

ФІЛЬТРАЦІЯ ТРИКОМПОНЕНТНОГО СЕЙСМІЧНОГО ЗАПISУ ЗА ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЮ ОЗНАКОЮ

У роботі запропоновано підхід до фільтрації трикомпонентного сейсмічного запису за поляризаційною ознакою. Він відрізняється від існуючих способів поляризаційної фільтрації підсиленням сейсмічних коливань не з певного напрямку, а за ступенем лінійності коливання часток ґрунту, що дозволяє підвищити відношення сигнал/шум незалежно від напрямку надходження сейсмічного сигналу, підсилюючи при цьому кожен його складову. Крім того, запропонований підхід не впливає на форму сейсмічного сигналу, що важливо при вирішенні завдань ідентифікації природи сейсмічного джерела.

Ключові слова: сейсмічний моніторинг, трикомпонентна сейсмічна станція, поляризаційна фільтрація.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Одним з етапів обробки вимірювальних даних сейсмічного методу спостереження при вирішенні завдань сейсмічного моніторингу є фільтрація. Питанням фільтрації вимірювальних даних сейсмічних спостережень присвячено низку робіт [1–4]. Основними напрямками цих досліджень є фільтрація в смузі частот, яка забезпечує максимальне значення відношення сигнал/шум [1]. Однак частотний склад сейсмічних сигналів варіює у відносно широких межах залежно від епіцентральної відстані та енергетичного класу сейсмічної події. Тому у випадках, коли частота сигналу близька до частоти фону, частотна фільтрація (ЧФ) є малоефективною.

У зв'язку з цим завдання розробки нових та удосконалення існуючих підходів до фільтрації сейсмічних даних є **актуальним**.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з ознак сейсмічного сигналу та його складових при реєстрації трикомпонентною сейсмічною станцією (ТКСС) є поляризаційні властивості [5]. Записи сейсмічних хвиль від вибухів, землетрусів та інших джерел характеризуються лінійною поляризацією коливань, у той час як шуми є результатом суперпозиції хвиль, що надходять на станцію від різних джерел та мають низький рівень лінійності поляризації [1]. Ці відмінності сигналів та шумів можуть бути виявлені за допомогою поляризаційного аналізу коливань, а зменшення рівня шумів за даною ознакою може здійснюватися за допомогою поляризаційної фільтрації (ПФ).

ПФ сейсмічних даних полягає у врахуванні значення ступеня лінійності прийнятої реалізації та кутового положення головної півосі еліпсоїда відносно напрямку [1, 5], для якого здійснюється процедура ПФ (визначений напрямок), що реалізується як

$$p_i(\alpha, \gamma) = g_i \cdot G_1 \cdot G_2, \quad (1)$$

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

G_1 – коефіцієнт лінійності ($0 < G_1 < 1$) прийнятої реалізації трикомпонентного запису, який визначається як

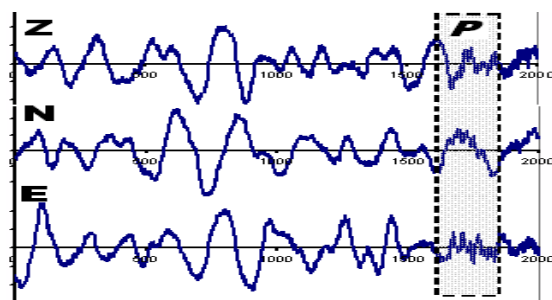
© Ю. О. Гордієнко, 2017

$$G_1 = 1 - \frac{b}{c}, \quad (2)$$

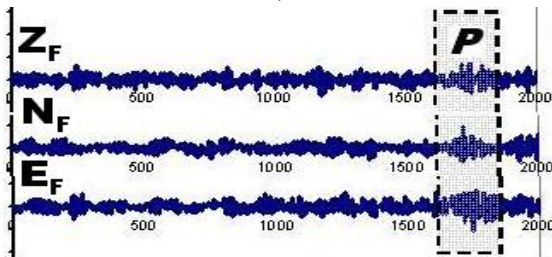
де b та c – значення найменшої та найбільшої півосі еліпсоїда відповідно;

G_2 – значення кута між положенням у просторі найбільшої півосі еліпсоїда та визначеним напрямком, який задається кутом виходу сигналу на денну поверхню γ та азимутом α .

