

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Зятькова Николая Юрьевича
«Разработка и оптимизация программного комплекса для дифракционного моделирования сейсмических волн с адаптацией под графические ускорители»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы исследования.

В теоретической сейсмике существует проблемы синтеза и анализа волнового поля для сложных неоднородных геологических сред со сложными границами (например, соляные купола, базальтовые траппы, рифовые структуры).

Данная работа посвящена разработке и оптимизации программного комплекса для кластера из графических ускорителей для вычисления волновых полей в слоистых средах со сложными границами. Программный комплекс реализует акустическую версию теории операторов прохождения-распространения-дифрагирования (ТОПРД), разрабатываемой группой дифракции в Лаборатории динамических проблем сейсмологии ИНГГ СО РАН, используя её аппроксимацию метод наложения концевых волн (МНКВ).

Новый метод, используемый автором диссертации, позволяет аналитически вычислять интерференционное волновое поле для сред с произвольными границами, а также отдельные волновые составляющие (аналитически производить декомпозицию сейсмического изображения на отдельные волны, в т.ч. дифракционные, ползущие, головные, а также отдельные акты каскадной дифракции).

Содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, списка работ, опубликованных автором по теме диссертации, и шести приложений. Общий объём диссертации равен 195 страницам.

Первый раздел диссертации Зятькова Н.Ю. посвящён обзору литературы по теме исследования и обзору методов сейсмического моделирования волновых полей: лабораторных, численных и аналитических. Автор описывает ценность каждой группы методов и сравнивает их по следующим параметрам: 1) скорость вычислений, 2) сложность модели среды, 3) возможность расщепления полного волнового поля на отдельные волны, 4) возможность моделирования в различных частотных диапазонах, 5) возможность вычислений без задания источника и приёмников модели.

Второй раздел диссертации Зятькова Н.Ю. посвящён описанию метода наложения концевых волн – аппроксимации ТОПРД для средних частот. В частности, автор описывает принципы матричных аппроксимаций операторов ТОПРД:

- 1) поверхностного интегрального оператора распространения;
- 2) поверхностного интегрального оператора дифрагирования;
- 3) оператора прохождения-распространения, как композицию конволюционного оператора прохождения и поверхностного интегрального оператора распространения.

Автор предлагает новую матричную аппроксимацию оператора распространения, заменившую аппроксимацию, которая использовалась в предыдущей упрощённой версии МНКВ, не учитывавшей эффект каскадной дифракции от границ слоёв. Для учёта этого

эффекта использован новый оператор – оператор дифрагирования, который математически похож на оператор распространения, но не совпадает с ним. Для того чтобы два разных оператора аппроксимировать единообразно, автор не смог воспользоваться известными аппроксимациями поверхностных интегральных операторов, разработанных в методе граничных интегральных уравнений (ГИУ). В разделе 2.1 соискатель применил более грубую (на несколько порядков) аппроксимацию по сравнению с известными. Результаты тестирования такой аппроксимации в разделе 2.2 показывают, что этого оказалось достаточно для устойчивого и корректного вычисления волновых полей в программном комплексе МНКВ. В разделе 2.3 приведено схематическое описание алгоритма МНКВ: структура всех матриц, схема их пошагового умножения и схема вычисления необходимых векторов.

Третий раздел диссертации Зяткова Н.Ю. посвящён описанию, реализованного автором, программного комплекса МНКВ.

В разделе 3.1 обсуждена архитектура программного комплекса МНКВ и пример задания слоистой модели среды с помощью данного программного комплекса. В разделе 3.2 описываются особенности и проблемы реализации программного комплекса МНКВ, возникающие на уровне требуемых вычислительных ресурсов и объёмов оперативной памяти ЭВМ. Вычисления волнового поля и отдельных волн методом МНКВ сводятся к многократным матрично-векторным операциям больших размерностей (порядка 10^5 - 10^6). В разделах 3.3-3.5 показана схема реализации компонент программного комплекса МНКВ:

1. «ИсточникГраница» – матрично-векторная схема вычисления волнового поля источника на границе с учётом каскадной дифракции,
2. «ГраницаГраница» – матрично-векторная схема вычисления распространения волнового поля от одной криволинейной границы до другой внутри заданного слоя с учётом каскадной дифракции,
3. «ГраницаПриёмники» – матрично-векторная схема вычисления распространения волнового поля от криволинейной границы слоя в приёмники с учётом каскадной дифракции.

