

УДК 621.396

В.М. Васильєв, канд. техн. наук

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ Й ОЦІНКИ ЙМОВІРНОСТІ КОНФЛІКТІВ ПРИ ПОЛЬОТІ ЛІТАКІВ НА МАРШРУТАХ

Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: v_vasylyev@ukr.net

Запропоновано ймовірнісні методи прогнозування й оцінки конфліктних ситуацій при польоті літаків на маршрутах. Розглянуто критерій виявлення конфлікту і процедуру ймовірнісно-імітаційного методу його оцінки. Наведені аналітичні вирази оцінки ймовірності конфлікту можуть бути використані для оцінки безпеки повітряного руху в системах попередження зіткнень літаків.

Вступ

Основною характеристикою системи організації і управління повітряним рухом є її безпека. Будь-яка модернізація існуючої системи організації повітряного руху або впровадження нової концепції, викликані економічними чи якими-небудь іншими причинами, не повинні приводити до зниження рівня безпеки повітряного руху.

Показником безпеки є ймовірність виникнення конфліктних ситуацій. Конфлікт визначається як ситуація, коли прогнозована відстань між літаками в момент часу їхнього найбільшого зближення, стає менше встановленого мінімального припустимого значення, а різниця висот менше визначеного інтервалу розділення. Оцінка ймовірності конфліктної ситуації виконується як при проектуванні системи управління повітряним рухом, так і в процесі її функціонування.

Під час оперативного управління повітряним рухом (УПР) надзвичайно важливим є завчасне виявлення розвитку конфліктних ситуацій при небезпечному зближенні літаків. Роль методів виявлення і запобігання конфліктних ситуацій істотно зростає при впровадженні нових концепцій організації повітряного руху, наприклад, при скороченні мінімуму вертикального ешелонування, організації "вільного польоту" та ін., спрямованих на збільшення пропускну здатності системи управління повітряним рухом при високій щільності повітряного руху.

Незважаючи на наявність великої кількості методів і алгоритмів виявлення конфліктів, у даний час гостро стоїть проблема вибору критерію безпеки, мір оцінки і класифікації конфліктних ситуацій, способів їхнього усунення, а також практичної реалізації методів як у бортових системах, так і в системах УПР.

У статті дається загальна постановка задачі оцінки ймовірності конфлікту і пропонуються методи її рішення шляхом імітаційного моделювання, також виводяться вирази для обчислення ймовірності конфлікту чисельним методом.

Методи виявлення й оцінки ймовірності конфлікту

Відомі методи виявлення конфлікту поділяють на геометричні і ймовірнісні методи [1].

Геометричні методи визначають конфліктну ситуацію в результаті аналізу прогнозованих траєкторій руху літаків без урахування невизначеності майбутнього положення літаків, обумовленою ймовірнісним характером процесу польоту і похибками вимірів їхніх траєкторій. При цьому можуть використовуватися планові траєкторії і найгірші, з погляду можливості розвитку конфліктних ситуацій, траєкторії руху.

Для геометричних методів виявлення конфліктів число прогнозованих конфліктів дорівнює сумі помилкових і правильних тривог. Для ймовірнісних методів ці два числа є сумами середніх ймовірностей конфлікту.

Ймовірнісні методи в даний час вважаються найбільш перспективними. Ці методи дають ймовірнісну оцінку можливості виникнення конфліктної ситуації.

При цьому враховується ймовірнісний характер процесу польоту, обумовлений впливом різних випадкових факторів, таких як навігаційні похибки, похибки системи керування, вітрові впливи і т.д., а також похибки визначення параметрів траєкторії польоту за даними системи спостереження.

Перспективними є ймовірнісні методи виявлення з урахуванням особливостей використання навігації з застосуванням бортової системи керування польотом (FMS-Flight Management System).

Серед відомих ймовірнісних методів виявлення конфліктів можна виділити два методи. Перший метод [2] заснований на визначенні поняття ймовірності конфлікту.

