

# СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

---

## SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

---

---

УДК: 621.391

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307067>

### ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СЕЙСМОСИГНАЛІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

*М. А. Глауберман<sup>1</sup>, Я. І. Леніх<sup>2</sup>, О. С. Максимов<sup>1</sup>, А. П. Балабан<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Навчально-науково-виробничий центр ОНУ імені І. І. Мечникова, [mik\\_ag@i.ua](mailto:mik_ag@i.ua)

<sup>2</sup> Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України, ОНУ імені І. І. Мечникова, [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

### ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СЕЙСМОСИГНАЛІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

*М. А. Глауберман, Я. І. Леніх, О. С. Максимов, А. П. Балабан*

**Анотація:** У роботі проведено аналіз проблеми обробки сейсмосигналів інтелектуальної автономної сейсмічної системи для розвідувально-сигналізаційних і охоронних цілей та визначено основні напрямки створення нової енергетично мало витратної сейсмічної системи подвійного призначення з підвищеною розпізнавальною дальністю виявлення рухомих об'єктів. Розглянуто різні методи обробки сейсмосигналів, їх порівняння з точки зору ефективності виходячи з особливостей їх характеристик і енергозатрат.

**Ключові слова:** сейсмосигнали, ідентифікаційні ознаки, сейсмічні системи, часові методи обробки сигналів

### PROBLEMS OF CHOICE EFFECTIVE METHODS OF TREATMENT OF SEISMO SIGNALS FOR INTELLECTUAL OF SYSTEMS

*M. A. Glauberman, Ya. I. Lepikh, O. S. Maksimov, A. P. Balaban*

**Abstract.** The paper analyzes the problem of processing seismic signals an intellectual autonomous seismic system for reconnaissance, signaling and security purposes and identifies the main directions for creating a new energy-efficient dual-use seismic system with an increased identification range for detecting moving objects. Various methods of processing seismic signals are considered, their comparison in terms of efficiency based on the characteristics of their characteristics and energy consumption.

**Keywords:** seismic signals, identification features, seismic systems, temporary signal processing methods

## ВСТУП

Існуючі системи виявлення руху людини та транспортних засобів як для цілей охорони кордону, різних об'єктів, так і для розвідувально-сигналізаційних цілей відносяться до великого класу розвідувально-сигналізаційних засобів (РСЗ) і характеризуються малою величиною відстані виявлення, відносно великою вагою, недостатньою завадостійкістю та значним енергоспоживанням.

Як правило, до основного складу таких РСЗ входять три типи сенсорів – акустичний, магнітометричний і пасивний інфрачервоний.

Одною з основних причин необхідності розробки технології автоматичних наземних сенсорів полягає в тому, що жоден сенсор не може забезпечити повне покриття всіх цілей на всіх дистанціях. Для цього застосовується багаторівневий підхід, тобто одночасне розгортання кількох різних типів взаємопов'язаних сенсорів з метою отримання якомога більшого обсягу інформації з місця дії, що знаходиться під наглядом.

Охоронні та розвідувально-сигналізаційні сейсмічні системи (ОРССС) це окремий клас РСЗ, які призначені як для розвідувально-сигналізаційних цілей, так і для встановлення факту порушення межі території, що контролюється. При цьому, на основі аналізу сигналів від сейсмічних коливань ґрунту, визначається тип об'єкту проникнення (людина, тварина, транспортний засіб).

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Сучасні сейсмічні системи, які призначені для виявлення рухомих об'єктів можна розділити за цільовим призначенням на два типи - розвідувально-сигналізаційні (далі розвідувальні) та охоронні. Цей поділ фактично є наслідком відмінності локалізації робочих зон встановлених систем: встановлені вони на нейтральній території або території противника для розвідувальних цілей, чи на своїй території для охорони режимних об'єктів. Такий поділ зумовлює також відповідні відмінності у вимогах до систем виявлення [1].

