_0} \times (\rho')^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 P}{\partial \rho^3} \right)_{s, \rho=\rho_0} \times (\rho')^3 +$$

$$+ \left(\frac{\partial P}{\partial s} \right)_{s, \rho=\rho_0} \times s' + \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho \partial s} \right)_{\rho=\rho_0, s=s_0} \times \rho' s' + \dots$$

На основе метода последовательных приближений были получены и сравнены между собой мажорантные оценки

амплитуд давления третьего порядка, обусловленные только возмущениями плотности, или учитывающие влияние энтропии. Оценки проводились на основе параметров, характерных для мягких биологических тканей, и параметров разрабатываемой томографической системы. Учет всевозможных факторов, определяющих изменение энтропии, показал, что влиянием энтропии на эффекты третьего порядка в задачах нелинейной акустической томографии третьего порядка можно пренебречь при диагностике мягких биологических тканей. Данный результат позволяет проводить изоэнтропийное математическое описание нелинейных эффектов третьего порядка малости в упомянутых задачах.

При использовании в двумерной томографической системе неколлинеарных волн исследуемый объект (орган пациента) помещается в центре области томографирования, а излучающие и приемные преобразователи располагаются вокруг этой области. Эти преобразователи могут быть как плоскими, так и цилиндрическими, причем в последнем случае – в сочетании с системой акустических конических зеркал, преобразующей цилиндрические волны в плоские. За счет кодирования сигналов, зондирующих объект, томографическая система нуждается лишь в малом количестве преобразователей: три преобразователя одновременно излучают зондирующие сигналы, а еще один преобразователь принимает комбинационный сигнал, который порождается внутри объекта в результате нелинейного взаимодействия волн. Эти аспекты подробно рассматривались ранее в диссертационной работе А.А. Шмелева.

В случае двух кодированных и одной монохроматической неколлинеарных зондирующих плоских волн каждую точку в области пересечения первичных волн можно описать двумя параметрами: порождаемым в ней кодом волны на рабочих комбинационных частотах (например, $\Omega_{+-} = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$) и временем задержки прихода этой волны на приемник. На этом факте основана процедура обработки принимаемого сигнала. Для получения оценки $\hat{\epsilon}'_3$ комбинированного акустического нелинейного параметра $\epsilon'_3 = 2(\epsilon_2 - 1)^2 - \epsilon_3$ в элементе разрешения с центром в точке $\mathbf{r}$, сигнал $p(\mathbf{y}, t)$, регистрируемый на приемнике с центром в точке $\mathbf{y}$, подвергается корреляционной обработке с помощью сигнала сравнения $p_{+-\delta}(\mathbf{y}, t)$:

$$\hat{\epsilon}'_3(\mathbf{r}) = \frac{\int p_{+-\delta}^*(\mathbf{y} | \mathbf{r}; t) p(\mathbf{y}, t) dt}{\int p_{+-\delta}^*(\mathbf{y} | \mathbf{r}; t) p_{+-\delta}(\mathbf{y} | \mathbf{r}; t) dt}. \quad (3)$$

Сигнал сравнения заранее предвычисляется аналитически для каждого элемента разрешения в томографируемой области. Он обусловлен нелинейным рассеянием трех заданных волн на одиночной пробной точечной неоднородности вида $(\epsilon'_3)_\delta(\mathbf{r}') \sim \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r})$. Нормировочный множитель, который должен присутствовать при задании пробной неоднородности для получения адекватных количественных значений $\hat{\epsilon}'_3(\mathbf{r})$, сейчас не приводится. Вычисление

сигнала сравнения представляет собой решение прямой задачи рассеяния для волнового уравнения (1), при учете только физической (зависящей от ε'_3) части нелинейных вторичных источников чисто третьего порядка $Q_{\text{phys}}^{(3)}$:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2(\mathbf{r})} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = Q_{\text{phys}}^{(3)} \equiv \frac{\varepsilon'_3(\mathbf{r})}{\rho_0^2 c^6(\mathbf{r})} \frac{\partial^2 p^3}{\partial t^2}. \quad (4)$$

В диссертационной работе показано, что в процессе томографирования с помощью двух кодированных и одной монохроматической зондирующих волн возникает принципиальная трудность: мешающий сигнал $p^{(2 \times 2)}$, порожденный нелокальным взаимодействием не в одной и той же точке $\mathbf{r}$, а в разных точках области томографирования, может иметь такой же код и такой же момент времени прихода на приемник, что и информативный сигнал $p^{(3)}$, порожденный локальным взаимодействием в одной и той же точке $\mathbf{r}$. За счет этого, при настройке сигнала сравнения на точку $\mathbf{r}$, корреляционная оценка $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ (3) нелинейного параметра будет искажена. Причину данной проблемы, выявленной в диссертационной работе, можно кратко пояснить следующим образом. Пусть комбинационный сигнал от взаимодействия чисто третьего порядка $p^{(3)}$ порождается в фиксированном элементе разрешения с центром в точке $\mathbf{r}_0$ (рис. 2). Этот сигнал имеет определенный код, определяемый линией одинакового кода AB (биссектрисой между направлениями излучения зондирующих кодированных плоских волн с волновыми векторами $\mathbf{k}_1$ и $\mathbf{k}_2$), на которой происходит взаимодействие кодированных зондирующих волн, и определенную задержку времени прихода на плоский приемник (направление на приемник совпадает с волновым вектором $\mathbf{k}_{+-}$ принимаемого комбинационного сигнала). С другой стороны, пусть при формировании сигнала $p^{(2 \times 2)}$ в первом акте второго порядка участвуют две зондирующие волны, являющиеся кодированными. Тогда тот же самый код порождается в любой точке, принадлежащей той же линии одинакового кода AB , например в точке $\mathbf{r}'_*$. Это происходит за счет равенства взаимных задержек времен распространения плоских волн от их излучателей до точек на AB . Порожденная в результате первого акта второго порядка волна распространяется из точки взаимодействия $\mathbf{r}'_*$ до параболы (совокупности точек $\mathbf{r}''$), фокусом которой является точка первого акта взаимодействия $\mathbf{r}'_*$. Поскольку парабола является геометрическим местом точек, равноудаленных от точки фокуса и плоскости приемника, то это обеспечивает для мешающего сигнала $p^{(2 \times 2)}$ то же время прихода на приемник, что и для информативного сигнала $p^{(3)}$. Таким образом, требуется оценить и сравнить амплитуды полей (одинаковых с точки зрения корреляционной обработки) $p^{(3)}$ и $p^{(2 \times 2)}$ на приемнике, порожденных в найденных областях, чтобы понять, возможно ли, в

принципе, томографирование в схеме с двумя кодированными и одной монохроматической зондирующими волнами.

