УДК 519.852 DOI: 10.30748/soivt.2018.53.05

С.М. Піскунов[1], Д.А. Купрієнко[2], А.Д. Мар'яш[1], А.Ф. Шевченко[1]

[1] *Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*
[2] *Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Богдана Хмельницького, Хмельницький*

МЕТОД І АЛГОРИТМ ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНУ ЦІЛЕРОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ

Запропоновано метод і алгоритм знаходження оптимального плану розподілу вогневих засобів по цілям, який дозволяє максимізувати значення показника ефективності при виконанні системи обмежень. Метод та алгоритм ґрунтуються на модифікації угорського методу оптимізації в матричній постановці завдання призначення за умови поліноміального представлення функції часу. Запропонований метод та алгоритм дозволяє зменшити кількість витрат машинної пам'яті та кількості операцій при реалізації обчислень оскільки не потребує доповнення матриці ефективності до квадратної в порівнянні із угорським методом. Наведено приклади обчислень із застосуванням запропонованого алгоритму. Оптимальність отриманого методу та алгоритму підтверджено шляхом використанням методу еквівалентних перетворень. Достовірність запропонованого методу та алгоритму підтверджено збігом з результатами які отримано угорським методом. Отримані дані можуть бути застосовані в алгоритмах цілерозподілу між зенітними засобами ближньої дії та малої дальності протиповітряної оборони Сухопутних військ. Представлені результати можуть бути використані також при розробленні алгоритмів цілерозподілу, що здійснюється в режимі реального часу, для вогневих засобів перехоплення балістичних цілей (ракет, артилерійських снарядів та мін) та засобів ураження тактичних безпілотних літальних апаратів зенітним вогнем в повітрі.

Ключові слова: *протиповітряна оборона Сухопутних військ, оптимальний цілерозподіл, угорський метод оптимізації.*

Вступ

Тимчасова окупація Російською Федерацією частини території України − Автономної Республіки Крим і міста Севастополя, розпалювання Росією збройного конфлікту в східних регіонах України та руйнування системи світової та регіональної безпеки і принципів міжнародного права зумовлюють можливість нанесення РФ масованих авіаційних ударів по території України [1]. Для ефективного відбиття масованих авіаційних ударів засобами протиповітряної оборони, потрібно оптимально вирішувати задачу цілерозподілу між зенітними засобами. Цілерозподіл (ЦР) може проводитися для засобів оборони та нападу [2]. Сформулюємо задачу знаходження оптимального плану ЦР зенітних комплексів (ЗК), під якими будемо розуміти зенітні ракетні (ЗРК) або зенітні артилерійські (ЗАК) комплекси протиповітряної оборони (ППО), які мають в своєму складі цільові канали (ЦК) [3, 9]. Перелік задач, що вирішуються при ЦР з періодом $T_{ЦР}$, і їх короткий опис приведено у [4]. Одною з основних задач ЦР є знаходження плану розподілу ЦК по цілях, яку можна сформулювати наступним чином. Необхідно знайти такий план ЦР, який доставляє максимум показнику ефективності (ПЕ), і задовольняє системі прийнятих обмежень [5–6].

Для завдань протиповітряної оборони в якості ПЕ часто використовують математичне сподівання (МС) числа уражених цілей або МС упередженої шкоди об'єктам (військам), що обороняються [9]. Величина ПЕ може бути розрахована як [3]

$$M\left(\left\|x_{ij}\right\|\right)=\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}Q_{ij}x_{ij}\,, \qquad (1)$$

де j, n – номер і кількість цілей, які беруть участь у ЦР відповідно; i, m – номер і кількість ЗК, відібраних для ЦР відповідно; $Q_{ij}=B_jP_{ij}, i=1,2,..,m;$ $j=1,2,...,n;$ B_j – важливість j-ої цілі; P_{ij} – вірогідність ураження j-ої цілі при одній дії і-м ЦК; x_{ij} – параметри ЦР, які задовольняють обмеженню:

$$\sum_{j=1}^{n}x_{ij}\le 1\,;\; i=1,2,...,m\,; \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{m}x_{ij}\le 1\,;\; j=1,2,...,n\,; \qquad (3)$$

x_{ij} – позитивні.

