

І. БІНЬКО, В. ШЕВЕЛЬ, А. БИКОВ, Д. КРИЦЬКИЙ

АНАЛІЗ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ДРОНІВ І РОЗРАХУНОК ТРАЄКТОРІЇ ПЕРЕХОПЛЕННЯ

Предмет дослідження – вивчення застосування інноваційного методу *Cascade DataHub* для оптимізації управління автоматизованими рухомими системами, зокрема безпілотними літальними апаратами. У статті аналізуються теоретичні та практичні аспекти впровадження зазначеного методу в різних галузях. **Мета роботи** – всебічно проаналізувати сучасні моделі та методи керування групою дронів з огляду на децентралізовані підходи, а також розробити ефективні алгоритми для оптимізації траєкторії перехоплення. Розглянути підвищення точності та надійності управління складними автоматизованими системами завдяки збільшеній інтеграції даних у реальному часі. Дослідження спрямоване на виявлення потенційних переваг методу в контексті зменшення часу на реакцію систем і підвищення точності ухвалення рішень. **Завдання:** розробити комплексні алгоритми для швидкого оброблення та аналізу великих обсягів даних із різноманітних джерел; створити надійні комунікаційні протоколи для забезпечення стійкості зв'язку між системами в екстремальних умовах; проаналізувати інтеграцію цих розробок у практичному застосуванні, що дасть змогу збільшити їх ефективність у реальних оперативних умовах. Для досягнення поставленої мети використовуються такі методи: математичне моделювання, статистичний аналіз, машинне та глибоке навчання. Їх застосування дозволяє забезпечити високу точність і надійність роботи управлінських систем. **Результати.** У процесі дослідження встановлено, що метод *Cascade DataHub* забезпечує значне зменшення часу реакції систем на команди, підвищує точність виконання завдань і зменшує втрати даних під час їх передачі. Упровадження цього методу також сприяє ефективнішому розподілу ресурсів між автоматизованими одиницями, що є критично важливим для місій із високими вимогами до координації та часової синхронізації. **Висновки.** Усебічно проаналізовано сучасні моделі та методи керування групою дронів з огляду на децентралізовані підходи. Розроблено ефективні алгоритми оптимізації траєкторії перехоплення, спрямовані на підвищення точності та надійності управління складними автоматизованими системами з допомогою інтеграції даних у реальному часі. Дослідження виявило потенційні переваги запропонованого методу в контексті зменшення часу реакції систем та підвищення точності ухвалення рішень, що сприяє ефективнішому функціонуванню автоматизованих систем.

Ключові слова: *Cascade DataHub*; автоматизовані системи; машинне навчання; управління реальним часом; глибоке навчання.

Вступ

Протягом останніх десятиліть роботи стали все більш поширеними в різних галузях, зокрема військовій, цивільній та промисловій. Ефективне управління роботами вимагає швидкого збору, зберігання, оброблення та аналізу великих обсягів інформації в реальному часі. Історично методи керування роботами постійно еволюціонували, пристосовуючись до зростання вимог щодо швидкості оброблення та надійності систем. Останні роки позначені збільшенням інтересу до методів машинного навчання, особливо глибокого, що успішно застосовуються у багатьох галузях [1].

Cascade DataHub, новітня структура нейронної мережі, є одним із таких інноваційних методів, що забезпечує значне підвищення швидкості навчання та ефективності управління завдяки

зменшенню кількості необхідної навчальної інформації. У статті подається система управління безпілотними апаратами, що дає змогу керувати групою роботів (роєм), і розглядаються можливості використання методу *Cascade DataHub* для управління автоматизованою рухомою системою.

Основна мета цього дослідження полягає в проведенні всебічного аналізу сучасних моделей і методів управління групою дронів, зважаючи на децентралізовані підходи. Крім того, необхідно розробити ефективні алгоритми для оптимізації траєкторії перехоплення, що підвищують точність і надійність управління складними автоматизованими системами завдяки збільшеній інтеграції даних у реальному часі. Дослідження спрямоване на виявлення потенційних переваг методу в контексті зменшення часу реакції систем і підвищення точності ухвалення рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Управління автоматизованими рухомими системами в складних умовах, як-от керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА), вимагає стійких адаптивних стратегій, що можуть ефективно впоратися з високою мінливістю та невизначеністю. Методи управління еволюціонували від простих ручних керувань до складних автономних систем, що використовують передові алгоритми. Спочатку системами переважно керувала безпосередньо людина. З розвитком технологій акцент змістився на автоматизацію для підвищення точності, зменшення часу реакції та мінімізації людських помилок. Це призвело до розроблення різних методологій, кожна з яких адаптована до певних оперативних контекстів:

– в ранніх БПЛА використовувалися *традиційні системи управління*; ці системи покладаються на заздалегідь задані правила й обмежені в керуванні

динамічними змінами в середовищі. Вони прямолінійні, але не мають гнучкості;

– *адаптивні системи управління* коригують свої параметри в реальному часі для адаптації до змін у середовищі. Вони більш гнучкі, ніж традиційні системи, і використовуються там, де умови експлуатації не передбачувані;

– *прогностичні системи управління* застосовують моделі для прогнозування майбутніх станів системи, ефективні в сценаріях, де важливе планування та передбачення. Вони можуть виявити потенційні проблеми та проактивно коригувати поведінку системи;

– *інтелектуальні системи управління* застосовують штучний інтелект, зокрема машинне та глибоке навчання, для прийняття рішень на основі аналізу даних. Вони ефективні в складних середовищах, де численні змінні впливають на поведінку системи.

У табл. 1 наведено порівняння основних методів управління.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз методів управління автоматизованими рухомими системами

Метод	Переваги	Недоліки	Ідеальні умови застосування
Традиційні методи	Надійність, простота налаштування	Обмежена адаптивність	Стабільні, передбачувані умови
Адаптивні системи	Висока адаптивність, самоналаштування	Складність програмування	Змінні умови, де потрібна гнучкість
Методи на основі машинного навчання	Швидкість, адаптивність, навчання з досвіду	Потребують великих обсягів даних для навчання	Динамічні та непередбачувані умови

Нижче подано сучасні студії та публікації, пов'язані з методами управління автоматизованими рухомими системами, особливо БПЛА, з огляду на адаптивні стратегії та складні середовища.

Dual Attention and Focus Loss Using UAV by Y Xu et al. [2] – досліджено повністю автоматизовану систему з використанням БПЛА для збору відеоданих з антен. У роботі інтегруються інноваційні методи управління для ефективного результату. *Developing Mobile Application to Program and Control Robot by D Bhole et al.* [3] – проаналізовано розроблення мобільного застосунку для управління роботизованою рукою з допомогою Bluetooth, розглянуто інтеграцію автоматизованих систем у стратегії управління. *Autonomous Inspection and Maintenance Missions with AI Planning and the ROSPlan Framework by J Fillan* [4] – обговорюється методика планування III із застосуванням мобільних маніпуляторів та БПЛА, наголошується на потребі в автоматизованих рішеннях. *Introductory Chapter: Motion Planning for Dynamic Agents by ZA Ali* [5] –

описано планування руху як критичного аспекту робототехніки та автоматизації, зокрема для БПЛА й наземних безпілотних транспортних засобів, із упровадженням методів оптимального управління.

Визначення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми

Ідентифікація нерозв'язаних питань у царині управління автоматизованими рухомими системами є фундаментальним аспектом для розширення можливостей сучасних технологій. Особливо це стосується БПЛА, де точне та надійне керування є критично важливим. Незважаючи на значний прогрес у технологіях управління, існує низка фундаментальних питань, що залишається нерозв'язаною та потребує подальших досліджень.

1. *Інтеграція даних у реальному часі.* Попри розвиток алгоритмів, наявні системи часто зазнають труднощів, пов'язаних із забезпеченням надійної та ефективної інтеграції інформації з різних джерел

у реальному часі. Це особливо актуально в умовах, де динаміка зовнішнього середовища швидко змінюється.

