

УДК 621.391.962

Алгоритм просторового керування рухом рою БПЛА з лідером на основі синергетичного підходу

Конорєв О. Ю., Марченко П. А.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна

E-mail: konoriev.oleksandr@iit.kpi.ua, p.marchenko@kpi.ua

Зазначено, що безпілотні літальні апарати (БПЛА) доцільно використовувати у складі роїв (груп) для виконання завдань у складному середовищі з перешкодами в автоматичному або дистанційно-керованому режимі, що потребує алгоритмізації процесу побудови маршрутів руху. Показано, що проблемними аспектами керування роєм БПЛА є їхнє узгодження для виконання єдиного завдання, забезпечення надійності та стійкості зв'язку, оминання складних статичних і динамічних перешкод на маршруті польоту. Проведено аналіз моделей та алгоритмів побудови маршрутів, зокрема тих, що використовують синергетичний підхід, який ґрунтується на відомому місці розташування всіх інших елементів рою. Такий підхід розглянутий лише теоретично і з типовим прикладом для руху у двовимірній площині. Запропоновано вдосконалений алгоритм керування на основі синергетичного підходу для тривимірного простору за наявності лідера, що зменшує обчислювальну складність та час проведення розрахунків. Наведено вираз, що формалізує математичну модель визначення прискорення безпілотного літального апарата із групи (рою), що складається із N елементів. Показано, що для реалізації удосконаленого алгоритму побудови маршруту та керування групою визначення місцеположення ведених елементів групи потрібно проводити відносно позицій маршруту її лідера. Реалізація алгоритму перевірена шляхом математичного моделювання в середовищі Ardupilot SITL та проведенням натурного (льотного) експерименту з використанням групи (рою) з трьох БПЛА типу коптер. Запропонований алгоритм просторового керування рухом рою БПЛА з лідером на основі синергетичного підходу дає змогу утримувати елементи групи у просторі в межах цільової оптимальної відстані між ними. Подальшими дослідженнями слід вважати розроблення методики побудови маршрутів для безколізійного пересування груп (роїв) БПЛА на основі запропонованого алгоритму.

Ключові слова: синергетичний підхід; рій; безпілотний літальний апарат; лідер; алгоритм керування; потенціал притягування/відштовхування; моделювання

DOI: [10.20535/RADAP.2025.100.43-50](https://doi.org/10.20535/RADAP.2025.100.43-50)

Постановка проблеми у загальному вигляді

Розвиток сучасних обчислювальних технологій та поява мініатюрних вимірювальних датчиків і систем збільшує можливості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та розширює спектр їх застосування, охоплюючи галузі сільського господарства, транспорту, безпеки і оборони тощо [1]. Здатність БПЛА виконувати місії в автоматичному або дистанційно-керованому режимі дає змогу використовувати їх для виконання завдань у складних та екстремальних умовах [2].

Ройові технології з БПЛА відкривають нові можливості для вирішення багатьох прикладних задач – підвищення живучості й ефективності безпілотних систем, зменшення часу моніторингу ділянок земної поверхні, спільне використання БПЛА із різними

спеціалізованим корисним навантаженням. Але їхнє застосування пов'язане із труднощами керування та контролю, особливо під час оминання перешкод та уникнення зіткнень між агентами рою (БПЛА) [3].

Під час застосування груп (роїв) БПЛА активно використовуються інформаційні технології, можливості адаптації до навколишнього середовища, самоорганізація у роях (групах), автоматизація та синергія керування. Наприклад, синергетичний підхід, описаний у роботі [4], дає змогу планувати маршрути БПЛА з урахуванням статичних перешкод і забезпечує ефективну координацію руху кожного агента зі складу роя та гарантує безпечну відстань між ними, що дає змогу безколізійного пересування у просторі. Особливістю такого підходу є адаптивність до внутрішніх збоїв і зовнішніх атак: у разі втрати лідера або одного із БПЛА, рій здатний про-

довжувати виконання поставлених завдань завдяки алгоритму самоорганізації.

