

УДК 355.45

І.А. Таран

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРАЄКТОРІЇ ПОЛЬОТУ ЗАСОБУ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ДО ОБ'ЄКТУ УДАРУ

В роботі запропонована методика автоматичного визначення оптимальної траєкторії польоту засобу повітряного нападу до об'єкту удару, що забезпечує мінімум показника – сукупності виграшів (програшів) польоту по даному маршруту. Для визначення оптимальної траєкторії польоту використовується метод динамічного програмування, що дозволяє скоротити об'єм обчислень та програмно реалізувати запропоновану методику.

Ключові слова: траєкторія польоту, засіб повітряного нападу, об'єкт удару, динамічне програмування, вихідна точка маршруту, кінцева точка маршруту, рубіж виконання завдання.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасний стан та рівень розвитку засобів повітряного нападу (ЗПН) дозволяють при відповідних умовах швидко досягати стратегічної мети війни. Аналіз останніх збройних конфліктів показує, що в більшості випадків бойові дії починалися з повітряної наступальної операції або проведенням ракетних і авіаційних ударів, у ході яких, як правило, вирішувалися основні завдання конфлікту. В ході ударів поразалися важливі державні об'єкти, що призводило до зниження промислового і військового потенціалу противника, і, як наслідок, до досягнення цілей наступаючої сторони.

Основними особливостями конфліктів були:

– інформаційна перевага сторони, що наносила удар, в результаті чого здійснювалось завчасне викриття побудови системи протиповітряної оборони (ППО) та визначення замислу авіаційних та ракетних ударів виходячи з реальної обстановки;

– технічна перевага сторони, яка наносила удар, яка полягала в використанні ЗПН останніх поколінь, оснащених сучасними системами управління, навігації та зв'язку, що у поєднанні з належним рівнем підготовки командного та льотно-підйомного складу, інформаційною перевагою призводило до великих втрат сил і засобів ППО поряд з відносно невеликими втратами ЗПН та швидкого завоювання переваги в повітрі;

– ресурсна перевага сторони, яка наносила удар. У більшості конфліктів з одного боку виступала супердержава або коаліція декількох провідних країн з практично необмеженими ресурсами, з іншого – дещо відстала в воєнному відношенні країна.

Таким чином, вирішення завдань в протистоянні з озброєним сучасними засобом повітряним противником (ПП), потребує, по-перше, закупівлі, модернізації існуючих та розробки нових засобів ППО, основаних на найбільш сучасних технічних рішеннях та на застосуванні нових фізичних прин-

ципів; по-друге, проведення організаційних заходів, направлених на використання нових підходів і застосування нових принципів побудови системи ППО та її підсистем. Також ведення бойових дій потребує наявності значних ресурсів, виділення необхідних коштів на оборону держави та проведення комплексу заходів щодо підготовки країни до війни.

Реалії сьогодення вимагають від нашої держави бути готовою до протистояння з противником, який має технічну перевагу, а також практично необмежений в ресурсах. Тому чи не основним напрямком розвитку Повітряних Сил в політичних і фінансових умовах, в яких зараз перебуває Україна, являється розробка та впровадження системи заходів, направлених на створення (підвищення) інформаційної переваги над повітряним противником, що досягається, по-перше, створенням та впровадженням в практику військ методик розпізнавання замислу дій повітряного противника, по-друге – визначенням рекомендацій щодо створення раціональних структур системи ППО та її підсистем в залежності від варіантів дій ПП. Відповідні дослідження започатковані в [1]. Для розпізнавання варіантів замислу повітряного противника автором проводяться дослідження щодо розробки методики визначення оптимальних маршрутів польоту ЗПН до об'єктів удару. Викладення результатів цих досліджень є **метою даної статті**.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій [2 – 4] показав, що вибір раціонального маршруту й профілю польоту, що забезпечує найкращі умови для виконання польотного завдання при мінімальних витратах, здійснюється штурманом у ході прокладки маршруту. При цьому основним інструментом вибору раціонального маршруту є досвід і інтуїція штурмана. Визначенню можливих маршрутів польоту ЗПН та напрямків їх дій присвячений ряд наукових досліджень, узагальнених в [5, 6]. В [5] наведений порядок прогнозування замислу дій повітряного противника на оперативно-стратегічному напрямку, де проекція траєкторії польоту ЗПН до

