АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ

0580.21 b61

УДК 621.391.2

организация возд. движения
обстановка воздушная
анализ ситуационный

В.П. Харченко, д-р техн. наук, проф.,
Д.О. Корчунов, мол. наук. співроб.

МЕТРИЧНИЙ ПРОСТІР СИТУАЦІЙ ПОВІТРЯНОГО РУХУ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розглянуто принципи побудови метрики як міри, що характеризує ситуації повітряної обстановки та її зв'язок з імовірностями виникнення цих ситуацій.

Загальні положення. На цей час особливу увагу приділяється ситуаційному аналізу повітряної обстановки. Це є наслідком зростання інтенсивності авіаперевезень одночасно із впровадженням скороченого вертикального ешелонування (RVSM), зональної навігації (RNAV) і новітніх концепцій виконання польотів (COOPATS, Free Flight і Safe Flight 21). У цьому аспекті найбільш прийнятним до класифікації ситуацій повітряного руху літальних апаратів є багатоальтернативний підхід. Автоматична класифікація ситуацій є єдиною можливістю одержання рішення в умовах багатофакторності причин появи різних класів ситуацій повітряного руху.

Послідовність етапів, що призводить від початкових даних об'єкта дослідження до результатів використаних методів з усіма зворотними зв'язками і розгалуженнями, необхідними для розв'язання проблеми автоматичної класифікації процесів і явищ організації повітряного руху, може бути зображена структурною схемою (рис. 1).

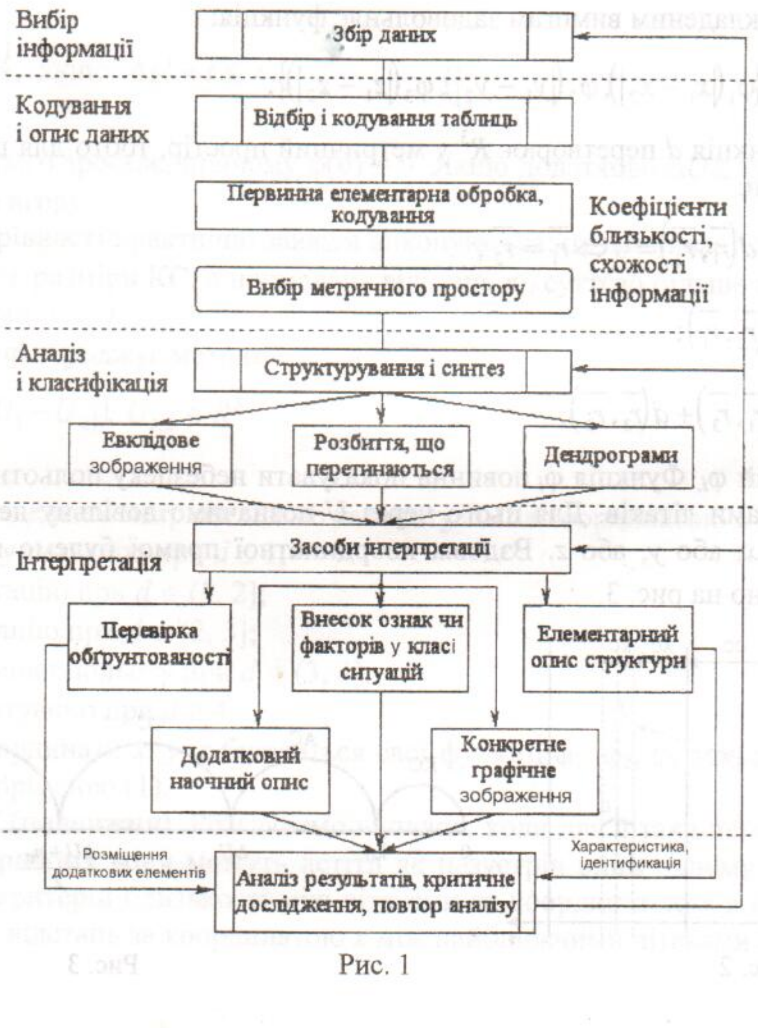

Рис. 1

Одним з ключових етапів алгоритму є вибір метрики, який логічно зв'язує процедури кодування і опису даних та аналізу і класифікації. Побудова метрики також робить можливим її виконання для оцінок імовірностей виникнення ситуацій.