В разделе 3.6 описана высокооптимизированная реализация процедуры заполнения (по формулам, полученным автором в разделе 2.1.1) и перемножения набора большеразмерных плотных матриц на набор векторов. Эта процедура является составной частью компонент «ИсточникГраница», «ГраницаГраница» и «ГраницаПриёмники». Автором для ускорения вычислений данной процедуры предложена алгоритмическая оптимизация заполнения и перемножения матриц на векторы, схема распараллеливания процедуры для одного графического ускорителя и схема распараллеливания процедуры для кластера из графических ускорителей. Получено общее ускорение в тысячи и более раз, по сравнению с неоптимизированной версией процедуры для однопроцессорной машины. Показана кривая масштабируемости реализованной процедуры в зависимости от числа задействованных GPU-ускорителей.

В разделе 3.8 описывается высокооптимизированная реализация процедуры заполнения и хранения большеразмерной матрицы виртуальной тени, состоящая из нулей и единиц и кодирующая освещённые и затенённые участки границы заданного слоя относительно друг друга. Автором предложены эффективные алгоритмы заполнения данной матрицы, сжатия и хранения на жёстком диске ЭВМ. Процесс заполнения матрицы тени также адаптирован соискателем для GPU-кластера.

Четвёртый раздел диссертации Зяткова Н.Ю. посвящён тестированию программного комплекса МНКВ. Для тестирования использована простая модель среды – два

полупространства, разделённые границей кусочно-криволинейной или сложной криволинейной формы. Рассмотрено семь геометрических форм границы (разделы 4.1.1-4.1.7). В разделе 4.1.8 дополнительно рассматривается трёхслойная модель с включением, порождающим дифракционные волны. Во всех перечисленных разделах автором приведены результаты вычисления элементов структуры волнового поля и их сравнения с аналитическими формулами асимптотического метода – теория краевых волн.

В разделе 4.2 приведены примеры разложения интерференционного поля на отдельные волновые события, распространяющихся во взаимно-встречных направлениях. Такое разложение, необходимое при анализе сложных волновых полей, является специфической функциональной возможностью программного комплекса МНКВ.

В разделе 4.3 приведено сравнение волнового поля в приближении 1-го акта каскадной дифракции, вычисленного программным комплексом МНКВ с полным волновым полем, смоделированным методом конечных разностей, для модели раздела 4.1.1. Приведенные количественные оценки разности этих волновых полей показали, что учёт только первого акта каскадной дифракции даёт приемлемую для инженеров-сейсмологов погрешность.

В **заключении** диссертации Зятькова Н.Ю. описаны основные итоги исследования по теме диссертации, даны рекомендации по использованию существующей акустической версии программного комплекса МНКВ и её модернизации для решения обратных сейсмических задач, приведены перспективы дальнейшей разработки темы.

Обоснованность и достоверность результатов работы

Об обоснованности и достоверности работы можно судить на основании сравнения результатов вычисления автора с помощью разработанного программного комплекса с результатом физического моделирования (Марсель, Франция), моделирования методом конечных разностей, аналитическими формулами. При использовании трёх типов сравнения, автор показал высокую точность соответствия сейсмограмм, вычисленных программным комплексом МНКВ с указанными методами. Также качество оптимизации программного кода МНКВ, разработанного автором, отмечено 1-ым местом в конкурсе «GPU: серьёзные ускорители для больших задач» в номинации «Эффективное приложение», организованном МГУ им. Ломоносова и компанией Nvidia.

Полнота опубликования результатов диссертации, соответствие автореферата содержанию диссертации.

