

УДК 550.341

ВЫДЕЛЕНИЕ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ОБЪЕМНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ЗАПИСЯХ (НОВЫЙ ПОДХОД)

© 1999 г. В. Ю. Бурмин

Представлено академиком В.Н. Страховым 23.12.97 г.

Поступило 06.01.98 г.

1. Поляризацией колебаний сейсмических волн называют траекторию, которую описывают частицы упругой среды при прохождении волны через рассматриваемую точку пространства. Поляризация колебаний является пространственно-временной характеристикой временного поля [1].

Продольные волны вне зон интерференции поляризованы линейно. Это означает, что направление вектора смещения в точке регистрации остается постоянным, а его величина может изменяться. Для линейно поляризованного колебания характерны сохранения формы записи и синфазность колебаний вне зависимости от ориентировки составляющих в пространстве. Во внутренних точках изотропной среды направление распространения продольных волн и направление смещения частиц совпадают. В анизотропных средах такого совпадения нет. Характер и параметры поляризации продольных волн не зависят от типа источника и действующих в нем сил. Поэтому в каждой точке среды характер поляризации волн Р, вызванных взрывом или землетрясением, будут одинаковы. При интерференции двух простых продольных волн, совпадающих по направлению распространения, совпадают также и направления колебаний.

Поперечные волны по своей поляризации отличаются от продольных волн. В изотропных средах поперечные волны поляризованы в плоскости, касательной к фронту волны Р, т.е. вектор движения частиц лежит в плоскости, перпендикулярной к лучу. В поперечных волнах действие волны на сейсмоприемник будет зависеть от того, как ориентирован сейсмоприемник и в какой плоскости, проходящей через направление распространения волны, происходит поперечное колебание. В отличие от продольных волн, для которых

поляризация определяется только направлением распространения волн, поляризация колебаний в поперечных волнах зависит также от источника. Ориентировка сил, действующих в источнике, определяет характер движения частиц.

При вертикальной оси симметрии и источниках с горизонтально действующей силой в направлении, перпендикулярном к действию силы, будут распространяться поперечные волны SH, поляризованные горизонтально, т.е. параллельно силе. При их распространении в осесимметричных средах на границах раздела не возникают обменные волны.

Поперечные SV-волны поляризованы преимущественно в вертикальной плоскости, и в отличие от волн SH они возбуждаются источниками различных типов.

Для поперечных волн, в отличие от продольных, существенным является то, что при интерференции двух поперечных волн, совпадающих по направлению распространения, направления колебаний в них могут не совпадать, так как в поперечной волне в общем случае возможно колебание по любому направлению, перпендикулярному к направлению распространения.

Поверхностные волны Рэлея на дневной поверхности поляризованы эллиптически. Плоскость поляризации вертикальна, а составляющие по вертикальной и горизонтальной компонентам сдвинуты на четверть периода. Эллипс поляризации вытянут вдоль вертикальной оси, а конец вектора смещения точек среды описывает траекторию в направлении на источник колебаний. Амплитуда поверхностной волны Рэлея убывает с глубиной по экспоненте, а глубина проникновения возмущения существенно зависит от длины волны: чем длиннее волна, тем глубже ее проникновение.

Поверхностные волны Лява поляризованы линейно в горизонтальной плоскости, перпендикулярно к направлению распространения волны, т.е. так же как и поперечные SH-волны.

Одной из основных задач обработки трехкомпонентных записей сейсмических волн является поляризационная фильтрация (ПФ), т.е. выделение волн с заданными параметрами поляризации. Помехами, или сейсмическим шумом, в этой задаче являются любые колебания, не обладающие такими параметрами. Цифровая регистрация сейсмических волн и интенсивное внедрение вычислительной техники в обработку экспериментальных данных позволяют эффективно реализовывать различные методы ПФ при анализе трехкомпонентных записей.

В настоящее время существуют различные подходы к выделению полезных колебаний по трехкомпонентным записям. Основная идея выделения линейно поляризованного сигнала состоит в том, что вводится селектирующая функция, зависящая от проекций наблюдаемого вектора смещения частиц среды и заданного вектора единичной длины. Селектирующая функция строится таким образом, чтобы она достигала максимума, когда направление заданного вектора совпадает с направлением поляризации волны.

