



Полноволновая 3D томография: анализ проблемы, финансируемый ITF. Full wavefield 3D tomography: a case study in ITF research funding

Часть развивающихся технологий появляется благодаря финансовым вложениям в развитие новых концепций и идей. В данной статье мы рассмотрим геофизические методы улучшения разрешения визуализации резервуаров, предложенные в Imperial College и финансируемые британским Industry Technology Facilitator.

Роль ITF в развитии нефтегазовых технологий

Основанный в 1999, расположенный в Великобритании Industry Technology Facilitator (ITF) был создан для того, чтобы расширить границы для развития технологии, стимулировать новаторов выйти за рамки и сломать барьеры, которые традиционно препятствовали применению новых технологий в нефтегазовой индустрии. ITF запустил более 110 совместных проектов, вовлекших 32 миллиона фунтов стерлингов прямых инвестиций в развитие технологий для нефтяной и газовой отрасли. Вопросы, спонсируемые ITF, покрывают построение высокоразрешающего изображения, сложнопостроенные резервуары, геомеханику, рентабельное бурение и расширение, поддонные методы, управление целостностью, экологическую эффективность и т.д.

ITF сейчас поддерживается 14 нефтяными компаниями (BP, Shell, Woodside, Nexen, ExxonMobil, Total, StatoilHydro, BG Group, CNR International, Eni, Wintershall, Chevron, ConocoPhillips, и Maersk) и пятью сервисными компаниями (Technip, Expro, Halliburton, Weatherford, и Helix Energy Solutions).

В 2002 ITF выступил с предложением, которое привлекло технологии разработчиков к созданию пошагового подхода к высокоразрешающему изображению залежей углеводородов. Идеей было поставить перед разработчиками задачу улучшения как вертикальной, так и горизонтальной разрешенности сейсмических данных.

Одна из 41 полученных заявок, предлагающая полноволновую 3D сейсмотомографию как способ улучшить разрешение изображения нефтегазовых резервуаров, действительно привлекла внимание ITF. Полноволновые сейсмические методы направлены на поиск высоко детализированной модели среды, которая может произвести все сейсмическое поле. Такие методы хорошо обоснованы в 2D (см. Sirgue & Pratt, 2004; Operto и др., 2004), но так как реальная среда всегда трехмерна, практическое применение таких методов в нефтегазовой индустрии было ограничено. Полное расширение волновой томографии до случая 3D с теоретической точки зрения довольно простое, однако требует значительных вычислительных средств (Riyanti и др., 2006).

Разработанный и представленный в Imperial College в Лондоне, проект достиг окончания первой стадии, обеспеченный инвестициями в размере 1 миллиона фунтов стерлингов и поддержкой пяти членов ITF. Профессор Mike Warner из Imperial College в Лондоне возглавил команду отделения наук о Земле и Инженерных наук, предлагая концепцию

использования полноволновой 3D сейсмотомографии для определения высокоразрешенной количественной модели, способной объяснить все волновое поле, включая те фазы, от которых обычная обработка и миграция стараются избавиться. Проект также предполагает увеличение на порядок сейсмического разрешения физических свойств.

Команда профессора Warner полагала, что подобные методы имеют потенциал отображать геологическую среду со значительно улучшенным пространственным разрешением для обеспечения максимально подробной картины физических свойств среды, используя новейшие расстановки источников и приемников. Особенно они применимы в высокоразрешающем 3D мониторинге резервуаров, используя источники, находящиеся на поверхности с зафиксированными на дне или в скважине приемниками. Хотя полноволновые методы сегодня хорошо разработаны для случая 2D, их применение в разведке и добыче будет ограничено, пока они не смогут быть использованы для 3D структур и 3D сейсмических расстановок. Несмотря на то, что такое расширение довольно простое, оно представляет серьезную вычислительную проблему на практике. Imperial College предложил довольно простое вычислительное решение этой проблемы, чтобы сделать возможным практическое использование полноволнового изображения трехмерных данных сейсморазведки, используя существующую, и доступную в будущем вычислительную технику.

'www.oil-itf.com; контактирующий автор Др. Duncan Anderson, E-mail: d.anderson@oil-itf.com.

