

УДК 355.45

Г.В. Худов, І.А. Таран

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО (МУРАШИНОГО) АЛГОРИТМУ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАМИСЛУ ПОВІТРЯНОГО ПРОТИВНИКА

*В роботі запропоновано використання мультиагентного (мурашиного) алгоритму для розпізнавання можливих маршрутів польоту засобів повітряного нападу до об'єктів удару та смуги прориву системи протиповітряної оборони. Досліджені оригінальний мурашиний алгоритм (AS) та його удосконалений варіант, мінімаксий мурашиний алгоритм. Наведені результати розрахунків. Показана можливість застосування алгоритмів в нестационарному середовищі.*

**Ключові слова:** мурашиний алгоритм, штучний інтелект, оптимізація, маршрут польоту, система протиповітряної оборони, засіб повітряного нападу, об'єкт удару.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розпізнавання замислу повітряного противника є важливим завданням органів управління угруповань військ, що вирішується в ході оцінки обстановки та визначення вихідних даних для прийняття рішення та планування протиповітряної оборони (ППО) [1, 2]. Правильно відповісти на питання, якими маршрутами полетить повітряний противник, в складі яких ешелонів та груп, де він буде створювати смугу прориву системи ППО – значить правильно оцінити обстановку та вірно обрати вихідні дані для прийняття рішення та вибору раціональної структури системи ППО та її підсистем.

Дії повітряного противника важко передбачити. Проте можливо стверджувати, що з множини можливих противник буде вибирати ті дії, які будуть забезпечувати високу ефективність повітряних ударів. Як показав **аналіз останніх досліджень і публікацій**, при розпізнаванні замислу повітряного противника дослідник або орган управління зустрічається з необхідністю вирішення декількох проблемних питань. По-перше, потрібно встановити критерій, за яким буде обиратись кращий замисел з множини можливих. Так, в найпростішому випадку, як найкращий маршрут обирається найкоротший, для чого аеродроми базування засобів повітряного нападу (ЗПН) з'єднуються з об'єктами удару (ОУ) дугами великого кола [3, 4]. В більш складному випадку обирається найкоротший маршрут з усіх, що огинають перешкоди, проте такий підхід не враховує складність маршруту. Дійсно, більш простий, хоча і довший маршрут може мати перевагу перед коротким, але складним. В [5] наведений метод використання нечітких множин для вирішення задачі кластеризації ЗПН і визначення напрямку дій ЗПН. В [6] на основі нечіткої класифікації здійснюється визначення напрямків удару ЗПН. В [7] запропонований метод зменшення невизначеності інформації про замисел дій повітряного противника в ході ве-

дення протиповітряної оборони, де за допомогою методів теорії нечітких множин із розвідувальних даних про повітряного противника отримується вектор динамічних пріоритетів об'єктів удару, який дозволяє з певним ступенем довіри визначити перелік об'єктів удару. Слід зауважити, що результати досліджень [6, 7] можуть бути використані для розпізнавання напрямків та об'єктів удару ЗПН безпосередньо в ході повітряного удару, що, із-за браку часу, ускладнює уточнення прийнятого рішення та проведення інших заходів з ППО.

Ще однією проблемою є дуже велика кількість можливих варіантів прокладання маршрутів ЗПН, положень смуг прориву системи ППО, особливо при декількох аеродромах базування ЗПН та багатьох об'єктах удару, що приводить до необхідності проведення надмірно великого обсягу обчислень навіть при використанні математичних методів дослідження операцій [8].

В останні роки набувають розвитку мультиагентні методи штучного інтелекту, до яких відносяться мурашиний алгоритм або метод мурашиних колоній (в англійській літературі – ant system (AS)), запропонований М. Доріго в 1992 році [9]. Спочатку алгоритм використовувався для пошуку найкоротшого шляху в графах, подальші дослідження, як західних [10, 11], так і вітчизняних вчених [12, 13], призвели до появи багаточисельних модифікацій алгоритму та продемонстрували його універсальність для вирішення широкого кола оптимізаційних задач. Однією з важливих переваг алгоритму являється його висока ефективність при оптимізації розподілених нестационарних систем [14]. При змінах досліджуваної системи алгоритм швидко адаптується до цих змін і знаходить нове оптимальне рішення. Названі вище, а також інші переваги алгоритму (такі, як, наприклад, швидкодія) роблять актуальним проведення дослідження стосовно можливості застосування мурашиного алгоритму та його різновидів для розпізнавання елементів замислу повітряно-

го противника, а саме – маршрутів, профілів польоту груп ЗПН з аеродромів базування до ОУ, а також положення смуги прориву системи ППО. Викладення результатів цих досліджень є **метою статті**.

