Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 623.746.2 **doi: 10.26906/SUNZ.2026.1.012**

Д. О. Галінський

Українська державна льотна академія, Кропивницький, Україна

МОДЕЛІ ТА МЕТОД ПЛАНУВАННЯ РУХУ РОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИКОНАННІ СПЕЦІАЛЬНИХ МІСІЙ З УРАХУВАННЯМ ПРІОРИТЕТУ ЗАВДАНЬ

Анотація. Актуальність. В статті наведено удосконалений автором метод планування руху рою безпілотних літальних апаратів (БпЛА) при виконанні спеціальних місій з урахуванням пріоритету завдань в складному середовищі, який перевершує відомі методи за швидкістю та точністю конвергенції та часом виконання. **Об'єкт дослідження** процеси застосування роїв безпілотних літальних апаратів при виконанні спеціальних місій **Мета статті**: удосконалення методу планування руху рою безпілотних літальних апаратів при виконанні спеціальних місій з урахуванням пріоритету завдань в складному середовищі. **Результати дослідження**. У статті для удосконалення методу планування руху БпЛА введено двохетапність планування шляху. В якості базового методу для удосконалення використано метод рою часток (PSO), який зарекомендував себе як достатньо ефективний алгоритм рішення схожих завдань. На першому етапі метод ініціює траєкторії польоту БпЛА та призначає пріоритети БпЛА зі складу рою на основі факторів навколишнього середовища та завдань місії. На другому етапі окремі БпЛА з високим пріоритетом використовують алгоритм PSO, що грунтується на відомому методі швидкого дослідження випадкового дерева, для планування шляху, тоді як початковий рій частинок вибірково успадковує результати попередньої ініціалізації. Оскільки траєкторії польоту БпЛА, згенеровані таким методом, можуть не відповідати фактичним вимогам до польоту рою БпЛА, використано криві Дубінса для згладжування та отримання фактичних траєкторій польоту у відповідності з пріоритетністю завдань спеціальної місії. **Висновки.** Запропонований гібридний підхід поєднує ініціалізацію траєкторій методом випадкових дерев (RRT) з оптимізацією роєм частинок (PSO), що дозволяє ефективно оминати локальні оптимуми у складних середовищах. Використання функції штрафів для дотримання безпечних дистанцій у поєднанні зі стратегією перезапуску та збереженням «елітних» станів забезпечує швидку збіжність і високу стійкість алгоритму. Експериментально доведена масштабованість методу на групи до п'ятисот БпЛА підтверджує його застосування для виконання спеціальних місій в умовах високої щільності агентів і динамічних обмежень.

Ключові слова: авіаційний транспорт, безпілотний літальний апарат, генетичні алгоритми, інформаційні технології, навігація, планування маршрутів руху, транспортні технології, штучний інтелект.

Вступ

Постановка проблеми. Управління БпЛА можна класифікувати і розділити на 3 основні категорії:

а) Дистанційне керування пілотом – статична автоматизація оператора, коли всі рішення приймаються дистанційним оператором.

б) Віддалене контрольоване управління – адаптивна автоматизація. Воно дає дронам можливість запускати і виконувати заданий процес незалежно один від одного, з можливістю втручання людини, якщо це необхідно. в) Повне автономне управління – системна статична автоматизація, коли дрони можуть приймати всі необхідні рішення для успішного завершення місії без необхідності втручання людини. На теперішній час завдання управління БпЛА можна розділити на три типи: керування одиночним БпЛА, керування БпЛА у складі групи, керування роєм.

Перший тип: зовнішні оператори мають повний контроль над БпЛА. Автоматичні процеси відповідають за стандартизовані операції. Параметри руху, параметри навігації, параметри технічного обслуговування та планування місії контролюються людиною. Цей тип БпЛА не має високого рівня автономності.

