

Д. О. Босий¹
О. І. Саблін¹
І. Ю. Потапчук¹

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ГЕОПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ ПОРТРЕТІВ ПОВІТРЯНИХ ЗАГРОЗ

¹Український державний університет науки і технологій, Дніпро

Розглянуто підхід до підвищення безпеки об'єктів, що не зупиняють технологічні процеси після оголошення повітряної тривоги, зокрема критичної інфраструктури транспорту, на основі об'єктової ідентифікації повітряних небезпек. Розглянуті наявні методи виявлення і розпізнавання повітряних цілей, таких як ударні дрони та крилаті ракети. Визначено, що для завчасного виявлення повітряної небезпеки на локальному рівні ефективним з погляду вартості, простоти та дальності дії є метод акустичної ідентифікації. Для його реалізації розглянута структура системи ідентифікації, побудована на основі використання сучасної елементної бази, що включає в себе високочутливі акустичні датчики, здатні до розрізнення звуків на відстані до 1 км та систему оброблення та радіопередавання інформації на відстань до 10 км.

Для виявлення різних типів повітряних небезпек за їхнім акустичним випромінюванням і відокремлення його від сторонній шумів в статті на основі спектрального аналізу визначені унікальні акустичні портрети ударних дронів та крилатих ракет. Для цього проведено статистичне дослідження великого обсягу даних акустичних шумів дронів і крилатих ракет, отриманих з відкритих джерел інформації. В підсумку отримані акустичні портрети різних типів повітряних небезпек у вигляді спектральної щільності акустичного сигналу відображають суттєві відмінні ознаки амплітудно-частотних характеристик акустичного випромінювання залежно від типу повітряної загрози.

З метою впровадження запропонованого методу розроблено спеціальний пристрій вимірювання акустичного сигналу та інших цифрових параметрів з безпроводною передачею даних на основі технологій ZigBee та LoRaWan. Пристрій може налаштовуватись на розрізнення звуків і шумів малої інтенсивності в необхідних частотних діапазонах, притаманних акустичним портретам, після виділення яких він переходить з «режиму сну» в активний, чим забезпечується його енергоекономічність.

Ключові слова: критична інфраструктура, повітряні небезпеки, ідентифікація, акустичний сигнал, акустичний портрет, безпроводна передача даних.

Вступ

Збільшення інтенсивності ворожих атак на об'єкти критичної інфраструктури, зокрема транспортної (залізничні станції, вузли, тягові підстанції, депо, мости тощо), де здебільшого, після оголошення повітряної тривоги не припиняється робота і технологічні процеси, значно підвищує потенційні ризики для персоналу, що потребує вдосконалення системи безпеки таких об'єктів.

Для завчасного попередження робітників про небезпеку використовується національна система оповіщення про повітряну тривогу по окремих областях країни, проте для об'єктів, що не припиняють свою роботу, важливим є визначення небезпек на локальнішому (об'єктовому) рівні, що може бути реалізовано на основі новітніх технічних засобів за різноманітних ознак. В підсумку, завчасне попередження дозволить працівникам, не зупиняючи технологічні процеси, встигати вжити необхідних безпекових заходів, до прикладу, покинути вразливі ділянки і прослідувати в укриття або на безпечніші майданчики.

Насамперед підвищення безпеки полягає в ранньому виявленні та розпізнаванні повітряних небезпек (ПН), що наближаються, таких як ударні безпілотні літальні апарати (БПЛА) або крилаті ракети (КР), з метою використання цієї інформації для прийняття відповідних рішень і захисту.

Виявлення наближення потенційної повітряної загрози базується на основі різних фізичних принципів, зокрема оптичного, радіолокаційного та акустичного [1]—[3]. Система ідентифікації повинна забезпечувати не лише фіксацію факту потрапляння повітряної небезпеки в контрольований простір (виявлення), а й розпізнавання типу, визначення параметрів руху (напрямок, висота, швидкість), та селекцію в умовах різного роду завад, також можливість інтеграції цієї інформації в систему безпеки вищого рівня.

Ефективне вирішення даних завдань на сучасному технологічному рівні потребує первинних знань та баз даних про унікальні портрети БПЛА різної фізичної природи та їхні можливі зміни, що дозволяє підвищувати якість ідентифікації і обмін інформацією на основі використання методів штучного інтелекту.

Огляд методів ідентифікації повітряних небезпек

У табл. 1 подано порівняння основних можливостей засобів виявлення повітряних цілей [1]. Варто зауважити, що універсальних засобів виявлення БПЛА за надійністю, всепогодною дією і точністю визначення координат не існує, також важливим фактором системи ідентифікації є її вартість, простота і можливість швидкого розгортання.

Таблиця 1

Порівняні характеристики засобів виявлення повітряних небезпек

Характеристики	Засоби виявлення повітряних небезпек		
	оптичні	радіолокаційні	акустичні
Виявлення	обмежено	обмежено	обмежено
Розпізнавання	без обмежень	обмежено	обмежено
Селекція	без обмежень	обмежено	обмежено
Вимірювання дальності	обмежено	без обмежень	обмежено
Вимірювання кута місця	без обмежень	без обмежень	обмежено
Вимірювання швидкості	обмежено	обмежено	обмежено
Залежність від погодних умов	сильна	слабка	середня
Залежність від зовнішньої освітленості	сильна	не залежить	не залежить
Вартість	середня	висока	низька

Оптичні засоби (ОЗ) є досить надійними для виявлення малорозмірних, малошвидкісних і таких що мають малі значення теплової та радіолокаційної сигнатур БПЛА [3].

