

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-45>

УДК: 004.8:519.876:629.7.055

Ковальчук Олег Олександрович,
<https://orcid.org/0000-0003-1372-6284>

Креденцер Борис Петрович, д.т.н., професор
<https://orcid.org/0000-0002-4323-0709>

Беляков Роберт Олегович, к.т.н., доцент
<https://orcid.org/0000-0001-9882-3088>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА БАРАЖУЮЧИХ БОЄПРИПАСІВ

Ковальчук О. О., Креденцер Б. П., Беляков Р. О. Математична модель інформаційно-керуючої системи виявлення безпілотних літальних апаратів та баражуючих боєприпасів. У статті розглянуто актуальну наукове завдання підвищення ефективності виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та баражуючих боєприпасів (ББ) в умовах бойових дій шляхом застосування адаптивних інформаційно-керуючих систем (ІКС), які об'єднують різноманітні сенсори у складі бездротових сенсорних мереж (БСМ). Проаналізовано сучасні підходи до використання радіолокаційних, оптико-електронних та акустичних засобів спостереження, зокрема з урахуванням результатів глибокого навчання та ф'южн-алгоритмів. Показано, що інтеграція даних з різних сенсорів дозволяє забезпечити високу достовірність виявлення цілей навіть за наявності завад, обмеженої інформованості та маневреності об'єктів. У сучасних умовах протистояння високотехнологічним загрозам особливої актуальності набуває застосування ф'южн-алгоритмів, які забезпечують ефективне поєднання інформації з різноманітних джерел (сенсорів БСМ). Такі алгоритми є необхідним елементом ІКС, оскільки дозволяють здійснювати синергетичну обробку даних, підвищувати достовірність розпізнавання та мінімізувати ймовірність хибних спрацювань навіть у складних умовах бойової обстановки. Наведено формалізовану імовірнісно-адаптивну модель виявлення повітряних об'єктів, яка враховує часові обмеження, керування діаграмами направленості сенсорів, забезпечення зв'язності мережі та мінімізацію ймовірності хибних спрацювань. Запропонована цільова функція дозволяє оптимізувати співвідношення між швидкістю виявлення та його точністю. Також представлено математичний апарат, що дозволяє враховувати просторові обмеження зони відповідальності, прогнозовану траєкторію БПЛА та особливості їх руху. Використання порогових значень імовірності для прийняття рішень дозволяє адаптувати систему під динамічну зміну бойової обстановки. Стаття формує основу для побудови високоефективних ІКС тактичного рівня з урахуванням реальних умов ведення бойових дій та потреб оперативного реагування.

Ключові слова: БПЛА, баражуючі боєприпаси, інформаційно-керуюча система, сенсорна мережа, ймовірність виявлення, ф'южн-алгоритм, адаптивне управління.

Kovalchuk O., Kredentser B., Bieliakov R. Mathematical Model of an Information and Control System for Detecting Unmanned Aerial Vehicles and Loitering Munitions. The article addresses the urgent scientific task of increasing the efficiency of detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) and loitering munitions (LMs) under combat conditions by employing adaptive information-control systems (ICS) that integrate various types of sensors within wireless sensor networks (WSNs). The study analyzes modern approaches to the use of radar, electro-optical, and acoustic surveillance tools, particularly considering the results of deep learning and fusion algorithms. It is demonstrated that the integration of data from heterogeneous sensors ensures a high reliability of target detection even in the presence of interference, limited situational awareness, and maneuvering targets.

In the current context of countering high-tech threats, the application of fusion algorithms is especially relevant, as they enable the effective combination of information from diverse sensors. Such algorithms are a crucial component of ICS, as they allow for synergistic data processing, improve recognition reliability, and minimize false alarm rates even in complex combat environments.

A formalized probabilistic-adaptive model for detecting aerial objects is presented, which accounts for time constraints, sensor beam steering, network connectivity, and false alarm minimization. The proposed objective function enables optimization of the trade-off between detection speed and accuracy. Additionally, the article presents a mathematical framework that considers spatial constraints of the area of responsibility, predicted UAV trajectories, and their motion characteristics. The use of probability thresholds for decision-making enables the system to adapt to dynamic changes in the combat situation.

