

УДК: 621.396:004.942:355.48

DOI: 10.33099/2311-7249/2025-54-3-141-149

СКОРЕЦЬКИЙ Максим Сергійович,

Командування Сухопутних Військ Збройних Сил України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0009-0008-6721-291X>

КРАВЦОВ Євген Павлович,

Окремий спеціальний центр електронної підтримки Командування Сухопутних Військ Збройних Сил України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0009-0000-1699-7472>

КАПТУР Вадим Анатолійович,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Окремий спеціальний центр електронної підтримки Командування Сухопутних Військ Збройних Сил України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0003-4200-1151>

САМОДІД Володимир Олександрович,

Окремий спеціальний центр електронної підтримки Командування Сухопутних Військ Збройних Сил України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0009-0005-7873-747X>

МЕТОДИКА ВПОРЯДКУВАННЯ ПОДІЙ ЗАРЕЄСТРОВАНИХ МУЛЬТИВЕНДОРНИМИ ЗАСОБАМИ ВІЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННОЇ ПІДТРИМКИ

Метою статті є розроблення методики впорядкування подій, зареєстрованих різнотипними засобами виявлення джерел радіовипромінювання з урахуванням часової, просторової та інформаційної неоднорідності даних у системах електронної підтримки.

Методи дослідження. У статті застосовано методи кластерного аналізу ефективних зон прийому засобів радіотехнічної розвідки, алгоритми формування груп подій за часовими ознаками, а також метод матриць подібності для визначення ймовірності відповідності між подіями. Зазначений методичний підхід дозволяє здійснювати багаторівневу агрегацію даних та фільтрацію дубльованих повідомлень.

Отримані результати дослідження. У ході дослідження розроблено алгоритм упорядкування подій, що надходять від різнотипних та мультівендорних засобів радіотехнічного контролю, призначених для роботи в багатосенсорних системах електронної підтримки. Алгоритм поєднує кластеризацію сенсорів за ознакою перетину зон потенційного покриття та поетапну перевірку гіпотези подібності між подіями на основі їх часових, просторових і радіотехнічних параметрів. Завдяки цьому забезпечується коректне формування «фінальних геолокацій», зменшення дублювання об'єктів і зниження кількості хибних спрацьовувань у процесі інтеграції даних від різних джерел. Практичну ефективність запропонованого підходу ілюстровано на прикладі роботи алгоритмів з умовними наборами даних, що далі продемонструвати характер їх взаємодії та очікувані результати.

Елементи наукової новизни. Вперше запропоновано формалізований підхід до багатоджерельного впорядкування даних з різних типів засобів радіотехнічної розвідки, який базується на інтеграції подій у просторі подібності з перевіркою гіпотез сумісності.

Теоретична й практична значущість викладеного у статті. Запропонована методика є основою для побудови модулів синхронізації даних у військових інформаційних системах. Вона дає змогу адаптувати засоби радіотехнічної розвідки до умов багатосенсорного розгортання в бойовій обстановці та зменшити навантаження на операторів систем за рахунок автоматичної агрегації геолокацій. Крім того, запропонований підхід дає змогу зменшити кількість помилок при геолокації джерел радіовипромінювання, зменшити кількість хибних спрацьовувань та забезпечити узгоджене представлення інформації в системах ситуаційної обізнаності.

Ключові слова: електронна підтримка, виявлення джерел радіовипромінювання, кластеризація сенсорів, подібність, алгоритм впорядкування.

Вступ

Постановка проблеми. Проведення заходів інформації про радіоелектронні засоби, системи електронної підтримки є складовою радіоелектронної управління та зброю противника для забезпечення боротьби, що зводяться до пасивного використання протидії ним. Основним функціональним електромагнітного спектра з метою здобуття призначенням системи електронної підтримки є

локалізація та відображення районів ймовірного місцеположення джерел радіовипромінювання (далі – ДРВ) [1; 2]. Завдяки використанню розвинутої мережі засобів виявлення різних виробників (мультивендорності) реалізація зазначеного функціоналу здійснюється різними способами, що передбачає розбір інформаційних повідомлень каналів керування, реєстрацію індивідуальних спектральних ознак (сигнатур) радіосигналів на певних частотах тощо.

Збільшення щільності мережі засобів виявлення та її мультивендорності з одного боку дає змогу підвищити спроможності по виявленню ДРВ, а з іншого – створює нову проблему щодо відсутності синхронізації (впорядкування) інформації отриманої від різних джерел. Зокрема, на напрямках, де одне й те саме ДРВ одночасно фіксується двома або більшою кількістю різнотипних засобів виявлення існує велика ймовірність дублювання об'єктів при їх відображенні відповідною системою електронної підтримки. Водночас, завдяки тому, що різні засоби мають різну точність виявлення сигналів, реалізацію пристроїв синхронізації за часом та різні способи представлення інформації процес «міжджерельної» синхронізації набуває особливої складності. Окремі зразки апаратури мають недостатньо ефективні алгоритми, що істотно знижує достовірність виявлення сигналів.

Слід однак зазначити, що не є винятком і ситуації, коли різні ДРВ, що функціонують в одній географічній зоні та можуть бути детектованими за допомогою засобів одного типу і проігноровані (наприклад, в силу специфічних налаштувань) засобами іншого типу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблематика інтеграції, синхронізації та обробки даних у багатоджерельних системах виявлення ДРВ активно досліджується як у межах розвитку систем радіоелектронної розвідки, так і в ширшому контексті інформаційної підтримки бойових дій. Зокрема, в роботах [3; 4] висвітлено сучасні підходи до інтеграції та узгодження інформації, отриманої з різнорідних сенсорних платформ, що ґрунтуються на поєднанні кореляційного аналізу, ймовірнісної оцінки та логіки нечітких множин. Однак більшість таких досліджень орієнтовані на інтегровані сенсорні комплекси одного виробника або на системи, що функціонують в єдиному інформаційному середовищі.

У дослідженнях [5; 6] розглянуто підходи до фільтрації, агрегування та узгодження сповіщень про виявлення сигналів, спрямовані на зменшення кількості хибних або дубльованих подій, що надходять від різних джерел. Запропоновані алгоритми групування та інтеграції даних за часовими і просторовими характеристиками дають змогу підвищити достовірність виявлення цілей і зменшити вплив шумів, однак, вони мають обмежену ефективність у випадках, коли джерела надходження інформації суттєво відрізняються за точністю, частотою оновлення або логікою формування повідомлень.

Деякі роботи [7; 8] висвітлюють аспекти уніфікації форматів повідомлень у мультивендорних системах, однак переважно на прикладах цивільних або стандартизованих платформ, що не враховують реальних

обмежень, пов'язаних із військовими умовами застосування, відсутністю повної документації на засоби виявлення або несумісністю програмних інтерфейсів.

Актуальні дослідження [9; 10] зосереджені також на розробці систем ситуаційної обізнаності, в яких реалізовані механізми первинного впорядкування подій за допомогою геопросторового та частотного аналізу. Проте застосування цих підходів у сфері електронної підтримки потребує адаптації до специфіки реального функціонування засобів радіотехнічної розвідки, зокрема, за умов недостатньої надійності каналів передачі даних, втрат пакетів та затримок у реєстрації подій.

Отже, незважаючи на наявність низки досліджень, які частково торкаються проблеми синхронізації та впорядкування даних, наразі відсутні відомі реалізації, що давали змогу ефективно інтегрувати повідомлення про події з різнотипних засобів виявлення в умовах бойового застосування. Це обумовлює потребу розроблення (удосконалення) методик, що дають змогу автоматизувати процеси впорядкування й агрегації подій у багатоджерельних системах електронної підтримки.

Метою статті є розроблення методики впорядкування подій зареєстрованих мультивендорними засобами виявлення джерел радіовипромінювання в системах електронної підтримки з урахуванням часової, просторової та інформаційної неоднорідності даних для їх синхронізації та подальшої обробки.

Виклад основного матеріалу дослідження

Передумови створення методики. В умовах сучасної війни виникає потреба синхронізації (впорядкування) подій (детектування сигналів, визначення місцеположення об'єктів (геолокації), пеленгування тощо), що отримані від різних засобів розвідки (сенсорів, пеленгаторів). Існуючі методики часто орієнтовані на роботу лише з одним типом засобів (або подій) і не можуть бути використані для побудови систем електронної підтримки, що інтегрують інформацію від засобів різних типів та виробників.

Об'єктом дослідження запропонованої методики є комплекси радіотехнічної розвідки, що здійснюють пеленгацію джерел радіовипромінювання у реальному часі в складних електромагнітних умовах, сенсори з механізмами автоматизованого розпізнавання типів ДРВ за характеристиками сигналів, а також інші засоби електронної підтримки.

Коротка сутність методики. В основу процесу впорядкування подій, що отримані від різних засобів (сенсорів, пеленгаторів) може бути покладений принцип фільтрації (виділення) всієї множини подій, що отримано за незначний проміжок часу dT (час достатній для фіксації, обробки та передачі інформації від кінцевого засобу виявлення (сенсора, пеленгатора тощо) до процесінгової шини даних) з формуванням на основі цієї фільтрації зони, що характеризує найбільш

ймовірне місце розташування ДРВ («фінальна геолокація»).

Призначення методики. Методика призначена для впорядкування послідовності подій про переміщення того чи іншого об'єкта у просторі на основі даних, що отримані від різнотипних засобів радіотехнічної розвідки.

Обмеження та припущення. Передбачається наявність інформації про тактико-технічні характеристики засобів радіотехнічної розвідки, що використовуються для збору інформації про події. Слід також врахувати, що різні підходи до геолокації можуть мати різні радіуси максимальної дальності виявлення ДРВ засобами одного і того самого типу. Так, наприклад, якщо сенсор здійснив геолокацію ДРВ завдяки декодуванню інформаційних повідомлень, що ним надсилаються, на відстані 4 км, то в той самий час він може бути здатний зафіксувати його на відстані 10 км (за наявності зони прямої видимості). Також слід урахувати те, що деякі засоби мають секторний огляд завдяки використанню спрямованих антен. Однак під час викладення матеріалу статті це не буде враховано з метою формування первинної моделі.

Ввідними даними для методики є характеристики та місцезнаходження засобів радіотехнічної розвідки, а також потік даних від них із визначеним набором характеристик. В основу пропонованого підходу пропонується покласти алгоритм наведений на рис. 1.

Кластеризація засобів виявлення (джерел) за ознакою перетину зон потенційного виявлення передбачає під собою визначення груп (кластерів) засобів виявлення при якій до кожної групи (кластеру) мають входити не менш ніж два засоби. Головною умовою при цьому є наявність певної мінімальної площі перетину ефективних зон прийому.

З метою кращого розуміння сутності процедури кластеризації засобів виявлення розглянемо приклад наведений на рис. 2. На цьому рисунку схематично наведено розташування 5-ти різних засобів виявлення трьох різних типів: пасивні пеленгатори A1 та A2 з радіусом дії 10 км кожен, пасивні сенсори D1 та D2 з радіусом дії 4 км кожен та активний радар R1 з радіусом дії 2 км. Враховуючи наявність перетинів між ефективними зонами прийому можна сформувати такі групи (кластери) засобів (всього 17 груп): D1-A1; D1-R1; D1-A1-R1; D1-A1-D2; D1-R1-D2; D1-A1-R1-D2; A1-R1; A1-D2; A1-R1-D2; A1-D2-A2; R1-D2; D2-A2; D1-D2; A1-A2; D1-D2-A1; D1-D2-A1-R1; A1-A2-D2. Ядром алгоритму (рис. 1) є безперервний цикл обробки подій від засобів виявлення. Вихід з циклу (та алгоритму в цілому) відбувається лише за умов примусового або позапланового завершення роботи системи, в межах якої реалізовано цей алгоритм. На кожній черговій ітерації циклу здійснюється відбір порції подій, за ознакою часу (всі події, що надійшли за певний період часу dT) або за ознакою кількості (досягнуто максимальну кількість подій, що може бути опрацьована в межах блоку – X_{max}).

У межах циклу (рис. 1), що послідовно перебирає всі сформовані кластери засобів виявлення здійснюється фільтрація всіх подій з чинного блоку $D\{d_1, d_2, \dots, d_x\}$ розміром X (де $X \leq X_{max}$), які згенеровані одним (або

декількома) засобами, що входять до складу кластеру. При цьому, із кожним попередньо сформованим кластером засобів виявлення може бути асоційовано ту чи іншу кількість подій з чинного блоку. Слід зазначити, що одна й та сама подія на цій стадії може бути асоційована із декількома кластерами засобів виявлення. Також на етапі формування груп подій здійснюється відкидання подій, геометричне представлення яких не перетинається із жодною з ефективних зон прийому засобів виявлення, що входять до складу кластеру, а також відкидання подій, у формуванні яких брали участь засоби, що не входять до складу чинного кластеру. Також, на цьому кроці здійснюється групування подій, що асоційовані з одним і тим самим кластером за часовою ознакою. Результатом роботи блоку є формування груп подій за принципом можливості її формування відповідним кластером k_j за певний проміжок часу, а також додаткової «позакластерної групи». При цьому до групи має обов'язково входити не менш ніж 2 події, що отримані різними засобами.

По завершенню циклу перебирання всіх сформованих кластерів виявлення, алгоритм впорядкування подій (рис. 1) має перейти в іншу стадію – проходження циклу по всіх сформованих групах подій для кожної з яких має бути створено низку підгруп (можливих комбінацій подій в межах групи), починаючи від підгруп максимального розміру (що вміщують всі події групи) і закінчуючи всіма підгрупами мінімального розміру, що задовільняють мінімальній умові за кількістю подій, що отримані різними засобами.

Далі, для кожної з підгруп послідовно формується низька матриць близькості (подібності) подій, що входять до складу підгрупи за тим чи іншим критерієм з подальшим прийняттям або не прийняттям гіпотези щодо подібності подій, що входять до складу підгрупи. Водночас, якщо було підтверджено гіпотезу подібності щодо якоїсь підгрупи в групі – аналіз для подальших підгруп цієї групи не здійснюється. Формування матриць близькості (подібності) здійснюється в межах тієї чи іншої підгрупи подій таким чином.

Для кожного з критеріїв близькості (подібності) формується симетрична матриця розміром $N \times N$, де N – кількість подій в підгрупі. Рядки матриці, як і її стовпчики відповідають тій чи іншій події в підгрупі (в порядку їх слідування). Елементи головної діагоналі матриці встановлюються рівними 1 (максимально можливий рівень подібності). Всі інші елементи формуються шляхом приведення до шкали від 0 (абсолютно різні) до 1 (максимально подібні) значень для двох подій, що формують відповідний елемент матриці по рядках та стовпчиках відповідно. При цьому, значення близькості (подібності) для елемента (i, j) має бути таким самим що й для елемента (j, i) цієї матриці. Правила формування конкретних значень визначаються для кожного з критеріїв окремо. За таких умов, кількість критеріїв, їх типи, а також правила оцінювання можуть змінюватись шляхом застосування методів машинного навчання з метою покращення показників ефективності моделі на стадіях імітаційного моделювання або навіть на стадії експериментальних досліджень.

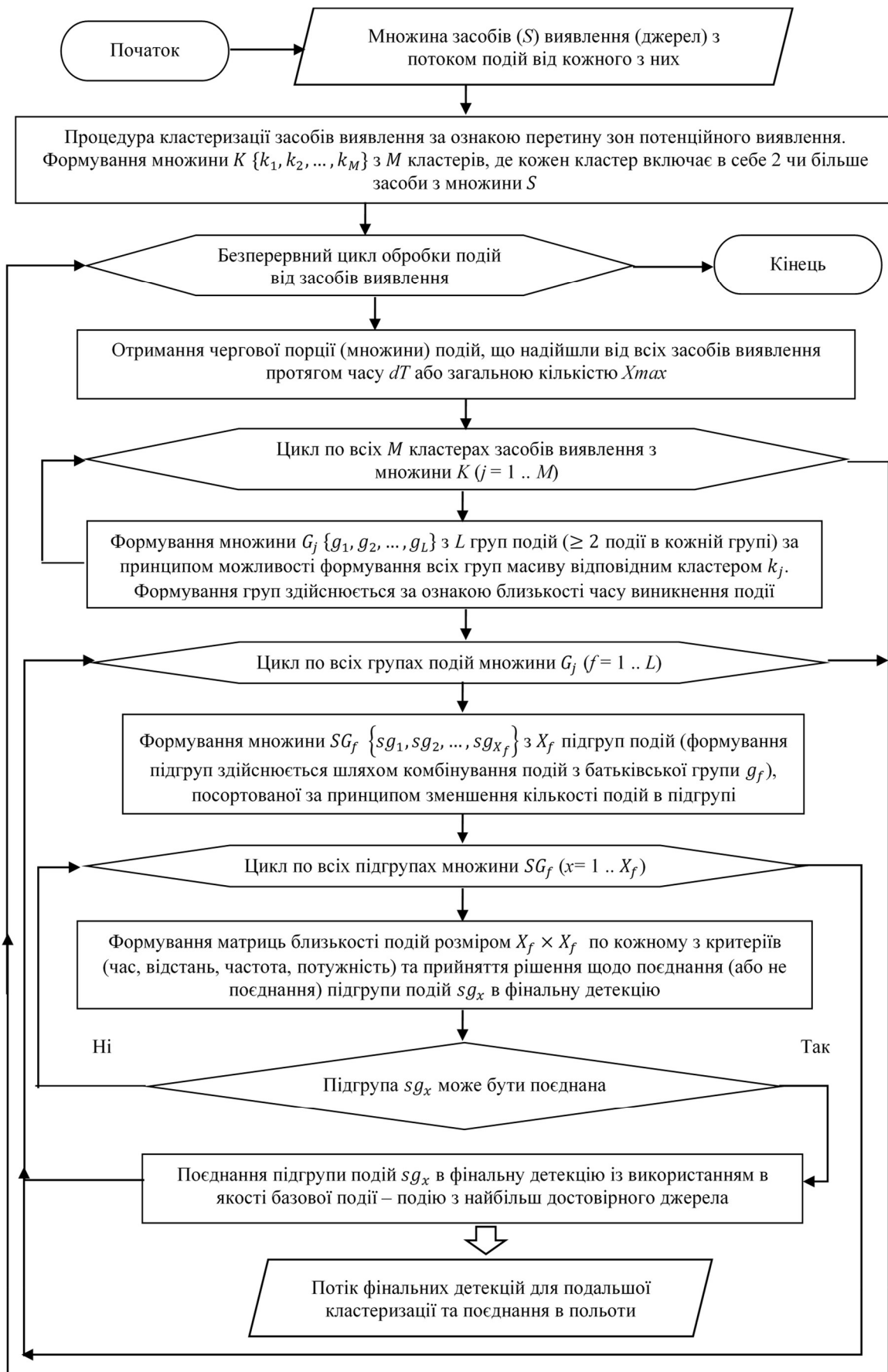


Рисунок 1 – Алгоритм впорядкування подій зареєстрованих різними засобами виявлення

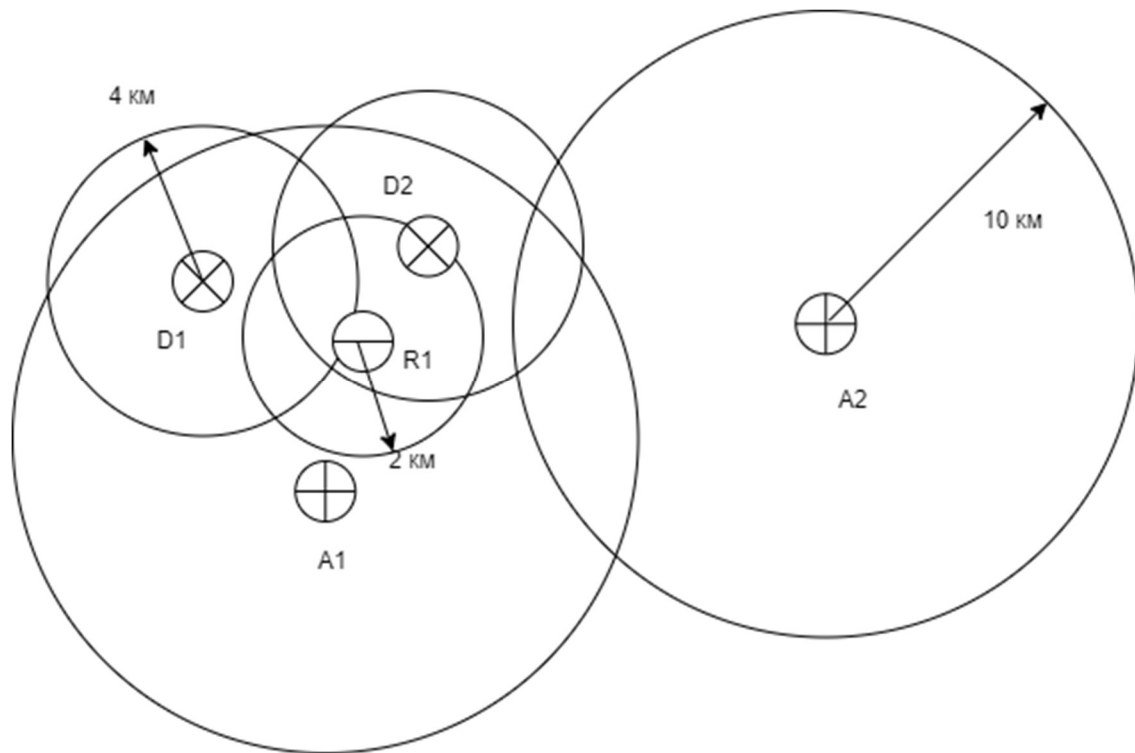


Рисунок 2 – Приклад кластеризації засобів виявлення

Прикладами критеріїв близькості можуть бути:

Час. Під близькістю (подібністю) двох подій отриманих з різних джерел за критерієм Часу будемо розуміти відношення різниці у часі фіксації цих двох подій до максимального часу різниці між подіями в межах групи dT . Разом із тим, різницю у часі фіксації двох подій має бути попередньо приведено до максимального значення часу різниці між подіями в межах групи dT таким чином, щоб фінальне значення потрапляло в межі діапазону від 0 до 1, де 0 – це події з абсолютно ідентичним часом, а 1 – це події в яких розбіжність часу дорівнює або більша за максимальне значення часу в межах групи;

Відстань. Під близькістю (подібністю) двох подій отриманих з різних джерел за критерієм Відстані будемо розуміти відношення відстані між двома точками у просторі, що складають геометричний центр геометричних відображень подій до максимальної відстані, що характеризує абсолютну відмінність подій dD . При цьому, відстань між двома подіями має бути попередньо приведено до максимального значення dD так, щоб фінальне значення потрапляло в межі діапазону від 0 до 1, де 0 – це події з абсолютно ідентичними координатами, а 1 – це події відстань між якими дорівнює або більша за dD ;

Частота. Під близькістю (подібністю) двох подій отриманих з різних джерел за критерієм Частоти будемо розуміти відношення різниці між центральними частотами цих двох подій до максимально можливого значення розбіжності частот dF . Водночас, різницю між центральними частотами двох подій має бути попередньо приведено до максимального значення розбіжності частот dF так, щоб фінальне значення потрапляло в межі діапазону від 0 до 1, де 0 – це події з абсолютно ідентичною

частотою, а 1 – це події в яких розбіжність частот дорівнює або більша за максимальне значення dF ;

Потужність. Під близькістю (подібністю) двох подій отриманих з різних джерел за критерієм Потужності будемо розуміти відношення різниці між очікуваними (розрахованими) потужностями випромінювання цих двох подій до максимально можливого значення розбіжності dP . Разом із тим, різницю між цими значеннями двох подій має бути попередньо приведено до максимального значення dP так, щоб фінальне значення потрапляло в межі діапазону від 0 до 1, де 0 – це події з абсолютно ідентичною потужністю, а 1 – це події в яких розбіжність потужностей дорівнює або більша за максимальне значення dP .

Остаточне значення гіпотези подібності β за тим чи іншим критерієм визначається як сума всіх елементів матриці близькості за певним критерієм поділена на кількість елементів в матриці:

$$H(A) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A(i,j)}{N \times N}. \quad (1)$$

У свою чергу остаточне значення повної гіпотези подібності B підгрупи визначається як сума всіх гіпотез (по всіх критеріях) поділена на кількість критеріїв (K_n):

$$B = \frac{\sum H(A)}{K_n}. \quad (2)$$

За таких умов, для прийняття рішення встановлюється граничне значення в діапазоні від 0 до 1, яке відповідає за рівень мінімально достатньої подібності подій в підгрупі.

На наступних ітераціях циклу кожна група (перед процедурою формування підгруп) проходить процедуру фільтрації подій щодо яких вже було підтверджено гіпотезу подібності. Тобто, якщо на одному з кроків було підтверджено гіпотезу про те, що події d_1 , d_5 та d_8 – є подібними, то у разі, якщо будь-яка з цих подій (або всі разом) входить до складу будь-якої з наступних груп (підгруп) – вони мають вилучатися, а групи (підгрупи) в яких кількість подій стає недостатньою (менше 2) – розформовуються. Тож, якщо наступна група була сформована подіями d_1 та d_4 – автоматично ця група має бути розформована.

На останньому кроці алгоритму в межах циклу здійснюється формування так званих «фінальних геолокацій», кожна з яких в геометричному відображенні являє собою коло з центром у точці найбільш імовірного місця розташування джерела радіовипромінювання з радіусом, що відображає зону неповності (очікуваної похибки). З метою визначення «фінальної геолокації» з двох чи більше подій, по яких на попередньому кроці було підтверджено гіпотезу подібності (за комплексними показниками) слід геометричне відображення події кожного з типів заповнити точками кожній з яких відповідає те чи інше значення імовірності. Спосіб та метод заповнення можуть відрізнитись та визначатись типом засобу виявлення. При цьому в тих випадках де це можливо при заповненні мають ураховуватися певні характеристики рівня прийнятого сигналу.

На фінальній стадії здійснюється визначення полігону перетину всіх геометричних відображень подій, що входять до складу підгрупи з подальшим визначенням кола, що можна вписати в цей полігон. На цій стадії також може бути запроваджено порогове значення щільності ймовірності, що визначається

відповідним колом за сукупністю всіх значень, визначених геометричними відображеннями, що входять до складу перетину.

У свою чергу основу етапу формування груп подій (рис. 1) становить процедура сортування подій за таким принципом. Подія потрапляє до групи подій g_j лише в тому випадку, якщо виконуються обидві (AND) такі умови: засіб (або множина засобів) виявлення, за допомогою яких виявлено відповідну подію входить до множини засобів виявлення, що складають кластер k_j (мається на увазі повне входження). Географічне відображення відповідної події має перетин із ефективною зоною прийому принаймні одного з засобів виявлення, що входить до складу кластеру k_j . У разі, якщо подію не можна віднести до жодного з кластерів – вона потрапляє до кластеру «некласифікованих» подій і в подальшому передається в потік без будь-якої фільтрації або ж агрегації із іншими подіями потоку.

На наступному кроці цього етапу здійснюється формування груп подій за ознакою близькості часу формування подій з врахуванням унікальності сукупності типів засобів, що задіяні при формуванні групи. Разом із тим, до групи має обов'язково входити не менш ніж 2 події, що отримані різними засобами. Для кращого розуміння принципів групування подій розглянемо такий приклад (табл. 1) потоку подій, що на попередньому кроці віднесених до кластеру D1-A1-R1-D2. Будемо вважати, що час групування становить 3 секунди. За результатами роботи наведеного вище алгоритму має бути сформовано такі групи:

- Група 1 (d-0001; d-0002; d-0003; d-0004);
- Група 2 (d-0005; d-0006);
- Група 3 (d-0007).

Таблиця 1

Умовний перелік подій зафіксованих засобами виявлення

Ідентифікатор події	Засоби виявлення	Відносний час реєстрації
d-0001	(D1,D2)	00:00:00:135
d-0002	(A1)	00:00:01:100
d-0003	(R1)	00:00:01:545
d-0004	(D1,D2)	00:00:02:005
d-0005	(D1,D2)	00:00:04:105
d-0006	(R1)	00:00:05:135
d-0007	(A1)	00:00:09:635

Так, зокрема, закриття Групи 1 та відкриття Групи 2, як і закриття Групи 2 та відкриття Групи 3 було здійснено за часовою ознакою (перевищення максимальної тривалості групи). В свою чергу Група 1 містить достатню кількість геолокацій отриманих від засобів виявлення різних, щоб сформувати більш ніж одну підгрупу. Зокрема, Підгрупа 1a буде відповідати повному складу Групи 1, а Підгрупи 1b, 1c та 1d формуються шляхом комбінування, тобто загальна кількість підгруп для групи, що складається з N елементів може бути визначена за виразом:

$$Q = \sum_{x=2}^{N-1} (C_N^{N-x+1}) + 1. \quad (3)$$

Так, у наведеному прикладі з 4 елементів кількість підгруп в Групі 1 складатиме $1 + C_4^3 + C_4^2 = 11$ підгруп. Для групи з 5 елементів – $1 + C_5^4 + C_5^3 + C_5^2 = 26$ підгруп.

Тож, в наведеному вище прикладі з Групи 1 буде сформовано такі підгрупи (відсортовані в порядку зменшення кількості подій):

Підгрупа 1a (d-0001 (D1,D2) – 00:00:00:135; d-0002 (A1) – 00:00:01:100; d-0003 (R1) – 00:00:01:545; d-0004 (D1,D2) – 00:00:02:005);

Підгрупа 1b (d-0001 (D1,D2) - 00:00:00:135; d-0002 (A1) – 00:00:01:100);

Підгрупа 1c (d-0001 (D1,D2) – 00:00:00:135; d-0003 (R1) – 00:00:01:545);

Підгрупа 1d (d-0001 (D1,D2) – 00:00:00:135; d-0004 (D1,D2) – 00:00:02:005);

Підгрупа 1e (d-0002 (A1) – 00:00:01:100; d-0003 (R1) – 00:00:01:545);

Підгрупа 1f (d-0002 (A1) – 00:00:01:100; d-0004 (D1,D2) – 00:00:02:005);

Підгрупа 1g (d-0003 (R1) – 00:00:01:545; d-0004 (D1,D2) – 00:00:02:005);

Підгрупа 1h (d-0001 (D1,D2) – 00:00:00:135; d-0002 (A1) – 00:00:01:100; d-0003 (R1) – 00:00:01:545);

Підгрупа 1i (d-0001 (D1,D2) – 00:00:00:135; d-0002 (A1) – 00:00:01:100; d-0004 (D1,D2) – 00:00:02:005);

Підгрупа 1j (d-0002 (A1) – 00:00:01:100; d-0003 (R1) – 00:00:01:545; d-0004 (D1,D2) – 00:00:02:005);

Підгрупа 1k (d-0001 (D1,D2) – 00:00:00:135; d-0003 (R1) – 00:00:01:545; d-0004 (D1,D2) – 00:00:02:005).

Подальша обробка «фінальних геолокацій» має здійснюватися шляхом віднесення моменту фіксації «фінальної геолокації» (із певним набором – координати, частота, час) до того чи іншого активного «польоту». Під «польотом» слід розуміти сукупність координат ймовірних точок знаходження БПЛА в просторі в той чи інший момент часу, поєднана за ознакою можливої приналежності цих точок до процесу переміщення цього БПЛА під час здійснення однієї польотної місії.

З метою віднесення геолокації до того чи іншого польоту кожна нова «фінальна геолокація» з розрахованими координатами має перевірятись на «приналежність» до одного з чинних польотів шляхом оцінки відстані між точкою, що була додана до польоту останньою та координатами нової «фінальної геолокації» та часу, що пройшов між цими двома подіями (остання точка польоту та нова подія) з подальшою оцінкою можливості переміщення між точками за заданий період часу з певною швидкістю (наприклад, швидкістю V) за умов збігу (або близькості) всіх інших характеристик (частота, тип тощо).

На подальшому етапі, обчислення має відбуватись із тими «фінальними геолокаціями» в яких розраховані координати та які не були віднесені до жодного з польотів. У цілому алгоритм може бути таким:

Первинний стан: множина польотів – порожня.

Старт: за надходження нової «фінальної геолокації» з розрахованими координатами.

Крок 0. Актуалізація множини польотів (видалення застарілих) – перевірка всіх польотів множини і виключення з нього тих польотів (зі всіма точками) в яких час останньої віднесеної до польоту точки перевищує певне порогове значення (T_{aging} , значення має налаштовуватись, за замовчуванням – 10 хвилин). Або вибірка з бази тих польотів, що відповідають поставленим вимогам.

Крок 1 (цикл). Здійснюється перевірка можливості включення події до одного з існуючих польотів множини. З цією метою здійснюється перебір всіх польотів в множині. У разі якщо загальне для польоту значення частоти (F_{fr}) збігається із значенням частоти події «фінальної геолокації» (або є близьким до нього) з цього польоту здійснюється вибір значення останньої

віднесеної до польоту точки (координати, час). У разі, якщо значення частоти не збігається – перебір польотів продовжується до завершення всіх записів у множині.

Крок 1a (тіло циклу). За кожним вибраним значенням останньої віднесеної до польоту точки (координати, час) здійснюється визначення відстані між цією точкою та розрахованими координатами події типу «direction» (наприклад, за формулою гаверсинуса), а також різниці у часі між останнім записом (точкою) в польоті та часом настання відповідної події типу «direction».

Крок 1b. Із використанням визначених відстані та часу розраховується швидкість «потенційного переміщення», яка оцінюється за ознакою «адекватності» (значення має бути меншим за потенційно можливу максимальну швидкість переміщення дронів певного типу, має налаштовуватись, за замовченням – 30 м/с).

Крок 1в. У разі, якщо отримане значення є «адекватним», точка додається до певного польоту й здійснюється вихід з циклу та позначається міткою, яка символізує про те, що точку додано до польоту. Додатково перед додаванням нової точки до польоту має здійснюватись перевірка на перенасиченість польоту точками як за ознакою максимальної кількості точок (має налаштовуватись, за замовченням – 100 точок на політ), так і за ознакою тривалості (час між першою точкою в польоті та останньою має буди обмеженим певним значенням, що також має налаштовуватись, за замовченням – 30 хвилин). У разі, якщо останнє правило не виконується – точка до польоту не додається та мітка віднесення точки до польоту не встановлюється (буде створено новий політ для цієї точки).

Крок 2. Якщо перебір завершився тим, що точку не було додано до жодного польоту – утворюється новий політ і точку слід додати до нього. Після цього здійснюється вихід з процедури обробки надходження нової події типу «direction» з розрахованими координатами.

Висновки й перспективи подальших досліджень

У роботі здійснено системне дослідження проблеми узгодження подій, зафіксованих різнотипними засобами радіотехнічного контролю в умовах реальних багатосенсорних (мультивендорних) систем електронної підтримки. На основі цього сформовано та обґрунтовано методику впорядкування подій, що забезпечує їх коректне об'єднання у межах спільного інформаційного простору.

Запропоновано алгоритм кластеризації засобів виявлення за ознакою перетину зон потенційного покриття, який дає змогу визначити множини сенсорів, здатних спостерігати одні й ті самі об'єкти. Додатково розроблено алгоритм формування «фінальних геолокацій» на основі перевірки гіпотези подібності між подіями, що надходять від різних датчиків. Сукупність цих рішень забезпечує суттєве зменшення дублювання об'єктів, підвищує точність їх геолокації та знижує частоту хибних спрацьовувань.

Практичну значущість методики підтверджено шляхом розгляду прикладів її застосування з використанням умовних наборів даних, що дало змогу продемонструвати логіку роботи алгоритмів та характер отримуваних результатів. Особливу увагу приділено процедурі віднесення сформованих «фінальних геолокацій» до конкретних активних «польотів», що забезпечує інтеграцію отриманої інформації у системи ситуаційної обізнаності.

Отримані результати створюють наукове підґрунтя

Список бібліографічних посилань

1. Настанова з радіо-, радіотехнічного контролю окремим спеціальним центром радіоелектронної боротьби (окремим вузлом радіоелектронної боротьби) у ході застосування військ (сил). Київ : Центр учбової літератури, 2024. 80 с. URL: <https://jurkniga.ua/contents/vikonannya-zakhodiv-radio-radiotekhnichnogo-kontrolyu-okremim-spetsialnim-tsentrom-radioelektronnoi-borotbi-okremim-vuzlom-radioelektronnoi-borotbi-u-khodi-zastosuvannya-viysk-sil-nastanova.pdf> (дата звернення: 25.10.2025). 2. Bronk J., & Watling J. Airborne Electronic Warfare in NATO. Royal United Services Institute (RUSI). London. 04 March 2025. URL: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/airborne-electromagnetic-warfare-critical-natos-airpower-edge> (accessed: 25 Oct 2025). 3. Інформаційні технології у сфері захисту довкілля : колективна монографія. Львів : Навчально-науковий інститут просторового планування та перспективних технологій НУ «Львівська політехніка», 2024. 184 с. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/jun/34921/monograph2024itep.pdf> (дата звернення: 25.10.2025). 4. Scholl C., Spiegler M., Ludwig K., Eskofier B. M., Tobola A., Zanca D. An Integrated Framework for Data Quality Fusion in Embedded Sensor Systems. *Sensors*. 2023. Vol. 23(8). P. 3798. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/8/3798> (accessed: 25 October 2025). 5. Семенова О. О., Луцишин А. С., Джус А. В., Мартинюк В. В. Агрегація даних у бездротових сенсорних мережах за допомогою технологій обчислювального інтелекту. *Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво»*. 2025. Вип. 60. С. 239-246. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2025-60-26. URL:

для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію параметрів алгоритмів, підвищення їх стійкості в умовах завад і впровадження в реальні комплекси радіоелектронної боротьби. Перспективами подальших досліджень слід також вважати адаптивне зважування критеріїв подібності із застосуванням методів машинного навчання, оптимізацію продуктивності в режимі реального часу та польову валідацію в межах інтегрованих систем радіоелектронної боротьби.

<https://cit.lntu.edu.ua/index.php/cit/article/download/774/868> (дата звернення: 25.10.2025). 6. Yang Y., Wang X., Wu X., Lan X., Su T., Guo Y. A Target Detection Algorithm Based on Fusing Radar with a Camera in the Presence of a Fluctuating Signal Intensity. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(18). P. 3356. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16183356> (дата звернення: 25.10.2025). 7. Савків В. Б., Шкодзінський О. К., Письнюк В. П. Методичні вказівки з проєктування систем автоматизації. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 64 с. Розд. «Взаємодія серверів і додатків за стандартом OPC (OPC UA)». URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/48646/1/KR_2025_2.pdf (дата звернення: 25.10.2025). 8. Martín L., Lanza J., González V., Santana J. R., Sotres P., Sánchez L. A Connector for Integrating NGSI-LD Data into Open Data Portals. *Sensors*. 2024. Vol. 24(5). P. 1695. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/5/1695> (accessed: 25 October 2025). 9. Паращук Л. Я., Паращук С. М. Рекомендації стосовно використання інформаційних систем для покращення ситуаційної обізнаності органів військового управління. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2025. № 1(52). С. 46–54. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-52-1-46-54. URL: <https://sit.nuou.org.ua/article/view/322311> (дата звернення: 25.10.2025). 10. Evolutionary Cost Analysis and Computational Intelligence for Energy Efficiency in Internet of Things-Enabled Smart Cities: Multi-Sensor Data Fusion and Resilience to Link and Device Failures. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8(2). P. 64. URL: <https://www.mdpi.com/2624-6511/8/2/64> (accessed: 25 October 2025).

METHODOLOGY FOR EVENT SYNCHRONISATION IN MULTI-SENSOR RADIO EMISSION DETECTION SYSTEMS WITHIN ELECTRONIC SUPPORT ENVIRONMENTS

SKORETSKYI Maxim, Command of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0008-6721-291X>,

KRAVTSOV Yevgen, Separate Special Centre for Electronic Support of the Land Forces Command of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0000-1699-7472>,

KAPTUR Vadym, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Separate Special Centre for Electronic Support of the Land Forces Command of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-4200-1151>,

SAMODID Volodymyr, Separate Special Centre for Electronic Support of the Land Forces Command of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-7873-747X>

Formulation of the problem in general. One of the critical functions of electronic support systems is the localisation and visualisation of probable radio emission source positions. With the increasing density and multivendor nature of detection sensor networks, there is a growing challenge of synchronising data streams from heterogeneous platforms. In operational environments, the same emission source may be detected by multiple systems simultaneously, resulting in signal duplication and conflicting position estimates due to differences in accuracy, timestamping, and

detection logic. **Purpose of the article.** The article aims to develop a synchronisation methodology for aggregating and ordering events (detections, bearings, and registrations) recorded by diverse radio emission detection systems within electronic support platforms.

Research methods. The study employs clustering algorithms based on the intersection of sensor coverage zones, temporal grouping of events within defined time intervals, and similarity matrix analysis to test the hypothesis of event correlation. This multi-layered algorithmic approach ensures spatial-temporal alignment and semantic aggregation of detection data, facilitating more accurate target representation.

Literature review. Recent studies have addressed data fusion in multisensory networks using correlation analysis, fuzzy logic, and probabilistic models. However, most approaches are limited to unified sensor environments or civilian applications and lack robustness in military-grade scenarios characterised by intermittent data transmission, vendor-specific formats, and the absence of unified protocols. The literature highlights the need for adaptable, automated models that can integrate detection reports from independent and incompatible systems in real-time.

Research results. The article introduces a two-stage algorithm that first forms clusters of sensors with overlapping coverage areas and then filters and groups event records based on spatial and temporal proximity. The hypothesis of event similarity is verified through similarity matrices across multiple criteria. Validated events are used to generate “final detections” with probabilistic accuracy zones, minimising false positives and improving localisation precision.

Research novelty. The proposed approach offers a formalised method for multi-source event synchronisation in distributed electronic support systems. It enables automated grouping of detections from heterogeneous sensors without prior data unification, thereby addressing the key limitation of current fusion models in combat environments.

Theoretical and practical significance. The model is of practical relevance for developers of situational awareness and command systems in the defence sector. It enhances operational decision-making by reducing information noise, improving data reliability, and minimising the cognitive load on system operators.

Conclusions and future work. The developed synchronisation algorithm enhances data aggregation accuracy in multisensor environments. Future research will focus on adaptive weighting of similarity criteria using machine learning, optimisation of real-time performance, and field validation within integrated electronic warfare systems.

Keywords: electronic support, radio emission source detection, sensor clustering, similarity, synchronisation algorithm.

References

1. **Manual on Radio and Radiotechnical Control** by a Separate Special Center of Electronic Warfare (a Separate Unit of Electronic Warfare) During the Deployment of Troops (Forces), (2024). Kyiv: Centre for Educational Literature [online]. Available at: <https://jurkniga.ua/contents/vikonannya-zakhodiv-radio-radiotekhnichnogo-kontrolyu-okremim-spetsialnim-tsentrom-radioelektronnoi-borotbi-okremim-vuzlom-radioelektronnoi-borotbi-u-khodi-zastosuvannya-viysk-sil-nastanova.pdf> [Accessed: 25 October 2025].
2. **Bronk, J., Watling, J.**, (2025). *Airborne Electronic Warfare in NATO*. Royal United Services Institute (RUSI), London, 4 March. [online]. Available at: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/airborne-electromagnetic-warfare-critical-natos-airpower-edge> [Accessed: 25 October 2025].
3. **Information Technologies in the Field of Environmental Protection: Collective Monograph**, (2024). Lviv: Institute of Spatial Planning and Advanced Technologies, Lviv Polytechnic National University [online]. Available at: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/jun/3/4921/monograph2024itep.pdf> [Accessed: 25 October 2025].
4. **Scholl, C., Spiegler, M., Ludwig, K., Eskofier, B. M., Tobola, A., Zanca, D.**, (2023). An Integrated Framework for Data Quality Fusion in Embedded Sensor Systems. *Sensors*, 23(8), 3798. [online] Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/8/3798> [Accessed: 25 October 2025].
5. **Semenova, O. O., Lutsyshyn, A. S., Dzhys, A. V., Martyniuk, V. V.**, (2025). Data Aggregation in Wireless Sensor Networks Using Computational Intelligence Technologies. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, 60, 239-246. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2025-60-26. [online] Available at: <https://cit.lntu.edu.ua/index.php/cit/article/download/774/868> [Accessed: 25 October 2025].
6. **Yang, Y., Wang, X., Wu, X., Lan, X., Su, T., Guo, Y.**, (2024). A Target Detection Algorithm Based on Fusing Radar with a Camera in the Presence of a Fluctuating Signal Intensity. *Remote Sensing*, 16(18), 3356. [online] Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16183356> [Accessed: 25 October 2025].
7. **Savkiv, V., Shkodzins'kyi, O., Pis'tsio, V.**, (2025). *Methodological Guidelines for the Design of Automation Systems*. Ternopil: TNTU. 64 p. Section “Interaction of Servers and Applications According to the OPC Standard.” [online] Available at: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/48646/1/KR_2025_2.pdf [Accessed: 25 October 2025].
8. **Martín, L., Lanza, J., González, V., Santana, J. R., Sotres, P., Sánchez, L.**, (2024). A Connector for Integrating NGSI-LD Data into Open Data Portals. *Sensors*, 24(5), 1695. [online] Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/5/1695> [Accessed: 25 October 2025].
9. **Parashchuk, L. Ya., Parashchuk, S. M.**, (2025). Recommendations on the Use of Information Systems to Improve the Situational Awareness of Military Command Authorities. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 1(52), 46–54. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-52-1-46-54.
10. **Evolutionary Cost Analysis and Computational Intelligence for Energy Efficiency in Internet of Things-Enabled Smart Cities: Multi-Sensor Data Fusion and Resilience to Link and Device Failures**, (2025). *Smart Cities*, 8(2), 64. [online] Available at: <https://www.mdpi.com/2624-6511/8/2/64> [Accessed: 25 October 2025].

Рукопис надійшов до редакції 21.09.2025
 Рукопис прийнято до друку після рецензування 18.11.2025
 Дата публікації 30.12.2025