

УДК 550.34.013.4

DOI 10.31891/2307-5732-2020-285-3-27

А. А. ЛУКІЯНЧУК

Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

## МЕТОДИКА ВИДІЛЕННЯ КОРИСНОГО СИГНАЛУ НА ФОНІ ЗАВАД

*Сейсмоакустичний моніторинг являє собою режимні спостереження з метою виявлення та ідентифікації сигналів на тлі сейсмічного шуму в сейсмоакустичному діапазоні частот. Мета процесів виявлення та оцінки сейсмічного сигналу на тлі мікросейсмічного шуму полягає в тому, щоб дослідити відмінності між сигналами і шумом, з метою поліпшення спроможності виявлення. Залежно від типу сейсмічних сигналів можуть застосовуватися різні методи виявлення. Процедура, заснована на оцінці ставлення потужності короткострокового сигналу до потужності довгострокового, використовується вже давно. Якщо відношення перевищує встановлений рівень, то приймається рішення, що сталося виявлення, саме цей алгоритм використовується нами при прийнятті рішення про наявність сигналу і грубу оцінку моменту його вступу.*

*Ключові слова: методика, сейсмоакустика, дистанційна розвідка, сейсмічний сигнал, завада.*

A. LUKIYANCHUK

Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv

## METHOD OF SIGNAL EXCRETION ON THE BACKGROUND OF INTERFERENCE

*The purpose of the detection processes, which will be presented below, is to investigate the differences between signals and noise, in order to improve the detection capability. Depending on the type of seismic signals, different detection methods can be used.*

*Commonly used method of filtering the observed data is based on information about the ratio of noise and signal energy. In addition, the spectral composition of seismic signals often differs from the spectral composition of noise, and therefore in this case, the comparison of spectral components is proposed as a possible method to obtain optimal filtering. Noise suppression filters can be useful in cases where only the signal characteristics are known. It is possible to distinguish the type of noise suppression filter, when the prehistory of the process, free of signals, noise is expected, and removes the predicted noise in the fragments where the appearance of signals is expected. They require a high level of noise stationary. Even in this case, error prediction filters are usually less effective than conventional bandpass filters. It should be noted that the seismic background noise produced by the total oscillations of the Earth establishes a natural limitation to what can be detected by seismic equipment.*

*Seismoacoustic monitoring is a mode observation to detect and identify signals on the background of seismic noise in the seismoacoustic frequency range. The purpose of the processes of detection and evaluation of a seismic signal on the background of microseismic noise is to investigate the differences between signals and noise, in order to improve the detection capability. Depending on the type of seismic signals, different detection methods can be used. The procedure is based on the assessment of the ratio of short-term signal power to long-term signal power has long been used. If the ratio exceeds the set level, then a decision is made that the detection occurred. This algorithm is used when deciding on the presence of a signal and a rough estimate of the moment of its entry.*

*Key words: method, seismoacoustics, remote sensing, seismic signal, interference.*

**Вступ.** Мета процесів виявлення, які будуть представлені нижче, полягає в тому, щоб дослідити відмінності між сигналами і шумом, з метою поліпшення спроможності виявлення. Залежно від типу сейсмічних сигналів можуть застосовуватися різні методи виявлення.

Зазвичай використовується методика фільтрації спостережених даних заснована на інформації, про відношення енергії шуму і сигналу. Крім цього спектральний склад сейсмічних сигналів часто відрізняється від спектрального складу шуму, і тому в такому випадку порівняння спектральних компонентів пропонується, як можливий метод отримати оптимальну фільтрацію. Фільтри, які подавляють шум можуть бути корисні у випадках, де відомі тільки характеристики сигналу. Можна виділити тип шумоподавляючого фільтра, коли по передісторії процесу, вільного від сигналів, передбачається шум, і видаляє передбачений шум в фрагментах, де очікується поява сигналів. Вони вимагають високий рівень стаціонарності шуму. Навіть в цьому випадку, фільтри передбачення помилки зазвичай менш ефективні, ніж звичайні смугові фільтри. Потрібно відзначити, що сейсмічний фоновий шум, вироблений загальним коливанням Землі, встановлює природне обмеження тому, що може бути виявлено сейсмічною апаратурою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для всебічного огляду у цій галузі, можна звернутися до робіт по обробці сигналу [1]. Розглянуті в роботі математичні моделі орієнтовані на автоматичне або на інтерактивне виявлення сигналу в записах, коли ці записи піддавалися попередній обробці по вирахуванню значної частини енергії шуму. Вже давно використовуються процедури, засновані на відношенні потужності короткострокового сигналу до потужності довгострокового: якщо відношення перевищує встановлений рівень, то сталося виявлення [2]. Такий підхід використаний в даній роботі для попередньої, грубої оцінки одного з параметрів, що визначають виявлення сигналу, а саме моменту його появи.

