

УДК: 004.94+004.021

В.Я. Петрівський, Я.Б. Петрівський, В.Л. Шевченко, І.П. Сініцин

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ДАТЧИКІВ З УРАХУВАННЯМ ВАЖЛИВОСТІ ДІЛЯНОК ТЕРИТОРІЇ МОНІТОРИНГУ ТА ЙМОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

Петрівський Володимир Ярославович

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
vovapetrivskiy@gmail.com

Петрівський Ярослав Борисович

Рівненський державний гуманітарний університет,
prorectorsgu@ukr.net

Шевченко Віктор Леонідович

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
gii2014@ukr.net

Сініцин Ігор Петрович

Інститут програмних систем Національної академії наук України,
ips2014@ukr.net

У зв'язку з поширенням використання датчиків у задачах збору та обробки даних одними із ключових критеріїв є об'єм накопиченої інформації та енергоефективність. Під час моніторингу території поширений рух об'єктів дослідження, в результаті можлива зміна ймовірності їх виявлення у ділянці території. Також ділянки території можуть бути різної важливості. Врахування даних факторів суттєво збільшить кількість накопиченої інформації. Представлено метод побудови оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів. Метод ґрунтується на представленні розподілу ймовірності виявлення об'єктів та важливості ділянок території у вигляді шарів та їх об'єднання у шар ймовірної цінності виявлених об'єктів. Розглянуто сім класів ймовірної цінності виявлених об'єктів з відповідними числовими та графічними еквівалентами. Під оптимальною траєкторією розглядаємо траєкторію руху датчика, що забезпечує мінімальні енерговитрати. Енергоефективність досягається шляхом побудови траєкторії мінімальної довжини. Задача побудови траєкторії мінімальної довжини, що проходить всі задані точки, знаходиться як розв'язок задачі комівояжера. Набір точок, за якими будується траєкторія, формується на основі шару ймовірної цінності виявлених об'єктів після проведення процедури заміни вузлів. Для кожного класу ймовірної цінності виявлених об'єктів запропоновано окремий клас заміни вузлів або суперпозицію класів їх заміни. Описано заміну п'яти, трьох та двох вузлів. Для пошуку розв'язку представленої задачі використано генетичний алгоритм з модифікацією правил схрещування та селекції. З використанням запропонованого алгоритму побудовано сімейство траєкторій. Аналіз отриманих результатів підтвердив ефективність розробленого методу та дозволив збільшити енергоефективність при пошуку конкретної території на 76 %.

Ключові слова: моніторинг, сенсор, оптимальна траєкторія, енергоефективність, важливість зон, ймовірність виявлення об'єктів.

© В.Я. ПЕТРІВСЬКИЙ, Я.Б. ПЕТРІВСЬКИЙ, В.Л. ШЕВЧЕНКО, І.П. СІНІЦІН, 2022

Вступ

Для коректного керування процесами і об'єктами потрібна інформація. Для отримання інформації про поточний стан процесів і об'єктів використовують моніторинг за допомогою датчиків. Саме тому задача моніторингу [1], що полягає у накопиченні інформації про явище або об'єкт, займає одну з ключових позицій серед завдань та викликів сучасного технологічного світу. Сенсори та сенсорні мережі широко використовуються для розв'язання задачі моніторингу [2]. При цьому сенсори можуть бути статичними або динамічними. Статичні не змінюють своєї позиції під час збору інформації, в той час як динамічні рухаються впродовж збору інформації. Одним із варіантів використання динамічних датчиків є використання сенсорів у складі безпілотних літальних апаратів. Перевага динамічних датчиків полягає у високій гнучкості планування моніторингу у просторі. Основним параметром, що впливає на якість збору інформації, є побудова оптимальної траєкторії руху. Оптимізація траєкторії дозволяє збільшити час автономної роботи датчика. При цьому потрібно враховувати ймовірність виявлення об'єктів, що представляють інтерес, та важливість різних ділянок зони моніторингу.

Аналіз сучасних досліджень та постановка проблеми

У більшості сучасних методів побудови оптимальних траєкторій руху датчиків отримані траєкторії задовольняють умовам максимального покриття та енергоефективності, а також враховують перешкоди та покриті області [3, 4]. Проте у даних дослідженнях не враховані важливість зон території та ймовірність виявлення об'єктів у зонах, тобто території розглядаються як однорідні. Відповідно до методології, що представлена у [5], термінальне управління рухом динамічних датчиків слід будувати поетапно. Насамперед необхідно побудувати просторову траєкторію руху центру мас літального апарата. У даному дослідженні не враховано зміну ймовірності виявлення об'єктів у різних областях території. У роботі [6] вирішується завдання планування траєкторії безпілотного літального апарата та запропоновано метод, що дозволяє на основі моделі динаміки польоту та допустимого управління визначити обмеження на геометрію траєкторії. Це дозволяє враховувати форму території, але не забезпечує енергоефективність. Також не враховано важливість зон території. У [7] представлено алгоритм повторного перегляду для одночасної локалізації та відображення на основі орієнтирів (simultaneous localization and mapping — SLAM). Оптимальний шлях серед обраних позицій отримується застосуванням алгоритму задачі комівояжера. У дослідженнях [8, 9] розглядається проблема комівояжера з круговим сусідством (traveling salesman problem with circle neighborhood — TSPCN). Замість міст є кола, і кожна точка на колі може бути потенційним вузлом відвідування. Розв'язання задачі комівояжера дозволяє побудувати траєкторію мінімальної довжини, що забезпечить енергоефективність, проте такий шлях може не забезпечити максимізацію накопиченої інформації про об'єкти та явища.

Завдяки розвитку технологій розміри датчиків постійно зменшуються, що веде до зменшення об'єму акумулятора або паливного бака. Саме тому забезпечення енергоефективності підвищує ефективність процесу моніторингу за рахунок збільшення часу використання датчика, в результаті збільшується об'єм накопиченої інформації. Слід також враховувати, що у реальних умовах всі території складаються з областей різної важливості, тобто неоднорід-

ні. Крім того, у реальних умовах об'єкти моніторингу можуть змінювати свої позиції або їх позиції невідомі під час побудови траєкторії, тобто існує ймовірність виявлення об'єктів моніторингу.

