

¹Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна

²Д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних наук Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна

СИНТЕЗ МАРШРУТІВ СУБ-РОІВ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ХОПФІЛДА ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу економії обмежених енерго-, обчислювальних і технологічних ресурсів малогабаритних безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Мета роботи – створення методу синтезу маршрутів суб-роїв БПЛА, що підвищує час життєздатності зграї БПЛА.

Метод. Запропоновано метод побудови моделей часток («суб-роїв») зграї БПЛА, що виключає дубляж виконання завдання у вузлах координатних сіток, якими покривається досліджувана територія. Суміщення нейронної карти мережі Хопфілда та польотної карти для кожного суб-рою забезпечує повідомлення через модулі бездротового зв'язку між БПЛА факту виконання моніторингового або технологічного завдання будь-яким окремим БПЛА суб-рою решті БПЛА. Запропонований підхід надає можливість використовувати функції самозагоєння суб-роїв зграї птахоподібних об'єктів («боїдів») шляхом перевизначення задач суб-роїв як кібер-фізичної системи у разі втрати окремих боїдів при їх критичному застосуванні. Структура одержуваних моделей поведінки суб-роїв, реалізована у двовимірних просторових коридорах довільної форми з наступною конкатенацією отриманих 2D-рішень, значно спрощує вирішення задачі комівояжера у тривимірному просторі та дозволяє істотно прискорити виконання завдань обстеження ділянок територій.

Результати. Розроблено програмне забезпечення (ПЗ), яке реалізує запропонований метод, що використано при проведенні обчислювальних експериментів по дослідженню властивостей методу.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу і ПЗ, що його реалізує, а також дозволяють рекомендувати їх для застосування на практиці для рішення задач обстеження території з використанням зграї боїдів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, суб-рої, зграя, нейронна мережа Хопфілда, дубляж задач.

НОМЕНКЛАТУРА

БПЛА – безпілотний літальний апарат (дрон, боїд);

ГДК – гранично допустима концентрація;

КФС – кібер-фізична система (англ. *cyber-physical system, CFS*);

НМХ – нейронна мережа Хопфілда;

2D – двовимірний простір (англ. *two-dimensional space*);

3D – тривимірний простір (англ. *three-dimensional space*);

B_{mn} – m -й боїд в n -му суб-рої зграї, який працює в SC_n -му просторовому коридорі;

A_n – матриця подій n -го суб-рою;

D_{ij} – початковий бінарний рівень ij -го нейрону;

$f(v_{ij})$ – функція активації ij -го нейрону;

lat_{ij} – широта ij -го вузла координатної сітки (англ. *latitude*);

lon_{ij} – довгота ij -го вузла координатної сітки (англ. *longitude*);

L – відстань між вузлами координатної сітки;

M – кількість боїдів в суб-рої;

N – кількість суб-роїв в зграї;

P_{ij} – ij -й вузол координатної сітки;

PE_0 – точка закінчення завдання одиночним БПЛА;

PF_n – точка вильоту боїдів n -го суб-рою;

SC_n – n -й просторовий коридор, в якому працює n -й суб-рої зграї;

TSP – задача комівояжера (англ. *travelling salesman problem*);

UAV – *unmanned aerial vehicles*;

x_{ij} – сигнал на вході ij -го нейрону;

y_{ij} – сигнал на виході ij -го нейрону;

v_{ij} – сигнал на виході адаптивного суматора ij -го нейрону;

w_{ij} – ваговий коефіцієнт вузла P_{ij} та ij -го елемента нейронної мережі Хопфілда;

Δt_{ij} – часова затримка поновлення стану ij -го нейрону.

ВСТУП

Все більше поширюється одночасне використання безпілотних апаратів (БПЛА або дронів) в різних галузях цивільно-військового призначення [1, 2]. Аграрний сектор нині є основним споживачем послуг дронів [1]. Необхідно зауважити, що останнім часом зміщується акцент з високотехнологічних дорогих пристроїв у бік дешевих спрощених вузькопрофільованих, з обмеженим набором інтерфейсів та сенсорів, апаратів критичного застосування («мікро-дронів»), втрата яких під час виконання задачі не перешкоджає її успішному завершенню [2]. У разі виходу з строї одного або декількох дронів вони підміняються аналогічними з тієї ж «зграї» або шляхом запуску додаткових апаратів. Тобто, «зграя» виконує адаптивні зміни порядку дронів на льоту та «самозагоєння» суб-роїв. Кожен з дронів в такій роївовій системі підтримує зв'язок з іншими БПЛА. Тут немає лідера чи командира, що дозволяє рою успішно пережити втрату окремих дронів і продовжувати скоординовані дії найчастіше на основі нейронної карти [3].

Треба зазначити, що дрони лише співпрацюють у межах «зграї» та повинні не створювати конфліктні ситуації один одному. Що стосується функцій, то кожна група БПЛА (суб-рій) в межах «зграї» виконує самостійне завдання (або вимірювання різних показників, або відеозйомку, або економне диференційоване обприскування окремих ділянок рослин тощо) та об'єднана так званим «ройовим інтелектом». Сучасна назва «*boiid*» використовується для невеликих та недорогих БПЛА у рої (за умови виконання спільного завдання) або у зграї (якщо кожен суб-рій зграї виконує окрему задачу з спільного завдання зграї), відповідає укороченій версії «птахоподібний об'єкт» (англ. *bird-oid object*) [2].

Ройовий інтелект передбачає скоординовані дії деякої кількості боїдів, які локально взаємодіють між собою і навколишнім середовищем [4]. Хоча кожен боїд слідує простим базовим правилами, але в сукупності система ройового інтелекту демонструє винятково складну спільну поведінку. Вона діє фактично як єдиний великий організм.

Об'єктом роботи є процес планування маршрутів БПЛА якщо не оптимальним чином, то таким, що забезпечує виконання низки задач всією зграєю з найменшою витратою обчислювальних та енергоспожитих ресурсів.

Предметом дослідження є методи синтезу маршрутів суб-роїв, з яких складається зграя боїдів, на основі нейронних мереж Хопфілда (HMX).