1 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемними аспектами керування роєм БПЛА залишаються: функціонування БПЛА в розподіленому режимі (узгодження для виконання єдиного завдання роєм), забезпечення надійності та стійкості зв'язку в рої та між роєм і наземною станцією керування (НСК), оминання складних статичних і динамічних перешкод на маршруті польоту. Окремі питання за цим напрямом розглянуті в низці робіт. Так, у [5] пропонується хмарна математична модель для самоорганізації роїв БПЛА та платформа, що дає змогу рою адаптуватися та самоорганізовуватися в режимі реального часу, але в наведеній моделі не вирішено проблемне питання масштабування рою.

У роботі [6] розглянутий покращений підхід на основі глибокого підкріплювального навчання для планування траєкторій БПЛА в сценаріях з динамічними перешкодами, але в цьому підході не вирішується зазначена проблематика для тривимірного простору.

Аналіз впливів різних рівнів точності GPS і затримок зв'язку на координату руху груп БПЛА та можливості уникнення зіткнень розглянуто у [7]. Створено емулятор і змодельовано кілька сценаріїв для перевірки оптимального розташування БПЛА у жорсткому строю, що дає змогу визначити, на скільки відстань між БПЛА і точність визначення координат GPS можуть впливати на швидкість реакції кожного БПЛА в рої та здатність дотримання встановленого маршруту. Водночас запропоновані сценарії не мають практичної реалізації.

Під час практичної реалізації змодельованих алгоритмів керування вплив зовнішніх факторів призводить до певної невідповідності результатів, отриманих під час моделювання в симуляторі, реальним результатом роботи БПЛА, на що акцентують увагу автори [8].

Сутність алгоритму керування на основі синергетичного підходу, наведеного у [4], зводиться до побудови маршруту БПЛА, ґрунтуючись на відомому місці розташування всіх інших елементів рою. Але такий підхід розглянутий лише теоретично і з типовим прикладом для руху в двовимірній площині. Водночас, для обміну інформацією потрібно підтримувати одночасний зв'язок між БПЛА та станцією керування або лідером. У реальних умовах будь-яка затримка в обчисленнях або втрата зв'язку між елементами рою впливає на рух усього рою.

За результатами аналізу наукових публікацій [1–8] можна зробити висновок, що невирішеними залишаються питання стосовно функціонування рою

в тривимірному просторі та адаптація алгоритмів керування до реальних умов з урахуванням змін у зовнішньому середовищі. Наведена практична реалізація алгоритму керування на основі синергетичного підходу [4] свідчить про його недостатню швидкість (значний час обчислення координат і швидкості елементів рою). Тому, вдосконалення такого алгоритму керування БПЛА для зменшення його обчислювальної складності та часу проведення розрахунків є важливим науковим завданням.

На підставі наведеного, метою й основним змістом статті є удосконалення алгоритму просторового керування рухом рою БПЛА з лідером на основі синергетичного підходу для забезпечення безколізійного пересування груп (роїв) БПЛА. Удосконалення алгоритму керування роєм здійснюється завдяки адаптації його роботи у тривимірному просторі, а перевірка реалізації алгоритму – шляхом моделювання у середовищі Ardupilot SITL та проведенням натурного (льотного) експерименту з використанням групи (рою) з трьох БПЛА.

2 Виклад основного матеріалу

Синергетичний підхід керування роєм (групою) рухомих об'єктів [4] передбачає введення поняття гравітаційної взаємодії між агентами, що визначає сили притягування та відштовхування між об'єктами і критичну (мінімальну – максимальну) відстань між ними для формування траєкторії їхнього спільного руху як єдиної структури без зіткнень між собою та перешкодами на маршруті. Вважається, що БПЛА, як елементи рою, є матеріальними точками, на які діють лише сили взаємного притягування і відштовхування, а наявність мас зумовлює інерційні властивості їхнього руху. Тоді, відповідно до другого закону Ньютона, рух матеріальної точки може бути формалізований рівняннями у проєкціях на координатні осі. В роботі [4] зазначена ідея реалізована у вигляді алгоритму для двовимірного випадку (політ рою у площині) без врахування функції лідера.

2.1 Розроблення алгоритму

У статті пропонується алгоритм керування роєм БПЛА для тривимірного простору за наявності лідера з використанням математичної моделі, що базується на синергетичному підході. Положення та рух лідера визначаються оператором через інтерфейс НСК та може бути змінений у режимі реального часу. Удосконалений синергетичний алгоритм керування БПЛА складається із двох основних частин.

