

УДК.621.396.61

М.Д. Рисаков, І.В. Тітов, І.Л. Костенко, В.Г. Карєв, О.П. Кулик, Ю.М. Добришкін

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МЕТОДИКА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ПОСАДОЧНОГО РАДІОЛОКАТОРУ ЩОДО ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОСАДКИ ЛІТАКІВ ПРИ МІНІМУМАХ ПОГОДИ І ТА ІІ КАТЕГОРІЙ

У роботі проаналізовані особливості використання інструментальних і радіолокаційних систем посадки при управлінні зниженням літака в зоні посадки в складних погодних умовах. Запропонована методика обґрунтування вимог до точності вимірювання координат літаків посадочним радіолокатором для забезпечення супроводження літаків в зонах допустимих відхилень до висот прийняття рішення по нормах І і ІІ категорій мінімумів погоди.

Ключові слова: посадочний радіолокатор, диспетчерський радіолокатор, злітно-посадочна смуга, керівник зони посадки, розрахункова точка посадки, задана лінія посадки, зона допустимих відхилень, зона нормальних відхилень.

Вступ

Постановка завдання. Забезпечення безаварійної посадки літаків тактичної авіації (ТА) в складних метеоумовах (СМУ) є складним завданням системи управління. Завдання управління посадкою літаків ТА вирішується інструментальними системами посадки (ІСП) і радіолокаційними системами посадки (РСП).

Для якісного вирішення цього завдання в СМУ системи посадки повинні забезпечувати високу точність вимірювання відносних координат літаків в зоні посадки і супроводження їх зниження, в ідеалі, до висот відходу на друге коло. ІСП дециметрового діапазону хвиль мають достатню точність, але в СМУ дозволяють екіпажу здійснювати зниження лише до висоти 60 м і не забезпечують безпеку польотів. Виходячи з принципів їх використання при управлінні посадкою, та через недостатню точність, РСП застосовуються для виведення літака до висоти ≥ 120 м.

Для обґрунтування чисельних вимог до точності вимірювання координат за допомогою РСП в зоні посадки, необхідно запропонувати методику обґрунтування таких вимог.

Аналіз публікацій. У роботі [1] проаналізовані особливості використання бортового і наземного обладнання ІСП, а також інформації посадочних радіолокаторів (ПРЛ) систем РСП при управлінні посадкою літаків в СМУ і обґрунтовані вимоги до точності обладнання ІСП. У статті [2] запропоновані можливі принципи розрахунку необхідних значень точності вимірювання координат літака в зоні посадки за допомогою ПРЛ в умовах поганій видимості злітно-посадочної смуги (ЗПС) і можливостей виконання цих вимог ПРЛ з цифровим когерентним накопичувачем відбитих імпульсів.

Мета статті. Пропонується методика обґрунтування вимог до ПРЛ щодо точності вимірювання координат для забезпечення посадки літаків при мінімумах погоди І та ІІ категорій.

Викладення основного матеріалу

Для виведення літака в зону посадки керівник ближньої зони користується інформацією диспетчерського радіолокатора (ДРЛ) і після виводу передає управління керівнику зони посадки (КрЗП). Для вирішення завдань контролю і управління посадкою літака КрЗП користується інформацією ПРЛ і ДРЛ систем РСП, що відображається на їх індикаторах.

З метою прийняття правильного рішення КрЗП про вихід літака на ЗЛП з необхідною точністю, для літаків ФА ВПС колишнього СРСР були визначені нормовані зони відхилень літака від ЗЛП по курсу і куту місця (глісаді). Ці зони мають розміри, які дозволяють екіпажу виправляти помилки пілотування без додаткових труднощів і забезпечують точний вихід в РТП. Такими зонами є зони допустимих відхилень (ЗДВ) і зон нормальних відхилень (ЗНВ) від ЗЛП (рис. 1).

Розміри ЗДВ [1] залежать від максимально-допустимих величин кута крену, вертикальної швидкості і перевантаження, якими характеризується конкретний тип літака для виправлення помилок пілотування на завершальному етапі посадки. По допустимих значеннях кута крену визначаються розміри ЗДВ по курсу, а по допустимих значеннях вертикальної швидкості – ЗДВ по глісаді.

Розміри цих зон були визначені на основі аналізу нормативних документів для льотної складу, характеристик точності ПРЛ і індикаторів, точності окомірного прочитування з індикаторів координат, а також статистичних даних, отриманих в ході дослідницьких робіт по пониженню мінімуму погоди

при зльоті та посадці літаків ФА [3]. ЗДВ є сектором відносно ЗЛП з кутом $\pm 2^\circ$ по курсу ($\beta_{зДВ} = 4^\circ$) і $\pm 0,5^\circ$ по куту місця ($\epsilon_{зДВ} = 1^\circ$), а ЗНВ – в три рази менше, тобто приблизно $\pm 0,7^\circ$ ($\beta_{зНВ} \approx 1,4^\circ$) і $\pm 0,16^\circ$ ($\epsilon_{зНВ} \approx 0,32^\circ$) відповідно. При цьому, якщо літак знаходиться в ЗНВ, то вважається, що політ виконується по ЗЛП, про що і інформується екіпаж.

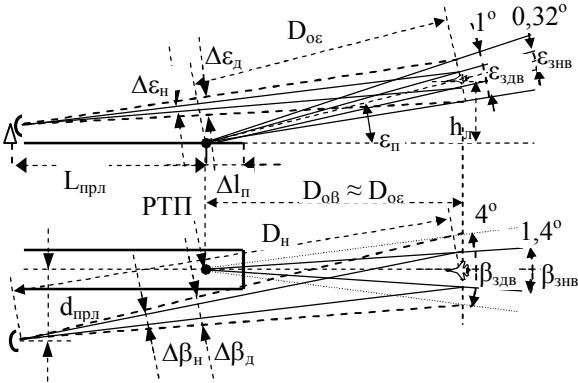


Рис. 1. Ілюстрації кутових розмірів ЗДВ і ЗНВ та їх перерахунку в кутові розміри секторів спостереження ПРЛ

Якщо ж літак знаходиться в ЗДВ, то КрЗП по індикаторах ПРЛ оцінює величину лінійних відхилень від ЗЛП в метрах і на встановлених рубежах 20, 10, 6, 3, 2 км (або по запиту екіпажа) передає їх екіпажу для усунення помилок пілотування.

