

Дем'янчук Т.М.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Губар В.Г.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МІР ПОДІБНОСТІ З МЕТОЮ ПОРІВНЯННЯ СИГНАТУР СИГНАЛІВ БПЛА

У даній статті розглядається застосування метричних методів кількісного аналізу подібності сигналів у контексті виявлення та ідентифікації електромагнітного випромінювання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на основі їх сигнатур, отриманих у ході радіоелектронної розвідки (РЕР). Дослідження має на меті продемонструвати потенціал використання формалізованих математичних підходів, зокрема метричних методів подібності, для підвищення точності класифікації сигналів, які надходять із різних джерел – особливо в умовах зашумлення, фрагментації чи інших викривлень, що часто трапляються у реальному бойовому середовищі. В основі дослідження лежить концепція аналізу сигнатур сигналів БПЛА розвідників типу «Орлан», що широко використовуються противником.

Виявлення сигнатур сигналів БПЛА є складним завданням через наявність природних та штучно створених завад, динамічність радіочастотного середовища, а також змінюваність параметрів сигналів під впливом умов передачі, переадресації та обробки. Традиційні підходи до розпізнавання, як-от фіксація порогових рівнів потужності або аналіз форм сигналу вручну, не забезпечують необхідної надійності, особливо в умовах автоматичного або напівавтоматичного моніторингу. У цьому контексті актуальним є застосування кількісних методів оцінки подібності, які дають змогу порівнювати реєстровані сигнали із заздалегідь створеними еталонними сигнатурами. Це дозволяє реалізувати ефективні алгоритми, здатні ідентифікувати тип БПЛА або інше джерело сигналу навіть за наявності значного рівня шуму або за часткової відсутності сигналу.

У рамках цього дослідження була сформована методика, яка включає кілька ключових етапів: вилучення комплексного сигналу з цифрового запису у форматі WAV, побудову спектрального представлення сигналу, виділення фрагменту спектрограми (сигнатури), подальше усереднення даних для зниження впливу флуктуацій, додавання штучного шуму контрольованих параметрів, та порівняння отриманої зашумленої сигнатури з початковою (референсною). Шум моделюється у вигляді комплексного додатку з випадковою амплітудною складовою, з можливістю введення імпульсних сплесків, що моделює несприятливі умови реального радіоелектронного середовища.

Один із розглянутих підходів до аналізу подібності сигналів ґрунтується на використанні коефіцієнта кореляції Пірсона, який дозволяє оцінити лінійний взаємозв'язок між двома векторами даних – еталонною та зашумленою сигнатурою. Цей метод забезпечує числову інтерпретацію рівня подібності та може застосовуватись як індикатор впізнаваності сигналу. Водночас, через свою обмеженість – зокрема, нечутливість до нелінійних залежностей і залежність від масштабу – він розглядається у межах ширшого набору метричних підходів. У роботі також досліджуються альтернативні метрики, зокрема косинусна подібність, рангові коефіцієнти Спірмена і Кендалла, евклідова, мангеттенська та чебишевська відстані. Такий комплексний підхід дозволяє оцінити сигнатурну подібність з різних точок зору та формує універсальну платформу для метричного аналізу сигнальних даних в умовах шуму та часткової фрагментації.

Для реалізації обчислень було використано мову програмування Python, яка завдяки своїм бібліотекам (NumPy, SciPy, Matplotlib тощо) забезпечує високоефективне опрацювання масивів даних, виконання чисельних операцій, побудову графіків та спектрограм. Однією з важливих частин дослідження став візуальний аналіз, який допомагає експериментально підтвердити ступінь подібності між сигналами, а також виявити нетипові або аномальні випадки, де метрика може давати хибні оцінки. Побудовані графіки сигналів дають змогу інтерпретувати числові результати у зрозумілому вигляді, що особливо важливо при подальшій інтеграції запропонованого підходу до реальних систем аналізу.

