

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПРЯМЫХ И ОДНОКРАТНО ОТРАЖЕННЫХ
ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ТРЕХМЕРНЫХ
НЕПАРАЛЛЕЛЬНО-СЛОИСТЫХ СРЕДАХ**

А.А. Мухин*, А.В. Решетников*, И.А. Гирман*
(* ООО «ГЕОВЕРС», г. Москва)

**TECHNOLOGY OF DIRECT AND SINGLE-REFLECTED ELASTIC WAVES
FIELD CALCULATION FOR 3D NON-PARALLEL LAYERED MODELS**

A.A. Mukhin*, A.V. Reshetnikov*, I.A. Girman*
(* *GEOVERS, Ltd.*)

Аннотация. В настоящей работе описывается технология моделирования волновых полей для трехмерных не параллельно-слоистых сред, основанная на применении лучевого метода. Нетривиальная задача слежения траектории лучей, как отраженных, так и обменных волн, от источника взрыва к сейсмоприемнику в объеме решена путем введения поверхностных источников для каждой границы скоростной модели. Каждый поверхностный источник представляет собой функцию направления луча, попавшего в данную точку границы из точки взрыва (или приемника). Путем попарного сравнения данных функций, заданных на сетке, на поверхности каждой границы удастся выявить точки событий (отражения/преломления – в зависимости от типа рассчитываемой волны) и проследить луч, заведомо попадающий из пункта взрыва в пункт приема с известной точностью. Полученная информация используется для формирования географов и результирующего волнового поля.

Abstract. This work describes technology of elastic waves field computation for 3D non-parallel layered models. The technology is based on ray-method application. The idea is to separate calculations of the ray trajectories from source and receiver to the bound, instead of monitoring ray-trajectory directly from source to receiver. For each pair of source-receiver, at

each border, surface sources (grid-defined functions of ray-in angle) are calculated and compared to define the incident (reflection or refraction) points. This information allows to select and trace the rays, coming to the receiver with defined accuracy, and therefore to form the wave field.

1. Введение

При обработке и анализе сейсмических данных все чаще встречаются ситуации, когда одномерных и (или) двумерных скоростных моделей геологической среды становится недостаточно для ее корректного описания и исследования. Использование же трехмерных моделей сопровождается известными сложностями. Если для ряда параллельно слоистых моделей задача расчета волнового поля может быть решена в явном виде, то при дальнейшем усложнении как геометрии слоев, так и распределения скоростей в геологических телах, применение и/или получение аналитического решения становится довольно трудоемким, а иногда и вовсе невозможным. Введение же упрощений в модель не всегда оправдано, так как может не только существенно исказить результат, но и просто исключить интересующие его фрагменты. Применение конечно-разностных методов расчета позволяет в этом случае получить полный и корректный результат, однако накладывает свои ограничения, прежде всего на вычислительные и временные ресурсы. В данной работе предпринята попытка разработки относительно гибкой технологии, позволяющей решить прямую задачу для моделей широкого класса, с границами раздела, ограниченными только условием однозначности в вертикальном направлении. Технология основана на использовании лучевого метода [1,2].

2. Схема метода

Слежение траектории луча напрямую от источника к приемнику (или иными словами “пристрел”) в трехмерных скоростных моделях – нетривиальная задача. Особенно если модель содержит непараллельные слои, и нас интересуют не только прямые, но и отраженные (или даже кратные) волны. Представленный метод основывается на разделении лучевых траекторий на две части: отдельно от источника и от приемника до целевой границы. Вместо последовательного пуска и анализа траекторий лучей непосредственно из пункта взрыва (далее ПВ) в пункт приема (далее ПП), вся поверхность целевой границы обстреливается лучами из ПВ и ПП. При этом поиск траектории луча, отвечающего реальному событию на границе, сводится к анализу информации об углах входа в границу лучей, пущенных из соответствующих точек. Упрощенная схема вычислений изображена на Рис.1. Для реализации технологии был разработан сервис по работе с поверхностями, основанный на понятии поверхностного источника [3].

Каждая граница скоростной модели представляется в виде математически заданной поверхности, покрытой равномерной прямоугольной сеткой. В ходе обстрела данной целевой границы в каждой ячейке соответствующей сетки сохраняется информация о времени хода по лучу и направлении луча, попавшего в данную ячейку. Таким образом формируется вышеупомянутый поверхностный источник, являющийся функцией, заданной на сетке на поверхности целевой границы. Для каждой границы модели рассчитывается набор таких поверхностных источников, соответствующих всем ПВ и всем ПП выбранной системы наблюдения.

На втором этапе вычислений (Рис.1.), поверхностные источники (сетки) каждой границы модели от каждой пары ПП-ПВ сравниваются на предмет выполнения условия отражения/преломления (в зависимости от типа рассчитываемой волны). Ячейки сетки,

в которых выполнилось событие, формируют массив структур, каждая из которых соответствует лучу, заведомо попадающему из текущего ПВ в текущий ПП с известной точностью. Стоит отметить, что в случае криволинейной границы таких ячеек может быть несколько, что означает наличие в данном теле множественных лучевых путей, однако не отражается на общей схеме вычислений. После объединения ячеек событий для всех границ и всех пар ПВ-ПП происходит переход к последнему этапу (Рис.1.) – слежение лучей уже непосредственно из ПВ в ПП с целью получить информацию о траекториях и полном времени хода. При необходимости, на этом этапе проводится уточнение углов пуска луча (“пристрел”), для более точного попадания в сейсмоприемник. В ходе финального пуска лучей производится учет ослабления амплитуды волны за счет отражения/преломления на границах, расчет геометрического расхождения вдоль траектории луча, и формирование волнового поля.

