

УДК 629.735.05(045)

І.В.Остроумов, к.т.н.
Т.Б. Лопатко**ВИКОРИСТАННЯ РАДІОМАЯКІВ DME ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ
У ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРИ УКРАЇНИ**

Національний авіаційний університет, e-mail: ostroumovv@ukr.net

Розглянуто питання оцінки можливості застосування далекомірною обладнання навігації для визначення координат місцеположення літака у повітряному просторі України. Представлено результати оцінювання характеристик DME/DME позиціонування для повітряного простору України. Розглянуто використання парних радіомаяків та всіх доступних у певній частині повітряного простору.

Ключові слова: DME/DME, позиціонування, повітряний простір, геометричний фактор, фактори погіршення точності.

Вступ. Авіаційна галузь є однією із пріоритетних сфер розвитку нашої держави. Багато зусиль уже було покладено на асоціацію та підписання договорів з міжнародними організаціями, створення планів розвитку українських авіа структур, модернізацію та вдосконалення вітчизняних аеронавігаційних систем. Як відомо, попит на авіа послуги з кожним роком лише зростає. Відповідно службами ICAO впроваджуються нові концепції розвитку авіації.

Резолюцією ІКАО, передбачається, що: «До початку 2009 року усі країни-члени повинні мати План впровадження навігації, заснованої на характеристиках (PBN), з метою забезпечення гармонізованого та скоординованого у світовому масштабі переходу до PBN до кінця 2016 року». Наміри ІКАО щодо глобального впровадження PBN були всебічно досліджені авіаційною спільнотою європейського регіону. Необхідність реалізації цих намірів була офіційно закріплена в Плані впровадження Єдиного Європейського Неба в Україні (LSSIP) (відомого як LCIP). [1]

Відповідно до одного із запропонованих підходів, зусилля потрібно спрямувати на підвищення рівня безпеки польотів шляхом одночасного застосування кількох супутникових сузір'їв GNSS та використання наземної навігаційної інфраструктури як резервної. Альтернативна навігація зараз здійснюється за системами DME, VOR, NDB, ILS. Однак, до 2025 року системи VOR та NDB будуть поступово виводитись з експлуатації. Як зазначено у плані впровадження PBN в Україні DME залишиться в експлуатації в якості резервного засобу для здійснення польотів у випадку недоступності супутникових навігаційних систем через вплив радіозавад або інших перешкод.

Сучасні обчислювальні системи літаководіння FMS (flight management system), у разі виникнення проблем із навігацією по GNSS, можуть використовувати дані від інерційної системи, та DME/DME, VOR/DME, VOR/VOR, ADF/ADF навігацію [2-5]. Час роботи інерційної системи обмежений накопиченням адитивної похибки, тому цілком доцільно спрямувати зусилля на вдосконалення методу позиціонування за далекомірними маяками.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. ІКАО запропонувала методику оцінки точності позиціонування за інформацією від радіомаячних систем загалом орієнтовану на використання двох радіомаяків DME [6, 7]. Якщо провести аналіз доступних далекомірних систем на території України, то у більшій частині її простору доступні більш ніж два маяки. Процес позиціонування за радіомаяками залежать від типу наземного і бортового навігаційного обладнання та геометрії їх розташування у просторі. В методі визначення місця положення який був запропонований ІКАО, у разі використання більше ніж 2 радіомаяків, не враховується повною мірою фактор взаємного геометричного розташування.

Недоліки таких запропонованих методів вивчались в міжнародних організаціях. В EUROCONTROL було створено програмне забезпечення DEMETER (Distance Measuring Equipment TracER), що допомагає відтворити та проаналізувати процеси пов'язані з впровадженням концепції PBN. Програма дозволяє розрахувати рівень мінімальної навігаційної інфраструктури, необхідної для підтримки В-RNAV (або RNAV-5, за даними VOR / DME) і Р-RNAV (або RNAV-1, за даними DME/DME навігації). Безумовно DEMETER відповідає на ряд питань, які виникають в процесі реалізації концепції, однак це програмне забезпечення неможливо використовувати для дослідження усіх доступних навігаційних засобів у певному місці повітряного простору з урахуванням локальних особливостей.