This article lays the foundation for the development of highly effective tactical-level ICSs that take into account real combat conditions and the need for rapid response.

Keywords: UAV, loitering munitions, information-control system, sensor network, detection probability, fusion algorithm, adaptive control.

Постановка наукового завдання.

У сучасних умовах ведення бойових дій безпілотні літальні апарати (БПЛА) та баражуючі боєприпаси (ББ) набули широкого застосування завдяки своїй маневреності, низькій вартості та здатності здійснювати розвідку й нанесення ударів на тактичному рівні. Використання БПЛА противником істотно знижує ефективність традиційних методів виявлення і реагування, що зумовлює необхідність розробки адаптивних, швидкодіючих та імовірнісно-обґрунтованих систем виявлення.

Однією з перспективних технологій є застосування бездротових сенсорних мереж (БСМ), які дозволяють створити розподілене середовище спостереження з можливістю масштабування та інтеграції різнотипних сенсорів – акустичних, радіолокаційних та оптико-електронних. Проте використання БСМ у бойових умовах супроводжується низкою викликів, зокрема:

- обмеженістю часу на виявлення цілі,
- неповнотою чи стохастичністю інформації про траєкторії та характеристики БПЛА/ББ,
- необхідністю забезпечення радіозв'язності мережі та оптимального керування діаграмами направленості сенсорів,
- високими вимогами до достовірності об'єднаного рішення в умовах можливих хибних спрацювань.

Особливої актуальності набуває ситуація, коли сенсорні вузли розміщуються як на власній території, так і завчасно – за допомогою спеціальних боєприпасів – на ворожій території. Це породжує протиріччя між потребою в розширенні зони контролю та необхідністю забезпечити своєчасну та достовірну оцінку загрози з мінімізацією помилкових виявлень.

Таким чином, протиріччя між обмеженими ресурсами сенсорної мережі, необхідністю виявлення маневрених повітряних об'єктів у реальному часі та забезпеченням високої достовірності ф'южн-рішення обумовлює наукову задачу підвищення ймовірності своєчасного і точного виявлення БПЛА та ББ в межах смуги відповідальності тактичних підрозділів є актуальною.

Метою роботи є формалізація математичної моделі інформаційно-керуючої системи на основі БСМ із різнотипними сенсорами для збільшення ймовірності виявлення БПЛА та ББ.

Об'єктом дослідження є процес виявлення БПЛА та ББ в смузі відповідальності підрозділів тактичної ланки управління. Відповідно, **предмет дослідження** – науково-методичний апарат формування ймовірнісних моделей та моделей покриття для виявлення БПЛА та ББ з використанням БСМ з випадковим розподілом сенсорів.

Аналіз останніх публікацій.

Актуальність застосування інформаційно-керуючих систем (ІКС) для виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та баражуючих боєприпасів (ББ) обумовлена зростанням загроз з боку малорозмірних повітряних об'єктів. ІКС мають забезпечувати надійне виявлення в умовах радіоелектронної боротьби, завад, обмеженої дальності та високої мобільності цілей.

РЛС використовуються для активного зондування простору. У роботі [1] проаналізовано мікродоплерівські ознаки малорозмірних БПЛА, які дозволяють підвищити точність класифікації при використанні FMCW-радарів. Автори статті [2] запропонували використання глибоких нейромереж для класифікації за мікродоплером з використанням бази сигналів радіолокаційного спостереження.

Оптико-електронні засоби дають змогу отримувати зображення у видимому та ІЧ-діапазоні. У роботах [3, 4] продемонстровано ефективність використання алгоритмів YOLOv5 для виявлення дронів у тепловізійних зображеннях. При цьому забезпечується висока точність в умовах поганої освітленості.

