Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 10, с. 1471—1479

УДК 519.633.6, 519.654, 550.834

ВОСПОЛНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ДВУМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ DMO

В.А. Поздняков, Е.В. Мезенцев

Красноярскгеофизика, 660022, Красноярск, ул. Партизана Железняка, 24в, Россия

Представлен метод восстановления пропущенных сейсмотрасс, разработанный на основе двумерного уравнения DMO. Предложена принципиально новая постановка начально-краевой задачи, основанная на задаче Гурса. Для численного решения использовался модифицированный метод конечных элементов. Метод был опробован на модельных примерах и реальных сейсмических данных.

DMO, метод конечных элементов, задача Гурса.

RESTORATION OF SEISMIC DATA USING THE TWO-DIMENSIONAL DMO EQUATION

V.A. Pozdnyakov and E.V. Mezentsev

This paper presents a method for restoring missing seismic traces by using the two-dimensional dip moveout (DMO) equation. A fundamentally new formulation of the initial-boundary-value problem based on the Goursat problem is proposed. A modified finite element method is used for numerical solution. The method is tested on model examples and actual seismic data.

DMO, finite element method, Goursat problem

ВВЕДЕНИЕ

В современной обработке сейсмических данных применяется значительное число преобразований, среди которых важнейшее место занимают миграционные преобразования и DMO (dip move out). Смысл последнего состоит в преобразовании сейсмограмм равных удалений к сейсмограммам нулевых удалений. Это позволяет заменить суммирование относительно общей центральной точки суммированием инвариантным относительно криволинейности отражающей границы, упростить алгоритмы миграции и восстановить зависимость коэффициента отражения волны от угла падения на границу. Саму процедуру DMO можно рассматривать как преобразование сейсмограмм одного удаления к сейсмограммам другого, что будет показано в дальнейшем. Такой подход позволяет использовать DMO для восполнения пропущенных сейсмотрасс.

В 1994 г. С. Фомелем [1994] для DMO преобразования было предложено дифференциальное уравнение, что позволило использовать эффективные в вычислительном плане алгоритмы, например метод конечных разностей или конечных элементов. По своей сути задача восстановления или восполнения пропущенных сейсмических данных состоит в следующем. Пусть имеем набор сейсмограмм, в котором пропущены отдельные трассы или сейсмограммы. Отсутствие данных может быть связано как с неполадками оборудования (неудачный взрыв или несработавший приемник), так и со сложностью реализации методики и технологии полевых наблюдений, обусловленной, например, сложным рельефом местности или изменчивостью свойств верхней части разреза. Задача восполнения данных сводится к нахождению решения уравнения DMO в некоторой области с известными данными на ее границе. Суть метода заключалась в использовании конечно-разностного фильтра для уравнения Фомеля в спектральной логарифмической области [Fomel, 2003].

Различные интегральные формы оператора DMO были независимо предложены Н. Чемингом и Б. Бьонди [Chemingui, Biondi, 1994], С. Багаини и У. Спагнолини [Bagaini, Spagnolini, 1996] и А.М. Стовасом и С.В. Фомелем [1996]. Использование интегральных операторов для восстановления сейсмических данных рассмотрено в статьях [Baganini et al., 1994; Mazzucchelli, Rocca, 1999]. Однако применение интегральной формы оператора DMO не дает хороших результатов для небольших удалений из-за ограниченности интегральных апертур, что не позволяет восстанавливать записи на соседних приемниках.

Работа посвящена принципиально другому подходу к решению уравнения DMO, связанному с иной постановкой краевой задачи. Мы рассмотрим решение задачи Гурса, в которой краевые данные задаются на характеристиках дифференциального уравнения. Решение задачи проводится во временно́й области с помощью метода конечных элементов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ГУРСА ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ DMO

Краевая задача с постановкой начальных данных на характеристиках дифференциального уравнения для волнового уравнения обсуждается во многих учебниках по уравнениям математической физики. Мы рассмотрим постановку задачи Гурса применительно к дифференциальному уравнению DMO, которое имеет следующий вид:

$$h(u_{XX} - u_{hh}) = \tau u_{\tau h}, \tag{1}$$

где $u = u(X, h, \tau)$ — волновое поле (в координатах: X — средняя точка, h — половина удаления источник—приемник, τ — время, исправленное путем введения кинематической поправки для выбранного значения скорости). В отличие от классического волнового уравнения уравнение (1) определено не в физическом пространстве, а в пространстве наблюдений: $h = (r - s)/2$, $X = (r + s)/2$, где s и r — координаты источника и приемника при «новом» времени, связанном с настоящим временем подстановкой $t^2 \to \tau^2 = t^2 - 4h^2 / v^2$, v — известная скорость.

