

УДК 629.735.05(045)

І.В. Остроумов

Національний авіаційний університет, Київ

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЇ ПОЛОЖЕННЯ ЗА ПАРОЮ ДАЛЕКОМІРНОГО ОБЛАДНАННЯ DME ПРИ ВИРІШЕНІ НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ

Точність витримування певних ліній положення під час польоту літака відноситься до основних завдань навігації. У статті розглянуто проблему витримування заданої лінії положення за далекомірним обладнанням DME. Відповідно міжнародним вимогам до складу бортового обладнання літака цивільної авіації проблема розглянута з точки зору застосування оптимальної пари DME. Виконано оцінювання максимальної точності навігації за DME/DME для повітряного простору України за умови використання оптимальної пари радіонавігаційних точок.

Ключові слова: DME, DME/DME, далекомірне обладнання, точність, пара радіонавігаційних точок, еліпс похибок, повітряний простір, Україна, лінія положення, альтернативні методи позиціонування, APTN.

Вступ

Велике значення під час пілотування повітряного корабля приділяється витримуванню певних ліній положення, що визначають рух літака за певною траєкторією. Цей процес є неодмінною вимогою виконання навігаційних задач та застосовується на усіх етапах польоту літака. Відповідно до міжнародних документів [1] до точності витримування заданих ліній положення висуваються жорсткі вимоги. Точність дотримання заданих параметрів руху неодмінно пов'язана з відхиленням літака від запланованої траєкторії руху і безпосередньо впливає на безпеку авіації в цілому.

Алгоритми альтернативних методів позиціонування застосовується на борту літака цивільної авіації у випадку проблем функціонування глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS). Найбільш точним з альтернативних алгоритмів позиціонування є позиціонування за парою далекомірного обладнання DME [2]. Цей алгоритм застосовується у переважній більшості сучасних обчислювальних систем літаководіння (FMS). При цьому, важливим є вірний вибір певної пари наземних радіомаяків DME, що забезпечуватимуть найвищу точність позиціонування. Оскільки на борту літака відповідно вимогам до польотної конфігурації має знаходитись два комплекти обладнання DME, то алгоритм позиціонування може одночасно працювати лише з певною парою далекомірного обладнання. Найбільш вагомий внесок у точність позиціонування вносить геометричний фактор, що пов'язаний з геометрією взаємного розташування наземних радіомаяків. Іншим компонентом визначення точності є точність власних обчислень DME, тобто точність визначення відстані між літаком та наземним обладнанням радіомаяка.

У дослідженнях [3-5] виконано аналіз точності позиціонування усіма наявними радіомаяками DME

у певній частині повітряного простору, проте отримані дані не відображають реальні можливості обладнання авіоніки літака а спрямовані на оптимізацію наземної мережі далекомірного обладнання.

Відповідно до наведеного вище основною метою статті є оцінювання максимальної точності позиціонування, що може бути отримана, за рахунок вибору оптимальної пари далекомірного обладнання DME у обчислювальній системі літаководіння для певного місцеположення літака у повітряному просторі України.

Зони невизначеності

Визначення місцеположення ПК за інформацією від далекомірного обладнання DME ґрунтується на одночасному використанні двох комплектів обладнання, що одночасно визначають відстань до двох різних радіонавігаційних точок (РНТ). У загальному випадку вважається, що результати вимірювань отримуються у одночасно, а часом запізнення інформації від більш віддаленої РНТ з пари, можна знехтувати. У цьому випадку, місцеположення ПК знаходиться у точці перетину ліній положення ПК відносно РНТ (рис. 1). Дія похибок визначення відстаней Δ за DME призводить до того що, отримане місцеположення ПК буде відрізнятися від істинного.

