

1. Наименование работы

Моделирование распространения сейсмических волн в вулканических средах

2. Состав коллектива исполнителей

Сапетина Анна Федоровна (afsapetina@gmail.ru)

3. Научное содержание работы:

Постановка задачи

Численное моделирование распространения сейсмических волн в сложно построенных упругих неоднородных средах проводится на основе решения полной системы уравнений теории упругости с соответствующими начальными и граничными условиями, записанной в терминах вектора скоростей смещений $\vec{u}=(U, W, W)^T$ и тензора напряжений

$$\vec{\sigma}=(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz})^T.$$

В качестве области моделирования рассматривается изотропная 3D неоднородная сложно построенная упругая среда, представляющая собой параллелепипед, одна из граней которого является свободной поверхностью (плоскость $z=0$).

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = [A] \vec{\sigma} + \vec{F}(t, x, y, z), \quad \frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial t} = [B] \vec{u},$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial x} & \lambda \frac{\partial}{\partial y} & \lambda \frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial}{\partial x} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial y} & \lambda \frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial}{\partial x} & \lambda \frac{\partial}{\partial y} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial z} \\ \mu \frac{\partial}{\partial y} & \mu \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \mu \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \mu \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \mu \frac{\partial}{\partial z} & \mu \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Основные уравнения в векторной форме могут быть представлены в следующем виде:

Начальными условиями являются:

$$\sigma_{xz} |_{t=0} = 0, \quad \sigma_{yz} |_{t=0} = 0, \quad \sigma_{xy} |_{t=0} = 0, \quad \sigma_{xx} |_{t=0} = 0, \quad \sigma_{yy} |_{t=0} = 0, \quad \sigma_{zz} |_{t=0} = 0,$$

$$U(x, y, z) |_{t=0} = 0, \quad V(x, y, z) |_{t=0} = 0, \quad W(x, y, z) |_{t=0} = 0.$$

А граничными

$$\sigma_{xz} |_{z=0} = 0, \quad \sigma_{yz} |_{z=0} = 0, \quad \sigma_{zz} |_{z=0} = 0.$$

В данной постановке $\lambda(x, y, z)$ и $\mu(x, y, z)$ являются параметрами Ламе. Предполагается, что плотность зависит от трех пространственных переменных и правая часть (массовая сила) может быть представлена в виде:

$$F(t, x, y, z) = F_x i + F_y j + F_z k, \quad \text{где } i, j, k \text{ — единичные}$$

направляющие векторы координатных осей. Например, для источника типа “вертикальная сила” получим представление:

$$F(t, x, y, z) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0)f(t), \text{ где } (x_0, y_0, z_0)$$

координаты источника, а $\delta(x)$ - дельта функция.

Метод решения поставленной задачи основан на использовании конечно-разностного метода. Алгоритм построения конечно-разностной схемы изложен в статье [1]. Расчет сеточных коэффициентов в разностной схеме проводится на основе интегральных законов сохранения (поскольку параметры λ , μ и ρ могут быть разрывными). Используемая конечно-разностная схема имеет второй порядок аппроксимации по времени и пространству [1], рассматриваются только равномерные сетки. Для примера представим несколько конечно-разностных уравнений используемой схемы:

$$\frac{\rho_{i,j,k} + \rho_{i-1,j,k}}{2} \frac{u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\tau} = \frac{(\sigma_{xxi,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - \sigma_{xxi-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}})}{\Delta x} + \frac{(\sigma_{xyi-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - \sigma_{xyi-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}})}{\Delta y} + \frac{(\sigma_{xzi-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \sigma_{xzi-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}})}{\Delta z} + f_{xi,j,k}^n,$$

$$\frac{(\sigma_{xzi-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \sigma_{xzi-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}})}{\tau} = \mu l_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} \left(\frac{u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k-1}^n}{\Delta z} + \frac{w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n - w_{i-1,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} \right),$$

где

$$\mu l_{i-\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\mu_{i,j,k}} + \frac{1}{\mu_{i-1,j,k}} + \frac{1}{\mu_{i,j,k-1}} + \frac{1}{\mu_{i-1,j,k-1}} \right) \right)^{-1}.$$

Критерий устойчивости данной схемы приведен в работе [1] и имеет следующий вид:

$$\tau \leq \left(Vp_{\max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}} \right)^{-1},$$

где Vp_{\max} – максимальная скорость распространения упругих волн, а τ и $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаги дискретизации по пространству и времени соответственно.

