«Утверждаю»
директор ИТПМ СО РАН
чл.-корр. РАН А.Н. Шиплюк
«03» 06 2016

Отзыв ведущей организации

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 решению проблемы разработки и реализации методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения на суперкомпьютерах нелинейных задач волновой томографии с учетом поглощения.

Актуальность выбранной темы.

Томографические методы в медицине и промышленности являются в настоящее время очень актуальной темой исследований. И одной из важнейших задач томографии является разработка принципиально новых томографов высокого разрешения, основанных на методах волновой томографии. Новые томографические методы можно также использовать в сейсмике для исследования приповерхностных слоев Земли, в электромагнитном зондировании, в гидроакустике, в неразрушающем контроле промышленных изделий и т.п. Развитие техники генерации и регистрации разнообразных диапазонов длин волн зондирующего излучения приводит к расширению диапазона геометрических размеров исследуемых объектов. И если на первом этапе при интерпретации данных такого зондирования достаточно просто удается использовать лучевые методы, когда размеры объектов много больше длины волны, то затем приходится переходить к более сложным волновым методам, что позволяет значительно повысить разрешающую способность данного вида томографии. Это относится к таким видам томографии, как интерференционная оптическая микроскопия клеток организмов, спектральной томографии в инфракрасном и тера-

герцовом диапазонах электромагнитного излучения. Наиболее интересные результаты в ближайшем будущем можно ожидать от применения разрабатываемых ультразвуковых томографов в медицине.

Использование медицинских рентгеновских томографов для регулярных обследований опасно из-за высокой лучевой нагрузки. Магнитно-резонансные томографы (МРТ) являются более безопасными для пациентов при многократных обследованиях, чем рентгеновские. Однако, недостатком МРТ является их высокая стоимость, а также худшее разрешение, чем в рентгеновских томографах.

В настоящее время в медицине для регулярных обследований широко используется УЗИ-диагностика стандартными УЗИ аппаратами, не имеющими томографических возможностей. Добавление возможности ультразвукового обследования объекта с разных сторон сможет обеспечить диагностику высокого разрешения на ранних стадиях заболевания без ионизирующего излучения. В этой связи, разработка томографических ультразвуковых комплексов для диагностики заболеваний молочной железы является перспективной для современной медицины. Все это указывает на актуальность темы диссертационного исследования.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации состоит из 273 страниц текста, 98 рисунков и 12 таблиц. В списке литературы - 215 работ.

Во **Введении** дается обоснование актуальности проблем, исследуемых в диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены результаты и положения, выносимые на защиту. Обоснованы научная новизна, достоверность и практическая значимость проведенных исследований. Перечислены российские и международные научные семинары и конференции, где была выполнена апробация основных этапов диссертационной работы.

В **первой главе** представлен дифференциальный подход к задаче волновой томографии, связанный с поиском неизвестных коэффициентов волнового дифференциального уравнения, позволяющего учитывать эффекты дифракции, рефракции и переотражения. Разработаны эффективные методы и алгоритмы решения прямых и обратных задач нелинейной волновой томографии во временно́й области в двумерном и трехмерном случае как коэффициентных задач для волнового уравнения. Разработанные алгоритмы базируются на вычислении производной Фреше функционала невязки с помощью решения начально-краевых задач для волнового уравнения. Для рассматриваемых постановок обратных задач впервые получено точное выражение для производной Фреше функционала невязки. Разработаны эффективные итерационные численные ме-

тоды решения задач волновой томографии на суперкомпьютерах как для послойной томографической схемы реконструкции, так и для полностью трехмерной схемы при зондировании исследуемого объекта импульсными источниками. Проведенные вычислительные эксперименты на суперкомпьютерах показали высокую точность разработанных алгоритмов с использованием параллельных вычислений.

Во **второй главе** дается описание разработанных автором методов, алгоритмов и программ для решения обратных задач для волнового уравнения в интегральных представлениях функции Грина, для нелинейных и линеаризованных моделей. Выполнено соответствующее численное моделирование по изучению свойств разработанных алгоритмов. Проведено сравнение вычислительных возможностей дифференциального и интегрального подходов. Показано, что оценка для числа операций в интегральном подходе значительно больше, чем в дифференциальном подходе. В данной главе исследованы постановки задач в линеаризованных моделях (приближение Борна) в задаче реконструкции с синтезированной апертурой для широкополосных и узкополосных импульсов зондирования.

