

УДК 621.396

В.М. Васильєв, канд. техн. наук

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА РИЗИКУ ЗІТКНЕНЬ ЛІТАКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ТЕОРІЇ

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

Запропоновано метод статистичного моделювання й оцінки ймовірності зіткнень літаків, який може скласти методологічну основу для оцінки безпеки повітряного руху та застосовуватися для вирішення задачі виявлення потенційно конфліктних ситуацій у процесі управління повітряним рухом. Для математичного опису прогнозованого руху літаків і оцінки ймовірності зіткнень використано кореляційні функції, що характеризують процес відхилення від заданої траєкторії польоту. Розглянуто процедуру оцінки ризику зіткнень літаків.

Вступ

Безпека повітряного руху є необхідною умовою при виконанні будь-якої модифікації чи проектуванні системи організації та управління повітряним рухом, хоча звичайно вихідною причиною для удосконалення системи є необхідність збільшення її пропускну здатності.

Основним показником безпеки повітряного руху є ризик зіткнення літаків.

Центральне місце в системі прийняття рішень при контролі й управлінні повітряним рухом займає виявлення потенційно конфліктних ситуацій.

На сьогодні відома велика кількість методів і алгоритмів виявлення конфліктних ситуацій, розроблених як для бортових систем керування польотом, так і наземних систем управління повітряним рухом.

Ряд методів запроваджений у реальних системах. Однак, незважаючи на це, на теперішній час продовжується інтенсивне дослідження і розробка більш досконалих методів виявлення конфліктних ситуацій, що мають кращі характеристики.

Актуальність цієї проблеми пов'язана також з перспективою переходу на нові концепції організації повітряного руху, наприклад, такі, як "Free Flight" ("Вільний політ"), які дають екіпажам повітряних суден більш вільний вибір траєкторії польоту, що неминуче потребує введення нових норм, технологій, процедур і критеріїв прийняття рішень.

Особливістю розглянутої проблеми є те, що, крім прямого вирішення задачі підвищення якості виявлення потенційно конфліктних ситуацій у процесі контролю і керування повітряним рухом, використовувани критерії можуть становити методологічну основу для оцінки безпеки повітряного руху для всієї системи організації повітряного руху.

Критерії оцінки ймовірності зіткнень літаків

Вважається [1], що ймовірнісні методи виявлення конфліктів у порівнянні з геометричними методами більш досконалі та перспективні. Вони дозволяють урахувувати ймовірнісні характеристики процесу руху й у той самий час урахувувати фактор керованості й особливості використовуваних методів навігації.

Відомі ймовірнісні методи виявлення конфліктів використовують такі показники, як ймовірність конфлікту P_c , ймовірність перекриття P_{ov} , ймовірність перетинання P_{ic} , ризик зіткнення літаків P_{col} [1; 2].

Ймовірність конфлікту P_c визначається як ймовірність того, що відстань між двома літаками (розділення літаків) стане менше деякого встановленого порога. Задача системи запобігання конфліктам полягає в тому, щоб утримувати ймовірність конфлікту нижче деякого припустимого рівня.

Ймовірність перекриття (накладення) P_{ov} виходить з ймовірності конфлікту за умови, що величина припустимого розділення літаків зменшена до розмірів літака. Таким чином, ця міра відображає ймовірність перетинання фізичних об'ємів літаків.

Поняття ризику зіткнень літаків прийнято ІКАО для оцінки безпеки повітряного руху. Ризик зіткнень визначає ймовірність P_{col} того, що два літаки зіткнуться.

Застосування поняття ймовірності перетинання P_{ic} потребує введення деякої функції, що характеризує процес вторгнення у заборонену зону. Причому, якщо припустима відстань зближення між літаками дорівнює їхнім фізичним розмірам, то однократне вторгнення означає зіткнення літаків.

Отже, зіткнення літаків являє собою подію, коли відбувається перше перетинання. Тому ризик перетинання дає верхню межу для ризику зіткнень, тобто $P_{col} \leq P_{ic}$.

У праці [1] наведено результати дослідження, які показують деяку перевагу алгоритму виявлення конфлікту, що використовує як міру ймовірності перетинання P_{ic} , у порівнянні з алгоритмом, що використовує ймовірність конфлікту P_c . Ця перевага виявляється при зближенні літаків на відстань менше 5 n-mile.