Другий тип включає керування групою БпЛА. Ці БпЛА можуть об'єднуватися в групи, і кілька осіб повинні керувати ними разом. Цей вид діяльності спрямований на зміну ролі людини з пілота, штурмана, на командира. Такі групи БпЛА працюють наступним чином:

1) БпЛА мають незалежні завдання, але працюють у спільному повітряному просторі;

2) БпЛА об'єднані у структуру, але всередині структур автономна взаємодія здійснюється лише частково;

3) БпЛА об'єднані в рій (поводяться як структури, змодельовані за природними процесами, мають високу інтеграцію та взаємодію).

Третій тип. Управління роями є найбільш складним науковим завданням, яке знаходиться на стику робототехніки, інформаційних технологій, штучного інтелекту, навігації та транспортних технологій.

Удосконалений автором метод розподілу завдань в рою БпЛА при виконанні спеціальних місій [1] дозволяє визначити пріоритет завдань і закріпити завдання за конкретними БпЛА однак не дає відповідь на питання як спланувати оптимальним чином маршрути польотів, враховуючи динамічно мінливі складні середовища польоту, забезпечуючи вимоги до безпеки польотів та пріоритетність завдань.

В якості базового методу для удосконалення використаємо метод рою часток, який зарекомендував

себе як достатньо ефективний алгоритм рішення схожих завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найпоширенішим методом планування траєкторії руху роїв БпЛА серед алгоритмів, аналоги яких зустрічаються у живій природі, у спеціальній літературі визначено ParticleSwarmOptimization (PSO). Даний метод відомий простотою та ефективністю. Значна кількість дослідників, використовуючи метод PSO в якості базового удосконалює його. Так, в роботі [2] розроблений розширений алгоритм оптимізації дискретного рою частинок (DPSO) для вирішення завдання комівояжера.

Розподілений алгоритм дослідження на основі PSO для вирішення часткових завдань в сценаріях катастроф наведений у роботі [3]. В статті [4] наведено оптимізацію параметрів, що впливають на продуктивність алгоритму PSO, з метою зменшення втрат ефективності та виникнення субоптимальних рішень.

Однак у існуючих дослідженнях використання методу PSO для планування траєкторії кількох БпЛА все ще має такі проблеми:

а) при наявності в навколишньому середовищі значної кількості перешкод, особливо у гірській місцевості, урбанізованій місцевості, заводських забудовах еволюційним алгоритмам важко знайти можливе рішення;

б) обмеження спільної роботи кількох БпЛА зі складу рою. Через численні обмеження щодо уникнення зіткнень у стиснутому просторі, БпЛА зі складу рою (як у алгоритмі розглядаються у вигляді частинок) важко оновити свої траєкторії до поточного оптимального напрямку, що призводить до труднощів у конвергенції під час процесу оптимізації.

в) проблема потрапляння до локального оптимуму.

Дані проблеми вирішуються шляхом удосконалення методу.

Метою роботи є удосконалення методу планування руху рою безпілотних літальних апаратів при виконанні спеціальних місій з урахуванням пріоритету завдань в складному середовищі.

Основний матеріал

Для удосконалення відповідного методу введено двохетапність планування шляху. На першому етапі метод ініціює траєкторії польоту БпЛА та призначає пріоритети БпЛА. На другому етапі окремі БпЛА з високим пріоритетом використовують алгоритм PSO для планування шляху, тоді як початковий рій частинок вибірково успадковує результати попередньої ініціалізації.

Визначимо набір оптимальних або субоптимальних маршрутів польоту від початкової точки до пункту призначення, забезпечуючи при цьому вимоги безпеки. Ці маршрути розроблені для кількох БпЛА зі складу рою. Безпека означає здатність БпЛА успішно уникати перешкод у складних умовах зовнішнього середовища при виконанні спеціальних місій та запобігати зіткненням між собою.

Позначимо середовище польоту БпЛА як E, кількість БпЛА у складі рою N, кількість завдань K. Кожен БпЛА рухається зі швидкістю v_i. Для кожного i-го БпЛА i=[1…N], його конкретне j-те завдання зі складу плану a_i включає початкову точку виконання завдання $x_{s_{ij}}$ та кінцеву точку $x_{g_{ij}}$. Розіб'ємо шлях від початкової точки до кінцевої точки на ділянки траєкторії, що визначаються точками P^i:

$$P^i = \left\{ p_1^i, p_2^i, ..., p_w^i \right\}, \quad (1)$$

де p_w^i є w −ою точкою маршруту i −го БпЛА, що також визначає й відповідну ділянку руху. Тоді $W_i = | P^i |$ визначає кількість елементів маршруту руху i −го БпЛА.

