

Д. О. Галінський, Р. В. Куліш

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

МЕТОД МОНІТОРИНГУ СТАНУ СТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИНАМІЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Анотація. Задача маршрутизації безпілотного літального апарату є багатокроковою задачею, що полягає у виборі наступної точки моніторингу серед множини можливих. Оскільки процес прийняття рішень при плануванні маршруту може бути розділений на окремі етапи доцільним є застосування динамічного програмування. В статті розглянуто проблему маршрутизації безпілотного літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів. Принциповою відмінністю розв'язуваної задачі від існуючих методів є припущення про альтернативність управління. Завдання оптимізації вирішується за умови, що всі коефіцієнти функції ризику в правій частині рівняння Белмана залежать від j -го номера обраної альтернативи. Проведений розрахунок польотних ситуацій, що свідчить про необхідність використання спрощеного підходу розрахунку точки польоту, для якого додатково потрібні середні значення ординат ризику.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, маршрутизація, пошук маршруту, моніторинг, стаціонарний об'єкт динамічне програмування, рівняння Белмана.

Вступ

Постановка проблеми. Активний розвиток безпілотних літальних апаратів (БпЛА), технічних та програмних компонент, широка сфера їх застосування вимагає пошуку нових рішень задач, пов'язаних з їх застосуванням. На теперішній час безпілотні системи є невід'ємною частиною будь-якої сфери людської діяльності: військова справа, пошуково-рятувальні місії, сільське господарство, будівництво та ін. Більшість із завдань, що вирішуються прямо чи опосередковано пов'язані із пошуком/моніторингом рухомих та статичних об'єктів земної поверхні.

В свою чергу, підвищення рівня розвитку сучасних інформаційних технологій, спонукає до пошуку алгоритмів побудови систем підтримки прийняття рішень при управлінні БпЛА, а задача маршрутизації БпЛА для пошуку та моніторингу об'єктів є окремою задачею. Планування моніторингу стаціонарних об'єктів вимагає врахування низки факторів та полягає у виборі точки польоту із множини можливих. Розділення задачі на окремі етапи дозволяє застосувати метод оптимізації за принципом Белмана.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі пошуку маршруту польоту безпілотного літального апарату присвячена велика кількість робіт закордонних та вітчизняних авторів. Серед найбільш відомих потрібно відмітити наступних: Gustavo Avellar, Ryan R. Pitre, X. Rong Li, Q. Zhang, M. Jiang, Д.В. Моїсєєв, Н.В. Аллилуєв у працях яких розглянуті питання побудови оптимального маршруту, опису принципів їх роботи та реалізації.

В роботі [1] запропоновано підхід планування маршруту для спільних місій БпЛА з пошуку та відстеження об'єктів. Для оптимізації маршруту руху БпЛА використано модифікований алгоритм оптимізації рою частинок та цільовою функцією, для визначення траєкторії. Алгоритм опирається на визначення траєкторії, якає найкращою для виявлення

та відстеження цілі враховуючи поточне місце БпЛА.

В робота [2] присвячена маршрутизації БпЛА для мереж бездротових датчиків. Маршрут БпЛА визначається шляхом послідовного коригування розташування кожного БпЛА на основі аналізу стану енергії датчика на основі діаграми Вороного. Для пошуку оптимального рішення запропоновано використання методу визначення початкового маршруту БпЛА з урахуванням енергії датчиків.

В роботі [3] використовуючи динамічне програмування вирішена задача оптимального маршруту двох БпЛА при пошуку рухомої цілі. Запропонований в роботі підхід дозволяє скоординувати управління БпЛА мінімізуючи помилки геолокації.

У роботі [4] представлено розроблене програмне забезпечення METPASS для планування та аналізу траєкторій польоту БпЛА з урахуванням метеорологічних даних. METPASS дозволяє оптимізувати порядок виконання місій БпЛА враховуючи: оптимальну траєкторію розміщення на тривимірній сітці для точок відправлення та прибуття в основі якої покладено застосування підходу динамічного програмування та функції вартості, яка враховує екологічні небезпеки вітру, польоту.