Таким чином, актуальною та невирішеною залишається проблема побудови енергоефективних траєкторій руху датчиків з урахуванням важливості областей території та ймовірності виявлення об'єктів у зонах території. Розв'язання описаної проблеми дозволить будувати траєкторії, що забезпечать максимізацію накопичення інформації про об'єкти або явища та збільшать час автономного використання датчиків за рахунок зменшення енерговитрат.

Мета статті — розробка методу побудови оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити метод формування шару ймовірної цінності виявлених об'єктів;
- розробити алгоритм побудови оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів;
- розробити метод пошуку оптимальної траєкторії руху сенсора.

Метод побудови оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів

1. Розробка методу формування шару ймовірної цінності виявлених об'єктів. У реальних умовах, крім перешкод та покритих ділянок, існують території, окремі області яких становлять більший інтерес, тобто є важливішими ніж інші області. Назвемо такі території територіями з неоднорідною важливістю областей. Позначимо територію як T , область або зону позначимо як Z , тобто, $T = Z_1 \cup Z_2 \cup \dots \cup Z_c$, c — кількість областей, з яких складається територія. Під важливістю області або зони $I(Z_i)$ будемо вважати ймовірну цінність об'єктів у області, що досліджується. Значення даної величини розглядаємо на інтервалі від нуля до одиниці, тобто $I(Z_i) \in [0; 1]$, $i = \overline{1, c}$, c — кількість зон.

Також у реальних умовах наявні області, у яких ймовірність виявлення об'єктів, що представляють інтерес або потребують уваги, вища, ніж у інших областях. Позначимо $P(Z_i)$ ймовірність виявлення об'єкта в області, $0 \leq P(Z_i) \leq 1$, $i = \overline{1, c}$, c — кількість зон. Назвемо такі території територіями з областями неоднорідної ймовірності виявлення об'єктів. Якщо на практиці визначення $P(Z_i)$ неможливо, то можна вважати ймовірність виявлення однаковою для всіх областей та враховувати лише важливість об'єктів.

У теорії ризиків використовують поняття математичного очікування прибутку, що обчислюється як добуток абсолютного прибутку на ймовірність його отримання. За аналогією введемо поняття ймовірної цінності або значущості виявлених об'єктів у областях, через які пролягає траєкторія руху датчика. Ймовірну цінність виявлених об'єктів у зоні Z_i позначимо $IP(Z_i)$ та обчислимо як добуток важливості зони та ймовірність виявлення об'єкта у даній зоні у вигляді

$$IP(Z_i) = I(Z_i)P(Z_i), \quad (1)$$

де $I(Z_i)$ — важливість зони Z_i , $P(Z_i)$ — ймовірність виявлення об'єкта у зоні Z_i , $i = \overline{1, c}$, c — кількість зон.

При цьому слід враховувати, що важливість об'єктів та ймовірність їх виявлення можуть змінюватися у часі t — $I(Z_i, t)$, $P(Z_i, t)$; бути різними для різних сценаріїв подій j , реалізація яких залежить від факторів впливу Ξ_j [10].

З урахуванням можливості зміни характеристик області у часі t та залежності від факторів впливу Ξ_j ймовірна цінність виявлених об'єктів матиме вигляд

$$IP(Z_i, t, \Xi_j) = I(Z_i, t, \Xi_j)P(Z_i, t, \Xi_j). \quad (2)$$

Назвемо такі території територіями з неоднорідними характеристиками областей.

Таким чином, задача полягає у побудові траєкторії за інтегральним функціоналом якості (3), в якому досягається максимальне значення ймовірної цінності виявлених об'єктів, максимуму покриття та енергоефективності за траєкторією S :

$$F(S) = \int_S (IP(S) + C(S) + E(S)) dS, \quad (3)$$

де $IP(S)$ — ймовірна цінність виявлених об'єктів за траєкторією S , $C(S)$ — покриття території за траєкторією S , $E(S)$ — енерговитрати за траєкторією S .

Ймовірна цінність виявлених об'єктів за траєкторією S означає суму ймовірної цінності виявлених об'єктів у всіх ділянках, через які пролягає побудована траєкторія. Максимум покриття означає охоплення датчиком всієї території під час руху заданою траєкторією. В свою чергу, максимум енергоефективності розглядаємо як побудову траєкторії мінімальної довжини, наслідком чого є мінімум енерговитрат.

На першому етапі при побудові необхідної траєкторії позначимо території області залежно від їх важливості. Для позначення даних областей доцільно використання числових еквівалентів та умовних позначень. Об'єднаємо міри важливості, значення числового еквіваленту та умовні позначення важливості ділянок території у класи важливості областей. Розглянемо сім класів важливості областей (табл. 1).

Таблиця 1

Клас важливості	Міра важливості	Числовий еквівалент	Умовне позначення
I_1	Обов'язково	1	*
$I_{0,9}$	Дуже важливо	0,9	+
$I_{0,7}$	Важливо	0,7	×
$I_{0,5}$	Не дуже важливо	0,5	#
$I_{0,3}$	Майже неважливо	0,3	^
$I_{0,1}$	Неважливо	0,1	—
I_0	Зовсім неважливо	0	Пробіл

Другим етапом після позначення областей залежно від їх важливості є позначення зон залежно від ймовірності виявлення в них об'єктів. Для цього також використаємо числові еквіваленти та умовні позначення (табл. 2).

Таблиця 2

Клас ймовірності	Значення ймовірності	Числовий еквівалент	Умове позначення
P_1	1	1	*
$P_{0,9}$	0,9	0,9	+
$P_{0,7}$	0,7	0,7	×
$P_{0,5}$	0,5	0,5	#
$P_{0,3}$	0,3	0,3	^
$P_{0,1}$	0,1	0,1	—
P_0	0	0	Пробіл

Очевидно, що поділ на зони за важливістю та ймовірністю виявлення об'єктів може бути різним. Таким чином, отримуємо два шари, що накладаються на вхідну територію. Накладемо отримані шари один на одного та отримаємо один шар ймовірної цінності виявлених об'єктів (рис. 1).

