

ПРОБЛЕМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

© С.В. Мостовой, В.С. Мостовой, 2011

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

Data reduction is an important stage in the analysis and interpretation of geophysical information. The key questions are those connected with the filtration of experimental data under the noise conditions. The paper offers modeling schemes of a low-frequency filtration, their algorithmic and program realization for the data reduction in a seismic frequency band. Field experiments were carried out. Data reduction of these experiments is given as illustrative examples of the offered schemes. They show its efficiency.

Keywords: filtration, noise, acoustic monitoring, mathematical model, field experiments.

Введение. В любом исследовании наряду с полезной информацией всегда имеет место помеха. Ее влияние на исследуемый материал не дает возможности исследователю получить полезную информацию в удобном для него виде. В данной статье предлагаются математические модели борьбы с помехой в системах сейсмоакустического мониторинга с учетом особенностей представления и обработки информации в сейсмическом и нижней части акустического диапазонов частот. Цель статьи – анализ предложенных авторами математических моделей борьбы с помехой в системах сейсмоакустического мониторинга.

Частотный фильтр выделения. Поскольку операция свертки во временной области соответствует операции умножения спектров Фурье свертываемых функций [1], свертка сигнала с ядром, имеющим нужный для фильтрации сигнала спектр, – это простой и легко реализуемый во временной области путь фильтрации. В обработке полевых наблюдений с высоким уровнем шума авторы использовали процедуру свертки сигнала $y(t)$ с ядром $K(t)$ вида гауссовой плотности распределения вероятностей

$$K(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (1)$$

где σ^2 – дисперсия гауссового процесса; t – время наблюдения.

Модуль спектра Фурье преобразования ядра (1) показан на рис. 1. Преобразование Фурье от (1) при $\sigma = 1$ имеет вид:

$$F(\omega) = \exp\left\{-\frac{\omega^2}{2}\right\}. \quad (2)$$

С учетом теоремы подобия [2] спектр Фурье для (1) запишем, как

$$F(\omega) = \sigma \exp\left\{-\frac{\omega^2 \sigma^2}{2}\right\}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что полоса фильтра регулируется величиной параметра σ (рис. 1).

Процедура фильтрации заключается в вычислении интеграла свертки для фильтрованного сигнала $Y(t)$, где интервал $[0, T]$ – длина фрагмента зарегистрированных данных:

$$Y(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^T y(\tau) \exp\left\{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}\right\} d\tau. \quad (3)$$

В полевых наблюдениях при сейсмоакустическом мониторинге строительного объекта колонного типа широкополосная аппаратура зарегистрировала две горизонтальные компоненты собственных колебаний объекта исследования в смеси с аддитивным шумом, связанным с множеством антропогенных и природных источников. Объект исследования – сооружение, размеры которого таковы, что его собственные колебания лежат в сейсмической области (меньше 1 Гц) и объект вполне может моделировать поведение геологического разлома. На рис. 2 и 3 показаны фрагменты этих записей, на рис. 4 – модуль спектра фрагмента одной из компонент записей. Цель эксперимента – определить собственные частоты осцилляции и демпферные свойства объекта на этих частотах. Результат фильтрации одной из компонент иллюстрирует рис. 5, спектральные характеристики фильтрованного сигнала – рис. 6, 7.

Для оценки демпфирующих характеристик объекта проведен активный эксперимент, когда возмущающим входным сигналом был подан короткий импульс, который можно было моделировать δ -функцией. Одна из компонент записи ре-

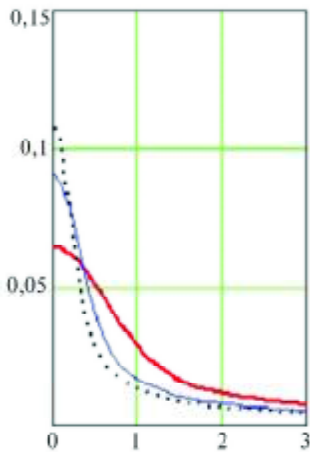


Рис. 1. Модуль спектра Фурье преобразования ядра (1) с различными значениями настройки стандартного отклонения: $\sigma = 0,37 \cdot 4$ – кривая в виде точек; $\sigma = 0,37 \cdot 3$ – синяя кривая; $\sigma = 0,37 \cdot 2$ – коричневая. По оси абсцисс – частота, Гц; по оси ординат – амплитуда, относительные единицы

