

МОДЕЛЬ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ РУХУ ОДНОРІДНОЇ ГРУПИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Анотація. В статті визначено, що на теперішній час існує значна кількість моделей, методів, які дозволяють ефективно планувати маршрут руху БпЛА для виконання завдань, однак наступним етапом розвитку роботизованих технологій є колективне застосування різномірних систем для виконання спільних завдань. Одночасне прибуття у необхідне місце або місця – один з елементів виконання місії, що потребує спільного планування та координації між БпЛА у групі. Мета місії полягає в тому, що група БпЛА повинна досягти місця призначення одночасно, що досягається шляхом створення траєкторій руху однакової довжини, допускаючи, що всі БпЛА летять з однаковою швидкістю. В статті отримала подальший розвиток модель планування маршрутів руху однорідної групи безпілотних літальних апаратів, яка, на відміну від існуючих, враховує обмеження та вимоги дотримання безпеки руху БпЛА та забезпечує одночасне прибуття групи до кінцевої точки виконання місії.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; генетичні алгоритми; інформаційні технології; оптимізація траєкторії руху; планування маршрутів руху групи БпЛА; управління повітряним рухом; штучний інтелект.

Вступ

Постановка проблеми. Застосуванню безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА) у всіх сферах людської діяльності присвячено значну кількість публікацій та наукових досліджень. На теперішній час існує значна кількість моделей, методів, які дозволяють ефективно планувати маршрут руху БпЛА для виконання завдань, однак наступним етапом розвитку роботизованих технологій є колективне застосування різномірних систем для виконання спільних завдань. Одночасне прибуття у необхідне місце або місця – один з елементів виконання місії, що потребує спільного планування та координації між БпЛА у групі. Мета місії полягає в тому, що група БпЛА повинна досягти місця призначення одночасно, що досягається шляхом створення шляхів однакової довжини, допускаючи, що всі БпЛА летять з однаковою швидкістю. Для створення шляхів однакової довжини використовується аналогія з розтягуванням ланцюжка пружин, яка з'єднує точки маршруту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання побудови оптимальних (раціональних) маршрутів руху груп БпЛА для виконання спільних місій є предметом дослідження значної кількості вчених у галузі системного аналізу, математичного моделювання, оптимізації, штучного інтелекту.

Дослідження, що відображені у статті, ґрунтуються на роботах [1-4], в яких з позиції побудови генетичних алгоритмів вирішується завдання планування маршрутів, приводяться оригінальні методи, що залежать від різних зовнішніх факторів.

Слід також відзначити роботи [5-8], в яких розвиваються методи пошуку та моніторингу, як основного призначення БпЛА, що дозволяє зробити висновки про результативність планування маршрутів.

В роботах [9-12] розроблені оптимізаційні постановки та математичні моделі планування маршрутів польотів БпЛА, а також однорідної групи БпЛА при виконанні різноманітних завдань.

Результати аналізу схожих робіт свідчать про те, що дослідники менше звертають увагу на шви-

дкість обчислень при сучасному рівні розвитку апаратних засобів. В той же час можливість оперативно перепланувати маршрут руху в залежності від умов обстановки та впливу сукупності внутрішніх та зовнішніх факторів є важливою спроможністю групового застосування БпЛА.

Метою статті є удосконалення моделі планування руху однорідної групи БпЛА.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо N БпЛА, які починають рух з точки старту у момент часу t_s та повинні досягти цільового пункту призначення у момент часу t_f , де $t_s < t_f$. Точки старту та точки цілі місії можуть бути з'єднані через набір маршрутних точок, як це наведено на рис. 1.

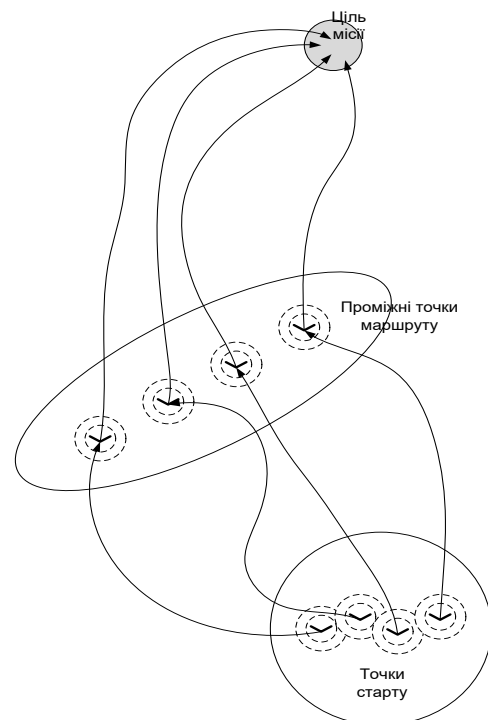


Рис. 1. Сфери безпеки та дальності руху БпЛА (джерело: розроблено автором)

