

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО АНАЛИЗА ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ЗАПИСЕЙ РЕАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Шевченко В.П., Колесников А.Л.

Серпуховский Военный Институт Ракетных войск
142202 г. Серпухов, Московская обл., ул. Бригадная 12.
Кафедра «Информационно-измерительной техники и технологий»

В настоящее время основными задачами анализа поляризации векторных сигналов являются выделение степени линейности колебания и его направленности. К известным способам поляризационного анализа относят способы на основе использования знаковых и временных зависимостей ортогональных компонент вектора смещения, спектральные, ковариационные способы и др. Они интерпретируют движение конца вектора смещения сейсмической волны либо по линии, либо по поверхности эквивалентного эллипсоида [1]. В последующем параметры поляризации волны рассчитывают исходя из положения рассматриваемой эквивалентной фигуры в пространстве.

Такое представление векторного сигнала не является рациональным, так как приводит к потере в ряде случаев важной информации о его поляризационной структуре. Известно, что поляризация векторного гармонического сигнала характеризуется плоской фигурой – эллипсом, который в частных случаях может вырождаться в линию или в окружность. При этом геометрические параметры этого эллипса – положение в пространстве плоскости, содержащей эллипс поляризации, и самого эллипса в этой плоскости часто используют для оценки направления на излучатель или выявления типа принимаемой волны. При использовании эллипсоида эта информация теряется.

Кроме того, известные способы поляризационного анализа являются интегральными и поэтому обладают плохим временным разрешением. Они предполагают обработку участка записи по длительности обычно не меньше периода колебания для нахождения усредненных параметров эквивалентного эллипсоида. В случае изменения параметров в течение меньшего времени, данные об изменениях теряются.

В этой связи перспективным является дифференциальный поляризационный анализ (ДПА), суть которого отражена в работе [2]. Исследования показали, что ДПА обладает лучшими точностными характеристиками. Кроме того, он позволяет в каждой точке реальной трехкомпонентной сейсмической записи интерпретировать движение конца вектора смещения в пространстве по эквивалентному эллипсу поляризации. Известный способ поляризационного анализа Флинна (ПАФ) [1] интерпретирует движение вектора смещения по поверхности эквивалентного эллипсоида. В результате ДПА свойственна новая положительная черта – возможность дополнительно выделить текущее положение плоскости, содержащей эллипс поляризации сейсмической волны. По положению нормали к этой плоскости возможно осуществить пеленгацию излучателя по поперечным S-волнам в короткопериодном диапазоне и по поверхностным волнам Релея – L_R и Лява – L_Q в длиннопериодном диапазоне. ПАФ этого сделать не позволяет. Его основной информативный параметр – положение большой полуоси эквивалентного эллипсоида, по которой возможна оценка пеленга только по продольной Р-волне.

Оценку поляризационных параметров предполагается осуществить согласно зависимостей:

$$2\omega^2 a^2 = \sum \eta_i + \sqrt{(\sum \eta_i)^2 - 4 \sum C_{ij}}; \quad 2\omega^2 b^2 = \sum \eta_i - \sqrt{(\sum \eta_i)^2 - 4 \sum C_{ij}};$$
$$K_{nx} = \frac{C_{yz}}{\sum C_{ij}}; \quad K_{ny} = \frac{C_{xz}}{\sum C_{ij}}; \quad K_{nz} = \frac{C_{xy}}{\sum C_{ij}};$$

$$K_{ax}^2 = \frac{C_{yz}}{\omega^2 a^2} + \eta_x - \omega^2 b^2; \quad K_{ay}^2 = \frac{C_{xz}}{\omega^2 a^2} + \eta_y - \omega^2 b^2; \quad K_{az}^2 = \frac{C_{xy}}{\omega^2 a^2} + \eta_z - \omega^2 b^2;$$

$$K_{bx}^2 = \frac{\omega^2 a^2 - \frac{C_{yz}}{\omega^2 b^2} - \eta_x}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2}; \quad K_{by}^2 = \frac{\omega^2 a^2 - \frac{C_{xz}}{\omega^2 b^2} - \eta_y}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2}; \quad K_{bz}^2 = \frac{\omega^2 a^2 - \frac{C_{xy}}{\omega^2 b^2} - \eta_z}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2},$$