Метою роботи є створення такого методу синтезу маршрутів суб-роїв зграї, який забезпечить вирішення задачі комівояжера (англ. TSP) з виключенням дубляжу виконання задач у вузлах, якими промаркована досліджувана територія, та з суттєвим прискоренням синтезу маршрутів БПЛА у порівнянні з існуючими методами. Необхідність досягнення мети обумовлена обмеженістю енергоресурсів боїдів, що не дозволяє виконувати великий обсяг обчислень, якого потребує застосування класичних методів вирішення задачі TSP. Актуальність досліджень підвищується, якщо завдання обстеження територій пов'язані з надзвичайними ситуаціями та потребують негайних рішень в надзвичайно обмежені строки.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Наочними задачами, для вирішення яких доцільно застосовувати зграї (рої) невеликих боїдів з обмеженими обчислювальними та енергоресурсами, наприклад, є вирішення задач агросектору, огляд технічних споруд, моніторинг метеопоказників, поширення тріщин при землетрусах, води – при повенях тощо. В подібних задачах завжди актуальними є питання визначення маршруту з моніторингом певних характеристик у визначених вузлах на чітко обмеженій території. Такий маршрут повинен бути, якщо й не оптимальним, але мінімальним за часом та довжиною траєкторії для прийняття своєчасних рішень.

Якщо ці умови не будуть виконані, можливі два варіанта критичного закінчення маршруту зграєю боїдів:

– невиконання задачі обстеження всіх заданих точок маршруту;

– неповернення чисельних боїдів до місця вильоту через зіткнення або закінчення ресурсу елементів електроживлення на борту боїдів.

Враховуючи вищевикладене, задача моніторингу характеристик території з чітко визначеними розмірами може бути приведена до класичної задачі комівояжера з нетрадиційним шляхом вирішення останньої.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Одним з ключових завдань при функціонуванні безпілотних апаратів в недостатньо відомій обстановці є планування безпечних траєкторій, що дозволяє будувати безаварійні маршрути переміщення [3]. Складність синтезу траєкторій для колективів роботів (у статті – зграї боїдів) полягає в тому, що, по-перше, в робочій зоні присутні інші безпілотні апарати (рухливі перешкоди), а по-друге, обчислювальні можливості бортових систем боїдів обмежені, що не дозволяє вирішувати задачу синтезу маршрутів БПЛА з використанням класичних переборних або потенційних алгоритмів.

У роботах [3, 5] розглянуті нові підходи до опису руху і планування маршрутів БПЛА на основі біологічно подібних алгоритмів. Нові методи побудови нейро-нечітких мереж не вимагають завантаження всієї навчальної вибірки в пам'ять комп'ютера та істотно прискорюють процес синтезу моделей [6]. Обмеженням використання таких методів є необхідність розбиття нейромоделі на прямокутні блоки.

З огляду на необхідність в проведеному дослідженні поєднувати нейронну карту [3] з картою польотів, доцільно використовувати для формування матриці стану всіх нейронів мережі алгоритм нейронної мережі Хопфілда [7]. Згодом всередині такої матриці можна виділити області довільної форми, в яких виконується синтез маршрутів БПЛА для вирішення задачі комівояжера.

Існує багато методів рішення TSP-задачі. Однак, такі методи в пошуку оптимального маршруту витрачають значну кількість обчислювальних і часових ресурсів, що зростають у експоненті із зростанням кількості вузлів – до 10 с для 20 точок маршруту [7]. Однак, в швидкодинамічних процесах, пов'язаних зі швидкістю переміщення БПЛА від 20 до 30 м/с [2], просторовий коридор може бути пройдений боїдом швидше, ніж буде розрахований оптимальний маршрут. Тому доцільним є приведення 3D завдання TSP до більш простої і швидко розв'язуваної двовимірної (2D) задачі [8].

Ефективність певного числа рішень досить спірна, але найважливішою вимогою при синтезі маршрутів БПЛА є перевага в швидкості розрахунку. Достатня швидкість для забезпечення безконфліктної поведінки боїдів зграї може бути забезпечена при застосуванні мультиагентного підходу, коли боїди самостійно розв'язують різні за змістом оптимізаційні задачі, що виникають під час роботи системи, за умов відсутності центрального управління [9]. Але такий підхід повинен бути доповненим правилами організації роботи кібер-фізичної системи (КФС), в якій забезпечені умови стабільного бездротового зв'язку для передачі таких карт на входи всіх боїдів суб-рою та ін. [10]. В такій КФС на попередньому етапі (до вильоту зграї) оператору КФС необхідно частково спланувати розподіл агентів (боїдів) зграї на суб-рої, сформувати початкові нейронні карти алгоритму HMX для кожного суб-рою.

У зв'язку з вищесказаним, синтез нейромережевої системи планування маршрутів БПЛА з виключенням дублювання виконання задач, з урахуванням обмежених апаратних можливостей птахоподібних безпілотних апаратів, є актуальною та своєчасною задачею.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо моделювання групової поведінки зграї боїдів з урахуванням розбиття їх на суб-рої, які виконують аналогічні задачі в обмежених просторових коридорах.

Для економії обчислювальних ресурсів і продовження життя зграї поведінку боїда- «комівояжера» пропонується описувати тільки в географічних координатах (lat_y, lon_y) , тобто, вирішувати 2D-задачу TSP. Висота h , на якій повинен переміщатися кожен окремий суб-рій, фіксується в залежності від рельєфу місцевості, над якою працює суб-рій. При такому підході повинна вирішуватися 2D-задача комівояжера в кожному просторовому коридорі, в якому працює окремий суб-рій [9]. На відміну від [6, 9] пропонується в розробленому методі формувати просторові коридори (блоки польотної карти) не прямокутними, а достатньо довільної форми з суміжними межами, без дублювання членства вузлів у суміжних блоках.

Попадання m -го боїда n -го суб-рою в точку з координатами (lat_y, lon_y) визначається або за GPS-координатами, або (за відсутністю зв'язку) порівнянням знімків фотокамери боїда з об'єктами з точною локалізацією, виявленими за Google або Apple мапами. Отже, вхідними даними є масив опорних точок, через які повинен пролетіти боїд (або суб-рій). Для кожного n -го суб-рою вказана точка вильоту PF_n , яка також є точкою фінішу.