**Методика виявлення корисного сигналу на фоні природних і штучних завад.** Зазвичай використовується методика фільтрації заснована на інформації, про відношення шуму і сигналу. Спектральний склад «корисних» сигналів зазвичай відрізняється від спектрального складу шуму, і тому порівняння спектральних компонентів пропонується, як можливий метод отримати оптимальну фільтрацію. У тих випадках, коли форма хвилі сигналу, який буде виявлений, відома, можуть використовуватися так звані фільтри форми хвилі [3]. Цю методику можна розглядати, як кореляцію між сигналом, що виявляється і основним сигналом відомої форми. Основний сигнал може бути або синтетичним або попередньо зареєстрованим сигналом.

Шумозаглушувальні фільтри можуть бути корисні у випадках, коли відомий тільки характер сигналу. Такі фільтри можуть також бути цінні для оцінки форм хвилі сигналу, мінімізуючи ефект від спотворення шумом. Є типи шумозаглушувальних фільтрів, які передбачають шум по його передісторії і видаляють передбачений шум. Ці фільтри часто називаються фільтрами помилки передбачення [4], і вимагають високий рівень стаціонарності шуму. Короткоперіодний шум може розглядатися з постійними статистичними характеристиками, принаймні, кілька годин. Навіть в цьому випадку, фільтри передбачення помилки зазвичай менш ефективні, ніж звичайні смугові фільтри [5]. Інший тип шумозаглушувального фільтра – так званий режекторний фільтр, який по суті вирізає шумові піки зі смуги частот [6]. Схематично саме подібний підхід, але для моделі нестационарного шуму, використовувався в даній роботі. Для шумозаглушення розглядалася процедура вирахування з спостережених даних гіпотетичної моделі мікросейсмічного фону з оптимальним значенням вільних параметрів, отриманих на передісторії процесу [7]. Далі будується оптимальна оцінка для сигналу, що приймається на тлі пригніченого таким чином шуму.

Як зазначено О. Дальман [3], природним обмеженням рівня виявлення сигналів є рівень мікросейсмічного фону. Підвищення чутливості сейсмічних сенсорів «впирається» в рівень шумів, присутніх при вимірах. Ця обставина супроводжує вимір як одиночними станціями, так і при групових вимірах великими масивами розосереджених сенсорів. Не вдаючись в аналіз природи мікросейсмічного фону, відзначимо важливу обставину: його статистичні характеристики залежать від часу і місця спостереження, тобто вони нестационарні як в часі, так і в просторі. Флуктуації статичних характеристик від місця спостереження дозволяють скористатися математичною моделлю, заснованою на гіпотезі про істотну роль у формуванні фону фрагментами середовища, безпосередньо прилеглими до місця вимірювань. І природний сейсмічний фон, в кінцевому рахунку, залежить від таких характеристик, як спектральні властивості цих фрагментів, які можуть змінюватися в часі і таким чином відображати тимчасові зміни і в стані об'єкта. Використання таких моделей дозволяє сподіватися на істотне зниження в попередній обробці рівня природного фону і, як результат, зниження рівня виявляється на цьому тлі сейсмічних сигналів. На рис.1 наведено природний фон, зареєстрований на рукотворному об'єкті, спектральні характеристики якого відповідають частині середньоперіодного і частини короткоперіодного піддіапазонів мікросейсмічного фону. Результат після попередньої обробки інформації природного фону, яка призводить реєстрований сигнал до хвилі, тобто криві на рис. 1 відповідають вимогам хвилі [2], а саме:

$$I. \text{ Кінцева енергія } \int_{-\infty}^{\infty} y(t)^2 dt < \infty, \text{ а в нашому випадку це } \int_{t_0}^T y(t)^2 dt < \infty, \text{ де } [t_0, T] - \text{ інтервал}$$

