

УДК 550.34:004.932

Д. Ю. Манько, Є. В. Беляк, І. В. Косяк

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

вул. М. Шпака 2, 03113 Київ, Україна

e-mail: dmitriy.manko@gmail.com

Застосування кореляційного методу для ідентифікації рухомих об'єктів за даними велосиметрів

Досліджено можливість застосування кореляційного методу ідентифікації рухомих об'єктів за даними велосиметричних вимірювань у задачах моніторингу техногенних впливів і виявлення транспортних об'єктів. Розглянуто проблему перенесення «сейсмічних портретів», сформованих за сигналами зміщення, на сигнали швидкості, що реєструються велосиметрами, та проаналізовано вплив диференціювання на спектральні властивості та кореляційне узгодження сигналів. Обґрунтовано зв'язок взаємно-кореляційних функцій сигналів зміщення та швидкості за умови обмеженості процесів і ергодичності, що дозволяє узгоджувати кореляційні портрети. Запропоновано дискретну процедуру формування «уявного велосиметра» на основі кінцевих різниць і алгоритм кореляційної ідентифікації, що придатний для потокової обробки даних. Експериментальна перевірка на прикладі ідентифікації проходження вантажного потяга показала узгоджену працездатність методу як для сигналів зміщення, так і для швидкісних сигналів, отриманих диференціюванням. Підтверджено часову стабільність кореляційного портрета та можливість його використання для довготривалого моніторингу. Отримані результати свідчать про ефективність застосування кореляційного методу у системах інженерного сейсмічного контролю та автоматизованого виявлення рухомих об'єктів на основі велосиметричних вимірювань.

Ключові слова: *кореляційний метод, велосиметр, ідентифікація рухомих об'єктів, сейсмічний портрет, диференціювання сигналів, кореляційна функція.*

Вступ

Велосиметри належать до найпоширеніших класів сейсмічних датчиків у прикладній сейсмології та інженерній геофізиці завдяки простоті встановлення, надійності роботи в польових умовах і достатній чутливості у широкому частотному діапазоні. У задачах моніторингу техногенних впливів і виявлення руху важких об'єк-

© Д. Ю. Манько, Є. В. Беляк, І. В. Косяк

тів ефективним підходом є кореляційна ідентифікація за «сейсмічним портретом», що є характерним фрагментом сигналу, який використовується як еталон для пошуку подій у тривалих потоках даних. Водночас на практиці портрети часто формуються за сигналами зміщення, тоді як вимірювання виконуються велосиметрами у швидкісному представленні. Диференціювання змінює спектральні характеристики та форму сигналу, що може знижувати кореляційне узгодження і ускладнювати перенесення еталонів між різними типами сенсорів. Це зумовлює високу **актуальність дослідження** методів узгодження кореляційних ознак і забезпечення надійної ідентифікації рухомих об'єктів за даними велосиметричних вимірювань.

Як показав проведений аналіз матеріалів наукових досліджень, кореляційні методи, зокрема кроскореляція, нормалізована кроскореляція та узгоджена фільтрація (Matched Filtering, MF), широко застосовуються для виявлення повторюваних сигналів, оцінювання часових зсувів і моніторингу змін середовища за пасивними записами [1, 2, 11–12]. У задачах шаблонного пошуку їхня ефективність визначається узгодженістю форми сигналів, оскільки відмінності смуги пропускання, фільтрації, фазових зсувів або інструментальних спотворень знижують піки кореляції і стабільність критеріїв виявлення [6, 9]. Перенесення кореляційного підходу на велосиметри потребує узгодження фізичної величини, відповідно до якої сформовано еталон (зміщення, швидкість або прискорення), а також урахування інструментальних параметрів сенсора, що визначає амплітудно-фазові спотворення сигналу [3–5, 10]. У сучасних дослідженнях застосовують два комплементарні підходи: приведення записів до спільної фізичної величини з урахуванням інструментальної відповіді та спектрально узгоджене перетворення сигналів перед кореляційним порівнянням [2–5, 10]. При цьому чисельне інтегрування або диференціювання сигналів супроводжується типовими проблемами — низькочастотним дрейфом або підсиленням високочастотного шуму, що зумовлює використання регуляризаційних методів, фільтрації та алгоритмів оцінювання похідних у режимі реального часу [15–16, 22, 23]. Попри розвиток інструментальних корекцій і обчислювально ефективних алгоритмів кореляційного пошуку, питання забезпечення незалежної від інструментарію та спектрально узгодженої переносимості кореляційних портретів між сигналами зміщення і швидкості залишається **невирішеною частиною загального дослідження**. Це зумовлює необхідність розроблення практичних методів перенесення кореляційної ідентифікації на велосиметричні вимірювання.

Отже, **метою роботи** є дослідження можливостей застосування кореляційного методу для ідентифікації рухомих об'єктів за даними велосиметричних вимірювань та обґрунтування підходів щодо перенесення кореляційних сейсмічних портретів, які сформовані за сигналами зміщення, на швидкісне представлення сигналів. Для досягнення поставленої мети передбачається проаналізувати зв'язок між кореляційними характеристиками сигналів зміщення та швидкості, розробити процедуру формування швидкісних сигналів і їхнього спектрального узгодження, реалізувати алгоритм кореляційної ідентифікації для потокової обробки даних і виконати експериментальну перевірку ефективності методу з подальшим оцінюванням стійкості виявлення подій і впливу шумів диференціювання.

Теоретичні засади та методика кореляційної ідентифікації рухомих об'єктів за велосиметричними сигналами

У рамках математичної моделі, що лежить в основі дослідження, функції $x(t)$ та $y(t)$ використовуються для формалізації вимірюваних сигналів, які, своєю чергою, розглядаються як обмежені за амплітудою випадкові процеси. Для практичної обробки надалі пропонується прийняти припущення ергодичності, тобто можливість оцінювання статистичних характеристик за часовим усередненням однієї реалізації (рис. 1).