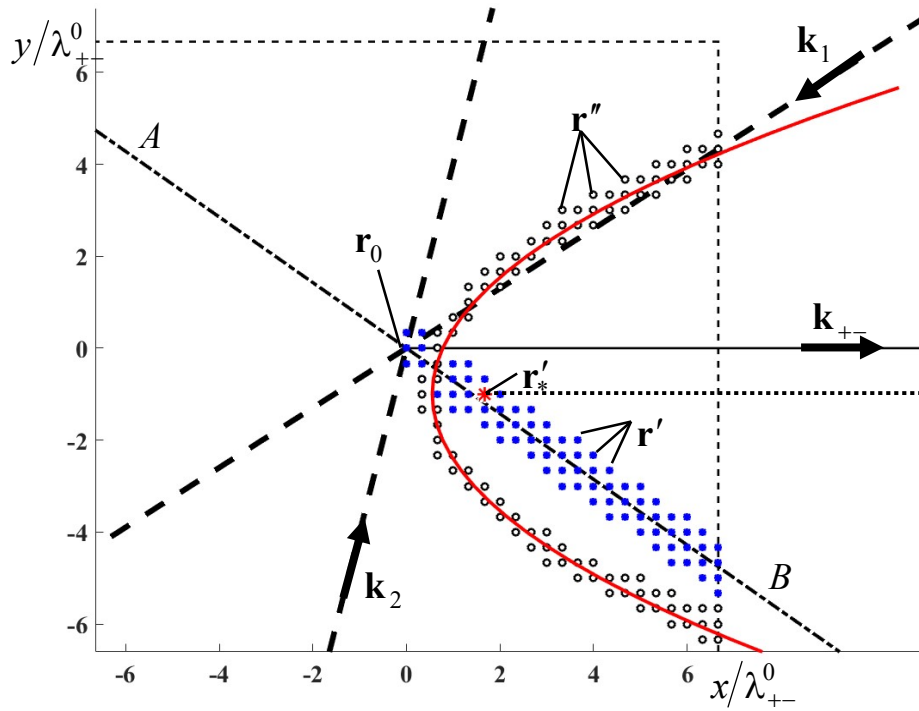
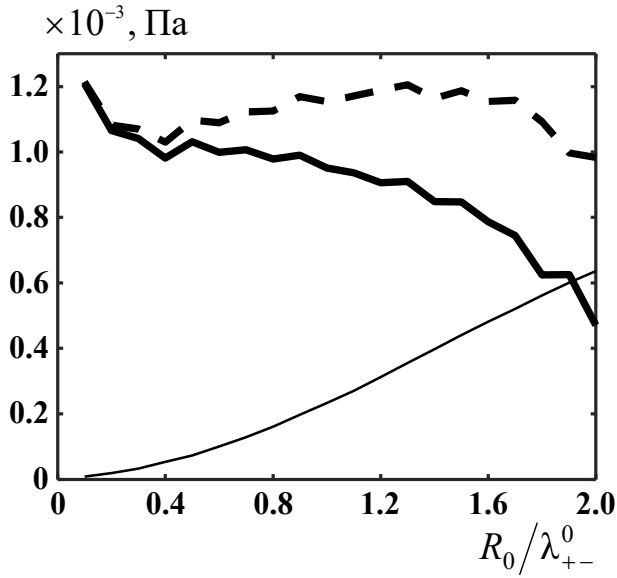
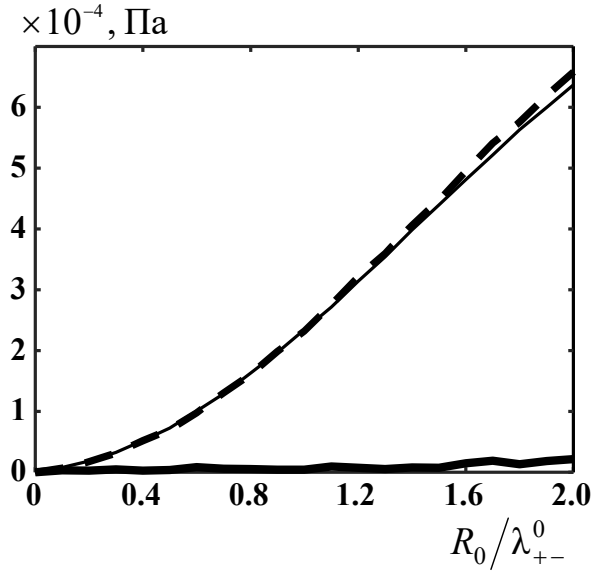


Рис. 2. Случай участия в первом акте второго порядка двух кодированных зондирующих волн: совокупность всех точек взаимодействия во втором акте $\mathbf{r}''$ (черный символ о) с наложенной на них теоретической параболой (красная линия), соответствующих фиксированной точке взаимодействия в первом акте $\mathbf{r}'_*$ (красный символ *), а также совокупность всех точек взаимодействия в первом акте $\mathbf{r}'$ (синий символ •).

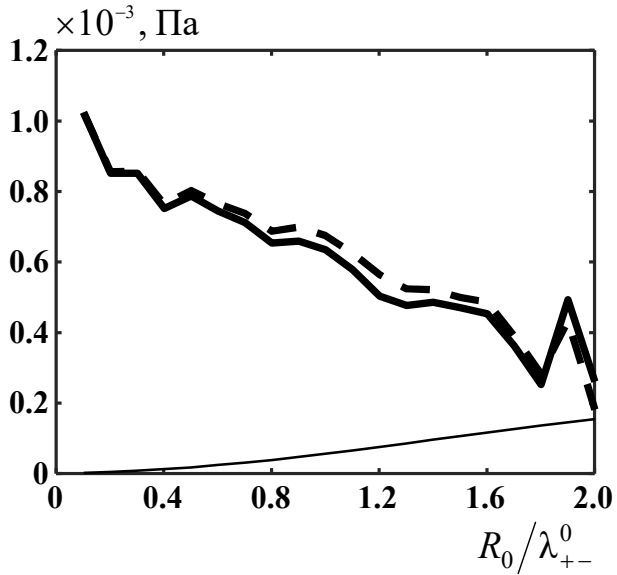
При численном моделировании нелинейного взаимодействия в данных областях использовалось волновое уравнение с точностью до третьего порядка малости (1) при $c \equiv c_0$. В качестве значения нелинейного параметра третьего порядка бралась оценка $\varepsilon_3 \approx (\varepsilon_2 - 1)^2$. Излучатели, работающие на центральных частотах 1.6 МГц (для двух излучателей) и 2.2 МГц (для третьего излучателя), располагались под углами 33° , -104° , -19° по отношению к приемнику, работающему на центральной частоте 1 МГц. Моделирование проводилось для воды и модельной мягкой биологической ткани, отличающейся от воды только повышенным значением нелинейных параметров ε_2 и ε_3 . В обоих случаях (рис. 3а, в) уровень мешающего сигнала $p^{(2 \times 2)}$ от совокупности элементов разрешения может быть соизмерим с уровнем информативного комбинационного сигнала s , несущего информацию о единственном элементе разрешения. Следовательно, сигнал $p^{(2 \times 2)}$ будет давать ложный вклад в каждый элемент разрешения на томограмме $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ комбинированного акустического нелинейного параметра третьего порядка, тем самым искажая его оценку.



