

Микола Григорович Живицький

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ МАРШРУТНОЇ НАВІГАЦІЇ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЗАДАНОГО РІВНЯ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ

Постановка проблеми у загальному вигляді

Реалізація принципів зональної навігації [1] вимагає від користувачів повітряного простору, по можливості, враховувати всі фактори, що будуть впливати на безпеку повітряної навігації. Оскільки дане питання є достатньо складним [1, 2] для його негайного впровадження, то фахівцями міжнародної організації цивільної авіації розроблена Концепція гнучкого використання повітряного простору (FUA), яка є одним з кроків еволюційного розвитку концепції вільного використання повітряного простору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Значний внесок у дослідження зазначеного питання зробили такі вчені як Г.Ф. Молоканов [3], С.П. Мосов, О.А. Машков, Р.В. Хращевський, В.М. Горбенко [2] та інші. Зазначені вчені досліджували питання штурманського забезпечення безпеки польотів, визначили основні напрямки розвитку повітряної навігації. Дана публікація є продовженням дослідження і інтеграції наявних знань щодо забезпечення безпеки польоту в 4-х вимірному повітряному просторі вільних маршрутів з метою подальшої автоматизації процесів управління польотами.

Метою даної статті є розробка методики визначення ймовірності маршрутної навігації із забезпеченням заданого рівня безпеки польотів в повітряному просторі.

Попередження небезпечних зближень та запобігання зіткнень повітряних суден (ПС) у повітрі займають одне з важливих місць в забезпеченні безпеки польотів у штурманському відношенні. Виключення випадків небезпечних зближень та запобігання зіткнень досягаються правильним розміщенням траєкторії польоту ПС у повітряному просторі, точним і надійним витримуванням її в польоті, а також обладнанням всіх ПС системами попередження зіткнень.

Вибір і розміщення у повітряному просторі траєкторії польотів ПС включає: визначення безпечного бічного інтервалу між паралельними ділянками сусідніх маршрутів; розрахунок безпечного часового інтервалу виходу ПС в точки перетину маршрутів на однакових висотах;

установлення безпечних дистанцій польоту ПС по одному маршруту; ешелонування ПС за висотами; визначення мінімально допустимого віддалення лінії заданого шляху (ЛЗШ) від меж заборонених зон.

На основі аналізу визначається можливість небезпечних зближень ПС, що виконують польоти по різних маршрутах, у випадках виходу їх в одні і ті ж райони в один і той же час на однакових висотах. Для цього необхідно виконати спеціальні розрахунки по урахуванню можливих бокових відхилень або використовуються одержані на їх основі норми ешелонування. Основними з них є: розрахунок ширини смуги маршруту; розрахунок мінімального віддалення ЛЗШ від межі забороненої зони; розрахунок мінімальної відстані між паралельними ділянками сусідніх маршрутів.

Розрахунок ширини смуги маршруту є базовим, оскільки його результати використовуються при виконанні інших розрахунків.

Смугою маршруту називають смугу, що симетрично розташована відносно ЛЗШ, за межі якої за час прольоту даного етапу (етапів) маршруту ПС жодного разу не вийде з необхідною гарантійною ймовірністю. Ширина смуги маршруту вказується віддаленням її меж від ЛЗШ – $\pm C$, км; (всього $2C$, км). Гарантійна ймовірність невиходу ПС за межі смуги маршруту P_0 на даному етапі відповідає ймовірності того, що максимальна величина абсолютного значення бокового відхилення l , спостережувана на цьому етапі, не перевищить величини C . Якщо смуга маршруту визначається для декількох (N) етапів, гарантійна ймовірність P_N невиходу ПС за її межі відповідає ймовірності того, що ні на одному з N етапів максимальні абсолютні значення бокових відхилень не перевищать величини C .

На підставі теоретичних досліджень і статистичного аналізу бокових відхилень, що спостерігалися в польотах, виконаних на різних типах літаків і вертольотів в різних умовах, встановлено [2], що максимальні значення абсолютної величини бокових відхилень на етапах маршруту є практично незалежними один від одного випадковими величинами, розподіл яких достатньо добре описується подвійним

експоненціальним законом розподілу, інтегральна функція якого має вид:

$$F(y) = \text{EXP}(-e^{-y}) \quad (1)$$

де $y = \frac{1 - q_1}{\hat{\sigma}_1}$ – нормована змінна;

l – максимальна величина абсолютного значення бокового відхилення на етапі маршруту;

$q_1, \hat{\sigma}_1$ – параметри розподілу;

e – основа натуральних логарифмів.