Система обмежень (3) передбачає, що в циклі ЦР, що розглядається, на кожну ціль призначається не більш одного ЦК, а (2) – ЗК вважаються одноканальними. У випадку коли ЗК є багатоканальним кожному ЦК привласнюється свій номер.

Для знаходження оптимального плану в задачах призначення, до яких відноситься і задача ЦР може бути використаний угорський метод [4–5]. Угорським методом отримують план призначення, який мінімізує ПЕ за умов квадратної матриці ефективності $\|Q_{ij}\|$, m=n. Тому задачу максимізації заздaлегідь трансформують в задачу мінімізації. Якщо $m \neq n$, то матрицю ефективності (МЕ) доповнюють до квадратної. На виконання вимог до виду цільової функції та МЕ при $n >> m$ необхідні додаткові витрати часу і пам'яті електронно-обчислювальної машини (ЕОМ), що є значним недоліком угорського методу. Проведення оптимального цілерозподілу в режимі реального часу потребують вогневі засоби перехоплення в повітрі балістичних цілей (ракет, артилерійських снарядів та мін) зенітним вогнем C-RAM (Counter – Rockets, Artillery and Mortar) [10] та засоби боротьби із тактичними безпілотними літальними апаратами C-LSS (Counter – Low, Small and Slow Unmanned Aerial System) [12].

Мета статті полягає в розробленні методу і алгоритму вироблення плану оптимального цілерозподілу зі зменшеними витратами часу і пам'яті для реалізації.

Основна частина

Розглянемо метод і алгоритм знаходження оптимального плану ЦР (призначення), в значній мірі, звільненого від вищезгаданих недоліків. Ідея нового підходу до знаходження плану призначення, що мінімізує ПЕ при m=n описана в [6]. Надалі скористуємося термінологією та окремими результатами [6].

Метод знаходження оптимального плану ЦР. Заздалегідь введемо деякі поняття. Нехай ми маємо певний вектор виду: $\vec{\Delta} = (\Delta_1, \Delta_2, ..., \Delta_j, ..., \Delta_n$, де $j=1,2,...,n$ – номер стовпця матриці $\|Q_{ij}\|$.

Елемент матриці Q_{ij_0} назвемо Δ - максимальним в i–ій строці за умови:

$$Q_{ij_0} + \Delta j_0 \geq Q_{ij} + \Delta_j, \; j = 1, 2, ..., n \,. \tag{4}$$

Надалі Δ-максимальний елемент рядку позначимо $Q_{ij(i)}$, $i=1,2,...,n$, $j(i)$ - номер стовпця, який відповідає Δ-максимальному елементу i-ого рядка.

Елементи матриці Q_{ij}, які задовольняють умові (4), та які виділені знаками (×) та (|), будемо називати основами та альтернативними основами (АО) відповідно.

Сутність методу визначає наступна теорема: якщо для вектору $\vec{\Delta}$ є повна система незалежних максимальних елементів при $m = n$ $Q_{1j(1)}, Q_{2j(2)}, ..., Q_{nj(n)}$, то набір параметрів ЦР $x^*_{1j(1)} = 1, x^*_{2j(2)} = 1, ..., x^*_{nj(n)} = 1$, буде оптимальним планом ЦР.

Він задовольняє обмеженням (2–3) та доставляє максимум ПЕ (1). Дійсно, враховуючи нерівність (4), обмеження (3) і сумуючи ліву та праву частину нерівності (4), отримаємо:

$$\sum_{i=1, j(i)\in N}^{n} Q_{ij(i)} + \sum_{j(i)\in N} \Delta_{j(i)} \geq$$

$$\geq \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} Q_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta_j x_{ij} \,. \tag{5}$$

В (5) N – множина стовпців, в яких знаходяться Δ-максимальні елементи рядків (i=1, ..., n). Отже,

$$\sum_{i=1, j(i)\in N}^{n} Q_{ij(i)} \geq \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} Q_{ij} x_{ij} \,. \tag{6}$$

Для будь якого плану ЦР, що задовольняє обмеженням (2–3), виконуються умови (6), тобто набір є оптимальним [11].