Дана модель є спрощеною, оскільки навколишнє середовище може мати перешкоди, які вимагають модифікації маршруту руху для уникнення зіткнення. Позиції кожного БПЛА у точках старту відомі, а позиції в точці цілі визначені заздалегідь для максимізації ефективності виконання місії кожним БПЛА. Вважаємо, що група БПЛА є однорідною, кожен елемент групи має однакові кінематичні та динамічні характеристики. Допустимо, що кожен БПЛА знаходиться в центрі двох концентричних сфер, які лежать в центрі мас БПЛА. Внутрішня сфера є сферою безпеки з радіусом R_s , тоді як зовнішня сфера зв'язку радіусом R_r , яка представляє радіус дії передавача таким чином, що $R_r > R_s \geq 1/k_{max}$. Отже, шляхи можуть бути промодельовані у вигляді труб з радіусами R_s навколо маршрутів руху, як це наведено на рис. 2.

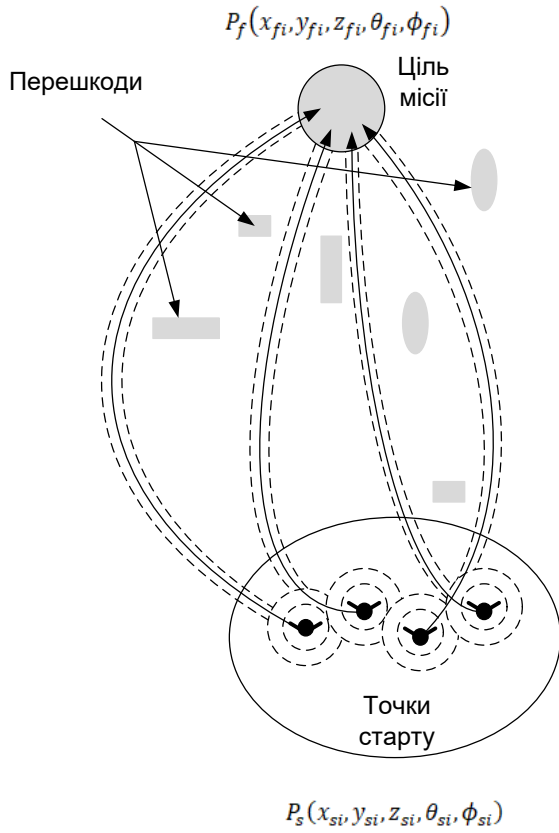


Рис. 2. Сценарій планування маршрутів декількох БПЛА (джерело: розроблено автором)

Загальну постановку завдання планування маршрутів руху БПЛА можна записати так: сформувавши найкоротші шляхи $\{r_1(q), r_2(q), \dots, r_N(q)\}$ для множини БПЛА $\{UAV_1, UAV_2, \dots, UAV_N\}$ таких, що для i -го та j -го БПЛА виконується:

$$h_{f,i} = h_{f,j} \quad (1)$$

при обмеженнях:

$$C = \begin{cases} |v_i| = |v_j|; \\ C_k: k \leq k_{max}; \\ C_\tau: \tau \leq \tau_{max}; \\ C_{safe}: r_i(q) \cap r_j(q) = \emptyset, i \neq j; \\ R_r > R_s \geq 1/k_{max}. \end{cases} \quad (2)$$

Розглянемо планування маршруту для одного БПЛА від точки старту до цільової точки (точки виконання місії). Планувальник маршруту створює шлях $r(q)$, що з'єднує початкову позицію: $P_s(x_s, y_s, z_s, \Theta_s)$ та цільову точку $P_f(x_f, y_f, z_f, \Theta_f)$:

$$P_s(x_s, y_s, z_s, \Theta_s) \xrightarrow{r(q)} P_f(x_f, y_f, z_f, \Theta_f). \quad (3)$$