Спершу, на основі наявної інформації про координати кожного елемента рою відносно лідера виконується обчислення функції (потенціалу) притягування/відштовхування. Вирази для удосконаленого

потенціалу притягування/відштовхування для тривимірного простору мають такий вигляд [4]:

$$U_i(x_i, y_i, z_i) = U_i^+ - U_i^-, \quad (1)$$

$$U_i^+ = \sum_{j=1, i \neq j}^N U_{i,j}^+ = \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{q m_i m_j}{\bar{R}_{i,j}^2}, \quad (2)$$

$$U_i^- = \sum_{j=1, i \neq j}^N U_{i,j}^- = \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{q m_i m_j}{\bar{R}_{i,j}^2}, \quad (3)$$

$$R_{i,j} = |[x_i, y_i, z_i] - [x_j, y_j, z_j]|, \quad (4)$$

де x_i, y_i, z_i та x_j, y_j, z_j – координати центра мас i -го та j -го БПЛА відповідно, що взаємодіють;
 $i, j \in [0, N - 1]$ – індекси i -го та j -го БПЛА;
 U_i^+, U_i^- – відповідні сумарні потенціали притягування (+) та відштовхування (–), що діють на i -ий БПЛА;

$U_{i,j}^+, U_{i,j}^-$ – потенціали притягування (+) та відштовхування (–) i -го БПЛА відносно j -го БПЛА;

q – коефіцієнт пропорційності, що враховує гравітаційну сталу;

$\bar{R}_{i,j}$ – відстань між центрами мас i -го та j -го БПЛА;

m_i та m_j – відносна маса i -го та j -го БПЛА відповідно.

По-друге визнаються проекції сил взаємодії i -го та j -го БПЛА на осі координат. Для цього виконується побудова та розв'язання диференційного рівняння притягування/відштовхування. Спочатку виконується диференціювання складеної функції (1), а потім отримуємо відповідні проекції траєкторії i -го БПЛА відносно j -го на координатні осі x, y, z :

$$\vec{F}_{x^{i,j}} = \frac{dU_{i,j}}{dx_i} = \frac{dU_{i,j}}{d\bar{R}_{i,j}} \frac{d\bar{R}_{i,j}}{dx_i}, \quad (5)$$

$$\vec{F}_{y^{i,j}} = \frac{dU_{i,j}}{dy_i} = \frac{dU_{i,j}}{d\bar{R}_{i,j}} \frac{d\bar{R}_{i,j}}{dy_i}, \quad (6)$$

$$\vec{F}_{z^{i,j}} = \frac{dU_{i,j}}{dz_i} = \frac{dU_{i,j}}{d\bar{R}_{i,j}} \frac{d\bar{R}_{i,j}}{dz_i}. \quad (7)$$

З урахуванням виразів (2)–(7) наведемо результуюче рівняння для сили притягування/відштовхування, що діє між i -им та j -им БПЛА з урахуванням цільової оптимальної відстані між елементами рою (групи) R_{lim} :

$$\begin{aligned} \vec{F}_{ij}^{\pm} &= \vec{F}_{x^{i,j}} + \vec{F}_{y^{i,j}} + \vec{F}_{z^{i,j}} = \\ &= \sum_{j=0, j \neq i}^N q m_i m_j \frac{\bar{R}_{i,j} - \bar{R}_{lim}}{\bar{R}_{i,j}^3}. \end{aligned} \quad (8)$$

З урахуванням виразів (1)–(4) та (8) вираз, що формалізує математичну модель визначення прискорення веденого БПЛА f із групи (рою), що

складається із N елементів за наявності лідера l у тривимірному просторі можна записати так:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{x} &= \left[\frac{d^2 x_f}{dt^2}, \frac{d^2 y_f}{dt^2}, \frac{d^2 z_f}{dt^2} \right] = \\ &= \frac{1}{m_f} \vec{F}_l^{\pm} = \sum_{f=0, f \neq l}^N q m_l \frac{\bar{R}_{l,f} - \bar{R}_{lim}}{\bar{R}_{l,f}^3}, \end{aligned} \quad (9)$$

де Δ – оператор Лапласа;

x_f, y_f, z_f – координати веденого БПЛА;

$\vec{F}_l^{\pm}$ – сила притягування/відштовхування лідера l ;

m_l, m_f – маса лідера та маса веденого БПЛА;

$\bar{R}_{l,f}$ – відстань між лідером l та веденим БПЛА.

