

УДК 656.7.084:519.857:656.7.052(045)

¹В.П. Харченко, д.т.н., проф.
²Д.В. Васильєв, асп.

РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ МІЖ ПОВІТРЯНИМИ КОРАБЛЯМИ МАНЕВРУВАННЯМ КУРСОМ ПОЛЬОТУ

Національний авіаційний університет

¹E-mail: kharch@nau.edu.ua²E-mail: d_vasyliiev@ukr.net

Розглянуто метод оптимального розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями маневруванням курсом польоту при кооперативному керуванні повітряним рухом. Запропонований метод з урахуванням різних обмежень забезпечує планування безконфліктної траєкторії польоту з мінімальною відстанню.

The method for optimal aircraft conflict resolution by course maneuvering at Cooperative Air Traffic Management is considered. Proposed method provides planning of conflict-free trajectory with minimum length in accordance with different limitations.

Рассмотрен метод оптимального разрешения конфликтных ситуаций между воздушными судами маневрированием курсом полета при кооперативном управлении воздушным движением. Предложенный метод с учетом разных ограничений обеспечивает планирование бесконфликтной траектории полета с минимальным расстоянием.

Постановка проблеми

Збільшення обсягів авіаційних перевезень вимагає проведення модернізації системи організації повітряного руху шляхом підвищення ефективності виконання польотів із забезпеченням необхідного рівня безпеки.

Використання кооперативного керування повітряним рухом (ККПР) та режиму «Free Flight» дозволить екіпажам літаків виконувати польоти за довільними траєкторіями та забезпечить оптимізацію їх взаємодії з диспетчерами керування повітряним рухом (КПР).

Підвищення інтенсивності повітряного руху безпосередньо впливає на збільшення кількості конфліктних ситуацій, що виникають між повітряними кораблями (ПК) під час польоту. Це вимагає створення нових методів виявлення та розв'язання конфліктних ситуацій, зокрема таких, що враховують різні оптимізаційні критерії при визначенні маневрів з усунення потенційних конфліктів.

Нові методи оптимального розв'язання конфліктних ситуацій повинні забезпечувати планування безконфліктних траєкторій

польоту ПК у режимі реального часу з урахуванням особливостей використання ККПР.

Аналіз досліджень і публікацій

Методи розв'язання конфліктних ситуацій можна поділити на такі:

- методи, в яких конфлікт вирішується знаходженням траєкторій польоту, що забезпечують тільки безпечні відстані між ПК;
- оптимізаційні методи, в яких при пошуку маневрів з усунення конфліктних ситуацій задаються критерії оптимальності.

Аналіз існуючих оптимізаційних методів розв'язання конфліктних ситуацій [1; 2; 3] показує, що метод, який використовує теорію ігор, недоцільно застосовувати для оперативного усунення конфлікту.

Метод, що використовує теорію роботів, та метод розв'язання конфліктних ситуацій під час польоту в режимі «Free Flight» мають складні і неефективні обчислювальні алгоритми.

Мета роботи – розроблення методу оптимального розв'язання конфліктних ситуацій при ККПР.

Метод оптимального розв'язання конфліктних ситуацій

Постановка задачі оптимального розв'язання конфліктних ситуацій, що виникають між ПК, які виконують політ на одному ешелоні по трасах, що перетинаються, наводиться за умови, що в зоні польотів здійснюється ККПР.

Задачею оптимального розв'язання конфліктних ситуацій при ККПР є визначення маневрів ПК для гарантованого усунення конфлікту та повернення на попередньо заплановану траєкторію польоту з урахуванням обраних критеріїв оптимальності та наявних обмежень.

Застосування ККПР, яке базується на використанні цифрової лінії передачі даних між ПК і системою ККПР та інтеграції даних про повітряний рух, дозволяє в режимі реального часу визначати та передавати програму оптимального керування польотом для розв'язання конфліктних ситуацій до бортової системи керування ПК.

Послідовність розв'язання конфліктної ситуації одним із ПК складається з трьох фаз (рис. 1):

- фаза 1: маневрування курсом для усунення конфлікту;
- фаза 2: вихід та політ за паралельною лінією шляху (ПЛШ);
- фаза 3: вихід на лінію заданого шляху (ЛЗШ).

Критеріями оптимальності для кожної фази розв'язання конфліктної ситуації є:

- фаза 1: безпечна мінімальна відстань між ПК;
- фаза 2: мінімізація відхилень від початкового курсу польоту;
- фаза 3: мінімізація відхилень від ЛЗШ.

