

В.О. Гордієнко, нач. автослужби
Національний університет оборони України

Ю.О. Гордієнко, к.т.н.
Головний центр спеціального контролю
Національного космічного агентства України

В.А. Кирилюк, к.т.н., с.н.с.
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету

ВИЯВЛЕННЯ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЇХ ДЖЕРЕЛ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

У роботі запропоновано підхід щодо виявлення сейсмічних сигналів за результатами оцінки коефіцієнта лінійності руху часток ґрунту та визначення кутових характеристик джерел сигналів за значенням максимуму скалярного добутку векторів, що характеризують рух часток середовища та очікуваний напрям надходження хвилі. Використання запропонованого підходу дозволяє покращити якісні показники виявлення сейсмічних сигналів та точність визначення кутових характеристик їх джерел при невеликому відношенні сигнал/шум.

Постановка проблеми. Основними елементами обробки вимірювальних даних трикомпонентної сейсмічної станції (ТКСС) є виявлення сейсмічного сигналу й оцінка його параметрів: амплітуди (A_m), періоду (T_m), азимута надходження хвилі (α) та кута її виходу на денну поверхню (γ). Зазначені параметри, у свою чергу, пов'язані з характеристиками сейсмічного джерела відносно пункту спостережень (ПС): α та γ визначають положення осередку сейсмічної події відносно ПС, A_m та T_m визначають магнітуду сейсмічної події.

На даний час більшість реалізованих алгоритмів виявлення сейсмічного сигналу за результатами спостережень ТКСС використовують критерій перевищення амплітуди, який є достатньо ефективним при енергетичному відношенні сигнал/шум не менше 5. Наприклад, для ПС «Ворсівка» (Малинський район Житомирської області) використання даного підходу дозволяє виявляти сейсмічні сигнали від землетрусів з осередками у сейсмоактивній зоні Вранча (румунська частина Карпат) з магнітудою $M_p \geq 4$. Це не відповідає вимогам щодо вирішення завдання моніторингу сейсмоактивних районів, які визначають сейсмічність України [1]. Не задовольняє вимогам точність визначення кутових характеристик джерел сейсмічних сигналів, яка значною мірою залежить від відношення сигнал/шум [2].

Таким чином, завдання пошуку нових підходів щодо виявлення сейсмічних сигналів з невеликим відношенням сигнал/шум та оцінки параметрів сейсмічної події є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з підходів щодо подолання вказаних проблем є застосування поляризаційного аналізу, суть якого полягає у використанні відмінностей поляризаційних властивостей шуму та сигналу. Записи сейсмічних хвиль P та S від вибухів та землетрусів характеризуються лінійною поляризацією коливань, у той час, коли шумові коливання ґрунту мають хаотичний характер з низьким рівнем лінійності поляризації [3]–[5].

Отже, використання поляризаційних властивостей складових сейсмічного сигналу може бути покладене в основу алгоритмічних підходів щодо виявлення сейсмічних сигналів та окремих їх складових. Однак реалізовані на даний час методичні підходи щодо поляризаційного аналізу базуються на апроксимації траєкторії руху ґрунту еліпсоїдом та оцінці його параметрів [6]–[9]. Це вимагає здійснювати обробку вже сформованої вибірки даних, тобто реалізовувати алгоритми обробки поза реальним часом. Крім того, використання цих підходів передбачає наявність апріорної інформації про кутові характеристики сейсмічної події відносно ПС.

Іншим підходом є використання апарату поляризаційної фільтрації (ПФ) [10], [11], суть якої полягає у перерахунку вихідних записів компонент сейсмічного запису ТКСС у повний вектор зміщення та його проекцію на певний напрямок, який задається азимутутом α і кутом виходу сейсмічного сигналу на денну поверхню γ . Реалізація даного підходу можлива в умовах реального часу, але також потребує наявності попередньої інформації про кутові характеристики осередку сейсмічної події відносно ПС.