Ймовірність конфлікту визначається як ймовірність того, що відстань між двома літаками стане менше деякого заданого порога розділення, наприклад, встановленого ІКАО.

Приймається, що відхилення літака від планової траєкторії польоту підкоряється нормальному закону розподілу. Відхилення в подовжньому, бічному і вертикальному русі незалежні. Середньоквадратичне відхилення у бічному і вертикальному русі приймається постійним, а в подовжньому – лінійно наростаючим.

Суть методу оцінки конфлікту для пари літаків полягає в наступному. Для заданого часу прогнозу визначається планове положення літаків. Для одного з літаків визначається сумарна коваріаційна матриця, що включає невизначеність прогнозованого положення як першого, так і другого літака. При цьому навколо другого літака описується сфера заданого радіуса ($R = 5$ морських миль), що являє собою зону конфлікту.

У процесі руху другого літака щодо першого ця сфера утворює циліндр. Геометрично ймовірність конфлікту визначається як ймовірнісна міра перетинання зони невизначеності з циліндром, що рухається в напрямку відносної швидкості.

Після ряду перетворень визначається функція щільності розподілу відстаней між літаками на ділянці їхнього зближення і виводиться аналітичний вираз, що дозволяє оцінювати ймовірність конфлікту.

Обмеженням даного методу є те, що вектор відносної швидкості вважається постійним, а при обчисленні загальної ймовірності конфлікту, інтегрованої на заданому інтервалі часу найбільш небезпечного зближення літаків, приймається, що дисперсія відхилення від заданої траєкторії польоту залишається сталою.

Метод не дає оцінку динаміки зміни ймовірності, тобто оцінку швидкості наростання конфліктної ситуації.

Другий метод виявлення конфлікту [3] заснований на понятті ризику зіткнень.

Ризик зіткнень визначає ймовірність того, що два літаки зіткнуться.

При розробці методу приймаються такі положення. Кожен літак міститься в центр деякого об'єму у вигляді паралелепіпеда з розмірами L_x, L_y, L_z . Для фіксованих моментів часу оцінюється відстань між парами літаків. Ця відстань розглядається як випадковий процес з відомими статистичними характеристиками. Зіткнення літаків відбувається, якщо відстань між ними потрапляє в область з розмірами $2L_x, 2L_y, 2L_z$. Ймовірність зіткнення визначається як ймовірність першого перетинання заборонної області.

Точне математичне рішення є надзвичайно складною задачею, тому застосовується ряд спрощень. Припускається можливість багаторазового вторгнення в заборонну область, визначається функція інтенсивності перетинання області, а потім ймовірність перетинання і ризик зіткнення.

Зазначений метод вимагає додаткових входних даних: дисперсії помилок бічної і подовжньої складових швидкості щодо маршруту польоту і розмір паралелепіпеда, яким є літак.

Стверджується [3], що метод дає кращий результат у порівнянні з методом, заснованим на оцінці ймовірності конфлікту, у випадку, коли подовжня складова невизначеності прогнозованого положення літака зменшується.

Однак прийняті спрощення роблять метод наближеним. Метод не дає оцінку ймовірності зіткнення.

Розглянуті підходи і методи рішення задачі виявлення конфліктів досить складні і для одержання аналітичного рішення потрібно зробити істотні спрощення, щоб записати вирази, що дозволяють зробити їхню алгоритмізацію і комп'ютерну реалізацію. Ці методи не дають адекватного математичного опису прогнозування розвитку невизначеності майбутнього положення літаків на ділянках маневрування.

У даній статті пропонуються методи, що дозволяють усунути ряд зазначених недоліків.

Постановка задачі виявлення й оцінки конфлікту

Запишемо постановку задачі виявлення конфліктів для двох літаків у загальному вигляді.

