

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 629.735:004.93:004.94:621.396.96

DOI: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-01>

УРАХУВАННЯ ХАРАКТЕРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ БУДОВИ ТА РУХУ БПЛА У ЗАДАЧАХ ЇХ КОМПЛЕКСНОГО ВИЯВЛЕННЯ І СУПРОВОДЖЕННЯ У ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРІ

Соколов К. А., аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0009-0003-4238-097X>, kyrilsokolov1997@gmail.com

Жук С. Я., д.т.н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-0046-8450>, s.zhuk@kpi.ua

Анотація. Стаття висвітлює аспект зростання ролі БПЛА у різних сферах діяльності. Підкреслено, що дане явище зумовлено гнучкістю БПЛА як цільової платформи модульної структури. Зазначено, що така особливість і визначає мультизадачність даного класу апаратів для забезпечення безпеки, надання допомоги у різних галузях. Також зауважено про здатність систем із використанням БПЛА до масштабування. Автори звертають увагу на пов'язану із цим важливість та необхідність контролю повітряного простору. У рамках цього питання підкреслено завдання виявлення та супроводження повітряних об'єктів як первинне завдання контролю повітряного простору. Надано класифікацію БПЛА за будовою та іншими ознаками, що впливають на льотні характеристики. У спрощеному вигляді розглянуто типову структурну будову малогабаритного БПЛА. Зазначено основні типи руху та маневрів БПЛА. Підкреслено специфічні маневрові рухи, виокремлено основні типи маневрів. Наведено кількісну класифікацію повітряних об'єктів у контексті використання БПЛА. Оглядом описано особливості поведінки таких об'єктів, як рої, характер їхньої поведінки. Детально розглянуто типологію пропульсивних систем та їх значення у задачах детекції та супроводження БПЛА. Зазначено про важливість комплексування чи злиття даних для підвищення якості детекції та стійкості супроводження БПЛА в складних умовах. Наведено приклад роботи системи з внутрішньою взаємодією давачів різної фізичної природи: аудіо, відео, ІЧ-діапазонів. Запропоновано умовний поділ елементів руху БПЛА на три типи. Зазначено особливості детекції та супроводження в рамках відеодетекції повітряного об'єкта з огляду на його особливості руху. Наведено тестову модель руху малогабаритного БПЛА за наведеним поділом на елементи руху. Відзначено можливу сферу застосування моделі руху в рамках оцінки параметрів руху та фільтрації з використанням сенсорних мереж і згорткових нейронних мереж. Зазначено можливість використання особливостей руху БПЛА та сучасних методів обробки даних у задачах виявлення та супроводження рухомих повітряних об'єктів, зокрема БПЛА.

Ключові слова: БПЛА, малогабаритні безпілотні літальні апарати, відслідковування, виявлення, супроводження, квадрокоптер, повітряний об'єкт, літальний апарат, сенсорні мережі, нейронні мережі, злиття даних, маневр, фільтрація сигналів, параметри руху.

USING FOR THE SPECIFIC FEATURES OF UAV STRUCTURE AND MOVEMENT IN TASKS OF THEIR COMPLEX DETECTION AND TRACKING IN AIRSPACE

Kyrylo Sokolov, Ph.D student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0003-4238-097X>, kyrilsokolov1997@gmail.com

Serhii Zhuk, Dc.S., Prof., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-0046-8450>, s.zhuk@kpi.ua

Abstract. The article discusses the increasing role of UAVs in various fields of activity. It emphasizes that this phenomenon is due to the flexibility of UAVs as a modular platform. It is noted that this feature determines the multitasking capabilities of this class of devices for ensuring safety and providing assistance in various sectors. The capability of systems using UAVs to scale is also mentioned. The author draws attention to the associated importance and necessity of airspace control. Within this issue,

the task of detecting and tracking aerial objects is emphasized as the primary task of airspace control. A classification of UAVs by structure and other characteristics affecting flight performance is provided. The typical structural design of a small UAV is considered in a simplified form. The main types of UAV movement and maneuvers are noted. Specific maneuvering movements are emphasized, and the main types of maneuvers are identified. A quantitative classification of aerial objects in the context of UAV use is presented. The characteristics of the behavior of such objects as swarms and their behavior are described in an overview. The typology of propulsion systems and their role in detection and tracking is detailed. The importance of data fusion for improving detection quality and tracking stability is noted. An example of a system with internal interaction of sensors of different physical natures: audio, video, IR ranges is provided. A conditional division of UAV movement elements into three types is proposed. The features of detection and tracking within the framework of video detection of an aerial object considering its movement features are noted. A test model of small UAV movement according to the proposed division into movement elements is presented. The possible application of the movement model in assessing movement parameters and filtering using sensor networks and convolutional neural networks is highlighted. The possibility of using UAV movement features and modern data processing methods in tasks of detecting and tracking moving aerial objects, particularly UAVs, is indicated.

Key words: UAV, small unmanned aerial vehicles, tracking, detection, tracking, quadcopter, aerial object, aircraft, sensor networks, neural networks, data fusion, maneuver, signal filtering, motion parameters.

Вступ

У зв'язку з поширенням БПЛА різних типів у різноманітних сферах питання регулювання, контролю та спостереження за даними пристроями є вкрай актуальним та важливим. Функціональний потенціал таких пристроїв є надзвичайно високим. У зв'язку із цим використання БПЛА різними службами для виконання специфічних завдань невпинно зростає. Зумовлені попитом, зростають і темпи виробництва даних літальних апаратів [1–3]. Технологічний розвиток сприяє зменшенню ціни компонентної бази та зменшенню габаритів і вагових показників таких пристроїв. Доступність цих пристроїв зростає, а керування ними спрощуються та розширюється за рахунок багатоплатформеності та внутрішньої взаємодії різних систем керування. Так, керування можливе з різних наземних систем керування (НСК): портативних гаджетів, ПК та спеціалізованих АРМ оператора та ін. (рис. 1).

