

УДК 656.7.08:519.87(045)

О.І. Запорожець, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.,
Хайдар Хосейн Ахмед, асп.

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ АВІАЦІЙНОЇ ПОДІЇ ПОВІТРЯНОГО КОРАБЛЯ

Визначено модель місця авіаційної події через функцію розподілу за умови залежності її параметрів від етапу польоту.

Модель місця авіаційної події (АП) є складовою моделі побудови контурів ризику «третьої сторони» навколо злітно-посадкових смуг аеропорту [1]. Для визначення моделі місця АП використовують базу даних ІКАО ADREP, базу даних США NTSB, мережу Інтернет. З джерела інформації ADREP ІКАО отримано дані про місце 678 АП, з ALPA (АТА) – 807 АП, з Airclaims (США) – 32 АП, з NTSB (США) – 59 АП, з САА-UK (Великобританія) – 26 АП.

Наведені джерела відрізняються за точністю і компетентністю подання інформації. Більше того, дані в різних джерелах подано різними способами, наприклад, у різних системах координат. У поточному наборі даних використовується тільки декартова система координат, яка може бути визначена відносно початку або кінця злітної смуги. Остаточний вибір залежить від типу АП. Деякі дані були виключені із загальних даних, оскільки були сумнівні про коректність місцезнаходження АП. Повторення в джерелах також були виключені шляхом вибору даних про АП і тип літака. Дані були поділені на п'ять категорій (табл. 1), але дані, що не потрапили до окремих категорій, були виключені.

Таблиця 1

Кількість АП із різних джерел

Джерело інформації	Переліт	Недоліт	Викочування		Відхилення	Некатегоризовані АП	Разом
			при зльоті	при посадці			
ADREP	67	109	35	67	74	326	678
ALPA	29	296	61	164	211	46	807
Airclaims	5	21	–	2	–	4	32
NTSB	5	9	3	4	11	27	59
CAA	–	–	4	18	–	4	26
Разом	106	435	103	255	296	407	1602

Розкид місць розташування АП за категоріями показаний на рис. 1. Вісь X направлена вздовж подовженої центральної лінії злітної смуги.

Кожна з п'яти категорій має значну кількість точок, розміщених на центральній лінії, з координатою $y = 0$. Цьому факту можна навести декілька пояснень:

- події дійсно часто відбуваються на центральній лінії;
- значення $y = 0$ використовується дослідниками для АП, що відбуваються безпосередньо поблизу (але не обов'язково) самої центральної лінії;
- місце АП подається тільки однією координатою, яка показує відстань до аеропорту, і $y = 0$ призначається по необачності, наприклад, при переведенні даних у декартові координати.

Понад 40 % АП можуть точно потрапити до центральної лінії (табл. 2).

Велика кількість точок на подовженій центральній лінії не є новиною. І раніше використовувалася функція Дірака для опису горизонтального розподілу місця розташування АП. Однак функція Дірака має небажані побічні ефекти. По-перше, через використання номінальних маршрутів розподіл на великих відстанях від злітної смуги вже більший за дійсний розподіл маршрутів руху. По-друге, функція Дірака має проблеми нерозривності при побудові поля ймовірності навколо викривленого маршруту.