## Виклад основного матеріалу

### А. Принципи поведінки мурах

Мурашині алгоритми основні на імітації природних механізмів самоорганізації колонії мурах. Колонія мурах розглядається як мультиагентна система, в якій кожний агент (мураха) діє по дуже простим правилам. На протидію примітивній поведінці мурах, поведінка всієї системи являється надзвичайно розумною, що забезпечує мурахам як виду існування на Землі вже понад 100 мільйонів років. Самоорганізація системи забезпечується низькорівневою взаємодією агентів, при цьому агенти обмінюються тільки локальною інформацією, а будь-яке централізоване управління системою, направлене на досягнення глобальних цілей, виключається. Для передачі локальної інформації агенти використовують так звані *стігмержі* – рознесений в часі тип взаємодії, коли один агент змінює деяку частину навколишнього середовища, а інші агенти спостерігають ці зміни через деякий час, коли знаходяться у відповідній точці середовища, та використовують відповідну інформацію у своїй діяльності. Мурахи застосовують стігмержі шляхом виділення *феромону* – спеціального секрету, який відкладається мурахою на своєму маршруті в процесі пошуку їжі та під час повернення з їжею до мурашника. Наступний мураха, який буде знаходитись поблизу маршруту руху першого, сприймає феромон та з високою ймовірністю продовжить рух до їжі по шляху першого мурахи, в свою чергу відкладаючи феромон (підвищуючи його концентрацію на маршруті). Чим вище концентрація феромону на маршруті, тим вища привабливість цього маршруту для наступних мурах, і тим більше мурах вибере саме цей маршрут. Розподіл феромону в навколишньому середовищі являється немовби динамічною пам'яттю системи. Кожний мураха в певний момент часу сприймає та змінює одну градку цієї пам'яті – рівень феромону в околиці точки, в якій мураха знаходиться.

Концентрація феромону, відкладеного на маршруті, зворотно пропорційна його довжині. Чим коротше буде маршрут, тим більшою буде концентрація феромону на ньому, в результаті більш короткий маршрут збережеться в глобальній пам'яті мурашника як більш вдалиний і з вищою ймовірністю буде обраний наступними мурахами.

З часом феромон випаровується, що забезпечує зворотній зв'язок. Оскільки, як зазначено вище, концентрація феромону буде поступово збільшуватись на вдалих маршрутах, а швидкість випаровування феромону є постійною, через деякий час невдалі

маршрути зникнуть, і все більше мурах будуть здійснювати рух лише по вдалих маршрутах. Використання зворотного зв'язку (випаровування) попереджує завчасну сходимість рішень – вибір мурахами одного і того ж субоптимального маршруту.

### Б. Основи застосування оригінального мурашиного алгоритму (AS) для прокладення маршруту польоту ЗПН

В найпростішому випадку маршрут польоту ЗПН можна представити як сукупність наступних ділянок: ділянки зльоту з вихідної точки маршруту (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 (РВЗ) або кінцевої точки маршруту (КТМ). Горизонтальні ділянки проходять через поворотні точки маршруту (ПТМ), в яких відбувається зміна курсу, а в загальному випадку, і висоти польоту (рис. 1). У подальшому вважаємо, що положення ВТМ, КТМ та поворотних точок маршруту повністю визначає маршрут польоту ЗПН.

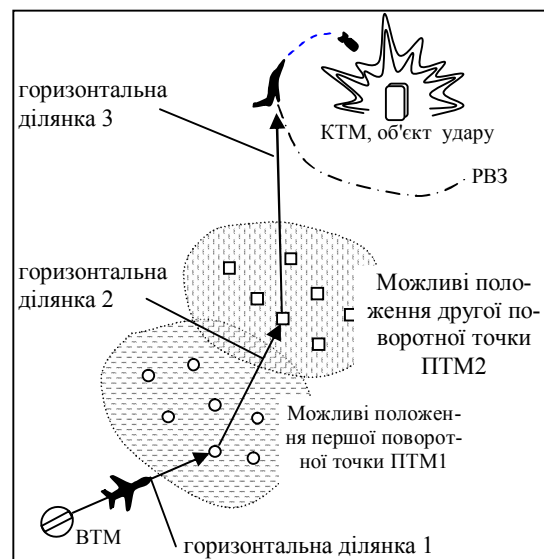


Рис. 1. Приклад представлення маршруту польоту

Політ по кожній з ділянок маршруту, а також здійснення маневру в вибраних ПТМ, має певні небезпеки для ЗПН та вимагає певних витрат ресурсів, що призводить до наявності переваги одного маршруту польоту перед іншим. Оскільки варіантів просторового розташування поворотних точок маршруту може бути дуже багато, кількість можливих маршрутів польоту ЗПН буде надзвичайно великою, що ускладнює вибір маршруту ЗПН методом перебору. В [8] наведені підходи щодо застосування для пошуку раціонального маршруту методу динамічного програмування, проте і цей метод не забезпечує достатньої швидкодії та не працює у нестационарних системах. Продемонструємо, як прокласти маршрут з використанням мурашиного алгоритму, для чого

скористаємось так званим оригінальним або класичним мурашиним алгоритмом (Ant System – AS).