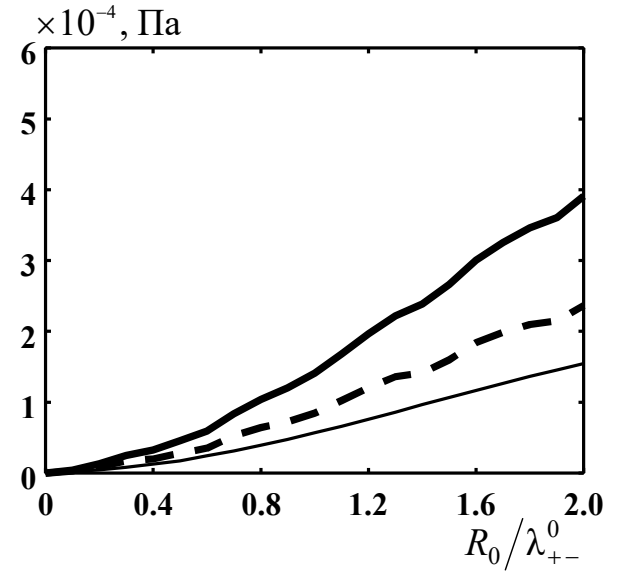
a



б



в



г

Рис. 3. Амплитуды регистрируемых полей давления, которые порождаются различными группами нелинейных вторичных источников в воде с $\varepsilon_2 = 3.5$, $\varepsilon_3 = 6.25$ (*a*, *б*) и модельной биологической среде с $\varepsilon_2 = 6$ и $\varepsilon_3 = 25$ (*в*, *г*), в зависимости от волнового радиуса элемента разрешения R_0/λ_{+-}^0 (λ_{+-}^0 – длина волны на центральной частоте принимаемого комбинационного сигнала):

поле от источников чисто третьего порядка $p_{+-}^{(3)}$ (тонкая сплошная линия —);
 поле от двукратного взаимодействия второго порядка $p_{+-}^{(2 \times 2)}$ (толстый пунктир — — —);
 итоговое поле $p_{+-}^{(III)} \equiv p_{+-}^{(3)} + p_{+-}^{(2 \times 2)}$ (толстая сплошная линия —) в случае двух кодированных и одной монохроматической зондирующих волн при линейном размере области томографирования $L = 70\lambda_{+-}^0$ (*a*, *в*), а также в случае трех кодированных зондирующих волн (*б*, *г*).

С целью подавления нелокального влияния мешающего сигнала предложено использовать кодирование всех трех плоских волн, зондирующих объект. Код комбинационного сигнала, порожденного в определенной точке, теперь будет зависеть от кодов всех трех зондирующих волн в данной точке в момент взаимодействия. Такой код будет индивидуальным для каждого элемента разрешения. Это обусловлено тем, что введение третьей кодированной зондирующей волны обеспечивает различную разность задержек времен распространения от каждой пары излучателей до каждой точки в области томографирования. При этом мешающий сигнал $p^{(2 \times 2)}$ с тем же кодом, как у сигнала $p^{(3)}$, будет формироваться за счет нелинейного взаимодействия, которое происходит только в пределах данного элемента разрешения (как и при формировании сигнала $p^{(3)}$), т.е. двукратное взаимодействие второго порядка становится, фактически, квазилокальным.

Сравнение уровней сигналов на приемнике в случае трех кодированных зондирующих волн проводилось для прежних сред – воды и модельной мягкой биологической ткани. Интересно, что при вышеупомянутых позициях преобразователей и рабочих частотах в случае воды (рис. 3б) поля $p_{+-}^{(3)}$ и $p_{+-}^{(2 \times 2)}$ компенсируют друг друга, и итоговое поле $p_{+-}^{(III)} = p_{+-}^{(3)} + p_{+-}^{(2 \times 2)}$ становится очень малым. Данный факт может быть удобен в эксперименте, так как вода часто играет роль иммерсионной жидкости. В случае модельной биологической ткани (рис. 3г) амплитуда сигнала чисто третьего порядка может оставаться соизмеримой с амплитудой сигнала за счет двукратного взаимодействия второго порядка. Однако за счет того, что в случае трех кодированных зондирующих волн двукратное взаимодействие второго порядка становится квазилокальным, т.е. несущим томографическую информацию об одном фиксированном элементе разрешения, появляется возможность восстановления томограмм акустических нелинейных параметров без ложного влияния соседних элементов разрешения.

Четвертая глава посвящена численному моделированию процесса томографирования на основе зондирования исследуемого объекта тремя неколлинеарными кодированными плоскими волнами. Излучение тремя преобразователями, расположенными под прежними углами 33° , -104° , -19° по отношению к приемнику, в этом случае ведется на соответствующих частотах $f_1, f_2 \in [1.55; 1.8]$ МГц, $f_3 \in [2.075; 2.325]$ МГц, прием – на частоте $f_{+-} \in [0.9; 1.4]$ МГц. Для данной томографической схемы был численно промоделирован процесс восстановления комбинированного акустического нелинейного параметра $\epsilon'_3 = 2(\epsilon_2 - 1)^2 - \epsilon_3$ для различных нелинейных рассеивателей при учете в волновом уравнении только физической части нелинейных вторичных источников чисто третьего порядка $Q_{\text{phys}}^{(3)}$, зависящей от ϵ'_3 , – см. уравнение (4). Результат восстановления (оценка) точечного

нелинейного рассеивателя $\varepsilon'_3 = \delta(\mathbf{r})$ алгоритмом (3) представлен на рис. 4а. Эта оценка характеризует разрешающую способность томографической системы. Применение к данной оценке $\hat{\varepsilon}'_3$ двумерного преобразования Фурье по пространственным координатам дает пространственный спектр оценки $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{K}) \equiv \int \hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r}) \exp(-i\mathbf{K}\mathbf{r}) d\mathbf{r}$ (рис. 4б).