Розширення рівняння (3) для врахування маршрутизації N БПЛА виконується так, що кожен БПЛА проходить через n_p точок, що представляється як:

$$\begin{aligned} &P_{s,i,j-1}(x_{s,i,j-1}, y_{s,i,j-1}, z_{s,i,j-1}, \theta_{s,i,j-1}, \psi_{s,i,j-1}) \\ &\xrightarrow{r_{i,j-1}(q), C_{safe}, C_{len}} P_{f,i,j}(x_{f,i,j}, y_{f,i,j}, z_{f,i,j}, \theta_{f,i,j}, \psi_{f,i,j}); \end{aligned} \quad (4)$$

$$|k_i(q)| < k_{max}, |\tau_i(q)| < \tau_{max}, i = 1, \dots, N, \\ j = 2, \dots, n_p,$$

де τ – кручення; k – кривизна; k_{max} – обмеження на максимальну кривизну; τ_{max} – обмеження на максимальне кручення; C_{safe} , та C_{len} – обмеження на безпеку руху (огинання перешкод) та довжину шляху. Обмеження на довжину шляху $h(q)$ для групи БПЛА має вигляд:

$$C_{len} = \min \int_{s_1}^{s_2} |h(q)| dq, \quad (5)$$

де

$$h(q) = \int_{q_1}^{q_2} \sqrt{\dot{x}(q)^2 + \dot{y}(q)^2 + \dot{z}(q)^2} dq, \quad (6)$$

де $q \in [q_1, q_2]$; $\dot{x}(q) = dx/dq$; $\dot{y}(q) = dy/dq$; $\dot{z}(q) = dz/dq$ є годографами.

Для польотів на постійній висоті формула (4) зводиться до двовимірної форми:

$$\begin{aligned} &P_{s,i,j-1}(x_{s,i,j-1}, y_{s,i,j-1}, z_{s,i,j-1}, \theta_{s,i,j-1}) \\ &\xrightarrow{r_{i,j-1}(q), C_{safe}, C_{len}} P_{f,i,j}(x_{f,i,j}, y_{f,i,j}, z_{f,i,j}, \theta_{f,i,j}); \end{aligned} \quad (7)$$

$$|k_i(q)| < k_{max}, i = 1, \dots, N, j = 2, \dots, n_p.$$

Після того, як початкові маршрути визначені, необхідно переконатися:

- у безпеці для польоту;
- досягнення БПЛА мети місії (одночасне прибуття до місця призначення).

При цьому виникає питання часу планування маршрутів руху. Це залежить від наявної інформації про навколишнє середовище та місцезнаходження БПЛА. Один із способів – інтегрувати процес генерації маршруту руху БПЛА з плануванням. Даний підхід схожий на планування маршрутів за допомогою методів оптимізації [1, 2] Однак, він потребує подальшого доопрацювання для створення раціональних маршрутів, а також має значну обчислювальну складність.

Інша можливість полягає в тому, щоб розділити два процеси: генерацію маршрутів та планування руху БПЛА [4]. Тепер виникають дві можливості:

коли планувати – до або після генерації маршруту. Математичну модель руху БпЛА у загальному випадку можна описати кривою. Тому планування маршруту можна розглядати як планування геометричної еволюції кривої.

Маршрут руху у рівнянні (4) повинен задовольняти обмеженням. Значення k_{max} та τ_{max} визначають кінематичні обмеження БпЛА. Також це єдині два параметри, які повністю визначають криву в просторі. У двовимірному просторі для визначення кривої потрібна лише кривизна. Крива, що задовольняє обмеженням на кривизну, є здійсненою траєкторією. Таким чином, можливий маршрут визначається як придатний для руху (відповідає кінематичним та динамічним обмеженням), так і безпечний для польоту (без зіткнень). Тобто, маршрут руху – це або

одна поліноміальна крива або складена крива. Такий маршрут корисний для прогнозування положення БпЛА протягом всієї місії до того, як БпЛА вийдуть на траєкторію. Крім того, це допомагає планувальнику маршруту врахувати кінематичні обмеження на ранній стадії планування маршруту.

Рішення завдання одночасного прибуття групи БпЛА повинно відповідати обмеженням (4). Основними обмеженнями є максимальні обмеження на кривизну та уникнення зіткнень. Модель складається з трьох етапів.