Методика увеличения эффективности

Главной целью проекта было обеспечить теоретическое обоснование и рабочий прототип компьютерного кода, который бы демонстрировал, как ранее разработанный для 2D метод полноволновой томографии может быть применен в случае 3D в форме, которая в вычислительном отношении достаточно эффективна, чтобы позволить ее применение к реальным 3D данным. Было так же предложено, в дополнение к главному проекту предоставить полностью документированную библиотеку с последовательностью построения изображений для демонстрации применимости метода к отдельным расстановкам, наборам данных и задачам

Метод

На первой стадии проекта ключевым требованием к обнаружению, эксплуатации и управлению малыми отложениями на старых площадях и максимизации извлечения со стареющих площадей стало улучшенное пространственное отображение резервуара совместно с более эффективным использованием данных мониторинга от зафиксированных скважинных приемных расстановок. В типичных приложениях линейная пространственная разрешающая способность волновых методов на порядок лучше, чем у традиционных методов, основанных на времени пробега, а пространственная разрешающая способность приближенного поля скоростей лучше, чем у традиционных глубинно-мигрированных разрезов

В двумерном случае, наиболее в вычислительном отношении эффективные алгоритмы работают в частотной области и включают логическое разложение больших разреженных матриц, используя вложенное рассечение, следующее за повторным решением для отдельных источников использующим обратную подстановку (Stekl & Pratt, 1998). Результаты исследований профессора Warner показывают, что расширение таких методов до 3D приводит к матрицам с размерностью $n^3 \times n^3$, где n - линейные размеры 3D модели. Разложение таких матриц приводит в лучшем случае к $\sim n^6$ операций и хранению $\sim n^4$ памяти. Для реалистичных моделей, где n приближается к 1000, и время расчета и объем данных становятся неприемлемо большими.

Во многих областях вычислительной физики с большими разреженными матрицами работают, используя не прямое разложение, а итерационный подход, успешно улучшая начальное предположение. На первой стадии проекта – Core Module - Imperial College применил итеративную конечно-разностную схему в 3D для акустического волнового уравнения, которое достаточно эффективно для использования в 3D томографии. Эта схема совместно с некоторыми

новыми разработками в томографии была использована для создания нескольких наборов 3D данных.

Решалась система уравнений вида $Ax = b$, где A – большая разреженная матрица, зависящая только от скорости, плотности и неупругости модели с граничными условиями, x это вектор-столбец, содержащий неизвестное поле в каждой точке сетки для одной частоты, а b – это вектор-столбец со значениями поля источника для каждой точки сети. Итеративная схема аппроксимирует матрицу A начальным оператором матрицей M , для которой решение можно рассчитать значительно быстрее. Это приближительное решение затем используется в истинной матрице A для расчета эффективного источника, который может быть вычтен из истинного источника b и будет получена остаточная ошибка. Эта остаточная ошибка используется как источник для следующей итерации, и процесс продолжается до тех пор, пока ошибка не станет меньше некоторого малого значения.

Возникает два ключевых вопроса: как выбрать начальный оператор M и как наилучшим образом обновить остаток на каждой итерации для наискорейшей сходимости. Для отображения дополнительных свойств команда использовала два оператора, чередуясь между двумя методами. В первом случае оператор дан виде $M = (2I - kA)^{-1}$, где k есть «константа» первого порядка, которую можно незначительно менять в зависимости от длины волны для достижения оптимальной сходимости. Этот оператор представляет собой разложение в ряд Тейлора первого порядка: он только распространяет волновое поле локально, но ведет себя гладко и продолжает уменьшать остаточную ошибку даже когда ошибка поля является маленькой и равномерно распределенной. Второй оператор использует простое

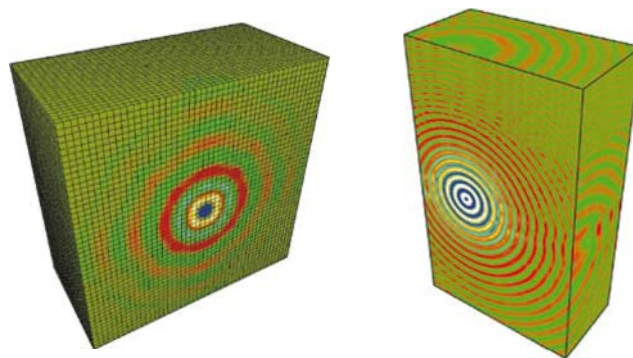


Рис.1 На левом рисунке изображен срез через приближительное поле, отвечающее монохроматическому точечному источнику, расположенному в центре однородной модели, используемое для предобуславливания итерационной схемы. Правый рисунок показывает срез через конечное поле в пределах неоднородной модели с размерами 250 x 150 x 150 ячеек. У модели есть отражающая верхняя поверхность; все другие грани поглощающие.