Основні вимоги до метрики. Розглянемо пари літаків, що зближаються і знаходяться в безпосередній близькості. Вважаємо, що літаки рухаються рівнобіжними курсами вздовж осі Ox, що проходить паралельно осі траси (рис. 2). Для пари літаків із двох сусідніх маршрутів введемо п'ять ситуацій, що характеризують ступінь небезпеки польоту: нормальну ситуацію (НС), ускладнені умови польоту (УУП), складну ситуацію (СС), аварійну ситуацію (АС) і катастрофічну ситуацію (КС) [1; 2].

Положення літаків будемо також характеризувати їхньою висотою Z, подовжньою X та бічною Y координатами. Крім того, вважаємо, що в деякий момент часу спостерігаються положення I і II літаків, відповідно $\overline{r_1} = (x_1, y_1, z_1)$ і $\overline{r_2} = (x_2, y_2, z_2)$.

Введемо в просторі R^3 декартових трійок координат метрику, що характеризує ступінь небезпеки польоту двох літаків. Метрика буде більш небезпечним ситуаціям ставити у відповідність менші числа, тому що при таких ситуаціях взаємна відстань між літаками менше, ніж для менш небезпечних ситуацій.

Інша природна вимога полягає в тому, щоб шукана метрика $\rho(\overline{r_1}, \overline{r_2})$ була функцією від величин $|x_1 - x_2|$, $|y_1 - y_2|$ і $|z_1 - z_2|$. Вимагаємо також, щоб при зростанні кожного з цих модулів значення метрики збільшувалося. Остання вимога природна, тому що при збільшенні хоча б одного з цих модулів (при незмінних значеннях інших модулів) відстань між літаками збільшується, а ступінь небезпеки зменшується.

Нехай задані три опуклі вгору, строго зростаючі функції φ_i: $[0, +\infty) \to [0, +\infty)$, причому $\varphi_i(0) = 0$, $i = \overline{1,3}$. Викладеним вимогам задовольняє функція:

$$d(\overline{r_1}, \overline{r_2}) = \max\{\varphi_1(|x_1 - x_2|), \varphi_2(|y_1 - y_2|), \varphi_3(|z_1 - z_2|)\}. \qquad (1)$$

Крім того, функція d перетворює R^3 у метричний простір, тобто для цієї функції виконані три аксіоми метрики:

1) $d(\overline{r_1}, \overline{r_2}) \geq 0; d(\overline{r_1}, \overline{r_2}) = 0 \Leftrightarrow \overline{r_1} = \overline{r_2}$;

2) $d(\overline{r_1}, \overline{r_2}) = d(\overline{r_2}, \overline{r_1})$;

3) $d(\overline{r_1}, \overline{r_2}) \leq d(\overline{r_1}, \overline{r_3}) + d(\overline{r_3}, \overline{r_2})$.

Вибір функцій φ_i. Функція φ_i повинна показувати небезпеку польотної ситуації за відповідними координатами літаків. Для цього через U позначимо довільну декартову координату. Отже, U – це або x, або y, або z. Вздовж координатної прямої будемо відкладати величину $|U_1 - U_2|$, як показано на рис. 3.