Вочевидь, що $p_1^i = x_{s_i}; p_w^i = x_{g_i}$.

Необхідно визначити такий набір шляхів L, щоб досягалася цільова функція:

$$L = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{K} l_i j \to min \quad (2)$$

при системі обмежень.

Введемо відповідну систему обмежень, яка у загальному випадку буде реалізовуватися на визначенні вартості елементів руху БпЛА зі складу рою та відповідати загально визначеному підходу у формуванні системі "штрафів". Для визначення штрафів введемо деяку систему показників. В цій системі нижній індекс відповідає наступному фізичному обмеженню.

Штраф довжини польоту – обмеження "1".

Розіб'ємо траєкторію польоту БпЛА на кілька вузлів і підсумовуємо довжини траєкторії польоту, обчислюючи відстані між вузлами. Формула для розрахунку довжини шляху i-го БпЛА виглядає так:

$$F_1^i = \sum_{w=1}^{W_i - 1} \left| \overrightarrow{p_w^i p_{w+1}^i} \right|, \quad (3)$$

де довжина вектору визначається за відомою формулою [5]:

$$\left| \overrightarrow{p_w^i p_{w+1}^i} \right| = \sqrt{\begin{matrix} (x_{(w+1)}^i - x_w^i)^2 + \\ +(y_{(w+1)}^i - y_w^i)^2 + (z_{(w+1)}^i - z_w^i)^2 \end{matrix}}. \quad (4)$$

де права частина рівняння визначає координати вузлів.

Штраф небезпеки маршруту польоту – обмеження "2".

Під час виконання місії БпЛА повинен враховувати небезпеки, пов'язані з перешкодами для забезпечення безпеки польоту. При аналізі обмежень польоту перешкоди зазвичай моделюються у вигляді циліндрів, і ризик небезпеки зростає зі зменшенням відстані до центру циліндра. Показником загрози для БпЛА можна вважати її ступінь.

Ступінь загрози для БпЛА розрахуємо за такою формулою:

$$F_2^w = \sum_{w=1}^{W_i - 1} \sum_{q=1}^{Q} E_q(\overrightarrow{p_w^i p_{w+1}^i}) \quad (5)$$

де E_q є ступінь загрози q-ої перешкоди на відрізку шляху $p_w^i p_{w+1}^i$.

Розрахунок E_q заснований на відносній відстані d_q між БпЛА та перешкодою так:

$$E_q = \begin{cases} 0, \text{ якщо } d_q > S_q + R_q; \\ \left(S_q + R_q\right) - d_q, \text{ якщо } R_q < d_q \le S_q + R_q; \\ \infty, \text{ якщо } d_q \le R_q, \end{cases} \quad (6)$$

де S_q позначає безпечну дистанцію (зона, в якій забезпечується відсутність зіткнення перешкоди й БпЛА); R_q – циліндричний радіус q −ої перешкоди; Q – загальна кількість перешкод.

Штраф небезпеки висоти на маршруті польоту – обмеження “3”.

Висота польоту БпЛА зазвичай обмежується нижнім та верхнім рівнем.

Формула для розрахунку показника висоти, який враховується при визначенні оптимальності маршруту виглядає так:

$$F_3^w = \sum_{w=1}^{W} H^w; \quad (7)$$

$$H^w = \begin{cases} \left| h^w - \dfrac{h_{max}^w - h_{min}^w}{2} \right|, h_{min}^w \le h^w \le h_{max}^w, \\ \infty, \text{ в іншому випадку} \end{cases} \quad (8)$$

де H^w є показником обмеження висоти; h^w – поточна висота БпЛА на w–ій ділянці руху; h_{min}^w, h_{max}^w – мінімальне та максимальне обмеження висоти на w-й ділянці відповідно.