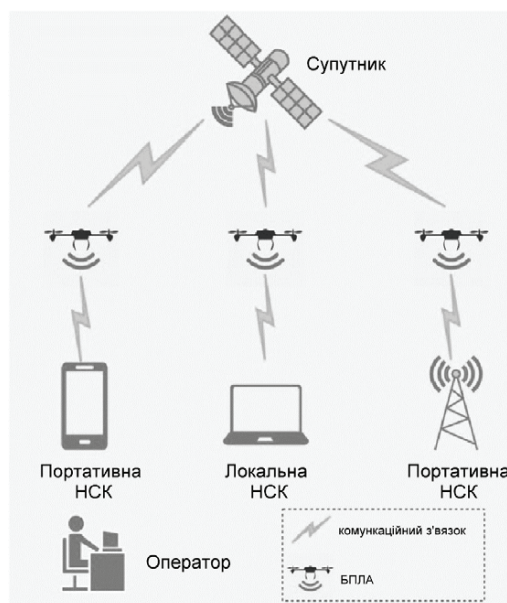


Рис. 1. Система керування БПЛА

За рахунок комплексного та модульного підходу малі БПЛА з простих пристроїв, призначених для розважальної сфери, кінематографу, спостереження, перетворилися на багатоцільові платформи та системи (рис. 2). Такі системи здатні поєднувати у собі кілька модулів для виконання специфічних та складних завдань. Також ці пристрої можуть використовуватися як розширення вже існуючих систем за їх покращення та модернізації. Таким чином, вони доповнюють існуючі підходи у вирішенні вузьких завдань кожної зі сфер, зокрема секторів безпеки [4], пошуково-рятувальних операцій [5], моніторингу об'єктів, аерофотозйомки, контролю транспортного руху. Задля забезпечення контролю, безпеки та управління існує гостра необхідність у створенні нових та модернізації вже існуючих систем спостереження за пові-

тряним простором. Окремим питанням у цьому завданні є оптимізація та покращення методів виявлення і слідування за повітряними об'єктами з урахуванням особливостей їх будови і поведінки.

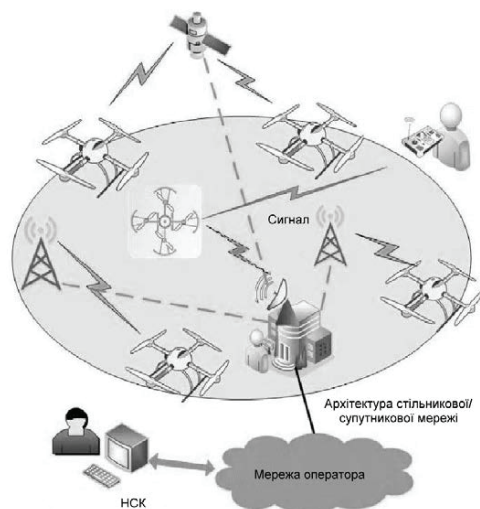


Рис. 2. Розгалужена система з використанням БПЛА

Виконання досліджень

Розглянемо основні типи безпілотних літальних апаратів. Кожен тип має свої особливості, що відрізняє їх з-поміж інших. Ці особливості зумовлені їх побудовою та специфікою використання у різних сферах для виконання різноманітних завдань. На рис. 3 зображено часткову класифікацію БПЛА [6–9], яка цікавить нас у рамках дослідження.

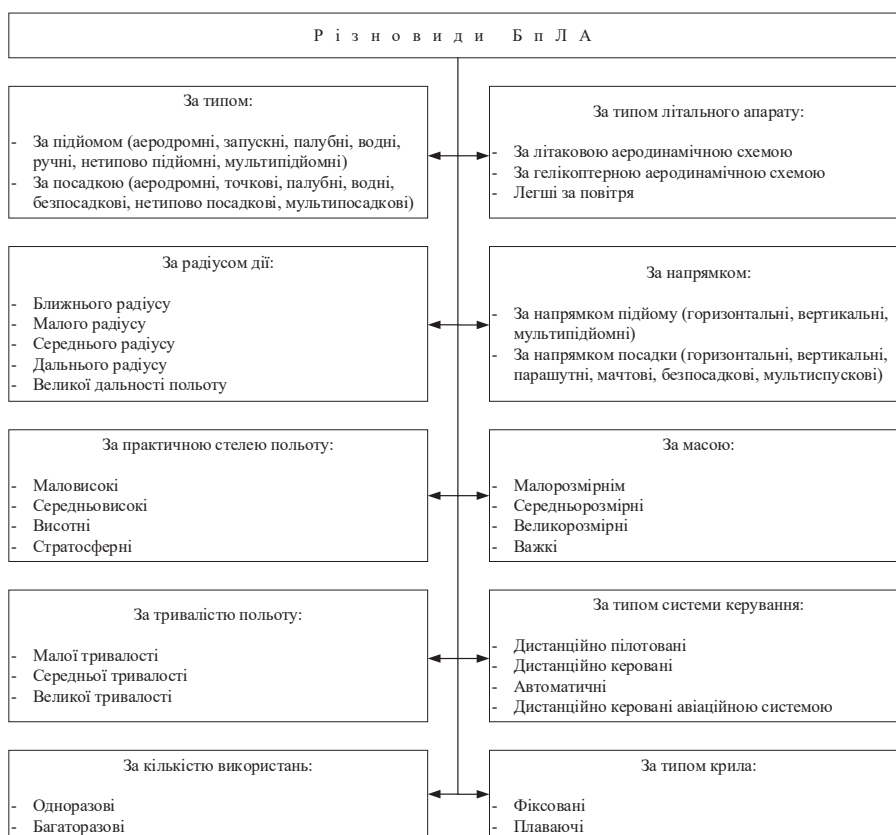


Рис. 3. Часткова класифікація БПЛА

Наведена класифікація орієнтується на врахування саме тих ознак, які впливають на динаміку руху БПЛА. Своєю чергою, перш за все, динаміка руху зумовлена внутрішньою будовою БПЛА: формою фюзеляжу (корпусу), двигуном, принципом дії підйомної сили, габаритами, корисним навантаженням тощо.

Внутрішня будова БПЛА варіюється залежно від його типу та призначення [10–12]. На рис. 4 зображено спрощену схему будови квадрокоптера.