Визначення координат БПЛА із рою (групи) елементів здійснюється подвійним інтегруванням рівняння (9) методом Рунге-Кутти четвертого порядку. Оскільки побудова маршруту руху рою БПЛА передбачає визначення та обробку великого об'єму даних про навігаційні параметри, то запропоновано удосконалення алгоритму керування роєм БПЛА порівняно із вихідним, наведеним у [4]. Реалізація алгоритму просторового керування рухом рою БПЛА з лідером на основі синергетичного підходу передбачає визначення положення елементів рою на основі розв'язання диференційного рівняння (9), зокрема розрахунок відбувається поки відстань між елементами групи не буде відповідати значенню цільової оптимальної відстані R_{lim} , що не завжди є ефективним на практиці, особливо коли елементи знаходяться на великій відстані один від одного.

Для реалізації удосконаленого алгоритму побудови маршруту та керування групою БПЛА на основі наведених диференціальних рівнянь (8), (9) визначення місцеположення ведених елементів групи потрібно проводити відносно позицій маршруту її лідера. Сам же маршрут лідера має визначатись через інтерфейс взаємодії з роєм НСК, що значно покращує швидкість побудови маршруту порівняно з алгоритмом, що запропонований у роботі [4], в якому розрахунок відбувається відносно центру мас групи та не враховує напрямку переміщення рою. Загальна блок-схема роботи алгоритму від зльоту до посадки рою наведена на Рис. 1.

Відними даними для алгоритму є множина позицій лідера T у кожен момент часу, множина початкових позицій P ведених БПЛА у трьох вимірах простору та цільова оптимальна відстань між елементами рою (групи), які в подальшому використовуються для побудови маршруту руху рою до заданої точки. Вихідними даними алгоритму є список маршрутів, де кожен маршрут визначає рух для веденого БПЛА з групи. У запропонованому алгоритмі реалізовано апроксимацію положення БПЛА, що дає змогу визначити наступну позицію веденого елемента рою з меншою кількістю операцій розв'язання диференціального рівняння (9).

