

УДК 004.942

**Д. П. КУЧЕРОВ**, доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

(Національний авіаційний університет, м. Київ),

**А. М. КОЗУБ**, кандидат технічних наук, доцент

(Національний університет оборони України  
ім. І. Черняхівського, м. Київ),

**О. М. КОСТИНА**, кандидат військових наук,  
доцент

(Центральний науково-дослідний інститут  
озброєння та військової техніки Збройних Сил  
України, м. Київ)

## Управління мультиагентною системою в потенціальному полі

Розглядається рух мультиагентної системи, що складається з обмеженої кількості безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Мультиагентна система включає агента-лідера і декілька агентів – членів групи. Рух цієї системи відбувається за траєкторією, яка визначається початковими умовами, її математичною моделлю і перешкодами, що є на маршруті. Кінцева мета руху відома тільки лідеру групи. Рух цієї структури розглядається в потенціальному полі, яке визначається силами притягання і відштовхування та створюється сигналами управління шляхом вимірювання відстаней до найближчих сусідів. Це дозволяє вважати групу БПЛА агрегатом деякого розміру та описати його рух системою диференціальних рівнянь другого порядку. У роботі досліджуються умови стабілізації руху, надається модельованого підходу.

Ключові слова: групове управління, потенціальне поле, БПЛА, закон керування

Рассматривается движение мультиагентной системы, состоящей из ограниченного количества БПЛА. Мультиагентная система включает агента-лидера и несколько агентов – членов группы. Движение этой системы происходит по траектории, которая определяется начальными условиями, ее математической моделью и препятствиями на маршруте. Конечная цель движения известна только лидеру группы. Движение этой структуры рассматривается в потенциальном поле, которое определяется силами притяжения и отталкивания и создается сигналами управления путем измерения расстояний до ближайших соседей. Это позволяет считать группу БПЛА агрегатом определенного размера и описать его движение системой дифференциальных уравнений второго порядка. В работе исследуются условия стабилизации такого движения, приводится моделирование предлагаемого подхода.

Ключевые слова: групповое управление, потенциальное поле, БПЛА, закон управления

Безпілотний літальний апарат є популярною повітряною розвідувальною платформою за рахунок розвитку технологій, що дозволили застосувати велику кількість елементів конструкції та компонентів управління рухом для її створення. Останнім часом розробники безпілотних засобів звертають увагу на повітряні платформи з програмним управлінням, що мають можливості вертикального старту та посадки, до яких відносяться мультикоптери. Ці платформи здатні не тільки нести корисне навантаження, а й виконувати політ за гнучкою програмою. Їх основними завданнями можуть бути спостереження землі, виконання пошуково-рятувальних операцій, виявлення пожеж, доставка вантажів, а також військові. Перевагами БПЛА є низька вартість експлуатації, відсутність пілота, що виключає ризик втрати життя людини, програмне виконання завдань.

Інтуїтивно можна припустити, що декілька БПЛА виконують завдання точніше та за менший час, ніж один. Параметрами оцінювання ефективності дій групи окрім показників точності та часу можуть бути кількість виконаних завдань, об'єктивність і достовірність його виконання. Проте групова поведінка є більш складною, ніж поведінка одного БПЛА.

Для синтезу керування групою поведінкою звичайно використовують агентний підхід. Важливим завданням мультиагентної системи, як і в разі одного БПЛА, є планування маршруту. Це завдання ускладнюється вимогою безпеки польотів, що досягається збільшенням відстані між агентами. При цьому для збереження цілісності групи відстань між агентами не повинна бути занадто великою.

Спільне виконання завдань повинне забезпечуватись механізмом та порядком взаємодії для досягнення поставленої мети. Класичним підходом до вирішення цієї проблеми в наукових роботах є застосування методів, заснованих на поведінці тварин, птахів і комах. На жаль, не всі ці методи придатні для застосування в технічних засобах, тому що групою технічних агентів звичайно керує людина-оператор, група складається з обмеженої кількості БПЛА, вона повинна діяти в умовах реального середовища, де є завади та перешкоди руху. Врахування цих властивостей на порядок збільшує потік даних в системі, що веде до зростання технічної та обчислювальної складності розроблюваної системи.

**Метою** статті є синтез закону управління та дослідження стабільності руху за маршрутом групи агентів, що складається з агента, який виконує функції лідера, і агентів-членів, які слідує за ним в умовах фіксованих перешкод природного походження. Закон управління повинен враховувати долання «вузьких місць», що вимагає перестроювання групи.

Матеріал стаття є продовженням роботи, представленій на міжнародній конференції «Методи і системи навігації та управління рухом (MSNMC)» [1], де наданий опис динаміки групи БПЛА за наявності перешкод. Не зважаючи на те, що на даний час складено чимало оглядів та публікацій про мультиагентні системи, найбільш загальні питання про цей клас систем викладено в [2]. У цій монографії вводиться поняття автономних

агентів, що здатні виконувати незалежну діяльність. Узагальнена архітектура агентської системи має три рівні управління, що відповідають за планування, поведінку і взаємодію елементів системи.

