сурсоемкие задачи, что дает исследователю возможность четко представлять характер поведения ударной волны в материале при различных режимах и условиях.

Список литературы

1. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зоновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. – Л.: Наука, 1987.
2. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Волновая динамика электровзрыва в твердых диэлектриках. // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. Вып. 5. – С. 42–48.
3. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2004.
4. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Воеводин В.В. Вычислительная математика и структура алгоритмов. – М.: Изд-во МГУ, 2006.
6. Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967.

Е.В. Лысь, В.В. Лисица, Г.В. Решетова, В.А. Чеверда

Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Проведение акустического каротажа в районах со сложным геологическим строением, повсеместное использование наклонных и горизонтальных скважин ведёт к необходимости существенного углубления понимания процессов формирования и распространения сейсмоакустических полей в трёхмерно-неоднородных средах с учётом таких особенностей горных пород, как анизотропия и поглощение. К сожалению, аналитическое описание такие волновые поля допускают только в простейших постановках, весьма далёких от реальности. В связи с этим возникает необходимость в алгоритмах, позволяющих выполнять их полномасштабное математическое моделирование, что стало возможным с появлением высокопроизводительных вычислительных систем с параллельной архитектурой.

В работе представлен метод конечно-разностного моделирования акустического каротажа для системы уравнений упругости, где тензор упругих модулей не имеет квазидиагональной структуры, что позволяет моделировать задачи с произвольной анизотропией и TTI. При таком виде тензора упругих модулей появляется необходимость использовать специальные схемы (схема на повернутых сетках, схема Лебедева), поскольку сдвинутая сетка Верьё [9] не позволяет аппроксимировать решение такой системы. Математическая постановка задачи упругости рассматривалась в цилиндрической системе координат, поскольку в этом случае удаётся избежать проблемы аппроксимации на криволинейных границах скважины и окружающей её формации.

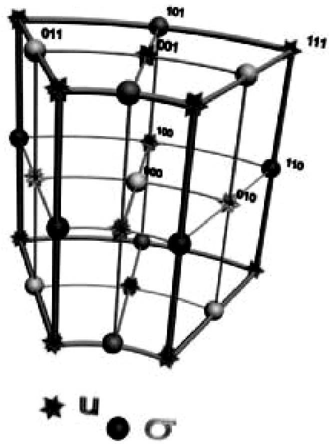

Рис. 1. Элементарная ячейка схемы Лебедева в цилиндрической системе координат. Компоненты тензора напряжений определены в узлах, отмеченных сферами, а компоненты скоростей смещений в узлах, помеченных звёздочками

В качестве граничных условий был выбран идеально согласованный слой PML (perfectly match layer).

Постановка задачи. Рассматривалась система уравнений упругости

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \sigma, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T), \quad \sigma = C_\varepsilon,$$

где ρ – плотность, u – скорость смещений, σ – тензор напряжений, ε – тензор деформаций, C – тензор упругих постоянных.

В выбранной системе координат тензор C представляется квадратной симметричной (6×6) матрицей. Для изотропного случая тензор C имеет простой квазидиагональный вид. В этом случае для конечно-разностной аппроксимации системы возможно использовать схему Вирьё [9]. В анизотропных средах тензор C теряет квазидиагональный вид, и использование схемы Вирьё приводит к необходимости интерполяции переменных и, как следствие, потере точности конечно-разностного решения. В работе [1] была предложена схема Лебедева для конечно-разностной аппроксимации системы уравнений упругости с произвольным видом тензора C, позволяющая аппроксимировать задачу без каких-либо пространственных интерполяций. Схема Лебедева является обобщением схемы Вирьё для более широкого класса задач и вследствие этого обладает сходными дисперсионными и спектральными свойствами. На рис. 1 представлена элементарная ячейка схемы Лебедева в цилиндрической системе координат.

Рис. 2. Типичное скоростное строение среды при акустическом каротаже

Геометрия расчетной области и строение сетки. Как видно из рис. 2, наиболее контрастные границы типичного скоростного строения среды при такого рода исследованиях – это границы между зондом и флюидом в скважине и стенка скважины (граница флюид-формация). Эти интерфейсы имеют цилиндрическую геометрию. Чтобы избежать численного рассеяния на этих интерфейсах, все рассмотрения проводятся в цилиндрической системе координат, координатные линии которой совпадают с наиболее контрастными границами среды.

При фиксированных шагах сетки объем элементарной ячейки будет увеличиваться при удалении от оси $r = 0$, т.е. ухудшаются дисперсионные свойства схемы и налагается более строгое ограничение на шаг по времени. Чтобы устранить эти явления, проводится измельчение сетки в азимутальном направлении (рис. 3), в результате которого разница объемов любых двух ячеек сетки (покрывающей некоторый геометрический объем) не превосходит некоторого наперед заданного числа. На интерфейсах между сетками (неизмельченной и измельченной) возникает необходимость проводить интерполяцию переменных задачи в точках, в которых определены операторы конечно-разностной схемы. Как было показано В.И. Костиным с соавторами [5], интерполяция, основанная на преобразовании Фурье, имеет экспоненциальный порядок сходимости благодаря 2π-периодичности интерполируемых функций.