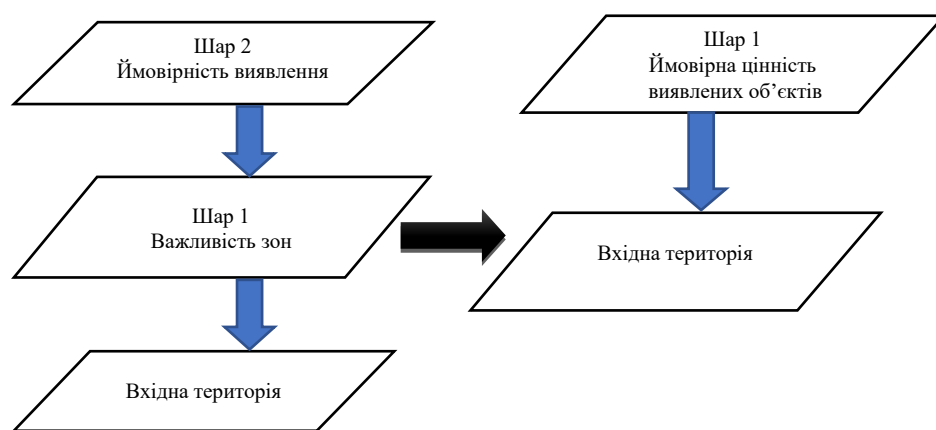


Рис. 1

Значення ймовірної цінності виявлених об'єктів у зонах отриманого шару будемо обчислювати з використанням формули (1) або (2). У випадку, коли розглядається лише важливість зон, всі зони шару ймовірності виявлення об'єктів розглядаються як зони класу P_1 , і навпаки. Під час об'єднання класів важливості та ймовірності виявлення отримаємо 49 діапазонів значень (наприклад $I_{0,4} \cup P_{0,9} = IP_{0,6}$), які об'єднаємо у сім класів ймовірної цінності виявлених об'єктів (табл. 3).

Таблиця 3

Клас ймовірної цінності виявлених об'єктів	Значення ймовірної цінності	Числовий еквівалент	Умове позначення
IP_1	(0,9; 1]	1	*
$IP_{0,9}$	(0,7; 0,9]	0,9	+
$IP_{0,7}$	(0,5; 0,7]	0,7	×
$IP_{0,5}$	(0,3; 0,5]	0,5	#
$IP_{0,3}$	(0,1; 0,3]	0,3	^
$IP_{0,1}$	(0; 0,1]	0,1	—
IP_0	0	0	Пробіл

2. Розробка алгоритму побудови оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням ймовірної цінності ділянок території. Після розподілення областей за класами ймовірної цінності виявлених об'єктів побудуємо рівномірну сітку з кроком h , значення якого обирається експертом. Наступний етап — заповнення матриці ймовірної цінності виявлених об'єктів D , елементи якої є значенням ймовірної цінності виявлених об'єктів у вузлах сітки. Кожен вузол сітки — точка деякої області території, що належить певному класу важливості та ймовірності виявлення.

Розмірність матриці ймовірної цінності виявлених об'єктів D залежить від кроку сітки, розміру території та може досягати великих значень. Для полегшення обчислень, зменшення кількості операцій та врахування значень ймовірної цінності виявлених об'єктів при побудові траєкторії слід зменшити кількість вузлів. Для цього виконаємо процедуру заміни вузлів, що полягає у заміні певної кількості сусідніх вузлів, що мають однакове значення, одним вузлом. Будемо використовувати 5-, 3- та 2-точкову заміни. Для прикладу розглянемо 3-точкову заміну. Спочатку обходимо область за рядками та розглядаємо кожні трійки елементів. Якщо значення трьох підряд елементів рівне, залишаємо лише центральне значення, значення бокових двох елементів замінюємо на нуль. У випадку 5-точкової заміни залишаємо третій елемент. У випадку 2-точкової заміни залишаємо будь-який елемент з пари елементів. Після проходження рядками виконуємо проходження за стовпцями. Схематично зобразимо 3-точкову заміну (рис. 2).

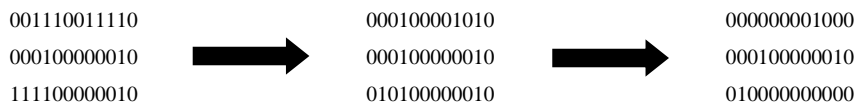


Рис. 2

Після заміни вузлів побудуємо траєкторію, що проходить через кожен вузол лише один раз. Для цього використаємо генетичний алгоритм. Також можливе використання нейронних мереж.

Для кожного класу ймовірної цінності виявлених об'єктів (табл. 3) виконаємо заміни вузлів (табл. 4):

Таблиця 4

Клас ймовірної цінності виявлених об'єктів	Заміна вузлів
IP_1	Без заміни вузлів
$IP_{0,9}$	2-точкова заміна
$IP_{0,7}$	3-точкова заміна
$IP_{0,5}$	3-точкова заміна 2-точкова заміна
$IP_{0,3}$	5-точкова заміна 3-точкова заміна
$IP_{0,1}$	5-точкова заміна 3-точкова заміна 2-точкова заміна
IP_0	Елементи = 0

Таким чином, алгоритм побудови траєкторії, за якої досягається максимальне значення ймовірного виявлення об'єктів та задовольняються умови максимального покриття та енергоефективності, показано на рис. 3.