В AS в кожній ітерації ітераційного процесу  $m$  агентами здійснюється пошук рішення та оновлення феромонів на знайденому маршруті. Кожний  $k$ -й агент починає шлях з ВТМ, послідовно проходить вибрані алгоритмом поворотні точки маршруту і звершує шлях в КТМ. Вибір ПТМ з  $J$  можливих здійснюється на основі ймовірнісного правила, що визначає ймовірність переходу  $k$ -го агента в  $i$ -у ПТМ з врахуванням доступності  $i$ -ї ділянки маршруту  $L_i$  та концентрації феромонів на цій ділянці  $F_i$  в момент часу  $t$  наступним чином:

$$P_i^k(t) = \frac{F_i(t)^\alpha \cdot L_i^\beta}{\sum_{j=1}^J F_j(t)^\alpha \cdot L_j^\beta}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – параметри, що задають вагу феромона і доступності ділянки, відповідно. При  $\alpha=0$  агенти на кожному кроці переходять в найближчу ПТМ і AS перетворюється в "жадібний" алгоритм класичної теорії оптимізації. При  $\beta=0$  враховується тільки вплив феромонів, що швидко приведе рішення до субоптимального. За правилом (1) знаходяться ймовірності вибору тієї чи іншої ПТМ. Сам вибір здійснюється за принципом "колеса рулетки". Це може бути реалізовано, наприклад, розподілом деякого відрізка довжиною  $S$  на  $J$  частин довжиною, пропорційною  $P_i$ , генерування рівномірно розподіленого в інтервалі  $[0, S]$  випадкового числа та вибору ПТМ відповідно до того, в яку за порядковим номером частину відрізка  $S$  попадає випадкове число.

Доступність ділянки маршруту  $L_i$  в найпростішому випадку може бути розрахована як

$$L_i = \frac{1}{D_i}, \quad (2)$$

де  $D_i$  – довжина  $i$ -ї ділянки маршруту. В більш складних випадках значення  $L_i$  може бути розраховане в залежності від наявності зон виявлення та поразення засобів ППО та інших небезпек на ділянці польоту.

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:

$$F_i(t+1) := (1-\rho)F_i(t) + \sum_{k=1}^m \Delta F_i^k, \quad (3)$$

де  $\rho \in [0, 1]$  – швидкість випаровування феромону;  $\Delta F_i^k$  – 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 (3) перетворюється на:

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

тобто оновлення феромону полягає в його випаровуванні із швидкістю  $\rho$ .

### В. Результати застосування AS для прокладення маршруту польоту ЗПН

Перевірка працездатності алгоритму AS була здійснена з використанням контрольного прикладу. Для наочності представлення результатів в усіх прикладах застосована прямокутна система координат, у якій ВТМ, КТМ і ПТМ знаходяться в одній горизонтальній площині. Доступність ділянок маршруту розраховувалась за (2). Очевидно, що для умов контрольного прикладу оптимальним маршрутом буде пряма від ВТМ до КТМ. Результати розрахунків наведені на рис. 2.

Вихідні дані :

кількість ВТМ  $N_{ВТМ}=1$ ;

кількість КТМ  $N_{КТМ}=1$ ;

кількість горизонтальних ділянок маршруту – 3;

кількість можливих перших ПТМ (ПТМ1)

$N_{ПТМ1}=20$ ;

кількість можливих других ПТМ (ПТМ2)

$N_{ПТМ2}=20$  (положення ВТМ, КТМ, ПТМ1 та ПТМ2 показані на рис. 2);

"жадібність" алгоритму  $\beta=1$ ;

вага феромонів  $\alpha=2$ ;

швидкість випаровування феромону  $\rho=0,001$ ;

кількість ітерацій алгоритму  $N=400$ ;

кількість агентів в ітерації  $m=10$ ;

початкова кількість феромону  $F_0=0,01$ .