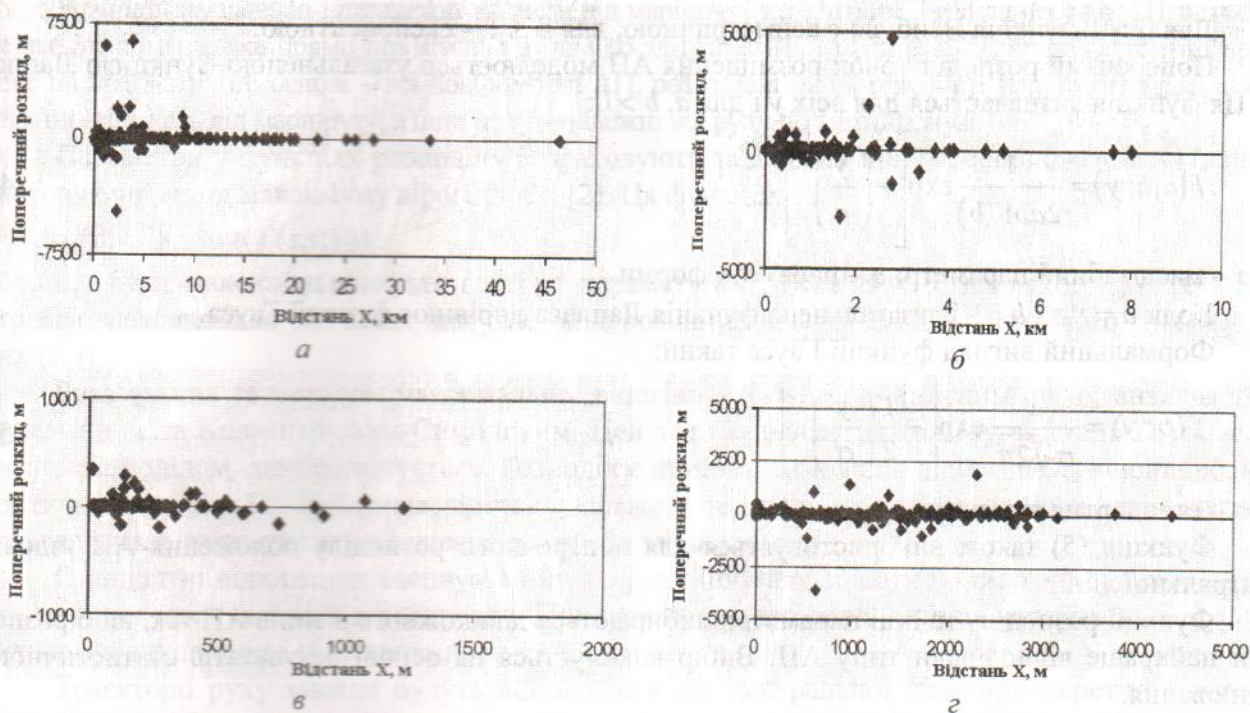


Рис. 1. Розкид місць розташування подій недоліту (а), перельоту (б), викочування при зльоті (в), відхилення (z)

Раніше допускалося, що поперечний розподіл залежить від горизонтальної координати X :

$$F(x, y) = f(y; x)f(x). \quad (1)$$

Альтернативно незалежний розподіл в обох напрямках може бути виражений залежністю:

$$F(x, y) = f(y)f(x). \quad (2)$$

Для того, щоб зробити правильний вибір між формулами (1) та (2), необхідно розглянути кореляцію зв'язку між відстанями x та y (табл. 3). Наведені результати кореляції вказують на існування залежності між розподілами. Можна припустити, що поперечний розподіл лінійно залежить від координати x .

Як правило, для моделювання АП використовуються три стандартні функції розподілу: Вейбуля, узагальнена функція Лапласа і нормальна або функція Гауса. Функція Вейбуля використовується для моделювання горизонтального розподілу АП. Така функція визначається для $x \geq 0$:

$$f(\eta, \beta; x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta\right], \quad (3)$$

де $\eta > 0$ – параметр масштабу; $\beta > 0$ – параметр форми.

Таблиця 2

Кількість АП різної категорії

Категорії АП	Кількість точок зльотної смуги	Відсоток до загальної кількості
Переліт	68	65
Недоліт	353	81
Викочування:		
при зльоті	72	70
при посадці	203	80
Відхилення	54	18

Таблиця 3

Кореляція між x та y

Категорія АП	x от y
Переліт	0,2764
Недоліт	0,2421
Викочування:	
при зльоті	-0,2872
при посадці	0,4251

Для $\beta > 1$ функція Вейбуля є асиметричною, для $\beta \leq 1$ – експонентною.

Поперечний розподіл точок розміщення АП моделюється узагальненою функцією Лапласа. Ця функція визначається для всіх y і для $a, b > 0$:

$$f(a, b; y) = \frac{1}{2ab\Gamma(b)} \exp\left[-\left(\frac{y}{a}\right)^{\frac{1}{b}}\right], \quad (4)$$

де a – масштабний параметр; b – параметр форми.

Коли $a = \sqrt{\sigma}$ і $b = 1/2$, узагальнена функція Лапласа дорівнює функції Гауса.

Формальний вигляд функції Гауса такий:

$$f(\sigma; y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma}\right)^2\right], \quad (5)$$

де σ – стандартне відхилення, м.

Функція (5) також використовується для поперечного розподілу положення АП уздовж центральної лінії.

Функції розподілу та їхні параметри вибираються для кожного з типів АП так, щоб розподіли найкраще відповідали типу АП. Вибір виконується на основі результатів статистичного оцінювання.

З погляду механіки польоту немає різниці між викочуваннями літака за межі злітної смуги при пробігу під час посадки і розбігу перед зльотом. В обох випадках пілот буде намагатися зупинити літак нормальним способом, наприклад, використанням реверса тяги двигунів та/або гальм. Дані з баз даних про АП показують, що швидкості для таких стадій польоту приблизно рівні і рівні розподіли кінетичної енергії. Тому викочування літака при зльотах і посадках моделюються, використовуючи однакові функції розподілу (хоч і з різними параметрами).