2. *Безпека передачі даних.* Забезпечення безпеки каналів комунікації є основним викликом, особливо в контексті збільшення загроз кібербезпеці.

3. *Адаптивність до нових умов.* Необхідність адаптації систем управління до непередбачених умов без втрати продуктивності або точності.

4. *Розроблення високоефективних алгоритмів.* Створення алгоритмів, що можуть швидко обробляти великі обсяги інформації та забезпечувати точність у прийнятті рішень за динамічних умов.

Основною метою цього дослідження є проведення всебічного аналізу сучасних моделей і методів керування групою дронів, зважаючи на децентралізовані підходи. Крім того, метою статті є розроблення ефективних алгоритмів для оптимізації траєкторії перехоплення, що підвищують точність та надійність управління складними автоматизованими системами завдяки збільшеній інтеграції даних у реальному часі. Дослідження спрямоване на виявлення потенційних переваг методу в контексті зменшення часу реакції систем і підвищення точності ухвалення рішень.

Для досягнення окресленої мети визначені такі завдання:

- розроблення алгоритмів: створення нових алгоритмів, що підвищують швидкість оброблення інформації та точність ухвалення рішень;
- тестування в різних умовах: перевірка ефективності нових методів управління в лабораторних та полігонних умовах;
- аналіз результатів: оцінювання впливу застосування нових алгоритмів на загальну продуктивність і надійність систем;
- інтеграція розробок на практиці: упровадження розроблених алгоритмів і методів у практичному застосуванні, що дасть змогу збільшити їх ефективність в реальних оперативних умовах.

Цей підхід спрямований на заповнення наукових прогалин у царині керування автоматизованими системами та на підтримку розвитку більш ефективних і безпечних технологій управління, що можуть адаптуватися до швидко змінюваних умов експлуатації.

Матеріали й методи

Управління роботами зазвичай здійснюється за допомогою бортового комплексу навігації та

управління, що містить інтегровану систему з приймачем супутникової навігації, систему датчиків і сигналів, різні види антен і датчиків, модуль автопілота й систему накопичення та передачі інформації.

Бортова система навігації та управління забезпечує різні можливості, зокрема: рух заданим маршрутом із точністю до координат і висоти поворотних пунктів маршруту, зміна маршрутного завдання або повернення до точки старту за командою з наземного пункту керування, автосупровід обраної цілі, стабілізація кутів орієнтації робота, підтримка заданих висот і швидкості польоту, збирання та передача необхідної інформації та параметрів польоту, а також програмне управління пристроями цільового обладнання [6].

Загальна концепція системи керування дроном (рис. 1) ілюструє взаємодію між наземним програмно-апаратним комплексом і безпосередньо роботом, що обмінюються даними з допомогою захищеного каналу зв'язку. Для оброблення вхідної інформації програміст має зважати на можливі різні формати й типи даних, щоб правильно їх інтерпретувати та використовувати в подальшому обробленні. Наприклад, під час отримання текстових даних важливо перевірити їх правильність і коректність, а також переконатися, що вони містять необхідну інформацію для подальшого оброблення. У процесі отримання числових показників важливо перевірити їх діапазон значень і взяти до уваги можливі помилки округлення або неправильного форматування. Отже, коректне оброблення вхідної інформації є важливим складником ефективної програмної реалізації будь-якого завдання.



Рис. 1. Загальна концепція системи управління дронами

Система передачі інформації та зв'язку між роботом та програмно-апаратним наземним комплексом може здійснюватися з допомогою різних каналів зв'язку, таких як радіоканали, мережі зв'язку, а також інфрачервоних і лазерних засобів передачі даних.

Крім того, передача інформації може здійснюватися на великі відстані завдяки супутниковим засобам зв'язку. У разі взаємодії групи роботів між собою та з програмно-апаратним наземним комплексом з'являється потреба у використанні протоколів комунікації та алгоритмів координації дій, що дають змогу розв'язувати завдання зі збору інформації та здійснення операцій у групі [7]. На рис. 2 подано основні елементи взаємодії в системі управління роєм роботів із застосуванням генетичного програмування, що ілюструє зазначені аспекти взаємодії.

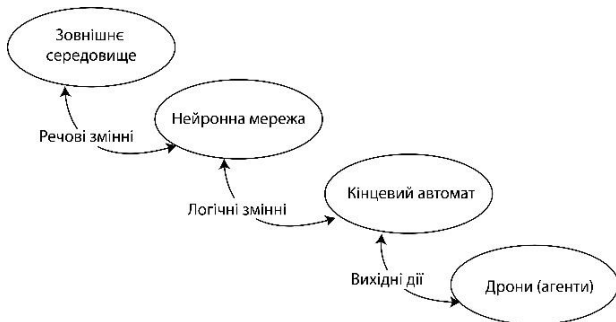


Рис. 2. Основні елементи взаємодії в системі управління роєм роботів із застосуванням генетичного програмування

Крім того, для забезпечення безпеки пересування та керування роботами може впроваджуватися система дистанційного контролю та аварійного відключення, що дозволяє операторам з наземного комплексу віддалено взаємодіяти з роботами та управляти ними в разі виникнення непередбачуваних ситуацій. Зв'язок між роботами та пілотованими об'єктами може здійснюватися завдяки мережам зв'язку та спеціальним пристроям, що дають змогу передавати інформацію між цими об'єктами. Така взаємодія може бути корисною для забезпечення координації та співпраці між пілотованими й безпілотними об'єктами. Крім того, передача інформації та зв'язок між роботами може здійснюватися за допомогою радіо- або інших комунікаційних каналів. Це дозволяє організувати координацію дій між роєм роботів, що виконують спільне завдання, а також забезпечувати взаємодію між ними та програмно-апаратним наземним комплексом.

Окрім безпосередньої передачі інформації між роботами й програмно-апаратним наземним комплексом, також можлива передача даних за допомогою супутникових зв'язків. Це дає змогу контролювати безпілотний апарат у віддаленому режимі, наприклад, якщо робот перебуває на значній

відстані від оператора. У разі використання робота для виконання місії у спеціальних умовах, таких як погана погода або висока інтенсивність радіації, можуть бути використані спеціальні комунікаційні канали, що дозволяють передавати інформацію за відповідних умов. Отже, система управління роботами може бути досить складною та динамічною. Для її ефективної роботи необхідно впроваджувати різноманітні технології передачі інформації та забезпечення зв'язку між компонентами системи.

На рис. 3 показано структуру нейронної мережі та її взаємодію з кінцевим автоматом. Символ S позначає нейрони з функцією активації сигмоподібної кишки, а символ L позначає нейрони з функцією порогової активації. Поруч вказані номери нейронів, що використовуються в описі крос-операції нейронної мережі. Кожен із трьох нейронів нейронної мережі отримує число, яке може бути як нулем, так і одиницею. Отже, існує вісім можливих комбінацій вихідних сигналів нейронної мережі (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111), що надходять на вхід кінцевого автомата. Цю структуру нейронної мережі та її взаємодію з кінцевим автоматом можна використовувати для розв'язання різноманітних завдань у сфері машинного навчання та робототехніки [8].