Задача знаходження оптимального плану ЦР вирішується в наступній послідовності. В якості вихідного вектору $\vec{\Delta}_{и}$ використаємо вектор, всі компоненти якого дорівнюють 0. Знайдемо Δ-максимальні елементи рядків (4). Якщо в якомусь стовпці буде знаходитись більш одного Δ-максимального елемента рядків матриці $\|Q_{ij}\|$, то необхідно обрати інший Δ – елемент Q_{ij}, найбільш близький за величиною Δ – до максимального, та при цьому здійснити корегування значень компонентів вектору $\vec{\Delta}$. Для цього можна використати величину:

$$\delta_{j_0(i_0)} = \min_{l\in S,\, i\in R} \left\{ \left[Q_{ij(i)} + \Delta_{j(i)} \right] - (Q_{il} + \Delta_l) \right\}, \tag{7}$$

де $j_0(i_0)$ – координати елемента Q_{ij}, який є найближчим за величиною до завчасно сформованої основи i_0-го рядка; S – множина стовпців без основ; R – множина рядків без альтернативних основ.

Процес знаходження плану ЦР завершується, після отримання системи з n–незалежних Δ-максимальних елементів матриці $\|Q_{ij}\|$ і виконання системи обмежень (3).

Як виходить із викладок, запропонований метод дозволяє знайти оптимальний план ЦР при m<n без розширення матриці $\|Q_{ij}\|$ до квадратної. Процес знаходження рішення завершиться, коли буде отримана система з m незалежних елементів рядків матриці $\|Q_{ij}\|$. Це відповідає ситуації, коли число стовпців з Δ-максимальними елементами (r) буде дорівнювати m, що в подальшому будемо називати граничним значенням ($r_П$).

Правильність твердження про те, що отриманий план ЦР буде оптимальним, можна довести з використанням еквівалентних перетворень [5].

Якщо m>n, то доцільним є доповнення матриці ефективності до квадратної розмірністю mxm, $r_П$:= m і використання викладеного методу при m=n в повному обсязі.

Доповнення матриці до квадратної не призведе до перевищення мінімального об'єму пам'яті і допустимого часу, що витрачається на реалізацію алгоритму [11]. В цьому випадку на завершальному етапі при $m > n$ необхідно з плану ЦР виключити фіктивні цілі з номерами n+1, n+2, ...,m.