Важливим показником ефективності ОЗ є межа виявлення БПЛА різної розмірності для об'єктиву оптико-електронної системи (ОЕС) із заданим кутом поля зору та фокусною відстанню f за метеорологічної дальності видимості 100 км і коефіцієнті розсіювання у видимій області спектра 0,0392 [2]. Зменшення межі виявлення у конкретних умовах відносно до границі в ідеальних умовах приблизно оцінюють за зміною сили випромінювання на одиницю тілесного кута для приймача випромінювання (об'єктиву ОЕС). Якість оптичної ідентифікації суттєво залежить від зміни спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери за довжинами хвиль, також залежить від метеорологічної дальності видимості і визначається погодними умовами (вологістю і температурою повітря, атмосферним тиском, швидкістю вітру, наявністю опадів тощо).

Так, наприклад, серпанок і вологість призводять до істотного зниження прозорості атмосфери в областях спектра, в яких працюють приймачі випромінювання ОЕС, що спричиняє проблеми у застосуванні методу. Особливо суттєвим є зниження помітності ПН в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні довжин хвиль випромінювання 0,5...0,76 мкм, оскільки, за винятком польоту БПЛА з повітряно-реактивним двигуном і БПЛА з ракетним двигуном на твердому паливі, основним джерелом теплового випромінювання є елементи корпусу БПЛА [4]. Ці ділянки конструкції БПЛА відрізняються невисокими значеннями теплових потоків (25...50 Вт/м²), отже низька сила випромінювання з урахуванням зниження прозорості атмосфери не дозволяє використовувати ІЧ-техніку для підвищення ймовірності виявлення БПЛА, особливо тих, що мають електричний двигун, у яких мінімальний рівень ІЧ-помітності.

Радіолокаційний контроль повітряного простору є досить ефективним у тому випадку, коли помітність (відбивна здатність) БПЛА в діапазоні радіохвиль відповідає розпізнавальній здатності радіолокаційної станції (РЛС). Відбивні властивості БПЛА в РЛС оцінюються за ефективною площею розсіювання (ЕПР) повітряного об'єкта [5].

Незважаючи на те, що РЛС є достатньо надійним засобом контролю повітряного простору, завдання виявлення та ідентифікації малорозмірного малозшвидкісного ударного БПЛА з малою ЕПР є проблемним [8]. БПЛА з масою менше 5,0 кг суттєво звужують межі їхнього виявлення, а за високої частки радіопрозорих матеріалів в конструкції майже унеможливує їхнє виявлення за допомогою РЛС [9]. Також варто зазначити, що РЛС є активними засобами сканування повітряного простору, а через їхнє випромінювання під час роботи стають вразливими до протирадарних БПЛА.

Важливою інформативною ознакою БПЛА під час польоту є акустичне випромінювання (АВ), яке дозволяє виявляти БПЛА в умовах коли оптичні та радіолокаційні засоби не забезпечують необхідної точності. Акустичні (звукові) хвилі, що генеруються БПЛА, поширюються у просторі і можуть фіксуватися акустичними приймачами сигналу (мікрофонами), які перетворюють акустичний тиск на електричний сигнал. Межі акустичного виявлення визначаються чутливістю мікрофонів.

Джерелами звукових хвиль БПЛА зазвичай є рухомі установки і лопаті повітряних гвинтів, де частота генерованого звуку кратна частоті обертання колінчастого вала поршневого двигуна, кількості та частоті обертання лопатей повітряного гвинта, а інтенсивність звуку залежить від швидкості обтікання лопатей повітрям [10].

У реальному середовищі АВ згасає внаслідок в'язкості повітря та молекулярного тертя. Загасання звукових хвиль також відбувається при їхньому поширенні вздовж поглинаючої поверхні та визначається її коефіцієнтом поглинання. Однак істотнішу роль у згасанні звукових хвиль відіграє турбулентність повітря. Неабияку вагу в цьому відіграє вітер і висхідні потоки повітря. На низьких частотах додаткове загасання залежить від відстані до джерела звуку, а на далеких (понад 4 км) відстанях високі частоти практично не чутні.

Застосування акустичних систем виявлення забезпечує визначення пеленгу літального апарату та його класу (типу). Акустичні системи, мають такі переваги [11]:

- забезпечують стійке автоматичне виявлення малозшвидкісних маловисотних повітряних цілей в будь-яких погодних умовах та в умовах складних рельєфів місцевості;
- скритність роботи та збереження працездатності в умовах радіоелектронної протидії;
- малі габарити, низьке енергоспоживання та кращі показники «ефективність–вартість».

Завдання акустичної ідентифікації БПЛА і КР полягає у розробці моделі, яка дозволить адекватно описувати спектральні і кореляційні властивості акустичного сигналу на значних часових інтервалах, та забезпечить підвищення спектрального розрізнення в області низькочастотних складових спектра досліджуваного сигналу, а, отже, підвищення ефективності розв'язання задачі ідентифікації БПЛА за АВ на основі їхніх відомих акустичних портретів, для подальшого навчання нейро-фазі мереж з метою підвищення точності визначення в умовах дії завад та у разі зміни в конструкції БПЛА, що призводить до модифікації його акустичного портрету [12].

Аналіз акустичних портретів повітряних небезпек

Визначення акустичних портретів повітряних небезпек за генерованим звуком під час польоту виконувалося на основі дослідження статистики акустичних шумів різних типів ворожих БПЛА та КР, отриманої з відкритих джерел інформації у вигляді даних відео і аудіо фіксації їхнього польоту. Один з прикладів реалізації АВ БПЛА та КР показано на рис. 1.