Третья глава посвящена решению коэффициентных обратных задач волновой томографии с учетом эффектов поглощения. В рамках дифференциального подхода разработаны новые эффективные алгоритмы решения коэффициентных обратных задач для волновых моделей с различной зависимостью поглощения от частоты в послойных и полностью трехмерных схемах регистрации зондирующего сигнала. Впервые получены точные выражения производной Фреше для функционала невязки, как по функции скорости, так и по функции поглощения для различных постановок. В рассматриваемом диапазоне параметров, с вариацией функции скорости не более 20% и функции поглощения не более 50%, разработанные итерационные алгоритмы эффективно решают поставленную задачу. Вычислительный эксперимент с различными моделями поглощения показал, что скоростной разрез восстанавливается лучше, чем пространственное распределение коэффициента поглощения.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию и проведению вычислительного эксперимента в прямых и обратных задачах волновой томографии при проектировании ультразвуковых томографических комплексов в медицине. Показано, что в схеме с полным диапазоном данных хорошо восстанавливается не только форма неоднородных включений, но и пространственное распределение скорости звука. Точность восстановления с полными данными заметно выше, чем в томографических схемах на прохождение. В схеме на отражение восстановление абсолютного значения скорости невозможно, можно пытаться восстанавливать только границы неоднородностей. Также, если расстояние между детекторами увеличивается, для получения качественных реконструкций необходимо существенно увеличивать количество источников.

Проведены модельные расчеты по исследованию влияния плотности на возможность реконструкции неоднородностей для медицинских сред в задачах ультразвуковой томографии. Выбор значений параметров в изучаемых математических моделях ориентирован на задачи дифференциальной диагностики заболеваний молочной железы. Показано, что восстановление поля скоростей на основе волновой модели (не учитывающей плотность) не сильно чувствительно к наличию разницы в 10%-20% в плотности вещества. Удается с небольшими артефактами восстанавливать как форму неоднородного объекта, так и абсолютные значения скорости распространения волны.

В **пятой главе** дано описание разработанного в диссертации комплекса программ ПОУТИМ для суперкомпьютеров общего назначения на CPU для ультразвуковых томографических исследований в медицине, а также созданного автором комплекса программ для кластеров на графических картах. Исследованы вопросы масштабируемости, эффективности, производительности разработанных программных комплексов. Продемонстрирована возможность эффективного использования разработанного программного обеспечения для большого числа процессоров. Созданный комплекс программ обеспечивает высокий уровень масштабирования для двадцати тысяч процессов кластерной вычислительной системы «Ломоносов».

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

Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными как теоретическими выкладками, так и обширным вычислительным экспериментом, с использованием современных суперкомпьютеров в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова.

Достоверность результатов и вывод ов.

Достоверность изложенных результатов обусловливается использованием для их получения основных теоретических положений акустики, фундаментальных принципов математического моделирования, строгими аналитическими выкладками и доказательствами, подтверждается сравнением получаемых решений с данными натурного эксперимента, использованием в расчетах экспериментальных данных.

Научная новизна полученных результатов.

В работе впервые проведено сравнение вычислительных возможностей интегрального и дифференциального подходов для решения задач волновой томографии. Показано, что объем вычислений в дифференциальном подходе на несколько порядков меньше, чем в интегральном. В

интегральном подходе даже использование суперкомпьютеров не позволяет на мелкой сетке решать нелинейную трехмерную задачу волновой томографии за приемлемое время.

Линеаризация интегральных уравнений (интегральный подход) позволяет значительно сократить объем вычислений, что дало возможность в линеаризованных обратных задачах в постановке с синтезированной апертурой предложить и обосновать новые эффективные методы обращения и разработать программы решения задач на мелкой сетке.