Нехай положення одного літака в просторі в заданий момент часу t визначається випадковим вектором \mathbf{X}_1 , що має нормальний розподіл $N(\mathbf{M}_1, \mathbf{D}_1)$, положення іншого літака – вектором \mathbf{X}_2 з розподілом $N(\mathbf{M}_2, \mathbf{D}_2)$, при цьому математичні сподівання $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2 \in \mathbb{R}^3$, а $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2$ – позитивно визначені коваріаційні матриці. Приймаємо, що вектори \mathbf{X}_1 і \mathbf{X}_2 незалежні.

При зазначених припущеннях вектор відстані між літаками $\mathbf{d} = \mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2$ має нормальний розподіл $N(\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2, \mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_2)$, а сам вектор \mathbf{d} може бути поданий як випадкова багатовимірна величина

$$\mathbf{d} = \mathbf{M} + \mathbf{D} \boldsymbol{\gamma}, \quad (1)$$

де $\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2$; $\mathbf{D} = \sqrt{\mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_2}$ – така позитивно визначена матриця, що $\mathbf{D}^2 = \mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_2$; $\boldsymbol{\gamma}$ – вектор випадкових величин з нульовими математичними сподіваннями і одиничними дисперсіями, $N(\mathbf{0}, \mathbf{I}_3)$, \mathbf{I}_3 – одинична матриця розміру 3×3 .

Імовірність порушення безпечного розділення літаків для встановленого граничнодопустимого зближення літаків d_{\min} визначається як

$$P_c = P\{\|\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2\| \leq d_{\min}\}, \quad (2)$$

де $\|\bullet\|$ позначає евклідову норму в \mathbb{R}^3 .

З урахуванням відношення (1) вираз (2) запишемо як

$$P_c = P\{\|\mathbf{M} + \mathbf{D}\boldsymbol{\gamma}\|^2 \leq d_{\min}^2\}. \quad (3)$$

Для отримання оцінки ймовірності конфлікту у числовому вигляді необхідно знати характеристики випадкового вектора відстані між літаками.

Прогнозування невизначеності положення літаків

При реалізації запропонованого методу природно припустити, що для кожного літака математичне сподівання \mathbf{M}_j (j – номер літака) його місця знаходження є планованою (програмною) траєкторією польоту і передбачається, що воно відоме.

Для ілюстрації запропонованого методу розглянемо алгоритм виявлення і оцінки конфліктів для більш простого випадку польоту двох літаків на одній висоті (рис. 1).

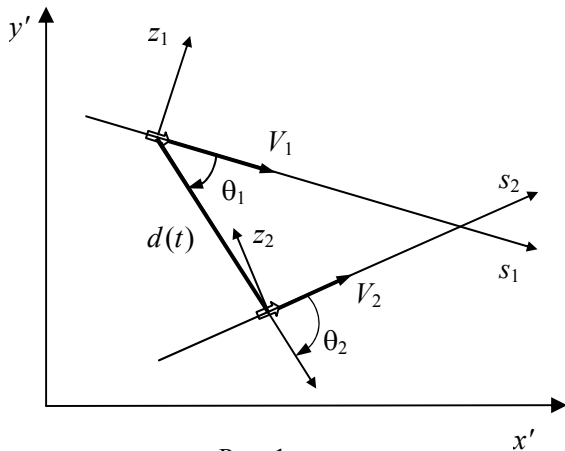


Рис. 1

У відомих методах оцінки ймовірності конфлікту [2] приймається, що відхилення від заданої траєкторії польоту відбувається незалежно в подовжньому s і бічному z русі, тоді коваріаційна матриця дисперсій відхилень має діагональний вигляд

$$\mathbf{R}(t) = \begin{bmatrix} r_s^2(t) & 0 \\ 0 & r_z^2(t) \end{bmatrix},$$

де r_s , r_z – середньоквадратичне відхилення в подовжньому і бічному русі відповідно.