На першому етапі створюються допустимі маршрути, на другому етапі отримані маршрути модифікуються для отримання маршрутів з обмеженням на безпеку. На третьому етапі створюються маршрути однакової довжини. Схема розробленого планувальника маршрутів наведена на рис. 3.

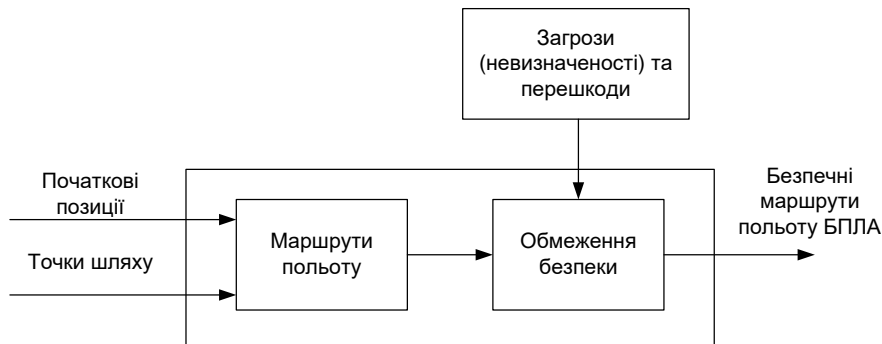


Рис. 3. Узагальнена схема планувальника маршруту (джерело: розроблено автором)

Залежно від обмежень швидкості БпЛА, одночасне прибуття до пункту призначення може бути досягнуто двома способами:

- 1) створення шляхів рівної довжини для БпЛА з постійною швидкістю;
- 2) шляхом створення шляхів різної довжини для БпЛА зі змінною швидкістю.

Рівняння (4) можна розв'язати за допомогою методів оптимізації, але це вимагатиме значних обчислювальних затрат, і отриманий в результаті маршрут може виявитися не оптимальним.

На першому етапі створюються змінні маршрути шляхом з'єднання стартової та фінішної позицій кожного БпЛА. Ці маршрути є початковими траєкторіями. Конструкцію змінних маршрутів можна записати у вигляді:

$$P_{si}(x_{si}, y_{si}, z_{si}, \theta_{si}, \psi_{si}) \xrightarrow{r_i(q)} P_{fi}(x_{fi}, y_{fi}, z_{fi}, \theta_{fi}, \psi_{fi}), \quad (8)$$

$$|k_i(q)| < k_{max}, |\tau_i(q)| < \tau_{max}, \quad i = 1, \dots, N,$$

$$j = 2, \dots, n_p$$

При цьому можна використовувати три типи маршрутів:

- 1) маршрути Дубінса;
- 2) маршрути піфагорійського годографа (ПГ)
- 3) клоатоїдні маршрути (далі – КМ).

Маршрути Дубінса та КМ – це складові шляхи, які є кусково-неперервними, тоді як ПГ – це єдиний

маршрут, який отримується шляхом інтерполяції. Контур Дубінса забезпечує контур з максимальною кривизною [6].

Для безперервного маршруту, яким БпЛА з фіксованим крилом слідує легше, можна використовувати два типи траєкторій: маршрути ПГ та КМ.

На другому етапі допустимі маршрути модифікуються під обмеження безпеки. Виконання цих обмежень забезпечує уникнення зіткнень і достатній простір для маневрування, уникаючи будь-яких перешкод. Отже, побудований маршрут є одночасно і маневреним, і безпечним. Побудований маршрут задовольняє головному обмеженню на максимальну кривизну. Однак, цей маршрут не гарантує безпеку, доки не будуть накладені обмеження безпеки на допустимі маршрути. Для уникнення зіткнення БпЛА з іншими перешкодами визначено два обмеження безпеки:

- 1) мінімальна відстань між БпЛА;
- 2) відсутність зіткнення маршрутів.

Ці обмеження наведені на рис. 4.

Вважається, що кожен БпЛА має безпечний радіус R_s , розташований в центрі маси. Цей радіус безпеки менший за радіус дії датчика, але більший за мінімальний радіус кривизни.