В численном моделировании упругих волн возникают фиктивные отражения от границ моделируемой области из-за усечения реальной области моделирования. Для устранения этого эффекта в данной работе используется метод CFS-PML [2 - 4]. Он дает более «качественную» картину волнового поля для данной задачи, в сравнении с классическим методом PML. Также его преимущества заключаются в более простой реализации, поскольку не происходит расщепления основных искомым компонент волнового поля на составляющие, в отличие от PML. И данный подход более экономичен с вычислительной точки зрения. Для

больших 3D задач при использовании CFS-PML может требоваться размер памяти до 12% меньше, по сравнению с классическим PML [4].

Поскольку область расчета представляет параллелепипед, а свободная поверхность располагается на верхней его грани, то каждая из его границ, за исключением свободной поверхности, окружается поглощающим слоем. Во внутренней области волновое поле рассчитывается по первоначальным конечно-разностным уравнениям, а при попадании волны в зону поглощения, происходит расчет по новым формулам, описывающим подход к созданию поглощающих границ. Для того, чтобы не усложнять изложение, не будем представлять эти формулы.

Современное состояние проблемы

Одним из путей изучения строения геологических объектов является активный вибросейсмический мониторинг. Проведение натуральных геофизических экспериментов позволяет получить некоторые представления о скоростных параметрах упругой среды, а также о геометрии изучаемого объекта. Но в процессе обработки результатов полевого эксперимента могут возникнуть интересные эффекты, требующие дальнейшего исследования. Для их интерпретации необходимо проведение масштабного численного моделирования, которое позволяет получить большее количество данных об исследуемом объекте, чем в ходе натурального эксперимента. Таким образом, создание математических моделей изучаемых объектов и дальнейшее моделирование сейсмических полей помогают в изучении реальных объектов.

Одними из интереснейших геологических объектов для исследования являются вулканические постройки. Их исследование помогает решить множество проблем, в том числе проблему предсказания вулканических извержений, которая имеет очевидную практическую значимость.

В связи с тем, что реальная область исследования имеет довольно сложный рельеф, не всегда удается поставить площадную систему наблюдения для решения обратной задачи геофизики. Поэтому приходится решать набор прямых задач с целью определения параметров изучаемой среды, соответствующих экспериментальным наблюдениям на поверхности вулканов.

Решение задачи численного моделирования распространения упругих волн от сосредоточенного источника может требовать значительных вычислительных ресурсов, в связи со сложностью и масштабом моделируемой области. Поэтому необходима разработка параллельных программ для уменьшения времени расчета и возможностью моделирования «больших» 3D моделей упругих сред.

Караваемым Д.А. были разработаны и обоснованы методы численного моделирования сейсмических полей для 3D сложно построенных сред, характерных для вулканов. Им же разработан инструментарий для решения прикладных задач численного моделирования сейсмических полей, включающий построитель 3D моделей неоднородных упругих сред и параллельную программу для численного моделирования распространения упругих волн, реализованную на кластерах с MPP-архитектурой, с использованием технологий MPI и OpenMP. Один реальный расчет такая программа проводит в течение нескольких часов. [5, 6]

Стоит отметить консервативность в развитии алгоритмов по сравнению с современными вычислительными системами, которые развиваются быстрее. Потому возникает проблема подстройки алгоритмов под архитектуру.

В последние несколько лет стали активно применять графические процессоры для

вычислений общего назначения. Их современная архитектура позволяет эффективно выполнять вычисления с высокой степенью параллелизма. При этом графические процессоры имеют ряд плюсов перед центральными процессорами, а именно, они обладают большей энергоэффективностью и меньшей стоимостью в пересчете на производительность. Одним из вычислительных комплексов, функционирующих на базе графических ускорителей, является Информационно-вычислительный центр НГУ.

В свете приведенных фактов, стала актуальной адаптация существующих и создание новых алгоритмов и программного обеспечения для решения задачи численного моделирования распространения упругих волн на гибридном кластере с графическими ускорителями.

Полученные результаты

В ходе работы создан инструментарий для численного моделирования распространения упругих волн в сложно построенных средах магматических вулканов при вибросейсмическом зондировании. В том числе разработан построитель моделей неоднородных упругих сред и комплекс параллельных программ для решения задачи численного моделирования распространения упругих волн в 3D и 2D средах на гибридном кластере типа ИВЦ НГУ.

1. Впервые проведен расчет волнового поля для магматического вулкана Эльбрус, проведен краткий анализ полученных результатов.
2. Осуществлены оптимизации алгоритмического и программного обеспечения для реализации численных моделей на гибридном кластере типа ИВЦ НГУ.

Исследована масштабируемость разработанной программы для трехмерного моделирования волновых полей. Показано, что задача хорошо ложится на гибридную архитектуру.

4. Эффект от использования кластера в достижении целей работы:

Частичная отладка разработанных программ и большая часть расчетов в ходе работы проведена на кластере ИВЦ НГУ.