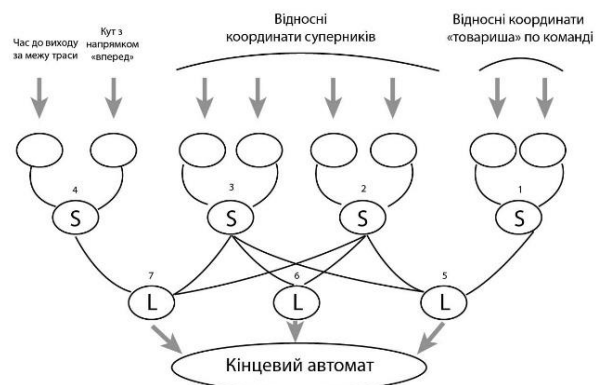


Рис. 3. Нейронна мережа та її взаємодія з кінцевим автоматом

Алгоритм генетичного програмування, що використовується системою управління, передбачає такі етапи: створення початкового покоління, мутація, схрещування (кросовер), відбір особин на формування наступного покоління, обчислення функції пристосованості. Ці процеси зображені на рис. 4, що демонструє загальну структуру нечіткої моделі системи управління автоматизованою безпіотною технікою на основі методу лінеаризації зворотним зв'язком із застосуванням нечіткого логічного висновку.



Рис. 4. Загальна структура моделі управління безпілотною технікою із застосуванням нечіткого логічного висновку

Перевагами цієї системи є наочність і відносна простота реалізації, відсутність високих вимог до продуктивності технічного обладнання, а також можливість використання системи для різних вхідних змінних. Недоліками є практична неможливість керування роєм, оскільки взаємодія із "сусідами" оцінюється лише за фактом подій. Незважаючи на значну кількість параметрів, що беруться до уваги, їх спрощення у використовуваній системі не може коректно та об'єктивно оцінити результати, наприклад, ігнорується зміна стану довкілля та параметри робота, що залежать від цього. Як метод аналізу та синтезу впроваджується лінеаризація зворотним зв'язком спільно з нечіткими системами логічного висновку. Порівняно із "звичайною" лінеаризацією, такий алгоритм можна застосовувати для суттєво нелінійних об'єктів управління. Передбачено, що метод лінеаризації зворотним зв'язком спільно з нечіткими системами логічного висновку може бути впроваджений для керування різними об'єктами, що мають суттєву нелінійність. Це може передбачати системи зі змінними параметрами, системи зі збуреннями або системи з нелінійними функціями. Застосування такого методу збільшує точність керування та зменшує вплив похибок вимірювання на якість управління. Порівняно зі звичайною лінеаризацією, метод лінеаризації зворотним зв'язком бере до уваги нелінійні ефекти в системі, тобто зберігає більш точну модель системи [9]. Завдяки цьому методу можна ефективно моделювати поведінку системи,

що дає змогу більш точно прогнозувати її реакцію на різні вхідні сигнали. Отже, застосування методу лінеаризації зворотним зв'язком разом із нечіткими системами логічного висновку є ефективним способом управління складними системами з високим ступенем нелінійності.

Зазвичай використання бази знань призводить до обмеження сфери застосування систем управління, до цільової функції об'єкта, яким вона керує. Це може бути як перевагою, так і недоліком зазначеної системи.

Перевагами системи управління роботами на основі лінеаризації зворотним зв'язком та нечіткого логічного висновку є значне зниження впливу невизначеності на якість систем та підвищення якості ідентифікації завдяки оптимізації системою параметрів нечіткої моделі. Крім того, структура нечіткої моделі системи управління роботами, що використовується, дозволяє виправити недоліки нечітких систем, такі як відсутність імовірності доповнення вихідного набору правил бази знань та можливість наявності неповного набору правил, суперечливих чи ідентичних правил через людський фактор у процесі формування правил бази знань.

Недоліками системи управління безпілотними апаратами є трудомісткість обчислень і складність формування бази знань під час навчання нечіткої моделі. Залежність від якості навчання та налаштування нечіткої бази знань може вплинути на ефективність системи управління.

Управління автоматизованою технічною системою на основі розподіленої системи полягає в тому, що одна людина здатна керувати роєм та передавати агентам команди для виконання складних завдань. Кожен апарат оснащений спеціальним комп'ютером, що забезпечує автономну роботу апарата в умовах відсутності зв'язку з керувальною системою.

Управління безпілотним апаратом на основі розподіленої системи є більш ефективним, ніж традиційні методи, оскільки забезпечує більш точне та швидке виконання завдань. Управління може здійснюватися з будь-якої точки світу за допомогою мережі Інтернет.

Програмне забезпечення для керування роботами на основі розподіленої системи може виконувати такі функції: планування маршрутів, автоматичне стеження за об'єктами, зйомка відео й фото, аналіз зібраної інформації та прийняття рішень на її основі.

Управління автоматизованою безпілотною системою на основі розподіленої системи застосовують у таких галузях, як землеробство, лісове господарство, охорона довкілля, моніторинг стану доріг та інфраструктури, військова царина тощо [10].

Схема взаємодії процесів за допомогою *Cascade DataHub* зображена на рис. 5.

Запропонована система має безперечну перевагу керування роєм. Крім того, схема взаємодії процесів, що використовується, дає змогу уникнути багатьох

проблем, пов'язаних з управлінням зазначеними процесами та з організацією доступу одних даних до інших.

Однак суттєвими недоліками можна виокремити складність реалізації алгоритмів керування та програмного забезпечення, а також недостатню захищеність системи управління загалом. Також необхідно звернути увагу на обладнання, що використовується системою розподіленого керування, і на ймовірні труднощі в процесі інтеграції програмного забезпечення.

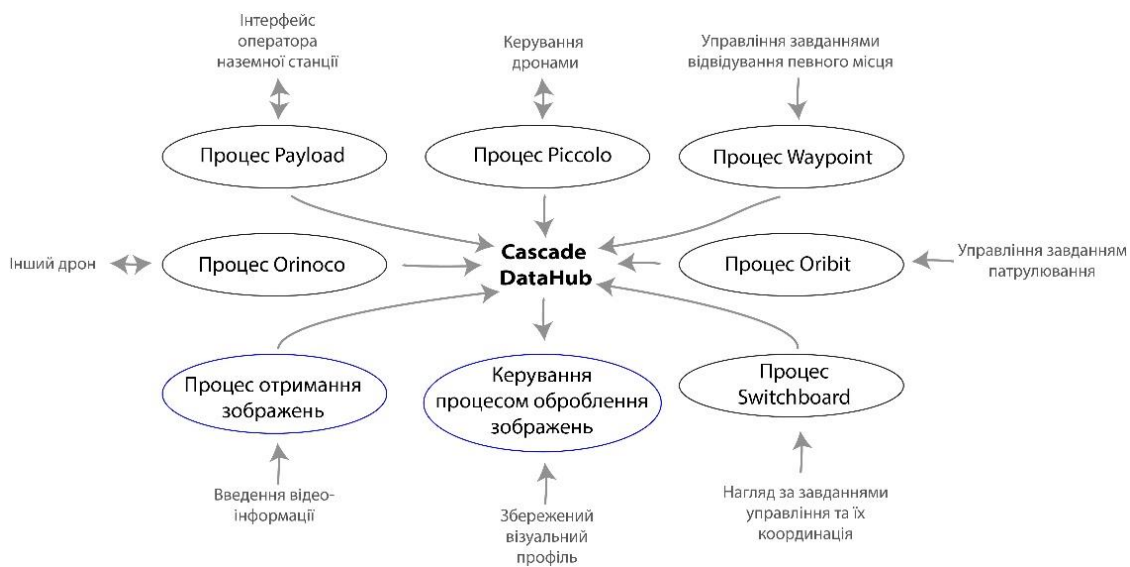


Рис. 5. Схема взаємодії процесів за допомогою *Cascade DataHub* у системі розподіленого управління дронами

В організації управління роєм роботів важливо звернути увагу на такі особливості, як взаємодія роботів у групі, забезпечення отримання та передачі інформації, контроль групи загалом. Взаємодія у рою означає керування діями агентів і контроль за їх виконанням, забезпечення безпеки польоту та уникнення зіткнень.