При обґрунтуванні чисельних значень необхідної точності вимірювання координат для забезпечення посадки літака в СМУ виходитимемо з того, що розміри цих зон прийнятні і для сучасних літаків ТА ПС ЗСУ.

Захід на посадку по ІСП ґрунтується на вимірюванні екіпажем по бортових приладах відхилень літака від площин рівносигнального випромінювання двох пелюсток діаграм спрямованості (ДС) курсового і глиссадного радіомаяків. Лінія перетину цих двох площин і утворює в просторі задану лінію (траєкторію) посадки. Тому по відомих значеннях точності вимірювання кутів відхилення за допомогою ІСП типу ПРМГ-5 [4] можна визначити ймовірність P_v виводу і супроводження ЛА в зонах ЗДВ або ЗНВ. Значення точності ІСП вимірювання кутових координат по курсу σ_β та по глисаді σ_ϵ залежить від точності установки та підтримання маяками ПРМГ площин курса $\sigma_{ПК} = 0,2^\circ$ та глисаді $\sigma_{ПГ} = 0,075\epsilon_{ПГ}$ [4] і від точності бортового обладнання [1] по курсу $\sigma_{БК} = 0,25^\circ$ та по глисаді $\sigma_{БГ} = 0,15^\circ$. Задавшись $\epsilon_{ПГ} = 2^\circ 40'$, розрахуємо значення σ_ϵ та σ_β :

$$\sigma_\epsilon = \sqrt{\sigma_{ПГ}^2 + \sigma_{БГ}^2} = 0,25^\circ, \sigma_\beta = \sqrt{\sigma_{ПК}^2 + \sigma_{БК}^2} = 0,32^\circ. \quad (1)$$

Для визначення ймовірності P_v виводу і супроводження ЛА в зонах ЗДВ або ЗНВ потрібно знайти відношення q_d половини кутових розмірів відповідних зон $\theta_{зДВ} (\beta_{зДВ}, \epsilon_{зДВ})$, або $\theta_{зНВ} (\beta_{зНВ}, \epsilon_{зНВ})$ до помилки $\sigma_\theta (\sigma_\beta, \sigma_\epsilon)$ вимірювання відповідної кутової координати:

$$q_d = \frac{\theta_{зДВ}}{2\sigma_\theta}, \quad q_n = \frac{\theta_{зНВ}}{2\sigma_\theta} \quad (2)$$

і по табличних значеннях інтеграла ймовірності визначається значення вірогідності P_v . Виконавши розрахунки відношень (2) для помилок (1) та розмірів ЗДВ або ЗНВ (рис.1), і скориставшись табличними значеннями інтеграла ймовірності робимо висновки про те, що наземне і бортове обладнання ПРМГ-5 забезпечує ймовірності P_v супроводження ЛА в ЗНВ 0,971 по курсу і 0,478 по глисаді та ймовірності P_v в ЗДВ практично 1 по курсу і 0,954 по глисаді. Очевидно, такі значення вірогідності супроводження ЛА в ЗДВ по курсу і по глисаді дають підставу стверджувати, що обладнання ПРМГ-5 забезпечує гарантований вивід літаків до відповідної висоти зниження h_{min} . На жаль, для ПРМГ-5 $h_{min} = 5$ м [4], що відповідає висоті $h_{пр}$ прийняття рішення по нормам I категорії мінімуму погоди:

$$30 \text{ м} < h_{пр} \leq 60 \text{ м}.$$

Для розрахунку ймовірності виводу і супроводження ЛА до певних висот зниження за допомогою ПРЛ необхідно скористуватися іншою методикою. Це пов'язано з розміщенням ПРЛ відносно ЗПС (рис.1) і необхідністю перерахунку координат літака відносно ПРЛ до відносних координат в зоні посадки: віддалення D_{oe} літака від РТП та його відхилень від ЗЛП у двох площинах.

Висота h_d зниження літака при постійному значенні кута $\epsilon_{ПГ}$ глисаді пов'язана з віддаленням D_{oe} очевидним виразом:

$$D_{oe} = h_d / \sin \epsilon_{ПГ}. \quad (3)$$

Для висот $h_{пр} 60$ м і 30 м (норми I та II категорій) та кута $\epsilon_{ПГ} = 2^\circ 40'$, згідно з виразом (3) маємо два значення віддалення $D_{oe} = D_I$ і D_{II}

$$D_I \approx 1290 \text{ м}, \quad D_{II} \approx 645 \text{ м}. \quad (4)$$

Для розрахунку значень ймовірності виводу і супроводження ЛА P_v в зоні ЗДВ у площинах курсу та глисаді на віддаленнях від РТП (4) за допомогою ПРЛ необхідно знати значення помилок вимірювання координат, а кутові розміри зон ЗДВ $\beta_{зДВ}, \epsilon_{зДВ}$ перерахувати в кутові розміри секторів $\Delta\beta_{до}, \Delta\epsilon_{до}$ (рис. 1).