У результаті дослідження було продемонстровано, що навіть при значному рівні зашумлення (додавання комплексного шуму), коефіцієнти кореляції можуть зберігати відносно високе значення, що свідчить про збереження основної структури сигналу. Це дозволяє зробити висновок про потенційну ефективність використання цього підходу для попереднього аналізу та фільтрації даних у системах РЕР.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані для створення автоматизованих або напіваавтоматизованих систем виявлення БПЛА, інтегрованих у складі мобільних або стаціонарних радіомоніторингових комплексів. Такі системи можуть працювати у режимі реального часу, порівнюючи нові сигнали із базою відомих сигнатур, що дозволяє оперативно реагувати на загрози. Крім того, підхід може бути масштабований для роботи з широким спектром типів сигналів, а не лише з БПЛА «Орлан», що робить його універсальним інструментом для аналізу радіоелектронної обстановки у складних умовах.

Таким чином, проведений огляд демонструє підхід до аналізу сигналів у радіоелектронній розвідці, заснований на застосуванні метричних методів подібності. Запропонована методика є ефективною, гнучкою та перспективною для подальшого вдосконалення. Вона може бути інтегрована до систем аналізу з використанням елементів штучного інтелекту або машинного навчання, де метрики подібності використовуються як вхідні ознаки або критерії подальшої класифікації. Надалі можливе також тестування алгоритмів на великих масивах емпіричних даних, що дозволить покращити точність і чутливість систем виявлення БПЛА в реальних умовах.

Ключові слова: міри подібності, виявлення БПЛА, спектральний аналіз, SDR, класифікація сигналів, радіочастотний моніторинг.

Постановка проблеми. У сучасних умовах ведення війни, що відзначаються високою інтенсивністю бойових дій, застосуванням інтелектуальних систем озброєння, а також активною участю високотехнологічних рішень, виникає нагальна потреба у вдосконаленні засобів виявлення, спостереження та протидії загрозам з повітря. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали одним з основних інструментів ведення розвідки, коригування вогню, здійснення точкових ударів, забезпечення ретрансляції зв'язку тощо. Масштабне вторгнення Російської Федерації на територію України у 2022 році стало каталізатором стрімкого зростання кількості БПЛА, які використовуються обома сторонами конфлікту, що, у свою чергу, обумовило нові виклики для систем протидії.

БПЛА різних класів – від побутових дронів до тактичних платформ типу «Орлан» – активно використовуються для проникнення в тил, збору розвідувальної інформації, ураження цілей або виконання радіоелектронних завдань. У зв'язку з цим зростає значення технологій радіоелектронної розвідки (РЕР) та радіоелектронної боротьби (РЕБ), які повинні оперативно виявляти джерела сигналів, аналізувати їх і класифікувати. На перший план виходить завдання ідентифікації БПЛА не лише за візуальними або акустичними ознаками, але й за характеристиками електромагнітного випромінювання.

Кожен дрон або наземна станція керування випромінює унікальний за спектральними харак-

теристиками сигнал, який можна охарактеризувати через так звану сигнатуру – частотне представлення, що відображає властивості модуляції, ширину смуги, спектральну щільність потужності, рівень шуму. У разі БПЛА типу «Орлан», що активно використовується військами РФ для розвідки і коригування артилерії, сигнатури сигналів мають чіткі повторювані ознаки, які, за умови правильного вилучення та обробки, можуть бути надійним індикатором присутності БПЛА у повітряному просторі.

Завдяки розвитку програмно-визначеного радіо (SDR) з'явилася можливість високоточних записів широкосмугових сигналів, їх збереження, постобробки і візуального аналізу спектрограм. SDR відкриває нові горизонти для РЕР, однак одночасно вимагає наявності методів, які здатні з великого масиву сигналів виділяти ті, що потенційно є сигнатурами БПЛА. Через високу динаміку умов (наявність перешкод, зміна частот, періодів мовчання тощо), сигнали часто є фрагментарними, частково зашумленими або взагалі не відповідають формальним шаблонам.

У таких умовах традиційні методи детектування, які базуються, наприклад, на пороговому аналізі амплітуд, фіксованих спектральних маркерах або передбачуваних структурах пакету, втрачають ефективність. Саме тому зростає інтерес до методів оцінки подібності, що дозволяють порівнювати новий сигнал із базою еталонних сигнатур і робити висновок щодо ймовірної відповідності між ними. Такий підхід

відкриває перспективи для реалізації інтелектуальних алгоритмів класифікації, які здатні виявляти навіть модифіковані або частково спотворені сигнали.