Основные новые результаты получены в дифференциальном подходе (обратная коэффициентная задача для дифференциального волнового уравнения). Впервые разработаны эффективные алгоритмы и численные методы решения прямых и обратных задач волновой томографии для суперкомпьютеров. Впервые в дифференциальном подходе для разных постановок задач нелинейной волновой томографии в моделях, учитывающих волновые эффекты и поглощение, получены точные представления для производной Фреше функционала невязки.

Разработаны комплексы программ для высокопроизводительных суперкомпьютеров общего назначения и для GPU кластеров, что для задач волновой томографии реализуется впервые в мировой практике. Предложена архитектура программ с большим числом независимых параллельных процессов вычислений.

Впервые проведены масштабные модельные расчеты на 20480 ядрах суперкомпьютера по решению обратной задачи в послойной схеме для реальных параметров ультразвуковой томографии в медицине. Впервые продемонстрирована возможность численного решения полностью трехмерных задач волновой томографии на суперкомпьютерах с высоким разрешением и возможностью дифференциальной диагностики в медицине. На модельных расчетах показано, что в качестве начального приближения для итерационного процесса решения в ультразвуковой томографии можно использовать константу.

Разработаны новые методы и алгоритмы решения задач волновой томографии в моделях, учитывающих поглощение. Впервые на модельных расчетах показана возможность одновременного определения двух неизвестных функций – полей поглощения и модуля скорости.

Методами численного моделирования впервые исследована применимость послойных схем в решении трехмерных задач ультразвуковой томографии. Результаты показали появление небольших артефактов в послойных схемах.

Методами вычислительного эксперимента впервые определены оптимальные значения параметров ультразвуковых томографов, проведено исследование и сравнение различных томографических схем, задач с неполными данными, стандартных медицинских УЗИ аппаратов и томографических методов.

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, а именно: осуществлена постановка и разработаны эффективные математические методы решения прямых и обратных задач нелинейных волновой томографии как коэффициентных обратных задач для уравнений гиперболического типа как в послойном, так и в трехмерном случае (главы 1-3);

- Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий, а именно: разработаны эффективные итерационные численные методы решения задач волновой томографии, базирующиеся на возможности прямого вычисления градиента функционала невязки, на суперкомпьютерах. Получены точные представления для производной Фреше функционала невязки. Впервые продемонстрирована возможность решения задач волновой томографии в 3D схеме на GPU кластерах, проведены масштабные модельные расчеты на 20480 ядрах CPU суперкомпьютера по решению обратной задачи томографии (главы 4-5);

- Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно - ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента, а именно: разработаны оригинальные комплексы программ для высокопроизводительных суперкомпьютеров общего назначения и для GPU кластеров, что для задач волновой томографии реализуется впервые в мировой практике (глава 5).

Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов.

Разработанные Романовым С.Ю. методы и алгоритмы предназначены для разработки принципиально новых томографов, использующих волновые источники излучения. Потенциальными потребителями разработанного программного обеспечения в первую очередь могут быть разработчики ультразвуковых томографов для диагностики рака груди. Разработанные томографические методы могут использоваться в решении задач сейсмической разведки, неразрушающем контроле в промышленности, в биофизических исследованиях клеток крови оптической микроскопией, и т.д.

Созданное автором диссертации программное обеспечение для задачи реконструкции изображения поверхности Земли РЛС с синтезированной апертурой использовалось для обработки больших массивов реальных спутниковых данных сантиметрового диапазона.

Теоретические и практические аспекты волновой томографии исследовались автором диссертации в рамках выполнения ряда проектов РФФИ и целевых программ Минобрнауки. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты работы могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в ИМ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИНГГ СО РАН, ИЯФ СО РАН, ИПМ РАН, МГТУ, а также в других научных организациях, занимающихся рассматриваемой тематикой.

Замечания по материалам диссертации.

