

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ DME/DME ПОЗИЦІОНУВАННЯ ДЛЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ УКРАЇНИ

Національний авіаційний університет

Розглянуто питання оцінки доступності позиціонування за допомогою далекомірного обладнання DME в Україні. Представлено методику розрахунку коефіцієнту погіршення точності у горизонтальній площині для DME/DME навігації та виконано розрахунок HDOP для повітряного простору України. У підсумку оцінено точність позиціонування за DME/DME методом.

Вступ

Концепція навігації заснованої на характеристиках (PBN), затверджена ICAO, висуває низку навігаційних специфікацій для навігаційних систем, що використовуються на різних етапах польоту. Ці специфікації визначають вимоги до характеристик систем через точність, цілісність та безперервності, що необхідні ПК для виконання польоту у певному повітряному просторі. Концепція PBN нерозривно розглядає можливість бортового обладнання у поєднанні з оточуючою інфраструктурою зв'язку, навігації та спостереження у певному повітряному просторі. Крім того, PBN засновується 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 важливу роль під час польоту [1].

RNAV сертифікований ПК спроможний точно визначати своє власне місцеположення за допомогою приймача глобальної супутникової навігаційної системи, далекомірного обладнання DME, все напрямлених радіомаяків VHF чи інерційної навігаційної системи. Обчислювальна система літаководіння використовує алгоритми фільтрації Калмана для інтеграції координатної інформації від різних систем позиціонування у залежності від різних факторів[2]. Наприклад у випадку недоступності GNSS для позиціонування може бути використано позиціонування за сигналами від декількох далекомірних чи кутомірних радіомаяків [3,4,5].

Аналіз досліджень і публікацій

Результати позиціонування за радіомаяками залежать від типу наземного і бортового навігаційного обладнання та геометрії їх розташування у просторі. Відповідно до цього моніторинг доступності методів позиціонування за сигналами радіомаяків та оцінка впливу геометричного фактору на точність позиціонування завжди залишаються актуальними.

Запропонована ICAO методика [6, 7] оцінки точності позиціонування за інформацією від радіомаячних систем загалом орієнтована на використання двох радіомаяків DME, у той час як для території України у більшій частині її простору доступні більш ніж два радіомаяка. Крім того, запропонована методика оцінки точності для більшої кількості радіомаяків не враховує геометрію розташування у повній мірі.

Постановка завдання

Відповідно до наведеного вище, питання оцінки доступності методу позиціонування на основі далекомірного обладнання DME є актуальними, особливо в умовах збільшення завантаженості повітряного простору. Крім того, точність позиціонування є важливою вимогою концепції PBN до виконання польотів у повітряному просторі країни, оскільки фундаментальною основою RNAV є гарантування необхідного рівня точності.

Основною метою статті є оцінка доступності сигналів далекомірних радіомаяків у повітряному просторі України та оцінка впливу геометрії розташування наземного обладнання DME на точність позиціонування.

Принцип позиціонування

Принцип визначення координат ПК за сигналами наземних радіомаяків DME ґрунтується на далекомірному методі позиціонування. Під час польоту бортове обладнання аналізує всі доступні наземні радіомаяки DME у точці свого місцезнаходження. Доступні наземні радіомаяки використовуються бортовим обладнанням для визначення похилої відстані між ПК та радіомаяком з використанням часового критерію. У випадку доступності двох радіомаяків результатом розвитку навігаційного рівняння буде дві точки місцеположення, одна з яких відбракується алгоритмом стеження за траєкторією руху ПК. Слід зауважити, що для позиціонування за двома радіомаяками можуть використовуватись виключно радіомаяки кут між яким та ПК знаходиться у межах від 30° до 150°, що відповідає допустимому рівню точності за RNAV[6].

Визначення координат місцеположення ПК ($x_{ПК}$, $y_{ПК}$, $z_{ПК}$) у глобальній геоцентричній системі координат ECEF у випадку наявної більшої кількості радіомаяків (більше двох), отримується за рахунок розв'язку навігаційного рівняння виду:

$$D_i^2 = (x_{ПК} - x_{DMEi})^2 + (y_{ПК} - y_{DMEi})^2 + (z_{ПК} - z_{DMEi})^2, \quad (1)$$

де x_{DMEi} , y_{DMEi} , z_{DMEi} – координати місцерозташування i -го наземного радіомаяка DME; D_i – похила відстань між i -м радіомаяком та ПК.