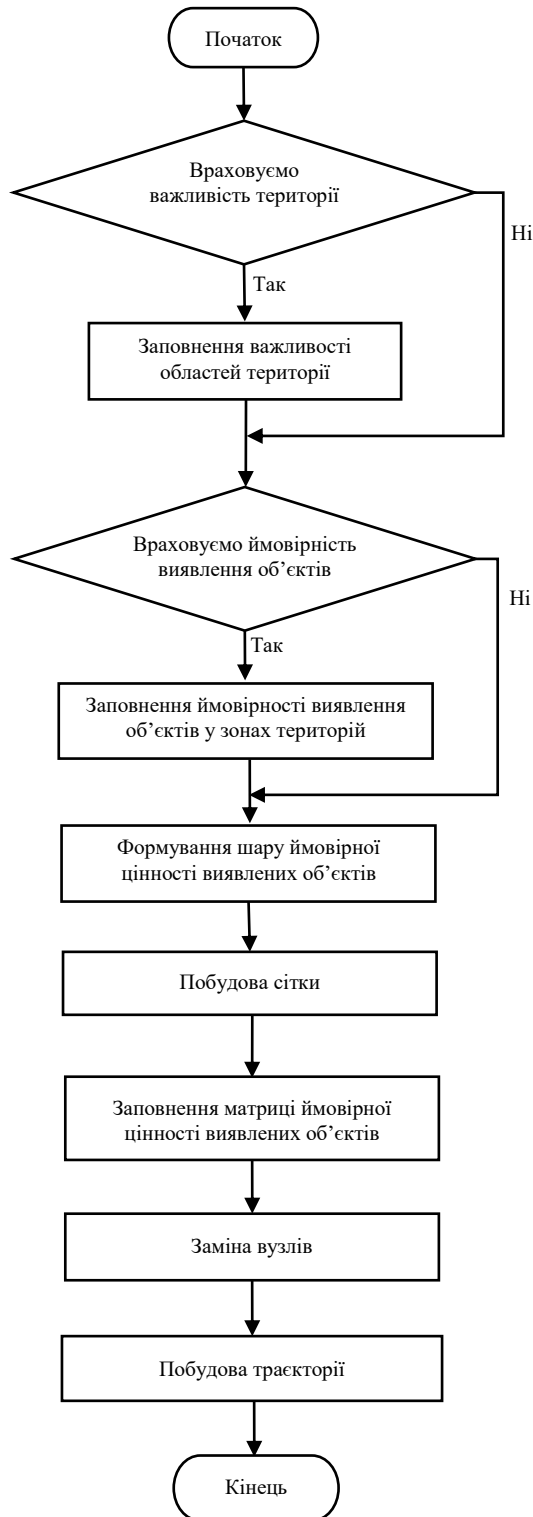


Рис. 3

3. Розробка методу пошуку оптимальної траєкторії руху сенсора. Після заповнення матриці ймовірної цінності виявлених об'єктів та заміни вузлів необхідно побудувати траєкторію (рис. 3). Позначимо S траєкторію руху датчика (4), що складається з пар точок з координатами x , y :

$$S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}, \quad (4)$$

де n — кількість точок, з яких складається траєкторія.

Довжину траєкторії позначимо $L(S)$.

Енерговитрати будемо обчислювати як довжину траєкторії руху датчика, помножену на енерговитрати одного кроку руху датчика:

$$E(S) = L(S) \Delta e, \quad (5)$$

де $L(S)$ — довжина траєкторії, Δe — енерговитрати одного кроку руху датчика.

Величина $E(S)$ означає енерговитрати датчика за один обліт території за заданою траєкторією S . Оскільки енерговитрати (5) прямопропорційні довжині траєкторії $L(S)$, очевидно, що мінімальні енерговитрати досягаються при мінімальній довжині траєкторії.

Сформулюємо задачу пошуку траєкторії мінімальної довжини:

$$E(S) \rightarrow \min_{S \in G}, \quad (6)$$

$$G = \begin{cases} x_1 \in [x_{\min}, x_{\max}] \\ y_1 \in [y_{\min}, y_{\max}] \\ \vdots \\ x_n \in [x_{\min}, x_{\max}] \\ y_n \in [y_{\min}, y_{\max}] \end{cases}, \quad (7)$$

де S — траєкторія, n — кількість точок, з яких складається траєкторія.

Мінімальне значення енерговитрат досягається при побудові траєкторії, що проходить кожну точку лише один раз та має мінімальну довжину. Таким чином, задачу (6), (7) представимо у вигляді задачі комівояжера.

Для знаходження траєкторії, що проходить крізь кожну точку лише один раз, сформулюємо задачу побудови мінімального маршруту при обльоті території як задачу комівояжера:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{x_{ij} \in [0;1]}, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

$$u_i - u_j + (n-1) x_{ij} \leq n-2, \quad i, j = \overline{2, n}, \quad i \neq j, \quad (11)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо прямуємо з точки } i \text{ в точку } j, \\ 0, \text{ якщо не прямуємо з точки } i \text{ в точку } j. \end{cases} \quad (12)$$

У задачі (8)–(12) умова (9) означає лише один вихід з точки, а умова (10) — лише один вхід у точку, тобто кожна точка відвідується лише один раз. Обмеження (11) є спеціальною умовою, що забезпечує замкненість маршрутів та відсутність підциклів,

що не зв'язані між собою. У цільовій функції величини c_{ij} — це відстань між точками, через які повинна пролягати траєкторія. Відстань між точками будемо обчислювати як евклідову.

Для відшукування розв'язку описаної задачі використано генетичний алгоритм. У класичному випадку даний алгоритм складається з таких кроків [11]:

- 1) формування початкової популяції;
- 2) схрещування та/або мутація;
- 3) селекція (відбір);
- 4) формування нового покоління.

Кроки 1–3 виконуються циклічно до виконання умов зупинки алгоритму: знаходження оптимального рішення, досягнення кількості еволюцій, вичерпання часу роботи.

У випадку описаної вище задачі початковою популяцією буде набір траєкторій. Розглядаємо 20 траєкторій, що формуються довільним чином, тобто обираються всі точки у довільному порядку. Позначимо таку популяцію P_{start} :

$$P_{start} = \{S_1, S_2, \dots, S_{20}\}, \quad (13)$$

де S_i — траєкторії, $i = \overline{1, 20}$.

При схрещуванні початкової популяції (13) батьківські генотипи представимо у вигляді: $g_1^1, g_2^1, \dots, g_n^1$:

$$\begin{cases} G_1 = (g_1^1, g_2^1, \dots, g_n^1), \\ G_2 = (g_1^2, g_2^2, \dots, g_n^2), \end{cases} \quad (14)$$

де g — ген у генотипі, n — кількість генів у генотипі.

У (14) геном є точка траєкторії, кількість точок у генотипі рівна довжині траєкторії. Результат схрещування представимо таким чином:

$$\begin{cases} C_1 = (c_1^1, c_2^1, \dots, c_n^1), \\ C_2 = (c_1^2, c_2^2, \dots, c_n^2). \end{cases} \quad (15)$$

Гени результуючих генотипів (15) матимуть вигляд (16), (17) згідно з [12]:

$$c_i^1 = \begin{cases} g_i^1, & i = 0 \vee i \bmod 2 = 0, \\ g_i^1, & i \bmod 2 \neq 0; \end{cases} \quad (16)$$

$$c_i^2 = \begin{cases} g_i^1, & \frac{i}{2} \bmod 2 = 0, \\ g_i^1, & \frac{i}{2} \bmod 2 \neq 0. \end{cases} \quad (17)$$

Селекцію проводимо поєднанням методу рулетки та турнірної селекції. Для кожної траєкторії (результуючого генотипу) обчислюємо значення ймовірності вибору за формулою (18)

$$p_i = \frac{L(S_i)}{\sum_{i=1}^N L(S_i)}(S_i), \quad (18)$$

де $L(S_i)$ — значення функції пристосування для особи S_i (довжина траєкторії S_i), N — кількість особин у популяції.

Умова зупинки ітераційної процедури генетичного алгоритму для розв'язання задачі (8)–(12) — неперевищення різниці між значеннями сум функцій пристосування на поточній та попередній ітерації певного визначеного числа Δ :

$$\sum_{j=1}^N L(S_j^i) - \sum_{j=1}^N L(S_j^{i-1}) \leq N\Delta, \quad (19)$$

де i — номер ітерації, N — кількість особин у популяції, $\Delta = \text{const}$.

Як додаткову умову зупинки, крім (19), розглянемо умову неперевищення кількості ітерацій. Дане число обирається експертом.

Після зупинки роботи алгоритму популяція, функція пристосування якої мінімальна, і буде траєкторією мінімальної довжини, що проходить крізь всі точки один раз.

Побудова траєкторій руху датчиків для конкретних територій та розподілів ймовірної цінності виявлених об'єктів

Розглянемо використання запропонованого методу. Нехай дано територію, яку необхідно покрити, тобто побудувати траєкторію руху для датчика (рис. 4).

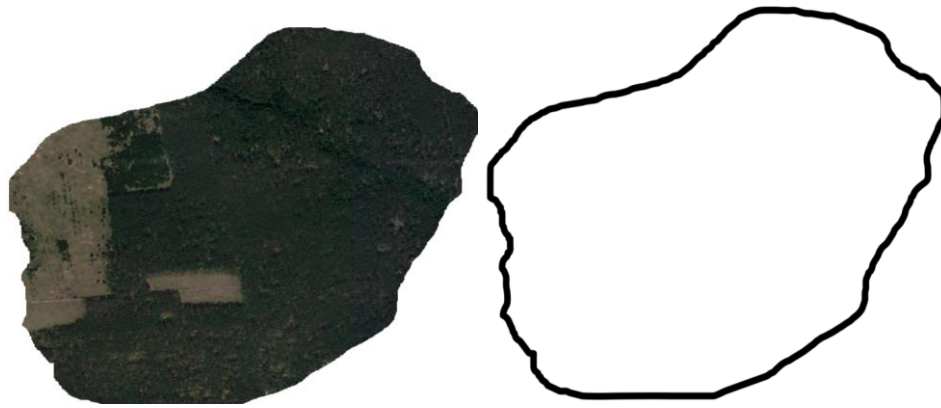


Рис. 4

Також дано експертний розподіл території на області за важливістю та ймовірністю виявлення об'єктів (рис. 5, а, б).

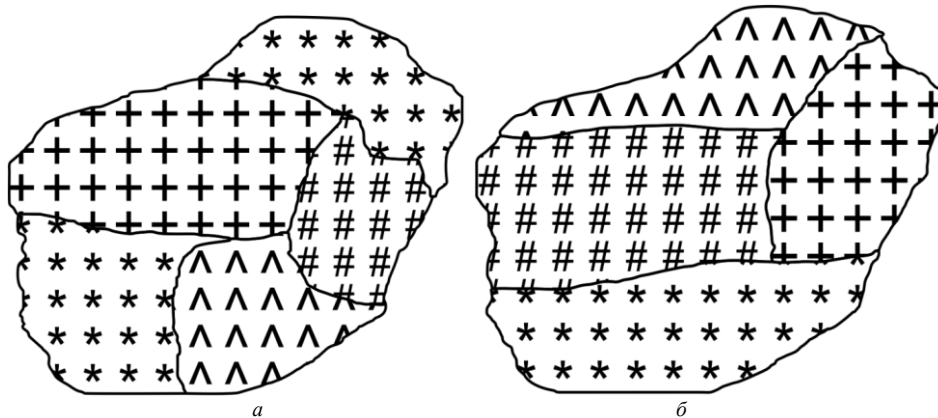


Рис. 5

Після побудови шару ймовірної цінності виявлених об'єктів та заміни вузлів результуюча траєкторія руху сенсора з урахуванням ймовірної цінності виявлених об'єктів (важливості областей та ймовірності виявлення об'єктів) та кроком у 50 пікселів матиме вигляд, показаний на рис. 6.

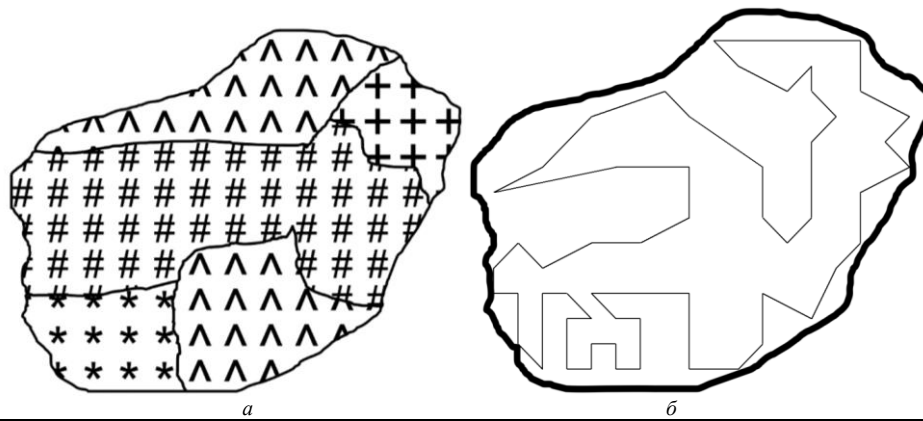


Рис. 6

Таким чином отримано траєкторію, що максимізує інтегральний функціонал якості, в якому досягається максимальне значення суми ймовірної цінності виявлених об'єктів, максимум покриття та енергоефективності.

На шарі ймовірної цінності об'єктів (рис. 6, а) кривими позначено межі шарів важливості областей та ймовірності виявлення об'єктів. Білі пікселі є наслідком неспівпадіння кольорів при накладанні шарів. Дана ситуація можлива при позначенні експертами областей з використанням пензля з несучільною заливкою.