5. Иллюстрации, визуализация результатов:

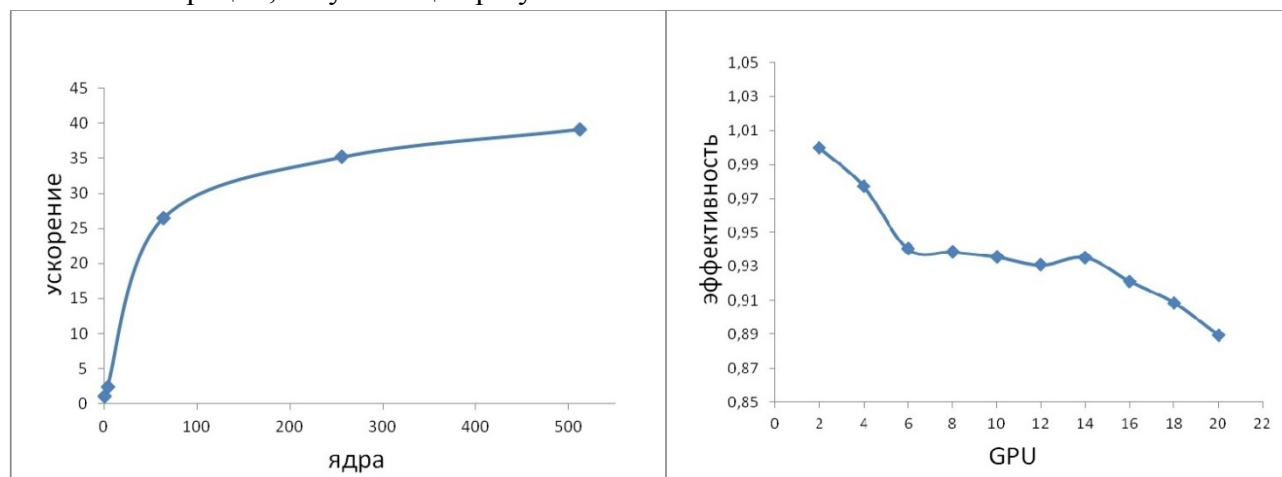


Рис. 1. Графики исследования сильной и слабой масштабируемости для программы трехмерного моделирования волновых полей

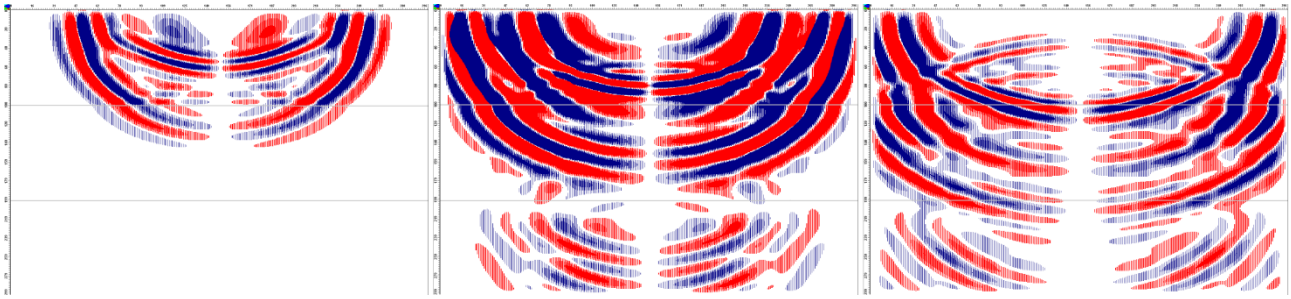


Рис. 2. Снимки компоненты V волнового поля, плоскость Ouz для трехслойной среды с источником типа центр давления, располагающимся вблизи свободной поверхности в центре, в разные моменты времени

6. Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Сапетина А. Ф. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для моделирования вулканических структур на гибридном кластере (тезисы). // XIII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Программа и тезисы докладов (Новосибирск, 15-17 октября 2012 г.), Новосибирск, 2012. С. 33–34
2. Сапетина А. Ф. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для моделирования вулканических структур на гибридном кластере (доклад). // XIII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Доклады. URL: <http://conf.nsc.ru/ym2012/ru/reportview/138100>
3. Сапетина А. Ф. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для моделирования вулканических структур на гибридном кластере // Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Математика, Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. С. 155.
4. Сапетина А. Ф. Численное моделирование распространения сейсмических волн в сложно построенных средах на гибридном кластере // Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах. Материалы XIII Всероссийской конференции (Н. Новгород, 14–16 ноября 2013 г.), Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. С. 225–229
5. Сапетина А. Ф. Численное моделирование распространения сейсмических волн в сложно построенных средах на гибридном кластере // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2014. № 3. (в печати)
6. Сапетина А. Ф. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для моделирования вулканических структур на гибридном кластере // Материалы 52-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2014: Математика, Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2014. С. 149.

7. Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию:

Впечатления положительные. Предложений не имею.