Поскольку данное уравнение является t-гиперболическим уравнением второго порядка по переменной h, то для него можно поставить задачу Гурса, т.е. начально-краевую задачу с данными, заданными на характеристиках. Здесь следует отметить, что для этого уравнения можно выделить несколько семейств характеристик, наибольший интерес представляют следующие три семейства:

$$\tau = C_1, \quad X + h = C_2, \quad X - h = C_3.$$

Здесь C_i — некоторые константы.

Характеристики и область построения решения даны на рис. 1.

Исходя из этого, делая замену $r = X + h$, $s = X - h$, уравнение (1) можно переписать в более удобной форме:

$$2(r - s)u_{rs} = \tau(u_{\tau r} - u_{\tau s}). \tag{2}$$

Область определения (r, s, τ) имеет следующую специфику: время (τ) изменяется в пределах от 0 до некоторого T, r и s тоже в силу своей специфики не могут быть отрицательными, более того в силу принципа взаимности можно рассматривать только область $r > s$. Таким образом, общая область имеет вид

$$r > 0, s > 0, r > s, \ \tau \in [0, T].$$

Область восстановления данных в общем случае имеет произвольную границу, однако предлагается окружать эту область треугольником (если говорить про плоскость (r, s)):

$$r = C_1, \quad s = C_2, \quad r + s = C_3,$$

где C_i — некоторые константы.

Итак, область восстановления будет вписана в призму с основанием в виде равнобедренного прямоугольного треугольника, ограниченную плоскостями (рис. 2):

$$r = R, \quad s = S, \quad r - s = C, \quad \tau = T_1, \quad \tau = T_2,$$

без ограничения общности можно считать, что $\tau \in [0, T]$.

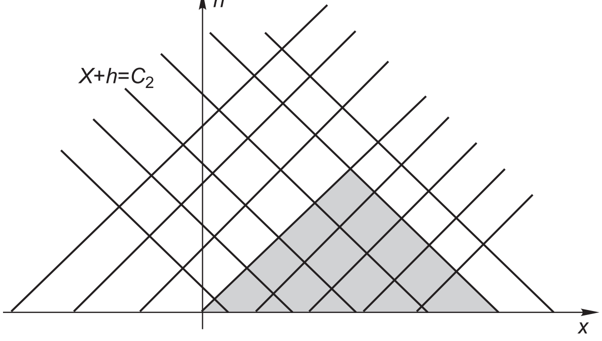

Рис. 1. Характеристики уравнения Фомеля и область построения решения.

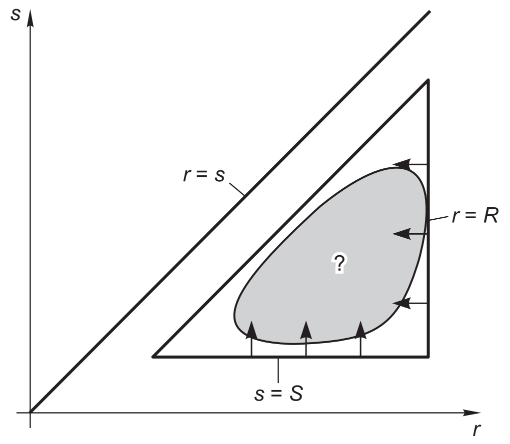

Рис. 2. Область восстановления в координатах (*r*, *s*).

Граничные условия в этом случае будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} u(0,r,s) = U(r,s), \\ u(\tau,R,s) = V(\tau,s), \\ u(\tau,r,S) = W(\tau,r), \\ r \le R, \quad s \ge S, \quad r-s \le C, \quad \tau \in [0,T]. \end{cases} \tag{3}$$

Таким образом, нами поставлена начально-краевая задача Гурса (3) для дифференциального уравнения DMO (1).

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГУРСА ДЛЯ УРАВНЕНИЯ DMO МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ), УЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ВНУТРИ ОБЛАСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Существует большое количество литературы, в которой описывается применение МКЭ к численному решению дифференциальных уравнений, в том числе и гиперболического типа [Конор, Бреббиа, 1979; Митчел, Уэйт, 1981].