Постановка завдання. PBN базується на використанні систем зональної навігації Area Navigation (RNAV). Застосування RNAV висуває низку вимог до характеристик бортових та наземних систем. Зокрема, до позиціонування, оскільки місцеположення ПК відіграє ключову роль під час виконання

польотів за новими концепціям. Питання альтернативних методів позиціонування певною мірою залишається відкритим, адже ще не прийнято чіткий план дій в цьому напрямку.

Розвиток та вдосконалення DME/DME навігації дозволить значно підвищити надійність та точність позиціонування в зонах де виникають проблеми з GNSS.

Мета статті. Метою статті є оцінювання точності та доступності позиціонування за сигналами далекомірних радіомаяків DME для повітряного простору України у випадку позиціонування за двома радіомаяками та за всіма наявними.

Точність позиціонування за двома радіомаяками. До складу сучасного бортового обладнання ПК відноситься FMS. На сьогоднішній день програмне забезпечення FMS використовує інформацію від двох комплектів бортового обладнання взаємодії з наземними радіомаяками DME. Під час польоту алгоритм DME/DME навігації у програмному забезпеченні FMS, за координатами власного місцеположення, оцінює найбільш вдалу пару радіомаяків DME та налаштовує бортове обладнання на роботу з ними. Система DME працює по принципу «запит-відповідь». Бортовим обладнанням формується сигнал запиту, який у вигляді двухімпульсної кодової послідовності подається на передавач і випромінюється бортовою антеною. Високочастотні кодові послідовності сигналу запиту приймаються антеною наземного радіомаяка надходять на приймач і далі на пристрій обробки. У ньому проводиться декодування прийнятої послідовності та формування сигналу-відповіді, який випромінюється антеною радіомаяка з часом затримки 50 мкс. Сигнал-відповідь приймається бортовою антеною, надходить на приймач і з нього на вимірювач дальності, де здійснюється декодування і виділення сигналів конкретного радіомаяка. За часом затримки сигналу-відповіді відносно сигналу-запиту визначається похила дальність до радіомаяка:

$$D = \frac{c(t_r - 50\text{мкс})}{2},$$

де t_r – час між посиланням запиту до наземного радіомаяка та отриманням відповіді бортовим обладнанням DME, c – швидкість світла.

У внутрішній пам'яті FMS міститься аеронавігаційна база даних, що містить відомості про розташування та основні характеристики наземних радіомаяків. Похила дальність до двох радіомаяків у поєднанні з координатами радіомаяків використовуються для оцінювання власних координат ПК. У такому випадку можна використовувати виключно дані радіомаяків кут між яким та ПК знаходиться у межах від 30° до 150° , що відповідає допустимому рівню точності за RNAV[6]. Розв'язок навігаційного рівняння у випадку двох радіомаяків визначить координати двох точок можливого місцеположення літака. З двох отриманих координат буде вибрано ту, що розміщена як найближче до минулого місцеположення літака. У загальному випадку відстань між точками можливого місцеположення буде більшою за 100 км, така довжина дозволяє відхилити хибну точку місцеположення ПК з досить високою ймовірністю.

При цьому алгоритмі функціонування FMS важливим є оцінювання зони доступності наземних далекомірних радіомаяків. На рис. 1. наведено результати оцінювання доступності радіомаяків DME у повітряному просторі України, оцінені за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, для висоти спостереження 32000 футів.