Розв'язок системи нелінійних навігаційних рівнянь отримується за допомогою лінеаризації системи рівнянь з застосуванням методу найменших квадратів для пошуку невідомих величин [8]. Для цього вводиться низка допоміжних величин:

$$\Delta D_i = \hat{D}_i - D_i,$$

$$\Delta x_i = \hat{x}_i - x_{ПК},$$

$$\Delta y_i = \hat{y}_i - y_{ПК},$$

$$\Delta z_i = \hat{z}_i - z_{ПК},$$

$$\hat{r}_i^2 = (x_{ПК} - \hat{x}_i)^2 + (y_{ПК} - \hat{y}_i)^2 + (z_{ПК} - \hat{z}_i)^2,$$

$$a_{xi} = \frac{x_{DME} - \hat{x}_i}{\hat{r}_i^2}, \quad a_{yi} = \frac{y_{DME} - \hat{y}_i}{\hat{r}_i^2}, \quad a_{zi} = \frac{z_{DME} - \hat{z}_i}{\hat{r}_i^2},$$

де \hat{x}_i , \hat{y}_i , \hat{z}_i – координати номінальних точок, ΔD – відстань від номінальної точки та ПК.

З урахуванням цього навігаційне рівняння (1) можна записати у матричному лінійаризованому вигляді:

$$\Delta D = H \Delta X,$$

де

$$\Delta D = \begin{pmatrix} \Delta D_1 \\ \Delta D_2 \\ \vdots \\ \Delta D_N \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{xN} & a_{yN} & a_{zN} \end{pmatrix}, \quad \Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{pmatrix},$$

$i = 1 \dots N$.

Розв'язок лінійної системи рівнянь для трьох радіомаяків може бути отриманий у вигляді:

$$\Delta X = H^{-1} \Delta D.$$

У випадку використання більшої кількості радіомаяків розв'язок може бути отриманий у вигляді:

$$\Delta X = (H^T H)^{-1} H^T \Delta D.$$

У принципі побудови DME визначення відстані між радіомаяком та бортовим обладнанням будується за часовим критерієм з урахуванням часу затримки (t_{GROUND}) у наземній частині обладнання:

$$D = \frac{c(t_r - t_{GROUND})}{2},$$

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

Точність позиціонування

Точність позиціонування розглядається як межі інтервалу, відносно дійсного місцеположення, у якому у 99% випадках (за правилом 3σ , чи у 95% за правилом 2σ) знаходиться отриманий результат вимірювань.

Загальна точність позиціонування за сигналами радіомаяків DME (σ_{Π}) залежить від геометрії розташування наземного обладнання, зони дії та точності навігаційного обладнання DME (σ_{DME}). Вплив геометрії розташування наземної частини обладнання враховується коефіцієнтом погіршення точності DOP (Dilution Of Precision)[8, 9]:

$$\sigma_{\Pi} = DOP \sigma_{DME}, \quad (2)$$

Точність визначення дальності далекомірним обладнанням DME складається з точності наземного та бортового обладнання системи. Відповідно міжнародним вимогам точність DME не повинна перевищувати

0,125% від дальності. Проте сучасне навігаційне обладнання забезпечує набагато більшу точність визначення дальності так наприклад $\pm 0,12$ м.миль + 0,05% від дальності (для дальності до 65 м.миль) та $\pm 0,17$ м.миль + 0,05% від дальності (для відстаней більших за 65 м.миль)[10].

Оцінка впливу коефіцієнта погіршення точності позиціонування пов'язаного з геометрією розташування наземного обладнання виконується з використанням матриці H . Для оцінки складових H використовуються координати наземних радіомаяків та точки повітряного простору для якої розраховується коефіцієнт DOP.

Розрізняють різні складові зміни точності позиціонування[8]:

$EDOP$ (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.