Методика увеличения эффективности

быстрое одномерное волновое уравнение, которое распространяет энергию от одного слоя к другому в одном из декартовых направлений, меняя все шесть направлений в порядке: вверх-вниз, вперед-назад, влево-вправо. Было обнаружено, что этот оператор был менее эффективен, когда остаточная ошибка поля была широко распределена, однако он распространяет поле на большие дистанции и служит для быстрого уменьшения ошибок в области, где остаток довольно велик.

На рис. 1 изображено поле точечного источника, распространяющееся в модели однородной среды с помощью этого оператора. Он приводит к минимизации остатка, используя перезапускаемый гибкий метод минимизации обобщенной невязки (fGMRES) - метод, который работает, чтобы гарантировать, что новый результат является ортогональным предыдущему.

Было два других подхода к созданию начального оператора. Действуя на минимальной длине волны, по четыре точки сети на длину волны, используя 3D конечно-разностный шаблон с 27 точками, который аналогичен 2D шаблону с 9 точками в Stekl и Pratt (1998). Там, где длины волны локально значительно больше, сеть была огрублена в 2 раза, используя, в дальнейшем, решение для этой грубой сети как начальный оператор для полного решения на лучшей сети. Такое огрубление сети делать несколько раз для самых больших длин волн. Укрупнение сети значительно уменьшает время выполнения на низких частотах, которые иначе сходятся очень медленно. Для прямоугольных кубических моделей модель была подразделена на перекрывающиеся области, которые являются приблизительно кубическими, применяя последовательное решение в пределах этих кубических подобластей, чтобы действовать как начальный оператор для полного решения для большей области куба. Эта блочная итерация служит для того, чтобы уменьшить время выполнения и требуемые объемы памяти.

Рис. 1 также показывает срез через финальное поле в пределах неоднородной модели, используя

схему. Схема было распараллелизована, используя потоки POSIX на мультипроцессорной многоядерной машине с разделяемой памятью. Запустив тест на время исполнения, используя до 8 одновременных потоков, получили >95% загрузки процессоров и >85% общей эффективности многопоточности. Требуемые объемы памяти зависят непосредственно от количества ячеек в модели, и определяются как n^3 в кубических моделях, что позволяет модели реалистичных размеров рассчитывать на относительно недорогих 64-битных аппаратных средствах PC. Количество итераций, требуемых для решения отдельной модели, зависит как от модели, так и от источников, поэтому точно определить время выполнения сложно. Проведя тесты на моделях, различающихся на два с половиной порядка по размерам, тесты, было найдено, что время расчета

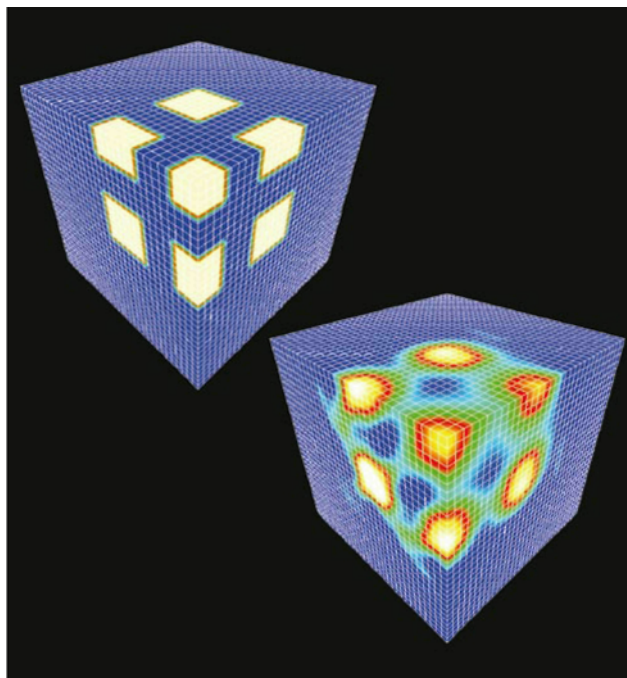


Рис.2 Вверху слева изображен срез синтетической модели. Справа снизу изображена та же скоростная модель, восстановленная 3D томографией. Модель разрешена не хуже чем в половину длины волны. В томографии использовано только два источника плоской волны.

