

DOI: 10.35681/1560-9189.2024.26.2.317415

УДК 550.34.01

**О. І. Бріцький, О. О. Токалін**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

## **Поширення методу кореляційного виявлення руху важких об'єктів при використанні сейсмометрів — вимірювачів швидкості**

*Наведено результати досліджень ідентифікації сейсмічних подій природнього та техногенного характеру із використанням прецизійних цифрових лазерних сейсмометрів і методів кореляційного аналізу. Викладено аналітичний підхід для виявлення співвідношень між взаємно кореляційними функціями сейсмічних процесів, які отримано при вимірюванні зміщень і швидкостей. Такий зв'язок підтверджено експериментально. Було досліджено один і той же сейсмічний процес. Незначні відмінності в отриманих результатах пояснюються збільшенням впливом шумових завад при вимірюванні швидкості сейсмічних процесів.*

**Ключові слова:** рух важкої техніки, цифрові лазерні сейсмометри, велосиметри, сейсмічні портрети швидкості та самих процесів, крос-кореляційний аналіз.

### **Аналіз стану проблеми**

При дослідженні сейсмічних сигналів різної природи виникають проблеми, що пов'язані з походженням таких сигналів. Як показує досвід, сейсмічні сигнали можуть бути отриманими сейсмометрами, які вимірюють прискорення, швидкість чи поточне положення земної поверхні. Останні є найбільш точними завдяки використанню розробленого в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України малогабаритного цифрового лазерного інтерферометра [1], який є надзвичайно чутливим і дозволяє проводити вимірювання навіть в області інфрачастот. Для таких сейсмометрів розроблено кореляційний метод локації та ідентифікації руху важких об'єктів із використанням їхніх сейсмічних портретів [2]. Однак найбільш розповсюдженими в сейсмології є велосиметри, які вимірюють швидкість коливання земної поверхні. Прикладами можуть бути сейсмометри STS 2, Guralp CMG-T40, різноманітні молекуляно-електронні, геофони та інші [3–6]. Тому актуальною є задача поширення розробленого методу кореляційного виявлення руху важких об'єктів при використанні велосиметрів.

© О. І. Бріцький, О. О. Токалін

## Виклад основних результатів дослідження

Ідея проведення досліджень полягала в аналітичному виявленні співвідношень між взаємно-кореляційними функціями портретів і процесів, отриманих для сейсмічних зміщень і швидкостей та експериментальному підтвердженню наявності таких співвідношень.

Зазвичай вважається, що сейсмічні сигнали через наявність шумів є випадковими процесами, причому завжди передбачається, що ці процеси мають властивість ергодичності, тобто усереднення за ансамблем реалізацій процесів еквівалентно усередненню за часом. У цьому випадку взаємно-кореляційну функцію сигналів можна визначити як

$$R_{xy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T d\tau x(\tau) y(t + \tau). \quad (1)$$

Використовуючи заміну змінних  $\theta = \tau + t$ , неважко побачити, що  $R_{xy}(t) = R_{yx}(-t)$ , тобто в разі взаємно-кореляційної функції відсутня комутація за індексами:

$$\begin{aligned} R_{xy}(t) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T + t + T - t} \int_{-T+t}^{T+t} d\theta y(\theta) x(\theta - t) = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T d\theta y(\theta) x(\theta - t) = R_{yx}(-t). \end{aligned} \quad (2)$$

Однак для парних функцій комутативність зберігається.

Використовуючи добре відому формулу диференціювання інтеграла за параметром (формулу Лейбниця)

$$\frac{d}{dt} \int_{v(t)}^{u(t)} d\tau F(\tau, t) = \int_{v(t)}^{u(t)} d\tau \frac{\partial}{\partial t} F(\tau, t) + F(u, t) \frac{du(t)}{dt} - F(v, t) \frac{dv(t)}{dt}, \quad (3)$$

знайдемо похідну  $R_{xy}(t)$ :

$$\frac{d}{dt} R_{xy}(t) = \dot{R}_{xy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T d\tau x(\tau) \dot{y}(\tau + t) = R_{x\dot{y}}(t), \quad (4)$$