Розглянемо план території, який покривається декількома координатними сітками з K рівномірно нанесеними в лінію контрольними вузлами на чітко визначеній відстані L (рис. 1). Кожна координатна сітка – це квадрат 10×10 вузлів, який є планом одного польоту зграї боїдів. Кількість суб-роїв в зграї, точки вильоту кожного суб-рою, висота польоту кожного суб-рою і відстань між вузлами, в яких повинні бути виконані технологічні або моніторингові завдання, визначається оператором цієї КФС перед кожним вильотом.

Якщо задача обстеження території виконується окремим БПЛА, з вильотом у точці PF_0 та закінченням завдання у точці PE_0 (рис. 2), то загальна вартість такого маршруту становить приблизно 2620, якщо вважати, що ваговий коефіцієнт переміщення боїда між вузлами P_{ij} координатної сітки по прямій становить $w_{ij} = 1 \cdot k$, а по діагоналі – $w_{ij} = 1,4 \cdot k$, де k – коефіцієнт, що динамічно змінюється в залежності від швидкості переміщення боїда [2].

Для прискорення обстеження мапи, вкритої декількома координатними сітками (див. рис. 1), доцільно використовувати зграю боїдів, поділену на декілька суб-роїв N , з кількістю M_n боїдів в n -му суб-рої. Для кожного суб-рою складається окрема польотна карта в межах однієї координатної сітки, що відповідає одному вильоту зграї. Пропонується для роботи кожного n -го суб-рою формувати просторовий коридор SC_n довільної форми.

Алгоритм має розуміти варіанти різного положення точок вильоту безпілотних літальних апаратів: виліт всіх

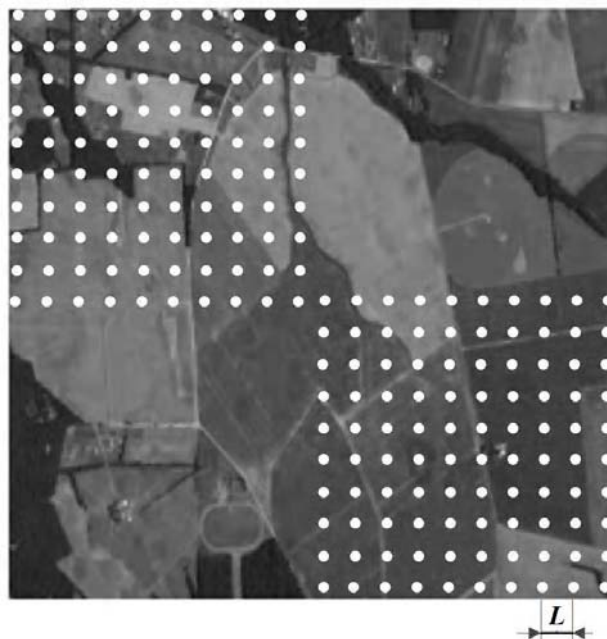


Рисунок 1 – Координатні сітки на мапі

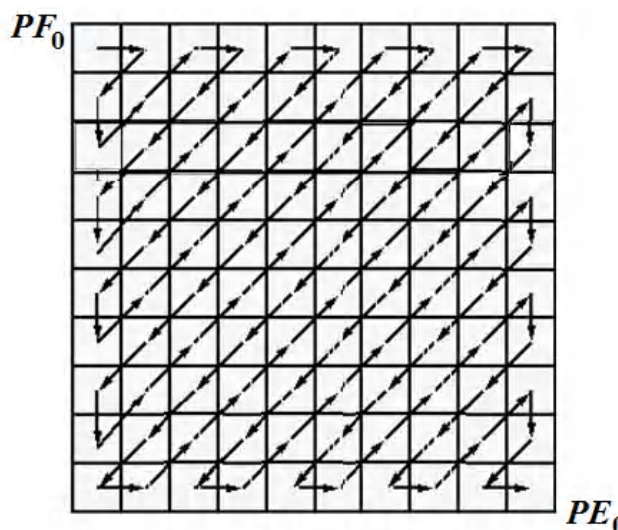


Рисунок 2 – Маршрут обстеження території окремим БПЛА

суб-роїв з однієї спільної точки PF_0 (рис. 3а), або з різних точок вильоту $PF_1 \dots PF_N$ (рис. 3б).

В залежності від кількості та положення точок вильоту кожного суб-рою стає кожна координатна сітка розділяється на просторові коридори SC_n (див. рис. 3). У наведеному прикладі кількість таких коридорів становить $N=4$. В кожному коридорі працює один суб-рій з кількістю боїдів один або більше (максимальна кількість боїдів у зграї M). Кожен вузол координатної сітки входив тільки в один просторовий коридор.

Тоді площа території, яка буде обстежена за один виліт зграї боїдів, залежить від відстані L між кожними двома сусідніми вузлами та кількості вузлів K :