Уравнение (2) с помощью метода конечных элементов аппроксимируется системой уравнений вида (см. Приложение 1)

$$C\frac{du}{d\tau} + Du = 0. \tag{4}$$

Системы вида

$$C\alpha_\tau + D\alpha = b$$

можно решать методом Кранка—Николсона—Галеркина, т.е. заменяя системой линейных алгебраических уравнений

$$C\frac{\alpha_{n+1}-\alpha_n}{\Delta\tau} + D\frac{\alpha_{n+1}+\alpha_n}{2} = b, \; (n = 0, 1, \ldots, N),$$

где α_n аппроксимируют $\alpha(\tau_0+n\Delta\tau)$. Таким образом, система уравнений (4) аппроксимируется системой

$$C\frac{u_{n+1}-u_n}{\Delta\tau} + D\frac{u_{n+1}+u_n}{2} = 0.$$

И окончательно

$$(D/2 + C/\Delta\tau)u_{n+1} = (-D/2 + C/\Delta\tau)u_n. \tag{5}$$

Учет граничных условий (3) для уравнения (2), а также учет известных данных внутри области восстановления описан в Приложении 2.

Решая систему уравнений (5) на каждом шаге по времени, получим решение задачи Гурса для уравнения DMO.

ПРОВЕРКА МЕТОДА НА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ И РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Модельный пример описывается таким образом. Для численных расчетов мы использовали следующую расстановку источников-приемников: 50 источников располагались на прямой линии на удалении 25 м друг от друга, приемники располагались в тех же точках, длина расстановки составила 1250 м. Глубина залегания границы 2000 м от первого источника. Угол наклона отражающей границы α выбирался 15°, 30° и 45° (рис. 3). Скорость в среде составляла 3000 м/с, данные снимались через 2 мс. В качестве сигнала использовался импульс Рикера с частотой 30 Гц. Внутри призмы было оставлено 20 % известных данных. На рис. 4 в качестве примера приведена реальная сейсмограмма, в которой случайным образом было убрано 80 % данных, подобные сейсмограммы используются нами в качестве исходных для алгоритма восстановления.

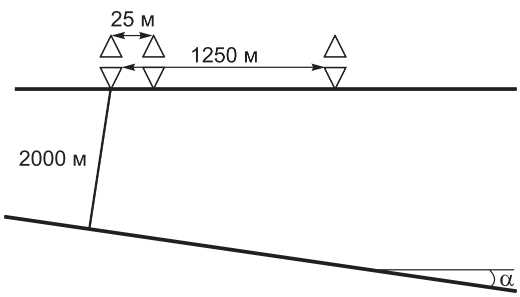

Рис. 3. Расстановка источников-приемников для двухслойной модельной среды.

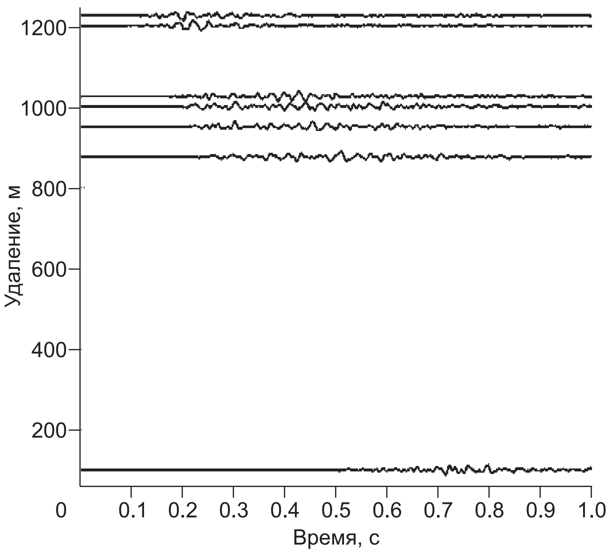

Рис. 4. Фрагмент реальной сейсмограммы, используемой в качестве исходных данных для алгоритма восстановления, с 80%-м отсутствием данных внутри области восстановления.

