

УДК 550.34.01

В.В. Петров, О.І. Брицький, А.А. Крючин, С.В. Щербина

ІДЕНТИФІКАЦІЯ СЕЙСМІЧНИХ ПОДІЙ ПРИРОДНОГО ТА ВІЙСЬКОВОГО ХАРАКТЕРУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВИХ ЛАЗЕРНИХ СЕЙСМОМЕТРІВ

Петров Вячеслав Васильович

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ,
ORCID: 0000-0002-7265-9889,

petrov@ipri.kiev.ua

Брицький Олександр Ігорович

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ,
ORCID: 0000-0003-1081-7543,

britsky_ai@ukr.net

Крючин Андрій Андрійович

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ,
ORCID: 0000-0002-5063-4146,

kryuchyn@gmail.com

Щербина Сергій Валентинович

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ,

nohup@ukr.net

Наводяться результати досліджень сейсмічних подій природного та військового характеру з використанням цифрових лазерних сейсмометрів. Дослідження спрямовані на ідентифікацію сейсмічних подій шляхом використання прецизійних лазерних сейсмометрів і методів кореляційного аналізу. Актуальність таких досліджень підтверджується підвищенням сейсмічної активності зі значними руйнівними наслідками (Туреччина, Сирія) та агресивними діями Російської Федерації щодо України. Події останніх років свідчать про необхідність моніторингу переміщення важкої техніки та її використання поблизу державного кордону України. Сутність проблеми посилюється широкомасштабним маскуванням таких подій з погляду повітряного, космічного та радіолокаційного спостереження і створенням завад засобам зв'язку. Подібне маскування важко виконати у сейсмічному фізичному полі, але для моніторингу переміщення важкої військової техніки потрібно використовувати надчутливі сейсмометри. Такі сейсмометри розроблені в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України. Їхньою особливістю є застосування цифрових лазерних інтерферометрів як

вимірювальних елементів переміщень земної поверхні з точністю до 2 нм. Ідентифікація виконується шляхом обчислення взаємно кореляційних функцій попередньо записаних сейсмічних портретів важливих подій і поточних сейсмічних записів. При експериментальних дослідженнях використовувалися сейсмічні портрети вантажних і пасажирських залізничних потягів. При цьому виявлялися потяги за портретами п'ятирічної давнини. Очевидно, що з використанням запропонованого підходу можна ідентифікувати рух важкої військової техніки. Це можуть бути танки, самохідні артилерійські установки, бойові машини піхоти. Окремо досліджувалася сейсмічна реакція на дії ствольної артилерії.

Ключові слова: сейсмічні події природнього та військового характеру, сейсмометри з цифровими лазерними інтерферометрами, сейсмічні портрети, кореляційний аналіз.

Вступ

Необхідність ідентифікації сейсмічних подій різної природи існувала завжди. Це стосується землетрусів, карстових мікросейсмів у місцях культурної та історичної спадщини, наслідків техногенних катастроф, результатів військових дій та ін.

Нині особливо актуальним є агресивне застосування сейсмологічних методів в умовах повномасштабної війни Російської Федерації проти України. В доступних джерелах, наприклад в [1], викладені перші системні дослідження в цьому напрямку. Вони були проведені фахівцями США в 2006 році на базі Багдадської сейсмічної обсерваторії. При цьому наводились результати досліджень спектрів швидкостей сейсмічних подій при пострілах і вибухах і висувалась гіпотеза про можливість ідентифікації специфічних військових подій методами сейсмології.

Попередні дослідження, виконані авторами, підтверджують можливість застосування сейсмологічного підходу для аналізу сейсмічних явищ військового характеру.

Події останніх років свідчать про необхідність моніторингу переміщення важкої техніки та її використання поблизу державного кордону України. Сутність проблеми посилюється широкомасштабним маскуванню таких подій з погляду повітряного, космічного та радіолокаційного спостереження і створенням завад засобам зв'язку.