Акустичні методи базуються на виявленні характерних частот двигунів БПЛА. У [5] досліджено використання згорткових нейромереж для класифікації акустичних сигналів дронів у складному середовищі. У статті [6] продемонстровано ефективність звукових спектрів у поєднанні з глибоким навчанням для точного розпізнавання.

Інтеграція різнотипних сенсорів у бездротових сенсорних мережах дозволяє досягти підвищеної достовірності виявлення. У [7] роботі розглянуто архітектуру багатовисерних систем, орієнтованих на забезпечення безпеки за рахунок об'єднання даних з РЛС, ОЕ та акустики.

У роботі [8] представлено огляд підходів до злиття інформації у децентралізованих мережах з БПЛА.

У [9] праці описано алгоритми прийняття рішень на основі ф'южн-алгоритмів, які враховують якість каналів, вагу джерел інформації та ймовірність хибних спрацювань.

Автори [10] наводять концепцію обробки в умовах великих обсягів даних для ІКС за допомогою IoT-систем.

Виклад основного матеріалу.

Постановка задачі.

Нехай задано підрозділ тактичного рівня, що здійснює бойове чергування на визначеній ділянці місцевості, якій відповідає смуга відповідальності Ω . Метою функціонування інформаційно-

керуючої системи (ІКС), інтегрованої у підрозділ, є забезпечення безперервного моніторингу повітряного простору з виявленням ворожих БПЛА та баражуючих боєприпасів (ББ) у реальному часі.

Виявлення повітряних об'єктів здійснюється із застосуванням бездротової сенсорної мережі (БСМ), яка включає наступні підсистеми:

- радіолокаційні сенсори (РЛС), встановлені на власній території,
- акустичні сенсори, розгорнуті в позиційних районах поблизу бойових порядків,
- оптико-електронні сенсори (ОЕС), розміщені на щоглах або БПЛА-ретрансляторах,
- радіочастотні сенсори, доставлені завчасно на ворожу територію з використанням спеціальних боєприпасів з розвідувальним навантаженням.

Для вирішення поставленого завдання та досягнення мети статті проведемо формалізацію процесів виявлення БПЛА та ББ, увівши допущення та обмеження процесу роботи інформаційно-керуючої системи.

Виклад основного матеріалу.

Задано:

$p_i(t)$ – ймовірність виявлення БПЛА сенсором i у момент часу t ;

$\theta_i(t)$ – кут орієнтації діаграми направленості сенсора i у момент часу t , з обмеженням:

$$|\theta_i(t) - \theta_i(t-1)| \leq \Delta\theta_{\max}, \quad (1)$$

де $\Delta\theta_{\max}$ – максимальний кутовий приріст (до 60°).

Цільова функція дослідження:

$$J = u_{\max}(t)P_{\det}(t) - \lambda T_{\det}(t), \quad (2)$$

де $P_{\det}(t)$ – сумарна ймовірність виявлення у момент часу t :

$$P_{\det}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p_i(t)] \quad (3)$$

$T_{\det}(t)$ – середній час виявлення цілі, λ – ваговий коефіцієнт пріоритету швидкості виявлення.

Управління покриттям здійснюється через діаграми направленості сенсорів.

$$u(t) = [\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_n(t)]^T \in \mathbb{U}^n \subseteq [-\pi, \pi]^n, \quad (4)$$

де $u(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор управління орієнтацією сенсорів у момент часу t , $\mathbb{U}^n$ – допустимий простір управління з урахуванням обмежень на зміну діаграми направленості.

Допущення.

БПЛА власних підрозділів обладнані системами розпізнавання типу свій-чужий, інтенсивність застосування БПЛА та ББ противником не перевищує значення, за якого інформація про виявлення залишається актуальною на проміжку часу необхідного для доведення та реакції власних підрозділів.

Для кожного цільового об'єкта o_i , що перебуває в межах зони відповідальності Ω , система ІКС отримує сигнал від сенсорної підсистеми

$$x_i(t) \in R^n$$

Що являє собою вектор спостереження для об'єкта o_i на момент часу t .