Одним із найпростіших і водночас ефективних підходів до такого порівняння є використання метрик подібності. Найвідоміша з них – коефіцієнт кореляції Пірсона, що дозволяє визначити ступінь лінійної залежності між двома масивами даних. У випадку аналізу сигнатур, це може означати, що, незважаючи на наявність шуму або масштабування, загальний характер сигналу зберігається, і він має високу подібність до оригіналу. Однак Пірсонова кореляція чутлива до нелінійних викривлень, тому доцільним є паралельне використання альтернативних метрик, таких як косинусна подібність (яка порівнює напрямки вектора ознак), рангові коефіцієнти (наприклад, Спірмена), а також відстані – евклідова, мангеттенська, Чебишова тощо.

Застосування цих метрик особливо актуальне в умовах, коли сигнал є неідеальним – наприклад, коли фіксується лише частина спектру, або коли на нього накладаються завади (внутрішні від SDR, зовнішні з довкілля, або навіть спрямовані атаки за допомогою генераторів завад). Щоб оцінити ефективність методів подібності в таких умовах, доцільно створювати контрольовані експерименти, у яких до еталонної сигнатури додається штучний шум із регульованими характеристиками, після чого проводиться порівняння із «чистим» сигналом. Таким чином можна емпірично оцінити, які саме метрики залишаються стійкими до шуму, і за яких умов сигнал ще можна вважати впізнаваним.

У перспективі, такий підхід дозволить не лише виявляти присутність відомого БПЛА у зоні моніторингу, але й оцінювати ступінь невизначеності в сигналі, сигналізуючи оператору про необхідність перегляду або уточнення еталонної сигнатури. Більше того, це створює підґрунтя для навчання систем виявлення на основі накопичення та аналізу сигнатур, включаючи аномальні, спотворені, або нові типи випромінювання.

Отже, огляд метрик подібності є частиною ширшого наукового напрямку – розробки інтелектуальних систем виявлення на основі спектрального аналізу та метричних оцінок подібності. Вони мають важливе значення не лише в контексті сучасного військового конфлікту, а й у сфері цивільної безпеки, моніторингу повітряного простору, а також у наукових досліджен-

нях електромагнітних впливів і класифікації джерел випромінювання в умовах невизначеності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У контексті виявлення та класифікації сигнатур сигналів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) спостерігається зростання інтересу до застосування метричних методів для оцінки подібності сигналів, особливо в умовах впливу шуму, фрагментації та динаміки радіочастотного середовища. У науковій літературі широке поширення отримали дослідження, присвячені застосуванню кореляційних методів для аналізу сигналів у системах зв'язку та радіоелектронної розвідки. Наприклад, коефіцієнт кореляції Пірсона традиційно використовується для оцінювання лінійного взаємозв'язку між сигналами, однак його чутливість до масштабних змін та відсутність врахування нелінійностей обмежують сферу ефективного застосування.

Попередні дослідження [1–3] демонструють доцільність використання спектральних ознак для ідентифікації джерел випромінювання, проте часто обмежуються формальним порівнянням пікових частот, ширини смуги або рівня шуму. У той час як сигнатурний підхід передбачає комплексне трактування сигналу як узагальненої часово-частотної структури, що є більш інформативним і стійким до завад. У цьому контексті все частіше використовуються методи обробки спектрограм та машинного навчання для розпізнавання сигнатур [4–6], однак ці підходи часто потребують великого обсягу навчальних даних і не завжди добре працюють у реальному часі.

Аналіз літератури свідчить, що порівняно мало уваги приділяється адаптивним методам метричного аналізу сигнатур у зашумленому середовищі. Тому виникає потреба у формуванні універсального підходу, який дозволяє здійснювати гнучке порівняння сигналів за допомогою набору метрик та методів нормалізації, адаптованих до характеристик БПЛА-сигналів.