Подібне маскуванню важко виконати у сейсмічному фізичному полі, але для моніторингу переміщення важкої військової техніки потрібно використовувати надчутливі сейсмометри, розроблені в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України. Їхньою особливістю є застосування цифрових лазерних інтерферометрів як вимірювальних елементів. При цьому використовуються стабілізовані напівпровідникові лазери. Вони вимірюють зміщення земної поверхні, а не його швидкість чи прискорення, мають розрізняльну здатність на рівні 2 нм в діапазоні частот 0...100 Гц і можуть бути виконані в об'ємі 0,5 дм³. Програмне забезпечення має відкритий код, що дозволяє використовувати інтерферометр не тільки як вимірювальний елемент, а і як елемент системи наноправління в реальному масштабі часу [2]. Для порівняння лінійні вимірювальні системи провідного світового виробника компанії Renishaw (Велика Британія) [3] використовують лазер HeNe і мають значно більший об'єм і вищу вартість.

Як приклад використання надчутливого сейсмометра на рис. 1 наведено результат реєстрації землетрусу з епіцентром біля м. Маріуполь 7 серпня 2016 року з території Київської області, а також сейсмограму землетрусу та зміну гравітації, що передувала йому.

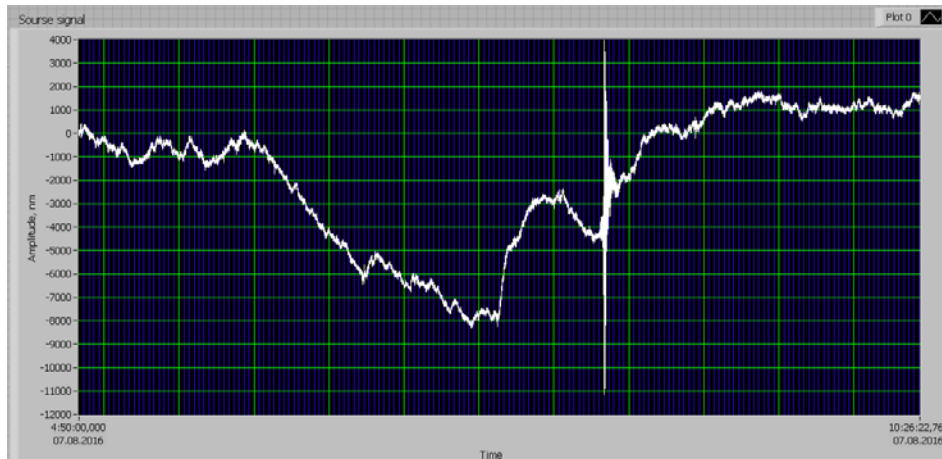


Рис. 1

Необхідно зазначити, що завдання локації та частково ідентифікації сейсмічних подій розглядалися в [4–6], де було зроблено висновок про доцільність застосування кореляційного підходу для вирішення таких задач. При цьому використовувалися огинаючі сейсмограми, методи радіолокації [4] або спектральна подібність сейсмічних сигналів [1]. В [7] для вирішення подібних задач застосовувався сейсмоакустичний комплекс. При цьому тонка структура сейсмічного сигналу і сейсмічні портрети подій, які підлягають ідентифікації, не враховувалися.

Постановка задачі

Обґрунтувати можливість ідентифікації досліджуваних явищ шляхом їх кореляційної обробки з сейсмічними портретами, отриманими за допомогою цифрових лазерних сейсмометрів.

Викладення основних результатів дослідження. Як математичні моделі досліджуваних процесів використані їх сейсмічні портрети та амплітудно-частотні спектри, а в процесі дослідження виконано порівняння сейсмічних портретів із фрагментами реальних процесів. Сейсмограми руху важкої техніки (залізничних потягів), записані цифровим лазерним сейсмометром на відстані 6 км від Південно-Західної залізничної вітки в районі смт Клавдієво–Тарасове Київської області, вважається реальними процесами.

Дослідження виконувалися в програмному середовищі LabView [8] шляхом обчислення взаємно кореляційних функцій сейсмограм руху важкої техніки з їх сейсмічними портретами.