На основі спектрального аналізу множини реалізацій акустичних шумів різних типів повітряних небезпек та їхньої фільтрації від сторонніх звуків отримано стійкі акустичні портрети БПЛА та КР, які притаманні конкретним типам ПН, тому можуть бути використані для розпізнавання БПЛА і КР акустичним методом.

Для дослідження звукових файлів використовувалась програма Simulink пакету MatLAB. У Simulink використовується концепція візуального програмування, де модель пристрою збирається за допомогою стандартних блоків з бібліотеки та проводяться відповідні розрахунки. Для аналізу звуків двох видів загроз, за допомогою елементів бібліотек Audio Toolbox та DSP System Toolbox створено відповідний алгоритм.

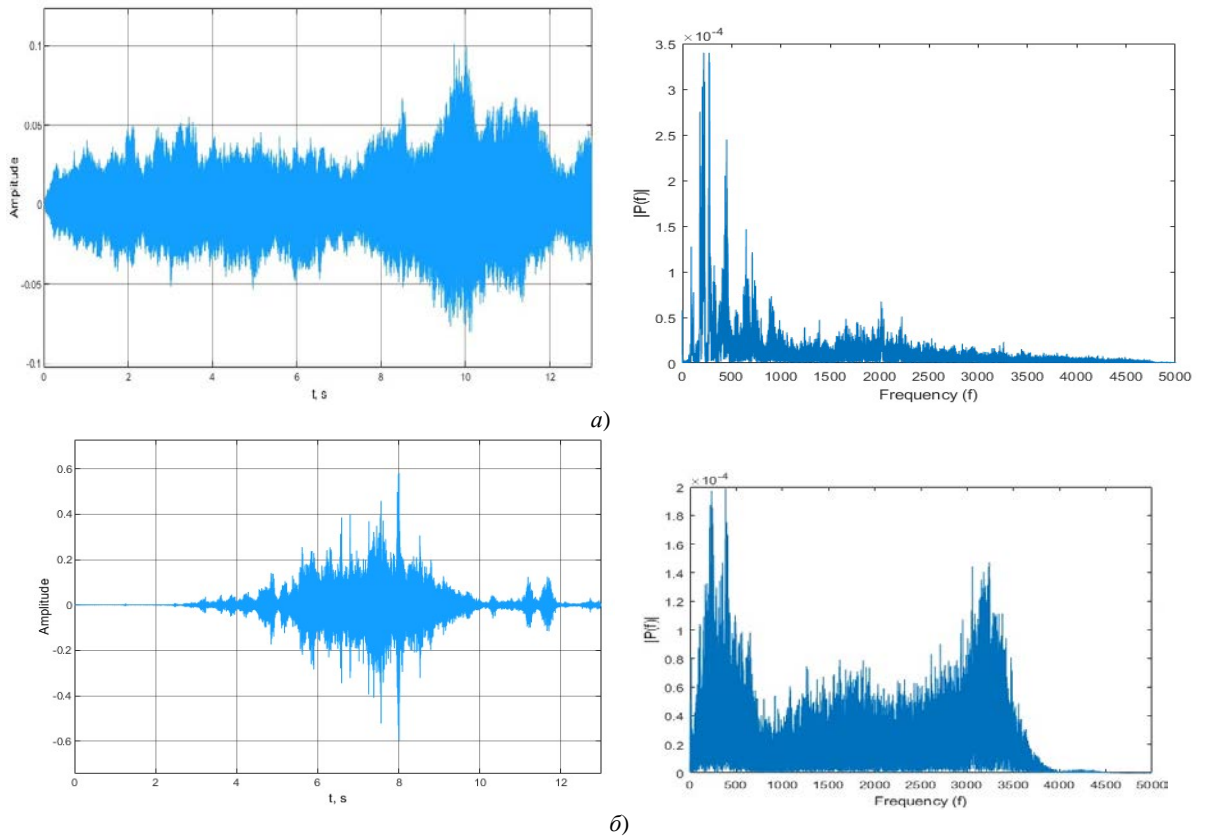


Рис. 1. Акустичний сигнал та його спектр від: *a* — ударного дрону ; *б* — крилатої ракети

В результаті обробки статистичних даних отримано акустичні потрати повільних і швидкісних повітряних цілей, що низько летять, а також характер зміни в часі спектра акустичних сигналів та відповідно частотних діапазонів акустичного випромінювання залежно від типу повітряної загрози.

Приклади акустичних портретів двох різних типів повітряних небезпек для моменту максимальної інтенсивності звуку показані у вигляді спектрограм на рис. 2, з яких видно відмінність у характері спектральної густини акустичних сигналів.