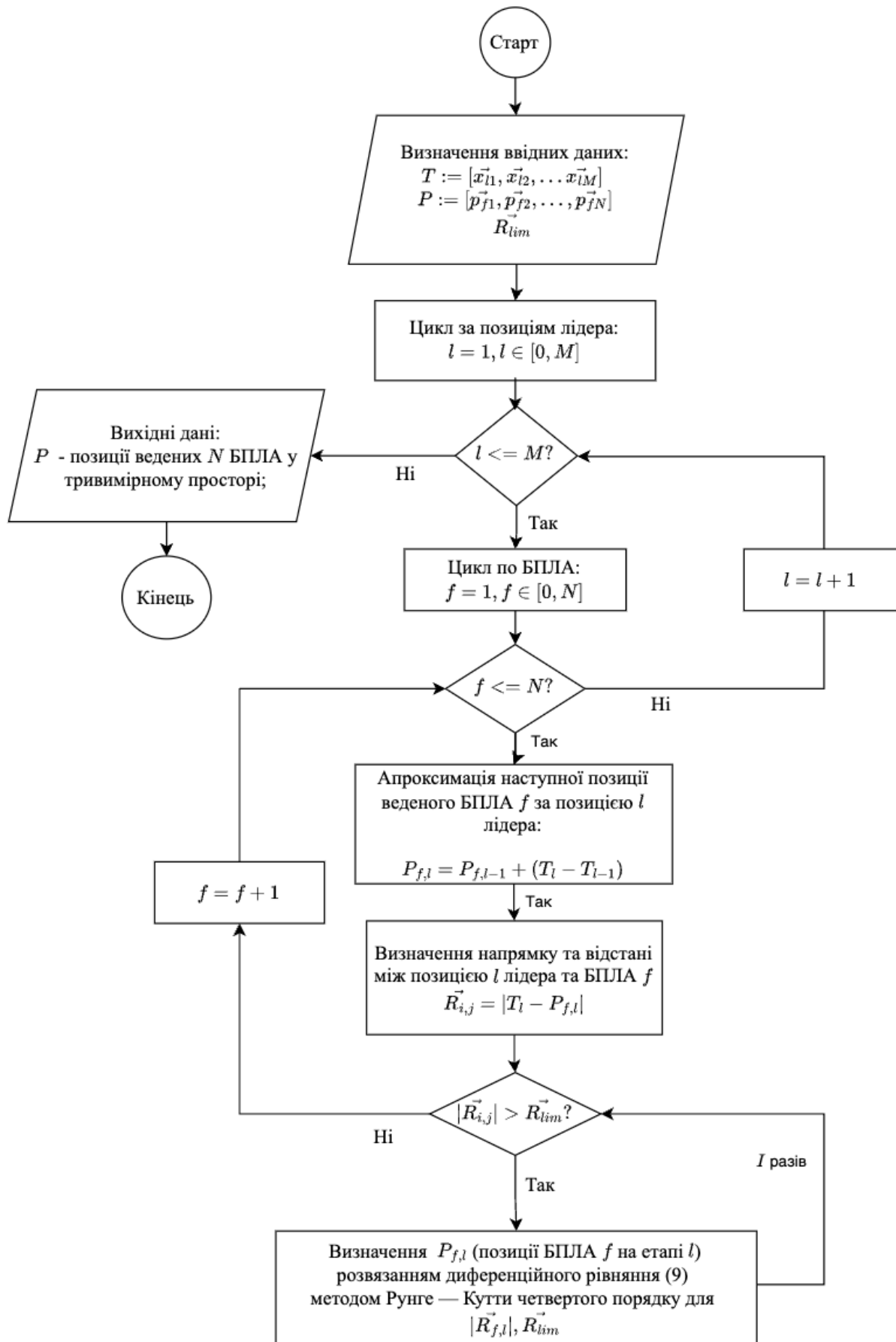


Рис. 1. Блок-схема алгоритму просторового керування рухом рою БПЛА з лідером

Розрахунок траєкторії маршруту групи БПЛА за запропонованим алгоритмом (Рис. 1) можна провести за допомогою оновленого псевдокоду, наведеного на Рис. 2.

Після обчислення лідером параметрів за алгоритмом (Рис. 1), оновленні траєкторії передаються на інші (ведені) БПЛА для виконання на польотному контролері. Новий лідер рою може бути призначений протоколом консенсусу Raft за умов втрати зв'язку [10].

Для підтвердження працездатності удосконаленого алгоритму просторового керування рухом рою БПЛА проводилися:

моделювання в програмному середовищі Ardupilot SITL;

натурний (льотний) експеримент із використанням групи (рою) з трьох БПЛА, один з яких був призначений лідером.

```

1: Вхідні параметри:
2:  $T := [\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_M]$  - позиція та траєкторія руху лідера у кожен момент часу;
3:  $P := [\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_N]$  - позиції ведених БПЛА у кожен момент часу;
4:  $R_{lim}$  - цільова оптимальна відстань між елементами групи;
5: for  $l = 1, 2, \dots, M$  do
6:   for  $f = 1, 2, \dots, N$  do
7:      $P[f] := P[f-1] + (T[l] - T[l-1])$ 
8:     while  $|T[l] - P[f]| > R_{lim}$  do
9:        $P[l] :=$  Вирішити диференційне рівняння (9) для  $R_{l,f} = |T[l] - P[f]|$  та  $R_{lim}$ 
10:      методом Рунге — Кутта четвертого порядку;
11:     end while
12:   end for
13: end for
14: Повернути  $P := [\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_N]$ 

```

Рис. 2. Псевдокод алгоритму просторового керування рухом рою БПЛА з лідером на основі синергетичного підходу

2.2 Моделювання в програмному середовищі

У групі з N елементів, де розрахунок маршруту відбувається на M -етапів вперед, загальна складність запропонованого алгоритму досягає $O(M * N * I)$, що є лінійно залежною відносно розміру рою N . Це значно зменшує загальну складність алгоритму, запропонованого в [4], який має квадратичну залежність відносно розміру рою $O(M * N^2 * I)$. Параметр I визначає кількість ітерацій розв'язання диференційного рівняння (9), що залежить від швидкості досягнення R_{lim} між елементами групи.