Постає завдання розробки методики виявлення сейсмічних сигналів за поляризаційною ознакою та визначення азимута надходження сейсмічної хвилі й кута її виходу в умовах відсутності апріорної інформації про кутові характеристики осередку сейсмічної події.

Метою роботи є розробка методики виявлення сейсмічних сигналів, зареєстрованих ТКСС, та оцінювання їх кутових характеристик на основі ПФ.

Основний матеріал. Процедура ПФ можна навести як результат скалярного добутку:

$$p_i(\alpha, \gamma) = g_i \cdot G^{\alpha\gamma}, \quad (1)$$

де $p_i(\alpha, \gamma)$ – проекція повного вектора зміщення ґрунту на напрямок $G^{\alpha\gamma}$;

g_i – поточне значення зміщення ґрунту $g_i = \{n_i, e_i, z_i\}$;

$G^{\alpha\gamma}$ – напрямок, для якого проводиться ПФ $G^{\alpha\gamma} = \{x, y, z\}$, де координати x, y, z пов'язані з азимутом α та кутом виходу γ , як [12]:

$$\begin{aligned} x &= \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha), \\ y &= \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha), \\ z &= \sin(\gamma). \end{aligned} \tag{2}$$

Таким чином, вираз (3) можна надати як

$$p_i(\alpha, \gamma) = n_i \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) + e_i \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha) + z_i \sin(\gamma). \tag{3}$$

За умов відсутності апріорної інформації про кутові характеристики джерела сейсмічної події відносно ПС пропонується перейти від аналізу вимірювальних даних з певного напрямку до аналізу з усіх можливих напрямків, тобто для $\alpha = 0^\circ \dots 360^\circ$ та $\gamma = -90^\circ \dots 90^\circ$:

$$P(\alpha, \gamma) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k g_i \cdot G^{\alpha\gamma}, \tag{4}$$

де k – розмір ділянки сейсмічного запису.

Характер зміни функції $P(\alpha, \gamma)$ визначає поляризацію сейсмічної хвилі. Так, для лінійно поляризованої хвилі функція змінюється від нуля до деякого максимального значення, для еліптично поляризованої – від мінімального до максимального значення. Для зручності аналізу поляризації хвилі використовують коефіцієнт лінійності:

$$G = 1 - \frac{\min P(\alpha, \gamma)}{\max P(\alpha, \gamma)}. \tag{5}$$

Кутові характеристики джерела сигналу визначаються за виразом:

$$(\alpha, \gamma) = \arg \max P(\alpha, \gamma). \tag{6}$$

Для аналізу був взятий сигнал від землетрусу з осередком у сейсмоактивній зоні Вранча (15.05.2009, $M_p = 5,2$), зареєстрованого ТКСС ПС «Ворсівка». На рис. 1 наведено результати розрахунку функції $P(\alpha, \gamma)$ для різних ділянок сейсмічного запису: для шуму та першої фази сейсмічного сигналу.

