Тема работы:

Параллельная реализация метода численного решения уравнения эйконала для задач сейсмической томографии

Состав коллектива:

Никитин Александр Алексеевич, н.с. ИНГГ СО РАН

Сердюков Александр Сергеевич, с.н.с. ИНГГ СО РАН

Информация о гранте:

Стипендия Президента СП-2899.2015.5 «Разработка высокопроизводительных алгоритмов сейсмической томографии для гибридных суперкомпьютеров», А.А. Никитин, 2015-2017.

Грант ВР «Разработка параллельных алгоритмов для задач сейсмической томографии и их реализация для гетерогенных вычислительных систем», рук. А.А. Никитин, 2015.

Научное содержание работы:

1. Постановка задачи.

Разработка высокоэффективной параллельной реализации алгоритма численного решения уравнения эйконала для применения при решения задач сейсморазведки методом сейсмической томографии.

2. Современное состояние проблемы.

Метод сейсмической томографии заключается в построении скоростной модели геологического разреза на основе данных времен пробега сейсмических волн. Метод получил широкое распространение при обработке региональных и глобальных сейсмологических данных, в разведочной сейсморазведке при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых, и в инженерной сейсморазведке при проведении контроля за состоянием различных конструкций и прилегающей вмещающей среды. В связи с развитием систем наблюдений и ростом объемов сейсмических данных актуальной проблемой является разработка новых, более эффективных алгоритмов и их программных реализаций, которые бы позволили повысить производительность восстановления трехмерных скоростных моделей методом сейсмической томографии. В докладе рассматриваются вопросы оптимизации и эффективности алгоритмов расчета времен первых вступлений и построения сейсмических лучей, применяемых при решении прямой задачи в методе лучевой томографии. Приводятся результаты сравнительного тестирования производительности и точности обратного лучевого трассирования на основе решения уравнения эйконала и трассирования на основе метода изгиба луча.

Времена пробега сейсмических волн могут быть вычислены путём решения уравнения эйконала, которое является нелинейным дифференциальным уравнением, имеющим несколько форм, см. разд. 3.1.1. [2]. Рассмотрим уравнение эйконала в форме:

$$\left|\nabla t(\mathbf{x})\right| = f(\mathbf{x}),\ \mathbf{x} \in \Omega \setminus \Gamma \subset R^n,$$

с заданными краевыми условиями:

$$t(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x}),\ \mathbf{x} \in \partial\Gamma,$$

где t(x) – неизвестная функция, описывающая время пробега волны в точку x, f(x) – заданная положительная функция медленности (величина, обратная к скорости распространения волны) в точке x, Ω – расчетная область пространства R^n, Г – подобласть в Ω (точка или область вокруг сейсмического источника) с границей $\partial\Gamma$ с заданным фиксированным значением времени пробега g(x). Нелинейность уравнения эйконала приводит к возникновению неустойчивостей в ходе расчетов, что требует регуляризации численной схемы, т.е. использования так называемых «вязких» решений [3], соответствующих временам первых вступлений волн, которые оказываются достаточными для многих приложений.

Одним из наиболее популярных методов, применяемых для нахождения времен пробега волн и построения сейсмических лучей, является лучевое трассирование. К этому методу относятся алгоритмы пристрелки луча (ray shooting), такие как [4], и изгиба луча (ray bending), такие как [5]. Лучевое трассирование является очень эффективным способом решения прямой задачи, так как вычисления времен пробега проводятся одновременно с построением лучей. Однако методы лучевого трассирования не гарантируют нахождения точного решения, т.е. глобального минимума времен пробега и соответствующего ему луча. Чтобы гарантировать нахождение глобального минимума необходимо решать уравнение эйконала напрямую, используя конечно-разностные методы, такие как Fast Sweeping Method (FSM) [6]. Данный метод использует противопоточную конечно-разностную схему Годунова первого порядка для дискретизации частных производных и итерации Гаусса-Зейделя с чередующимся направлением обхода сетки. Модификация данного метода, Locking Sweeping Method (LSM) [7], позволяет ускорить вычисления за счет устранения операций, заведомо не улучшающих результат. Sweeping методы первого порядка всегда сходятся к вязкому решению за конечное число итераций, которое зависит от сложности модели, при этом на каждой итерации решение не ухудшается.