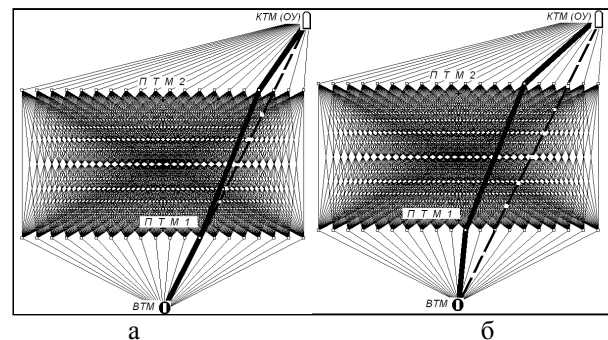


Рис. 2. Результати роботи AS для вихідних даних контрольного прикладу

В результаті  $N$  ітерацій алгоритму отримані маршрути польоту ЗПН, показані на рис. 2 жирною суцільною лінією. Отримані в більшості реалізацій результати незначно відрізняються від оптимального маршруту, показаного на рис. 2 переривчастою лінією. Проте, як показано в правій частині рис. 2, можливі і реалізації алгоритму з відверто невдалими результатами, що вказує на необхідність проведення подальших досліджень щодо застосування для вирішення поставленого у статті завдання удосконаленого варіанту AS – мі-

німаксного мурашиного алгоритму (Min-max ant system - MMAS).

#### Г. Основи застосування мінімаксного мурашиного алгоритму (MMAS) для прокладення маршруту польоту ЗПН

Мінімаксний мурашиний алгоритм (MMAS) [9] являється розвитком оригінального мурашиного алгоритму AS. Його характерними особливостями є те, що тільки найкращі агенти підвищують рівень феромону на своїх маршрутах, а також те, що рівень феромону на маршрутах обмежений. Оновлення рівня феромону на маршрутах здійснюється за правилом:

$$F_i(t+1) = [(1-\rho)F_i(t) + \Delta F_i^{\text{best}}]_{F_{\min}^{\text{max}}},$$

де  $F_{\max}$  та  $F_{\min}$  – верхня та нижня межі рівня феромону;  $[x]_b^a$  – оператор, який визначається як:

$$[x]_b^a = \begin{cases} a, & \text{якщо } x > a \\ b, & \text{якщо } x < b \\ x & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

а  $\Delta F_i^{\text{best}}$  визначається як:

$$\Delta F_i^{\text{best}} = \begin{cases} 1/L_{\text{best}}, & \text{якщо } i - \text{кращий маршрут в ітерації} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

а  $L_{\text{best}}$  – довжина маршруту кращого агента. Це може бути або найкращий маршрут, знайдений в поточній ітерації – *iteration best*,  $L_{\text{ib}}$ , або найкраще рішення, знайдене з початку роботи алгоритму – *best-so-far*,  $L_{\text{bs}}$ .

#### Д. Результати застосування MMAS для прокладення маршруту польоту ЗПН

Перевірка працездатності алгоритму MMAS була здійснена з використанням даних контрольного прикладу. На відміну від оригінального алгоритму (AS) MMAS знаходив оптимальне рішення в усіх реалізаціях. На рис. 3 послідовно показана робота алгоритму після 40, 80, 200 та 400 ітерацій. Після 40 ітерацій рівень феромону на всіх маршрутах ще незначно відрізняється від початкового рівня  $F_0$ , проте агенти вже позначили феромонами два маршрути як кращі (більш жирні лінії). Після 80 ітерацій рівень феромону на всіх маршрутах, крім кращих, значно зменшується внаслідок випаровування (відповідні лінії стали тоншими), чітко виділяються три кращі маршрути, між якими в подальшому "іде суперечка". Після 200 ітерацій вже чітко виділяється кращий маршрут, хоча декілька маршрутів ще намагаються "вести суперечку", після 400 ітерацій кращий маршрут (який і є оптимальним), очевидно, домінує.

На рис. 4 показані результати роботи MMAS для різних положень ВТМ. В усіх випадках MMAS знаходив оптимальне рішення, що перевірялось методом перебору.

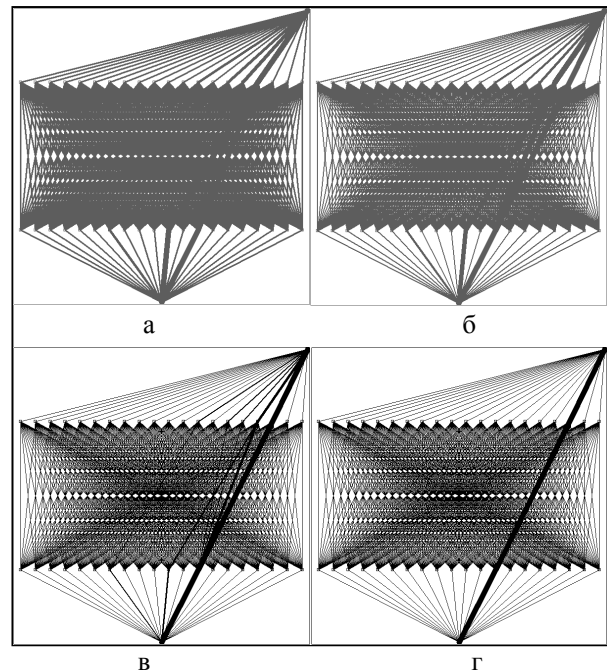


Рис. 3. Результати роботи MMAS для вихідних даних контрольного прикладу:

(а – після 40; б – після 80; в – після 200; г – після 400 ітерацій)

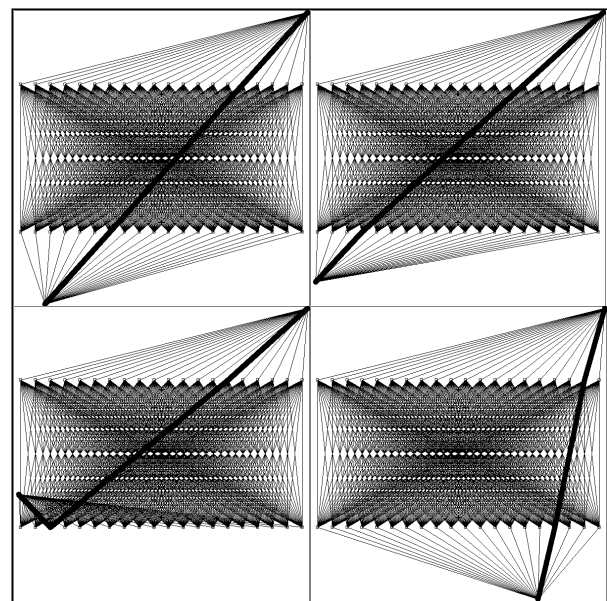


Рис. 4. Результати роботи MMAS для різних положень ВТМ

В подальшому перевірялась працездатність алгоритму MMAS при використанні критерію "найкоротший маршрут з тих, що огинають перешкоди". В середовище прокладання маршруту додані перешкоди ("заборонені зони"), а доступність ділянки маршруту  $L_i$  розраховувалась як:

$$L_i = \begin{cases} 1/D_i, & \text{якщо } i\text{-й маршрут пролягає} \\ & \text{за межами "заборонених зон"} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (4)$$

Також збільшені до 60 потужності множин ПТМ1 та ПТМ2.

Результати роботи ММАС при наявності "заборонених зон" показані на рис. 5. В усіх випадках алгоритм знаходив найкоротший маршрут з тих, що не проходять через "заборонені зони". Слід зауважити, що на рис. 5 та на наступних не показані маршрути з рівнем феромонів нижче 5% від максимального.

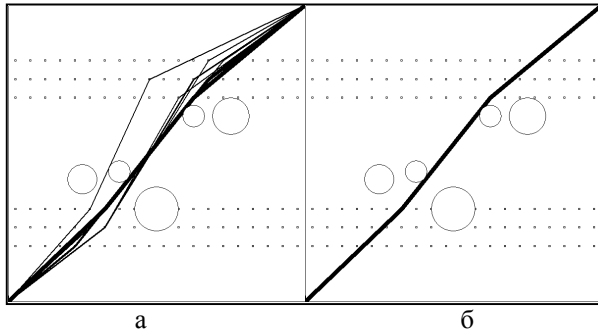


Рис. 5. Робота ММАС при наявності "заборонених зон": а – після 100 ітерацій; б – після 300 ітерацій

#### Е. Результати застосування ММАС для прокладення маршрутів польоту декількох груп ЗПН та визначення смуги прориву системи ППО

Позитивні результати, отримані в попередньому пункті, спонукали нас провести дослідження щодо застосування ММАС для визначення смуги прориву системи ППО декількома групами ЗПН, що здійснюють політ з різних аеродромів базування (ВТМ) до різних ОУ. При цьому вважаємо, що:

система ППО долається всіма групами ЗПН по другій ділянці маршруту (відстань від ПТМ1 до ПТМ2); це означає, що поворотні точки маршруту ПТМ1 та ПТМ2 для всіх груп ЗПН однакові;

одна група ЗПН закріплюється за одним ОУ;

розподіл груп ЗПН за ОУ невідомий; може існувати обмеження на кількість груп ЗПН, що базуються на одному аеродромі; при відсутності такого обмеження, очевидно, оптимальним буде зліт всіх груп ЗПН з найближчого до входу в смугу прориву системи ППО аеродрому базування;

критерієм оптимальності є досягнення мінімуму сумарної дальності від аеродромів базування груп ЗПН до відповідних ОУ при умові огинання ЗПН "заборонених зон", що зустрічаються на маршрутах. При цьому доступність ділянок маршруту розраховувалась за (4).

Для розрахунку використовувались вихідні дані контрольного прикладу. При цьому кількість ПТМ1 та ПТМ2 збільшена до 60, кількість КТМ (ОУ) дорівнює 5, кількість ВТМ (аеродромів базування ЗПН) складає 3. "Заборонені зони" позначені на рис.6 колами. Обмежень на кількість груп ЗПН, що базуються на одному аеродромі, немає. Розташування ВТМ, КТМ, ПТМ1, ПТМ2, "заборонених зон" показане на рис. 6.