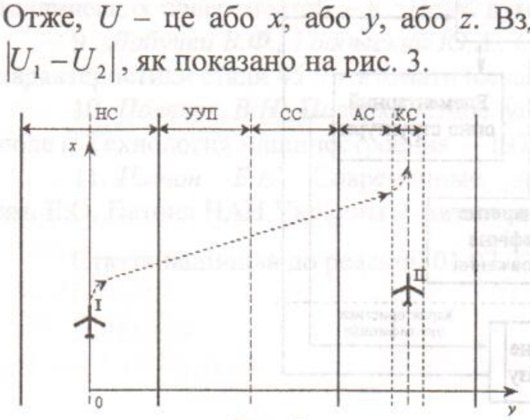

Рис. 2

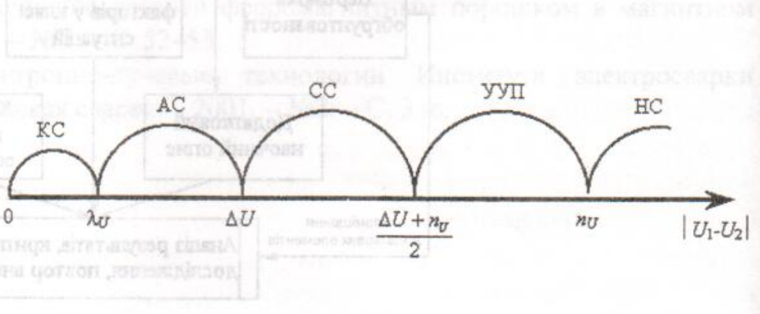

Рис. 3

Нехай λ_U – середній розмір літального апарата за координатою U, ΔU – мінімально припустима відстань за координатою U, передбачена нормами ICAO (наприклад, для бічного ешелонування в умовах RNAV – це половина величини встановленого типу RNP, що забезпечує дотримання умов неперевищення норм загальної похибки системи (TSE) протягом 95% польотного часу [3]), n_U – така досить велика відстань за координатою U, що при $|U_1 - U_2| \geq n_U$ за заданою координатою відбувається НС. Характеристики ΔU, n описують розміри і відстані повітряних коридорів, виділених для літаків.

Нехай при $|U_1 - U_2| \leq \lambda_U$ маємо за заданою координатою КС, при $|U_1 - U_2| \in (\lambda_U, \Delta U]$ маємо АС, при $|U_1 - U_2| > n_U$ маємо НС. Оскільки коридори СС і УУП поділяють навпіл проміжок між АС і НС, то при $|U_1 - U_2| \in \left(\Delta U, \frac{n_U + \Delta U}{2}\right]$ маємо СС, а при $|U_1 - U_2| \in \left(\frac{n_U + \Delta U}{2}, n_U\right]$ маємо УУП.

Тепер визначимо кусково-лінійну функцію φ, узгоджену з введеними ситуаціями: $\varphi(0) = 0$, $\varphi(\lambda_U) = 1$, $\varphi(\Delta U) = 2$, $\varphi(n) = 4$.

Функція φ діє з $[0, +\infty)$ в $[0, +\infty)$. Тому для задоволення зазначених значень вона повинна мати аналітичний вигляд:

$$\begin{cases} \dfrac{t}{\lambda_U}, \text{ якщо } 0 \leq t \leq \lambda_U; \\ 1 + \dfrac{t - \lambda_U}{\Delta U - \lambda_U}, \text{ якщо } \lambda_U < t \leq \Delta U; \\ 2 + \dfrac{2 \cdot (t - \Delta U)}{n_U - \Delta U}, \text{ якщо } \Delta U < t \leq \infty. \end{cases}$$

Ця функція строго зростає, причому $\varphi(0) = 0$. Якщо додатково $\Delta U \geq 2\lambda_U$ і $n_U \geq 3\Delta U - 2\lambda_U$, то функція φ опукла вгору.

Останні дві нерівності практично завжди виконуються: це випливає з того, що розміри АС значно перевершують розміри КС, а нормальна відстань n_U суттєво більше відстані безпеки ΔU, передбаченої нормами ICAO.

Отже, функція φ породжує метрику

$$d(U_1, U_2) = \varphi(|U_1 - U_2|),\ U_{1,2} \in R^3$$

на дійсній прямій.