Штраф згладжування траєкторії на маршруті польоту – обмеження “4”.

Для розрахунку показника “штрафу”, пов’язаного з потребою згладжування траєкторії для БпЛА на визначеній ділянці маршруту руху, необхідно визначити кути повороту:

$$\varphi_i^w = arctg\left(\frac{\left| \overrightarrow{p_w^i p_{w+1}^i} \times \overrightarrow{p_{w+1}^i p_{w+2}^i} \right|}{\overrightarrow{p_w^i p_{w+1}^i} \cdot \overrightarrow{p_{w+1}^i p_{w+2}^i}} \right). \quad (9)$$

Формула для визначення кута набору висоти БпЛА має вигляд:

$$\varphi_i^w = arctg\left(\frac{z_{(w+1)}^i - z_w^i}{\overrightarrow{p_w^i p_{w+1}^i}} \right). \quad (10)$$

Тоді показник має вигляд:

$$F_4^w = a_1 \sum_{w=1}^{w-2} \varphi^w + a_1 \sum_{w=1}^{w-1} \left| \varphi^w - \varphi^{w-1} \right|, \quad (11)$$

де α_1 та α_2 вагові коефіцієнти складових показника, що відповідають умові $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Штраф безпечної дистанції між БпЛА – обмеження “5”.

Позначимо $d(m_1, m_2)$ як відстань між m_1 та m_2 БпЛА зі складу рою. Позначимо $S_{m_1 m_2}$ як безпечну дистанцію між m_1 та m_2 БпЛА, виходячи з їх функціонального призначення та умов виконання місії. Тоді обмеження має вигляд:

$$F_5^w = \sum_{i=1}^{N} F_i^w; \quad (12)$$

$$F_i^w = \begin{cases} 0, \text{ якщо } d(m_1, m_2) \ge S_{m_1 m_2}; \\ \infty, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (13)$$

Перетворення обмежень застосування БпЛА зі складу групи у функцію штрафів дозволяє кількісно оцінити ефективність їх шляхів на основі значення цієї функції. Перетворення обмежень траєкторії руху БпЛА у функцію витрат дозволяє кількісно оцінити якість їхніх шляхів на основі значення цієї функції:

$$F = \sum_{w=1}^{W} \sum_{\eta=1}^{5} \beta_1 F_\eta^w, \quad (14)$$

де β_η – є ваговий коефіцієнт обмеження η, яких у статті введено п’ять (3), (5), (7), (11), (13).

Етап удосконаленого методу планування руху рою БпЛА при виконанні спеціальних місій використовує відомий метод пріоритетного планування місії БпЛА зі складу рою на основі факторів навколишнього середовища та завдань місії [1]. Додатково БпЛА з низьким пріоритетом виконання завдань повинні забезпечувати відсутність зіткнень з БпЛА з високим пріоритетом для виконання вимог безпеки польотів рою.

Оптимізації рою частинок є інтелектуальним методом оптимізації, який імітує поведінку природного біологічного рою, представляючи ефективну стратегію пошуку та є базовим для даного дослідження. Відповідно до даного методу кожна “частинка” є потенційним рішенням у просторі пошуку, оновлюючи свою швидкість і положення на основі еволюційних найкращих позицій як окремої особи, так і рою. Так кожна частинка відстежує своє власне історичне найкраще положення (індивідуальне оптимальне рішення, що позначимо p_b) та еволюційне найкраще положення всього рою (глобальне оптимальне рішення, що позначимо як g_b). Оновлення швидкості та положення частинок ґрунтуються на цих двох оптимальних рішеннях, що гарантує, що процес пошуку рухається за напрямом підвищення ефективності. Відповідні формули виглядають так:

$$\begin{gathered} v_i^{(k+1)} = \varpi v_i^k + c_1 r_1 (p_{bi}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (g_{b_i}^k - x_i^k); \\ v_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}, \end{gathered} \quad (15)$$

де вектор x представляє собою положення, вектор v швидкість i − ої частинки (i −го БпЛА зі складу рою відповідно). Параметри c_1 та c_2 – коефіцієнти прискорення, які впливають на рух частинок та враховують індивідуальний та соціальний їх досвід. Змінні r_1 та r_2 є рівномірно розподіленими випадковими числами у діапазоні [0,1]. Парметр ϖ позначає інерційну вагу, яка використовується для збалансування локальних й глобальних пошукових

можливостей частинок. $p_{b_i}^{k}$ – це індивідуальне оптимальне положення i –го БпЛА зі складу рою при ітерації k, а g_b – глобальне оптимальне положення всього рою.