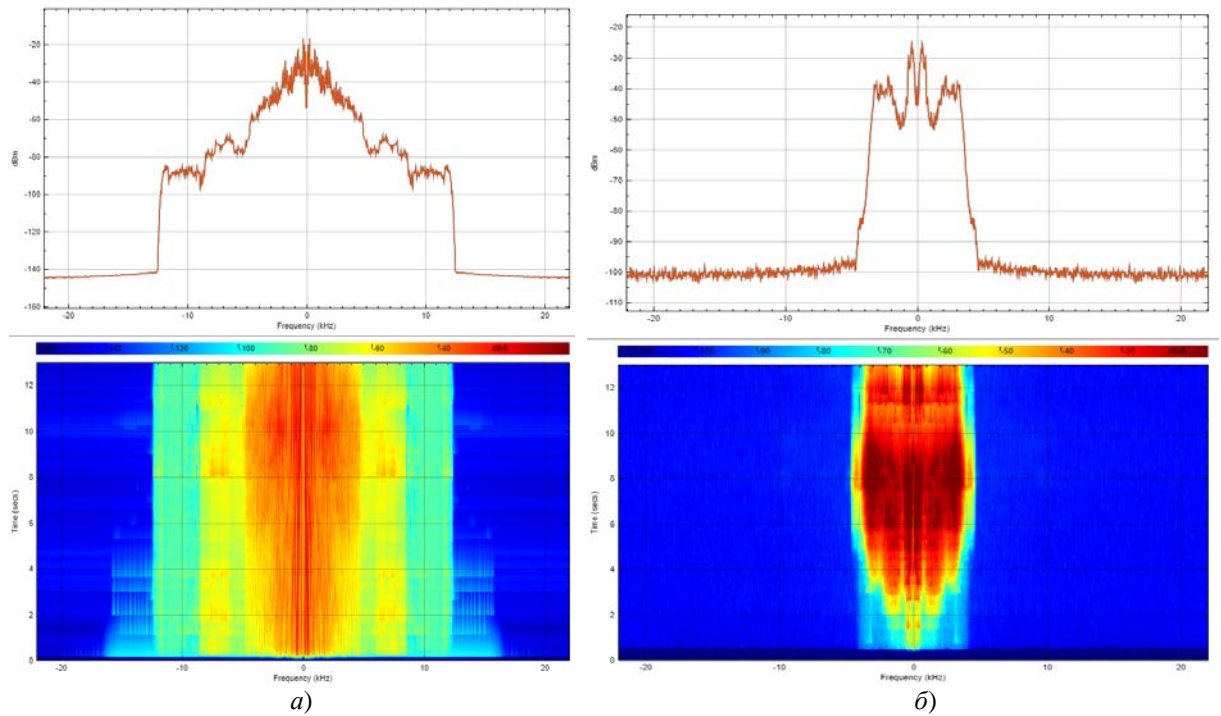


Рис. 2. Акустичні портрети: *a* — неактивного ударного БПЛА; *б* — крилатої ракети

Концепція підвищення безпеки локальних об'єктів на основі системи акустичної ідентифікації БПЛА

Для завчасного виявлення БПЛА необхідна система розподілених високочутливих акустичних приймачів, які на достатній дальності здатні з високим ступенем точності зафіксувати факт наближення БПЛА за його акустичним портретом, визначити його тип, напрям, швидкість і передати інформацію за призначенням. Система повинна бути простою, дешевою, надійною, мати незалежне енергоживлення та можливість інтегруватися до системи оповіщення вищого рівня.

Таким чином, задача мінімізації потенційного ризику R для об'єкта на основі завчасного оповіщення про небезпеку на локальному рівні може бути формалізована у вигляді знаходження оптимальних значень множини $\{X_i\}$ в допустимій області

$$R = F\langle X_1, X_2, \dots, X_i, \rangle \rightarrow \min,$$

де i — множина факторів X , що визначають технічний і організаційний ступень захищеності об'єкта.

До факторів із множини $\{X_i\}$ можуть бути віднесені: фізична ознака для ідентифікації небезпеки; технічні характеристики системи ідентифікації; ступінь захищеності інформації та система обміну даними; чутливість та селективність до вимірюваної ознаки; багатоваріантність топології системи (розташування датчиків, їхня кількість, взаємозв'язки) в залежності від площі і територіальної розподіленості об'єкта; час оповіщення і відстань до укриття; сукупність умов, що обмежують область допустимих варіантів рішень з мінімізації ризиків тощо.

Кількість датчиків облаштованих радіопередавачем даних і оптимальна схема їхнього розташування на плані об'єкта залежать від розміру і конфігурації його площі, де визначальним є радіус r чутливості приймачів звуку, що визначає площу акустичного покриття в заданому частотному діапазоні. Кількість точок вимірювання звуку визначається відповідно максимальними радіусом r акустичної чутливості мікрофонів і дальністю радіопередачі даних L .

Наприклад, якщо для об'єкта 1 з площею S_1 достатньо одного мікрофону (S_1 повністю покривається радіусом чутливості), то для об'єкта 2 з $S_2 > S_1$ мікрофонів може бути потрібно декілька. Оскільки для сучасних високочутливих мікрофонів і технологій радіопередачі даних зазвичай $L \gg r$, тоді кількість n просторово розосереджених вимірювачів шуму з бездротовою передачею даних по контуру площі об'єкта є залежністю $n = (r, S)$. Сьогодні сучасні високочутливі мікрофони здатні розрізняти звуки з дальністю відстані до 1 км [2].

На рис. 3 показано систему розподіленого вимірювання напруги вздовж контактної мережі, інтегровану в систему тягового електропостачання залізниць [13], де пристрої вимірювання напруги з радіопередаванням даних суміщені з пристроями вимірювання шуму, що дозволяє виконувати просторовий розподіл системи акустичної ідентифікації уздовж контактної мережі залізниці.