У статті, що аналізується, автори запропонували підхід до порівняння сигнатур на основі формалізованих метричних методів, що поєднує класичні статистичні індикатори з можливістю моделювання умов зашумлення. Важливою особливістю є використання спектрального представлення сигналу (через спектрограми) та його обробка із залученням засобів мов програмування (зокрема, Python).

Таким чином, порівняно з попередніми дослідженнями, дана робота виокремлюється цілісним експериментальним підходом, в якому симулю-

ються типові умови завад, а також застосовуються одразу декілька метрик подібності. Це відкриває шлях до створення систем виявлення, здатних працювати у реальному часі й виявляти сигнатури БПЛА з високою точністю навіть за несприятливих умов. Актуальність підходу підтверджується зростанням практичної потреби у таких системах у межах сучасної гібридної війни, зокрема в умовах протидії БПЛА типу «Орлан».

Постановка завдання. У сучасних умовах ведення гібридної війни, як уже зазначалося вище, дедалі зростає роль безпілотних літальних апаратів, які широко використовуються у розвідувальних та ударних операціях. У зв'язку з цим зростає необхідність у розробці ефективних методів виявлення та класифікації таких об'єктів на основі їхніх сигнатур. Особливу цінність у таких завданнях мають алгоритми, що здатні працювати в режимі реального часу з високою точністю, в умовах сильного радіочастотного зашумлення, фрагментації сигналу та обмеженого обсягу даних. Саме тому у цій статті метою є огляд методів метричного порівняння сигнатур БПЛА «Орлан», що можуть застосовуватися у згаданих алгоритмах.

Основним об'єктом дослідження є радіочастотна сигнатура (Рисунок 1) БПЛА типу «Орлан», отримана із записаного реального сигналу у вигляді файлу .wav. Цей сигнал обробляється для виділення так званого водопадку (Рисунок 2) – двовимірної масиви, що відобра-

жає зміну частотного спектра в часі. Такий підхід дозволяє зосередитися на часо-частотній структурі сигналу, яка є унікальною для кожного типу передавача та апаратури БПЛА.

З технічного боку реалізовано декілька ключових етапів. Перший – це формування спектрограми сигналу за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є, який дозволяє отримати спектральний склад сигналу. У цьому процесі враховано як реальну, так і уявну частини сигналу, закодовані у двоканальному .wav файлі, що відповідає комплексному представленню електромагнітного коливання. Подальший аналіз проводиться над вибраним фрагментом спектрограми, із якого обчислюється усереднений профіль – репрезентативна (референсна) сигнатура, яка використовується для порівняння.

Одним з основних викликів, який постає при роботі з реальними сигналами БПЛА, є високий рівень шуму, спотворення та фрагментарність. У роботі моделюються ці умови за допомогою функції, яка додає до сигналу складову випадкового шуму з амплітудними сплесками, симулюючи типові перешкоди в бойових умовах. Це дозволяє протестувати стійкість обраних метрик до завад та оцінити їхню придатність до реального застосування.

У рамках роботи застосовано набір метричних функцій, кожна з яких по-різному вимірює схожість між «референсною» сигнатурою та її зашумленою версією.