В роботі [5] розроблено метод автоматизованого планування маршрутів БпЛА з урахуванням порядку виявлення стаціонарних об'єктів. Ранжування об'єктів пошуку здійснено за важливістю. В основу зміни маршрутів польоту БпЛА використовується базове поняття теорії симплексів – симпліційний аналіз.

В роботі [6] розроблено метод автоматизованого планування маршрутів пересування безпілотних транспортних засобів заснований на мурашиному алгоритмі. Метод дозволяє за вхідними даними у вигляді мінімальної та максимальної швидкостей руху безпілотного транспорту, координат початку руху, координат точок зупинок, координати кінцевої точки та обмежень у часі одержувати вихідні дані в вигляді послідовного списку відвідування точок, на

який затрачується найменше часу з врахуванням мінімальної та максимальної швидкості безпілотно-го транспортного засобу.

Низка робіт [7, 8, 9, 10] доводить переваги динамічного програмування для вирішення задач оптимізації, зокрема для задач планування.

Метою статті вирішення задачі пошуку маршруту польоту безпілотно-го літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів методом динамічного програмування.

Виклад основного матеріалу

Вирішення задачі маршрутизації безпілотно-го літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів за допомогою динамічного програмування. скільки маршрут БпЛА, що обирається, є результатом багатокрокового вибору чергового пункту, а прийняття рішення на кожному кроці крім поточного штрафу у вигляді втраченого часу ще має наслідки для майбутніх кроків, найбільш ефективним методом оптимізації є динамічне програмування [11]. Враховуючи дискретний характер альтернативних рішень при виборі елементів об'єктів моніторингу, рівняння Белмана у часткових похідних можна записати як:

$$-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = \min_j \left\{ f_{0j} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} \dot{x}_j + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \dot{z}_j + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \alpha} \dot{\alpha}_j \right\} =$$

$$= \min_j \left\{ f_{0j} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} \frac{x_j - x}{r_j} V + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \frac{z_j - z}{r_j} V + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \alpha} \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} V \right\} = \quad (1)$$

$$= F_j\{x, z, \alpha\},$$

де \mathcal{E} - функція Белмана, F_j - функція поточного ризику з урахуванням наслідків у майбутньому, j - номер пункту, що вибирається в поточний момент часу, r_j - відстань між БПЛА і j -м об'єктом, V - швидкість БПЛА, x_j, z_j - координати у об'єкта, x, z - координати БпЛА, α - курсовий кут БпЛА. Наприклад, це може бути або пункт попереду у напрямку польоту ($j = 1$), ззаду ($j = 2$), зліва ($j = 3$) або праворуч ($j = 4$), як наведено на рис. 1.

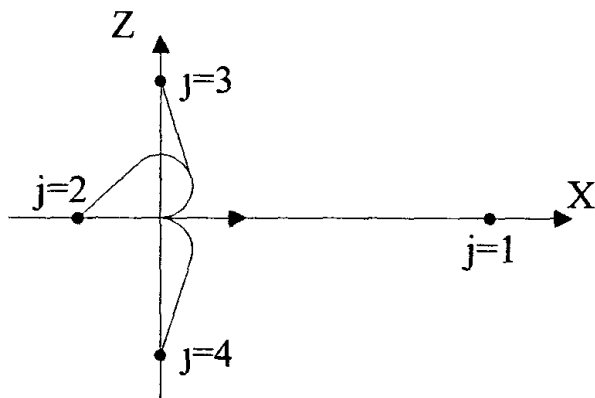


Рис. 1. Розташування пунктів в околиці БпЛА, що мають приблизно однакову довжину шляху, що в районі досяжності

Принциповою відмінністю розв'язуваної задачі від прийнятого в існуючих методах припущення про безперервність управління є те, що управління є альтернативним (зокрема, відповідно до рис. 1, $j = 1, 2, 3, 4$).