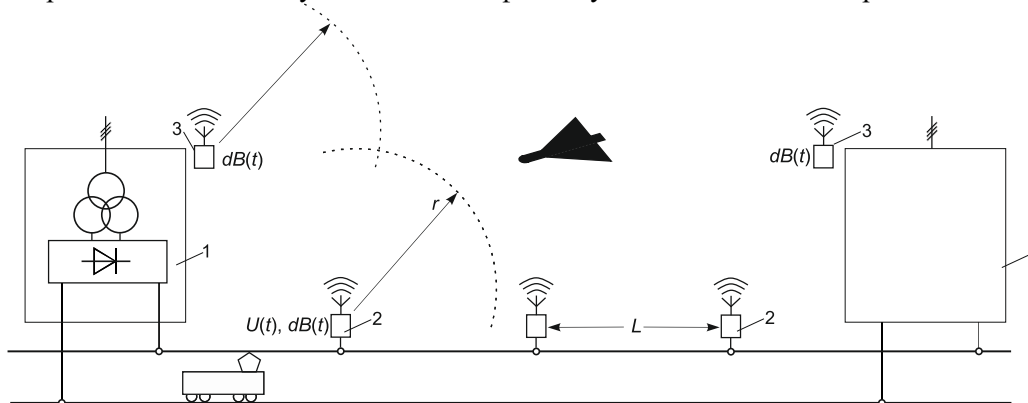


Рис. 3. Схема ідентифікації передачі даних з мікрофонів по радіоканалу: 1 — об'єкт, що захищається (тягова підстанція); 2 — пристрій вимірювання напруги $U(t)$ в мережі доповнений вимірювачем шуму $dB(t)$ з радіоканалом зв'язку; 3 — пристрій вимірювання шуму на захисному об'єкті; r, L — відповідно дальність акустичної чутливості мікрофонів та максимальна відстань радіопередачі

Робота системи акустичної ідентифікації у цьому випадку полягає в такому. На вхід через блок декодування подається масив значень акустичного сигналу, отриманий шляхом накопичення даних, які передаються мережею, що побудована за комірковою топологією пристроями вимірюван-

ня шуму з бездротовою передачею даних, розподілених уздовж захищеної зони та підключених додатково до інших інфраструктурних об'єктів для реалізації системи технічного діагностування. Системою виконується аналіз отриманого масиву даних шляхом пошуку розрахункової координати БПЛА відносно об'єкта захисту, для спрацювання оповіщення.

Для впровадження запропонованого методу розроблено спеціальний пристрій вимірювання акустичного сигналу та інших цифрових параметрів з бездротовою передачею даних (рис. 4). Розроблений пристрій призначений підвищувати безпеку праці обслуговуючого персоналу та підвищувати точність ідентифікації загроз в акустичному сигналі.

Принцип роботи пристрою полягає в тому, що для вимірювання шуму застосовується цифровий мікрофон, до виходу якого підключений пристрій узгодження та мікроконтролер загального призначення з вбудованим багатоканальним аналогово-цифровим перетворювачем.

Пристрій може налаштовуватись на розрізнення звуків і шумів малої інтенсивності в необхідних частотних діапазонах, притаманних акустичним портретам БПЛА, після виділення яких він переходить з «режиму сну» в активний, чим забезпечується його енергоекономічність. Як технологію безпроводної передачі даних використовується ZigBee та LoraWan [14], [15].

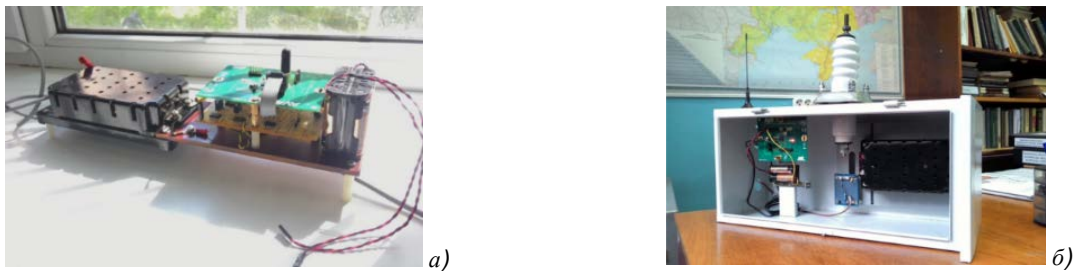


Рис. 4. Зовнішній вигляд розробленого пристрою для радіопередавання даних
а — у приміщеннях; б — на відкритому просторі

ZigBee — це стандарт, який задовольняє потребу у дуже недорогих пристроях з низьким енергоспоживанням та низькими швидкостями передачі даних для бездротового зв'язку на короткі відстані. IEEE 802.15.4 підтримує зіркоподібні та рівноправні топології. Специфікація ZigBee підтримує зіркоподібну та два види рівноправних топологій: mesh (сіткову) та cluster tree (клас-терне дерево).

До появи ZigBee основною технологією бездротового зв'язку був Bluetooth. Проте Bluetooth мав певні технічні обмеження, які робили його менш придатним для промислового дистанційного управління та домашньої автоматизації. Розуміючи необхідність у новітній технології бездротового зв'язку для цих застосувань, у 2003 році офіційно представлено у Сполучених Штатах протокол ZigBee.

Розроблена для додатків з низькою швидкістю передачі даних, низькою вартістю та тривалим терміном служби батарей, ця бездротова технологія працює в діапазонах частот 868 МГц, 915 МГц і 2,4 ГГц, забезпечуючи максимальну швидкість передачі даних до 250 Кбіт/с. Вона включає в себе енергоощадні техніки, які дозволяють бездротовим пристроям у застосуваннях ZigBee більшу частину часу перебувати в режимах енергозбереження. Це значно знижує потребу в частій заміні батарей, що дозволяє пристроям працювати надійно протягом багатьох років. Основні технічні характеристики пристроїв безпроводної передачі даних ZigBee подані в табл. 2 [14].