Розвідувальні системи характеризуються скритністю та автономністю на значний період роботи, зокрема, це означає і визначає необхідність здійснювати тривалу роботу на одному комплекті джерел живлення.

Найчастіше така вимога виконується за рахунок точності класифікації (розпізнавання типу) об'єкта та зменшення максимальної дистанції виявлення [2].

Для охоронних систем основна вимога дещо протилежна - максимальна дистанція виявлення та високі характеристики точності системи за рахунок можливості використання потужнішого джерела живлення.

В усьому класі РСЗ вагому і перспективну частину займають інтелектуальні сейсмічні системи (ІСС), які спроможні працювати на необхідній віддалі та розпізнавати рухомі об'єкти у зоні їх дії. Такі системи характеризуються скритністю (сейсмічні засоби виявлення відносяться до засобів пасивного типу) та автономністю на значний час роботи.

Відзначимо, що джерелом інформації для сейсмічних систем про об'єкт виявлення є поверхневі сейсмічні хвилі - хвилі Релея.

При переміщеннях по поверхні землі різних об'єктів (людей, тварин, транспорту) відбувається їх силовий вплив на ґрунт, в результаті чого в ґрунті виникають сейсмічні коливання двох типів: *об'ємні і поверхневі*, останні у свою чергу діляться на два типи: хвилі Лява (L-хвилі) і хвилі Релея (R-хвилі) [3].

Відомо, що внесок хвиль Релея в розподіл енергій між різними типами хвиль в приповерхневому шарі є визначальним. На хвилі Релея припадає близько 70% енергії поверхневих хвиль і саме тому при виявленні наземних рухомих об'єктів сейсмічні перетворювачі реєструють сейсмічні поверхневі хвилі Релея.

Використання сейсмічних сигналів у наземних сенсорних системах потребує вирішення низки проблем, пов'язаних зі складністю характеристик сейсмічної хвилі та її залежністю від базової геології – властивості ґрунту, його неоднорідність, залежність від кліматичних умов, температури, вологості тощо [4, 5].

Відомо, що параметри хвиль Релея, при збільшенні відстані від джерела сейсмічних

коливань до сейсмоприймача змінюються, зокрема в спектрі сигналу, що приймається, високочастотні складові затухають більш інтенсивно. Навіть при незмінній відстані на тому ж самому ґрунті при зміні кліматичних умов спектри відрізняються як граничними частотами, так і структурою [6, 7].

Найбільш складною проблемою раннього виявлення та надійної класифікації рухомих об'єктів (джерел сеймосигналів), яка розглянута в даній роботі, є виділення надійного набору ідентифікаційних ознак об'єкта і створення оптимального алгоритму, який може ефективно охарактеризувати конкретне джерело [8, 9].

Розробка алгоритмів виділення ознак сеймосигналів в системі розпізнавання об'єктів полягає в тому, щоб зібрати набір інформації, яка ефективно і оптимально представляє основні характеристики вхідних даних. Ефективний алгоритм вибору ознак може зменшити загальний об'єм даних, зберігаючи характеристики сигналу, властиві кожному класу, щоб підвищити ефективність класифікації об'єктів. Отже, для успішного функціонування системи важливо розробити такий алгоритм за вимогами конкретного застосування, щоб певний об'єкт міг бути виявлений і ідентифікований відповідним чином. Це складне завдання дослідження, яке вимагає розуміння, які ознаки є найбільше характерними і стабільними, для розробки системи точного розпізнавання об'єктів.

Методи виділення ідентифікаційних ознак часто групуються в три категорії з точки зору області обробки сигналів, а саме: часова, частотна і частотно-часова області.

У класичному варіанті побудова простору ідентифікаційних ознак здійснюється шляхом аналізу особливостей сеймосигналів від об'єктів в часовій, частотній і частотно-часовій областях.

В даний час найбільш використовуваними є системи зі складною обробкою сигналу та використанням складних класифікаторів ідентифікаційних ознак об'єктів (нейромережевий, метод опорних векторів, тощо).

