

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Румянцевой Ольги Дмитриевны «Методы решения обратных многомерных задач акустического рассеяния и их практические приложения», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.06 — акустика

Диссертационная работа О.Д. Румянцевой посвящена обратным задачам акустического рассеяния в размерности $d=2$ и $d=3$. Более точно, рассматриваются, прежде всего, задачи томографического типа, мотивированные приложениями к медицине (диагностика патологий мягких биологических тканей на ранней стадии). При этом целью является разработка и апробация итерационных и функциональных методов решения таких задач с последующим внедрением этих методов в конкретные акустические томографические устройства. Результаты диссертации включают оригинальные продвижения первостепенной важности в этих направлениях.

На математическом уровне в диссертационной работе рассматривается обратная задача рассеяния для линейного акустического уравнения, где в общем случае скорость звука, поглощение, плотность среды и векторное поле течений зависят от точки пространства. В монохроматическом режиме такое акустическое уравнение имеет формально тот же вид, что и стационарное уравнение Шредингера в магнитном поле. В виду такого совпадения часть результатов диссертации использует математические методы, которые были первоначально предложены в рамках обратной задачи квантового рассеяния и теории солитонов (например, комплексно-геометрические решения Фаддеева многомерного уравнения Шредингера, задача Римана–Гильберта–Манакова, $\bar{\partial}$ -уравнение). С теоретической точки зрения это является одним из наиболее оригинальных и впечатляющих мест диссертационной работы !

Эти результаты, основанные на продвинутых математических (функционально-аналитических) методах, очень хорошо представлены во второй части диссертации. Исторически эти функционально-аналитические методы восходят к работам И.М. Гельфанда, М.Г. Крейна, Б.М. Левитана, В.А. Марченко и Т. Редже в одномерном или в сферически-симметричном случае и, в частности, к работам И.М. Гельфанда, Ю.М. Березанского, Л.Д. Фаддеева, Р. Ньютона, С.В. Манакова, С.П. Новикова, Р. Билса, Р.Р. Койфмана в многомерном случае.

При этом диссертационная работа включает пионерские и основополагающие результаты по численному моделированию в рамках акустической томографии таких функционально-аналитических алгоритмов, первоначально предложенных в чисто математических работах. В частности, используя терминологию диссертации, здесь имеются в виду двумерный монохроматический алгоритм Новикова–Гриневича–Манакова, двумерный и трехмерный монохроматические алгоритмы Новикова и модификации этих алгоритмов. (Названия алгоритмов связаны с математическими работами П.Г. Гриневича, С.В. Манакова, Р.Г. Новикова.) Диссертационная работа включает, в частности, следующие результаты по этим алгоритмам:

- Впервые выполнено численное моделирование нескольких вариантов монохроматических двумерных функциональных алгоритмов, позволяющих восстанавливать одновременно разномасштабные детали рассеивателя произвольной силы без привлечения итерационной процедуры. Эти алгоритмы основаны на решении задачи типа Римана–Гильберта–Манакова на комплексно-геометрические решения Фаддеева уравнения Гельмгольца при фиксированной частоте.
- Впервые численным моделированием проиллюстрировано, что область работоспособности исследуемых монохроматических двумерных функциональных алгоритмов значительно шире, чем это было доказано первоначально в математических работах.
- Впервые предложено обобщение монохроматического двумерного функционального алгоритма Новикова на полихроматический случай получения данных. Впервые численным моделированием проиллюстрирована эффективность выполненного обобщения как способа подавления процессов неустойчивости решения, возникающих в монохроматическом случае.
- Впервые выполнено численное моделирование трехмерного монохроматического функционального алгоритма Новикова, позволяющего посредством итераций восстанавливать рефракционно-поглощающие рассеиватели произвольной силы. Этот алгоритм основан на решении нелинейного $\bar{\delta}$ -уравнения на обобщенную амплитуду рассеяния Фаддеева в комплексной области.

Эти результаты по функциональным алгоритмам подробно изложены в главах 6–9 второй части диссертации.