Необхідно ввести функцію класифікації

$$C(x_i(t)) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } o_i \text{ визначено як «чужий» (загроза),} \\ 0, & \text{якщо } o_i \text{ розпізнано як «свій»,} \end{cases} \quad (5)$$

за допущення, що всі власні БПЛА задовольняють умові:

$$C(x_j(t)) = 0, \quad \forall j \in O_{\text{own}}, \quad (6)$$

де O_{own} – множина всіх власних БПЛА в зоні Ω .

Обмеження.

Радіозв'язність мережі:

$\forall v_i, v_j \in V : \exists$ маршрут з v_i до v_j .

Час реакції:

$$T_{det}(t) \leq T_{max}. \quad (7)$$

Фізичні обмеження діаграм направленості:

$$\theta_i(t) \in [\theta_{i,min}, \theta_{i,max}]. \quad (8)$$

Закони розподілу сенсорів на своїй та «ворожій» території.

На власній території –

$$\forall v_i \in V_{own}: x_i, y_i \in \Omega_{own}, \quad (9)$$

а на непідконтрольній території –

$$\forall v_j \in V_{enemy}: x_j, y_j \in \Omega_{enemy}. \quad (10)$$

Мережа сенсорів описується орієнтованим графом

$$G = \langle V, E \rangle, \quad (11)$$

де $V = v_1, v_2, \dots, v_n$ – множина сенсорних вузлів, $E = e_{ij}$ – множина каналів зв'язку між сенсорами.

Радіозв'язність гарантується за умови

$$\forall (v_i, v_j) \in E: d_{ij} \leq d_{max}, P_{ij} \geq P_{min}, \quad (12)$$

де d_{ij} – відстань між сенсорами, d_{max} – максимальна відстань стійкого радіозв'язку, P_{ij} – ймовірність успішного прийому пакетів між сенсорами.

Кожен сенсорний вузол обладнаний адаптивною діаграмою направленості з можливістю зміни сектора огляду в межах $\pm 60^\circ$:

$$|\theta_i(t) - \theta_i(t-1)| \leq \Delta\theta_{max}, \Delta\theta_{max} \leq 60^\circ. \quad (13)$$

Оцінка ймовірності виявлення кожною підсистемою, а саме:

$P_{det}^{RL}(t)$ – ймовірність виявлення радіолокаційною підсистемою;

$P_{det}^{AC}(t)$ – ймовірність виявлення акустичною підсистемою;

$P_{det}^{OE}(t)$ – ймовірність виявлення оптико-електронною підсистемою;

$P_{det}^{RF}(t)$ – ймовірність виявлення сенсорами, встановленими на ворожій території, та в загальному

$$P_{det}^{S_i}(t) = \int_{\Omega_i}^1 f_{S_i}(x, t) dx, \quad (14)$$

де $f_{S_i}(x, t)$ – функція густини ймовірності виявлення у просторі Ω_i сенсором S_i , а врахування помилкових виявлень здійснюється через $P_{FA}^{S_i}$ – ймовірність помилкового виявлення (False Alarm) для кожної підсистеми.

Оцінка ймовірності виявлення об'єкта проводиться для кожної підсистеми окремо.

Зокрема, для радіо-локаційної системи:

$$P_{det}^{RL}(d) = 1 - \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{d - \mu_{RL}}{\sqrt{2} \sigma_{RL}} \right) \right] \quad (15)$$

де μ_{RL}, σ_{RL} – параметри нормального розподілу ефективної дальності виявлення.

Для акустичних сенсорів:

$$P_{det}^{AC}(t) = \exp \left(- \frac{N_f(t)}{SNR_{AC}^1} \right) \quad (16)$$

де $N_f(t)$ – інтенсивність фонового шуму, а SNR_{AC}^i – відношення сигнал/шум i -го сенсора.

Для оптико-електронної підсистеми:

$$P_{det}^{OE}(r, \theta) = g(L, r, \theta), \quad (17)$$

де g – функція, що враховує дальність r , кутову похибку θ та погодні умови $\{L\}$.