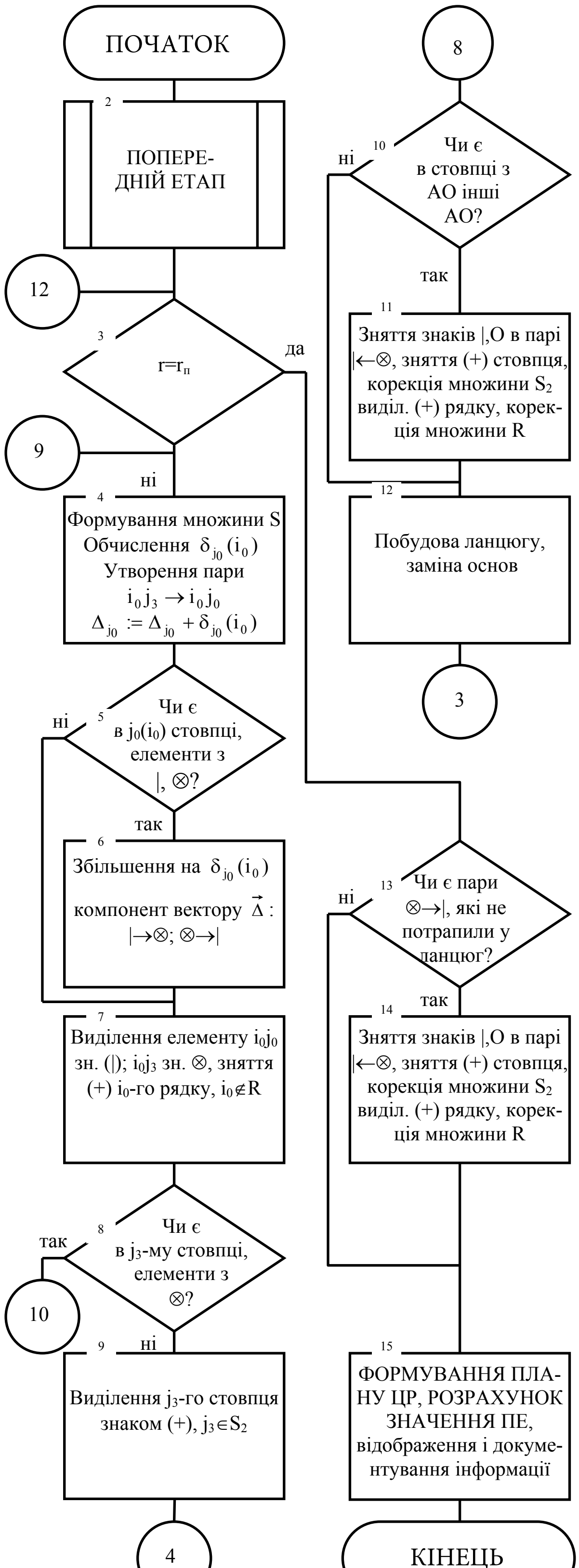


Рис. 1. Схема алгоритму знаходження оптимального плану цілерозподілу

Алгоритм знаходження оптимального плану ЦР. Схема алгоритму знаходження оптимального плану ЦР з використанням запропонованого методу представлена на рис. 1. Вона включає попередній етап (блоки 2, 3), послідовно виконання ітераційної процедури (блоки 4, 5, …, 12) і завершальний етап формування плану ЦР (блоки 13, 14, 15). Стисло опишемо зміст операцій алгоритму.

Попередній етап (блоки 2, 3). Передбачає ввід величину Q_{ij}, $i=1,2,...,m$; $j=1,2,...,n$. Якщо $m>n$, то МЕ доповнюється до квадратної шляхом введення фіктивних цілей з номерами $j=n+1$, $n+2$, ..., m, для яких Q_{ij} дорівнюють 0. Проводиться визначення величини $n_0=\max(n,m)$, $r_П:=m$ для всіх випадків: $m=n$, $m<n$, $m>n$; $\vec{\Delta}_è = (0,0,...,0)$, $j=1,2,...,n_0$. Проводиться пошук максимальних елементів рядків, що співпадають з Δ-максимальними елементами (4). Ці елементи виділяються знаком (×), та отримують назву основних. Рядки без основ виділяються знаком (+), утворюючи множину S_1. Всі рядки МЕ виділяють знаком (+), вони створюють більшість рядків без АО (R). Підраховується число стовпців з основами (r). Якщо $r=r_П$ (блок 3), то на попередньому етапі отримана повна система незалежних основ і план ЦР, у відповідності з теоремою, повністю визначають їх знаходження. Якщо $r \neq r_П$ (блок 3), то виконуються ітеративні операції.

Опис окремої ітерації. Блок 4. Утворюється більшість рядків S, виділених знаком (+), за правилом $S=S_1 \cup S_2$, де S_1 – більшість стовпців без основ; S_2 – більшість стовпців, що мають елементи позначені ⊗, але не мають елементів, виділених знаком (×). По формулі (7) знаходять величину $\delta_{j0(i_o)}$. Номеру стовпця з основою i_0-го рядку надається ознака можливої заміни j_3 і створюється пара можливої заміни основ: $i_0 j_3(i_0) \to i_0 j_0(i_0)$. Обчислюються нові значення компоненту $\Delta_{j0} := \Delta_{j0} + \delta_{j0(i_o)}$.

