

Г. В. Худов¹, І. О. Романенко², П. Є. Минко³, Ю. С. Соломоненко¹, В. О. Іванюк¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба, Харків, Україна

² Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України, Україна

³ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ПОЛЬОТУ КРИЛАТИХ РАКЕТ НА ОСНОВІ МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ

Анотація. Предметом вивчення в статті є метод прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі мурашиного алгоритму. **Метою** є отримання адекватних результатів при прогнозуванні траєкторії руху крилатих ракет при здійсненні планування застосування сил та засобів протиповітряної оборони та вибору їх раціональної побудови. **Завдання:** аналіз відомих методів оцінки траєкторії польоту крилатої ракети; моделювання траєкторії польоту крилатих ракет як пошуку послідовності дій крилатої ракети, яка може переміщати з одного місця в інше, уникаючи будь-яких перешкод на траєкторії польоту; удосконалення методу прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет. Використовуваними **методами** є: методи системного аналізу, теорії ймовірності, методи ройового інтелекту, математичної статистики. Отримані такі **результати**. Удосконалено метод прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі мурашиного алгоритму, в якому, на відміну від відомих, розрахунок траєкторії польоту крилатої ракети передбачає розрахунок цільової функції, визначення сукупності ділянок руху агентів, концентрації феромону на маршрутах руху агентів, переміщення агентів по визначених ділянках руху. Проведена перевірка працездатності удосконаленого методу прогнозування дій повітряного противника на основі мурашиного алгоритму. **Висновки.** Встановлено, що в усіх випадках метод прогнозування дій повітряного противника на основі мурашиного алгоритму забезпечує найменшу довжину маршруту від вихідної точки маршруту до об'єктів ураження. Напрямою подальших досліджень є побудова системи радіолокаційної розвідки за результатами моделювання варіантів дій повітряного противника.

Ключові слова: крилата ракета, повітряний противник, траєкторія польоту, об'єкт ураження, мурашиний алгоритм, радіолокаційна розвідка.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Відомо [1], що застосування ракетного озброєння (крилатих, балістичних, аеробалістичних ракет) несе небезпеку для цивільного населення. Сучасні ракети постійно маневрують та змінюють напрямок руху [2]. Це, безумовно, ускладнює завдання виявлення, визначення координат крилатої ракети та її знищення. Прогнозування замислу дій повітряного противника є важливим завданням органів військового управління, що вирішується в ході оцінки обстановки та визначення вихідних даних для прийняття рішення та планування протиповітряної оборони (ППО). Правильно відповісти на питання, якими маршрутами полетять крилаті ракети, у складі яких ешелонів та груп, де буде створюватися смуга прориву протиповітряної оборони – значить правильно оцінити обстановку та вірно обрати вихідні дані для прийняття рішення та вибору раціональної структури системи ППО та її підсистем.

Відомі методи прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет пов'язані з проведенням ручних розрахунків, мають певну долю суб'єктивізму тощо. Відомі методи прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі автоматизованих розрахунків не задовольняють сучасним вимогам та є застарілими. Отже, виникає невідповідність між можливостями існуючих методів прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет та вимогами до прогнозування такої траєкторії. Для усунення вказаної невідповідності у роботі запропоновано метод прогнозування траєкторії руху крилатої ракети на основі мурашиного алгоритму.

Мета статті – розробка методу прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі мурашиного алгоритму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методики оцінки дій повітряного противника орієнтовані, в основному, на проведення ручних розрахунків. В загальному випадку крилаті ракети до досягнення об'єкту удару можуть використовувати певну множини можливих маршрутів і профілів польоту [3]. Можливо стверджувати, що з цієї множини противник буде використовувати такі маршрути, які забезпечать високу ефективність повітряних ударів [4].

При прогнозуванні траєкторії польоту крилатої ракети в найпростішому випадку у якості найкращого маршруту обирається найкоротший [4]. Для цього визначаються точки пуску крилатих ракет, елементи системи об'єктів прикриття ППО з вказанням їх зон бойових дій і бойового застосування [5].