Результаты решения задачи Гурса без использования известных данных внутри призмы для отражающих границ с углами наклона соответственно 15° и 30° приведены на рис. 5, *а*, *б*. Для границы с углом наклона 15° решение задачи Гурса и теоретически построенная сейсмограмма не имеют существенных отличий, однако при увеличении угла наклона отражающей границы отличия становятся более заметными: плоская наклонная граница, углы наклона 15° и 30°, длина профиля 1250 м, скорость v = 3000 м/с, расстояние между приемниками 25 м.

Результаты решения задачи Гурса с использованием известных данных внутри призмы для отражающих границ с углами наклона 30° и 40° приведены на рис. 5, *в*, *г*. Существенных отличий между восстановленными данными и теоретически построенной сейсмограммой практически незаметно, ошибка не более 5 %. Таким образом, можно сделать вывод, что использование дополнительных известных данных внутри области восстановления позволяет су-

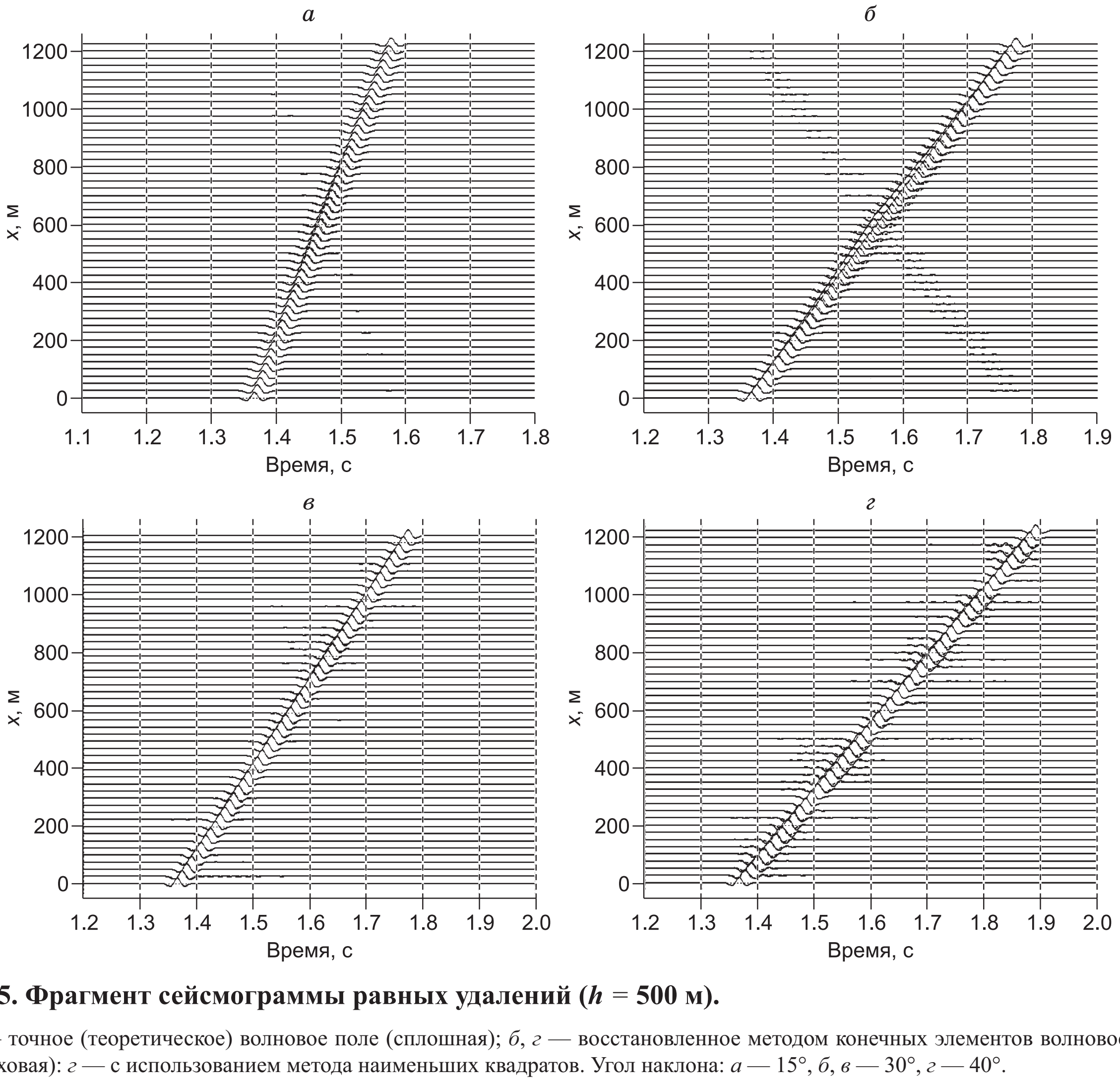

Рис. 5. Фрагмент сейсмограммы равных удалений (*h* = 500 м).