На рис. 7 представлено траєкторії обльоту для різних форм територій.

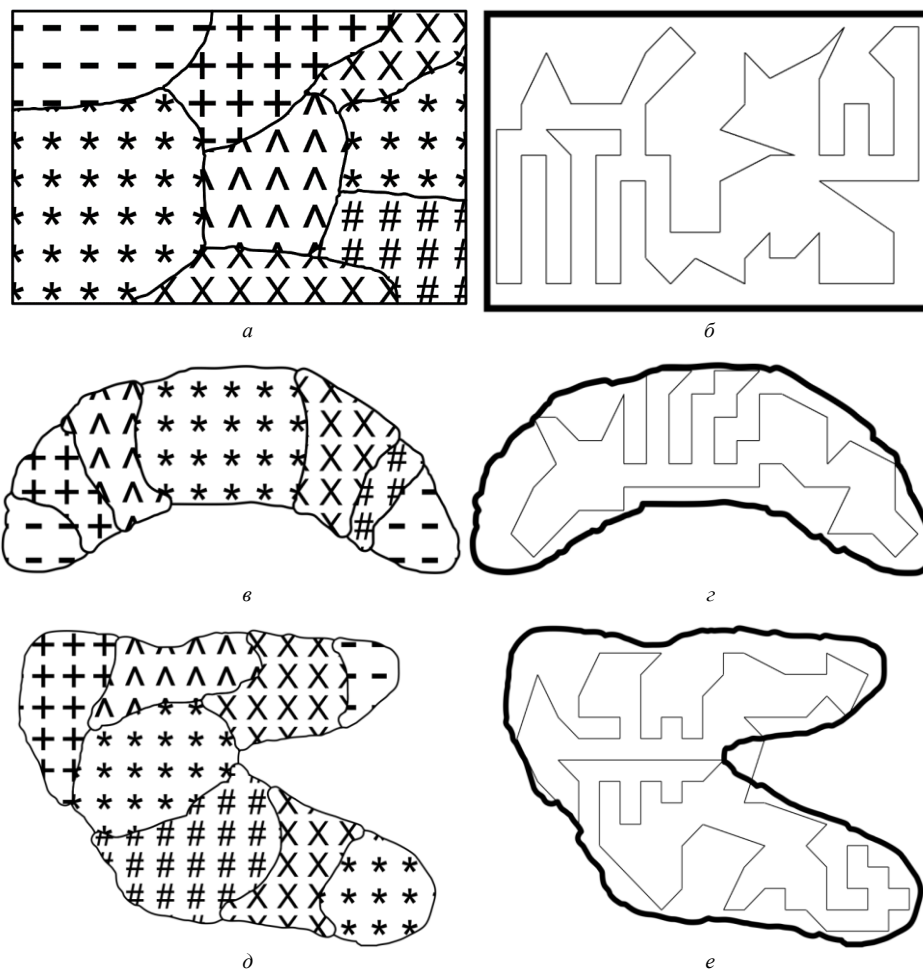


Рис. 7

Обговорення результатів дослідження

У випадку траєкторії, що представлена на рис. 7, δ за розподілом ймовірної цінності виявлених об'єктів (рис. 7, ε), маємо наявний вихід траєкторії за межі території. Така ситуація допустима на територіях складної форми, коли дана траєкторія більш енергоефективна за траєкторію, що пролягає в межах території. Також умова проходження траєкторії в межах території може бути додатковим критерієм при побудові траєкторії, що, в свою чергу, може призвести до збільшення обчислювальної складності процесу побудови траєкторії.

Очевидно, що кожний рухомий датчик володіє акумулятором або паливним баком певної ємності (табл. 5), позначимо дану величину V .

Таблиця 5

Модель БПЛА	Об'єм баку/акумулятора	Час автономної роботи
Bayraktar TB2	300 літрів	≈ 27 годин
Griflion H	27 літрів	≈ 15 годин
RQ-4 Global Hawk	6985 літрів	≈ 36 годин
MQ-9 Reaper	1300 літрів	≈ 27 годин
IAI Heron	450 літрів	≈ 46 годин
DJI Mavic 3 Cine	5000 mAh	≈ 50 хвилин
Autel EVO II Dual Rugged Bundle	7100 mAh	≈ 40 хвилин

Для оцінки ефективності запропонованого методу побудуємо еталонну траєкторію для покриття такої ж території, але з однорідними характеристиками, тобто ймовірна цінність виявлених об'єктів рівна 1 для всіх областей території: $IP(Z_i) = 1$, $i = \overline{1, c}$, c — кількість зон. Значення кроку сітки $h = 50$ пікселів, об'єм акумулятора $V = 10000$ умовних одиниць, енерговитрати одного кроку руху датчика — умовна одиниця. Довжина траєкторії при покритті території з однорідними характеристиками складає 6186,06 пікселів (рис. 8).

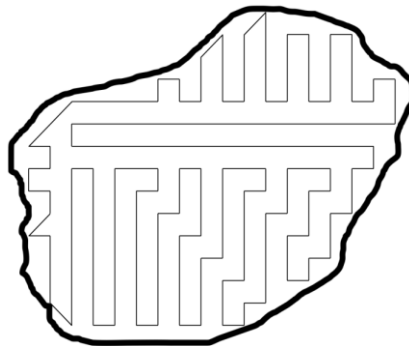


Рис. 8

Позначимо $RC(E, V)$ кількість об'їзтів території при заданих енерговитратах:

$$RC(E, V) = \frac{V}{E}. \quad (20)$$

Кількість об'їзтів (20) даної траєкторії при заданих параметрах рівна $RC(6186,06, 10000) = \frac{100000}{6186,06} = 16,165$.

Як еталонне значення ефективності виберемо значення кількості об'їзтів території при класі ймовірності IP_1 . Для всіх інших класів ймовірної цінності виявлених об'єктів значення ефективності обчислимо як відношення кількості об'їзтів території для даного класу до кількості об'їзтів для класу IP_1 :

$$Eff = \frac{RC_i(E, V)}{RC_{IP_1}(E, V)}, \quad (21)$$

де $RC_{IP_1}(E, V)$ — кількість об'єктів для класу IP_1 , $RC_i(E, V)$ — кількість об'єктів для класу i , $i = \overline{1, 6}$.