Тому для наближеного управління скористаємося підходом [12], заснованому на обчисленні функції мінімального ризику F_j для різних альтернатив у ситуаціях, близьких до меж перемикання при відхиленнях «ліворуч і праворуч» від робочої точки, в якій не можна віддати перевагу жодній альтернативі. Відповідно до цього методу, обчислення цих функцій ризику, званих ординатами ризику C_i здійснюється спочатку шляхом подання функції Белмана статичним рядом

$$\varepsilon(\bar{x}_n, \tau) = \alpha(\tau) + \sum_{l=1}^n \beta_l(\tau) x_l +$$

$$+ \sum_{l=1}^n \gamma_l(\tau) \frac{x_l^2}{2} + \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{k=l+1}^n \psi_{lk}(\tau) x_l x_k, \quad (2)$$

де $\varepsilon(\bar{x}_n, \tau)$ - функція - Белмана, $\alpha(\tau), \beta_l(\tau), \gamma_l, \psi_{lk}$ - коефіцієнти полінома, x_j - j -й елемент вектора координат x_n .

Незалежно від значень вихідних даних розв'язуваної задачі, функції ризику $F_j(\bar{x}_n, \tau)$ видаються поліномами того самого порядку, що і функція Белмана $\varepsilon(\bar{x}_n, \tau)$, а ординати ризику:

$$c_i^- = \min_j \{F_j(\bar{x}_p - \Delta x_i)\};$$

$$c_i^+ = \min_j \{F_j(\bar{x}_p + \Delta x_i)\};$$

$$c_{il}^{++} = \min_j \{F_j(\bar{x}_p + \Delta x_i + \Delta x_l)\}.$$

і коефіцієнти $\beta_l, \gamma_l, \psi_{lk}$ обчислюються в припущенні очевидної переваги однієї альтернативи перед іншими в окремих точках простору стану, наприклад, у середині інтервалу x_{pl} , а також на лівій та правій межах інтервалу можливих значень змінних x_l .

На відміну від випадку відкритої області управління $u(\tau)$ завдання оптимізації вирішується за умови, що всі коефіцієнти функції ризику в правій частині рівняння Белмана залежать від j -го номера обраної альтернативи, а мінімізація функціонала здійснюється апроксимацією множини функцій ризику F_j , що перетинаються, одним статичним поліномом. Для чого використовується метод робочої точки. Це дозволяє записати систему диференціальних рівнянь щодо шуканих коефіцієнтів апроксимації $\alpha(\tau), \beta_l(\tau), \gamma_l(\tau), \psi_{lk}(\tau)$, визначити значення цих коефіцієнтів, що встановилося, при асимптотичній поведінці оптимальної системи і довести рішення задачі до кінця, якщо прирівняти ординати ризику один одному.

$$C_0 = c_i^+ = c_i^- = c_{ik}^\pm. \quad (3)$$

Обчислення ординат мінімального ризику у різних польотних ситуаціях. Попередні дослідження показали, що стосовно даної задачі подання функції Белмана є у квадратичній формі недостат-

ньо, щоб отримати адекватний опис. Тому була взята наступна апроксимація:

$$\varepsilon = \alpha + \beta_1 x + 0,5\gamma_1 x^2 + \beta_2 z + 0,5\gamma_2 z^2 + \beta_3 \alpha + 0,5\gamma_3 \alpha^2 + \psi_{12} xz + \psi_{13} x\alpha + \psi_{23} z\alpha + \lambda xz\alpha, \quad (4)$$

де $\beta_l, \gamma_l, \psi_{lk}, \lambda$ – коефіцієнти, а останній доданок $\lambda xz\alpha$ містить добуток трьох змінних. Отримавши значення $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}$ виразу 4 і підставивши в до виразу 2, отримаємо у вигляді формулу для обчислення функції ризику $F_j(x, z, \alpha)$:

$$F_j = \frac{r_j}{V\Delta t} + (\beta_1 + \gamma_1 x + \psi_{12} z + \psi_{13} \alpha + \lambda z\alpha) \frac{x_j - x}{r_j} V + (\beta_2 + \gamma_2 z + \psi_{12} x + \psi_{23} z + \lambda x\alpha) \frac{z_j - z}{r_j} + (\beta_3 + \gamma_3 \alpha + \psi_{13} x + \psi_{23} z + \lambda xz) \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} = (5)$$