а, *в* — точное (теоретическое) волновое поле (сплошная); *б*, *г* — восстановленное методом конечных элементов волновое поле (штриховая): *г* — с использованием метода наименьших квадратов. Угол наклона: *а* — 15°, *б*, *в* — 30°, *г* — 40°.

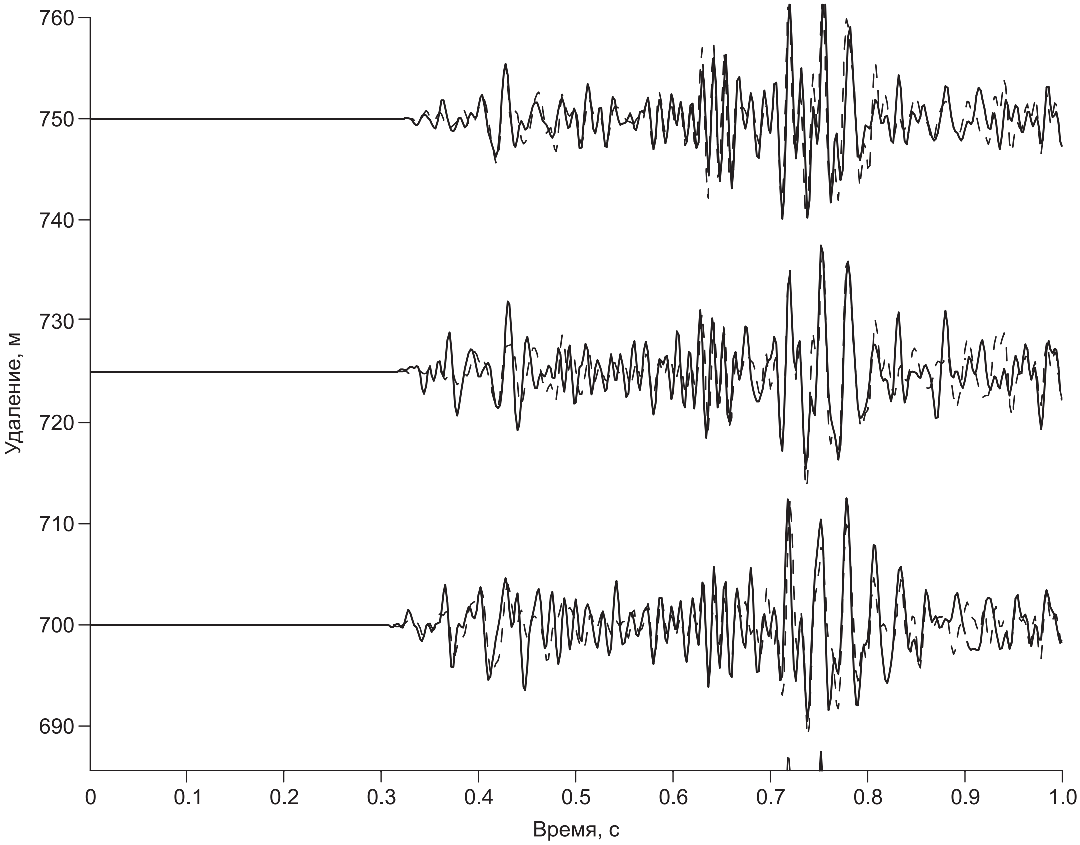

Рис. 6. Фрагмент сейсмограммы общей точки возбуждения.

Реальные трассы — сплошная, восстановленные — штриховая линия.

щественно улучшить качество решения задачи Гурса для уравнения DMO: плоская наклонная граница, углы наклона 30° и 40°, длина профиля 1250 м, скорость $v = 3000$ м/с, расстояние между приемниками 25 м.