яка, як випливає з визначення (1), є взаємно-кореляційною функцією сигналу  $x(t)$  і сигналу  $\dot{y}(t)$ , тобто похідною від сигналу  $y(t)$ , оскільки внаслідок лінійного зв'язку параметра  $t$  та змінної  $\tau$  часткова похідна за параметром дорівнює похідній незалежної змінної, тобто

$$\frac{\partial}{\partial t} y(\tau + t) = \frac{d}{dt} y(t) = \dot{y}(t). \quad (5)$$

Водночас згідно з (2):

$$R_{x\dot{y}}(t) = R_{\dot{y}x}(-t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T+t}^{T+t} d\tau \dot{y}(\theta) x(\theta - t). \quad (6)$$

Виконуючи в (6) інтегрування частинами з урахуванням того, що будь-який вимірюваний сигнал завжди є обмеженим за величиною, отримаємо:

$$\begin{aligned} R_{\dot{y}x}(-t) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left[ y(\theta)x(\theta - t) \Big|_{-T+t}^{+T+t} - \int_{-T+t}^{T+t} d\theta \dot{x}(\theta - t)y(\theta) \right] = \\ &= -\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T+t}^{T+t} d\theta \dot{x}(\theta - t)y(\theta), \end{aligned} \quad (7)$$

оскільки перший член границі прагне до нуля. Повертаючись до старих змінних, отримаємо:

$$R_{\dot{y}x}(-t) = -\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T d\tau \dot{x}(\tau) y(\tau + t) = -R_{\dot{x}y}(t), \quad (8)$$

звідки, диференціюючи вираз (8), знаходимо:

$$-\dot{R}_{\dot{x}y}(t) = -\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T d\tau \dot{x}(\tau) \dot{y}(\tau + t) = -R_{\dot{x}\dot{y}}(t). \quad (9)$$

Таким чином, взаємно-кореляційна функція для продиференційованих за часом сигналів  $\dot{x}(t)$  і  $\dot{y}(t)$  має простий зв'язок із взаємно-кореляційною функцією вихідних сигналів:

$$R_{\dot{x}\dot{y}}(t) = -\ddot{R}_{xy}(t). \quad (10)$$

Цей зв'язок має місце для будь-яких обмежених амплітудами ергодичних випадкових процесів і може розглядатись як доведена теорема. У зв'язку з тим, що більшість сейсмодатчиків вимірюють швидкості переміщення, а датчик, заснований на використанні цифрових лазерних інтерферометрів, вимірює безпосередньо переміщення в місці його встановлення, доведені співвідношення можуть бути використані для порівняння кореляційних функцій зазначених датчиків сейсмічних хвиль  $R_{\dot{x}\dot{y}}(t)$  і  $R_{xy}(t)$ .

Поряд із класичним визначенням взаємно-кореляційної функції (1) для аналізу сигналів часто застосовується взаємно-кореляційна функція для позитивних значень аргументу, тобто

$$R_{xy}^+(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T d\tau x(\tau) y(\tau + t), \quad (11)$$

що формально можна подати як добуток  $R_{xy}^+(t) = R_{xy}(t) \cdot t_+^0$ , де  $t_+^0$  — узагальнена функція, відмінна від нуля лише за позитивних значеннях аргументу. Аналогічно з (4), диференціюючи за часом, отримаємо:

$$\dot{R}_{xy}^+(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T d\tau x(\tau) \dot{y}(\tau + t) = R_{\dot{x}y}^+(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{T+t} d\theta \dot{y}(\theta)x(\theta - t), \quad (12)$$

де знову використано заміну  $\theta = \tau + t$ . Повторне диференціювання (12) згідно з формулою Лейбниці (3) призводить до виразу

$$\dot{R}_{\dot{x}y}^+(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[ -\int_t^{T+t} d\theta \dot{y}(\theta)\dot{x}(\theta - t) + \dot{y}(T+t)x(T) - \dot{y}(t)x(0) \right], \quad (13)$$