$$= \frac{r_j}{V\Delta t} + (\beta_1 + \gamma_1 x + \psi_{12} z + \psi_{13} \alpha + \lambda z\alpha) \frac{\Delta x_j}{r_j} V + (\beta_2 + \gamma_2 z + \psi_{12} x + \psi_{23} z + \lambda x\alpha) \frac{\Delta z_j}{r_j} V + (\beta_3 + \gamma_3 \alpha + \psi_{13} x + \psi_{23} z + \lambda xz) \frac{\Delta \alpha_j}{r_j} V,$$

де $\Delta x_j = x_j - x, \Delta z_j = z_j - z, \Delta \alpha_j = \alpha_j - \alpha$ – збільшення координат векторapotочний стан динамічної системи.

Тепер можна приступити до обчислення ординат ризику, поставивши в якості робочої точки положення БПЛА, представлене на рис. 1, коли відстань до пунктів 1,2,3,4 обрано таким чином, що вони приблизно однакові, і не можна віддати перевагу жодній з альтернатив.

При даних припущеннях координати робочої точки дорівнюють $x = x_0; z = z_0; \alpha = 0$, авідстань r_j між БПЛА та пунктами були взяті кратними мінімальному радіусу R , дорівнює: $r_1 = 8R, r_2 = R, r_3 = r_4 = 3R$. Це дозволяє обчислитипершу ординату C_0 як середнє значення з 4 функцій ризику, що виникаютьпри перельоті БПЛА у різних напрямках.

$$C_0 = 0,2\beta_l + 0,2x_0\gamma_l + 0,2z_0\psi_{l2} + \frac{5,8R}{V^2\Delta t}. \quad (6)$$

Тепер розглянемо польотні ситуації за відхилень від робочої точки. При $x = x_0 + \Delta x_1 = x_0 + R$ мінімальний штраф буде при польоті ЛА пункт 1, а за $x = x_0 + \Delta x_2 = x_0 - 9R$ краще летіти в пункт 2, тому

$$c_1^+ = \min_j F_j \left(\begin{matrix} x = x_0 + R \\ z = z_0 \\ \alpha = 0 \end{matrix} \right) = (x_0 + R)\gamma_1 + z_0\psi_{12} + \frac{7R}{V^2\Delta t};$$

$$c_1^- = \min_j F_j \left(\begin{matrix} x = x_0 + 9R \\ z = z_0 \\ \alpha = 0 \end{matrix} \right) = \beta_1 + (x_0 - 9R)\gamma_1 + z_0\psi_{12} + \frac{8R}{V^2\Delta t}. \quad (7)$$

Різні за модулем відхилення Δx_1 і Δx_2 були взяті для того, щоб напрямком польоту ЛА було однаково - вперед. Ілюстрація польотних ситуацій представлена на рис. 2, 3.

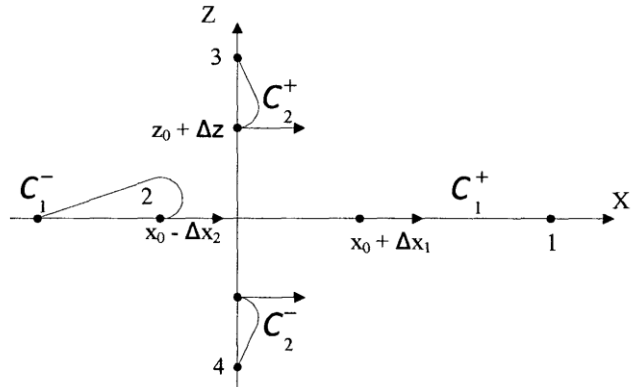


Рис. 2. Ілюстрація польотних ситуацій при почергових відхиленнях щодо та z від робочої точки

Розглянемо відхилення Δz по другій координаті z . При $z = z_0 + \Delta z$ мінімальний шлях БПЛА буде при польоті до пункту 3, а при $z = z_0 - \Delta z$ – при польоті до пункту 4.