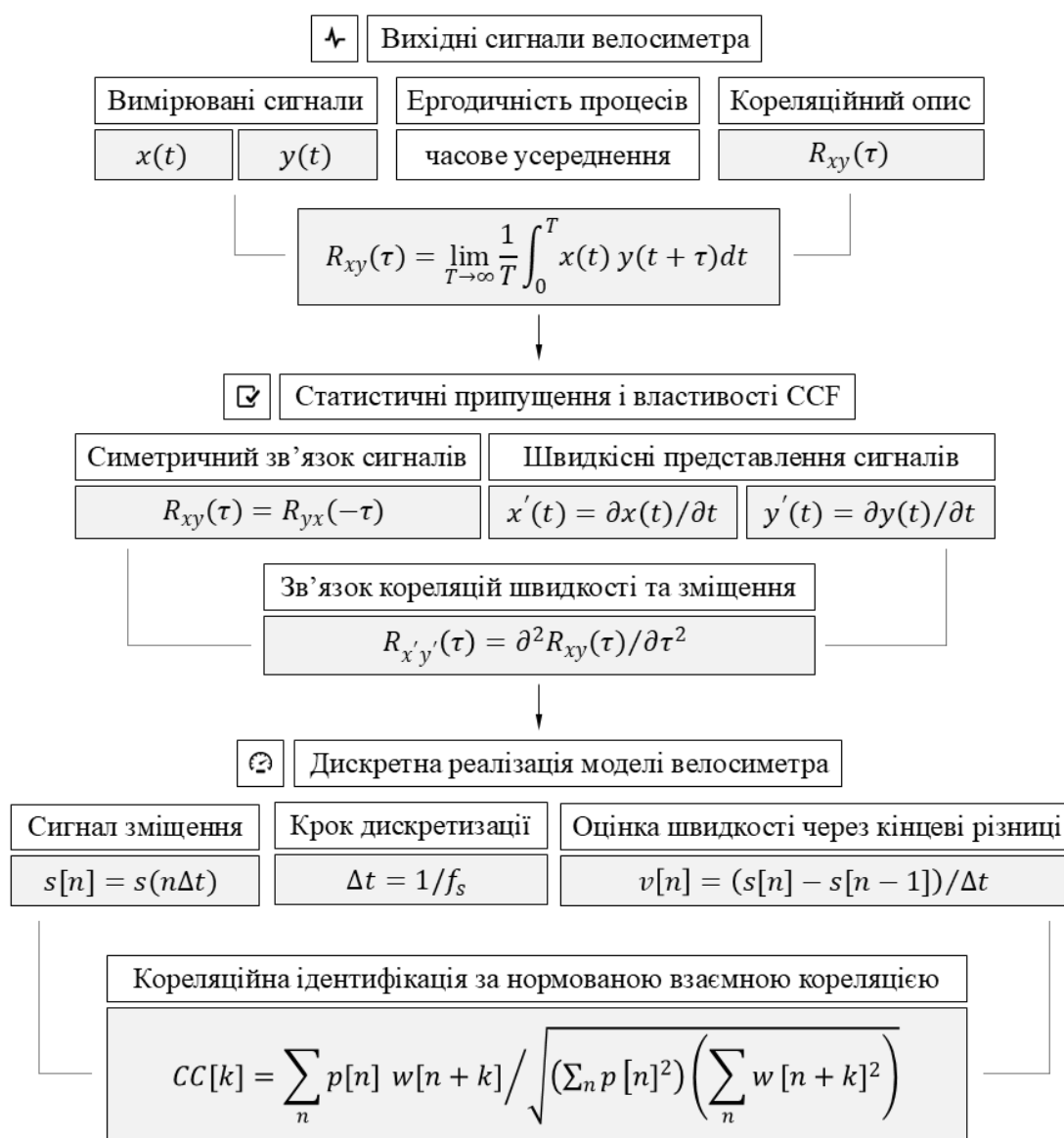


Рис. 1. Структурно-логічна схема кореляційної ідентифікації рухомих об'єктів за велосиметричними сигналами [6–9, 15]

Взаємозв'язок сигналів при цьому описується взаємно-кореляційною функцією $R_{xy}(\tau)$ (Cross-Correlation Function, CCF), що характеризує ступінь подібності

сигналів при часовому зсуві τ . Відомою властивістю цієї функції є симетричний зв'язок між сигналами, згідно з яким взаємна кореляція змінюється відповідно до перестановки аргументів і зміни знаку зсуву [1, 2].

Своєю чергою, для переходу від сигналів зміщення до швидкісного представлення вводяться похідні $x'(t)$ та $y'(t)$, що відповідають швидкості зміни сигналів у часі [15, 16]. Аналіз властивостей кореляційної функції показує, що кореляційні характеристики швидкісних сигналів пов'язані з кореляційною функцією сигналів зміщення через другу похідну за часовим зсувом τ (рис. 1). Це співвідношення є принциповим, оскільки демонструє можливість узгодження кореляційних портретів швидкості з портретами зміщення без зміни базової ідеї кореляційної ідентифікації. Практично це означає дві рівноправні можливості обробки: перехід до швидкісних сигналів шляхом диференціювання у часовій області або проведення кореляційного аналізу безпосередньо для сигналів зміщення, використовуючи похідні за зсувом у кореляційному просторі.

Нехай дискретний сигнал зміщення задано як $s[n] = s[n \cdot \Delta t]$, де величина Δt визначається як $\Delta t = 1/f_s$ крок дискретизації. Модель «уявного велосиметра» реалізується шляхом чисельного диференціювання, що дозволяє отримати оцінку швидкості $v[n]$ на основі різниці сусідніх відліків (рис. 1). Оскільки операція диференціювання підсилює високочастотні компоненти, для зменшення шумів доцільно застосувати попереднє згладжування сигналу $s[n]$, як то ковзне середнє або фільтр Савицького-Голея, а також використовувати в розрахунках центральну різницю в локальному вікні. Таким чином, кореляційна ідентифікація виконується в дискретному часі за нормованою взаємною кореляцією $CC[k]$ між еталонним портретом $p[n]$ та потоком даних $w[n]$, що можуть бути представлені як сигналами зміщення, так і швидкості (рис. 1). Значення $CC[k]$ характеризують ступінь подібності сигналів при зсуві k , а локальні максимуми цієї функції відповідають моментам проходження об'єкта [6–9]. Таким чином, описана методика забезпечує узгоджену кореляційну ідентифікацію подій у сигналах різної фізичної природи та створює основу для практичної реалізації алгоритмів виявлення рухомих об'єктів за велосиметричними вимірюваннями.

Нижче подано алгоритм кореляційної ідентифікації подій у вигляді послідовності етапів, що забезпечують узгоджене порівняння еталонного сигналу з потоком вимірюваних даних і визначення моментів проходження об'єкта.

1. Формування еталонного портрета та підготовка даних. На даному етапі задається еталонний фрагмент сигналу $p[n]$, який характеризує подію, та потік даних $w[n]$, в якому виконується пошук. При цьому необхідно забезпечити спільну часову шкалу, однакову частоту дискретизації та узгоджену смугу пропускання. Перед кореляційним аналізом доцільно застосувати однакові процедури попередньої обробки сигналів, як то фільтрацію, нормування та усунення тренду, що підвищує коректність порівняння.

2. Перехід до швидкісного представлення. Якщо вимірювання виконуються велосиметрами, або необхідно узгодити фізичну природу сигналів, формують швидкісні аналоги портрета та потоку даних шляхом чисельного диференціювання. Такий перехід відповідає моделі «уявного велосиметра» і забезпечує узгодження представлення сигналів. З огляду на підсилення високочастотних компонентів при

диференціюванні, доцільно виконувати попереднє згладжування або смугову фільтрацію.

3. Обчислення нормованої взаємної кореляції. Для оцінювання подібності сигналів обчислюють нормовану взаємну кореляцію $CC[k]$ між портретом і потоком даних у ковзному вікні по всій довжині сигналу для $w[n]$ або його швидкісного аналога. Нормування забезпечує інваріантність результату до масштабних змін амплітуди та дозволяє коректно порівнювати сигнали різної енергії.

4. Виявлення подій за максимумами кореляції. Локальні максимуми функції $CC[k]$ відповідають найкращим збігам портрета з фрагментами потоку даних. Для підвищення надійності детекції застосовують порогові критерії значущості або адаптивні правила прийняття рішення, що враховують фоновий рівень кореляції і рівень шуму.