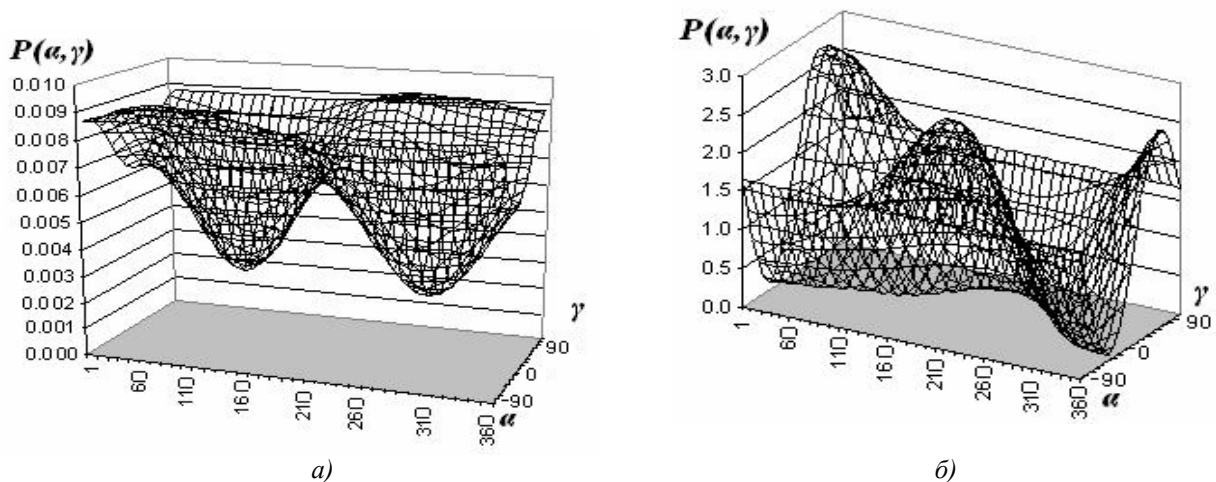


Рис. 1. Вигляд функції $P(\alpha, \gamma)$ для шуму (а) та першої фази сейсмічного сигналу від землетрусу з осередком у зоні Вранча (б)

Значення коефіцієнта лінійності для випадків, які наведені на рис. 1, складає для шуму $G = 0,632$ та сигналу $G = 0,995$. При цьому максимум $P(\alpha, \gamma)$ для сигнальної складової є для кутів $\alpha = 205^\circ$ та $\gamma = -45,5^\circ$, що достатньо точно відповідає кутовому положенню осередку землетрусу відносно ПС «Ворсівка».

Оцінка кутових характеристик та коефіцієнта лінійності проводилася для першої фази сейсмічного сигналу від землетрусу з осередком у зоні Вранча тривалістю 100 відліків, що відповідає 2,5-секундному запису хвильових форм, при частоті дискретизації $f_d = 40$ Гц. Обґрунтованість вибору такої тривалості сейсмічного запису пояснюється рис. 2, на якому наведено значення оцінок коефіцієнта лінійності G для шумової та сигнальної складових та їх відношення залежно від тривалості вибірки.

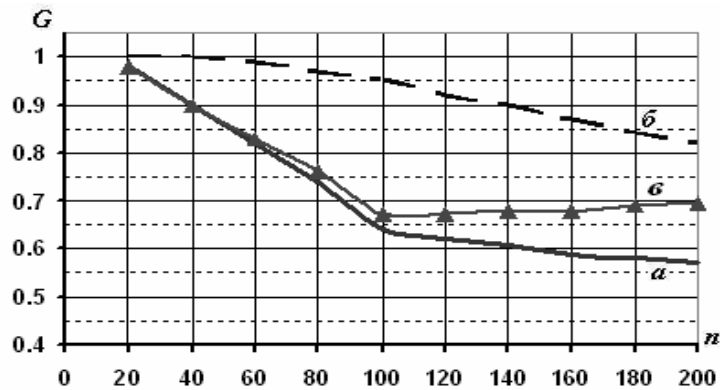


Рис. 2. Залежність оцінки коефіцієнта лінійності G від тривалості вибірки для шуму (а) та першої фази сейсмічного сигналу від землетрусу з осередком у зоні Вранча (б) та їх відношення (в)

Як видно з рис. 2, для вибірки тривалістю $k=100$ відношення оцінки коефіцієнта лінійності для шуму та сигналу набуває мінімального значення, при цьому значення коефіцієнта лінійності для сигнальної складової – не менше ніж 0,95, що забезпечує виявлення сейсмічних сигналів із заданими показниками якості.

На рис. 3 наведено залежність абсолютної похибки Δ визначення кутових характеристик сейсмічного сигналу від рівня сигнал/шум.