Обрані критерії оптимальності забезпечують мінімізацію відстані безконфліктної траєкторії польоту.

Аналіз та прогнозування повітряної обстановки, виявлення потенційних конфліктних ситуацій, прийняття рішень виконуються в дискретні моменти часу.

Отже, розв'язання конфліктної ситуації можна розглядати як послідовний багатоетапний процес прийняття рішень.

Декомпозиція процесів розв'язання конфліктів на етапи дозволяє застосовувати динамічне програмування для оптимального розв'язання конфліктних ситуацій маневруванням курсом польоту [4].

Літак, який здійснює маневрування з усунення конфлікту, є динамічною системою S , стан якої змінюється та на i -му етапі для фіксованого моменту часу t_i приймає одне зі значень із множини S_i .

Процес планування маневрів розглядається на часовому інтервалі $[t_0, t_A]$, де t_0 – момент виявлення конфліктної ситуації, t_A – момент виходу ПК, який маневрує, з зони ККПР.

Декомпозиція загальної задачі на етапи проводиться за часовим критерієм із заданим кроком дискретизації Δt .

Процес розв'язання конфліктної ситуації поділено на фази. Кожна фаза об'єднує декілька етапів розв'язання задачі.

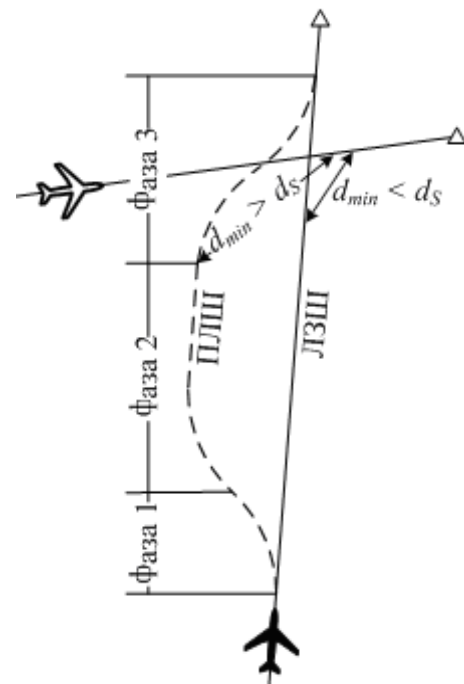


Рис. 1. Розв'язання конфліктної ситуації маневруванням курсом польоту

Фаза 1 починається з моменту виявлення конфліктної ситуації t_0 та закінчується в момент t_s , коли прогнозована найменша відстань між ПК d_{\min} стане більшою граничного значення d_s ($d_{\min} > d_s$).

Фаза 2 починається з моменту t_s та закінчується в момент найбільшого зближення ПК t_{\min} .

Фаза 3 починається з моменту t_{\min} та закінчується в момент t_A виходу ПК з зони КПР.

Для кожного i -го етапу розв'язання задачі визначаються:

1) множина керувань U_i – зміни кута розвороту ПК;

2) множина станів системи S_i – кути розвороту $\Delta\psi$, на які ПК змінює курс у результаті дії керувань.

На керування можуть накладатися обмеження за порушенням:

- норм бокового ешелонування з іншими ПК, що знаходяться в зоні КПР;
- правил використання повітряного простору.

Керування буде належати до множини допустимих $U_i \in U_{\text{дон}}$, якщо під його дією ПК не порушить встановлені вимоги до маневрування.

Підзадача оптимального планування маневрів з усунення конфліктних ситуацій (фаза 1) формулюється так. Із множини можливих керувань знайти такі, які переведуть ПК з початкового стану (конфлікт виявлено) в кінцевий (конфлікт усунено) таким чином, що прогнозована мінімальна відстань між ПК набуде безпечного значення [4].

Рекурентне рівняння для знаходження оптимального керування U_i^* на i -му етапі фази 1 для стану S_i має вигляд [4]:

$$W_i(S_i) = d_{\min}(S_i) = \max_{U_i} \{ \Delta d_{\min}(S_{i-1}, U_i) + d_{\min}(S_{i-1}) \} = \max_{U_i} \{ d_{\min}(S_{i-1}, U_i) \},$$

$$t_i \in [t_0; t_s],$$

де $d_{\min}(S_i)$ – максимальне значення прогнозованої мінімальної відстані між ПК для стану S_i ;

$\Delta d_{\min}(S_{i-1}, U_i)$ – зміна значення прогнозованої мінімальної відстані між ПК у разі переходу від стану S_{i-1} до стану S_i при керуванні U_i ;

$d_{\min}(S_{i-1}, U_i)$ – прогнозоване значення мінімальної відстані під час керування U_i .