У більшості сучасних віддалених сейсмічних системах використовується обробка сигналу в частотній та/або частотно-часовій областях і ці методи передбачають використання трудомістких енергоємних обчислювальних засобів [10, 11].

Зважаючи на це, обробка сейсмічних сигналів повинна здійснюватися в реальному часі. У віддалених автономних сейсмічних системах при використанні малопотужних мікроконтролерів її бажано проводити базуючись на швидкі оптимальні алгоритми виявлення та розпізнавання об'єктів, наприклад, такі, як швидке перетворення Фур'є (ШПФ) у частотній області, або алгоритм Малла у вейвлет-просторі. Можливий також спектральний аналіз з використанням менш складних алгоритмів - за допомогою аналізу сингулярного спектра. Цей метод є часовим методом обробки сигналу, перевагою якого є відносна простота обчислювальних алгоритмів, можливість побудови образів об'єктів виявлення для кореляційного аналізу сигналів [11, 12].

Можливість використання цього методу та його ефективність була експериментально показана нами у роботах [13, 14]. Встановлено, що для віддалених автономних СС у якості методів розпізнавання людини і транспортних засобів, що рухаються, можуть застосовуватися методи, які використовують часові параметри сейсмічних сигналів від цих об'єктів [15].

Однак, при аналізі нестационарних процесів, якими є сеймосигнали від рухомих об'єктів, цей метод має певні недоліки, а саме - аналіз сингулярного спектру потребує хоч і меншого, ніж у ШПФ і вейвлет-аналізу, однак все ж значного залучення обчислювальних ресурсів мікропроцесора сейсмічної системи, що суттєво позначається на енергоспоживанні системи. Як альтернатива обробки спектрів, також пропонується програмна або апаратна фільтрація сеймосигналу [10, 16].

Необхідно відзначити, що етап попередньої обробки сигналу, що складається зі збору даних і зменшення шуму, дозволяє видаляти небажані сигнали зібраних даних, в той час як корисні сигнали можуть бути підсилені [17, 20].

Подальша обробка сигналів передбачає виділення ряду вибраних характеристик, що представляють деякі специфічні характеристики джерела, які можуть бути не очевидні при первинному аналізі. Після збору ці вектори ознак можна нормалізувати, якщо це збільшує загальну продуктивність обробки сигналу.

В даний час системи для виявлення рухомих об'єктів по сейсмічному сигналу використовують переважно спектральні та спектрально-часові методи обробки сейсмосигналу. Однак, використання цих методів призводить до значного ускладнення обробки сигналів, що суттєво збільшує обчислювальні та енергетичні витрати пристроїв і систем виявлення. Очевидно, що для розвідувально-сигналізаційних цілей, тобто виявлення віддалених об'єктів, що рухаються, де використовується автономний режим роботи, потрібні системи з мінімальними енергетичними витратами, тобто потрібні нові рішення на базі швидких оптимальних алгоритмів виявлення та розпізнавання об'єктів, що рухаються, з високими характеристиками достовірного виявлення, нові конструктивні та схемотехнічні рішення.

Визначення простору ознак доцільно здійснювати шляхом аналізу відмінних рис сигналів різного походження в часовій та частотних областях з використанням програмної або апаратної фільтрації в частотній області, що значно простіше та економніше за використання ШПФ і вейвлет-аналізу.

Завдання обмеження споживання можливо вирішити шляхом використання першого етапу виявлення порогового методу у часовій області. Далі алгоритми відсіву шуму чи перешкоди очевидно повинні працювати послідовно, причому в залежності від загального «споживання» конкретного алгоритму за повний цикл його роботи.

На етапі класифікації пари сигнал/(шум, перешкода) (завдання - виявлення), і на етапі класифікації корисного сигналу за вектором «людина, транспорт колісний, транспорт гусеничний» можливо використовувати алгоритми як в часовій, так і в частотній області. Чим більше алгоритм споживає за цикл, тим

далі він має перебувати від «первинного виявлення».