Тому при $\Delta z = R$ отримаємо:

$$c_2^+ = \min_j F_j \left(\begin{matrix} x = x_0 \\ z = z_0 + R \\ \alpha = 0 \end{matrix} \right) = 0,8x_0\psi_{12} + 0,8\beta_2 + 0,8(z_0 + R)\gamma_2 + \frac{0,55}{R}\beta_3 + \frac{0,55x_0}{R}\psi_{13} + \frac{0,55(z_0 + R)}{R}\psi_{23} + \frac{0,55x_0(z_0 + R)}{R}\lambda + \frac{3,7R}{V^2\Delta t};$$

$$c_2^- = \min_j F_j \left(\begin{matrix} x = x_0 \\ z = z_0 - R \\ \alpha = 0 \end{matrix} \right) = -0,8x_0\psi_{12} - 0,8\beta_2 - 0,8(z_0 - R)\gamma_2 - \frac{0,55}{R}\beta_3 - \frac{0,55x_0}{R}\psi_{13} - \frac{0,55(z_0 - R)}{R}\psi_{23} - \frac{0,55x_0(z_0 - R)}{R}\lambda + \frac{3,7R}{V^2\Delta t}. \quad (8)$$

Ілюстрація для оцінок ординат c_2^+ та c_2^- також представлена на рис. 2. Далі, задавшись відхиленнями α , при $\Delta \alpha = \pm \pi/2$ отримаємоочевидний вибір альтернатив польоту, як показано на рис. 3, при досягненні пунктів 3 та 4.

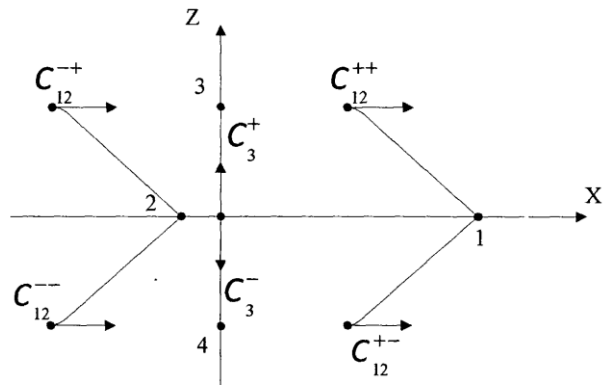


Рис. 3. Ілюстрація польотних ситуацій при відхиленні α і попаданні в пункти 3 та 4 і попарних відхиленнях по x та z при попаданні в пункти 1 та 2

При $\Delta\alpha = \pi/2$ потрібно летіти в пункт 3, при $\Delta\alpha = -\pi/2$ в пункт 4, і це забезпечить мінімальний час польоту.

Тому ординати c_3^+ та c_3^- рівні:

$$c_3^+ = x_0\psi_{12} + \beta_2 + z_0\gamma_2 + \frac{\pi}{2}(\psi_{23} + x_0\lambda) + \frac{4R}{V^2\Delta t};$$

$$c_3^- = -\left[x_0\psi_{12} + \beta_2 + z_0\gamma_2 + \frac{\pi}{2}(\psi_{23} + x_0\lambda)\right] + \frac{4R}{V^2\Delta t}.$$

Тепер потрібно попарними відхиленнями координат системи і, як показано на рис. 2 та 4 число польотних ситуацій збільшується вдвічі. Так при відхиленнях по x і z виникають 4 ситуації, для яких очевидна перевага перельоту в пункт 1 при $x = x_0 + \Delta x_1$ і в пункт 2 при $x = x_0 + \Delta x_2$.

Зокрема, за $x = x_0 + R$; $z = z_0 + 3R$ отримаємо:

$$c_{12}^{++} = 0,97\beta_1 - 0,14\beta - \frac{0,02}{R}\beta_3 + 0,97 \times$$

$$\times (x_0 + R)\gamma_1 - 0,14(z_0 + R) + 0,97z_0\psi_{12} -$$

$$- \frac{0,02}{R}(x_0 + R)\psi_{13} - \frac{0,02}{R}(z_0 + R)\psi_{23} -$$

$$- 0,02(x_0 + R)\lambda + \frac{7,2R}{V^2\Delta t}.$$

Аналогічним чином можна надійти в оцінці ординат мінімального ризику C_{13} під час розгляду 4 ситуацій, показаних на рис. 4.