Блоки 5, 6. При всіх перетвореннях для основ має виконуватися умова (4). Тому за наявністю в $j_0(i_0)$-му стовпці елементів зі знаками (|) або ⊗ (блок 5) компоненти вектору $\vec{\Delta}$ відповідних стовпців збільшуються на $\delta_{j0(i_0)}$ (блок 6) за правилом:

$$(\,|\,) \to \otimes\,;\ (\otimes) \to (\,|\,).$$

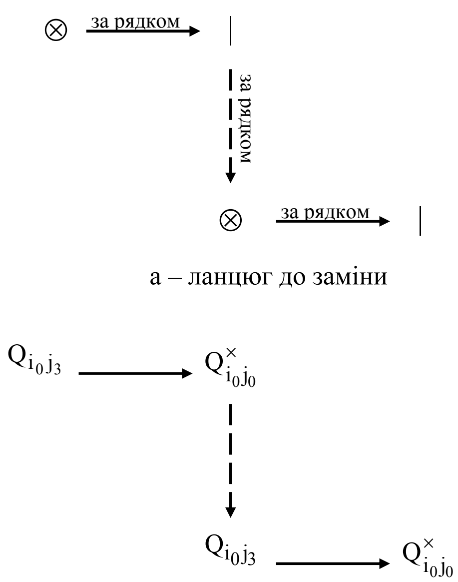
Блок 7. Створює A_O, виділяючи елемент $Q_{i_0 j_0}$, знаком (|), $i_0 \notin R$, знімається знак (+) i_0-го рядку, елемент $Q_{i_0 j_0}$ зі знаком (×) виділяється знаком (⊗).

Блок 8, 9. Здійснюється аналіз, чи є в j_3-ому стовпці інші основи (блок 8). Якщо інших основ немає, то основи на АО не замінюються, а продовжується пошук варіанту заміни: стовпець j_3 виділяється знаком (+), його включається в множину S2 (блок 9) і при скорегованих множинах S та R обчислюємо величину $\delta_{j0(i_0)}$ (блок 4).

Блоки 10, 11, 12. Попередньо перевіряється наявність в стовпці з тільки но створеної АО інших

АО (блок 10). Якщо АО є, то відміняється можливий варіант заміни основ (|)←(⊗) (блок 11). В парі (|) ← (⊗) змінюється знак (|), рядок виділяється знаком (×), включається рядок у більшість R, стирається знак О у основи пари, стовпець виключається з більшості S_2, стирається знак (×) цього стовпця (блок 11). Будується ланцюг заміни основ (рис. 2, а, блок 12), вихідним елемент з виділеним знаком (⊗), що находиться в стовпці j_3, в якому є інші основи (блок 8). Ланцюг завжди завершається на АО.

У вбудованому ланцюгу замінюються основи на АО, які виділяються знаком (×) (рис. 2, б).



а – ланцюг до заміни

б – ланцюг після заміни

Рис. 2. Створення ланцюга заміни основ

Кількість стовпців з основами r збільшується на 1 при заміні основ останньої ланки. Відновлюються знаки (+) рядків, які містили АО, включаючи їх в множині R.

При стиранні знаків ⊗ другого, третього ланцюгів, рядки, що мають такі елементи, виключаємо з множини S_2, знімаючи у них знак (+). Затираємо знак (+) стовпця, в якому лежить АО наступної ланки, виключаючи його з множини S_1.

Завершальний етап алгоритму_(блоки 13, 14, 15). Якщо виявилося, що m стовпців мають основи (блок 3), перевіряється наявність пар ⊗ → |, які не потрапили в ланцюг заміни (блок 13). За їх наявності знімається знак (|) у парі, рядок виділяється знаком (+), він включається до множини R та ліквідується знак (О) у елемента, виділеного (⊗), знімається позначення (+) стовпця. Стовпець виключається з множини S2 (блок 14).

