

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-16>

УДК 004.388 : 004.031.43 : 004.383.8

ТАНАСІЙЧУК Степан  
Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0003-2989-3183>  
e-mail: [stepan.tanasiychuk@stfalcon.com](mailto:stepan.tanasiychuk@stfalcon.com)

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Наголошено, що в даний час, безпілотні літальні апарати (БПЛА) використовуються в широкому діапазоні цивільних ролей, починаючи від пошуку та порятунку, спостереження, моніторингу дорожнього руху, моніторингу погоди та пожежогасіння, до персональних безпілотників та ділової фотографії на основі безпілотників, а також відеозйомки, сільського господарства та навіть служб доставки. БПЛА мають широке використання у війні з РФ. Проаналізовано найбільш поширені методи керування БПЛА. Для основних методів дано опис. Сказано, що серед інтелектуальних моделей, які описують порядок переміщення БПЛА у просторі можна назвати метод побудови маршрутів БПЛА. В основі методу лежить використання математичного очікування інформаційної ентропії для оцінки оптимальності альтернативних варіантів маршруту. Останнім часом все частіше використовують триангуляції Делоне для вирішення завдання планування маршрутів БПЛА. У цьому випадку маршрут формується у вигляді набору проміжних пунктів маршруту (ППМ), проходження яких є обов'язковим. На характер маршруту руху БПЛА між умовними точками на карті жорстких обмежень не накладається, що дозволяє будувати траєкторії, максимально враховують динамічні можливості БПЛА. Однак, відомі методи планування маршруту, що базуються на триангуляції Делоне не враховують такі важливі особливості: наявність невизначеності в розташуванні джерел потенційної загрози (постів протиповітряної оборони противника); наявність у складі групи БПЛА різних типів, що передбачає їх ранжування за ступенем важливості; неоднорідність складу наземних цільових об'єктів, що вимагає в процесі планування обліку ступеня важливості кожного з них. Завдяки технічному прогресу у сфері супутникових технологій нині реалізуються проекти низькоорбітальних систем (LEO). Kuiper від Amazon, Starlink від SpaceX і OneWeb – це три з основних розроблюваних проектів у групувань супутників LEO наступного покоління, які обіцяють забезпечити високошвидкісне широкосмугове з'єднання з малою затримкою по всьому світу. Констатовано, що перспективним інноваційним обладнанням для керування БПЛА є використання бездротового зв'язку, що поєднує конвергенцію в наземних, супутникових та безпілотних станціях. Особливості структури атмосфери і переваги супутникових технологій дають змогу застосовувати багаторівневі висотні моделі, за допомогою яких можна збільшити пропускну здатність.

Ключові слова: робот, дрон, БПЛА, робототехніка, автоматизація, система автоматичного управління, управління на дистанції.

TANASIYCHUK Stepan  
Khmelnitskyi National University

## ANALYSIS OF METHODS AND MEANS OF CONTROLLING AUTONOMOUS UNMANNED AERIAL VEHICLES

The current paper highlights the widespread utilization of unmanned aerial vehicles (UAVs) across a broad spectrum of civilian roles, ranging from search and rescue, surveillance, traffic monitoring, weather tracking, and firefighting, to personal drones, business photography based on UAVs, as well as videography, agriculture, and even delivery services. UAVs are extensively employed in warfare against the Russian Federation. The most common UAV control methods are analyzed, with detailed descriptions provided for the key approaches. It is emphasized that among the intellectual models describing UAV spatial movement, the route-planning method stands out. This method is based on the application of mathematical expectation of informational entropy to evaluate the optimality of alternative route options. In recent times, Delaunay triangulation is increasingly employed to solve UAV route-planning tasks. In this case, the route is defined as a set of intermediate route points (IRPs) that must be traversed. The nature of the UAV's movement between arbitrary points on the map does not impose rigid constraints, thus enabling trajectory generation that maximally considers UAV's dynamic capabilities. However, known route-planning methods based on Delaunay triangulation fail to account for crucial aspects such as uncertainty in the locations of potential threat sources (enemy air defense posts), the presence of different types of UAVs within a group, requiring their prioritization, and the heterogeneity of ground target objects, necessitating the consideration of the importance level of each. Thanks to advancements in satellite technologies, projects involving low Earth orbit (LEO) systems are currently being implemented. Amazon's Kuiper, SpaceX's Starlink, and OneWeb are three major upcoming projects of LEO satellite clusters promising high-speed broadband connectivity with minimal latency worldwide.