У свою чергу, параметри q_1 і $\hat{\sigma}_1$ пов'язані з математичним очікуванням m_1 і середнім квадратичним відхиленням $\hat{\sigma}_1$ самої величини l наступними залежностями:

$$q_1 = m_1 - 0.4501 \sigma_1; \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1}{1.2826} \quad (3)$$

Величини m_1 і σ_1 оцінюються шляхом статистичної обробки максимальних на етапах маршрутів значень абсолютної величини бокових відхилень l , що спостерігалися раніше у фактично виконаних польотах:

$$\tilde{m}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}; \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma}_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \tilde{m}_1)^2}{n-1}}, \quad (5)$$

де \tilde{m}_1 та $\tilde{\sigma}_1$ – статистичні оцінки величин m_1 і σ_1 відповідно;

n – кількість опрацьованих значень l .

Значення m_1 і σ_1 з достатньою для практики точністю можна вважати рівними їх статистичним оцінкам. Тоді ширина $\pm C$ смуги маршруту для заданої гарантійної ймовірності P_0 невиходу за її межі за час прольоту одного етапу маршруту може бути визначена рішенням рівняння (1) за умови $F(y) = P_0$ і $l = C$, що після відповідних перетворень дає:

$$c = m_1 - \sigma_1 [0.45 + 0.78 \ln(-\ln P_0)] \quad (6)$$

Розрахунок ширини смуги маршруту $\pm C$, за межі якої з ймовірністю P_N ПС жодного разу не вийде за час прольоту N послідовних етапів, виконується виходячи з того, що при достатньо високій гарантійній ймовірності P_0 невиходу за межі смуги на кожному етапі випадки виходу можна розглядати, як явища рідкісні, кількість появи яких добре описується законом розподілу Пуассона.

Середнє число a_N цих виходів на ділянці маршруту, що має N етапів, на підставі закону великих чисел можна визначити з виразу:

$$a_N = N[1 - F(y_C)] \quad (7)$$

де $F(y_C)$ – значення функції $F(y)$ при $l = C$ (тобто ймовірність невиходу ПС за смугу шириною $\pm C$ на одному етапі маршруту P_0).

Тоді ймовірність P_N того, що за час прольоту всіх етапів маршруту ПС жодного разу не вийде за межі смуги шириною $\pm C$, км, відповідно до закону Пуассона визначиться виразом:

$$P_N = \text{EXP}(-a_N). \quad (8)$$

Підставивши сюди значення a_N з формули (7), врахувавши вирази (1) і (2) і вирішивши одержане рівняння відносно C , одержимо:

$$c = m_1 - \sigma_1 \{0.45 + 0.78 \ln[\ln N - \ln(\ln P_N + N)]\} \quad (11)$$

Ширина смуги маршруту визначається для загальної кількості польотів на ПС даного типу в певних умовах. При цьому ширина смуги маршруту, визначена для однієї якої-небудь гарантійної ймовірності і однієї і тієї ж довжини маршруту по ПС, може служити показником якості їх повітряної навігації.

Значення ширини смуги маршруту використовується для оцінки безпеки прольоту заданого коридору, оцінки можливості спостереження контрольних орієнтирів, що розташовані в стороні від лінії заданого шляху і в інших випадках. Взаємне розташування траєкторій польоту в районі польотів повинно забезпечувати: безпечно розходження ПС у повітрі згідно з правилами вертикального, повздовжнього та бічного ешелонування; політ поза заборонених (небезпечних) зон.

Розміщення у повітряному просторі розрахункових траєкторій польотів ПС здійснюється на основі аналізу взаємного розташування всіх маршрутів у районі польотів з урахуванням їх ширини смуги безпеки, часових графіків руху ПС та запланованих для них висот (ешелонів). Для такого аналізу виконуються попередні розрахунки можливих відхилень ПС від ЛЗШ і ширини смуги безпеки вздовж етапів маршрутів польотів.

Усі розрахунки, пов'язані із запобіганням випадків небезпечних зближень і зіткнень ПС, базуються на прогнозованій точності і надійності навігації в подальших польотах. Точність навігації у майбутньому польоті характеризується величиною середньоквадратичної бічної помилки (СКБП) витримування ЛЗШ σ_1 .

Надійність навігації на етапі маршруту польоту – це ймовірність невиходу за межі смуги безпеки P , яка встановлюється при визначенні мінімальної безпечної відстані між сусідніми паралельними маршрутами ($P \geq 0,999$).