Блок 15. Формується план ЦР $\|x_{ij}\|$. Якщо m=n, то $x^*_{ij} = 1$, i=1,2,...,m; j=1,2,...,n. Координати (i,j) параметра x^*_{ij} відповідають координатам основ. При m<n з плану ЦР виключаються цілі, на які не призначені ЗК, а так само формується множина номерів цих цілей. При m>n з плану ЦР виключаються фіктивні цілі, формується множина "вільних" цільових каналів ЗК і виключаємо ці ЗК з процесу формування плану ЦР.

Розраховуємо значення ПЕ шляхом сумування основ, що відповідають $x^*_{ij} = 1$.

$$M\left(\left\|x^*_{ij}\right\|\right) = \sum_{i=1,\, j(i)\in N}^{m} Q^*_{ij(i)} .$$

З необхідним степенем деталізації наглядно відображаємо план цілерозподілу , значення ПЕ, документуємо вихідні данні і результати виконання алгоритму.

В якості прикладу застосування запропонованого алгоритму розглянемо матрицю виду

$$\left\|Q_{ij}\right\| = \begin{Vmatrix} 9 & 6 & 5 & 8 \\ 4 & 8 & 6 & 2 \\ 6 & 7 & 9 & 4 \\ 2 & 7 & 3 & 1 \end{Vmatrix} .$$

Знайдемо даним методом план ЦР, що максимізує ПЕ (1) і задовольняє обмеженням (2–3). Порівняємо отриманий план ЦР з планом, що знайдено угорським методом [5].

Після виконання попереднього етапу отримаємо:

$$\begin{Vmatrix} 9^* & 6 & 5 & 8^+ \\ 4 & 8^* & 6 & 2 \\ 6 & 7 & 9^* & 4 \\ 2 & 7^* & 3 & 1 \end{Vmatrix} \begin{matrix} + \\ + \\ + \\ + \end{matrix} \quad \vec{\Delta}_{è} = (0;\ 0;\ 0;\ 0); \quad S = \{4\}; \quad R = \{1; 2; 3; 4\};\ r = 3;\ r_{ï} = 4.$$

Так як $r \neq r_{ï}$, то необхідно виконати одну ітерацію (блоки 4, 5, … , 12), отримаємо

$$\begin{Vmatrix} 9 & 6 & 5 & 8^* \\ 4^* & 8 & 6 & 2 \\ 6 & 7 & 9^* & 4 \\ 2 & 7^* & 3 & 1 \end{Vmatrix} \qquad \begin{matrix} \vec{\Delta}_k = (4;0;1;5); \quad r = 4; \\ S = 0; \quad R = \{1,2,3,4\}. \end{matrix}$$

Виконавши операції блоків 13, 15, отримаємо

$$\left\|X^*_{ij}\right\| = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \qquad (8)$$

$$M(X^*) = 8 + 4 + 9 + 7 = 28 \text{ од.}$$

План цілерозподілу (8) являється оптимальним. Він забезпечує максимум ПЕ та задовольняє обмеженням (2–3).

План цілерозподілу (8) і значення ПЕ співпадає з планом ЦР, отриманим угорським методом в [5].

Висновки

1. Запропонований метод і розроблений алгоритм знаходження оптимального плану цілерозподілу (в загальному випадку – плану призначення) при квадратній (m = n) та прямокутній (m < n) формах матриці ефективності. Метод і алгоритм забезпечують максимізацію показників ефективності зенітних комплексів і не потребують попереднього перетворення задачі максимізації на задачу мінімізації та доповнення матриці ефективності до квадратної.

2. Визначено, що при перевищені кількості зенітних засобів (цільових каналів) кількості цілей, задачу вироблення оптимального плану цілерозподілу доцільно вирішувати при доповнені матриці ефективності до квадратної, оскільки витрати пам′яті та машинного часу на обчислення за алгоритмом не перевищують припустимих значень.

3. Метод і алгоритм можуть бути використані при розробці алгоритмів цілерозподілу в режимі реального часу для вогневих засобів перехоплення в повітрі балістичних цілей (ракет, артилерійських снарядів та мін) та тактичних безпілотних літальних апаратів зенітним вогнем.

