УДК 004.932.72'1

А. П. Бабич, С. О. Калініченко, Ю. В. Волинець, В. Ю. Гайдай

АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНИХ АРХІТЕКТУР СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ТА СУПРОВОДЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ НА БАЗІ YOLO ДЛЯ БПЛА

Анотація. *У тезах проаналізовано альтернативні архітектури систем автоматизованого виявлення, розпізнавання та супроводження об'єктів у складі безпілотних авіаційних систем. Розглянуто поєднання алгоритмів сімейства YOLO з Kalman Filter, ByteTrack, PX4, CNN та SLAM (ROS2). Сформовано критерії порівняння за точністю, швидкодією, обчислювальними ресурсами, стійкістю супроводження та можливістю програмно-апаратної інтеграції. Визначено доцільність застосування кожної архітектури залежно від класу БпЛА: тактичних (Tactical UAV), середньої дальності ураження (Middle Strike) та глибокого ураження (Deep Strike).*

Ключові слова: *безпілотна авіаційна система, YOLO, ByteTrack, Kalman Filter, супроводження об'єктів.*

Abstract. *The paper analyzes alternative architectures of automated object detection, recognition and tracking systems for unmanned aerial systems. Combinations of YOLO-family algorithms with Kalman Filter, ByteTrack, PX4, CNN and SLAM (ROS2) are considered. Comparison criteria are formed in terms of accuracy, processing speed, computational resources, tracking robustness and software-hardware integration capabilities. The suitability of each architecture is determined for different UAV classes: tactical UAVs, Middle Strike and Deep Strike.*

Keywords: *unmanned aerial system, YOLO, ByteTrack, Kalman Filter, object tracking.*

Сучасні безпілотні авіаційні системи потребують засобів автоматизованого аналізу відеоданих, здатних працювати в умовах обмежених бортових обчислювальних ресурсів та змінної обстановки. Одним із напрямів підвищення ефективності таких систем є застосування методів комп'ютерного зору для автоматичного виявлення, розпізнавання і супроводження об'єктів. Алгоритми сімейства YOLO поєднують детекцію об'єктів із високою швидкодією, що робить їх придатними для інтеграції у бортові програмно-апаратні комплекси [1–3].

Представлено порівняльний аналіз альтернативних архітектур систем розпізнавання та супроводження об'єктів на базі YOLO та визначення особливостей їх застосування залежно від класу БпЛА, вимог до точності, продуктивності, стійкості трекінгу й обчислювальних ресурсів.

Розглянуто три архітектурні варіанти: YOLO + Kalman Filter + PX4; YOLO Segmentation + ByteTrack + PX4; YOLO + CNN + SLAM (ROS2).

Перша архітектура орієнтована на високу швидкодію та невисоке навантаження на обчислювальну систему. Kalman Filter забезпечує прогнозування стану об'єкта між послідовними вимірюваннями [4, 5], а PX4 використовується як система керування польотом [10]. Такий підхід є відносно простим для інтеграції, однак має обмеження при багатооб'єктному супроводженні та тривалих перекриттях. Тому він найбільш прийнятний для легких тактичних БпЛА (Tactical UAV) з обмеженим енергоресурсом і бортовою обчислювальною потужністю, коли завдання зводиться до супроводження одного, як правило, помітного об'єкта.

Друга архітектура поєднує YOLO Segmentation із ByteTrack та PX4. Використання сегментації дозволяє отримувати детальніші просторові характеристики об'єктів, а ByteTrack виконує багатооб'єктне супроводження, використовуючи інформацію від детектора [6, 7]. Архітектура зберігає придатну для бортового застосування швидкодію та забезпечує підвищену стійкість до короткочасного зникнення об'єкта у відеопотоці [12]. Вона є найбільш збалансованою для тактичних розвідувальних БпЛА та БпЛА середньої дальності ураження (Middle Strike), які працюють у динамічній обстановці з кількома об'єктами в кадрі та потребують стійкого супроводження цілі.

Третя архітектура доповнює YOLO компонентами CNN та SLAM у середовищі ROS2. Її особливістю є можливість поєднання розпізнавання із просторовою локалізацією та побудовою карти середовища [9, 11]. Це розширює функціональні можливості системи, але збільшує вимоги до обчислювальної платформи, пам'яті та складності програмної інтеграції. Така архітектура є перспективною для автономних БпЛА глибокого ураження (Deep Strike), де важливі самостійна

орієнтація в просторі та побудова карти місцевості, а наявність потужнішого бортового обчислювача виправдовує зростання складності системи.