Так на рис. 1 показано, що результати вимірювань відстаней RA та RB за DME від наземних РНТ А та В місять похибки ΔA та ΔB відповідно. Точка перетину ліній положення А та В дає місцеположення ПК P1, що відрізняється від істинного місцеположення P2 на величину похибки ΔP . Для навігаційних систем важливим є розрахунок похибок визначення місцеположення. Виконаємо оцінювання похибки позиціонування ΔP за відомими похибками систем DME. На великих відстанях кривизною ліній положення можна знехтувати і вважати їх прямими лініями (рис. 2).

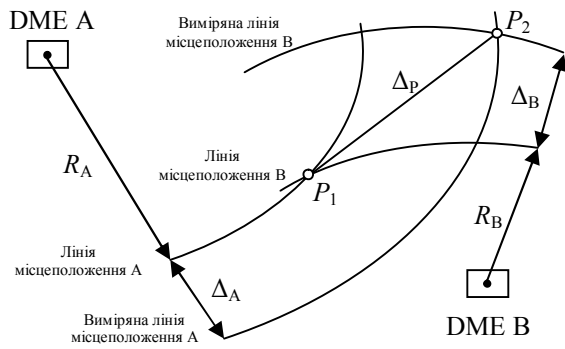


Рис. 1. Похибка визначення місцеположення

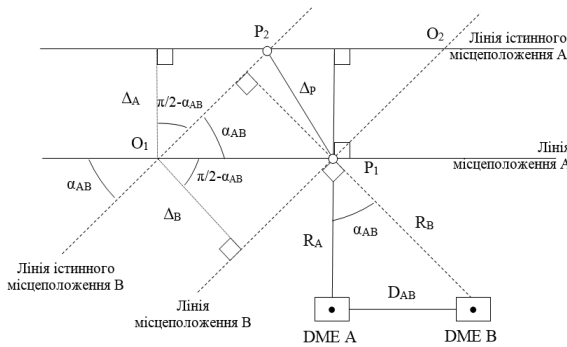


Рис. 2. Розрахунок похибки визначення місцеположення

На рис. 2 наведено випадок визначення координат місцеположення ПК за перетином двох ліній місцеположення, утворених за результатами вимірювань відстаней (R_A та R_B) до РНТ А та В. Точка P_1 відповідає визначеному місцеположенню ПК. Наявність похибок (Δ_A та Δ_B) у результатах вимірювань відстаней дозволяє провести лінії істинного місцеположення на перетині яких знаходиться точка істинного місцеположення ПК – P_2 . Відстань між точками місцеположення P_1 і P_2 є радіальною похибкою Δ_P , що визначає точність визначення координат ПК. Для оцінювання величини похибки Δ_P використаємо кут між напрямками на РНТ А та В α_{AB} , що зазвичай визначається за базисом пари РНТ:

$$\alpha_{AB} = \arccos\left(\frac{D_{AB}^2 - R_A^2 - R_B^2}{2R_A R_B}\right).$$

Оскільки лінії місцеположення перпендикулярні до радіальних відстаней R_A та R_B , а кути утворені двома перпендикулярними кутами є однаковими, тоді кут перетину ліній положення буде рівним куту утворення напрямками на РНТ α_{AB} . Похибка Δ_P визначається за теоремою косинусів з трикутника $O_1P_1P_2$:

$$\Delta_P = \sqrt{O_1P_1^2 + O_1P_2^2 - 2O_1P_1 O_1P_2 \cos(\alpha_{AB})},$$

де $O_1P_1 = \frac{\Delta_B}{\cos(\pi/2 - \alpha_{AB})} = \frac{\Delta_B}{\sin(\alpha_{AB})},$

$$O_1P_2 = \frac{\Delta_A}{\cos(\pi/2 - \alpha_{AB})} = \frac{\Delta_A}{\sin(\alpha_{AB})}.$$

$$\text{Тоді } \Delta_P = \sqrt{\left(\frac{\Delta_B}{\sin(\alpha_{AB})}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_A}{\sin(\alpha_{AB})}\right)^2 - 2\frac{\Delta_B}{\sin(\alpha_{AB})}\frac{\Delta_A}{\sin(\alpha_{AB})}\cos(\alpha_{AB})};$$

$$\Delta_P = \sqrt{\frac{\Delta_B^2 + \Delta_A^2 - 2\Delta_A \Delta_B \cos(\alpha_{AB})}{\sin^2(\alpha_{AB})}}.$$