При использовании sweeping методов важным вопросом является выбор оптимального критерия остановки итерационного процесса. Тестирование sweeping методов, проведенное авторами, показало, что критерий остановки в форме

$$\max_{i,j,k}(t_{i,j,k}^{(m)} - t_{i,j,k}^{(m-1)}) \le \varepsilon$$

(где m – номер текущей итерации) с ε, равным отношению минимального шага сетки к максимальной скорости в скоростной модели, позволяет достичь хорошего баланса между производительностью и точностью полученного решения. Так, для моделей SEG/EAGE Overthrust и Salt, применение такого критерия позволяет получить решение с максимальной ошибкой относительно полностью сошедшегося решения равной 0.59% и 0.18% за 17 и 24 итерации соответственно. При этом для расчета полностью сошедшихся решений требуется 346 и 339 итераций.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Решение уравнения эйконала в трехмерной области является вычислительно сложной задачей и требует использования эффективных параллельных алгоритмов, оптимизированных под особенности архитектур современных многоядерных микропроцессоров. В данной работе авторами был предложен новый подход к параллельной реализации sweeping методов, разработанные методы были названы Block Fast Sweeping Method (BFSM) и Block Locking Sweeping Method (BLSM) соответственно [9]. Благодаря оптимизации с учетом особенностей иерархии памяти в современных компьютерах, предложенные методы показывают 85-95% эффективность параллельной реализации.

Построение сейсмических лучей на основе решения уравнения эйконала осуществляется путем решения дифференциального уравнения луча:

$$\frac{dx}{dt} = V\vec{n},$$

где $\vec{n}$ – вектор нормали к фронту волны, соответствующий направлению градиента времен первых вступлений. Алгоритм обратного лучевого трассирования заключается в решении этого уравнения для заданной пары источник/приемник, используя стандартные методы, такие как метод Эйлера. При количестве источников, значительно превышающем количество приемников, целесообразно решать уравнение эйконала для приемников, а не источников, и проводить обратное трассирование от источников к приемникам, так как решение уравнения эйконала является значительно более сложной процедурой, чем трассирование.

4. Полученные результаты.

В данной работе было проведено сравнительное тестирование метода изгиба луча из пакета программ сейсмической томографии LOTOS [8] и обратного лучевого трассирования на основе решения уравнения эйконала с помощью BLSM. Тестирование выполнялось на синтетической градиентной скоростной модели с аномалиями +/- 0, 10, 20, 30 и 40%, размещенными в шахматном порядке, без сглаживания и со сглаживанием аномалий. Максимальное количество приемников – 25, источников – 10000. Пример полученных обоими методами лучей представлен на (рис. 1). Как видно из (рис. 2), ошибка времен, полученных методом изгиба, относительно времен, вычисленных при решении эйконала, тем больше, чем больше амплитуда аномалий и резкость их границ. При этом ускорение расчета времен и построения лучей с 25 приемников с помощью обратного трассирования и BLSM относительно метода изгиба начинает наблюдаться с 600 источников, а на 10000 источников оно стало 18-и кратным. Ускорение мало зависит от амплитуды и степени сглаживания аномалий, и это наблюдение в целом оказалось верным для всех проведенных тестов. Следовательно, при наличии резких высококонтрастных аномалий или при высоком отношении количества источников к приемникам рекомендуется использовать обратное лучевое трассирование на основе решения уравнения эйконала для повышения точности и производительности решения прямой задачи томографии.

В дальнейшем планируется интегрировать разработанные параллельные алгоритмы решения уравнения эйконала и процедуру обратного лучевого трассирования на его основе в пакет томографии LOTOS в качестве альтернативы используемому методу изгиба луча. Также планируется продолжить разработку и оптимизацию параллельных алгоритмов решения уравнения эйконала, в частности, их векторизованных версий.

5. Илюстрации, визуализация результатов.