Далі визначається перелік об'єктів, що досягаються, складається список об'єктів, які ймовірно можуть бути уражені та оцінюється можливість ураження даних об'єктів [6].

Наступним кроком відомих методів оцінки траєкторії польоту крилатої ракети є визначення глибини та ширини удару. В результаті обирається найкоротший маршрут з точки пуску крилатої ракети до об'єкту удару [7-9].

Відомі методики забезпечують оцінку параметрів удару на початок операції (бойових дій), не є адаптивними та не можуть бути використані для оцінки параметрів наступного удару крилатих ракет. Основними недоліками відомих методик є [10-13]:

– постульована в апіорі та незмінна побудова ракетного удару;

– заданий задалегідь та незмінний в часі процентний розподіл крилатих ракет в ударі.

Зазначені недоліки унеможливають отримання адекватних результатів при прогнозуванні траєк-

торії руху крилатих ракет при здійсненні планування застосування сил та засобів ППО та вибору їх раціональної побудови.

Отже, існуючі методи прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет потребують удосконалення.

Основна частина

Планування траєкторії польоту крилатих ракет полягає в пошуку послідовності дій крилатої ракети, яка може переміщати з одного місця в інше, уникаючи будь-яких перешкод на траєкторії польоту. Це може бути інтерпретовано як завдання пошуку оптимальної траєкторії крилатої ракети в статичному середовищі. Це, в свою чергу, передбачає досягнення мети руху при оптимізації визначених витрат.

Точки траєкторії польоту крилатої ракети позначимо як $W_i(\mathbf{X}) \in \mathbf{R}^n$, для $i = 1, 2, \dots, N$, де N – загальна кількість точок маршруту; \mathbf{X} – n -мірний вектор координат руху; \mathbf{R}^n – простір руху розміру n . Точки маршруту крилатої ракети поділяються на:

- вихідну точку маршруту (ВТМ);
- поворотні точки маршруту (ПТМ);
- кінцеву точку маршруту (КТМ).

ПТМ будемо позначати як $C_i(\mathbf{X}) \in \mathbf{R}^n$, для $i = 1, 2, \dots, M$, де M – загальна кількість ПТМ.

Будемо враховувати мінімальну безпечну відстань між крилатими ракетами та розміри ракет. Мінімальну безпечну відстань позначимо як $R_{safe}(\mathbf{X}) \in \mathbf{R}^n$. Також будемо враховувати перешкоди, що визначають зміну траєкторію польоту крилатої ракети.

Перешкоди будемо позначати $Obst_i(\mathbf{X}) \in \mathbf{R}^n$, для $i = 1, 2, \dots, Obs$, де Obs – загальна кількість перешкод. Будемо враховувати обмеження та допущення, що при плануванні траєкторії польоту крилатої ракети кількість ПТМ дорівнює кількості перешкод ($M = Obs$).

При визначенні траєкторії польоту крилатої ракети будемо враховувати конфігурацію простору руху. Під конфігурацією простору розуміється місцевість, погодні умови та перешкоди. Фізичні особливості місцевості будемо визначати за допомогою цифрової карти місцевості з урахуванням цифрової моделі висот (матриці точок висот). Будемо враховувати обмеження щодо можливого напрямку руху крилатої ракети. Будемо вважати, що крилата ракета може рухатися тільки вперед і не можуть робити різкі повороти або підйоми (рис. 1).

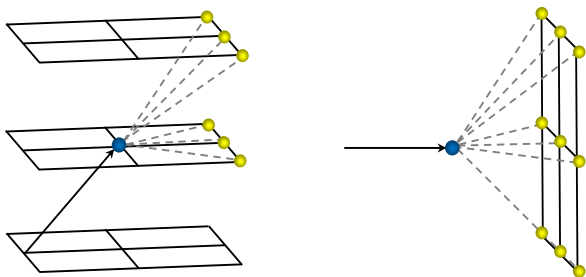


Рис. 1. Можливі напрямки руху крилатої ракети

Залежно від призначення ракет можна розглядати різні види цільової функції, відносно якої потрібно вирішити оптимізаційне завдання. Крилаті ракети, як правило, мають обмежену дальність та обмежений запас пального.

