

ПРОТОКОЛИ ОБМІНУ ДАНИМИ ТА АДАПТИВНА НАВИГАЦІЯ У БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ (БПЛА) ВИКОРИСТАННЯ ПРОТОКОЛУ MAVLINK ДЛЯ КООРДИНАЦІЇ ТА ПЕРЕХОПЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба;

Анотація

У роботі досліджено архітектуру та математичне забезпечення систем адаптивної навігації швидкісних БПЛА-перехоплювачів. Обґрунтовано використання протоколу MAVLink 2.0 як галузевого стандарту для забезпечення мінімальних затримок інформаційного обміну та цілісності телеметричних даних. Розглянуто інтеграцію безпілотних засобів у сучасні контури АСУ, зокрема через платформу ситуаційної обізнаності DELTA. Формалізовано алгоритми модифікованої пропорційної навігації (PN) та прогностичного режиму «Follow Me» для перехоплення маневруючих повітряних цілей.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БПЛА), MAVLink 2.0, адаптивна навігація, пропорційна навігація, перехоплення об'єктів, DELTA.

Abstract

The paper investigates the architecture and mathematical support of adaptive navigation systems for high-speed UAV interceptors. The use of the MAVLink 2.0 protocol as an industry standard to ensure minimal delays in information exchange and integrity of telemetric data is justified. The integration of unmanned vehicles into modern ACS circuits is considered, in particular through the DELTA situational awareness platform. The algorithms of modified proportional navigation (PN) and the predictive "Follow Me" mode for intercepting maneuvering air targets are formalized.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs), MAVLink 2.0, adaptive navigation, proportional navigation, interception of objects, DELTA.

Вступ

Розвиток швидкісних та маневрених БПЛА-перехоплювачів є критично важливим для створення економічно ефективної системи протидії малорозмірним повітряним цілям.

На відміну від дороговартісних ракет ЗРК, використання безпілотних платформ дозволяє суттєво знизити вартість кожної місії перехоплення.

Головними технологічними викликами при створенні таких систем є забезпечення мінімальної затримки інформаційного обміну та розробка інтелектуальних алгоритмів наведення, здатних працювати в реальному часі.

Результати дослідження

MAVLink є високоефективним протоколом, побудованим за принципом "header-only", що робить його ідеальним для систем з обмеженими ресурсами. Версія MAVLink 2.0 підтримує розширені набори повідомлень та забезпечує контроль цілісності даних через CRC-16-CCITT [1].

Для контуру перехоплення критично важливими є наступні типи повідомлень:

GLOBAL_POSITION_INT: передача високочастотної тривимірної телеметрії (до 50-200 Гц).

ATTITUDE: дані про просторову орієнтацію (крен, тангаж, ролання).

SET_POSITION_TARGET_GLOBAL_INT: динамічне задання цільових векторів прискорення та швидкості для автопілота в Offboard-режимі[2].

Координація дій перехоплювача реалізується через трирівневу систему взаємодії:

1. Сенсорний рівень: збір даних про ціль від зовнішніх РЛС та інтеграція з системою DELTA, що забезпечує повну ситуаційну обізнаність у повітряному просторі.

Ключовим елементом ситуаційної обізнаності є українська платформа DELTA, яка забезпечує спостереження за полем бою в реальному часі у повітрі, на морі та на землі. Система інтегрує дані від зовнішніх РЛС, супутників, аеророзвідки та оптико-електронних станцій (ОЕС)[3]. Використання протоколів НАТО дозволяє DELTA здійснювати "деконфліктизацію" — етап планування, що запобігає одночасному виконанню одного завдання різними вогневыми засобами в одному районі. Це критично при масовому застосуванні перехоплювачів проти групи цілей[4].

2. Командно-диспетчерський рівень: розрахунок прогнозних точок зустрічі наземним пунктом управління (НПУ) через спеціалізоване ПЗ, таке як QGroundControl та модуль Mission Control[5], здійснює планування операцій БПЛА-перехоплювачів. За час існування платформи через цей модуль було виконано понад 200 000 місій. На цьому етапі розраховуються стратегічні вектори зближення, які передаються на борт через телеметричні радіостанції MAVLink.

3. Виконавчий рівень: відпрацювання розрахованих траєкторій бортовим комп'ютером (Companion Computer) через шлюзи MAVSDK із затримкою контуру не більше 15–20 мс.