Коефіцієнти DOP оцінюються з рівнянь:

$$(H^T H)^{-1} = \begin{pmatrix} EDOP^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & NDOP^2 & \sigma_{yz}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & VDOP^2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$HDOP = \sqrt{EDOP^2 + NDOP^2}, \quad (4)$$

$$PDOP = \sqrt{EDOP^2 + NDOP^2 + VDOP^2}. \quad (5)$$

Вихідні дані

На території України розміщено вісім наземних радіо-маячних станцій DME. Основні технічні характеристики радіомаяків наведені у таблиці.

Таблиця 1. DME станції розміщені на території України

Ідентифікаційний код	Назва	Робоча частота, кГц	Широта, град	Довгота, град	Висота, м	Канал DME
BRP	Boryspil	115900	50.2855987548828	30.899299621582	152	106X
DNP	Dnipropetrovsk	112500	48.3595008850098	35.1025009155273	155	072X
DON	Donetsk	115000	48.0718002319336	37.7359008789062	231	097X
IVF	Ivano Frankivsk	114200	48.8847007751465	24.6898994445801	285	089X
KHR	Kharkiv	116500	49.9267997741699	36.2853012084961	163	112X
LIV	Lviv	115500	49.8115997314453	23.951000213623	333	102X
ODS	Odesa	113950	46.4300003051758	30.6702995300293	60	086Y
SMF	Simferopol	116600	45.051399230957	33.9793014526367	189	113X
KER	Kerch	116300	45.3708992004395	36.405101776123	43	110X
KVR	Kryvyi Rih	116000	48.0508995056152	33.2117004394531	121	107X
MRP	Mariupol	116200	47.0750999450684	37.4518013000488	81	109X
VIN	Vinnytsia	114800	49.2397003173828	28.6205005645752	302	095X

Доступність позиціонування за обладнанням DME

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[11,12]:

1. Terminal (T). Для істинних висот від 305м до 3658м похила дальність дії складає 46 км;
2. Low altitude (L). Для істинних висот від 305м до 5486м похила дальність дії складає 74 км;
3. High Altitude (H). Для істинних висот від 305м до 4420м похила дальність дії складає 74 км, для висот від 4420м до 18288м похила дальність дії складає 185 км та для висот від

5486м до 13716м похила дальність дії складає 241 км.

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

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 доступності вважається сталою величиною. Оцінку доступності виконаємо у глобальній декартовій системі координат ECEF (earth-centered earth-fixed) з подальшим переведенням результатів у геоцентричну систему координат LLA (Latitude Longitude Altitude).

Результати визначення оцінки доступності для висоти польоту 8000 м наведено на рис. 1. Зони контурного рисунку вказують на кількість радіонавігаційних станцій, що доступні у відповідному повітряному просторі.