існування спостережених даних.

$$II. \int_0^{\infty} \frac{|F(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty, \text{ де } F(\omega) - \text{ перетворення функції Фур'є } y(t). \text{ Ця умова має на увазі, що хвиля}$$

не має нульовий компонент в модулі спектра, тобто відсутність постійної складової.

З огляду на це, для виконання другого пункту, всі дані піддалися наступній обробці:  $y(t) - m$ , де

$$m = \int_{t_0}^T y(t)^2 dt < \infty.$$

Повністю методика такої обробки викладена Мостовим С. [8].

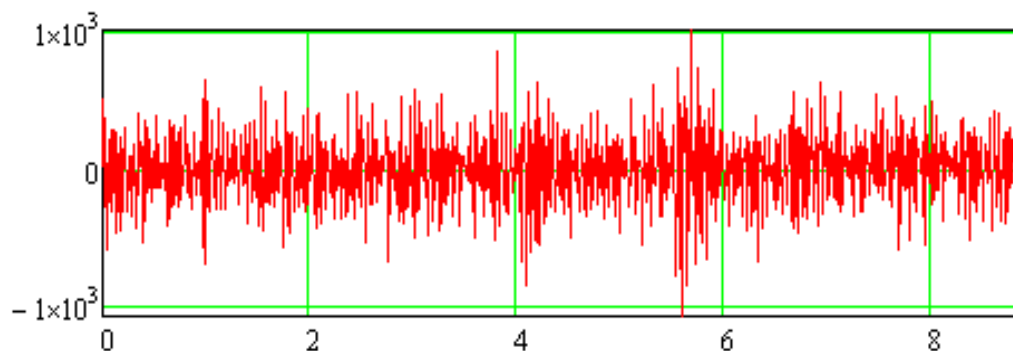


Рис. 1. Природний фон

**Виділення сигналу.** Наступним етапом попередньої обробки є виявлення і оцінка параметрів сигналу, що приймається на тлі мікросейсмічного шуму. В якості оператора виявлення використовуємо оцінку енергії процесу  $E_2(t, T)$  в ковзному вікні фіксованої довжини  $T$  в метриці  $L_2(T)$ :

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

або в метриці  $L_1(T)$ :

$$E_1(t, T) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |y(\tau)| d\tau.$$

Як функції часу  $t$  та довжини вікна  $T$  ці енергії представлені на рис. 2 а для  $E_1(t, T)$  і  $E_2(t, T)$ , а топографія їх рельєфів на рис. 2, б. Суб'єктивність процедури прийняття рішень про наявність сигналу  $S(t, \Lambda)$  в спостережених даних  $y(t)$  або його відсутність в природному тлі  $n(t)$  з енергетичного критерію, тобто однієї з двох альтернатив:

1.  $y(t) = n(t)$ ;
2.  $y(t) = n(t) + S(t, \Lambda)$ , де  $\Lambda$  – безліч параметрів, що визначають сигнал, добре ілюструється малюнками 3–6.

