

Адаптация программного пакета SPEC-FEM3D, реализующего метод спектральных элементов для расчета полного волнового поля, к сейсмическим задачам

Гула А.К., Нефедкина Т.В.

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

GulaAK@ipgg.sbras.ru, NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Настоящая работа посвящена моделированию полей упругих волн в средах с плоскими границами методом спектральных элементов с помощью программного пакета SPEC-FEM3D и программного инструмента для создания гексаэдрических сеток конечных элементов CUBIT.

Ключевые слова

Параллельное программирование, метод спектральных элементов, поля упругих волн, программный пакет SPEC-FEM3D

1 Введение

Для исследования распространения полей упругих волн в земной коре были предложены различные методы математического моделирования [1]. Не так давно был разработан инновационный численный метод, известный как метод спектральных элементов (МСЭ). МСЭ объединяет общность метода конечных элементов с точностью спектральных методов. Метод получил параллельную реализацию в программном пакете SPEC-FEM3D [2].

2 Литературный обзор

МСЭ был впервые представлен А.Т. Patera для решения задач вычислительной гидродинамики [3]. Его разработка была результатом комбинирования точности и быстрой конвергенции псевдо-спектрального метода с геометрической гибкостью метода конечных элементов. Полиномы Чебышева были основными полиномами для интерполяции в оригинальной работе Patera [3]. Этот выбор был мотивирован тем фактом, что расширения с полиномами Чебышева обладают той же (экспоненциальной) конвергенцией, что и ряды Фурье. Следовательно, слово «Спектральный» в МСЭ относится к экспоненциальной конвергенции, она выполняется при увеличенном порядке полиномиальной интерполяции.

Альтернатива МСЭ Чебышева была разработана Patera and Madau [4], с использованием интерполяции Лагранжа с квадратурой ГЛЛ, ведущей к диагональной структуре массовой матрицы. Принимая такое приближение, Komatitsch [5] and Komatitsch and Vilotte [6], применили МСЭ для моделирования распространения волн в крупно-масштабных трехмерных структурах. Используя преимущество точности диагональной массовой матрицы, они достигли точной временной схемы и получили эффективную параллельную реализацию.

3 Моделирование трёхмерных полей упругих волн методом спектральных элементов

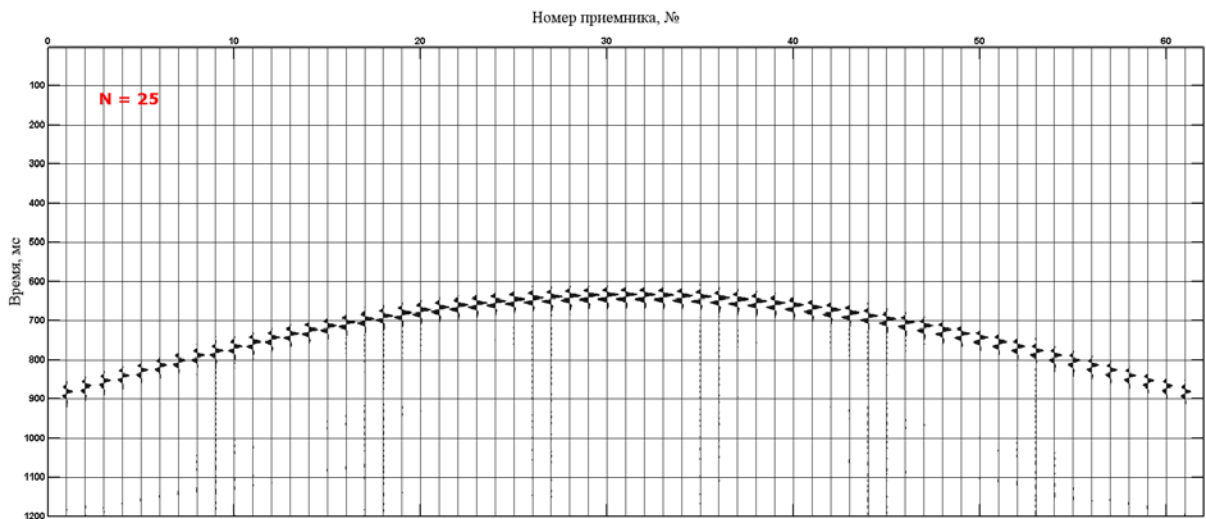
Главной задачей является адаптация сейсмологического программного пакета для задач сейсмологии, в частности для анализа амплитуд отраженных волн. Таким образом, появляется ряд затруднений, главным образом связанных с дискретизацией сетки, так как необходимо перейти от региональных масштабов к локальным. Шаг

сетки зависит от частоты и скорости, и должен быть как минимум в 1,5 раза меньше, чем минимальная длина волны, которая считается как отношение наименьшей скорости в среде на доминантную частоту сигнала.

При проведении вычислений приходится работать с большими объемами данных, параметризованная сетка занимает около 150 Гб свободного дискового пространства, что сильно влияет на скорость вычисления (счет может растянуться на месяц), поэтому для повышения производительности используется кластер. Распараллеливание задач производится с помощью системы MPI. Также присутствует возможность гибридного счета, программа частично реализована на CUDA.