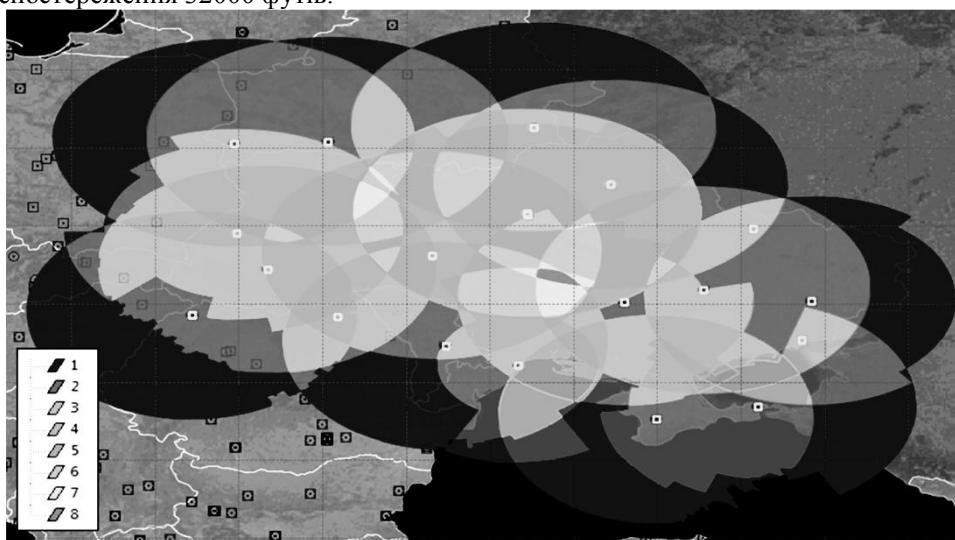


Рис. 1. Результати оцінювання доступності далекомірних радіомаяків

Оцінювання точності позиціонування виконується за рівнянням[6]:

$$2\sigma = 2 \frac{\sqrt{(\sigma_{1,air}^2 + \sigma_{1,sis}^2) + (\sigma_{2,air}^2 + \sigma_{2,sis}^2)}}{\sin(\alpha)},$$

де $\sigma_{1,air}$ та $\sigma_{2,air}$ – похибки визначення дальності до першого та другого радіомаяків (зазвичай складає 0,125% від відстані);

$\sigma_{1,sis}$ та $\sigma_{2,sis}$ – похибки обладнання (зазвичай $\sigma_{sis}=0,05$ м.мили);

α – кут між напрямками на наземні радіомаяки ($30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$).

Результати оцінювання точності позиціонування наведено на рис.2 для повітряного простору України.

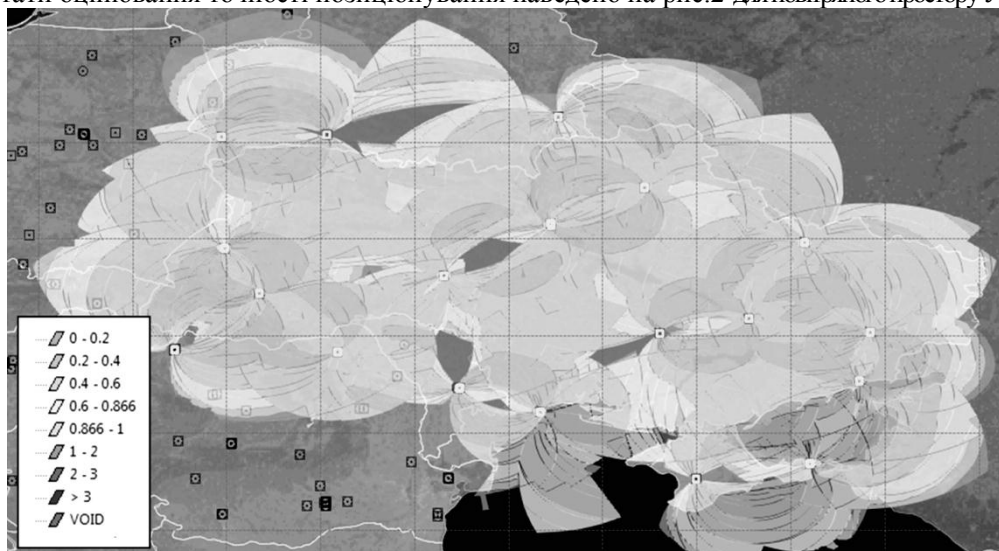


Рис.2. Результати оцінювання точності позиціонування за радіомаяками DME

Позиціонування за більш ніж двома радіомаяками. Принципово іншим підходом до визначення власного місцеположення є позиціонування за більш ніж двома далекомірними радіомаяками. У цьому випадку бортове обладнання використовується для послідовного визначення дальності до всіх наявних у цій частині повітряного простору радіомаяків.