где $\omega 2a2$, $\omega 2b2$ – сигналы, пропорциональные большой и малой полуосям эллипса поляризации;

$$\eta_i = A_i'^2(t) - A_i''(t) \cdot A_i'(t);$$

$$\eta_{ij} = [A_i'(t) \cdot A_j''(t) - A_i''(t) \cdot A_j'(t)]^2;$$

$A_i(t)$, $A_i'(t)$, $A_i''(t)$ – i -я компонента сигнала, ее первая и вторая производные;

$$C_{ij} = \eta_i \cdot \eta_j - \eta_{ij};$$

K_{ai} , K_{bi} , K_{ni} – направляющие косинусы большой, малой полуосей и нормали к плоскости эллипса поляризации относительно i -й оси.

ДПА могут подвергаться не только сейсмические сигналы, но и векторные сигналы любой природы (электромагнитные, магнитные и другие). В данной статье приведем результаты применения ДПА для сейсмического пеленгования реальных источников, в частности пакистанского подземного ядерного испытания, проведенного 28.05.98.

На рис. 1 представлен фрагмент трехкомпонентной короткопериодной записи Р-волны от пакистанского ядерного взрыва, полученный в лаборатории Залесово 28.05.98. Магнитуда источника составила 4.9, расстояние ~ 3300 км, истинный азимут – 219,6°.

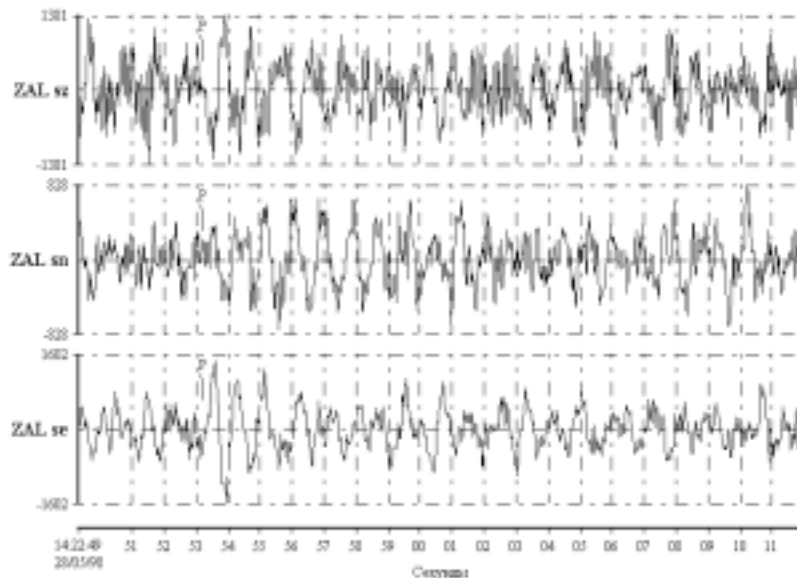


Рис. 1. Трехкомпонентная короткопериодная запись Р-волны, полученная в лаборатории Залесово от пакистанского подземного ядерного взрыва.

Запись осложнена высокочастотными местными промышленными помехами. Вступление волны Р произошло на 53 секунде и помечено соответствующей буквой на записях трех компонент – вертикальной sz, горизонтальной sn-север-юг и горизонтальной se-восток-запад. Московское время отложено на оси абсцисс в секундах и составляет для начала реализации 14:22:49.

На рис. 2 на трех верхних графиках показаны те же компоненты, растянутые во времени так, чтобы захватить первые два квазипериода Р-волны. На нижних трех графиках даны результаты текущих измерений с помощью ДПА азимутального угла α , угла выхода β

и линейности волны $N=1-b/a$, где a и b – величины большой и малой полуосей текущего эллипса поляризации.