об'єкту удару на земну поверхню являє собою дугу великого кола, що з'єднує базу ЗПН з об'єктом удару. В штабній математичній моделі "Ешелон-2003" [5] варіанти очікуваного замислу дій повітряного противника та його реакції за умовами розвитку обстановки вважаються відомими. Одним з варіантів визначення траєкторії польоту ЗПН являється визначення поворотних точок маршруту (ПТМ), в яких ЗПН змінює висоту та курс польоту, при цьому положення ПТМ задається дослідником на основі інтуїтивних уявлень про можливий характер дій повітряного противника. В [6] здійснюється визначення пар "ЗПН-об'єкт удару" і, якщо об'єкт знаходиться в межах досяжності відповідного ЗПН, проводиться розрахунок параметрів траєкторії польоту ЗПН, при цьому, вважається, траєкторія ЗПН являє собою дугу великого кола, що з'єднує базу ЗПН з об'єктом удару. В [3] здійснюється синтез алгоритму оптимізації траєкторії польоту літального апарату по маршруту на основі інформації про стан систем протидії (системи протиповітряної оборони) без врахування інших факторів, що впливають на виграш (чи програш) від вибору різних варіантів траєкторії польоту ЗПН. В [4] здійснюється формування декількох варіантів польоту ЗПН до об'єктів на основі критерію забезпечення мінімального часу знаходження ЗПН в зонах виявлення засобів ППО.

Виклад основного матеріалу

В загальному випадку траєкторія польоту ЗПН від вихідної точки маршруту (ВТМ) до кінцевої точки маршруту (КТМ) проходить через декілька поворотних точок маршруту. В поворотних точках маршруту ЗПН здійснює маневр, змінює курс і висоту польоту.

Будемо вважати, що траєкторія польоту ЗПН складається з наступних ділянок:

1) ділянка польоту від ВТМ до поворотної точки маршруту №1 (ПТМ-1) – буде включати зліт, набір висоти H_1 (м) і курсу α_1 (град), горизонтальний політ до ПТМ-1 протяжністю D_1 (км), маневр з метою зміни висоти H_1 і курсу α_1 на H_2, α_2 ;

2) ділянка польоту від ПТМ-1 до ПТМ-2 – буде включати горизонтальний політ до ПТМ-2 протяжністю D_2 (км), маневр з метою зміни висоти H_2 і курсу α_2 на H_3, α_3 ;

3) ділянка польоту від ПТМ-2 до ПТМ-3 – буде включати горизонтальний політ до ПТМ-3 протяжністю D_3 (км), маневр з метою зміни висоти H_{J-2} і курсу α_{J-2} на H_{J-1}, α_{J-1} ;

J-1) ділянка польоту від ПТМ-J-1 до КТМ – буде включати, горизонтальний політ до КТМ протяжністю D_{J-1} (км);

J) маневр в КТМ, де відбувається зміна висоти з H_{J-1} на H_J та курсу з α_{J-1} на α_J . Вважаємо, що після здійснення цього маневру ЗПН знаходиться на рубежі виконання завдання (РВЗ), при цьому значення

висоти H_J та курсу α_J вважаємо відомими, оптимальними для виконання польотного завдання.

Зауважимо, що курс ЗПН на горизонтальних ділянках маршруту може витримуватись постійним тільки при польоті по локсодромії, що буде мати місце тільки при прокладці відносно невеликих по дальності (не більше 150-300 км) маршрутів [6]. При прокладці маршрутів на більші відстані у якості горизонтальних ділянок використовується ортодромія – дуга великого кола, що з'єднує поворотні точки маршруту. Ортодромія перетинає різні меридіани під різними кутами, як наслідок значення курсу при польоті по горизонтальній ділянці не є постійним. В подальшому з метою зменшення об'єму викладок вважаємо значення курсу на горизонтальних ділянках польоту постійною величиною.

Зауважимо також, що маневр J може здійснюватись і без зміни висоти у випадку, якщо горизонтальний політ на ділянці J-1 проходить на висоті, оптимальній для виконання завдання. В цьому випадку можна сказати, що висота змінилась з H_{J-1} на H_J , при цьому $H_J = H_{J-1}$. Наведене стосується і інших маневрів 2...J-1.

Приклад траєкторії польоту при J=4 наведений на рис. 1.

