

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу Романова Сергея Юрьевича «Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач томографии в скалярных волновых моделях», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Романова С.Ю. посвящена разработке и реализации численных алгоритмов и программных комплексов решения прямых и обратных задач томографии и дистанционного зондирования в рамках скалярных волновых моделей. Исследуются математические вопросы решения нелинейных обратных задач в трехмерных постановках, учитывающих дифракционные эффекты и поглощение.

Содержание диссертации.

Во введении приводится история проблематики, обосновывается актуальность исследований, излагаются цель работы и ставятся задачи, которые необходимо решить для ее достижения, указаны методы их решения, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы, приводится апробация результатов и краткое содержание диссертации. Формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются прямая и обратная задачи для скалярной волновой модели распространения волн в неоднородной среде. Исследуются и сравниваются две схемы сбора данных – послойная (2.5D) и трехмерная (3D). Задача волновой томографии формулируется как коэффициентная обратная задача в рамках дифференциального подхода. Определяются функциональные пространства и действующие на них операторы. Формулируется обратная задача нахождения скоростных неоднородностей по регистрируемым приходам волн, вводится функционал невязки. Обратная задача ставится как задача поиска функции, доставляющей минимум функционалу невязки.

Описан итерационный алгоритм минимизации функционала невязки, количество итераций используется как параметр регуляризации. Представлены примеры вычислительных экспериментов в 2.5D и 3D геометриях. Все численные эксперименты можно характеризовать как многофакторные с исследованием взаимовлияния различных параметров.

Вторая глава посвящена коэффициентным обратным задачам в частотной области, приводящим к уравнению Гельмгольца. Возмущение среды осуществляется источником с набором известных частот. Требуется восстановить скоростную неоднородность среды. Для решения задачи используется известный подход, основанный на аппарате функции Грина. При численном решении возникающего интегрального уравнения 1 рода используется известный итера-

тивно-регуляризованный метод Гаусса-Ньютона. Сформулированные выводы о сложности применения интегрального подхода подтверждены математическим моделированием и вычислительным экспериментом на суперкомпьютере «Чебышев» МГУ.

Рассмотрены также линеаризованные в приближении Борна важные задачи дистанционного зондирования – задачи волновой диагностики с синтезированной апертурой. Показано, что математическая модель формирования изображений в РЛС с синтезированной аппаратурой представляет собой набор сверток с ядром Френеля. Результаты реконструкции по реальным данным иллюстрируются.

В третьей главе методы, развитые Романовым С.Ю. в рамках дифференциального подхода к решению обратных задач, распространены на волновые модели с учетом поглощения. Определены функциональные пространства и действующие на них операторы. Сформулирована вариационная постановка обратных задач: решение обратной задачи сводится к поиску минимума функционала невязки по экспериментальным данным. Минимум ищется среди пар функций (скорость, поглощение). Численное решение обратных задач получено с использованием градиентных методов.

Представлены примеры вычислительных экспериментов в 2.5D и 3D геометриях с учетом поглощения. Как и в главе 1, все численные эксперименты исследуют взаимовлияние параметров, имеющих наибольший вклад в решение задачи ультразвуковой томографии груди. Модельные задачи решались как при условии неотражения на границе, так и с граничными условиями. Результаты иллюстрируются.

В четвертой главе проведено математическое моделирование и вычислительный эксперимент в рассматриваемой задаче с целью оптимизации параметров и сравнение геометрий сбора данных. Исследована применимость послойных схем в решении трехмерных задач. Продемонстрирована практическая применимость теоретических результатов Глав 1-3 и разработанной методологии математического моделирования для ответов на поставленные в диссертационной работе вопросы.

В пятой главе рассматриваются вопросы распараллеливания численных методов и алгоритмов, описывается разработанный комплекс программ для суперкомпьютеров. Комплекс программ состоит из трех блоков: решение прямой задачи; решение обратной задачи и получение реконструкции в слое по данным прямой задачи; визуализация решения. Предусмотрен интерактивный выбор модельных фантомов, параметров геометрии сбора данных: количество источников и приемников, их частотные характеристики, количество вычислительных ядер и процессоров GPU и других.