Результати використання мультиагентних систем при виконанні практичних завдань надані в роботах [3–6]. У [3], наприклад, використовують принципи мурашиної колонії для бездротових сенсорних мереж та нової функції маршрутизації. Запропонований алгоритм оптимізації синтезований у вигляді імовірнісної процедури, за допомогою якої авторам вдається зменшити обсяг обчислювальних операцій, що виникають в процесі доставлення інформаційних пакетів. Позитивні результати автори отримують за рахунок використання відомого підходу на основі алгоритмів пошуку, випаровування і агрегації.

У роботі [4] пропонуються алгоритми координації та оптимізації мультиагентної системи RobotCup для виконання рятувальних операцій. Координація агентів здійснюється за протоколом, що передбачає укладання контракту (домовленостей), а оптимізація шляху – за модифікованими алгоритмами  $A^*$  та пошуку Нільссона. У роботі показано переваги децентралізованого управління для виконання типових завдань.

Автори [5] розглядають рой БПЛА, що складається з квадрокоптерів, дії яких моделюються за алгоритмами поведінки тварини і рою комах. Проведений експеримент показав, що якість мультиагентної системи залежить від кількості агентів, але при цьому зростає кількість зв'язків в групі, що ускладнює управління системою.

Стеження робота за ціллю, що рухається, розглянуто в роботах [6, 7]. Рух колісних засобів [6] та рою БПЛА [7] відбувається в адитивному потенціальному полі сил притягання і відштовхування. Результуюча сила залежить від взаємного розташування, швидкості та прискорення, що складаються між роботом і ціллю. Зупинка робота здійснюється за координатами відносно швидкості та прискорення.

Автори роботи [8] вводять поняття агрегації для руху та контролю дій агрегату з кінематичними зв'язками. Агенти описуються інтеграторами, перехід на інші позиції здійснюється в ковзному режимі. Головна ціль руху полягає в уникненні «невігідних» позицій на шляху. Рух здійснюється в потенціальному полі, що являє собою замкнену область з центром, яку автори подають диском певного радіуса. Недоліком такого подання є використання сигналів управління значної амплітуди, які й викликають ковзний режим агентів, що призводить якнайменше до затягування процесу керування.

Автори [9, 10] пропонують опис дій групи агентів мережною структурою. Ізольовані агенти співпрацюють на основі певних правил і домовленостей. Дії агента здійснюються на основі протоколу переговорів між сусідами, відповідно до якого створюються принципи самоорганізації агентської мережі. З метою підтримки співпраці агента і уникнення затримки в процесі організації авторами пропонується механізм взаємних поступок при управлінні і алгоритм Q-навчання.

При вирішенні практичних завдань найбільш цікавим є планування маршруту. Сучасні результати, присвячені цій темі, надані в роботах [11–13]. Поєднання розширеного евристичного алгоритму пошуку  $A^*$  і стохастичного підходу до динамічного програмування при плануванні траєкторії безпілотної наземного транспортного засобу пропонується в роботі [11]. Для уникнення ям, канав і заторів на маршруті безпілотної засіб використовує інформацію від оптико-електронних датчиків, якими він оснащений, що дозволяє оптимізувати маршрут у режимі реального часу.

Задача планування маршруту БПЛА з нерухомим крилом за рахунок використання диференціальної геометрії вирішується в роботі [12]. Для відпрацювання поворотів за мінімальний інтервал часу з постійною швидкістю автори пропонують будувати маршрут за кривими Dubins, що подаються дугами кіл і відрізками прямих, але при цьому бічне прискорення стає переривчастим. Безперервність прискорення в роботі досягається застосуванням графіка Піфагора. У роботі [13] автори вирішують аналогічну проблему кривими Без'є.

За стабільну та надійну роботу групи відповідає підсистема зв'язку. У роботах [14, 15] розглядаються проблеми забезпечення надійності підсистеми передачі даних. Загальні підходи до проектування цієї підсистеми наведені в [14], особливості, що виникають при передачі даних, та алгоритми щодо їх врахування можна знайти в [15]. Планування траєкторії методами теорії графів розглянуто в [16]. Рух роботів здійснюється в межах заданих траєкторій. У цій роботі рух роботів розглядається як повністю детермінована задача з постійною швидкістю і без перешкод.

Рішення задачі стеження роєм БПЛА за рухомою мішенню надається в роботі [17]. Рух рою відбувається в потенціальному полі, що створюється контролерами роботів відносно робота-лідера за принципом зворотного зв'язку. Запропонований в роботі критерій Ляпунова оцінює стабільність руху тільки на великому інтервалі часу, і він не може дати оцінку за наявності перешкод. Практична реалізація роботів, що слідує до цілі за умови перешкод надається в роботі [18]. На жаль, запропонований в роботі метод не підходить для управління БПЛА.

У порівнянні з роботою [1], в цій роботі розроблюється синтез керування рухом БПЛА за умов обмеженого розміру групи, який не є фіксованим та може збільшуватися при маневрах та огинанні перешкод.