Сумарна ймовірність виявлення на основі ф'южн-алгоритму розраховується як:

$$P_{det}^{fusion}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{N_s} [1 - P_{det}^{S_i}(t)], \quad (18)$$

де S_i – підсистема i -го типу, а N_s – загальна кількість підсистем.

Рішення про наявність БПЛА приймається за допомогою імовірнісного правила:

$$\begin{cases} H_1 : \text{БПЛА присутній, якщо } P_{det}^{fusion}(t) \geq \gamma, \\ H_0 : \text{БПЛА відсутній, якщо } P_{det}^{fusion}(t) < \gamma, \end{cases} \quad (19)$$

де γ – порогове значення, обране з урахуванням максимально допустимої ймовірності помилкового виявлення $P_{FA}^{fusion} \leq a$.

Завдання оптимального керування системою полягає в максимізації цільової функції:

$$J = \max_{u(t)} [P_{det}^{fusion}(t) - \lambda \cdot T_{det}(t)], \quad (20)$$

де $T_{det}(t)$ – середній час виявлення, λ – ваговий коефіцієнт пріоритету швидкодії, $u(t)$ – керуючий вектор (напрямки сенсорів, маршрути обробки сигналів).

Усі модулі ІКС – включаючи підсистему прийняття рішень, адаптацію секторів огляду, комунікаційні протоколи – працюють у реальному часі, що дозволяє мінімізувати час оповіщення підрозділів про загрозу з повітря.

Побудована модель дозволяє оцінити ефективність ІКС за умов імовірнісного виявлення цілей, динамічного середовища та обмеженої інформації про умови функціонування, що є необхідним для формування надійної системи повітряного моніторингу тактичного рівня.

Врахування адаптивного управління за використання запропонованої моделі.

Керування діаграмою направленості сенсорів впливає на $P_{det}^{Si}(t)$ шляхом:

$$P_{det}^{Si}(t, \theta_i) = g(\theta_i(t), \Delta\theta_{max}, \phi_{target}(t)) \quad (21)$$

де $\phi_{target}(t)$ – прогнозована траєкторія БПЛА, $\Delta\theta_{max}$ – допустиме відхилення діаграми направленості сенсора.

Оптимізаційна функція.

$$\theta_i(t) = \arg \max_{\theta_i(t)} P_{det}^{fusion}(t), \quad (22)$$

за обмеження

$$|\theta_i(t) - \theta_i(t-1)| \leq \Delta\theta_{max}. \quad (23)$$

Отже, формування ймовірності виявлення як інтеграції над простором дії кожного сенсора дозволяє врахувати обмеження їх дальності та направленості. Байєсівське об'єднання рішень дає оптимальну стратегію при незалежних сенсорах, але у випадку корельованих даних необхідно додатково враховувати коефіцієнти залежності. Введення порогового значення γ дозволяє балансувати між швидкістю реакції та мінімізацією хибних спрацьовувань. Адаптивне керування діаграмами направленості підвищує загальну ймовірність виявлення, особливо при маневруванні БПЛА.

Висновки та перспективи подальшого дослідження

У результаті проведеного дослідження встановлено, що ефективне виявлення безпілотних літальних апаратів та баражуючих боєприпасів в умовах активних бойових дій можливе лише за умови інтеграції різнотипних сенсорних підсистем у рамках єдиної інформаційно-керуючої системи (ІКС). Застосування радіолокаційних, акустичних, оптико-електронних та радіочастотних сенсорів у складі бездротової сенсорної мережі дозволяє досягти високої ймовірності виявлення при збереженні оперативності реагування.

Формалізована модель виявлення враховує ключові обмеження реального середовища: стохастичність траєкторій цілей, обмеженість часу, фізичні та енергетичні обмеження сенсорів, необхідність забезпечення радіозв'язності. Введення цільової функції, що поєднує сумарну ймовірність виявлення та середній час реакції, дозволяє оптимізувати роботу ІКС в умовах динамічної обстановки.