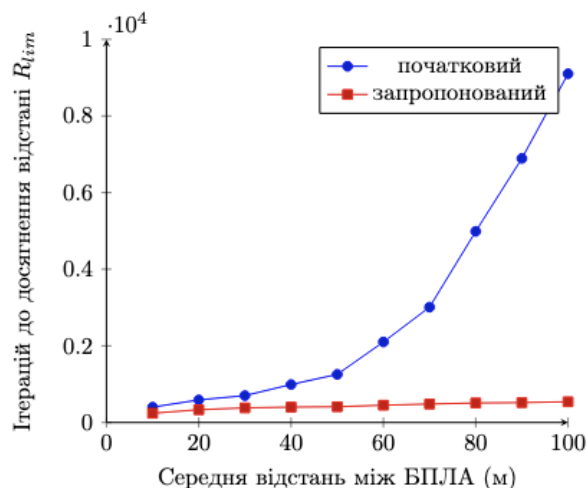
Практична оцінка параметра I для $N = 3$ та $R_{lim} = 6$ м наведена на Рис. 3 та залежить від максимальної відстані розміщення елементів один від одного. Час виконання однієї операції розрахунків алгоритму становить 4 с на бортовому комп'ютері Raspberry Pi 4. Похибка вимірювань становить не більше 5%.

Аналіз графічної залежності (Рис. 3 а) свідчить, що запропонований алгоритм просторового керування рухом рою БПЛА з лідером на основі синергетичного підходу забезпечує лінійний процес наростання кількості ітерацій (запропонований) для досягнення R_{lim} , на відміну від прототипу (початковий) [4],

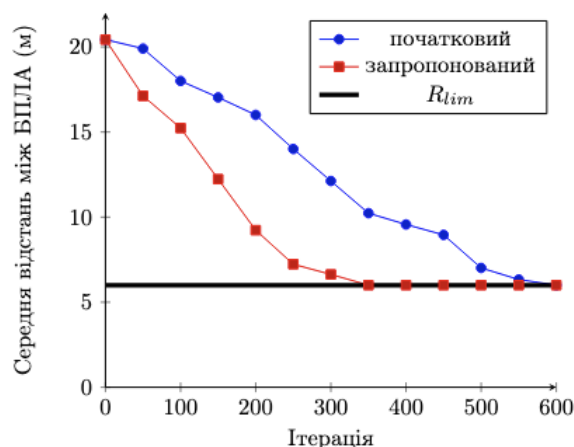
для якого цей показник зростає квадратично. Водночас суттєво покращується збіжність обчислень відстані між БПЛА до R_{lim} , що дає змогу прискорити побудову маршруту (Рис. 3б). Перевагою запропонованого алгоритму є суттєве зменшення обчислень, що дає змогу розв'язувати тривимірну задачу за той же проміжок часу, що і для двовимірного простору, і застосовувати його в системах реального часу з мінімальними затримками.

Моделювання проводилось за такої послідовності дій:

1. Одночасний зліт всіх БПЛА та їхній підйом на задану висоту.
2. Перевірка можливості формування у повітрі кластеру БПЛА заданої конфігурації з трьох БПЛА. Перевірявся варіант формування кластеру у вигляді трикутника із стороною 6 м та 40 м.
3. Політ кластеру із 3-х БПЛА по заданому маршруту.
4. Повернення кластеру до початкової точки зльоту.
5. Порівняння еталонного [4] та запропонованого алгоритмів.



(а)



(б)

Рис. 3. Графік залежності відстані між БПЛА від кількості ітерацій I вирішення рівняння (9)

Результати моделювання підтверджують працездатність удосконаленого алгоритму, який працює краще, ніж еталонний. Зокрема, зліт і формування трикутника, що формується БПЛА, відбувається швидше для запропонованого алгоритму.

2.3 Проведення натурного (льотного) експерименту

Особливістю систем керування роєм БПЛА є потреба у забезпеченні стійкого і надійного зв'язку між елементами рою та наземною станцією керування оскільки керування роєм відбувається на основі обміну інформацією між БПЛА та НСК [9]. Також потрібно враховувати затримку та швидкість сигналу під час обміну інформацією. Архітектура системи керування роєм БПЛА, що використовувалась під час проведення експерименту, наведена на Рис. 4.