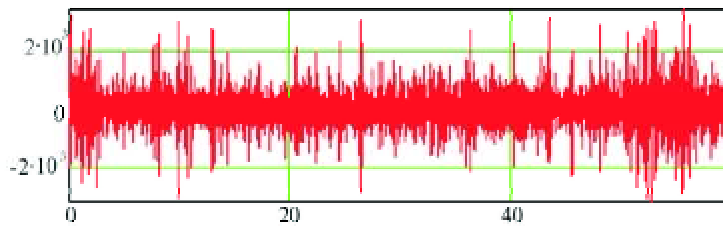


Рис. 2. Фрагмент первой из горизонтальных компонент записи естественного микросейсмического фона. По оси абсцисс – время, с; по оси ординат – амплитуда зарегистрированного сигнала, относительные единицы

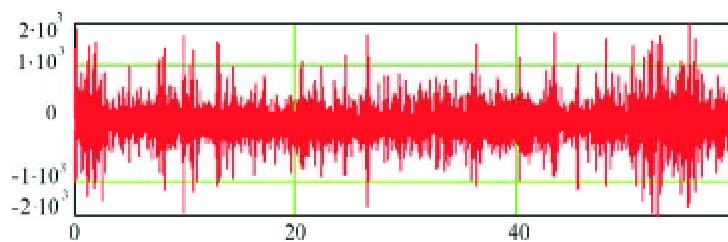


Рис. 3. Фрагмент второй из горизонтальных компонент записи естественного микросейсмического фона. По оси абсцисс – время, с; по оси ординат – амплитуда зарегистрированного сигнала, относительные единицы

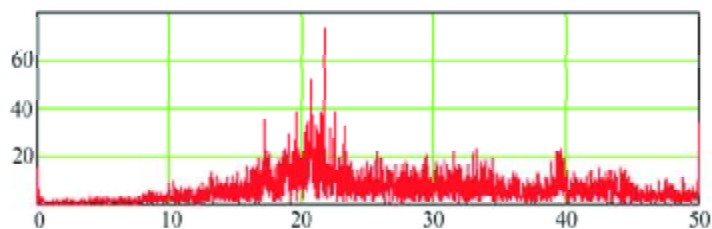


Рис. 4. Модуль спектра Фурье преобразования первой компоненты записи. По оси абсцисс – частота, сотые доли герца; по оси ординат – амплитуда, относительные единицы

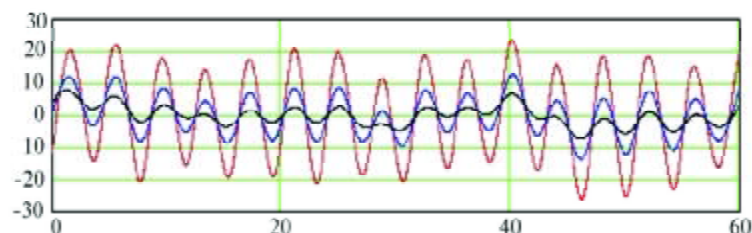


Рис. 5. Результат фильтрации первой из горизонтальных компонент. По оси абсцисс – время, с; по оси ординат – амплитуда фильтрованного сигнала, относительные единицы. Три кривые – результат фильтрации с различными значениями настройки фильтра с гауссовым ядром (параметры стандартного отклонения: $\sigma = 0,37 \cdot 4$ – черная кривая; $\sigma = 0,37 \cdot 3$ – синяя; $\sigma = 0,37 \cdot 2$ – коричневая). Во всех случаях наблюдается устойчивая частота основной гармоники собственных частот

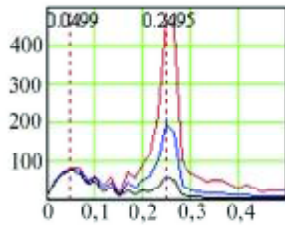


Рис. 6. Спектральные характеристики фильтрованного сигнала первой компоненты записи. По оси абсцисс – частота, Гц; по оси ординат – амплитуда, относительные единицы. Три кривые – результат фильтрации с различными значениями настройки фильтра: $\sigma = 0,37 \cdot 4$ – черная кривая; $\sigma = 0,37 \cdot 3$ – синяя; $\sigma = 0,37 \cdot 2$ – коричневая. Выделяются две доминирующие собственные частоты объекта вне зависимости от параметра настройки фильтра – штриховые линии