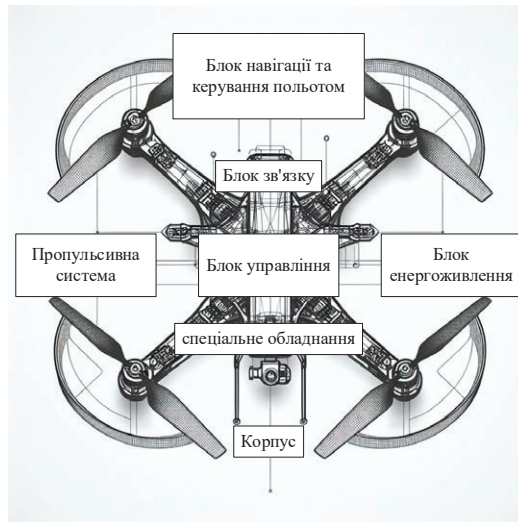


Рис. 4. Структурна схема будови квадрокоптера

Не останню роль відіграють і вимоги до виконання поставлених завдань: польоти на довгі відстані, вантажопідйомність, розміщення певного обладнання, вимоги до базування, керування тощо. Усе це зумовлює в кінцевому підсумку певні льотні характеристики, характер руху і загальну типову поведінку в конкретних сценаріях застосування. На малюнках представлено типові представники БПЛА. Умовно на рис. 5 представлено крупногабаритний БПЛА з фіксованим крилом [13], а на рис. 6 – малогабаритний БПЛА (МБПЛА) мультироторного типу [12] як найбільш розповсюджений та загальнодоступний вид.

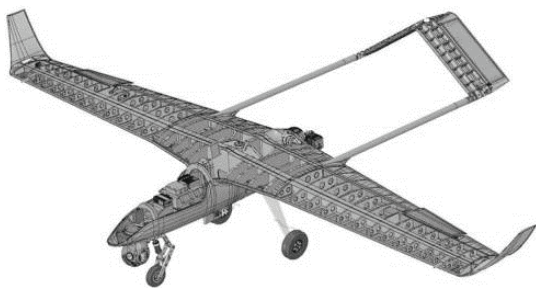


Рис. 5. БПЛА з фіксованим крилом НСУАВ

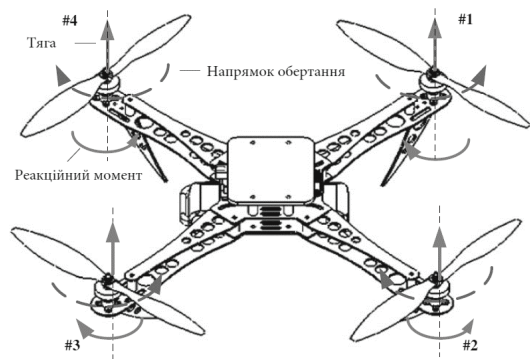


Рис. 6. Квадрокоптер у зависаючому польоті

Так, певні типи апаратів мають визначені їх геометрією певні особливості поведінки. БПЛА з фіксованим крилом здатні застосовуватися для перельотів на значні дистанції, маневреність їх порівняно з іншими типами БПЛА у цілому нижча, що зумовлено максимально допустимими навантаженнями за їх характерної геометрії та враховуючи матеріали виготовлення [13; 14]. Виходячи з аеродинаміки та особливостей побудови, можна зазначити, що НСУАВ, зображений на рис. 5, призначений для тривалих польотів на значних висотах. Водночас квадрокоптер як окремий випадок мультикоптера має значно менші габарити, вантажопідйомність і, відповідно, більшу маневреність у зв'язку з конструкцією [15]. Більша маневреність дає змогу виконувати більш складні та специфічні маневрові рухи.

Розглянемо основні типи руху та маневрів БПЛА. Деякі з них здатні проводити вертикальний зліт та посадку (VTOL), особливо квадрокоптери можуть взлітати та сідати вертикально, що робить їх ідеальними для роботи в обмежених просторах або в густому лісі [16]. Більшість БПЛА можуть виконувати горизонтальний політ, що дає їм змогу подолати великі відстані та виконувати завдання, такі як відеозйомка, моніторинг або доставка вантажів. Сучасні БПЛА мають системи стабілізації, які дають їм змогу утримувати стабільне положення в повітрі, навіть за сильного вітру, що активно використовується у завданнях, які вимагають високої точності, таких як фотографування або відеозйомка. Певні типи БПЛА можуть виконувати автономні польоти, використовуючи передвстановлені точки шляху або системи штучного інтелекту для навігації [17]. БПЛА можуть виконувати різноманітні маневри, включаючи повороти, петлі, зміну висоти та швидкості. Серед основних маневрів БПЛА здатні виконувати повороти на різні кути, що дає їм змогу змінювати напрямки польоту. Можуть виконувати петлі, що дає їм змогу швидко змінити напрямки на 180 градусів. Здатні підніматися та опускатися, що дає змогу перебувати на різних висотах для виконання різноманітних завдань, а також можуть прискорюватися та уповільнюватися, що дає змогу адаптуватися до різних умов польоту [18]. Також можна виокремити спеціальні маневри, такі як обертання навколо своєї осі, зависання, що може бути корисним для певних завдань, таких як відеозйомка.

За кількісною ознакою повітряні об'єкти, що спостерігаються, можуть бути поодинокі або розподілені, як це показано на рис. 7.

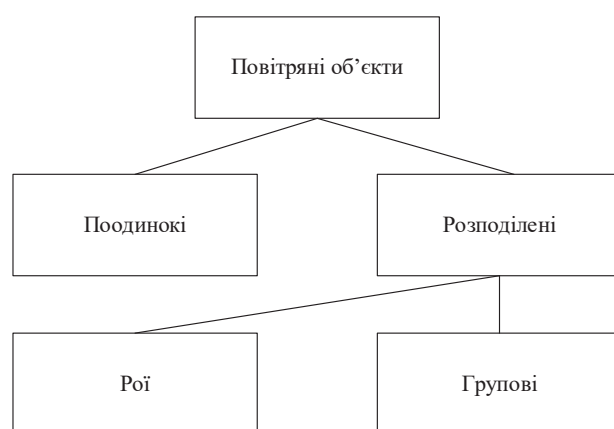


Рис. 7. Класифікація повітряних об'єктів

Поведінкові особливості руху поодиноких БПЛА були описані вище, розподілені ж об'єкти мають низку власних особливостей. Коли БПЛА діють у групах, їхні поведінкові особливості можуть ще більше ускладнюватися, тому визначну роль відіграють координація одиниць у групах, розподіл ролей відповідно до поставленого завдання. Типова конфігурація груп являє собою зв'язку «ведучий – відомий» у різних співвідношеннях залежно від кількості та структурної ієрархії. Схематично поодинокий та розподілені об'єкти (БПЛА) представлено на рис. 8.

