ISSN 0135-3500. Записки Санкт-Петербургского государственного горного института. 1994. Том 139

УДК 622.831.322.01

О.В.КОВАЛЕВ, С.С.АНДРЕЙКО

ПРИМЕНЕНИЕ ЛУЧЕВОЙ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ВЫБРОСООПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ В ПОДГОТОВЛЕННЫХ К ОТРАБОТКЕ СТОЛБАХ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Лучевая сейсмотомография используется в сейсморазведке как один из приемов интерпретации данных. С ее помощью можно восстановить детальную картину строения пород в пространстве между двумя горными выработками. Пространственное распределение затухания или скорости распространения упругих волн рассчитывается с помощью линейных интегралов или их аппроксимаций вдоль лучей и воспроизводится в цифровом виде. Решение больших систем линейных уравнений, связывающих измеряемые интегральные параметры и характеристики изучаемых геологических объектов, производится с помощью различных алгебраических алгоритмов. В основу анализа распространения упругих волн между выработками положены представления геометрической оптики. Возможности алгоритмов восстановления проиллюстрированы в процессе обработки экспериментальных результатов шахтных исследований. Метод позволяет воспроизводить двумерное распределение вариаций исследуемых параметров.

Методы томографического исследования структуры неоднородных объектов самой различной природы благодаря успехам вычислительной математики, современному цифровому аппаратурному и компьютерному оснащению в последнее десятилетие развивались чрезвычайно интенсивно. Особый интерес представляет использование томографических методов для исследования геологических объектов в горном деле. Однако следует отметить, что в горном деле количество высказанных заманчивых идей и проектов, связанных с использованием реконструктивной вычислительной томографии, намного превышает число проведенных реальных исследований. Известно незначительное число источников, в которых дано описание реальных исследований по применению в горном деле томографии.

Это связано с тем, что геофизическая томография (геотомография) имеет ряд важных особенностей. Прежде всего она отличается масштабами физических явлений и геометрическими характеристиками сканирования. Размеры объектов и расстояния в геофизике весьма значительны, поэтому в целях обеспечения достаточного уровня принимаемых сигналов геофизические исследования проводятся на более низких частотах. Пространственное разрешение структурных образцов, восстановленных на основе регистрируемых сигналов,

колеблется от первых метров до нескольких десятков метров. Кроме того, для решения задач применяются различные нерегулярные схемы сканирования. Обычно имеются два профиля наблюдений, различным образом ориентированные друг относительно друга. При этом могут меняться как длина лучей, так и густота их пересечения в среде. Бо́льшая часть лучей пересекает исследуемую среду преимущественно в одном направлении. Этот факт приводит к тому, что классическая параметризация исходных данных по углам наклона становится невозможной, а составляемые системы линейных уравнений могут оказаться вырожденными. Поэтому для использования классических алгоритмов вычислительной томографии, применяющих данные, параметризованные по углам, необходима их специальная интерполяция. В нашем случае принята параметризация по номерам источников и приемников.

Рассмотрение распространения упругой волны основано на приближениях геометрической оптики. Типичная схема системы наблюдений выглядела следующим образом: источник упругих колебаний располагался в одной горной выработке, а приемники – в другой. Эффективное изучение массива между выработками обеспечивалось расположением отдельных источников и приемников сигнала в различных точках выработок, в результате чего это пространство просвечивалось множеством лучей с различной ориентацией. Регистрируемые сигналы несут информацию о времени распространения, используемую при измерениях скорости, и информацию об амплитуде, необходимую для определения затухания.

Некоторые возможные области использования геотомографии таковы: выявление областей аномального строения в массиве горных пород, оценка напряженного состояния, обследование подземных хранилищ, проведение в шахтных условиях картирования выклинившихся и утерянных залежей и т.д.

В настоящей работе описывается метод интерпретации данных для случая прямолинейного распространения сейсмических волн, приводятся результаты модельного изучения его возможностей и использования метода при обработке экспериментальных данных, полученных в шахтных условиях при определении контуров выбросоопасных геологических нарушений.