Оскільки похибки Δ_A та Δ_B є випадковими величинами то і радіальна похибка Δ_P буде мати випадковий характер. Тоді

$$\sigma_P^2 = \frac{\sigma_B^2 + \sigma_A^2 - 2\rho\sigma_A\sigma_B \cos(\alpha_{AB})}{\sin^2(\alpha_{AB})},$$

де ρ – коефіцієнт взаємної кореляції похибок вимірювання ліній місцеположення.

Оскільки інформація стосовно R_A та R_B отримується від різних РНТ матимемо незалежні похибки вимірювання ліній місцеположення, для яких $\rho = 0$, тоді матимемо:

$$\sigma_P^2 = (\sigma_B^2 + \sigma_A^2) / \sin^2(\alpha_{AB}). \quad (1)$$

Відповідно до цього середньоквадратична похибка визначення місцеположення ПК залежить від середньоквадратичних похибок вимірювання ліній положення та кута між напрямками на РНТ. Максимальна точність місцеположення буде спостерігатись при перетині ліній положення перпендикулярно одна до одної.

Лінії сталих кутів між напрямками на РНТ

Графічно певному сталому значенню кута α_{AB} відповідає лінія кола, хордою якого є базисна відстань між РНТ – D_{AB} . РНТ знаходяться на коловій лінії у точках перетину хорди. Лінії колів будуть симетричними по обидві сторони хорди. На рис. 3 зображено лінії сталих кутів тільки над лінією хорди для радіомаків BRP (Boryspil) та IKI (Kyiv/ Zhyliany).

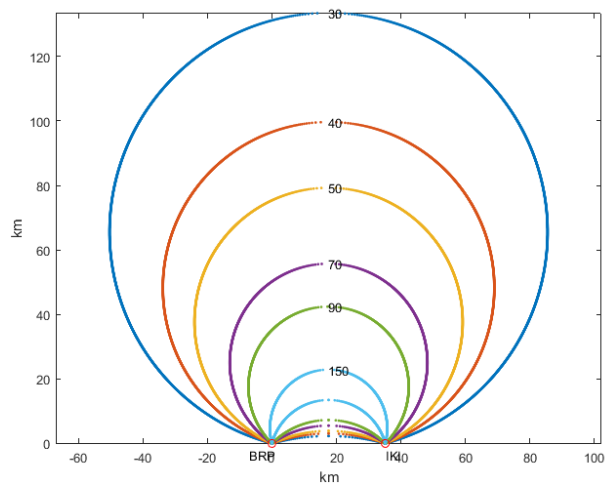


Рис. 3. Лінії сталих кутів між напрямками на РНТ

Радіус кола [7]:

$$R = d / (2 \sin(\alpha_{AB} / 2)).$$

Координати центра кола у зв'язаній системі координат, центр якої розміщується у DME A, а вісь X напрямлена у напрямку DME B, можна обчислити за наступними співвідношеннями:

$$x_c = \frac{d}{2}, y_c = \frac{d}{2} \operatorname{ctg}(\alpha_{AB}).$$

Оскільки, знаменником у (1) є величина зі сталими коловими лініями, а дія похибок у чисельнику не дуже сильна, то результуючі лінії однакових похибок визначення місцеположення будуть мати вигляд теж колів (рис. 4).