The paper concludes that a promising innovative solution for UAV control lies in wireless communication, which converges ground, satellite, and unmanned stations. Atmospheric structure peculiarities and advantages of satellite technologies enable the application of multilevel altitude models, enhancing throughput capacity.

Keywords: robot, drone, UAV, robotics, automation, automatic control system, remote control.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В сучасних воєнних умовах, безпілотні літальні апарати (БПЛА) корисні в численних сферах застосування, зокрема недоступних або небезпечних для людини, таких як патрулювання великих просторів, виконання розвідувальних місій та знищення живої сили ворога. Найбільш поширеним їх використанням є

повітряна розвідка. Завдяки оперативному наданню повної, достовірної інформації про противника досягається успішність ведення бойових дій. Складність у прийнятті обґрунтованого рішення щодо побудови доцільного маршруту польоту обґрунтовується застосуванням БПЛА в умовах обмежень, льотних та технічних можливостей апарата [3]. Незважаючи на значний обсяг досліджень в області управління рухом безпілотних літальних апаратів (БПЛА), завдання вдосконалення існуючих методів та засобів як і раніше залишається актуальною.

### Формулювання цілей статті

**Мета дослідження** полягає в аналізі методів і засобів керування автономними безпілотними літальними апаратами.

### Виклад основного матеріалу

Збройна агресія РФ проти України характеризується активним застосуванням БПЛА для вирішення завдань розвідки, вогневого ураження противника (ВУП), корегування вогню артилерії та інших спеціальних завдань. Особливістю війни стало широке застосування міні-БПЛА тактичного призначення типу DJI Mavic чи DJI Spark, як для розвідки та корегування вогню, так і для виконання інших бойових завдань. Наприклад, застосовуються міні-БПЛА для скидання пляшок із запальною сумішшю або саморобних міні-авіабомб, які кріпляться до підвісу, надрукованого на 3D-принтері, а самі авіабомби є кумулятивними або осколковими ручними гранатами або гранатами ВОГ-17, оснащеними стабілізаторами, також надрукованими на 3D-принтері. Також ворог широко застосовує як модифіковані БПЛА («Тахіон», «Елерон – 3», «Леер», «Орлан – 10», «Орлан – 30», «Форпост», «Гранат», «Застава», «ZALA») так і малорозмірні БПЛА-камікадзе («КУБ-БЛА», «Ланцет – 1» та «Ланцет – 3»), що створює постійні загрози з повітря у зв'язку з їх малою помітністю та складністю виявлення, тому вдосконалення методів керування такими літальними апаратами є надзвичайно важливим не тільки в період війни, але й після її закінчення [1].

Основними способами застосування безпілотних літальних апаратів є: обліт заданого рубежу; обліт заданої точки; пошук в заданому кутовому секторі; пошук цілі на заданому маршруті польоту.

Спосіб обльоту заданого рубежу. Даний спосіб використовується в умовах активної протидії ППО (зазвичай до активної фази бойових дій) та під час ведення радіотехнічної розвідки без перетину лінії бойового зіткнення (ЛБЗ), а також у випадках, коли координати об'єкта відомі і потрібно уточнити його стан. Переваги способу: висока прихованість ведення розвідки; використання пасивних засобів оптико-електронної та радіотехнічної розвідки дозволяє суттєво знизити ризик втрати БПЛА під час його польоту в оперативній та стратегічній глибинах території противника.