Нехай бортове обладнання визначає дальність до трьох наземних станцій DME: (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) , – координати відповідно 1-го, 2-го та 3-го радіомаяка, (x_u, y_u, z_u) , невідомі координати ПК. Координати місцеположення ПК розв'язок системи нелінійних навігаційних рівнянь шляхом лінеаризації системи з застосуванням методу найменших квадратів для пошуку невідомих величин:

$$D_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2}$$

$$D_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2},$$

$$D_3 = \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2}$$

де D_1, D_2, D_3 – похила дальність між ПК та радіомаяками.

Загальна точність позиціонування за сигналами радіомаяків DME залежить від геометрії розташування наземного обладнання, зони дії та точності навігаційного обладнання DME. Вплив геометрії розташування наземної частини обладнання враховується коефіцієнтом погіршення точності DOP (Dilution Of Precision). Добуток коефіцієнта погіршення точності з точністю визначення дальності визначає точність позиціонування за далекомірним методом.

Розрізняють різні складові коефіцієнту погіршення точності. Зокрема виділяють:

EDOP (East DOP) – коефіцієнт зміни точності у східному напрямку,

NDOP (North DOP) – коефіцієнт зміни точності у північному напрямку,

HDOP (Horizontal DOP) – коефіцієнт зміни точності у горизонтальній площині,

VDOP (Vertical DOP) – коефіцієнт зміни точності у вертикальній площині,

PDOP (Position DOP) – загальний коефіцієнт зміни точності позиціонування.

Для визначення DOP розраховують матрицю А, що у випадку трьох радіомаяків буде мати наступний вигляд:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{(x_1 - x_u)}{D_1} & \frac{(y_1 - y_u)}{D_1} & \frac{(z_1 - z_u)}{D_1} \\ \frac{(x_2 - x_u)}{D_2} & \frac{(y_2 - y_u)}{D_2} & \frac{(z_2 - z_u)}{D_2} \\ \frac{(x_3 - x_u)}{D_3} & \frac{(y_3 - y_u)}{D_3} & \frac{(z_3 - z_u)}{D_3} \end{pmatrix}$$

Формують матрицю похибок Q :

$$Q = (A^T A)^{-1}$$

Елементи матриці Q визначають коефіцієнти погіршення точності у певних площинах[8]:

$$Q = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 \end{pmatrix} \text{ або } Q = \begin{pmatrix} EDOP^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & NDOP^2 & \sigma_{yz}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & VDOP^2 \end{pmatrix},$$

$$HDOP = \sqrt{EDOP^2 + NDOP^2},$$

$$PDOP = \sqrt{EDOP^2 + NDOP^2 + VDOP^2}.$$

Виконаємо оцінку доступності позиціонування за радіомаяками для території України. Для кожної точки повітряного простору розрахуємо відстані до наземних станцій DME та порівняємо їх з максимальною дальністю дії радіомаяків. Дальність дії радіомаяка залежить від його класу[9]: Terminal (T), Low altitude (L), High Altitude (H).

Горизонтальна дальність дії радіомаяка певного класу залежить від висоти польоту ПК та похилої дальності до наземного радіомаяка. При цьому, необхідно враховувати рельєф підстилаючої поверхні[10].

Для оцінки доступності позиціонування побудуємо сітку координат. Кожний з вузлів цієї сітки є рівновіддаленим від поверхні глобального еліпсоїда (використано глобальний геоцентричний еліпсоїд WGS 84) на відстань висоти спостереження. Кількість вузлів при цьому визначає точність оцінювання доступності. У межах комірки доступність вважається сталою величиною. Оцінку доступності виконаємо у локальній декартовій системі координат NED (North East Down) з подальшим переведенням результатів у геоцентричну систему координат LLA (Latitude Longitude Altitude).

Результати визначення оцінки доступності для висоти польоту 32000 футів наведено на рис. 3. Зони контурного рисунку вказують на кількість радіонавігаційних станцій, що доступні у відповідному повітряному просторі.