Рис. 4. Архітектура системи керування роєм БПЛА

Комунікація між НСК і БПЛА здійснюється через телеметричні модулі (наприклад, LoRa на частоті 900 МГц). Кожен БПЛА у рої оснащений GPS-модулем для розрахунку поточних координат. Використання даних GPS дає змогу відстежувати поточні навігаційні параметри БПЛА – координати

і швидкість. Для підвищення надійності системи передбачено резервний канал зв'язку на основі пульта керування (наприклад, ELRS (ExpressLRS) або CRSF (Crossfire)). Цей канал дає змогу в ручному режимі коригувати політ рою, надаючи додатковий рівень контролю та безпеки, у випадку збою основного каналу телеметрії.

Усі БПЛА оснащені польотними мікроконтролерами із програмним забезпеченням ArduPilot, що забезпечує реалізацію основних польотних функцій, таких як навігація, керування польотом та інтеграція навігаційної інформації в режимі реального часу. Для проведення натурного (льотного) експерименту було задіяно три БПЛА коптерного типу відповідно до архітектури, наведеної на Рис. 4.

Натурний (льотний) експеримент проводився з використанням еталонного та удосконаленого алгоритмів. Для кластеру у формі трикутника зі стороною 6 м обидва алгоритми для чотирьох режимів перевірки працювали задовільно. Під час перевірки алгоритму для кластеру у формі трикутника зі стороною 40 м для еталонного алгоритму спостігались періодичні затримки в польоті групи БПЛА. У цьому режимі для удосконаленого алгоритму, затримки були відсутні, а політ відбувався плавно і рівномірно.

Експеримент підтвердив, що лінійний характер збільшення кількості ітерацій розрахунків починає відчуватись на відстані між БПЛА до 40 м, а ефективність запропонованого алгоритму підвищується зі збільшенням відстані між БПЛА у кластері. Водночас, слід зазначити, що функціонування рою на більших відстанях потребує вдосконалення апаратної складової кожного БПЛА зі складу рою.

2.4 Перспективи подальшого розвитку дослідження

Одним з напрямів подальших досліджень слід вважати розроблення методики побудови маршрутів для безколізійного пересування груп (роїв) БПЛА на основі запропонованого алгоритму.

Висновки

1. Отже для удосконалення алгоритму просторового керування рухом рою БПЛА з лідером на основі синергетичного підходу використано математичну модель визначення прискорення БПЛА, що формалізована виразом (9) та адаптована для керування роєм (групою) БПЛА у тривимірному просторі. Застосування такого підходу дало змогу зменшити складність обчислень та час на їх проведення.

2. Реалізація запропонованого алгоритму була перевірена методом математичного моделювання у програмному середовищі Ardupilot SITL, що підтвердило здатність алгоритму забезпечити лінійний процес наростання кількості ітерацій для досягнення критичної відстані, на відміну від прототипу, для якого цей показник зростає квадратично.

3. Перевірка під час проведення натурного (льотного) експерименту з роєм, що складався з трьох безпілотних літальних апаратів типу коптер з реалізованою апаратною складовою та налаштованою програмною частиною для керування ними підтвердила те, що запропонований алгоритм виявся ефективним у застосуванні в реальних умовах завдяки спрощенню обчислень та часу на їх проведення.