Отримання та передача інформації передбачає організацію зв'язку між об'єктами системи управління роботами, наземний комплекс та сторонні довірені суб'єкти. Контроль групи – це насамперед визначення розташування групи та її елементів, облік кількості об'єктів системи, встановлення масштабів групи. Необхідно зауважити, що в процесі розроблення та проектування систем управління роботами важливим етапом є визначення вимог до забезпечення безпеки відповідно до потреб конкретної місії та умов її виконання. Потрібно зважати на потенційні загрози, що можуть

виникнути під час місії, і розробляти заходи для їх попередження та/або усунення.

Також важливим етапом є створення алгоритмів керування, що дають змогу забезпечити ефективну роботу системи та досягти поставлених цілей. Ці алгоритми мають бути розроблені з огляду на характеристики роботів, використовувані датчики та інші компоненти системи управління [11, 12].

Окрім того, у розробленні систем управління необхідно брати до уваги технічні недоліки роботів, зокрема обмежену максимальну швидкість та дальність переміщення, обмежену місткість батарей тощо. На всі перелічені фактори необхідно зважати в проектуванні системи, щоб забезпечити її ефективну роботу та досягти максимальної продуктивності.

Нарешті, важливим аспектом є підтримка та обслуговування системи управління. Потрібно забезпечити доступ до необхідних ресурсів для ефективності системи, а також розробити

процедури та інструкції для її експлуатації та технічного обслуговування.

Метод *Cascade DataHub* – це інноваційний підхід до керування безпілотними апаратами, що дає змогу забезпечити надійний, ефективний та безпечний контроль за роботою агентів в умовах реального часу. Основна ідея методу полягає в тому, щоб об'єднати різноманітні джерела інформації, які забезпечують функціонування безпілотних апаратів, в єдину систему управління та моніторингу.

Основні компоненти методу *Cascade DataHub*

Датчики – забезпечують збір інформації про стан безпілотного апарата, а також про довкілля, в якому він працює. Серед датчиків, які використовуються в методі *Cascade DataHub*, можна виокремити *GPS*-навігатори, акселерометри, гіроскопи, датчики тиску, температури, вологості тощо.

Мережа передачі даних – забезпечує передачу інформації від датчиків до центральної системи керування безпілотними апаратами. Залежно від умов використовуються різноманітні мережі передачі даних, наприклад *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *3G/4G*, *LoRaWAN*, *NB-IoT* тощо [13].

Центральна система управління – забезпечує оброблення та аналіз інформації, що надходить від датчиків, та прийняття рішень.

Отже, збір та аналіз даних, які надходять від датчиків, та прийняття рішень на їх основі є важливими компонентами керування безпілотними апаратами. Однак для ефективного виконання цих завдань необхідно мати підтримку від відповідних програмних засобів.

Основна ідея методу *Cascade DataHub* полягає в тому, що інформація, яка надходить від датчиків, збирається на одному місці, де вона обробляється та аналізується. Після цього оброблені дані передаються на інші системи управління, що застосовують цю інформацію для контролю та управління автоматизованою безпіотною системою.

Другий етап використання *Cascade DataHub* полягає в навчанні мережі дрібних деталей керування безпілотним апаратом, таких як точне розташування та орієнтація в просторі, уникання перешкод тощо. На цьому етапі мережа вчиться робити більш точні та складні маневри, що дозволяє їй краще керувати роботом у складних умовах.

Третій етап застосування *Cascade DataHub* полягає в навчанні мережі детального управління безпіотною автоматизованою системою. На цьому

етапі мережа вчиться виконувати високоточні маневри та рухи, що дає змогу досягати більшої точності та ефективності управління. Наприклад, мережа може вивчити виконання точної зйомки з певної висоти та кута для максимально якісних зображень. Крім того, можна навчити мережу розрізняти певні об'єкти на зображеннях, що допоможе в побудові більш точних карт.

Проте метод *Cascade DataHub* впроваджується не лише для вдосконалення автономної роботи безпілотних апаратів. Він може застосовуватися в багатьох інших сферах, де потрібно розв'язувати складні завдання із значною кількістю інформації.

Наприклад, зазначений метод може бути використаний у медицині для вдосконалення процесу діагностики захворювань на основі аналізу зображень або в економічній галузі для аналізу фінансових ризиків та побудови прогнозів.

Отже, метод *Cascade DataHub* є потужним інструментом для розв'язання складних завдань, що вимагають значної кількості інформації та високої точності результатів. Він може бути застосований у багатьох сферах, зокрема в авіаційній промисловості та різноманітних наукових дослідженнях. Із зростанням кількості даних і вдосконаленням технологій навчання машин метод *Cascade DataHub* стає ще більш ефективним і потужним інструментом для досягнення високих результатів у різних сферах діяльності.

Однією з основних переваг методу *Cascade DataHub* є висока швидкість оброблення інформації. Завдяки цьому дані можуть бути аналізовані в реальному часі, що дає змогу операторам здійснювати швидке та ефективне керування БПЛА.

Іншою перевагою методу *Cascade DataHub* є його достатня точність і надійність. Цей метод точно визначає параметри польоту, а саме: швидкість, висоту, напрямок та інші, що дозволяє операторам ефективно керувати автоматизованою безпіотною системою.

Cascade DataHub – це метод глибокого навчання, що дає змогу зменшити кількість навчальної інформації та збільшити швидкість навчання. Це досягається завдяки послідовному під'єднанню декількох нейронних мереж, кожна з яких відповідає за визначення різних аспектів управління системою.

Принципи роботи методу *Cascade DataHub* передбачає кілька етапів.

Перший етап полягає в тому, що використовується нейронна мережа, яка навчається на загальних даних і визначає загальне керування системою.

Другий етап полягає в під'єднанні до першої мережі наступної, яка визначає більш детальні аспекти управління системою.

Метод уже застосовувався для керування групою БПЛА в сільському господарстві, де важливо швидко реагувати на мінливі погодні умови й забезпечувати точність збору показників. *Cascade DataHub* вирізняється здатністю зменшувати кількість потрібної навчальної інформації та підвищувати швидкість її оброблення, що забезпечує високу ефективність управління.

Технічні характеристики

DataHub Manager – програма, що керує безпілотними апаратами та забезпечує збір інформації з них.

DataHub Analytics – програма, яка аналізує та візуалізує дані з БПЛА.

DataHub Connectors – компоненти, що дають змогу з'єднувати *DataHub* із різними джерелами інформації, такими як сенсори, бази даних та інші системи.

DataHub API – програмний інтерфейс, що дозволяє інтегрувати *DataHub* з іншими системами та розробляти власні застосунки на базі *DataHub*.

За допомогою *DataHub Manager* можна керувати безпілотними апаратами з одного місця, використовуючи віддалений доступ через інтернет. Крім того, програма допомагає встановлювати параметри польоту, контролювати батареї, керувати камерою та виконувати інші дії.

DataHub Analytics дає змогу аналізувати інформацію, зібрану з безпілотних апаратів, за допомогою різних інструментів аналізу даних, таких як графіки, таблиці, карти тощо. Крім того, програма дозволяє створювати власні звіти та дашборди для візуалізації інформації.

DataHub Connectors є додатковими програмними інструментами, що дають змогу отримувати інформацію з різних джерел і джерел трансляції в режимі реального часу. У цьому разі йдеться про інформацію з датчиків, мереж, баз даних, трансляцій відео та звуку. *Connectors* можуть бути налаштовані для збору інформації з різних джерел та її транслявання до аналітичних інструментів, розроблених із використанням *Cascade DataHub* [14].

Загалом *DataHub Connectors* дають змогу під'єднуватися до кількох джерел трансляції з різними протоколами зв'язку: *MQTT*, *OPC UA*, *REST API* тощо. Крім того, *Connectors* можуть

бути розширені для під'єднання до нових джерел інформації за допомогою розширення програмного забезпечення.