Розрахунок ширини смуги маршруту виконується для нормального та подвійного експоненціального законів розподілу помилок витримування ЛЗШ. Максимальне з двох значень смуги використовується для оцінки взаємного розташування траєкторій у районі польотів.

Ширина смуги безпеки вздовж етапу маршруту для нормального закону розподілу обчислюється за формулою:

$$C_1 = \pm \sigma_1 \sqrt{2 \ln \frac{t}{-t_0 \ln \frac{\Phi\left(\frac{C}{\sigma_1 t_0}\right)}{P}}}, \quad (9)$$

де t – час польоту на етапі;

t_0 – середній інтервал часу між корекціями координат ПНС на етапі маршруту (півперіод коливань ПС відносно ЛЗШ);

σ_{10} – СКБП виходу на ППМ.

Це співвідношення явно не вирішується, його можна вирішити методом ітерацій (послідовних приближень). При $|C_1| \geq (2 - 3) \sigma_{10}$ значення інтегралу імовірності близьке до одиниці, тоді співвідношення (9) спрощується і матиме вигляд:

$$C_1 = \pm \sigma_1 \sqrt{2 \ln \frac{t}{-t_0 \ln P}} = Y \sigma_1$$

Інтеграл імовірності у формулі (1) обчислюється за наближеною формулою:

$$\Phi(T) = \sqrt{1 - e^{-0,6286T^2}},$$

де $T = \frac{C}{\sigma_{10}}$, а параметр Y – за допомогою табл.1.

Таблиця 1

Значення параметру Y

Імовірність польоту в межах смуги, P	$\frac{t}{t_0} = 1$	$\frac{t}{t_0} = 2$	$\frac{t}{t_0} = 6$
0,95	2,44	2,7	3,1
0,98	2,8	3,03	3,37
0,997	3,4	3,6	3,9
0,999	3,72	3,9	4,17

Відношення $\frac{t}{t_0}$ приблизно рівне збільшеній на одиницю кількості корекцій ПНС на етапі маршруту польоту. При збільшенні кількості корекцій зростає параметр Y , проте одночасно зменшується СКБП σ_1 . Тому лінійної залежності ширини смуги від кількості корекцій не існує.

З урахуванням цих попередніх обчислень ширина смуги безпеки вздовж етапу маршруту для подвійного експоненціального закону розраховується за формулою:

$$C_2 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \ln(-\ln P) \sigma + m - 0,45 \sigma \quad (10)$$

У практиці не завжди вдається розташувати маршрути польотів на безпечних відстанях один від одного. Тому в тих випадках, коли траєкторії польотів з урахуванням смуги безпеки перетинаються чи сходяться на віддалення за часом менше $2s$, необхідно визначити і врахувати при плануванні порядку використання повітряного простору мінімально допустимий часовий інтервал виходу ПС в точки перетину чи райони зближення сусідніх маршрутів.

Планування маршрутних польотів за часом виконується, як правило, штильовим розрахунком, тому безпечні часові інтервали виходу ПС в точки перетину чи райони зближення маршрутів залежать від можливих випадкових відхилень

фактичного часу виходу в них від розрахункового, які виникають з таких причин: не витримання розрахункових швидкостей польоту ПС до точки перетину (району зближення) сусідніх маршрутів; відхилення ПС від ЛЗШ; похибка визначення відстаней до точки перетину (району зближення); несвоєчасний зліт ПС.

Перші три причини відхилень за часом моментів виходу ПС в задану точку носять випадковий характер і характеризуються сумарною СКП σ_1 . Несвоєчасний зліт ПС легко враховується на землі шляхом перенесення розрахункового часу проходження заданої точки, тому в подальшому ця часткова помилка не розкривається.

Мінімальний часовий інтервал виходу двох ПС в точку перетину (район зближення) сусідніх маршрутів дорівнює сумі максимально можливих помилок виходу в неї за часом Δt_{\max} . Величину помилки виходу ПС в задану точку по часу Δt можна отримати для гарантійної імовірності P_Γ , що вимагається, за такою приблизною формулою:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{\ln(1 - P_\Gamma^2)}{0,6286}} = X \sigma_1$$

Точне значення параметра X (інтеграл імовірності) наведено нижче:

Таблиця 2

Значення гарантійної імовірності при відповідних значеннях параметру

Гарантійна ймовірність P_Γ	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,997
Параметр X	1,96	2,05	2,17	2,33	2,57	3

З урахуванням цього $\Delta t_{\max} = 2\Delta t$. Значення СКП виходу в задану точку (на заданий рубіж) за часом в умовах стройової частини можна отримати, опрацювавши статистику помилок виходу екіпажів в різні точки маршруту. При визначенні

безпечного часового інтервалу виходу груп в точки перетину маршрутів на однаковій висоті значення P_Γ належить брати в межах 0,999-0,9999.