С другой стороны, в первой части диссертации изложены некоторые результаты, которые уже реализованы на опытном образце ультразвукового медицинского томографа, разработанном и используемом на кафедре акустики физического факультета МГУ. К таким результатам относятся:

- Показано, что двухшаговый алгоритм, разработанный и апробированный в рамках диссертационной работы, позволяет восстанавливать пространственные распределения скорости звука и коэффициента поглощения с разрешающей способностью около одной трети характерной длины волны. Такая высокая разрешающая способность актуальна для целей ранней диагностики новообразований мягких биотканей и, прежде всего – в молочной железе.
- Впервые показано, что при томографировании акустического рассеивателя, создающего эффекты многократного рассеяния волн, восстановление тонкой структуры этого рассеивателя в виде адекватных количественных оценок значений скорости звука и коэффициента поглощения невозможно без сопутствующей оценки характеристик более крупномасштабных деталей.
- Разработаны оригинальные корреляционные методы, которые позволяют воспроизводить карту вектора скорости кровотока на основе эффекта движения спекл-структур на промежуточных изображениях. Исходными данными служат обычные сигналы на приемниках, регистрируемые при облучении объекта (органа) зондирующими полями, причем при различных положениях излучателей. Предложенные алгоритмы являются удобным инструментом, позволяющим с помощью вышеупомянутого медицинского томографа восстановить в каждой точке не только скорость звука и поглощение, но и, в качестве дополнения, векторную карту кровотока. Предложенная методика апробирована на модельных данных (полученных решением прямой задачи), а также экспериментально на основе данных, полученных от модельного объекта с помощью вышеупомянутого медицинского томографа. Хотя эти экспериментальные результаты не вошли в диссертацию непосредственно, они представлены в публикациях, ссылки на которые даны в диссертационной работе.

Первая часть диссертации включает также следующие результаты.

- Разработан оригинальный строгий волновой алгоритм, который позволяет восстанавливать характеристики рассеивателя в пространстве, фурье-сопряженном к координатному пространству. При этом на этапе восстановления учитывается априорная статистическая информация об искомом рассеивателе и о

помехе, присутствующей в экспериментальных данных. В рамках данного алгоритма процедура винеровской фильтрации впервые обобщена на случай сильных рассеивателей, которые столь сильно искажают зондирующее поле, что измеряемые данные оказываются связанными с искомыми характеристиками нелинейным образом, и это обстоятельство принципиальным образом усложняет решение обратной задачи.

- Впервые получены количественные соотношения, которые связывают конечный объем данных (полученных в томографическом эксперименте) с характерным линейным размером исследуемого рассеивателя и шириной его пространственного спектра. Такие соотношения позволяют оценить возможность обеспечения устойчивости и единственности при решении акустической обратной многомерной задачи рассеяния по данным, доступным в реальном эксперименте.
- В рамках схемы ультразвукового томографирования трехмерного объекта по слоям, впервые предложен оригинальный способ повышения разрешающей способности томографической системы в направлении, перпендикулярном поверхности слоя. При этом численным моделированием проиллюстрировано, что предложенный эффект достигается за счет наклонов преобразователей антенны на разные углы в определенном диапазоне.
- Впервые предложены алгоритмы, позволяющие восстановить отдельно сразу несколько акустических линейных характеристик исследуемого объекта – скорость звука, плотность объекта, коэффициент поглощения звуковой волны и даже частотную зависимость коэффициента поглощения. Эти алгоритмы относятся к усложненной ситуации, когда полный объем данных рассеяния получить невозможно по техническим или, например, анатомическим причинам. Показано, что неполнота данных непременно должна быть учтена в алгоритмах восстановления, поскольку иначе правильные количественные значения вышеупомянутых характеристик получить, в общем случае, невозможно.

Всё это подробно изложено в главах 2–4 первой части диссертации.

Оппонент не имеет существенных замечаний по диссертационной работе. В качестве же перспективы для дальнейшей работы можно пожелать внедрить функциональные алгоритмы, промоделированные и апробированные в диссертации и хорошо зарекомендовавшие себя в целях восстановления

акустических характеристик, в томографическую установку, подобно тому как это сделано в настоящее время для двухшагового алгоритма.

Таким образом, как уже было отмечено выше, диссертационная работа содержит оригинальные продвижения первостепенной важности в области акустической томографии, направленные, прежде всего, на медицинские приложения.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

По моему мнению, диссертация «Методы решения обратных многомерных задач акустического рассеяния и их практические приложения» соответствует паспорту специальности 01.04.06 — «Акустика» и всем требованиям к докторским диссертациям Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а её автор — Румянцева Ольга Дмитриевна — безусловно заслуживает присуждения искомой учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.06 — «Акустика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории прямых и обратных задач, изучения очага землетрясений Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (ИТПЗ РАН)

Новиков Роман Геннадьевич

Novikov

117997, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32

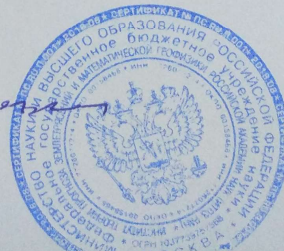
Телефон: +7 (495) 333-45-13, e-mail: roman.novikov@polytechnique.edu

Дата составления отзыва: 7 июня 2022 года.

Подпись Новикова Р.Г. заверяю:

учёный секретарь

Селюцкая



Селюцкая О.В.