Другий етап удосконаленого методу планування руху рою БпЛА при виконанні спеціальних місій ґрунтується на відомому методі швидкого дослідження випадкового дерева. Даний метод забезпечує швидке дослідження неопуклих просторів високої розмірності шляхом випадкової побудови дерева, що заповнює простір.

Після ініціалізації стартової x_{s_i} та цільової точок x_{g_i} метод починає роботу з випадкового вибору точки V_{rand} із заданого простору E. Далі шукається в побудованому дереві вузол, найближчий до V_{rand}, називається V_{nearr}. Далі метод рухається за напрямком від V_{rand} до V_{nearr} за заздалегідь визначеним розміром кроку, що генерує новий вузол V_{new}. Після генерації V_{new}, метод виконує перевірку на зіткнення, щоб переконатися, що новий вузол не розташований у зоні перешкоди. Якщо перевірку на зіткнення пройдено, V_{nearr} встановлюється як первинний вузол до V_{new}.

У подальшому метод заново виявляє всі вузли, які потенційно можуть бути батьківськими V_{new} у діапазоні з центром в V_{rand}, з попередньо визначеним розміром кроку δ як деякого радіусу. Якщо існує вузол, який є кращим батьком, ніж поточний, тобто шлях до цього вузла коротший, ніж шлях до поточного батьківського вузла, то батьківський вузол V_{new} змінюється.

Далі метод проходить процес, який називається повторним підключенням. Під час цього процесу перевіряються всі вузли у межах радіусного діапазону. Якщо шлях через V_{new} коротший за шлях до поточного батьківського вузла, тоді батьківський вузол встановлюється на V_{new}.

Грунтуючись на удосконаленому [1] методі розподілу завдань в рою при виконанні спеціальних місій, визначимо пріоритетність БпЛА у рою та застосуємо метод пріоритетного планування маршрутів. Метод пріоритетного планування виконує планування траєкторії відповідно до пріоритету серед БпЛА. При формуванні траєкторій руху БпЛА траєкторії з більш високим пріоритетом встановлюються як перешкоди для уникнення зіткнень між БпЛА тим самим забезпечуючи максимізацію ефективності рою.

Розкриємо сутність удосконаленого методу. Вважаючи складність завдання побудови маршрутів декількох БпЛА застосуємо дворівневу стратегію планування шляху для ефективного розв'язання задачі та зменшення її складності. Загальна структура удосоконаленого методу складається з двох частин: першого рівня та другого рівня. Схема методу наведена на рис. 1.

Перший рівень методу полягає у ініціалізації траєкторії БпЛА за допомогою відомого методу оптимізації рою часток, забезпечуючи початковий орієнтир для подальшого планування. Потім виконується призначення пріоритетів і вводиться стратегія перезапуску, щоб адаптуватися до складних середовищ і уникнути локального оптимуму. Після кожної ітерації планування шляху пріоритети перерозподіляються, а планування повторюється для пошуку кращого рішення. БпЛА з найвищим пріоритетом заходить на другий рівень для більш точного планування шляху з урахуванням подолання перешкод та забезпечення безпечної навігації рою.