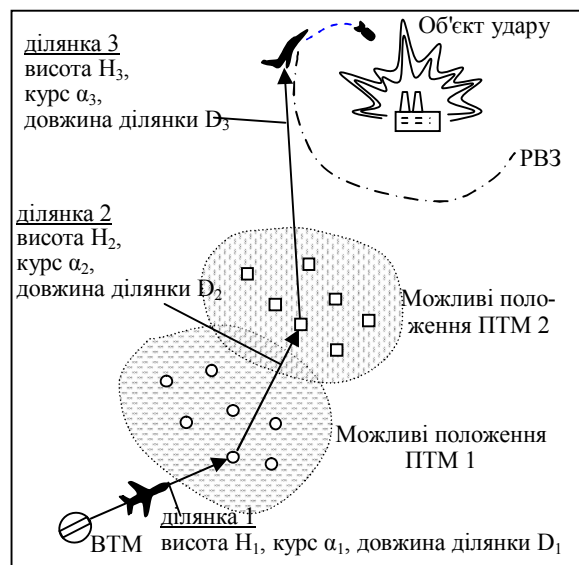


Рис. 1. Приклад траєкторії польоту при J = 4

Вважаємо, що зміни координат ЗПН в ході зльоту 1, маневрів 2, 3, 4 при заданих висоті і курсу перед маневром і після його завершення, відомі. Якщо положення ВТМ відоме, то траєкторія польоту ЗПН буде визначатись просторовим положенням поворотних та кінцевої точок маршруту, яке для кожної з них може бути задане значенням трьох координат (декартовими X, Y, Z або географічними широтою ϕ та довготою λ та висотою H, або декартовими X, Y та висотою H).

З метою зменшення об'єму обчислень будемо також вважати, що для кінцевої точки маршруту невідомо

мою являється тільки одна з координат – висота H (або координата Z).

У цьому випадку при $J=4$ множина невідомих параметрів маршруту польоту ЗПН буде включати 7 елементів:

$$\Omega = (H_1, H_2, H_3, X_1, Y_1, X_2, Y_2). \quad (1)$$

Якщо кількість поворотних точок маршруту дорівнює 1 ($J=3$), то при припущеннях, зроблених вище, кількість невідомих параметрів дорівнює чотири (висоти H_1, H_2 , координати X_1, Y_1). Помітимо, що цей випадок є різновидом попереднього випадку при $H_3=H_2$ і $\alpha_3=\alpha_2$, тобто в ПТМ-2 висота і курс не змінюються. Якщо поворотні точки маршруту відсутні ($J=2$), невідомим є один параметр – висота польоту H_1 , і політ відбувається по дузі великого кола, що з'єднує ВТМ з КТМ. Надалі будемо розглядати випадок наявності двох ПТМ маршруту ($J=4$), вважаючи, що викладені методичні підходи до визначення раціонального маршруту польоту можуть бути легко узагальнені й використані для випадків $J \neq 4$.

Нехай w_{jk} – скалярний або векторний показник (виграш або програш, далі – програш), що характеризує сукупність переваг і небезпек від польоту по кожній з можливих прямолінійних ділянок польоту, а також від здійснення можливих маневрів, де $j=1 \dots J$ – номер ділянки маршруту, k – номер варіанта прокладки ділянки маршруту з можливих K варіантів.

Наприклад, w_{21} – показник, що характеризує програш від польоту на ділянці 2 (від ПТМ-1 до ПТМ-2) при польоті по першому маршруту із множини можливих.

Припустимо також, що сумарний програш W_k від польоту по k -му маршруту, що складається з окремих ділянок, є адитивним, і його можна розрахувати як суму програмів по ділянках маршруту, тобто

$$W_k = \sum_{j=1}^J w_{jk}.$$

При зроблених вище припущеннях природним шляхом знаходження раціонального маршруту буде розрахунок значення W_k для всіх можливих K маршрутів і вибір як оптимального маршруту такого, для якого значення W_k буде мінімальним. Але практична реалізація використання методу перебору всіх можливих маршрутів буде затруднена через надзвичайно велику кількість останніх. Скільки всього можливих маршрутів? Якщо невідомі параметри (1) є безперервними величинами, то число маршрутів нескінченне й вирішення задачі методом прямого перебору варіантів маршрутів неможливе. Можливим рішенням є табулювання безперервних невідомих параметрів у деякому діапазоні їхньої зміни, при цьому крок дискретизації вибирається виходячи з конкретного змісту задачі – виходячи з необхідної точності визначення траєкторії ЗПН, а також з про-

торових розмірів зони можливих положень поворотних точок маршруту. Наприклад, параметр X_1 табулюємо на $K_1=30$ значень у межах можливого розміру зони можливих положень ПТМ-1 X , де значення X встановлюється, наприклад, шляхом експертного опитування. Аналогічно табулюються і можливі діапазони зміни координати Y поворотної точки маршруту та висоти польоту на ділянці (мал. 2).