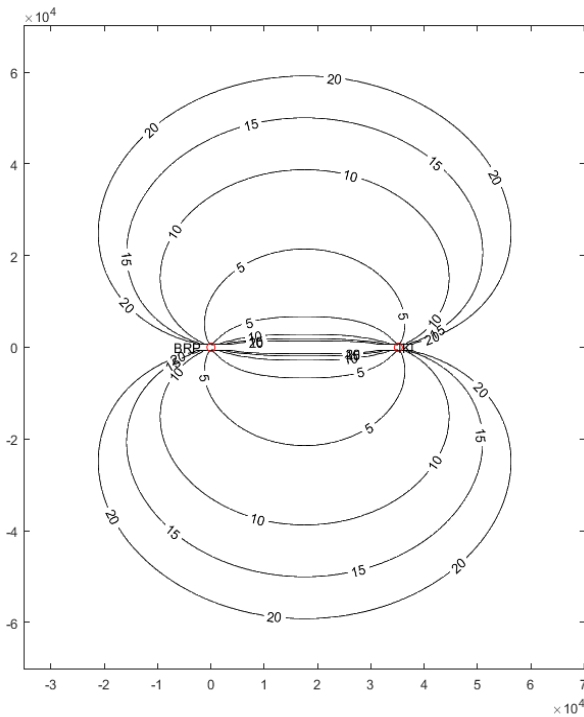


Рис. 4. Похибка місцеположення

Відповідно до (1) максимальна точність позиціонування буде мати місце за умови: $\sin(\alpha_{AB})=1$, тобто при $\alpha_{AB}=90^\circ$. Для цього кола відстань D_{AB} між РНТ буде діаметром, а центр знаходиться у $x_c = d/2, y_c = 0$.

Для побудови зони дії методу позиціонування зазвичай обмежуються рівнем погіршення точності позиціонування у два рази:

$$\sigma_P = \frac{\sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_A^2}}{\sin(\alpha_{AB})};$$

$$2\sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_A^2} = \frac{\sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_A^2}}{\sin(\alpha_{AB})}; \sin(\alpha_{AB}) = \frac{1}{2}.$$

Відповідно до цього, подвійному погіршенню точності відповідатиме зона обмежена лініями сталих кутів 30° та 150° . Для випадку радіомаяків BRP та IKI зона подвійного погіршення точності наведена на рис. 5.

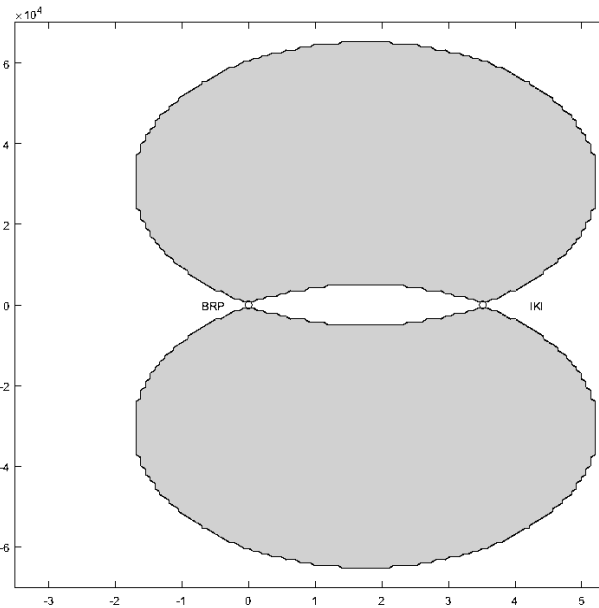


Рис. 5. Зона подвійного погіршення точності

Оцінювання характеристик еліпса похибок

Важливим етапом розрахунку точності місцеположення є оцінювання зони у межах якої ймовірність знаходження ПК буде відповідати певній величині P. У випадку незалежних вимірювань та припущення що випадкові похибки визначення ліній місцеположення визначаються нормальним законом розподілу, тоді розподіл похибок визначення місцеположення описується подвійним нормальним законом розподілу випадкової величини:

$$\rho(\Delta_A, \Delta_B) = \frac{1}{2\pi\sigma_A\sigma_B} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta_A^2}{\sigma_A^2} + \frac{\Delta_B^2}{\sigma_B^2}\right)}.$$