Розглядається рій БПЛА, що складається з  $N$  агентів, які позначені  $A_1, \dots, A_n$  на рис. 1. Рій виконує завдання з моніторингу або видової розвідки певної ділянки земної поверхні в евклідовому просторі  $(x, y, z)$ . Для виконання цього завдання агенти можуть використовувати відомі тактики, наприклад «пеленг», «клин», інші або виконують автономний політ.

На рис. 1 показані траєкторії руху 4-х БПЛА, що складають мультиагентну систему, яка виконує завдання моніторингу за заданим маршрутом, на якому є перешкоди  $M_1, M_2$  з відомими координатами  $(x_M, y_M, z_M)$ . Для уникнення зіткнень та збереження конфігурації групи

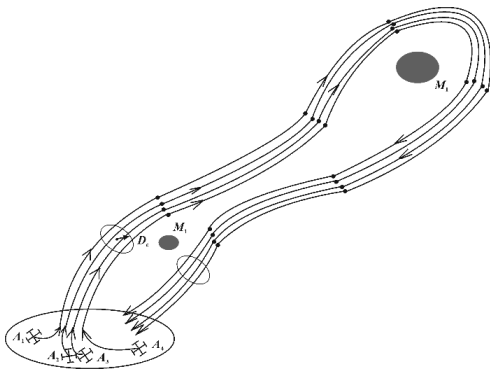


Рис. 1. Група з 4-х БПЛА здійснює політ за маршрутом

при виконанні руху передбачається приблизно рівна швидкість переміщення агентів  $v_i \approx v_j, i \neq j$ .

Подамо структуру рою БПЛА утворенням обмеженого розміру. Використовуючи термінологію [8], це утворення назовемо агрегатом з деяким центром ваги. Будемо вважати, що кожний агент агрегату забезпечується засобами зв'язку і управління для здійснення руху.

Агенти рухаються в тривимірному евклідовому просторі, в якому можуть зустрітися перешкоди. Наявні органи управління дозволяють здійснити маневр та обійти перешкоди. Позначимо  $p_i$  положення  $i$ -го агента і  $u_i$  – керуючий сигнал у просторі, де  $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ . Тоді динамічну модель руху  $i$ -го агента можна описати диференціальними рівняннями другого порядку у вигляді [1, 5, 7]

$$\ddot{p}_i = k_i u_i. \quad (1)$$

У (1)  $p_i, u_i$  є функціями часу  $t$ . Як і в [8], введемо параметр агрегату  $D_\varepsilon > 0$ , що характеризує розмір, який при  $\forall t \rightarrow \infty$  підтримується сигналами керування  $u_i$

$$p_i \rightarrow D_\varepsilon(p_c), \quad (2)$$

де параметр центрального агента (лідера)

$$p_c(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(t) \quad (3)$$

та

$$D_\varepsilon(p_c) = \{p \in \mathbb{R}^3 : d = \|p - p_c\| < \varepsilon\}. \quad (4)$$

У (4)  $\varepsilon$  є конструктивним параметром, який визначається розробником системи. Рівняння (4) є критерієм забезпечення цілісності групи.

Якщо на маршруті БПЛА є перешкоди, конфігурація групи змінюється, вибирається новий її тип, що забезпечує їх подолання, у загальному випадку це трохи збільшує параметр  $D(p)$  так, щоб забезпечити нерівність  $D(p) \leq D_\varepsilon(p)$ . Це передбачає зміну конфігурації утворення «в малому» та не змінює загальної цілі групи.

У статті ставиться та вирішується задача синтезу керування групою з  $n$  БПЛА, яка рухається по маршруту, на якому зустрічаються перешкоди природного типу з фіксованими параметрами, щоб забезпечити справедливості умови  $D(p) \leq D_\varepsilon(p)$ .

**Метод потенціального поля.** Як і в роботах [6–8, 17], подамо мультиагентну систему полем агентів, яке утворюється силами притягання і відштовхування. Енергія притягання підтримує обрану конфігурацію, а

енергія відштовхування утримує агентів від зіткнення між собою та з перешкодами.

Енергія поля притягання описується рівнянням

$$E_{att}(\Delta p_i) = \frac{1}{2} \mu (\Delta p_i)^2, \quad (5)$$

де  $\mu > 0$  коефіцієнт масштабування,  $\Delta p_i = \|p_i - p_c\|$  – евклідова відстань між  $i$ -м і центральним агентами. Вигляд сил, що діють на агента  $A_c$  в однорідному полі притягання, показаний на рис. 2. Сили поля слабше діють в центрі і сильніше по краях групи.