3. Численный эксперимент

В ходе работы был проведен ряд тестов описанной технологии на синтетических данных. Акцент был сделан на проверку возможности применения метода для непараллельно-слоистых 1D-3D скоростных моделей. Пример одной из таких моделей, содержащих однородные, изотропные геологические тела, приведен на Рис.2. Система наблюдений состояла из двух ПВ и вертикальной скважины в центре модели. В качестве импульса источника был использован импульс Рикера [4] с частотой 40 Гц. Коэффициенты отражения/преломления рассчитаны по аппроксимационным формулам Аки-Ричардса [5]. Результирующие поля приведены на Рис.3.

Стоит отметить одну особенность данной схемы – получение полного и корректного результата в ней практически полностью зависит от успешной работы кинематической составляющей. И единственным числовым параметром,

предложенным для задания пользователем, является размер ячейки сетки поверхностного источника. С одной стороны, это накладывает определенные ограничения на использование технологии. Но с другой, таким образом пользователю предоставляется возможность контролировать производительность (время) расчетов, которая непосредственно связана с размером ячейки сетки поверхностного источника. Кроме того, проведенные тесты показали, что критичным является лишь адекватный выбор порядка этой величины: меньшие ее вариации не оказывают заметного влияния на результат (Рис.4.).

В целях проверки технологии были также проведены сравнения результатов, полученных лучевым и конечно-разностным методами. Пример скоростной модели и результирующих волновых полей приведены на Рис.5 и 6. Отметим, что для получения относительно разрешенного результата при запуске конечно-разностного моделирования, были установлены следующие значения параметров: шаг по координатам – 2 м., шаг по времени – 0.1 мсек. Кроме того, потребовалось расширить саму модель с целью избежания нежелательных артефактов в результирующем поле, связанных с отражениями от границ области моделирования. Эти факторы привели к существенному увеличению времени расчета (до порядка по сравнению с лучевым методом).

4. Преимущества и недостатки метода

Среди преимуществ данного метода необходимо прежде всего отметить относительную гибкость алгоритмов. Во-первых, при необходимости они позволяют получать поля и (или) годографы только определенных типов волн (продольных, отраженных от данной границы и т.п.), если другие не представляют интереса. При этом текущая реализация позволяет использовать различные типы исходного импульса

источника, как синтетические, так и полученные из реальных данных. Учет динамики в результирующем поле (ослабление амплитуды при отражении/преломлении, геометрическое расхождение) также абстрагирован, и может быть исключен, если интересует только кинематическая картина распространения волн в модели.

Во-вторых, представленная схема позволяет разбить задачу на логически завершённые и независимые этапы, что делает ее адаптируемой для параллельных вычислений и экономной по времени и ресурсам. В-третьих, метод обобщается на случай моделей с более сложной топологией и распределением скоростей. При наличии сервиса для описания сложно построенных моделей и слежения лучей в них, сама технология построения поверхностных источников и результирующего поля не требует сильного усложнения. То же самое можно сказать и о задаче расчета полей кратных волн.

Что касается потенциальных недостатков метода, то к наиболее весомым относятся прежде всего ограничения на топологию скоростной модели, связанные с ограничениями лучевого метода как такового.

Список рисунков

1. Схема вычислений, производимых для каждой границы скоростной модели.
2. Пример синтетической непараллельно-слоистой 3D скоростной модели. Карта скоростей представлена для продольных волн.
3. Результат лучевого моделирования для скоростной модели (Рис.2.) по двум ПВ. Z-компоненты соответствующих волновых полей.
4. Эквивалентные фрагменты волновых полей, рассчитанных для различных значений размера ячейки сетки поверхностного источника: а – 10м, б – 15м, в - 20 м. АРУ использована при отображении.

5. Пример синтетической непараллельно-слоистой 3D скоростной модели. Карта скоростей представлена для продольных волн.
6. Результаты моделирования для скоростной модели (Рис.5.): а – конечно-разностное, б – лучевое. Z-компоненты соответствующих волновых полей.

Список литературы

1. А. С. Алексеев, Б. Я. Гельчинский. О лучевом методе вычисления полей волн в случае неоднородных сред с криволинейными границами раздела. Вопросы динамической теории распространения волн. Сборник III. – Л., 1959г., стр. 11-107
2. А.В. Решетников, А.А. Табаков, А.А. Мухин, В.Л. Елисеев. Методика расчета кинематических характеристик упругих волн лучевым методом в условиях множественных путей. Материалы международной научно-практической конференции «Гальперинские чтения-2006». 2006, стр. 25-27
3. А.А. Мухин, А.В. Решетников, И.А. Гирман. Моделирование поля прямых и однократно отраженных продольных и поперечных волн в трехмерных непараллельно-слоистых средах. Материалы международной научно-практической конференции «Гальперинские чтения-2007». 2007, стр. 40-42
4. Ricker N. [1953] The form and laws of propagation of seismic wavelets. Geophysics, vol. 18, pp. 10-40
5. Aki K. and Richards P.G. [1979] Quantitative Seismology, vol. I, pp. 141-150