Вираз для обчислення взаємкореляційної функції двох процесів є класичним і має вигляд [8]

$$R_{x,y}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t + \tau) d\tau, \quad (1)$$

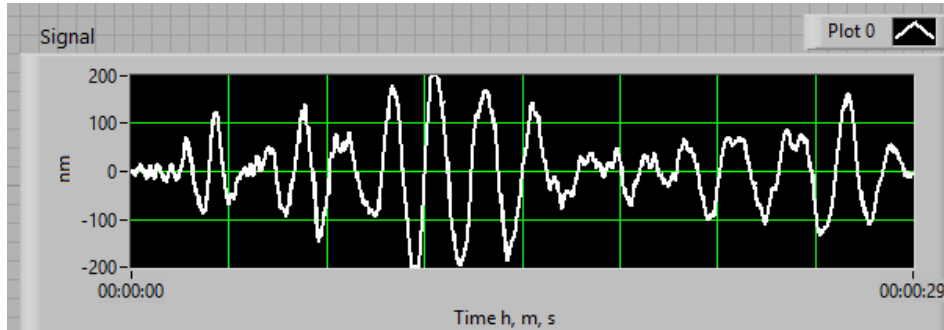
або в дискретному записі

$$h_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k y_{j+k}. \quad (2)$$

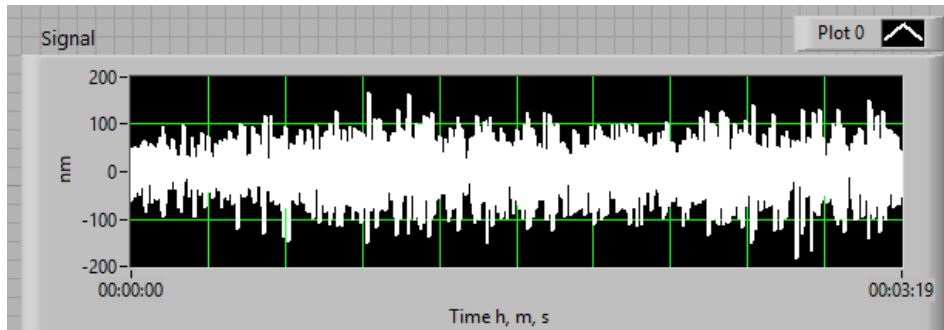
Тут x_k і y_k — портрет і досліджуваний процес відповідно.

При обчисленнях записаний сейсмічний процес зміщувався над сейсмічним портретом. При цьому спостерігалось ототожнення портрету і процесу, тобто виконувався пошук сейсмічного явища, яке зображав сейсмічний процес.

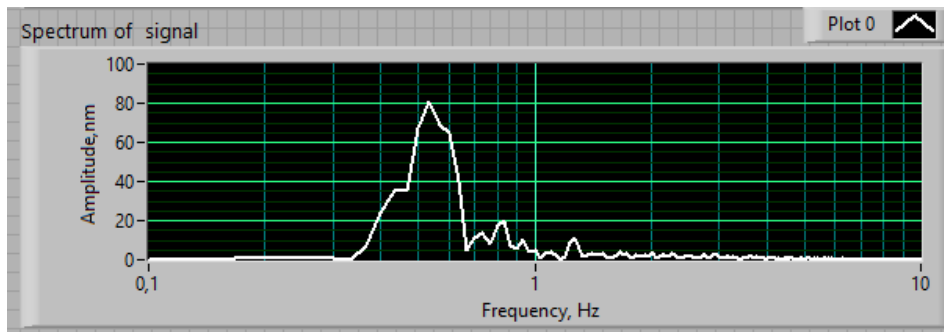
Дискретизація сигналів у виразі (1), що проводилася із урахуванням їх ефективних смуг спектрів, становила 100 Гц, і це підтверджується результатами розрахунків, зображеними на рис. 2, де представлені узагальнені сейсмічні портрети пасажирського і вантажного потягів (рис. 2, *a*, *б*) та їх амплітудно-частотні спектри відповідно (рис. 2, *в*, *г*). Цього достатньо навіть для аналізу швидкостей і прискорень сейсмічних процесів, що досліджувалися окремо.