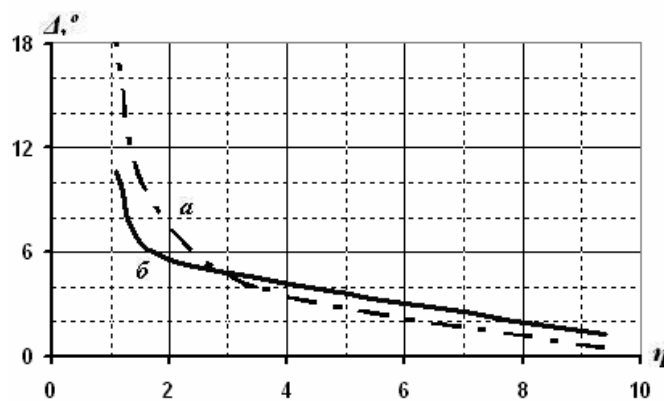


Рис. 3. Залежність похибки визначення кутових характеристик сейсмічного сигналу від рівня сигнал/шум для існуючого (а) та запропонованого способів (б)

Пунктирною лінією зображений графік похибок визначення кутових характеристик методом оцінювання їх математичних сподівань [11]:

$$\alpha = \frac{1111}{k} \sum_{i=1}^k \arctg \frac{e_i}{n_i}, \tag{7}$$

$$\gamma = \frac{11}{k} \sum_{i=1}^k \arctg \frac{z_i}{\sqrt{n_i^2 + e_i^2}}, \tag{8}$$

де e_i – поточне значення зміщення ґрунту вздовж координатної осі "схід–захід";
 n_i – поточне значення зміщення ґрунту вздовж координатної осі "північ–південь";
 z_i – поточне значення зміщення ґрунту вздовж координатної осі "стиснення–розрідження".

Суцільною лінією зображено графік похибок визначення кутових характеристик джерел методом оцінювання положення максимуму функції (4). Аналіз рис. 3 свідчить, що точність визначення кутових характеристик джерела сигналу за виразом (6) вища, ніж за виразами (7) та (8) для невеликих відношень сигнал/шум ($\eta < 3$).

Виявлення сейсмічних сигналів на виході поляризаційного фільтра здійснюється за критерієм Неймана–Пірсона [14]. При цьому рівень порога для коефіцієнта лінійності G складає 0,95. Це значення порога забезпечує ймовірність хибних тривог таку ж, як і для випадку виявлення за амплітудним показником ($P_{хт} = 0,01$). Водночас ймовірність правильного виявлення зростає до 0,92. Це дозволяє здійснювати виявлення сигналів при відношенні сигнал/шум, що не перевищує 2.

На рис. 4, як приклад, наведено сигнал від землетрусу з осередком у зоні Вранча (12.04.2009 р., $M_p = 2$) та результати обробки за запропонованим способом. Відношення сигнал/шум для першої фази складає $\eta = 1,6$, що не дозволяє його виявити за амплітудним показником.