Відповідно до введеної метрики маємо такі ситуації за координатою U:
- катастрофічну ситуацію при $d \leq 1$;
- аварійну ситуацію при $d \in (1, 2]$;
- складну ситуацію при $d \in (2, 3]$;
- ускладнені умови польоту при $d \in (3, 4]$;
- нормальну ситуацію при $d \geq 4$.

Для кожної координати x, y, z будуються свої функції φ_1, φ_2, φ_3 так, як описано. Шукана метрика задається формулою (1).

Координата *X* (подовжня). Розглянемо випадок, коли два літаки летять у сусідніх повітряних коридорах. Причому вони можуть летіти як назустріч один одному, так і в одному напрямку. Нехай S_x – критерій близькості між літаками за координатою x в одному повітряному потоці. Тоді середня відстань за координатою x між найближчими літаками сусідніх потоків дорівнює $S_x/2$ (рис. 4).

За n_x беремо в даному випадку $n_x = S_x/2$. Величина Δx, що задає АС, визначається нормативними документами. Тоді, маємо:

– нормальну ситуацію при $|x_1 - x_2| > S_x/2$;

– ускладнені умови польоту при $|x_1 - x_2| \in \left(\frac{\Delta x + n_x}{2}, n_x\right]$;

– складну ситуацію при $|x_1 - x_2| \in \left(\Delta x, \frac{\Delta x + n_x}{2}\right]$;

– аварійну ситуацію при $|x_1 - x_2| \in (\lambda_U, \Delta x]$;

– катастрофічну ситуацію при $|x_1 - x_2| \le \lambda_U$.

Координати *Y*, *Z* (бічна і вертикальна). Розглянемо випадок, коли два літаки никають у сусідніх повітряних коридорах. Через U позначимо одну з координат, в даному випадку y або z. При перебуванні обох літаків у заштрихованих зонах своїх повітряних коридорів, як це показано на рис. 5, маємо

$$|U_1 - U_2| \ge S_U - 2 \cdot \Delta U,$$

де S_U – критерій близькості.

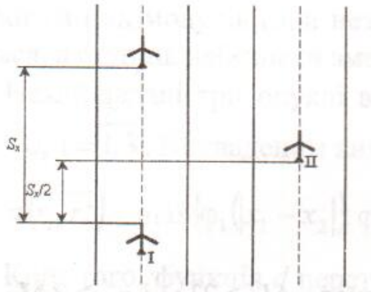

Рис. 4

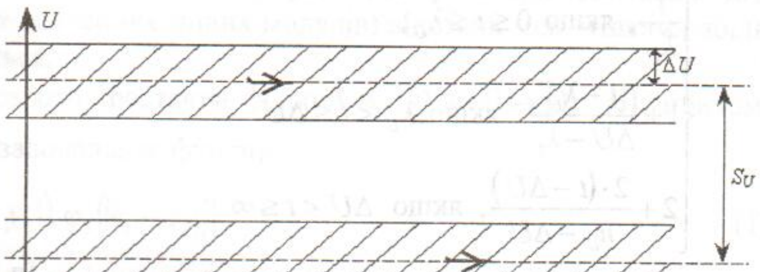

Рис. 5

Рівність досягається у випадку наближення літаків до сусідніх границь своїх повітряних коридорів. Доцільно припустити, що $n_U = S_U - 2\Delta U$.

Тоді можна записати умови виникнення:

– катастрофічної ситуації: $|U_1 - U_2| \le \lambda_U$;

– аварійної ситуації: $|U_1 - U_2| \in (\lambda_U, \Delta U]$;

– складної ситуації: $|U_1 - U_2| \in \left(\Delta U, \frac{n_U + \Delta U}{2}\right]$;

– ускладнених умов польоту: $|U_1 - U_2| \in \left(\frac{n_U + \Delta U}{2}, n_U\right]$;

– нормальної ситуації: $|U_1 - U_2| > n_U$.

Отже, побудову метрики (1) цілком завершено.