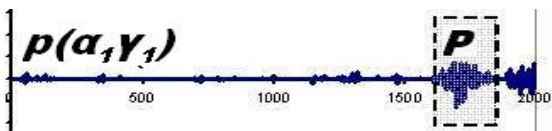
Результати використання ЧФ та ПФ за вказаним способом для першого вступу сейсмічних сигналів (P -хвиля) від землетрусів з осередками поблизу м. Кривий Ріг (24.06.2013) та в горах Вранча (румунська частина Карпат, 06.10.2013) наведено на рис. 1–2.



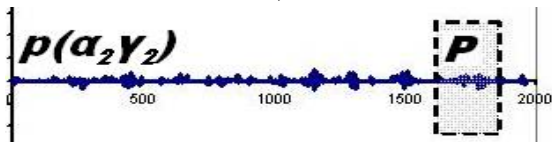
а)



б)

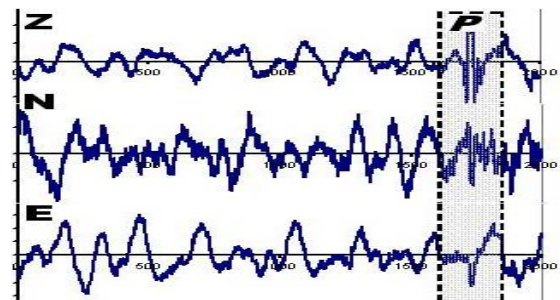


в)

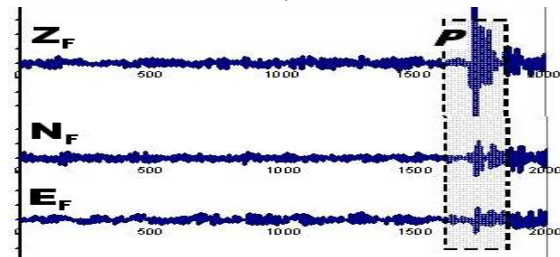


г)

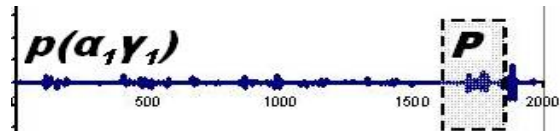
Рис. 1. Результати обробки сейсмічного сигналу від землетрусу поблизу м. Кривий Ріг: а) вихідний запис; б) ЧФ; в) ПФ на джерело події; г) результат ПФ на зону Вранча



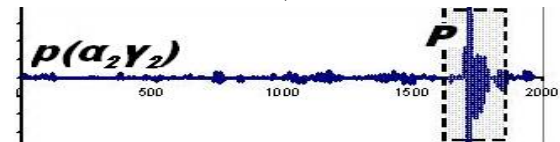
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Результати обробки сейсмічного сигналу від землетрусу в зоні Вранча: а) вихідний запис; б) ЧФ; в) ПФ на джерело події з осередками поблизу м. Кривий Ріг; г) ПФ на джерело події

На рисунках наведено вихідний запис з ТКСС (рис. 1а, 2а), запис після застосування ЧФ у смузі частот 1,8–3,2 Гц (рис. 1б, 2б) та після послідовного застосування ЧФ і ПФ для напрямку ($\gamma = 34^\circ$; $\alpha = 132^\circ$), що відповідає куту виходу сейсмічної хвилі з осередку

сейсмічної події поблизу м. Кривий Ріг (рис. 1в, 2в), та для напрямку ($\gamma = 46^\circ$; $\alpha = 204^\circ$), що відповідає куту виходу сейсмічної хвилі з осередку сейсмічної події в зоні Вранча (рис. 1г, 2г).

Як видно з рис. 1–2, використання існуючих підходів до реалізації ПФ зумовлює підвищення відношення сигнал/шум лише для сигналів з осередками у визначеному (підконтрольному) напрямку та зменшує це відношення для інших напрямків (рис. 1г, 2в).