На другому рівні під час кожного циклу ітерації виконується ряд операцій, включаючи планування шляху, виявлення зіткнень та оновлення списку перешкод. Планування шляху досягається шляхом успадкування шляхів, ініціалізованих методом рою часток, і попереднього покоління роїв часток «перезапуску», з подальшою їх оптимізацією за допомогою методу випадкових дерев. Таким чином, удосконалений метод інтегрує переваги методів ініціалізації рою часток та випадкових дерев з урахуванням пріоритетності розподілу завдань серед БпЛА зі складу рою для виконання спеціальної місії. Він використовує можливості глобального пошуку для визначення потенційних місць розташування загального оптимального рішення, а також використовує потужні можливості локальної оптимізації алгоритму для точного налаштування рішень. Результатом цієї інтеграції є ефективні та високоякісні рішення для планування шляху. Під час процесу планування шляху другий рівень виконує виявлення зіткнень із глобальним списком перешкод, щоб гарантувати, що згенеровані шляхи є безпечними та надійними. Як тільки планування шляху завершено, оптимізований шлях оновлюється в глобальному списку перешкод. Це дозволяє ефективно використовувати цю інформацію в подальших процесах планування, тим самим підвищуючи ефективність як планування шляху, так і виявлення зіткнень.

Вибір координат при плануванні маршрутів має вирішальне значення для еволюційних алгоритмів. В існуючих еволюційних алгоритмах ці точки шляху зазвичай представляються у вигляді тривимірних координат в декартових координатах [6], полярних координатах [5]. Використання декартових координат для представлення точок шляху дозволяє проводити кращі операції рандомізації, тому у дослідженні вибрані декартові координати.

При ініціалізації траєкторій метод випадкових дерев здатний генерувати попередні траєкторії польоту для окремих БпЛА. Він досліджує та знаходить можливу траєкторію, будуючи деревоподібну структуру, яка починається з початкової точки та поступово розширюється до цільової області. Метод не тільки зосереджується на швидкій генерації контурів, але й оптимізує якість траєкторій шляхом перепідключення існуючих сегментів, щоб гарантувати, що згенеровані шляхи є відносно оптимальними. Оскільки траєкторії польоту БпЛА, згенеровані таким методом, можуть не відповідати фактичним вимогам до польоту множини БпЛА, використаємо криві Дубінса для згладжування та отримання фактичних траєкторій польоту. В статті не будемо розкривати відомі методи, а лише зробимо відповідні посилання [7] на базову теорію.