5. Оцінювання часу проходження об'єкта. Час появи події визначають за положенням піка кореляційної функції k^* з подальшим перерахунком у часову шкалу $t^* = k^* \cdot \Delta t$. За необхідності уточнення часу може виконуватися інтерполяція в околі максимуму.

6. Альтернативна реалізація без диференціювання сигналів. Замість формування швидкісних сигналів можливе попереднє обчислення кореляційної функції для сигналів зміщення з подальшим застосуванням дискретного аналога другої похідної за зсувом. У цьому випадку операція диференціювання переноситься з сигналів у кореляційний простір, що в ряді практичних ситуацій підвищує стійкість до шуму та зменшує підсилення високочастотних завад.

Запропонована послідовність етапів забезпечує універсальну процедуру кореляційної ідентифікації рухомих об'єктів у сигналах різної фізичної природи та дозволяє адаптувати алгоритм до характеристик вимірювальної апаратури і умов завад.

Процедура кореляційної ідентифікації рухомих об'єктів реалізується як послідовність етапів цифрової обробки сигналів, що забезпечують узгодження їх фізичного представлення та підвищення достовірності виявлення подій. Узагальнену структуру алгоритму наведено на рис. 2. На першому етапі задається повний набір вхідних даних, що включає еталонний сигнал, потік вимірюваних даних і параметри дискретизації, які визначають часову шкалу аналізу. Далі виконується попередня обробка сигналів, що передбачає узгодження частотної смуги, цифрову фільтрацію та нормування амплітуди з метою забезпечення коректності кореляційного порівняння. Залежно від умов вимірювання та вимог до чутливості алгоритму обирається стратегія обробки — аналіз у часовій області або обробка в просторі зсувів. У часовій області кореляційна ідентифікація може виконуватися безпосередньо для сигналів зміщення або після їхнього диференціювання з формуванням швидкісних представлень, що відповідає моделі «уявного велосиметра». Альтернативно, в просторі зсувів обчислюється взаємна кореляційна функція або коефіцієнт кореляції між сигналами, з можливістю формування швидкісного портрета шляхом застосування похідних за зсувом, що підвищує стійкість до високочастотних завад.

Після узгодження представлення сигналів виконується обчислення нормованої взаємної кореляції, яка характеризує ступінь подібності сигналів при різних часових зсувах. Виявлення подій здійснюється за локальними максимумами кореляційної функції із застосуванням порогових критеріїв значущості. Час проходження

об'єкта оцінюється за положенням піка кореляції з урахуванням кроку дискретизації, після чого формуються результати детекції і супровідні метрики якості.

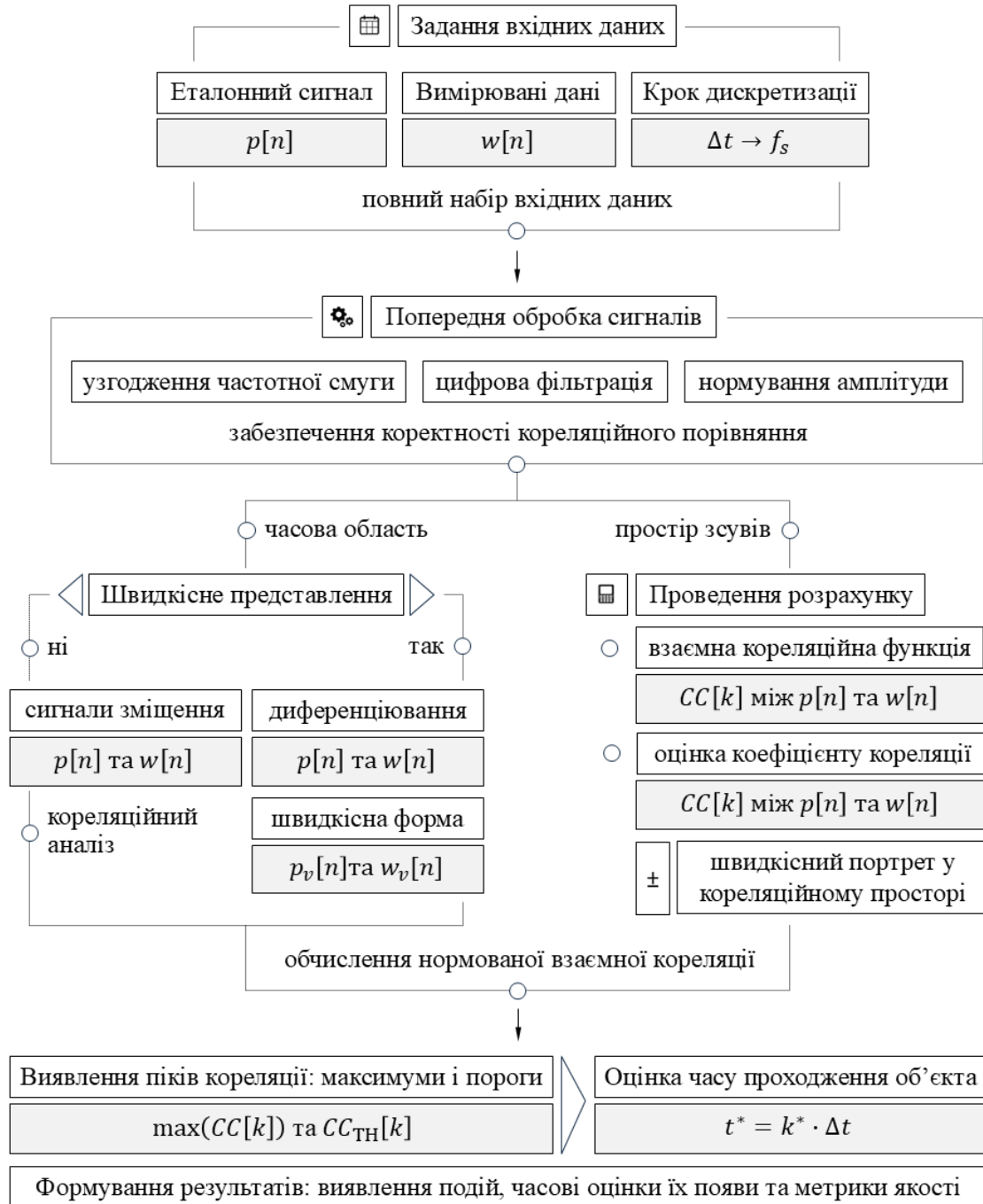


Рис. 2. Узагальнена схема алгоритму кореляційної ідентифікації рухомих об'єктів за велосиметричними сигналами [6–9, 19, 20]

Таким чином, розроблені теоретичні засади та методика кореляційної ідентифікації забезпечують узгоджене представлення та порівняння сигналів зміщення т

швидкості на основі їхніх кореляційних характеристик. Установлений зв'язок між кореляційними функціями відповідних фізичних представлень сигналу дозволяє здійснювати перенесення кореляційних «портретів» без зміни принципу ідентифікації, тоді як запропоновані підходи до цифрової реалізації і попередньої обробки забезпечують стійкість алгоритму до шумових завад і варіацій інструментальних характеристик.

