Тема работы:

Разработка методов обработки данных сейсмического мониторинга

Состав коллектива:

Дучков Антон Альбертович, зав.лаб. ИНГГ СО РАН

Никитин Александр Алексеевич, н.с. ИНГГ СО РАН

Научное содержание работы:

1. Постановка задачи.

Разработка, реализация и тестирование параллельных алгоритмов и программного обеспечения для решения задачи восстановления скоростных моделей среды 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.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Алгоритм сейсмической томографии, реализованный в данной работе, можно условно разделить на две больших этапа — решение прямой задачи, заключающееся в нахождении времен пробега сейсмических волн и траекторий лучей по начальной скоростной модели среды, и решение обратной задачи, заключающееся в построении разреженной томографической матрицы по траекториям лучей и решении полученной системы линейных уравнений для вычисления [1].

Времена пробега сейсмических волн могут быть вычислены путём решения уравнения эйконала, которое является нелинейным дифференциальным уравнением, имеющим несколько форм, см. разд. 3.1.1. [2,3]. 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, Γ – подобласть в Ω (точка или область вокруг сейсмического источника) с границей δΓ 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 [4], 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. В данной работе мы используем разработанный нами ранее параллельный алгоритм Block Locking Sweeping Method [8], основанный на LSM.

Для реализации разреженных матриц и решения системы линейных уравнений в MPI мы применяем широко используемую библиотеку PETSc (https://www.mcs.anl.gov/petsc). В качестве метода решения СЛАУ был выбран LSQR [1].

4. Полученные результаты.

В рамках работы была разработана и реализована программа сейсмической томографии ST3D [9]. Программа реализует метод сейсмической томографии, который заключается в построении скоростной модели геологического разреза на основе данных времен пробега сейсмических волн. В реализации метода применяется численное решение уравнения эйконала для расчета поля времен первых вступлений волн в заданной начальной скоростной модели, обратное лучевое трассирование для построения траекторий сейсмических лучей, построение на их основе томографической матрицы со сглаживанием и регуляризацией, решение полученной системы линейных уравнений методом LSQR. Для ускорения вычислений используются технологии MPI и OpenMP. Программа может работать как на рабочих станциях, так и на кластерах. Область применения: восстановление скоростной модели геологической среды в задачах сейсмологии и сейсморазведки. Работа над совершенствованием программы продолжается.

5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование кластера позволило выполнить тестирование разработанной программы ST3D на большем числе ядер ЦПУ, чем доступно на обычных рабочих станциях, а также провести тестирование на нескольких узлах кластера при использовании MPI для распараллеливания вычислений в распределенной памяти.

Список литературы:

1. 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.
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. Nikitin A.A., Serdyukov A.S., Duchkov A.A. Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs // Computational Geosciences. – 2018. – T. 22. – № 3. – C. 775-787.

9. Никитин А.А., Дучков А.А., Кулаков И.Ю., Чернышов Г.С. ST3D: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // № 2020615981, заявка № 2020615095 от 01.06.2020, зарегистрировано 05.06.2020, RU