Цільова функція повинна бути обрана такою, що мінімізує відстань між точками траєкторії і, відповідно, витрати пального. Отже, цільова функція при забезпеченні мінімальної відстані між точками W_i траєкторії і мінімальних витрат пального може бути записана виразом (1):

$$\varphi(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{N-1} \|W_{i+1}(\mathbf{X}) - W_i(\mathbf{X})\| \rightarrow \min. \quad (1)$$

Завдання планування траєкторії польоту крилатої ракети може бути зведено до пошуку траєкторії крилатої ракети в дискретному середовищі. Таке завдання визначається наступними елементами:

- простір станів \mathbf{X} , який є скінченною або зліченою кінцевою множиною станів;
- набір доступних дій, $u \in U(x)$ для кожного стану $x \in \mathbf{X}$;
- функція переходу стану f , яка створює стан $f(x, u) \in \mathbf{X}$ для кожного $x \in \mathbf{X}$ і $u \in U(x)$;
- початковий стан $x_1 \in \mathbf{X}$;
- стан цілі $x_G \in \mathbf{X}$.

Загальний алгоритм пошуку оптимальної траєкторії працює шляхом систематичного пошуку в графі, застосовуючи функцію переходу та вибираючи стани, які мінімізують цільову функцію, одночасно відстежуючи відвідувані вузли, щоб не було зайвих розрахунків (дій).

З урахуванням вищезазначеного оптимізаційне завдання визначення траєкторії польоту (визначення вектору координат \mathbf{X}) крилатої ракети в загальному вигляді може бути сформульовано у вигляді:

$$\varphi(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{N-1} \|W_{i+1}(\mathbf{X}) - W_i(\mathbf{X})\| \rightarrow \min;$$

$$W_i(\mathbf{X}) \in \mathbf{R}^n, i = 1, 2, \dots, N;$$

$$R_{safe}(\mathbf{X}) \in \mathbf{R}^n;$$

$$C_j(\mathbf{X}) \in \mathbf{R}^n, j = 1, 2, \dots, M; \quad (2)$$

$$Obst_k(\mathbf{X}) \in \mathbf{R}^n, k = 1, 2, \dots, Obs;$$

$$\forall \mathbf{X} \wedge (\mathbf{X} \notin Obst_i(\mathbf{X}));$$

$$\forall \mathbf{X} \wedge (\mathbf{X} > R_{safe}(\mathbf{X}));$$

$$M = Obs.$$

Для вирішення завдання (2) доцільно використання мурашиного алгоритму, перевагами якого є спроможність вирішення оптимізаційних завдань без знання простору пошуку [14-17]. Мурашиний алгоритм реалізує прямий випадковий пошук можливих рішень оптимізаційного завдання, що є оптимальними або близькими до оптимальних, доки не буде виконана деяка умова або досягнута задана кількість ітерацій.

Узагальнений опис мурашиного алгоритму можна представити виразом:

$$AS = \{S, M, A, P, I, O\}, \quad (3)$$

де S – множина агентів; M – об'єкт для обміну досвідом між агентами (мурахами); A – правила роботи мурашиного алгоритму (створення, поведінка, модифікація агентів); P – параметри (евристичні коефіцієнти), що використовуються в правилах A ; $I = \{I_1 \cdot I_{33}\}$, I_1 – вхід системи, на який подається цільова функція, обмеження, I_{33} – вхід для зворотного зв'язку; $O = \{O_1 \cdot O_{33}\}$, O_1 – вихід (найкраще знайдене рішення задачі), O_{33} – вихід для зворотного зв'язку.

Розглянемо особливості застосування мурашиного алгоритму для прогнозування маршруту польоту крилатої ракети.

В найпростішому випадку маршрут польоту крилатої ракети можна представити як сукупність наступних ділянок: ділянки зльоту з ВТМ та набору висоти, горизонтальних ділянок, на яких відбувається крейсерський політ, подолання зони ППО, вихід на об'єкт удару, ділянка зниження до рубежу виконання завдання або КТМ. Горизонтальні ділянки проходять через ПТМ, в яких відбувається зміна курсу, а в загальному випадку, і висоти польоту. У подальшому вважаємо, що положення ВТМ, КТМ та ПТМ повністю визначає маршрут польоту крилатої ракети.

Політ по кожній з ділянок маршруту, а також здійснення маневру в вибраних ПТМ, має певні небезпеки для крилатої ракети та вимагає певних витрат ресурсів, що призводить до наявності переваги одного маршруту польоту перед іншим. Оскільки варіантів просторового розташування ПТМ може бути дуже багато, кількість можливих маршрутів польоту ЗПН буде надзвичайно великою, що ускладнює вибір маршруту ЗПН найпростішим методом – перебору.

Послідовність етапів методу прогнозування дій повітряного противника на основі мурашиного алгоритму може бути представлена наступним чином.

1. Ініціалізація початкових положень агентів (крилаті ракети) на першій ітерації ($j=1$). $X_{i1}(x_{i1}, y_{i1})$ – вектор положень агентів на першій ітерації, $i=1, 2, \dots, S$; S – загальна кількість агентів. Загальна кількість агентів S дорівнює кількості крилатих ракет.

2. Розрахунок цільової функції $\phi_j(X)$ на j -й ітерації.

У якості цільової функції на j -й ітерації будемо визначати наступну функцію:

$$\phi_j(X) = \sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^{N_k} (P_i^k(j) \cdot D_i^k(j)), \quad (4)$$

де k – поточний номер агента; N_k – загальна кількість точок маршруту для k -го агента; $P_i^k(j)$ – ймовірність переходу k -го агента в i -ту ПТМ на j -й ітерації:

$$P_i^k(j) = (F_i^k(j))^\alpha (L_i^k(j))^\beta / \sum_{m=1}^M (F_m^\alpha(j) \cdot L_m^\beta(j)), \quad (5)$$

де $\alpha \geq 0$ і $\beta \geq 0$ – параметри, що задають вагу феромона і “жадібність” методу відповідно; M – кількість можливих ПТМ; $L_i^k(j)$ – привабливість ділянки маршруту для k -го агента в i -й точці маршруту на j -й ітерації; $F_i^k(j)$ – концентрація феромону k -го агента в i -й точці маршруту на j -й ітерації; функція $D_i^k(j)$ визначає довжину ділянки маршруту для k -го агента в i -й точці на j -й ітерації та для тривимірного простору визначається за виразом:

$$D_i^k(j) = |\Delta x_i^k(j)| + |\Delta y_i^k(j)| + |\Delta z_i^k(j)|, \quad (6)$$

де $|\Delta x_i^k(j)|$, $|\Delta y_i^k(j)|$, $|\Delta z_i^k(j)|$ – елементарні переміщення k -го агента в i -й точці на j -й ітерації по осям x , y та z відповідно.

3. Переміщення агентів. В простішому мурашиному алгоритмі в кожній ітерації ітераційного процесу k агентами здійснюється пошук рішення та оновлення феромонів на знайденому маршруті. Кожний k -й агент починає шлях з ВТМ, послідовно проходить вибрані методом ПТМ і завершує шлях в одній з КТМ. Переміщення агентів проводиться по критерію мінімуму цільової функції (4), яка, з урахуванням дев'ятизв'язності переміщення агентів (рис. 1):

$$|\Delta x_i^k(j)| + |\Delta y_i^k(j)| + |\Delta z_i^k(j)| = 1, \quad (7)$$

приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \phi_j(X) &= \sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^{N_k} (P_i^k(j)) = \\ &= \sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^{N_k} \left((F_i^k(j))^\alpha (L_i^k(j))^\beta / \sum_{m=1}^M (F_m^\alpha(j) \cdot L_m^\beta(j)) \right), \end{aligned} \quad (8)$$

а задача (2) може бути сформульовано у вигляді:

$$\phi_j(X) = \sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^{N_k} \left(\frac{(F_i^k(j))^\alpha (L_i^k(j))^\beta}{\sum_{m=1}^M (F_m^\alpha(j) \cdot L_m^\beta(j))} \right) \rightarrow \min;$$

$$W_i(X) \in \mathfrak{R}^n, i = 1, 2, \dots, N;$$

$$R_{safe}(X) \in \mathfrak{R}^n; \quad (9)$$

$$C_j(X) \in \mathfrak{R}^n, j = 1, 2, \dots, M;$$

$$Obst_k(X) \in \mathfrak{R}^n, k = 1, 2, \dots, Obs;$$

$$\forall X \wedge (X \notin Obst_i(X));$$

$$\forall X \wedge (X > R_{safe}(X));$$

$$M = Obs.$$

Привабливість ділянки маршруту L_i в (9) обернено пропорційна затратам на подолання ділянки C_i :

$$L_i = 1/C_i, \quad (10)$$

а затрати на подолання ділянки в мурашиному алгоритмі залежать тільки від його довжини, тобто:

$$C_i = D_i, \quad (11)$$

де D_i – довжина i -ї ділянки маршруту.

В більш складних випадках значення L_i може бути розраховане в залежності від наявності зон небезпеси (вираз (12)):

$$L_i = \begin{cases} 1 & \text{якщо } i\text{-й маршрут пролягає} \\ D_i & \text{за межами "зон небезпеси";} \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (12)$$

На початку ітераційного процесу кількість феромону на ділянках маршруту приймається однаковою і рівною деякому невеликому числу F_0 . Після кожної ітерації концентрація феромонів на вибраних агентами ділянках оновлюється за правилом (13):

$$F_i(t+1) = (1-\rho)F_i(t) + \sum_{k=1}^m \Delta F_i^k, \quad (13)$$

де $\rho \in [0,1]$ – швидкість випаровування феромону; ΔF_i^k – концентрація феромону на i -й ділянці маршруту, що створюється проходженням k -го агента.

У тому випадку, якщо у поточній ітерації по ділянці не пройшов жодний з агентів, правило (13) перетворюється на (вираз (14)):

$$F_i(t+1) = (1-\rho)F_i(t), \quad (14)$$

тобто оновлення феромону полягає в його випаровуванні із швидкістю ρ .

4. Перевірка виконання умови зупинки. Якщо умова виконана, то отримується траєкторія руху крилатої ракети (X). В іншому випадку – здійснюється перехід до другого пункту. Параметри P (5) методу визначаються як $P(\alpha, \beta, \rho, F_0)$.

Таким чином, удосконалено метод прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі мурашиного алгоритму, в якому, на відміну від відомих, розрахунок траєкторії польоту крилатої ракети передбачає розрахунок цільової функції, визначення сукупності ділянок руху агентів, концентрації феромону на маршрутах руху агентів, переміщення агентів по визначених ділянках руху.

Проведемо перевірку працездатності методу прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі мурашиного алгоритму на контрольному прикладі. Для наочності представлення результатів застосована прямокутна система координат, у якій ВТМ, КТМ і ПТМ знаходяться в одній горизонтальній площині.

Вихідні дані:

- кількість ВТМ $N_{ВТМ}=1$;
- кількість КТМ $N_{КТМ}=1$;
- кількість можливих ПТМ1 $N_{ПТМ1}=20$;
- кількість можливих ПТМ2 $N_{ПТМ2}=20$;
- “жадібність” методу $\beta=1$;

– вага феромонів $\alpha=2$;

– швидкість випаровування феромону $\rho=10^{-3}$;

– кількість ітерацій методу $N=400$;

– кількість агентів в ітерації $m=10$;

– початкова кількість феромону $F_0=10^{-2}$.

В результаті $N=400$ ітерацій маршрут руху агента наведений на рис. 2 жирною суцільною лінією. Переривчастою лінією показано оптимальний маршрут руху агентів.

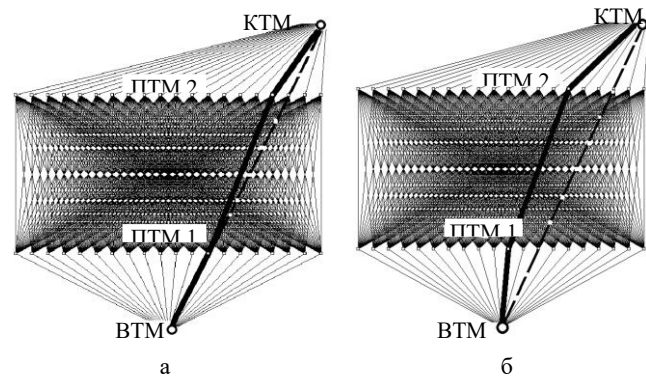


Рис. 2. Результати перевірки працездатності методу прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі мурашиного алгоритму:
а) маршрут руху агентів відрізняється від оптимального маршруту;
б) маршрут руху агентів істотно відрізняється від оптимального маршруту

З аналізу рис. 2, а видно, що отриманий маршрут руху агентів незначно відрізняється від оптимального маршруту. Проте, як показано на рис. 2, б, можливі і реалізації методу з відверто невдалими результатами, що вказує на необхідність проведення подальшого дослідження.

Висновки

Удосконалено метод прогнозування траєкторії польоту крилатих ракет на основі мурашиного алгоритму, в якому, на відміну від відомих, розрахунок траєкторії польоту крилатої ракети передбачає розрахунок цільової функції, визначення сукупності ділянок руху агентів, концентрації феромону на маршрутах руху агентів, переміщення агентів по визначених ділянках руху. Проведена перевірка працездатності удосконаленого методу прогнозування дій повітряного противника на основі мурашиного алгоритму.

Встановлено, що в усіх випадках метод прогнозування дій повітряного противника на основі мурашиного алгоритму забезпечує найменшу довжину маршруту від ВТМ до тих об'єктів ураження.

Напрямок подальших досліджень: побудова системи радіолокаційної розвідки за результатами моделювання варіантів дій повітряного противника.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Amble J. Intelligence and the Future Battlefield, with Lt. Gen. Scott Berrier / J. Amble // Modern War Institute. – October 25, 2019. URL: <https://mwi.usma.edu/mwi-podcast-intelligence-future-battlefield-lt-gen-scott-berrier/>.
2. Air & Space Operations Review : A Journal of Strategic Airpower & Spacepower. – 2022. – Vol. 1. – No. 4. URL: <https://www.airuniversity.af.edu/ASOR/>.

3. Синтез адаптивних структур системи зенітного ракетно-артилерійського прикриття об'єктів і військ та оцінка її ефективності (теорія, практика, тенденції розвитку) : монографія / Торопчин А. Я. та ін. Харків : ХУ ПС, 2006. 349 с.
4. Городнов В. П., Ермошин М. О., Шулежко В. В. Методика оцінки статистичних параметрів удару повітряного противника при відновленні системи зенітного ракетно-артилерійського прикриття. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків: ХУ ПС, 2013. № 1(10). С. 57–60.
5. Пуховий О. В. Удосконалена методика визначення варіанту бойового застосування угруповання радіотехнічних військ. Системи озброєння і військова техніка. 2012. № 3(31). С.66–70.
6. Моделювання бойових дій військ (сил) протиповітряної оборони та інформаційне забезпечення процесів управління ними (теорія, практика, історія розвитку) : монографія / Городнов В. П та ін. Харків : ХВУ, 2004. 410 с.
7. Ярош С. П., Рогуля О. В. Аналіз тактики бойового застосування крилатих ракет при нанесенні ударів по важливих державних об'єктах та угрупованнях військ. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2019. № 3(61). С. 35–44. <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.61.06>.
8. Жарик О. М., Тристан А. В. Військова операція Азербайджану в Нагірному Карабасі в контексті розвитку Повітряних Сил Збройних Сил України. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 2(43). С. 19–24. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.02>.
9. Ярошенко Я., Герасименко В., Блискун О., Базіло С., Ікаєв Д. Досвід застосування безпілотної авіації у вірмено-азербайджанському конфлікті восени 2020 року. Уроки для України. Восно-історичний вісник. 2021. № 2(40). С. 53–71. <https://doi.org/10.33099/2707-1383-2021-40-2-53-71>.
10. Олексенко О. О., Ярошенко Я. В. Розробка методу оптимального маршруту польоту безпілотної літального апарату на основі мурашиного алгоритму. Сучасний стан проведення наукових досліджень у ІТ-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері : кол. наук. монографія. Вінниця, 2021. Вид. 1. С. 147–158. <https://doi.org/10.36074/csriteenat.ed-1.10>.
11. Олексенко О. О., Герасименко В. В. Метод визначення варіантів польоту безпілотної літального апарату на основі макс-мінного мурашиного алгоритму. Сучасний стан проведення наукових досліджень у ІТ-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері : кол. наук. монографія. Вінниця, 2021. Вид. 2. С. 2–10. <https://doi.org/10.36074/csriteenat.ed-2.01>.
12. Khudov, H., Oleksenko, O., Kuchuk, N., Yaroshenko, Y., Ishchenko, O., Ikaiev, D., Kireienko V. Determining the unmanned aerial vehicle optimal flight route based on the ant colony optimization. Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry (TOJQI). 2021. Vol. 12, Issue 6, pp. 5173–5178.
13. Khudov, H., Oleksenko, O., Lukianchuk, V., Herasymenko, V., Yaroshenko, Y., Ishchenko, O., Ikaiev, D., Golovchenko O., Volobuiev, A., Drob, Y., Solomonenko, Y., Khizhnyak, I. The Determining the Flight Routes of Unmanned Aerial Vehicles Groups Based on Improved Ant Colony Algorithms. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2021. Vol. 11. Issue 09, pp. 23–32. https://doi.org/10.46338/ijetae0921_03.
14. Олексенко О. О., Худов Г. В., Гниря В. В., Неводничий А. О. Методика прогнозування дій повітряного противника на основі мурашиного алгоритму. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ : тези доп. Міжн. наук.-техн. конф.(м. Львів, 14-15 трав. 2020 р.). Львів, 2020. С. 250.
15. M. Dorigo, K. Socha. An Introduction to Ant Colony Optimization. Technical Report Series. Iridia : Universite Libre de Bruxelles, 2006. 19 p.
16. M. Dorigo, M. Birattari, T. Stützle, Ant Colony Optimization. Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006. № TR/IRIDIA/2006-023.14 p. <https://iridia.ulb.ac.be/IridiaTrSeries/rev/IridiaTr2006-023r001.pdf>.
17. M. Dorigo, T. Stützle. Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances. M. Gendreau and Y. Potvin, editors, Handbook of Metaheuristics, 2nd edition. in International Series in Operations Research & Management Science, Springer, Verlag, New York, 2010. Vol. 146. P. 227–263.

Received (Надійшла) 23.04.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.05.2023

An improved method for predicting the flight path of a cruise missile based on the ant colony algorithm

Hennadii Khudov, Igor Romanenko, Petro Mynko, Yuriy Solomonenko, Vitaliy Ivanyuk

Abstract. The subject matter of the article is the method for predicting the flight path of cruise missiles based on the ant colony algorithm. The goal is to obtain adequate results in predicting the trajectory of cruise missiles when planning the use of air defense forces and means and choosing their rational construction. Task: analysis of known methods for estimating the flight path of a cruise missile; modelling the flight path of cruise missiles as a search for a sequence of actions of a cruise missile that can move from one place to another, avoiding any obstacles on the flight path; improvement of the method for predicting the flight path of cruise missiles. The methods used are: methods of system analysis, probability theory, methods of swarm intelligence, mathematical statistics. The following results are obtained. The method of predicting the flight path of cruise missiles based on the ant colony algorithm has been improved, in which, unlike the known ones: the calculation of the flight path of a cruise missile provides for the calculation of the objective function; the determination of the set of agent movement areas; the pheromone concentration on the agent movement routes, and the movement of agents along certain movement areas. The operability of an improved method for predicting the actions of an air enemy based on the ant colony algorithm has been tested. Conclusions. It has been established that in all cases the method of predicting the actions of an air enemy based on the ant colony algorithm provides the shortest route length from the starting point of the route to the objects of destruction. The direction of further research is the construction of radar reconnaissance based on the results of modelling options for the actions of an air enemy.

Keywords: cruise missile, air enemy, flight path, target, ant algorithm, radar reconnaissance.