Список літератури

1. Повітряна розвідка [Мосов В.П і др.]; под ред. В.П. Мосова. – К.: КВИАУ. ім. Жуковського, 1988. – 312 с.
2. Boord W.J., Hoffman J.B. Air and Missile Defense Systems Engineering / Broken Sound Parkway NW.: CRC Press, 2017. – 268 p.
3. Неупокоев Ф. К. Стрельба зенитными ракетами / Ф. К. Неупокоев. – М.: Воениздат, 1991. – 343 с.
4. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
5. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления / Л.Г. Раскин. – М.: Сов. радио, 1976. – 344 с.
6. Диниц Е.А. Один алгоритм решения задачи о назначении / Е.А. Диниц, М.А. Кронрод // Доклады АН СССР. Серия математика: наук. ж. – М.: АН СССР. – 1969. – Вип. 1-3. – С. 23-25.
7. Balakrishnan R. Guided Weapons System Design / R. Balakrishnan. – DESIDOC. Delhi: Defence R&D Organisation, 1998. – 184 p.
8. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. – 2-е изд., перераб. доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
9. Ефективність управління вогнем та стрільби переносного ЗРК в обумовлених умовах його застосування / О.В. Коломійцев, В.Є. Кудряшов та ін. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУ ПС, 2009. – Вип. 2 (18). – С. 14-16.
10. Mace S. C-RAM: Air Defense Artillery Takes On New Counter-Rockets, Artillery and Mortars Intercept Mission / S. Mace. - Air Defense Artillery magazine. – 2005. – July-September.
11. Stoer J., Bulirsch R. Introduction to Numerical Analysis. 2-nd Edition. / Springer-Verlag - New York, 1993. – 672 p.
12. Pham T. TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs / T. Pham, N. Srour. – U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5417. – P. 24-29.

References

1. Mosov, V.P. (1988), “*Povitriana rozvidka*” [*Airborne intelligence*], KVIAU named by Zhukovsky, Kiev, 312 p.
2. Boord, W.J. and Hoffman, J.B. (2017), *Air and Missile Defense Systems Engineering,* Broken Sound Parkway NW, CRC Press.
3. Neupokoev, F.K. (1991), “*Strelba zenitnymi raketami*” [*The Firing of Air Defence Rockets*], Voenizdat, Moscow, 343 p.
4. Korbut, A.A. and Finkilshtein, Yu.Yu. (1969), “*Diskretnoe programirovanie*” [*The Discrete Programming*], Nauka, Moscow, 368 p.
5. Raskin, L.G. (1976), “*Analiz slozgnih system i elememty teorii optimalnogo upravleniya*” [*The analysys of complex systems and elements of theory of optimal guide*], Sovetskoe radio, Moscow, 344 p.
6. Dinicz, E.A. and Kronrod, M.A. (1969), “*Odin algiritm resheniya zadachi o naznachenii*” [*The one algorithm of solving of assignment problem]*, Report of AN USSR, No. 1-3, pp. 23-25.
7. Balakrishnan, R. (1998), *Guided Weapons System Design*, DESIDOC, Defence R&D Organisation, Delhi, 184 p.
8. Radioelectronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory. Reference book (2007), ed. Shirman J.D. - 2 nd ed., Radio Engineering, Moscow, 512 p.
9. Kudryashev, V.E. and Kolomijtzev, O.V. (2009) “Esektivnost upravlinnya vognem ta strelby perenosnogo ZRK v obumovlenih umovah jogo zastosuvanija” [The effectiveness of fire control and firing of MANPADS in the conditions of its application], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 2, pp. 14-16.
10. Mace, S. (2005), *C-RAM: Air Defense Artillery Takes On New Counter-Rockets, Artillery and Mortars Intercept Mission*, Air Defense Artillery magazine, July-September.
11. Stoer , J. and Bulirsch, R. (1993), *Introduction to Numerical Analysis*, 2-nd ed., Springer-Verlag, NY, 672 p.
12. Pham, T., and Srour, N. (2004), *TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs*, U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE, vol. 5417, pp. 24-29.