Перші мають, як правило, низьке загальне «споживання» при порівняно скромних параметрах ймовірностей отримання правильного результату, особливо з великих дистанцій.

Другі вимагають використання спеціальних апаратних можливостей обчислювача, так званий цифровий процесор обробки сигналів (ЦПОС), що значно збільшує споживання енергії.

Пошук оптимальних, з погляду розпізнавання ознак, і навіть оцінка часу виконання кожного алгоритму розпізнавання проводиться методом моделювання в середовищі MATLAB.

Збільшення кількості одержаних ознак, що використовуються для представлення вхідних даних, може призвести до поганих результатів класифікації. Застосування відповідних алгоритмів зменшення розмірності зібраних векторів ознак перед виконанням алгоритмів остаточного прийняття рішення дозволить покращити загальну продуктивність розпізнавання об'єктів з точки зору точності та обчислювальної ефективності. Переваги використання таких алгоритмів пов'язані із зменшенням обсягу даних чи шуму.

При цьому необхідно розглянути можливість зменшення розмірності оптимізації продуктивності прийняття рішень.

У цілому на даний час поширеними методами зменшення розмірності є: метод головних компонент, метод незалежних компонент, багатовимірне шкалювання, і навіть численні нейромереві методи, карти Кохонена, що самоорганізуються, тощо.

Таким чином при знаходженні оптимального балансу використання алгоритмів в часовій і частотній областях можливо значно скоротити час роботи обчислювального пристрою, а отже загальне енергоспоживання системи зменшується, а вдосконалені часові методи розпізнавання дозволять віддаленим автономним СС при незначному енергоспоживанні мати значну величину вірогідності коректного розпізнавання рухомих об'єктів.



## ВИСНОВКИ

Задача створення інтелектуальної автономної сейсмічної системи для розвідувально-сигналізаційних та охоронних цілей пов'язана з вирішенням проблеми знаходження балансу застосування різних методів виявлення та класифікації рухомих об'єктів у межах робочої зони сейсмічної системи, визначення простору ознак, які будуть використовуватися для вирішення задачі виявлення та класифікації корисного сейсмічного сигналу.

Збільшення кількості одержаних ознак, що використовуються для представлення вхідних даних, може фактично призвести до негативних результатів класифікації. Застосування відповідних алгоритмів зменшення розмірності зібраних векторів ознак перед виконанням алгоритмів остаточного прийняття рішення дозволить покращити загальну продуктивність розпізнавання і класифікації об'єктів. Переваги використання таких алгоритмів пов'язані із зменшенням обсягу даних чи шуму.

Визначення простору ознак доцільно здійснювати шляхом аналізу відмінних рис сигналів різного походження в часовій і частотній областях з використанням програмної або апаратної фільтрації в частотній області, що суттєво спрощує процес обробки сигналів, ніж використання ШПФ і вейвлет-аналізу, і разом з тим зменшує енергозатрати.

## Список використаної літератури

[1]. P. Fastyskovsky, M. Glauberman, Ya. Lepikh. Point seismic system for detection and recognition of moving person and vehicles. TheFourth Internat. Conf. on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), 09-13 Sept. 2019, Odesa, Ukraine, PP. 1-4.

[2]. Yuxin Tian, Hairong Qi, X. Wang. Target detection and classification using seismic signal processing in unattended ground sensor systems // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, May 2002.

[3]. G. A. Athanasopoulos, P. C. Pelekis, G. A. Anagnostopoulos. Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from

field measurements // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2000. – Vol. 19, issue 4. – P. 277–288.

[4]. O. Kegeyes-Brassai, Z. Szilvagyai, A. Wolf, R. Ray. Effects of local ground conditions on site response analysis results in Hungary // Proc. 19th Int. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Repub. Korea, pp. 252-255 (2017).