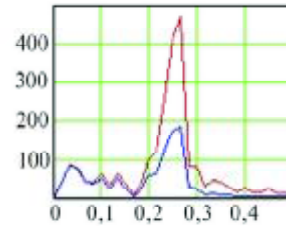


Рис. 7. Спектральные характеристики фильтрованного сигнала второй компоненты записи. Выделяются те же две собственные частоты объекта, что и для первой компоненты. Значение $\sigma = 0,37 \cdot 3$ – синяя кривая, значение $\sigma = 0,37 \cdot 2$ – коричневая

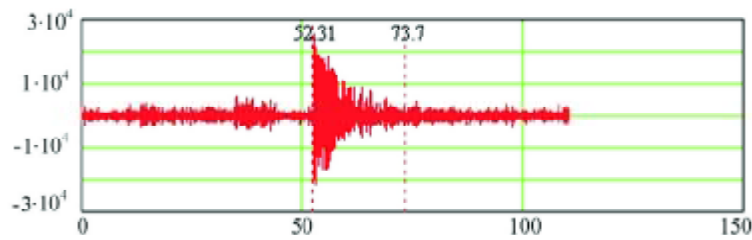


Рис. 8. Реакция системы на входной сигнал типа δ -функции. По оси абсцисс – время, с; по оси ординат – амплитуда зарегистрированного сигнала, в относительных единицах. Штриховая линия – длительность реакции объекта на δ -функцию

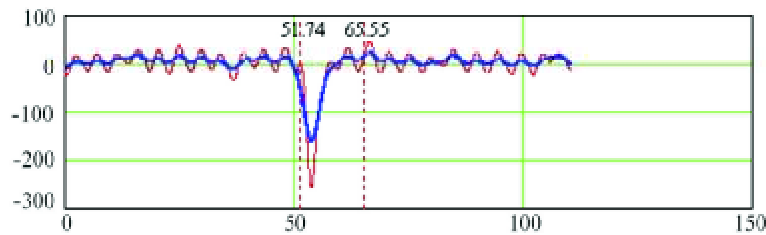


Рис. 9. Результат фильтрации реакции объекта (первая компонента записи) на сигнал типа δ -функции. Наблюдается реакция объекта на доминирующей собственной частоте. Две кривые – результат фильтрации с различными значениями настройки фильтра: $\sigma = 0,37 \cdot 2$ – коричневая кривая; $\sigma = 0,37 \cdot 4$ – синяя. Штриховые линии – оценка длительности отклика объекта на δ -функцию. По оси абсцисс – время, с; по оси ординат – амплитуда зарегистрированного сигнала, относительные единицы

акции объекта на такой сигнал показана на рис. 8, результат фильтрации – на рис. 9.

Процедура подавления низкочастотной помехи.

Приведем еще один важный тип фильтрации, связанный с подавлением низкочастотной помехи. Такая процедура предварительной обработки может быть актуальна в целом ряде случаев. Например, в работе [3] отмечается, что сейсмические широкополосные датчики чувствительны к магнитному полю. Магнитные штормы и искусственные возмущения магнитного поля могут привести к появлению существенного низкочастотного шума при регистрации сейсмических данных. Показано, что вариации в магнитном поле привносятся непосредственно на величину ускорения в сейсмических датчиках. Помеха значительна в пределах периодов от 60 до 1200 с. Это связано с тем, что в пружинах, которые являются неотъемлемой частью в конструкции датчиков, наводится ЭДС, что и вызывает искажения в данных измерений. Эффект не

важен для горизонтальной составляющей, но при регистрации вертикальной составляющей он существен.

Первый этап исследования – построение оптимальных оценок линейного оператора связи помехи, вызванной низкочастотными вариациями магнитного поля, и случайной помехи, на фоне которой сейсмографы регистрируют сигналы. Строится гипотеза о такой модели, связывающей магнитное возмущение $z(t)$ с сейсмическим фонном $y(t)$:

$$y(t - \theta) = \int_{t-T}^t z(\tau) h(t - \tau) d\tau + n(t). \quad (4)$$

Здесь $h(t)$ – стационарный линейный оператор магнитной помехи $z(t)$; $y(t)$ – сейсмический фон, физически осуществимая функция, отличная от нуля лишь на интервале длиной T . Предполагается зависимость оператора $h(t)$, длины T , транспортной задержки θ от координат, в которых ре-

гистрируются функции $y(t)$ и $z(t)$. Аддитивная помеха $n(t)$ в общем случае также зависит от точки, в которой регистрируется прогностический параметр $y(t)$.