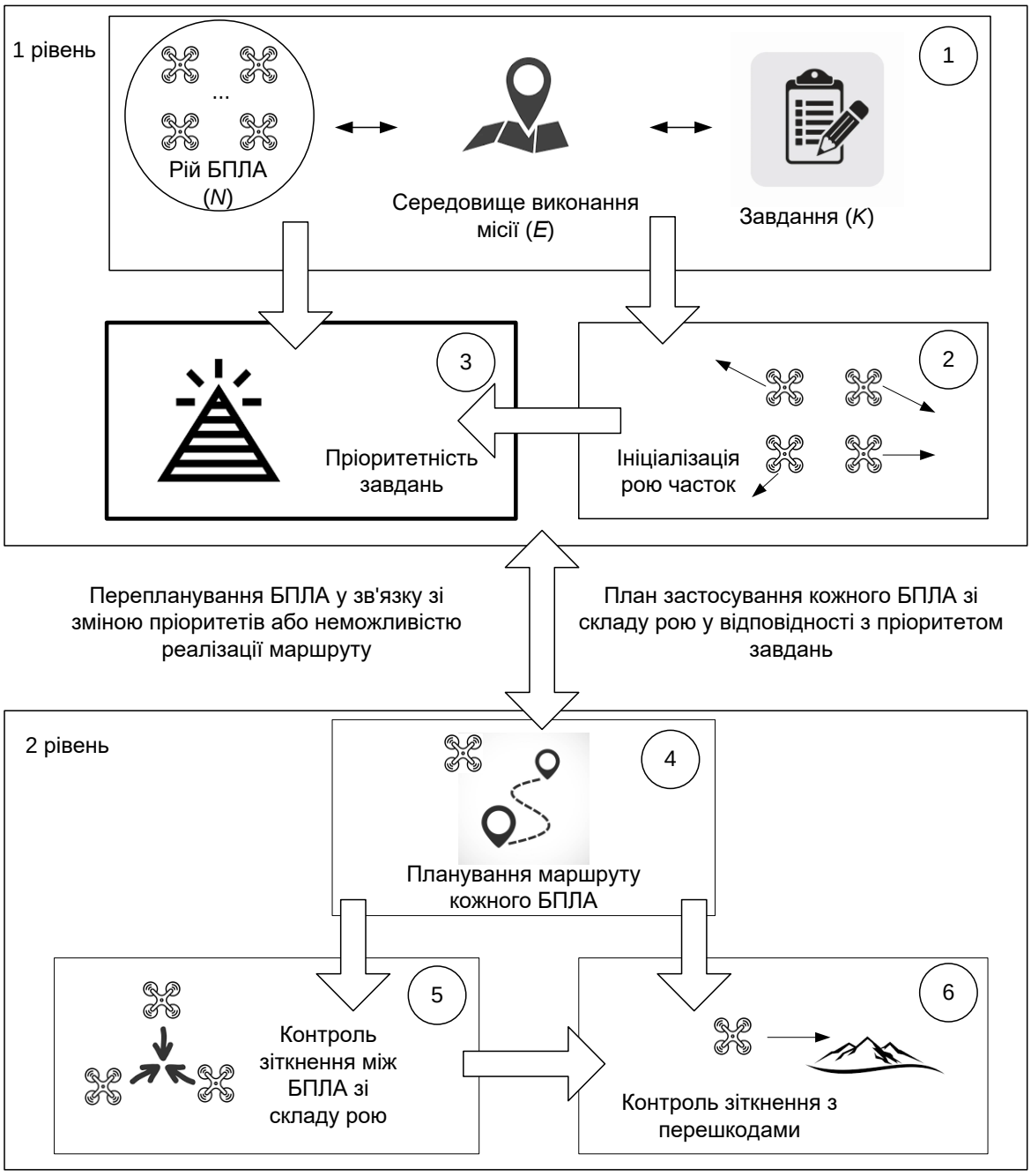

Рис. 1. Схема удосконаленого методу

Після згладжування Дубінса отримана траєкторія відповідає обмеженням продуктивності БпЛА й може бути використана для організації польоту у відповідності з пріоритетністю завдань спеціальної місії.

Висновки

Таким чином, використання методу випадкових дерев для ініціалізації траєкторії БпЛА може забезпечити попереднє та ефективне розуміння для подальшого розподілу пріоритетів. Такий підхід підвищує ефективність пошуку та якість методу ініціалізації рою часток, одночасно знижуючи ризик потрапити в пастку локального оптимуму. Цей метод демонструє значну гнучкість і застосовність при роботі зі складними середовищами та обмеженнями.

З урахуванням того, що спеціальні місії роїв БпЛА виконуються у складних умовах зовнішнього середовища, з метою адаптації до складних умов та уникання потрапляння траєкторій БпЛА в локальний оптимум застосуємо стратегію перезапуску у призначенні пріоритетів БпЛА.

Після кожної ітерації перезапуску для повного використання результатів попереднього рішення зберігаємо стани деяких частинок з попередньої ітерації для полегшення швидкої конвергенції.

З іншого боку, для підтримки різноманітності частинок метод також вводить деякі випадкові частинки на цій основі. Вони збільшують простір дослідження та допомагають алгоритму уникнути ло-кальних оптимальних рішень. Експериментальні результати в чотирьох сценаріях з роєм у складі сорока

БпЛА демонструють кращу продуктивність. Масштабність рою досліджувалось для рою з п’ятисот БпЛА, що дозволяє зробити висновок про масштабованість методу на значні розміри задачі виконання спеціальних місій.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Список літератури