Точності вимірювання координат локаторами ПРЛ-10МН та ПРЛ-6М2 складають відповідні значен-

ня по курсу $\sigma_\beta = 0,4^\circ$ та $\sigma_\beta = 0,38^\circ$, по глісаді $\sigma_\epsilon = 0,25^\circ$ та $\sigma_\epsilon = 0,2^\circ$ і по дальності $\sigma_D = 150$ м та $\sigma_D = 120$ м [6, 7]. Для перерахунку кутових розмірів зон ЗДВ $\beta_{здв}$, $\epsilon_{здв}$ в кутові розміри секторів $\Delta\beta_{до}$, $\Delta\epsilon_{до}$, скористаємося ілюстраціями на рис. 1. З ілюстрацій видно, що для заданого кута глісади ϵ_Π розміри секторів $\Delta\beta_{до}$, $\Delta\epsilon_{до}$ залежать як від віддалення ЛА щодо РТП у площинах курсу $D_{о\beta}$ та глісади $D_{о\epsilon}$, так і від розміщення ПРЛ відносно ЗПС ($L_{прл}$, $d_{прл}$).

З урахуванням малих значень всіх кутових розмірів зон $\beta_{здв}$, $\epsilon_{здв}$, секторів $\Delta\beta_{до}$, $\Delta\epsilon_{до}$ та заданого кута глісади ϵ_Π , для названого перерахунку можна отримати наступний алгоритм розрахунку розмірів секторів спостереження:

$$\Delta_{до} = D_{о\beta} \sin \theta_{здв}, \quad \Delta\theta_{до} \approx \arcsin(\Delta_{до}/D_{н}),$$

$$D_{н} \approx (D_{о\beta} + L_{прл}) \cdot \left(2 + d_{прл}^2 / \left(2(D_{о\beta} + L_{прл})^2\right)\right), \quad (5)$$

де $\Delta\theta_{до}$ – кутові розміри секторів спостереження $\Delta\beta_{до}$, $\Delta\epsilon_{до}$; $\theta_{здв}$ – кутові розміри відповідних ЗДВ $\beta_{здв}$, $\epsilon_{здв}$; $\Delta_{до}$ – лінійні розміри секторів $\Delta\beta_{до}$, $\Delta\epsilon_{до}$ на віддаленнях $D_{о\epsilon}$ (4) літака від РТП.

Виконуємо розрахунок кутових розмірів секторів $\Delta\beta_{до}$, $\Delta\epsilon_{до}$ для типових розмірів ЗПС і розміщення ПРЛ та інших параметрів посадки: $L_{зпс} = 2,5$ км, $\epsilon_\Pi = 2^\circ 40'$, $\Delta_{\Pi} = 200$ м, $d_{прл} = 150$ м. При цьому (рис. 1) $L_{прл} \approx 1050$ м. Тоді згідно виразу (5) для двох віддалень ЛА від РТП 1290 м і 645 м, що відповідає висотам $h_{пр} = 60$ м і $h_{пр} = 30$ м отримуємо такі значення:

$$\text{– для } D_{о\epsilon} = D_I \approx 1290 \text{ м}$$

$$\Delta\beta_{до}^I \approx 2,2^\circ; \quad \Delta\epsilon_{до}^I \approx 0,76^\circ, \quad (6)$$

а для $D_{о\epsilon} = D_{II} \approx 645$ м

$$\Delta\beta_{до}^{II} \approx 1,1^\circ; \quad \Delta\epsilon_{до}^{II} \approx 0,38^\circ. \quad (7)$$

Для визначення ймовірності P_v виводу у зоні допустимих відхилень на віддаленнях (4), потрібно знайти аналогічне з (2) відношення q_d розміру половини секторів (6) або (7) спостережень ПРЛ відповідної зони ЗДВ до помилок σ_θ вимірювання кутових координат.

Такі відношення для ПРЛ-6М2 ($\sigma_\beta = 0,38^\circ$, $\sigma_\epsilon = 0,2^\circ$) мають значення:

$$q_{д\beta}^I \approx 2,9; \quad q_{д\beta}^{II} \approx 1,45;$$

$$q_{д\epsilon}^I \approx 1,9; \quad q_{д\epsilon}^{II} \approx 0,95. \quad (8)$$

Тоді по таблиці значень інтеграла ймовірності для значень (8) знаходимо значення ймовірності P_v виведення ЛА за допомогою ПРЛ в ЗДВ по курсу та по глісаді на віддаленнях (4):

$$P_{v\beta}^I \approx 0,996; \quad P_{v\beta}^{II} \approx 0,853;$$

$$P_{v\epsilon}^I \approx 0,943; \quad P_{v\epsilon}^{II} \approx 0,658. \quad (9)$$

Аналогічний розрахунок P_v для ПРЛ-10МН ($\sigma_\beta = 0,4^\circ$; $\sigma_\epsilon = 0,25^\circ$) дає такі результати:

$$P_{v\beta}^I \approx 0,934; \quad P_{v\beta}^{II} \approx 0,828;$$

$$P_{v\epsilon}^I \approx 0,871; \quad P_{v\epsilon}^{II} \approx 0,553. \quad (10)$$

Проте, такі значення ймовірності для ПРЛ на практиці залишаються нереалізованими. Це пов'язано з тим, що інтенсивні віддзеркалення від землі поблизу РТП і недостатній коефіцієнт подавлення (15 дБ) цих віддзеркалень в ПРЛ, приводять до маскування відбитих імпульсів ЛА. В результаті цього істотно знижується окомірною точність вимірювання координат ЛА, або такі вимірювання стають неможливими. У зв'язку з цим, в технічній документації вказуються мінімальні значення висот $h_{л}$ зниження в зоні посадки, до яких віддзеркалення від землі не приводять до суттєвого маскування імпульсів ЛА. Тому рекомендується використовувати ПРЛ-10МН або ПРЛ-6М2 до висот $h_{л} = 150$ м або $h_{л} = 120$ м. По викладеній методиці можна переконатися (для цих висот), що ймовірності P_v по курсу та по глісаді мають достатні значення для забезпечення гарантованого виводу літака в ЗДВ. Ці ймовірності P_v для ПРЛ-6М2 та ПРЛ-10МН мають відповідно значення:

$$P_{v\beta}^6 \approx 0,9992; \quad P_{v\beta}^6 \approx 0,924;$$

$$P_{v\beta}^{10} \approx 0,996; \quad P_{v\beta}^{10} \approx 0,826.$$

З аналізу принципів дії та використання ІСП типу ПРМГ-5 впливають наступні недоліки таких систем посадки [4, 5]:

- малий розмір кутового сектора глісади, в межах якого забезпечується пропорційна залежність інформаційного параметра сигналу від відхилення літака від номінальної траєкторії зниження;
- нелінійність траєкторії зниження, що задається курсовим та глісадним радіомаяками, і її залежність від характеру місцевості поблизу радіомаяків та погодних умов;

- неможливість вибору оптимальної траєкторії заходження на посадку у залежності від характеру місцевості;

- здібність ІСП забезпечити супроводження літака по нормам мінімуму погоди I категорії.

Вказані недоліки зумовили необхідність переходу до ІСП сантиметрового діапазону, які дозволяють забезпечити супроводження літака по нормам мінімумів погоди II категорії.

Оскільки ПРЛ працюють у сантиметровому діапазоні хвиль та відносяться до систем посадки, доцільно проаналізувати можливість їх удосконалення з метою самостійного забезпечення супроводження літака по нормам мінімумів погоди I та II категорій.

Для обґрунтування можливостей такого удосконалення спочатку необхідно обґрунтувати вимоги то точності вимірювання координат в зоні посадки за допомогою ПРЛ. Для цього потрібно вирішувати зворотну задачу, яка полягає у тому, що по заданому значенню ймовірності виведення P_v ЛА до висоти $h_{пр}$ прийняття рішення потрібно знайти значення необхідної точності вимірювання відповідних координат. В цьому випадку виникає можливість змінити підхід до визначення розмірів секторів спостереження для зниження чисельних значень необхідної точності. Уточнимо і обґрунтуємо суть такого підходу.

Для кількісної оцінки точності здійснення екіпажами приземлення ЛА на ЗПС, відповідним чином позначається (забарвлюється) майданчик, який називають майданчиком (смугою) точного приземлення. Такий майданчик $S_{тп}$ раніше [8] і зараз [5] має ширину ($d_{тп}$), що становить 60% ширини $d_{зпс}$ ЗПС, довжину ($\Delta L_{тп}$) 300 м і віддалення ΔL_T від торця ЗПС на 45÷50 м (рис.2, а). Виходитимемо з того, що ширина ЗПС дорівнює 40 м, тоді ширина майданчика $S_{тп}$ точного приземлення матиме значення:

$$d_{тп} = 24 \text{ м.} \quad (10)$$

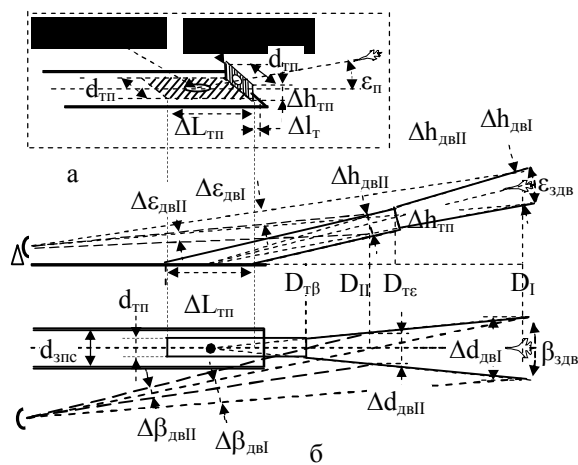


Рис. 2. Ілюстрації залежності секторів спостереження зон допустимого відхилення від висоти прийняття рішення

Якщо літак при посадці приземляється на цьому майданчику, то така посадка вважається точною. Очевидно, що для такого приземлення літак перед посадкою повинен бути виведений у відповідну площину $Q_{тп}$ на площині, перпендикулярній траєкторії зниження (рис.2, а). При цьому ширина $d_{тп}$ площі $Q_{тп}$ співпадає з шириною майданчика $S_{тп}$, а висота $\Delta h_{тп}$ пов'язана з її довжиною $\Delta L_{тп}$ і кутом глісади $\epsilon_{п}$ виразом:

$$\Delta h_{тп} \approx \Delta L_{тп} \sin \epsilon_{п} .$$

Для кута глісади $\epsilon_{п} = 2^{\circ}40'$ і $\Delta L_{тп} = 300$ м отримаємо:

$$\Delta h_{тп} \approx 14 \text{ м.} \quad (11)$$

По мірі наближення ЛА до РТП розміри секторів спостереження $\Delta\beta_{до}$, $\Delta\epsilon_{до}$ (рис. 2, б) зменшуватимуться. Очевидно, що на певних віддаленнях $D_{тб}$, $D_{тг}$ лінійні розміри цих секторів стають рівними ширині $d_{тп}$ (віддалення $D_{тб}$) і висоті $\Delta h_{тп}$ (віддалення $D_{тг}$ на рис.2, б) площі $Q_{тп}$ точної посадки.