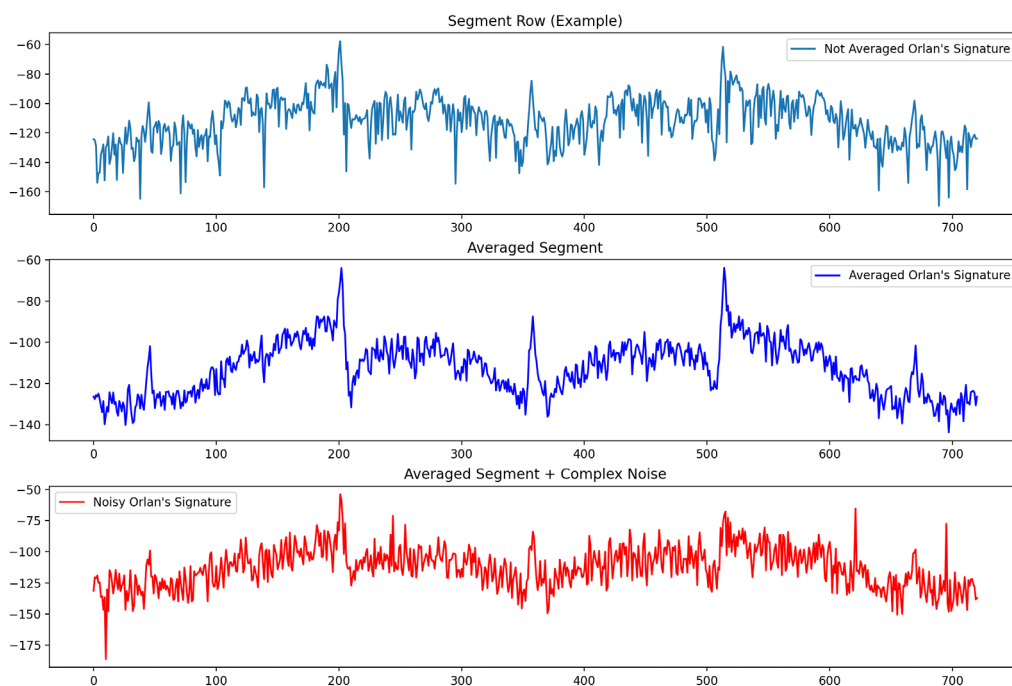


Рис. 1. Сигнатури сигналу БПЛА «Орлан»

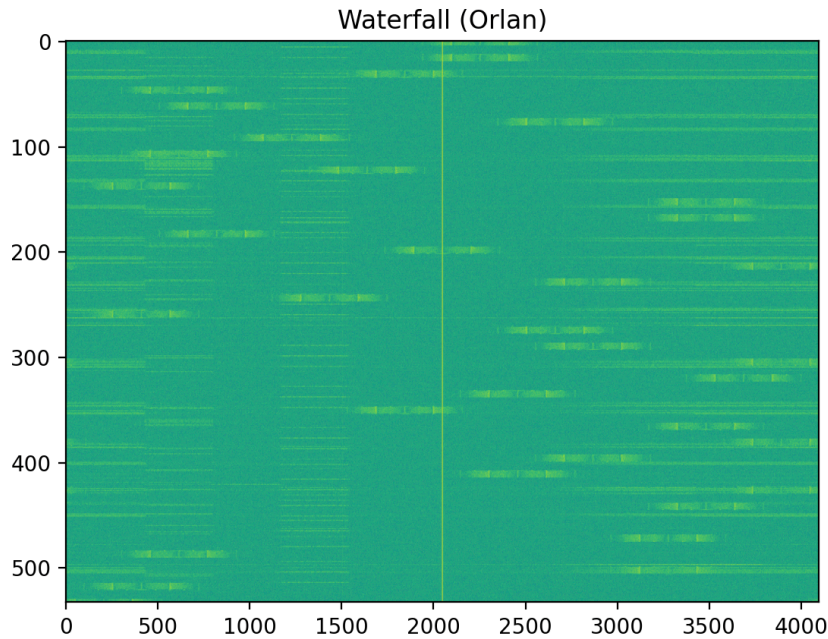


Рис. 2. «Waterfall» БПЛА «Орлан»

Виклад основного матеріалу. Застосування мір подібності для порівняння між собою референсної сигнатури (Рисунок 1, синій графік, Averaged Orlan's Signature) та її зашумленої версії (Рисунок 1, червоний графік, Noisy Orlan's Signature).

1. Кореляція Пірсона – це міра лінійного зв'язку між двома числовими величинами. Вона була запропонована британським статистиком Карлом Пірсоном у 1896 році. Це один із найстаріших інструментів у статистиці, який досі широко використовується в багатьох галузях науки: біології, соціології, економіці, машинному навчанні тощо. Кореляція Пірсона показує, наскільки сильно і в якому напрямку зміни однієї змінної пов'язані зі змінами іншої. Значення коефіцієнта Пірсона лежить у межах від -1 до 1 та обчислюється згідно формули (1).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

де: x_i , y_i – значення у відповідних векторах, $\bar{x}$ та $\bar{y}$ середні значення (математичні сподівання) відповідних векторів.