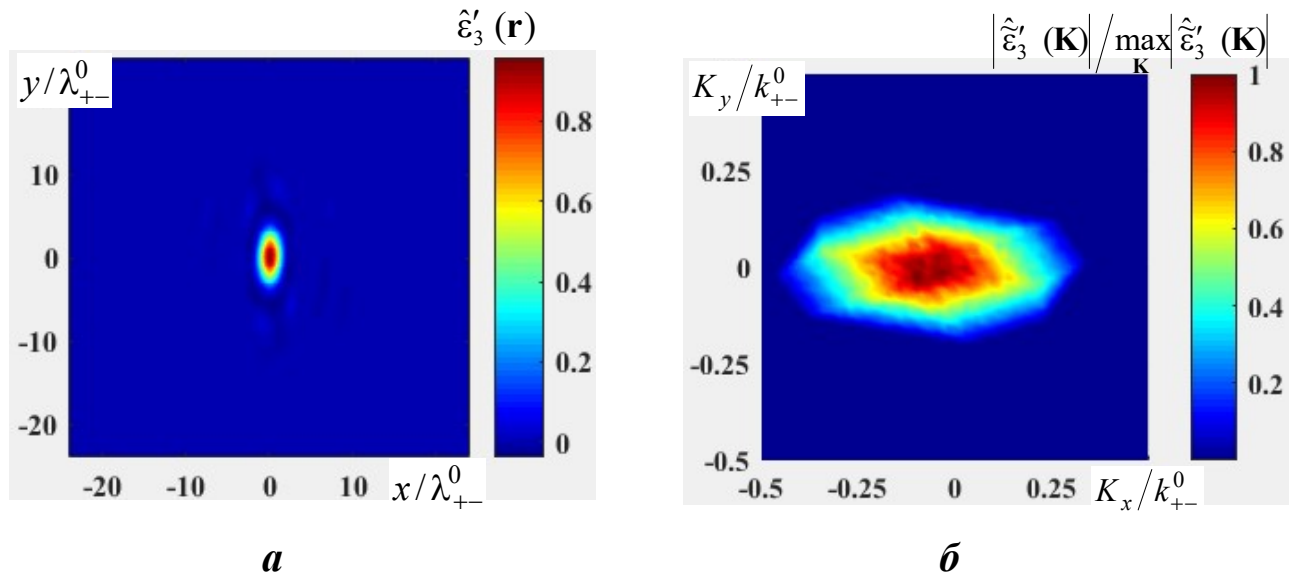


Рис. 4. Случай трех кодированных зондирующих волн. Оценка одиночного точечного нелинейного рассеивателя третьего порядка (а) и пространственный спектр этой оценки (б).

Пространственный спектр оценки δ -образного рассеивателя показывает, какие векторы пространственной частоты $\mathbf{K}$ способны восстанавливаться в данной томографической схеме. Восстановление области пространственных частот в окрестности нулевой частоты $\mathbf{K} = 0$ обеспечивает восстановление количественных значений нелинейного параметра. Если система не позволяет восстановить окрестность $\mathbf{K} = 0$, то восстановление количественных значений нелинейного параметра невозможно, однако можно диагностировать присутствие локальных неоднородностей в пространственном распределении этого параметра. Это было главным недостатком первоначальной неколлинеарной схемы томографии, основанной на регистрации комбинационных сигналов второго порядка и исследованной в диссертационной работе С.Н. Евтухова.

Для дальнейшей иллюстрации качества восстановления был задан более сложный рассеиватель в виде однородных по нелинейному параметру букв «ACOUST» на нулевом фоне. Исходная модель и результат восстановления показаны на рис. 5а, б, соответственно. Видно, что вертикальные участки букв восстановились значительно лучше, чем горизонтальные участки, амплитуда которых меньше, и они сливаются друг с другом (рис. 5б). Это связано с отличием разрешающей способности томографической системы в разных направлениях (рис. 4а). Область восстанавливаемых в данной томографической

схеме векторов пространственной частоты в вертикальном направлении является более узкой, чем в горизонтальном (рис. 4б). Как следствие, в пространственном спектре модели $\tilde{\varepsilon}'_3(\mathbf{K})$ будут восстанавливаться не все векторы пространственной частоты $\mathbf{K}$, имеющие вертикальное направление или близкое к нему; это ухудшает разрешающую способность томограммы $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ в вертикальном направлении.