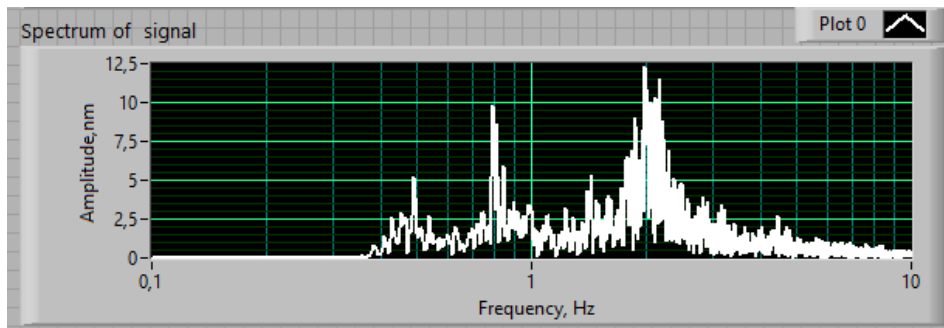
a



б



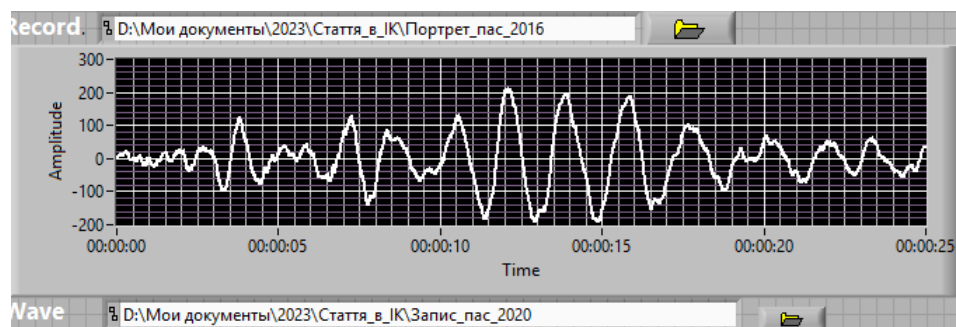
в



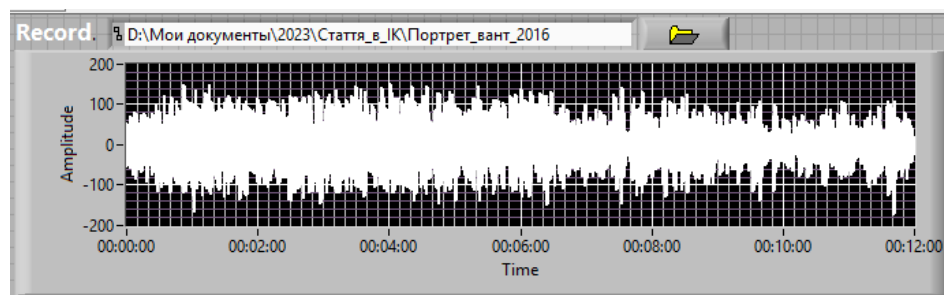
г

Рис. 2

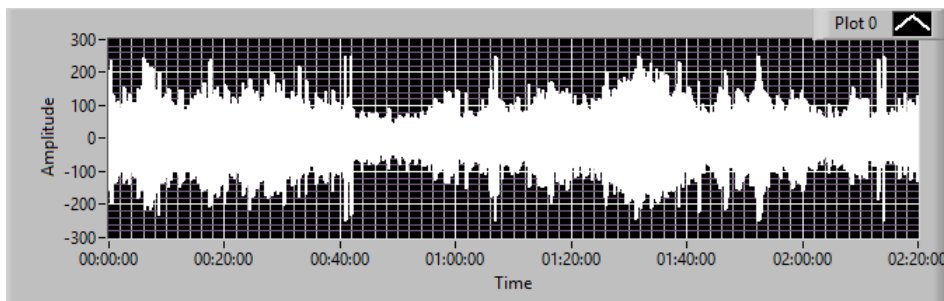
На рис. 3 зображено результати ідентифікації руху різних залізничних потягів із використанням кореляційного аналізу: сейсмічні портрети (рис. 3, а, б), сейсмограми руху (рис. 3, в, г) та результати кореляційного аналізу руху пасажирського і вантажного потягів (рис. 3, д, е, де (1, 2) — виявлення пасажирського потягу; (3, 4, 5) — порожніх (3, 5) і завантаженого (4) вантажних потягів. Цікаво, що між записом сейсмічних портретів (2016 р.) і аналізом сейсмічних процесів (2020 р.) сплинуло чотири роки. Аналогічні експерименти повторювалися щорічно. Останній раз — у 2023 р. При цьому були отримані позитивні результати.