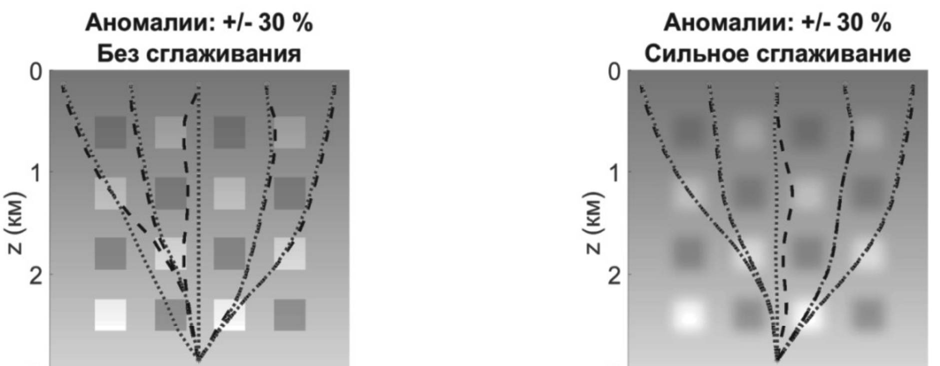

Рис. 1. Пример лучей, расчитаных методом изгиба (короткие шрихи) и обратным лучевым трассированием (длинные штрихи).

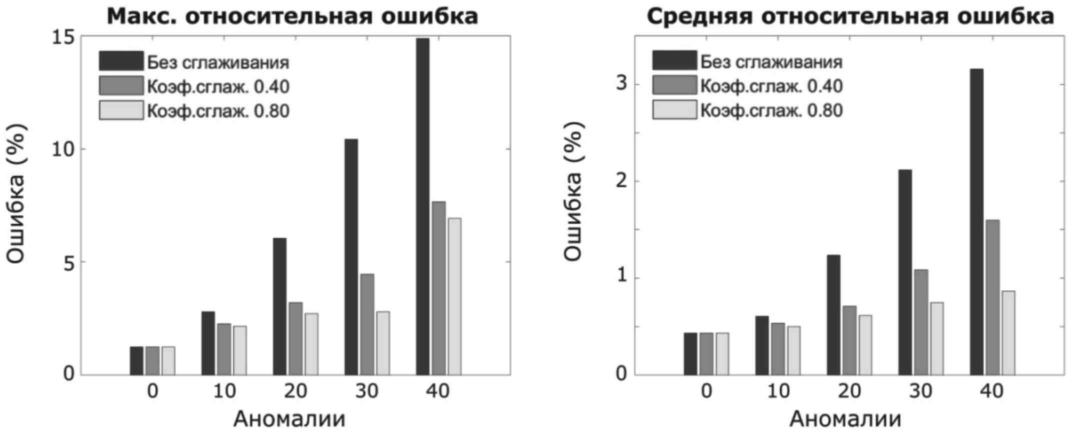

Рис. 2. Ошибка времен первых вступлений, посчитанных методом изгиба, относительно времен, посчитанных при решении уравнения эйконала.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование кластера позволило выполнить тестирование разработанных в работе алгоритмов на большем числе ядер ЦПУ, чем доступно на обычных рабочих станциях.

Список литературы:

1. Никитин А.А., Сердюков А.С., Дучков А.А. Оптимизация параллельных Sweeping методов численного расчета времен пробега сейсмических волн для вычислительных систем с общей памятью // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. – 2016. – Т. 1. – С. 244-248.
2. Cerveny V. Seismic ray theory. Cambridge University Press. 2001.
3. Crandall M. G., Lions P. L. Viscosity solutions of Hamilton-Jacobi equations // Transactions of the American Mathematical Society. Vol. 277. N 1. P. 1-42.
4. Virieux, J., Farra, V. Ray tracing in 3-D complex isotropic media: An analysis of the problem // Geophysics. Vol. 56. N. 12. P. 2057-2069.
5. Um, J., and Thurber, C.H., 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 77. N. 3. P. 972-986.
6. Zhao H. A fast sweeping method for eikonal equations // Mathematics of computation. Vol. 74, N. 250. P. 603-627.
7. Bak S., McLaughlin J., Renzi D. Some improvements for the fast sweeping method // SIAM Journal on Scientific Computing. Vol. 32. N. 5. P. 2853-2874.
8. Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 99. N. 1, P. 194-214.
9. Nikitin A.A., Serdyukov A.S., Duchkov A.A. Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs // Computational Geosciences. – 2018. – Т. 22. – № 3. – С. 775-787.