в якому два останні члени в граничному переході зникають через обмеженість амплітуди сигналів. Повертаючись до старих змінних, аналогічно (9) та (10), остаточно отримаємо:

$$\dot{R}_{\dot{x}y}^+(t) = \dot{R}_{\dot{x}y}^+(t) = -\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T d\tau \dot{x}(\tau)\dot{y}(\tau + t) = -R_{\dot{x}\dot{y}}^+(t).$$

Для експериментального підтвердження доведених співвідношень порівнювалися результати обробки інформації, отриманої цифровим лазерним сейсмометром і велосиметром для одного і того ж сейсмічного процесу. Сигнали уявного велосиметра отримувалися шляхом диференціювання потоку сигналів цифрового лазерного сейсмометра. У дискретному вигляді оцінка швидкості процесу виконувалася для портрету та процесу за виразом

$$V_n = (X_n - X_{n-1})/\Delta t, \quad (14)$$

де  $\Delta t$  — період роботи АЦП пристрою збору даних.

На рис. 1 представлено результати кореляційної обробки сигналів цифрового лазерного сейсмометра.

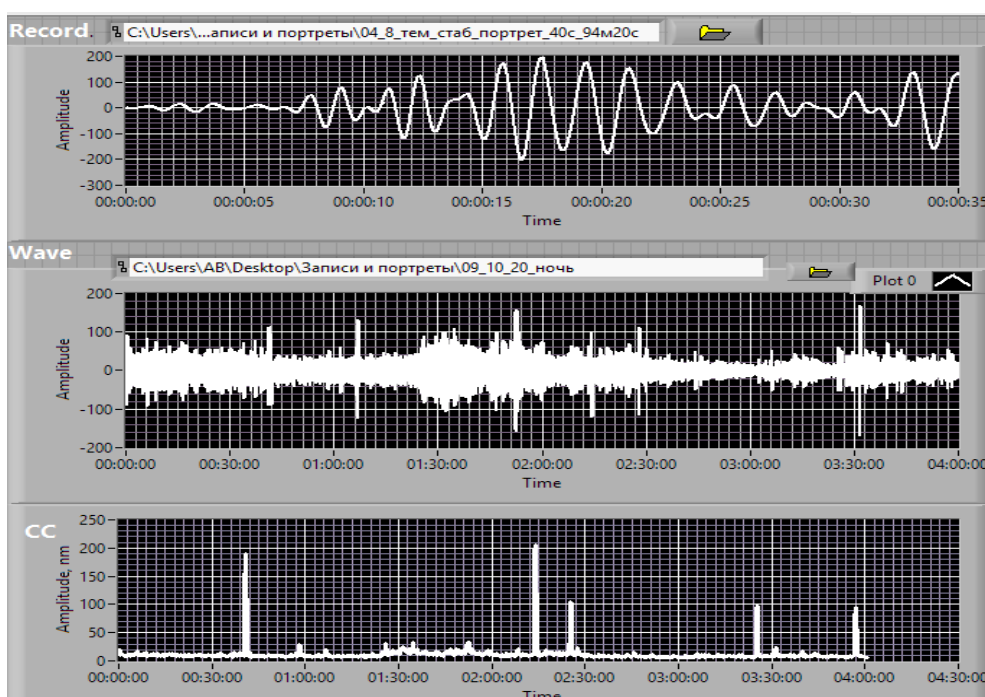


Рис. 1. Результати ідентифікації руху вантажних потягів (CC) у загальному потоці даних (Wave) при використанні сейсмічного портрету (Record) і цифрового лазерного сейсмометра

Після застосування виразу (14) для сейсмічного портрету та потоку даних, що відповідає роботі велосиметра, було проведено повторний кореляційний аналіз зі швидкісними сейсмограмами, результати якого зображено на рис. 2.

Як видно з рис. 2, отриманий результат практично співпадає із зображеним на рис. 1, тобто взаємно кореляційні функції (CC) аналогічно виявляють рух вантажного потягу в загальному потоці даних. Незначні розбіжності пояснюються шумами потокового диференціювання. Цікавим є той факт, що сейсмічний портрет вантажного потягу був отриманий у 2016 році, а сейсмограма залізничного руху протягом 4 годин — у 2020.