1. Галінський, Д. Динамічний метод розподілу завдань в рою БпЛА при виконанні спеціальних місій. *Випробування та сертифікація*, 2025, 3(9), 87-94. https://doi.org/10.37701/ts.09.2025.11
2. Phung, M.D.; Quach, C.H.; Dinh, T.H.; Ha, Q. Enhanced discrete particle swarm optimization path planning for UAV vision-based surface inspection. Autom. Constr. 2017, 81, 25–33. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.04399
3. Sánchez-García, J.; Reina, D.; Toral, S. A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario. Future Gener. Comput. Syst. 2019, 90, 129–148. https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.048
4. Wu, X.; Bai, W.; Xie, Y.; Sun, X.; Deng, C.; Cui, H. A hybrid algorithm of particle swarm optimization, metropolis criterion and RTS smoother for path planning of UAVs. Appl. Soft Comput. 2018, 73, 735–747. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2018.09.011
5. Rakha, T.; Gorodetsky, A. Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. Autom. Constr. 2018, 93, 252–264. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002
6. Pasha, J.; Elmi, Z.; Purkayastha, S.; Fathollahi-Fard, A.M.; Ge, Y.E.; Lau, Y.Y.; Dulebenets, M.A. The drone scheduling problem: A systematic state-of-the-art review. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2022, 23. URL: https://www.ieee.org/publications/rights/index.html
7. Dubins, L. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. Am. J. Math. 1957, 79, 497–516. https://doi.org/10.2307/2372560
8. Foudeh, H.A.; Luk, P.C.K.; Whidborne, J.F. An advanced unmanned aerial vehicle (UAV) approach via learning-based control for overhead power line monitoring: A comprehensive review. IEEE Access 2021, 9, 130410–130433. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110159
9. Goel, U.; Varshney, S.; Jain, A.; Maheshwari, S.; Shukla, A. Three Dimensional Path Planning for UAVs in Dynamic Environment using Glow-worm Swarm Optimization. Procedia Comput. Sci. 2018, 133, 230–239. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.028
10. Gohari, A.; Ahmad, A.B.; Rahim, R.B.A.; Supa’at, A.S.M.; Abd Razak, S.; Gismalla, M.S.M. Involvement of surveillance drones in smart cities: A systematic review. IEEE Access 2022, 10, 566–598. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3177904

Received (Надійшла) 22.12.2025
Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026
Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Галінський Дмитро Олександрович – аспірант, Українська державна льотна академія, Кропивницький, Україна;
Dmytro Galinskyi – Postgraduate student, Ukraine State Flight Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: galinskyid@gmail.com; ORCID Author ID: https://orcid.org/0000-0003-0385-9323.

Models and method of planning the motion of a swarm of UAVs when performing special missions taking into account the priority of tasks

Dmytro Galinskyi

Abstract. Relevance. The article presents a method for planning the movement of a swarm of unmanned aerial vehicles (UAVs) improved by the author when performing special missions, taking into account the priority of tasks in a complex environment, which surpasses known methods in terms of speed and accuracy of convergence and execution time. **Object of research**: processes of using swarms of unmanned aerial vehicles when performing special missions. **Purpose of the article**: improving the method of planning the movement of a swarm of unmanned aerial vehicles when performing special missions, taking into account the priority of tasks in a complex environment. **Research results**. In the article, a two-stage path planning method is introduced to improve the UAV movement planning method. The particle swarm optimization (PSO) method, which has proven to be a fairly effective algorithm for solving similar tasks, is used as the basic method for improvement. In the first stage, the method initiates UAV flight trajectories and assigns priorities to UAVs from the swarm based on environmental factors and mission tasks. In the second stage, individual UAVs with high priority use the PSO algorithm, which is based on the well-known fast random tree exploration method, for path planning, while the initial particle swarm selectively inherits the results of the previous initialization. Since the UAV flight trajectories generated by this method may not meet the actual flight requirements of the UAV swarm, Dubins curves are used to smooth and obtain actual flight trajectories in accordance with the priority of the special mission tasks. **Conclusions**. The proposed hybrid approach combines trajectory initialization using the random tree method (RRT) with particle swarm optimization (PSO), which allows for effective bypassing of local optima in complex environments. The use of a penalty function to maintain safe distances in combination with a restart strategy and preservation of “elite” states ensures fast convergence and high stability of the algorithm. The experimentally proven scalability of the method to groups of up to five hundred UAVs confirms its application for performing special missions in conditions of high agent density and dynamic constraints.

Keywords: air transport, unmanned aerial vehicle, genetic algorithms, information technology, navigation, route planning, transportation technology, artificial intelligence.