Задача заключается в определении оптимальной оценки оператора $\hat{h}(t)$, длины интервала носителя этой функции \hat{T} и задержки $\hat{\theta}$ по предыстории процессов $y(t)$ и $z(t)$ при заданных статистических свойствах нормальной помехи $n(t)$.

В качестве критерия оптимальности (в случае отсутствия каких-либо представлений о T , θ и $h(t)$) рассматривается критерий максимум функции правдоподобия.

Поскольку оператор $h(t)$ предполагается физически осуществимой функцией, отличной от нуля на интервале $(0, T)$, то оценку $\hat{h}(t)$ естественно искать в виде

$$\hat{h}(t) = \sum_{i=1}^n \hat{h}_i \varphi_i(t) \chi(t, \hat{T}) = \sum_{i=1}^n \hat{h}^T \cdot \varphi(t) \chi(t, \hat{T}), \quad (5)$$

где $\chi(t, \hat{T})$ – характеристическая функция интервала:

$$\chi(t, \hat{T}) = \begin{cases} 1, & t \in (0, \hat{T}), \\ 0, & t \notin (0, \hat{T}); \end{cases}$$

$\hat{\mathbf{h}} = \{\hat{h}_i^T\}$ – транспонированный вектор оценок коэффициентов аппроксимирующего ряда при $i=1, n$ (n – количество функций из ортонормированного базиса); оценка оператора $\hat{h}(t)$ аппроксимируется n членами разложения в ряд на интервале $(0, T)$ по ортонормированному базису $\varphi(t) = \{\varphi_i(t)\}$.

Широкий класс моделируемых низкочастотных помех $n(t)$ может быть аппроксимирован стационарным, экспоненциально коррелированным процессом. Ширина полосы в спектральной области и весь процесс определяются двумя параметрами. Корреляционная функция такого процесса имеет вид

$$K(\tau) = \sigma^2 \exp\{-\alpha(\tau)\}. \quad (6)$$

Здесь параметр σ^2 определяет мощность шума, а параметр α – ширину спектра. На рис. 10 представлена корреляционная функция процесса, а на рис. 11 – его спектральная плотность для двух

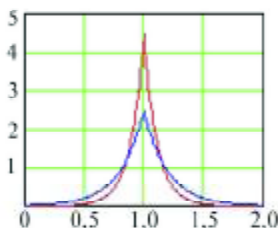


Рис. 10. Корреляционная функция случайного процесса: $\alpha_0 = 9$ – коричневая кривая, $\alpha_1 = 5$ – синяя. По оси абсцисс – частота, Гц; по оси ординат – амплитуда, относительные единицы

значений параметра α . Этот параметр, как видно, определяет и ширину спектра.

Плотность вероятности нормального экспоненциального коррелированного стационарного шума имеет вид [4]

$$F[n(t)] = l \cdot \exp\left[-\frac{n_i^2}{2\sigma^2}\right] \times \exp\left[-\frac{1}{4\alpha\sigma^2} \int_3 \left[\frac{dn(t)}{dt} + \alpha n(t)\right] dt\right]. \quad (7)$$

Здесь l – некоторая константа; n – значение шума в первой точке интервала наблюдения; α и σ – параметры, определяющие корреляционную функцию процесса (1).

Для помехи с функционалом плотности вероятности (7) система уравнений для оптимальной оценки вектора параметров \mathbf{h} будет [5]:

$$\left[\Psi^0(\theta, T) + \left(\frac{1}{2\alpha}\right) \Psi(\theta, T) \right] \mathbf{h} = \mathbf{I}^{(0)}(\theta, T) + \mathbf{I}(\theta, T), \quad (8)$$