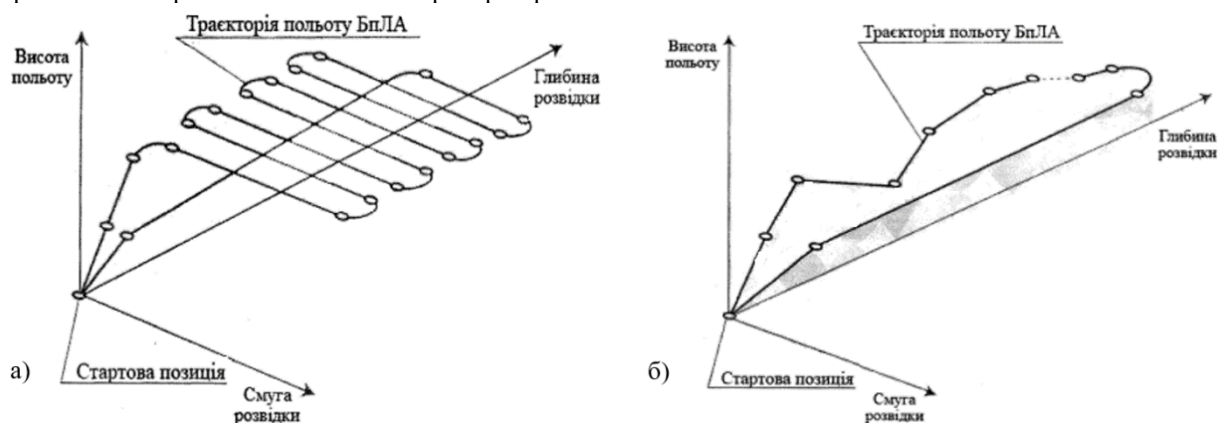


Рис. 1. – Управління БПЛА при пошуку об'єктів (цілей) у визначеному районі а) та за визначеним маршрутом польоту б)

Недоліками способу є епізодичність добування розвідувальної інформації.

Спосіб обльоту заданої точки. Даний спосіб використовується для розвідки конкретних об'єктів противника на усю глибину його бойових порядків, під час дорозвідки та контрольної розвідки цілей.

Перевагами способу є забезпечується найбільш висока прихованість дій БПЛА; можливість збільшення глибини розвідки. Недоліками способу є малий обсяг розвіданої інформації, отриманої за один виліт.

Спосіб пошуку в заданому кутовому секторі. Даний спосіб використовується під час пошуку одночасно декількома БПЛА в умовах невизначеності стосовно розташування противника. Перевагами способу є максимальна швидкість добування даних щодо положення і дій сторін в широкій смузі; високий темп оновлення інформації; можливість виявлення рухомих та обмежено рухомих об'єктів на території противника на віддаленнях, коли імовірно місце перебування об'єктів розвідки невідоме. Недоліками даного способу є складність організації застосування та контролю одночасно за декількома БПЛА.

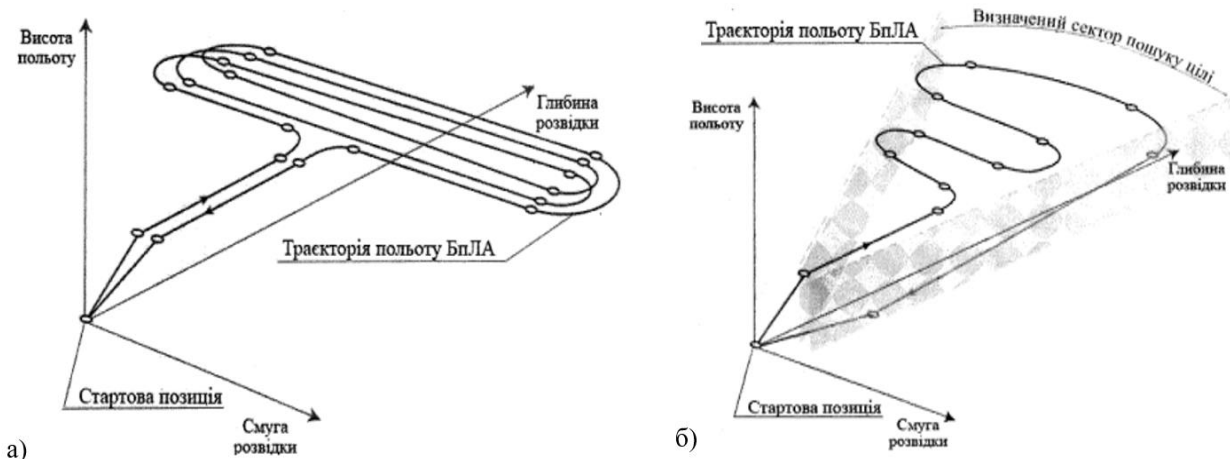


Рис. 2. – Управління БПЛА при пошуку об'єктів (цілей) баражуванням у визначеному районі а) та пошук об'єктів (цілей) у визначеному секторі б)

Спосіб пошуку цілі на заданому маршруті польоту. Даний спосіб застосовується за наявності первинної інформації щодо місця положення одного або групи об'єктів і за умов, у яких забезпечується однозначне виявлення положення або напрямку руху об'єктів на місцевості. Перевагами способу є максимальна швидкість добування даних щодо положення та дій сторін в широкій смузі розвідки; високий темп оновлення інформації; можливість виявлення рухомих та обмежено рухомих об'єктів на території противника. Недоліком даного способу є підвищення імовірності виявлення та втрати БПЛА.