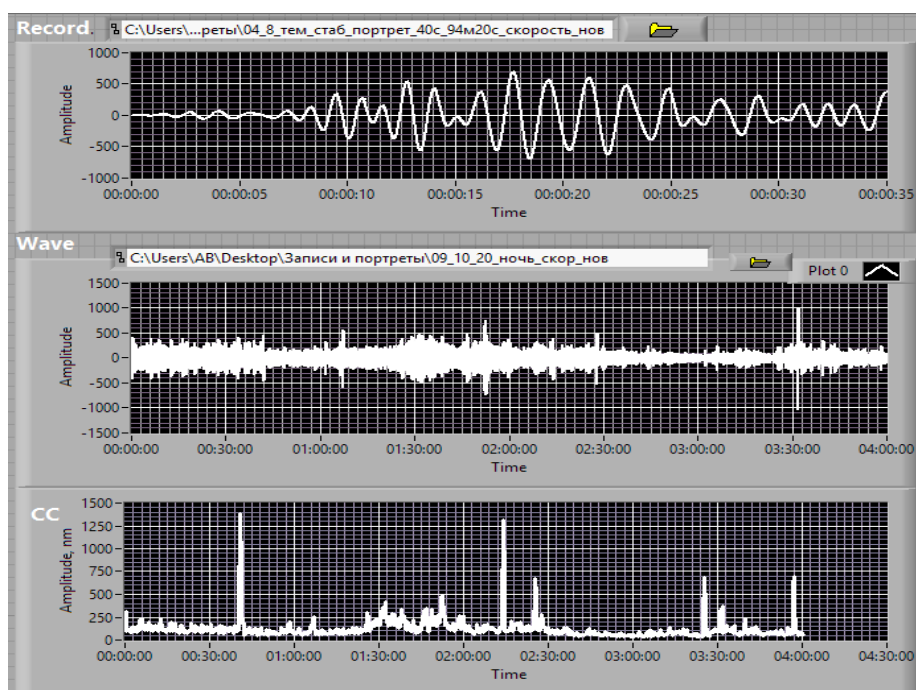


Рис. 2. Результати ідентифікації руху вантажних потягів (CC) у загальному потоці даних (Wave) при використанні сигналів уявного велосиметра

## Висновок

У результаті дослідження підтверджено можливість кореляційної ідентифікації руху важких об'єктів при використанні сейсмічних сигналів велосиметрів.

1. Oleksander I. Britsky; Ivan V. Gorbov; Viacheslav V. Petrov and Iryna V. Balagura. A compact semiconductor digital interferometer and its applications. Proc. SPIE 9506, Optical Sensors 2015, 95060G (May 5, 2015); doi:10.1117/12.2178476; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2178476>.

2. Петров В.В., Брицький О.І., Крючин А.А., Щербина С.В. Ідентифікація сейсмічних подій природного та військового характеру з використанням цифрових лазерних сейсмометрів. *Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики»*, 2023. № 2. С. 67–74.

3. Britsky O., Shcherbyna S., Pigulevskiy P., & Cherevko I. A new laser approach for seismic risk assessment. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2023. **3**. P. 10–18. <http://dx.doi.org/10.17721/1728-2713.102.02>.

4. Chalyi, O., Feshchenko, A., & Shcherbyna S. The cause of cracks on the walls of buildings in the Kyiv-Pechersk Lavra. XVII Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment». 7–10 November 2023, Kyiv, Ukraine.

5. Kril T.V., Cherevko I.A., Shcherbyna S.V., Chalyi O.O. Modern risk assessment of the influences of natural and military man-made factors on the state of the historical buildings of the Kyiv-Pechersk Lavra. DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.309056>.

6. Hai Huang, Vadim Agafonov, Hongyu Yu. Molecular Electric Transducers as Motion Sensors: A Review. *Sensors*. 2013. **13**. P. 4581–4597. <https://doi.org/10.3390/s130404581>.

Надійшла до редакції 10.10.2024