$$S = (K - 1)^2 L^2. \tag{1}$$

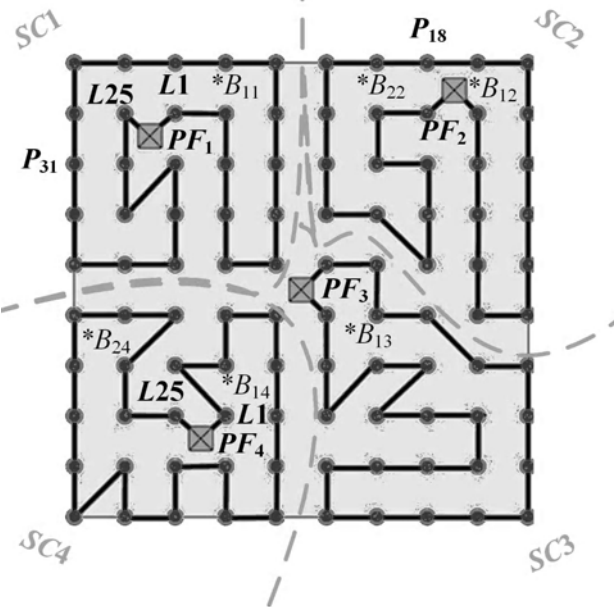
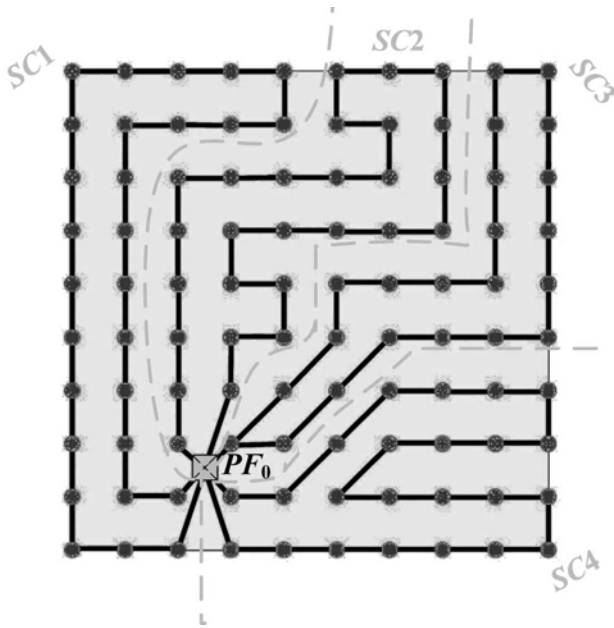


Рисунок 3 – Розподіл координатної сітки польотів на просторові коридори SC_n при $N = 4$:
 а – при спільній точці PF_0 вильоту боїдів ($*B_{ij}$); б – при рознесених точках вильоту PF_n

Дискретна повнозв'язна НМХ складається з одного шару бінарних нейронів, кожен з яких пов'язаний з решетою нейронів і має мережеві вхід і вихід (рис. 4а). Координати цілі (вузли координатної сітки), а також інформація, чи є ці вузли вже обстеженими, надходять на вхід НМХ (рис. 4б), яка являє собою шар адаптивних суматорів із зворотними зв'язками, вихідні сигнали яких надходять з часовою затримкою Δt_{ij} на входи нейронів, в результаті чого вихідний сигнал НМХ формується лише після того, як мережа досягне динамічної рівноваги [3].

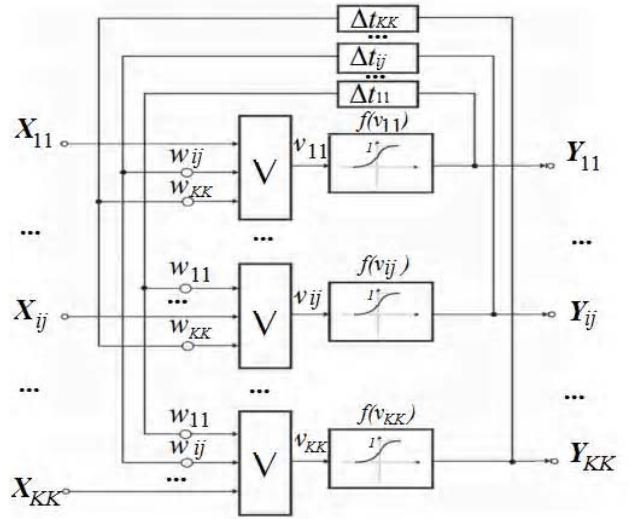
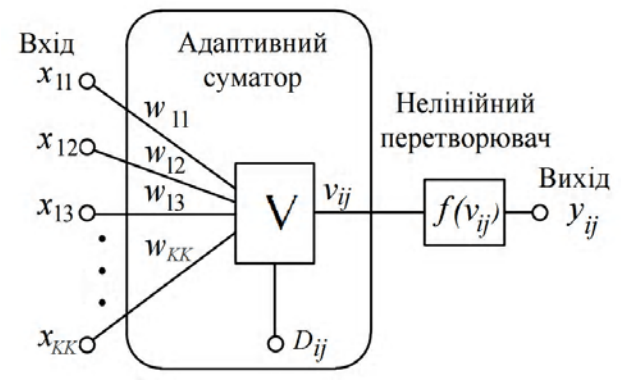


Рисунок 4 – Графічне зображення: а – нейрону; б – НМХ
 Математично подібний нейрон (рис. 4а) описується за допомогою системи рівнянь (2):

$$\begin{cases} y_{ij} = f(v_{ij}); v_{ij} = \sum_{i=1}^{K,K} x_{ij} w_{ij} + D_{ij}; \\ D_{ij} = 1, P_{ij} \notin SC_n; D_{ij} = 0, P_{ij} \in SC_n; \\ w_{ij} = 1, \text{якщо довжина маршруту між вузлами } L; \\ w_{ij} = 1,4, \text{якщо довжина маршруту між вузлами } \sqrt{L}^2. \end{cases} \quad (2)$$

Початковий бінарний рівень нейрону D_{ij} задається оператором КФС та дорівнює «1», якщо нейрон (вузол польотної карти) не входить до карти суб-рою; дорівнює «0», якщо вузол підлягає обстеженню боїдом даного суб-рою. Штучна мережа Хопфілда «навчається» рішенням задачі диз'юнкції матриць стану вузлів польотної карти (нейронної карти), що, по суті, зводиться до приведення стану всіх нейронів до «1», коли всі вузли польотної карти будуть обстежені. Тобто, у разі здійснення боїдом у вузлі P_{ij} вимірювання будь-якої характеристики, фотографування місцевості та ін., вихідна функція

$f(v_{ij})$ обчислювального процесу на відповідному ij -му нейроні, встановлюється в «1» і передається за правилами НМХ на входи всіх нейронів суб-рою. Якщо інший боїд попадає в точку з такими координатами, обчислювальний процес в цьому боїді не активується, тому що характеристики цієї точки вже виміряні та це відображено у нейронній карті.

Добуток всіх зважених входів $x_{ij} \cdot w_{ij}$ наприкінці задачі повинен бути ненульовим, враховуючи, що в кожній цільовій точці подія відбулася.