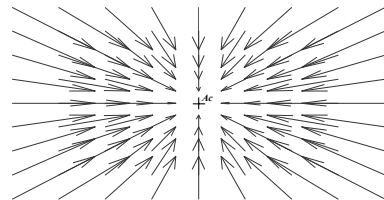


Рис. 2. Поле, утворене силою притягання, що діє на агента  $A_c$

Сили, що створюються полем притягання, мають вигляд [20]

$$u_{att}(\Delta p_i) = -grad E_{att}(\Delta p_i) = -\mu(\Delta p_i). \quad (6)$$

Енергія відштовхування обчислюється як [19]

$$E_{rep}(\Delta p) = \begin{cases} \frac{1}{2} v \left( \frac{1}{\Delta p_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & \text{if } \Delta p_i \leq d_0, \\ 0, & \text{if } \Delta p_i > d_0, \end{cases} \quad (7)$$

де  $v > 0$  – коефіцієнт масштабування,  $d_0 > 0$  – константа, яка визначає відстань максимальної дії на найближчого агента. Вигляд відштовхуючого поля (7) показано на рис. 3. Це поле сильніше в центрі, на відміну від поля тяжіння.

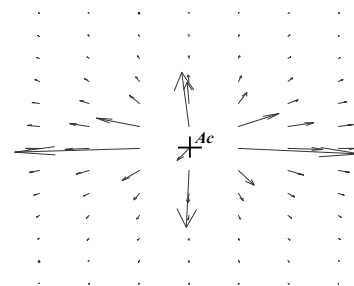


Рис. 3. Поле, утворене силою відштовхування, що діє на агента  $A_c$

Силу відштовхування можна подати виразом

$$u_{rep}(\Delta p_i) = -grad E_{rep}(\Delta p_i) = \begin{cases} v \left( \frac{1}{\Delta p_i} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{\Delta p_i^2} \frac{p_i - p_0}{d_0(\Delta p_i)}, & (8) \\ 0, & \text{if } \Delta p_i > d_0. \end{cases}$$

if  $\Delta p_i \leq d_0$ ,

У (8)  $p_0$  – координати агента до найближчої перешкоди і  $d_0(\Delta p) = \|p - p_0\|$  є його евклідовою відстанню.

Тоді загальний закон керування, що дозволяє агентам досягати цілі, подається адитивною сумою складових

$$u_i^g = u^i + u_i^{att} + u_i^{rep}, \quad (9)$$

де  $u_i$  – закон руху  $i$ -го агента в агрегаті, а  $u_i^{att}, u_i^{rep}$  – складові, що визначаються за формулами (6), (8).

Якщо  $i$ -й агент є лідером групи, тоді  $u^i = u^l$ . Траєкторія лідера визначається до початку руху, динаміка його руху описується системою рівнянь, подібною (1):

$$\begin{aligned} \dot{p}_1^l &= p_2^l, \\ \dot{p}_2^l &= k^l u^l, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $u^l$  – відомий закон, траєкторії інших агентів будуються відносно нього. Такий підхід дозволяє ввести два кінцеві стани, початковий стан  $(0, 0, 0)$  і кінцевий стан  $(p_k, 0, 0)$  для кожного агента системи.

Розглянемо три типи руху агрегату: прямолінійний, криволінійний, з перешкодами.

**Прямолінійний рух групи.** У цьому випадку лідер рухається без прискорення. Тоді (10) перетворюється на одне рівняння

$$\dot{p}_1^l = p_2^l = \text{const}. \quad (11)$$

Завдання  $i$ -го агента в русі – зберегти свою позицію в групі або не допускати впливу на інших агентів. Закон управління подається у вигляді

$$u^i = \begin{cases} -k_{p_1}(p_{1i} - p_{1j}) - k_{p_2}(p_{2i} - p_{2j}), & \text{якщо } i, j \text{ є агентами групи,} \\ 0 & \text{для тих, що не належать групі.} \end{cases} \quad (12)$$

Для лідера  $j = l$ . Тут  $k > 0$  – позитивний коефіцієнт, який встановлює швидкість агента. Крім того, існує пара малих  $\xi_{p1} \neq 0, \xi_{p2} \neq 0$  така, що відхилення  $|p_{1i} - p_{1l}| \leq \xi_{p1}$  і  $|p_{2i} - p_{2l}| \leq \xi_{p2}$ , які мають місце в (12) та необхідні для підтримання стабільного руху.

Якщо лідер знаходиться в центрі групи, його координати визначаються рівнянням (3), а саме

$$p^l = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^{N^*} p_i, \quad \dot{p}^l = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^{N^*} \dot{p}_i, \quad (13)$$

де  $N^* < N$  – кількість сусідів (агентів) у групі. Цей тип руху показаний на рис. 4.

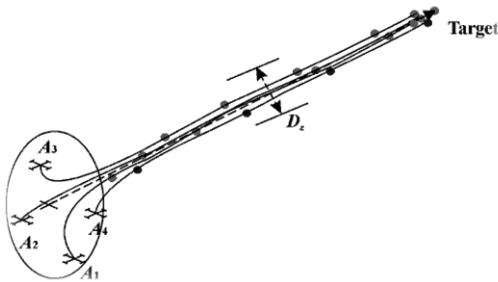


Рис. 4. Рух групи БПЛА за прямою

**Лема 1.** Рух кожного агента групи, що складається з  $N$  агентів, подається системою диференціальних рівнянь другого порядку у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= p_2, \\ \dot{p}_2 &= \bar{u} = -k_{p_1}(p_{1i} - p_{1j}) - k_{p_2}(p_{2i} - p_{2j}), \end{aligned} \quad (14)$$

де  $p = p_i - p_j$  – відповідні координати  $i$ -го та  $j$ -го агентів,  $i \neq j, i \leq n, j \leq n$ . Якщо  $j = n$ , це лідер групи.