Визначення мінімальної відстані. Розглянемо спочатку випадок, коли кожний з маршрутів польоту не перетинається. Відстань між будь-якими двома маршрутами польоту повинна бути більшою за порогове значення, яке задається мінімальною роздільною відстанню, d_{sep} . Тут за порогове значення

приймається подвоєний безпечний радіус R_{safe} . Це можна інтерпретувати як перевірку на неперетин маршрутів польоту, а також зміщення кривих руху

на відповідність запасу міцності. Це наведено на рис. 4, де маршрути $r_1(q)$ та $r_2(q)$ розділені відстанню d_{sep} .

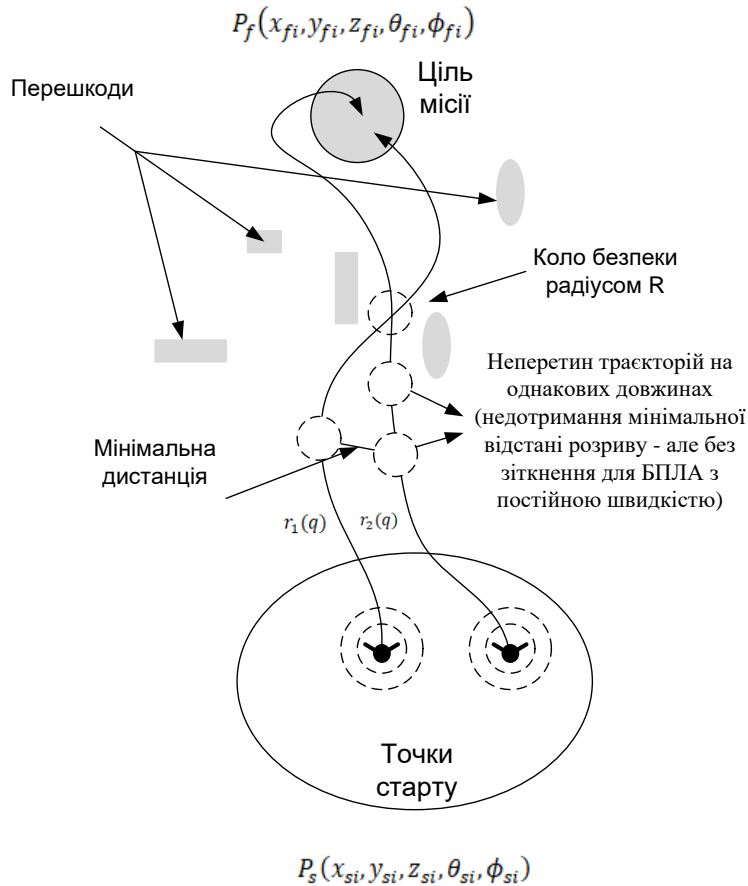


Рис. 4. Обмеження безпеки при побудові маршрутів (джерело: розроблено автором)

Реалізація мінімальної відстані відбувається наступним чином. На рис. 4 наведені кола безпеки, центри яких знаходяться у точках вздовж кожного маршруту. Якщо ці кола безпеки будь-яких двох маршрутів перетинаються, може статися зіткнення. Представляючи відстань між двома маршрутами як $r_k(q)$ та $r_m(q)$, через $d_{sep\ k,m}$, то обмеження мінімальної відстані розходження можна записати:

$$d_{sep\ k,m} = R_{s,k} + R_{s,m}, \quad (9)$$

де $R_{s,k}$ та $R_{s,m}$ – радіуси безпеки k -го та m -го маршрутів відповідно.

Отже, мінімальна відстань $d_{sep\ k,m}$ між будь-якими двома маршрутами БПЛА повинна дорівнювати або бути більшою за суму відповідних радіусів їх кіл безпеки. Відстань між двома БПЛА вимірюється шляхом обчислення евклідової відстані між двома точками на двох різних маршрутах. Відстань між k -м маршрутом та m -м маршрутом при певній довжині або часі визначається за формулою:

$$d_{sep\ k,m} = \sqrt{(z_m - z_k)^2 + (y_m - y_k)^2 + (x_m - x_k)^2}, \quad (10)$$

де (x_k, y_k, z_k) – точка на k -му маршруті, (x_m, y_m, z_m) – точка на m -му маршруті.