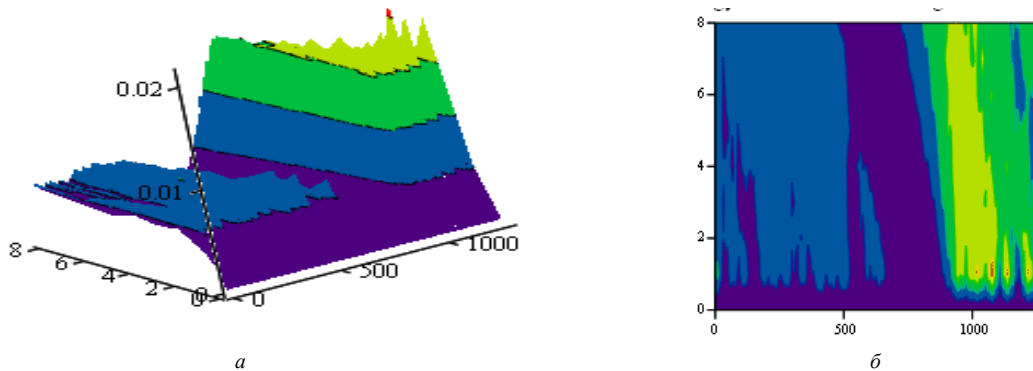


Рис. 2

Ми бачимо, що на результат впливає вибір метрики, вибір довжини ковзного вікна для оцінки рівня енергії в ньому для вже обраної метрики і вибір порога  $H$ , для енергії в ковзному вікні, який і визначає рішення на користь однієї з альтернатив.

**Математична модель сигналу.** В якості моделі сигналу вибираємо суперпозицію рішень диференціального рівняння другого порядку, яка описує суперпозицію осциляторів, що вступили в різні моменти часу, мають свої амплітуди і свої власні частоти.

Оптимальна оцінка параметрів сигналу полягає у визначенні вектора вільних параметрів, які мінімізують значення критерію узгодження моделі зі спостереженими даними. На користь такої моделі вказує та обставина, що вона дає гарне узгодження в разі моделювання лінійної системи коливальних об'єктів і, тим самим, враховує осцилюючий характер спостережених даних, а також її простота. Ми вибрали досить простий випадок і в якості критерію узгодження величини норми (інтеграл від квадрата ухилення моделі від спостережених даних  $y(t)$  або  $L_1$  (інтеграл від модуля ухилення моделі від спостережених даних  $y(t)$ ). У першому випадку критерій  $F(\lambda)$  приймає вигляд:

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

У другому випадку:  $F(\lambda) = \int_T |y(t) - M(t, \lambda)| dt$ . А оптимальна оцінка вільних параметрів  $\lambda^*$  –

це точка в просторі параметрів мінімізує формули:  $F(\lambda^*) = \min_{\lambda \in \Lambda} F(\lambda)$ ,  $y(t)$  – аналітична апроксимація вектора значень оброблених спостережених даних, представлених на малюнку 1.  $\Lambda$  – безліч можливих значень вектора  $\lambda$ .

Пошук мінімуму здійснюється за алгоритмом Лівенберга–Марквард [9], для апріорі випадковим чином обраної точки в просторі вільних параметрів моделі.

**Аналіз отриманих результатів.** Складнощі пошуку глобального мінімуму нашого критерію обумовлені великим числом нелінійно вхідних в модель параметрів. Алгоритм пошуку локального мінімуму, в околі випадковим чином обраної точки в просторі параметрів, здійснюється якнайшвидшим пуском, від цієї точки в найближчій локальний мінімум. Ми бачимо, що при цьому спуску траєкторію «чекає» безліч пасток у вигляді локальних мінімумів. Збіжність до глобального мінімуму може бути пришвидшена, якщо дослідник оперує «хорошими» апріорними знаннями про область можливості значень параметрів, в модель входять нелінійно, наприклад, у вигляді їх апріорних розподілів з малими дисперсіями.

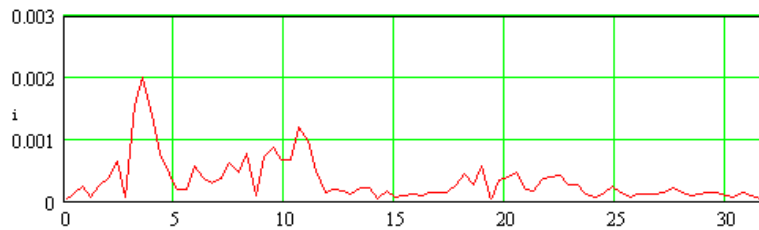
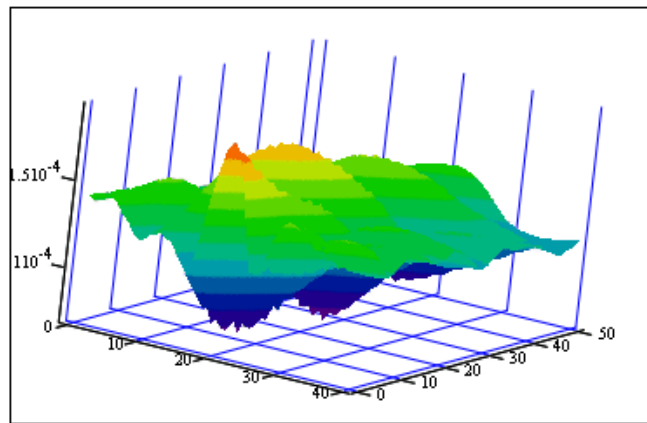