Таким чином, виключається дублювання події в кожній точці обстежуваної території, економляться обмежені обчислювальні ресурси комп'ютерних компонентів боїдів, економиться електроживлення і відповідно збільшується час життя зграї.

При плануванні маршруту суб-рою на основі розподіленої НМХ кожен з боїдів суб-рою формує власну нейронну карту і виконує її динамічне коригування за початковими даними і за інформацією від датчиків на боїді. Сформовану нейронну карту боїд по каналу зв'язку передає всім доступним боїдам зграї. У процесі руху боїд отримує нові «знання» про проведені дослідження у вузлах координатної сітки і відповідно до них коригує нейронну карту.

Кількість таких координатних сіток на цільовій мапі відповідає кількості вильотів зграї боїдів для виконання поставленої задачі з обстеження дослідної поверхні.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На початку роботи алгоритму на основі польотної карти створюється квадратна матриця подій K -го порядку, де K – кількість опорних точок в одній стороні побудованої квадратної координатної сітки, що покриває частину цільової території за топологією рис. 3а, яка можлива для моніторингу протягом одного вильоту зграї боїдів. У перетину i -го рядка та j -го стовпця даного масиву записуються «0», якщо точка входить до n -го з N просторових коридорів SC_n , та «1», якщо точка не входить до цього коридору (тобто, для даного суб-рою точка вважається вже обстеженою). Ця ж матриця A є нейронною картою НМХ:

$$\left\{ a_{ij}^{(n)} \mid n = \overline{1, N}; a_{ij}^{(n)} \mid i = \overline{1, K}; a_{ij}^{(n)} \mid j = \overline{1, K} \right\};$$

$$a_{ij}^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } a_{ij} \in SC_n; \\ 1, & \text{якщо } a_{ij} \notin SC_n. \end{cases} \quad (3)$$

На другому етапі згідно з запропонованим методом для кожного n го суб-рою складається окрема нейронна карта НМХ A_n за правилами:

$$A = \left\| a_{ij}^{(n)} \right\|_{1 \times K} = \left\| \begin{matrix} a_{11}^{(1)} & \dots & a_{1j}^{(n)} & \dots & a_{1K}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1}^{(n)} & \dots & a_{ij}^{(n)} & \dots & a_{iK}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{K1}^{(n)} & \dots & a_{Kj}^{(n)} & \dots & a_{KK}^{(n)} \end{matrix} \right\|. \quad (4)$$

Тобто, якщо $a_{ij}^{(n)} = 1$, то такий вузол для n -го суб-рою вважається вже обстеженим.

На третьому етапі виконується синтез маршрутів боїдів суб-рою в межах кожного n -го просторового коридору.

Розглянемо обмеження технічної реалізації такої топології в зграї БПЛА, що складається з суб-роїв. Після вимірювань та/або відеомоніторингу та/або виконання інших технологічних процесів стан даного вузла в матриці (тобто нейрона матриці Хопфілда) змінюється з «0» на «1» (ставиться ознака, що вузол обстежений). Такий стан нейронної мережі з виходу обстеженого вузла (фактично – з RF-передавача БПЛА) передається на входи всіх інших вузлів, тобто всім БПЛА, в яких би вони вузлах не знаходились в даний час. Таким чином, вхідні сигнали потрапляють на всі нейрони, а вихідними можуть бути сигнали як з усіх нейронів, так і з частини нейронів після декількох циклів функціонування. Тобто, нейронна карта НМХ поновлюється з деякими часовими затримками Δt_{ij} .

Робота алгоритму завершується, коли вже виконаний обліт всіх опорних точок кожного просторового коридору, а також відома довжина шляху кожного маршруту. Маршрут являє собою масив послідовності опорних точок, причому найперша і остання точка – це завжди буде точка вильоту боїда (суб-рою) зграї.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У нашому випадку, коли в зграї використовується шість БПЛА, що працюють у складі 4 суб-роїв в 4 просторових коридорах $SC_1 - SC_4$, можна нарахувати 15 зв'язків у повнозв'язному площинному (2D) графі (рис. 5).

В загальному випадку кількість зв'язків в наведеній топології можна розрахувати за формулою $N \cdot (N-1)/2$, де N – загальна кількість боїдів у зграї. Це означає, якщо для

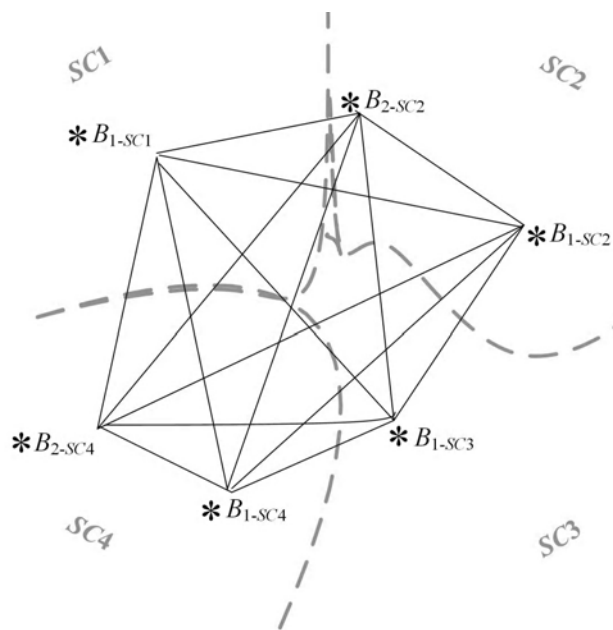


Рисунок 5 – Повнозв'язний граф для $M=6, N=4$

обстеження частини території з 100 координатних вузлів випустити зграю з 100 боїдів, то при цьому потрібно забезпечити 4950 бездротових зв'язків. Навіть якщо врахувати необхідність використання трансферних вузлів для передачі даних на вхід всіх нейронів НМХ (окрім вузла-передавача) при відсутності прямої електромагнітної видимості між боїдами або при перевищенні можливої дальності сигналу [10], наявних обчислювальних та телекомунікаційних ресурсів на борту боїдів розглянутої мережі буде недостатньо.