Для розрахунку віддалень $D_{тб}$, $D_{тг}$ скористаємося очевидними виразами та значеннями розмірів ЗДВ та площі $Q_{тп}$:

$$D_{тб} \approx d_{тп} \cdot \text{ctg} \beta_{зДВ} = 24 \cdot \text{ctg} 4^{\circ} \approx 343 \text{ м,} \quad (12)$$

$$D_{тг} \approx \Delta h_{тп} \cdot \text{ctg} \epsilon_{зДВ} = 14 \cdot \text{ctg} 1^{\circ} \approx 802 \text{ м.}$$

При розрахунку необхідної точності вимірювання координат в площині курсу на віддаленнях прийняття рішення $D_{пр} \leq D_{тб}$, з метою виключення пред'явлення до ПРЛ необґрунтовано високих вимог по точності, замість розміру ЗДВ можна враховувати ширину $d_{тп}$ площі $Q_{тп}$ точної посадки, а в площині глісади на віддаленнях $D_{пр} \leq D_{тг}$ – висоту $\Delta h_{тп}$ площі $Q_{тп}$. Для цього лінійні розміри $d_{тп}$, $\Delta h_{тп}$ потрібно перерахувати в кутові розміри секторів $\Delta\beta_{до}$ та $\Delta\epsilon_{до}$ на віддаленнях $D_{пр} \leq D_{тб}$ та $D_{пр} \leq D_{тг}$. Для такого перерахунку можна скористатися аналогічним з (5) виразом:

$$D_{н} \approx (D_{пр} + L_{прл}) \cdot \left(1 + \frac{d_{прл}^2}{2(D_{пр} + L_{прл})^2} \right), \quad (13)$$

$$\Delta\theta_{до} \approx \arcsin \Delta_{тп} / D_{н},$$

де $\Delta\theta_{до}$ – кутові розміри секторів $\Delta\beta_{до}$ або $\Delta\epsilon_{до}$; $\Delta_{тп}$ – лінійні розміри $d_{тп}$ або $\Delta h_{тп}$ площі $Q_{тп}$ точної посадки.

Для обґрунтування вимог до ПРЛ по точності вимірювання координат ЛА в зоні посадки, потрібно задатися значенням ймовірності P_v виведення літака в ЗДВ на відповідній висоті $h_{пр}$: 60 м і 30 м (I і II категорії метеомінімуму) і по виразах (5) або (13) знайти розміри секторів спостереження $\Delta\beta_{до}$, $\Delta\epsilon_{до}$ у двох площинах. Для віддалень (4) ЛА $D_{пр} = D_I (= D_{II})$ від РТП та параметрів розміщення ПРЛ по першій формулі виразу (13) знаходимо віддалення ЛА від ПРЛ на висотах прийняття рішення: 60 м і 30 м:

$$D_{нI} \approx 2345 \text{ м, } D_{нII} \approx 1702 \text{ м.} \quad (14)$$

На рис. 2, б ілюструється розташування віддалень (12) і (14) на вісі дальності. З ілюстрацій видно, що в площині курсу лінійні $\Delta d_{двI}$, $\Delta d_{двII}$ та кутові

$\Delta\beta_{двI}$, $\Delta\beta_{двII}$ розміри секторів спостереження на віддаленнях D_I і D_{II} залежать від розмірів ЗДВ – $\beta_{здв}$. Тому значення лінійних та кутових розмірів цих секторів спостереження потрібно розраховувати по формулам алгоритму (5). В результаті такого розрахунку маємо:

$$\begin{aligned} \Delta d_{двI} &\approx 90 \text{ м}; \quad \Delta d_{двII} \approx 45 \text{ м}; \\ \Delta\beta_{двI} &\approx 2,2^\circ; \quad \Delta\beta_{двII} \approx 1,5^\circ. \end{aligned} \quad (15)$$

У площині глісади на дальності прийняття рішення $D_{пр} = D_{II}$ лінійні розміри ЗДВ менше висоти $\Delta h_{тп}$ площі $Q_{тп}$ точної посадки. Тому для розрахунку кутового розміру сектору $\Delta\epsilon_{двII}$ спостереження на дальності D_{II} можна користуватися виразом (13). При цьому значення лінійного розміру $\Delta h_{двII}$ цього сектору стає рівним висоті $\Delta h_{тп}$. На дальності ж $D_{пр} = D_I$, розрахунок розмірів ($\Delta h_{двI}$ і $\Delta\epsilon_{двI}$) сектора спостереження потрібно виконувати по формулам (5). В результаті такого розрахунку маємо:

$$\begin{aligned} \Delta h_{двI} &\approx 22,5 \text{ м}; \quad \Delta h_{двII} \approx 14 \text{ м}; \\ \Delta\epsilon_{двI} &\approx 0,55^\circ; \quad \Delta\epsilon_{двII} \approx 0,47^\circ. \end{aligned} \quad (16)$$

Отримані значення (15) і (16) лінійних та кутових розмірів секторів спостереження дозволяють перейти до розрахунку необхідних значень точності вимірювання координат ЛА в зоні посадки за допомогою ПРЛ.

До особливостей таких вимірювань відноситься необхідність перерахунку отриманих за допомогою ПРЛ трьох координат (дальність D_L , кути курсу β_L і глісади ϵ_L ЛА) у відносні координати: віддалення $D_{ол}$ ЛА від РТП і лінійні (кутові) відхилення ЛА від ЗЛП в двох площинах. При цьому точності $\sigma_{об}$, $\sigma_{оє}$ перерахунку кутових відхилень ЛА від ЗЛП залежать не тільки від точності ПРЛ σ_{β_k} , σ_{ϵ_k} вимірювання кутових координат β_L , ϵ_L , але і від точності σ_D вимірювання дальності D_L ЛА. Тому таку залежність можна представити виразами:

$$\begin{aligned} \sigma_{об} &= \sqrt{\sigma_{\beta_k}^2 + \sigma_{\beta_d}^2}, \\ \sigma_{оє} &= \sqrt{\sigma_{\epsilon_k}^2 + \sigma_{\epsilon_d}^2}, \end{aligned} \quad (17)$$

де σ_{β_d} , σ_{ϵ_d} – складові помилок вимірювання кутових відхилень ЛА від ЗЛП, що обумовлені помилками σ_D вимірювання дальності D_L ЛА. Проаналізуємо таку залежність. Для цього скористаємося ілюстраціями, приведеними на рис. 3, де ілюструється геометрична залежність вимірюваних і відносних координат, а також вплив помилки $\sigma_{Dл}$ вимірювання дальності D_L до ЛА на точність σ_h , σ_d

вимірювань лінійних відхилень ЛА по глісаді Δh і по курсу Δd .

