

В. С. Мостовой

Оптимальное обнаружение сигналов на фоне микросейсмического шума

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

The problem of signal detection on a microseismic background noise is of current importance, but especially in analysis of those signals which are comparable or smaller than the level of background noise from the energetic point of view. Background noise establishes a natural restriction to the signals that can be detected by seismic tools. Under condition of a high-level noise, the conceptual mathematical model of optimal estimation of the signal parameters is proposed. Efficiency of the model is illustrated by the example of a field observation experiment.

Цель процессов обнаружения и оценки сейсмического сигнала на фоне микросейсмического шума состоит в исследовании различия между сигналами и шумом для улучшения способности обнаружения. В зависимости от типа сейсмических сигналов могут применяться различные методы обнаружения. В настоящем сообщении будем рассматривать процессы обнаружения, работающие на одном канале записи, а также регистрации их трехкомпонентной станцией. Для всестороннего обзора этой области обратимся к публикациям работ [1–3]. В одноканальном поиске сигнала его обнаружение часто делается визуально. Представленные здесь математические модели ориентированы на автоматическое обнаружение в записях одиночных станций, когда эти записи подвергались предварительной обработке при вычитании значительной части энергии шума [4]. Оценка отношения мощности кратковременного сигнала к мощности долгосрочного сигнала используется нами для принятия решения о наличии сигнала и грубой оценки момента его вступления.

Для шумоподавления (на этапе предварительной обработки) рассматриваются процедура вычитания из наблюдаемых данных гипотетической модели микросейсмического фона с оптимальными значениями свободных параметров [4] и оптимальная оценка для сигнала, принимаемого на фоне подавленного таким образом шума.

Естественным ограничением на уровень поисковых сигналов является уровень микросейсмического фона [1]. Повышение чувствительности сейсмических сенсоров упирается в уровень шумов. Отметим важное обстоятельство: статистические характеристики сейсмического фона зависят от времени и места наблюдения, т. е. они нестационарны как во времени, так и в пространстве. Флуктуации статических характеристик от места наблюдения позволяют воспользоваться математической моделью, основанной на гипотезе о существенной роли в формировании фона фрагментами среды, непосредственно прилегающими к точкам измерений. И естественный сейсмический фон, в конечном счете, зависит от таких характеристик, как спектральные свойства и добротность этих фрагментов. Использование описанных моделей позволяет надеяться на существенное снижение в предварительной обработке уровня естественного фона [4] и, как результат, снижение уровня обнаруживаемых на этом фоне сейсмических сигналов (рис. 1). На рисунке приведен результат первого этапа предварительной обработки по снижению уровня шума в полевых наблюдениях на рукотворном объекте. (Полужирная кривая — наблюдаемые данные; тонкая кривая — результат предварительной обработки по снижению уровня естественного фона.)

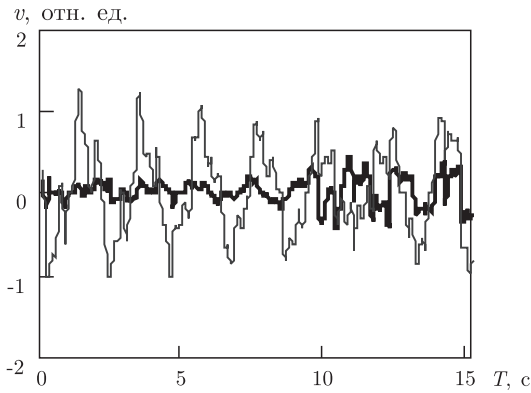


Рис. 1

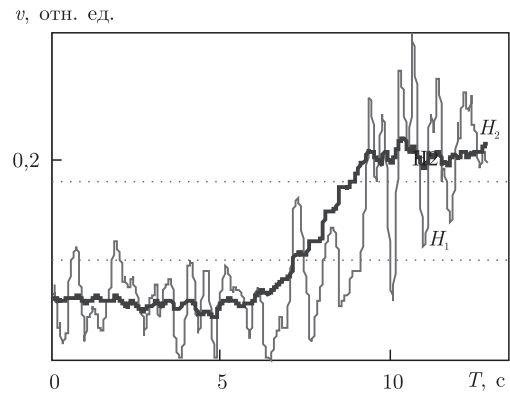


Рис. 2

Следующий этап предварительной обработки — обнаружение и оптимальная оценка параметров сигнала. В качестве оператора автоматического поиска используем оценку энергии процесса в скользящем окне $E_2(t, T)$ фиксированной длины T в метрике $L_2(T)$:

$$E_2(t, T) = \frac{1}{T} \sqrt{\int_t^{t+T} y(\tau)^2 d\tau}.$$

На рис. 2 представлена кривая $E_2(t, T)$ с двумя фиксированными значениями параметра T : $T = 0,3$ с (тонкая кривая) и $T = 2,4$ с (полужирная кривая) и два пороговых значения H_1 и H_2 для принятия решения (пунктирные линии). Уровни значимости критерия $E_2(t, T)$ для принятия решения, а также H_1 и H_2 выбираются субъективно. Как видно из рисунка, при малых значениях H и малых длинах окна сканирования T при оценке значения $E_2(t, T)$ велика вероятность ложной тревоги, т.е. принятие решения о вступлении сигнала, когда последнего нет. При высоких порогах H и больших значениях T велика вероятность пропуска цели, т.е. вероятность принятия решения об отсутствии сигнала в случае, когда сигнал присутствует. Оптимальное значение T равно времени существования сигнала [8], которое априори неизвестно. Из диаграммы кривых на рис. 2 следует, что мы можем грубо оценить интервал для такого параметра сигнала, как момент вступления, который лежит в интервале от 7 до 12 с.

В качестве модели ожидаемого сигнала выбираем суперпозицию из $I + 1$ осцилляторов, каждый из которых вступает в свой момент времени λ_{0+i} , имеет амплитуду λ_{1+i} , затухание колебаний с постоянной времени λ_{2+i} и угловую частоту колебаний λ_{3+i} , $i = \overline{0, I}$:

$$M(t, \lambda) = \sum_{i=0}^I \Phi(t - \lambda_{0+i}) \lambda_{1+i} [e^{-\lambda_{2+i}(t - \lambda_{0+i})} \sin[\lambda_{3+i}(t - \lambda_{0+i})]], \quad (1)$$

где $\lambda = \{\lambda_k\}$; $k = \overline{0, 4(I + 1)}$ — вектор свободных параметров модели; I — количество участвующих в суперпозиции подмоделей; $\Phi(t)$ — единичная функция. Каждая из подмоделей — это физически осуществимая волна. Оптимальная оценка параметров сигнала заключается в определении вектора свободных параметров, минимизирующих значение критерия согласия модели с наблюдаемыми данными. Мы выбрали достаточно простой случай

и в качестве критерия согласия — величину квадрата отклонения модели от наблюдаемых данных $y(t)$ в метрике L_2 . Следовательно, критерий $F(\boldsymbol{\lambda})$ принимает вид

$$F(\boldsymbol{\lambda}) = \int_T [y(t) - M(t, \boldsymbol{\lambda})]^2 dt, \quad (2)$$

а оптимальная оценка свободных параметров $\boldsymbol{\lambda}^*$ — это точка, минимизирующая (2) в пространстве параметров [9]:

$$F(\boldsymbol{\lambda}^*) = \min_{\boldsymbol{\lambda} \in \boldsymbol{\Lambda}} F(\boldsymbol{\lambda})$$

(здесь $y(t)$ — аналитическая аппроксимация вектора значений обработанных наблюдаемых данных, представленных на рис. 1; $\boldsymbol{\Lambda}$ — множество возможных значений $\boldsymbol{\lambda}$).

Чтобы найти минимум критерия, нам необходимо вычислить частные производные $\partial F(\boldsymbol{\lambda})/\partial \lambda_k$, $k = \overline{0, K}$, и, приравняв их к нулю, создать систему уравнений такого вида:

$$\frac{\partial F(\boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_k} = \int_T [y(t) - M(t, \boldsymbol{\lambda})] \frac{\partial M(t, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_k} dt = 0. \quad (3)$$

Система уравнений сводится к выражению

$$\int_T [y(t) \cdot \mathbf{D}(M(t, \boldsymbol{\lambda}))] dt = \int_T [M(t, \boldsymbol{\lambda}) \cdot \mathbf{D}(M(t, \boldsymbol{\lambda}))] dt, \quad (4)$$

где $\mathbf{D}(M(t, \boldsymbol{\lambda}))$ — вектор-функция, который состоит из производных модели по всем компонентам $\boldsymbol{\lambda}$. Для модели (1) полученный из формулы (4) вектор имеет вид

$$\mathbf{D}(M(t, \boldsymbol{\lambda})) = \left\{ \frac{\partial M(t, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_{p+i}} \right\}; \quad p = \overline{0, 3}; \quad i = \overline{0, I}. \quad (5)$$

В нашей модели параметры λ_{0+i} — это моменты вступления подмоделей. Для случая потока разрешенных сигналов, т. е. сигналов, носители которых не пересекаются, можно выбрать фрагменты записи с единственным сигналом так же, как и для случая, представленного на рис. 2. В случае потока неразрешенных сигналов, когда носители сигналов пересекаются, модель сигнала опишем соотношением

$$M(t, \boldsymbol{\lambda}) = \sum_{s=1}^S \sum_{i=0}^I \Phi(t - \lambda_{0+i,s}) \lambda_{1+i,s} [e^{-\lambda_{2+i,s}(t - \lambda_{0+i,s})} \sin[\lambda_{3+i,s}(t - \lambda_{0+i,s})]], \quad (6)$$