Експериментальна перевірка кореляційної ідентифікації рухомих об'єктів за сигналами зміщення та швидкості

Експериментальна апробація методики кореляційної ідентифікації була спрямована на підтвердження її працездатності та стійкості при використанні сигналів різної фізичної природи, зокрема зміщення та швидкісних представлень, характерних для велосиметричних вимірювань. Основним завданням перевірки було встановити, чи зберігається здатність алгоритму до надійного виявлення подій при переході від сигналів зміщення до швидкості, а також оцінити вплив операції диференціювання на форму кореляційної відповіді та достовірність детекції. Експериментальне дослідження було побудовано за принципом порівняльного аналізу двох режимів обробки одного фізичного процесу: кореляційної ідентифікації за сигналами зміщення та повторного аналізу після потокового диференціювання, що моделює роботу велосиметра. Такий підхід дозволяє оцінити переносимість кореляційних сейсмічних портретів між різними представленнями сигналу та визначити практичні обмеження, що пов'язані зі зміною спектральних характеристик і підсиленням шумових складників. При цьому особливу увагу було приділено умовам, близьким до реального моніторингу, як то пошук подій у тривалому безперервному записі за наявності фонового шуму та випадкових збурень. Така постановка експерименту дозволяє оцінити придатність методики для довготривалого спостереження та автоматизованого виявлення рухомих об'єктів у практичних системах інженерного сейсмічного контролю.

Таким чином, експеримент передбачав порівняння кореляційної ідентифікації подій за сигналами зміщення та швидкісними представленнями, отриманими поточним диференціюванням, з метою оцінювання переносимості методу на велосиметричні вимірювання. Для експериментальної перевірки методики використано еталонний сейсмічний портрет вантажного потяга, сформований за результатами вимірювань. Даний портрет застосовано як шаблон для пошуку відповідних подій у безперервному потоці сейсмічних вимірювань 2020-го року. Така постановка дозволяє оцінити переносимість кореляційного портрету у часі та перевірити інваріантність форми події відносно зміни умов спостереження. Тривалість потокової сейсмограми відповідає практичному сценарію інженерного моніторингу, що на рівні постановки задачі формалізується як пошук характерної події у довготривалому записі за наявності фонового мікросейсмічного шуму, випадкових збурень та інших техногенних впливів. Обробку набору даних при цьому було організовано за принципом шаблонного пошуку, в якому еталонний сейсмічний портрет послідовно порівнюється з фрагментами потоку вимірювань. Для наочності представлення результатів та аналізу етапів обробки було використано структуру Record-Wave-CC, що відображає взаємозв'язок між еталоном, поточним сигналом і кореляційною відповіддю [19–21]:

— Record: еталонний портрет події, що представляє характерний фрагмент сигналу проходження вантажного потяга та використовується як шаблон для кореляційного порівняння;

— Wave: безперервний потік вимірюваних даних, який містить фонові коливання, шумові компоненти та корисні події, що надалі підлягають виявленню;

— CC: кореляційна відповідь у вигляді кривої нормованої взаємної кореляції, яка характеризує ступінь подібності еталонного портрета та фрагментів потоку за різних часових зсувів; локальні максимуми цієї кривої відповідають найкращим збігам сигналів і вказують на моменти проходження об'єкта.

Таким чином, реалізована схема відповідає класичному підходу шаблонного пошуку: еталонний портрет «ковзає» вздовж потоку даних, на кожному зсуві оцінюється ступінь подібності сигналів, після чого аналізуються піки кореляційної функції для ідентифікації подій у часі.

Для оцінювання переносимості кореляційної ідентифікації на різні фізичні представлення сигналу виконано порівняльний аналіз двох режимів обробки одного процесу. Обидва режими реалізують однакову процедуру кореляційного пошуку та відрізняються лише формою подання сигналу, що дозволяє оцінити вплив процедури диференціювання та зміни спектрального акценту на результати детекції [19, 22–24].

1. Режим 1: Кореляційний аналіз за сигналами зміщення. На першому етапі еталонний портрет і потік даних розглядаються як сигнали зміщення без додаткових перетворень. Після обчислення нормованої взаємної кореляції формується крива CC, на якій спостерігаються чітко виражені локальні максимуми. Ці максимуми інтерпретуються як моменти проходження вантажного потяга, оскільки саме в ці часові інтервали форма поточного фрагмента сигналу є найбільш подібною до еталонного портрета. Практично важливими ознаками коректної детекції є виразне відокремлення піків від фонового рівня кореляції, що забезпечує високу контрастність виявлення та повторюваність піків у часових ділянках, які відповідають очікуваним моментам проходження потяга, що підтверджує фізичну узгодженість результатів.

2. Режим 2: Кореляційний аналіз для «уявного велосиметра» (швидкісне представлення). На другому етапі моделюється ситуація, коли вимірювання надходять від велосиметра, тобто у швидкісному представленні. Для цього застосовується дискретне диференціювання, яке формує оцінку швидкості сигналу. У потоковій реалізації використовується схема зворотної різниці, зручна для обробки у режимі реального часу, де швидкість визначається за різницею сусідніх відліків сигналу, поділеною на період дискретизації Δt . Принципово важливо, що одна й та сама операція диференціювання застосовується узгоджено як до еталонного портрета, так і до потоку даних. Після формування швидкісних сигналів знову обчислюється кореляційна крива CC, але вже для швидкісного представлення, що дозволяє оцінити ефективність детекції у велосиметричному режимі.

Отже, обидва режими реалізують єдину процедуру кореляційного пошуку, що забезпечує коректне порівняння результатів і дозволяє оцінити вплив зміни фізичного представлення сигналу на стабільність і достовірність виявлення подій.

Порівняльний аналіз результатів кореляційної обробки свідчить про принципову узгодженість детекції подій у двох режимах обробки. Піки функції нормова-

ної взаємної кореляції CC , що відповідають проходженню вантажного потяга, відтворюються як при аналізі сигналів зміщення, так і при використанні швидкісного представлення. Таким чином, події виявляються в тих самих часових інтервалах, що підтверджує переносимість кореляційного підходу на велосиметричні вимірювання без зміни базового принципу ідентифікації. Водночас спостерігаються незначні відмінності у формі кореляційних кривих у двох режимах. Такі розбіжності є очікуваними та зумовлені фізико-математичними властивостями операції диференціювання [15–17]:

- диференціювання підсилює високочастотні компоненти сигналу;
- разом із корисними високочастотними складниками підсилюються також шумові компоненти;
- унаслідок цього швидкісне представлення може характеризуватися більш нерівномірним фоновим рівнем кореляції або дещо зміненою «гостротою» піків.

Зазначені відмінності не свідчать про втрату детектованості подій, а відображають зміну спектрального акценту сигналу та підвищену чутливість швидкісного представлення до високочастотних шумів. У практичному аспекті це вказує на необхідність оптимального смугового обмеження та згладжування при роботі з велосиметричними даними.