Пілот, який потрапив до АП, спробує зупинити літак так швидко, як це можливо. Необхідність керувати літаком може бути викликана тільки тим, щоб уникнути перешкод. Тому велика кількість викочувань літака знаходиться на центральній лінії. Більша кількість АП, указаних у повідомленнях, характеризується положенням літака в межах ширини злітної смуги, тому при дослідженнях АП вони подаються на подовженій центральній лінії, хоча необов'язково вони знаходяться безпосередньо на центральній лінії.

Функція розподілу для АП типу викочування набуває вигляду:

$$f_{\text{вук}}(s, t) = f_w(\eta, \beta, s) \{pf_G(\sigma_0, t) + (1-p)f_L(b, a_0 + a_1s; t)\}$$

де f_w, f_G, f_L – відповідно функції розподілу Вейбуля (3), Гауса (5), Лапласа (4).

Недольоти та перельоти також моделюються однаковими функціями. Ці функції поділяються на частини, залежні від руху по маршруту і злітній смузі (незалежна від маршрутної частини). Частина, залежна від руху по злітній смузі, використовується для обліку можливості АП під час швидкого запобігливого маневру, що не враховує наступний маршрут польоту, тобто цей маршрут може бути наперед не відомим.

У моделі для розподілів недольотів та перельотів використовуються такі функції:

$$f(s, t) = pf_{\text{мз}}(s, t) + (1-p)f_{\text{зсз}}(s, t). \quad (6)$$

Частина, залежна від маршруту $f_{\text{мз}}$, в формулі (6) моделюється як

$$f_{\text{мз}}(s, t) = f_w(\eta, \beta; s) f_G(\sigma_0 + \sigma_1s, t), \quad (7)$$

а частина, залежна від руху по злітній смузі, $f_{\text{зсз}}$:

$$f_{\text{зсз}}(s, t) = f_w(\eta, \beta; s) f_L(b, a_0 + a_1s; t). \quad (8)$$

Параметри обох функцій Вейбуля в формулах (6), (7), (8) визначаються різними наборами даних, тому будуть різні.

Розподіл на залежні і незалежні частини від маршруту не є чітким. База даних про АП звичайно не дає інформації, яка прямо пов'язана з рухом по злітній смузі і маршруту. Таке розподілення зроблене на прагматичній основі – всі повідомлені АП, розміщені на центральній лінії, розглядаються як такі, що залежать від маршруту, а інші події – залежні від руху по злітній смузі.

Параметри у функціях розподілу розраховують за даними про місцезположення АП, використовуючи метод максимуму вірогідності [2]. Ця функція:

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^n \log(f(s, t; \theta))$$

повинна бути максимальною для вектора параметрів θ . Розв'язок θ , для якого функція $L(\theta)$ отримує максимальне значення, набуває найвірогідніший розподіл для поточного набору даних (s, t) .

Розв'язання за методом максимальної вірогідності буде прийнятним чи ні, визначається тестуванням за Колмогоровим-Симоновим. Цей тест визначає найбільшу відстань D_{ks} між даними і розподілом, що пропонується. Розподіл є прийнятним, якщо відстань D_{ks} є меншою, ніж критична відстань D_c . Критична відстань залежить від розміру набору даних і визначається стандартними статистичними залежностями або за таблицями.

Стандартні відхилення експлуатаційного руху поблизу зі злітною смугою будуть меншими, ніж для руху далеко від аеропорту. Припускається, що існує лінійна залежність між стандартним відхиленням і відстанню до злітної смуги.

Траєкторії руху завжди будуть відхилятися від центральної лінії при перетині порогів злітної смуги. Стандартні відхилення в цих точках визначаються за правилами IAR. Правило IAR-AWO 131 у параграфі 1.4 визначає максимум імовірності перевищення мінімальної відстані до границь злітної смуги.

Для усередненого літака (наприклад, типу Боїнг-737), у якого колія шасі становить приблизно 6 м, правила IAR застосовуються, якщо центр літака знаходиться на 18 м від центру злітної смуги. Це може статися не більше одного разу на мільйон в умовах експлуатації. Допускаючи, що траєкторії руху літаків нормально розподілені навколо центральної лінії, відхилення в точці порогу повинно бути меншим, ніж $18/4.89 = 3,68$ м. Стандартне відхилення в точці порогу, яке використовується в моделі, дорівнює 3,5 м. Це означає, що приблизно 99 зі 100 літаків літають в межах половини ширини злітної смуги, і це допустимо.

Звіт ІКАО [3] вміщує стандартні відхилення для горизонтального розподілу для траєкторій польоту при посадках ILS CAT II. Дані, що використовуються в звіті ІКАО, були взяті з Німеччини (137 випадків), Голландії (930), Америки (295) і Англії (160). Стандартні відхилення траєкторій польоту при посадках ILS CAT II, побудовані за даними табл. II-3-6 звіту ІКАО, показано на рис. 2. Лінія регресії, виведена з цих спостережень, має нахил $4,9 \cdot 10^{-3}$, тобто стандартне відхилення σ для поперечного розподілу збільшується на 4,9 м за 1 км. Стандартне відхилення для посадки дорівнює $\sigma = 3,5 + 4,9 \cdot 10^{-3}$.