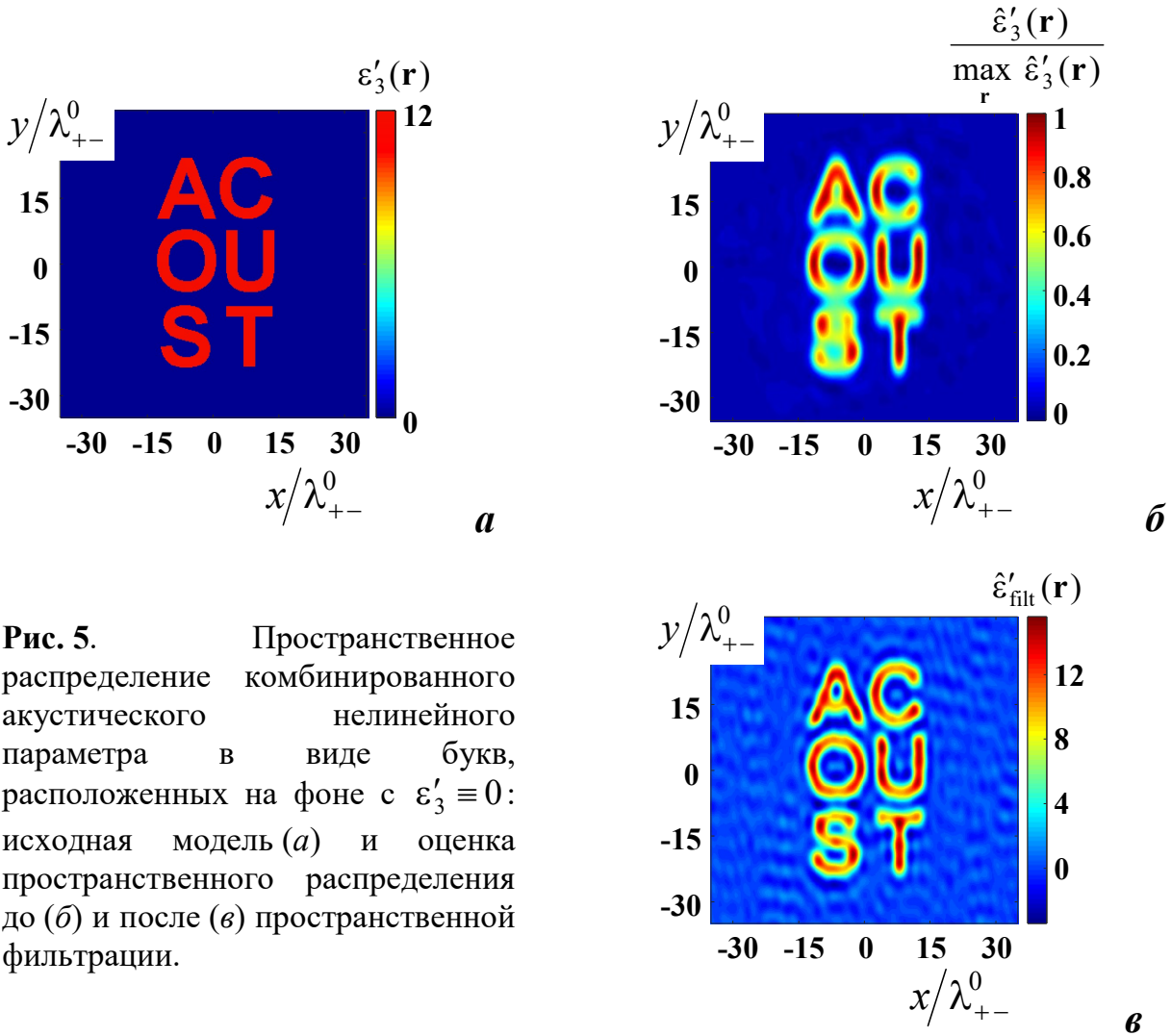


Рис. 5. Пространственное распределение комбинированного акустического нелинейного параметра в виде букв, расположенных на фоне с $\varepsilon'_3 \equiv 0$: исходная модель (*a*) и оценка пространственного распределения до (*б*) и после (*в*) пространственной фильтрации.

Другая проблема связана с тем, что в рассматриваемом случае кодирования всех трех зондирующих волн плотность распределения векторов пространственной частоты $\mathbf{K}$, доступных при восстановлении, оказывается неодинаковой (рис. 4б). За счет этого в оценку количественных значений $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ привносится погрешность, которая носит флуктуирующий характер и зависит от точки изображения $\mathbf{r}$. Тем не менее, данное обстоятельство может быть учтено, и полученная оценка $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ может быть скорректирована. Для этого пространственный спектр $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{K})$ этой оценки нормируется на пространственный спектр результата восстановления δ -образного рассеивателя в области векторов $\mathbf{K}$, доступных при восстановлении (рис. 4б). Тогда

скорректированная оценка $\hat{\varepsilon}'_{\text{filt}}(\mathbf{r})$, получающаяся после обратного пространственного преобразования Фурье (рис. 5в), становится заметно лучше изначальной оценки $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ (рис. 5б): увеличивается четкость получаемого изображения и, в то же время, значения букв в оценке $\hat{\varepsilon}'_{\text{filt}}(\mathbf{r})$ колеблются около истинного значения 12, заданного в исходной модели (рис. 5а). Тем самым, в оценке $\hat{\varepsilon}'_{\text{filt}}(\mathbf{r})$ воспроизводятся адекватные значения комбинированного акустического нелинейного параметра, хотя при восстановлении $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ с помощью (3), нормировочный множитель, участвующий в формировании сигнала сравнения, не учитывался, и, как следствие, абсолютные значения $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ не соответствовали действительности. По этой причине на рис. 5б приведена оценка $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$, нормированная на свое максимальное значение, а на рис. 5в – оценка $\hat{\varepsilon}'_{\text{filt}}(\mathbf{r})$ уже в абсолютной шкале.

В рассмотренных выше модельных экспериментах восстанавливаются значения комбинированного акустического нелинейного параметра $\varepsilon'_3 = 2(\varepsilon_2 - 1)^2 - \varepsilon_3$. На практике же, конечной целью является раздельное восстановление нелинейных параметров второго ε_2 и третьего ε_3 порядков. Однако в результате всего одного эксперимента (когда одновременно излучаются три зондирующих сигнала, и принимается один нелинейно рассеянный сигнал) это не представляется возможным, поскольку процедура разделения представляет собой недоопределенную задачу. Следовательно, необходимо проведение дополнительных экспериментов.

Обычно возможность получить дополнительные эксперименты достигается путем увеличения числа преобразователей или вращением томографической системы относительно исследуемого объекта. Однако возможен другой путь проведения дополнительных экспериментов без излишнего увеличения числа используемых преобразователей. Данный путь осуществим за счет выполнения своеобразной формы принципа взаимности для процессов нелинейного рассеяния. На практике это заключается в перемене ролей преобразователей, служащих излучателями или приемниками (то есть приемники становятся излучателями и наоборот). При проведении томографического эксперимента (рис. 6а) объект облучается одновременно тремя неколлинеарными зондирующими волнами с частотами ω_j ($j=1,2,3$) и соответствующими волновыми векторами $\mathbf{k}_j$ с излучателей S_j . Нелинейно рассеянный сигнал с волновым вектором $\mathbf{k}_{+-}$ на комбинационной частоте третьего порядка Ω_{+-} регистрируется приемником R . В исходной томографической схеме при выполнении условий синхронизма $\mathbf{K}_{+-} = \mathbf{k}_{+-} - \{\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3\}$, $\Omega_{+-} = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ восстанавливается область пространственных частот, которая описывается векторами $\mathbf{K}_{+-}$ при варьировании излучаемых частот ω_j в пределах их частотных полос.