Для однорідних БПЛА з однаковими безпечними відстанями рівняння (9) зводиться до:

$$d_{sep\ k,m} > 2R_{safe} \quad (11)$$

Відсутність зіткнення маршрутів. У багатьох випадках побудовані маршрути можуть мати перетини. Це порушує обмеження на безпеку. У таких випадках тест на мінімальну відстань дасть хибний результат. Якщо маршрути перетинаються, це не обов'язково означає, що відбудеться зіткнення. БПЛА зіткнуться лише у тому випадку, якщо вони досягнуть точки перетину одночасно. Кола безпеки перетнуться, якщо БПЛА знаходяться в межах $d_{sep\ k,m}$ при наближенні до точки перетину.

Відповідно до рис. 4, шляхи $r_k(q)$ та $r_m(q)$, уникають зіткнення, якщо різниця між довжинами маршрутів до точки перетину d_{int} задовольняє наступній умові:

$$d_{int\ k,m} = |s_{int,k} - s_{int,m}| > d_{sep} > (R_{s,k} + R_{s,m}), \quad (12)$$

де $s_{int,k}$ та $s_{int,m}$ – довжини шляхів $r_k(q)$ та $r_m(q)$, відповідно, від їх початкових точок до точки перетину.

Якщо маршрути задовольняють обмеженням безпеки, визначеним у рівняннях (11) та (12), то

немає необхідності їх перепланувати. У іншому випадку, маршрути переплануються шляхом зміни кривизни або проходження через проміжні точки та/або позиції.

Якщо маршрут, який можна прокласти, задовольняє умові мінімального розділення у нерівності (11), то маршрути безпечні для проходження й немає необхідності перепланувати. Якщо ця умова не виконується, то перевіряється умова (12) на зіткнення маршрутів на перетині. Якщо обидві умови не виконуються, то потрібне повторне планування. Для групи з N БПЛА, яка використовує n БПЛА за один раз, кількість тестів безпеки T_{safe} , які необхідно провести, становить:

$$T_{safe} = 2 \frac{N!}{n!(N-n)!} \quad (13)$$

Збільшення або переміщення кола (сфери) вздовж маршруту польоту, а потім побудова еволюційної кривої створює або дві криві зсуву для двохвимірної кривої, або трубу (канал) для трьохвимірної кривої. У двохвимірному випадку мінімальна відстань розділення між маршрутами може бути представлена набором еволюційних маршрутів зміщення.

Маршрути зміщення $r_d(q)$ на відстані зміщення R_{safe} задаються формулою:

$$r_d(q) = r(q) \pm R_{safe}n(q), \quad (14)$$

де $n(q)$ – вектор нормалі до $r(q)$, а відстань зміщення дорівнює подвоєному радіусу безпеки.

Аналогічно, для тривимірної маршруту поверхні каналу або труби $r_s(q)$ з безпечним радіусом задається формулою:

$$r_s(q) = r(q) + R_{safe}[n(q), b(q)] \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

де $n(q)$ – нормальний вектор, а $b(q)$ – бінормальні вектори, які можна аналітично обчислити через параметризацію кривої.

Однотимчасне прибуття до кінцевої точки (точки місії) вимагає вирівнювання всіх довжин маршрутів для групи БПЛА, які летять з однаковою швидкістю. Хоча на другому етапі планувальник створює можливі маршрути (ефективні та безпечні). Вони, як правило, не мають однакової довжини.

Еталонна довжина маршруту необхідна для того, щоб забезпечити мету для модифікації довжини маршруту. Маршрути можна подовжувати, змінюючи обмеження на кривизну. Довжини всіх маршрутів збільшуються до довжини еталонної траєкторії шляхом відповідних перетворень з обмеженнями на кривизну.

Якщо еталонний маршрут, що відповідає маршруту максимальної довжини, задано як r_{ref} , а його довжина як s_{ref} , то

$$r_{ref} = r(s_{ref}), i = 1, \dots, N, \quad (16)$$

Значення кривизни k модифікується так, щоб задовольнити умову:

$$h_{ref} - \{h_i\} = 0, i = 1, \dots, N, \quad (17)$$

де h_i – довжина i -го маршруту, а N – кількість БПЛА.

Еталонний маршрут не враховується в процесі модифікації.

Блок-схема алгоритму одночасного прибуття безпілотних літальних апаратів до пункту призначення наведена на рис. 5.