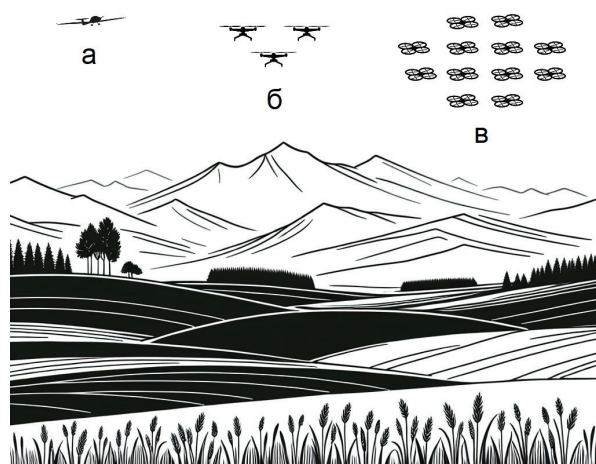


Рис. 8. Схематичне відображення повітряних об'єктів: а – поодинокий об'єкт, б – група, в – рій

Окремим підвидом розподілених об'єктів у випадку БПЛА є так звані рої. Це такі групи, де вони рухаються як єдиний організм, що ускладнює передбачення їхніх траєкторій. Такі рої можуть змінювати геометричну форму розміщення у просторі. У такому разі надважливими питаннями є синхронізація та координація окремих одиниць у складі всього рою. Умовна класифікація роїв наведена на рис. 9 [2]. Вона базується на особливостях управління та на масштабі застосування.

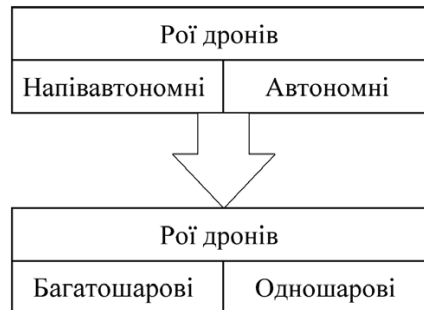


Рис. 9. Класифікація роїв

Тип двигуна впливає (рис. 10) на додаткові чинники виявлення БПЛА, оскільки залишає «сліди» різної фізичної природи [9; 19; 20]. Це можна врахувати під час створення комплексної системи їх виявлення та відслідковування. Сліди різної фізичної природи визначають додаткові канали спостереження, які будуть працювати відповідно до певного роду збурення – збудження зовнішнього середовища або випромінювання згенерованого внаслідок роботи БПЛА.

Так, реактивні двигуни створюють значний тепловий слід, що дає змогу чітко спостерігати його в ІЧ-спектрі. Пропелерний та вентиляторний двигуни створюють значну кількість характерного шуму – звукових коливань, які здатна зчитати чутлива та високоселективна аудіосистема. Електродвигуни та електроніка на борту генерують електромагнітне випромінювання, яке також може бути зафіксовано спектроаналізаторними системами. Дані методи відносяться до пасивних методів пошуку об'єктів. З активних методів можна використати класичну радіолокацію, оскільки корпус (фюзеляж) має певну ефективну площу розсіювання (ЕПР).

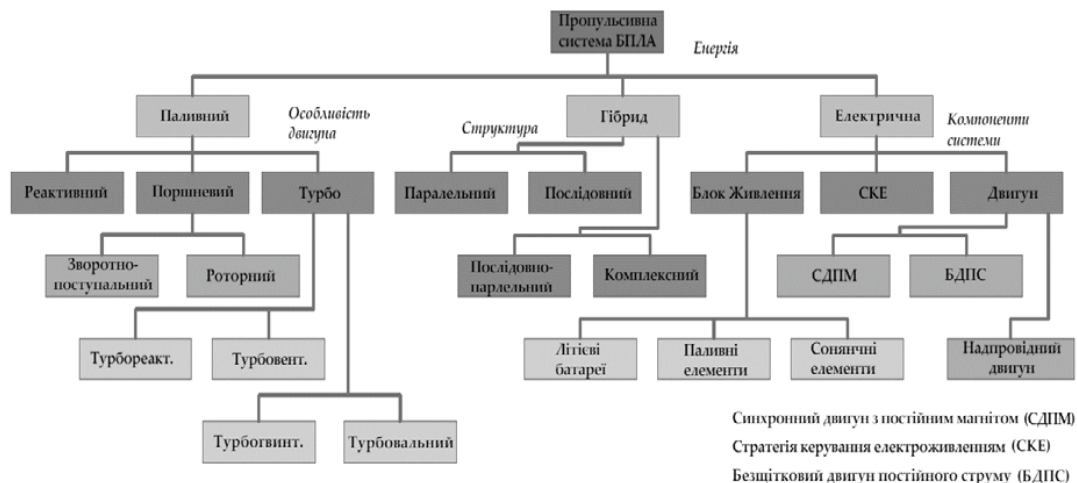


Рис. 10. Класифікація пропульсивних систем БПЛА

Фонові обстановка під час пошуку об'єкта може бути складною для певних типів каналів. У такому разі доцільним є отримання та використання даних із датчиків різної фізичної природи для забезпечення безшовного та безперервного слідування. Для покращення швидкодії системи та з метою зменшення її обчислювальних потужностей задіяння всіх датчиків різної фізичної природи можна використовувати на етапі детекції об'єктів. Слідування ж проводити по найбільш чіткому «сліду», на другому місці, використовуючи дані, отримані з каналів, на які приходять сигнали меншої інтенсивності як резервного каналу інформації.

Комплексування каналів отримання даних дає змогу покращити точність вимірювання. Так, первинну детекцію можна зробити, наприклад, використовуючи радіолокатор, а для збільшення точності вимірювання кутових координат можна задіяти оптичну відеосистему, яка здатна покращити загальну точність, і додатково використати направлений мікрофон [21]. Додатковою перевагою є взаємодоповнення інформації з різних каналів. Тобто, наприклад, за зриву супроводження по відеоданих можна продовжувати слідування на основі даних отриманих із радіолокатора, і навпаки. Ще одним сценарієм суміщення даних є використання дальноміра та відеосистеми, що потенційно здешевшує систему. У такому разі дані отримані з дальноміра доповнюють дані, отримані з камери, при цьому формується повна інформація щодо розташування об'єкта, що спостерігається, по координатах заданої системи координат [22]. У разі використання, наприклад, ІЧ-датчиків, які доречно застосовувати й у ночі, що на відміну від відеосистеми будуть коректно працювати за умов низької освітленості, також можна застосувати й аудіосистему отримання звукових даних. Такі і подібні до них комбінації можна застосовувати не лише з метою підвищення точності результатів, а й із метою підвищення стійкості та надійності роботи системи відслідковування [21].