Текст хорошо структурирован и иллюстрирован, язык изложения очень хороший, диссертацию Романова С.Ю. можно использовать при чтении спецкурсов для студентов и аспирантов, занимающихся математическими и вычислительными задачами томографии.

Актуальность выбранной темы.

В настоящее время активно развиваются математическое моделирование волновых процессов и методы реконструктивной волновой томографии. Эта задача является актуальной для определения внутренних особенностей исследуемого объекта и охватывает широкий спектр исследования и практических применений: медицинская диагностика и визуализация, ультразвуковая микроскопия, дефектоскопия, гидролокация, сейсмика и т.д. Для формирования изображений в перечисленных областях используются акустические поля в широком диапазоне частот, чем определяется многообразие технических реализаций устройств диагностики. При этом всестороннее использование компьютерных технологий формирует единую тенденцию в формулировке физико-математических принципов обработки данных. Сбор большого объема информации об исследуемом объекте осуществляется с использованием многочастотного и многопозиционного сканирования, что характеризует обратные задачи томографического типа. Необходимым условием успеха томографической визуализации является создание детально разработанных математических и численных методов реконструкции, в которых существенным является исходная строгая постановка задачи, максимально соответствующая физическому содержанию томографической проблемы.

Жизненно важной проблемой современной реконструктивной волновой томографии является задача обнаружения новообразований молочной железы с использованием ультразвука как одного из видов неионизирующего излучения. Математические аспекты этой проблемы также рассмотрены в диссертации. Большое значение имеют математические исследования по разработке и созданию ультразвуковых томографов, специализированных для выявления онкологических заболеваний молочной железы на ранних стадиях. В диссертации исследован важный вопрос оптимизации параметров медицинских ультразвуковых томографов, использующих разработанные алгоритмы: разрешение, длина волны, отношение сигнал-шум, количество источников и приемников, размер сеток, точность регистрации входных данных и др. Вывод о необходимости обеспечить погрешность входных данных не более 5-10%, очевидно, будет учтен при разработке ультразвукового томографа, поскольку этот результат получен из практического требования иметь ультразвуковой томограф с разрешением порядка 3 мм и основан на моделировании, проведенном автором диссертации.

На основании вышеизложенного можно заключить, что актуальность темы диссертации Романова С.Ю. не подлежит сомнению.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Характерной особенностью диссертации Романова С.Ю. является проведение полного цикла исследования: от математических постановок задач волновой томографии и поиска их решения, разработки численных методов и алгоритмов, создания программного комплекса, обладающего масштабируемостью и эффективностью, поиска способов распараллеливания на архитектуре суперкомпьютеров общего назначения и на графических ускорителях, до многофакторного вычислительного эксперимента с модельными и реальными данными.

В диссертации Романова С.Ю. выдержан высокий научный уровень как в постановке задач и получении теоретических результатов, на основе которых сконструированы итерационные методы оптимизации и их реализации в виде алгоритмов, адаптированных к архитектуре суперкомпьютеров, так и в полномасштабном вычислительном эксперименте.

Используя современные методы математического моделирования и вычислительного эксперимента, автор диссертации выявляет взаимовлияние сложных факторов, теоретический анализ которых затруднителен, таких как оптимизация параметров и сравнение геометрий сбора данных. Вывод Романова С.Ю. о необходимости работать над решением обратных задач в трехмерных постановках в силу самой природы акустического феномена, несмотря на упрощения 2.5D схемы и ее успех в рентгеновской томографии, считаю правомерным.

Автор использовал широкий спектр проверенных методов математической физики, численного анализа, программирования и суперкомпьютерных технологий. Выводы, сделанные на основании моделирования, с высокой степенью аргументированы.

Достоверность результатов и выводов.