Описанный метод был опробован на реальных сейсмических данных. В качестве теста был взят сейсмический профиль с территории Восточной Сибири. Источники располагались на удалении 25 м друг от друга, приемники располагались в тех же точках. Из исходного набора сейсмограмм была выбрана часть сейсмограмм таким образом, чтобы получить расстановку такую же, как в описанном выше модельном примере. Затем было уделено 80 % исходных данных внутри области восстановления. Результат применения метода восстановления данных с помощью уравнения DMO представлен на рис. 6, здесь приведены часть одной из восстановленных сейсмограмм и наложенные на нее соответствующие данные с исходной сейсмограммы. Как можно заметить, различия между ними практически незаметны, ошибка восстановления составила порядка 10 %, что говорит о возможности применения уравнения для восстановления реальных сейсмических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был рассмотрен новый подход к восстановлению двумерных сейсмических данных путем решения дифференциального уравнения DMO с помощью метода конечных элементов. Постановка начально-краевой задачи Гурса также является новым подходом к решению уравнения. Использование дополнительных известных данных внутри области восстановления с помощью метода наименьших квадратов позволяет существенно улучшить качество численных решений. Алгоритм восстановления отсутствующих трасс был проверен на модельных и реальных данных и показал достаточно высокую точность восстановления данных в обоих случаях.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Приложение метода конечных элементов к решению уравнения DMO

В уравнении

$$2(r-s)u_{rs}=\tau(u_{\tau r}-u_{\tau s})$$

преобразуем левую часть

$$2(r-s)\frac{\partial^2 u}{\partial r\partial s}=\frac{\partial}{\partial r}\left((r-s)\frac{\partial u}{\partial s}\right)-\frac{\partial u}{\partial s}+\frac{\partial}{\partial s}\left((r-s)\frac{\partial u}{\partial r}\right)+\frac{\partial u}{\partial r}.$$

Затем, воспользовавшись вариационной формулой метода Галеркина, получим

$$\iint_A\left((r-s)\frac{\partial u}{\partial s}\frac{\partial \delta u}{\partial r}-\frac{\partial u}{\partial s}\delta u+(r-s)\frac{\partial u}{\partial r}\frac{\partial \delta u}{\partial s}-\frac{\partial u}{\partial r}\delta u+\tau\frac{\partial u}{\partial \tau}\frac{\partial \delta u}{\partial r}-\tau\frac{\partial u}{\partial \tau}\frac{\partial \delta u}{\partial s}\right)dA=0. \qquad (\text{П. } 1.1)$$

Интегрирование производится по некоторому элементу A, который будет описан позднее. Поскольку уравнение трехмерное, имеет смысл использовать аппроксимации следующего вида:

$$u=\sum a_i(\tau)\varphi_i(r,s).$$

Причем в качестве интерполяционных функций будут выступать функции, определенные на треугольных элементах, заданных в плоскости $(r;\ s)$, что выглядит естественным исходя из постановки краевой задачи. В качестве таких функций были выбраны полиномы следующего вида:

$$u=\alpha_1+\alpha_2 r+\alpha_3 s.$$

Таким образом, в качестве элемента A в выражении (П. 1.1) будет выступать треугольник (рис. 7). Далее выписываем матрицу элемента. Для угловых узлов имеем:

$$\begin{Bmatrix}u_1\\u_2\\u_3\end{Bmatrix}=\frac{1}{2B}\begin{bmatrix}1 & r_1 & s_1\\1 & r_2 & s_2\\1 & r_3 & s_3\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\alpha_1\\\alpha_2\\\alpha_3\end{Bmatrix},$$

$$\begin{Bmatrix}\alpha_1\\\alpha_2\\\alpha_3\end{Bmatrix}=\frac{1}{2B}\begin{bmatrix}2A_1 & 2A_2 & 2A_3\\b_1 & b_2 & b_3\\a_1 & a_2 & a_3\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u_1\\u_2\\u_3\end{Bmatrix},$$

где $a_i=r_k-r_j,\ \ b_i=s_j-s_k,\ \ 2A_i=r_js_k-r_ks_j,\ \ i=1,2,3;\ \ j=2,3,1;\ \ k=3,1,2,\ \ B$ — площадь элемента.

$$\frac{\partial u}{\partial r}=\alpha_2=\frac{1}{2B}(b_1u_1+b_2u_2+b_3u_3)=\frac{1}{2B}b^Tu^n,$$

$$\frac{\partial u}{\partial s}=\alpha_3=\frac{1}{2B}a^Tu^n.$$

Здесь $a=\{a_1,a_2,a_3\},\quad b=\{b_1,b_2,b_3\},\quad u^n=\{u_1,u_2,u_3\}$, аналогичные выражения получаются для $\dfrac{\partial\delta u}{\partial r}$ и $\dfrac{\partial\delta u}{\partial s}$.