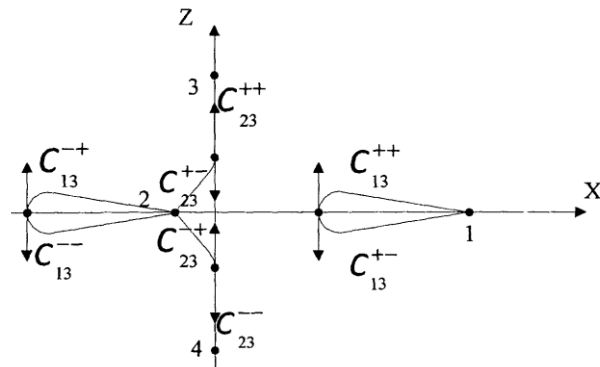


Рис. 4. Ілюстрація польотних ситуацій при попарних відхиленнях α і x і відповідно $-\alpha$ і z

У цих випадках краще летіти до пункту 2, якщо $x = x_0 - \Delta x_2$ і до пункту 1, якщо $x = x_0 + \Delta x_1$. Тому отримуємо, зокрема, при $x = x_0 + R$, $\Delta\alpha = \pi/2$ оцінку c_{13}^{++} мінімального ризику у вигляді:

$$c_{13}^{++} = 0,87\beta_1 - \frac{0,225}{R}\beta_3 + 0,87(x_0 + R)\gamma_1 -$$

$$- \frac{0,35}{R}\gamma_3 + 0,87z_0\psi_{12} - \left(1,145 + 0,225\frac{x_0}{R}\right)\psi_{13} -$$

$$- 0,225\frac{z_0}{R}\psi_{23} + \left(1,145 + 0,225\frac{x_0}{R}\right)z_0\lambda + \frac{8R}{V^2\Delta t}.$$

При попарних відхиленнях α і z також виникають 4 ситуації, ілюстровані на рис 5, причому:

в пункт 2 краще летіти при $z = z_0 + R$, $\Delta\alpha = -\pi/2$ і $z = z_0 + R$, $\Delta\alpha = \pi/2$,

в пункт 3 – при $z = z_0 + R$, $\Delta\alpha = \pi/2$,

в пункт 4 – при $z = z_0 - R$, $\Delta\alpha = -\pi/2$.

Тому ординати ризику C_{23} рівні:

$$c_{23}^{++} = \beta_2 + (R + z_0)\gamma_2 +$$

$$+ x_0\psi_{12} + \frac{\pi}{2}\psi_{23} + \frac{x_0\pi}{R}\lambda + \frac{3R}{V^2\Delta t};$$

$$c_{23}^{--} = -\beta_2 + (R - z_0)\gamma_2 - x_0\psi_{12} +$$

$$+ \frac{\pi}{2}\psi_{23} + \frac{x_0\pi}{R}\lambda + \frac{3R}{V^2\Delta t};$$

$$c_{23}^{\pm} = -\frac{2}{\pi}\beta_1 - \frac{2}{\pi}\beta_2 - \frac{1}{R}\beta_3 - \frac{2x_0}{\pi}\gamma_1 -$$

$$- \frac{2}{\pi}(z_0 + R)\gamma_2 + \frac{\pi}{2R}\gamma_3 - \frac{2}{\pi}\psi_{12} \times$$

$$\times (z_0 + x_0 + R) + \left(1 - \frac{x_0}{R}\right)\psi_{13} - \frac{z_0}{R}\psi_{23} +$$

$$+ \left(z_0 + R - \frac{x_0z_0}{R}\right)\lambda + \frac{\pi}{2}\frac{R}{V^2\Delta t};$$