По материалам диссертации имеются замечания:

1. По тексту часто встречаются опечатки, например, на стр.31 – вместо слов «в настоящем главе» следует – «в настоящей главе»; на стр.39 (также стр.119) - вместо слов «экспериментальным данным «измерения» волны» следует: «экспериментальные данные «измерения» волны»; на стр.44 – вместо "скоростью волны", надо - "скорость волны"; на стр.68, 2-я формула сверху, аргумент функции Грина должен быть q, а не g; на стр.81, 3-я формула сверху - в двукратном интеграле пропущен знак второго интеграла; и т.д.
2. В тексте диссертации встречаются неудачные формулировки, например, на стр.31 написано: «… неоднородность среды вызвана изменениями скорости …», тогда как наоборот, - это изменения скорости вызваны неоднородностями среды.
3. При описании процедуры итеративной регуляризации (стр.47) использовались эмпирически подбираемые константы - λ и b, без какого-либо обоснования выбора их конкретных значений.
4. Вычислительный эксперимент в главах 1-3 для реконструкции неоднородностей проводился без внесения случайного шума в модельные сигналы детекторов (например, Рис. 1.4 - 1.6). Без экспериментов с зашумленными данными такое моделирование не является достаточно полным.
5. В постановке вычислительного эксперимента (также в главе 1), моделирующего полностью трехмерную схему ультразвукового томографического исследования молочной железы, использовались все грани модельного куба, окружающего модельную неоднородность. Однако, очевидно, что в реальном эксперименте одна грань будет недоступна для установки передатчиков и детекторов, на что указано лишь в главе 4.

6. При описании результатов численного моделирования сравнение точной и восстановленной томограмм проводится лишь визуально, хотя указание среднеквадратичной ошибки реконструкции могло бы сделать такое сравнение количественным, а не только качественным (Рис.1.4-1.6, 2.5-2.7, 3.3-3.20, 4.6, 4.8 и т.д.).

7. Решение модельных прямых задач в главе 4 для центрального сечения шара и для цилиндра того же радиуса очень полезно для сравнения двух схем регистрации данных: послойной и полной трехмерной. Однако при описании параметров этого расчета не указано использованное число членов конечных рядов, примененных для получения аналитических решений в обеих схемах.

8. В разделе 4.4.3 изучено, в частности, влияние случайного шума во входных данных на качество реконструкции трехмерного изображения, с использованием уровня шума в 3% и 10%, и делается вывод – необходимо сделать эту погрешность как можно меньше, и уровень шума 10% является верхним пределом допустимого случайного шума в измерениях. Представляется, что введение в процедуру реконструкции стандартных методов сглаживания (фильтрация сигнала в частотной области, либо вэйвлет-фильтрация, либо применение сглаживающих сплайнов) могло бы серьезно улучшить качество реконструкции по зашумленным данным.

Отмеченные недостатки диссертации носят во многом редакционный и рекомендательный характер и ни в коей мере не влияют на высокую оценку уровня диссертационной работы.

Все положения, выносимые на защиту, опубликованы и достаточно полно представлены в отечественных и зарубежных научных журналах. Автореферат диссертации правильно отражает ее основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые моменты. Материалы диссертации опубликованы в 32 научных работах, в том числе 17 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК, автор имеет 1 авторское свидетельство на компьютерную программу.

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, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области волновой томографии, а именно: впервые разработаны и обоснованы эффективные алгоритмы и численные методы для суперкомпьютеров решения обратных задач томографии в скалярных волновых моделях, учитывающих поглощение, впервые проведено полномасштабное математическое моделирование в задаче проектирования волновых томографов.

На основании вышеизложенного, считаем, что диссертационная работа Романова С. Ю. «Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач томографии в скалярных волновых моделях» является научно-квалификационной работой, соответствующей 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.

Диссертация рассмотрена и одобрена на заседании лаборатории № 13 Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, протокол № 15 от 27 ноября 2015 года.

Заведующий лабораторией № 13,
д.ф.-м.н., профессор А.А. Маслов

Главный научный сотрудник лаборатории № 13,
д.ф.-м.н. В.В. Пикалов
e-mail: pickalov@itam.nsc.ru
тел. +7 (383) 330-36-74

Наименование организации, предоставившей отзыв:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук
Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.
Телефон: +7 (383) 330-42-68
E-mail: admin@itam.nsc.ru
Web: http://www.itam.nsc.ru/