Окрім комплексування, існують більш просунуті методи злиття даних (fusion data). Такі методи дають змогу більш гнучко зіставляти отримані дані з дачачів різної фізичної природи [23]. У разі відстеження МБПЛА є можливість співставляти не окремі дані, а траєкторії, отримані з різних каналів. Злиття даних можливо як на основі класичних методів, заснованих на теоремі Байєса, так і з використанням елементів нечіткої логіки та нелінійних методів злиття даних [24].

Побудова моделі руху є надзвичайно важливим етапом у багатьох дослідженнях та практичних завданнях, оскільки дає змогу прогнозувати, оцінювати та співставляти реальні отримані результати з розрахованими у моделі. Це дає змогу проводити більш точні симуляції та отримувати більш точні прогнози швидкості траєкторії руху МБПЛА.

Складні маневрові рухи можна представити у вигляді суми простих (із похибкою), таких як повороти, петлі, зміна висоти та швидкості, зависання. А їх, своєю чергою, можна апроксимувати трьома станами: зависання, майже рівномірний рух, рух із маневром (прискорення). Також можна зазначити, що певні типові рухи простіше буде прораховувати та обчислювати у різних системах координат та потім приводити до однієї узагальненої.

Урахування особливостей руху важливе в рамках детекції та відслідковування повітряних об'єктів, зокрема у разі реалізації візуального відслідковування. Так, відслідковування маневруючого БПЛА за різних умов та різних маневрів оптимально буде робити різними методами у зв'язку з їхніми особливостями. Так, під час зависання дрона методи відеодетекції, основані на різниці кадрів, неефективно справляються з таким завданням, у цьому разі більш доцільно використовувати методи пошуку за шаблоном із застосунком кореляційно-екстремальних функцій (КЕФ). А у разі рівномірного руху на відносно простому тлі можна застосовувати звичайні диференціальні методи покадрового відслідковування або відслідковування за рухом під час використання методів обчислення оптичного потоку. Комбінування та переключення методів варто робити залежно від багатьох чинників, зокрема зовнішніх умов, складності тла та обстановки [25].

Модель руху малогабаритного БПЛА подано у вигляді стохастичної динамічної системи з випадковою структурою [26], а саме:

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{L}_n \mathbf{w}(k-1) + \mathbf{H}_n^s(k), n=1, S,$$

яка враховує три основних види руху $S=3$: зависання $n=1$, майже рівномірний рух $n=2$, рух з маневром $n=3$. Вектор стану $\mathbf{w}^T(k) = (x(k), \dot{x}(k), \ddot{x}(k), y(k), \dot{y}(k), \ddot{y}(k), z(k), \dot{z}(k), \ddot{z}(k))$ містить у собі координати положення, швидкості і прискорення по осях місцевої системи координат. $\gamma(k)$ – шум збудження з одиничною кореляційною матрицею.

Матриці, що входять у модель руху (5.34), мають вигляд:

$$\mathbf{L}_n(k, k-1) = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_n^b & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{L}_n^b & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{L}_n^b \end{bmatrix}, \mathbf{H}_n(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_n^b & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_n^b & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_n^b \end{bmatrix},$$

де $\mathbf{L}_j^b, \mathbf{H}_j^b, n=1, 3$, мають вигляд:

$$\mathbf{L}_1^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_2^b = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_3^b = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_1^b = \begin{bmatrix} c_1 \cdot T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_2^b = \begin{bmatrix} \frac{c_2 \cdot T^2}{2} \\ c_2 \cdot T \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_3^b = \begin{bmatrix} \frac{c_3 \cdot T^3}{6} \\ \frac{c_3 \cdot T^2}{2} \\ c_3 \cdot T \end{bmatrix}$$

c_1, c_2, c_3 – СКВ випадкових флуктуацій швидкості, прискорення і швидкості зміни прискорення малогабаритного БПЛА для кожного типу руху відповідно. T – час. За певного виду маневру застосовується змінна перемикавання з класу ланцюгів Маркова $c_n(k), n=1,3$, яка описує тип структури моделі руху малогабаритного БПЛА.

Отримана траєкторія змодельована виходячи з таких початкових умов та параметрів руху. Подальші величини наведено в одиницях виміру Сі. Початкове положення: $x(-1) = 300, y(-1) = 1000, z(-1) = 100$, стартова швидкість $\dot{x}(-1) = -20, \dot{y}(-1) = -20, \dot{z}(-1) = 0$ та початкове прискорення $\ddot{x}(-1) = 0, \ddot{y}(-1) = 0, \ddot{z}(-1) = 0$. Рух об'єкта на всьому часовому проміжку відбувається на фіксованій висоті 100 м.

Отримана траєкторія описує такий характер руху: рівномірний рух – маневр – рівномірний рух – маневр «скидання швидкості» – зависання – маневр – рівномірний рух (рис. 11–13).