$$c_{23}^{\mp} = -\frac{2}{\pi}\beta_1 + \frac{2}{\pi}\beta_2 - \frac{1}{R}\beta_3 - \frac{2x_0}{\pi}\gamma_1 + (z_0 - R) \times$$

$$\times \frac{2}{\pi}\gamma_2 + \frac{\pi}{2R}\gamma_3 - \frac{2}{\pi}(z_0 - x_0 - R)\psi_{12} - \left(1 - \frac{x_0}{R}\right) \times$$

$$\times \psi_{13} + \frac{z_0}{R}\psi_{23} - \left(z_0 + R - \frac{x_0z_0}{R}\right)\lambda + \frac{\pi}{2}\frac{R}{V^2\Delta t}.$$

Залишилося розглянути останній випадок одночасно трьох можливих відхилень $\Delta x, \Delta z, \Delta\alpha$, яким відповідає 8 можливих комбінацій, показаних на рис. 5.

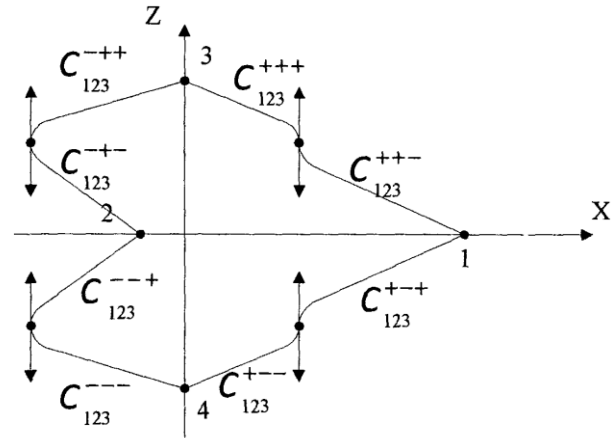


Рис. 5. Ілюстрація 8 польотних ситуацій при одночасному відхиленні по x, z та α від робочої точки

Зокрема, при

$$x = x_0 + R; z = z_0 + R; \Delta\alpha = \pi/2$$

потрібно летіти в пункт 3, і відповідно ордината ризику c_{123}^{+++} дорівнює:

$$c_{123}^{+++} = -0,44\beta_1 + 0,88\beta_2 + \frac{0,22}{R}\beta_3 -$$

$$- 0,44(x_0 + R)\gamma_1 + 0,88(x_0 + R)\gamma_2 + \frac{0,34}{R}\gamma -$$

$$- (0,44z_0 + 0,88x_0 + 0,44R)\psi_{12} +$$

$$+ \left(\frac{0,22x_0}{R} - 0,46\right)\psi_{13} + \left(\frac{0,22z_0}{R} - 1,6\right)\psi_{23} +$$

$$+ \left(\frac{0,22x_0z_0}{R} - 0,5z_0 + 1,64x + 0,93R\right)\lambda + \frac{2,3R}{V^2\Delta t}.$$

Таким чином, якщо проаналізувати всі розглянуті вище польотні ситуації, то можна побачити, що всього виходить 27 різних ординат, а прирівнювання їх один одному для оцінки 10 шуканих коефіцієнтів $\beta_1, \gamma_1, \psi_{1k}, \lambda$ функції Белмана представляє важко осяжне число систем рівнянь, дорівнює кількості поєднань C_{27}^{10} .

Тому був використаний спрощений підхід, для якого додатково потрібні так звані «середні» ординати ризику C_{13} і C_{23} обчислені за формулами:

$$\begin{aligned} C_{13} &\approx 0,25(c_{13}^{++} + c_{13}^{\pm} + c_{13}^{\bar{+}} + c_{13}^{\bar{-}}); \\ C_{23} &\approx 0,25(c_{23}^{++} + c_{23}^{\pm} + c_{23}^{\bar{+}} + c_{23}^{\bar{-}}). \end{aligned} \quad (12)$$

Отже, спрощений підхід дозволяє визначити середні значення ординат ризику необхідні для розрахунку польотних ситуацій.