Основою системи наведення є закон пропорційної навігації (Proportional Navigation — PN). На відміну від простого слідування за ціллю, метод PN дозволяє прогнозувати точку зустрічі, що забезпечує перехоплення за найкоротшою траєкторією. При реалізації алгоритму PN на базі БПЛА необхідно враховувати фізичні обмеження приводів (актуаторів). Система керування включає блоки сатурації прискорення, щоб запобігти занадто крутим маневрам, які можуть призвести до звалювання або механічного пошкодження апарату.

Для досягнення високої точності наведення частота повідомлень HIGHRES_IMU та GLOBAL_POSITION_INT збільшується до 200 Гц шляхом налаштування параметрів MAV_X_RATE та оптимізації буферів порту telem2 [6].

При отриманні координат цілі через пакети MAVLink бортовий комп'ютер аналізує вектори швидкості та прискорення об'єкта. Використовується алгоритм екстраполяції координат, який враховує затримку зв'язку та інерцію платформи, забезпечуючи упереджувальний вихід у розраховану точку зустрічі.

Це дозволяє ефективно працювати навіть проти цілей, що виконують інтенсивні маневри.

Для протидії груповим повітряним загрозам (наприклад, роям дронів-камікадзе) застосовується інформаційна технологія адаптивного управління роєм в антагоністичному середовищі[7].

Ройовий інтелект та системний підхід управління базується на шести взаємопов'язаних блоках: формування базису системи, моделювання адаптивної поведінки, вибір методів взаємодії, функціонування в динамічному бою, архітектура місії та модель виконання завдань.

Децентралізований розподіл цілей використовується теоретико-ігровий непараметричний підхід для динамічного розподілу об'єктів перехоплення між членами рою[8]. Кожен апарат оновлює свої "переконавання" щодо стану поля бою за допомогою моделей байєсівського навчання, аналізуючи дані від інших БПЛА через кастомні пакети MAVLink.

Це дозволяє рою перехоплювачів функціонувати як єдиний організм.

Висновки

Встановлено, що запропонований підхід з оптимізації протоколу MAVLink зі збільшенням частоти до 200 Гц є критичною для підтримки точності в контурі перехоплення.

Закон пропорційної навігації (PN) забезпечує значну перевагу над методами прямого переслідування, скорочуючи час до перехоплення та енерговитрати.

Інтеграція з платформою DELTA дозволяє БПЛА отримувати дані про цілі в реальному часі, що економить тисячі годин на координацію та звітування.

Технології ройового інтелекту та байєсівського навчання гарантують стійкість системи при виконанні складних бойових завдань у ворожому середовищі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yan, L., Shi, Y., Li, Y. Frequency-Hopping Spread Spectrum Techniques for Secure UAV Communications // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 156521–156531. — DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2949572

2. Кайдено, М. М., Кравчук, С. О. Захист від впливу різних класів атак на канали управління безпілотних літальних апаратів // Інформаційні та телекомунікаційні науки. — 2022. — №1. — С. 35–43. — <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12022.35-43>

3. Гетьман, О. В., Кайдено, М. М. Характеристики навмисних завад, що діють на канал зв'язку безпілотного літального апарату // Збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій» (ПТ– 2022). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — С. 143–145.

4. Sklar, B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. — Prentice Hall, 2001. — 770 p.

5. Zeng, K., Zhang, H., Lin, J. Jamming-Resistant Communications for UAV Networks: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2020. — Vol. 22, No. 4. — P. 2769–2795. — DOI: 10.1109/COMST.2020.2998101

6. Prasad, M. V. R. K. D., Pathak, S. K. LoRa Technology: A Review // International Journal of Engineering & Technology. — 2018. — Vol. 7, No. 4. — P. 3458–3464.

7. Wang, J., Xu, Y., Yang, Z., & Hu, J. (2025). A deep learning framework for real-time damage detection of bridges under moving loads. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 40(5), 482–499. <https://doi.org/10.1111/mice.12997>

8. Zhao, H., Wang, Y., Chen, M., & Zhou, J. (2025). Transfer learning for damage detection in structures with limited labeled data. Structural Health Monitoring, 24(2), 123–136. <https://doi.org/10.1177/14759217231123609>

Лавров Андрій Юрійович — науковий співробітник, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, e-mail: andriy.lavrov@gmail.com

Лавров Олег Юрійович — канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Lavrov Andriy Y. — Researcher, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, e-mail: andriy.lavrov@gmail.com

Lavrov Oleg Y. — PhD, Associate Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University