Після визначення основних параметрів безпечних інтервалів можна змоделювати «зону безпеки» повітряного судна при виконанні маршрутного польоту. Графічна інтерпретація якої представлена на рис. 1.

В любий момент часу при надходженні в систему зональної навігації інформації про ПС для кожного ПС буде змодельована зона безпеки. У випадку виникнення критичних ситуацій (входження зони безпеки одного ПС в зону безпеки іншого) буде запропоновано оптимальну траєкторію в 4-х вимірному просторі для його усунення (збільшення ймовірності прольоту по маршруту).

Процес вирішення вказаних задач, що визначають основний зміст навігації, може розглядатися як функціонування ергономічної системи, що являє собою сукупність дій екіпажу, що враховує умови польоту і застосовує взаємопов'язані бортові і наземні навігаційні засоби на користь вирішення поставленої на політ задачі.

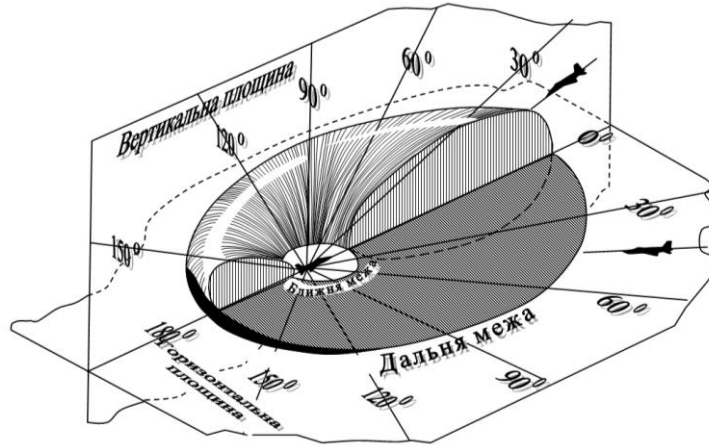


Рис. 1. Область безпеки повітряного судна при виконанні маршрутного польоту

В такому трактуванні навігація включає функціонування всіх трьох елементів ергономічної системи: людину (екіпаж), техніку (бортові і наземні навігаційне устаткування) і середовище (повітряну, навігаційну обстановку і інші чинники, які характеризують умови польоту).

Системний синтез спирається на математичний опис процесу, що вимагає побудови узагальненої моделі, для наочного уявлення і подальшого дослідження якої є зручною мережева модель навігації, що дозволяє перейти до кількісної оцінки її ефективності.

Під ефективністю маршрутної навігації розумітимемо ймовірності виконання польоту по заданому маршруту без відхилень ПС від заданої траєкторії, які перевищують допустимі величини проходом основних точок маршруту в межах призначеного інтервалу часу.

Для знаходження ефективності вирішення основних задач навігації необхідно визначити ступінь впливу різних чинників на вказану вище ймовірність виконання польоту з необхідною точністю. Це можна зробити шляхом декомпозиції навігації з її багаторівневим описом [3, 4] і врахуванням ефективності вирішення часткових навігаційних задач, під якими умовимося розуміти ймовірності того, що дана задача буде своєчасно вирішена з точністю, не нижче тієї яка вимагається. На другому рівні декомпозиції навігації знаходження оптимальної траєкторії обмежимо вибором необхідного числа поворотних пунктів маршруту (ППМ) і висот їх прольоту, що визначають маршрут і профіль польоту. В даний час ця задача розв'язується евристично з таким розрахунком, щоб вибрані маршрут і профіль забезпечували найкращі умови для виконання

головного завдання польоту з урахуванням обмежень по втратах і вимог безпеки і, по можливості, не знижували задану на першому рівні ймовірності P_T виконання поставленого екіпажу завдання. Природно, що даний метод не дає гарантії близькості вибраної траєкторії до оптимальної чи тієї, що вимагається.

Основним критерієм ефективності маршрутної навігації на цьому рівні, є ймовірності проходу ПС через всі пункти маршруту з похибками за часом, боковому і вертикальному відхиленню, що не перевищують заданих значень.