В даний час, серед інтелектуальних моделей, які описують порядок переміщення БПЛА у просторі можна назвати метод побудови маршрутів БПЛА. В основі методу лежить використання математичного очікування інформаційної ентропії для оцінки оптимальності альтернативних варіантів маршруту. Останнім часом все частіше використовують триангуляції Делоне для вирішення завдання планування маршрутів БПЛА. У цьому випадку маршрут формується у вигляді набору проміжних пунктів маршруту (ППМ), проходження яких є обов'язковим. На характер маршруту руху БПЛА між умовними точками на карті жорстких обмежень не накладається, що дозволяє будувати траєкторії, максимально враховують динамічні можливості БПЛА.

Однак, відомі методи планування маршруту, що базуються на триангуляції Делоне не враховують такі важливі особливості: наявність невизначеності в розташуванні джерел потенційної загрози (постів протиповітряної оборони противника); наявність у складі групи БПЛА різних типів, що передбачає їх ранжування за ступенем важливості; неоднорідність складу наземних цільових об'єктів, що вимагає в процесі планування обліку ступеня важливості кожного з них [6].

Найбільш поширеними методами управління БПЛА є: «ведучий/лідер – основна група», віртуальні лідери, векторні поля проходження шляху (path following), повністю децентралізовані підходи на основі консенсусу, підходи на основі нечіткої логіки. Потрібно відзначити, що в багатьох роботах, що досліджують саме децентралізоване управління моделі динаміки БПЛА розглядаються в спрощеному вигляді як точкові маси або лінійні інтегратори. Внаслідок таких спрощень одержувані закони управління виявляються працездатними лише поблизу положення рівноваги через відсутність асимптотичної стійкості в цілому. При такому керуванні БПЛА існує одностороннє спрямоване керування за типом «відкритий ланцюг», але не має зворотного зв'язку від основної групи БПЛА. Відповідно, бажана дистанція задається тільки на лідерському БПЛА, при цьому команда управління від ведучого передається до останнього БПЛА по ланцюжку.

Методи відеонавігації поділяються на розрахунок пройденого шляху на основі аналізу потоку відеоданих, що надходять з оптико-електронних приладів спостереження. У першому кадрі відеопотоку фіксуються певні характерні точки в просторі і далі відбувається відстеження їх переміщення в кадрі при переміщенні БПЛА. За характером переміщення програма визначає, як змінюється положення і орієнтація самої камери. Основним обмеженням даного методу є можливість тільки відносного визначення координат та орієнтації, що може призвести до зростання помилки навігації з часом [2].

Поширеним є метод точної прив'язки по рельєфу по стереоефекту, що виникає при русі камери БПЛА. Даний спосіб дозволяє частково компенсувати недоліки першого методу, адже використовуючи перекриття потоку фото-відеоданих, відновлюється рельєф, він порівнюється із закладеними в пам'ять даними, у випадку «впізнання місцевості» визначаються точні координати і орієнтація в просторі. Основна перевага перед попереднім методом полягає в можливості знаходження не тільки відносного, але і абсолютного положення камери, оскільки знання карти прив'язує камеру до конкретних точок на місцевості з відомими абсолютними координатами. Це призводить до того, що помилка навігації не зростає з часом. Основний недолік даного методу – чутливість до занадто великих помилок вихідних координат камери,

отриманих від інерційних навігаційних приладів, які метод повинен потім уточнювати. Також зберігається і такий недолік першого методу, як неможливість роботи над водною або піщаною поверхнею і виникнення істотної помилки за відсутності явно вираженого рельєфу.