Важливим підсумком проведеної експериментальної перевірки є підтвердження часової стабільності еталонного сейсмічного портрета. Портрет вантажного потяга, сформований за результатами вимірювань 2016 року, зберігає придатність для ідентифікації відповідних подій у потокових даних наступних років навіть за умов тривалого безперервного запису [21]. Це свідчить про достатню інваріантність форми події з точки зору кореляційного критерію подібності та підтверджує можливість використання сформованих портретів у задачах довготривалого моніторингу без необхідності їхнього регулярного оновлення. Експериментальна перевірка виконувалася шляхом порівняння результатів кореляційної ідентифікації руху вантажного потяга за сигналами зміщення та швидкісними представленнями. Еталонний сейсмічний портрет було сформовано у 2016 р., тоді як потокова сейсмограма залізничного руху тривалістю близько 4 годин отримана у 2020 р. Подальша обробка включала: кореляційний аналіз сигналів зміщення та повторний аналіз після потокового диференціювання, що моделює роботу велосиметра. Отримані результати підтверджують стабільність детекції подій у часі та узгоджену працездатність методу для різних фізичних представлень сигналу.

Приклад результатів кореляційної ідентифікації подано на рис. 3. Верхній графік (Record) відображає еталонний сейсмічний портрет події, який сформований на основі характерного фрагмента сигналу проходження вантажного потяга. Середній графік (Wave) демонструє безперервний потік сейсмічних вимірювань тривалістю кілька годин, що містить фонові мікросейсмічні коливання, техногенні збурення та шуми різної природи. Нижній графік (CC) відображає кореляційну відповідь, отриману шляхом ковзного зіставлення портрета з потоковим сигналом.

Для кореляційного аналізу використовувався еталонний портрет тривалістю близько 35 с. Потокова реалізація мала тривалість близько 4 годин. Обробка виконувалася у ковзному режимі з узгодженими часовими параметрами та фіксованим кроком дискретизації. Виразні локальні максимуми кореляційної функції відповідають часовим інтервалам, у яких форма поточного сигналу найбільш подібна до

еталонного портрета. Таким чином, піки CC інтерпретуються як моменти проходження вантажного потяга, тоді як низький фоновий рівень кореляції відповідає відсутності подібних подій у сигналі.

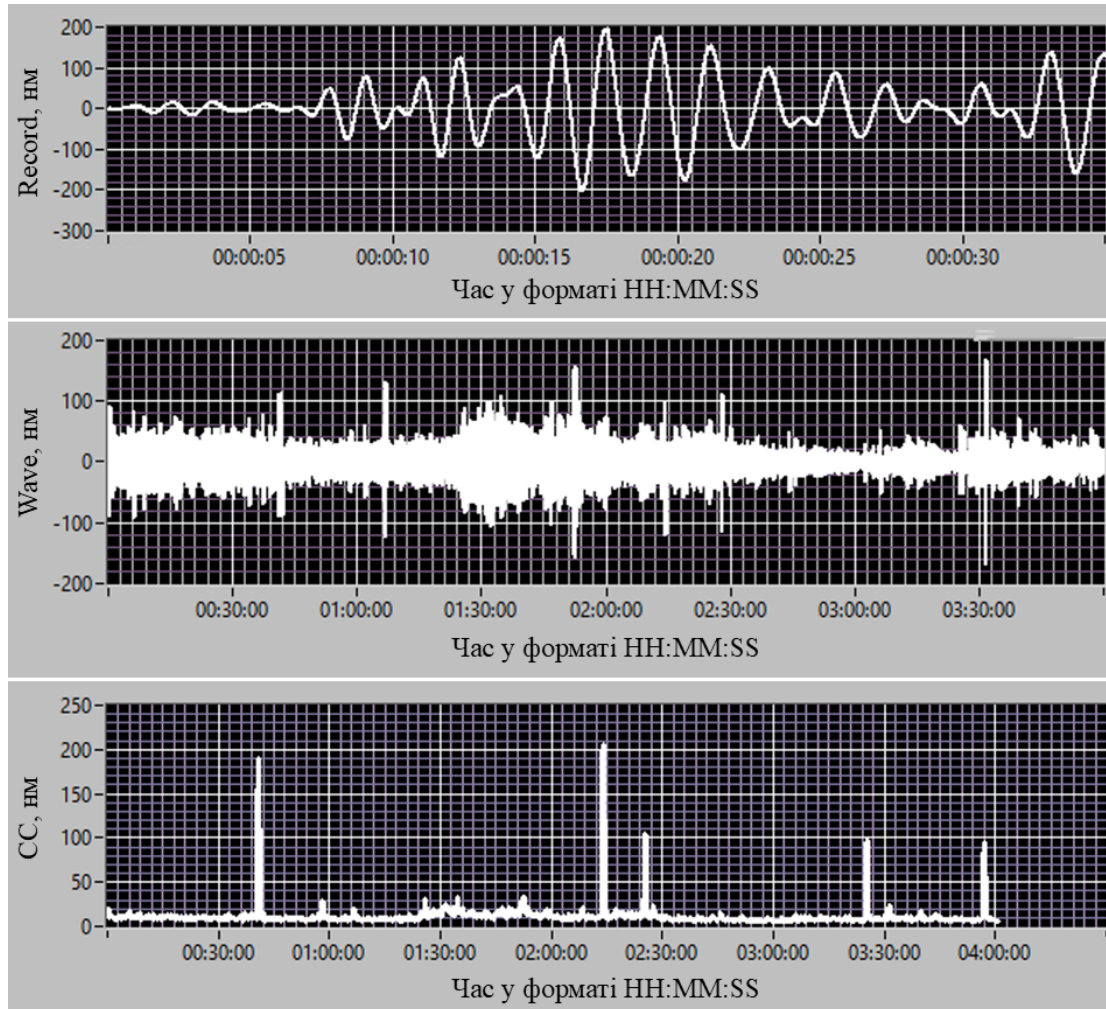


Рис. 3. Результати кореляційної ідентифікації проходження вантажного потяга в потоковому сейсмічному записі при використанні сигналів зміщення

Результати кореляційної ідентифікації для швидкісного представлення сигналу наведено на рис. 4. Швидкісна форма сигналів отримана шляхом дискретного диференціювання еталонного портрета та потокового запису, що відповідає умовам вимірювання велосиметрами. Як і у випадку аналізу сигналів зміщення, кореляційна функція містить виразні локальні максимуми, що відповідають моментам проходження вантажного потяга.

Спостережувані відмінності у формі кореляційної кривої порівняно з рис. 3 зумовлені підсиленням високочастотних компонентів при диференціюванні, що одночасно підвищує чутливість до швидких змін сигналу та до шумових складових. Попри це, часові положення кореляційних піків узгоджуються з результатами, отриманими для сигналів зміщення, що підтверджує працездатність кореляційного підходу при використанні швидкісних датчиків.