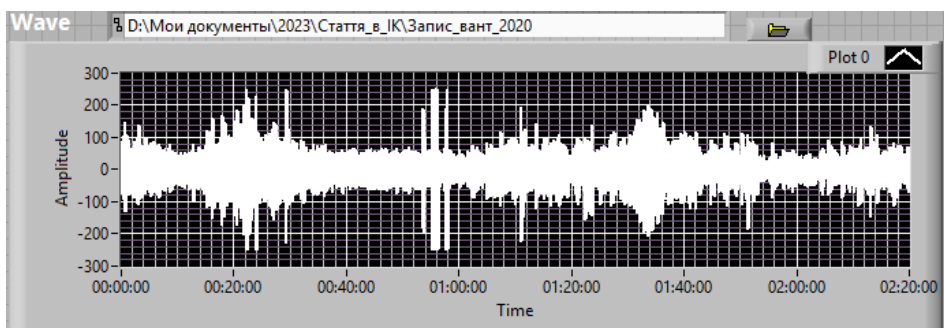
а



б

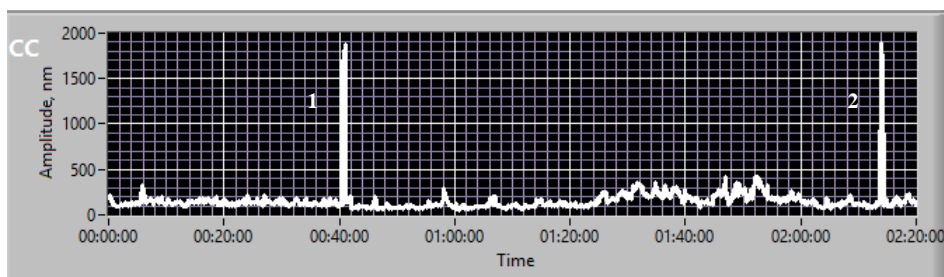


в

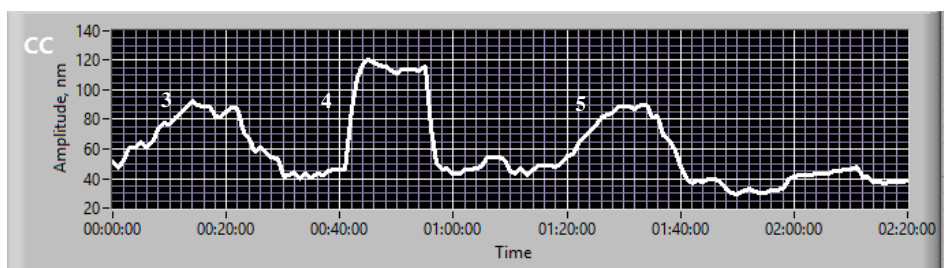


г

Рис. 3



д



е

Очевидно, що за допомогою запропонованого підходу можна виконувати ідентифікацію руху важкої військової техніки. Схематично такий процес зображено на рис. 4, де БТ — броньована техніка. Кореляційна обробка сейсмічної інформації, яка надходить від цифрового лазерного сейсмометра, повинна здійснюватися паралельно відповідно до кількості сейсмічних портретів об'єктів, які підлягають ідентифікації. При цьому кращі результати будуть досягнуті при ідентифікації руху більш важких зразків техніки (танків, самохідних артилерійських установок (САУ), багатоосьових та гусеничних ракетних тягачів).

Сейсмічні портрети окремих зразків важкої військової техніки можна записати на полігонах ЗС України.



Рис. 4

Окремим напрямком дослідження може бути ідентифікація дій ствольної артилерії, а саме, мінометів, гармат танків і САУ.

Висновок

В умовах підвищення сейсмічної активності зі значними руйнівними наслідками (Туреччина, Сирія) та агресивних дій Російської Федерації щодо України зростає актуальність сейсмічних досліджень як у цивільній, так і у військовій сферах. Стосовно військової сфери це — виявлення залізничних потягів вздовж кордону нашої держави і їх завантаженості (порожній, особовий склад, важка військова техніка). Окремим напрямком досліджень є ідентифікація руху важкого озброєння і військової техніки (танки, САУ, бойові машини піхоти, тягачі важкого ракетного озброєння тощо). Такі дослідження можна виконати із використанням розроблених в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України цифрових лазерних сейсмометрів, які дозволяють виміряти тонку структуру сейсмічного сигналу і створити сейсмічні портрети досліджуваних подій. Ідентифікація конкретної події за допомогою кореляційного підходу, зрозуміло, має значну долю імовірності, але при сумісному використанні з іншими способами дослідження може принести значну користь у цивільній та військовій сферах.