Врахування поляризаційних властивостей сейсмічних сигналів та фону може бути покладено в основу розробки підходів до фільтрації сейсмічних даних трикомпонентного запису.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розробка методологічних підходів до реалізації процедури фільтрації вимірювальних даних ТКСС за поляризаційною ознакою.

Виклад основного матеріалу. Траєкторія руху часток ґрунту при проходженні сейсмічної хвилі має форму витягнутого еліпсоїда, а для фону – близьку до сфери [5]. Для визначення коефіцієнта лінійності ділянки трикомпонентного сейсмічного запису $\{n_1, e_1, z_2\}$ обчислюється матриця коваріації M [2]:

$$M = \begin{vmatrix} \text{cov}(n,n) & \text{cov}(n,e) & \text{cov}(n,z) \\ \text{cov}(e,n) & \text{cov}(e,e) & \text{cov}(e,z) \\ \text{cov}(z,n) & \text{cov}(z,e) & \text{cov}(z,z) \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Квадратична форма (еліпсоїд), що задається цією матрицею, приводиться до головних осей. Велика вісь еліпсоїда характеризує орієнтацію в просторі повного вектора зміщення певного типу сейсмічної хвилі кутами (азимутом α та кутом виходу γ), а відношення малої b до великої півосі c – рівень прямолінійності поляризації коливань [1, 5].

Враховуючи традиційний підхід до ПФ (1), який використовується при вирішенні завдань безперервного моніторингу певних районів (об'єктів), фільтрацію сейсмічних даних ТКСС за поляризаційною ознакою пропонуємо здійснювати таким чином:

$$\begin{aligned} N_{FPi} &= n_i \cdot G_1 \cdot G^{\alpha\gamma}; \\ E_{FPi} &= e_i \cdot G_1 \cdot G^{\alpha\gamma}; \\ Z_{FPi} &= z_i \cdot G_1 \cdot G^{\alpha\gamma}, \end{aligned} \quad (4)$$

де n_i, e_i, z_i – координати вектора зміщення часток ґрунту;

$N_{FPi}, E_{FPi}, Z_{FPi}$ – координати вектора зміщення часток ґрунту після фільтрації за поляризаційною ознакою;

G_1 – коефіцієнт лінійності прийнятої реалізації (2);

$G^{\alpha\gamma}$ – кут між положенням у просторі поточного значення вектора зміщення та найбільшої півосі еліпсоїда, який визначається як

$$G^{\alpha\gamma} = \frac{n_i \cdot n + e_i \cdot e + z_i \cdot z}{\sqrt{n_i^2 + e_i^2 + z_i^2}}, \quad (5)$$

де n, e, z – координати одиничного вектора, який визначає положення головної півосі еліпсоїда в просторі.

Запропонований спосіб враховує поляризаційну ознаку, але на відміну від (1) підсилює ділянки коливань ґрунту не з певного (підконтрольного) напрямку, а в напрямку кутового положення головної півосі еліпсоїда, визначеного за результатами розрахунку матриці коваріації (3).

На рис. 3 наведено результати використання запропонованого підходу для фільтрації сейсмічних сигналів, зображених на рис. 1–2, за поляризаційною ознакою.