Обчисливши значення кореляційного коефіцієнта Пірсона отримано результат, що становить 0,808, або ж – 80,8%.

2. Кореляція Спірмена – це рангова кореляція, яка вимірює монотонний (не обов'язково лінійний) зв'язок між двома змінними. Вона оці-

нює, наскільки добре одна змінна може бути описана монотонною функцією іншої. Коефіцієнт рангової кореляції був запропонований Чарльзом Спірменом (Charles Spearman) у 1904 році, британським психологом і статистиком. Він розробив цю метрику для аналізу зв'язку між оцінками людей у психологічних тестах, де точні значення не мали великого значення, а от порядок (ранг) – так. Ідея така: замість самих значень використовуються ранги (позиції в упорядкованому списку), після чого розраховується звичайна кореляція Пірсона між цими рангами. Значення кореляції Спірмена, як і у Пірсона, лежить у межах від -1 до 1 та обчислюється згідно формули (2).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (2)$$

де d_i – різниця між рангами $R(x_i)$ та $R(y_i)$, n – кількість пар значень.

Обчисливши значення кореляційного коефіцієнта Спірмена отримано результат, що становить 0,806, або ж – 80,6%.

3. Коефіцієнт Кендалла – це ще один непараметричний метод вимірювання зв'язку між двома змінними, подібний до Спірмена, але з дещо іншим підходом. Коефіцієнт був запропонований американським статистиком Морісом Кендаллом у 1938 році. Він прагнув створити більш «логічну» міру кореляції для порядкових (рангових) даних, яка прямо спирається на кіль-

кість узгоджених/неузгоджених пар. Він ґрунтується на порівнянні парних значень: наскільки часто пара значень має узгоджений або неузгоджений порядок у двох вибірках. Значення коефіцієнта Кендалла, як і у Пірсона та Спірмена, лежить у межах від -1 до 1 та обчислюється згідно формули (3).

$$\tau = \frac{C - D}{\frac{1}{2}n(n-1)}, \quad (3)$$

де C – кількість узгоджених пар, D – кількість неузгоджених пар та n – загальна кількість пар.

Обчисливши значення коефіцієнта Кендалла отримано результат, що становить 0,608, або ж – 60,8%.

4. Косинусна подібність – це міра, яка показує, наскільки два вектори спрямовані в одному напрямку. Її спочатку широко застосовували у текстовій аналітиці (порівняння документів, рекомендаційні системи). У радіоелектроніці та спектральному аналізі вона дозволяє порівнювати форму сигнатур, ігноруючи амплітуду – це особливо важливо, якщо сигнал ослаблений або спотворений. Застосовується переважно у випадках, коли важлива форма або напрямок вектора, а не його довжина чи абсолютні значення. Значення косинусної міри подібності лежить у межах від 0 до 1 та обчислюється згідно формули (4).

$$\cos(\theta) = \frac{\vec{x} \cdot \vec{y}}{\|\vec{x}\| \cdot \|\vec{y}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}, \quad (4)$$

де $\vec{x} \cdot \vec{y}$ – скалярний добуток векторів, $\|\vec{x}\|$ – довжина (норма) вектора $\vec{x}$, $\|\vec{y}\|$ – довжина (норма) вектора $\vec{y}$.

Обчисливши значення косинусної міри подібності отримано результат, що становить 0,996, або ж – 99,6%.

5. Евклідова відстань – це одна з найпростіших і найвідоміших метрик відстані. Вона вимірює пряму відстань (лінію) між двома точками у багатовимірному просторі, подібно до того, як рулетка вимірює відстань між двома точками в реальному світі. На відміну від попередніх мір подібності, Евклідова відстань після її обрахування надає результат, що лежить в межах від нуля до нескінченності $([0, \infty))$. Таким чином, про максимальну подібність порівнюваних векторів говоритиме значення результату, що мак-

симально приближене до нуля. Обчислюється Евклідова Відстань згідно формули (5).

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (5)$$

де (x, y) – два вектор (наприклад, сигнатури), x_i та y_i значення елементів векторів на позиції i , n – довжина векторів.