Убедительно подтверждается теоретическими исследованиями с приведенными доказательствами, результатами вычислительного эксперимента, анализом погрешностей решения, а также сравнением с известными методами, моделями и известными тестовыми фантомами. Автор диссертации обработаны реальные данные, полученные на космическом аппарате «Алмаз», получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Научная новизна полученных результатов.

Научная новизна заключается в качественных достижениях. Романов С.Ю. впервые провел сравнение дифференциального и интегрального подходов к решению нелинейной обратной задачи волновой скалярной томографии. Для итерационного процесса в интегральном подходе впервые получены явные формулы, однако исследования показывают, что вычислительная

сложность применения интегрального подхода остается слишком высокой для практики. Приводимые в работе оценки числа операций приводят к выводу о неоспоримом преимуществе дифференциального подхода перед интегральным подходом.

Автором диссертации в дифференциальном подходе впервые сформулированы в виде теорем и доказана дифференцируемость по Фреше целевого функционала невязки, а затем выводится его точная формула для задач в двух постановках. Эти результаты являются новыми, поскольку доказательства получены Романовым С.Ю. на математическом уровне строгости и в отличных, от использованных в работах его предшественников, пространствах функций и граничных условий, а также вводится зависимость поглощения от частоты, обсуждаются вопросы учета отражения на границе. Впервые исследована стоксовская модель поглощения, для которой предложена четырехслойная по времени явная схема, обеспечивающая устойчивое решение волнового уравнения с поглощением. Сделаны выводы о том, что качество реконструкции скорости выше качества реконструкции поглощения.

Впервые исследован важный вопрос оптимизации параметров медицинских ультразвуковых томографов. Автор диссертации провел трудоемкое и исчерпывающее сравнение послойных и трехмерных томографических геометрических схем на прохождение и отражение.

В рассматриваемой задаче волновой томографии разработаны новые численные алгоритмы, которые спроецированы на архитектуру суперкомпьютеров как общего назначения, так и на графических ускорителях. Впервые исследуются вопросы распараллеливания численных методов и алгоритмов, описываются разработанные комплексы программ для суперкомпьютеров двух типов: общего назначения и суперкомпьютеров на кластерах графических ускорителей. Выбраны принципы распараллеливания для этих двух типов – по слоям, по числу источников и по способу декомпозиции области. Проведены расчеты на 20480 ядрах CPU суперкомпьютера «Ломоносов».

Впервые детально и в совокупности Романовым С.Ю. исследованы вопросы масштабируемости, эффективности и производительности применения суперкомпьютерных технологий при решении сложных нелинейных задач волновой томографии. Приведена информация о важности и взаимозависимости этих вопросов, предоставлен ряд конкретных рекомендаций. Особенно практически ценно перекрестное сравнение CPU и GPU суперкомпьютеров по ряду факторов, важных и определяющих успех при решении задач волновой томографии. Среди таких факторов находятся: соотношение времени обменов между процессами, сравнение времени расчетов на GPU и ядрах в зависимости от размерности сетки декомпозиции области, соответствие числа GPU числу источников.

Соответствие содержания диссертации специальности.

Представленное в диссертации Романова С. Ю. исследование выполнено полностью в рамках паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Содержание и оригинальные результаты работы соответствуют паспорту специальности по пунктам:

- Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

В диссертации Романова С.Ю. обратные задачи рассмотрены как коэффициентные нелинейные обратные задачи для разных физических постановок. Впервые проведено сравнение дифференциального и интегрального методов. Предложены новые методы решения проблемы искусственных граничных условий.

- Развитие качественных и приближённых аналитических методов исследования математических моделей.

В рамках интегрального подхода использован метод линеаризации и исследованы его достоинства и издержки. В рамках дифференциального подхода исследуется обратная задача, поставленная как задача минимизации функционала невязки, которая решается с использованием градиентного итерационного метода. В приближенных методах существенно используется точный вид производной Фреше функционала невязки, полученный в диссертации в форме теорем.

- Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

Для численного решения задачи минимизации в диссертации применяются явные разностные схемы второго порядка, выбранные как наиболее удобно проецируемые на архитектуру современных суперкомпьютеров. Впервые разработаны итерационные численные методы решения задач томографии на суперкомпьютерах.

- Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Впервые создан проблемно-ориентированный комплекс программ для суперкомпьютеров и предложены схемы распараллеливания, обладающие высокой эффективностью и масштабируемостью.

- Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Автором диссертации произведено многофакторное математическое моделирование с комбинированием различных схем регистрации данных ультразвукового томографа с целью выявления оптимальных параметров, обеспечивающих наилучшие технические характеристики томографа, таких как разрешение 2-3мм, необходимое для медицинской диагностики.

Замечания по материалам диссертации.

По математическим результатам диссертации и применяемым методам математического моделирования замечаний нет.

Имеются замечания, большей частью редакционного характера.

1. На стр. 30, в заключение Теоремы 1.3, в неравенстве (не пронумеровано) используется обозначение округления скаляра до ближайшего целого числа в сторону меньшего. Ниже, на стр. 31 (а также стр.111, строка 1), это же обозначение применяется в теоретико-множественном смысле к множеству $R^N/\emptyset$ без объяснения. Желательно иметь в тексте определение.

2. На стр.45, левая часть уравнения (1.30), видимо, должна читаться $u(r,t_1)$ вместо $u(r,t)$.

3. На стр.47, 6-я и 7-я строки сверху, на шаге 2 описания итерационного процесса, используются обозначения $u^{(m)}(r,t)$ и $u(r,t)$, соответственно. Поскольку это есть описание алгоритма, необходимо объяснение идентификаторов. Аналогичный вопрос к пункту 2 алгоритма на стр. 130.

4. В модельных 3D экспериментах с полными данными фантом просвечивается со всех шести граней куба S1-S6, стр. 59, Рисунок 1.8. Грань S6, где просвечиваемый объект примыкает к грудной клетке, не может на практике использоваться. Реконструкция по полным данным, несомненно, информативна, однако несколько непонятно, почему автор диссертации не провел эксперимент с неполными данными на гранях S1-S5, или только на боковых гранях – как сделано в более сложной задаче одновременного восстановления скорости и поглощения в третьей главе.

5. Символ R используется в нескольких разделах диссертации для обозначения разных величин – вещественной числовой оси, области восстанавливаемой неоднородности, оператора восстановления. Это несколько смущает в тех случаях, когда эти величины оказываются в тексте рядом. Так, на стр. 79 в равенстве (2.15), символ R используется как область интегрирования. Ниже, в строке перед равенством (2.16), R – это область неоднородности, а на стр. 80, R вводится как интегральный оператор. Однако это не вызывает трудностей, поскольку использование символа является локальным, и общий смысл ясен из контекста.

Указанные замечания являются частными и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокуп-

ность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области волновой томографии. Результаты, полученные в диссертации Романова С.Ю., имеют большое теоретическое и практическое значение, охватывают как фундаментальные проблемы математического моделирования и численных методов в прямых и обратных задачах волновой томографии, так и ряд важных прикладных задач медицинской диагностики и дистанционного зондирования.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, исходя из полученных Романовым С.Ю. научных и практических результатов, считаю, что диссертационная работа «Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач томографии в скалярных волновых моделях» соответствует требованиям Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор Романов Сергей Юрьевич заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, Казанцев Иван Гаврилович

Адрес: Россия, 630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева, д. 6, Институт вычислительной математики и математической геофизики

Телефон: +7 (383) 780-92-48

E-mail: kazantsev.ivan6@gmail.com

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Старший научный сотрудник

лаборатории обработки изображений



Казанцев И.Г.

Подпись Ивана Гавриловича Казанцева заверяю

И.о. Директора

Д.т.н.



Ковалевский В.В.