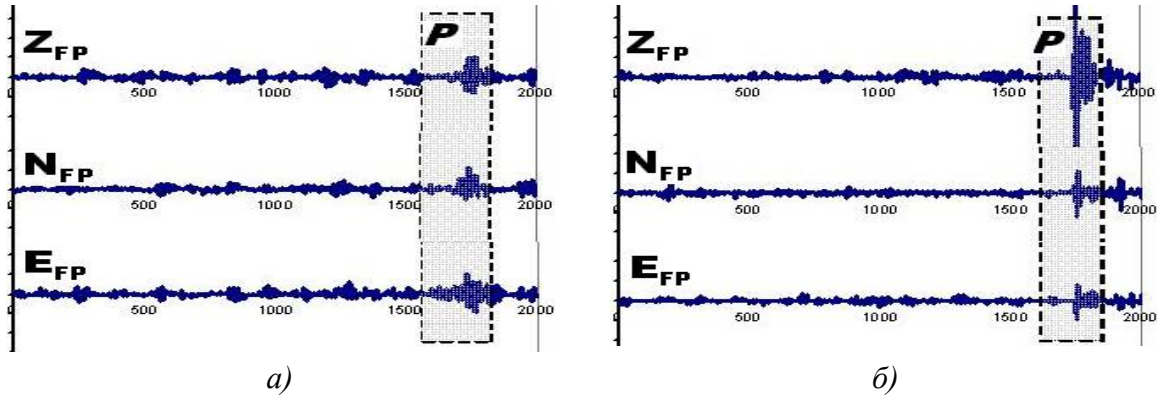


Рис. 3. Результат використання фільтрації за поляризаційною ознакою сейсмічних сигналів від землетрусів з осередками: а) поблизу м. Кривий Ріг; б) у зоні Вранча

Застосування запропонованого підходу дозволяє підвищити відношення сигнал/шум порівняно з ЧФ. На рис. 4 наведено значення зміщення часток ґрунту після застосування ЧФ, ПФ та фільтрації за поляризаційною ознакою. Зміщення часток ґрунту визначаємо в такий спосіб:

$$Q = \sqrt{n_i^2 + e_i^2 + z_i^2} . \quad (6)$$

Відношення сигнал/шум визначалося за відношенням STA/LTA , яке застосовується як попередній виявник [1, 3] та знаходиться таким чином:

$$STA_i = \frac{1}{M_S} \sum_{j=i}^{i+M_S} Q_j , \quad (7)$$

$$LTA_i = \frac{1}{M_L} \sum_{j=i-N_L}^{M_L} Q_j , \quad (8)$$

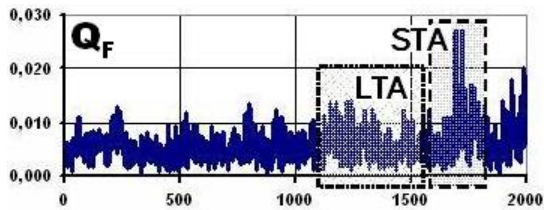
де M_S – найбільш імовірний час тривалості сигнальної складової;

M_L – час, що передуює сигналу, протягом якого оцінюється шум.

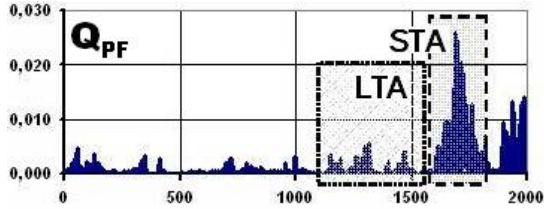
Відношення сигнал/шум після ЧФ, ПФ та фільтрації за поляризаційною ознакою становить відповідно 1,93; 4,72 та 3,47.

Основною перевагою запропонованого способу є те, що його використання, на відміну від ПФ, не зменшує рівня інших складових сейсмічного сигналу (поперечної S -хвилі та поверхневої L -хвилі), параметри яких застосовуються для визначення місцеположення осередку сейсмічної події та ідентифікації його природи [1, 3].

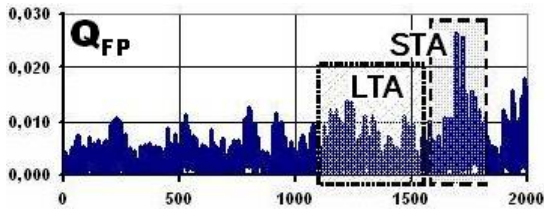
Відношення сигнал/шум для зміщення часток ґрунту, перераховане для результатів застосування ПФ та фільтрації за поляризаційною ознакою, для S -хвилі становить 1,14 та 3,83 відповідно (рис. 5).



