

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 разработке и численной апробации различных методов решения обратных задач акустического рассеяния. Под обратными задачами рассеяния понимается восстановление характеристик внутренней структуры исследуемого объекта (акустического рассеивателя) в виде пространственных неоднородностей скорости звука, плотности среды, коэффициента поглощения и степени частотной зависимости коэффициента поглощения. Исходными данными для процесса восстановления является измеренное рассеянное акустическое поле в некотором множестве экспериментов. Обратная задача является, по своей природе, некорректной (т.е. решение неединственно или неустойчиво) и, как правило, нелинейной относительно искомых величин. Такое сочетание делает решение задачи весьма трудным. Предлагаемые в работе методы весьма разнообразны, однако все они объединены общей целью – восстановить пространственные распределения упомянутых акустических характеристик не только в виде изображения, но и в виде *количественных* значений, что характерно именно для обратных задач томографического типа. Такие методы могут быть применены непосредственно или в виде общей идеи в практических задачах медицинской диагностики, океанологии и отчасти дефектоскопии.

Диссертационная работа разделена на две крупные части. **В первой части (главы 1–4)** рассмотрены классические методы: от лучевого подхода с низкой разрешающей способностью делается переход к волновым методам, оперирующим с классическими волновыми полями. Каждый из предлагаемых методов можно кратко охарактеризовать следующим образом.

Первая глава – обзорная. Приводимые в ней основные уравнения являются базовыми для изложения математической стороны методов решения обратных акустических задач томографического типа.

Во второй главе предлагается так называемый двухшаговый алгоритм. На первом шаге лучевым подходом (предлагаются два альтернативных алгоритма восстановления) с низким разрешением восстанавливаются крупные детали внутренней структуры объекта. Далее, на втором шаге, внутренняя структура уточняется: мелкие детали восстанавливаются волновым способом с учетом уже найденных крупных деталей. Несмотря на то, что двухшаговый алгоритм является не вполне строгим, он позволяет обеспечить, в итоге, разрешающую способность около одной четверти характерной длины волны. Это подтверждено в диссертации не только на модельных данных, но и на реальных экспериментальных данных, снятых с помощью опытного образца ультразвукового медицинского томографа, разрабатываемого на кафедре акустики в лаборатории обратных задач.

В третьей главе разработаны строгие волновые алгоритмы, которые позволяют не только восстановить искомые акустические характеристики (как единое целое, без разделения на крупные и мелкие части), но и эффективно подавить влияние помех в измеряемых данных на результат восстановления. Решение обратной задачи усложняется тем, что получаемые в итоге уравнения являются нелинейными относительно неизвестных. Разработанная в рамках диссертации процедура подавления основана на нелинейном обобщении процедуры винеровской фильтрации, и это обобщение получено в диссертации при учете имеющейся статистической априорной информации об исследуемом объекте и о помехе в виде соответствующих корреляционных функций. Проведено численное моделирование, подтвердившее работоспособность итоговых алгоритмов.

Кроме того, в третьей главе, в рамках статистических аспектов обратной задачи, подробно анализируется, с физической точки зрения, проблема возможной неединственности и неустойчивости решения в случае конечного объема *дискретизованных* экспериментальных данных. В этой связи приводится необходимое условие на минимальный объем независимых дискретизованных данных (полученных при угловом расстоянии между соседними преобразователями не менее рэлеевского угла), при котором можно ожидать как единственность, так и устойчивость решения рассматриваемой обратной задачи рассеяния.

Четвертая глава включает в себя несколько тем, относящихся к способам преодоления некоторых дополнительных трудностей решения обратных задач, которые возникают при получении данных в реальных условиях томографирования. Во-первых, когда антенная решетка томографа двумерная, исследуемый трехмерный объект томографируется по слоям, и разрешающая способность в направлении, перпендикулярном плоскости томографирования, оказывается на порядок хуже, чем в самой плоскости. В связи с этим, разработан и численно апробирован способ повышения разрешающей способности в перпендикулярном направлении за счет привнесения различных углов наклона преобразователей антенной решетки. Во-вторых, в реальном эксперименте часто не удается снять полный набор экспериментальных данных в силу технических ограничений или ограничений, связанных с расположением исследуемого объекта. Как следствие, результат восстановления количественных значений искомых характеристик будет адекватным, только если неполнота данных учитывается на алгоритмическом уровне. Ситуация еще больше усложняется, поскольку на практике, как правило, бывает неизвестен показатель степени частотной зависимости. Соответствующие безытерационные и итерационные алгоритмические схемы определения всех линейных акустических параметров (скорости звука, плотности, коэффициента поглощения и степени его частотной зависимости), показавшие работоспособность и приемлемую помехоустойчивость, разработаны в рамках диссертации.

В завершение главы разработана возможность восстановления карты вектора скорости кровотока при ультразвуковом диагностическом обследовании мягких биологических тканей. Предложенные методы не используют эффект Доплера и включают в себя процедуру пространственной корреляции фрагментов пар промежуточных изображений, содержащих спекл-структуры, которые смещаются синхронно с движением кластеров крови, рассеивающих зондирующее их поле. С практической точки зрения, такой способ восстановления кровотока удобен в качестве оснащения томографа дополнительной воз-

возможностью, причем без существенного усложнения схемы съема данных. Тогда по одним и тем же измеренным данным можно восстановить не только вышеупомянутые акустические параметры, но и кровоток.

Вторая часть диссертационной работы (**главы 5–9**) посвящена восстановлению прежних линейных акустических параметров, но уже методами функционального анализа, в которых используется совершенно иной подход к решению обратной задачи, чем в первой части диссертации.

Пятая глава представляет собой обзор некоторых современных исследований, касающихся функциональных методов.