Метод точної прив'язки за еталонними фотографіями ґрунтується на тому, що кадри відео порівнюються із закладеними в пам'ять зображеннями ділянок маршруту і тільки у випадку «впізнання місцевості» відбувається визначення точних координат і орієнтації в просторі. Цей метод забезпечує високу точність визначення абсолютних координат навіть при відсутності рельєфу. Він також дозволяє знайти абсолютне положення камери, навіть коли її приблизні координати взагалі невідомі. Це досягається шляхом сканування всієї бази даних зі знімками місцевості і порівняння їх з поточним знімком. Крім того, маючи «прив'язаний» знімок можна з високою точністю визначити координати наземних об'єктів, виявлених оптико-електронною апаратурою.

Крім того, в даний час основним методом позиціонування БПЛА в просторі є глобальна система навігації при якій приймач встановлюється на борт БПЛА і отримує дані з супутників. Для збільшення точності показань даних з глобальної системи Global Positioning System зараз активно стали використовуватися мережі наземних стаціонарних вишок. Такі вишки є реперними для системи навігації БПЛА, вони визначають похибки показань глобальної системи навігації і відправляють поправки по радіоканалу на приймач БПЛА. Однією з поширених, на даний момент, систем такого типу є DGPS (differential global positioning system). Існує ряд досліджень, в яких пропонується використання стаціонарних вишок не тільки в якості коректорів, але і як основне джерело для отримання даних про місцезнаходження [5].

Аналізуючи методи позиціонування БПЛА в просторі слід відмітити, що відомий цілий ряд алгоритмів, які використовують для локалізації цілей по пеленгу. Найбільш поширений алгоритм використовує розширений фільтр Калмана або навіть набір таких фільтрів, що відповідають різним діапазонам дальності. Застосування спеціального рандомізованого тестового сигналу у вхідному каналі дає можливість визначити параметри об'єкту управління, коли розглядається модель об'єкту з майже довільними адитивними перешкодами.

На даний час найбільш поширеними є такі системи і алгоритми уточнення місцезнаходження БПЛА, які базуються на основі калманівської фільтрації вимірювань пеленгаційного типу, позиціонування БПЛА за даними відстаней до одиниць мережі вишок, встановлення комплексу інерційних систем з датчиками, згідно яких автопілот отримує інформацію про повітряну швидкість, крени, прискорення барометричної висоті. У комплекс інерціальної системи входить:

- барометр, який визначає висоту відносно від заданого нульового рівня. Вагомим недоліком такого барометру є велика похибка у вимірах (близько 10–15 м);
- радіотехнічний датчик для вимірюванні відрізка часу між послідовними прийомом електромагнітних хвиль, відбитих від поверхні, до якої вимірюється висота (поверхня землі або вода). Вагомим недоліком такого датчика є велике енергоспоживання і невелика відстань дії (до 20–30 м);
- сонар для звукового виявлення підводних об'єктів за допомогою акустичного випромінювання. Його недоліком є мала відстань дії (до 10 м);
- лідар (LIDAR-світлове виявлення і визначення дальності) – датчики для отримання інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем на основі явища відбиття світла і його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах. Датчики має велике енергоспоживання і велику вагу, що виключає їх використання в мобільних роботах;
- комплекс з тривісного гіроскопу і акселерометру, який дозволяє визначити кути нахилу БПЛА щодо горизонту і прискорення обертання.

Позиціонування БПЛА за даними вбудованих сенсорів в перші було застосовано для автоматичного орієнтування крилатих ракет в ХХ столітті. Така система вимагає високої точності вимірювання висоти, має велику вагу (більше 20 кг) і велике енергоспоживання, що не дозволяє широко використовувати такий метод для БПЛА.

Американська компанія General Atomics Aeronautical Systems Inc. (GA-ASI), яка є частиною корпорації General Atomics, повідомила, що 8 січня 2019 року ВПС США вперше використали нову наземну станцію управління Block 50 Ground Control Station (GCS), розроблену та виготовлену компанією GA-ASI, для управління безпілотним літальним апаратом General Atomics MQ-9 Reaper. Ця подія відбулася на аеродромі Грейт Б'юль біля Палмдейла, штат Каліфорнія.