где S — количество пересекающихся сигналов в группе, т. е. группа состоит из S неразрешенных сигналов. В общем случае S — случайная величина. В матрице свободных параметров модели

$$\boldsymbol{\Lambda} = \{\lambda_{k,s}\}; \quad k = \overline{0, K}; \quad s = \overline{1, S}; \quad K = 4I;$$

столбец с номером s является вектором параметров s -го сигнала. В векторе параметров $\text{mod}(k, 4)$ — это номер λ_0 , λ_1 , λ_2 или λ_3 параметра соответствующей затухающей (или возрастающей) гармоники. Гармоника имеет номер $\text{ant}(k, 4)$. Принимаем следующую символику: $\text{mod}(k, 4)$ — остаток от деления числа k на 4, а $\text{ant}(k, 4)$ — целая часть от деления k на 4. Оптимальная оценка матрицы свободных параметров $\boldsymbol{\Lambda}$, получена как оценка

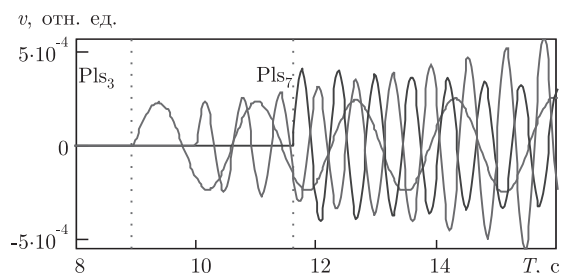


Рис. 3

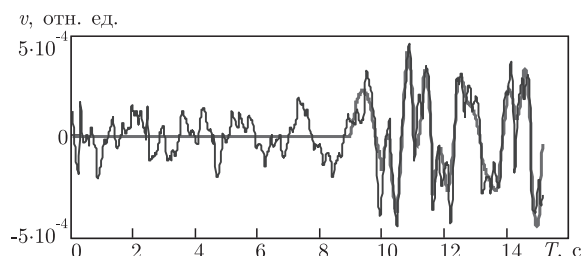


Рис. 4

при минимальном значении критерия на множестве локальных минимумов этого критерия. Каждый локальный минимум вычисляем как ближайший к случайному значению критерия в точке пространства значений свободных параметров модели, которая представляет собой псевдослучайный вектор соответствующей размерности. Процедура получения оптимальной оценки заключается в том, что для множества из M псевдослучайных матриц Λ определяем точки, ближайшие к каждой из них, локальных экстремумов и далее на множестве локальных минимумов выбираем глобальный. Точка, которая дает этот минимум критерию в $(K + 1) \cdot S$ -мерном пространстве, выбирается как оптимальная для свободных параметров модели сигнала. В такой процедуре нам обеспечена сходимость к оптимальному решению по вероятности с ростом количества M псевдослучайных матриц Λ . В результате получен сигнал как суперпозиция трех сигналов, вступивших в разное время в интервале от 8,65 до 11,61 с, которые показаны на рис. 3.

На рис. 4 продемонстрирована оптимальная для нашего примера оценка сигнала (полужирная кривая) на фоне микросейсмического шума (тонкая линия).

Таким образом, нами предложена концептуальная модель сейсмического сигнала и оптимальная процедура его оценки на фоне микросейсмического шума. Эффективность модели проиллюстрирована примером анализа полевых наблюдений.

1. *Dahlman O., Israelson H.* Monitoring underground nuclear explosions. – Amsterdam – Oxford – New York: Elsevier scientific publ. comp., 1977. – 440 p.
2. *Robinson E. A.* Statistical communication and detection with special reference to digital data processing of radar and seismic signals. – London: Charl. Grif., 1967. – 362 p.
3. *Van Trees H. L.* Detection, estimation and modulation theory. Part I. – New York: Wiley, 1969. – 647 p.
4. *Мостовой В. С.* Оптимальные оценки параметров микросейсмического фона // Доп. НАН України. – 2007. – № 12. – С. 115–120.
5. *Frasier C. W.* Single-channel event detector in real time // Seismic Discrimination, Semiannual Technical Summary to the Advanced Research Projects Agency 1 January, 30 June, 1974. – Mass. Institute of Technol., Lincoln Lab., 1974. – P. 51.
6. *Gjoystdahl H., Husebye E.* A comparison of performance between prediction error and bandpass filters. NTNF/NORSAR, Kjeller, Techn. Rep. – 1972. – No 43. – P. 25–28.
7. *Capon J., Greenfield R. J., Kolker R. J., Lacos R. T.* Short period signal processing results for the large aperture seismic arrays // Geophys. – 1968. – **33**. – P. 452–472.
8. *Мостовой В. С.* Оптимальные оценки параметров геофизических полей. – Киев: Наук. думка, 1987. – 208 с.
9. *Plessix R.-E.* A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications // Geophys. J. Intern. – 2006. – **167**. – P. 495–499.

Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 07.05.2007