Тому доцільно вважати, що боїди обмінюються картою НМХ з деякою часовою затримкою, коли відстань між ними не перевищує можливу для телекомунікаційного обміну.

Наприклад, для координатної сітки розміром 10x10 точок, яка поділена на 4 просторові коридори за правилами, наведеними на рис. За, матриці подій A_n для просторових коридорів SC_1 та SC_2 виглядатимуть:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Для інших коридорів SC_n матриця A_n будується аналогічно.

Матриця A повної координатної сітки має розмір $K \times K$ й отримується шляхом поелементної диз'юнкції матриць $A_1 \dots A_4$.

$$A = A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4. \quad (6)$$

Наприклад, після виконання завдань у просторових коридорах SC_1 та SC_2 відповідними суб-роями матриця A , обчислена за формулою (6), набуває вигляду:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

З матриці у (7) видно, що просторові коридори SC_3 та SC_4 ще не обстежені. Якщо у результаті критичного застосування боїди в зазначених коридорах втрачені, тоді оператором КФС повинні бути перевизначені початкові змінні D_{ij} нейронам карт A_1 і A_2 НМХ, і боїди, які звільнились від виконаних завдань у просторових коридорах SC_1 та SC_2 , повинні бути направлені у просторові коридори SC_3 та SC_4 .

Алгоритм закінчується, коли всі значення матриці A повністю обстеженої координатної сітки частини досліджуваної території стають одиничними.

Таким чином, поведінка кожного суб-рою присвячена вирішенню єдиної для такого суб-рою задачі – виконання будь-якої технологічної функції та/або моніторингу характеристик території у призначеному цьому суб-рою просторовому коридорі чітко визначених розмірів та конфігурації, з обов'язковим вимірюванням характеристик (виконанням технологічних функцій) в кожному з наявних на координатній сітці вузлів.

Кожен з цих боїдів буде абсолютно автономною одиницею, яка буде в змозі приймати свої власні рішення і виконувати дії. Але кожен боїд буде в змозі «спілкуватися» з рештою боїдів суб-рою, наслідуючи, таким чином, поведінки рою бджіл і виконуючи спільне завдання.

НМХ може бути корисною в цьому випадку для того, щоб жоден вузол не був обстежений двічі. Для цього треба скористатися властивістю мережі Хопфілда, що з виходу кожного з нейронів подається сигнал на входи всіх інших нейронів. Тоді факт виконання дії (вимірювання, фотографування тощо) у вузлі координатної сітки кожним боїдом стає відомим решті боїдам суб-рою, й такий вузол викреслюється з числа опорних точок, відповідний нейрон переходить в нульовий стан, і боїд не виконує повторної дії в такому вузлу.

Таким чином, глобальні рішення щодо обстеження вузлів координатної сітки приймаються «зграєю» на основі всіх наявних колективних даних. Завдяки цьому суб-рої є універсальним утворенням, що добре пристосовується до групової поведінки членів суб-рою (БПЛА)

та слабо чутливе до втрати деяких його членів. Зграя, що поділена на суб-рої, може втратити деяку кількість боїдів, але все ж залишиться здатною до виконання завдання з обстеження частини мапи, обмеженої координатною сіткою з поділом на просторові коридори.

Проведені експерименти підтвердили працездатність і практичну застосовність запропонованого методу. Результати планування маршрутів боїдів суб-роїв наведені у табл. 1 і табл. 2. У табл. 1 наведені результати застосування запропонованого методу з топологією мережі, при якій для кожного суб-рою власна окрема точка вильоту, за умови застосування боїдів зі швидкістю польоту 5 м/с та відстанню між вузлами координатної сітки $L = 100$ м.

В табл. 2 наведені аналогічні дані для БПЛА, які мають спільну точку вильоту.

З аналізу табл. 1–табл. 2 видно, що запуск суб-роїв з різних точок вильоту скорочує час обстеження території на 10,4%. Але при цьому загальна вартість маршруту зростає на 2,6%. Це означає, що в такому разі треба приділяти більше уваги питанням оптичної навігації, більш точному позиціонуванню БПЛА при здійсненні складного маневрування між вузлами координатної сітки. Необхідно передбачити режим повернення БПЛА на початкову позицію.

Треба відзначити, що при такому підході пройдений суб-роєм шлях не буде мінімальним, і описане рішення є тільки суб-оптимальним для TSP. Але використання мережі Хопфілда дозволяє знаходити задовільні рішення досить швидко, без додаткового аналізу. Це робить можливим використовувати розроблений метод синтезу маршруту відокремленої групи безпілотних апаратів (з конкатенацією декількох двовірних рішень у тривимірному просторі) у швидкодіючих мережах, наприклад, таких, як зграя боїдів. Використання класичних методів, що дозволяють знаходити оптимальне рішення з використанням множинних ітерацій, може зажадати таких тимчасових і обчислювальних ресурсів, що приведуть до краху зграї боїдів при несвоєчасному отриманні корекції маршруту.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Як видно з табл. 1–табл. 2, запропонований синтезу маршрутів зграї БПЛА з розбиття на суб-рої, що діють в двовірних просторових коридорах, дозволяє істотно

прискорити виконання завдань обстеження ділянок території. Описаний підхід забезпечує рішення задачі комівояжера з відвідуванням всіх вузлів координатної сітки, що покриває карту частини досліджуваної поверхні, а також високий рівень узагальнення даних моделлю.

Це дозволяє рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

Сформовані матриці подій дозволяють забезпечувати активність моніторингових або функціональних пристроїв БПЛА (відеокамери, метео-датчики, пристрої розпорошення речовин та ін.) тільки у власному просторовому 2D-коридорі, а також і пасивність цих же пристроїв при попаданні деяких БПЛА суб-рою в чужій для нього просторовий коридор. Такий підхід підвищує час життєздатності зграї шляхом виключення дублювання задач у вузлах та економії обмежених енерго-, обчислювальних і технологічних ресурсів БПЛА.