Глобальна класифікація ситуацій. Розглянемо два літаки із сусідніх повітряних ешелонів у межах однієї повітряної траси. Їхнє взаємне розташування характеризується метрикою (1): $d = d(\bar{r}_1, \bar{r}_2)$.

Введемо глобальну класифікацію ситуацій:

1) $d \in [0, 1]$ – КС;

2) $d \in (1, 2]$ – АС;

3) $d \in (2, 3]$ – СС;

4) $d \in (3, 4]$ – УУП;

5) $d \in (4, +\infty]$ – НС.

У першому випадку маємо за кожною координатою КС. У другому випадку за якоюсь координатою маємо АС, а по іншим – або АС, або КС і т.д. Значення d вказує на найменш небезпечну ситуацію за трьома координатами. Зокрема, при $d > 4$ хоча б за одною координатою маємо НС.

Далі закодуємо ситуації 1–5 такими номерами: КС – 0, АС – 1, СС – 2, УУП – 3, НС – 4. Такими ж номерами далі будемо кодувати ситуації за кожною з координат x, y, z.

Розрахунок імовірностей виникнення глобальних ситуацій для двох літаків розглянемо на прикладі одиночної повітряної траси.

Нехай i – номер ситуації: $i = \overline{0,3}$. Тоді ймовірність P_i попадання в i-у ситуацію пари літаків, що вільно никають у сусідніх коридорах, дорівнює:

$$P_i = P_z(\le i)P_y(\le i)P_x(\le i) - P_z(\le i-1)P_y(\le i-1)P_x(\le i-1). \tag{2}$$

У формулі (2) $i = \overline{0,3}$. При $i = 0$ маємо

$$P_0 = P_z(0)P_y(0)P_x(0),$$

де $P_z(0)$, $P_y(0)$, $P_x(0)$ – імовірності катастрофи за z, y, x відповідно.

Крім того, $P_z(\le i)$ – імовірність виникнення за координатою z будь-якої ситуації з номером від 0 до i включно. Аналогічно вводяться ймовірності $P_y(\le i)$ і $P_x(\le i)$.

Пояснимо формулу (2). Розглянемо подію A_i (відбулася i-а глобальна ситуація) і подію $A_{z\le i}$ (відбулася ситуація за координатою z з номером, що не перевершує i). Аналогічно вводяться події $A_{y\le i}$, $A_{x\le i}$. Подія A_i відбувається тоді, коли покоординатно найменш небезпечна ситуація має номер i, тобто коли відбуваються одночасно події $A_{z\le i-1}$, $A_{y\le i-1}$, $A_{x\le i-1}$. Формально це можна записати за допомогою теоретико-множинних операцій над подіями:

$$A_i = \left(A_{z\le i} \cap A_{y\le i} \cap A_{x\le i}\right) \setminus \left(A_{z\le i-1} \cap A_{y\le i-1} \cap A_{x\le i-1}\right).$$

Тоді за властивістю імовірностей подій $P(A)$ і через незалежність подій $A_{z\le i}$, $A_{y\le i}$, $A_{x\le i}$ (вважаємо, що літаки никають за кожною з координат незалежно) одержимо:

$$P_i = P(A) = P(A_{z\le i} \cap A_{y\le i} \cap A_{x\le i}) - P(A_{z\le i-1} \cap A_{y\le i-1} \cap A_{x\le i-1}) =$$
$$= P_z(\le i)P_y(\le i)P_x(\le i) - P_z(\le i-1)P_y(\le i-1)P_x(\le i-1),$$

і приходимо до формули (2).

Залишилося розрахувати множники правої частини формули (2). Нехай за координатою x ситуація «$\le i$» виникає, коли $|x_1 - x_2| \le l_i(x)$. Тоді відповідно до рівномірного розподілу різниці координат $(x_1 - x_2)$ на відрізку $[0, S_x]$ одержимо

$$P_x(\le i) = \frac{l_i(x)}{S_x}. \tag{3}$$

Зокрема, $l_0(x) = \lambda_{xy}$ при $i = 0$. Тоді формула (3) має значення:

$$P_x(0) = \frac{\lambda_x}{S_x},$$

яке аналогічно моделі Рейха [4].