где приняты такие обозначения:

$$\begin{aligned} I_i^{(0)}(\theta, T) &= y_i \int_0^T \varphi_i(\tau) z(t+\tau) d\tau; \\ \mathbf{I}^{(0)}(\theta, T) &= \{I_i^{(0)}(\theta, T)\}_{i=1, n}; \\ I_i(\theta, T) &= \int_3 [y_i'(t) + \alpha y_i(t)] \times \\ &\times \left[\int_{t-T}^t \varphi_i(t-\tau) z(\tau+\theta) d\tau + \alpha \int_{t-T}^t \varphi_i(t-\tau) z(\tau+\theta) d\tau \right]; \\ \mathbf{I}(\theta, T) &= \{I_i(\theta, T)\}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{ij}^{(0)}(\theta, T) &= \int_0^T \varphi_i(t-\tau) z(\tau+\theta) d\tau \int_0^T \varphi_j(t-\tau) z(\tau+\theta) d\tau; \\ \Psi^{(0)}(\theta, T) &= \{\Psi_{ij}^{(0)}(\theta, T)\}_{i, j=1, n}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_{ij}(\theta, T) &= \int_3 \int_{t-T}^t (\varphi_i(t-\tau) z(\tau+\theta) d\tau dt + \\ &+ \alpha \int_3 \int_{t-T}^t \varphi_i(t-\tau) z(\tau+\theta) d\tau dt). \end{aligned}$$

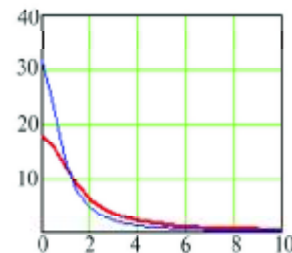


Рис. 11. Спектральные характеристики экспоненциально коррелированного шума: $\alpha_0 = 9$ – синяя кривая, $\alpha_1 = 5$ – коричневая. По оси абсцисс – частота, Гц; по оси ординат – амплитуда, относительные единицы

Как было отмечено, решение системы уравнений (8) даст условно оптимальную оценку вектора параметров $\hat{\mathbf{h}}$, которая зависит от значений θ и T .

Выводы. Использование предложенных авторами математических моделей фильтрации в сейсмоакустическом мониторинге дает возможность существенно снизить влияние помехи на наблюдаемые данные. Такой подход позволяет более успешно обрабатывать наблюдаемые данные с целью прогноза поведения исследуемого объекта. Предложенные в статье модели апробированы авторами на натуральных объектах, а именно при мониторинге монумента независимости в Киеве и дымовой трубы на Рязанской ГРЭС. Можно утверждать, что использование рассматриваемых моделей понижает уровень помехи и существенно улучшает обработку исследуемых данных.

1. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. — М.: Наука, 1968. — 496 с.
2. Араманович И.Г., Луц Г.Л., Эсгольц Л.Э. Функции комплексного переменного. — М.: Наука, 1968. — 415 с.
3. Forbriger T. Reducing magnetic field induced noise in broadband seismic recordings // Geophys. J. Int. — 2007. — 169. — P. 240–258.
4. Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи. — М.: Сов. радио, 1971. — 423 с.
5. Мостовой В.С. Модели обнаружения и идентификации сигналов в системах мониторинга геофизических полей: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Киев, 1996.

Поступила в редакцию 27.09.2010 г.

С.В. Мостовой, В.С. Мостовой

ПРОБЛЕМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Предварительная обработка наблюдаемых данных — важный этап в анализе и интерпретации геофизической информации. Вопросы, связанные с фильтрацией экспериментальных данных, в условиях высокого уровня помех становятся ключевыми в этом процессе. Предлагаются модельные схемы низкочастотной фильтрации, их алгоритмическая и программная реализация для предварительной обработки данных полевых экспериментов в сейсмическом диапазоне частот. Выполнены полевые испытания, предварительная обработка результатов приведена в виде иллюстративных примеров эффективности этих схем.

Ключевые слова: фильтрация, помеха, сейсмоакустический мониторинг, математические модели, полевые наблюдения.

С.В. Мостовой, В.С. Мостовой

ПРОБЛЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ ПІД ЧАС ОБРОБКИ ГЕОФІЗИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Попередня обробка спостережених даних є важливий етап в аналізі та інтерпретації геофізичної інформації. Питання, пов'язані з фільтрацією експериментальних даних, в умовах високого рівня завад стають ключовими в цьому процесі. Запропоновано модельні схеми низькочастотної фільтрації, їх алгоритмічна та програмна реалізація для попередньої обробки даних польових експериментів у сейсмічному діапазоні частот. Виконано польові випробування, попередню обробку результатів яких наведено у вигляді ілюстрованих прикладів ефективності цих схем.

Ключові слова: фільтрація, завада, сейсмоакустичний моніторинг, математичні моделі, польові дослідження.