Моделювання й оцінка ризику зіткнень з використанням кореляційних залежностей

Рух літака є керованим процесом, тому параметри траєкторії його польоту корельовані у часі. Кореляційна залежність дозволяє одержати більш достовірний прогноз траєкторії польоту. Розглянемо підхід до оцінки ризику зіткнень літаків з використанням інформації про кореляційні функції відхилень літака від заданої (запланованої) траєкторії польоту.

Процес руху кожного літака опишемо як такий, що утворюється з трьох складових:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_0(t) + \alpha \mathbf{X}_1(t) + \beta \mathbf{X}_2(t).$$

Перша складова \mathbf{X}_0 – задана (планова) траєкторія руху літака. Друга складова \mathbf{X}_1 – сильно корельовані випадкові відхилення від заданої траєкторії польоту, обумовлені випадковими збуреннями систематичного характеру, значення яких має постійно або повільно (лінійно) наростаючий характер. Третя складова \mathbf{X}_2 – слабокорельовані випадкові відхилення, викликані впливом випадкових короткоперіодичних збурень, таких, як турбулентність повітряного середовища, слабокорельовані навігаційні похибки і т.д.

Запровадимо коефіцієнти α і β , що можуть урахувати вагу відповідної складової, наприклад, залежно від часу прогнозу і часу польоту до точки найбільшого зближення літаків.

Для складової \mathbf{X}_1 кореляція може виявлятися на значних інтервалах часу. Для цієї складової область невизначеності майбутнього положення літака, виходячи з припущення, що відхилення від заданої траєкторії польоту відбувається незалежно в подовжньому s , бічному z і вертикальному h русі, визначається коваріаційною матрицею дисперсій відхилень, що має діагональний вигляд:

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

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

Для складової \mathbf{X}_2 кореляція виявляється на невеликих інтервалах часу до декількох хвилин.

Задача оцінки ризику зіткнень літаків при відомих статистичних характеристиках складової \mathbf{X}_1 і відомої кореляційної залежності складової \mathbf{X}_2 може бути вирішена з використанням комбінованого підходу в такий спосіб.

Передбачається, що всі процеси, що беруть участь в описі руху літака, гауссові.

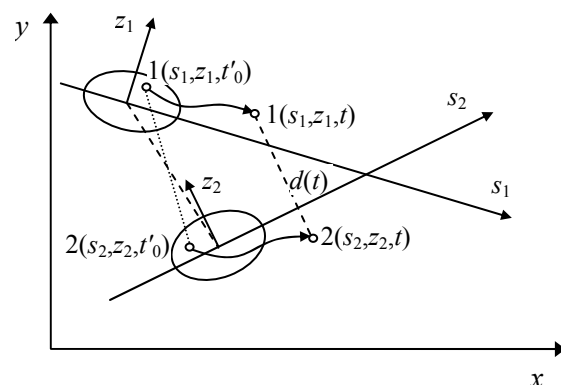
Спочатку для двох літаків здійснюється прогноз невизначеності їхнього місцеположення, обумовленої впливом сильнокорельованої складової.

При польоті по трасі прийнято вважати [2], що дисперсія процесу відхилення в бічному положенні r_z^2 постійна і визначається переважно похибками навігаційних систем, які у теперішній час є такими, що дозволяють утримувати літак у заданих межах відхилень, тобто задовольняти вимогу відповідного RNP (Required Navigation Performance – необхідні навігаційні характеристики) на досить великому інтервалі часу. Отже, припускається, що дисперсія бічного відхилення дорівнює дисперсії похибки визначення бічного положення $r_z^2 = \sigma_z^2$.

Для подовжнього руху припускається, що дисперсія відхилення збільшується за квадратичним законом і визначається як $r_s^2 = t^2 \sigma_s^2$.

На рисунку для випадку польоту двох літаків на одній висоті показано області невизначеності прогнозованого місцеположення літаків у фіксований момент часу t'_0 у вигляді еліпсів з півосями r_s і r_z .

Умовно на рисунку показана ситуація можливого взаємного положення літаків для заданого моменту часу t'_0 , траєкторії їх руху і положення в момент часу $t > t'_0$.



Положення двох літаків для заданих моментів часу

У процесі прогнозування визначається інтервал часу $(t'_0, t_k]$, протягом якого прогнозується найбільш небезпечне зближення літаків і фіксується область невизначеності для моменту t'_0 .