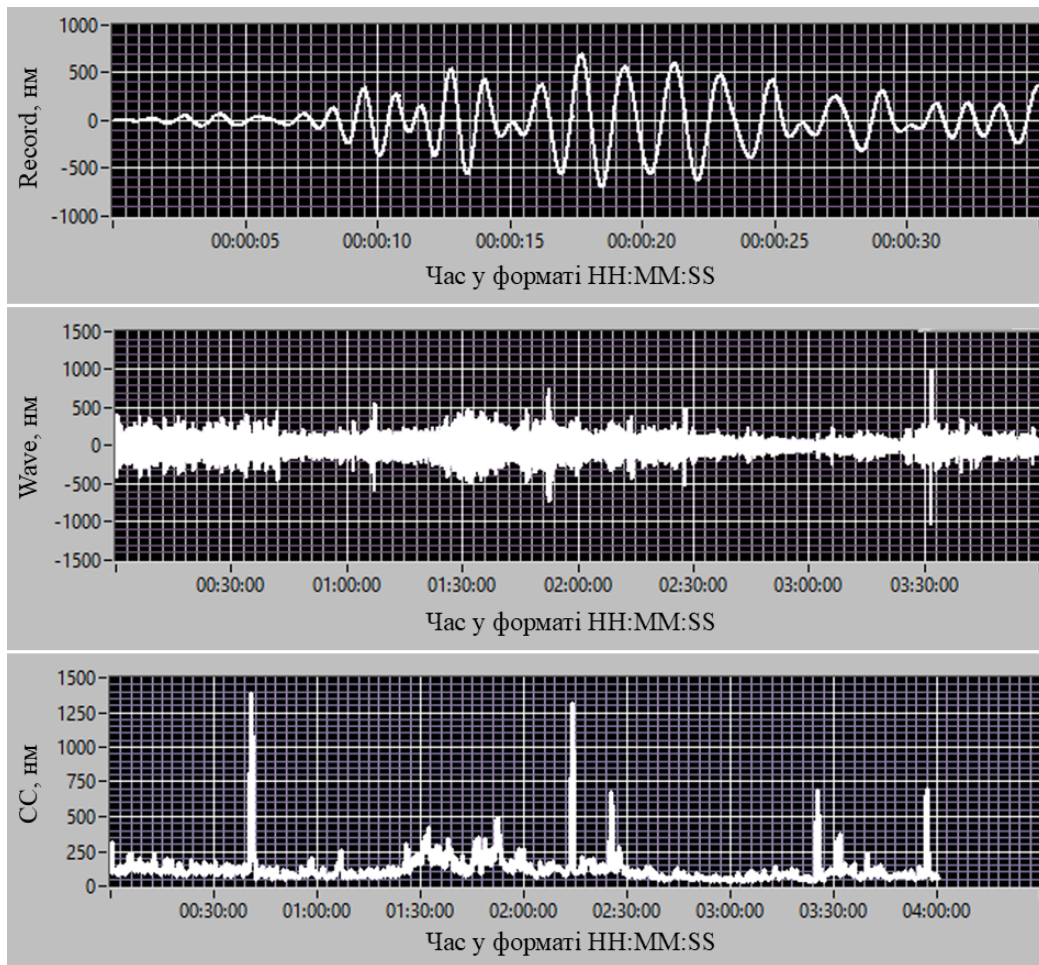


Рис. 4. Результати кореляційної ідентифікації проходження вантажного потяга в потоковому сейсмічному записі, отриманими для «уявного велосиметра»

Методичні особливості і обмеження кореляційної ідентифікації подій у сигналах зміщення та швидкісних представленнях

Проведене експериментальне дослідження показало працездатність кореляційної ідентифікації подій як для сигналів зміщення, так і для швидкісного представлення, отриманого шляхом дискретного диференціювання. Водночас практичне застосування такого підходу пов'язане з низкою методичних особливостей, зумовлених спектральними властивостями сигналів, впливом шумових компонентів, відмінностями частотних характеристик датчиків та обмеженнями дискретної реалізації кореляційних процедур. Зокрема, перехід від зміщення до швидкості змінює частотну структуру сигналу і може підсилювати високочастотні завади, що впливає на форму та стабільність кореляційної функції. У зв'язку з цим доцільно розглянути основні фактори, які визначають стійкість кореляційної ідентифікації подій у реальних вимірюваннях, а також практичні підходи до зменшення впливу шумів, узгодження спектральних характеристик сигналів і підвищення надійності процедур детекції.

У рамках дослідження, процедура диференціювання сигналу розглядається як математична операція, що змінює його спектральні властивості, причому у частот-

ній області ця операція відповідає множенню спектра сигналу на множник, пропорційний частоті. Унаслідок цього відбувається відносне підсилення високочастотних складників сигналу. Така властивість є принципово важливою при переході від представлення сигналу у вигляді зміщення до швидкісної форми, однак вона має і побічний ефект: разом із корисними компонентами підсилюються також високочастотні шумові складники. Якщо у сигналі присутній білий або квазібілий шум, після диференціювання його внесок у робочій смузі кореляційного аналізу стає більш помітним. У результаті може погіршуватися відношення сигнал/шум саме в тих деталях хвильової форми, які визначають структуру кореляційного піка. З практичної точки зору це призводить до зменшення стабільності оцінок кореляційної функції $CC[k]$. Зокрема, можуть спостерігатися підвищення фонового рівня кореляції, збільшення розкиду значень локальних максимумів, поява паразитних кореляційних піків, а також незначне зміщення позиції головного максимуму на один-два відліки дискретизації. Найбільш характерні прояви такого ефекту спостерігаються у таких типових сценаріях [9, 15–17]:

1) *сигнал з плавними фронтами та низькочастотною домінуючою структурою*. У цьому випадку основна енергія корисної події зосереджена у нижній частині спектра. Диференціювання зміщує спектральну «вагу» сигналу у бік вищих частот, де корисна складова вже значно слабша. У результаті відносний внесок шуму зростає, що погіршує контрастність кореляційного піка та знижує стабільність процедури ідентифікації;

2) *наявність у потоці високочастотних завад*. У реальних вимірюваннях часто присутні короткі імпульсні збурення, механічні удари або електричні перешкоди. Після диференціювання такі компоненти підсилюються і можуть почати домінувати у сигналі. У цьому випадку кореляційне вікно частково «підхоплює» ці завади, що призводить до появи додаткових локальних максимумів кореляційної функції і потенційних хибних детекцій.

Для зменшення впливу описаних ефектів пропонується розробити комплексну методику, що складаються з наступних процедур [8, 15–17].

1. **Попереднє згладжування сигналу**. Застосування згладжувальних процедур перед операцією диференціювання дозволяє зменшити дисперсію шумових компонентів.

2. **Смугова фільтрація сигналу**. Введення смугових фільтрів дає змогу обмежити аналіз частотною областю, в якій форма досліджуваної події є найбільш стабільною та відтворюваною. Це дозволяє одночасно пригнічувати низькочастотні тренди та високочастотні шуми, що покращує контрастність кореляційної відповіді.

3. **Регуляризовані оцінки похідної**. До регуляризованих методів оцінки похідної належать підходи з обмеженням гладкості, спектральне згладжування або регуляризація Тихонова. Такі методи дозволяють отримувати більш стійке швидкісне представлення сигналу без надмірного підсилення високочастотних компонентів.

4. **Робастні правила детекції і постобробка піків**. Поріг детекції доцільно задавати відносно локального фонового рівня або медіанного значення кореляційної функції. Після первинного виявлення максимумів корисною є також постфільтрація піків, яка може включати перевірку мінімальної відстані між сусідніми мак-

симумами, аналіз ширини піка або оцінку його симетрії. Такі процедури дозволяють зменшити кількість хибних спрацьовувань у режимі аналізу швидкісних сигналів.