DataHub API – це інтерфейс програмування застосувань (*API*), який дозволяє розробникам звертатися до інформації, розташованої в системі *DataHub*. За допомогою *API* можна взаємодіяти з базою даних, відправляти запити на отримання інформації та керувати нею. *DataHub API* використовує стандартні протоколи *REST API*, що дає змогу розробникам легко інтегрувати свої програмні продукти з *DataHub*.

API DataHub розроблено з огляду на масштабованість і гнучкість, що дозволяє розробникам створювати застосунки різного рівня складності та розміру. Крім того, *DataHub API* підтримує мови програмування *Python*, *JavaScript*, *Java*, *Ruby*, *PHP* та *C #*, що уможливорює їх вибір.

Метод *Cascade DataHub* допомагає створити єдину платформу для збору, оброблення та аналізу інформації з безпілотних літальних апаратів. Цей метод інтегрує різноманітні джерела даних, такі як *GPS*, камери, сенсори, інші системи управління та моніторингу, у єдину систему, що дає змогу здійснювати моніторинг, аналіз та керування апаратами в реальному часі.

Ключовою особливістю методу є можливість створення різних зв'язків між даними, що дозволяє аналізувати та контролювати роботу апаратів з різних кутів зору. Завдяки технології оброблення інформації в реальному часі оператори можуть миттєво реагувати на небезпечні ситуації, підвищуючи безпеку та надійність управління.

Крім того, метод *Cascade DataHub* зменшує витрати на керування безпілотними апаратами, оскільки дає змогу здійснювати контроль і моніторинг апаратів на віддаленій відстані зі зручного місця, зменшуючи необхідність у великій кількості спеціалізованого обладнання та персоналу.

Незважаючи на переваги методу *Cascade DataHub*, він також має недоліки. Зокрема йдеться про потребу у високошвидкісному інтернет-з'єднанні для передачі значного обсягу інформації в реальному часі. Також можуть виникнути проблеми зі стабільністю роботи системи в разі непередбачуваних ситуацій, таких як відключення одного із джерел даних.

Для забезпечення ефективного управління групою дронів у мінливих умовах важливо розробити систему взаємодії між БПЛА, яка дає змогу їм виконувати різні завдання в координації один з одним (рис. 6).

Можливий підхід, коли використовується основний дрон (лідер), що розподіляє завдання між іншими апаратами. Взаємодія дронів у такий спосіб дає змогу

ефективно реагувати на зміни в середовищі та перерозподіляти завдання у разі виходу з ладу одного з літальних апаратів.

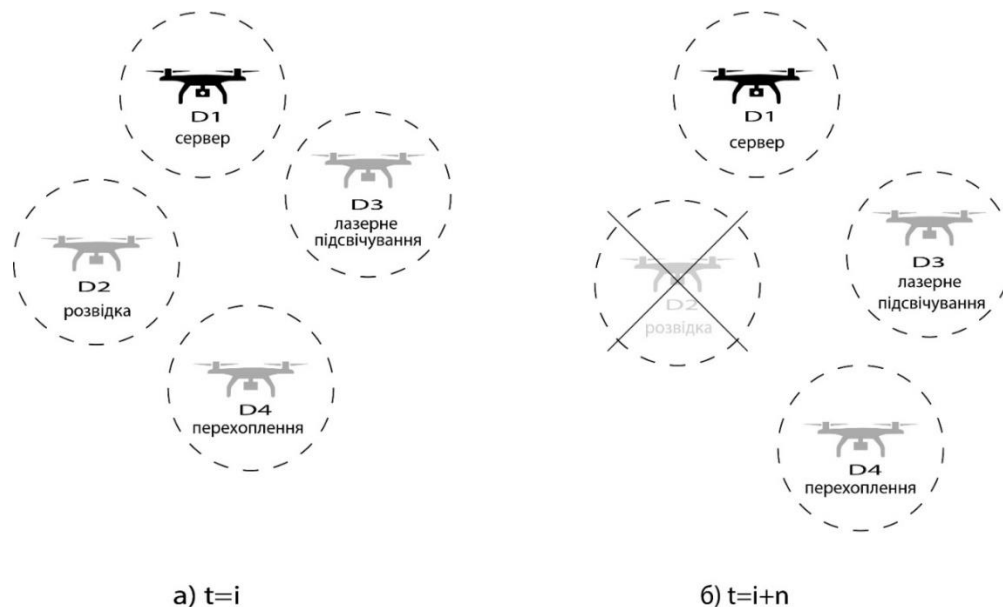


Рис. 6. Схема реалізації взаємодії дронів у певний момент часу

На рис. 6, а показано, як дрони виконують завдання в певний момент часу $t=i$. Основний дрон (D1) керує іншими апаратами: D2 виконує розвідувальні завдання, D3 – лазерне підсвічування, D4 – перехоплення.

На рис. 6, б показано ситуацію в момент часу $t=i+n$, коли один із дронів (D2) був збитий або вийшов з ладу. Основний дрон (D1) перерозподіляє завдання між іншими апаратами, і завдання збитого дрона (D2) виконує допоміжний БПЛА (D3).

Запропонована схема взаємодії дронів забезпечує гнучкість і стійкість системи управління в умовах мінливого середовища. Перерозподіл завдань у разі виходу з ладу одного з дронів дозволяє зберегти ефективність операцій та швидко адаптуватися до нових умов.

Такий підхід значно підвищує надійність системи та мінімізує втрати функціональних можливостей у критичних ситуаціях. Основний дрон (лідер) виконує ключову роль у забезпеченні координації та управління групою дронів, що дає змогу максимально ефективно використовувати доступні ресурси.

Результати моделювання показали, що застосування цієї схеми взаємодії значно підвищує ефективність виконання завдань, зокрема в умовах складної оперативної обстановки. Перспективи подальших досліджень передбачають оптимізацію

алгоритмів розподілу завдань і вивчення можливостей інтеграції додаткових функцій, таких як автоматичне виявлення загроз і реагування на них.

Упровадження зазначеного підходу в реальній системі керування безпілотними літальними апаратами може значно впливати на розвиток технологій автономного управління та підвищення ефективності виконання різних операцій.

У процесі визначення траєкторії перехоплювача використовувався метод наведення за принципом "крива погоні". Цей метод був обраний, оскільки він відносно простий у реалізації, а також його можна застосовувати як у системах наведення самонавідних ракет, так і в БПЛА.

Метод наведення за кривою погоні схожий на гонитву собаки за зайцем, тому в літературі його також називають методом "крива переслідування", або "собача крива". Існує два основні випадки застосування цього методу: переслідування цілі, що віддаляється, і переслідування цілі, що наближається (рис. 7).

У першому випадку, якщо дрон має достатню дальність польоту та швидкість більшу, ніж швидкість цілі, він може вразити ціль. У другому випадку під час наближення до цілі різко зростає швидкість повороту. Це навантаження може бути надмірним для корпусу ракети, що, імовірно,

спричинить його руйнування. У реальності керуюча сила, створювана кермом напрямку, збільшується лише до певного значення. Отже, може настати момент, коли кермо літального апарата відхилиться до упору, але максимальна керуюча сила, що виникає в цьому разі, виявиться недостатньою для необхідної зміни напрямку руху.