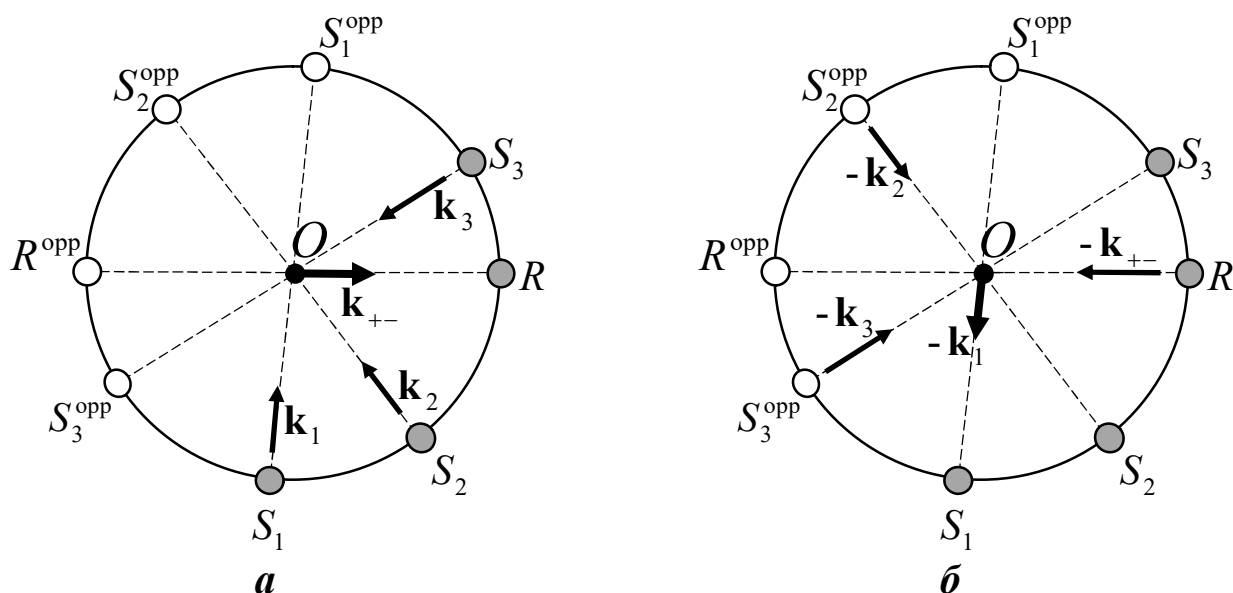


Рис. 6. Исходная схема томографирования (а) и одна из схем, взаимных к исходной (б).

Существуют также другие томографические схемы, в которых область восстанавливаемых векторов $\mathbf{K}_{+-}$ оказывается такой же, как в исходной схеме. Для реализации данных схем необходимы четыре дополнительных преобразователя $S_1^{\text{opp}}, S_2^{\text{opp}}, S_3^{\text{opp}}, R^{\text{opp}}$, расположенных центрально симметрично (относительно начала координат O) к соответствующим преобразователям S_1, S_2, S_3, R исходной схемы (рис. 6б). Так, при преобразовании выражений для условий синхронизма частот и векторов пространственной частоты, ту же область векторов $\mathbf{K}_{+-}$ можно получить, ведя прием в направлении $-\mathbf{k}_1$ на частотах ω_1 первого исходного преобразователя (рис. 6б): $\mathbf{K}_{+-} = (-\mathbf{k}_1) - \{(-\mathbf{k}_{+-}) + (-\mathbf{k}_3) - (-\mathbf{k}_2)\}$; $\omega_1 = \Omega_{+-} + \omega_3 - \omega_2$. Тем самым, в первой «взаимной» схеме излучатель S_1 становится приемником, а приемник R из исходной схемы становится излучателем на частотах Ω_{+-} . Видно, что в этом случае используются два преобразователя из исходной схемы (S_1 и R), и два центрально-симметричных преобразователя (S_2^{opp} и S_3^{opp}). Таким же образом прием можно вести и на частотах ω_2 или ω_3 второго или третьего исходных преобразователей. Тем самым, доступны три томографические схемы, «взаимные» к исходной. К тому же, если в исходной схеме в равной мере представлены как значения $\mathbf{K}_{+-}$, так и $-\mathbf{K}_{+-}$, то область доступных значений векторов пространственной частоты будет одинаковой в «зеркальной» (использующей только преобразователи $S_j^{\text{opp}}, R^{\text{opp}}$) и исходной схемах. Таким образом, всего получается восемь схем: исходная, три «взаимных» и соответствующие четыре «зеркальные» схемы.

Регистрируемые сигналы третьего порядка значительно слабее, чем сигналы второго порядка и, тем более, чем зондирующие сигналы. Следовательно, рабочая частотная полоса приемника не должна пересекаться с частотными полосами излучателей и сигналов второго порядка. По этой причине, схема томографии, использованная при численном моделировании (рис. 4, 5), не допускает проведения дополнительных «взаимных» экспериментов, так как в ней излучатели не могут стать приемниками. Тем самым, необходимо найти параметры новой исходной схемы, в которой проведение дополнительных «взаимных» экспериментов возможно.

Искомая схема должна удовлетворять нескольким ограничениям. Основное – восстановление нулевой компоненты $K=0$ пространственного спектра нелинейного параметра рассеивателя. Только в этом случае возможно восстановление количественных значений нелинейных параметров. К тому же, рабочие частоты преобразователей не должны быть слишком высокими, так как с ростом частоты увеличивается поглощение и, следовательно, еще больше ослабляется принимаемый сигнал. В то же время, частоты не должны быть слишком низкими, так как это снизит разрешающую способность системы. Поскольку при «взаимных» экспериментах в качестве приемников выступают исходные излучатели, то еще одно ограничение накладывается на взаимное угловое расстояние β_{ij} между любыми парами (i, j) используемых преобразователей: $20^\circ \leq \beta_{ij} \leq 160^\circ$. Это ограничение связано с тем, что при малых или, наоборот, близких к 180° значениях углов между излучателем и приемником, излучаемые сигналы (от боковых лепестков диаграммы направленности в случае малых углов) могут беспрепятственно попадать на приемник. Помимо этого, как уже упоминалось, частотная полоса преобразователя, выступающего в роли приемника, должна быть свободна от пересечений с полосами любых излучаемых сигналов, их вторых гармоник и комбинационных сигналов второго порядка. Для возможности проведения дополнительных экспериментов за счет принципа взаимности, при которых излучатели из исходной схемы становятся приемниками, необходимо, чтобы требованию «чистоты» полосы удовлетворяли также и полосы этих излучателей, когда данный излучатель выполняет роль приемника во «взаимной» схеме.

В результате проведенного поиска были выбраны две томографические схемы (одной из них соответствует рис. 7), предоставляющие возможность проведения вплоть до шести экспериментов на основании принципа взаимности. Попытки найти схемы с максимальным возможным количеством проводимых экспериментов, т.е. восемь, приводят к резкому повышению всех частот (вследствие необходимости обеспечения «чистоты» полосы каждого преобразователя), что влечет за собой резкое повышение поглощения. Из рис. 7 видно, что частотные полосы принимаемых, излучаемых и мешающих сигналов расположены на частотной оси достаточно плотно – минимальный зазор между ними составляет около 100 кГц. Следовательно, спектры излучаемых сигналов обязаны быть, по возможности, четко локализованными в соответствующей

частотной полосе. Исходя из этого, встает вопрос о выборе способа кодирования излучаемых сигналов.