Ймовірність знаходження ПК у певній зоні буде сталою для геометричної фігури, що має форму еліпса та описується рівнянням:

$$\frac{\Delta_A^2}{\sigma_A^2} + \frac{\Delta_B^2}{\sigma_B^2} = k^2.$$

Ймовірність місцеположення у еліпсі [6]:

$$P = 1 - e^{-k^2/2},$$

чи

$$k = \sqrt{-2 \ln(1 - P)}.$$

Еліпс похибок визначається його напіввісьми a та b та кутом нахилу еліпса у просторі. Розглянемо еліпс похибок з лініями положення A та B, що перетинаються під кутом α_{AB} . Тоді, кут нахилу еліпсу відносно лінії положення B, можна визначити з співвідношення [7]:

$$\frac{\sigma_B}{\sin(\alpha_B)} = \frac{\sigma_A}{\sin(\alpha_{AB} - \alpha_B)},$$

$$\frac{\sin(\alpha_{AB} - \alpha_B)}{\sin(\alpha_B)} = \frac{\sigma_A}{\sigma_B},$$

$$\frac{\sin(\alpha_{AB})\cos(\alpha_B) - \sin(\alpha_B)\cos(\alpha_{AB})}{\sin(\alpha_B)} = \frac{\sigma_A}{\sigma_B},$$

$$\sin(\alpha_{AB})\operatorname{ctg}(\alpha_B) = \frac{\sigma_A}{\sigma_B} + \cos(\alpha_{AB}),$$

$$\operatorname{ctg}(\alpha_B) = \frac{\sigma_A}{\sigma_B \sin(\alpha_{AB})} + \operatorname{ctg}(\alpha_{AB}).$$

А напіввісі еліпсу можна оцінити виходячи з його рівняння та значень похибок [7]:

$$a = \frac{\sigma_B k}{\sin(\alpha_B)};$$

$$b = \frac{\sigma_A k}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha_{AB} - \alpha_B)\right)} = \frac{\sigma_A k}{\cos(\alpha_{AB} - \alpha_B)}.$$

Крім того, для оцінювання впливу взаємного розташування РНТ може застосовуватись підхід, що оцінює площу паралелограма, утвореного лініями істинного та виміряного положення:

$$S = \sigma_A \sigma_B \sin(\alpha_B).$$

Загалом похибка визначення відстані за DME розглядається як складова двох компонентів [1, 8]:

- похибки, що вноситься наземним обладнанням σ_{sis} . Відповідно до нормативних документів величина цієї похибки не може перевищувати 0,05 м. милі;

- похибки, що вноситься під час розповсюдження радіохвиль σ_{air} [8]:

$$\sigma_{\text{air}} = \max\{0,085 \text{ м. милі}; 0,125\% R\},$$

де R – виміряна відстань.

Загалом маємо:

$$\sigma_{A,B}^2 = \sigma_{\text{sis}}^2 + \sigma_{\text{air}}^2.$$

Іншим чином максимальна точність визначення відстані [8] може бути обчислена як:

- для відстаней від 0 до 65 м. милі:

$$\pm 0,12 \text{ м. милі} + 0,05\% \text{ від виміряної відстані};$$

- для відстаней більших за 65 м. милі:

$$\pm 0,17 \text{ м. милі} + 0,05\% \text{ від виміряної відстані}.$$

Оцінювання точності позиціонування для певного повітряного простору

Під час виконання польоту необхідним для позиціонування є вибір оптимальної пари навігаційного обладнання для найбільш точного дотримання певної лінії місцеположення чи визначення координат місцеположення ПК.

У якості критерію оптимальності використовують точність чи величину середньоквадратичного відхилення.

У загальному випадку виконується вибір такої пари РНТ, розмішені таким чином, що забезпечують найменше значення параметра середньоквадратичного відхилення.