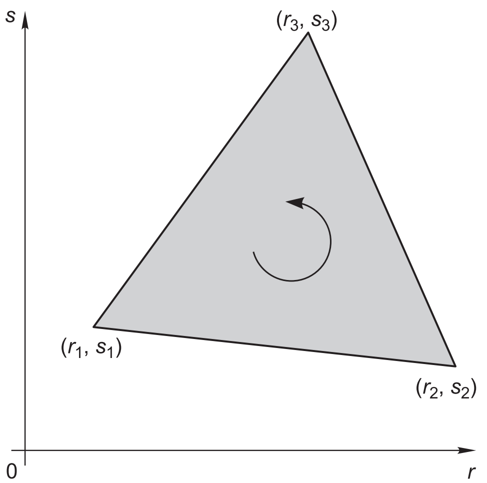

Рис. 7. Треугольный элемент, участвующий в методе конечных элементов.

Функции φ_i выглядят следующим образом:

$$\varphi_i = \frac{1}{2B}(2A_i + b_i r + a_i s); \quad i = 1, 2, 3,$$

$$u = \varphi^T(r,s)u^n(\tau), \quad \varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\},$$

аналогично для δu.

Вернемся к формуле (П. 1.1), с учетом вышеизложенного для отдельного элемента она принимает вид:

$$\iint_A \Big[(r-s)\frac{1}{2B^2} a^T u^n b^T \delta u^n - \frac{1}{2B} a^T u^n \varphi^T \delta u^n + (r-s)\frac{1}{4B^2} b^T u^n a^T \delta u^n -$$

$$- \frac{1}{2B} b^T u^n \varphi^T \delta u^n + \tau \frac{1}{2B}\left(\varphi^T \frac{du^n}{d\tau} b^T \delta u^n - \varphi^T \frac{du^n}{d\tau} a^T \delta u^n \right)\Big] dA =$$

$$= \delta u^{n,T} \left(\iint_A \Big[(r-s)\frac{1}{2B^2}\left(a^T b + b^T a\right) + \frac{1}{B}\left(b^T + a^T\right)\varphi \Big] dA \right) u^n + \qquad \text{(П. 1.2)}$$

$$+ \delta u^{n,T} \left(\iint_A \Big[\frac{\tau}{2B} \varphi^T (b-a) \Big] dA \right) \frac{du^n}{d\tau} = 0.$$

Вычисляя интегралы в (П. 1.2), пользуясь произвольностью вариации δu и суммируя вклады всех элементов, получаем общую систему вида

$$C\frac{du}{d\tau} + Du = 0.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Учет граничных условий и известных данных внутри области восстановления

Рассмотрим систему линейных алгебраических уравнений

$$A\mathbf{m} = \mathbf{b}, \qquad \text{(П. 2.1)}$$

где векторы **m**, **b** размерности N, A — матрица размерности $N \times N$. Этот же вид имеет и система уравнений (5). Допустим, мы знаем некоторое граничное значение $m_j = c$, тогда заменяем значения j-й строки матрицы **A** нулями, а элементу a_{jj} присваиваем 1. В векторе **b** значение b_j заменяем на c. В результате получаем новую систему уравнений с уже учтенными граничными условиями. Схематически это выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,j-1} & a_{1,j} & a_{1,j-1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{j-1,1} & \cdots & a_{j-1,j-1} & a_{j-1,j} & a_{j-1,j+1} & \cdots & a_{j-1,n} \\ a_{j,1} & \cdots & a_{j,j-1} & a_{j,j} & a_{j,j+1} & \cdots & a_{j,n} \\ a_{j+1,1} & \cdots & a_{j+1,j-1} & a_{j+1,j} & a_{j+1,j+1} & \cdots & a_{j+1,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,j-1} & a_{n,j} & a_{n,j-1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_{j-1} \\ m_j \\ m_{j+1} \\ \vdots \\ m_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_{j-1} \\ b_j \\ b_{j+1} \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,j-1} & a_{1,j} & a_{1,j-1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{j-1,1} & \cdots & a_{j-1,j-1} & a_{j-1,j} & a_{j-1,j+1} & \cdots & a_{j-1,n} \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{j+1,1} & \cdots & a_{j+1,j-1} & a_{j+1,j} & a_{j+1,j+1} & \cdots & a_{j+1,n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,j-1} & a_{n,j} & a_{n,j-1} & \cdots & a_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_{j-1} \\ m_j \\ m_{j+1} \\ \vdots \\ m_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_{j-1} \\ c \\ b_{j+1} \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}.$$