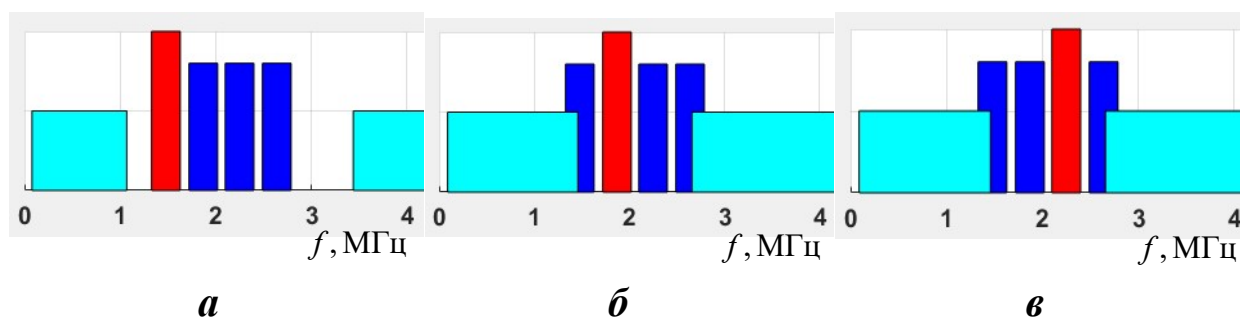


Рис. 7. Области частотного спектра для найденной томографической схемы, занимаемые приемом (красный столбик) и излучением (синие столбики) в исходной (а), первой (б) и второй (в) взаимных схемах. Голубым цветом показаны области спектра, занимаемые мешающими комбинационными сигналами второго порядка и вторыми гармониками исходных сигналов.

Были рассмотрены три способа кодирования. Первый – использование фазоманипулированных сигналов. Поскольку частотный спектр такого сигнала имеет *sinc*-образную огибающую, то его необходимо дополнительно фильтровать перед излучением сигнала. Это приводит к обрезанию периферийной части спектра и, следовательно, к потере кодовой информации. Кроме того, обеспечение обрезания периферии спектра с высокой степенью точности предъявляет повышенные требования к практической реализации процедуры фильтрации. Тем самым, более целесообразно использовать тот способ кодирования исходного сигнала, который изначально дает хорошо локализованный спектр. В настоящей работе рассматривались два таких способа: формирование исходного сигнала в виде суммы модулированных по фазе сигналов с *sinc*-образными огибающими и в виде случайного шума, спектр которого фильтруется в заданной полосе. Для каждого способа кодировки зондирующих сигналов восстанавливались пространственные распределения $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$ для тестовых нелинейных объектов. Оказалось, что качество восстановления при различных способах кодировки не имеет существенных отличий. Следовательно, целесообразность выбора того или иного способа кодировки определяется, в первую очередь, имеющимися техническими возможностями излучения и приема сигналов в заданных частотных полосах с заданной точностью.

Заключительный параграф диссертационной работы посвящен численному моделированию общего решения прямой задачи рассеяния трёх зондирующих волн с произвольной временной зависимостью. При численном моделировании, результаты которого обсуждались выше (см. рис. 4, 5), использовалась только физическая $Q_{\text{phys}}^{(3)}$ часть нелинейных вторичных источников чисто третьего порядка. Этого было достаточно для иллюстрации принципиальной возможности нелинейного томографирования на основе трех кодированных зондирующих волн. На этапе же моделирования более общего

решения принимались во внимание все типы нелинейных вторичных источников третьего порядка $Q^{(III)}$ в волновом уравнении (1). Поля в области томографирования $\mathcal{R}$ и, в итоге, на приемнике y формировались с помощью свертки функции Грина $g_0(\mathbf{r}, t)$ с соответствующими вторичными источниками

$$Q(\mathbf{r}, t): p(\mathbf{y}, t) = \int_{-\infty}^t dt' \int_{\mathcal{R}} d\mathbf{r}' g_0(\mathbf{y} - \mathbf{r}', t - t') Q(\mathbf{r}', t').$$

Промоделированное волновое решение прямой задачи может использоваться для более точного формирования сигнала сравнения p_δ томографической системы, участвующего в корреляционной обработке (3) регистрируемого сигнала $p(\mathbf{y}, t)$ с целью получения оценки комбинированного нелинейного параметра третьего порядка $\hat{\varepsilon}'_3(\mathbf{r})$. Кроме того, в дальнейшем, решение прямой задачи для разных типов нелинейных вторичных источников будет необходимо для обеспечения процедуры раздельного восстановления акустических нелинейных параметров второго и третьего порядков, что является предметом отдельного исследования.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование механизмов нелинейного взаимодействия третьего порядка при коллинеарном распространении волн. Показано, что квадратично нарастающий с расстоянием вклад в третью гармонику (или волну комбинационной частоты третьего порядка, в общем случае) за счет двукратного взаимодействия второго порядка становится соизмеримым с линейно нарастающим вкладом уже на очень малых волновых расстояниях. Сделан вывод, что томографические схемы, основанные на коллинеарном взаимодействии, не представляются перспективными для восстановления пространственного распределения акустического нелинейного параметра третьего порядка. В схемах же, основанных на неколлинеарном взаимодействии, данная сложность может быть преодолена путем кодирования зондирующих сигналов.
2. Рассмотрено влияние возмущений энтропии на акустическое давление, возникающее за счет нелинейного взаимодействия в случае трех волн, зондирующих исследуемый объект. Оценен вклад в возмущение энтропии за счет наличия вязкости и теплопроводности, а также за счет нелинейности рассматриваемой среды. Показано, что при учете всевозможных факторов, ответственных за изменение энтропии, вклад в акустическое давление третьего порядка, обусловленный возмущениями плотности в зондирующих волнах, значительно превосходит вклад, вызванный возмущениями энтропии. Тем самым, сделан вывод о правомерности изоэнтропийного математического описания нелинейных волновых эффектов третьего порядка в задачах нелинейной акустической томографии мягких биологических тканей.