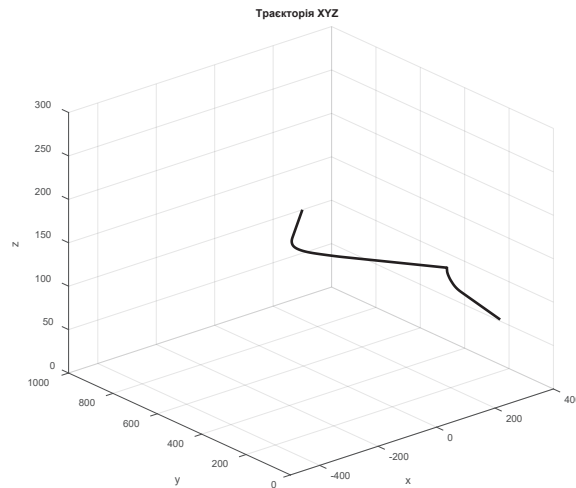


Рис. 11. Змодельована траєкторія руху малогабаритного БПЛА

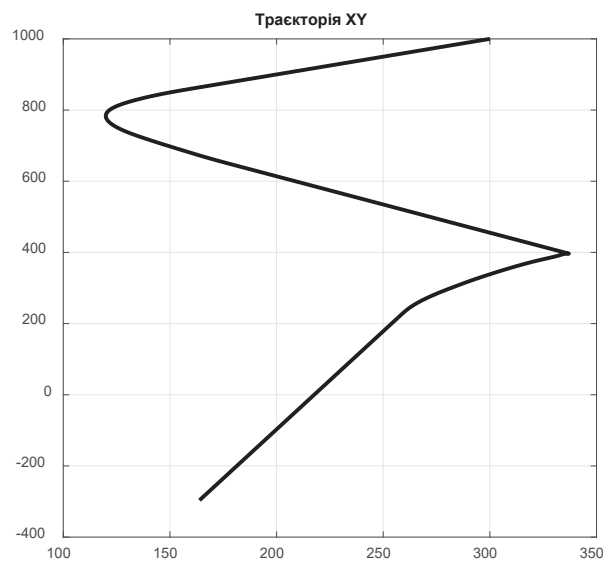


Рис. 12. Траєкторія руху малогабаритного БПЛА у площині фіксованого зрізу з вистою 100 м

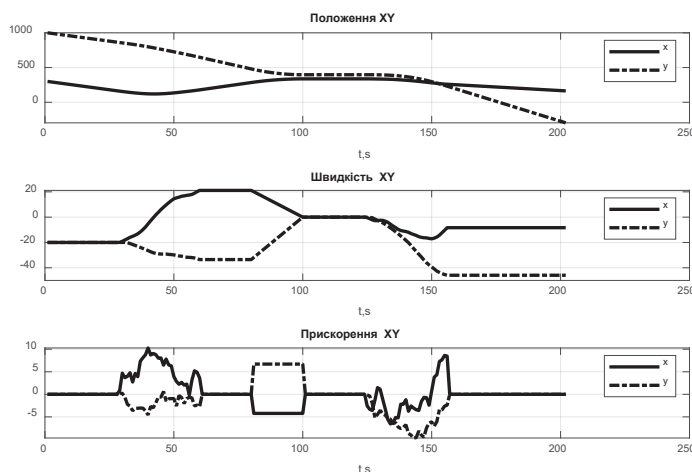


Рис. 13. Графіки положення, швидкості та прискорення в площині ХУ

Питання методів оцінки параметрів руху та фільтрації є невід'ємним складником завдання супроводження рухомого об'єкта в різних умовах [27–29]. Дані методи використовуються у різних сферах та у зв'язці з іншими системами, наприклад на базі сенсорних мереж, приклад подано на рис. 14 [26]. При цьому використовують фільтр Калмана, його модифіковані варіанти, метод найменших квадратів (МНК), а також сучасний підхід з обробкою даних нейронними мережами [30].

Сенсорні мережі також використовують для оцінки параметрів руху, відслідковування. У простому випадку такі системи мають пункт збору та обробки даних, а також розгалужену мережу датчиків. Нерідко для обробки інформації використовують нейронні мережі, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN) [21].

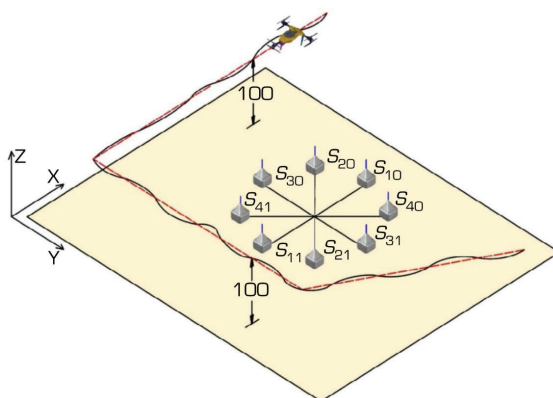


Рис. 14. Сенсорна мережа для оцінки параметрів руху МБПЛА

Висновки

Кожне сімейство та тип БПЛА мають свої унікальні характерні особливості просторового руху. Ці особливості руху зумовлені будовою БПЛА, його масою та габаритами, типом пропульсивної системи та іншими складниками. Будова БПЛА впливає не лише на його динаміку рух та маневреність, а й на те, наскільки він буде помітний для різних типів датчиків (аудіо, відео, ІЧ).

Орієнтуючись на поведінкові особливості груп, поодиноких об'єктів, можна більш точно налаштувати систему виявлення та відслідковування, урахувавши маневреність БПЛА і навколишню обстановку. Особливості руху БПЛА накладають певні вимоги на системи детекції та відслідковування цих об'єктів. Це певні швидкості руху, відстані їх можливого виявлення, «сліди», котрі вони залишають, із яких і формуються технічні вимоги до комплексу виявлення та супроводження таких повітряних об'єктів. Такий комплекс являє собою поєднання апаратного та програмного забезпечення, на базі якого можливе застосування сучасних підходів, нейронних мереж, машинного навчання для забезпечення виконання поставлених завдань. При цьому залишається можливість доповнювати та модернізувати комплекс, додаючи алгоритми розпізнавання, групування та ідентифікації повітряних об'єктів.

Використання комбінованих методів виявлення та супроводження повітряних об'єктів дає змогу гнучко підлаштуватися під кожну ситуацію, що дає можливість більш ефективно знаходити та відстежувати різноманітні БПЛА та зменшити ймовірність зриву вікна супроводження за об'єктом. По-кращити роботу алгоритмів можна, суміщаючи дані від давачів різної фізичної природи, наприклад відеодавача та радіолокаційної станції, що дасть змогу взаємно коригувати роботу комплексу та збільшити відмовостійкість системи. Складні рухи та маневри можна апроксимувати більш простими та узагальнити підхід для спрощення розрахунків. Змодельована траєкторія руху повітряного об'єкта може бути перерахована відносно інших додатково введених систем координат. А сам алгоритм побудови такої траєкторії може бути модифікованим та використаним для симуляції задля оцінки ефективності алгоритмів виявлення та відслідковування МБПЛА.