**Доведення.** Твердження випливає безпосередньо з (9), (11).

**Висновок 1.** Замкнена динамічна система (14) збігається до рівноважного стану

$$p_{1i} - p_{1j} \neq 0, \quad p_{2i} - p_{2j} \neq 0. \quad (15)$$

**Висновок 2.** Швидкість агентів-членів асимптотично наближається до швидкості агента-лідера.

**Висновок 3.** У системі (14) координати  $p_i \neq p_j$  для будь-якого  $i \neq j$  при  $t \geq 0$ .

**Висновок 4.** Якщо максимальні відстані між БПЛА в групі  $\|p_i - p_j\| < \varepsilon$ , то розмір агрегату  $D(p) < D_\varepsilon(p)$ .

**Криволінійний рух.** Такий рух здійснюється з прискоренням, умова (11) не виконується, а динамічна система (14) трансформується в

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= p_2, \\ \dot{p}_2 &= \dot{p}_2^l + \bar{u}. \end{aligned} \quad (16)$$

Координати  $p_1, p_2$  в (16) збігаються з тими ж координатами в системі рівнянь (14), але керуючий сигнал є значенням  $|\bar{u}| < U_{\max}$ . Цей тип руху показаний на рис. 5.

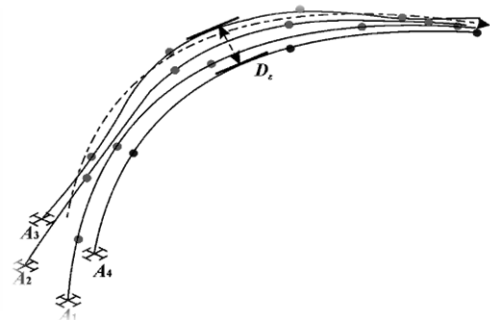


Рис. 5. Рух БПЛА уздовж кривої

**Лема 2.** Якщо існують коефіцієнти  $k_y$  і  $k_p$  такі, що  $k_y > 0, k_p > 0$ , і є справедливою нерівність  $0,5k_y/k_p < 0$ , то система (15) є експоненційно стійкою.

**Доведення.** Уявимо систему рівнянь (16) диференціальним рівнянням

$$k_p \ddot{e}_p(t) + k_y \dot{e}_y(t) + k_y e_y(t) = 0, \quad (17)$$

де  $e_p = p_i - p_j, e_y = y_i - y_j, e_y = \dot{y}_i - \dot{y}_j$ . Якщо  $k_p \neq 0$ , і  $(k_p, k_y)$  є позитивними коефіцієнтами, то це рівняння може бути поданим у алгебраїчній формі

$$s^2(t) + k_y/k_p s(t) + k_y/k_p = 0. \quad (18)$$

Тоді умова експоненційної стійкості (15) отримується при негативній дійсній частині коренів (18), що виконується при  $k_y/(2k_p) < 0$ .

**Висновок 1.** Якщо  $k_y = 0$ , то агенти виконують коливальний рух навколо лідера з постійною амплітудою і частотою, що дорівнює  $\sqrt{k_y/k_p}$ .

**Висновок 2.** Якщо  $k_y/\sqrt{4k_y k_p} > 0$ , то забезпечується стійкий рух в асимптотиці.

Висновок 3. Якщо  $0 < k_y / \sqrt{4k_y k_p} < 1$ , відбувається коливальний рух, амплітуда якого зменшується.

Висновок 4. Якщо  $k_y / \sqrt{4k_y k_p} > 1$ , відбувається аперіодичний рух агента.

Висновок 5. Якщо максимальна відстань між БПЛА в групі  $\|p_i - p_j\| \leq \epsilon$ , то розмір групи  $D(p) \leq D_\epsilon(p)$ .

**Рух в умовах перешкод.** Існуючі підходи до розгляду руху агентів з перешкодами передбачають дію сили відштовхування від перешкод, що розташовані на маршруті. Дія цієї сили зростає, коли агент наближується до перешкод (гальмує агента), і зменшується з віддаленням. При огинанні перешкоди агент має докладати додаткові зусилля, що можуть привести до відхилення від первинного маршруту. Це досягається введенням у силу відштовхування адитивних компонент швидкості агента і прискорення

$$u_i = \begin{cases} u_{rep\ p_i} + u_{rep\ p_{i1}} + u_{rep\ p_{i2}}, & \text{if } (d - 2r) \leq d_0, p_{i1} > 0, p_{i2} > 0 \\ u_{rep\ p_i} + u_{rep\ p_{i1}}, & \text{if } (d - 2r) \leq d_0, p_{i1} > 0, p_{i2} \leq 0, \\ 0, & \text{if } (d - 2r) > d_0, \text{ or } p_{i2} \leq 0. \end{cases} \quad (19)$$