Обчисливши значення Евклідової відстані отримано результат, що становить 255,2.

6. Манхеттенська відстань, або також **L1-норма** – це метрика, що вимірює відстань між двома точками шляхом підсумовування абсолютних різниць їхніх координат. Вона не підносить різниці до квадрату, тому більші відхилення мають менший вплив. Аналогічно з Евклідовою відстанню Манхеттенська відстань надає результат, що лежить в межах від нуля до нескінченності $([0, \infty))$. Обчислюється Манхеттенська Відстань згідно формули (6).

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \quad (6)$$

де (x, y) – пара векторів (наприклад, сигнатур), x_i та y_i значення елементів векторів на позиції i , n – довжина векторів.

Обчисливши значення Манхеттенської відстані отримано результат, що становить 5483.

7. Відстань Чебишова – це міра відстані, яка визначає найбільшу абсолютну різницю між відповідними координатами двох векторів. Її ще називають L_∞ -норма або максимальна норма. Цей підхід моделює ситуацію, коли переміщення обмежується лише найповільнішим або найгіршим компонентом, і тому використовується там, де важливе найбільше можливе відхилення. Відстань Чебишова обчислюється згідно формули (7).

$$d(x, y) = \max_i |x_i - y_i|, \quad (7)$$

де (x, y) – пара векторів, x_i та y_i – відповідні елементи векторів.

Обчисливши значення відстані Чебишова отримано результат, що становить 57,7.

Висновки. У статті розглянуто метод метричного аналізу сигнатур безпілотних літальних апаратів (БПЛА) типу «Орлан» із метою підвищення ефективності їх виявлення в умовах реального, зашумленого радіочастотного середовища. Було проаналізовано низку класичних метрик подібності – кореляцію Пірсона, Спірмена, Кендалла,

косинусну подібність та евклідову відстань – на предмет їхньої здатності виявляти сигнатури навіть за наявності спотворень та шуму.

Результати експериментів продемонстрували, що найбільш стійкими до завад є метрики, які враховують загальну форму та напрям векторів (зокрема косинусна подібність), тоді як метрики рангового типу (Спірмен, Кендалл) також показали добру адаптивність до нелінійних змін. Евклідова відстань, хоча і є менш інформативною при високому рівні шуму, може бути корисною для доповнення загальної оцінки подібності.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у його здатності адаптуватися до непередбачуваних умов роботи системи РЕР, що особливо актуально в умовах гібридної війни. Отримані результати можуть бути використані для побудови алгоритмів виявлення БПЛА, які поєднують спектральний аналіз із інтелектуальними методами класифікації на основі багатометричної оцінки. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні бази еталонних сигнатур, залученні методів машинного навчання та впровадженні виявлених підходів у реальні системи ситуаційного моніторингу.

Список літератури:

1. Ansari M.I., Hasan T. SpectNet: End-to-End Audio Signal Classification Using Learnable Spectrograms. arXiv preprint arXiv:2211.09352. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2211.09352> (дата звернення: 28.05.2025).
2. Harp G.R., et al. Machine Vision and Deep Learning for Classification of Radio SETI Signals. arXiv preprint arXiv:1902.02426. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1902.02426> (дата звернення: 28.05.2025).
3. Tekbiyik K., et al. Spectrum Sensing and Signal Identification with Deep Learning based on Spectral Correlation Function. arXiv preprint arXiv:2003.08359. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2003.08359> (дата звернення: 28.05.2025).
4. Kuang T., et al. Abnormal Signal Recognition with Time-Frequency Spectrogram: A Deep Learning Approach. arXiv preprint arXiv: 2205.15001. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2205.15001> (дата звернення: 28.05.2025).
5. Zhou Y., et al. Cancelable biometric schemes for Euclidean metric and Cosine metric. Cybersecurity. 2023. Т. 6, № 1. С. 1–16. URL: <https://cybersecurity.springeropen.com/articles/10.1186/s42400-023-00137-0> (дата звернення: 28.05.2025).