Для порівняння архітектур використано критерії швидкодії, затримки обробки кадру, частоти обробки відео, вимог до RAM і VRAM, енергоспоживання, стійкості до перекриття, підтримки багатооб'єктного трекінгу та можливості інтеграції з ROS2 і PX4. За цими критеріями YOLO + Kalman Filter + PX4 має найвищу швидкодію та найменші вимоги до ресурсів, але найменшу стійкість до перекриттів і обмежену підтримку багатооб'єктного супроводження. YOLO Segmentation + ByteTrack + PX4 забезпечує компроміс між швидкодією, стійкістю супроводження та вимогами до обчислювальної платформи. YOLO + CNN + SLAM (ROS2) має найширші функціональні можливості, проте потребує найбільших обчислювальних ресурсів і найскладніший в інтеграції. Узагальнені результати порівняння наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння архітектур систем розпізнавання та супроводження об'єктів:

Критерій	**YOLO + Kalman Filter + PX4**	**YOLO Segmentation + ByteTrack + PX4**	**YOLO + CNN + SLAM (ROS2)**
Швидкодія	Найвища	Висока, придатна для бортового застосування	Помірна
Вимоги до обчислювальних ресурсів	Низькі	Середні	Високі
Багатооб'єктне супроводження та стійкість до перекриттів	Обмежені	Підвищена стійкість до короткочасного зникнення об'єкта	Не є основною функцією
Просторова локалізація та побудова карти	Відсутня	Відсутня	Наявна
Складність програмної інтеграції	Низька	Середня	Висока
Доцільний клас БпЛА	Легкі тактичні (Tactical UAV)	Тактичні розвідувальні та Middle Strike	Автономні Deep Strike

На підставі проведеного аналізу сформовано рекомендації щодо вибору архітектури залежно від класу БпЛА та вимог платформи. Для легких тактичних БпЛА (Tactical UAV) із суттєвими обмеженнями ресурсів розглядається YOLO + Kalman Filter + PX4. Для тактичних розвідувальних БпЛА та БпЛА середньої дальності ураження (Middle Strike) найбільш оптимальною є YOLO Segmentation + ByteTrack + PX4 на обчислювальній платформі класу NVIDIA Jetson Orin NX [8]. Для перспективних автономних БпЛА глибокого ураження (Deep Strike) з RGB-D сенсорами розглядається YOLO + CNN + SLAM (ROS2) на обчислювальній платформі класу NVIDIA Jetson AGX Orin.

Таким чином, проведений аналіз показує, що вибір архітектури системи комп'ютерного зору має здійснюватися комплексно, з урахуванням класу БпЛА, призначення платформи, обчислювальних ресурсів, стійкості супроводження та способу взаємодії з бортовою системою керування. Архітектура YOLO Segmentation + ByteTrack + PX4 є найбільш збалансованим варіантом для тактичних розвідувальних БпЛА та БпЛА Middle Strike і може розглядатися як основа для подальшого дослідження та модернізації програмно-апаратних комплексів БпАС. Подальші дослідження доцільно спрямувати на практичну перевірку обраних архітектур на цільових бортових платформах з урахуванням умов застосування відповідного класу БпЛА.

Висновки

Проаналізовано три альтернативні архітектури систем розпізнавання та супроводження об'єктів на базі YOLO. Визначено їхні особливості, вимоги до обчислювальних ресурсів та можливості інтеграції з PX4 і ROS2. Встановлено, що YOLO + Kalman Filter + PX4 доцільна для легких тактичних БпЛА з обмеженими ресурсами, YOLO Segmentation + ByteTrack + PX4 - для

тактичних розвідувальних БпЛА та БпЛА Middle Strike, а YOLO + CNN + SLAM (ROS2) - для перспективних автономних БпЛА Deep Strike з високими вимогами до обчислювальної платформи.

Список використаних джерел:

1. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
2. Jocher G. et al. Ultralytics YOLOv8. Ultralytics: web site. URL: https://docs.ultralytics.com/models/yolov8 (accessed 10.03.2026).
3. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H.-Y. M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2023. P. 7464–7475.
4. Bewley A., Ge Z., Ott L., Ramos F., Upcroft B. Simple Online and Realtime Tracking. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2016. P. 3464–3468. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533003.
5. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. UNC Chapel Hill, TR 95-041. 1995.
6. Zhang Y. et al. ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box. European Conference on Computer Vision (ECCV). 2022. P. 1–18. DOI: 10.1007/978-3-031-20047-2_1.
7. You L., Chen Y., Xiao C., Sun C., Li R. Multi-Object Vehicle Detection and Tracking Algorithm Based on Improved YOLOv8 and ByteTrack. Electronics. 2024. Vol. 13(15). P. 3033. DOI: 10.3390/electronics13153033.
8. NVIDIA Jetson Orin NX Technical Specification. NVIDIA: web site. URL: https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-orin-nx-series (accessed 20.03.2026).
9. Macenski S., Foote T., Gerkey B., Lalancette C., Woodall W. Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses In The Wild. Science Robotics. 2022. Vol. 7(66). eabm6074. DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074.
10. PX4 Autopilot Development Guide. PX4: web site. URL: https://docs.px4.io/main/en (accessed 25.03.2026).
11. Mur-Artal R., Tardós J. D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. IEEE Transactions on Robotics. 2017. Vol. 33(5). P. 1255–1262. DOI: 10.1109/TRO.2017.2705103.
12. Yin X. et al. Real-Time UAV Target Detection and Tracking Based on Improved YOLOv8 and ByteTrack in Complex Environments. Drones. 2024. Vol. 8(3). P. 82. DOI: 10.3390/drones8030082.

Бабич Анатолій Петрович - кандидат військових наук, доцент, професор кафедри експлуатації та застосування безпілотних авіаційних систем та комплексів повітряної розвідки Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, м. Харків, вул Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: aviaas5700@ukr.net ORCID https://orcid.org/0000-0002-9467-7754

Волинець Юрій Володимирович - *командир 242 та 247 навчальних груп, старший сержант, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Інженерно-авіаційний факультет, кафедра експлуатації та застосування безпілотних авіаційних систем та комплексів повітряної розвідки. Галузь знань - 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації», спеціальність 173 «Авіоніка», спеціалізація «Безпілотні авіаційні комплекси оперативно-тактичного, оперативного та стратегічного класу», м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: yura282006@gmail.com ORCID https:// orcid.org/0000-0002-0413-6365*

Калініченко Сергій Олександрович - курсант 247 навчальної групи, головний сержант, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Інженерно-авіаційний факультет, кафедра експлуатації та застосування безпілотних авіаційних систем та комплексів повітряної розвідки. Галузь знань - 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації», спеціальність 173

«Авіоніка», спеціалізація «Безпілотні авіаційні комплекси оперативно-тактичного, оперативного та стратегічного класу», м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: Sobeautyfullnight@gmail.com ORCID https:// orcid.org/0000-0002-0413-6365

Гайдай Владислав Юрійович *- курсант 247 навчальної групи, старший солдат, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Інженерно-авіаційний факультет, кафедра експлуатації та застосування безпілотних авіаційних систем та комплексів повітряної розвідки. Галузь знань - 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації», спеціальність 173 «Авіоніка», спеціалізація «Безпілотні авіаційні комплекси оперативно-тактичного, оперативного та стратегічного класу», м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: gajdajvlad79@gmail.com ORCID https:// orcid.org/0009-0009-3061-0268*

Anatoliy Petrovich Babych - Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Operation and Application of Unmanned Aerial Systems and Complexes of Aerial Reconnaissance, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: aviaas5700@ukr.net ORCID https://orcid.org/0000-0002-9467-7754

Serhii Oleksandrovych Kalinichenko - cadet of the 247th training group, Chief Sergeant, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Faculty of Aircraft Engineering, Department of Operation and Application of Unmanned Aerial Systems and Complexes of Aerial Reconnaissance. Field of study: 17 “Electronics, Automation and Electronic Communications”; specialty 173 “Avionics”; specialization: “Unmanned Aviation Complexes of Operational-Tactical, Operational and Strategic Classes”, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: Sobeautyfullnight@gmail.com ORCID https:// orcid.org/0000-0002-0413-6365

Yurii Volodymyrovych Volynets - commander of the 242 and 247 training groups, Staff Sergeant, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Faculty of Aircraft Engineering, Department of Operation and Application of Unmanned Aerial Systems and Complexes of Aerial Reconnaissance. Field of study: 17 “Electronics, Automation and Electronic Communications”; specialty 173 “Avionics”; specialization: “Unmanned Aviation Complexes of Operational-Tactical, Operational and Strategic Classes”, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: yura282006@gmail.com ORCID https:// orcid.org/0000-0002-0413-6365

Vladyslav Yuriyovych Haidai - cadet of the 247th training group, senior soldier, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Faculty of Aircraft Engineering, Department of Operation and Application of Unmanned Aerial Systems and Complexes of Aerial Reconnaissance. Field of study: 17 “Electronics, Automation and Electronic Communications”; specialty 173 “Avionics”; specialization: “Unmanned Aviation Complexes of Operational-Tactical, Operational and Strategic Classes”, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: gajdajvlad79@gmail.com ORCID https:// orcid.org/0009-0009-3061-0268