Виконаємо оцінку величини коефіцієнта, що характеризує геометричний фактор зміни точності у горизонтальній площині (HDOP) для повітряного простору України у зоні доступності (рис.3). Розрахунок HDOP виконуємо у зв'язаній з ПК NED (North East Down) системі координат. При

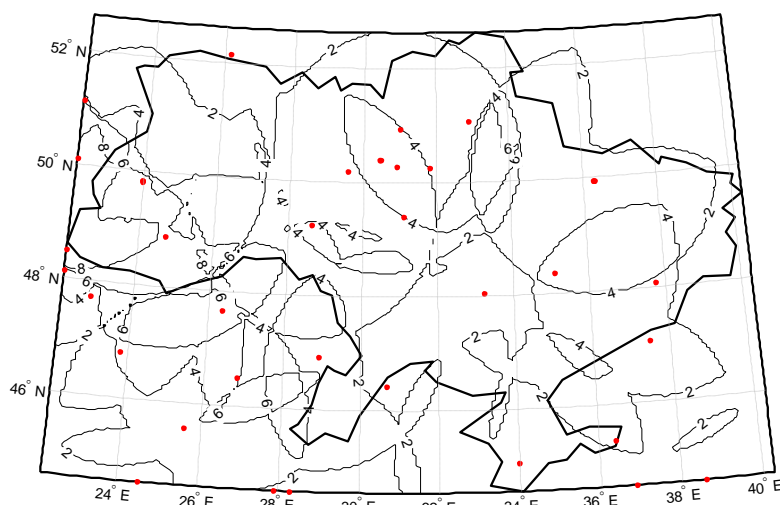


Рис. 3. Доступність DME/DME навігації для повітряного простору України

цьому центр локальної системи координат знаходиться у точці місцеположення ПК, вісь «x» направлена у північному напрямку, вісь «y» – у східному напрямку, вісь «z» – вниз.

Результати моделювання коефіцієнтів HDOP та PDOP для повітряного простору України наведено на рис.4 та рис.5 відповідно.

Контурними лініями на рис.4 та рис.5. представлено зони повітряного простору країни з відповідним значенням коефіцієнтів HDOP та VDOP. Отримані результати оцінки HDOP вказують на наявність зон

(зон у яких HDOP < 1) повітряного простору у яких за рахунок вдалої геометрії розташування наземних станцій спосерігається підвищення точності позиціонування порівняно з точністю далекомірного обладнання. Результати оцінки рfufkтуj] похибки позиціонування за далекомірним обладнанням наведено на рис.6.