Рис. 3. Модуль спектра Фур'є

На рис. 3 показаний модуль спектра Фур'є  $|F(\omega)|$  фрагменту кривої  $y(t)$  на ділянці початку інтервалу, обраного з енергетичного критерію, як початку несучого сигнал фрагмента запису, тобто від точки виходу кривої рівня енергії  $E_1(t, 8)$  і з-під рівня  $H_1$  до входу під цей рівень або до кінця запису (в нашому виходу до кінця запису). Ця крива дозволяє грубо оцінити значення домінуючих частот в сигналі.

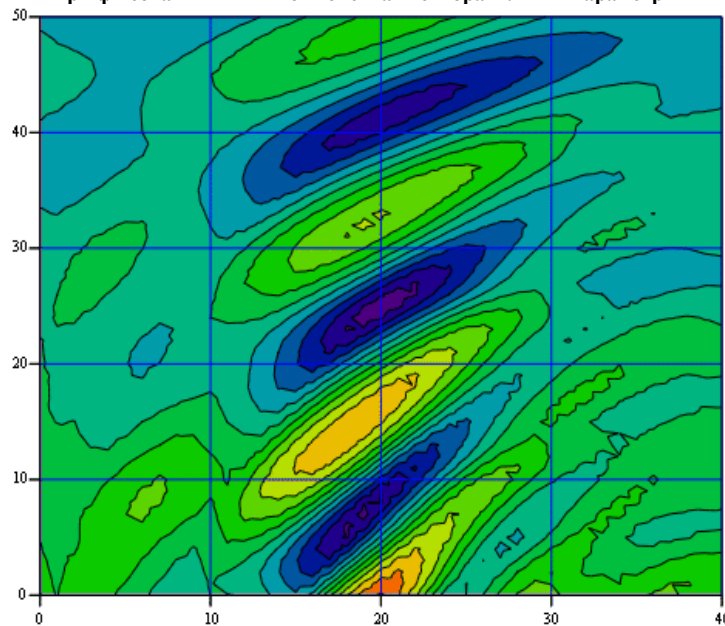
Рішення задач за допомогою симуляції методом Монте-Карло полягає в тому, що по апріорному розподілу векторів вільних параметрів моделі викидається  $N$  псевдовипадкових векторів і для кожного з них відшукується найближчий локальний мінімум. Для кожного з локальних мінімумів обчислюється значення критерію. З безлічі локальних мінімумів вибирається точка, яка дає мінімум критерієм з даної множини точок. Ця точка і вибирається в якості рішення.

**Узагальнення моделі.** Модель може бути узагальнена і для складнішого випадку, а саме потоку недозволених сигналів, тобто коли носії сигналів перетинаються.



МЗ\_1

Рис. 4. Залежність критерію, заданого рівнянням, від амплітуди і частоти першої гармоніки при фіксованих інших компонентах вектора вільних параметрів



МЗ\_1

Рис. 5. Топографія цього критерію

Оптимальна оцінка матриці вільних параметрів в моделі (рис. 4, 5), виходить як оцінка вільних параметрів, що дає мінімальне значення критерію, на безлічі локальних мінімумів цього критерію. Кожен локальний мінімум обчислюється, як і в разі моделі. Процедура отримання оптимальної оцінки полягає в тому, що для безлічі з псевдовипадкових матриць визначаються точки локальних екстремумів, найближчі до кожної з них, і далі на безлічі локальних мінімумів вибирається глобальний. Точка, яка дає цей мінімум критерію у просторі, і вибирається як оптимальна для вільних параметрів моделі сигналу. Як і раніше для моделі в такій процедурі нам забезпечена збіжність до оптимального рішення по ймовірності з ростом кількості псевдовипадкових матриць. В цьому випадку можна вважати, що ми отримали в результаті рішення суперпозицію трьох сигналів, що вступили в різний час (в нашому прикладі в інтервалі від моменту вступу першого осцилятора до моменту вступу останнього).