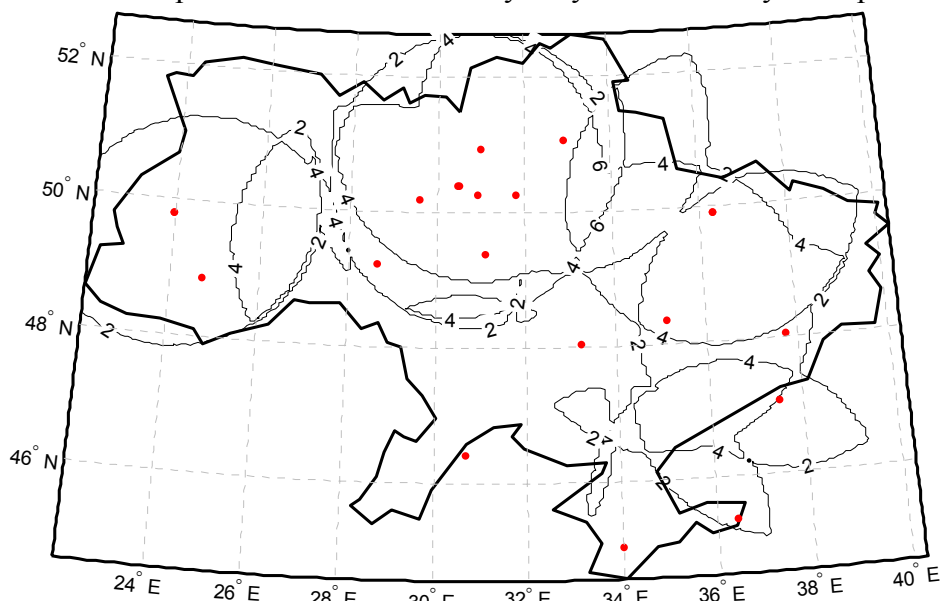


Рис.1. Доступність позиціонування за радіомаяками для території України

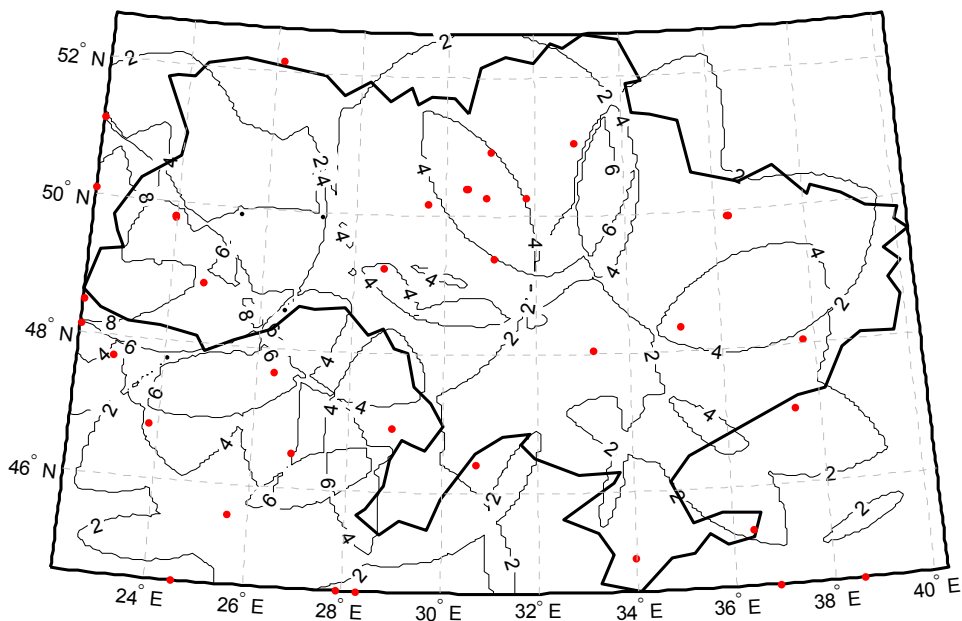


Рис.2. Доступність позиціонування за радіомаяками для території України з урахуванням зарубіжних VOR

Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 1 вказують на доступність більше двох навігаційних станцій у більшій частині повітряного простору України, що вказує на теоретичну можливість застосування даного методу позиціонування.

Крім того під час вирішення навігаційної задачі у повітряному просторі України можуть використовуватись сигнали DME станцій розміщених поза територіальними межами країни (рис.2). Використання азимутів всіх доступних радіонавігаційних DME станцій підвищує точність позиціонування.

Оцінка точності позиціонування

Виконаємо оцінку величини коефіцієнта, що характеризує геометричний фактор зміни точності у горизонтальній площині (HDOP) для повітряного простору України у зоні доступності (рис.2). Розрахунок HDOP виконаємо за формулами (3, 4, 5). Визначення коефіцієнтів DOP виконуємо у зв'язаній з ПК NED (North East Down) системі координат. При 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 VDOP для повітряного простору України з використанням національних та

зарубіжних радіомаяків наведено на рис.3 та рис.4 відповідно.

Контурними лініями на рис.3 та рис.4. 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 спостерігається підвищення точності позиціонування порівняно з точністю далекомірного обладнання. Загалом розподіл коефіцієнта HDOP виконаний для висоти польоту 8000м вказує на доступність методу позиціонування за сигналами далекомірного обладнання у переважній частині повітряного простору країни для навігації у горизонтальній площині. Результати оцінки коефіцієнта VDOP не можуть гарантувати необхідний рівень точності позиціонування у вертикальній площині. Мала точність пояснюється горизонтальним розміщення наземних станцій виключно на земній поверхні.