Таблиця 2

Технічні параметри пристроїв безпроводної передачі даних ZigBee

Фізичний рівень	Частотний діапазон	Нумерація каналів	Параметри розповсюдження		Параметри даних		
			Швидкість передачі	Модуляція	Швидкість передачі, kb/s	Швидкість передачі символів kbaud	Модуляція
868/915 МГц	868...870 МГц	0	300 kchip/s	8PSK	20	20	BPSK
	902...928 МГц	1...10	600 kchip/s	8PSK	40	40	BPSK
2,4 ГГц	2,4...2,4835 ГГц	11...26	2,0 Mchip/s	O-QPSK	250	62,5	16-ary Orthogonal

У мережі ZigBee роль і тип кожного пристрою має велике значення і прямі наслідки на його функціональність. Оптимізована топологія ZigBee дозволяє ефективно розміщувати мережу, встановлювати шляхи передачі даних та підвищує стійкість до помилок та надійність. Наразі технологія ZigBee використовує три основні структури мережі: зіркова мережа, мережа «меш» та кластерна мережа.

– Зіркова мережа — структура підходить для пристроїв, які потребують неперервної роботи протягом тривалого періоду. Це найпоширеніша топологія мережі в розгортаннях ZigBee.

– Мережа «меш» ґрунтується на кількох взаємопов'язаних бездротових мережах, що надає додаткові канали зв'язку для передачі даних. У випадку непередбачуваної відмови каналу комунікації можна безперешкодно перенаправити через альтернативні канали. Ця структура мережі пропонує високу надійність.

– Кластерна мережа поєднує переваги та характеристики як зіркових, так і мереж «меш», використовуючи їхні сильні сторони для оптимізації роботи мережі.

Основні відмінності між ZigBee та Bluetooth:

1. Розмір стеку — ZigBee має невеликий розмір (28 Кб), порівняно зі стеком Bluetooth (250 Кб). Це пов'язано з меншою вартістю та меншим споживанням енергії.

2. Ультранизьке споживання енергії— ключовий аспект системного проектування технології ZigBee, щоб забезпечити довгий термін служби пристроїв з неакумуляторними батареями, порівняно з акумуляторними батареями для Bluetooth. Наприклад, перехід з режиму сну до передачі даних в ZigBee набагато швидший, ніж для Bluetooth.

3. Мережеві можливості — ZigBee включають до 255 пристроїв на мережу, порівняно з 8 для мереж Bluetooth.

Швидкість передачі даних для технології ZigBee становить 250 кбіт/с (максимальна швидкість інформаційного потоку 128 кбіт/с), порівняно з 720 кбіт/с для бездротової технології Bluetooth.

Дальність дії для продуктів ZigBee очікується близько 30 метрів в типовому будинку, порівняно з близько 10 метрами для продуктів Bluetooth (без підсилювача потужності).

Підсумовуючи, ZigBee виділяється як потужна і стабільна бездротова технологія, яка користується великим попитом у різних галузях промисловості. Пристрої ZigBee можуть швидко приєднатися, обмінюватися інформацією, від'єднуватися і потім переходити у глибокий сон, щоб забезпечити дуже довгий термін служби батареї. Для цієї операції пристрої Bluetooth потребують близько у 100 разів більше енергії.

Іншим варіантом, з більшою дальністю радіопередачі даних є технологія LoRa — це бездротова модуляційна техніка, що походить від технології розподілу частоти за допомогою чирп-імпульсів (CSS) [15]. Вона кодує інформацію на радіохвилях за допомогою чирп-імпульсів подібно тому, як це роблять дельфіни та кажани. Модульована передача LoRa стійка до перешкод і може бути прийнята на великі відстані.

LoRa ідеально підходить для застосувань, які передають невеликі порції даних з низькими швидкостями передачі бітів. Дані можуть бути передані на більші відстані порівняно з технологіями, такими як WiFi, Bluetooth або ZigBee. Ці характеристики роблять LoRa добре пристосованим для сенсорів та приводів, які працюють у режимі низького споживання енергії. LoRa може працювати на ліцензійних бездротових субгігерцевих діапазонах, наприклад, 915 МГц, 868 МГц і 433 МГц. Також він може працювати на частоті 2,4 ГГц для досягнення вищих швидкостей передачі даних порівняно з субгігерцевими діапазонами, за рахунок зменшення дальності. Ці частоти належать до діапазонів ISM, які міжнародно зарезервовані для промислових, наукових та медичних цілей.

Створена компанією Semtech для стандартизації LPWANs, LoRa забезпечує далекомагістральний зв'язок: до трьох миль (п'ять кілометрів) у міських районах і до 10 миль (15 кілометрів) або більше в сільських районах (на прямій видимості). Ключовою характеристикою рішень на основі LoRa є надзвичайно низькі вимоги до енергоспоживання, що дозволяє створювати пристрої, які працюють від батареї та можуть працювати до 10 років.

Запатентований метод модуляції з розподілом спектра, отриманий з наявної технології розподілу спектра за допомогою частотних чирпів (CSS), LoRa пропонує компроміс між чутливістю та швидкістю передачі даних, працюючи в каналі з фіксованою шириною смуги 125 кГц або 500 кГц (для висхідних каналів) та 500 кГц (для низхідних каналів). В технології LoRa Chirp Spread Spectrum (CSS) від компанії Semtech розподіл сигналу за спектром досягається шляхом генерації чирпового сигналу, який постійно змінюється за частотою.

Оброблення сигналу LoRa виконується в радіочастотному каналі шляхом множення сигналу

даних на розподільчий код. Зі збільшенням частоти, збільшуються частотні компоненти загального спектра сигналу. Іншими словами, енергія загального сигналу розподіляється на ширший спектр частот, що дозволяє приймачу розрізняти сигнал з меншим (тобто гіршим) відношенням сигнал-шум (SNR).