а)

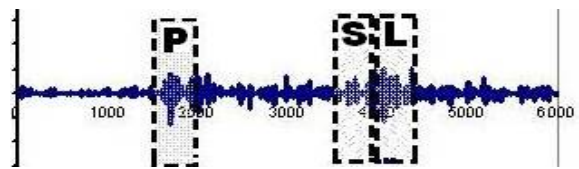


б)

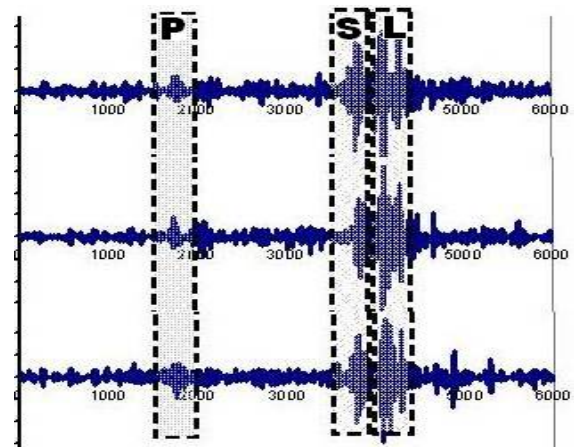


в)

Рис. 4. Зміщення ґрунту для фону та Р-хвилі сейсмічного сигналу від землетрусу з осередком поблизу м. Кривий Ріг: а) ЧФ; б) ПФ; в) фільтрація за поляризаційною ознакою



а)



б)

Рис. 5. Результати ПФ сейсмічного сигналу від землетрусу з осередком поблизу м. Кривий Ріг (а) та фільтрації за поляризаційною ознакою (б)

Іншою перевагою використання запропонованого підходу є незначний вплив на форму сейсмічного сигналу, що особливо важливо при вирішенні завдань ідентифікації природи сейсмічної події (вибуху або землетрусу), яка є наступним етапом обробки вимірювальних даних у рамках сейсмічного моніторингу [1, 6].

На рис. 6 наведено хвильові форми вертикальної складової сейсмічного запису після застосування ЧФ і фільтрації за поляризаційною ознакою, а також відповідні значення коефіцієнта кореляції.

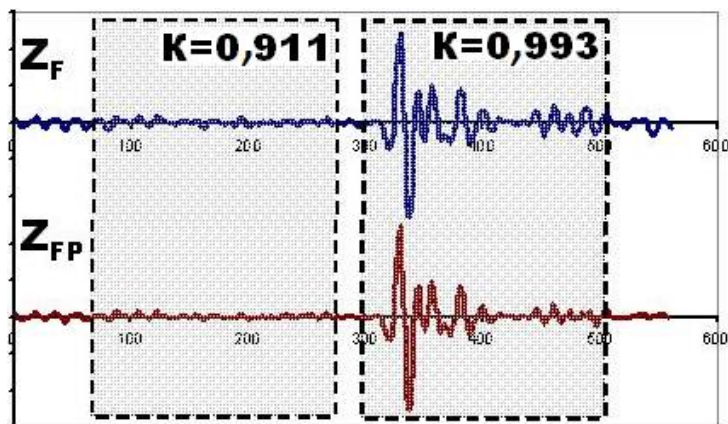


Рис. 6. Вертикальні складові сейсмічного запису фону та першого вступу сейсмічного сигналу від землетрусу з осередком у зоні Вранча

Вказано ділянки сейсмічного запису, для яких проводився розрахунок коефіцієнта кореляції для фону та сигнальної складової, їх кореляція визначалася як

$$K = \frac{\sum_{i=1}^M Z_{Fi} \cdot Z_{FPi}}{\frac{1}{M} \cdot \left[\sum_{i=1}^M Z_{Fi}^2 \cdot \sum_{i=1}^M Z_{FPi}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

де M – тривалості сейсмічного запису, для яких розраховувалося значення кореляції.

Висновки. У роботі запропоновано підхід до реалізації фільтрації вимірювальних даних ТКСС за поляризаційною ознакою. Він ґрунтується на врахуванні поляризаційних властивостей сейсмічних сигналів та фону. Основною перевагою запропонованого підходу є підвищення відношення сигнал/шум незалежно від напрямку надходження сейсмічної хвилі. Врахування поляризаційних властивостей дозволяє здійснювати підсилення складових сейсмічного сигналу. Крім того, даний підхід не впливає на особливості форми сейсмічного сигналу, а відносна простота реалізації дозволяє застосовувати його в режимі реального часу.