**Висновки.** Використання розглянутої методики фільтрації в системі сейсмоакустичного моніторингу дає можливість істотно знизити вплив перешкоди на спостережені дані. Такий підхід дає можливість більш успішно обробляти спостережені дані з метою прогнозу поведінки досліджуваного об'єкта. Теоретичні положення підтверджуються розрахунками з попередньої обробки і виділення сигналу з даних польових спостережень.

### Література

1. Robinson, E.A., 1967. Statistical communication and detection with special reference to digital data processing of radar and seismic signals. Charles Griffin and Co. Ltd., London, 362 p.
2. Frasier, C.W., 1974. Single-channel event detector in real time. In: Seismic Discrimination, Semiannual Technical Summary to the Advanced Research Projects Agency 1 January – 30 June 1974. Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory, p. 51.
3. Dahlman O., Israelson H. Monitoring Underground Nuclear Explosions. Amsterdam-Oxford-New York, 1977, 440 p.
4. Peacock, K.L. & Treitel, S., 1969. Predictive deconvolution. Theory and practice. Geophysics, 34:155–169
5. Gjoystdahl, H. & Husebye, E.S., 1972. A comparison of performance between prediction error and bandpass filters. NTNF/NORSAR, Kjeller, Technical Report No, 43.
6. Capon, J., Greenfield, R.J., Kolker, R.J. & Lacoss, R.T., 1968. Short period signal processing results for the large aperture seismic arrays. Geophysics, 33:452–472.
7. Мостовой С.В. Модели оптимизации динамических параметров объекта в пассивном мониторинге / С.В. Мостовой, В.С. Мостовой // Гефиз. журн. – 2007. – С. 35–41.
8. Mostovoy S., Mostovoi V. Active Monitoring and decision making problem. IJ ITA Vol.12, Number 4, Sofia, 2005, p. 127–135.
9. Соболев М.М. Численные методы Монте-Карло / Соболев М.М. – М. : Наука, 1973. – 311 с.

### References

1. Robinson, E.A., 1967. Statistical communication and detection with special reference to digital data processing of radar and seismic signals. Charles Griffin and Co. Ltd., London, 362 p.
2. Frasier, C.W., 1974. Single-channel event detector in real time. In: Seismic Discrimination, Semiannual Technical Summary to the Advanced Research Projects Agency 1 January – 30 June 1974. Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory, p. 51.
3. Dahlman O., Israelson H. Monitoring Underground Nuclear Explosions. Amsterdam-Oxford-New York, 1977, 440 p.
4. Peacock, K.L. & Treitel, S., 1969. Predictive deconvolution. Theory and practice. Geophysics, 34:155–169
5. Gjoystdahl, H. & Husebye, E.S., 1972. A comparison of performance between prediction error and bandpass filters. NTNF/NORSAR, Kjeller, Technical Report No, 43.
6. Capon, J., Greenfield, R.J., Kolker, R.J. & Lacoss, R.T., 1968. Short period signal processing results for the large aperture seismic arrays. Geophysics, 33:452–472.
7. Mostovoy S.V. Modeli optimizacii dinamiceskikh parametrov obekta v passivnom monitoringe / S.V. Mostovoj, V.S. Mostovoj // Gefiz. zhurn. – 2007. – С. 35–41.
8. Mostovoy S., Mostovoi V. Active Monitoring and decision making problem. IJ ITA Vol.12, Number 4, Sofia, 2005, p. 127–135.
9. Sobol M.M. Chislennyye metody Monte-Karlo / Sobol M.M. – M. : Nauka, 1973. – 311 s.

Надійшла / Paper received: 12.04.2020

Надрукована / Paper Printed : 04.06.2020