У термінах LoRa, кількість розподільчого коду, який застосовується до початкового сигналу даних, називається коефіцієнтом розподілення (SF). У модуляції LoRa існує всього шість коефіцієнтів розподілення (SF7 до SF12). Чим більший коефіцієнт розподілення використовується, тим далі сигнал може бути відправлений та все ще бути прийнятим без помилок радіочастотним приймачем.

У табл. 3 показані чотири різних коефіцієнти розподілення [SF7 ... SF10], які можуть бути використані для висхідних повідомлень на 125 кГц каналі [15]. Показано еквівалентну швидкість передачі бітів, а також оцінено діапазон (це залежить від місцевості; більші відстані досягаються на відкритій місцевості, ніж в міській). Також показані значення часу затримки, або часу використання ефіру, для пакета з 11 байтів для кожного з чотирьох коефіцієнтів розподілення.

Таблиця 3

Коефіцієнти розподілення LoRa [15]

Коефіцієнт розподілення (SF) під час передачі повідомлень вгору на частоті 125 кГц	Швидкість передачі, bps	Діапазон передачі (залежить від місцевості), км	Час використання ефіру для пакета з 11 байтів, мс
SF10	980	8	371
SF9	1760	6	185
SF8	3125	4	103
SF7	5470	2	61

Коефіцієнти розподілення модуляції LoRa інтегровані ортогонально. Це означає, що сигнали, модульовані різними коефіцієнтами розподілення і передані на тому самому частотному каналі у той самий час, не взаємодіють між собою. Замість цього, сигнали з різними коефіцієнтами розподілення просто виглядають один для одного як шум.

LoRaWAN підходить для передачі невеликих пакетів даних (наприклад, даних з сенсорів) на великі відстані. Модуляція LoRa надає значно більший діапазон зв'язку з низькими пропусковими здатностями порівняно з іншими конкуруючими технологіями бездротової передачі даних. На рис. 5 показано деякі технології доступу, які можна використовувати для бездротової передачі даних та їхні очікувані діапазони передачі порівняно з пропусковою здатністю.

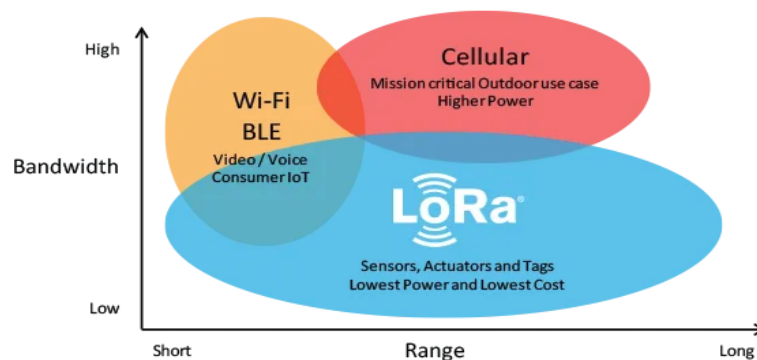


Рис. 5. Технології бездротової передачі даних

Загалом технологія LoRa має такі особливості:

- низьке споживання енергії: пристрої можуть працювати до 10 років від однієї батареї;
- довгий діапазон: до 10 км у сільській місцевості та до 3 км у міській;
- глибока проникність у приміщення: легко охоплює будівлі з кількома поверхами;
- спектр без ліцензії: не потрібно платити за використання частотного спектра;
- геолокація: визначає місцезнаходження без GPS за допомогою трилатерації;
- висока потужність: обробка мільйонів повідомлень;

- публічні та приватні розгортання: можливість використання одного обладнання та програмного забезпечення;
- безпека шифрування завдяки використанню AES-128 для захищеного зв'язку;
- оновлення прошивки повітрям, тобто можливість віддаленого оновлення;
- роумінг: плавні переходи між мережами;
- низькі витрати: мінімальна інфраструктура та відкрите програмне забезпечення;
- сертифікація: надійність пристроїв підтверджується програмою сертифікації LoRa;
- екосистема: велика кількість виробників та постачальників.

Подальше використання інструментів нейронних мереж та програмування мікроконтролерів за результатами їхнього навчання на базі сучасних бездротових технологій передачі даних дозволить побудувати автономну та децентралізовану систему ідентифікації повітряних загроз.

Висновки

1. Підвищення рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури, їхній захист від ушкоджень у процесі експлуатації, а також від потенційних повітряних загроз на тепер є пріоритетним питанням, що потребує постійного вдосконалення системи безпеки з урахуванням можливостей новітніх технічних засобів.

2. На основі спектрального аналізу у статті визначено унікальні акустичні портрети ударних дронів та крилатих ракет для виявлення різних типів повітряних небезпек за їхнім акустичним випромінюванням і відокремлення їх від сторонніх шумів. Проведене статистичне дослідження великого обсягу даних акустичних шумів дронів і крилатих ракет з відкритих джерел дозволило отримати акустичні портрети у вигляді спектральної щільності акустичного сигналу. Визначені акустичні портрети БПЛА можуть бути використані для навчання нейромереж і подальшого програмування мікроконтролерів, що значно підвищить селективність і точність ідентифікації БПЛА.

3. Використання сучасних бездротових технологій передачі даних дозволяє інтегрувати систему оповіщення на локальному рівні в систему безпеки вищого рівня. Для впровадження запропонованого методу розроблено пристрій для вимірювання акустичного сигналу та інших цифрових параметрів з безпроводною передачею даних на основі технологій ZigBee та LoRaWAN.