На основі отриманих при прогнозуванні статистичних характеристик невизначеності положення літаків може бути визначена ймовірність конфлікту як ймовірність того, що вектор відстані між літаками \mathbf{d} стане менше мінімально припустимого значення d_{\min} , яке дорівнює нормі безпечного розділення літаків (наприклад, установленого ICAO 5 n-mile), тобто

$$P_c = P\{\|\mathbf{d}(t)\| < d_{\min}\},$$

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

Методи визначення ймовірності конфлікту як статистичним моделюванням, так і аналітично наведені в праці [3].

Для оцінки ризику зіткнень літаків мінімально припустиме значення відстані між літаками d_{col} має бути значно менше d_{\min} і сумірним з фізичними розмірами літаків.

З огляду на те, що інтервал часу небезпечного зближення літаків становить не більше декількох хвилин, можна вважати, що характер відхилення на цьому короткому проміжку часу обумовлюється кореляційною функцією процесу \mathbf{X}_2 .

Ризик зіткнення літаків на ділянці найбільш небезпечного зближення оцінюється в результаті прогнозування місцеположення літаків на час $t \in (t'_0, t_k]$ на зазначеному інтервалі, починаючи з фіксованого моменту часу t'_0 .

Вважається, що при польотах на трасах подовжня, бічна і вертикальна складові руху не корельовані між собою і кожна складова описується своєю кореляційною функцією K_s, K_z, K_h , а випадкові процеси є стаціонарними.

Якщо спектральні щільності, які відповідають кореляційним функціям, є такими, що факторизуються, то процес руху записується в просторі станів для вектора $\mathbf{X} = [s \quad \dot{s} \quad z \quad \dot{z} \quad h \quad \dot{h}]^T$ як

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{33} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \\ \mathbf{G}_3 \end{bmatrix} \mathbf{W} \quad (1)$$

або $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W}$,

де \mathbf{A} – матриця, що обумовлює динаміку розвитку процесу; \mathbf{G} – матриця коефіцієнтів, що визначають інтенсивність (дисперсію) збурень; \mathbf{W} – вектор випадкових збурень типу “білий

шум” з нульовими математичними сподіваннями і одиничними інтенсивностями $N(\mathbf{0}, \mathbf{I})$.

Слід зазначити особливості і відмінності опису бічної, подовжньої і вертикальної складових руху. На сьогодні використовується 3D навігація, коли контроль і керування літаком здійснюється в тривимірній системі координат і на відміну від перспективної чотиривимірної 4D навігації не здійснюється керування за часом.

Для бічного руху провадиться контроль і формується керування безпосередньо бічного положення щодо лінії заданого шляху. Так само виконується при витримуванні висоти польоту.

У подовжньому русі здійснюється стабілізація заданої швидкості польоту. Тому бічний і вертикальний рухи характеризуються кореляційною функцією змінювання координати, а подовжній рух – кореляційною функцією змінювання швидкості польоту.

Для опису бічного руху може бути використана кореляційна функція [4]

$$K_z(\tau) = \sigma_z^2 e^{-\lambda|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{\lambda}{\omega_0} \sin \omega_0 |\tau| \right). \quad (2)$$

Після факторизації спектральної щільності, що відповідає цій кореляційній функції, одержимо математичний опис бічного руху в просторі станів у вигляді (1):

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\dot{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\omega_0^2 + \lambda^2) & -2\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \end{bmatrix} w; \quad (3)$$

$$g_2 = 2\sigma_z \sqrt{\lambda(\omega_0^2 + \lambda^2)},$$

де w – стандартний гауссівський білий шум $N(0, 1)$.

Кореляційна функція (2) може бути прийнята також для опису відхилень у вертикальному русі.

Для опису подовжнього руху може бути використана кореляційна функція відхилення від заданої швидкості польоту [4]

$$K_v(\tau) = \sigma_v^2 e^{-\lambda|\tau|} \cos \omega_0 \tau. \quad (4)$$

Відповідний опис у просторі станів (1) з урахуванням $\dot{s} = V$ має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{\dot{s}} \\ \dot{s}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -(\omega_0^2 + \lambda^2) & -2\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ \dot{s} \\ s' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g_4 \\ g_5 \end{bmatrix} w; \quad (5)$$

$$g_4 = -\sigma_v \sqrt{2\lambda}; \quad g_5 = \sigma_v \sqrt{2\lambda} \left(2\lambda - \sqrt{\omega_0^2 + \lambda^2} \right),$$

де s' – допоміжна перемінна, пов'язана співвідношенням $s' = \dot{s} - g_4 w$.