Визначимо коваріаційну матрицю \mathbf{R}_d для вектора відстані між літаками \mathbf{d} . Для цього при-

ведемо коваріаційні матриці для кожного літака до системи координат, орієнтованої уздовж відносної відстані, з використанням матриці направляючих косинусів (див. рис. 1)

$$\mathbf{F}_j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix}.$$

У результаті для кожного літака будемо мати

$$\mathbf{R}'_j = \mathbf{F}_j \mathbf{R}_j \mathbf{F}_j^T,$$

а коваріаційна матриця відхилень для вектора відстані між літаками визначиться як

$$\mathbf{R}_d = \mathbf{R}'_1 + \mathbf{R}'_2. \quad (4)$$

Для прийнятих вище позначень можна записати

$$\mathbf{D}^2 = \mathbf{R}_d.$$

На підставі визначених статистичних характеристик вектора відстані між літаками одержимо ймовірнісну оцінку порушення норми безпечного розділення літаків.

Ймовірнісно-імітаційний метод оцінки конфлікту

Оцінка ймовірності конфлікту може бути отримана прямим статистичним моделюванням шляхом генерування нормально розподілених із заданими параметрами випадкових величин відхилень від програмних точок траєкторій польоту для фіксованого моменту часу кожного з пари літаків, обчислення “миттєвої” відстані між літаками і порівняння її з мінімально допустимим зближенням літаків. Однак, така процедура вимагає великого об'єму вибірки стандартних випадкових гауссівських величин і тому є нераціональною.

Після визначення статистичних характеристик випадкового вектора відстані між літаками (4) оцінка конфлікту може бути зроблена методом статистичного моделювання відхилень вектора відстаней з використанням критерію (3).

Зробимо ряд перетворень для спрощення реалізації процедури оцінки.

Нехай $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ – власний ортонормований базис матриці \mathbf{D} вектора \mathbf{d} у виразі (1).

Виконаємо розкладання вектора математичних сподівань \mathbf{M} у виразі (1) за цим базисом

$$\mathbf{M} = q_1 \mathbf{e}_1 + q_2 \mathbf{e}_2,$$

тоді q_i виражаються через скалярний добуток

$$q_i = (\mathbf{M}, \mathbf{e}_i), \quad i = \overline{1,2}.$$

Представимо у базисі $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$

$$\mathbf{D}\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \gamma_1 \\ \lambda_2 \gamma_2 \end{bmatrix},$$

де γ – вектор незалежних стандартних гауссівських випадкових величин γ_1, γ_2 з характеристиками $N(\mathbf{0}, \mathbf{I}_2)$, \mathbf{I}_2 – одинична матриця розміру 2×2 ; λ_1, λ_2 – власні значення матриці \mathbf{D} .

У результаті випадковий вектор відстані між літаками \mathbf{d} в базисі $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$ має розподіл

$$N([q_1, q_2]^T, \text{diag}[\lambda_1^2, \lambda_2^2]), \quad (5)$$

а складові вектора запишуться як

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1 \gamma_1 \\ \lambda_2 \gamma_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для заданих умов імовірність порушення встановленої норми безпечного розділення літаків визначається як

$$P_c = P\{\|\mathbf{d}\|^2 \leq d_{\min}^2\} = P\{(q_1 + \lambda_1 \gamma_1)^2 + (q_2 + \lambda_2 \gamma_2)^2 \leq d_{\min}^2\}.$$

При наявності генератора стандартних випадкових гауссівських величин, що дозволяють моделювати множину n незалежних пар значень ζ_1, \dots, ζ_n випадкової величини ζ , для великих значень n приблизно можна вважати, що

$$P_c \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(\zeta_i \leq d_{\min}^2) = \frac{\#\{i: 1 \leq i \leq n, \zeta_i \leq d_{\min}^2\}}{n},$$

де I – індикаторна функція випадкової події; $\#$ – кількість точок у множині, для яких задовольняється зазначена умова.

Більш наочно процедура визначення шуканої ймовірності записується виразом

$$P_c \approx \frac{\#\{i: 1 \leq i \leq n, (q_1 + \lambda_1 \gamma_1^i)^2 + (q_2 + \lambda_2 \gamma_2^i)^2 \leq d_{\min}^2\}}{n}.$$

Рішення щодо прогнозованого порушення норм безпечного розділення літаків приймається, якщо значення ймовірності стає більше заданого значення $P_c(t) \geq 1 - \alpha$, де α – рівень значимості (як правило дорівнює 0,05).