Висновки

Задача побудови маршруту БПЛА є багатокроковою та потребує від оператора вибору наступної

точки польоту зважаючи на польотну ситуацію. Для вирішення задачі оптимізації введена система штрафів - прийняття рішення на кожному кроці, крім поточного, накладається штраф у вигляді втраченого часу, що має наслідки для майбутніх кроків, а отже справедливим є припущення, що управління БПЛА є альтернативним.

В статті вирішена задача планування маршруту польоту БПЛА із застосуванням динамічного програмування за принципом Белмана. Завдання оптимізації вирішується за умови, що всі коефіцієнти функції ризику в правій частині рівняння Белмана залежать від j -го номера обраної альтернативи.

Проведений розрахунок польотних ситуацій, що свідчить про необхідність використання спрощеного підходу розрахунку точки польоту, для якого додатково потрібні середні значення ординат ризику.

Отже, часткова задача маршрутизації безпілотного літального апарату для моніторингу стаціонарних об'єктів є вирішеною.

Список літератури

1. UAV route planning for joint search and track missions—An information-value approach / Ryan R., Rong Li, R. Delbalzo // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.—2012.—№48.— С. 2551-2565.
2. Energy-efficient UAV routing for wireless sensor networks / B.Jaeuk, S. Ik Han, Y. Han // IEEE Transactions on Vehicular Technology.— 2019.—Vol.69, No2.— p.1741-1750.
3. Optimal UAV coordination for target tracking using dynamic programming / Quintero S. A., Papi F., Klein D. J., Chisci L., Hespanha J. P. // IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2010, December. — pp. 4541-4546.
4. Meteorological path planning using dynamic programming for a solar-powered UAV / Wirth L., Oettershagen P., Ambühl J., Siegwart R. // 2015 IEEE aerospace conference, 2015, March, 2015— P. 1-11.
5. Метод автоматизованного планування маршрута безпілотного летального апарату с учетом выявления стационарных объектов / Бережний А.О., Крижанівський І.М., Барабаш О.В.// Телекомунікаційні та інформаційні технології.—2019.—№4.—С. 90-98.
6. Метод використання мурашиного алгоритму для автоматизованого планування маршрутів пересування безпілотних транспортних засобів /Мельник А.В. // The 10th International scientific and practical conference :Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions, November 29-December 2022.—Bilbao, Spain, 2022.— 606 p.
7. О решении задачи оптимизации методом динамического программирования /Аблялимов О.С. // Universum: технические науки.—2020.—№9-1.—78 С.
8. Элементы динамического программирования в экстремальных задачах маршрутизации / Ченцов А.А., Ченцов П.А. // Проблемы управления.— 2013.—№5.—С.12-21.
9. Dynamic routing-and-inventory problems: a review / B. Flavio // Transportation Research Part A: Policy and Practice.— 1998.—P. 585-598
10. Dynamic routing of bandwidth guaranteed tunnels with restoration / K. Murali, T. V. Lakshman. // Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2000.— Vol. 2.— P.902-911.
11. Applied dynamic programming / Bellman Richard E., Stuart E. Dreyfus //Princeton university press, 2015.—Vol. 2050.
12. Dynamic programming and minimum risk paths / Serafini, P.// European Journal of Operational Research, 2006.— №175(1).— P.224-237.

Received (Надійшла) 17.01.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.03.2023

Method of monitoring the condition of stationary elements of critical infrastructure objects by uavs using dynamic programming

D. Galinskiy, R. Kulish

Abstract. The task of routing an unmanned aerial vehicle is a multi-step task consisting in choosing the next monitoring point among many possible ones. Since the decision-making process in route planning can be divided into separate stages, it is advisable to use dynamic programming. The article considers the problem of routing an unmanned aerial vehicle for monitoring stationary objects. The fundamental difference between the problem being solved and the existing methods is the assumption of alternative control. The optimization task is solved under the condition that all coefficients of the risk function on the right side of the Belman equation depend on the j -ro number of the chosen alternative. Flight situations have been calculated, which indicates the need to use a simplified approach for calculating the flight point, which additionally requires average values of risk ordinates.

Keywords: unmanned aerial vehicle, routing, route search, monitoring, stationary object, dynamic programming, Belman equation.