Література

1. Protect your sky: a survey of counter unmanned aerial vehicle systems / H. Kang et al. IEEE access. 2020. Vol. 8. P. 168671–168710. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3023473> (дата звернення: 23.05.2024).
2. Towards the unmanned aerial vehicles (uavs): a comprehensive review / S. A. H. Mohsan et al. Drones. 2022. Vol. 6, no. 6. P. 147. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6060147> (дата звернення: 23.05.2024).
3. Unmanned aerial vehicles: a review / A. A. Laghari et al. Cognitive robotics. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004> (дата звернення: 23.05.2024).
4. Song Y., Zhang X., Zhao X. Research on the application of UAVs in the security of major events. BCP Social Sciences & Humanities. 2022. Vol. 19. P. 247–253. URL: <https://doi.org/10.54691/bcpssh.v19i.1611> (дата звернення: 23.05.2024).
5. Способи застосування бпла під час авіаційного пошуку і рятування / Г. Лещенко та ін. Science-based technologies. 2021. Т. 51, № 3. С. 271–280. URL: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.51.15998> (дата звернення: 23.05.2024).
6. Гуцул Т., Жежера І., Ткач В. Особливості класифікації та методів вибору БПЛА. *Технічні науки та технології*. 2023. № 4(30). С. 201–212. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-201-212](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-201-212) (дата звернення: 23.05.2024).
7. Попіль Д., Бровко П., Книш Б. Класифікація відомих видів безпілотних літальних апаратів. *Modern engineering and innovative technologies*. 2017. Т. 1. № 02–01. С. 34–39. URL: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2017-02-01-004>.
8. Security analysis of drones systems: attacks, limitations, and recommendations / J.-P. Yaacoub et al. Internet of things. 2020. Vol. 11. P. 100218. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218> (дата звернення: 23.05.2024).
9. Çoban S., Oktay T. Unmanned aerial vehicles (uavs) according to engine type. Journal of aviation. 2018. URL: <https://doi.org/10.30518/jav.461116> (дата звернення: 23.05.2024).
10. Bresciani T. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter : Master thesis. Lund, 2008. 170 p. URL: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8847641> (дата звернення: 23.05.2024).
11. Fethalla N. Modelling, Identification, and Control of a Quadrotor Helicopter. MONTREAL, 2019. 193 p. URL: <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2354> (дата звернення: 23.05.2024).
12. Quan Q. Introduction to multicopter design and control. Singapore : Springer Singapore, 2017. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3382-7> (дата звернення: 23.05.2024).
13. Aerodynamic and structural design for the development of a MALE UAV / P. Panagiotou et al. Aircraft engineering and aerospace technology. 2018. Vol. 90, no. 7. P. 1077–1087. URL: <https://doi.org/10.1108/aeat-01-2017-0031> (дата звернення: 23.05.2024).
14. Grodzki W., Łukaszewicz A. Design and manufacture of umanned aerial vehicles (UAV) wing structure using composite materials. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2015. Vol. 46, no. 3. P. 269–278. URL: <https://doi.org/10.1002/mawe.201500351> (дата звернення: 23.05.2024).
15. Rodic A., Mester G. Modeling and simulation of quad-rotor dynamics and spatial navigation. 2011 IEEE 9th international symposium on intelligent systems and informatics (SISY 2011), Subotica, 8–10 September 2011. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/sisy.2011.6034325> (дата звернення: 23.05.2024).
16. Technical Analysis of VTOL UAV / S. Yu et al. Journal of computer and communications. 2016. Vol. 04, no. 15. P. 92–97. URL: <https://doi.org/10.4236/jcc.2016.415008> (дата звернення: 23.05.2024).
17. Frazzoli E. Maneuver-Based motion planning and coordination for single and multiple uavs. 1st UAV conference, Portsmouth, Virginia. Reston, Virigina, 2002. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2002-3472> (дата звернення: 23.05.2024).
18. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: theory and experiment / G. Hoffmann et al. AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit, Hilton Head, South Carolina. Reston, Virigina, 2007. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461> (дата звернення: 23.05.2024).
19. Overview of propulsion systems for unmanned aerial vehicles / B. Zhang et al. Energies. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 455. URL: <https://doi.org/10.3390/en15020455> (дата звернення: 23.05.2024).
20. Adamski M. Analysis of propulsion systems of unmanned aerial vehicles. Journal of marine engineering & technology. 2017. Vol. 16, no. 4. P. 291–297. URL: <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1383337> (дата звернення: 23.05.2024).
21. CNN-Based UAV detection and classification using sensor fusion / H. Lee et al. IEEE access. 2023. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3293124> (дата звернення: 23.05.2024).
22. Жук С. Я., Соколов К. А. Адаптивне оцінювання параметрів руху малорозмірного БПЛА за даними відеокамери і FMCW-далекоміру. *Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування*. 2023. № 91. С. 46–52. URL: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.46-52>.
23. Wei Y., Hong T., Fang C. Research on information fusion of computer vision and radar signals in UAV target identification. Discrete dynamics in nature and society. 2022. Vol. 2022. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/3898277> (дата звернення: 23.05.2024).
24. Durrant-Whyte H., Henderson T. C. Multisensor data fusion. Springer handbook of robotics. Berlin, Heidelberg, 2008. P. 585–610. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_26 (дата звернення: 23.05.2024).

25. Соколов К. Візуальне виявлення та відстеження малогабаритних рухомих об'єктів на основі функціональних особливостей зорового апарату та особливостях сприйняття людини. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2023. № 5. С. 75–82. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/13> (дата звернення: 23.05.2024).
26. Tovakch I. O., Zhuk S. Y. Adaptive filtration of parameters of the UAV movement on data from its location calculated on the basis the time difference of arrival method. 2017 IEEE first ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, 29 May – 2 June 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100466> (дата звернення: 23.05.2024).
27. Adaptive filtering of UAV movement parameters based on aoa-measurements of the sensor network in the presence of abnormal measurements / S. Y. Zhuk et al. *Journal of aerospace technology and management*. 2021. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1242> (дата звернення: 23.05.2024).
28. Цуканов О. Ф., Якорнов Є. А. Методи оцінки параметрів руху маневруючих безпілотних літальних апаратів в інфокомунікаційних сенсорних мережах. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2023. Т. 2. № 04. С. 74–84. URL: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-08> (дата звернення: 23.05.2024).
29. Song T. L., Ahn J. Y., Park C. Suboptimal filter design with pseudomeasurements for target tracking. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*. 1988. Vol. 24, no. 1. P. 28–39. URL: <https://doi.org/10.1109/7.1033> (дата звернення: 23.05.2024).
30. Wei Y., Hong T., Kadoch M. Improved Kalman Filter Variants for UAV Tracking with Radar Motion Models. *Electronics*. 2020. Vol. 9, no. 5. P. 768. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics9050768> (дата звернення: 23.05.2024).