Аналітичний вираз для оцінки ймовірності конфлікту

Під час розробки методів виявлення і оцінки конфліктів природним є бажання одержати аналітичні вирази для оцінки характеристик алгоритмів. Аналітичні вирази дозволяють більш точно оцінювати ймовірність конфлікту.

Проведена операція розкладення за власним базисом (6) дозволяє вивести у кінцевій формі вираз для оцінки ймовірності конфлікту.

При розкладанні випадкового вектора відстані між літаками \mathbf{d} в ортонормованому базисі його складові у виразі (6) стають незалежними, тоді

функцію розподілу вектора відстані можна записати як

$$g(x, y) = g(x)g(y) = \frac{1}{2\pi\lambda_1\lambda_2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-q_1)^2}{\lambda_1^2} + \frac{(y-q_2)^2}{\lambda_2^2}\right)\right).$$

На рис. 2 умовно показаний еліпс розсіювання відносно точки, що визначається значеннями математичного сподівання q_1, q_2 величин x і y .

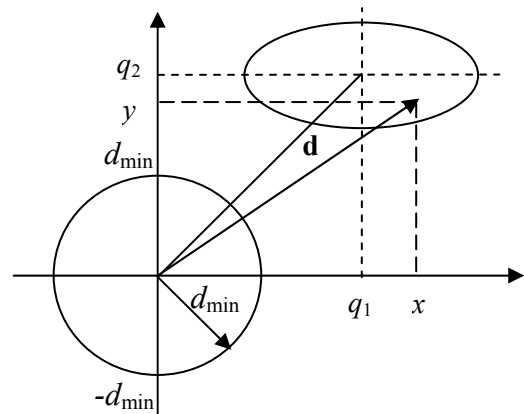


Рис. 2

Імовірність конфлікту визначається як імовірність того, що випадковий вектор відстані між літаками \mathbf{d} з характеристиками (5), (6), положення якого визначається вектором математичних сподівань $[q_1 \ q_2]^T$ і діагональною коваріаційною матрицею $\text{diag}[\lambda_1^2 \ \lambda_2^2]$, потрапить у заборонну область, обмежену окружністю радіусом d_{\min} , з центром в початку координат. Імовірність конфлікту можна записати як (див. рис. 2)

$$P_c = P\{(x, y) \in \Omega\} = \quad (6)$$

$$= \iint_{\Omega} \frac{1}{2\pi\lambda_1\lambda_2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-q_1)^2}{\lambda_1^2} + \frac{(y-q_2)^2}{\lambda_2^2}\right)\right) dx dy,$$

де Ω – область інтегрування, для якої задовольняється умова $x^2 + y^2 \leq d_{\min}^2$.

Приймаючи до уваги незалежність випадкових величин x і y , вираз для ймовірності конфлікту (7) можна записати у вигляді

$$P_c = \iint_{\Omega} \frac{1}{\lambda_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-q_1)^2}{2\lambda_1^2}} \frac{1}{\lambda_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-q_2)^2}{2\lambda_2^2}} dx dy,$$

і зінтегрувати (див. рис. 2) для зовнішнього інтеграла в межах від $-d_{\min}$ до d_{\min} , а для внутрішнього, використовуючи рівняння окружності $x^2 + y^2 = d_{\min}^2$, у межах від $-\sqrt{d_{\min}^2 - y^2}$ до $\sqrt{d_{\min}^2 - y^2}$.