References

- [1] Ann S., Kim Y., Ahn J. (2015). Area Allocation Algorithm for Multiple UAVs Area Coverage Based on Clustering and Graph Method. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, Iss. 9, pp. 204–209. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.08.084.
- [2] Chandran I., Vipin K. (2024). Multi-UAV Networks for Disaster Monitoring: Challenges and Opportunities from a Network Perspective. *Drone Systems and Applications*, Vol. 12, pp. 1–28, DOI:10.1139/dsa-2023-0079.
- [3] Ariante G., Ponte S., Papa U., Greco A., Del Core G. (2022). Ground Control System for UAS Safe Landing Area Determination (SLAD) in Urban Air Mobility Operations. *Sensors*, Vol. 22, Iss. 9:3226. DOI: 10.3390/s22093226.
- [4] Chepizhenko V., Pavlova S., Pisarchuk A., Zakharin F., Ponomarenko S. (eds. by V. Chepizhenko). (2018). *Navigatsiya i upravlenie slozhnimi dinamicheskimi sistemami [Navigation and control of complex dynamic systems]*. Kiev: Natsionalnii aviaatsionnii universitet, 166 s. / LAP LAMBERT Academic Publishing, 176 p.
- [5] Poghosyan S., Poghosyan V., Abrahamyan S., Lazyan A., Astsatryan H., Alaverdyan Y., Eguiazarian K. (2024). Cloud-based mathematical models for self-organizing swarms of UAVs: design and analysis. *Drone Systems and Applications*, Vol. 12, pp. 1–12. DOI:10.1139/dsa-2023-0039.
- [6] Tang J., Liang Y., Li K. (2024). Dynamic Scene Path Planning of UAVs Based on Deep Reinforcement Learning. *Drones*, Vol. 8, Iss. 2, 60, pp. 1–21. DOI: 10.3390/drones8020060.
- [7] Marek D., Paszkuta M., Szyguła J., Biernacki P., Domanski A., Szczygieł M., Król M., Wojciechowski K. (2024). Swarm of Drones in a Simulation Environment – Efficiency and Adaptation. *Applied Sciences*, Vol. 14, Iss. 9, 3703. DOI: 10.3390/app14093703.
- [8] Phadke A., Medrano F. A., Sekharan Ch. N., Chu T. (2024). An Analysis of Trends in UAV Swarm Implementations in Current Research: Simulation Versus Hardware. *Drone Systems and Applications*, Vol. 12, pp. 1–10. DOI: 10.1139/dsa-2023-0099.
- [9] Campion M., Ranganathan Pr., Faruque S. (2019). UAV Swarm Communication and Control Architectures: A review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, Vol. 7(2), pp. 93–106. DOI: 10.1139/juvs-2018-0009.
- [10] Hu J., Liu K. (2020) Raft consensus mechanism and the applications. *Journal of Physics: Conference Series. 5th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*, Vol. 1544, pp. 1–18. DOI:10.1088/1742-6596/1544/1/012079.

Algorithm for Spatial Control of Swarm of Unmanned Aerial Vehicles with Leader Based on Synergistic Approach

Konorev O. Yu., Marchenko P. A.

Formulation of the problem in general. It is noted that it is advisable to use unmanned aerial vehicles as part of swarms (groups) to perform tasks in a complex environment with obstacles in an automatic or remote-controlled mode, which requires algorithmisation of the process of building routes. It is shown that the problematic aspects of UAV swarm control are their coordination to perform a single task, ensuring the reliability and stability of communication, and avoiding complex static and dynamic obstacles along the flight route.

Analysis of recent researches and publications. The paper analyses models and algorithms for building routes, in particular those that use a synergistic approach based on the known location of all other swarm elements. However, this approach is considered only theoretically and with a typical example for movement in a two-dimensional plane.

Presenting the main material. An improved control algorithm based on a synergistic approach for three-dimensional space in the presence of a leader is proposed, which reduces the computational complexity and calculation time. An expression is presented that formalises the mathematical model for determining the acceleration of an unmanned aerial vehicle from a group (swarm) consisting of N elements. It is shown that in order to implement an improved algorithm for route construction and group control, the location of the driven elements of the group should be determined relative to the route positions of its leader. The implementation of the algorithm has been tested by mathematical modelling in the Ardupilot SITL

environment and by conducting a full-scale (flight) experiment using a group (swarm) of three UAVs of the copter type.

Conclusion. The proposed algorithm for spatial control of a UAV swarm with a leader based on a synergistic approach allows keeping the group elements in space within the target optimal distance between them. The simulation and practical experiment confirmed the ability of the algorithm to provide a linear process of increasing the number of iterations to reach the critical distance,

unlike the prototype, for which this indicator increased quadratically.

The perspectives of future researches. Further research should include the development of a methodology for constructing routes for collision-free movement of groups (swarms) of UAVs based on the proposed algorithm.

Keywords: synergistic approach; swarm; unmanned aerial vehicle; leader; control algorithm; attraction/repulsion potential; modelling