М о д е л ь с р е д ы. Исследуемая среда аппроксимировалась кусочно-постоянной моделью. Двумерный ее срез, в плоскости которого велось восстановление свойств, был разбит на дискретные ячейки произвольных размеров по обеим осям. При этом форма ячеек может быть произвольной – квадратной, прямоугольной, круглой и т.д. Предполагаем, что в пределах ячейки свойства среды будут постоянными, что безусловно верно при стремлении ячеек к нулю. Будем нумеровать ячейки индексами k, l, m и n по вертикалям и горизонталям. Обозначим через A_{kl} и A_{mn} коэффициент поглощения-рассеяния, или медленность. Условимся, что величина A с индексами k и l будет применяться в решении прямой задачи, а с индексами m и n – при решении обратной задачи или восстановлении сечения среды. Длину луча, просвечивающего исследуемую среду, обозначим через K_{ij}. Индекс i соответствует номеру конкретного источника, а j – номеру прием-

ника, в который рассматриваемый луч приходит. Измеренную или определенную тем или иным способом амплитуду волны обозначим U_{ij}. Величина U_{ij} соответствует выражению

$$U_{ij} = \frac{U_c}{R_{ij}} \exp(-D_{ij}), \qquad (1)$$

где U_c – амплитуда излучаемого сигнала, D_{ij} – линейный интеграл коэффициента поглощения-рассеяния по лучу длиной R_{ij}.

Если предположить, что коэффициент поглощения-рассеяния по длине всего луча постоянный и равен A_{ij}, то получим следующее выражение

$$D_{ij} = R_{ij} A_{ij}. \qquad (2)$$

Формула (2) будет верна, если считать, что A_{ij} – это постоянная в пределах ij-го луча медленность (величина, обратная скорости волны). Следовательно, мы можем ввести величину A_{ij} – постоянную для всего ij-го луча. Величина A_{ij} – среднее или эффективное поглощение, или медленность. В последнем случае, если на самом деле свойства среды по лучу меняются, среднее по лучу или лучевое среднее можно определить, рассчитав D_{ij} для конкретной постановки задачи:

$$A_{ij} = D_{ij}/R_{ij}. \qquad (3)$$

В дальнейшем будем оперировать с абстрактными лучевыми данными D_{ij} и параметрами среды $A_{kl}(A_{mn})$, независимо от типа исследуемых волн и вида используемых волновых характеристик (амплитуд или времен). Обозначим через R_{ijkl} отрезок луча ij длиной R_{ij}, лежащий в определенной ячейке с индексами k и l. Весовой коэффициент, учитывающий вклад конкретной ячейки kl в формирование луча R_{ijkl}

$$S_{ijkl} = R_{ijkl}/R_{ij}. \qquad (4)$$

Поскольку исследуемая область может включать в себя лишь часть луча ij, необходимо определить также сумму весовых коэффициентов по лучу – суммирование ведется по всем k-, l-ячейкам среды. При этом для тех ячеек, через которые луч ij не проходит, S_{ijkl} будет равно нулю. Сумма весовых коэффициентов

$$S_{ij} = \sum_{k,l} S_{ijkl}. \qquad (5)$$

Для решения прямой задачи средний лучевой параметр может быть найден как среднее значение по всем ячейкам среды с учетом весового коэффициента S_{ijkl} и их суммы:

$$A_{ij} = \frac{1}{S_{ij}} \sum S_{ijkl} A_{kl}. \qquad (6)$$

Сумма весовых коэффициентов для конкретной ячейки среды mn определяется суммированием по всем используемым при решении обратной задачи лучам ij:

$$S_{mn} = \sum_{ij} S_{ijmn}. \qquad (7)$$

Решение обратной задачи о восстановлении сечения параметров среды A_{mn} по исходным данным D_{ij} или лучевым средним A_{ij} условимся называть восстановлением. Обозначим N – количество лучей, проходящих из источников в приемники, и K – общее количество ячеек, на которые разбита среда. Теперь можно составить систему линейных уравнений:

$$A_{ij} = A_{mn} S_{ijmn}. \qquad (8)$$

Всего получится N уравнений для K неизвестных, причем неизвестными будут величины $A_{mn}(A_{kl})$, коэффициентами – $S_{ijmn}(S_{ijkl})$, а значениями – A_{ij}. Задача определения A_{mn} сводится к решению системы линейных уравнений (8).

Используемая нами модель прямолинейного распространения сейсмических волн является близкой аппроксимацией реальной физической картины, если выполняются следующие условия:

$$d \gg \lambda/2\pi \qquad (9)$$

и

$$\delta \gg \lambda/\pi, \qquad (10)$$

где d – расстояние между источником и приемником упругих колебаний; δ – толщина скип-слоя в среде; λ – длина волны в среде.