Станція управління Block 50 GCS має інноваційну особливість: вона дозволяє операторові керувати БПЛА, використовуючи практично ідентичні до кабіни пілотованого літака елементи управління. Це включає візуальне відображення та зведення всіх необхідних даних на одному «кокпіті», що суттєво підвищує обізнаність оператора з ситуацією. Головною перевагою цього рішення є можливість зменшити кількість операторів для управління одним літальним апаратом сімейства Reaper з двох до одного. Тепер всі функції, пов'язані з керуванням БПЛА, його системами та озброєнням, може виконувати один оператор. Раніше для управління одним апаратом з флоту Reaper потрібно було двох операторів: один керував

польотом, а інший – використанням сенсорів та озброєння. Це нововведення в наземній станції управління від GA-ASI має потенціал ефективно оптимізувати робочі процеси та зменшити потребу в персоналі для управління безпілотними літальними апаратами [4].

Завдяки технічному прогресу у сфері супутникових технологій нині реалізуються проекти низькоорбітальних систем (LEO). Kuiper від Amazon, Starlink від SpaceX і OneWeb – це три з основних розроблених проектів угруповань супутників LEO наступного покоління, які обіцяють забезпечити високошвидкісне ширококутне з'єднання з малою затримкою по всьому світу.

БПЛА продовжуватимуть набирати популярність у суспільстві, в сферах від доставки ліків у віддалені райони до відстеження лісових пожеж. Однак важливо мати потужну базу функцій автопілоту для керування цими безпілотниками, оскільки ручне управління може бути неможливим. Існують програмні інструменти з відкритим кодом, які можуть допомагати пришвидшити впровадження безпілотників з автопілотом: – Ardupilot; – Crowdsourcing; – Micro air vehicle; – ArduCopter; – OpenPilot; – Open-source robotics; – Paparazzi; – PX4 autopilot; – Slugs (autopilot system).

ArduPilot – один з найпопулярніших проектів на основі Arduino з відкритим кодом для управління автономними транспортними засобами. Платформа Ardupilot складається з трьох основних компонентів, що стосуються обладнання, прошивки та програмного забезпечення. Їх основні підпроекти з підтримки різних транспортних засобів включають квадрокоптери, літаки та ровери. ArduPilot дозволяє створювати та використовувати надійні, автономні, безпілотні системи транспортних засобів для цивільного використання. ArduPilot пропонує широкий набір інструментів, придатних для практично будь-якого автомобіля та додатків. Як проект з відкритим кодом, він постійно розвивається на основі швидкого зворотного зв'язку з боку великої спільноти користувачів. Команда розробників співпрацює із спільнотою та комерційними партнерами, щоб додати ArduPilot функціональність, яка вигідна кожному [3]. Незважаючи на те, що ArduPilot не виробляє жодного обладнання, прошивка ArduPilot працює на різноманітному обладнанні для управління безпілотними транспортними засобами усіх типів. У поєднанні з програмним забезпеченням наземного управління безпілотні машини, що працюють на ArduPilot, можуть мати розширену функціональність, включаючи спілкування в реальному часі з операторами. ArduPilot має величезне Інтернет-співтовариство, присвячене допомозі користувачам у питаннях, проблемах та рішеннях.

Paparazzi – це система автопілоту з відкритим кодом, орієнтована на недорогі автономні літаки. Низька вартість та доступність дозволяють використовувати любителів у невеликих дистанційно пілотованих літаках. Проект розпочався у 2003 році, і надалі розробляється та застосовується у École nationale de l'aviation civile (ENAC), французькій академії цивільної авіації. В даний час кілька постачальників виробляють автопілоти та аксесуари Paparazzi.

Автопілот дозволяє вилетіти з дистанційного керування літаком поза полем зору. Все апаратне та програмне забезпечення є відкритим та вільно доступним для будь-кого за ліцензійною угодою GNU. Автопілоти з відкритим кодом забезпечують гнучке апаратне та програмне забезпечення. Користувачі можуть легко модифікувати автопілот на основі власних особливих вимог, таких як оцінка лісових пожеж. Співробітники Paparazzi діляться ідеями та інформацією, використовуючи те саме програмне забезпечення MediaWiki, яке використовується Вікіпедією.