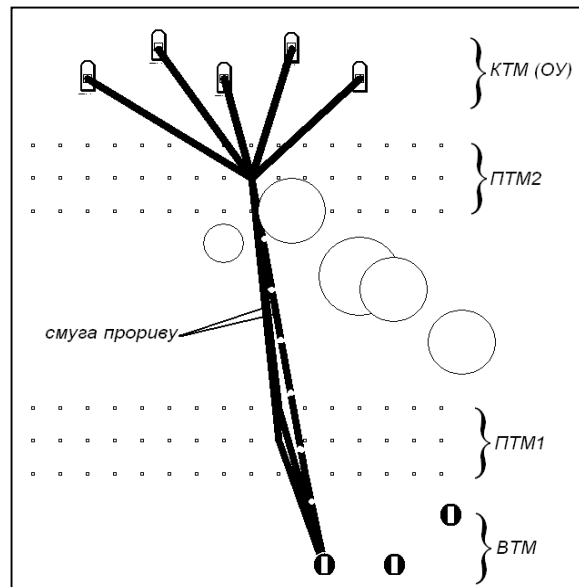


Рис. 6. Результати застосування ММАС для визначення смуги прориву системи ППО

На рис. 6 наведені результати розрахунку маршрутів польоту груп ЗПН до ОУ та смуги прориву системи ППО для трьох реалізацій алгоритму ММАС (для наочності отримані в трьох реалізаціях маршрути накладені на одному рисунку). Видно, що у всіх трьох реалізаціях кінцеві ділянки маршруту (ділянки виходу до ОУ) співпадають. Перша і друга ділянки маршруту в двох реалізаціях несуттєво відрізняються від третьої, в ході якої знайдено оптимальну за обраним критерієм сукупність маршрутів (показані пунктиром). Зауважимо також, що у всіх реалізаціях для всіх маршрутів алгоритм, природно, обрав як ВТМ найближчий аеродром базування ЗПН, оскільки обмеження на кількість груп ЗПН, що базуються на кожному аеродромі, відсутні. На рис. 7 показана робота алгоритму ММАС при збільшеній до 15 кількості "заборонених зон". Алгоритм знову швидко знайшов оптимальне рішення.

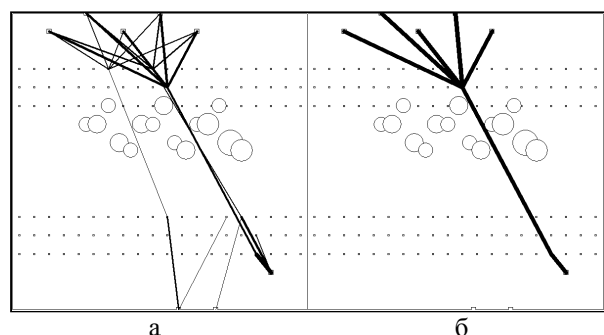


Рис. 7. Результати застосування ММАС для визначення смуги прориву системи ППО, кількість "заборонених зон" – 15: а – після 30 ітерацій; б – після 200 ітерацій

В наступному експерименті досліджується робота алгоритму ММАС при змінах в місцеположенні "заборонених зон" (рис. 8). Працездатність при не-

стаціонарному середовищі є однією з переваг мурашиних алгоритмів [9], що сприяє використанню цих алгоритмів при дослідженні процесів, що протікають у ході ведення бойових дій.

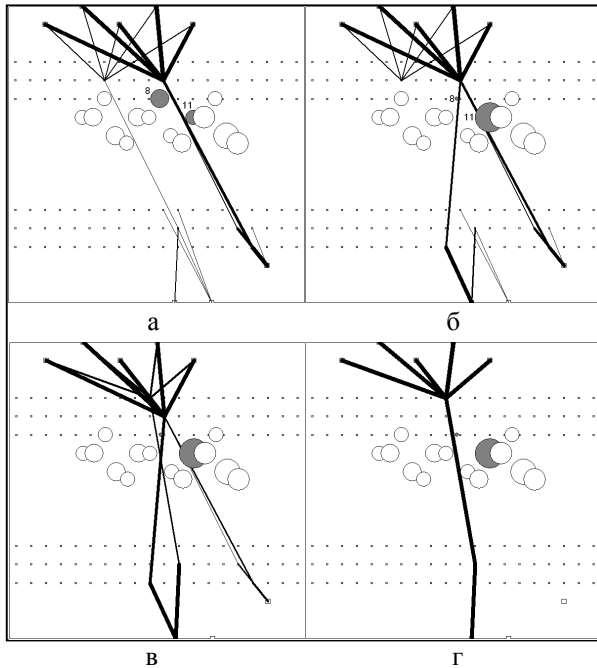


Рис. 8. Результати застосування ММАС в нестационарному середовищі:  
а – після 40 ітерацій; б – після 80 ітерацій;  
в – після 140 ітерацій; г – після 300 ітерацій)