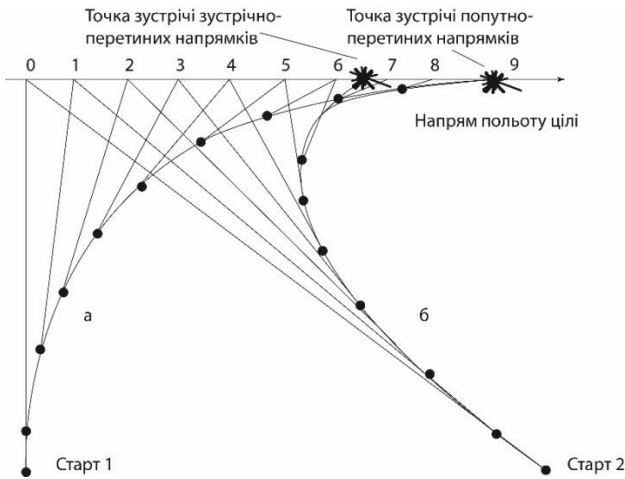


Рис. 7. Криві погоні за попутно-перетинних та зустрічно-перетинних напрямків польоту

Із цього моменту дрон рухатиметься по колу мінімального радіуса, що відповідає граничній керуючій силі. Наведення припиниться, оскільки літальний апарат не встигатиме розгортатися за ціллю. Ціль за деякий час вийде з поля зору координатора, після чого наведення стає неможливим [15].

Щоб вивести рівняння лінії, оберемо систему координат, у якій вісь абсцис проходить крізь початкове положення точок P і A , у цьому разі точка A розташована на початку системи координат xAy . Співвідношення постійних швидкостей точок позначимо літерою k .

Якщо припустити, що за нескінченно малий проміжок часу точка P пройшла відстань dS , а точка A – відстань dS_i , тоді за поставленою вище умовою матимемо співвідношення $dS = kdS_i$, або

$$\sqrt{dx^2 + dy^2} = k\sqrt{d\xi^2 + d\eta^2}. \quad (1)$$

Далі необхідно виразити $d\xi$ і $d\eta$ через x , y та їх диференціали. За умовою координати точки P мають задовольняти рівняння дотичної до шуканої кривої, тобто

$$\eta - y = \frac{dy}{dx}(\xi - x). \quad (2)$$

Додаючи до цього рівняння, задане умовою рівняння траєкторії $F(\xi, \eta)$ руху "втікача", можна визначити з отриманої системи рівняння ξ і η . Після підставлення цих значень у диференційне рівняння воно запишеться у вигляді

$$\Phi\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}\right) = 0. \quad (3)$$

Постійні інтегрування можуть бути знайдені з початкових умов ($y = 0; y' = 0$) (коли $x = 0$).

Загалом для довільно заданої кривої $F(\xi, \eta)$ знайти рішення отриманого рівняння досить складно. Задача істотно спрощується, якщо розглянути простий випадок, коли траєкторія "втікача" є прямою.

Розглянемо випадок $A0(0,0)$, $P0(0,1)$ за умови руху "втікача" вздовж осі x і якщо $k > 0$. У довільний момент часу "втікач" завжди перебуває на дотичній до кривої траєкторії руху "переслідувача". Отже,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-y}{a-x}. \quad (4)$$

На підставі цього запишемо диференційне рівняння

$$y + y'(a-x) = 0, \quad (5)$$

де $y > 0$.

З умови $a = V \cdot t$ випливає $\frac{y}{y'} + Vt = x$, після диференціювання за часом $\dot{y} = y' \cdot \dot{x}$ і $\dot{y}' = y'' \cdot \dot{x}$, на підставі яких знаходимо

$$\dot{x} = \frac{dx}{dy} = \frac{V \cdot y'^2}{y \cdot y''}. \quad (6)$$

Запишемо вираз для визначення довжини кривої

$$l = Wt = k \int_0^x \sqrt{1 + (y')^2} dx. \quad (7)$$

З виразів $dx^2 + dy^2 = W^2 dt^2$ і

$$\omega^2 = \frac{dx^2}{dt^2} + \frac{dy^2}{dt^2} = \dot{x}^2 + (y' \cdot \dot{x})^2 \text{ випливає } \dot{x} = \frac{W}{\sqrt{1 + y'^2}}.$$

Аналогічно проводимо диференціювання за y :

$$y''^n - k \cdot \frac{y'^2}{y} \cdot \sqrt{1 + y'^2} = 0. \quad (8)$$

Рішення з підставленням $u = x' = \frac{1}{y'}$, $y'' = \frac{-1}{u^3} \frac{du}{dx}$

за умови поділу змінних приводить до

$$\frac{-du}{\sqrt{1+u^2}} = k \cdot \frac{dy}{y}, \text{ після інтегрування отримуємо}$$

$$\arcsin u = k \cdot \ln y + C.$$

Далі після використання формального визначення $\sin h$ з $C_1 = e^C$ маємо

$$x' = \frac{dx}{dy} = \frac{1}{2} \left[(C_1 \cdot y)^k - (C_1 \cdot y)^{-k} \right].$$

Ще раз інтегруємо з визначенням постійної інтегрування C_2 .

З початкових умов $\left. \frac{dx}{dy} \right|_{y=1} = 0$ випливає $C_1 = 1$,

а також $x|_{y=1} = 0$. Отримуємо $C_2 = \frac{k}{1-k^2}$ або

$$x(y) = \frac{1}{2} \left(\frac{y(1+k)}{(1+k)} - \left\{ \frac{y^{(1+k)}}{(1-k)} \right\} \right) + \left\{ \frac{k}{1-k^2} \right\} \begin{cases} k \neq 1 \\ k = 1 \end{cases}.$$

Результати досліджень та їх обговорення

У статті проаналізовано ефективність застосування методу *Cascade DataHub* у контексті керування безпілотними літальними апаратами. Практична реалізація цього методу демонструє, як інтеграція різноманітних джерел інформації в реальному часі

може значно покращити якість і швидкість управлінських рішень у динамічних умовах. Встановлено, що *Cascade DataHub* забезпечує більшу стабільність зв'язку між апаратами, що важливо для місій із високими вимогами до координації та часової синхронізації.

На мапі (рис. 8) зображені отримані траєкторії польоту. У нижній частині форми розташовуються елементи керування швидкістю відтворення анімаційної моделі та старту / паузи демонстрації. Під час моделювання користувачеві надається спрощений візуальний процес переслідування, нейтралізації та повернення на базу перехоплювача. На формі червоним кольором позначено перехоплювач, а зеленим – ціль. У процесі демонстрації користувач може змінити масштаб часу за допомогою керувального елемента в нижній лівій ділянці форми, за замовчуванням візуалізація відбувається в реальному часі. Після нейтралізації ціль забарвлюється в чорний колір, візуалізація призупиняється та виводиться повідомлення про успішність перехоплення. Після цього перехоплювач починає повертатися назад на базу запуску.