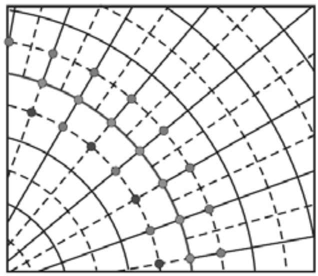

Рис. 3. Схема распределения узлов (переменных) на интерфейсе между двумя сетками

Декомпозиция области вычислений. Программная реализация данного алгоритма была выполнена на языке C++ с использованием библиотеки MPI (message parsing interface). В силу специфики расчетной области (вытянутый в вертикальном направлении цилиндр) применялась одномерная декомпозиция расчетной области, т.е. модель разрезалась на N подобластей по координате Z, где N – число процессоров параллельной вычислительной системы, задействованных при расчете конкретной задачи. Обмен между соседними процессорами осуществлялся средствами библиотеки MPI. Для повышения эффективности работы параллельного алгоритма применялись неблокирующие операторы обмена (Isend, Irecv), позволяющие осуществлять обмен данными в фоновом режиме, т.е. процесс пересылки/приема данных выполняется одновременно с расчетом внутри области. Вся область расчетов делится на условно зависимые блоки, каждому такому блоку соответствует некоторый класс (объект, в котором реализована конечно-разностная схема, предназначенная для работы в фиксированной части расчетной области).

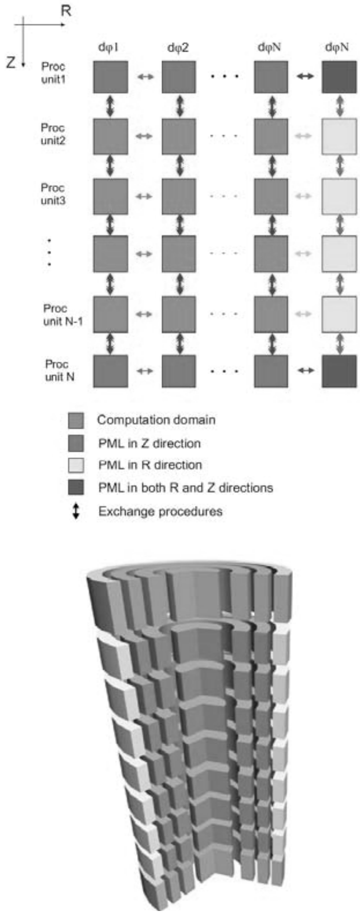

Рис. 4. Схематическое представление
декомпозиции расчетной области

Геометрическая форма всех подобластей – есть кольцо прямоугольного сечения, кроме областей, содержащих точки с координатой $r = 0$ (рис. 4, первый столбец), их форма – цилиндр.

На рис. 4 (внизу) представлена трехмерная, более наглядная диаграмма декомпозиции расчетной области. При такой организации вычислений необходимо определить два типа процедур обмена данными:1) обмен между соседними процессорами (см. рис. 4) – двойные стрелки; 2) обмен между различными классами на одном процессоре – одинарные стрелки. Реализация и очередность выполнения процедур обмена в большой степени влияют на быстродействие алгоритма в целом.

Список литературы

1. Asvadurov S., Druskin V. and Moskow S. 2007 Optimal Grids for Anisotropic Problems. Electronic Transactions on Numerical Analysis (ETNA) 26, 55–81.

2. Biot M. A. 1952 Propagation of elastic waves in a cylindrical bore containing fluid // Journal of Applied Physics 23, 997–1005.

3. Chen Y.-H. and Chew W.C. 1998. A three dimensional finite-difference code for the modelling of sonic logging tool // Jour. Acoust. Soc. Am., 103 (2), 702–712.

4. Kessler D., Kosloff D. 1991 Elastic wave propagation using cylindrical coordinates // Geophysics, 56 (12), 2080–2089.

5. 3d finite-difference synthetic acoustic logging in cylindrical coordinates / V.I. Kostin [et al.] // Geopthysical Prospecting, 2008. Electronical publication Doi: 10.1111/j.1365- 2478.2008.00643.x.

6. Krauklis P.V., Krauklis L.A. 1976 On compressional wave spectrum in a well with cemented casing string // Dynamic wave propagation theory problems, Vol. XVII. P. 156–164, Nauka (in Russian).

7. Lisitsa V. and Vishnevsky D. Lebedev type scheme for the numerical simulation of wave propagation in 3D anisotropic elasticity // Geophysical Prospecting, 2009, doi: 10.1111/j.1365-2478.2009.00862.x.

8. Pissarenko D., Reshetova G.V. and Tcheverda V.A. 2009 3D finite-difference synthetic acoustic logging in cylindrical coordinates // Geophysical Prospecting 57, 367–377.

9. Virieux J. 1986. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity – stress finite difference method // Geophysics 51(4), 889–901.