При $J=4$ і кількості інтервалів табулювання кожного невідомого параметра $K=30$, кількість варіантів маршрутів польоту дорівнює $30^7 \approx 2,2 \cdot 10^{10}$. Очевидно, що хоча застосування табулювання дозволяє зменшити кількість розглянутих варіантів маршрутів польоту засобу повітряного нападу до об'єкту удару, отримане значення однаково є досить великим, а вирішення задачі шляхом прямого перебору варіантів маршрутів затруднене.

Використаємо для вирішення задачі знаходження раціонального маршруту метод динамічного програмування. Динамічне програмування є особливий метод оптимізації рішень, спеціально пристосований до багатокрокових операцій [7]. В даній роботі кроки динамічного програмування відповідають ділянкам польоту ЗПН, наведеним вище.

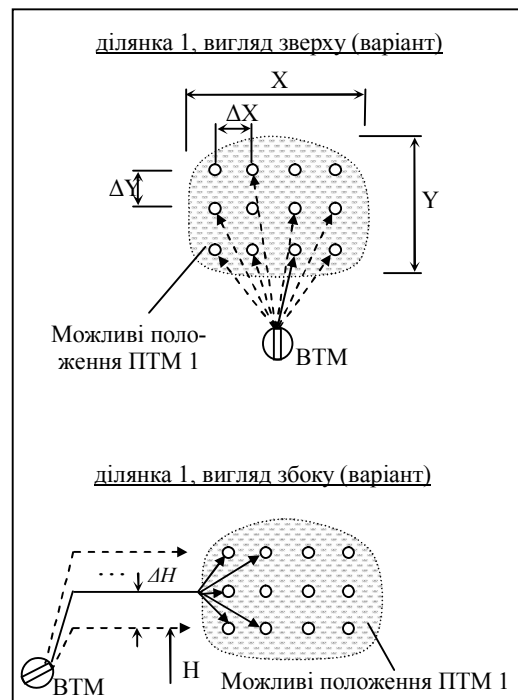


Рис. 2. Табулювання невідомих параметрів (ортодромії (локсодромії) показані як прямі)

Введемо такі позначення:

J – кількість кроків динамічного програмування (у нашому прикладі $J=4$);

j – поточний крок динамічного програмування;

$S_j^{(1)}, S_j^{(2)}, \dots, S_j^{(k)}, \dots, S_j^{(K)}$ – можливі стани системи після j -го кроку, де k – поточний стан системи, K – загальна кількість можливих станів системи;

S_0 – вихідний стан системи (ЗПН перебуває в ВТМ);

S_j – кінцевий стан системи (ЗПН перебуває в КТМ). У нашому прикладі $S_j = S_4$;

$U_j(S_{j-1}^{(k)})$, $U_j^*(S_{j-1}^{(k)})$ – управління та умовне оптимальне управління на j -му кроці після завершення $j-1$ кроку й переходу системи в стан $S_{j-1}^{(k)}$.

Починаємо оптимізацію з останнього ($j=4$) кроку. Нехай у ході процесу вибору маршруту польоту ЗПН на попередніх кроках ми встановили, що наприкінці третього кроку (третьої ділянки польоту) ЗПН перебуває в КТМ на висоті H_3 й летить із курсом α_3 . Також ми знаємо оптимальні значення висоти H_4 й курсу α_4 на РВЗ. Що необхідно робити на останньому, четвертому кроці? Очевидно, змінити висоту й курс на оптимальні для виконання завдання. Тому умовне оптимальне управління на четвертому кроці $U^*_4(S_3^k)$ – змінити висоту з H_3 на H_4 , а курс із α_3 на α_4 . При цьому умовний оптимальний програш дорівнює

$$W^*_4(S_3^k) = w_{4k},$$

де w_{4k} – програш від здійснення маневру 4 по зміні висоти з H_3 на H_4 , а курсу із α_3 на α_4 при знаходженні ЗПН по закінченні третього кроку в стані k (тобто на висоті й курсі, що відповідають вибору k -го варіанту управління на третьому кроці).