Одним из широко известных методов ПФ является метод, предложенный Е.А. Флином [2] и основанный на аппроксимации поверхности движения частиц среды, соответствующей начальной части полезной записи, поверхностью второго порядка (эллипсоидом) [3], параметры которой характеризуют степень прямолинейности и направленность движения частиц. В работах [4, 5] выделение линейно поляризованных сигналов основано на корреляционном анализе проекций волнового поля. Авторы [6] для выделения полезных колебаний и определения азимута и угла выхода сейсмического луча предлагают способ построения локальной системы координат, связанной с сейсмическим лучом в точке регистрации. Все эти способы имеют свои достоинства и недостатки, но для оценки искомых параметров используют метод наименьших квадратов. Ниже предлагается новый подход к выделению линейно поляризованных сейсмических волн, в котором оценка неизвестных параметров проводится в равномерной метрике, что, по нашему мнению, делает определение более устойчивым.

2. Основы нового подхода. Пусть регистрация сейсмических сигналов ведется системой трех взаимно ортогональных сейсмоприемников, ориентированных в пространстве произвольным образом. Упругая среда, в которой распространяются сейсмические волны, в общем случае может быть неоднородной и анизотропной. Обозначим оси правосторонней декартовой системы координат, начало которой находится в точке регистрации, через X_1, X_2, X_3 . Направление осей координат определяется ориентацией сейсмоприемников. Будем считать, что сейсмические

волны, регистрируемые сейсмоприемниками, содержат преимущественно линейно поляризованные сейсмические колебания, соответствующие P-, SV- и SH-волнам.

Поставим задачу повернуть систему координат X_1, X_2 и X_3 таким образом, чтобы направление колебаний волны P совпало с направлением оси X_1 , колебаний волны SV с X_2 , а колебания волны SH с X_3 . В общем случае источник упругих колебаний может возбуждать только одну продольную P-волну или только две волны – продольную P и поперечную S.

Как известно, преобразование декартовых координат и, в частности, поворот системы координат задается матрицей [7]

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где элементы матрицы удовлетворяют условиям ортогональности

$$\sum_i a_{ji}a_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{при } j = k, \\ 0 & \text{при } j \neq k. \end{cases} \quad (2)$$

В новой системе координат компоненты $\{p, q, r\}$ каждого из трех векторов запишутся в виде

$$\begin{aligned} p &= a_{11}x_1 + a_{21}x_2 + a_{31}x_3, \\ q &= a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + a_{32}x_3, \\ l &= a_{13}x_1 + a_{23}x_2 + a_{33}x_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим функционал

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 |a_{1j}x_{1i} + a_{2j}x_{2i} + a_{3j}x_{3i}|, \quad (4)$$

где n – общее число векторов или дискретных отсчетов на сейсмограмме (на каждом сейсмическом канале записи).

Справедливо неравенство

$$S \leq \sum_{i=1}^n |x_i|, \quad (5)$$

которое является неравенством треугольников [8] и означает, что длина произвольного вектора не превосходит суммы длин его проекций на координатные оси. Здесь $x = \{x_1, x_2, x_3\} = \{p, q, r\}$ – один из рассматриваемых векторов.

Из неравенства (5) с очевидностью следует, что функционал S примет минимальное значение в том случае, когда направление соответствующих векторов совпадает с направлением координатных осей.

Выразим элементы матрицы (1) через углы Эйлера [7]. Будем иметь:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \cos \theta \sin \varphi, \\ a_{12} &= \sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \cos \theta \sin \varphi, \\ a_{13} &= \sin \theta \sin \varphi, \\ a_{21} &= -\cos \psi \sin \varphi - \sin \psi \cos \theta \cos \varphi, \\ a_{22} &= -\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \theta \cos \varphi, \\ a_{23} &= \sin \theta \cos \varphi, \quad a_{31} = \sin \psi \sin \theta, \\ a_{32} &= -\cos \psi \sin \theta, \quad a_{33} = \cos \theta. \end{aligned}$$

Условия (2) в этом случае будут выполнены автоматически.

Подставим выражения для a_{ji} в (4). В результате получим

$$\begin{aligned} S = \sum_{i=1}^n & |x_{1i} \cos \psi \cos \varphi - x_{1i} \sin \psi \cos \theta \sin \varphi - \\ & - x_{2i} \cos \psi \sin \varphi - x_{2i} \sin \psi \cos \theta \cos \varphi + \\ & + x_{3i} \sin \theta \sin \varphi| + |x_{1i} \sin \psi \cos \varphi + \\ & + x_{1i} \cos \psi \cos \theta \sin \varphi - x_{2i} \sin \psi \sin \varphi + \\ & + x_{2i} \cos \psi \cos \theta \cos \varphi - x_{3i} \cos \psi \sin \theta| + \\ & + |x_{1i} \sin \theta \sin \varphi + x_{2i} \sin \theta \cos \varphi + x_{3i} \cos \theta|. \end{aligned} \quad (4')$$