У результаті одержимо

$$P_c = \int_{-d_{\min}}^{d_{\min}} \left(\frac{1}{\lambda_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-q_2)^2}{2\lambda_2^2}} \frac{1}{\lambda_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\sqrt{d_{\min}^2-y^2}}^{\sqrt{d_{\min}^2-y^2}} e^{-\frac{(x-q_1)^2}{2\lambda_1^2}} dx \right) dy =$$

$$= \frac{1}{\lambda_2 \sqrt{2\pi}} \int_{-d_{\min}}^{d_{\min}} \left(e^{-\frac{(y-q_2)^2}{2\lambda_2^2}} \left(\Phi \left(\frac{\sqrt{d_{\min}^2-y^2}-q_1}{\lambda_1} \right) - \Phi \left(\frac{-\sqrt{d_{\min}^2-y^2}-q_1}{\lambda_1} \right) \right) \right) dy,$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$.

Отриманий вираз визначає ймовірність конфлікту для фіксованого моменту часу t .

Обчислюючи ймовірність конфлікту для послідовних моментів часу, можна виявити динаміку її зміни й оцінити швидкість зміни (наростання чи зменшення).

Важливим показником є максимальне значення ймовірності конфлікту

$$P_{\max} = \max\{P_c(t)\}.$$

Загальна ймовірність конфлікту P_k визначається в результаті усереднення значень ймовірностей, отриманих для фіксованих моментів часу за період часу найбільшого зближення літаків.

При цьому для кожного моменту часу необхідно обчислювати значення $q_1(t), q_2(t)$ і $\lambda_1(t), \lambda_2(t)$, так що $P_c = P_c(t)$.

Загальну ймовірність можна апроксимувати виразом

$$P_k = \frac{1}{t_k - t_0} \sum_{i=0}^k P_c(t_i) \Delta t,$$

де t_0 – момент початку порушення безпечного розділення літаків; t_k – момент, коли порушення розділення закінчується; Δt – крок дискретизації.

Спрощена оцінка погрози порушення норми безпечного розділення

Для прийняття рішення в умовах дефіциту часу пропонується спрощений спосіб оцінки погрози порушення норми безпечного розділення літаків.

Візьмемо до уваги наступне. У початковому стані в зоні управління повітряним рухом конфлікти між літаками відсутні. Тому при безупинному моніторингу і прогнозуванні повітряної обстановки у випадку виявлення небезпечного зближення літаків оцінка ймовірності конфлікту

на початковому етапі буде мати невелике значення і наростати досить плавно. У ряді випадків для прийняття рішення важливе значення має не абсолютне значення ймовірності конфлікту, а факт його наявності і швидкість наростання.

Спрощена оцінка ймовірності конфлікту полягає у наступному.

На рис. 3 для фіксованого моменту часу показане прогнозоване планове взаємне положення пари літаків у системі координат xOy , початок якої сполучено з одним з літаків, а осі орієнтовані уздовж осей еліпса ортогоналізованої коваріаційної матриці (4) з характеристиками (5).

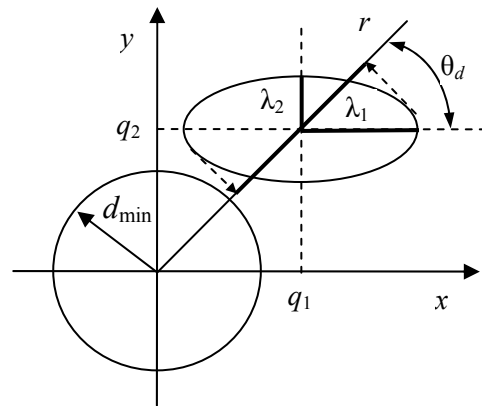


Рис. 3

Перший літак оточений зоною безпеки радіуса d_{\min} .

Планове положення другого літака визначається координатами (q_1, q_2) відносно першого. Цей літак оточений еліпсом, розміри якого визначаються сумарною невизначеністю прогнозованого положення обох літаків.

Спрощено контроль безпечного розділення літаків можна виконати, аналізуючи можливі відхилення уздовж лінії, що з'єднує їхнє планове положення.

Зробимо проекцію еліпса невизначеності на лінію Or , що з'єднує точки планованого положення першого і другого літаків, тобто точки, що відповідають математичним сподіванням їхнього положення.