Кроме того, необходимо также, чтобы показатель преломления сейсмической волны изменялся достаточно плавно.

Как показали результаты шахтных экспериментальных исследований, левые части неравенств (9) и (10) изменяются соответственно от 470 до 628 и от 12 до 120 м, тогда как длина продольной сейсмической волны на расстояниях между источником и приемником от 50 до 200 м изменяется от 2,4 до 7,5 м при изменении диапазона частот от 2300 до 600 Гц. Показатель преломления соляных пород Старобинского месторождения также меняется весьма плавно. Следовательно, допущение прямолинейности распространения сейсмической волны в наших условиях является вполне обоснованным. Кроме того, экспериментальные данные и примеры восстановления показывают, что введение коррекции на искривление лучей оправдано только при условии достижения очень высокой точности измерений, которую существующие системы обеспечить не могут.

А л г о р и т м в о с с т а н о в л е н и я с е ч е н и я с р е д ы. Для восстановления сечения исследуемой среды использовались алгебраические алгоритмы. В отличие от алгоритмов, традиционно базирующихся на интегральном представлении при регулярной параметризации исход-

ных данных по углам прохождения, все математические выкладки содержат только алгебраическую форму, а интегралы заменены суммами. Алгебраические процедуры восстановления сечения имеют ряд серьезных преимуществ. Они отличаются быстродействием, обладают желаемой гибкостью в отношении геометрии наблюдений и допустимой формы лучевых траекторий, дают достаточно устойчивое решение. Все это делает применение алгебраических процедур восстановления наиболее предпочтительным.

Рассмотрим те алгебраические алгоритмы лучевой томографии, которые использовались при решении обратной задачи. При обработке экспериментальных данных применялся самый старый, самый простой и самый распространенный алгоритм – обратное проецирование. В алгебраической форме записи результат обратного проецирования может быть представлен следующим образом:

$$A'_{mn} = \frac{1}{S_{mn}} \sum_{ij} A_{ij} S_{ijmn}. \qquad (11)$$

Как видно из (11), полученный результат – это просто осреднение. Аналогичное осреднение производит среда при формировании регистрируемого сигнала или мы сами при решении прямой задачи по формуле (6). Единственное, что меняется – это индекс суммирования. Вместо номеров ячеек – номера источников и приемников и нормирующая средняя сумма (7) вместо (5). Данный алгоритм является наиболее быстрым и устойчивым к наличию помех и резких неоднородностей. Он позволяет оценить в целом средние значения коэффициента поглощения-рассеяния или скорости волн в исследуемой среде. Также по полученным с его помощью сечениям можно принципиально решить вопрос о наличии или отсутствии в пределах исследуемой среды крупных аномалий параметров. Однако данный алгоритм выдает по сечению заниженные значения в пределах положительных аномалий и завышенные значения в пределах отрицательных аномалий.

Следующим алгоритмом, который использовался при обработке экспериментальных данных, был алгоритм итерационного восстановления. В настоящее время имеется значительное количество представителей этого семейства алгоритмов. Смысл их заключается в решении обратной задачи методом последовательных приближений. Предположим, что получено сечение среды в результате обратного проецирования по формуле (11). Будем считать это нулевым приближением с номером итерации q ($q = 0$). Тогда

$$A'_{mn}(q) = A'_{mn}(0) = A'_{mn}. \qquad (12)$$

С учетом формулы (6) рассчитаем для нулевой итерации модельное среднее параметра по каждому лучу:

$$A'_{ij}(q) = \frac{1}{S_{ij}} \sum S_{ijkl} A'_{kl}(q). \qquad (13)$$

Далее по каждому лучу найдем расхождение между экспериментальным и расчетным лучевым средним:

$$dA_{ij}(q) = A_{ij} - A'_{ij}(q). \qquad (I4$$

Затем определим среднеквадратическое расхождение для конкретного номера итерации:

$$M(q) = \frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i,j} dA_{ij}(q)}, \qquad (I5$$

где N – количество лучей.