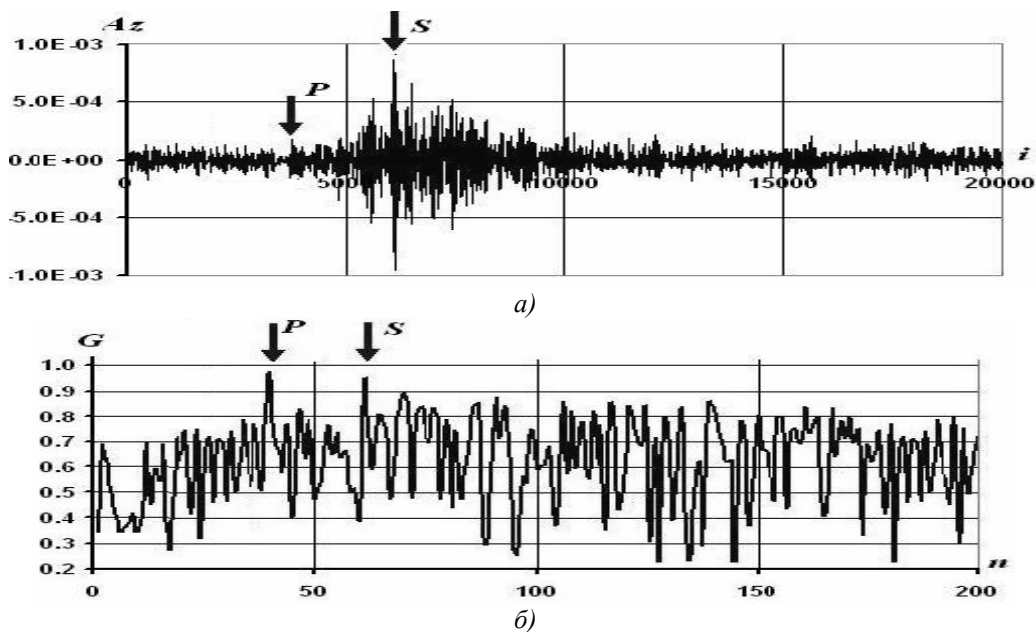


Рис. 4. Сигналограма землетрусу з осередком у зоні Вранча (а) та результати поляризаційної фільтрації (б)

Як видно з рис. 4, значення коефіцієнта лінійності для першої фази сигналу перевищує 0,95, що дозволяє прийняти рішення про наявність сигналу. При цьому кутові характеристики максимуму функції $P(\alpha, \gamma)$ відповідають зоні Вранча. Максимум функції $P(\alpha, \gamma)$ для наступного перевищення порога відповідає кутам $\alpha = 100^\circ$ та $\gamma = -15^\circ$, що є перпендикулярним напрямком для траси розповсюдження P -хвилі. Виходячи з особливостей складових сейсмічних сигналів, а саме – перпендикулярного напрямку коливання часток ґрунту для першої (P -хвиля) та другої (S -хвиля) складових сейсмічного сигналу, а також різниці часу вступу між ними [4], слід зазначити, що друге перевищення порога для коефіцієнта лінійності відповідає S -хвилі.

Висновки. Для виявлення сейсмічних сигналів, зареєстрованих ТКСС, пропонується використовувати апарат ПФ для всіх можливих напрямків надходження сейсмічної хвилі. Запропонований підхід дозволяє виявляти сейсмічні сигнали з незначним відношенням сигнал/шум. Подальші дослідження передбачається спрямувати на розроблення адаптивних до відношення сигнал/шум алгоритмів визначення кутових характеристик джерел сейсмічних сигналів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Машков О.А.* Научные проблемы создания автоматизированной системы обработки сейсмических данных (алгоритмические аспекты) / *О.А. Машков, В.А. Кирилук* // Специальная техника и вооружение. - 2002. - № 1, 2. - С. 35–41.
2. *Машков О.А.* Методика ідентифікаційного виявлення сейсмічних сигналів / *О.А. Машков, В.А. Кирилук* // Моделювання та інформаційні технології : збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. – К., 2002. – Вип. 19. – С. 31–41.
3. *Кедров О.К.* Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / *О.К. Кедров*. – М., Саранск : Крас. Окт., 2005. – 420 с.
4. *Саваренский Е.Ф.* Сейсмические волны / *Е.Ф. Саваренский*. – М. : Недра, 1972. – 293 с.
5. *Александров С.И.* Поляризационный анализ сейсмических волн / *С.И. Александров*. – М. : ОИФЗ РАН, 1999. – 142 с.
6. *Гальперин Е.И.* Поляризационный метод сейсмических исследований / *Е.И. Гальперин*. – М. : Недра, 1977. – 279 с.