Розрахуємо вираш ефективності:

$$\overline{Eff} = (Eff - 1) * 100\%. \quad (22)$$

Обчислимо значення вирашу ефективності для різних значень ймовірної цінності виявлених об'єктів. Клас ймовірної цінності виявлених об'єктів IP_0 не розглядаємо, оскільки точки даного класу не розглядаються при побудові траєкторії. Відмінність однорідності визначаємо як різницю між одиницею та середнім значенням класу ймовірної цінності виявлених об'єктів.

Величина кроку сітки також впливає на довжину траєкторії, тому остаточну ефективність для заданого кроку сітки h обчислимо як мінімальне значення вирашу ефективності (21), (22) для всіх класів ймовірної цінності виявлення об'єктів, крім першого:

$$\overline{Eff}_h = \min_i \overline{Eff}_i, \quad i = \overline{1, 6}. \quad (23)$$

Для $h = 50$ ефективність (23) рівна $Eff_{h=50}^* = \min \{90, 99, 116, 195, 207\} = 90$.

Використовуючи різні вхідні параметри, побудуємо сімейство кривих, що описують залежність (23) вирашу ефективності від відмінності однорідності при різних значеннях кроку h (рис. 9).

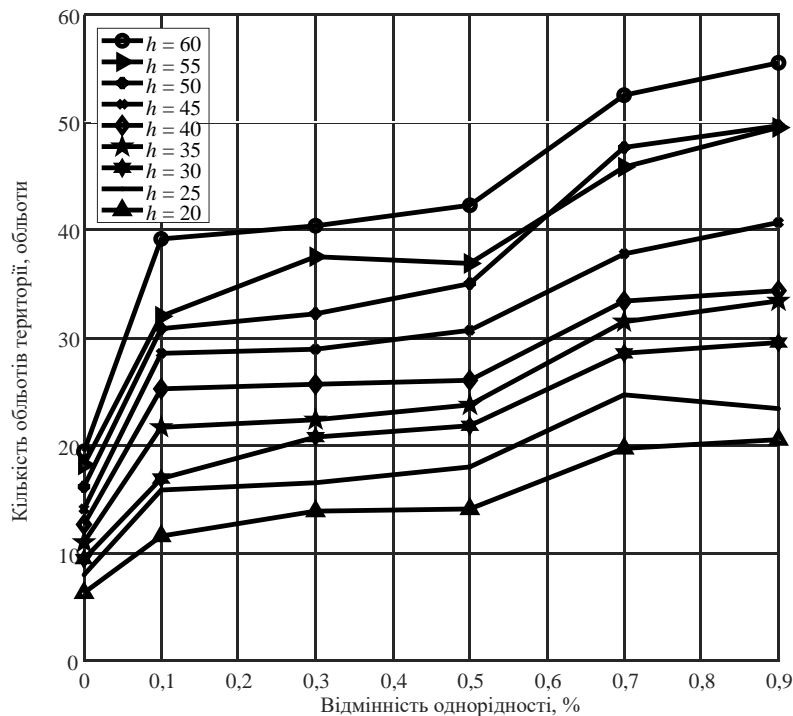


Рис. 9

Аналізуючи отримані результати (рис. 10), припустимо, що функцію залежності кількості об'єктів території від відмінності однорідності можна представити як суперпозицію показникової та логістичної функцій:

$$f(x) = \begin{cases} a\sqrt{x} + b, & x \in [0; 3), \\ \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_0)}} + b, & \end{cases} \quad (24)$$

де a та b — сталі коефіцієнти, L — максимальне значення кількості об'єктів (верхня асимптота), x_0 — значення середньої точки кривої.

У рівнянні (24) x_0 буде рівним 0,6 як середина інтервалу $[0,3; 0,9]$.

Використовуючи різні вхідні параметри, побудуємо сімейство кривих, що описують залежність виграшу ефективності від відмінності однорідності при різних значеннях кроку h (рис. 10).

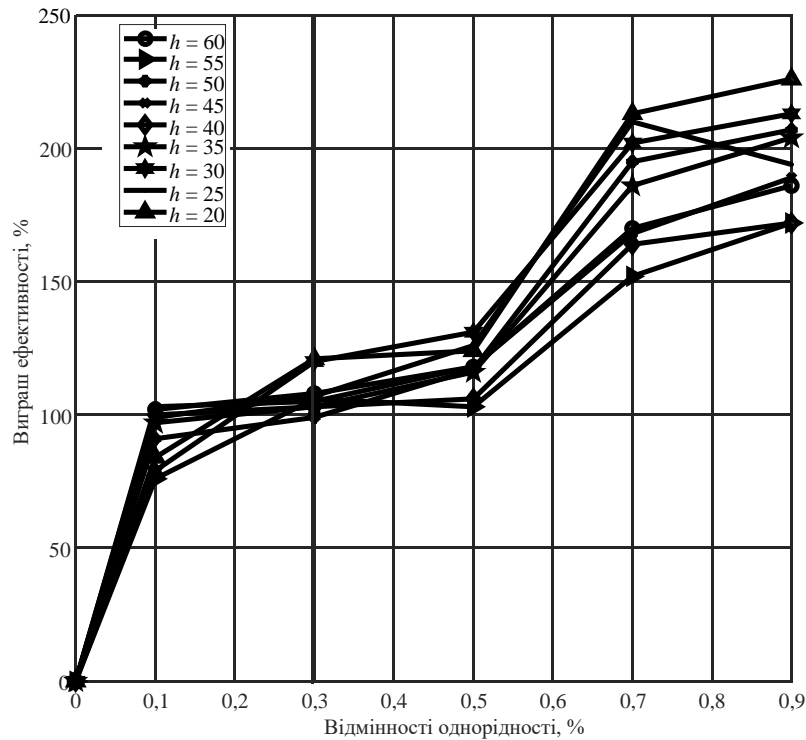


Рис. 10

На основі отриманих результатів (рис. 10) можна зробити висновок: при значеннях відмінності однорідності до 0,1 (10 %) величина кроку h не впливає на виграш ефективності; при значеннях відмінності однорідності від 0,1 (10 %) до 0,5 (50 %) величина кроку h не сильно впливає; при значеннях відмінності однорідності більше 0,5 (50 %) величина кроку h сильно впливає на виграш ефективності. Отже, траєкторії, побудовані з малим кроком h , не енергоефективні.

