

УДК 53.082

*А. А. Персичкин, А. А. Шпилевой*

### О МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

*Рассмотрены преимущества использования метода матричных пучков в целях спектрального анализа сигналов, получаемых при помощи сейсмодатчиков. Такое использование позволит повысить эффективность применения сейсмодатчиков в широком классе технических средств, обеспечивающих охрану периметра, контроля доступа, геофизических приборах и т. п.*

*The advantages of using the method of Matrix pencil method in order spectral analysis of the signals received at seismic sensors. This use will increase the effectiveness of application of seismic sensors in a wide range of technical equipments, securing the perimeter, access control, geophysical instruments, and so on.*

**Ключевые слова:** сейсмодатчик, спектральный анализ, декремент затухания, Фурье-преобразование, метод матричных пучков.

**Key words:** seismic sensor, spectral analysis, the damping rate, Fourier transform, Matrix pencil method.



Сигналы, получаемые с сейсмодатчиков [1], как правило, представляют собой сумму экспоненциально-затухающих гармонических колебаний. Спектры частот и декременты затухания таких сигналов могут характеризовать как сам объект воздействия, так и среду их распространения, что находит применение в технических системах охраны периметра, контроля доступа, геофизических приборах и других средствах неразрушающего контроля.

Однако спектральный анализ сейсмических сигналов с помощью традиционных методов, таких как преобразование Фурье, приводит к неоднозначным результатам по спектру частот и невозможности определения декремента затухания. В этой связи перспективным стало использование метода матричных пучков (Matrix pencil method) [2], который успешно используется для спектрального анализа сигналов спада свободной индукции в экспериментах по ядерному магнитному и ядерному квадрупольному резонансам [3; 4].

Мы будем рассматривать сигналы с экспоненциальной огибающей при наличии шума. Входной сигнал с числом  $t$  интересующих нас частот описывается следующим выражением:

$$y_n = x_n + n_n = \sum_{t=1, M} |b_t| \cdot \exp((\alpha_t + j \cdot \omega_t) \cdot n + j \cdot \phi_t) + N_n, \quad (1)$$

где  $n_n$  – компоненты шумовой составляющей;  $a_t$  – декремент затухания экспоненциальной огибающей сигнала;  $|b_t|$  – амплитуда компоненты сигнала  $t$ ;  $\omega_t$  – частота компоненты сигнала  $t$ ;  $\phi_t$  – фаза компоненты сигнала  $t$ .

Компоненты полезного сигнала представим в виде

$$x_n = \sum_{t=1, M} b_t \cdot z_t, \quad (2)$$

где  $b_t = |b_t| \cdot \exp(j \cdot \phi_t)$ ,  $z_t = \exp((\alpha_t + j \cdot \omega_t) \cdot n)$  – комплексная частота.

Для анализа сигнала (1), (2), смешанного с шумом, требуется найти величины  $b_t$ ,  $\omega_t$ ,  $a_t$ . Пусть  $X = (x_0, x_1, \dots, x_n)$  – выборка исследуемого сигнала. Составим две матрицы следующего вида (матрицы Тейплица):

$$X_0 = \begin{pmatrix} x \cdot l & \dots & x_1 & x_0 \\ x \cdot l + 1 & \dots & x_2 & x_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x \cdot n & \dots & \dots & x \cdot l \end{pmatrix}, \quad X_1 = \begin{pmatrix} x \cdot l + 1 & \dots & x_2 & x_1 \\ x \cdot l + 2 & \dots & x_3 & x_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x \cdot n + 1 & \dots & \dots & x \cdot l + 1 \end{pmatrix}.$$

Для матриц  $X_0$  и  $X_1$  составим равенство вида  $C = A^{-1}U_0^H X_1 V_0$ , где  $C$  – квадратная матрица;  $A$ ,  $U$ ,  $V$  – элементы сингулярного разложения матрицы  $X_0$ ;  $A^{-1}$  – обратная матрица диагональной матрицы  $A$ ;  $U$ ,  $V$  – сопутствующие сингулярные вектора;  $U_0^H$  – транспонированная матрица  $U_0$ . Собственные значения  $C$  суть интересующий нас спектр  $z_t$ . На основании (2) найдем амплитуду  $b_t$  при помощи системы линейных уравнений. Методика реализована в Matlab. Результаты анализа сейсмического сигнала в грунте, выполненного методами преобразования Фурье и метода матричных пучков (МРМ) представлены на рисунке 1.