Дієвість запропонованого підходу підтверджена багаторічними експериментальними дослідженнями і може бути корисною у цивільній та військовій сферах.

V. Petrov, O. Britsky, A. Kryuchyn, S. Shcherbyna

IDENTIFICATION OF SEISMIC EVENTS OF NATURAL AND MILITARY CHARACTER USING DIGITAL LASER SEISMOMETERS

Viacheslav Petrov

Institute for Information Recording of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv,

petrov@ipri.kiev.ua

Oleksander Britsky

Institute for Information Recording of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv,

britsky_ai@ukr.net

Andriy Kryuchyn

Institute for Information Recording of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv,

kryuchyn@gmail.com

Sergiy Shcherbyna

S.I. Subbotin Institute of Geophysics by S.I. Subbotin name, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv,

nohup@ukr.net

The results of studies of seismic events of natural and military nature with the use of digital laser seismometers are provided. The study is aimed at identifying seismic events by using precision laser seismometers and correlation methods. The relevance of such studies is confirmed by the increase in seismic activity with significant devastating consequences (Turkey, Syria) and aggressive actions of the Russian Federation on Ukraine. The events of recent years indicate the need to monitor the movement of heavy equipment and its use near the state border of Ukraine.

The essence of the problem is exacerbated by large -scale masking of such events in terms of air, space and radar surveillance and the creation of interference with communications. Such masking is difficult to perform in the seismic physical field, but to monitor the movement of heavy military equipment, you need to use hypersensitive seismometers. Such seismometers are developed at the Institute of Problems of Registration of Information of the NAS of Ukraine. Their feature is the use of digital laser interferometers as measuring elements of the displacement of the earth's surface with an accuracy of 2 nanometers. Identification is performed by calculating the mutual correlation functions of pre - recorded seismic portraits of important events and current seismic records. Experimental studies used seismic portraits of freight and passenger railways. At the same time, trains were shown in portraits of five years ago. Obviously, using the proposed approach one can identify the movement of heavy military equipment. These can be tanks, self-propelled artillery installations, infantry fighting vehicles. Separately investigated seismic reaction to the actions of the artillery.

Keywords: natural and military seismic events, seismometers with digital laser interferometers, seismic portraits, correlation analysis.

ПОСИЛАННЯ

1. Aleqabi G.I., Wysession M.E., Ghalib H.A.A. Characterization of Seismic Sources from Military Operations in Urban Terrain (MOUT): Examples from Baghdad. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2015. Vol. 106, N 1. P. 23–41. DOI: 10.1785/0120140187.
2. Britsky O.I., Gorbov I.V., Petrov V.V., Balagura I.V. A compact semiconductor digital interferometer and its applications. *Proc. SPIE 9506, Optical Sensors 2015*. 2015. Vol. 9506. 7 p. DOI: 10.1117/12.2178476.
3. Руководство пользователя: лазерная система XL80. <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/--114809>.
4. Сивцевич В.В., Виноградов А.Е. Формирование эталонов в устройстве распознавания движущихся наземных объектов. *Докл. БГУИР*. 2016. № 1 (95). С. 51–56.
5. Кухальский Н.Е., Кожека П.И. Особенности корреляционной обработки сейсмических сигналов. *Докл. БГУИР*. 2011. № 4 (58). С. 30–35.
6. Фейзханов У.Ф., Незимов С.С. Метод определения XY координат слабо шумящего объекта, основанный на применении алгоритма обратных проекций взаимных корреляционных функций сейсмических сигналов. <https://zetlab.com/podderzhka/vibrometriya-i-akustika/kalibrovka-i-prakticheskoe-prime-nenie-akselerometrov/opredelenie-hy-koordinat-slaboshumyashhego-obekta/>.
7. Никифоров М.М., Пампуха И.В., Лоза В.М., Щербина С.В., Шевцов А.Г. Особенности использования автоматизированного сейсмоакустического комплекса комбинированным методом обнаружения объектов. *Геофизический журнал*. 2018. Vol. 40, № 6. С. 150–158. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151049>.
8. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW. М. : ДМК Пресс, 2007. 472 с.

Отримано 09.03.2023