В том случае, если величина $M(q)$ нас удовлетворяет, итерации можно прекратить. Тогда $A'_{mn}(q)$ для данной итерации будет являться нужным решением. Если $M(q)$ нас не устраивает, то, используя выражение (II) можно рассчитать сечение среднего расхождения:

$$dA'_{mn}(q) = \frac{1}{S_{mn}} \sum dA_{ij}(d) S_{ijmn}. \qquad (I6$$

После этого вводят средние расхождения по ячейкам, как поправки в сечение предыдущего приближения, получая при этом следующее приближение:

$$A'_{mn}(q+1) = A'_{mn}(q) + dA'_{mn}(q). \qquad (I7$$

Получив очередное приближение решения, можно перейти к очередной итерации, начиная с расчетов по формуле (I3). Итерации ведутся до тех пор, пока разница двух соседних итераций $(M(q)-M(q-1))$ не станет достаточно маленькой. Данный алгоритм наиболее устойчив к вырождению системы, практически не допускает случаев роста среднеквадратического расхождения с числом итераций, позволяет с большой разрешающей способностью и достоверностью оценить распределение параметров среды по исследуемым сечениям. Как правило, для стабилизации среднеквадратического расхождения достаточно порядка десяти итераций. Однако, как и для предыдущего алгоритма, положительные аномалии оказываются несколько заниженными, а отрицательные – завышенными.

Суть алгоритма суммирования разностей заключается в коррекции сечения обратного проецирования. При этом предполагается, что аномальные значения A_{mn} в каждой конкретной ячейке среды единственны. В этом случае результат восстановления сечения может быть представлен в виде

$$A''_{mn} = \frac{1}{S_{mn}} \sum_{ij} (A_{ij} - A'_{ij} S_{ij} + S_{ijmn} A'_{mn}) S_{ijmn}. \qquad (I8)$$

Данный алгоритм использует сечение обратного проецирования и производит его коррекцию, применяя аномальные лучевые средние, отнесенные к конк-

ретной ячейке среды. Восстановление алгоритмом суммирования разностей дает наилучшие результаты по разрешению и в случае удачно подобранной дискретизации среды – по количественному соответствию результатов восстановления истинным значениям параметров.

Алгоритм коррекции обратной проекции – это более корректный алгоритм типа обратного проецирования. В данном случае сечение обратного проецирования рассматривается как результат фильтрации истинного сечения. Для восстановления создается фильтр, обратный указанному, и производится обратная фильтрация (деконволюция) сечения обратного проецирования. Опуская алгебраические выкладки по созданию алгоритма, отметим, что данный алгоритм дает хорошие результаты как по разрешению, так и по количественному соответствию результатов восстановления истинным значениям параметров среды.

Экспериментальные результаты. Методы алгебраического восстановления сечения исследуемой среды были применены для интерпретации экспериментальных данных, полученных в шахтных условиях на 5-й южной панели рудника 2-го рудоуправления Старобинского месторождения. Возможность применения метода лучевой сейсмотомографии для определения в массиве контуров выбросоопасных геологических нарушений – мульд погружения, оценивалась на примере подготовительных выработок лавы № II. В пределах изучаемой области соляные породы характеризовались незначительной контрастностью по основным физико-механическим параметрам. Наша цель заключалась в определении детального строения массива пород между подготовительными выработками. Сведения о строении массива пород в поле действующего очистного забоя крайне необходимы, так как внезапная встреча выбросоопасного геологического нарушения создает угрозу жизни шахтеров и нарушает технологический цикл добычных работ, что в свою очередь приводит к значительному перерасходу средств.

Для просвечивания использовались упругие колебания. Источником упругих колебаний служила одноударная пневматическая машина оригинальной конструкции производительностью 15–20 ударов в минуту. Для приема упругих колебаний применяли сейсмоприемники СВ-30. В качестве регистрирующей аппаратуры применялась 24-канальная инженерная сейсмостанция ESS-01-24. Заданное распределение траекторий сейсмических волн в исследуемом массиве между двумя горными выработками достигалась изменением взаимного расположения источника и приемников. Интенсивность воздействия на массив оценивалась с помощью специального датчика. Непосредственно в шахтных условиях производилась регистрация на магнитную ленту информации о времени распространения упругой волны и ее интенсивности. Далее на ПЭВМ АТ 286 с помощью специального пакета прикладных программ определялись скорость распространения упругих волн, эффективный коэффициент поглощения-рассеяния и восстанавливались различными алгоритмами сечения массива. К полученным сечениям применялись также специальные процедуры обработки, позволяющие получить более четкие контуры выбросоопасных геологи-



Рис.1. Распределение скорости P-волны в массиве (алгоритм итерационного восстановления, 12 итераций)

ческих нарушений: сглаживание сечений в скользящем окне заданной ширины и многоуровневая пороговая дискриминация.