References

1. Kang, H., Joung, J., Kim, J., Kang, J., & Cho, Y. S. (2020). Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems. *IEEE Access*, 8, 168671–168710. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3023473>
2. Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *Drones*, 6(6), 147. <https://doi.org/10.3390/drones6060147>
3. Iaghari, A. A., Jumani, A. K., Iaghari, R. A., & Nawaz, H. (2022). Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Cognitive Robotics*. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004>
4. Song, Y., Zhang, X., & Zhao, X. (2022). Research on the application of UAVs in the security of major events. *BCP Social Sciences & Humanities*, 19, 247–253. <https://doi.org/10.54691/bcpssh.v19i.1611>
5. Leshchenko, H., Mandryk, Ya., Stratonov, V., & Davydov, S. (2021). Sposoby zastosuvannya BPLA pid chas aviatsiinoho poshuku i riaduvannya [Methods of using uavs during aviation search and rescue]. *Science-based technologies*, 51(3), s. 271–280. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.51.15998>
6. Hutsul, T., Zhezhera, I., & Tkach, V. (2022). Osoblyvosti klasyfikatsii ta metodiv vyboru bpla [Features of uav classification and selection methods]. *Technical Sciences and Technologies*, 4(30), s. 201–212. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-201-212](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-201-212)
7. Popyl, D., Brovko, P., & Knysh, B. (2017). Klasyfikatsiia vidomykh vydiv bezpilotnykh litalnykh aparativ [The classification of the certain types of the unmanned aerial vehicles]. *Modern engineering and innovative technologies*, 1(02-01), s. 34–39. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2017-02-01-004>
8. Yaacoub, J.-P., Noura, H., Salman, O., & Chehab, A. (2020). Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations. *Internet of Things*, 11, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218>
9. ÇOBAN, S., & OKTAY, T. (2018). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) According to Engine Type. *Journal of Aviation*. <https://doi.org/10.30518/jav.461116>
10. Bresciani, T. (2008). Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter (№ 8847641) [Master thesis, Lund University Department of Automatic Control]. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication>. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8847641>
11. Fethalla, N. (2019). Modelling, Identification, and Control of a Quadrotor Helicopter. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2354>
12. Quan, Q. (2017). Introduction to Multicopter Design and Control. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3382-7>
13. Panagiotou, P., Giannakis, E., Savaidis, G., & Yakinthos, K. (2018). Aerodynamic and structural design for the development of a MALE UAV. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 90(7), 1077–1087. <https://doi.org/10.1108/aeat-01-2017-0031>
14. Grodzki, W., & Łukaszewicz, A. (2015). Design and manufacture of unmanned aerial vehicles (UAV) wing structure using composite materials. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 46(3), 269–278. <https://doi.org/10.1002/mawe.201500351>
15. Rodic, A., & Mester, G. (2011). Modeling and simulation of quad-rotor dynamics and spatial navigation. *Y 2011 IEEE 9th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2011)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/sisy.2011.6034325>
16. Yu, S., Heo, J., Jeong, S., & Kwon, Y. (2016). Technical Analysis of VTOL UAV. *Journal of Computer and Communications*, 04(15), 92–97. <https://doi.org/10.4236/jcc.2016.415008>
17. Frazzoli, E. (2002). Maneuver-Based Motion Planning and Coordination for Single and Multiple UAVs. *Y 1st UAV Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics*. <https://doi.org/10.2514/6.2002-3472>
18. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., & Tomlin, C. (2007). Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. *Y AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>
19. Zhang, B., Song, Z., Zhao, F., & Liu, C. (2022). Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies*, 15(2), 455. <https://doi.org/10.3390/en15020455>
20. Adamski, M. (2017). Analysis of propulsion systems of unmanned aerial vehicles. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 16(4), 291–297. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1383337>
21. Lee, H., Han, S., Byeon, J.-I., Han, S., Myung, R., Joung, J., & Choi, J. (2023). CNN-Based UAV detection and classification using sensor fusion. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3293124>
22. Zhuk, S. Ya., & Sokolov, K. A. (2023). Adaptivne otsiniuvannya parametriv rukhu malorozmirnoho BPLA za danymy videokamery i FMCW-dalekomiru [Adaptive estimation of small-size UAV motion parameters based on video camera and FMCW

rangefinder data]. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, (91), s. 46–52. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.46-52>

23. Wei, Y., Hong, T., & Fang, C. (2022). Research on information fusion of computer vision and radar signals in UAV target identification. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/3898277>

24. Durrant-Whyte, H., & Henderson, T. C. (2008). *Multisensor data fusion*. У В. Siciliano & О. Khatib (Ред.), Springer handbook of robotics (с. 585–610). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_26

25. Sokolov, K. A. (2023). Vizualne vyivlennia ta vidstezhennia malohabarynykh rukhomykh ob'ektiv na osnovi funktsionalnykh osoblyvostei zorovoho aparatu ta osoblyvostiakh spryniatia liudyny [Visual detection and tracking of small moving objects based on the functional features of the visual apparatus and the peculiarities of human perception]. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, (5), s. 75–82. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/13>

26. Tovakch, I. O., & Zhuk, S. Y. (2017). Adaptive filtration of parameters of the UAV movement on data from its location calculated on the basis the time difference of arrival method. У 2017 IEEE first ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100466>

27. Zhuk, S. Y., Tovkach, I. O., Neuimin, O., & Vasyliiev, V. (2021). Adaptive filtering of UAV movement parameters based on aoa-measurements of the sensor network in the presence of abnormal measurements. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 13. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1242>

28. Tsukanov, O. F., & Yakornov, Ye. A. (2023). Metody otsinky parametriv rukhu manevruiuchykh bezpilotnykh litalnykh aparativ v infokomunikatsiynykh sensorynykh merezhakh. Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnolohii [Methods for evaluating the motion parameters of maneuvering unmanned aerial vehicles in info-communication sensor networks]. *Infocommunication and computer technologies*, 2(04), s. 74–84. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-08>

29. Song, T. L., Ahn, J. Y., & Park, C. (1988). Suboptimal filter design with pseudomeasurements for target tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 24(1), 28–39. <https://doi.org/10.1109/7.1033>

30. Wei, Y., Hong, T., & Kadoch, M. (2020). Improved kalman filter variants for UAV tracking with radar motion models. *Electronics*, 9(5), 768. <https://doi.org/10.3390/electronics9050768>