Теперь, переписав систему (5) в виде

$$M_{k+1}u_{k+1} = M_k u_k$$

и применив данный алгоритм, получим

$$\tilde{M}_{k+1}u_{k+1} + b_{k+1} = \tilde{M}_k u_k + b_k$$

или

$$\tilde{M}_{k+1}u_{k+1} = \tilde{M}_k u_k + b_k - b_{k+1}. \qquad \text{(П. 2.2)}$$

Вернемся к задаче восполнения данных. Вписав область восстановления в призму, мы оставили внутри некоторое количество известных данных, которые можно использовать для уточнения решения краевой задачи. Один из подходов состоит в следующем.

Пусть имеется система линейных алгебраических уравнений (П. 2.1) и нам известно некоторое количество значений вектора m в этой системе:

$$m_{j_1} = c_1, \quad m_{j_2} = c_2, \quad \ldots, \quad m_{j_n} = c_n; \quad n < N.$$

Систему (П. 2.2) перепишем в виде

$$\begin{cases} \mathrm{A}\mathbf{m} = \mathbf{b}, \\ \mathrm{B}\mathbf{m} = \mathbf{c}, \end{cases} \qquad \text{(П. 2.3)}$$

где $\mathbf{c} = \{c_1, c_2, ..., c_n\}$, B — матрица размерности $n \times N$, элементы которой имеют следующий вид:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, j = j_i \\ 0, j \neq j_i \end{cases}, \quad i = 1, ..., n.$$

Систему (П. 2.3) перепишем в виде

$$\tilde{\mathrm{A}}\mathbf{m} = \tilde{\mathbf{b}}, \qquad \text{(П. 2.4)}$$

где $\tilde{\mathrm{A}} = \begin{pmatrix} \mathrm{A} \\ \mathrm{B} \end{pmatrix}$ и $\tilde{\mathbf{b}} = \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \end{pmatrix}$.

Умножив в системе (П. 2.4) левую и правую части слева на матрицу $\tilde{\mathrm{A}}^T$, получим систему уравнений

$$\mathrm{K}\mathbf{m} = \tilde{\mathrm{A}}^T \cdot \tilde{\mathrm{A}}\mathbf{m} = \tilde{\mathrm{A}}^T \cdot \tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{p}. \qquad \text{(П. 2.5)}$$

Причем K – квадратная симметричная матрица размерности $N \times N$, **p** – вектор размерности N. Описанный метод является методом наименьших квадратов.

ЛИТЕРАТУРА

Конор Дж., Бреббиа К. Метод конечных элементов в механике жидкости. Л., Судостроение, 1979, 264 с.

Митчелл Э., Уэйт Р. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными. М., Мир, 1981, 216 с.

Стовас А.М., Фомель С.В. Кинематически-эквивалентные интегральные операторы ДМО // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (2), с. 111—123.

Фомель С.В. Кинематически-эквивалентный дифференциальный оператор продолжения сейсмограмм отраженной волны по удалениям // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (9), с. 146—160.

Bagaini C., Spagnolini U. 2-D continuation operators and their applications // Geophysics, 1996, № 61, p. 1846—1858.

Bagaini C., Spagnolini U., Pazienza V.P. Velocity analysis and missing offset restoration by prestack continuation operators // 64th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1994, p. 1549—1552.

Chemingui N., Biondi B. Coherent partial stacking by offset continuation of 2-D prestack data // Stanford Exploration Project-82, 1994, p. 117—126.

Mazzucchelli P., Rocca F. Regularizing land acquisitions using shot continuation operators: effects on amplitudes // 69th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1999, p. 1995—1998.

Fomel S. Seismic reflection data interpolation with differential offset and shot continuation // Geophysics, 2003, v. 68, № 2, p. 733—744.

Рекомендована к печати 25 декабря 2009 г.
В.С. Селезневым

Поступила в редакцию
2 июня 2009 г.