Прогнозування мінімальної відстані d_{\min} проводиться відносно координат ПК $x(t_i + \tau_n), y(t_i + \tau_n)$, які він буде мати в момент виходу на ПЛШ (рис. 2).

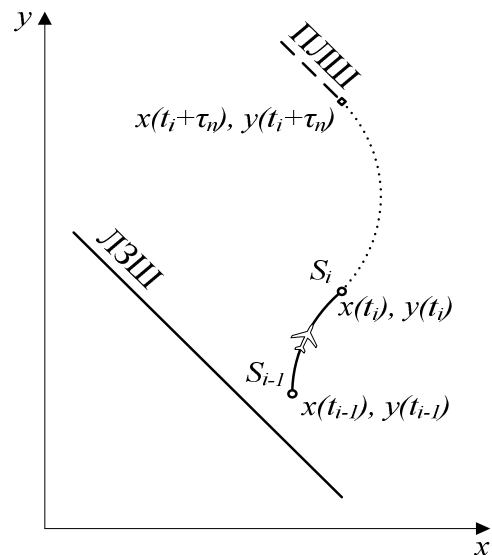


Рис. 2. Прогнозування точки виходу на ПЛШ

Підзадача оптимального планування маневрів із виходу та польоту за ПЛШ (фаза 2) формулюється так. Із множини можливих керувань знайти такі, які переведуть ПК з початкового стану (конфлікт усунено) в кінцевий (ПК знаходяться в безконфліктній точці найбільшого зближення) таким чином, що відхилення від початкового курсу польоту набуде мінімального значення.

Рекурентне рівняння для знаходження оптимального керування U_i^* на i -му етапі фази 2 для стану S_i має вигляд:

$$W_i(S_i) = \phi(S_i) = \min_{U_i} \{ \Delta\phi(S_{i-1}, U_i) + \\ + \phi(S_{i-1}) \} = \min_{U_i} \{ \phi(S_{i-1}, U_i) \}, \\ t_i \in (t_s; t_{\min}],$$

де $\phi(S_i)$ – мінімальне значення відхилення від початкового курсу польоту для стану S_i ;

$\Delta\phi(S_{i-1}, U_i)$ – зміна значення відхилення від початкового курсу польоту у разі переходу від стану S_{i-1} до стану S_i при керуванні U_i ;

$\phi(S_{i-1}, U_i)$ – відхилення від початкового курсу польоту при керуванні U_i .

Підзадача оптимального планування маневрів з повернення на ЛЗШ (фаза 3) формулюється так. Із множини можливих керувань знайти такі, які переведуть ПК з початкового стану (ПК знаходяться у безконфліктній точці) в кінцевий (ПК вийшов із зони КНР) таким чином, що забезпечиться лінійне бокове відхилення від ЛЗШ з мінімальним значенням.

Рекурентне рівняння для знаходження оптимального керування U_i^* на i -му етапі фази 3 для стану S_i має вигляд:

$$W_i(S_i) = z(S_i) = \min_{U_i} \{ \Delta z(S_{i-1}, U_i) + \\ + z(S_{i-1}) \} = \min_{U_i} \{ z(S_{i-1}, U_i) \}, \\ t_i \in (t_{\min}; t_A],$$

де $z(S_i)$ – мінімальне значення лінійного бокового відхилення від ЛЗШ для стану S_i ;

$\Delta z(S_{i-1}, U_i)$ – зміна значення лінійного бокового відхилення від ЛЗШ у разі переходу від стану S_{i-1} до стану S_i при керуванні U_i ;

$z(S_{i-1}, U_i)$ – значення лінійного бокового відхилення від ЛЗШ при керуванні U_i .

Визначення лінійного бокового відхилення z проводиться відносно координат ПК, які він буде мати в момент виходу на початковий курс польоту ψ_0 .

За результатами розв'язання задачі пошуку оптимальних маневрів формується множина оптимальних керувань курсом польоту U^* та відповідна множина оптимальних станів S^* .

Моделювання конфліктної ситуації

Дослідження запропонованого методу оптимального розв'язання конфліктних ситуацій проведено комп'ютерним моделюванням конфліктної ситуації [5].

Дані, за якими моделювалася конфліктна ситуація, що виникає між двома ПК, які виконують політ на одному ешелоні, наведено в таблиці.