На рис. 8 продемонстрований процес пошуку рішення, в якому після 60-ї ітерації алгоритму змінені дві з "заборонених зон" (на рисунку відповідні кола зафарбовані). Алгоритм почав будувати нове рішення: після 80 ітерацій це рішення ще не оптимальне, оскільки на результат впливає високий рівень феромонів на третій ділянках маршрутів (ділянках виходу на об'єкт удару), отриманий на перших 60 ітераціях. Проте вже після 140 ітерацій з'являється оптимальне рішення, яке починає домінувати після 300 ітерацій алгоритму. На інших, неоптимальних маршрутах рівень феромону поступово зменшується за рахунок випаровування.

## Висновки

Таким чином, в даній роботі розглянута можливість застосування оригінального мурашиного алгоритму AS для визначення маршрутів польоту засобів повітряного нападу та смуги прориву системи ППО з метою розпізнавання замислу повітряного противника для забезпечення вироблення рішення та побудови раціональної структури системи ППО та її підсистем. В даному алгоритмі рішення будується в ітераційному процесі багатьма агентами (мурахами), які взаємодіють між собою через стімержі – шляхом внесення змін в навколишнє середовище, а саме – відкладенням феромонів на маршру-

тах, причому вищий рівень феромону відкладається на кращих маршрутах. Результати досліджень в цілому позитивні і вказують на можливість вирішення поставленого завдання з використанням оригінального мурашиного алгоритму.

Приведені результати роботи алгоритму показали, що в деяких випадках алгоритм знаходить субоптимальне рішення, яке відрізняється від оптимального. В роботі наведені результати досліджень при застосуванні удосконаленого варіанту AS – мінімаксного мурашиного алгоритму (Max-min ant system – MMAS).

Характерними особливостями цього алгоритму є те, що тільки найкращі агенти підвищують рівень феромону на своїх маршрутах, а також те, що рівень феромону на маршрутах обмежений. Цей алгоритм має кращу сходимість і продемонстрував кращі результати. В роботі наведені результати розрахунків для контрольного прикладу при різних положеннях вихідної точки маршруту, також продемонстрована робота алгоритму в динаміці – після визначеної кількості ітерацій.

Прокладання маршрутів польоту, а також вибір смуги прориву системи ППО буде здійснюватись противником з урахуванням наявності на маршруті перешкод, "заборонених зон" (зон вогню зенітних ракетних комплексів, зон подавлення засобів радіоелектронної боротьби, областей зі складними метеорологічними умовами тощо). В роботі продемонстрована робота алгоритму ММАС при наявності на можливих маршрутах польоту таких перешкод. В залежності від обраного способу визначення доступності ділянки маршруту польоту маршрут або має огинати "заборонені зони", або ж може проходити через них, але при цьому привабливість такого маршруту зменшується.

В роботі також наведені результати досліджень щодо застосування ММАС для одночасного визначення маршрутів польоту декількох груп ЗПН від різних аеродромів до різних об'єктів удару. В межах області простору, в якій розташовані зони вогню (розвідки, подавлення) засобів системи ППО, маршрути різних груп ЗПН співпадали. Відповідні, спільні для всіх маршрутів ділянки являються оптимальними за обраним критерієм маршрутами подолання системи ППО, що дозволяє, з урахуванням існуючих нормативів, визначити положення смуги прориву системи ППО. Також проведені дослідження щодо працездатності алгоритму в умовах нестационарного середовища. Для цього після декількох кроків ітераційного процесу, коли агенти поступово підвищували рівень феромону на декількох субоптимальних маршрутах, змінювались розміри і місцеположення "заборонених зон". Алгоритм ММАС швидко адаптувався до змін та будував нове рішення, оптимальне в нових умовах.

Авторами ведуться дослідження щодо застосування ще однієї модифікації AS-методу мурашиних колоній (ant colony optimization – ACO). Подальші дослідження також можуть бути направлені на реалізацію тримірної пошуку маршрутів польоту ЗПН в географічних координатах з урахуванням розмірів поворотних точок маршруту, у яких ЗПН здійснюють маневр, та реальних розмірів і конфігурації заборонених зон, а також рельєфу місцевості. Практична реалізація закладених в статті положень також буде вимагати обґрунтування меж областей можливих положень поворотних точок маршруту та кроку їх табуляції. Авторами планується реалізація модифікації мурашиного алгоритму з безперервним середовищем, коли положення і кількість поворотних точок маршруту заздалегідь не визначені, а агенти переміщуються в кожній ітерації у випадковому напрямку та випадковим чином вибирають момент повороту. При цьому феромони мають відкладатись не тільки вздовж маршруту, а і в деякій його околиці. Відповідні дослідження ведуться авторами і будуть опубліковані в подальших роботах.