Оптимізуємо передостанній (третій) крок. Перед цим кроком ЗПН знаходиться в стані $S_2^{(k)}$ – тобто в ПТМ-2 з координатами X_2 , Y_2 на висоті H_2 . Управління $U_3(S_2^{(k)})$ на цьому кроці – зміна висоти на H_3 . Зміна курсу з α_2 на α_3 здійснюється лише за одним можливим варіантом, оскільки згідно зроблених вище допущень значення курсу α_3 буде однозначно визначатись взаємним просторовим положенням ПТМ-2 і КТМ. Позначимо $W_3^*(S_2^{(k)})$ – умовний оптимальний програш на двох останніх кроках: третьому й четвертому, який вже оптимізований. Умовний програш на двох останніх кроках за умови застосування на третьому кроці k -го варіанту управління (вибору значення H_3) дорівнює

$$w_{3k} + W^*_4(S_3^k),$$

де W_{3k} – програш на третьому кроці від застосування k -го варіанта управління.

Потрібно знайти таке управління k на третьому кроці, при якому цей програш мінімальний, тобто

$$W^*_3(S_2^k) = \min_{U_3} \{w_{3k} + W^*_4(S_3^k)\}.$$

Цей мінімум і є умовний оптимальний програш за два останніх кроки, а те значення варіанту управління і відповідної висоти польоту на третій ділянці H_3 , при яких цей мінімум досягається, – умовне оптимальне управління на третьому кроці.

Далі оптимізуємо другий крок. Перед цим кроком ЗПН знаходиться в стані $S_1^{(k)}$ – тобто в ПТМ-1 з координатами X_1 , Y_1 на висоті H_1 . Управління $U_2(S_1^{(k)})$ на цьому кроці – вибір ПТМ-2 з параметрами X_2 , Y_2 , $H_2=H_1$ та горизонтальний політ до ПТМ-2 протяжністю D_2 ; при цьому значення α_2 та D_2 будуть визначатись взаємним просторовим положенням ПТМ-1 та ПТМ-2.

Тобто кількість варіантів управління на другому кроці дорівнює кількості можливих положень ПТМ-1 при умові $H_2=H_1$ (таких управлінь буде K^2), і відповідні розрахунки необхідно буде провести для K^3 можливих положень ПТМ-2.

Знаходимо таке управління на другому кроці, при якому значення програшу буде мінімальне, тобто:

$$\begin{aligned} W^*_2(S_1^k) &= \min_{U_2} \{w_{2k} + W^*_3(S_2^k)\} = \\ &= \min_{U_2} \left\{ w_{2k} + \min_{U_3} [w_{3k} + W^*_4(S_3^k)] \right\}. \end{aligned}$$

Оптимізація першого кроку буде проводитись аналогічно другому з тією різницею, що координати вихідної точки маршруту відомі, і управління буде полягати в виборі висоти польоту на першій ділянці H_1 (K варіантів управлінь) і відповідні розрахунки потрібно буде провести для $N_2=K^3$ можливих положень ПТМ-2.

Оцінимо обсяг розрахунків, які необхідно провести при визначенні раціонального маршруту польоту ЗПН з застосуванням динамічного програмування.

На четвертому кроці необхідно провести один розрахунок для кожного з K можливих положень ЗПН в КТМ.

На третьому кроці необхідно провести K розрахунків для кожного з K^3 можливих варіантів положення ПТМ-2, кількість розрахунків показника програшу – K^4 .

На другому кроці – K^2 розрахунків для кожного з K^3 можливих варіантів положення ПТМ-1, оскільки з кожної з K^3 ПТМ-1 ЗПН може переміщуватись в K^2 точок ПТМ-2, що знаходиться з ПТМ-1 одній висоті, кількість розрахунків – K^5 .

На першому кроці – K^3 розрахунків для кожного з K можливих варіантів положення ПТМ-1, оскільки з кожної з вихідного положення ЗПН може переміщуватись в K^3 ПТМ-1 по K варіантам ділянок маршруту (K варіантів висоти H_1), кількість розрахунків при цьому складає K^4 .