Определяя ψ_0 , φ_0 и θ_0 , доставляющие минимум функционалу (4'), подставляя полученные значения углов в (1) и производя соответствующие преобразования, получим новую систему координат P, R, Q , направления осей которой будут совпадать с направлениями колебаний сейсмических P -, SV - и SH -волн. При этом следует иметь в виду, что индексы волн (P, SV или SH) в общем случае не будут совпадать с соответствующими индексами осей координат. Чтобы такое совпадение было, необходимо привязать оси координат к соответствующим сейсмическим волнам. Кроме того, полученное решение будет определено с точностью до поворота системы координат вокруг любой оси на π , т.е. до знака направления прихода сейсмических волн.

Пусть скорость сейсмических волн в земле меняется только по вертикали. В этом случае сейсмические лучи, выходящие на поверхность, лежат в плоскости, ортогональной поверхности земли.

Пусть источник упругих колебаний возбуждает продольную волну P , поперечную волну SV , поляризованную в вертикальной плоскости, и поперечную волну SH , поляризованную в горизонтальной плоскости, а регистрация колебаний производится на дневной поверхности. Тогда реше-

ние трехмерной задачи редуцируется к решению последовательности одномерных.

Будем минимизировать функционал S в несколько этапов. На первом этапе повернем систему координат таким образом, чтобы ось X_1 была направлена вверх от поверхности земли, ось X_2 на восток, а ось X_3 на север. В результате получим новую систему координат с осями Z, E, N .

На втором этапе найдем такое положение новой системы координат, при котором направление одной из осей координат (X или Y) совпало бы с направлением прихода P -волны. Для этого будем вращать систему координат вокруг оси Z в диапазоне углов от 0 до 90° . Углы отсчитываем от направления на север, т.е. будем определять азимут подхода сейсмического луча в точке приема. Так как в этом случае углы ψ и θ равны нулю, то, очевидно, матрица преобразования системы координат будет иметь вид

$$A = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

а функционал (4)

$$\begin{aligned} S = \sum_{i=1}^n & \{|x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi| + \\ & + |-x_i \sin \varphi + y_i \cos \varphi| + |z_i|\}. \end{aligned}$$

Повернув систему координат X, Y, Z на угол φ , добьемся того, что одна из осей координат, X или Y , будет направлена вдоль направления прихода сейсмического луча в точке приема. Оси новой системы координат обозначим через R, T и Z . Очевидно, что, помимо найденного, существует еще одно положение системы координат, при котором направление (положительное или отрицательное) другой координатной оси совпадает с направлением прихода луча.

На третьем этапе определим такое положение системы координат, при котором ось R совпала бы с направлением касательной к сейсмическому лучу. Для этого будем вращать систему координат вокруг оси T также в диапазоне углов от 0 до 90° . При этом углы отсчитывают от горизонтальной оси вверх. В этом случае $\psi = 0$ и $\varphi = 0$ и матрица преобразования системы координат будет иметь вид

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

а функционал (4) запишется в виде

$$S = \sum_{i=1}^n \{ |t_i| + |r_i \cos \theta + z_i \sin \theta| + | - r_i \sin \theta + z_i \cos \theta | \}.$$

Положим $\theta_1 = \theta$, повернем систему координат R, T, Z на угол θ вокруг оси T и определим значение функционала S . Затем повернем систему координат X, Y, Z на угол $\varphi_2 = \varphi + \pi/2$, найдем новый угол θ_2 и вновь вычислим значения функционала S . Сравним два значения функционала S , выберем те значения углов φ и θ , которые соответствуют наименьшему значению функционала. Окончательно матрица преобразования системы координат будет иметь вид

$$A = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \cos \theta & \cos \varphi \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. М.: Недра, 1977. 277 с.
2. Flin E.A. // Proc. IEEE. 1965. V. 53. № 12. P. 1874-1876.
3. Цибульчил Г.М. // Геология и геофизика. 1969. № 4. С. 73-86.
4. Кац С.А., Михайлова Н.Г. В сб.: Вычислительная сейсмология. М., 1976. В. 9. С. 220-232.
5. Кац С.А., Михайлова Н.Г. Там же. М., 1977. В. 10. С. 223-232.
6. Plesinger A., Hellweg M., Seidl D. // J. Geophys. 1986. V. 59. P. 129-139.
7. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия. М.: Наука, 1968. 232 с.
8. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. М.: Наука, 1974. 296 с.