Збільшення кількості БПЛА в кожному суб-рої або ущільнення вузлів координатної сітки прискорює виконання завдання цим суб-роєм, проте веде до значного витрачання загальних ресурсів зграї і до підвищення небезпеки зіткнень БПЛА всередині зграї. Таким чином, вибір характеристик зграї і планування завдань повинні бути спрямовані на пошук оптимального співвідношення K^2/N , що забезпечує прийнятний рівень енергоспоживання, матеріальних і часових витрат на виконання завдання на території.

ВИСНОВКИ

Експерименти показують, що синтез топології суб-роїв безпілотних апаратів з використанням нейронної мережі Хопфілда є доцільним та корисним для підвищення ефективності використання БПЛА при обстеженні території.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропонований метод маршрутів суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда, який в процесі синтезу маршрутів завдяки формуванню топології суб-роїв з використанням НМХ виключає дубляж виконання моніторингових та/або технологічних функцій зграєю БПЛА у визначених вузлах координатної сітки, якою покривається частина мапи обстежуваної території.

Запропонований метод дозволяє істотно прискорити час обстеження території, що виконується з викорис-

Таблиця 1 – Результати методу з різних точок вильоту БПЛА

№ суб-рою (просторового коридору)	№ точки вильоту БПЛА	К-сть БПЛА	К-сть вузлів маршруту (разом/розподіл між БПЛА)	Середній час виконання задачі суб-роєм, хв	Загальна вартість маршруту
SC_1	PF_1	1	25/25	8,9	268
SC_2	PF_2	2	25/13 і 12	4,0	268
SC_3	PF_3	1	25/25	8,5	256
SC_4	PF_4	2	25/13 і 12	3,9	252
РАЗОМ:		6	100	23,3	1044

Таблиця 2 – Результати методу з однієї точки вильоту БПЛА

№ суб-рою (просторового коридору)	№ точки вильоту БПЛА	К-сть БПЛА	К-сть вузлів маршруту (разом/розподіл між БПЛА)	Середній час виконання задачі суб-роєм, хв	Загальна вартість маршруту
SC_1	PF_0	1	28/28	9,3	278
SC_2		2	27/14 і 13	4,5	264
SC_3		1	22/22	7,9	236
SC_4		2	23/12 і 11	4,3	240
РАЗОМ:		6	100	26,0	1018

танням БПЛА, підвищити економію обмежених обчислювальних та енергоресурсів безпілотних апаратів, що дозволяє збільшити час їх життя.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в тому, що застосування запропонованого методу дозволяє подовжити час життя зграї ресурсообмежених недорогих птахоподібних об'єктів (боїдів). Експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу. Отримано залежність моделі, синтезованої запропонованим методом, від місця розташування вузлів вильоту кожного суб-рою боїдів. Використання отриманої залежності дозволяє на практиці більш раціонально вибирати місце старту суб-рою, кількість координатних сіток для розбиття досліджуваної поверхні, відстань між вузлами сітки, забезпечуючи прийнятну точність нейромоделі в процесі обстеження вузлів, з забезпеченням зниження загальної вартості маршрутів.

Перспективи подальших досліджень полягають у доповненні запропонованих рішень адаптивною зміною висоти роботи кожного суб-рою в залежності від рівня критичності ситуації на обстежуваній території (пожежа, перевищення ГДК шкідливих речовин тощо).

ПОДЯКИ

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Чорноморського національного університету ім. Петра Могили за темами «Створення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від енергії вимірювального сигналу» (держ. реєстр. № 0115U000316, 2015–2016 рр.) та «Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення» (2017–2018 рр.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ачасова А. Безпілотники – сучасний інструмент для аграрія [Електронний ресурс] / А. Ачасова // АгроPRO. – 2016, Жовтень (спецвипуск). – С. 44–46. – Режим доступу : URL : <https://agropro.club/articles/bezpilotniki-suchasnij-instrument-dlya-agrariya/>.

Журавская И. Н.¹, Мусиенко М. П.²

¹Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры компьютерной инженерии Черноморского национального университета им. Петра Могили, Николаев, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, декан факультета компьютерных наук Черноморского национального университета им. Петра Могили, Николаев, Украина

СИНТЕЗ МАРШРУТОВ СУБ-РОЕВ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Актуальность. Решена актуальная задача экономии ограниченных энерго-, вычислительных и технологических ресурсов малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Цель работы – создание метода синтеза маршрутов суб-роев БПЛА, продлевающего время жизнеспособности стаи БПЛА.

Метод. Предложен метод построения моделей частиц («суб-роев») стаи БПЛА, исключающий дублиаж выполнения задачи в узлах координатных сеток, которыми покрывается исследуемая территория. Совмещение нейронной карты сети Хопфилда и полетной карты для каждого суб-роя обеспечивает сообщение через модули беспроводной связи между БПЛА о факте выполнения мониторинговой или технологической задачи любым отдельным БПЛА суб-роя остальным БПЛА. Предложенный подход позволяет использовать функции самозаживления суб-роев стаи птицеподобных объектов («боидов») путем переопределения задач суб-роев как кибер-физической системы в случае потери отдельных боидов при их критическом применении. Структура получаемых моделей поведения суб-роев, реализованная в двумерных пространственных коридорах произвольной формы с последующей конкатенацией полученных 2D-решений, значительно упрощает решение задачи коммивояжера в трехмерном пространстве и позволяет существенно ускорить выполнение задач обследования участков территорий.

Результаты. Разработано программное обеспечение (ПО), реализующее предложенный метод, которое использовано при проведении вычислительных экспериментов по исследованию свойств метода.