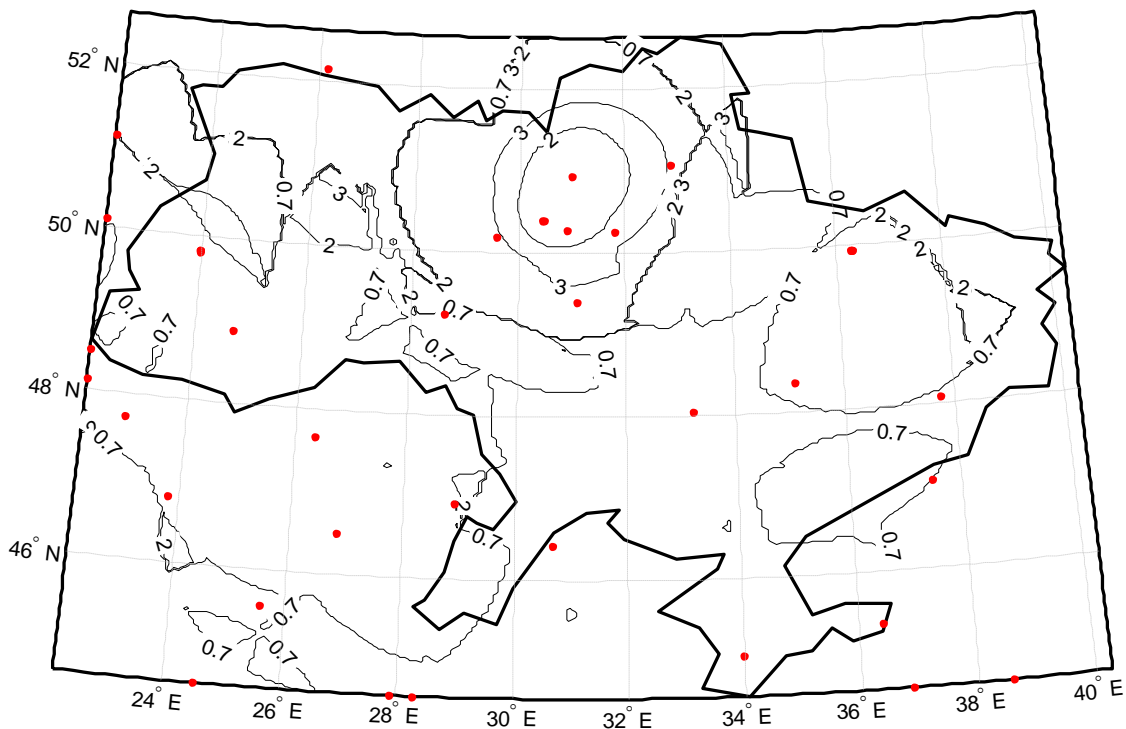


Рис. 4. Геометричний фактор погіршення точності у горизонтальній площині

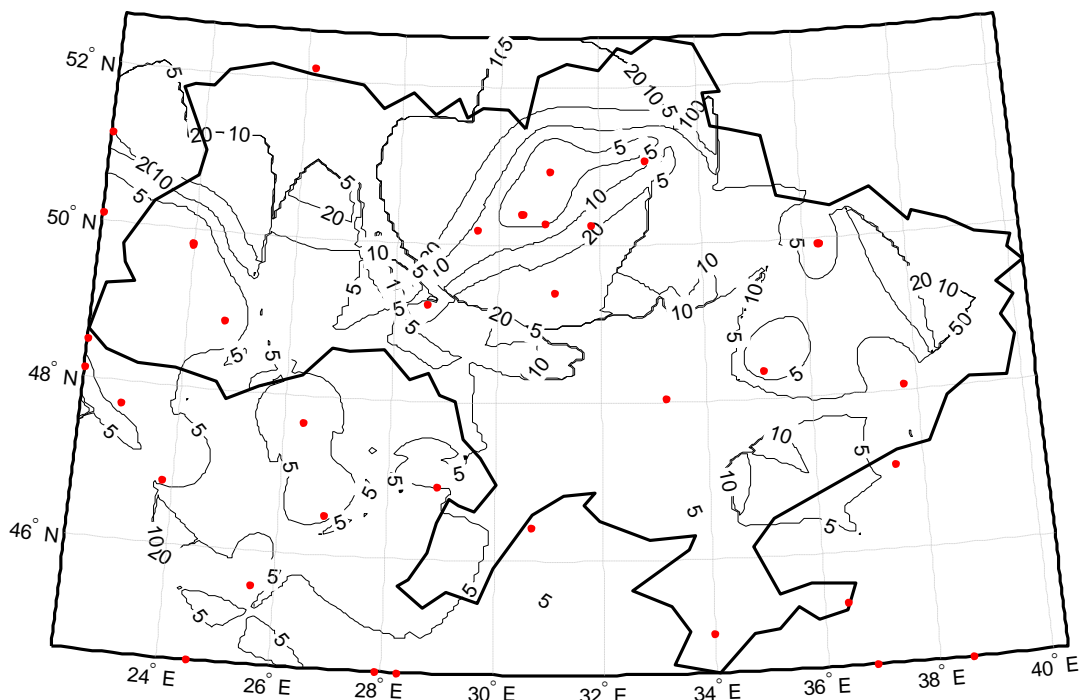


Рис. 5. Коefіцієнт PDOP

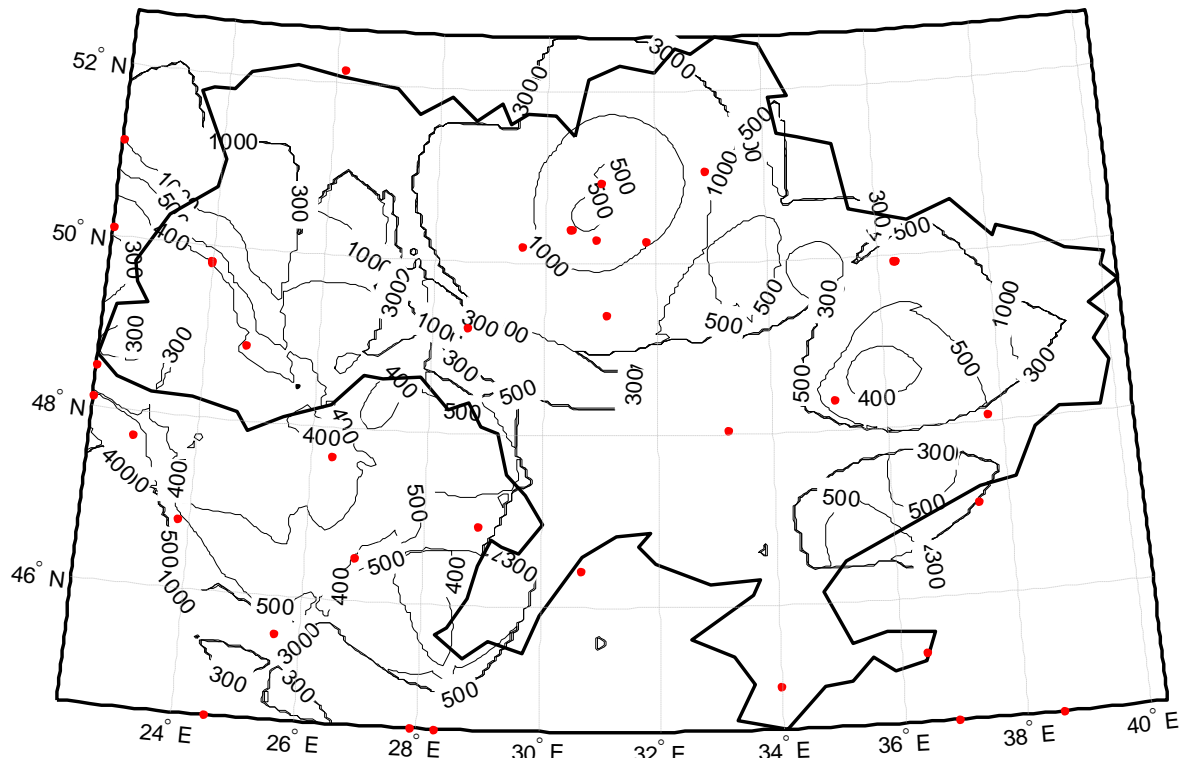


Рис. 6. Загальна точність позиціонування

Висновки. Результати оцінювання точності позиціонування за далекомірним обладнанням DME у випадку позиціонування за парою радіомаяків та у випадку використання всіх доступних радіомаяків вказують на доступність даного методу позиціонування у переважній частині повітряного простору України. Крім того результати оцінювання загальної похибки позиціонування за далекомірним методом рис.6. вказують на зони повітряного простору з точністю позиціонування у 300 м.

Список літературних джерел

1. Впровадження навігації, заснованої на характеристиках (PBN) /Дорожня карта та стратегія України на 2013 – 2025 роки
2. Остроумов І.В. Інтеграція координатної інформації у обчислювальній системі літаководіння / І.В. Остроумов // тези науково-практичного семінару Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем 17-23 червня 2013 року - Житомир. — 2013. — 19 с.