У системі рівнянь (19) використовуються

$$u_{rep\ p_i} = k_1 \left( \frac{1}{d - 2r} - \frac{1}{d_0} \right), \quad (20)$$

$$u_{rep\ p_{i1}} = k_2 p_{i1obs}, \quad (21)$$

$$u_{rep\ p_{i2}} = k_3 p_{i2obs}, \quad (22)$$

де  $r$  – максимальний геометричний розмір агента,

$$p_{i1obs} = p_{i1}^T n_{aobs}, \quad (23)$$

та

$$p_{i2obs} = p_{i2}^T n_{aobs}, \quad (24)$$

де  $n_{aobs}$  – одиничний вектор, спрямований від  $i$ -го агента на перешкоду. Значення  $p_{i1obs}$  показує рух агента: якщо  $p_{i1obs} > 0$ , агент рухається на перешкоду, якщо  $p_{i1obs} < 0$ , здійснюється рух у протилежному напрямі. Рух групи, що складається з 4 агентів, які проходять перешкоди, показаний на рис. 6.

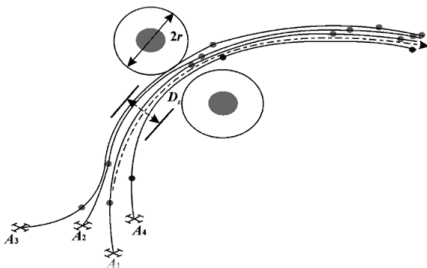


Рис. 6. Рух групи з 4-х агентів в умовах перешкод

Порядок долання перешкод, що створюють вузькі місця, відбувається зі зміною конфігурації групи, як показано на рис. 6. При цьому відбувається сортування БПЛА за швидкістю, першим проходить той, що

ближчий та має більшу швидкість:  $p_{1N} < p_1 (N-1) < \dots < p_{12} < p_{11}$ . Сортування може проводитися інакше, якщо опорним обрати лідера групи.

**Модель БПЛА.** Як динамічну модель БПЛА обрано модель квадрокоптера, що відрізняється простотою керування, стабільністю руху, можливістю зависання в повітрі, прийнятною вартістю. Детальний опис моделі надано в [21]. Модель подається системою диференціальних рівнянь другого порядку

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi} \left( \frac{I_y - I_x}{I_x} \right) - \frac{J_r}{I_x} \dot{\theta}w + \frac{l}{I_x} U_2, \\ \ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi} \left( \frac{I_z - I_x}{I_y} \right) - \frac{J_r}{I_y} \dot{\phi}w + \frac{l}{I_y} U_3, \\ \ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta} \left( \frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{l}{I_z} U_4, \\ \ddot{z} = -g + (\cos\phi \cos\theta)kU_1, \\ \ddot{x} = (\cos\phi \cos\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi)kU_1, \\ \ddot{y} = (\cos\phi \cos\theta \cos\psi + \sin\phi \cos\psi)kU_1 \end{cases} \quad (25)$$

Тут  $\phi, \theta, \psi$  – кути крену, тангажу і ристання відповідно,  $I_{x,y,z}$  – інерція БПЛА,  $J_r$  – інерція ротора,  $l$  – розмах квадрокоптера,  $k = 1/m$ ,  $m$  – маса БПЛА,  $w$  – швидкість обертання ротора, величини  $U_1, U_2, U_3, U_4$  обчислюються так:

$$\begin{cases} w = w_2 + w_4 - w_1 - w_3, \\ U_1 = b(w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2), \\ U_2 = b(w_4^2 - w_2^2), \\ U_3 = b(w_3^2 - w_1^2), \\ U_4 = d(w_2^2 + w_4^2 - w_1^2 - w_3^2), \end{cases} \quad (26)$$

де  $b, d$  – коефіцієнти тяги і опору відповідно.

Для моделювання (25) перетворюється у форму простору станів, де  $X \in \mathcal{R}^{12}$  – вектор стану з координатами

$$\begin{aligned} x_1 = \phi, \quad x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\phi}, \quad x_3 = \theta, \quad x_4 = \dot{x}_3 = \dot{\theta}, \\ x_5 = \psi, \quad x_6 = \dot{x}_5 = \dot{\psi}, \quad x_7 = z, \quad x_8 = \dot{x}_8 = \dot{z}, \\ x_9 = x, \quad x_{10} = \dot{x}_9 = \dot{x}, \quad x_{11} = y, \quad x_{12} = \dot{x}_{11} = \dot{y}. \end{aligned} \quad (27)$$

В цьому випадку модель квадрокоптера подається в просторі станів системою диференціальних рівнянь 1-го порядку

$$\begin{cases} \dot{x}_2, \\ x_4 x_6 a_1 + x_4 a_2 w + b_1 U_2, \\ \dot{x}_4, \\ x_2 x_6 a_3 + x_2 a_4 w + b_2 U_3, \\ \dot{x}_6, \\ x_4 x_2 a_5 + b_3 U_4, \\ \dot{x}_8, \\ -g + (\cos x_1 \cos x_3)kU_1, \\ \dot{x}_{10}, \\ u_x k U_1, \\ \dot{x}_{12}, \\ u_y k U_1, \end{cases} \quad (28)$$