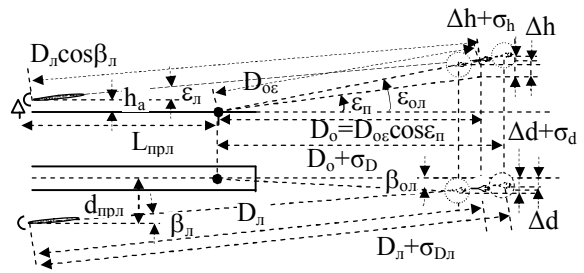


Рис. 3. Ілюстрації перерахунку координат ЛА D_L , β_L , ϵ_L , що вимірюються, до відносних координат: лінійних Δd , Δh і кутових $\beta_{ол}$, $\epsilon_{ол}$ відхилень від ЗЛП та віддалення $D_{оє}$ літака від РТП

Спочатку проаналізуємо вплив точності $\sigma_{Dл}$ вимірювання дальності ЛА D_L на точність вимірювання кутових відхилень ЛА від ЗЛП по курсу $\beta_{ол}$ і по глісаді ($\epsilon_{ол} - \epsilon_L$). В зв'язку з цим нагадаємо, що в даний час, КрЗП вимірює лінійні відхилення ЛА від ЗЛП по курсу Δd і по глісаді Δh шляхом окомірною прочитування координатної інформації з екранів індикаторів, і відповідним чином коректує зниження ЛА по ЗЛП.

Очевидно, що для істотного підвищення точності таких вимірювань необхідно виключити операторні складові помилок і вплив індикатора на точність шляхом автоматичного вимірювання і перерахунку координат і представлення їх оператору у формі формуляру координат біля мітки. Мова йде про перерахунок вимірюваних координат відносно ПРЛ β_L , ϵ_L , D_L в координати ЛА відносно ЗЛП Δd , Δh і РТП $D_{оє}$. З ілюстрацій витікає наступний алгоритм перерахунку координат:

$$\begin{aligned} \Delta d &\approx \pm (D_L \sin|\beta_L| - d_{прл}), \\ \Delta h &\approx D_L \cos\beta_L (\sin\epsilon_L - \cos\epsilon_L \operatorname{tg}\epsilon_L) \\ &\quad + L_{прл} \operatorname{tg}\epsilon_L + h_a, \\ D_{оє} &\approx \frac{D_L \cos\beta_L \cos\epsilon_L - L_{прл}}{\cos\epsilon_L}, \end{aligned} \quad (18)$$

де h_a – висота підйому антени глісади.

При цьому точність перерахунку (18) залежати-ме і від точності вимірювання дальності.

З ілюстрацій і виразів (18) витікають залежності складових помилок σ_{hd} , σ_{hd} вимірювань (перерахунків) лінійних відхилень ЛА від ЗЛП по глісаді Δh і по курсу Δd від помилок $\sigma_{Dл}$ вимірювання дальності D_L та від кутових координат літака β_L , ϵ_L :

$$\begin{aligned} \sigma_{dл} &\approx \sigma_{Dл} \sin|\beta_L|, \\ \sigma_{hл} &\approx \sigma_{Dл} \cos\beta_L |\sin\epsilon_L - \cos\epsilon_L \operatorname{tg}\epsilon_L|. \end{aligned} \quad (19)$$

Одночасно, з перших двох виразів алгоритму (18) можна отримати наступні залежності складових помилок $\sigma_{\delta\beta}$, $\sigma_{\text{нк}}$ цих вимірювань від помилок ПРЛ $\sigma_{\beta\kappa}$, $\sigma_{\text{ек}}$ вимірювання кутових координат та від координат літака $D_{\text{л}}$, $\beta_{\text{л}}$, $\varepsilon_{\text{л}}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta\beta} &\approx D_{\text{л}} \cos \beta_{\text{л}} \sin \sigma_{\beta\kappa}, \\ \sigma_{\text{не}} &\approx D_{\text{л}} \cos \beta_{\text{л}} \cos \varepsilon_{\text{л}} \sin \sigma_{\text{ек}}. \end{aligned} \quad (20)$$

При цьому результуючі точності $\sigma_{\text{д}}$, $\sigma_{\text{н}}$ перерахунку лінійних відхилень ЛА від ЗЛП, по аналогії з (17), пов'язані зі складовими (19) та (20) виразами:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{д}} &= \sqrt{\sigma_{\delta\beta}^2 + \sigma_{\text{дд}}^2}, \\ \sigma_{\text{н}} &= \sqrt{\sigma_{\text{не}}^2 + \sigma_{\text{нд}}^2}, \end{aligned} \quad (21)$$

З виразів (19) та (20) видно, що значення помилок вимірювання лінійних відхилень ЛА від ЗЛП залежать від значень кутових координат $\beta_{\text{л}}$, $\varepsilon_{\text{л}}$ ЛА відносно ПРЛ, які змінюються із зміною віддалення ЛА. Для обчислення можливих значень цих помилок на віддаленнях (14) ЛА I та II категорій мінімум погоди необхідно знайти значення координат $\beta_{\text{лі}}$, $\varepsilon_{\text{лі}}$ ($i=1,2$) ЛА для цих віддалень. Для цього скористаємося виразами:

$$\beta_{\text{лі}} \approx \arcsin \frac{d_{\text{прл}}}{D_{\text{ні}}}, \quad \varepsilon_{\text{лі}} \approx \arcsin \frac{h_{\text{прі}} - h_{\text{а}}}{D_{\text{ні}} \cos \beta_{\text{лі}}}.$$