Нехай $\psi(t)$ – щільність розподілу координати y, віднесена до осі повітряного коридору. Ситуація "$\leq i$" за координатою y виникає тоді, коли $|y_1 - y_2| \leq l_i(y)$. Оскільки $(y_1 - y_2)$ має щільність $\psi(y_1)\psi(y_2 - S_y)$, віднесену до осі I (рис. 2) повітряного коридору, то ймовірність появи ситуації «$\leq i$» буде дорівнювати:

$$\mathrm{P}_y(\leq i) = \iint\limits_{|y_1 - y_2| \leq l_i(y)} \psi(y_1)\psi(y_2 - S_y)dy_1 dy_2 = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \psi(y_1)dy_1 \int\limits_{y_1 - l_i(y)}^{y_1 + l_i(y)} \psi(y_2 - S_y)dy_2 . \quad (4)$$

Зокрема, $l_0(y) = \lambda_y$ при $i = 0$, і тоді вираз (4) бічного перекриття буде мати вигляд

$$\mathrm{P}_y(0) = \int\limits_{-\infty}^{\infty} \psi(y_1)dy_1 \int\limits_{y_1 - \lambda_y}^{y_1 + \lambda_y} \psi(y_2 - S_y)dy_2 \approx 2\lambda_y \int\limits_{-\infty}^{\infty} \psi(y_1)\psi(y_1 - S_y)dy_1 ,$$

що узгоджується з формулами моделі Рейха [4].

Аналогічно нехай $f(t)$ – щільність розподілу висоти z, віднесена до осі I повітряного коридору. Тоді ймовірність настання ситуації «$\leq i$» за координатою z буде:

$$\mathrm{P}_z(\leq i) = \int\limits_{-\infty}^{\infty} f(z_1)dz_1 \int\limits_{z - l_i(z)}^{z + l_i(z)} f(z_2 - S_z)dz_2 , \quad (5)$$

тобто ситуація «$\leq i$» за координатою z виникає, коли $|z_1 - z_2| \leq l_i(z)$. При $i = 0$ маємо $l_0(z) = \lambda_z$ і вираз (5) набуває вигляду

$$\mathrm{P}_z(0) = \int\limits_{-\infty}^{\infty} f(z_1)dz_1 \int\limits_{z - l_i(z)}^{z + l_i(z)} f(z_2 - S_z)dz_2 \cong 2\lambda_z \int\limits_{-\infty}^{\infty} f(z_1) f(z_1 - S_z)dz_1$$

Отже, встановлено взаємозв'язок побудованої метрики (1) з імовірностями виникнення ситуацій повітряної обстановки. Такий підхід дозволяє обгрунтувати багатоальтернативні моделі класифікації небезпеки польотів на основі оцінки ймовірності виникнення ситуацій. Одержана таким способом інформація використовується для керування ситуаціями, що дозволяє знизити ризик зіткнення літальних апаратів.

Список літератури

1. *Харченко В.П., Косенко Г.Г.* Многоальтернативный последовательный метод в задачах ситуационного анализа воздушной обстановки // Моделирование радиоэлектронных систем и комплексов обеспечения полетов: Сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 1996. – С. 3–10.

2. *Білецький А.Я., Корчунов Д.О., Харченко В.П.* Принципи побудови ситуаційних моделей системи керування повітряним рухом // Вісн. КМУЦА. – 2000. – № 3–4. – С. 255–260.

3. *Руководство* по требуемым навигационным характеристикам (RNP) (Doc 9613). – 2-е изд. – Монреаль: ICAO, 1999. – 57 с.

4. *Руководство* по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования (Doc 9689). – 1-е изд. – Монреаль: ICAO, 1998. – 124 с.

Стаття надійшла до редакції 29.10.02.