де

$$a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x}, \quad a_2 = -\frac{J_r}{I_x}, \quad a_3 = \frac{(I_z - I_x)}{I_y}, \quad a_4 = \frac{J_r}{I_y}, \quad (29)$$

$$a_r = \frac{(I_x - I_y)}{I_x}, \quad b_r = \frac{l}{I_x}, \quad b_s = \frac{l}{I_y}, \quad b_t = \frac{l}{I_z}.$$

$$\begin{aligned} u_x &= \cos x_1 \sin x_3 \cos x_5 + \sin x_1 \sin x_5, \\ u_y &= \cos x_1 \sin x_3 \cos x_5 - \sin x_1 \sin x_5. \end{aligned} \quad (30)$$

На відміну від [21], де використовується змінний режим для управління, керуючі дії ( $U_1, U_2, U_3, U_4, u_x, u_y$ ) кожного агента є гладкими функціями часу  $t$ .

**Моделювання.** Розглядається група БПЛА, яка рухається в потенціальному полі в напрямку цілі за маршрутом, на якому є перешкоди. Група складається з чотирьох квадрокоптерів, один з них виконує функцію лідера. Маршрут агентів задається початковою та кінцевими позиціями на площині в декартових координатах. Початкові позиції агентів  $p_{A1} = (100, 30)^T$ ,  $p_{A2} = (75, 20)^T$ ,  $p_{A3} = (130, 50)^T$  та лідера групи  $p_{A4} = (110, 70)^T$ , кінцева позиція  $p_k = (600, 270)^T$ . Задані також координати розташованих на площині стаціонарних перешкод на маршруті як  $p_{n1} = (270, 130)^T$ ,  $p_{n2} = (220, 210)^T$  і  $D_e(p_A) \leq 50$ . Рух агентів-членів і агента-лідера цільовий показаний на рис. 7.

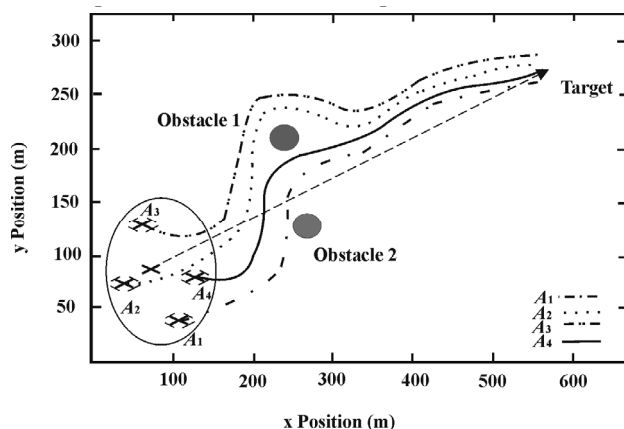


Рис. 7. Траєкторії руху групи до цілі з огинанням перешкод

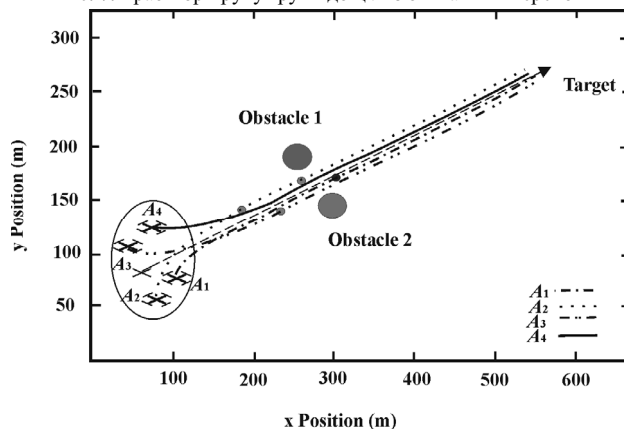


Рис. 8. Траєкторії руху БПЛА зі зміною конфігурації

На рис. 7 показано, що агенти в процесі руху огинають перешкоди і продовжують рух до цілі. За необхідності при подоланні перешкод група агентів може змінювати конфігурацію. Якщо не існує перешкод на

маршруті, структура агентів, якою здійснюється політ, не змінюється. Приклад реконфігурації групи БПЛА показаний на рис. 8. При доланні перешкоди руху типу «вузьке місце» агенти перестроюються в «колонну» в жорстко визначеному порядку:  $A4 \rightarrow A3 \rightarrow A2 \rightarrow A1$ , при цьому агент  $A1$  стає першим, а  $A4$  – останнім.

**Висновки.** У роботі запропоновано синтез закону управління рухом мультиагентної системи для слідування за маршрутом, на якому можливі перешкоди руху. Особливістю запропонованого підходу є синтезований закон управління з гладкою функцією часу. Показано також два способи долання перешкод, один з них заснований на огинанні, а інший на реконфігурації. Закон управління формується за двома спеціальними потенціальними функціями, одна з яких створює силу притягання агентів до центра структури, друга відштовхує їх від сусідів та перешкод. Конфігурація польотної групи в умовах перешкод змінюється, що припускає відповідні зміни розміру та форми.