Шестая глава посвящена описанию основных соотношений функционального подхода, в котором используется идея академика РАН Л.Д. Фаддеева – математический переход от действительных волновых векторов (описывающих направление падения на объект плоской волны и направление приема рассеянного сигнала) к комплексным волновым векторам, которые получаются из действительных добавлением мнимой части. Тогда вместо классических волновых полей вводятся так называемые обобщенные волновые поля, соответствующие комплексным волновым векторам.

Для решения *двумерной обратной задачи* авторами-математиками (Р.Г. Новиков, П.Г. Гриневич, С.В. Манаков) рассматриваемого далее НГМ-алгоритма предлагается использовать то условие, что квадрат комплексного волнового вектора равен квадрату волнового числа фоновой однородной непоглощающей среды. Тогда двумерные векторы действительной и мнимой частей волнового вектора должны быть взаимно ортогональными. В представленной диссертации проанализирована роль соотношений типа уравнений Сохоцкого, благодаря которым НГМ-алгоритм обладает единственностью решения, в то время как предварительно описанный в диссертации алгоритм, строящийся только на уравнениях типа уравнений Роуза (но записанных в диссертации в терминах обобщенных волновых полей) единственностью не обладает.

Далее в шестой главе приводятся результаты численного моделирования НГМ-алгоритма применительно к акустическим обратным задачам, т.е. для объектов-рассеивателей, которые характеризуются как неоднородностями скорости звука, так и коэффициента поглощения. Это впервые выполненное моделирование, касающееся решения обратной задачи функциональными методами на основе идеи Л.Д. Фаддеева, показало работоспособность, эффективность и хорошую помехоустойчивость процедуры восстановления. Надо отметить, что здесь, в отличие от двухшагового алгоритма, детали рассеивателя с разными волновыми масштабами восстанавливаются одновременно, с примерно той же разрешающей способностью.

В седьмой главе приводятся результаты восстановления рассеивателей с абсолютно мягкой и абсолютно жесткой границей. На примере рассеивателей такого типа удалось показать, что область работоспособности НГМ-алгоритма гораздо более широкая, чем это предполагалось изначально в оригинальных работах авторов алгоритма. Это обстоятельство свидетельствует о возможном широком применении алгоритма в прикладных задачах даже в монохроматическом режиме, хотя для очень сильных акустических рассеивателей всё же может наступать неустойчивость процесса восстановления.

В восьмой главе монохроматический функциональный алгоритм обобщается на многочастотный случай благодаря привлечению уравнений связи, отражающих факт неза-

висимости определенных характеристик исследуемого объекта от зондирующих частот. Такое обобщение является оригинальным результатом диссертационной работы. При этом выполненное численное моделирование многочастотного алгоритма показало, что привлечение на этапе восстановления различных частот, но в рамках единого алгоритма, позволяет подавить вышеупомянутые процессы неустойчивости решения, возникающие в монохроматическом случае.

Девятая глава посвящена уже *трехмерному* функциональному алгоритму решения обратной задачи. Этот трехмерный алгоритм, разработанный в рамках чисто математических работ самого высокого уровня, по своей структуре сильно отличается от двумерного случая, хотя по-прежнему построен с помощью привлечения на этапе обработки входных данных идеи перехода к комплексным волновым векторам. К результатам непосредственно диссертационной работы относится впервые выполненное численное моделирование рассматриваемого трехмерного алгоритма. Опять же на примере рефракционно-поглощающих рассеивателей разной силы показана работоспособность и достаточно хорошая помехоустойчивость алгоритма, хотя его численная реализация в практических задачах потребует очень больших вычислительных затрат в силу как трехмерности задачи, так и в силу необходимости привлечения итераций для получения решения.

В конце диссертационной работы приведены основные результаты и выводы, список публикаций автора диссертации, а также список дополнительно цитируемой литературы.

Основные результаты диссертации изложены в 122-х печатных работах, в том числе в 2-х монографиях, 59-и статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 3-х патентах и 58-и публикациях в сборниках трудов конференций и симпозиумов. Результаты диссертации полностью отражены в этих публикациях, а также неоднократно докладывались устно.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

По диссертационной работе О.Д. Румянцевой можно сделать несколько замечаний.

1. В разделе 4.1, посвященном современным разработкам ультразвуковых медицинских томографов, подробно описаны зарубежные коллективы, занимающиеся данной тематикой. Однако имеется только беглое упоминание работ российской группы В.А. Гончарского, хотя эта группа заслуживает отдельного внимания.
2. Материал второй крупной части диссертационной работы, относящийся к развитию функциональных методов решения обратных задач рассеяния, очень интересен и перспективен для решения прикладных акустических задач томографического типа. Однако форма его изложения в диссертации достаточно сложна для восприятия физиками-прикладниками или инженерами. Чтобы материал был доступен более широкому кругу исследователей, следовало бы изложить его в более структурированном виде для упрощённого понимания и для программной реализации разработанных алгоритмов.
3. Некоторая фрагментарность изложения – диссертация смотрится как набор самостоятельных недостаточно связанных друг с другом фрагментов. Отдельной задачей смотрится задача определения кровотока без использования эффекта Доплера.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают заслуг соискателя в получении важных и интересных теоретических и экспериментальных результатов, полученных на протяжении последних тридцати лет.

Представленная 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 — заслуживает присуждения искомой учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.06 — «Акустика».

Официальный оппонент:

доктор технических наук, заместитель генерального директора по науке и системе качества, начальник системного отдела 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

Дата составления отзыва: 9 июня 2022 года.

Подпись Базулина Е.Г. заверяю:

генеральный директор НПЦ «Эхо+»
доктор технических наук

А.Х. Вopilкин