[5]. R. Karmakar. Potential effects of climate change on soil properties: A Review // Science Int., 4 (2), PP. 51-73 (2016), doi: 10.17311/sciintl.2016.51.73.

[6]. Pavel P. Fastyskovsky and Yaroslav I. Lepikh. Influence of Soil State on Characteristics of Seismic Signals from Moving Objects // Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, Kyiv, Ukraine, Nov. 29 – Dec. 3, 2021. – PP. 172-175.

[7]. P. P. Fastyskovsky, M. A. Hlauberman. Vplyv pohlynannia v gruntі na spektralni kharakterystyky seismichnykh syhnaliv vid rukhomykh obiektiv // Tezy dopovidei VI Vseukr. nauk.- prakt. konf. "Perspektyvni napriamky suchasnoi elektroniky, informatsiinykh i kompiuternykh system" (MEICS-2021), Ukraine, Dnipro, 24.11 – 26.11.2021. - s. 10 (in ukrainian).

[8]. Kostenko K. V., Shevcov V. F. Klasifikaciya ob"ektov v sejsmicheskikh sistemah ohrany // Cifrovaya obrabotka signalov, No. 2, 2009, p. 25-29 (in russian).

[9]. E. Kose, A. Hocaoglu. A new spectral estimation-based feature extraction method for vehicle classification in distributed sensor networks // Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci., 27, PP. 1120 – 1131 (2019).

[10]. R. Berešik. Hilbert-Huang Transform and its Application in Seismic Signal Processing // Proc. 13 th IEEE Int. Conf. New Trends in Signal Processing (NTSP). - Demänovská dolina, Slovakia, 12-14 October 2016. - PP. 9-14. - Nov 21, 2016, Slovakia. - doi: 10.1109/NTSP.2016.7747776.

[11]. E. Köse, A. K. Hocaoglu. A new spectral estimation-based feature extraction method for vehicle classification in distributed sensor net-

works // Turk J Elec Eng & Comp Sci. – 2019. – vol. 27. – PP. 1120-1131. - doi:10.3906/elk-1807-49).

[12]. Morozov Yu. V., Spektor A. A. Klassifikaciya ob'ektov na osnove analiza spektral'nyh karakteristik ogibayushchih sejsmicheskikh signalov // Avtometriya, T. 53, No.6, 2017, p. 49-56 (*in russian*).

[13]. P. P. Fastyskovsky, O. V. Tkachenko, Ya. I. Lepikh, M. A. Glauberman. Use of seismic signals' time parameters for moving objects recognition by remote seismic devices // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2020 – T. 17, №3.

[14]. Fastyskovsky P. P. Sposib vyavleniia liudyny ta transportnykh zasobiv, shcho rukhaiutsia, po seismychnomu syhnalu. Patent na korysnu model No. 150754. Zareiestrovano v Derzhavnomu reiestri Ukrainy korysnykh modelei 13.04.2022 (*in ukrainian*).

[15]. Pavel P. Fastyskovsky, Michael A. Glauberman, Yaroslav I. Lepikh. Autonomous Seismic Sensor with a New Temporal Method of a Moving Person Detection // Proceedings of IEEE XII<sup>th</sup> International Conference Electronics and Information Technologies, Lviv, Ukraine,

May 19-21, 2021. – PP. 17-21. DOI: 10.1109/ELIT53502.2021.9501092.

[16]. J. Peng, P. Zhang, and N. Riedel. Discriminant learning analysis. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 38(6):1614–1625, 2008. ISSN 1083-4419.

[17]. P. P. Fastyskovsky, Ya. I. Lepikh. Portable seismic systems (overview) // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2021. - Vol. 18, No. 4. – P. 27 – 42, DOI: 10.18524/1815-7459.2021.4.248178.