Оцінку похибок позиціонування у горизонтальній площині виконаємо за (2) з використанням отриманої матриці значень коефіцієнтів HDOP та характеристик типового наземного далекомірного обладнання DME. Результати оцінки похибок наведено на рис.5.

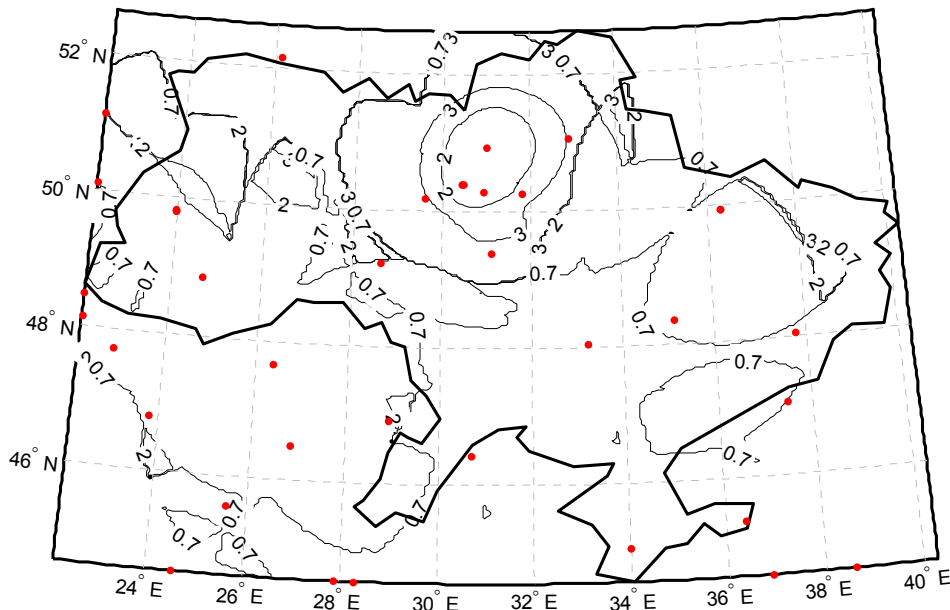


Рис.3. Коефіцієнт HDOP

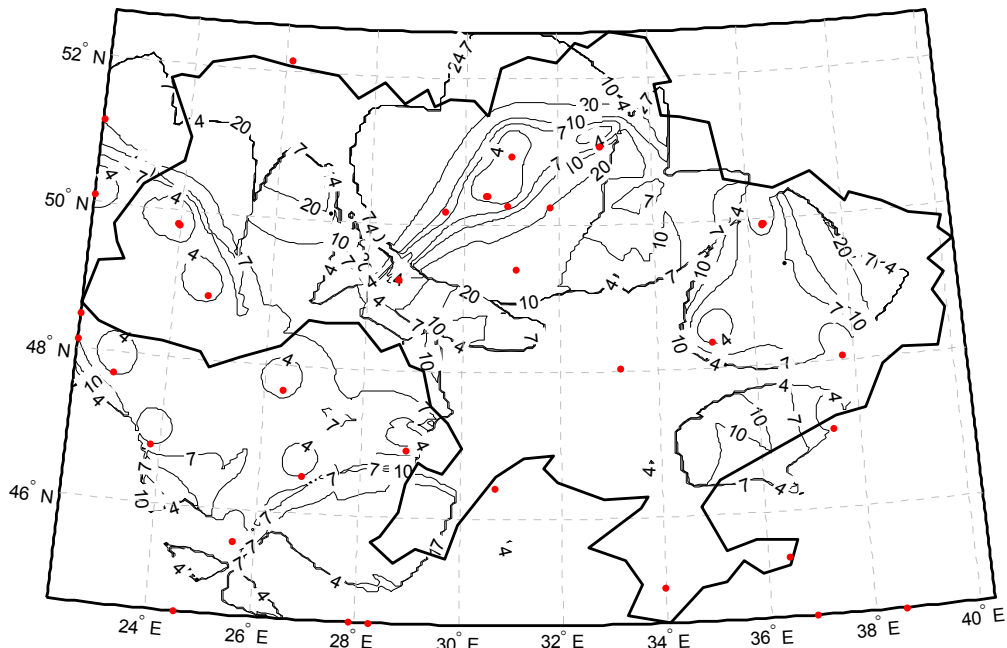


Рис.4. Коефіцієнт VDOP

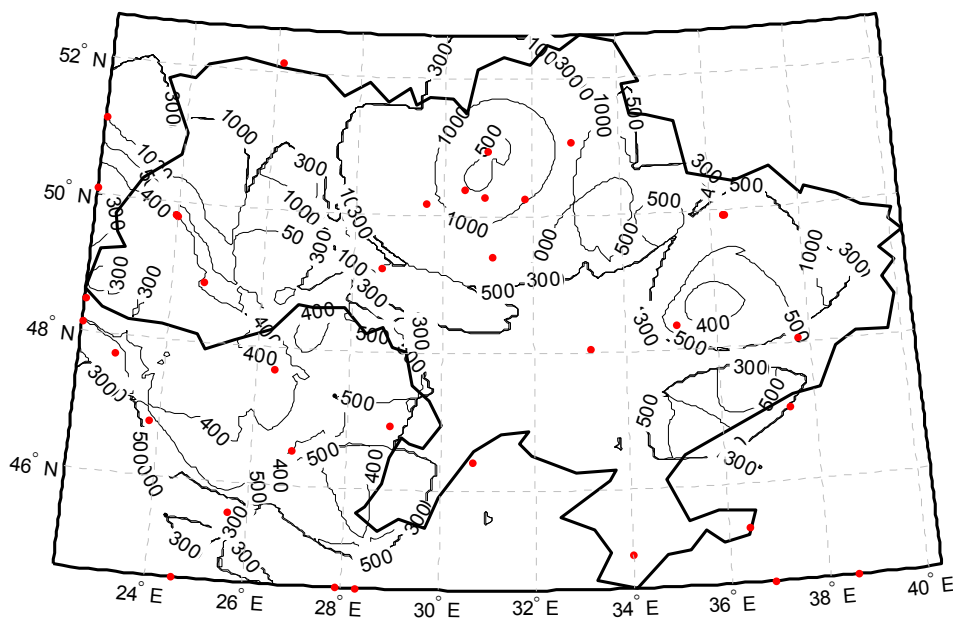


Рис. 5. Загальна похибка позиціонування

Висновки

На сьогоднішній день супутникові навігаційні системи забезпечують достатній рівень точності позиціонування для виконання польотів, проте у випадках відмови, метод позиціонування за сигналами радіонавігаційних маяків DME може бути застосований у переважній частині повітряного простору України (рис. 1-2). Оскільки точність цього методу позиціонування залежить від

геометрії розташування наземних радіомаяків визначено коефіцієнти HDOP для повітряного простору (рис. 3) та результуючу похибку позиціонування у горизонтальній площині.

Список літератури

1. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Doc 9613, AN/937. – ICAO, 2008. – 304 с.

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. — К., 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. Правила аеронавігаційного обслуговування. Производство полётоввоздушних судов. Том II. Построение схем визуальных полётов и полётов по приборам. Doc 8168. OPS/611. — ICAO, 2006. — 872 с.
7. Guidance Material for the Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV). — Eurocontrol, 2003. — 217p.
8. *Kaplan Elliott.* Understanding GPS: principles and applications./ Elliott Kaplan, Christopher Hegarty. — ARTECH HOUSE, INC, 2006. —723p.
9. *Changlin Ma.* Techniques to Improve Ground-Based Wireless Location Performance Using a Cellular Telephone Network / Ma Changlin / UCGE № 20177. Department of Geomatics Engineering. — Calgary, 2003. — 278p.
10. DME Ground beacon distance measuring equipment. Technical manual. Vol.1. — Thales, 2004. — 486p.
11. U.S. National aviation standard for the VOR/DME/TACAN systems. — Department of transportation. FAA, 1982. —70 p.
12. *Харченко В.П.* Авіоніка / В.П. Харченко, І.В. Остроумов. — К.: НАУ, 2013. — 281 с.