У результаті одержимо дисперсію відхилення Δd від планованого значення відстані між літаками d_p , яка має вираз

$$\sigma_{\Delta d}^2 = \lambda_1^2 \cos^2 \theta_d + \lambda_2^2 \sin^2 \theta_d,$$

де

$$\theta_d = \arctg \frac{q_2}{q_1}.$$

Приблизну оцінку ймовірності конфлікту визначимо як

$$P_c \approx P\{|d_p + \Delta d| \leq d_{\min}\} = \\ = P\{-d_{\min} < \sqrt{q_1^2 + q_2^2} + \Delta d < d_{\min}\} = \\ = \Phi\left(\frac{d_{\min} - \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{\sigma_{\Delta d}}\right) - \Phi\left(\frac{-d_{\min} - \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{\sigma_{\Delta d}}\right).$$

Коректність застосування отриманого виразу, за умови припустимої втрати точності оцінки ймовірності конфлікту, залежить від геометрії взаємного положення літаків і розмірів зони невизначеності їхніх прогнозованих положень, і вимагає додаткових досліджень.

Висновки

Загальний ймовірнісний підхід до математичної постановки задачі виявлення й оцінки ймовірності конфлікту, запропонований у статті, дає можливість подальшого удосконалення методів з використанням додаткової апріорної інформації.

Ймовірнісно-імітаційний метод оцінки конфлікту шляхом статистичного моделювання дозволяє обійти проблеми, пов'язані з аналітичним рішенням задачі, а процедура ортогоналізації значно прискорює процес моделювання через зменшення об'єму вибірки стандартних випадкових величин. Отриманий аналітичний вираз для оцінки ймовірності конфлікту дозволяє застосовувати чисельні методи і використовувати його при оперативному прийнятті рішення щодо запобігання конфліктних ситуацій, а спрощений

вираз дає можливість одержувати експрес оцінку погрози порушення норм безпечного розділення літаків.

Методи можуть знайти застосування при оцінюванні безпеки польотів як на етапі організації повітряного руху, так і при оперативному контролі і управлінні повітряним рухом.

У системі організації повітряного руху розроблені методи можуть застосовуватися для оцінки рівня безпеки систем управління повітряним рухом, що експлуатуються, рівня безпеки при реорганізації структури повітряного простору і трас, а також при адаптації нових автоматизованих систем УПР до наявної організації повітряного руху, процедурам і умовам функціонування.

Стосовно до оперативного управління повітряним рухом розроблені методи спрямовані на підвищення ефективності наземних і бортових систем попередження зіткнень.

Список літератури

1. Bakker G.J., Kremer H.J., Blom H.A.P. Geometric and probabilistic approaches towards conflict prediction, 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, 13–16 June 2000.
2. Paielli R.A., Erzberger H. Conflict Probability Estimation for Free Flight // Journal of Guidance, Control and Dynamics.– 1997. – 20(3). – P. 588–596.
3. Accident Risk Assessment for Advanced ATM / H.A.P. Blom, G.J. Bakker, P.J.G. Blanker. // Air Transportation Systems Engineering, G.L. Donohue and A.G. Zellweger (Eds.), AIAA, 2001. – P. 463–480.

Стаття надійшла до редакції 11.06.04.

В.Н. Васильев

Методы прогнозирования и оценки вероятности конфликтов при полете самолетов на маршрутах

Предложены вероятностные методы прогнозирования и оценки конфликтных ситуаций при полете самолетов на маршрутах. Рассмотрены критерий обнаружения конфликта и процедура вероятностно-имитационного метода его оценки. Приведенные аналитические выражения оценки вероятности конфликта могут быть использованы для оценки безопасности воздушного движения в системах предупреждения столкновений самолетов.

V.M. Vasylyev

Methods of Conflict Prediction and Conflict Probability Estimation for en Route Flight

The probabilistic methods of conflict prediction and estimation of conflict situation are offered for en route flight. The mathematical statement of problem, the criterion of conflict detection, and randomized estimation procedure are presented. The analytical expressions for evaluation conflict probability are derived for estimation of air traffic safety in collision avoidance systems.