4. ZigBee є потужною та стабільною бездротовою технологією, популярною у промисловості завдяки швидкому приєднанню, обміну інформацією, від'єднанню та переходу у глибокий сон, що забезпечує довгий термін служби батареї. Технологія LoRa, з більшою дальністю передачі даних, використовує чирп-імпульси і підходить для передачі невеликих пакетів даних на великі відстані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ю. Г. Даник, і М. В. Бугайов, «Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження», *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*, зб. наук. пр., № 10, с. 5-20, 2015.
- [2] AUDS Anti-UAV Defence System. [Electronic resource]. Available: <https://www.blighter.com/>.
- [3] Я. І. Лепіх та ін., *Оптико-електронні системи ближньої локації*, моногр. Одеса, Україна: Одеський нац. ун-т імені І. І. Мечникова, 2019.
- [4] C. G. Ribbing, "Controlling thermal radiation from surfaces," in *Optical Thin Films and Coatings*, A. Piegari and F. Flory, Sawston, UK: Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 811-835. <https://doi.org/10.1533/9780857097316.2.357>.
- [5] С. О. Сокольський, і А. В. Мовчанюк, «Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 87, с. 46-55, Грудень. 2021. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.46-55>.
- [6] Г. Е. Соколов, «Аналіз акустичних інформаційних сигналів квадрокоптерів і перешкодних звуків міста», *Проблеми інформатизації та управління*, № 67(3), 2021, с. 61-70.
- [7] С. О. Козерук, і О. В. Коржик, «Виявлення малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 76, с. 15-20, 2019. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.76.15-20>.
- [8] В. М. Карташов, В. О. Посошенко, А. І. Капуста, М. В. Рибников, і Є. В. Першин, «Особливості задач виявлення і спостереження груп безпілотних літальних апаратів», *Радіотехніка*, Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб., вип. 211, с. 84-92, 2022. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.4.211.06>.
- [9] O. Sukharevsky, *Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects*, 2015, p. 334. <https://doi.org/10.1201/b17239>.
- [10] В. А. Тихонов, та ін. «Виявлення-розпізнавання безпілотних літальних апаратів з використанням складової моделі авторегресії їх акустичного випромінювання», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, 2020, № 81, pp. 38-46.
- [11] V. M. Kartashov, et all., "Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles," *Telecommunications and Radio Engineering* (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*), vol.77 (10), pp. 915-924, 2018.

[12] Г. С. Ігнатенко, і А. Г. Ламчановський, «Класифікація аудіосигналів за допомогою нейронних мереж,» *Молодий вчений*, міжнар. журн., № 48(286), с. 23-25, 2019.

[13] D. O. Bosyi, O. I. Sablin, I. Yu. Khomenko, Y. M. Kosariiev, I. Yu. Kebal, and S. S. Myamlin, "Intelligent Technologies for Efficient Power Supply in Transport Systems," *Transport Problems*, no. 12 (SE), pp. 57-71, 2017. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.5> .

[14] *What is ZigBee and how it works?* [Electronic resource]. Available: <https://www.tech-sparks.com/zigbee/> .

[15] *LoRa and LoRaWAN*, a Technical Overview, Semtech Corporation, December 2019, 26 p.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.07.2024

Босий Дмитро Олексійович — д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри інтелектуальних систем енергопостачання, e-mail: d.o.bosyi@ust.edu.ua ;

Саблін Олег Ігорович — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри екологічної та цивільної безпеки, e-mail: o.i.sablin@ust.edu.ua ;

Потапчук Ірина Юрївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних систем енергопостачання.

Український державний університет науки і технологій, Дніпро

D. O. Bosyi¹
O. I. Sablin¹
I. Yu. Potapchuk¹

Increasing the Security Level of Critical Transport Infrastructure Facilities Based on Geospatial Analysis of Acoustic Portraits of Air Threats

¹Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro

The article discusses an approach to improving the safety of facilities that do not interrupt technological processes after an air raid alert, in particular, critical transport infrastructure, based on object-based identification of air hazards. Existing methods for detection and recognition of the air targets, such as attack drones and cruise missiles, are reviewed. It has been determined that for early detection of air hazards at the local level, the acoustic identification method is effective in terms of cost, simplicity and range. To implement it, the structure of the identification system is considered, built on the basis of the use of modern element base, including highly sensitive acoustic sensors capable of distinguishing sounds at a distance of up to 2.5 km and a system for processing and radio transmission of information at the distance of up to 10 km.

To identify various types of air hazards by their acoustic radiation and separate it from extraneous noise, unique acoustic portraits of attack drones and cruise missiles are identified in the research on the base of spectral analysis. For this purpose, a statistical study was carried out of a large volume of data of the acoustic noise of drones and cruise missiles, the information is obtained from the open sources. The resulting acoustic portraits of various types of air hazards in the form of the spectral density of the acoustic signal reflect the significant distinctive features of the amplitude-frequency characteristics of acoustic radiation depending on the type of air hazard.

In order to implement the proposed method, a special device for measuring the acoustic signal and other digital parameters with wireless data transmission based on ZigBee and LoRaWan technologies has been developed. The device can be configured to distinguish between low-intensity sounds and noises in the required frequency ranges inherent in acoustic portraits, after the identification it switches from "sleep mode" to active mode, which ensures its energy efficiency.

Keywords: critical infrastructure, air hazards, identification, acoustic signal, acoustic portrait, wireless data transmission.

Bosiy Dmytro O. — Dr Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Intelligent Energy Supply Systems, e-mail address d.o.bosyi@ust.edu.ua ;

Sablin Oleg I. — Dr Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Environmental and Civil Safety, e-mail: o.i.sablin@ust.edu.ua ;

Potapchuk Iryna Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Intelligent Energy Supply Systems