Таким чином, хоча перехід до швидкісного представлення сигналу є природним для велосиметричних систем вимірювання, операція диференціювання змінює спектральний баланс сигналу та підвищує чутливість алгоритму до високочастотних шумів. Тому для забезпечення стабільності кореляційної ідентифікації необхідно поєднувати диференціювання з відповідними процедурами попередньої обробки та робастними критеріями детекції.

Під час перенесення кореляційного портрета між різними типами датчиків, а також між однаковими датчиками, що працюють за різних налаштувань вимірювального тракту або фільтрації, необхідно враховувати відмінності їхніх частотних характеристик та масштабування сигналів. Навіть за умови використання нормованої кореляції, яка зменшує чутливість алгоритму до простого амплітудного множника, спектральні перекося та фазові спотворення можуть істотно впливати на форму кореляційної функції. Якщо вимірювальний канал підсилює або пригнічує певну частотну смугу, змінюється відносна «вага» окремих ділянок хвильової форми у скалярному добутку сигналів. У результаті навіть за наявності однакової події кореляційний пік може зменшуватися, а форма функції $CC[k]$ — спотворюватися. Подібні ефекти стають особливо помітними у випадках, коли еталонний портрет сформовано в одній частотній смузі, а потоковий сигнал має іншу спектральну структуру. Причинами такого розходження можуть бути відмінності у фільтрації сигналу, частоті дискретизації, інструментальній характеристиці датчика або умовах встановлення вимірювальної системи. З практичної точки зору для підвищення стійкості кореляційної ідентифікації доцільно враховувати наступні методичні рекомендації [7, 9, 17].

1. Фіксація робочої частотної смуги. Доцільно заздалегідь визначати частотний діапазон, у якому подія має найбільш стабільний та відтворюваний спектральний «підпис». Саме в цій смузі слід формувати еталонний портрет і виконувати кореляційний аналіз.

2. Узгодження процедур фільтрації. Портрет і потоковий сигнал повинні проходити однакову процедуру попередньої обробки. Це означає узгодження амплітудно-частотних та фазових характеристик застосованих фільтрів, що дозволяє зменшити спектральні перекося та забезпечити коректне порівняння сигналів.

3. Попереднє вирівнювання спектра сигналів. У випадках значної нерівномірності спектральної енергії може бути доцільним застосування процедур спектрального нормування або спектрального вирівнювання сигналу (Signal Whitening; SW). Такі операції зменшують залежність кореляційної функції від амплітудних нерівностей спектра та підвищують чутливість алгоритму до форми сигналу.

4. Контроль часової узгодженості сигналів. Для коректної роботи кореляційного алгоритму важливо забезпечити точну синхронізацію каналів вимірювання. Навіть невеликий часовий зсув між сигналами може змінювати положення максимуму $CC[k]$ та призводити до систематичної похибки оцінки часу події.

Окремого розгляду потребує використання співвідношення, яке встановлює зв'язок між кореляційними характеристиками сигналів зміщення та швидкості, застосування якого на скінченних вибірках має певні обмеження [1, 15–17].

1. Підсилення шумових похибок при обчисленні похідних. Друга похідна за зсувом є операцією, що підсилює дискретизаційні та шумові похибки сигналу. У випадку коротких кореляційних вікон це може призводити до значного зростання похибки оцінки та зниження стійкості кореляційної функції.

2. Вплив повільних складових і трендів сигналу. Наявність дрейфу нульового рівня, температурних ефектів або квазістатичних коливань порушує припущення, за яких граничні члени у відповідних аналітичних співвідношеннях коректно зникають. У практиці це проявляється у вигляді зміщення базового рівня кореляції і появи широких псевдопіків.

3. Проблеми дискретної реалізації похідних. Обчислення похідних за зсувом у дискретному сигналі потребує узгодженого кроку дискретизації та коректної обробки країв аналізованого вікна. Інакше виникають крайові ефекти (Boundary Effects; BE), що можуть призводити до появи артефактів на початку та в кінці кореляційного інтервалу.

У зв'язку з цим при практичній реалізації алгоритму кореляційної ідентифікації доцільно застосовувати додаткові процедури стабілізації обчислень [19, 20]:

1) *видалення повільної складової (тренду) сигналів.* Перед виконанням кореляційного аналізу бажано видаляти середнє значення сигналу та лінійний тренд. У деяких випадках ефективним є також застосування високопрохідної фільтрації для усунення повільних компонентів;

2) *раціональний вибір довжини кореляційного вікна.* Довжина аналізованого інтервалу повинна бути співрозмірною з тривалістю події. Це дозволяє забезпечити домінування корисного сигналу в кореляційному вікні та зменшити вплив фонового шуму;

3) *використання адаптивних порогів детекції.* У реальних умовах рівень шуму та спектральний склад сигналу можуть змінюватися протягом тривалого запису. Тому замість фіксованого порога доцільно використовувати адаптивні критерії, наприклад поріг відносно локального фонового рівня кореляції або статистик у ковзному вікні;

4) *перевірку стійкості результатів до параметрів попередньої обробки.* Практично корисною є оцінка стабільності детекції при зміні параметрів фільтрації або згладжування. Якщо при незначних змінах попередньої обробки детекції зникають або значно зміщуються, це свідчить про невдалий вибір портрета або наявність домінуючих нестационарних завад у сигналі.

Отже, перенесення кореляційного портрета між різними сенсорними системами та фізичними представленнями сигналу потребує врахування спектральних властивостей вимірювального тракту, узгодження процедур попередньої обробки та використання робастних алгоритмів детекції. Застосування описаних методичних підходів дозволяє підвищити стабільність кореляційної ідентифікації подій у довготривалих потоках вимірювань.

Таким чином, результати аналізу показують, що перенесення кореляційного методу ідентифікації подій на велосиметричні сигнали є технічно здійсненним і методично обґрунтованим. Водночас практична реалізація такого підходу потребує не лише формального переходу між представленнями «зміщення – швидкість», але й урахування спектральних властивостей сигналів, рівня шумів та інструментальних характеристик вимірювального тракту. Важливими чинниками стабільності

детекції є узгодження робочої частотної смуги, коректний вибір довжини кореляційного вікна, а також застосування робастних процедур попередньої обробки та адаптивних критеріїв порогування. Дотримання цих методичних вимог дозволяє забезпечити надійну кореляційну ідентифікацію подій у довготривалих потоках сейсмічних вимірювань.

Висновки

Проведено комплексне дослідження можливостей застосування кореляційного методу для ідентифікації рухомих об'єктів за даними велосиметричних вимірювань. У роботі розглянуто теоретичні засади кореляційної обробки сигналів зміщення та швидкості, обґрунтовано можливість перенесення кореляційного «сейсмічного портрета» між різними фізичними представленнями сигналу та виконано експериментальну перевірку працездатності запропонованого підходу на реальних даних моніторингу руху залізничного транспорту.

У процесі дослідження отримано наступні результати.