Напрямами подальших досліджень є розробка швидких алгоритмів обробки вимірювальних даних ТКСС, що ґрунтуються на врахуванні поляризаційних властивостей сейсмічних сигналів, зокрема виявлення сигналів, визначення основних типів сейсмічних хвиль, локації осередку сейсмічної події, реалізації безперервного моніторингу потенційних джерел надзвичайних подій природного (сейсмоактивні зони) та техногенного (потенційно небезпечні об'єкти) характеру.

Враховуючи обмеженість Національної системи сейсмічних спостережень, розроблення та реалізація таких алгоритмів дозволить вирішувати більшість завдань сейсмічного моніторингу окремими пунктами сейсмічних спостережень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кедров О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / О. К. Кедров. – М., Саранск : Тип. «Крас. Окт.», 2005. – 420 с.
2. Esmersoy С. Three-component array processing / С. Esmersoy, V. Cormier, M. Toksuz // Twenty-Five Year Review of Basic Research, Publisher. – USA, 1985. – P. 565–578.
3. Машков О. А. Методика виявлення сейсмічних сигналів / О. А. Машков, В. А. Кирилук // Труды Академії оборони України. – 2002. – № 35 – С. 122–131.
4. Никифоров И. В. Оперативная обработка данных автоматизированной сейсмической станции. Теория и практика / И. В. Никифоров, И. Н. Тихонов, Т. Г. Михайлова. – Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. – 175 с.
5. Алказ В. Г. Поляризационный анализ сейсмических колебаний / В. Г. Алказ, Н. И. Онофраш, А. И. Перельберг. – Кишинев : Штиница, 1977. – 110 с.
6. Врахування особливостей форми сигналу при вирішенні завдань виявлення сейсмічних сигналів від підземних ядерних вибухів сейсмічною групою / С. П. Куліков, Р. А. Андрошук, Ю. О. Гордієнко, О. І. Солонець // Вісник воєнної розвідки. – К. : НДІ ГУР, 2011. – № 21.–С. 32–38.

Ю. А. Гордиенко

ФИЛЬТРАЦИЯ ТРИКОМПОНЕНТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННОМУ ПРИЗНАКУ

В работе предложен подход к фильтрации трехкомпонентной сейсмической записи по поляризационному признаку. Он отличается от известных способов поляризационной фильтрации усилением сейсмических колебаний не с определенного направления, а по степени линейности колебаний частиц грунта, что позволяет повысить отношение сигнал/шум независимо от направления прихода сейсмического сигнала. Другим преимуществом предлагаемого способа является то, что его применение не уменьшает уровня других составляющих сейсмического сигнала, что важно при решении задач определения местоположения сейсмического источника и его идентификации. Кроме этого, предлагаемый подход не влияет на форму сейсмического сигнала, что значимо при решении задач идентификации природы сейсмического источника.

Ключевые слова: *сейсмический мониторинг, трехкомпонентная сейсмическая станция, поляризационная фильтрация.*

Y. O. Gordienko

FILTRATION OF THREE COMPONENT SEISMIC RECORD ON POLARIZATION SIGN

The paper suggests an approach to filtering a three-component seismic record in terms of the polarization attribute. The proposed approach differs from the known methods of polarization filtration in the amplification of seismic oscillations not from a certain direction, but depending on the scale of soil grain oscillations linearity. Implementation of the proposed approach gives ability to increase the signal-to-noise ratio irrespective of the direction of arrival of the seismic signal. Another advantage of the proposed method is that its application does not reduce the level of other components of the seismic signal, which is important in solving problems of determining the location of a seismic source and its identification. In addition, the proposed approach does not affect the shape of the seismic signal, which is important in solving problems of identifying the nature of the seismic source.

Keywords: *seismic monitoring, three component seismic stations, polarization filtration.*