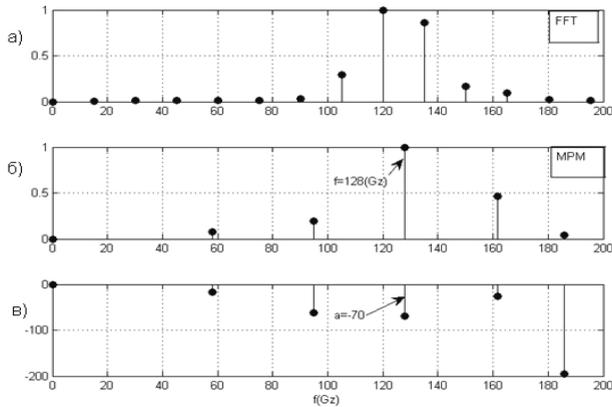


Рис. 1. Результаты анализа сейсмического сигнала в грунте, выполненного методами преобразования Фурье и метода матричных пучков (МРМ)

$a$  – нормированный спектр мощности Фурье-сигнала;  
 $b$  – нормированный спектр мощности сигнала, полученный методом МРМ;  
 $\beta$  – спектр декрементов затухания сигнала, полученный методом МРМ

Анализ полученных данных свидетельствует о преимуществе метода матричных пучков по сравнению с преобразованием Фурье при спектральном анализе сейсмических сигналов. В частности, метод позволил однозначно определить основную частоту (128 Гц) и декремент затухания ( $-70 \text{ с}^{-1}$ ). При помощи рассмотренной методики получен сейсмический сигнал без шумов, представленный на рисунке 2, . Для сравнения на рисунке 2, б приведен исходный сигнал с сейсмодатчика.

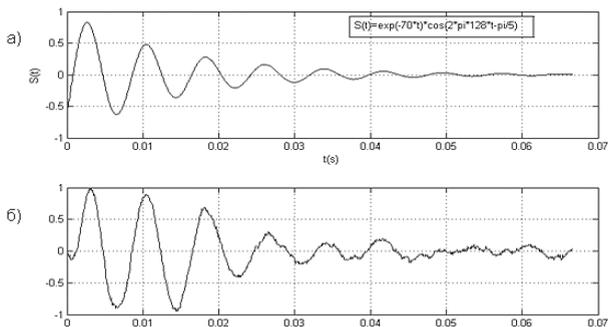


Рис. 2. Сейсмический сигнал без шумов и исходный сигнал:  
 $a$  – сейсмический сигнал, восстановленный методом МРМ;  
 $b$  – исходный сигнал, полученный при помощи сейсмодатчика

Таким образом, метод матричных пучков может с успехом применяться для оценки параметров сейсмических сигналов, а при априорных значениях частот и декрементов затухания - для повышения вероятности обнаружения и анализа источника сейсмических колебаний.



### Список литературы

1. Волков А.Д. Применение сейсмодатчика МЕТ1003 в экспериментальной технике // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 116–120.
2. Hua Y, Sarkar T.K. Matrix Pencil Method for Estimating Parameters of Exponentially Damped/Undamped Sinusoids in Noise // Transaction on Acoustics Speech, and Signal Processing. 1990. Vol. 38, № 5. P. 814–824.
3. Lin Yung-Ya, Hodkinson P., Ernst M., Pines A. A Novel Detection-Estimation Scheme for Noisy NMR Signals: Applications to Delayed Acquisition Data // J. Magn. Reson. 1997. Vol. 128. P. 30–41.
4. Гречишкин В.С., Гречишкина Р.В., Персичкин А.А., Шпилевой А.А. Методы спектрального оценивания в локальном ЯКР при наличии дисперсии // Оптика и спектроскопия. 2002. Т. 93, № 4. С. 582–586.

### Об авторах

Андрей Андреевич Персичкин — ассист., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: persichkinaa@mail.ru

Андрей Алексеевич Шпилевой — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

### About the authors

Andrey Persichkin — Lecturer, I. Kant Baltic Federal University, Senior Lecturer, KPI FSB RF, Kaliningrad.

E-mail: persichkinaa@mail.ru

Dr Andrey Shpilevoy — Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru