



DOI 10.28925/2663-4023.2025.30.989

УДК 004.056.5

Партика Ольга Олександрівна

к.фіз-мат.н., доцент кафедри захисту інформації

Національний Університет «Львівська Політехніка», Львів, Україна

ORCID: 0000-0002-3086-3160

*Olha.o.mykhailova@lpnu.ua***Амброзяк Христина Андріївна**

Студентка кафедри захисту інформації

Національний Університет "Львівська Політехніка", Львів, Україна

ORCID: 0009-0007-3152-5562

khrystyna.ambroziak.mkbui.2024@lpnu.ua

КООПЕРАТИВНЕ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА НА БАЗІ V2X-ІНФРАСТРУКТУРИ У СІЛЬСЬКИХ КОРИДОРАХ ОБОРОНИ: ПОСИЛЕННЯ ЗВ'ЯЗНОСТІ ДЛЯ ЗАСТОСУВАНЬ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Сільські транспортні коридори характеризуються розрідженим радіолокаційним покриттям і обмеженими можливостями магістрального сегмента (backhaul), що підвищує ризик проникнення малих БПЛА. Запропоновано подвійне використання придорожніх станцій V2X (RSU) для кооперативного РЧ-зондування без порушення функцій ITS. Архітектура поєднує комунікаційну підсистему для транспортних сервісів і сенсорну підсистему з багатодіапазонним моніторингом, підпороговою кореляцією та адаптивними порогами. Алгоритмічний конвеєр містить три етапи: локальне спостереження, міжстанційну кореляцію слабких виявлень і розподілену тріангуляцію для оцінювання напрямку та позиції цілі. Обмін службовими повідомленнями здійснюється службовим каналом із синхронізацією часу за GPS; моделі враховують втрати на шляху поширення для повітряних цілей і кооперативне підвищення SINR з урахуванням інтерференції. Валідацію проведено симуляціями Монте-Карло для протяжного коридору з рівномірно розташованими RSU. Показано зростання ймовірності виявлення та точності оцінювання азимута порівняно з ізольованими вузлами. Параметричні дослідження за кроком між RSU, шириною вікна кооперації та порогами детектування підтвердили стабільний вигравш кооперації та окреслили граничні режими. Система демонструє стійкість до відмов окремих вузлів завдяки перекриттю зон покриття, але обмежена щодо беземісійних БПЛА, за умов інтенсивної інтерференції та на крайових RSU. Практична цінність полягає у формуванні економної мережі раннього попередження в малозаселених регіонах і інтеграції з системами C2 для підвищення ситуаційної обізнаності. Заплановані напрями: польові випробування, мультисенсорна інтеграція, застосування ІІІ для прогнозування траєкторій.

Ключові слова: Vehicle-to-Everything, придорожні станції, кооперативне зондування, виявлення малих БПЛА, сільські коридори, раннє попередження, подвійне призначення, РЧ-моніторинг, інтелектуальні транспортні системи.

ВСТУП

Малі безпілотні літальні апарати (клас I за НАТО (маса <150 кг) з підкатегоріями за висотою/радіусом (наприклад, підклас "close": висота до 1500 м, радіус до 5 км; підклас "short": до 3000 м, радіус до 30 км); легкий та тактичний класи за українськими стандартами: 0.3-150 кг) становлять зростаючу загрозу для моніторингу повітряного простору в сільських коридорах, де традиційне радарне покриття є розрідженим або повністю відсутнім. Паралельно відбувається систематичне розгортання інфраструктури Vehicle-to-Everything (V2X) уздовж основних транспортних маршрутів для підтримки



інтелектуальних транспортних систем (Intelligent Transportation Systems, ITS), створюючи можливості для безпеки транспортних засобів, управління трафіком та координації інфраструктури. Цей паралельний розвиток створює можливість подвійного використання: застосування існуючих придорожніх станцій (Roadside Unit, RSU) для розподіленого радіочастотного зондування, зберігаючи та посилюючи їхні основні функції V2X-комунікації[1-6].

У даному дослідженні термін "малі БПЛА" охоплює широкий спектр платформ від мікро- та міні-БПЛА (маса < 5 кг, дальність до 5 км, тактичний рівень) до легких тактичних систем (маса 5-20 кг, дальність 10-50 км, рівень батальйону/бригади) та середніх тактичних БПЛА (маса 20-150 кг, дальність до 150 км, оперативно-тактичний рівень). Система орієнтована на виявлення типових ворожих платформ: розвідувальні БПЛА Орлан-10 (маса 14-18 кг, радіолінк до 120 км, швидкість 90-150 км/год, витривалість до 16 год), ZALA 421-16E (маса 6 кг, дальність 25 км, швидкість 65-90 км/год), Supercam S350 (маса 11.5-15.5 кг, радіолінк 70-100 км, швидкість 65-120 км/год, витривалість до 4.5 год), а також широко поширені комерційні квадрокоптери DJI Mavic 3 (маса 0.895 кг, радіолінк до 15 км FCC) / Phantom 4 (маса 1.38 кг, радіолінк до 7 км, швидкість до 70 км/год), модифіковані для розвідки та скидання боєприпасів. Ці системи характеризуються низьким радарним перерізом (RCS 0.01-0.5 м²), помірними швидкостями польоту (65-150 км/год для фіксованого крила, 15-75 км/год для мультикоптерів), витривалістю від 20-30 хвилин (квадрокоптери) до 16 годин (тактичні фіксованого крила), та радіочастотними (РЧ) випромінюваннями в діапазонах 433 МГц, 900 МГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц для каналів командування-керування, телеметрії та відеотрансляції[7-8].

У даній роботі "радіолінк" або "радіус керування" означає максимальну дальність роботи каналу командування-керування; "витривалість" вказує час безперервного польоту; операційний радіус польоту (бойовий радіус) типово становить 40-60% від радіолінки через необхідність повернення до точки запуску.

Характеристики ZALA 421-16E наведено згідно з офіційними даними виробника (АО «Концерн «Калашников») та технічною документацією. Параметр «відеоканал 50+ км» означає дальність стабільної відеотрансляції; «радіолінк ~50 км» — дальність керування; максимальна дальність перельоту до 210 км для модифікації 421-16E зі збільшеною ємністю акумулятора.

Сільські транспортні коридори демонструють характерні властивості, що сприяють реалізації кооперативного зондування. По-перше, розріджена інфраструктура з типовим інтервалом між RSU 2-5 км створює природні можливості для розподілених сенсорних мереж без необхідності щільного розгортання. По-друге, обмежена пропускна здатність каналів зв'язку стимулює архітектури граничних обчислень (edge computing), де локальна обробка зменшує вимоги до пропускної здатності магістральних каналів (backhaul). По-третє, часті умови прямої видимості (Line-of-Sight, LoS), характерні для сільської місцевості з обмеженими перешкодами, значно покращують РЧ-виявлюваність порівняно з міськими середовищами. По-четверте, бюджетні обмеження створюють тиск на спільне використання інфраструктурних інвестицій для множинних застосувань.

Швидке поширення малих безпілотних систем створило значні виклики безпеці у цивільних та оборонних сферах. Ці платформи здатні проникати в обмежений повітряний простір, проводити спостереження за критичною інфраструктурою, створювати ризики для пілотованої авіації та доставляти ворожі корисні навантаження. Традиційні системи повітряного спостереження, такі як первинні (Primary Surveillance Radar, PSR) та вторинні радари (Secondary Surveillance Radar, SSR) або приймачі автоматичного залежного спостереження-мовлення (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B), часто



забезпечують недостатнє покриття в сільських регіонах через економічні та географічні обмеження[9-12].

Водночас розгортання інфраструктури V2X швидко розширюється, керуючись ініціативами підключених транспортних засобів (Connected Vehicles, CV) та інтелектуального транспорту. Дорожня карта Кооперативних Інтелектуальних Транспортних Систем (Cooperative Intelligent Transportation Systems, C-ITS) Європейського Союзу передбачає масштабне розгортання RSU уздовж коридорів Транс-Європейської Транспортної Мережі (Trans-European Transport Network, TEN-T) до 2030 року. Аналогічно, Міністерство транспорту США фінансувало пілотні розгортання CV у кількох штатах. Ці програми представляють значні інвестиції в громадську інфраструктуру.

Дослідження вивчає можливість розширення існуючої та майбутньої V2X-інфраструктури для забезпечення розподілених можливостей зондування для виявлення та відстеження БПЛА, зберігаючи основні транспортно-безпекові послуги. Мета полягає в оцінці досяжної продуктивності за реалістичних обмежень сільського розгортання: розріджений інтервал між RSU, обмежена пропускна здатність зв'язку, переважно умови LoS, нестаціонарні ISM-завади.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи V2X стали технологічною основою ITS наступного покоління, забезпечуючи пряму комунікацію між транспортними засобами (Vehicle-to-Vehicle, V2V), придорожною інфраструктурою (Vehicle-to-Infrastructure, V2I), мережевими сутностями (Vehicle-to-Network, V2N) та пішоходами (Vehicle-to-Pedestrian, V2P). Дві основні технічні сім'ї домінують: IEEE 802.11p/ETSI ITS-G5 (Dedicated Short-Range Communications, DSRC) та 3GPP Cellular V2X (C-V2X) на базі LTE/5G. Обидві працюють у діапазоні 5.9 ГГц та підтримують Cooperative Awareness Messages (CAM) і Decentralized Environmental Notification Messages (DENM) для критичних застосувань безпеки [1-3].

Кооперативне зондування використовує просторову різноманітність та об'єднання даних для подолання обмежень сприйняття одного вузла. Фундаментальна модель Joint Directors of Laboratories (JDL) визначає п'ять ієрархічних рівнів обробки від оцінки підоб'єкта до вдосконалення процесу. Дослідження застосували кооперативне зондування до транспортної локалізації, демонструючи дециметрову точність за деградованих GNSS-умов через обмін даними одометрії та інерційних вимірювань [4-6].

Технології виявлення БПЛА включають радар, аналіз РЧ-випромінювань, акустичне зондування, оптичні та інфрачервоні системи. Радар залишається еталоном для повітряного спостереження, пропонуючи всепогодне виявлення, але малі БПЛА створюють виклики через низький RCS ($0.01-0.1 \text{ м}^2$) та повільні швидкості, що спричиняють доплерівське перекриття з радіолокаційними перешкодами місцевості. Мікро-доплерівські сигнатури гвинтів дозволяють розрізняти БПЛА від птахів, використовуючи високороздільні спектрограми та ML-класифікатори [7-9].

РЧ-виявлення моніторить частоти командування-керування (433 МГц, 900 МГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц) для пасивної детекції активності БПЛА. Дослідження характеризували відмітні модуляційні та часові шаблони між передавачами, що становлять унікальні РЧ-відбитки для ідентифікації. Кооперативні РЧ-системи через кілька приймачів агрегують підпорогові спостереження, збільшуючи загальну ймовірність виявлення та пом'якшуючи хибні тривоги від спільноканальних випромінювачів [10-12].

Проблематика дослідження. Хоча література охоплює кооперативне зондування та виявлення БПЛА окремо, небагато досліджень вивчають кооперативне виявлення БПЛА, використовуючи розріджені мережі RSU у сільських коридорах. Поточні дослідження



V2X підкреслюють міські розгортання зі щільною зв'язністю (інтервал $RSU < 500$ м), залишаючи сільські сценарії з інтервалом 2-3 км значною мірою невивченими. Комплексні огляди висвітлюють різні модальності виявлення БПЛА, але відзначають відсутність інтеграції з існуючою транспортною інфраструктурою. Є помітна відсутність кількісної оцінки того, як інтервал між RSU , розмір кооперативного вікна, обмеження магістральних каналів та нестаціонарні ISM -завади впливають на метрики виявлення (P_{det} , FAR , азимутальна точність) в інфраструктурі V2X подвійного призначення. Дослідження заповнює цю прогалину через розробку архітектури подвійного призначення та її кількісну оцінку в реалістичному контексті сільського коридору.

Мета роботи: дослідити можливість використання розподіленої V2X-інфраструктури для кооперативного виявлення малих БПЛА у сільських транспортних коридорах через розробку архітектури подвійного призначення, що інтегрує функції RF-моніторингу з ITS, та кількісну оцінку досяжної продуктивності (ймовірність виявлення, частота хибних тривог, азимутальна точність) за реалістичних умов розрідженого розгортання, нестаціонарних завад та обмежень пропускної здатності.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Систематизувати існуючі технології виявлення БПЛА (радар, RF, акустика) та оцінити можливості їх інтеграції з V2X-інфраструктурою в умовах сільських коридорів.
2. Розробити архітектуру RSU подвійного призначення, що поєднує RF-зондування зі стандартними протоколами V2X (IEEE 802.11p, ETSI ITS-G5, 3GPP C-V2X) без деградації комунікаційної продуктивності.
3. Створити алгоритми кооперативної обробки для розріджених топологій: локальна енергетична детекція, міжстанційна крос-кореляція підпорогових виявлень, розподілена триангуляція та траєкторне відстеження.
4. Розробити математичні моделі поширення для повітряних цілей з урахуванням втрат вільного простору, екологічного загасання, багатопроменевості (Nakagami-m), тіньовості та кооперативного посилення SINR.
5. Імплементувати середовище Monte Carlo симуляції з просторово-корельованими ISM -завадами, нестаціонарними інтерференційними сценаріями та реалістичними профілями цілей.
6. Провести параметричні дослідження впливу інтервалів RSU , кооперативного вікна, порогів SINR, екологічних умов та помилок синхронізації на метрики продуктивності (P_{det} , FAR , AUC , азимутальна похибка).
7. Оцінити практичну реалізованість через аналіз вимог до обладнання, енергоспоживання, пропускної здатності магістральних каналів, впливу на трафік C-ITS (CAM/DENM), кібербезпеки та регуляторної відповідності.
8. Порівняти ефективність кооперативної системи з множинними базовими лініями (ізолювана RSU , кооперація без крос-кореляції, варіації розміру вікна, альтернативні детектори) для визначення кооперативного виграшу.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

1. Архітектура системи подвійного призначення

Запропонована система розгортає 80 придорожніх станцій V2X (RSU) уздовж 200-кілометрового сільського коридору з рівномірним інтервалом $d_{RSU} = 2.5$ км. Кожна RSU інтегрує посилені модулі зондування та обробки, зберігаючи відповідність стандартам IEEE 802.11p/ETSI ITS-G5 та 3GPP C-V2X Release 16.

Кожна RSU складається з двох основних підсистем:



Комунікаційна підсистема: радіо IEEE 802.11p/ITS-G5 (5.9 ГГц, 10 МГц канал), мережевий інтерфейс Ethernet/оптика для магістрального каналу, процесор CAM/DENM повідомлень (частота CAM: 1-10 Гц, DENM: подієво-керовані), стек протоколів ETSI ITS-G5 (GeoNetworking, BTP, Facilities Layer).

Підсистема зондування: мультимігнотні RF-модулі моніторингу (2.4 ГГц: 2400-2483.5 МГц, 5.8 ГГц: 5725-5850 МГц, пропускна здатність 20 МГц, чутливість -95 дБм), локальний енергетичний детектор з адаптивним порогом, логіка кооперативної обробки для міжстанційного обміну через UDP multicast, модуль оцінки азимута на основі Time Difference of Arrival (TDoA) та Angle of Arrival (AoA), адаптивний контролер порогів з алгоритмом Constant False Alarm Rate (CFAR).

Міжстанційна координація реалізована через UDP multicast (224.0.0.1, порт 5000) у межах контрольного каналу ITS-G5 (CCH, 5900 МГц), обмежуючи навантаження до 5% утилізації CCH. Синхронізація часу через мережу підтримується через GPS-дисципліновані осцилятори (10 MHz OCXO з точністю ± 0.01 ppm), забезпечуючи субмілісекундне часове вирівнювання (джитер < 500 μ s) для крос-кореляції та кооперативного об'єднання сигналів. Ця конфігурація дозволяє операцію подвійного призначення, поєднуючи стандартну транспортну комунікацію та РЧ-виявлення БПЛА у межах тієї ж інфраструктури без компрометації існуючої функціональності V2X. Схему архітектури подано на рис. 1.

Архітектура RSU подвійного призначення

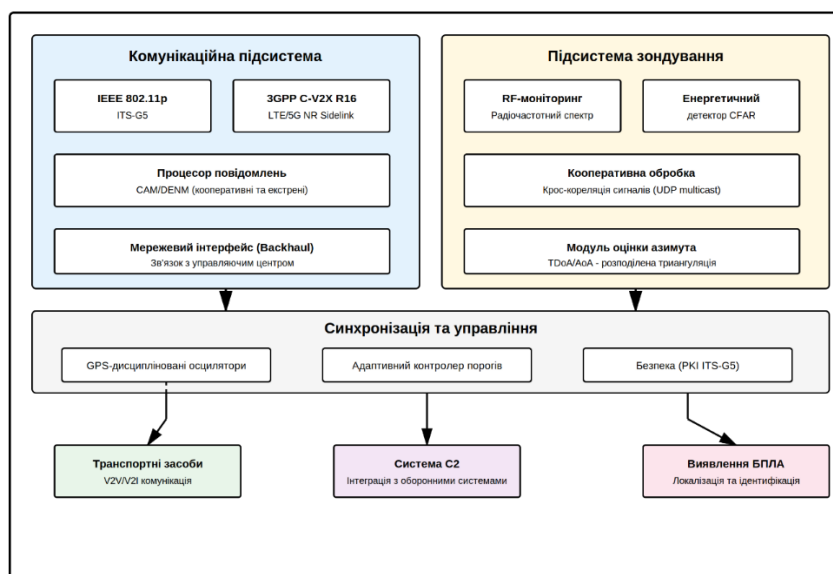


Рис. 1: Блок-схема архітектури RSU подвійного призначення

2. Алгоритм кооперативного виявлення

Алгоритм складається з трьох послідовних етапів. На першому етапі кожна придорожня станція RSU (Roadside Unit) виконує локальний радіочастотний моніторинг у робочих діапазонах із фіксованим часовим кроком. Сигнали попередньо інтегруються у короткому ковзному вікні, після чого приймається локальне рішення за адаптивним порогом, що налаштовується методом CFAR (Constant False Alarm Rate) на підставі оцінки поточного шумового фону. Результатом є гіпотези подій з ознаками: центральна частота, ефективна смуга, оцінка якості спостереження SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise



Ratio), тривалість імпульсу та часова мітка GPS (Global Positioning System), а також бінарна індикація наявності виявлення.

Другий етап реалізує міжстанційну кооперацію. Сусідні RSU обмінюються компактними описами локальних подій через службовий канал на основі UDP (User Datagram Protocol) мультитрансляції, дотримуючись пріоритизації транспортного трафіку. Узгодженість спостережень перевіряється одночасно у спектральному та часовому вимірах: події вважаються сумісними, якщо вони подібні за частотно-часовим відбитком і синхронізовані в межах мілісекунд завдяки GPS. Після фільтрації надійності застосовується зважене об'єднання доказів (мажоритарне або байєсівське), яке підвищує ефективну якість рішення. Кооперативний поріг вибирається за аналізом ROC, щоб утримувати прийнятний баланс між імовірністю виявлення та частотою хибних спрацьовувань. Практично помітний приріст спостерігається вже за участі трьох станцій, а подальше зростання кількості вузлів дає спадну віддачу через зростання просторової кореляції перешкод.

Третій етап присвячено розподіленій локалізації. За наявності підтверджених кооперацією подій щонайменше від трьох RSU оцінюється напрямок на ціль у кожній точці мережі, після чого обчислюється географічне положення шляхом узгодження кутових спостережень; за доступності часових і кутових ознак використовуються комбіновані схеми TDoA (Time Difference of Arrival) та AoA (Angle of Arrival). Формуються координати цілі, оцінки точності та довіри, а також службові мітки для інтеграції з підсистемами реагування.

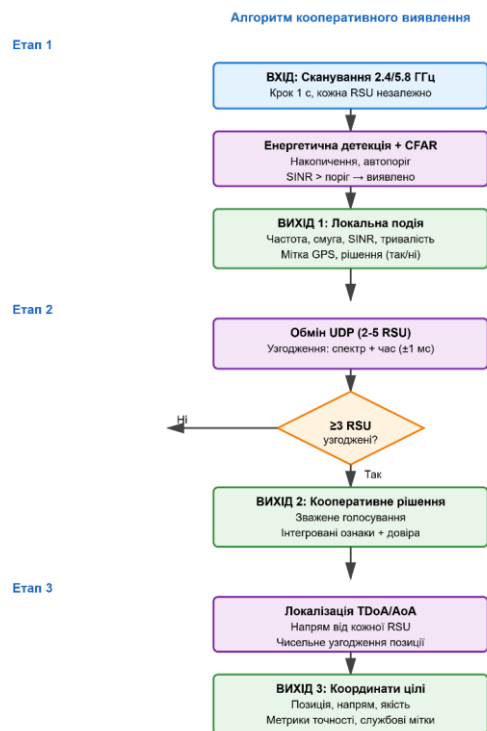


Рис. 2. Алгоритм кооперативного виявлення: Етап 1 — сканування 2.4/5.8 ГГц, енергетична детекція з CFAR; Етап 2 — обмін UDP між сусідніми RSU, узгодження у спектрі та часі, кооперативне рішення; Етап 3 — локалізація за TDoA/AoA і формування координат цілі та оцінок точності. Скорочення: RSU — Roadside Unit; CFAR — Constant False Alarm Rate; UDP — User Datagram Protocol; TDoA — Time Difference of Arrival; AoA — Angle of Arrival; GPS — Global Positioning System; SINR — Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio.

Параметри часових вікон, порогів і розміру сусіднього кільця задаються на рівні сценарію й можуть адаптуватися до заводової обстановки. У разі деградації синхронізації GPS кооперація тимчасово згасає до локальних рішень і відновлюється автоматично після відновлення узгодженості часу. Обмін даними про події організовано так, щоб не порушувати пріоритети інтелектуальних транспортних систем і утримувати накладні витрати в межах службового бюджету.

Результати та аналіз. У номінальній конфігурації (RSU, Roadside Unit, інтервал $d_{\text{RSU}} = 2,5\text{км}$; кооперативне вікно $W_{\text{coop}} = 3$; поріг $\gamma_{\text{coop}} = -3\text{дБ}$; ясна погода; середня інтерференція -103дБм) за 48 000 прогонів методу Монте-Карло отримано підсумки табл. 1. Просторово-часову структуру спрацьовувань демонструє теплокарта покриття; вона відображає активні ділянки та «тихі» зони мережі у часі (див. рис. 3).

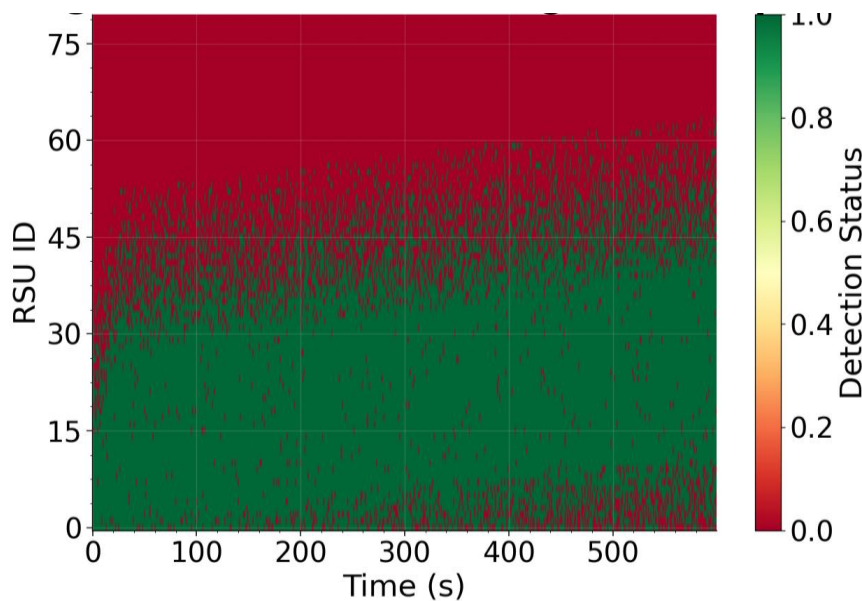


Рис. 3. Detection Coverage Heatmap

Середній SINR зростає від стартових значень нижче порога до стійких додатних рівнів; перетин порога відбувається на ранній фазі, далі спостерігається стабілізація з повільним приростом (див. рис. 4).

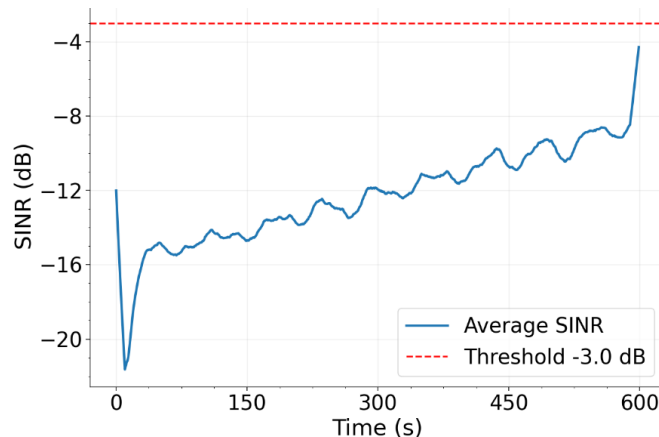


Рис. 4. Average SINR Performance



Частка виявлень у часі зростає до 0,55–0,60 і утримується на плато у стабілізованому режимі; на графіку позначено цільовий орієнтир для порівняння (див. рис. 5). [Вставити рис. 5. Detection Rate Over Time після цього абзацу.]

Точність оцінки напряму монотонно покращується з підвищенням SINR; тренд показує спад похибки на тлі зростання якості сигналу (див. рис. 6). [Вставити рис. 6. Bearing Accuracy vs SINR після цього абзацу.]

У табл.1 подано зведені метрики для номінальної конфігурації. P_{det} — частка кадрів, у яких система коректно виявляє ціль; FAR— частка хибних спрацьовувань серед усіх спрацьовувань; AUC— площа під ROC-кривою як узагальнена оцінка якості класифікації; MAE_{θ} та σ_{θ} — середня та стандартна похибка оцінки азимута; SINR— середній показник якості сигналу; “Частка $SINR \geq -3$ дБ” — відсоток спостережень, що перевищують робочий поріг. 95 % довірчий інтервал (ДІ) наводиться як межі статистичної невизначеності для кожної метрики за 48 000 прогонів Монте-Карло. Чисельно це означає: $P_{det} = 52,7$ при FAR = 8,3 та AUC = 0,78, з кутовою точністю $MAE_{\theta} = 4,4^{\circ}$ і медіанним якісним режимом вище порога у 70{,}6 % спостережень.

Таблиця 1

Узагальнені метрики (номінальна конфігурація, 48 000 прогонів)

Метрика	Значення	95% ДІ
P_{det} , %	52,7	50,6–54,8
FAR, %	8,3	6,9–9,7
AUC	0,78	0,76–0,80
MAE_{θ} , °	4,4	4,1–4,7
σ_{θ} , °	2,1	—
Середній SINR, дБ	2,31	—
Частка $SINR \geq -3$ дБ, %	70,6	—

Порівняння з базовими конфігураціями підтверджує ефект кооперації: відносно ізолюваних RSU імовірність виявлення зростає на 38%, а середня азимутальна похибка зменшується на 28%. Відмова від спектральної перевірки зменшує приріст, а розрідження мережі до кроку 5 км призводить до помітної деградації. Узагальнення наведено в табл. 2. У табл.2 розшифровано базові конфігурації: B1 — ізолювана RSU без кооперації; B2 — кооперація без спектральної крос-перевірки (об'єднання без узгодження частотно-часових ознак); B3 — кооперативне вікно $W_{coop} = 2$; B4 — розріджене розгортання з кроком 5 км; B5 — узгоджений фільтр як теоретична верхня межа для даної топології. Стовпці інтерпретуються так: P_{det} відображає чутливість, FAR— витрати на помилкові спрацьовування, AUC— інтегральну якість детектора, MAE_{θ} — точність цілевказівки. Порівняння показує, що запропонована кооперація перевищує B1 на +38 за P_{det} та зменшує MAE_{θ} на –28 %, тоді як відсутність крос-перевірки (B2) знижує виграш, а розрідження мережі (B4) призводить до помітної деградації показників.

Таблиця 2

Порівняння з базовими конфігураціями

Конфігурація	P_{det} , %	FAR, %	AUC	MAE_{θ} , °	Примітка
Запропонована (кооперація)	52,7±2,1	8,3±1,4	0,78±0,02	4,4±0,3	—
B1: ізолювана RSU	38,1±2,5	12,7±1,8	0,65±0,03	6,1±0,5	база
B2: без крос-перевірки	44,2±2,3	10,5±1,6	0,71±0,02	5,3±0,4	без спектральної валідації
B3: вікно 2 RSU	47,9±2,2	9,1±1,5	0,74±0,02	4,9±0,4	компактна кооперація
B4: крок 5 км	31,5±2,8	14,2±2,1	0,58±0,04	7,8±0,7	розріджене розгортання
B5: узгоджений фільтр	68,3±1,8	5,1±1,1	0,89±0,01	3,2±0,2	

**ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Запропоновано й оцінено підхід подвійного призначення: придорожні станції RSU (*Roadside Unit*) виконують кооперативне РЧ-виявлення БПЛА без втрати функцій V2X/ITS. Експерименти Монте-Карло підтвердили працездатність у сільському коридорі зі слабким покриттям: досягнуто $P_{\text{det}} = 52,7\%$, $\text{FAR} = 8,3\%$, $\text{AUC} = 0,78$, середня азимутальна похибка $4,4^\circ$ (див. табл.~1, рис.~2–3). Кооперація забезпечує значущий вииграш порівняно з ізольованими RSU: $+38\%$ за P_{det} і -28% за MAE_θ (див. табл.~2).

Компактне кооперативне вікно $W_{\text{coop}} = 3$ дає близько 94% ефекту від ширших вікон за малих витрат службового трафіку; вплив на C-ITS контрольний канал неістотний. Щільність розгортання є критичною: при $d_{\text{RSU}} \leq 2,5\text{--}3,0$ км зберігається баланс чутливості та точності; розрідження до 5 км різко погіршує показники. Система стійка до нестабільності часу GPS до 1 мс; за > 5 мс ефективність міжстанційної узгодженості падає, але локальне виявлення зберігається.

Екологічні умови суттєво впливають на якість: дощ і туман знижують P_{det} приблизно на 16% і 32% відповідно. Теоретична межа $P_{\text{det}} \approx 88\%$ недосяжна в реальних умовах через загасання, інтерференцію та часові похибки; розрив можна скорочувати мультисенсорною інтеграцією (пасивний радар, акустика, EO/IR), кращою синхронізацією та ML-класифікацією.

Рекомендовано для пілотного впровадження коридори з високим ризиком, інтервал $d_{\text{RSU}} \leq 2,5\text{--}3,0$ км, кооперативне вікно $W_{\text{coop}} = 3$, робочий поріг $\gamma_{\text{coop}} \approx -3$ дБ, РКИ-автентифікацію кооперативних повідомлень і моніторинг GPS-стабільності. Наступні кроки: SDR-прототип, полігонні випробування, оцінка впливу на C-ITS у реальній мережі та інтеграція з системами C2.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang, J. A., Liu, F., Masouros, C., Heath, R. W. Jr., Feng, Z., Zheng, L., & Petropulu, A. (2021). An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 15(6), 1295–1315. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3113120>
2. Geng, Z., Xu, R., & Deng, H. (2020). LTE-based multistatic passive radar system for UAV detection. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 14(12), 1775–1783. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0452>
3. Guerna, A., & Bitam, B. (2022). Roadside unit deployment in Internet of Vehicles systems: A survey. *Sensors*, 22(9), 3542. <https://doi.org/10.3390/s22093542>
4. European Commission – Directorate-General for Mobility and Transport. (2024). *Road deployment on the Trans-European Transport Network (TEN-T): ITS services*. European Commission.
5. U.S. Department of Transportation. (2024, April). *Connected Vehicle Pilot Deployment Program – 2024 update: Executive briefing*.
6. Degrande, T., Van den Eynde, S., Vannieuwenborg, F., Colle, D., & Verbrugge, S. (2021). C-ITS road-side unit deployment on highways with ITS road-side systems: A techno-economic approach. *IET Intelligent Transport Systems*, 15(7), 863–874. <https://doi.org/10.1049/itr2.12065>
7. Festag, A. (2014). Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G. *E & I Elektrotechnik und Informationstechnik*, 131(7), 409–416. <https://doi.org/10.1007/s00502-014-0219-8>
8. Molina-Masegosa, R., & Gozávez, J. (2017). LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications: A new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(4), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MVT.2017.2752798>
9. Bazzi, A., Cecchini, G., Zanella, A., & Masini, B. M. (2018). Study of the impact of PHY and MAC parameters in 3GPP C-V2V mode 4. *IEEE Access*, 6, 71685–71698. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883401>
10. Hall, D. L., & Llinas, J. (1997). An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 6–23. <https://doi.org/10.1109/5.554205>



11. Wymeersch, H., Seco-Granados, G., Destino, G., Dardari, D., & Tufvesson, F. (2017). 5G mmWave positioning for vehicular networks. *IEEE Wireless Communications*, 24(6), 80–86. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700033>
12. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>
13. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2019). Communications and control for wireless drone-based antenna array. *IEEE Transactions on Communications*, 67(1), 820–834. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2870870>
14. Tsang, B., Narayanan, R. M., & Bharadwaj, R. (2023). Classification and discrimination of birds and small drones using micro-Doppler spectrogram signatures. *Signals*, 4(2), 337–358. <https://doi.org/10.3390/signals4020018>
15. Mykhaylova, O., Stefankiv, A., Nakonechny, T., Fedynyshyn, T., & Sokolov, V. (2024). Resistance to replay attacks of remote control protocols using the 433 MHz radio channel. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3654, pp. 98–108). CEUR-WS.
16. Seidaliyeva, U., Ilipbayeva, L., Taissariyeva, K., Smailov, N., & Matson, E. T. (2023). Advances and challenges in drone detection and classification techniques: A state-of-the-art review. *Sensors*, 24(1), 125. <https://doi.org/10.3390/s24010125>
17. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). (2018, June). *Technical specification 36.885 v15.3.0 – Study on LTE-based V2X services*. <https://www.3gpp.org/DynaReport/36885.htm>
18. U.S. Federal Communications Commission (FCC). (2020, November). *First report and order and further notice of proposed rulemaking: Use of the 5.850–5.925 GHz band (FCC 20-164)*. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-164A1.pdf>
19. 5G Automotive Association (5GAA). (2024). *C-V2X evolution toward 5G-Advanced and 6G: Joint communication and sensing perspectives* [White paper]. <https://5gaa.org/news/c-v2x-evolution-toward-5g-advanced-and-6g/>
20. Naik, G., Choudhury, B., & Park, J. M. (2019). IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications. *IEEE Access*, 7, 70169–70184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919489>

**Partyka Olha**

Ph.D., Associate Professor, Department of Information Security
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-3086-3160
Olha.o.mykhailova@lpnu.ua

Ambroziak Khrystyna

student, Department of Information Security
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0009-0007-3152-5562
khrystyna.ambroziak.mkbui.2024@lpnu.ua

COOPERATIVE UAV DETECTION USING V2X INFRASTRUCTURE IN RURAL DEFENSE CORRIDORS: STRENGTHENING CONNECTIVITY FOR DUAL-USE APPLICATIONS ADVERSARIAL TACTICS FOR DETECTION EVASION

Abstract. Rural transport corridors have sparse radar coverage and constrained backhaul, which increases the risk of small-UAV incursions. A dual-use approach is proposed in which V2X roadside units (RSUs) perform cooperative RF sensing without degrading ITS functions. The architecture combines a communications subsystem for transport services with a sensing subsystem that provides multiband monitoring, sub-threshold correlation, and adaptive thresholds. The processing pipeline has three stages: local observation, inter-station correlation of weak detections, and distributed triangulation for direction and position estimation. Control messages are exchanged over the service channel with GPS time synchronization. The models account for airborne path-loss and cooperative SINR gain under interference. Validation with Monte Carlo simulations for a long corridor of evenly spaced RSUs shows higher detection probability and better azimuth accuracy than isolated nodes. Parametric studies over RSU spacing, cooperation-window size, and detection thresholds confirm consistent cooperative gain and identify boundary regimes. The system is resilient to single-node failures due to coverage overlap, but is limited for non-emitting UAVs, under heavy interference, and at corridor edges. Practical value lies in creating a cost-efficient early-warning network in sparsely populated regions and integrating with C2 systems to raise situational awareness. Planned work includes field trials, multisensor integration, and AI-based trajectory prediction.

Keywords: Vehicle-to-Everything (V2X); roadside units (RSU); cooperative sensing; small-UAV detection; rural corridors; early warning; dual-use; RF monitoring; Intelligent Transportation Systems (ITS).

REFERENCES

1. Zhang, J. A., Liu, F., Masouros, C., Heath, R. W. Jr., Feng, Z., Zheng, L., & Petropulu, A. (2021). An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 15(6), 1295–1315. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3113120>
2. Geng, Z., Xu, R., & Deng, H. (2020). LTE-based multistatic passive radar system for UAV detection. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 14(12), 1775–1783. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0452>
3. Guerna, A., & Bitam, B. (2022). Roadside unit deployment in Internet of Vehicles systems: A survey. *Sensors*, 22(9), 3542. <https://doi.org/10.3390/s22093542>
4. European Commission – Directorate-General for Mobility and Transport. (2024). *Road deployment on the Trans-European Transport Network (TEN-T): ITS services*. European Commission.
5. U.S. Department of Transportation. (2024, April). *Connected Vehicle Pilot Deployment Program – 2024 update: Executive briefing*.
6. Degrande, T., Van den Eynde, S., Vannieuwenborg, F., Colle, D., & Verbrugge, S. (2021). C-ITS road-side unit deployment on highways with ITS road-side systems: A techno-economic approach. *IET Intelligent Transport Systems*, 15(7), 863–874. <https://doi.org/10.1049/itr2.12065>
7. Festag, A. (2014). Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G. *E & I Elektrotechnik und Informationstechnik*, 131(7), 409–416. <https://doi.org/10.1007/s00502-014-0219-8>



8. Molina-Masegosa, R., & Gozávez, J. (2017). LTE-V for sidelink 5G V2X vehicular communications: A new 5G technology for short-range vehicle-to-everything communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12(4), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MVT.2017.2752798>
9. Bazzi, A., Cecchini, G., Zanella, A., & Masini, B. M. (2018). Study of the impact of PHY and MAC parameters in 3GPP C-V2V mode 4. *IEEE Access*, 6, 71685–71698. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883401>
10. Hall, D. L., & Llinas, J. (1997). An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 6–23. <https://doi.org/10.1109/5.554205>
11. Wymeersch, H., Seco-Granados, G., Destino, G., Dardari, D., & Tufvesson, F. (2017). 5G mmWave positioning for vehicular networks. *IEEE Wireless Communications*, 24(6), 80–86. <https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700033>
12. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>
13. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2019). Communications and control for wireless drone-based antenna array. *IEEE Transactions on Communications*, 67(1), 820–834. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2870870>
14. Tsang, B., Narayanan, R. M., & Bharadwaj, R. (2023). Classification and discrimination of birds and small drones using micro-Doppler spectrogram signatures. *Signals*, 4(2), 337–358. <https://doi.org/10.3390/signals4020018>
15. Mykhaylova, O., Stefankiv, A., Nakonechny, T., Fedynyshyn, T., & Sokolov, V. (2024). Resistance to replay attacks of remote control protocols using the 433 MHz radio channel. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (Vol. 3654, pp. 98–108). CEUR-WS.
16. Seidaliyeva, U., Ilipbayeva, L., Taissariyeva, K., Smailov, N., & Matson, E. T. (2023). Advances and challenges in drone detection and classification techniques: A state-of-the-art review. *Sensors*, 24(1), 125. <https://doi.org/10.3390/s24010125>
17. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). (2018, June). *Technical specification 36.885 v15.3.0 – Study on LTE-based V2X services*. <https://www.3gpp.org/DynaReport/36885.htm>
18. U.S. Federal Communications Commission (FCC). (2020, November). *First report and order and further notice of proposed rulemaking: Use of the 5.850–5.925 GHz band (FCC 20-164)*. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-164A1.pdf>
19. 5G Automotive Association (5GAA). (2024). *C-V2X evolution toward 5G-Advanced and 6G: Joint communication and sensing perspectives* [White paper]. <https://5gaa.org/news/c-v2x-evolution-toward-5g-advanced-and-6g/>
20. Naik, G., Choudhury, B., & Park, J. M. (2019). IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications. *IEEE Access*, 7, 70169–70184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919489>