Надійшла до редколегії 14.02.2018
Схвалена до друку 20.03.2018

Відомості про авторів:

Піскунов Станіслав Миколайович
кандидат технічних наук доцент
начальник кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0002-4685-527X
e-mail: piskunoff@ukr.net

Купрієнко Дмитро Анатолійович
доктор військових наук доцент,
професор кафедри Національної академії Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького,
Хмельницький, Україна
https://orcid.org/0000-0002-4086-1310
e-mail: kupriyenko@ukr.net

Мар'яш Андрій Дмитрович
Курсант Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0002-3428-5134
e-mail: patriot.shaldy@gmail.com

Шевченко Антон Федорович
кандидат технічних наук доцент
доцент Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0001-8171-8396
e-mail: antenna_81@ukr.net

Information about the authors:

Stanislav Piskunov
Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Chief of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4685-527X
e-mail: piskunoff@ukr.net

Dmytro Kupriyenko
Doctor of Military Sciences Associate Professor,
Professor of National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine,
Khmelnytskyi, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4086-1310
e-mail: kupriyenko@ukr.net

Andriy Mariash
Cadet of of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-3428-5134
e-mail: patriot.shaldy@gmail.com

Anton Shevchenko
Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-8171-8396
e-mail: antenna_81@ukr.net

МЕТОД И АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДСТВ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ

С.Н. Пискунов, Д.А. Куприенко, А.Д. Марьяш, А.Ф. Шевченко

Предложен метод и алгоритм отыскания оптимального плана распределения огневых средств по целям, который позволяет максимизировать значение показателя эффективности при выполнении системы ограничений. Метод и алгоритм основаны на модификации венгерского метода оптимизации в матричной постановке задачи о назначениях при условии полиномиального представления функции времени. Предложенный метод и алгоритм позволяют уменьшить количество затрат машинной памяти и количества операций при реализации вычислений поскольку не требует дополнения матрицы эффективности до квадратной по сравнении с венгерским методом. Приведены примеры использования предложенного алгоритма. Оптимальность полученного метода и алгоритма подтверждается методом эквивалентных преобразований. Достоверность метода и алгоритма подтверждена совпадением с результатами полученными венгерским методом. Полученные результаты могут быть использованы в алгоритмах целераспределения между зенитными средствами ближнего действия и малой дальности противовоздушной обороны Сухопутных войск. Представленные результаты могут быть также использованы при разработке алгоритмов целераспределения, которые реализуются в режиме реального времени, для огневых средств перехвата баллистических целей (ракет, артиллерийских снарядов, мин) и средств поражения тактических беспилотных летательных аппаратов зенитным огнем в воздухе.

Ключевые слова: *противовоздушная оборона Сухопутных войск, оптимальное целераспределение, венгерский метод оптимизации.*

THE METHOD AND ALGORITHM FOR SEARCHING OF THE OPTIMAL PLAN OF TARGETS DISTRIBUTION TO AIR DEFENCE SYSTEM

S. Piskunov, D. Kupriyenko, A. Maryash, A. Shevchenko

The method and algorithm for searching of the optimal plan of targets distribution from weapons which maximizes the value of the efficiency index when the system of constraints is implemented are proposed. The method and algorithm are based on the modification of the Hungarian optimization method with matrix formulation of assignment problems under the condition of a polynomial representation of the time function. The proposed method and algorithm allow to reduce the amount of computer memory and the number of operations in the implementation of calculations because it does not require the addition of an efficiency matrix to a square-form instead the Hungarian method. Examples of calculations using the proposed algorithm are given. The optimality of the obtained method and algorithm is confirmed by the method of equivalent transformations. The reliability of the method and algorithm is confirmed by the coincidence with the results obtained by the Hungarian method. The obtained results can be used in targeting algorithms between short range air defense systems. The presented results can also be used in the development of target distribution algorithms, which are implemented in real time processing, for interception ballistic targets (missiles, artillery shells, mines) and engaging of tactical unmanned aerial vehicles by air defense fire in to the air.

Keywords: *air defence of The Army, optimal targets distribution, Hungarian optimization method.*