Demianchuk T.M., Gubar S.G. ANALYSIS OF THE USE OF SIMILARITY MEASURES FOR COMPARING UAV SIGNAL SIGNATURE

This article explores the application of metric-based quantitative methods for analyzing signal similarity in the context of detecting and identifying electromagnetic emissions from unmanned aerial vehicles (UAVs) based on their signatures obtained through electronic intelligence (ELINT). The research aims to demonstrate the potential of using formalized mathematical approaches—particularly similarity metrics—to enhance the accuracy of signal classification from various sources, especially under conditions of noise, fragmentation, or other distortions commonly encountered in real-world combat environments. The study is centered around the analysis of UAV signal signatures, focusing specifically on the “Orlan” reconnaissance drones, which are widely used by the adversary.

Detecting UAV signal signatures poses significant challenges due to the presence of both natural and artificially generated interference, the dynamic nature of the radio frequency environment, and variability in signal parameters caused by transmission conditions, redirection, and processing. Traditional recognition approaches, such as threshold-based power detection or manual waveform analysis, often fail to deliver reliable results—particularly in automated or semi-automated monitoring systems. In this context, the application of quantitative similarity assessment methods becomes highly relevant, allowing for the comparison of recorded signals against pre-established reference signatures. This enables the implementation of effective algorithms capable of identifying the type of UAV or other signal source—even in the presence of high noise levels or when signal information is partially missing.

Within this study, a methodology has been developed that includes several key steps: extraction of a complex signal from a digital WAV-format recording; construction of its spectral representation; selection of a spectrogram fragment (signature); subsequent averaging of the data to reduce the influence of fluctuations; addition of artificial noise with controlled parameters; and comparison of the resulting noisy signature with the original (reference) version. The noise is modeled as a complex additive component with random amplitude characteristics and the potential inclusion of impulse spikes to simulate adverse real-world electromagnetic environments.

One of the approaches considered for signal similarity analysis is the Pearson correlation coefficient, which evaluates the linear relationship between two data vectors—the reference and the noisy signature. This method offers a numerical interpretation of similarity and can be used as an indicator of signal recognizability. However, due to its limitations—namely, insensitivity to nonlinear dependencies and sensitivity to scaling—it is considered within a broader set of metric-based approaches. The study also examines alternative similarity measures, such as cosine similarity, rank-based coefficients (Spearman and Kendall), Euclidean, Manhattan, and Chebyshev distances. This multifaceted approach enables a comprehensive evaluation of signal signature similarity from different perspectives and provides a universal platform for metric-based analysis of signal data under noise and partial fragmentation conditions.

The computational framework was implemented in Python, which—through its libraries (NumPy, SciPy, Matplotlib, etc.)—provides high-performance data processing, numerical computation capabilities, and tools for plotting and spectrogram visualization. A key component of the research is visual analysis, which assists in experimentally validating the degree of similarity between signals and identifying atypical or anomalous cases where certain metrics may produce misleading results. The plotted signal graphs allow for an intuitive interpretation of numerical results, which is especially important when integrating the proposed approach into real-world analysis systems.

The results of the study demonstrate that even under significant noise levels (via the addition of complex noise), correlation coefficients can retain relatively high values, indicating the preservation of the signal's core structure. This supports the conclusion that the proposed approach has potential effectiveness for preliminary analysis and signal filtering in ELINT systems.

The practical value of the findings lies in their potential use for the development of automated or semi-automated UAV detection systems integrated into mobile or stationary radio monitoring complexes. These systems can operate in real time, comparing incoming signals with a database of known signatures, enabling timely responses to threats. Additionally, the approach can be scaled to work with a wide variety of signal types—not limited to “Orlan” UAVs—making it a universal tool for analyzing the electromagnetic environment in complex operational scenarios.

In summary, this review presents a signal analysis approach for electronic intelligence based on the application of similarity metrics. The proposed methodology is effective, flexible, and promising for further development. It can be integrated into analysis systems employing artificial intelligence or machine learning elements, where similarity metrics serve as input features or criteria for subsequent classification. Future directions include testing the algorithms on large empirical datasets, which would further enhance the accuracy and sensitivity of UAV detection systems in real-world conditions.

Key words: *similarity measures, UAV detection, spectral analysis, SDR, signal classification, radio frequency monitoring.*