Для тестирования работы программы была выбрана однородная изотропная модель среды: Габаритные размеры модели в метрах: 4000 x 4000 x 4000. Полупространство описывается скоростями $V_{P1} = 2500$ м/с м/с, $V_{S1} = 1800$ м/с и плотностью $\rho_1 = 2100$ кг/м³. Форма падающей волны задана в виде импульса Рикера. Система наблюдения – симметричная, источник заглублен и находится по центру куба, для устранения поверхностных эффектов приемная линия заглублена на 1 км. В результате симуляции получаем прямую продольную волну [Рис 1], кинематический и динамический анализ которой подтверждает корректность просчитанной задачи.

Выбор второй модели был определен важной задачей верификации различных методов трехмерного моделирования волновых полей. Существует потребность уточнить динамические особенности поля, которые рассчитывались другими методами. Рассматривается однородная изотропная двухслойная модель среды с горизонтальной границей. Габаритные размеры модели в метрах: 6000 x 2000 x 4000. Верхнее полупространство описывается скоростями $V_{P1} = 4500$ м/с м/с, $V_{S1} = 2250$ м/с и плотностью $\rho_1 = 2200$ кг/м³, нижнее полупространство представляет совокупность двух слоев с одинаковыми свойствами, дублирующий слой предназначен для исключения паразитных отражений от края модели и является своеобразным фильтром. Нижнее полупространство имеет следующие свойства: скорости $V_{P2} = 6000$ м/с, $V_{S2} = 3000$ м/с, плотность $\rho_2 = 2500$ кг/м³. Источник и приемники располагаются вдоль линии с координатами $z = -1000$ м, $y = 4000$ м. Глубина границы по отношению к линии наблюдения составляет 1000 м. Первоначальная точка имеет координату $x = 500$ м, в ней находится источник. Расстояние между приёмниками 50 м. Шаг сетки для верхнего и нижнего полупространства выбирался разным в соответствии с длиной волны. Максимальное удаление источник-приёмник равно 4000 м и покрывает докритические, околоскритические и закритические области. На [Рис 2.] и [Рис 3] представлены сейсмограммы X и Z компонент волнового поля. На X компоненте [Рис 2.] в первых вступлениях отчетливо видна прямая продольная волна P, на больших временах прослеживаются отраженная волна PP и обменная волна PS. На Z компоненте [Рис 3.] наблюдаются отраженная волна PP и двукратно отраженная PPPP.



24-Jun-2013 15:58:59

Рис 1. Сейсмограмма прямой волны с импульсом падающего сигнала в виде Рикера, с доминантной частотой 30 Гц, N - шаг сетки.

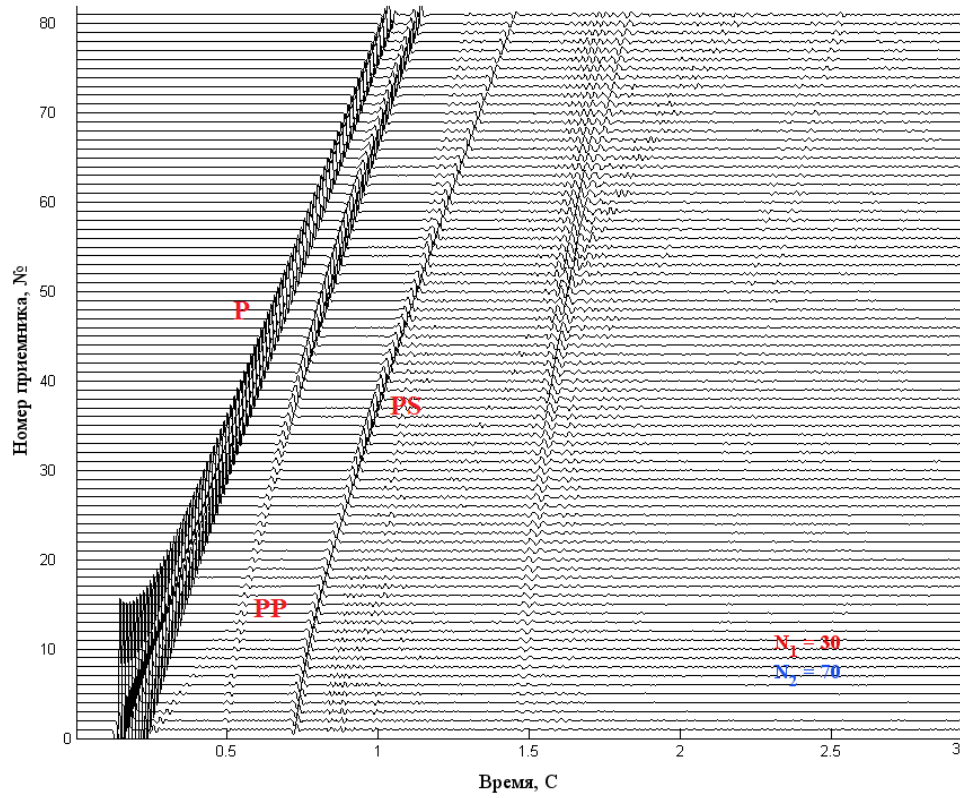


Рис 2. Сейсмограммы горизонтальной компоненты X, падающий импульс Рикера, с доминантной частотой 30 Гц, N - шаг сетки.