Підставляючи в останній вираз значення дальностей $D_{\text{ні}}$, висоти антени ПРЛ $h_{\text{а}}=2$ м і висот прийняття рішень $h_{\text{прі}}=60$ м і $h_{\text{прі}}=30$ м отримуємо середні значення кутових координат:

$$\begin{aligned} \beta_{\text{лI}} &\approx 3,66^\circ; \quad \beta_{\text{лII}} \approx 5,0^\circ; \\ \varepsilon_{\text{лI}} &\approx 1,42^\circ; \quad \varepsilon_{\text{лII}} \approx 0,94^\circ. \end{aligned} \quad (22)$$

Для розрахунку чисельних значень необхідної точності (21) вимірювання лінійних відхилень від ЗЛП задамося значенням ймовірності $P_{\text{в}}$ виведення ЛА в ЗДВ $P_{\text{в}}=0,999$.

Тоді по інтегралу ймовірності знаходимо необхідне значення відношень $q_{\text{д}}$ половини довірливих інтервалів (15) і (16) до помилок (21):

$$q_{\text{д}} = 3,3. \quad (23)$$

При цьому значення необхідної точності вимірювання лінійних відхилень ЛА від ЗЛП на дальностях (14) знаходимо по значенням лінійних розмірів (15) і (16) секторів спостереження за принципом:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{дI}} &= \frac{90}{2 \cdot 3,3} \approx 13,6 \text{ м}; \quad \sigma_{\text{дII}} = \frac{14}{2 \cdot 3,3} \approx 6,8 \text{ м}; \\ \sigma_{\text{нI}} &= \frac{22,5}{2 \cdot 3,3} \approx 3,41 \text{ м}; \quad \sigma_{\text{нII}} = \frac{14}{2 \cdot 3,3} \approx 2,12 \text{ м}. \end{aligned} \quad (24)$$

Виходимо з того, що помилка $\sigma_{\text{Дл}}$ вимірювання дальності, як і складові $\sigma_{\beta\kappa}$, $\sigma_{\text{ек}}$ помилок (17)

вимірювання кутових координат, впливають на точність приземлення ЛА на майданчику $S_{\text{тп}}$ (рис. 2, а). Для того, щоб помилка $\sigma_{\text{Дл}}$ слабо впливала на точність приземлення пред'явимо наступні вимоги до точності вимірювання дальності. Для цього у якості довірчого інтервалу для обчислення значення помилки $\sigma_{\text{Дл}}$ по інтегралу ймовірності, задамося відрізом дальності $\Delta L_{\text{тп}}/3$ і таким ж значенням $P_{\text{в}}$.

Тоді по значенню відношення (3) отримуємо значення необхідної точності вимірювання дальності:

$$\sigma_{\text{Дл}} = \frac{\Delta L_{\text{тп}}}{3 \cdot 2q_{\text{д}}} \approx 15 \text{ м}. \quad (25)$$

Підставляючи в (19) значення помилки (25) та кутів (22) отримуємо значення складових помилок $\sigma_{\text{ндI}}$, $\sigma_{\text{ндII}}$ вимірювань лінійних відхилень ЛА від ЗЛП по глісаді Δh і по курсу Δd , обумовлених помилкою вимірювання дальності:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ддI}} &\approx 0,96 \text{ м}; \quad \sigma_{\text{ддII}} \approx 1,31 \text{ м}; \\ \sigma_{\text{ндI}} &\approx 0,33 \text{ м}; \quad \sigma_{\text{ндII}} \approx 0,45 \text{ м}. \end{aligned} \quad (26)$$

Для отримання чисельних значень необхідної точності $\sigma_{\beta\kappa}$, $\sigma_{\text{ек}}$ вимірювання кутових координат за допомогою ПРЛ для висот прийняття рішення 60 м і 30 м вираз (21) перетворимо до вигляду:

$$\sigma_{\delta\beta i} = \sqrt{\sigma_{\text{дI}}^2 - \sigma_{\text{ддI}}^2}, \quad \sigma_{\text{неI}} = \sqrt{\sigma_{\text{нI}}^2 - \sigma_{\text{ндI}}^2}. \quad (27)$$

Підставляючи в (27) значення параметрів (24) і (26) отримуємо необхідні значення складової точності $\sigma_{\delta\beta i}$, $\sigma_{\text{неI}}$ вимірювання лінійних відхилень від ЗЛП по глісаді Δh і по курсу Δd , обумовлених помилками $\sigma_{\beta\kappa}$, $\sigma_{\text{ек}}$ вимірювання ПРЛ кутових координат:

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta\beta I} &\approx 13,57 \text{ м}; \quad \sigma_{\delta\beta II} \approx 6,67 \text{ м}; \\ \sigma_{\text{неI}} &\approx 3,39 \text{ м}; \quad \sigma_{\text{неII}} \approx 2,07 \text{ м}. \end{aligned} \quad (28)$$

З порівняння значень точності (28) і (24) виходить, що висока точність ПРЛ (25) вимірювання дальності дозволяє практично виключити її вплив на точність вимірювання ПРЛ кутових відхилень $\sigma_{\beta\kappa i}$, $\sigma_{\text{екI}}$ ЛА від ЗЛП. Значення складових помилок (28), практично співпадають із значеннями (24) результуючих помилок.