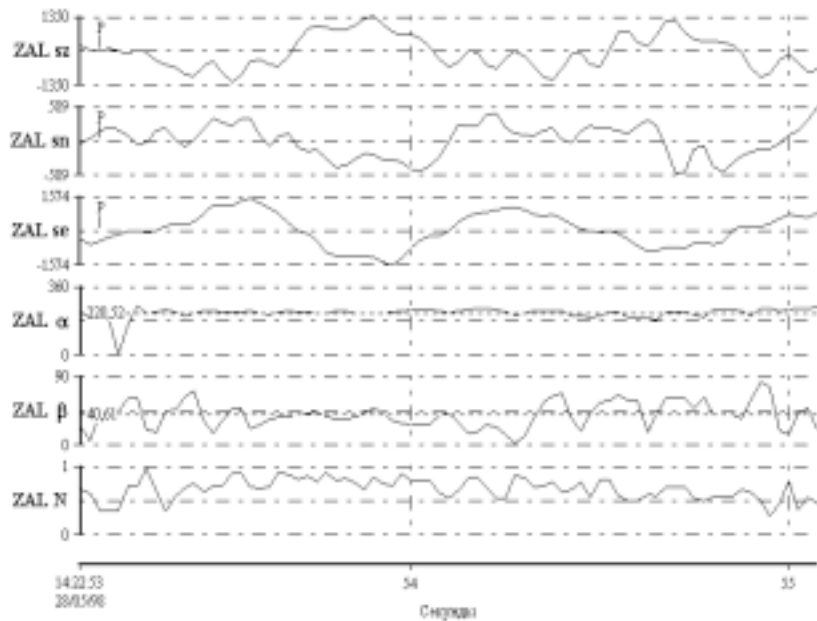


Рис. 2. Поляризационная обработка Р-волны от пакистанского подземного ядерного взрыва.

Шкалы отсчета всех величин представлены на осях ординат. Пределы шкал составляют: для угла α - $0...360^\circ$, для β - $0...90^\circ$, для N - $0...1$. Горизонтальным штрих пунктиром показаны границы шкал и значение их середины, вертикальным - положение временных отсчетов. Пунктиром отмечены модальные значения из всего множества результатов измерений в показанном на графике временном отрезке реализации сигналов. Число результатов измерений, приходящееся на одну секунду длительности реализации, определяется частотой дискретизации канала. Для данного случая она равна 40 Гц.

В разрыве пунктира в левой части графиков для углов α и β цифрами указаны величины модальных значений. Как следует из модального значения для азимута - $\alpha=220,52^\circ$, ошибка измерения пеленга составляет менее одного градуса относительно истинного его значения на пакистанский полигон - $219,6^\circ$. Это свидетельствует о высокой точности ДПА. Наиболее стабильные результаты измерений угла α соответствуют первому квазипериоду волны Р. На этом участке значение линейности N в основном выше $0,7...0,9$; что указывает на близость поляризации Р-волны к линейной.

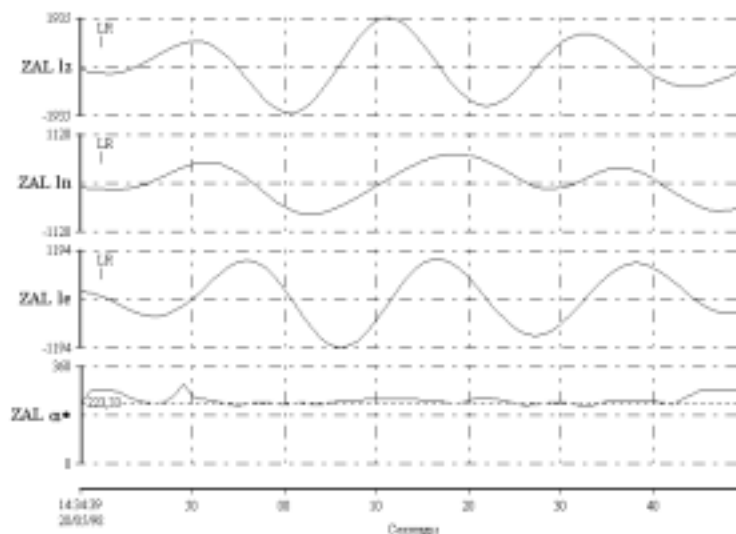


Рис. 3. Поляризационная обработка волны L_R от пакистанского подземного ядерного взрыва.

При анализе рассматриваемого источника обработке подвергались также записи длиннопериодного канала (частота дискретизации 1 Гц), на котором четко выделились вступления поверхностных волн Лява LQ и Релея LR. Известно, что колебания вектора смещения волны LR происходит в основном в вертикальной плоскости, содержащей трассу распространения волны. Таким образом, определяя текущее положение нормали к плоскости эллипса поляризации волны LR с помощью ДПА, возможно пеленгование источника сейсмических возмущений.