3. Остроумов І.В. Оцінка точності позиціонування за сигналами радіомаяків VOR / Остроумов І.В. // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць: Випуск 3(39). – К.:НАУ, 2012.– С. 102-107.
4. Ostroumov I. Positioning by VOR signals in Ukraine region // I. Ostroumov // Problems of CNS/ATM development and ATM. International Scientific-Metodical Conference of Researches, November 28 – 30, 2012 : theses. – K., 2012. – 74p.
5. Ostroumov I.V. Position detection by angular method in air navigation./ I.V. Ostroumov // The Fifth World Congress 'AVIATION IN THE XXI-st CENTURY' - 'Safety in Aviation and Space Technologies'. Volume 2. – Kiev: NAU, 2012. – 3.2.51-3.2.53 pp.
6. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Doc 9613, AN/937. – ICAO,2008. – 304 с.
7. Правила аэронавигационного обслуживания. Производство полётоввоздушных судов. Том II. Построение схем визуальных полётов и полётов по приборам. Doc 8168. OPS/611. – ICAO, 2006. – 872 с.
8. 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.
9. U.S. National aviation standard for the VOR/DME/TACAN systems. – Department of transportation. FAA, 1982. –70 p.
10. Харченко В.П. Авіоніка / В.П. Харченко, І.В. Остроумов. — К.: НАУ, 2013. — 281 с.