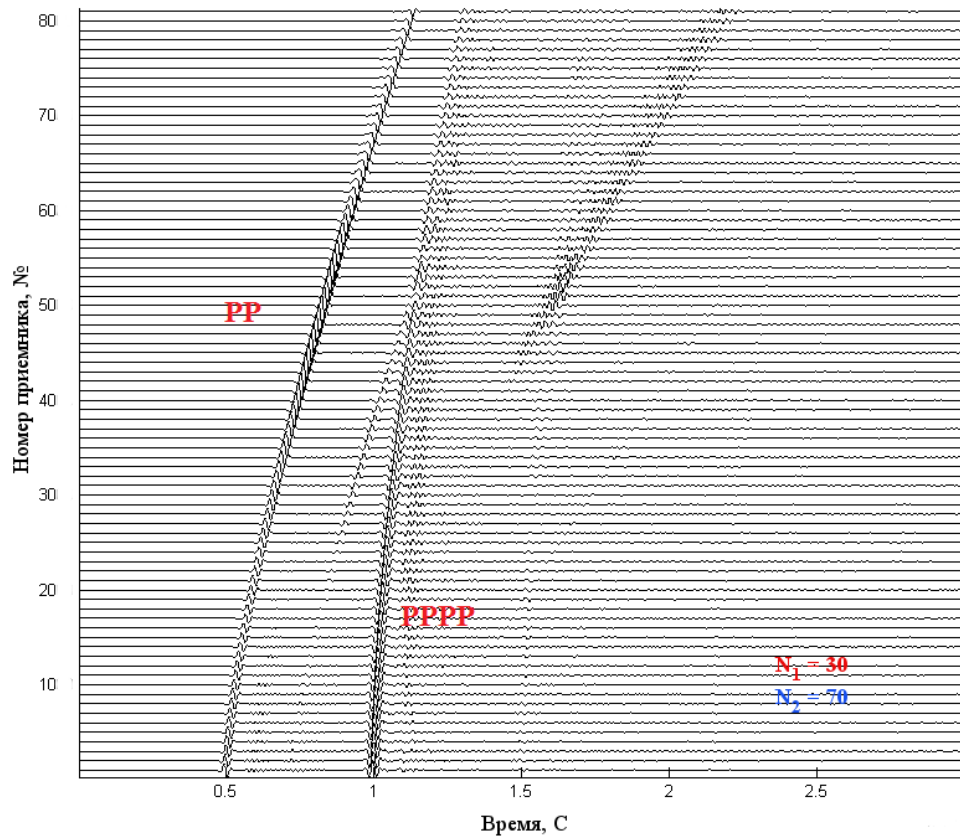


Рис 3. Сейсмограммы вертикальной компоненты Z, падающий импульс Рикера, с доминантной частотой 30 Гц, N - шаг сетки.

4 Заключение

В результате тестирования и адаптации программного пакета SPECFEM3D к сейсмическим задачам были сделаны следующие выводы:

- Ключевым параметром является размер шага сетки, который не должен превышать половину длины волны. В то же время мелкий шаг сетки создаёт дифракционный шум на сейсмограммах.
- Размер шага сетки накладывает ограничение на скоростную модель: при малых скоростях получается объем данных, требующий большего времени счёта.

5 Благодарности

Авторы благодарят руководство Сибирского суперкомпьютерного центра (ССКЦ) [7] за предоставленную возможность проведения расчетов.

Список литературы

- [1] Aizenberg A.M., Klem-Musatov K.D., Progress in seismic diffraction theory – From edge and tip waves to multiple reflections-transmissions with diffractions // Extended Abstracts of the 72-th EAGE Conference & Exhibition (2010) G034.
- [2] SPECFEM3D.User Manual. Version 2.0 “Sesame”,(July 15, 2011), Princeton University (USA) and University of Pau / CNRS / INRIA (France)
- [3] A. T. Patera. A spectral element method for fluid dynamics - Laminar flow in a channel expansion. Journal of Computational Physics, 54:468--488, 1984.
- [4] Y. Maday, and A. T. Patera 1989 Spectral Element Methods for the Incompressible NavierStokes Equations, in State of the Art Surveys in Computation Mechanics, ed. AK. Noor, ASME, New York, pp. 71-143.
- [5] D. Komatitsch. Méthodes spectrales et éléments spectraux pour l'équation de l'élastodynamique 2D et 3D en milieu hétérogène (Spectral and spectral-element methods for the 2D and 3D elastodynamics equations in heterogeneous media). PhD thesis, Institut de Physique du Globe, Paris, France, May 1997. 187 pages
- [6] Komatitsch, D., Vilotte, J.P. (1998). The spectral element method, Geophysical Journal International, 154, 146-153.
- [7] <http://www2.sccc.ru/>