### Список літератури

1. Полторак С.Т. Головне завдання – підвищення обороноздатності держави / С.Т. Полторак // *Наука і оборона*. – К.: МО України, 2015. – № 2. – С. 3-8.
2. Телелим В.М. Планування сил для виконання бойових завдань у «гібридній війні» / В.М. Телелим, Д.П. Музиченко, Ю.В. Пунда // *Наука і оборона*. – К.: МО України, 2014. – № 3. – С. 30-35.
3. Моделирование бойових дій військ (сил) протиповітряної оборони та інформаційне забезпечення процесів управління ними (теорія, практика, історія розвитку): моногр. / [В.П. Городнов, Г.А. Дробаха, М.О. Єрмошин, Є.Б. Смірнов, В.І. Ткаченко] – Х.: ХВУ, 2004. – 410 с.
4. Синтез адаптивних структур системи зенітного ракетно-артилерійського прикриття об'єктів і військ та оцінка її ефективності (теорія, практика, тенденції розвитку): моногр. / [А.Я. Торопчин, І.О. Кириченко, М.О. Єрмошин, Г.А. Дробаха, М.П. Долина] – Х.: ХУПС, 2006.
5. Герасимов Б.М. Нечеткие множества в задачах проектирования, управления и обработки информации / Б.М. Герасимов, Г.Г. Грабовский, Н.А. Рюминин. – К.: Техніка, 2002. – 140 с.
6. Олизаренко С.А. Метод формализации задачи распознавания направлений ударов СВН противника на основе нечеткой классификации / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // *Системы обработки информации*. – Х.: ХУПС, 2012. – Вып. 2(100). – С. 70-80.
7. Тристан А.В. Метод зниження рівня невизначеності при плануванні та веденні бойових дій угрупованням Повітряних Сил / А.В. Тристан // *Системы обработки информации* – Х.: НАНУ, ПАИМ, ХУПС. – 2008. – Вып. 5(72). – С. 13-18.
8. Таран І.А. Методика визначення оптимальної траєкторії польоту засобу повітряного нападу до об'єкту удару/ І.А. Таран // *Системы озброєння і військова техніка*. – Х.: ХУПС, 2015. – Вып. 2(42). – С. 44-48.
9. M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B*, vol. 26, no. 1, pp. 29 – 41, 1996.
10. T. Stutzle and H. H. Hoos, "MAX-MIN Ant System," *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, no. 8, pp. 889-914, 2000.
11. M. Dorigo, K. Socha. *An Introduction to Ant Colony Optimization*. Technical Report TR/IRIDIA/2006-010, IRIDIA, Universite Libre de Bruxelles, 2006.
12. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы / С.Д.Штовба // *Exponenta Pro. Математика в приложеннях*. – 2003. – №4. – С. 70-75.
13. Суботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. *Нейротронні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечітко логічних і нейронних моделей: моногр.* / під заг. ред. С.О. Суботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.
14. Caro G.D., Dorigo M. *Anet: a Mobile Agents Approach to Adaptive Routing*. Technical Report IRIDA 97-12. IRIDA-Universite Libre de Bruxelles. – Brussels, Belgium, 1997. – 27 p.

Надійшла до редколегії 17.08.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К.С. Васюта, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО (МУРАВЬИНОГО) АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАМЫСЛА ВОЗДУШНОГО ПРОТИВНИКА

Г.В. Худов, И.А. Таран

В работе предложено использование мультиагентного (муравьиного) алгоритма для распознавания возможных маршрутов полета средств воздушного нападения к объектам удара и полосы преодоления системы противоздушной обороны. Исследованы оригинальный муравьиный алгоритм (AS) и его усовершенствованный вариант, минимаксный муравьиный алгоритм. Приведены результаты расчетов. Продемонстрирована возможность применения алгоритмов в нестационарной среде.

**Ключевые слова:** муравьиный алгоритм, искусственный интеллект, оптимизация, маршрут полета, система противоздушной обороны, средство воздушного нападения, объект удара.

### USING ANT ALGORITHM TO DETERMINE THE ELEMENTS OF AIR ENEMY PLAN

G.V. Khudov, I.A. Taran

The paper proposed the use of multi-agent (ant) algorithm to detect the possible flight paths of air attacks to strike targets and stripes overcome air defense systems. Abstract original ant algorithm (AS) and an improved version, the minimax ant algorithm. There are the results of the calculations. The possibility of algorithms using in non-stationary environments is demonstrated.

**Keywords:** ant system, artificial intelligence, optimization, flight path, air defense system, means of air attack, object of air attack, penetration corridor.