Таке оцінювання виконується окремо по кожному з доступних методів позиціонування. На основі мінімальної похибки виконується вибір методу позиціонування.

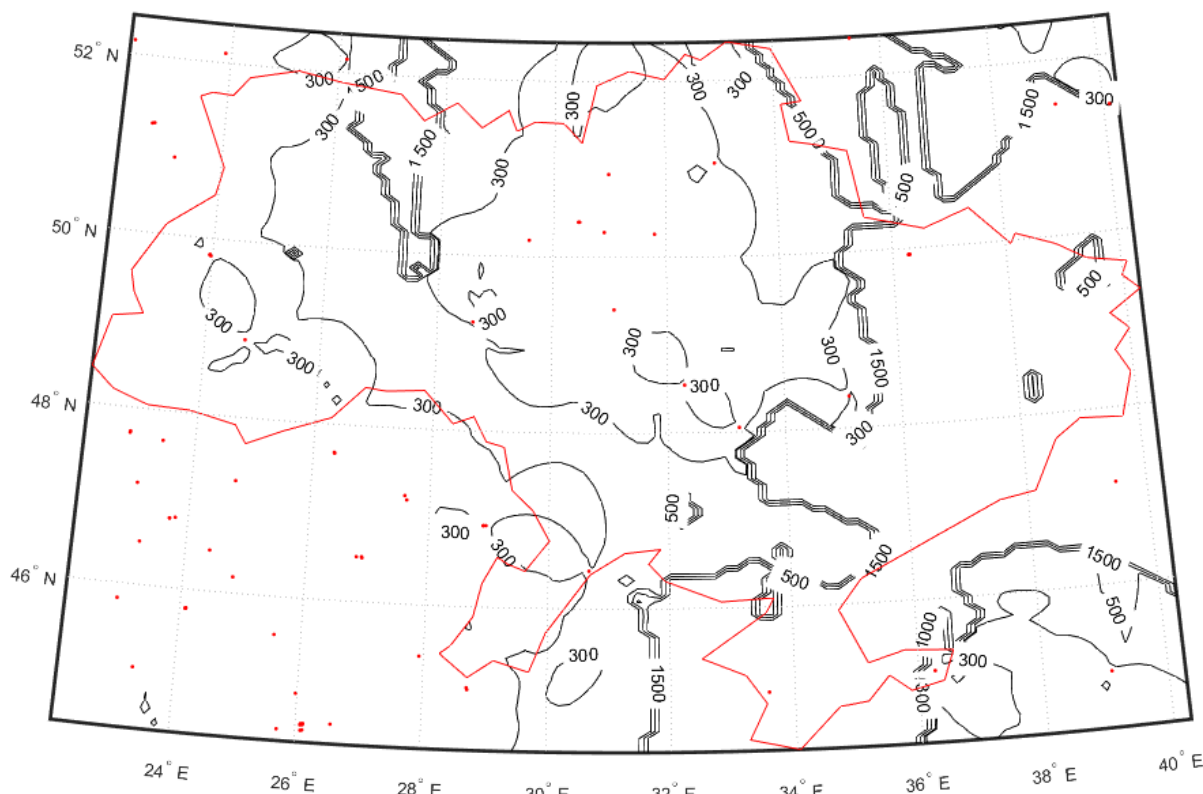


Рис. 6. Точність позиціонування за оптимальної пари DME

Цікавим є дослідження точності позиціонування для певного обмеженого повітряного простору, наприклад зони КПП.

Для цього задають певну висоту перерізу повітряного простору, що розповсюджується паралельно еліпсоїду на певній висоті спостереження. Потім будується сітка вузлових точок місцеположення у кожній з яких виконується оцінювання доступних пар РНТ та загальної точності позиціонування.