7. *Кац С.А.* Нетракторный поляризационный анализ линейно-поляризованных волн, регистрируемых трехкомпонентными установками / *С.А. Кац, Н.Г. Михайлова* // Вычислительная сейсмология. - М. : Наука, 1977. - Вып. 10. - С. 223–233.
8. *Гринюк Ю.В.* Використання поляризаційної фільтрації сейсмічних сигналів для покращення якісних показників їх виявлення / *Ю.В. Гринюк, В.А. Кирилюк, В.О. Сергійко* // Збірник наукових праць ЖВІРЕ. – 2004. - Вип. 8 – С. 124–129.
9. *Алказ В.Г.* Поляризационный анализ сейсмических колебаний / *В.Г. Алказ, Н.И. Онофраш, А.И. Перельберг.* – Кишинев : Штиница, 1977. – 110 с.
10. *Jurkevich A.* Polarization analysis of three-component array data / *Jurkevich A.* // Bull. Seism. Soc. Am. 1988. - Vol. 78. - P. 1725–1748.
11. *Гордієнко Ю.О.* Автоматична ідентифікація об'ємних хвиль за результатами аналізу кутових характеристик сейсмічного сигналу від джерел в ближній зоні / *Ю.О. Гордієнко, О.І. Солонець, Ю.А. Андрущенко* // Збірник наукових праць ХУПС. - 2007. - Вип. 3(4). - С. 27–31.
12. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / *Г.Корн, Т.Корн.* – М. : Наука, 1968. – 716 с.
13. *Пічугін М.Ф.* Обробка геофізичних сигналів у сучасних автоматизованих комплексах : навчальний посібник / *М.Ф. Пічугін, О.А. Машков, В.А. Кирилюк та ін.* – Житомир : ЖВІРЕ, 2007. – 176 с.

ГОРДІЄНКО Вадим Олексійович – начальник автослужби бази забезпечення наукового процесу Національної академії оборони України.

Наукові інтереси:

– обробка геофізичної інформації.

ГОРДІЄНКО Юрій Олексійович – кандидат технічних наук, інженер науково-дослідницького випробувального відділу Головного центру спеціального контролю Національного космічного агентства.

Наукові інтереси:

– обробка геофізичної інформації;

– фрактальний аналіз, детермінований хаос.

КИРИЛЮК Володимир Анатолійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– обробка геофізичної інформації.

Подано 09.01.2010

Гордієнко В.О., Гордієнко Ю.О., Кирилюк В.А. Виявлення сейсмічних сигналів та визначення кутових характеристик їх джерел за результатами поляризаційної фільтрації

Гордиенко В.О., Гордиенко Ю.О., Кирилюк В.А. Обнаружение сейсмических сигналов и определение угловых параметров их источников по результатам поляризационной фильтрации

Gordienko V.O., Gordienko U.O., Kirilyuk V.A. Detection seismic signals and determination of angular parameters of their sources on results of polarization filtration

УДК 550.344.03.42

Обнаружение сейсмических сигналов и определение угловых параметров их источников по результатам поляризационной фильтрации / В.О. Гордиенко, Ю. О. Гордиенко, В.А. Кирилюк

В работе предложен подход к обнаружению сейсмических сигналов по результатам оценивания коэффициента линейности движения частиц грунта и определению угловых параметров источников сигналов по значению максимума скалярного произведения векторов, которые характеризуют движение частиц среды и ожидаемое направление прихода волны. Использование предложенного подхода позволяет улучшить качественные показатели обнаружения сейсмических сигналов и точность определения угловых параметров их источников при небольшом отношении сигнал/шум.

УДК 550.344.03.42

Detection seismic signals and determination of angular parameters of their sources on results of polarization filtration / V.O. Gordienko, U.O. Gordienko, V.A. Kirilyuk

In work offered approach to detection seismic signals on results the evaluation of coefficient of linearness of motion of particles of soil and to determination of angular parameters of sources of signals by value a maximum of scalar multiply of vectors which characterize motion of particles of environment and expected direction of arrival of wave. The use offered approach allows improving the indexes of detection seismic signals and exactness of determination of angular parameters of sources of signals at a small relation signal/noise.