1. Проаналізовано теоретичні засади кореляційної ідентифікації подій у сигналах сейсмічного походження та встановлено аналітичний зв'язок між кореляційними характеристиками сигналів зміщення і швидкості, що дозволяє узгоджено використовувати портрети подій у різних представленнях сигналу. Розроблено алгоритмічну схему кореляційної ідентифікації, яка включає формування еталонного портрета події, ковзне обчислення нормованої взаємної кореляції у потокових даних і процедури детекції локальних максимумів кореляційної функції.

2. Проведено порівняльний аналіз двох режимів обробки сигналів: для сигналів зміщення та для швидкісного представлення, отриманого шляхом потокового диференціювання, що дозволило оцінити вплив диференціювання на форму кореляційної функції та стабільність детекції. Експериментально підтверджено, що кореляційні піки, які відповідають проходженню вантажного потяга, відтворюються як у сигналах зміщення, так і у швидкісних сигналах, що свідчить про можливість застосування кореляційної ідентифікації у системах на основі велосиметричних датчиків.

3. Установлено основні фактори, що впливають на стабільність кореляційної детекції, зокрема підсилення височастотних шумів при диференціюванні сигналу, відмінності частотних характеристик вимірювальних трактів, а також параметри попередньої обробки та кореляційного аналізу.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити висновок, що застосування кореляційної ідентифікації подій у велосиметричних сигналах є методично обґрунтованим і практично придатним для задач інженерного сейсмічного моніторингу рухомих об'єктів. За умови узгодження частотної смуги аналізу, коректної попередньої обробки сигналів та використання робастних критеріїв детекції запропонований підхід може бути ефективно використаний для автоматизованого виявлення характерних подій у довготривалих потоках вимірювань.

1. Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., et al. Tutorial on seismic interferometry: Part 1—Basic principles and applications. *Geophysics*. 2010. Vol. 75, No. 5. p. 75A195–75A209. <https://doi.org/10.1190/1.3457445>.

2. Li, J., Tan, Y. J., Schwarz, S. Y., et al. Recent advances and challenges of waveform-based earthquake location methods. *Reviews of Geophysics*. 2020. Vol. 58. e2019RG000667. <https://doi.org/10.1029/2019RG000667>.
3. Anderson, J. F., & Lees, J. M. Instrument corrections by time-domain deconvolution. *Seismological Research Letters*. 2014. Vol. 85, No. 1. p. 197–201. <https://doi.org/10.1785/0220130062>.
4. Mihaylov, A., & El Naggar, H. A comparison of instrument response correction methods: post-processing and real-time methods. *Results in Geophysical Sciences*. 2021. Vol. 8. 100033. <https://doi.org/10.1016/j.ringsps.2021.100033>.
5. Ma, J., Zhang, Y., Guo, J., et al. A digital correction method for improving the low-frequency response of a moving-coil geophone. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 6. 3082. <https://doi.org/10.3390/s23063082>.
6. Gao, D., & Kao, H. Optimization of the match-filtering method for robust repeating earthquake detection: multisegment cross-correlation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. Vol. 125. e2020JB019714. <https://doi.org/10.1029/2020JB019714>.
7. Beaucé, E., Frank, W. B., & Romanenko, A. Fast matched filter (FMF): An efficient seismic matched-filter search for both CPU and GPU architectures. *Seismological Research Letters*. 2018. Vol. 89, No. 1. p. 165–172. <https://doi.org/10.1785/0220170181>.
8. Senobari, N. S., Funning, G. J., Keogh, E., et al. Super-efficient cross-correlation (SEC-C): A fast matched filtering code suitable for desktop computers. *Seismological Research Letters*. 2019. Vol. 90, No. 1. p. 322–334. <https://doi.org/10.1785/0220180122>.
9. Caffagni, E., Eaton, D. W., Jones, J. P., et al. Detection and analysis of microseismic events using a matched filtering algorithm. *Geophysical Journal International*. 2016. Vol. 206, No. 1. p. 644–658. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw168>.
10. Ueno, T., Saito, T., Shiomi, K., & Haryu, Y. Effects of response changes on seismic interferometry analysis. *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67. 135. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0305-0>.
11. Woo, H. B., Bilek, S. L., Gochenour, J. A., et al. Processing ambient noise data using phase cross-correlation and application toward understanding spatiotemporal environmental effects. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2023. Vol. 128. e2023JF007091. <https://doi.org/10.1029/2023JF007091>.
12. van Dalen, K. N., Wapenaar, K., & Fokkema, J. T. Application of multi-dimensional deconvolution to seismic interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2015. Vol. 120. p. 944–961. <https://doi.org/10.1002/2014JB011262>.
13. Brenguier, F., Boué, P., Ben-Zion, Y., et al. Train traffic as a powerful noise source for monitoring active faults with seismic interferometry. *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL083438>.
14. Rezaeifar, M., van der Neut, J., & Draganov, D. Imaging shallow structures using interferometry of seismic body waves generated by train traffic. *Geophysical Journal International*. 2023. Vol. 233, No. 2. p. 964–977. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac507>.
15. Hu, B., & Lu, S. Numerical differentiation by a Tikhonov regularization method based on the discrete cosine transform. *Applicable Analysis*. 2012. <https://doi.org/10.1080/00036811.2011.598862>.
16. Kašac, J., Majetić, D., & Brezak, D. An algebraic approach to on-line signal denoising and derivatives estimation. *Journal of the Franklin Institute*. 2018. Vol. 355. <https://doi.org/10.1016/j.franklin.2018.08.016>.
17. Schwardt, M., Pilger, C., Gaebler, P., et al. Natural and anthropogenic sources of seismic, hydro-acoustic, and infrasonic waves: waveforms and spectral characteristics and applicability for sensor calibration. *Surveys in Geophysics*. 2022. Vol. 43. p. 1265–1361. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09713-4>.
18. You, B., Mi, B., Guan, B., et al. High-quality surface wave retrieval from vibrations generated by high-speed trains moving on viaducts. *Journal of Applied Geophysics*. 2023. Vol. 212. 105005. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105005>.
19. Britsky, O. I., Gorbov, I. V., Petrov, V. V., & Balagura, I. V. A compact semiconductor digital interferometer and its applications. *Proceedings of SPIE 9506, Optical Sensors 2015*. 2015. 95060G. <https://doi.org/10.1117/12.2178476>.
20. Petrov, V. V., Britsky, O. I., Kryuchyn, A. A., & Shcherbyna, S. V. Identification of seismic events of natural and military origin using digital laser seismometers. *Problems of Control and Informatics*. 2023. No. 2. p. 67–74.

21. 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. No. 3. p. 10–18. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.102.02>.

22. Chalyi, O., Feshchenko, A., & Shcherbyna, S. The cause of cracks on the walls of buildings in the Kyiv-Pechersk Lavra. *Proceedings of the XVII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*. Kyiv, Ukraine. 2023.

23. 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. *Geophysical Journal*. 2024. Vol. 46, No. 5. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.309056>.

24. Huang, H., Agafonov, V., & Yu, H. Molecular electric transducers as motion sensors: A review. *Sensors*. 2013. Vol. 13. p. 4581–4597. <https://doi.org/10.3390/s130404581>.

Надійшла до редакції 15.02 2026