Paparazzi приймає команди та дані р датчиків і відповідно регулює управління польотом. Наприклад, командою може бути підйом з певною швидкістю, а папараці регулюватимуть потужність та керувати поверхнями. Станом на 2010 рік папараці не мали хорошої функції утримання та зміни швидкості, оскільки контролер не враховує зчитування датчика швидкості повітря. У 2013 році Технологічний університет Delft випустив свій проект чіпів Lisa / S, який базується на Paparazzi. Paparazzi підтримує кілька апаратних конструкцій, включаючи мікроконтролери серії STM32 та LPC2100. Випущено низку файлів CAD. Paparazzi передбачає мінімальний набір датчиків польоту:

- оцінка відношення (орієнтація до центру мас) проводиться за допомогою набору інфрачервоних термоелементів;
- положення та висота надходять із стандартного приймача GPS;
- вимірювання швидкості може здійснюватися за допомогою додаткового гіроскопа;
- прискорення від додаткових інерційних датчиків;
- напрямок від додаткових магнітних датчиків.

За останні кілька років відродився інтерес до космічних Інтернет-сервісів, особливо до мега-угруповань LEO-супутників, таким як SpaceX Starlink, Amazon Kuiper і OneWeb. Поновлення інтересу до супутникового доступу на LEO сприяло появі декількох факторів. Ключовим фактором є значне зниження вартості запуску з появою підричних пускових установок, що повторно використовують частини ракет, як це передбачено, наприклад, в SpaceX. Тим часом, використання готових компонентів (COTS) і прийняття принципів бережливого виробництва при проектуванні і виробництві супутників дозволяють масове виробництво з більш швидким виробничим циклом при менших витратах. Також стало комерційно можливим використовувати передові технології супутникового зв'язку, такі як технології багатоточкових променів і складної бортової цифрової обробки.

Ще один ключовий фактор – це велика готовність інвестувати в супутниковий доступ на LEO, щоб допомогти з'єднати тих непокритих, мотивованих комерційним потенціалом, економічним розвитком і гуманітарними міркуваннями щодо подолання цифрового розриву. Проєкт партнерства третього покоління (3GPP) працює над адаптацією систем 5G для підтримки супутникового зв'язку. Розвиток 5G для підтримки доступу до LEO-супутників ґрунтується на гнучкості, властивій системам 5G. Першим завданням проєктування є підключення мобільних пристроїв 5G до супутникових мереж доступу на основі 3GPP у діапазоні частот нижче 6 ГГц, щоб можна було забезпечити підключення 5G у областях, де наземні мережі 5G недоступні. Друга мета проєкту – забезпечити широкопasmові з'єднання для більш досконалих пристроїв, таких як термінал з дуже малою апертурою (VSAT) або наземна станція (ESIM), що рухається, особливо на більш високих частотах (наприклад, діапазони Ku / Ka). Крім прямого супутникового доступу, 3GPP також працює над супутниковим транспортним зв'язком 5G, який може полегшити пропозицію стільникових послуг у тих областях, де наземні транспортні засоби неможливо або надто дорого побудувати.

Перспективним інноваційним обладнанням для керування БПЛА є використання бездротового зв'язку, що поєднує конвергенцію в наземних, супутникових та безпілотних станціях. Особливості структури атмосфери і переваги супутникових технологій дають змогу застосовувати багаторівневі висотні моделі, за допомогою яких можна збільшити пропускну здатність. Можливості підвищення продуктивності завдяки багаторівневим висотним системам зв'язку базуються на таких факторах:

- використання в одному тракті міліметрових та оптичних діапазонів, а також діапазонів LTE, волоконно-оптичних ліній залежно від структури атмосфери, погодних умов, територіального розташування;

- у стратосферних платформах і БПЛА можливе підсилення потужності сигналу завдяки використанню панелей перетворення сонячної енергії, збільшенню напрямленості (підсилення) антени, застосуванню технології «Multiple Input – Multiple Output» (MIMO);

- космічна (бортова) станція може виробляти: фільтрацію і перетворення радіочастот, демодуляцію / декодування, перемикання/маршрутизацію, кодування/модуляцію.

Середня пропускну здатність відкритих наземних оптичних систем 2 Гбіт/с. Однак із вдосконаленням методів оптоелектронного оброблення сигналів швидкість передавання може зрости до сотні (і більше) гігабіт за секунду.

Тому існує потреба в дослідженні інноваційних технологій з використанням БПЛА як елементу багаторівневої системи телекомунікацій.