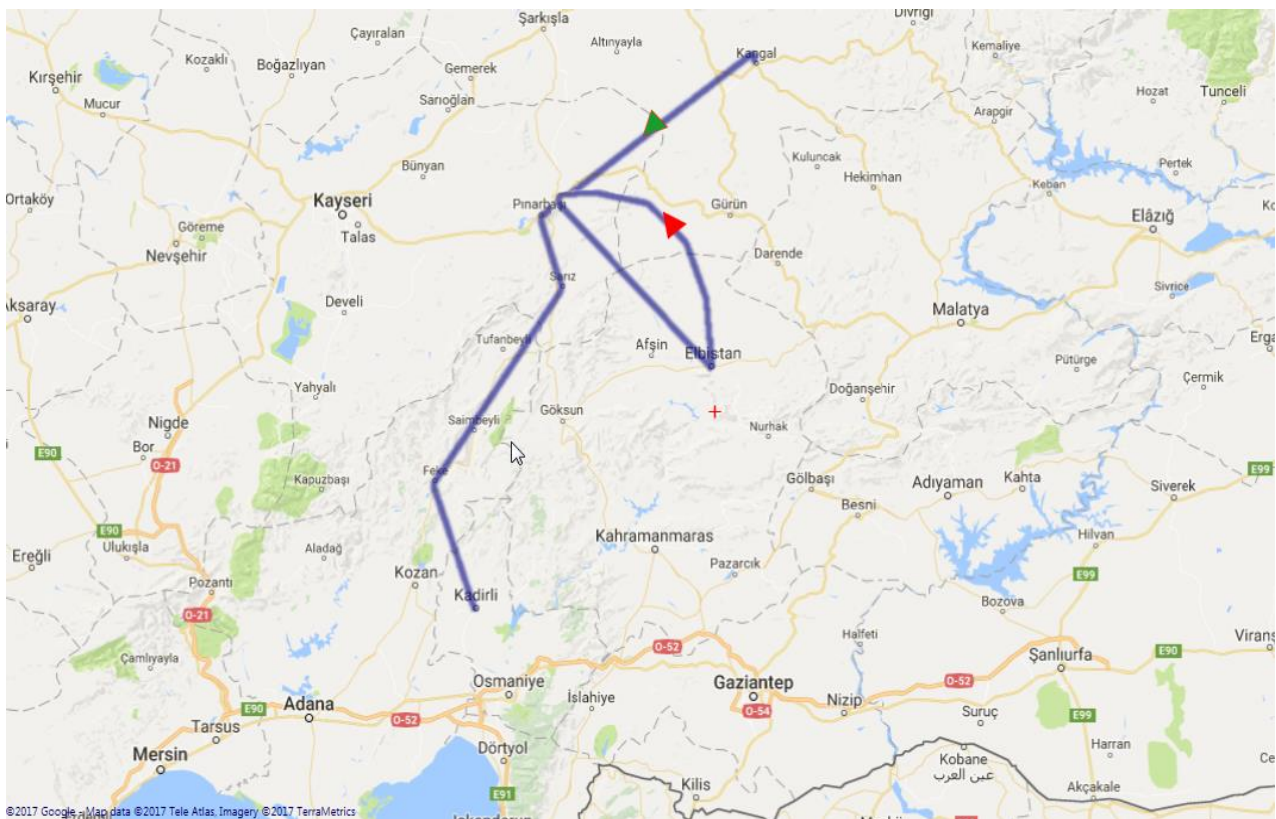


Рис. 8. Демонстрація перехоплення цілі

Переходячи до форми графічних звітів (рис. 9), користувач може переглянути показники метрики, отримані в процесі моделювання способом вибору

відповідного покажчика та його належності (ціль або перехоплювач).

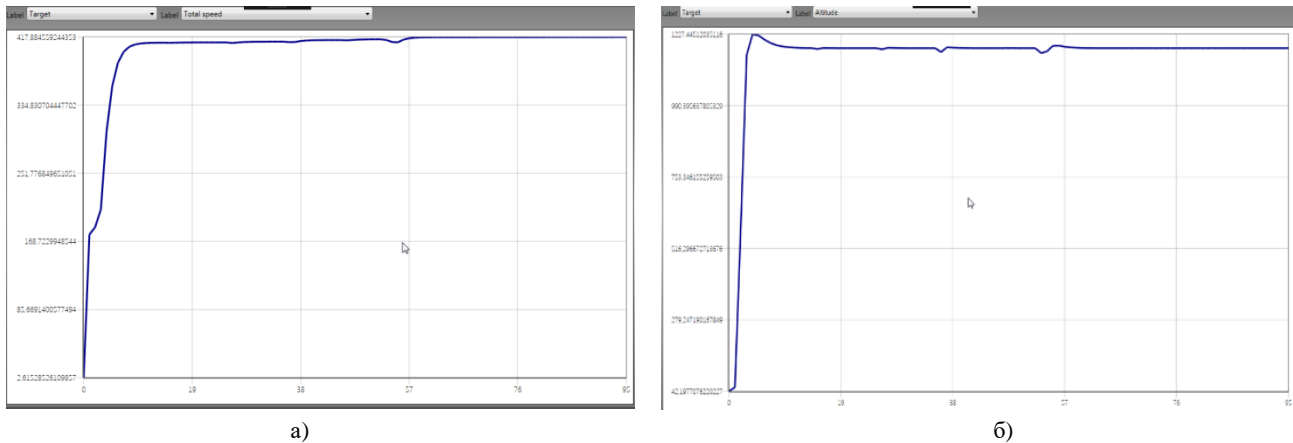


Рис. 9. Графіки: а) висота польоту дрона; б) швидкість польоту дрона

Основні результати передбачають зниження часу реакції системи на команди, підвищення точності виконання завдань і зменшення втрат інформації під час її передачі. Також було зазначено, що застосування цього методу сприяє ефективнішому розподілу ресурсів між апаратами, що дозволяє використовувати їх у більш складних місіях без збільшення витрат на обслуговування та управління.

Обговорення цих результатів вказує на значні переваги методу *Cascade DataHub* перед традиційними підходами, особливо в контексті масштабованих операцій із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Подальші дослідження мають зосередитися на розвитку алгоритмів адаптації до змінних умов експлуатації та інтеграції з іншими системами управління для створення більш гнучких і робастних систем.

Висновки

Унаслідок проведених досліджень підтверджено ефективність методу *Cascade DataHub* для керування безпілотними літальними апаратами в децентралізованій моделі. Основні результати показали, що метод забезпечує значне скорочення часу реакції системи на команди, підвищення

точності виконання завдань і зменшення втрат інформації під час її передачі. Упровадження методу *Cascade DataHub* дає змогу ефективно розподіляти ресурси між автоматизованими одиницями, що є критично важливим для місій із високими вимогами до координації та часової синхронізації.

Усебічно проаналізовано сучасні моделі та методи управління групою дронів з огляду на децентралізовані підходи. Розроблені алгоритми оптимізації траєкторії перехоплення спрямовані на підвищення точності та надійності керування складними автоматизованими системами завдяки інтеграції даних у реальному часі. Дослідження виявило потенційні переваги запропонованого методу в контексті зменшення часу реакції систем і підвищення точності ухвалення рішень, що сприяє ефективнішому функціонуванню автоматизованих систем.

Подальші дослідження мають зосередитися на оптимізації алгоритмів адаптації до змінних умов експлуатації та інтеграції з іншими системами управління для створення більш гнучких і робастних систем. Упровадження окресленого підходу в реальні системи керування безпілотними літальними апаратами може значно впливати на розвиток технологій автономного управління та підвищення ефективності виконання різних операцій.

Список літератури

1. Taye M. M. Understanding of Machine Learning with Deep Learning: Architectures, Workflow. *Applications and Future Directions. Computers*. 2023. Vol. 12. P. 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers12050091>

2. Xu Y., Ke Q., Jiang Z., Zhai Y., Genovese A., Piuri V. Dual attention and focus loss using UAV. Piuri Labs. 2023. URL: <https://piurilabs.di.unimi.it/Papers/tai23.pdf>
3. Bhole D., Domle M., Motghare M., Vaidya A. P. P. M. Developing mobile application to program and control robot. IRJMETS. 2023. URL: https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issue_12_december_2023/47953/final/fin_irjmets1704292742.pdf
4. Fillan J. Autonomous inspection and maintenance missions with AI planning and the ROSPlan framework. NTNU Open. 2023. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3094654>
5. Ali Z. A. Introductory chapter: Motion planning for dynamic agents. InTechOpen. 2024. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/1178552>
6. Rati B., Rajendra P., Parvez F., Jyoti G. Blockchain-enabled secure and efficient data sharing scheme for trust management in healthcare smartphone network. *The Journal of Supercomputing*. 2023. Vol. 79. P. 16233–16274. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05272-6>
7. Куценко Л. М., Семків О. М., Калиновський А. Я., Пікрасов М. М., Сухарькова О. І. Геометричне моделювання мобільної установки для запуску безпілотних літальних апаратів. *Технічні науки*. 2017. №12(41). С. 117–120. DOI: 10.15587/2313-8416.2017.117920
8. Majumdar A. K. Fundamentals of Free-Space Optical Communications Systems, Optical Channels, Characterization, and Network/Access Technology. *Optical Wireless Communications for Broadband Global Internet Connectivity*. 2019. P. 87–118. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813365-1.00004>
9. Kabir H., Tham M.-L., Chang Y. C. Internet of robotic things for mobile robots: Concepts, technologies, challenges, applications, and future directions. *Digital Communications and Networks*. 2023. Advance online publication. P. 1–39. DOI:10.1016/j.dcan.2023.05.006
10. Gielis J., Shankar A., Prorok A. A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems. *Current Robot Reports*. 2022. Vol. 3(3). P. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9
11. Gielis J., Shankar A., Prorok A. A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems // *Current Robot Reports*. 2022. Vol. 3(3). C. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9
12. Pathak R., Barzin R., Bora G. C. Data-driven precision agricultural applications using field sensors and Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Precision Agriculture and Aviation*. 2018. Vol. 1(1). P. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20180101.0004>
13. Tahir A. Formation Control of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles. Doctoral Dissertation. University of Turku, Turku, Finland. 2023. URL: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-9411-3>. ISBN: 978-951-29-9411-3.
14. Kong X., Yuhan W., Wang H. Edge Computing for Internet of Everything: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022, December. Advance online publication. P. 23472–23485. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3200431>
15. Liao S.-l., Zhu R.-m., Wu N.-q., Shaikh T. A., Sharaf M., Mostafa A. M. Path planning for moving target tracking by fixed-wing UAV. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16(4). P. 811–824. DOI: 10.1016/j.dt.2019.10.010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914719304817>

