

Роман Скаліш, Юрій Процик*

¹ НЛТУ України, Львів, Україна, ORCID: 0009-0007-4065-302,
skalish.roman@nltu.lviv.ua

² НЛТУ України, Львів, Україна, protsyk@nltu.edu.ua

Ієрархічний підхід до організації системи виявлення БПЛА на основі глибоких згорткових мереж

***Анотація.** У роботі розглянуто теоретичні засади побудови багаторівневої інтелектуальної системи виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) із використанням згорткових нейронних мереж (CNN). Запропоновано ієрархічну структуру з трьома рівнями: локального обчислення (детекція об'єктів у відеопотоці), стратегічного аналізу (ідентифікація патернів загрози) та глобального реагування (формування сигналу тривоги). Визначено ключові переваги такої моделі в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, змінного середовища та відсутності стабільного каналу зв'язку. Формалізовано узагальнену функцію якості системи, що враховує точність, повноту, швидкість та енергоспоживання. Результати можуть бути використані для розробки автономних мобільних платформ спостереження та охорони об'єктів критичної інфраструктури.*

***Ключові слова** – безпілотні літальні апарати, комп'ютерний зір, згорткові нейронні мережі, ієрархічна система, детекція, стратегічний аналіз, мобільна платформа, штучний інтелект.*

Вступ. У сучасних умовах стрімкого розвитку безпілотних технологій, зокрема дронів, актуалізується проблема їх своєчасного виявлення в повітряному просторі. Такі апарати можуть становити загрозу як для об'єктів інфраструктури, так і для безпеки публічного простору. Згорткові нейронні мережі (CNN) демонструють високу ефективність у задачах комп'ютерного зору, включаючи детекцію малорозмірних об'єктів у складних умовах. У даній роботі розглянуто ієрархічний підхід до побудови системи виявлення БПЛА, що дозволяє розмежувати рівні обробки, оптимізувати використання ресурсів та забезпечити більш гнучку реакцію на потенційні загрози.

Ієрархічна модель виявлення БПЛА. Запропонований підхід передбачає побудову системи виявлення дронів у вигляді трирівневої ієрархії, де кожен рівень виконує свою функцію та взаємодіє з іншими за принципом обробки та узагальнення інформації:

- Локальний рівень відповідає за первинну обробку вхідного відеопотоку та детекцію об'єктів за допомогою згорткових нейронних мереж, таких як YOLOv5 чи MobileNet SSD. На цьому етапі виявляються потенційні об'єкти, що мають ознаки дрона, із застосуванням попередньої обробки кадру (наприклад, підвищення контрастності, відсікання фону, виділення рухомих об'єктів).
- Стратегічний рівень здійснює часовий аналіз та інтерпретацію поведінкових шаблонів. Система відслідковує зміну позицій об'єктів, їх швидкість, траєкторії та визначає, чи мають вони ознаки БПЛА. На цьому рівні також можна реалізувати фільтрацію помилкових спрацьовувань, використовуючи методи кластерного аналізу або рекурентні нейромережі.
- Глобальний рівень забезпечує узагальнення результатів і прийняття рішень щодо активації сигналу тривоги або іншої реакції системи. Він може враховувати зовнішні чинники, контекст (час доби, зона контролю), а також взаємодіяти з іншими джерелами інформації або системами безпеки. Така структура дозволяє підвищити стійкість системи до помилок, оптимізувати розподіл обчислювального навантаження між рівнями та забезпечити масштабованість при переході від локальних до розподілених систем [2].

Метрики якості та формалізація системи. Оцінювання ефективності системи виявлення БПЛА потребує чітко визначених метрик, які дозволяють обґрунтовано порівнювати різні алгоритми й архітектурні рішення. У роботі враховано такі основні характеристики:

- Точність (precision) – відсоток правильних детекцій серед усіх спрацьовувань;
- Повнота (recall) – частка правильно виявлених об'єктів серед усіх реальних цілей;

- FPS (frames per second) – швидкість обробки кадрів, критично важлива для реального часу;
- P – середнє енергоспоживання або ресурсозатратність (особливо для мобільних платформ).

Для порівняння систем або конфігурацій введено узагальнену функцію якості:

$$Q = \alpha \cdot \text{Precision} + \beta \cdot \text{Recall} + \gamma \cdot \text{FPS} - \delta \cdot P \quad (1)$$

де α , β , γ , δ – вагові коефіцієнти, які можна налаштувати відповідно до пріоритетів (наприклад, точність важливіша за швидкість або навпаки). [1]

Такий підхід дозволяє порівнювати як окремі моделі CNN (YOLOv5, MobileNet, EfficientDet), так і цілі ієрархічні системи з різною архітектурою та глибиною обробки.

Переваги та перспективи застосування. Ієрархічна організація системи виявлення БПЛА має низку переваг, які роблять її особливо привабливою для використання у мобільних та ресурсно обмежених середовищах.

По-перше, розділення обчислювальних завдань між рівнями дозволяє оптимізувати навантаження: локальні рівні можуть працювати автономно з мінімальною затримкою, у той час як стратегічний і глобальний рівні забезпечують узагальнення та інтелектуальне реагування.

По-друге, така структура легко масштабована – окремі модулі можуть бути розгорнуті на різних пристроях або переміщені до більш потужних обчислювальних вузлів без суттєвих змін у логіці роботи.

По-третє, система гнучко адаптується до змін середовища, наприклад до погіршення освітлення, шумів, чи втрати з'єднання. Завдяки цьому вона зберігає працездатність навіть у складних умовах [3].

Крім того, використання недорогих компонентів – таких як одноплатні комп'ютери (Raspberry Pi), компактні камери та прості модулі зв'язку – робить систему економічно доцільною для розгортання у прикладних задачах: моніторинг периметра, охорона критичної інфраструктури, виявлення порушень у повітряному просторі. Таким чином, ієрархічна модель відкриває шлях до ство-

рення автономних, адаптивних і модульних систем моніторингу, що відповідають вимогам сучасної безпеки.

Висновок. Запропонована ієрархічна модель виявлення БПЛА на основі згорткових нейронних мереж дозволяє ефективно поєднувати локальну обробку відеоданих із загальним аналізом поведінки об'єктів у просторі та часі. Такий підхід забезпечує кращу адаптацію до змінних умов середовища та дає змогу реалізовувати системи моніторингу на доступних апаратних платформах. Результати можуть бути застосовані у сфері безпеки, нагляду та охорони об'єктів з обмеженим радіозв'язком.

Список використаних літературних джерел

- [1] Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv preprint.
- [2] Zhang, G., & Zhang, Y. (2022). UAV Detection Based on Deep Learning and Multi-Level Decision Fusion. *Sensors*, 22(3), 901.
- [3] Bhardwaj, A., & Shukla, P. K. (2021). Review of hierarchical deep learning techniques for object detection in aerial surveillance. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12, 9721–9737.

Hierarchical Approach to the Organization of a UAV Detection System Based on Deep Convolutional Neural Networks

Roman Skalish, Yurii Protsyk

This paper presents the theoretical foundations of a hierarchical intelligent system for detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) based on convolutional neural networks (CNNs). A three-level architecture is proposed: local computation (object detection in video streams), strategic analysis (threat pattern recognition), and global response (alarm signal generation). The advantages of such a model under limited computational resources, dynamic environments, and unreliable communication channels are discussed. A generalized system quality function is formalized, considering accuracy, recall, processing speed, and power consumption. The results can be applied to the design of autonomous mobile surveillance platforms for critical infrastructure protection.