Перспективним шляхом розвитку інтелектуальних моделей для оптимізації маршруту переміщення БПЛА є реалізація штучного інтелекту в ALIAS DARPA (Aircrew Labor-in-Cockpit Automation System) і вона виконує функції другого пілота. Існуюча на даний час система штучного інтелекту «Metis» відповідає за управління польотом безпілота. Вона успішно використовується на БПЛА MQ-9 поряд з встановленою на ньому системою штучного інтелекту Agile Condor, здатною в автоматичному режимі ідентифікувати і обирати цілі. Agile Condor є обчислювальною системою під управлінням нейромережевих алгоритмів, яка отримує дані з зовнішніх сенсорів літального апарату: радара і інфрачервоної і оптико-електронної камер. Випробування проходили на полігоні у Північній Дакоті і були визнані успішними.

#### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Проаналізовано найбільш поширені методи керування БПЛА. Для основних методів дано опис. Сказано, що серед інтелектуальних моделей, які описують порядок переміщення БПЛА у просторі можна назвати метод побудови маршрутів БПЛА. В основі методу лежить використання математичного очікування інформаційної ентропії для оцінки оптимальності альтернативних варіантів маршруту. Останнім часом все частіше використовують триангуляції Делоне для вирішення завдання планування маршрутів БПЛА. У цьому випадку маршрут формується у вигляді набору проміжних пунктів маршруту (ППМ), проходження яких є обов'язковим. Констатовано, що перспективним інноваційним обладнанням для керування БПЛА є використання бездротового зв'язку, що поєднує конвергенцію в наземних, супутникових та безпілотних станціях. Особливості структури атмосфери і переваги супутникових технологій дають змогу застосовувати багаторівневі висотні моделі, за допомогою яких можна збільшити пропускну здатність.

#### **Література**

1. Коршець О., Горбенко В. Уроки застосування безпілотних літальних апаратів у російсько-українській війні. *Повітряна міць України*, 2023. №1 (4), 9–17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17>.
2. Олексенко О. О., Авраменко О. В., Федоров А. В. Застосування безпілотних літальних апаратів збройними силами російської федерації у війні проти України. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2022. № 4 (49). С. 23–28.

3. Darintsev O. V., Yudintsev B. S., Alekseev A. Y., Bogdanov D. R. Methods of a heterogeneous multi-agent robotic system group control. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 150. C. 687–694. doi: 10.1016 / j. procs. 2019.02.032.
4. Ivanov D. Periodic formation within a large group of mobile robots in conditions of limited communications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1046. Cham: Springer, 2019. C. 107–112. doi: 10.1007 / 978-3-030-30329-7\_10.
5. Milyakov D. A., Merkulov V. I. The approach to managing a group of UAVs as a system with distributed parameters. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 150. C. 39–45. doi: 10.1016 / j. procs. 2019.02.009.
6. Muslimov T., Munasypov R. Three-dimensional consensus-based control of autonomous UAV swarm formations. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings»*. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. Vol. 187. P. 69–80.

#### References

1. Korshech O., Ghorbenko V. (2023). Uroky zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ u rosijsko-ukrajinskij vijni. *Povitrjana micj Ukrainy*, № 1 (4), 9–17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17>.
2. Oleksenko O. O., Avramenko O. V., Fedorov A. V. (2023). Zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ zbrojnykh sylamy rosijskoi federaciji u vijni proty Ukrainy. *Nauka i tekhnika Povitrjanykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrainy*. № 4 (49). S. 23–28.
3. Darintsev O. V., Yudintsev B. S., Alekseev A. Y., Bogdanov D. R. (2019). Methods of a heterogeneous multi-agent robotic system group control. *Procedia Computer Science*. Vol. 150. S. 687–694. doi: 10.1016 / j. procs. 2019.02.032.
4. Ivanov D. (2019). Periodic formation within a large group of mobile robots in conditions of limited communications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1046. Cham: Springer, S. 107–112. doi: 10.1007 / 978-3-030-30329-7\_10.
5. Milyakov D. A., Merkulov V. I. (2019). The approach to managing a group of UAVs as a system with distributed parameters. *Procedia Computer Science*. Vol. 150. S. 39–45. doi: 10.1016 / j. procs. 2019.02.009.
6. Muslimov T., Munasypov R. (2021). Three-dimensional consensus-based control of autonomous UAV swarm formations. *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings»*. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Vol. 187. P. 69–80.