References

1. Taye, M.M. (2023), "Understanding of Machine Learning with Deep Learning: Architectures, Workflow". *Applications and Future Directions. Computers 2023.*, Vol. 12, 91 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers12050091>
2. Xu, Y., Ke, Q., Jiang, Z., Zhai, Y., Genovese, A. and Piuri, V. (2023), 'Dual attention and focus loss using UAV', *Piuri Labs*. available at: <https://piurilabs.di.unimi.it/Papers/tai23.pdf>
3. Bhole, D., Domle, M., Motghare, M. and Vaidya, A.P.P.M. (2023), "Developing mobile application to program and control robot", IRJMETS. available at: https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issue_12_december_2023/47953/final/fin_irjmets1704292742.pdf
4. Fillan, J. (2023), "Autonomous inspection and maintenance missions with AI planning and the ROSPlan framework". NTNU Open. available at: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3094654>
5. Ali, Z.A. (2024), "Introductory chapter: Motion planning for dynamic agents", InTechOpen. available at: <https://www.intechopen.com/chapters/1178552>
6. Rati, B., Rajendra, P., Parvez, F. and Jyoti, G. (2023), "Blockchain-enabled secure and efficient data sharing scheme for trust management in healthcare smartphone network", *The Journal of Supercomputing*, Vol. 79, P. 16233–16274. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05272-6>

7. Kutsenko, L.M., Semkiv, O.M., Kalinovskiy, A.Y. and Pikasov, M.M. (2017), "Geometric Modeling of a Mobile Installation for Launching Unmanned Aerial Vehicles". *Technical Sciences*, №12(41). P. 117–120. DOI: 10.15587/2313-8416.2017.117920
8. Majumdar, A.K. (2019), "Fundamentals of Free-Space Optical Communications Systems, Optical Channels, Characterization, and Network/Access Technology", *Optical Wireless Communications for Broadband Global Internet Connectivity*, P. 87–118. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813365-1.00004>
9. Kabir, H., Tham, M.-L. and Chang, Y.C. (2023), "Internet of robotic things for mobile robots: Concepts, technologies, challenges, applications, and future directions", *Digital Communications and Networks*. Advance online publication. P. 1–39. DOI:10.1016/j.dcan.2023.05.006
10. Gielis, J., Shankar, A. and Prorok, A. (2022), "A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems", *Current Robot Reports*, Vol. 3(3), P. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9
11. Gielis J., Shankar A., Prorok A. A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems // Current Robot Reports. 2022. Vol. 3(3). C. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9
12. Pathak, R., Barzin, R. and Bora, G.C. (2018), "Data-driven precision agricultural applications using field sensors and Unmanned Aerial Vehicle", *International Journal of Precision Agriculture and Aviation*, Vol. 1(1), P. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20180101.0004>
13. Tahir, A. (2023), "Formation Control of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles", Doctoral Dissertation, University of Turku, Turku, Finland. available at: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-9411-3>. ISBN: 978-951-29-9411-3.
14. Kong, X., Yuhan, W. and Wang, H. (2022, December), "Edge Computing for Internet of Everything: A Survey", *IEEE Internet of Things Journal*. Advance online publication. P. 23472–23485. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3200431>
15. Liao, S.-l., Zhu, R.-m., Wu, N.-q., Shaikh, T. A., Sharaf, M. and Mostafa, A. M. (2020), "Path planning for moving target tracking by fixed-wing UAV", *Defence Technology*, Vol. 16(4), P. 811–824. DOI: 10.1016/j.dt.2019.10.010. available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914719304817>

Надійшла (Received) 09.05.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Бінко Ігор Вікторович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: i.v.binko@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-5638-4292>

Шевель Володимир Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: v.shevel@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0534-0242>

Биков Андрій Миколайович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: a.bykov@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7184-4994>

Крицький Дмитро Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: d.krickiy@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0194>

Binko Ihor – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, PhD student at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

Shevel Volodymyr – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, Associate Professor at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

Bykov Andrii – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, PhD student at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

Krytskyi Dmytro – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, Associate Professor at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

ANALYSIS OF DECENTRALIZED DRONE CONTROL MODEL AND INTERCEPTION TRAJECTORY CALCULATION

Subject matter: This article is devoted to the study of applying the innovative Cascade DataHub method for optimizing the management of automated mobile systems, especially unmanned aerial vehicles. The work analyzes both theoretical and practical aspects of implementing this method across various application sectors. **Goal:** The objective of the study is to conduct a comprehensive analysis of contemporary models and methods for managing a group of drones, focusing on decentralized approaches. Additionally, the study aims to develop effective algorithms for optimizing the interception trajectory, with the goal of enhancing the accuracy and reliability of managing complex automated systems through increased real-time data integration. The research is directed towards identifying the potential advantages of this method in reducing system response times and improving decision-making accuracy. **Tasks:** The main tasks of the research include the development of comprehensive algorithms for rapid processing and analysis of large volumes of data from various sources, creating reliable communication protocols to ensure connection stability under extreme conditions. Another important task is the integration of these developments into practical applications, which will increase their effectiveness in real operational conditions. **Methods:** To achieve the set goals, advanced techniques of mathematical modeling, statistical analysis, machine learning, and deep learning are used. The application of these techniques ensures high accuracy and reliability of the management systems. **Results:** During the research, it was found that the Cascade DataHub method significantly reduces the response time of systems to commands, increases the accuracy of task execution, and decreases data loss during their transmission. The implementation of this method also contributes to a more efficient distribution of resources among automated units, which is critically important for missions requiring high coordination and time synchronization. **Conclusions:** A comprehensive analysis of contemporary models and methods for managing a group of drones with a focus on decentralized approaches has been conducted. Effective algorithms for optimizing the interception trajectory have been developed, aimed at enhancing the accuracy and reliability of managing complex automated systems through real-time data integration. The study revealed the potential advantages of the proposed method in reducing system response times and improving decision-making accuracy, contributing to the more efficient functioning of automated systems.

Keywords: Cascade DataHub; automated systems; machine learning; real-time management; deep learning.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бінько І. В., Шевель В. В., Биков А. М., Крицький Д. М. Аналіз децентралізованої моделі управління дронів і розрахунок траєкторії перехоплення. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 2 (28). С. 33–47. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.033>

Binko, I., Shevel, V., Bykov, A., Krytskyi, D. (2024), "Analysis of decentralized drone control model and interception trajectory calculation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (28), P. 33–47. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.033>
