

# Літальні апарати: аеродинаміка, силові установки, обладнання, озброєння та застосування

УДК 004.023

DOI: 10.30748/zhups.2018.56.05

Є.С. Воробйов

*Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## ВИКОРИСТАННЯ КЛІТКОВИХ АВТОМАТІВ У МЕТОДІ РАНЖУВАННЯ ВАРІАНТІВ МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ УДАРНИХ ЛІТАКІВ ДЛЯ УРАЖЕННЯ НАЗЕМНИХ ЦІЛЕЙ

*У статті розглядається задача альтернативного вибору варіанта маршруту польоту ударної авіації для ураження наземних цілей. Дане завдання відноситься до класу задач багатокритеріальної оптимізації і вимагає значних часових і обчислювальних ресурсів для свого вирішення. В роботі розроблено метод отримання сімейства маршрутів відповідно до обраної стратегії ведення бойових дій. Запропоновано метод ранжування маршрутів за показниками паливної економічності, часу польоту та безпеки польотів під час виконання бойового завдання. Основна відмінність розробленого методу полягає в уточненні властивостей тривимірної моделі клітинного автомата решітчастого газу, розробки нового підходу до обчислення ймовірності зміни положення клітини і визначення правил переходу до сусідніх елементів і розробки нових процедур переходу в них. Використання методу параметричної оцінки варіантів маршрутів та їх ранжування для обґрунтування варіанту реалізації під час ведення бойових дій. Розроблені методи дозволяють автоматизувати процес отримання та обґрунтування рішень при плануванні використання груп ударної авіації.*

**Ключові слова:** клітинний автомат, маршрут, маршрут польоту, оптимізація, ранжування.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день не існує однозначного підходу до вирішення завдання пошуку маршруту польоту ударної авіації. Для вирішення даного завдання в цивільній авіації вироблені правила її рішення в жорстко заданих умовах розбиття простору і сформульованих цілей [1]. Однак для цивільної авіації основним завданням є перевезення найбільшої кількості вантажів або пасажирів за мінімальний час при максимальній безпеці [2]. Для літаків військового або спеціального призначення висуваються зовсім інші вимоги по визначенню маршрутів. Для таких маршрутів будуть характерні висока невизначеність в стані простору, невідомий або високий рівень ризику виконання завдання, різноплановість вирішуваних завдань і інші фактори.

Існуючі методи вирішення цих завдань можна умовно розбити на дві великі групи. Це автоматизовані методи вирішення і неавтоматизовані методи вирішення. Автоматизовані методи мають обмежені можливості, які дозволяють лише віднайти найкоротший маршрут без урахування особливостей вирішення завдань, стану середовища в якій буде функціонувати літальний об'єкт, а також цілей і завдань, які будуть перед ним стояти.

Неавтоматизовані методи дозволяють більш якісно підходити до вирішення даного завдання.

Однак основним їх недоліком є низька оперативність вирішення, відносно невисока точність і неможливість реалізації декількох стратегій планування польотів при одноразовому рішенні. Тобто, для вирішення таких завдань в різних умовах необхідно виконувати весь комплекс обчислень повторно.

Таким чином, існує необхідність розробки нових методів пошуку маршрутів польоту ударної авіації з урахуванням особливостей стану повітряного простору та переліку вирішуваних завдань. При цьому будемо враховувати необхідність вирішення завдання наведення повітряних об'єктів на наземні цілі в умовах протидії противника. Також актуальним завданням є необхідність обґрунтованого вибору варіанту прокладеного маршруту за умови отримання багатьох варіантів, що стає можливим при автоматизації процедури пошуку маршрутів польоту ударних груп авіації.

**Мета написання статті** полягає в розробці методу пошуку та вибору варіанту маршруту польоту ударної авіації для підвищення оперативності і точності її рішення.

**Аналіз літератури.** Автором роботи [2] існуючі на сьогодні методи вирішення завдань пошуку маршрутів рухомих об'єктів розділені на три класи: точні, класичні евристичні і метоевристическі методи. Точні методи представляють інтерес при розробці та тестуванні оптимізаційних алгоритмів, але

для вирішення практичних завдань не використовуються в зв'язку з швидким зростанням обчислювальної складності при збільшенні розмірності задачі. Евристичні методи полягають в здійсненні пошуку в відносно обмеженому просторі рішень і забезпечують знаходження наближених до оптимальних рішень за прийнятний час. Метаевристичні методи є підкласом класичних евристик, особливістю яких є ретельне вивчення найбільш перспективних частин простору рішень [3]. Якість отриманих рішень при цьому вище, ніж в класичних евристках. Однак, вони включають велику кількість параметрів, які повинні бути налаштовані для кожного конкретного завдання [4]. Тому метаевристичні методи складають основу сучасних досліджень в області наближених методів рішення [2]. Особливо часто для вирішення оптимізаційних задач, до яких відноситься і завдання пошуку маршрутів, використовуються метаевристичні, засновані на механізмах, які зустрічаються в живій природі. Такі метаевристичні методи отримали назву біо-алгоритмів. Серед них і клітинні автомати, завдяки природному паралелізму, простоті і універсальності дозволяють моделювати поведінку самих різних систем, об'єктів і явищ будь-якого походження [5]. Функціонування апарату клітинних автоматів детально описано в роботах [5; 7–8]. А приклади їх використання для вирішення оптимізаційних завдань доводять свою ефективність. Зокрема, в статті [9] на основі клітинних автоматів змодельовано поведінку натовпу з урахуванням ментальних особливостей пішоходів. В роботі [10] описано клітинно-автоматний підхід до моделювання поведінки транспорту і пішоходів. Пошук оптимальних маршрутів руху з використанням апарату клітинних автоматів також здійснено в статті [11], однак оскільки розглянуто рух об'єктів у двовимірному просторі то перенесення його в тривимірний простір потребує доопрацювання розробленої моделі та врахування обмежень щодо формування зон в повітряному просторі. Обґрунтування доцільності застосування клітинно-автоматного підходу до вирішення завдання комівояжера наведені в роботі [5]. В роботі [13] описано успішне застосування клітинних автоматів для вирішення завдання пошуку маршрутів пересування автомобілів від оптових баз до торгових точок. Однак такий підхід може бути застосований лише при наявності дорожньої мережі та сформульованої задачі комівояжера для даних умов, що не дозволяє використовувати даний підхід до вирішення завдання пошуку маршруту польоту повітряних об'єктів. В роботі [14] запропоновано використання алгоритмів маршрутизації для пошуку оптимальних маршрутів польотів ударної авіації. Однак такий підхід відрізняється високою обчислювальною складністю і грубим розбиттям простору з різними властивостями. Проведений аналіз показує успішне використання клітинних автоматів для вирішення завдань такого плану, що дозволяє припус-

тити їх ефективності і для вирішення завдання пошуку оптимального маршруту польотів ударної авіації при доопрацювання зазначених недоліків.

## Виклад основного матеріалу

Для вирішення завдання пошуку маршруту розглянемо клітинний автомат (КА) на основі моделі решітчастого газу, який доповнений до тривимірної моделі і характеризується такими особливостями [8].

1. Весь простір пошуку розбиваються на паралелепіпеди однакового розміру. Кожен паралелепіпед є осередком, в яку може переміщатися клітина. Усі можливі положення осередків газу задані в вигляді області простору в якому здійснюється пошук рішення (рис. 1).

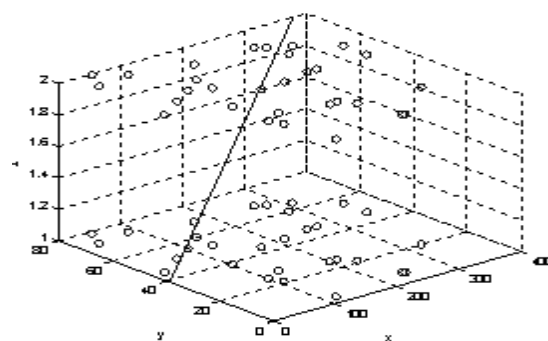


Рис. 1. Область простору для пошуку маршруту з зонами, забороненими для польоту

2. Комірка може перебувати в одному з декількох станів: «заповнена» або «порожня»

3. Можливо задати пріоритетний напрямок руху

4. Перешкодами можуть служити стаціонарні об'єкти, інші повітряні об'єкти, а також поля різної природи

Кожен часовий крок автомата складається з двох етапів:

1. Аналіз ситуації в кожному осередку.

2. Переміщення клітини відповідно до правил автомата.

При відсутності інших рухомих об'єктів можливо проводити аналіз лише щодо даного об'єкту. Це значно скорочує кількість проведених обчислень на кожному кроці роботи автомата.

У загальному випадку можливе переміщення в 26 можливих напрямках.

Аналіз ситуації проводиться шляхом підрахунку ймовірностей вибору одного з можливих напрямків руху (рис. 2).

Якщо підійти формально, то вибір напрямку руху в момент часу не залежить від напрямку руху в момент часу  $t_0$ . Рух клітини випадково і задається наступними правилами розрахунку ймовірності.

Рух клітини в одному з 26 можливих напрямків:

$$P_i(x, y, z) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D(x, y, z + k), \quad i = \overline{1, 26}, \quad (1)$$

де  $x, y, z$  – поточні координати клітини (об'єкта);

$N$  – глибина аналізу околиці клітини;

$k$  – глибина аналізу;

$D(x, y, z)$  – стан клітини,

$$D(x, y, z) = \begin{cases} 1, & \text{клітина зайнята;} \\ 0, & \text{клітина вільна.} \end{cases}$$

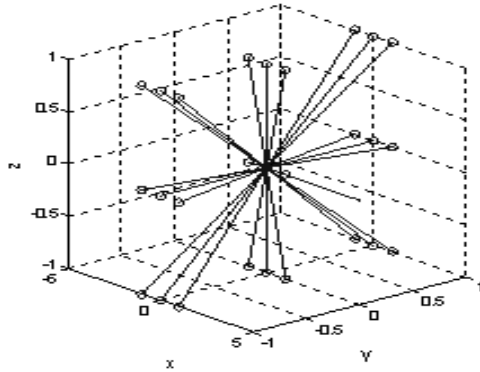


Рис. 2. Графічне відображення поняття «можливі напрямки руху»

Реалізуємо механізм, який регулює напрямки руху клітини від поточного положення в заданому напрямку.

Для цього скористаємося положеннями теорії векторів.

Перш за все, знайдемо вектор від поточного положення клітини до цільового об'єкта  $\overline{AB}$  (рис. 3).

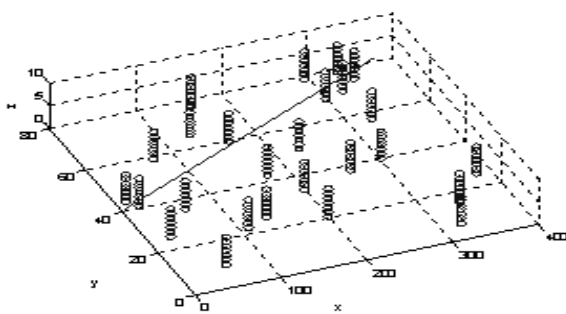


Рис. 3. Вектор від поточного об'єкта до цільового стану

Далі знайдемо вектори з поточної комірки до всіх 26, можливим для переміщення осередків.

Для відповідних напрямків вони будуть мати наступні значення (рис. 4) (відносно поточного стану клітини):

$$\begin{aligned} \vec{f}_j &= (x; y; z); \\ x &\in \{-1, 0, 1\}; \end{aligned}$$

$$y \in \{-1, 0, 1\}; \quad (2)$$

$$z \in \{-1, 0, 1\};$$

$$j = \overline{1, 26}.$$

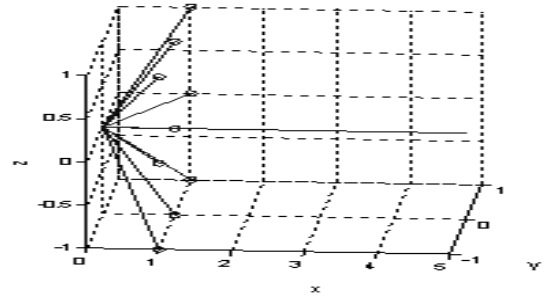


Рис. 4. Графічне представлення вектору  $\overline{AB}$  і орт-векторів.

Далі знаходимо ймовірності руху клітини в кожному з можливих напрямків з використанням виразу (1).

Після цього знаходимо кути між вектором і всіма орт-векторами (2) використовуючи вираз:

$$\alpha_j = \arccos \left( \frac{|\overline{AB} \cdot \vec{f}_j|}{|\overline{AB}| \cdot |\vec{f}_j|} \right). \quad (3)$$

Далі вирішуємо оптимізаційну задачу:

$$D_j(x, y, z) = D_0(x, y, z) + \vec{f}_j, \quad (4)$$

за умов:

$$\max(P_i); \quad (5)$$

$$\min(\alpha_j). \quad (6)$$

Якщо будь-які з значень  $P$  або  $\alpha$  рівні, то вибір здійснюється випадковим чином.

Однак, як було показано вище, подібна модель має недоліки. Недоліками є низька чутливість до ймовірності вибору напрямку, зависання автомата на одному місці, значні відхилення від основного напрямку руху та інші. Для подолання цих недоліків було запропоновано для підрахунку ймовірності використовувати вираз:

$$P_i = e^{-\frac{\sum_{k=1}^N D(x+k, y, z)}{\delta}}, \quad (7)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт, що дозволяє регулювати чутливість ймовірності;

$\sum_{k=1}^N D(x+k, y, z)$  – розраховується відповідно до виразу (1) для кожного напрямку.

Такий підхід до розрахунку ймовірностей дозволяє адекватно формалізувати процедуру вибору напрямку руху. Також даний підхід підходить для пошуку шляху в областях простору з різними властивостями. Прикладом такої області може бути «зона обльоту». Дана область характеризується

певними габаритами вхід в яку можливий, але не бажаний. Так ось вираз (1) не дозволяють розрізнити політ в даній зоні і поза нею, а використання виразу (7) дозволяє.

Розглянемо політ повітряного об'єкта в повітряному просторі з 3 зонами з різними властивостями. Перша зона доступна для вільного польоту, але має зони, заборонені для польоту. Друга зона доступна для польоту, але не рекомендована для використання. Третя зона знаходиться всередині другої і заборонена для польоту, але при цьому проліт в ній можливий.

При проведенні експериментів по дослідженню властивостей розробленого клітинного автомата клітина спочатку знаходиться в першій зоні, а мета знаходиться в другій зоні.

Результати роботи автомата представлені на наступних рисунках.

Приклад прокладки маршруту без зон з особливими умовами польоту представлений на рис. 5.

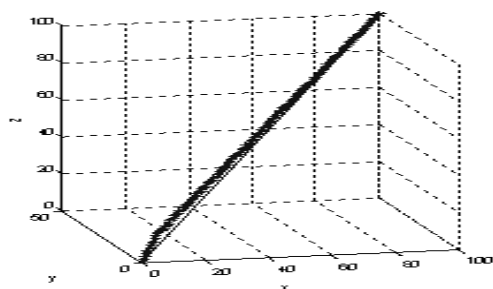


Рис. 5. Прокладка маршруту без зон з особливими умовами польоту

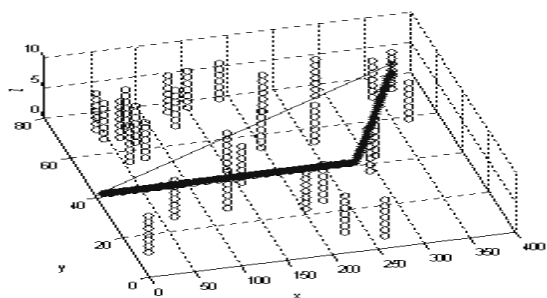


Рис. 6. Результати роботи клітинного автомата при 30 зонах заборонених для польоту

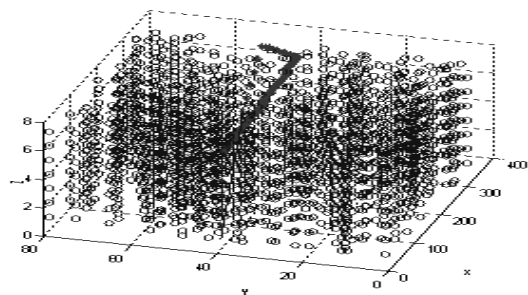


Рис. 7. Результати роботи клітинного автомата при 200 зонах заборонених для польоту

У загальному випадку при наявності різних зон (схематична модель зон перекриття РЛС) знайдений маршрут матиме такий вигляд:

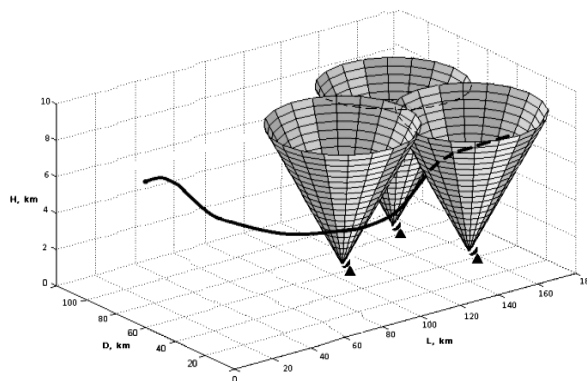


Рис. 8. Результати роботи клітинного автомата при обльоті зон з різними властивостями

Таким чином може бути розроблений метод пошуку маршрутів польоту ударної авіації на наземні цілі з використанням клітинного автомата



Рис. 9. Метод пошуку маршруту польоту ЛА з використанням просторової моделі решітчастого газу

З використанням такого підходу можливе отримання декількох варіантів маршруту польоту ударних літаків.

Враховуючи можливість реалізації паралельного обчислення пошуку багатьох варіантів реалізації маршрутів можливе отримання великої кількості варіантів, які враховують або не враховують вже реалізовані.

Тоді виникає питання: яким чином обрати варіант маршруту польоту літаків ударної авіації з

поміж інших? Для реалізації процедури ранжування розробимо модель простору та розглянемо підходи до її реалізації. На рис. 10 представлена двовимірна модель на якій наведені клітини кліткового автомату.

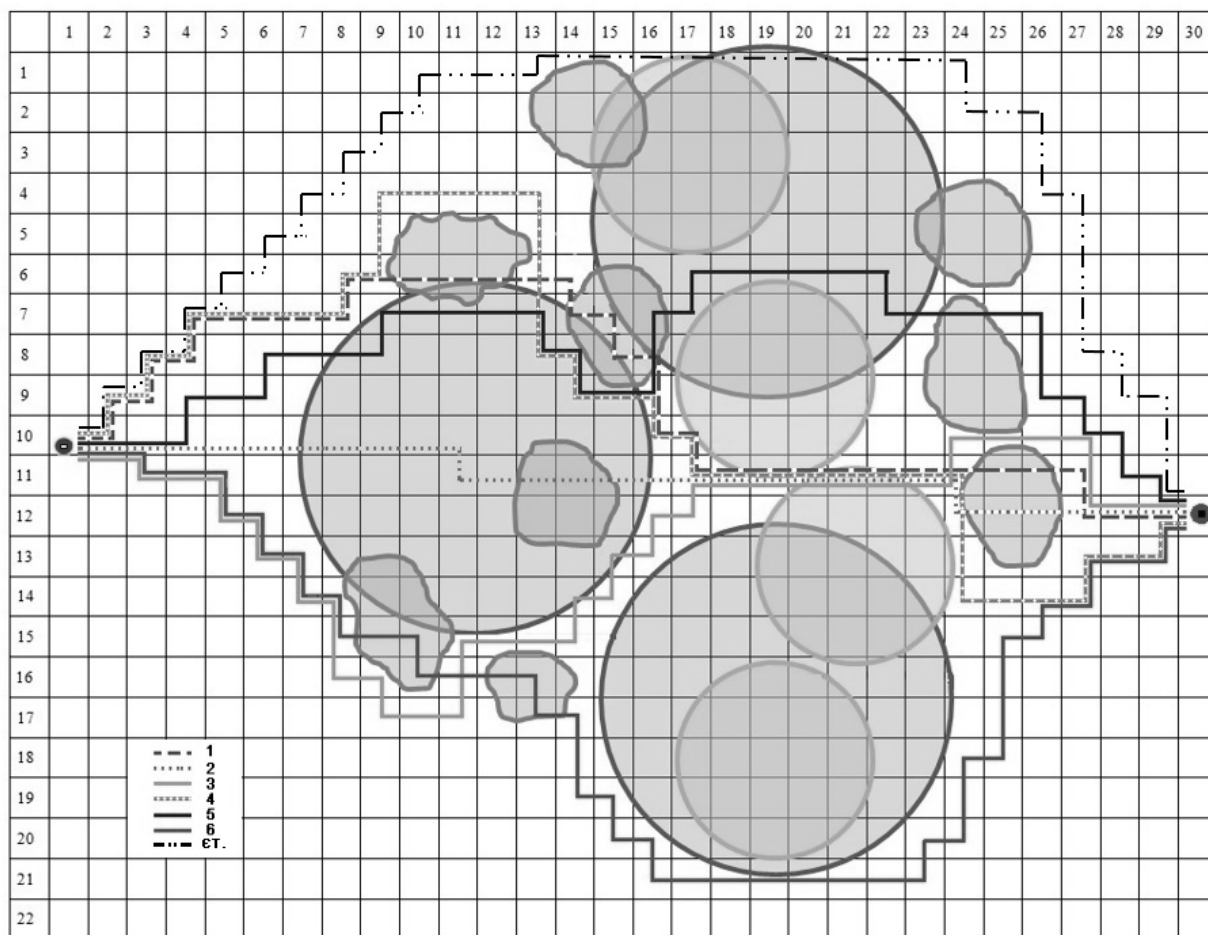


Рис. 10. Модель простору руху повітряного об'єкту

Також кожна клітина може перебувати в наступних станах:

1. Клітина вільна. Штраф за перебування в цій клітині 0.
2. Клітина заборонена для перебування. Штраф за перебування в клітині – 106.
3. Клітина належить межі радіолокаційного поля. Штраф за перебування в клітині дорівнює 5.
4. Клітина належить радіолокаційному полю. Штраф за перебування в клітині дорівнює 10.
5. Клітина належить межі зони ураження ЗРВ. Штраф за перебування в клітині дорівнює 10.
6. Клітина належить зоні ураження ЗРВ. Штраф за перебування в клітині – 15.

Для проведення ранжування знайдемо 3 етапних маршрути.

1. Маршрут з мінімальною витратою пального (1 на рис. 10).
2. Маршрут з мінімальною витратою польотного часу (2 на рис. 10).

3. Найбільш небезпечний маршрут (3 на рис 10).

Ці три маршрути обчислюються без врахування зон заборонених для польоту. Маршрут 2 не враховує зони дії радіолокаційного поля та зон ураження ЗРВ. Маршрут 3 прокладається з максимальним врахуванням зон дії радіолокаційного поля та зони ураження ЗРВ, реалізуючи стратегію "максимальна обережність".

Після створення такої моделі та розрахунку 3 визначених маршрутів проходить реалізація клітинного автомату з обраною стратегією прокладення маршруту.

Для прикладу були отримані маршрути 4, 5 та 6. Дані маршрути прокладені з урахуванням усіх обмежень та враховують результати прокладення попередніх маршрутів. Отримані маршрути можна представити у вигляді наступних таблиць.

Таблиця 1

## Еталонні маршрути

Мін. палива		Мін. час		Небезпечний	
х	у	х	у	х	у
1	12	1	12	1	12
1	11	2	12	2	11
2	10	3	12	3	11
2	9	4	12	4	10
3	8	5	12	5	9
3	7	6	12	6	9
4	6	7	13	7	8
4	5	8	13	8	7
5	4	9	13	9	7
5	5	10	13	10	7
6	3	11	13	11	7
7	3	12	13	12	7
...	...	...	...	...	...
28	8				
28	9				
28	10				
29	11				
29	12				
29	13				
30	14				
30	15				

Таблиця 2

## Знайдені маршрути

Вар. 1			Вар. 2			Вар. 3		
х	у	штраф	х	у	штраф	х	у	штраф
1	12		1	12		1	12	
2	11		2	13		2	12	
3	11		3	14		3	12	
4	10		4	15		4	12	
5	9		4	16		5	11	
6	9		4	17		6	10	
...	...	...	...	...	...	...	...	...
17	13	5	22	14	10	23	9	10
18	14	10	23	14	10	24	9	10
19	14	10	24	15	10	29	9	5
20	14	10	24	16	10	26	9	
21	14	10	24	17	15	27	10	
22	14	10	25	18		28	11	
23	14	10	26	18		28	12	
24	15	10	27	18		29	15	
24	16	10	28	17		29	16	
24	17	15				30	17	
25	18							
26	18							
27	18							
28	17							

Після отримання маршрутів проведемо їх ранжування. Для цього обчислимо відстань за координатами між координатами поточних та еталонних маршрутів:

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} + k_{\text{штр}}, \quad (8)$$

де  $x, y$  – значення координат об'єктів;

$k_{\text{штр}}$  – значення функції штрафу у чарунці.

Використовуючи вираз (8) отримуємо наступну таблицю.

Таблиця 3

## Результати розрахунку параметрів маршруту

Вар. 1			Вар. 2			Вар. 3		
паливо	час	безп.	паливо	час	безп.	паливо	час	безп.
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	2,236068	1	2	1,414214	0	1
1,414214	1	0	4,123106	2	3	2,236068	0	1
2,236068	2	0	6,324555	3	5	3,605551	0	2
2,236068	3	0	8,062258	4,123106	7,071068	3,605551	1	2
3,605551	3	0	10,04988	5,385165	8,246211	4,242641	2	1
3,605551	5	0	12,04159	5,385165	10,19804	9,242641	9	6
4,472136	6	0	14,14214	6,324555	12,16553	15,65685	14	12
5	6	0	15,13275	6,324555	12,16553	16,40312	14	12
4,123106	7,071068	1,414214	14,31782	6,324555	12,16553	16,40312	14	12
3,605551	8,246211	2,828427	16,27882	6,324555	12,16553	17,81025	14	12
2,236068	9,486833	4,242641	21,27882	11,32456	17,16553	17,81025	14	12
2,236068	9,486833	4,242641	21,27882	11,32456	17,16553	17,81025	14	12
2,236068	9,486833	5	21,27882	11,32456	16,18034	18,60233	13	12
2,236068	10,44031	5,830952	21,27882	10,38516	15,19804	18,60233	14	11
2,828427	9,486833	5,830952	26,27882	15,38516	19,21954	13,60233	9	5
3,605551	8,544004	5,830952	25,29706	14,47214	17,28011	18,60233	14	11
4,123106	8,062258	5,830952	24,31782	13,60555	15,09902	17,2111	15,09902	13
10	12,81025	10,83095	23,34166	12,82843	13	16,40312	16,08276	15,09902
16,08276	17,81025	16,40312	17,36932	7,236068	6	16,40312	16,08276	16,08276
17,28011	18,06226	16,40312	21,40175	12	10	15,65685	17,07107	17,07107
18,24621	17,61577	15,83095	21,40175	12	10	16,40312	16,08276	16,08276
19,21954	17,28011	15,38516	21,40175	12	10	16,40312	16,08276	16,08276
15,19804	12,07107	10,09902	21,40175	12	10	17,2111	15,09902	15,09902
21,18034	17	15	21,40175	12	10	17,2111	15,09902	15,09902
21,18034	17,07107	15	22,36932	12	11	15	11,7082	12,07107
21,18034	17,07107	15	23,15295	13,16228	12,23607	7,211103	6,082763	5,09902
21,18034	17,07107	15	29,03567	19,47214	18,60555	8,062258	5,09902	4,123106
21,18034	17,07107	15,09902	15,0333	5	3,605551	8,944272	4,123106	4,123106
21,18034	17,07107	15,09902	15,0333	5	3,605551	9,486833	3,605551	3
22,16553	38,30194	15	15,0333	32,44996	3,605551	12,36932	32,64966	0
22,16553	38,84441	16,08276	13,15295	32,75668	2,828427	12,36932	33,12099	1,414214
27,36932	44,41088	44,41088				12,36932	34,48188	34,48188
12,16553	30,80584	30,80584						
11,04536	31,62278	31,62278						
10	32,44996	32,44996						
9	32,75668	32,75668						
387,8196	554,5087	419,331	544,2485	333,9189	325,9722	414,3649	403,5703	311,9288
	1361,659			1204,14			1129,864	
	1			0,88			0,83	

В ході обчислень відразу обраховується відстань для всіх еталонних та знайдених маршрутів. Для кожного знайденого маршруту обраховуються показники по паливу, часу та безпеці, а також значення отриманих штрафів.

Після чого значення в кожному стовпчику сумують. Отримані значення також сумуються після чого отримується узагальнений показник ваги параметрів маршруту.

Після чого показники нормуються:

$$K_{\text{норм}} = \frac{\Pi_1}{\max(\Pi_1; \Pi_2; \Pi_3)} \quad (9)$$

Нормовані показники дозволяють зважено оцінити отримані маршрути відповідно до введених показників та обрати один з маршрутів для реалізації.

Так з отриманих оцінок видно, що 3 варіант обрахованого маршруту є переважним по відношенню до інших маршрутів. При цьому отримані показ-

ники дозволяють реалізувати окремі процедури парних порівнянь та часткових оцінок за переважними параметрами для кожного маршруту.

## Висновки

Представлені результати по розробці клітинного автомата для вирішення завдання прокладки маршруту руху повітряного об'єкта в різномірних зонах повітряного простору показали необхідність розробки нових підходів до формалізації правил поведінки даних автоматів. В першу чергу потрібна розробка нових підходів до розрахунку ймовірності

руху в різномірних зонах, а також розробки механізмів компенсації «зависання» клітинного автомата в стійких або альтернативних станах. Також отриманий метод ранжування отриманих маршрутів для реалізації процедур підтримки прийняття рішень в перспективних АСУ управління авіацією та протиповітряною обороною. Отримані результати дозволяють перейти до вирішення нового завдання врахування змін умов пошуку маршруту, обліку властивостей літального апарату і підвищення точності побудови маршруту польоту.

## Список літератури

1. Пожидаев М.С. Алгоритмы решения задачи маршрутизации транспорта: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.18 [Электронный ресурс] / Михаил Сергеевич Пожидаев. – Томск, 2010. – Режим доступа: <http://www.marigostra.ru/materials/disser.html>.
2. Сластников С.А. Применение метаэвристических алгоритмов для задачи маршрутизации транспорта / С.А. Сластников // Экономика и математические методы. – 2014. – Т. 50, вып. 1. – С. 117-126.
3. Мацюк Н.О. Особливості розв'язання задачі комівояжера для підприємств гуртової торгівлі / Н.О. Мацюк // Вісник ХНУ. Економічні науки. – 2013. – № 5, т. 2. – С. 95-100.
4. Bjarnadottir A.S. Solving the Vehicle Routing Problem with Genetic Algorithms / Aslaug Soley Bjarnadottir. – Technical University of Denmark, 2004. – 127 p.
5. Мацюк Н.А. Решение задачи коммивояжера средствами клеточных автоматов / Н.А. Мацюк, В.В. Жихаревич // Моделирование региональной экономики. – 2015. – № 2 (26). – С. 263-272.
6. Аладьев В.З. Классические однородные структуры. Клеточные автоматы / В.З. Аладьев. – Издательство Fultus Books, 2009. – 535 с.
7. Бандман О.Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики / О.Л. Бандман // Системная информатика. – 2005. – Вып. 10. – С. 57-113.
8. Тоффоли Т. Машины клеточных автоматов: пер. с англ. / Т. Тоффоли, Н. Марголус. – М.: Мир, 1991. – 280 с.
9. Макаренко О.С. Моделирование руху пішоходів на основі клітинних автоматів / О.С. Макаренко, Д.А. Крушинський // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2010. – № 1. – С. 100-109.
10. Аноприенко А.Я. Использование клеточных автоматов для моделирования движения транспорта / А.Я. Аноприенко, Д.Ю. Плотноков, Е.Ф. Малёваный // Збірка праць VI міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Інформатика та комп'ютерні технології», 2010. – С. 166-171.
11. Павленко М.А. Метод решения задачи прокладки маршрутов при управлении движением воздушного объекта / М.А. Павленко // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 5 (121). – С. 87-90.
12. Мацюк Н.О. Розв'язання задачі маршрутизації з використанням модифікованого мурашино-клітинно-автоматного алгоритму / В.В. Жихаревич, Н.О. Мацюк // Вісник економічної науки України. – 2016. – № 1(30). – С. 49-54.
13. Жихаревич В.В. Клітинно-автоматний підхід до розв'язання задачі маршрутизації оптових торговельних підприємств із урахуванням транспортної інфраструктури регіону [Електронний ресурс] / В.В. Жихаревич, Н.О. Мацюк // Вісник економічної науки України. – 2016. – № 2. – С. 69-73. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Venu\\_2016\\_2\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Venu_2016_2_17).
14. Павленко М.А. Метод решения задачи автоматизации процесса выбора маршрута полета ударной авиации / М.А. Павленко, Д.А. Пархоменко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Вип. 2(15). – Х.: ХУ ПС, 2014. – С. 71-74.
15. Направления развития интерфейсов взаимодействия в автоматизированных системах управления специального назначения / М.А. Павленко, С.В. Смеляков, В.Н. Руденко, С.И. Хмелевский // Системи обробки інформації. – 2016. – № 9. – С. 51-54.
16. Павленко М.А. Когнітивний підхід до розробки інформаційних моделей в системах підтримки прийняття рішень / М.А. Павленко, В.К. Медведєв, П.Г. Бердник, С.В. Міхасьов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 2. – С. 138-141.

## References

1. Podjedaev, M. (2010), "Algoritmy resheniya zadachi marshrutizatsii transporta" [Algorithms for solving the problem of transport routing], URL <http://www.marigostra.ru/materials/disser.html> (accessed 18 January 2018).
2. Slasnikov, S. (2014), "Primeneniye metaevristicheskikh algoritmov dlya zadachi marshrutizatsii transporta" [Using metaheuristic algorithms for the transport route task], *Economics and Mathematical Methods*, Moscow, No. 1, pp. 117-126.
3. Macuk, N. (2013), "Osoblyvosti rozv'yazannya zadachi komivoyazhera dlya pidpryyemstv hurtovoyi torhivli" [Features of the solution of the salesman's problem for wholesale companies], *Visnyk KhNU. Economic sciences*, Kharkiv, No. 5, pp. 95-100.
4. Bjarnadottir, A. (2004), "Solving the Vehicle Routing Problem with Genetic Algorithms", Technical University of Denmark, 127 p.
5. Macuk, N. and Gikharevich, V. (2015), "Resheniye zadachi komivoyazhera sredstvami kletochnykh avtomatov" [The solution of the traveling salesman problem with the means of cellular automata], *Modeluvannya of the Regions*, Kharkiv, pp. 263-272.
6. Aladev, V. (2009), "Klassicheskiye odnorodnyye struktury" [Classical homogeneous structures], Fultus Books, 535 p.
7. Badman, O. (2005), "Kletochno-avtomatnyye modeli prostranstvennoy dinamiki" [Cellular Automata Models of Spatial Dynamics], *System Informatics*, No. 10, pp. 57-113.



8. Toffoli, T. and Margolys, N. (1991), "Mashiny kletochnykh avtomatov" [Machines for cellular automata], MIR, Moscow, 280 p.
9. Makarenko, O. and Krushinski, D. (2010), "Modelyuvannya rukhu pishokhodiv na osnovi klitnynykh avtomativ" [Modeling of pedestrian traffic based on cellular automata], *System research and information technology*, No. 1, pp 100-109.
10. Anoprienko, A., Plotnikov, D. and Malevanu, E. (2010), "Ispolzovaniye kletochnykh avtomatov dlya modelirovaniya dvizheniya transporta" [The use of cellular automata for modeling the movement of transport], *Computer science and computer technology*, pp. 166-171.
11. Pavlenko, M. (2014), "Metod resheniya zadachi prokladki marshrutov pri upravlenii dvizheniyem vozdušnogo ob'yekta" [The method of solving the problem of laying routes in the control of the movement of an air object], *Information Processing Systems*, No. 5 (121), pp. 87-90.
12. Macuk, N. and Gikharevich, V. (2016), "Rozv'yazannya zadachi marshrutyzatsiyi z vykorystanniam modifikovanoho murashyno-klitynno-avtomatnoho alhorytmu" [Resolving the routing problem using a modified ant-cellular automaton algorithm], *Bulletin of Economic Science of Ukraine*, No. 1 (30), pp 49-54.
13. Gikharevich, V. and Macuk, N. (2016), "Klitynno-avtomatnyy pidkhid do rozv'yazannya zadachi marshrutyzatsiyi optovykh torhovel'nykh pidpryemstv iz urakhuvannyam transportnoyi infrastruktury rehionu" [Cellular automaton approach to the solution of the problem of routing of wholesale trade enterprises taking into account the transport infrastructure of the region], *Bulletin of Economic Science of Ukraine*, No 2, pp 69-73. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Venu\\_2016\\_2\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Venu_2016_2_17) (accessed 18 January 2018).
14. Pavlenko, M. and Parchomenko, D. (2014), "Metod resheniya zadachi avtomatizatsii protsessa vybora marshruta poleta udarnoy aviatsii" [The method of solving the problem of automating the process of selecting the flight route of attack aircraft], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No 2 (15), Kharkiv, pp. 71-74.
15. Pavlenko, M., Smelyakov, S. Rudenko, V. and Hmelevskiy, S. (2016), "Napravleniya razvitiya interfeysov vzaimodeystviya v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya spetsial'nogo naznacheniya" [Directions of development of interfaces of interaction in automated special management systems], *Areas of interface interaction in automated control systems special*, No. 9 (146), Kharkiv, pp. 51-54.
16. Pavlenko, M., Medvedev, V. Berdnick, P. and Mihasov, S. (2016), "Kognitivnyy pidkhid do rozrobky informatsiynykh modeley v sistemakh pidtrymky pryynyattya rishen" [Cognitive approach to the development of information models in decision support systems], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 2(23), Kharkiv, pp. 138-141.

Надійшла до редколегії 5.03.2018

Схвалена до друку 17.04.2018

**Відомості про авторів:**

**Воробйов Євген Сергійович**  
ад'юнкт  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І.Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-1828-0069>

**Information about the authors:**

**Evgen Vorobyov**  
Postgraduate Student  
of Ivan Kozhedub Kharkiv National  
Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-1828-0069>

**МЕТОД РАНЖИРОВАНИЯ ВАРИАНТОВ МАРШРУТА ПОЛЕТА УДАРНЫХ САМОЛЕТОВ  
ДЛЯ ПОРАЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ**

Е.С. Воробьев

В статье рассматривается задача альтернативного выбора варианта маршрута полета ударной авиации для поражения наземных целей. Данная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации и требует значительных временных и вычислительных ресурсов для своего решения. В работе разработан метод получения семейства маршрутов в соответствии с выбранной стратегией ведения боевых действий. Предложен метод ранжирования маршрутов по показателям топливной экономичности, времени полета и безопасности полетов при выполнении боевой задачи. Основное отличие разработанного метода заключается в уточнении свойств трехмерной модели клеточного автомата решетчатого газа, разработки нового подхода к вычислению вероятности изменения положения клетки и определение правил перехода к соседним элементам и разработки новых процедур перехода в них. Использован метод параметрической оценки вариантов маршрутов и их ранжирование для обоснования варианта реализации при ведении боевых действий. Разработанные методы позволяют автоматизировать процесс получения и обоснования решений при планировании использования групп ударной авиации.

**Ключевые слова:** клеточный автомат, маршрут, маршрут полета, оптимизация, ранжирование.

**METHOD OF RANKING OPTIONS OF THE ROAD VARIANTS TO TRAIN HARVEST AIRCRAFTS  
FOR THE IMPACT OF GROUNDWEIGHT USING CELLULAR AUTOMATON**

E. Vorobyov

The article deals with the problem of alternative choice of a variant of the flight route of shock aviation for the consideration of ground targets. This task refers to the class of multicriteria optimization tasks and requires significant time and computing resources for its solution. In the work the method of obtaining a family of routes according to the chosen strategy of conducting military operations is developed. The method of ranking routes according to parameters of parity efficiency, flight time and flight safety during the execution of combat task is proposed. The main difference between the ro-made method is to clarify the properties of the three-dimensional model of the cellular lattice machine, to develop a new approach to calculating the probability of changing the position of the cell and determining the rules of transition to neighboring elements and the development of new procedures for the transition to them. Using the method of parametric estimation of route options and their ranking to justify the implementation of the option during the conduct of hostilities. The developed methods allow to automate the process of obtaining and substantiating decisions when planning the use of shock-air groups.

**Keywords:** cellular automaton, route, flight route, optimization, ranging.