На рис. 3 представлена запись волны LR (три верхних графика) и результат измерения пеленга α^* по этой волне. Стабильный участок измерения пеленга соответствует второму и третьему квазипериоду волны. Ошибка модальной оценки пеленга $\alpha^*=223,33^\circ$ составляет 4° . Аналогичный результат с ошибкой $\sim 5^\circ$ дает пеленгование по волне Лява. Это несколько хуже, чем оценка пеленга по Р-волне. Однако, в случае потери Р-волны или ее сильной зашумленности помехами пеленгование по поверхностным волнам позволяет решить задачу оценки направления на источник и повысить достоверность отнесения сигнала к классу полезных на основе анализа близости этой оценки направлению на ядерный полигон.

Таким образом, применение ДПА для однопунктного сейсмического пеленгования более перспективно, чем использование ПАФ, так как позволит повысить точность пеленгования по Р-волне и обеспечить возможность пеленгования по поверхностным волнам.

Литература:

1. Flinn E.A. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion // "Proc. I.E.E.E.", 1965, vol. 53, pp. 1874-1876.
2. Колесников А.Л., Шевченко В.П., Поплавский А.С. Способ измерения параметров поляризации векторного сигнала. Заявка на изобретение, заявлено 20.07.99 г, № 99115871.



THE MATHEMATICAL MODEL OF THE DIFFERENTIAL POLARIZATION ANALYSIS OF REAL SEISMIC SIGNALS THREE COMPONENT RECORDS

Shevchenko V.P., Kolesnikov A.L.

The Serpukhov Military Institute of the Rocket Arms
142202 Moscow region, Serpukhov, Brigade St, 12.
Faculty «Information & measuring engineering and technologies»

At the present time basic tasks of the analysis of vector signals polarization are determination of the fluctuation linearity degree and its orientation. The well-known ways of the polarization analysis consist of the ways based on the use of sign and time dependences of orthogonal components of a displacement vector, spectral and covariance ways, etc. They interpret the movement of the displacement vector end of a seismic wave either on a line or on an equivalent ellipsoid surface [1]. Further the polarization wave parameters of are calculated in accordance with the considered equivalent figure location in space.

Such vector signal presentation is not rational, as it results in the losses of the important information of its polarization structure in a number of cases. It is known that a vector harmonic signal polarization is characterized by flat figure. It means an ellipse, which can degenerate into a line or a circle in some cases. Thus the geometrical parameters of this ellipse such as the location of a plane containing a polarization ellipse in space as well as the very ellipse in this plane often used for an estimation of a direction to a source or for determination of the received wave type. In the case an ellipsoid application this information is lost.

In addition the known ways of the polarization analysis are integral and thus have the bad time resolution. They assume the processing of a part of records with the usual duration not less than a fluctuation period for finding of the averaged parameters of the equivalent ellipsoid. In case of changing the parameters during the less period of time data connected with these changes is lost.

In this connection the most perspective is the Differential Polarization Analysis (DPA), which is described in [2]. The study has show that the DPA combines the best accuracy characteristics. Besides this, it allows to interpret the movement of displacement vector end in space alone an equivalent polarization ellipse in each point of the real three component seismic records. The known way of the Flinn's Polarization Analysis (FPA) [2] interprets movement of a displacement vector on a surface equivalent ellipsoid. As a results for the DPA has new positive feature in addition to it's peculiar the opportunity to allocate the current situation of a surface containing an ellipse of polarization of a seismic wave. On apposition of normal to this surface it is possible to carry out the direction finding of the source through the cross S-waves in short-period band Relay-L_R and Layva-L_Q surface waves in long period band. The FPA does not allow make this. Its basic informative parameter is the position of the large half-axis equivalent ellipse, according to which the direction finding estimation only on longitudinal P-wave is possible.