На підставі запропонованого закону управління розроблено алгоритм, за яким проводилося моделювання агентної системи. Наведені приклади моделювання поведінки цієї системи показують стабільність руху групи агентів. Вивчення впливу параметрів системи, що забезпечують її стабільний рух, дозволило встановити відповідні параметри системи. Аналіз поведінки групи включав до себе етапи збору групи в певну конфігурацію, слідування заданим маршрутом і уникнення перешкод. Дослідження показують, що успішне моделювання залежить від обраних значень масштабних коефіцієнтів  $\mu$  і  $\nu$  потенціальних функцій.

Майбутні дослідження мультиагентної системи плануються спрямувати на вивчення ковзних режимів у русі із запропонованими потенціальними функціями.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Kucherov D. P., Kozub A. N., Kostyna O. N. Group Behavior of UAVs in Obstacles Presence // Proc. IEEE 4th Int. Conf. Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2016.
2. Wooldridge M. An Introduction to multi-agent systems. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
3. Benu C. Goel, Sheenam. Ant Colony Optimization for Wireless Sensor Network: A Review // IOSR-JCE. 17(3). 89–92. 2015.
4. Chou W.Y.J., Marsh L., Gossink D. Multi-Agent Coordination and Optimisation in the RoboCup Rescue Project // Proc. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia, 2009.
5. Bandala A. A., Dadios E. P., Vicerra R. R. P., Lim L. A. G. Swarming Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadrotors – Swarm Behavior for Aggregation, Foraging, Formation, and Tracking // J. of Advanced Comput. Intell. and Intell. Inform., 18(5), 745–751, 2014.
6. Yin L., Yin Y., and Lin C.-J. A new potential field method for mobile robot path planning in the dynamic environments // Asian J. of Control. 11(2). 214–225. 2009.

7. Dang A. D., Horn J. Intelligent Swarm-Finding in Formation Control of Multi-Robots to Track a Moving Target // *Int. J. of Computer, Electr., Autom., Control and Inf. Eng.* 8(4). 561–567. 2014.
8. Gazi V., Fidan B., Hanay Y. S., Köksal M. I. Aggregation, Foraging, and Formation Control of Swarms with Non-Holonomic Agents Using Potential Functions and Sliding Mode Techniques // *Turk. J. of Electr. Eng.* 15 (2). 149–168. 2007.
9. Zhang L., Gui H. Optimal Strategies for Agents in an Alternating Offers Negotiation Protocol Considering Time Constraint // *J. of Autom. and Control Eng.* 4 (4). 313–318. 2016.
10. Jesintha D. K., Anandh J. P., Ramnath M. Dynamic analysis of agent network in self organization using service level agreement technique // *Int. J. of Eng. Sci. Invent.* 4 (3). 44–49. 2015.
11. Marsh L., Calbert G., Tu J., Gossink D., Kwok H. Multi-Agent UAV Path Planning // *Int. Congress on Modelling and Simulation, MODSIM05. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, 2005.
12. Shanmugavel M., Tsourdos A., White B. A., Zbikowski R. Differential Geometric Path Planning of Multiple UAVs // *Trans. of ASME J. of Dyn. Syst., Meas., and Control*, 129(3). 620–632. 2007.
13. Kucherov D. P. Agent-based approach to the problem movements by the route // *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukr. National University.* 4 (211). 168–171. 2014.
14. Çuhadar İ., Dursun M. Unmanned Air Vehicle System's Data Links // *J. of Autom. and Control Eng.* 4 (3). 189–193. 2016.
15. Kucherov D. P., Kozub A. N. Control System Objects with Multiple Stream of Information // *proc. IEEE 3rd Int. Conf. Actual Problems of UAV Developments (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, 2015.
16. Wang Y., Hu C. Moving as a whole: multirobot traveling problem constrained by connectivity // *Turk. J. of Electr. Eng. & Comput. Sci.*, 23, 769–788. 2015.
17. Dang A. D., Horn J. Formation Control of Leader-Following UAVs to Track a Moving Target in a Dynamic Environment // *J. of Autom. and Control Eng.* 3 (1). 1–8. 2015.
18. Ansary A. A., Hasan M. M. An Intelligent Line Following Robot with Obstacle Detection // *Int. J. of Sci. and Eng. Investig.* 5 (53). 44–48. 2016.
19. Jain M. C. *Textbook of Engineering Physics (Part I)* : PHI Learning Private Ltd, 2009.
20. Korn G. A., Korn T. M. *Mathematical handbook for scientist and engineers* : McGraw-Hill Company, 1968.
21. Bouabdallah S., Siegwart R. Backstepping and Sliding-mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor // *proc. IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, Barcelona, Spain, 2005.

**Рецензент С. В. Лапицький**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та  
військової техніки Збройних Сил України)