3. Для томографических схем, использующих в качестве зондирующих две кодированные волны и одну монохроматическую волну, исследованы два механизма формирования нелинейно рассеянного сигнала на комбинационных частотах третьего порядка – нелокальное двукратное взаимодействие второго порядка и локальное взаимодействие чисто третьего порядка. Найдены пространственные области формирования вторичных источников этого комбинационного сигнала для каждого механизма. Показано, что область, в которой формируется элементарный комбинационный сигнал с определенным кодом на основе двукратного взаимодействия второго порядка, не локализована в пределах одного элемента разрешения, но распределена по всей области томографирования. Это свидетельствует о мешающем характере сигнала от двукратного взаимодействия на этапе получения томограммы акустического нелинейного параметра.
4. Численным моделированием проиллюстрировано, что уровень мешающего сигнала от двукратного взаимодействия второго порядка может быть соизмерим с уровнем информативного комбинационного сигнала чисто третьего порядка, несущего информацию о единственном элементе разрешения. С целью подавления нелокального влияния мешающего сигнала предложено использовать кодирование всех трех зондирующих волн.
5. Сделано обобщение принципа взаимности на процессы нелинейного рассеяния третьего порядка. Показано, что использование «взаимных» томографических схем позволяет получать информацию об исследуемом объекте с разных ракурсов без существенного увеличения количества излучающих и приемных преобразователей, что удобно для использования в практических условиях.
6. Восстановлены пространственные распределения комбинированного акустического нелинейного параметра для модельных рассеивателей при различных способах кодировки трех зондирующих волн. Проиллюстрированы хорошее качество восстановления и возможность дополнительной корректировки получаемого изображения с помощью отклика данной томографической схемы на пробный точечный рассеиватель.
7. Реализовано численное моделирование прямой задачи рассеяния в случае трех зондирующих сигналов с произвольной временной зависимостью. При этом учтены все типы возникающих нелинейных вторичных источников, участвующих в формировании комбинационного сигнала третьего порядка на приемнике. Полученное решение прямой задачи позволяет приблизить смоделированный сигнал к сигналу, наблюдаемому в практических условиях, для последующего усовершенствования методики воспроизведения количественных значений акустических нелинейных параметров.

Список публикаций

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

A1. Буров В.А., **Крюков Р.В.**, Румянцева О.Д., Шмелев А.А. «Проблемы использования нелинейных коллинеарных процессов в акустической томографии третьего порядка» // Акустический журнал. 2012. Т. 58. N 1. С. 57–79. **IF = 0.86**

A2. **Крюков Р.В.** «Роль возмущений энтропии в задачах нелинейной акустической томографии третьего порядка» // Акустический журнал. 2012. Т. 58. N 2. С. 184–192. **IF = 0.86**

A3. Буров В. А., Шмелев А. А., **Крюков Р. В.**, Румянцева О. Д. «Роль нелинейных взаимодействий в акустической томографии третьего порядка» // Акустический журнал. 2015. Т. 61. N 6. С. 669–684. **IF = 0.86**

A4. Буров В.А., **Крюков Р.В.**, Румянцева О.Д. «Принципы акустической томографии третьего порядка на основе нелинейного взаимодействия кодированных волн» // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая. 2015. Т. 79. N 12. С. 1676–1681. **IF (РИНЦ) = 0.47**

A5. Котельников Е.А., **Крюков Р.В.**, Буров В.А., Дмитриев К.В., Румянцева О.Д. «Кодировка зондирующих сигналов при томографировании акустических нелинейных параметров» // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая. 2019. Т. 83. N 1. С. 76–82. **IF (РИНЦ) = 0.47**

Публикация в научном журнале, не входящем в перечень рецензируемых изданий:

A6. **Крюков Р.В.**, Румянцева О.Д., Иванова П.А. «Проблемы нелинейной акустической томографии третьего порядка на основе кодированных волн» // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2015. N 4. С. 154331-1 – 154331-4. **IF (РИНЦ) = 0.042**

Статьи в трудах конференций:

A7. **Крюков Р.В.**, Румянцева О.Д., Иванова П.А. «Проблемы нелинейной акустической томографии третьего порядка на основе кодированных волн» // Труды XV Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» («Волны-2015»). Секция 8 «Спектроскопия, диагностика и томография». 2015. С. 51–54.

A8. **Крюков Р.В.**, Шмелев А.А. «Использование нелинейных эффектов третьего порядка для целей акустической томографии» // XVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2010». Секция «Физика». Т.2. Сборник тезисов. М.: Физический факультет МГУ, 2010. С. 63–64.

A9. Буров В.А., Шмелев А.А., **Крюков Р.В.**, Румянцева О.Д. «Возможность томографии на основе нелинейных акустических эффектов третьего порядка» //

Сборник трудов XXII сессии Российского Акустического Общества. Т.1. М.: ГЕОС, 2010. С.183–187.

A10. Буров В.А., Шмелев А.А., **Крюков Р.В.**, Румянцева О.Д. «Акустическая томография с использованием нелинейных эффектов рассеяния второго и третьего порядков» // Сборник материалов III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская Физика – 2010». М.: Изд-во МГУ, 2010. Т.1. С. 131–134.

A11. Буров В.А., Шмелев А.А., **Крюков Р.В.**, Румянцева О.Д. «Томография на основе нелинейных акустических эффектов третьего порядка» // Труды 54-й научной конференции МФТИ. Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе. Управление и прикладная математика. Т.1. Москва-Долгопрудный: МФТИ, 2011. С.23–25.

A12. Буров В.А., **Крюков Р.В.**, Румянцева О.Д., Шмелев А.А. «Томография распределения нелинейного акустического параметра третьего порядка» // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Выпуск 5: 5-я Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2012). Суздаль, 18-19 сентября 2012 г. М.: ООО «Информпресс-94». 2012. С. 16–21.

A13. Котельников Е.А., **Крюков Р.В.** «Установка для томографирования акустических нелинейных параметров с использованием кодированных сигналов» // XXIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2017». Секция «Физика». Сборник тезисов. М.: Физический факультет МГУ, 2017. С. 504–506.

A14. **Крюков Р.В.**, Котельников Е.А. «Применение кодированных сигналов в задаче восстановления акустических нелинейных параметров» // XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2018». Секция «Физика». Сборник тезисов. М.: Физический факультет МГУ, 2018. С. 699–701.

A15. Котельников Е.А., **Крюков Р.В.**, Буров В.А., Дмитриев К.В., Румянцева О.Д. «Кодирование сигналов в акустической томографии нелинейного параметра» // Труды XVI Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2018»). Секция «Акустика неоднородных сред». 2018. С. 26–29.

Патенты на изобретения:

A16. Буров В. А., Шмелев А. А., Евтухов С. Н., **Крюков Р. В.**, Зотов Д. И., Раттэль М. И., Бобов К. Н., Румянцева О. Д. «Ультразвуковой томограф» // Патент на изобретение RU 2530659 С2. Москва, 2014.

A17. Буров В. А., Шмелев А. А., Евтухов С. Н., **Крюков Р. В.**, Зотов Д. И., Раттэль М. И., Бобов К. Н., Румянцева О. Д. «Ультразвуковой томограф» // Патент на изобретение RU 2526424 С2. Москва, 2014.