The estimation of polarizing parameters is supposed to be carried out according to dependences:

$$2\omega^2 a^2 = \sum \eta_i + \sqrt{(\sum \eta_i)^2 - 4 \sum C_{ij}}; \quad 2\omega^2 b^2 = \sum \eta_i - \sqrt{(\sum \eta_i)^2 - 4 \sum C_{ij}};$$

$$K_{ax}^2 = \frac{\frac{C_{yz}}{\omega^2 a^2} + \eta_x - \omega^2 b^2}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2}; \quad K_{ay}^2 = \frac{\frac{C_{xz}}{\omega^2 a^2} + \eta_y - \omega^2 b^2}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2}; \quad K_{az}^2 = \frac{\frac{C_{xy}}{\omega^2 a^2} + \eta_z - \omega^2 b^2}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2};$$

$$K_{bx}^2 = \frac{\omega^2 a^2 - \frac{C_{yz}}{\omega^2 b^2} - \eta_x}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2}; \quad K_{by}^2 = \frac{\omega^2 a^2 - \frac{C_{xz}}{\omega^2 b^2} - \eta_y}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2}; \quad K_{bz}^2 = \frac{\omega^2 a^2 - \frac{C_{xy}}{\omega^2 b^2} - \eta_z}{\omega^2 a^2 - \omega^2 b^2},$$

$$K_{nx} = \frac{C_{yz}}{\sum C_{ij}}; \quad K_{ny} = \frac{C_{xz}}{\sum C_{ij}}; \quad K_{nz} = \frac{C_{xy}}{\sum C_{ij}};$$

the $\omega^2 a^2$, $\omega^2 b^2$ – are the signals which are proportional to large and small half-axis of polarization ellipse;

$$\eta_i = A_i'^2(t) - A_i''(t) \cdot A_i'(t);$$

$$\eta_{ij} = [A_i'(t) \cdot A_j'(t) - A_i''(t) \cdot A_j(t)]^2;$$

$A_i(t)$, $A_i'(t)$, $A_i''(t)$ – i -is the signal's constituent, it's first and second derivatives;

$$C_{ij} = \eta_i \cdot \eta_j - \eta_{ij};$$

K_{ai} , K_{bi} , K_{ni} – directing cosines of the large, small half-axes and normal to surface of polarization ellipse in relation to i -axis.

DPA can be exposed not only seismic signals, but also vector signals of any nature (electromagnetic, magnetic and others). In this article we shall show the results of DPA application for seismic direction finding of real sources, in particular of Pakistan underground nuclear test which has been carried out at the 28.05.98 and received by Zalesovo seismic station. The source magnitude is 4.9, the distance ~ of 3300 km, the true azimuth – 219,6°.

As follows from modal meaning for the azimuth $\alpha=220,52^\circ$ measurements by the DPA, the error direction finding measurement is less than one degree of its true meaning on the Pakistan test site. It indicates to high accuracy of the DPA. The most stable results of corner α measurements correspond to first quasi-period of P-waves. On this site the meaning of rectilinearity basically above 0,7...0,9 that specifies affinity of polarization P-wave to linear.

During the analysis of the examined source the records of the long period channel (quatization frequency 1 Hz) were proceed also, and during this analysis the arriving of Relay-L_R

and Layva- L_Q surface waves were precisely allocated. It is known, that fluctuation of the L_R wave displacement vector occurs basically in a vertical surface containing a line of distribution of wave. Thus, determining the current situation with position the normal to polarization ellipse of the L_R wave surface by DPA, it is possible of a source seismic disturbance.

The error of the direction finding modal estimation $\alpha=220,52^\circ$ on L_R wave is 4° . The stable part of measurements corresponds to second and third quasi-periods of the wave. The similar result with an error $\sim 5^\circ$ give the direction finding on the wave Layva. This is a little bit worse, than the P-wave direction finding estimation. However, in case of loss of the P-wave or its strong noise by jamming on surface waves allows to solve problem of an estimation of the direction on a source and to increase reliability of classify the signal to the class useful on the basics of analysis of this estimation affinity to a direction on nuclear test site.

Thus, the DPA application for one-point seismic is more perspective, than the FPA usage, as it will allow to increase accuracy on the P-wave and to ensure an opportunity direction finding on surface waves.

References:

1. Flinn E.A. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion // "Proc. IEEE", 1965, vol. 53, pp. 1874-1876.
2. Kolesnikov A.L., Shevchenko V.P., Poplavskiy A.S. The way of measurements of the vector signal polarization parameters. The application for the invention, is declared 20.07.99, №99115871.

s