Висновки

Точність витримування лінії положення ПК є однією з основних характеристик безпеки авіації. Наведені математичні залежності дозволяють оцінити точність позиціонування за парою далекомірного обладнання DME. Крім того, виконано комп'ютерне моделювання для повітряного простору України та оцінено максимальну точність витримування ліній позиціонування за оптимальною парою DME. Отримані результати на рис. 6 вказують на досить неоптимальну геометрію розташування наземної мережі РНТ у східних та південних регіонах, що призвело до значних похибок більших за 1 км. Слід відмітити, що на заході країни у повітряному просторі поблизу м. Рівне похибка теж приймає значні значення. Загалом у центральній та західній частинах країни похибка знаходилась у межах 300 м.

Список літератури

1. *Performance-based Navigation (PBN) Manual. Doc 9613. – ICAO, 2008. – 304 p.*
2. *Ostroumov I.V. Nav aids facility for aircraft positioning / I.V. Ostroumov // The Sixth World Congress*

“Aviation in the XXI-st century” - “Safety in Aviation and Space Technologies”. Volume 2. – Kyiv: NAU, 2014. – 3.2.1-3.2.5 pp.

3. *Остроумов І.В. Оцінювання точності DME/DME позиціонування для повітряного простору України / Остроумов І.В. // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць: Випуск 3(43). – К.: НАУ, 2013. – С. 61-67.*
4. *Остроумов І.В. Використання радіомаяків DME для визначення місцеположення у повітряному просторі України / І.В.Остроумов, Т.Б. Лопатко // Вісник інженерної академії України. – 2013. – № 4. – С. 300–305.*
5. *Ostroumov I., Kuzmenko N. Accuracy estimation of alternative positioning in navigation / 2016 IEEE 4th International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control»(MSNMC), October 18-20, – 2016 : proceedings. – Kyiv, 2016. – 291-294 pp.*
6. *Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Высш. Шк., 1998. - 576 с.*
7. *Ярлыков М.С. Авиационные радионавигационные устройства и системы / М.С. Ярлыков, В.А. Болдин, В.С. Богачев. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1980. – 245 с.*
8. *DO-189. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Distance Measuring Equipment (DME) Operating within the Radio Frequency Range of 960-1215 MHz. – RTCA, 1985.*
9. *U.S. National aviation standard for the VOR/DME/TACAN systems. – Department of transportation. FAA, 1982. – 70 p.*

Надійшла до редколегії 31.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНИИ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ПАРЕ ДАЛЬНОМЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ DME ПРИ РЕШЕНИИ НАВИГАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

И.В. Остроумов

Точность выдерживания определённых линий положение во время полёта самолёта относится к одним из основных задач навигации. В статье рассмотрена проблема выдерживания заданной линии положения при использовании дальномерного оборудования DME. Согласно международным требованиям к составу бортового оборудования самолёта гражданской авиации, проблема рассмотрена с точки зрения применения оптимальной пары DME. Выполнено оценивание максимальной точности навигации по DME/DME для воздушного пространства Украины при условии использования оптимальной пары радионавигационных точек.

Ключевые слова: DME, DME / DME, дальномерное оборудования, точность, пара радионавигационных точек, эллипс ошибок, воздушное пространство, Украина, линия положения, альтернативные методы позиционирования, APTN.

ACCURACY ESTIMATION OF LOCATION LINE DETECTION BY PAIR OF DISTANCE MEASUREMENT EQUIPMENT IN NAVIGATION PROBLEM

I.V. Ostroumov

An accuracy of holding the exactly lines of position during the aircraft fly refers to the one of the main problems of navigation theory. The problem of holding the predefined line of aircraft location with the help of distance measuring equipment usage has been discussed in the article. According to international requirements for the minimal list of avionics equipment for civil aircraft, the problem is considered from the point of view of optimal pair DME using during all phases of flight. The values of maximum error of navigation by DME/DME for the Ukrainian airspace in case of optimal pair of navigation points were estimated and represented in contour lines.

Keywords: DME, DME/DME, distance measuring equipment, accuracy, pair of waypoints, ellipse of errors, air space, Ukraine, the line of position, alternative positioning methods, APTN.