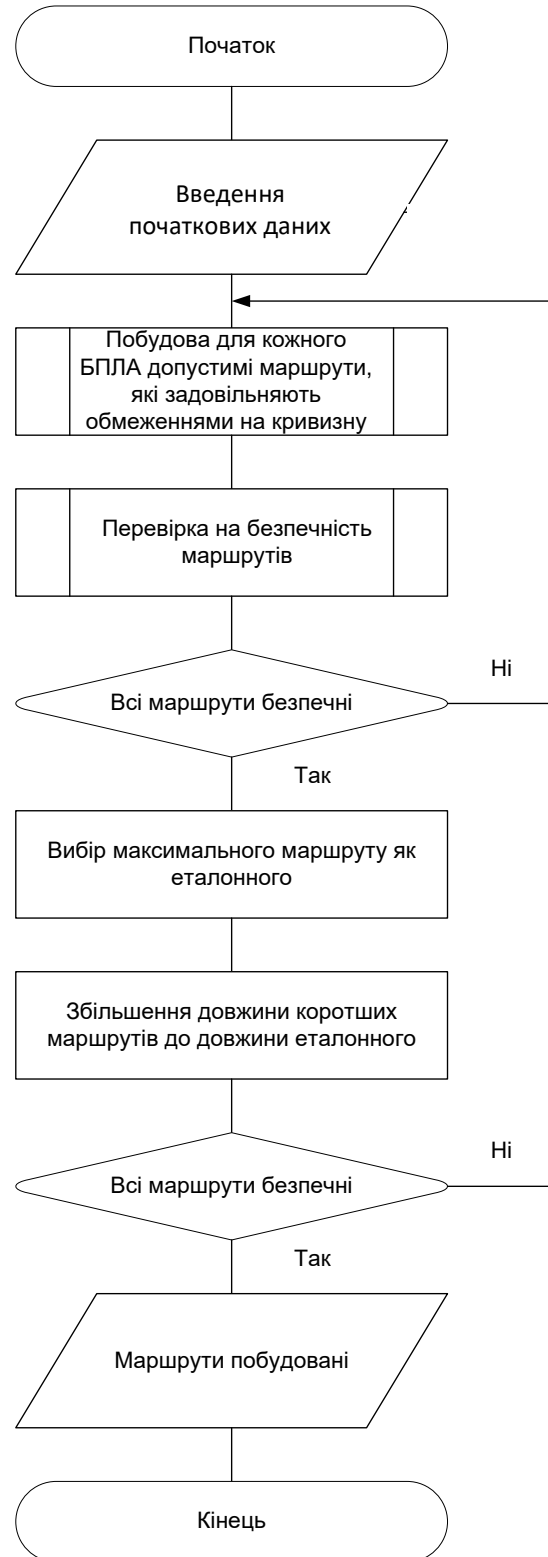


Рис. 5. Блок-схема алгоритму одночасного прибуття безпілотних літальних апаратів до пункту призначення (джерело: розроблено автором)

Швидкість обчислень можна прискорити, використовуючи глобальний планувальник для створення маршрутних точок та/або позицій або шляхом створення проміжних маршрутних точок.

Висновки

Одночасне прибуття БПЛА до точки місії досягається шляхом створення шляхів однакової довжини. Для створення шляхів однакової довжини використовується аналогія з розтягуванням ланцюжка пружин, що з'єднує точки маршруту.

Отримала подальший розвиток модель планування маршрутів руху однорідної групи безпілотних літальних апаратів, що на відміну від існуючих враховує обмеження та вимоги дотримання безпеки руху безпілотних літальних апаратів та забезпечує одночасне прибуття групи до кінцевої точки виконання місії.