Результаты диссертации опубликованы автором в 31 печатном издании, в числе которых 2 статьи из списка ВАК, 1 программа для ЭВМ, зарегистрированная в Роспатенте, глава в 1 учебном пособии, 10 публикациях, цитируемых в Scopus. Автор докладывал результаты работы на многих российских и международных конференциях, в том числе таких крупных геофизических конференциях как EAGE (European Association of Geoscientists & Engineers) и EGU (European Geosciences Union) в г. Копенгаген (Дания), г. Лондон (Великобритания), г. Амстердам (Нидерланды), г. Вена (Австрия). Результаты также обсуждались на семинарах в ИНГГ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН и ИВТ СО РАН. Автореферат достаточно полно отражает все основные положения диссертационной работы.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработанный автором программный комплекс МНКВ вычисляет готовое решение прямой задачи или его отдельные волновые составляющие по готовым аналитическим формулам ТОПРД, что позволяет существенно ослабить требования к численной реализации МНКВ. В итоге не требуется сходимость алгоритма МНКВ, а устойчивость

алгоритма МНКВ обеспечивается аналитическими критериями, которые следуют из типа аппроксимаций формул ТОПРД.

2. Программный комплекс МНКВ позволяет вычислять изолированные волновые поля, порожденные от отдельных границ и локальных областей, сложные волновые эффекты (дифракционные, ползущие, головные волны, отдельные акты каскадной дифракции). Это позволяет упростить процедуру решения обратной задачи восстановления материальных параметров исследуемой слоисто-блоковой среды и форм границ слоёв этой среды.

3. Программный комплекс МНКВ даёт возможность декомпозиции интерференционного волнового поля на отдельные волны, распространяющихся во взаимно-встречных направлениях. Это позволяет заменить эвристическую процедуру интерпретации полного волнового поля (интерференция этих компонент), которая необходима для существенного повышения разрешающей способности обратной сейсмической задачи.

Практическая значимость работы

Программный комплекс МНКВ можно применять, как:

- 1) решатель прямой задачи при анализе интерференционных волновых полей;
- 2) решатель прямой задачи при решении обратной задачи сейсмоки;
- 3) допускает масштабирование по координатам и времени, что позволяет проводить вычисления в стандартном диапазоне частот, а затем применение результата в широком диапазоне частот (от долей Гц до МГц).

По материалам диссертации имеется следующее замечание:

В разделе 2.1 соискатель применил более грубую (на несколько порядков) аппроксимацию сильно-сингулярных и гипер-сингулярных поверхностных интегралов по сравнению с известными аппроксимациями, разработанных в методе граничных интегральных уравнений (ГИУ). Фактически, применена одноточечная схема на элементе поверхности на основе теоремы о среднем значении интеграла. В разделе 2.2 численными тестами программным комплексом МНКВ показано, что такая аппроксимация с погрешностью порядка 1% достаточна для устойчивого и корректного вычисления сильно-сингулярных и гипер-сингулярных интегралов. Однако из текста раздела 2.1 остается неясным вопрос о том, как численно решается проблема нахождения неизвестной точки, в которой берется значение гипер-сингулярного интеграла в упомянутой теореме.

Замечание не снижает значимости полученных результатов, не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования и скорее могут быть рассмотрены как пожелание на будущее.

Заключение.

Диссертация Зятькова Николая Юрьевича «Разработка и оптимизация программного комплекса для дифракционного моделирования сейсмических волн с адаптацией под графические ускорители» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, результаты которой достоверны, опубликованы и хорошо апробированы. Содержание автореферата достаточно полно отражает результаты, изложенные в диссертации. Диссертация вносит существенный вклад в развитие теории распространения волновых полей и полностью соответствует специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам: 2 – «развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей», 3 – «разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», 4 –

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

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление правительства РФ от 24.09.2013), предъявленным к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Зятьков Николай Юрьевич достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,

доцент, к.ф.-м.н.

«27» 03 _____ 2020 г.



Подпись доцента, к.ф.-м.н., Г.В. Дятлова заверяю.
Координатор по административным
вопросам «АО Бейкер Хьюз, Россия»

E. Sviridov Е.В. Скрипка

Дятлов Глеб Владимирович
доцент, к.ф.-м.н., специальность ВАК 01.01.02 –
«Дифференциальные уравнения, динамические системы и
оптимальное управление»,
Заместитель директора по науке,
Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз»,
Адрес: Российская Федерация, 630090, Новосибирская область,
г. Новосибирск, ул. Академика Кутателадзе, 4а
Телефон: +7(383)373-17-50 (доб. 4005)
Эл. почта: Gleb.Dyatlov@bakerhughes.com