2. Perdix fact sheet: Release of the Strategic capabilities office DoD [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.
3. Даринцев О. В. Нейросетевой алгоритм планирования траекторий для группы мобильных роботов / О. В. Даринцев, А. Б. Мигранов, Б. С. Юдинцев // Искусственный интеллект ; Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – 2011. – № 1. – С. 154–160.
4. Rahman T. NCP striking pattern in combat situation using boids behaviour / T. Rahman, M. Hariadi, S. Sumpeno // Intelligent technology and its application (ISITIA) : IEEE international seminar, Surabaya, Indonesia, 22–24 May. 2014 : proceedings [Electronic resource]. – Access mode: <http://isitia.its.ac.id/base/index.php/SITIA/2014/paper/viewFile/343/143>.
5. Wang N. Hopfield neural network guided evolutionary algorithm for aircraft penetration path planning / N. Wang, L. Wang, X. Go, L. Chen, L. Shen // Advances in neural network research and applications (LISEE, 67). – Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – P. 235–243.
6. Субботін С. О. Побудова повністю визначених нейро-нечітких мереж з регулярними розбиттям простору ознак на основі вибірок великого обсягу / С. О. Субботін // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 3. – С. 47–53.
7. Hopfield J. J. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration / J. J. Hopfield, C. D. Brody // Proceedings of the NAS of the USA. – 2001. – Vol. 98, No. 3. – P. 1282–1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.
8. Musiyenko M. P. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors / [M. P. Musiyenko, I. M. Zhuravska, I. V. Kulakovska, A. V. Kulakovska] // Electronics and nanotechnology (ELNANO) : 36th international conference, Kyiv, 19–21 Apr. 2016 : proceedings. – Kyiv : IEEE; NTUU “KPI”, 2016. – P. 382–387. DOI: 10.1109/LNANO.2016.7493090.
9. Melnyk A. Multiagent approach to the distributed autonomous explorations / A. Melnyk, V. Golemba, A. Bochkaryov // Adaptive hardware and systems AHS 2007 : conference, Edinburgh, 5–8 Aug. 2007 : proceedings. – Scotland, UK : NASA/ESA, 2007. – P. 568–572.
10. Журавська І. М. Забезпечення стабільного бездротового зв'язку у кібер-фізичній системі з рухомими об'єктами / І. М. Журавська // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – Т. 5, № 2(31). – С. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784.

Стаття надійшла до редакції 06.02.2017.

Після доробки 02.06.2017.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода и реализующего его ПО, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике для решения задач обследования территории с использованием стаи боидов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, суб-рой, стая, нейронная сеть Хопфилда, дублияж задач

Zhuravska I. M.¹, Musiyenko M. P.²

¹Ph.D., Associate Professor, Doctorant of Department of Computer Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Dean of Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

THE SYNTHESIS OF ROUTES OF UAVS' SUB-SWARMS BASED ON HOPFIELD NEURAL NETWORK FOR INSPECTION OF TERRITORIES

Context. The urgent task the economy of the limited power, computing and technological resources of small unmanned aerial vehicles (UAVs) has been solved.

Objective is a creation of sub-swarms' routes synthesis method with increasing the time of UAV flock viability.

Method. The method for model building of the UAVs' sub-swarm is offered. It allows to avoid the dubbed tasks at any node of grids that cover the survey territory. Combining Hopfield neural network's map and flight map for each sub-swarm provides an information via wireless communication modules of UAV about the executed facts of monitoring or technological tasks by any individual UAV of sub-swarm to rest of UAVs. This approach allows to use the self-healing properties of the sub-swarms in flocks of bird-like objects ("boids") by means redefining the tasks of sub-swarms as a cyber-physical system in case of loss of several boids during a critical usage. The structure of the resulting sub-swarms' behavior models is implemented in two-dimensional spatial corridors of arbitrary shape; then achieved 2D-solving are concatenated. This can significantly speed up the tasks survey territories.

Results. The software implementing proposed method have been developed and used in computational experiments investigating the properties of the method. The experiments confirmed the efficiency of the proposed method and software.

Conclusions. The experiments also allow to recommend them for use in practice to solve the problems survey area using boids' flock.

Keywords: unmanned air vehicle, sub-swarm, flock, Hopfield neural network, dubbed tasks.

REFERENCES

1. Achasova A. Drones – modern tools for farmers [Electronic resource], *AgroPRO*, 2016, Oct. (special issue), pp. 44–46. Access mode: <https://agropro.club/articles/bezpilotniki-suchasnij-instrument-dlya-agrariya/>.
2. Perdix fact sheet: Release of the Strategic capabilities office DoD [Electronic resource]. Access mode: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.
3. Darintsev O. V., Migranov A. B., Yudincev B. S. Neural network algorithm of planning trajectories for a group of mobile robots, *Artificial Intelligence ; Ufa state aviation technical university*, 2011, No. 1, pp. 154–160.
4. Rahman T., Hariadi M., Sumpeno S. NCP striking pattern in combat situation using boids behaviour, *Intelligent technology and its application (ISITIA) : IEEE international seminar*. Surabaya, Indonesia, 22–24 May, 2014 : proceedings [Electronic resource]. Access mode: <http://isitia.its.ac.id/base/index.php/SITIA/2014/paper/viewFile/343/143>.
5. Wang N., Wang L., Go X., Chen L., Shen L. Hopfield neural network guided evolutionary algorithm for aircraft penetration path planning, *Advances in neural network research and applications (LISEE, 67)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, pp. 235–243.
6. Subbotin S. A. Building a fully defined neuro-fuzzy network with a regular partition of a feature space based on large sample, *Radio electronics, computer science, control*, 2016, No. 3, pp. 47–53.
7. Hopfield J. J., Brody C. D. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration, *Proceedings of the NAS of the USA*, 2001, Vol. 98, No. 3, pp. 1282–1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.
8. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Kulakovska I. V., Kulakovska A. V. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors, *Electronics and nanotechnology (ELNANO) : 36th international conference*, Kyiv, 19–21 Apr. 2016 : proceedings. Kyiv : IEEE; NTUU "KPI", 2016, P. 382–387. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493090.
9. Melnyk A., Golebo V., Bochkaryov A. Multiagent approach to the distributed autonomous explorations, *Adaptive hardware and systems AHS 2007 : conference, Edinburgh, 5–8 Aug. 2007 : proceedings*. Scotland, UK, NASA/ESA, 2007, pp. 568–572.
10. Zhuravska I. Ensuring a stable wireless communication in cyber-physical systems with moving objects, *Technology audit and production reserves*, 2016, Vol. 5, No. 2(31), pp. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784.