Для переходу від значень (28) складових помилок вимірювання лінійних відхилень від ЗЛП до значень складових помилок $\sigma_{\beta\kappa i}$, $\sigma_{\text{екI}}$ вимірювання кутових відхилень перетворимо вираз (20) до вигляду:

$$\begin{aligned} \sigma_{\beta\kappa i} &\approx \arcsin \frac{\sigma_{\delta\beta i}}{D_{\text{ні}} \cos \beta_{\text{лі}}}, \\ \sigma_{\text{екI}} &\approx \arcsin \frac{\sigma_{\text{неI}}}{D_{\text{ні}} \cos \beta_{\text{лі}} \cos \varepsilon_{\text{лі}}}. \end{aligned} \quad (29)$$

Підставляючи значення помилок (28) та координат (22) і (14) в (29), отримуємо значення необхідної точності вимірювання кутових координат за допомогою ПРЛ для виведення ЛА в ЗДВ по нормам мінімуму погоди I та II категорій:

$$\begin{aligned} \sigma_{\beta_{кI}} &\approx 0,33^{\circ}; \quad \sigma_{\beta_{кII}} \approx 0,22^{\circ}; \\ \sigma_{\epsilon_{кI}} &\approx 5'; \quad \sigma_{\epsilon_{кII}} \approx 4,2'. \end{aligned} \quad (30)$$

Отримані значення (30) свідчать про те, що вимоги до ПРЛ по точності вимірювання кутових координат по глісаді суттєво вище, ніж по курсу: у 4 рази по нормах I категорії та у 3,2 рази по нормах II категорії.

Висновки

1. Для виключення впливу помилок оператора та індикаторів ПРЛ на точність вимірювання координат ЛА, необхідно забезпечити автоматичне вимірювання і перерахунок координат ЛА відносно ЗЛП та РТП і представлення їх оператору у формі формуляру координат біля мітки.

2 Для виключення впливу помилок ПРЛ вимірювання дальності на точність вимірювання лінійних відхилень від ЗЛП необхідно забезпечити високу точність $\sigma_{Дг} \approx 15$ м вимірювання дальності ЛА.

3 Для забезпечення ймовірності $P_v = 0,999$ виводу ЛА в ЗДВ вимоги до ПРЛ по точності вимірювання кутових координат по глісаді ($\sigma_{\epsilon_{кI}} \approx 5'; \sigma_{\epsilon_{кII}} \approx 4,2'$) суттєво вище, ніж по курсу $\sigma_{\beta_{кI}} \approx 0,33^{\circ}; \sigma_{\beta_{кII}} \approx 0,22^{\circ}$.

4. Виходячи з принципів побудови ПРЛ (почергове підключення каналів курсу і глісади до однієї і тієї ж прийнятно-передавальної апаратури) витікає, що практичне виконання вимог до точності

каналом глісади означає, що і в каналі курсу буде досягнута аналогічна точність, що дозволить отримати ймовірність виводу ЛА в ЗДВ по курсу більше ніж $P_v = 0,999$.

Список літератури

1. Микоян С.А. Заход на посадку по приборам / С.А. Микоян, А.Г. Корбут. – М.: Воениздат, 1979. – 71 с.
2. Рысаков Н.Д. Требования к точности измерения координат посадочным радиолокатором для обеспечения посадки самолетов в условиях плохой видимости взлетно-посадочной полосы / Н.Д. Рысаков И.В. Титов, А.П. Кулик // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2011. – Вып. 2(92). – С. 133-136.
3. Управление полетами в частях авиации Вооруженных Сил СССР. Метод. пособие. – М.: Воениздат, 1985. – 196 с.
4. Військова техніка радіотехнічного забезпечення авіації Повітряних Сил. Част. 1. Пристрої і системи ближньої навігації та інструментальної посадки: навч. посіб. / О.В. Нікітін, С.І. Сиващенко, В.І. Васишин, М.М. Хмуров. – Х.: ХУПС, 2006. – 136 с.
5. Черный М.А. Воздушная навигация / М.А. Черный, В.И. Кораблин, 4-е изд. – М.: Транспорт, 2011. – 373 с.
6. Технический опис радиолокационной системы посадки РСР-10МН.
7. Технический опис радиолокационной системы посадки РСР-6М2.
8. Радионавигационные системы аэропортов / [К.В. Макаров, В.В. Червецов, И.Ф. Шеин, В.В. Вольнец]. – М.: Транспорт, 1978. – 336 с.

Надійшла до редколегії 9.02.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. П.Ю. Костенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПОСАДОЧНОМУ РАДИОЛОКАТОРУ ПО ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСАДКИ САМОЛЕТОВ ПРИ МИНИМУМАХ ПОГОДЫ I И II КАТЕГОРИЙ

Н.Д. Рысаков, И.В. Титов, И.Л. Костенко, В.Г. Карев, А.П. Кулик, Ю.Н. Добрышкин

В работе проанализированы особенности использования инструментальных и радиолокационных систем посадки при управлении снижением самолета в зоне посадки в сложных погодных условиях. Предложена методика обоснования требований к точности измерения координат самолетов посадочным радиолокатором для обеспечения сопровождения самолетов в зонах допустимых отклонений до высот принятия решения по нормам I и II категорий минимума погоды.

Ключевые слова: посадочный радиолокатор, диспетчерский радиолокатор, взлетно-посадочная полоса, руководитель зоны посадки, расчетная точка посадки, заданная линия посадки, зона допустимых отклонений, зона нормальных отклонений.

METHODS OF GROUNDING REQUIREMENTS OF LANDING RADAR COORDINATE MEASURING ACCURACY FOR AIRCRAFT LANDING AT WEATHER MINIMUM FIRST AND SECOND CATEGORIES

M.D. Rysakov, I.V. Titov, I.L. Kostenko, V.H. Karev, A.P. Kulik, Yu.M. Dobryshkin

This paper analyzes the features of the use of instrumentation and radar systems landing in the management of a decrease in the area of aircraft landing in difficult weather conditions. The method of study requirements for precision coordinate measuring aircraft landing radar for tracking aircraft in the areas of tolerance to the heights of a decision on the standards I and II categories of weather minima.

Keywords: precision radar, radar control tower, runway, head of the landing area, the estimated landing point specified line landing zone tolerance zone of normal deviations.