Дані для моделювання конфліктної ситуації

| Параметр | ПК1 | ПК2 |
|--|--------|--------|
| Курс ψ , град | 10 | 80 |
| Крейсерська швидкість V_c , м/с | 200 | 250 |
| Початкові координати $(x_0; y_0)$, км | (50;0) | (0;45) |
| Відстань до точки виходу з зони КНР s_0 , км | 100 | 100 |

Приймалося стандартне значення безпечної мінімальної відстані $d_s = 9,26$ км (5 морських миль).

Час до найбільшого зближення між ПК t_{\min} та відстань між ними d_{\min} в цей момент визначено виразами [6]:

$$t_{\min} = \frac{dV_{\text{збл}}}{V_{\text{від}}^2}; \\ d_{\min} = \frac{dV_{\text{н}}}{V_{\text{від}}},$$

де $V_{\text{збл}}$ – швидкість зближення, яка дорівнює складовій відносної швидкості, спрямованій уздовж лінії, що з'єднує ПК;

$V_{\text{від}}$ – відносна швидкість ПК;

$V_{\text{н}}$ – складова відносної швидкості, спрямована перпендикулярно до лінії, що з'єднує ПК.

За прийнятих початкових умов розрахункове значення прогнозованого часу найбільшого зближення ПК $t_{\min 0} = 256$ с, а мінімальна відстань між ПК $d_{\min 0} = 7036$ м.

Маневрування здійснює перший ПК, який виконує розвороти з кутом крену $\beta = 15^\circ$.

Крен змінюється практично миттєво.

Значення кутів розвороту $\Delta\psi$ становлять $-3^\circ, 0^\circ, 3^\circ$.

Значення кроку дискретизації $\Delta t = 3,984$ с дорівнює часу, необхідному для розвороту на кут $\Delta\psi = 3^\circ$ на швидкості $V = 200$ м/с з креном $\beta = 15^\circ$.

При розв'язанні конфліктної ситуації з використанням розробленого алгоритму визначено програму оптимального керування курсом польоту, яка забезпечує усунення конфліктних ситуацій та повернення ПК, що маневрує, на ЛЗШ (рис. 3, 4, 5).

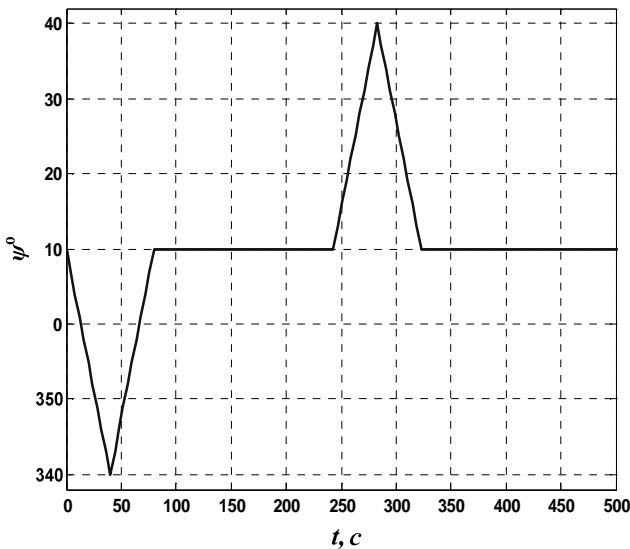


Рис. 3. Програма оптимальної зміни курсу польоту ПК

При цьому час найбільшого зближення ПК буде дорівнювати $t_{\min} = 243$ с, а відстань між ними в цей момент $d_{\min} = 9459$ м.

Від точки виявлення конфлікту до точки виходу з зони КТР ПК пролетить 101,99 км за перепланованою траєкторією.

Затримка відносно початково розрахованого за планом польоту часу виходу з зони КТР становить $T_A = 9,94$ с.