Методи побудови маршрутів руху ґрунтуються на кривих Дубінса, годографічних кривих, клотоїдних траєкторіях та узгоджують дії групи щодо виконання місії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Chodnicki, M.; Siemiatkowska, B.; Stecz, W.; Stępień, S. Energy Efficient UAV Flight Control Method in an Environment with Obstacles and Gusts of Wind. *Energies* 2022, 15.
- Huang, G.; Hu, M.; Yang, X.; Lin, P. Multi-UAV Cooperative Trajectory Planning Based on FDS-ADEA in Complex Environments. *Drones* 2023, 7, 55. <https://doi.org/10.3390/drones7010055>
- Liu, Y.; Zhang, F.; Huang, P.; Zhang, X. Analysis, Planning and Control for Cooperative Transportation of Tethered Multi-Rotor UAVs. *Aerosp. Sci. Technol.* 2021, 113, 106673.
- Xu, L.; Cao, X.; Du, W.; Li, Y. Cooperative Path Planning Optimization for Multiple UAVs with Communication Constraints. *Knowl. Based Syst.* 2022, 129, 110164.
- NataliiaYeromina, Tarshyn, V., Petrov, S., Samoilenko, V.T., Tabakova, I., Dmitriiev, O., Surkova, K., Danylko, O., Kushnierova, N., Soroka, M., Salo, N., & Chumak, O. (2021). Method of reference image selection to provide high-speed aircraft navigation under conditions of rapid change of flight trajectory. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, Vol 8(85) ISSN (Print): 2394-5443 ISSN (Online): 2394-7454 <http://dx.doi.org/10.19101/IJATEE.2021.874814>
- Tymochko O., Tymochko O., Trystan A., Matiushchenko O. and Berezhnyi A. Method of Automated Flight Route Planning for Unmanned Aerial Vehicles to Search for Stationary Objects. 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Kyiv, Ukraine, 2020. P. 242-246.
- Бережний А. О., Крижанівський І. М. Комплекс задач системи підтримки прийняття рішення на планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава, 2020. Вип. 1(59). С. 3–6. DOI:10.26906/SUNZ.2020.1.003.
- Бережний А.О., Крижанівський І.М., Барабаш О.В. Метод автоматизованого планування маршрутів безпілотних літальних апаратів з урахуванням виявлення стаціонарних об'єктів. Телекомунікаційні та інформаційні технології. Київ, 2019. Вип. 4(65). С. 90–98. DOI:10.31673/2412-4338.2019.049098.
- Aabid, A.; Parveez, B.; Parveen, N.; Khan, S.A.; Zayan, J.; Shabbir, O. Reviews on design and development of unmanned aerial vehicle (drone) for different applications. *J. Mech. Eng. Res. Dev.* 2022, 45, 53–69.
- Amici, C.; Ceresoli, F.; Pasetti, M.; Saponi, M.; Tiboni, M.; Zanoni, S. Review of propulsion system design strategies for unmanned aerial vehicles. *Appl. Sci.* 2021
- Rojas-Perez, L.O.; Martínez-Carranza, J. On-board processing for autonomous drone racing: An overview. *Integration* 2021, 80, 46–59.
- Tymochko O., Trystan A., Berezhnyi A., Sotnikov O., Matiushchenko O., Kryzhanivskiy I. Vehicles while Monitoring Behavior of Dynamic Objects in a Forest-Steppe Area. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research.* 2020. Vol.8, No 7. P. 3208 – 3215.

Received (Надійшла) 14.12.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 05.03.2025

Model for planning routes for a homogeneous group of unmanned aerial vehicles

Oleksandr Chumak

Abstract. The article determines that currently there are a significant number of models and methods that allow for effective planning of UAV movement routes to perform tasks, however, the next stage in the development of robotic technologies is the collective use of heterogeneous systems to perform common tasks. Simultaneous arrival at the required location or locations is one of the elements of mission execution that requires joint planning and coordination between UAVs in the group. The mission objective is that the UAV group must reach the destination simultaneously, which is achieved by creating trajectories of equal length, assuming that all UAVs fly at the same speed. The article further develops a model for planning the routes of a homogeneous group of unmanned aerial vehicles, which, unlike existing ones, takes into account the limitations and requirements for UAV safety and ensures the simultaneous arrival of the group to the final point of the mission. The planning model has three stages, taking into account the maximum curvature constraint and collision avoidance. In the first stage, permissible routes are created, in the second stage, the resulting routes are modified to obtain routes with safety constraints. In the third stage, routes of equal length are created. A route planner scheme and a flowchart of the algorithm for simultaneous arrival of UAVs at the destination are developed. Methods based on Dubins curves, hodographic curves, clothoid trajectories are used to construct UAV movement routes and coordinate the actions of the group to complete the mission. The speed of model calculations can be accelerated by using a global planner to create waypoints and/or positions or by creating intermediate waypoints.

Keywords: unmanned aerial vehicle; genetic algorithms; information technologies; trajectory optimization; planning of UAV group movement routes; air traffic control; artificial intelligence.