Размеры модели	Эффективный размер для сигнала частотой 25 Гц	Объем требуемой памяти	Процессорное время для одной прямой модели	Время расчета полноволновой томографии
200 x 100 x 100	3 x 1.5 x 1.5 км	100 Мб	12 минут	200 минут
400 x 200 x 200	6 x 3 x 3 км	750 Мб	200 минут	50 часов
800 x 400 x 400	12 x 6 x 6 км	6 Гб	50 часов	30 дней

Таблица 1 Память и средние времена выполнения для различных моделей. 'Процессорное время' требует один поток. 'время расчета' требует восемь потоков (т.е. четыре двухядерных процессора), 2.6 ГГц, 64-битные процессоры, 10 частот, 10 итераций на частоту.

Методика увеличения эффективности

соответствует количеству ячеек вдоль наибольшей диагонали и определяется как $\sim n^4$ для кубических моделей.

В таблице 1 отображены затраты времени и памяти для конкретных моделей. Эти затраты значительно меньше, чем в схемах с прямым расчетом.

Результаты

Описанная схема использовалась, чтобы выполнить волновую томографию на синтетических наборах данных. В отличие от прямого разложения и обратной подстановки, время пробега в методе варьировалось прямо пропорционально количеству источников. Однако было обнаружено, что волновая томография работает в целом удовлетворительно, если данные от большого количества источников объединены, чтобы обеспечить относительно небольшое количество распределенных комбинированных источников, которые тогда используются, чтобы выполнить томографию. Эти сгруппированные источники могут быть смоделированы параллельно на отдельных узлах, которые не разделяют память и которые требуют только довольно скромной полосы пропускания.

Для томографии использовалось 6 частот по 10 итераций на каждую. Все источники были сгруппированы, чтобы сформировать только два комбинированных источника приблизительно плоской волны: первый в основании модели, и второй - на левой задней грани. Есть много других способов объединить источники, и обычно способ, которым комбинированы индивидуальные точечные источники, меняется в процессе томографии. Использование только двух фиксированных источников плоской волны, однако, прекрасно демонстрирует мощность подхода.

Рис. 2 показывает, что модель была прекрасно восстановлена. Она пространственно разрешена не хуже чем в половину длины. Все аномалии расположены в правильной позиции, и они хорошо отделены от их соседей. Абсолютный уровень аномалий восстановлен хорошо, и восстановленная модель близко напоминает первоначальную модель, сглаженную Гауссовым фильтром.

Очевидно, что предложено первое точное восстановление высокоразрешенной модели в полном 3D, используя волновую томографию на простых аппаратных средствах. Эталонные тесты проекта демонстрируют, что полноволновая томография выполнима на моделях размером 800x400x400 ячейки, что соответствует $\sim 12 \times 6 \times 6$ км на 25 Гц, со временем расчета порядка месяца на относительно обычных компьютерных аппаратных средствах

Расширив волновую томографию в 3D и используя эти коды в итерационной линеаризованной схеме инверсии, которая аналогична той, что в настоящее время используется для отображения данных в 2D, этот проект определил возможную полезную роль, которую 2D/3D схемы инверсии могут иметь как недорогие схемы аппроксимации в 3D.

Следующая фаза проекта начнется с дополнительных инвестиций в 1.5 миллиона фунтов, обеспеченных ITF.

Литература

- Operto, S., Ravaut, C., Improta, L., Virieux, J., Herrero, A. and Aversana, P. [2004] Quantitative imaging of complex structures from multi-fold wide-aperture data: a case study. *Geophysical Prospecting*, 52, 625-651.
- Riyanti, CD., Erlangga, Y.A., Plessix, R.E., Mulder, W.A., Vuik, C. and Oosterlee, C. [2006] A new iterative solver for the time-harmonic wave equation. *Geophysics*, 71, E57-E63.
- Sirgue, L. and Pratt, R.G. [2004] Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies. *Geophysics*, 69, 231-248.
- Stekl, I. and Pratt, R.G. [1998] Accurate viscoelastic modelling by frequency-domain finite differences using rotated operators. *Geophysics*, 63, 1779-1794.