Загальна кількість розрахунків складає

$$K_{\text{заг}} = K + K^4 + K^5 + K.$$

Якщо $K = 30$, то $K_{\text{заг}} \approx 2,6 \cdot 10^7$, що вказує на значне зменшення об'єму необхідних обчислень при використанні динамічного програмування. Подальше зменшення об'ємів обчислень можливе за рахунок зменшення кількості інтервалів табулювання невідомих параметрів, а також раціонального вибору положення ПТМ-1 та ПТМ-2.

Висновки

Таким чином, в даній роботі запропонована методика автоматичного визначення оптимальної траєкторії польоту ЗПН до об'єкту удару, що забезпечує мінімум показника – сукупності виграшів (програшів) польоту по даному маршруту. Для визначення оптимальної траєкторії польоту використовується метод динамічного програмування, що дозволяє скоротити об'єм обчислень та реалізувати запропоновану методику у вигляді програми для ПЕОМ.

Наведені в даній роботі результати є складовою методикою визначення варіантів дій повітряного противника, що, в свою чергу, буде використовуватись у методиці вибору раціональної структури системи ППО та її підсистем відповідно до замислу повітряного противника, яка розробляється автором.

Запропонована методика використовує різні допущення, які потрібно підтвердити в ході практичної реалізації. Очевидно, що глибокі теоретичні дослідження необхідно провести для розробки методикою визначення виграшу або програшу від польоту по ділянці маршруту в умовах дії багатьох випадкових факторів.

Вимагає також обґрунтування вибір кроку табуляції невідомих параметрів маршруту. Дослід-

ження, проведені в даній роботі, можуть бути використані при розпізнаванні замислу повітряного противника та при синтезі системи ППО з раціональною структурою, що відповідає замислу повітряного противника. Відповідні дослідження ведуться автором й будуть опубліковані в подальших роботах.

Список літератури

1. Таран І.А. Формулювання задач синтезу раціональної структури системи протиповітряної оборони угруповання військ (сил) та її підсистем віддждвдовплциповідно до замислу дії повітряного противника / І.А. Таран // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 2(19). – С. 27-29.
2. Воздушная навигация / А.М. Белкин, Н.Ф. Мионов, Ю.И. Рублев, Ю.Н. Сарайский. – М.: Транспорт, 1988. – 304 с.
3. Сарайский Ю.Н. Основы навигации и применение геотехнических средств / Ю.Н. Сарайский, И.И. Алешков. – СПб.: СПбГУГА, 2010. – 220 с.
4. Черный М.А. Воздушная навигация / М.А. Черный, В.И. Кораблин. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.
5. Моделирование боевых действий войск (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.
6. Синтез адаптивних структур системи зенітного ракетно-артилерійського прикриття об'єктів і військ та оцінка її ефективності (теорія, практика, тенденції розвитку): моногр. / [А.Я. Торочин, І.О. Кириченко, М.О. Єрмошин, Г.А. Дробаха, М.П. Долина] – Х.: ХВУ, 2006.
7. Венцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология [2-е изд. стер.] / Е.С. Венцель. – М.: Наука, 1988. – 208 с.

Надійшла до редколегії 16.04.2015

Рецензент: д-р військ. наук, проф. Є.Б. Смірнов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І.Кожудуба, Харків.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА СРЕДСТВА ВОЗДУШНОГО НАПАДЕНИЯ К ОБЪЕКТУ УДАРА

И.А. Таран

Предложена методика автоматического определения оптимальной траектории полета средства воздушного нападения к объекту удара, что обеспечивает минимум показателя – совокупности выигрышей (проигрышей) полета по данному маршруту. Используется метод динамического программирования, что позволяет сократить объем вычислений и программно реализовать предложенную методику.

Ключевые слова: траектория полета, средство воздушного нападения, объект удара, динамическое программирование, исходная точка маршрута, конечная точка маршрута, рубеж выполнения задания.

A METHOD FOR DETERMINING THE OPTIMAL FLIGHT PATH OF AIR ATTACK TO STRIKE AN OBJECT

I.A. Taran

In this paper, the method of automatically determining optimal flight path of air attack to strike an object, providing a minimum rate – aggregate winnings (losers) flight on this route. To determine the optimal trajectory using dynamic programming method that reduces the amount of computation and software to implement the proposed methodology.

Keywords: trajectory of flight, mean of air attack, object of blow, dynamic programming, initial point of route, eventual point of route, border of the job processing.