Відповідно до отриманих результатів, мінімальне значення кількості об'єктів території для різних значень кроку h рівне 11 повних об'єктів, точне значення 31,99. Відповідно до цього значення виграш ефективності 76 %.

Отже, можна зробити висновок, що розроблений метод дозволяє збільшити енергоефективність при покритті території динамічними датчиками з урахуванням ймовірної цінності об'єктів на 76 %.

Висновок

Розроблено метод побудови оптимальної траєкторії руху датчиків з урахуванням важливості ділянок території та ймовірності виявлення об'єктів. Описаний

метод базується на побудові траєкторії за інтегральним функціоналом якості, в якому досягається максимальне значення суми ймовірної цінності виявлених об'єктів, максимуму покриття та енергоефективності. Ймовірність виявлення об'єктів та їх цінність розглядаються як окремі шари розподілу областей, що при накладанні утворюють шар ймовірної цінності виявлених об'єктів у областях території.

Описано сім класів ймовірності виявлення об'єктів, їх цінності та ймовірної цінності виявлених об'єктів з відповідними числовими та символічними еквівалентами. Наведено приклади побудови траєкторій для різних територій та розподілів ймовірної цінності виявлених об'єктів.

Для конкретно обраної території проведено аналіз ефективності запропонованого методу. Аналіз показав, що з використанням розробленого методу вдалося досягти збільшення енергоефективності на 76 %. Оскільки під час руху датчик витрачає паливо або запас акумулятора, енергоефективність розглядається як побудова траєкторії мінімальної довжини.

V. Petrivskiy, Ya. Petrivskiy, V. Shevchenko, I. Sinitsyn

OPTIMIZATION OF THE TRAJECTORY OF SENSORS MOTION TAKING INTO ACCOUNT THE IMPORTANCE OF THE AREAS OF THE MONITORING AREA SEGMENTS AND THE PROBABILITY OF DETECTION OF OBJECTS

Volodymyr Petrivskiy

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
vovapetrivskiy@gmail.com

Yaroslav Petrivskiy

Rivne State University of the Humanities,
prorectorsgu@ukr.net

Viktor Shevchenko

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
gii2014@ukr.net

Igor Sinitsyn

Institute of Software Systems of National Academy of Sciences of Ukraine,
ips2014@ukr.net

Due to the widespread use of sensors in data collection and processing, one of the key criteria is the amount of information accumulated and energy efficiency. While monitoring the territory, the movement of research objects is common. As a result there is a change in the probability of their detection in the segment of the territory. Also, segments may be of varying importance. Taking these factors into account will significantly increase the amount of information accumulated. The article presents a method of constructing the optimal trajectory of sensors motion taking into account the importance of territory segments and the probability of detection of objects. The method is based on the representation of distribution of the probability of detection of objects and the importance of territory segments in the form of layers and their integration into a layer of the probable value of detected objects. Seven classes of the probable value of detected objects with corresponding numerical and graphical equivalents are considered. As optimal trajectory of sensors motion the trajectory which provides minimum energy expenditure is meant. Energy efficiency is achieved by constructing a trajectory of minimum length as a solution to the salesman's problem. The set of points at which the trajectory is built is formed on the basis of the layer of the probable value of the detected objects after the procedure of replacing the

nodes. A separate node replacement class, or superposition of node replacement classes, is proposed for each class of probable value of detected objects. Replacement of five, three and two nodes is described. A genetic algorithm with modification of crossing and selection rules was used to find a solution to this problem. A set of trajectories is constructed using the proposed algorithm. The analysis of the obtained results confirmed the efficiency of the developed method and allowed to increase the energy efficiency when covering a given area by 76 %.

Keywords: monitoring, sensor, optimal trajectory, energy efficiency, zones importance, objects detection probability.

1. Chapter 5 — Technology Fundamentals. V. Tsiatsis et al. Internet of Things (Second edition). Technologies and Applications for a New Age of Intelligence. 2019. P. 67–126.
2. Kumbhar V. Types of sensors, advantages & disadvantages of all types sensors, applications of sensors. URL: <https://www.plctutorialpoint.com/2015/05/types-of-sensors-advantages.html>.
3. Petrivskiy V., Shevchenko V., Bychkov O., Pokotylo O. Models and information technologies of coverage of the territory by sensors with energy consumption optimization. In: Shkarlet S. et al. (eds). *Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. **344**. Springer, Cham. P. 17–30. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89902-8_2.
4. Petrivskiy V., Shevchenko V., Yevseiev S., Milov O., Laptiev O., Bychkov O., Fedoriienko V., Tkachenko M., Kurchenko O., & Opirskyy, I. Development of a modification of the method for constructing energy-efficient sensor networks using static and dynamic sensors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 1(9(115)), P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252988>.
5. Mechali O., Xu L., Huang Ya, Shi M., Xie X. Observer-based fixed-time continuous nonsingular terminal sliding mode control of quadrotor aircraft under uncertainties and disturbances for robust trajectory tracking: Theory and experiment. *Control Engineering Practice*. 2021. **111**. P. 104806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104806>.
6. Яковлев К., Макаров Д., Баскин Е. Метод автоматического планирования траектории беспилотного летательного аппарата в условиях ограничений на динамику полета. *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2014. № 4. С. 3–17.
7. Ryu H. A revisiting method using a covariance traveling salesman problem algorithm for landmark-based simultaneous localization and mapping. *Sensors*. 2019. **19**, N 22.
8. Isaacs J. T., Klein D. J., Hespanha J. P. Algorithms for the traveling salesman problem with neighborhoods involving a Dubins vehicle. *Proceedings of the American Control Conference*. 2011.
9. Nedjat A., Vizvarib B. Robot path planning by traveling salesman problem with circle neighborhood: modeling, algorithm, and applications. DOI: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2003/2003.06712.pdf>.
10. Шевченко В.Л. Оптимізаційне моделювання в стратегічному плануванні. К. : ЦВСД НУОУ, 2011. 283 с.
11. Diveev A.I., Bobr O.V. Variational genetic algorithm for NP-hard scheduling problem solution. *Procedia Computer Science*. 2017. **103**. P. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.010>.
12. The crossover operator of a genetic algorithm as applied to the task of a production planning. S.L. Podvalny et al. *Procedia Computer Science*. 2019. **150**. P. 603–608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.100>.

Отримано 01.06.2022