Оцінка ризику зіткнень літаків може бути отримана шляхом прямого статистичного моделювання в такий спосіб.

Для кожного літака для фіксованого часу t'_0 провадиться вибірка множини стандартних гаусівських величин і їх масштабування відповідно до прогнозованого на час t'_0 розміром області невизначеного положення літаків. Потім для пари вибірок, що відносяться до відповідної пари літаків, провадиться прогнозування траєкторій руху на інтервалі часу $(t'_0, t_k]$ відповідно до рівняння (1), а для наведених кореляційних функцій (2) і (4) – відповідно до рівнянь (3), (5).

При цьому перевіряються і фіксуються випадки, коли відстань між літаками стає менше заданого мінімально припустимого значення, або дорівнює йому $\|\mathbf{d}(t)\| \leq d_{col}$.

У процесі моделювання для n іспитів провадиться підрахунок середньої кількості таких подій

$$N_c = \frac{\#\{i: 1 \leq i \leq n, \|\mathbf{d}_i\| \leq d_{col}\}}{n},$$

де $\#$ – кількість випадків, для яких задовольняється зазначена умова.

За умовою задачі зазначені події є рідкими подіями і можуть бути описані пуассонівським законом розподілу. На підставі цього закону оцінимо ймовірність того, що на заданому інтервалі часу $T = t_k - t'_0$ не відбудеться жодного випадку вторгнення літака у заборонену зону. Ця ймовірність дорівнює

$$P_0 = e^{-N_c T}.$$

Ймовірність зіткнення визначиться як

$$P_{col} = 1 - e^{-N_c T}.$$

Отримане значення ймовірності порівнюється з припустимим рівнем ризику зіткнень для прийняття рішення щодо організації чи корекції повітряного руху.

В.Н. Васильєв

Статистическое моделирование и оценка риска столкновений самолетов с использованием корреляционной теории

Предложен метод статистического моделирования и оценки вероятности столкновений самолетов, который может составить методологическую основу для оценки безопасности воздушного движения, а также применяться для решения задачи обнаружения потенциально конфликтных ситуаций в процессе управления воздушным движением. Для математического описания прогнозируемого движения самолетов и оценки вероятности столкновений использованы корреляционные функции, характеризующие процесс отклонения от заданной траектории полета. Рассмотрена процедура оценки риска столкновений.

V.M. Vasylyev

Statistical modelling and evaluation of aircraft collision risk using correlation theory

The method of statistical modelling and evaluation of collision probability is offered. It can make a methodological basis for an evaluation of air traffic safety, and also to be applied to detection of potential conflict situations while air traffic control. For the mathematical description of predicted air traffic movement, and for the evaluation of collision probability the correlation functions of deviation process from planned flight trajectory are used. The procedure of an evaluation of collision risk is presented.

Висновки

Особливістю запропонованого методу моделювання й оцінки ризику зіткнень літаків є можливість використання статистичних характеристик у вигляді кореляційних функцій процесу відхилення від запланованих траєкторій польоту і одночасного керування (корегування) цією траєкторією.

Такий підхід дає змогу більш адекватно враховувати динаміку польоту при прогнозуванні траєкторії на ділянках найбільш небезпечного зближення літаків.

Метод може скласти методологічну основу для оцінки безпеки повітряного руху, та застосовуватися для вирішення задачі виявлення потенційно конфліктних ситуацій у процесі контролю і управління повітряним рухом.

Подальше дослідження передбачає знаходження більш адекватних значень характеристик складових, що впливають на відхилення від заданої траєкторії польоту, і одержання результатів чисельного моделювання.

Список літератури

1. Bakker G.J., Kremer H.J., Blom H.A.P. Probabilistic Approaches Toward Conflict Prediction // Air Transportation Systems Engineering, AIAA. – 2001. – P. 677–694.
2. Paielli R.A., Erzberger H. Conflict Probability Estimation for Free Flight // Journal of Guidance, Control and Dynamics. – 1997. – Vol. 20, № 3. – P. 588–596.
3. Васильєв В.М. Методи прогнозування і оцінки ймовірності конфліктів при польоті літаків на маршрутах // Вісн. НАУ. – 2004. – №2. – С. 24–29.
4. Унгурян С.Г., Маркович Е.Д., Волевач А.И. Анализ и моделирование систем управления воздушным движением. – М.: Транспорт, 1980. – 205 с.

Стаття надійшла до редакції 01.07.04.