Горизонтальний розподіл складається з двох частин: одна зображує місцезположення на центральній лінії, інша частина визначає інші місцезположення. Ваговий чинник p у моделях (наприклад, у формулі (6)) визначає вагу кожної частини в такій формі:

$$p \int_0^{\infty} f_w(\eta, \beta; s) ds + (1-p) \int_0^{\infty} f_L(b, a_0 + a_1 s; t=0) f_w(\eta, \beta; s) ds = \frac{n_{y=0}}{n} \quad (9)$$

бо шанс того, що місцезположення АП на продовженій центральній лінії дорівнює частці в наборі даних АП, розміщених уздовж центральної лінії. Величина p визначає частку розподілу, яка знаходиться на центральній лінії. Рівняння (9) приблизно дорівнює:

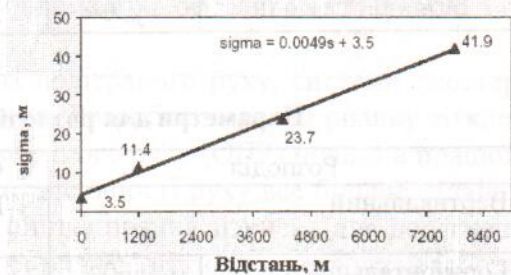


Рис. 2. Стандартні відхилення траєкторії польоту при посадках ILS CAT II

$$p + (1-p) \frac{1}{2a_0 b \Gamma(b)} = \frac{n_{y=0}}{n} \Leftrightarrow p = \frac{n_{y=0} 2a_0 b \Gamma(b) - 1}{2a_0 b \Gamma(b) - 1} \quad (10)$$

Чинник ваги може бути розрахований з рівняння (10).

Результуючі параметри розподілів надано в табл. 4–7.

Таблиця 4

Параметри для розподілу перельотів ($n=106, n_{y=0}=68$)

Розподіл		Функція	Параметри	$D_{кс}$	D_c
Вертикальний	$y=0$	Вейбуля	$\eta; \beta$	0,0887	0,1649
	$y \neq 0$	Вейбуля	$\eta; \beta$	0,0884	0,2206
Горизонтальний	$y=0$	Гауса	$\sigma_0; \sigma_1$	0,081	0,9055
	$y \neq 0$	Лапласа	$A_0; a_1; b$	0,0786	0,2206

Таблиця 5

Параметри для розподілу викочування при зльоті ($n=103, n_{y=0}=72$)

Розподіл		Функція	Параметри	$D_{кс}$	D_c
Вертикальний		Вейбуля	$\eta; \beta$	0,0563	0,1340
Горизонтальний	$y=0$	Гауса	σ_0	0,092	0,256
	$y \neq 0$	Лапласа	$A_0; a_1; b$	0,0918	0,2458

Таблиця 6

Параметри для розподілу недольотів ($n=435, n_{y=0}=353$)

Розподіл		Функція	Параметри	$D_{кс}$	D_c
Вертикальний	$y=0$	Вейбуля	$\eta; \beta$	0,0494	0,0724
	$y \neq 0$	Вейбуля	$\eta; \beta$	0,0471	0,1502
Горизонтальний	$y=0$	Гауса	$\sigma_0; \sigma_1$	0,045	0,1418
	$y \neq 0$	Лапласа	$A_0; a_1; b$	0,0449	0,1422

Таблиця 7

Параметри для розподілу викочування при посадці ($n=255, n_{y=0}=203$)

Розподіл		Функція	Параметри	$D_{кс}$	D_c
Вертикальний		Вейбуля	$\eta; \beta$	0,0572	0,0852
Горизонтальний	$y=0$	Гауса	σ_0	–	–
	$y \neq 0$	Лапласа	$A_0; a_1; b$	0,09178	0,1807

Запропоновані моделі (1)–(8) та знайдені значення параметрів (табл. 4–7) дозволяють з більшою достовірністю знаходити значення функцій розподілу місця авіаційної події при визначенні контурів ризику «третьої сторони» на околицях аеропортів цивільної авіації.

Список літератури

1. Запорожец А.И., Хайдар Хосейн Ахмед. Контуры риска «третьей стороны» в окрестности аэропортов гражданской авиации // *Вісн. НАУ.* – 2001. – № 4. – С. 166 – 171.
2. Брандт З. Статистические методы анализа наблюдений. – М.: Мир, 1975. – 312 с.
3. *Manual on the use of the collision risk model (CRM) for ILS operations* // ICAO Doc 9274-AN/904, 1980. – 67 p.

Стаття надійшла до редакції 26. 06. 02.