Запропонований підхід до адаптивного керування діаграмами направленості сенсорів сприяє підвищенню ймовірності виявлення маневрових цілей, а застосування ф'южн-алгоритмів із пороговою ймовірністю дозволяє знизити ризик хибних спрацьовувань. Байєсівське об'єднання рішень забезпечує оптимальність для незалежних сенсорів, але вимагає корекції у разі корельованих джерел даних.

Таким чином, побудована модель ІКС є обґрунтованим інструментом для проектування адаптивних систем виявлення БПЛА та ББ на тактичному рівні з урахуванням сучасних загроз і технологічних можливостей.

Напрямок подальших досліджень передбачається дослідження запропонованої моделі в імітаційному середовищі в різних сценаріях розміщення сенсорних вузлів та інтенсивності ворожих БПЛА.

Список бібліографічного опису

1. Zhang G., et al. Micro-Doppler based classification of small UAVs using FMCW radar // IEEE Access. – 2020. – №8. – С. 141434–141443.
2. Jarrous A., et al. Drone detection and classification using micro-Doppler signatures with deep networks // Sensors. – 2021. – Т. 21, №12. – С. 4121.
3. Mazzarella L., et al. Detection and tracking of drones using deep learning and thermal imagery // Remote Sensing. – 2021. – Т. 13, №2. – С. 356.
4. Halawani M., et al. Drone detection using YOLOv5 and thermal images // Electronics. – 2022. – Т. 11, №9. – С. 1445.
5. Parchami H., et al. Deep neural networks for acoustic drone detection // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2020. – Т. 56, №4. – С. 2879–2890.
6. Ashraf S., et al. Sound-based UAV detection using deep learning // Sensors. – 2021. – Т. 21, №16. – С. 5338.
7. Bacco M., et al. UAVs and multi-sensor fusion for wireless surveillance systems: Research challenges and future trends // Computer Networks. – 2020. – Т. 174. – С. 107228.
8. Azari A., et al. Integrated wireless sensor and drone networks: A survey // Ad Hoc Networks. – 2021. – Т. 122. – С. 102600.
9. Millán-Romero A., et al. Fusion of radar and EO data for drone detection using decision-level algorithms // Sensors. – 2020. – Т. 20, №18. – С. 5157.
10. Bisdikian C., et al. Fusion, analytics, and management in large-scale sensor systems // IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Т. 7, №5. – С. 4100–4112.

References

1. Zhang G., et al. Micro-Doppler based classification of small UAVs using FMCW radar // IEEE Access. – 2020. – №8. – С. 141434–141443.
2. Jarrous A., et al. Drone detection and classification using micro-Doppler signatures with deep networks // Sensors. – 2021. – Т. 21, №12. – С. 4121.
3. Mazzarella L., et al. Detection and tracking of drones using deep learning and thermal imagery // Remote Sensing. – 2021. – Т. 13, №2. – С. 356.
4. Halawani M., et al. Drone detection using YOLOv5 and thermal images // Electronics. – 2022. – Т. 11, №9. – С. 1445.
5. Parchami H., et al. Deep neural networks for acoustic drone detection // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2020. – Т. 56, №4. – С. 2879–2890.
6. Ashraf S., et al. Sound-based UAV detection using deep learning // Sensors. – 2021. – Т. 21, №16. – С. 5338.
7. Bacco M., et al. UAVs and multi-sensor fusion for wireless surveillance systems: Research challenges and future trends // Computer Networks. – 2020. – Т. 174. – С. 107228.
8. Azari A., et al. Integrated wireless sensor and drone networks: A survey // Ad Hoc Networks. – 2021. – Т. 122. – С. 102600.
9. Millán-Romero A., et al. Fusion of radar and EO data for drone detection using decision-level algorithms // Sensors. – 2020. – Т. 20, №18. – С. 5157.
10. Bisdikian C., et al. Fusion, analytics, and management in large-scale sensor systems // IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Т. 7, №5. – С. 4100–4112.