Так, в результате анализа алгоритмом итерационного восстановления со сглаживанием было получено распределение скоростей упругих колебаний на изучаемом участке (рис.I). Алгоритм был ограничен I2 итерациями. Восстановленное изображение квантовано по I0 уровням в интервале от 3800 до 5I00 м/с. Минимальная скорость обозначена черным цветом, максимальная – белым. Густота штриховки соответствует падению скорости в горной породе. Области низких скоростей (густая штриховка) соответствуют более слабым, нарушенным породам. Как видно, исследуемый участок массива практически по диагонали пересекает зона с пониженными значениями скоростей. Скорости упругих колебаний в этой зоне составляют 3800–4I00 м/с, ширина зоны изменяется от I2 до 40 м.

Восстановленное алгоритмом суммирования разностей по значениям коэффициента поглощения-рассеяния сечени того же участка массива представлено на рис.2. При обработке сечения была применена процедура пороговой дискриминации. Изображение квантовано по I0 уровням в интервале от 0 до 0,3 Нп/м. Минимальное затухание обозначено черным цветом, а максимальное – белым. Густота штриховки соответствует интенсивности затухания. Как видно из представленной иллюстрации, на исследуемом участке четко определены контуры выбросоопасного геологического нарушения. В центре нарушения выделяются области с значениями коэффициента поглощения-рас-

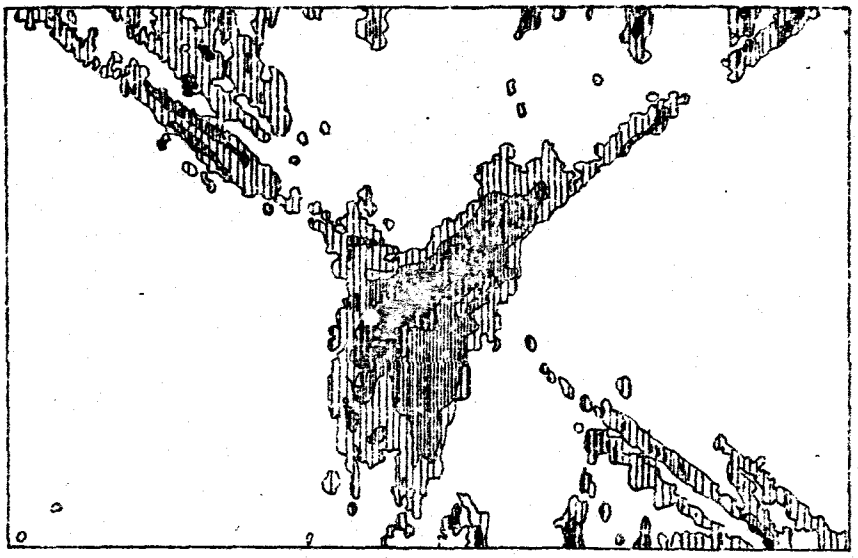


Рис.2. Распределение значений коэффициента поглощения-рассеяния в массиве (алгоритм суммирования разностей)

сеяния 0,27-0,3 Нп/м. Они представляют наибольшую опасность с точки зрения развития внезапного выброса соли и газа. Строение массива на данном участке подтвердилось при проведении специальной выработки в зону геологического нарушения.

В таких условиях и при частоте регистрации упругих колебаний 1-2 кГц приближения геометрической оптики вполне оправданы. В общем случае необходимо определять распределение в массиве как скорости, так и затухания упругих колебаний. Однако для определения контуров и строения выбросоопасных геологических нарушений коэффициент поглощения-рассеяния представляет собой наиболее информативный параметр.

Выводы

Аппарат лучевой сейсмической томографии адаптирован и применен для решения задачи определения контуров выбросоопасных геологических нарушений в соляных породах. В основу метода положено предположение о прямолинейном распространении сейсмических волн. Развита методика восстановления сечения массива пород с помощью алгебраических алгоритмов, которая была опробована в процессе обработки экспериментальных данных. Получено контрастное изображение выбросоопасного геологического нарушения. Для определения контуров выбросоопасных нарушений наиболее целесообразно применять наиболее информативный параметр - коэффициент поглощения-рассеяния.