Звичайно при виконанні польоту по маршруту екіпажі, проводячи корекцію місцезнаходження ПС і виправляючи шлях, допускають найбільші ухилення між ППМ, тоді як на самі ППМ прагнуть вийти точніше, «скидаючи» ті похибки в навігації, що нагромадилися до моменту їх проходження. Досвід показує, що помилки виходу на ППМ по боковому відхиленні Z , висоті прольоту H і часу t при звичайному перебігу процесу можна вважати незалежними і такими, що підкоряються нормальному розподілу з нульовими математичними очікуваннями і середніми квадратичними відхиленнями, відповідно σ_{Z0} , σ_{H0} , σ_t . Вважаючи інтервали допустимих відхилень ЛА по висоті, часу проходу і відхиленню від ППМ симетричними, ймовірності проходу кожної з основних точок маршруту з дотриманням заданих вимог можна знайти по формулі:

$$P_{ППМ} = \Phi\left(\frac{Z}{\sigma_{Z0}}\right)\Phi\left(\frac{\Delta H}{\sigma_{H0}}\right)\Phi\left(\frac{\Delta t}{\sigma_t}\right), \quad (11)$$

де $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – інтеграл ймовірності.

В цьому співвідношенні величини σ_{z0} , σ_{h0} , σ_t , як і допустимі відхилення Z , Δt , ΔH , для кожного ППМ можуть бути різними. Для несиметричних інтервалів прийнятних діапазонів похибок можна написати більш загальне співвідношення.

Формулу (11) можна використовувати для оцінки ефективності маршрутної навігації при польоті на заданий аеродром посадки, надійний вихід на який, як правило, з високою ймовірністю забезпечується спеціальними засобами приводу.

Звернемо увагу, що на цьому рівні виконання польоту по маршруту зводиться до вирішення завдання послідовного виводу ПС в наступну точку, а не безперервного утримання його на заданій в загальному випадку криволінійній траєкторії руху.

Для оцінки ймовірності проходу ПС кожного ППМ необхідно знати умовну ймовірність його польоту над наступним пунктом, знайдену в припущенні, що попередня точка маршруту пройдена в межах відведених допусків. В протилежному випадку ймовірність точного проходу подальшого ППМ, коли від попереднього пункту мали місце великі відхилення ПС, буде нижчою, ніж в першому випадку, особливо у польоті по ламаному маршруту. Тому необхідно оперувати

формулами повної ймовірності відповідних подій [3, 4].

Загальна ефективність навігації на маршруті, що визначається k основними точками (ВПМ, ППМ, ..., КПМ), а також ймовірністю P_n виходу на аеродром посадки, визначимо за формулою:

$$P_M = P_n \prod_{i=1}^k P_{ППМ_i} \quad (12)$$

Подальше уточнення профілю, режиму польоту і виду траєкторій між ППМ (маневрів) віднесемо до третього рівня декомпозиції навігації.

Висновки

Таким чином, сформована методика визначення ефективності маршрутної навігації з урахуванням безпеки повітряної навігації є основою для реалізації концепції вільного використання повітряного простору. Вихідними даними цієї методики будуть ймовірності безпечного польоту з пункту А в пункт Б, які будуть визначатися в масштабі реального часу і будуть вхідними характеристиками методики синтезу повітряного простору вільних маршрутів. Методика синтезу повітряного простору вільних маршрутів буде представлена в подальших публікаціях.

Література

1. **Eurocontrol manual** for airspace planning. Volume 2. Common guidelines // Brussels.: European organisation for the safety of air navigation. – 2003. –451р. 2. **Штурманське забезпечення** авіаційних з'єднань та частин. Частина II. Забезпечення безпеки польотів у штурманському відношенні / С.П. Мосов, О.А. Машков, Р.В.

Храшевський, В.М. Горбенко та ін.; Під ред. С.П. Сафронова. –К.: НАОУ, 2007. –475 с. 3. **Молоканов Г. Ф.** Эффективность маршрутной навигации и выхода на цель. – М., 1983. – 87 с. 4. **Королев А.В.**, Кучук Г.А., Пашнев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. – Х.: ХВУ, 2003. –224 с.

На основании анализа условий и факторов, которые влияют на воздушную навигацию, разработана методика определения вероятности маршрутной навигации с обеспечением заданного уровня безопасности полётов в воздушном пространстве.

Ключевые слова: маршрутная навигация, безопасность полётов, воздушное пространство.

Based on analysis of the conditions and factors that affect air navigation, the methods of determining the probability of route navigation with a certain level of flight safety in the air was developed.

Key words: route navigation, flight safety, airspace.