[18]. P. P. Fastyskovsky, M. A. Glauberman, Ya.I. Lepikh. Compact smart seismic sensor for the detection of a moving person // “Sensor Electronics and Microsystem Technologies”(SEMST-9) conference abstracts, Ukraine, Odesa, 20.09 – 24.09.2021. - p. 71.

[19]. J. Clemente, F. Li, M. Valero, W. Song. Smart seismic sensing for indoor fall detection, location and notification // IEEE J. Biomed. and Health Inform., pp. 1-9 (2019), doi: 10.1109/JBHI.2019.2907498).

[20]. P. P. Fastyskovsky, Ya. I. Lepikh. Remote Compact Seismic Sensor for the Moving Person Detection // IEEE Sensors Letters. – 2020. - Vol.4, No 8. - P. 1-3, ASN 2500903, doi: 10.1109/LSSENS.2020.3007831.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2023 р.

UDC: 621.391

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307067>

## PROBLEMS OF CHOICE EFFECTIVE METHODS OF TREATMENT OF SEISMO SIGNALS FOR INTELLECTUAL OF SYSTEMS

*M. A. Glauberman<sup>1</sup>, Ya. I. Lepikh<sup>2</sup>, O. S. Maksimov<sup>1</sup>, A. P. Balaban<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Training, Scientific & Production Center of Odesa I. I. Mechnikov National University, mik\_ag@i.ua

<sup>2</sup> Interdepartmental Scientific-Educational Physics and Technical Center of MES and NAS of Ukraine at the Odesa I. I. Mechnikov National University, ndl\_lepikh@onu.edu.ua

### Summary

Currently, Ukraine is under-resourced with small-sized secretive autonomous devices for reconnaissance purposes (detecting and recognizing the movements of people and vehicles in certain remote areas), and for protecting the border, guarding military depots and other facilities. Among the various detection tools, seismic systems are one of the most promising, as they are passive type tools. This detection systems is highly informative and makes it possible to solve a wide range of problems of detecting and recognizing moving objects.

However, seismic signal processing methods used in existing systems do not provide maximum reliability in classifying objects that are their sources.

The work gives characteristics of different processing methods based on both the characteristics of seismic signal parameters and the energy costs of processing systems, which can provide high reliability of object classification.

**Keywords:** seismic signals, identification features, seismic systems, temporary signal processing methods

УДК: 621.391

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2024.2.307067>

## ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ СЕЙСМОСИГНАЛІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

*М. А. Глауберман<sup>1</sup>, Я. І. Лепіх<sup>2</sup>, О. С. Максимов<sup>1</sup>, А. П. Балабан<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Навчально-науково-виробничий центр ОНУ імені І. І. Мечникова, [mik\\_ag@i.ua](mailto:mik_ag@i.ua)

<sup>2</sup> Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр МОН і НАН України, ОНУ імені І. І. Мечникова, [ndl\\_lepikh@onu.edu.ua](mailto:ndl_lepikh@onu.edu.ua)

### Реферат

Наразі Україна недостатньо забезпечена малогабаритними потайними автономними пристроями як для розвідувальних цілей (виявлення та розпізнавання переміщень людей та транспортних засобів на певних віддалених ділянках), так і для захисту кордону, охорони військових складів та інших об'єктів. Серед різних засобів виявлення сейсмічні системи є одними з найперспективніших, оскільки належать до засобів пасивного типу. Такі системи виявлення є високо інформативним і дозволяють вирішувати широкий спектр завдань виявлення та розпізнавання рухомих об'єктів.

Однак, методи обробки сейсмосигналів, що використовуються в існуючих системах, не дають максимальної достовірності при класифікації об'єктів, які є їх джерелами.

В роботі даються характеристики різним методам обробки виходячи як з особливостей параметрів сейсмосигналів, так і з енергетичних витрат систем обробки, які можуть забезпечити високу достовірність класифікації об'єктів.

**Ключові слова:** сейсмосигнали, ідентифікаційні ознаки, сейсмічні системи, часові методи обробки сигналів