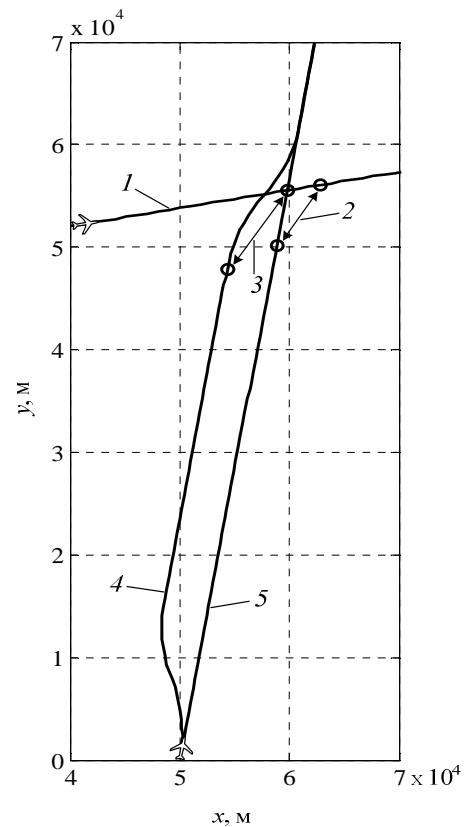


Рис. 4. Траєкторії польоту ПК під час розв'язання конфліктної ситуації маневрування курсом польоту: 1, 5 – траєкторії польоту ПК, які конфлікують; 2 – відстань $d_{\min 0}$ при виявленні конфлікту; 3 – відстань d_{\min} при усуненні конфлікту; 4 – траєкторія польоту першого ПК при усуненні конфлікту

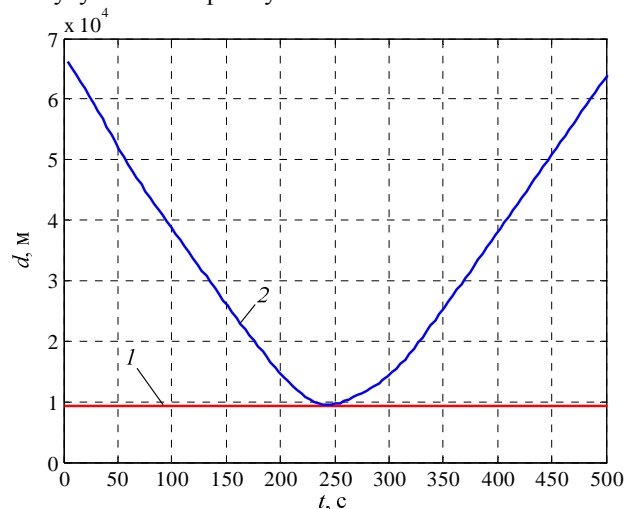


Рис. 5. Зміна відстані між ПК під час розв'язання конфліктної ситуації: 1 – безпечна мінімальна відстань між ПК d_s ; 2 – відстань між ПК $d(t)$

Висновки

Застосування динамічного програмування дозволяє враховувати різні критерії оптимальності та обмеження у ході планування процесів розв'язання конфліктних ситуацій.

Запропонований метод оптимального розв'язання конфліктних ситуацій маневруванням курсом польоту забезпечує планування безконфліктної траєкторії польоту ПК з мінімальною відстанню.

Метод може використовуватися для усунення будь-яких конфліктів, які виникають між ПК, що виконують політ на одному ешелоні, а також у ході створення комплексних систем підтримки прийняття рішень при КІР в умовах виникнення конфліктних ситуацій.

Література

1. *Bicchi A.* On Optimal Cooperative Conflict Resolution for Air Traffic Management Systems / A. Bicchi, L. Pallottino // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* – 2000. – Vol. 4, No 1. – P. 221–232.

2. *Menon P.K.* Optimal Strategies for Free Flight Air Traffic Conflict Resolution / P.K. Menon, G.D. Sweriduk, B. Sridhar // *Journal of Guidance, Control and Dynamics.* – 1999. – No 22(2). – P. 202–211.

3. *Tomlin C.J.* Conflict Resolution for Air Traffic Management: A Study in Multiagent Hybrid Systems / C.J. Tomlin, G.J. Pappas, S.S. Sastry // *IEEE Transactions on Automatic Control.* – 1998. – No 43(4). – P. 509–521.

4. *Васильєв Д.В.* Оптимізація розв'язання конфліктних ситуацій між повітряними кораблями з використанням методу динамічного програмування / Д.В.Васильєв // *Проблеми інформатизації та управління.* – 2010. – № 2 (30). – С. 46–51.

5. *Васильєв Д.В.* Комп'ютерна програма моделювання розв'язань конфліктних ситуацій між повітряними кораблями / Д.В. Васильєв // *Проблеми навігації і управління рухом: тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. студентів та молодих учених, 23-24 листоп. 2010 р.* – К.: Інноваційно-видавничий центр «Холтех», 2010. – С. 16.

6. *Тарасов В.Г.* Межсамолетная навигация / В.Г. Тарасов. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

Стаття надійшла до редакції 09.02.2011.