

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗА СИГНАЛАМИ РАДІОМАЯКІВ VOR

Національний авіаційний університет

Розглянуто застосування кутомірного методу позиціонування для визначення координат місцеположення літака за сигналами наземних все напрямлених радіомаяків VOR. Наведено результати оцінки точності та доступності кутомірного методу навігації основного на сигналах від VOR у повітряному просторі України.

Вступ

У сучасних умовах розвитку авіатранспортної системи безпека повітряного руху залежить від численних факторів. Одним з основних факторів є точність систем позиціонування повітряного корабля (ПК) у повітряному просторі. Визначення місцеположення ПК зазвичай виконується за допомогою супутникових навігаційних систем (GNSS)[1]. На сьогоднішній день системи GNSS забезпечує необхідний рівень точності позиціонування для виконання польотів. У випадку несправності бортового обладнання GNSS чи нездатності визначення координат обчислювальна система літаководіння (FMS) використовує інші, менш точні, методи позиціонування для визначення координат ПК. У випадку відмови GNSS може бути використана інерційна навігаційна система, проте час її використання обмежений у наслідок дії адитивної похибки. Альтернативними джерелами координатної інформації у FMS є методи позиціонування, основані на використанні інформації від навігаційних радіомаяків. Відповідно до зменшення точності позиціонування застосовують: DME/DME, VOR/DME, VOR/VOR, ADF/ADF навігаційні методи.

Аналіз досліджень і публікацій

Проведені дослідження можливості використання інформації від аеронавігаційних маяків для визначення власного місцеположення вказують на доцільність їх використання у разі інтеграції їх з іншими навігаційними системами для підвищення точності навігаційних систем [2]. Крім того, аналіз похибок кутомірно-

го методу позиціонування вказує на вплив геометрії розташування джерел сигналів на величину похибки [3,4,5].

Постановка завдання

Використання сигналів навігаційних радіомаяків VOR для позиціонування дозволяє забезпечити координатною інформацією бортове обладнання ПК. Функція кутомірного позиціонування закладена у більшості сучасних FMS. Точність кутомірного методу позиціонування залежить від геометрії розташування наземних станцій та визначає доцільність його застосування. Аналіз досліджень вказує на необхідність оцінки впливу геометричного фактору на точність позиціонування.

Основною метою статті є оцінка точності та доступності кутомірного методу навігації основного на сигналах від VOR у повітряному просторі України.

VOR/VOR навігація

Кутомірний метод навігації базується на визначенні місцеположення ПК за кутами-напрямами на наземні радіонавігаційні станції за умови відомих координат станцій. У якості джерела кутомірної інформації використано бортове обладнання VOR, що вимірює азимут радіомаяка [6], тобто кут між напрямом на північ та напрямом від ПК до радіомаяка (вимірюється від напрямку на північ за часовою стрілкою).

На рис. 1 наведено приклад застосування кутомірного методу позиціонування для визначення координат ПК у точці В за двома азимутами радіомаяків (А та С).

Координати ПК у загальному випадку для n кількості азимутів можуть бути

знайдені шляхом розв'язку системи рівнянь:

$$\operatorname{tg}(\alpha_i) = \frac{\Delta x_i}{\Delta y_i} = \frac{x_{\text{ПК}} - x_i}{y_{\text{ПК}} - y_i}, \quad i=1..n,$$

чи

$$x_{\text{ПК}} - y_{\text{ПК}} \operatorname{tg}(\alpha_i) = x_i - y_i \operatorname{tg}(\alpha_i), \quad i=1..n \quad (1)$$

де $x_{\text{ПК}}, y_{\text{ПК}}$ – координати ПК,
 x_i, y_i – координати радіомаяка,
 α_i – азимут радіомаяка.

У матричному вигляді систему рівнянь (1) можна представити у вигляді:

$$A \cdot X^T = B,$$

де

$$A = [1 \quad \operatorname{tg}(\alpha_i)], \quad X = [x_{\text{ПК}} \quad y_{\text{ПК}}],$$

$$B = [x_i - y_i \operatorname{tg}(\alpha_i)], \quad i = 1..n.$$

Вектор координат місцеположення обчислюється за виразом:

$$X = \left((A^T A)^{-1} A^T B \right)^T.$$

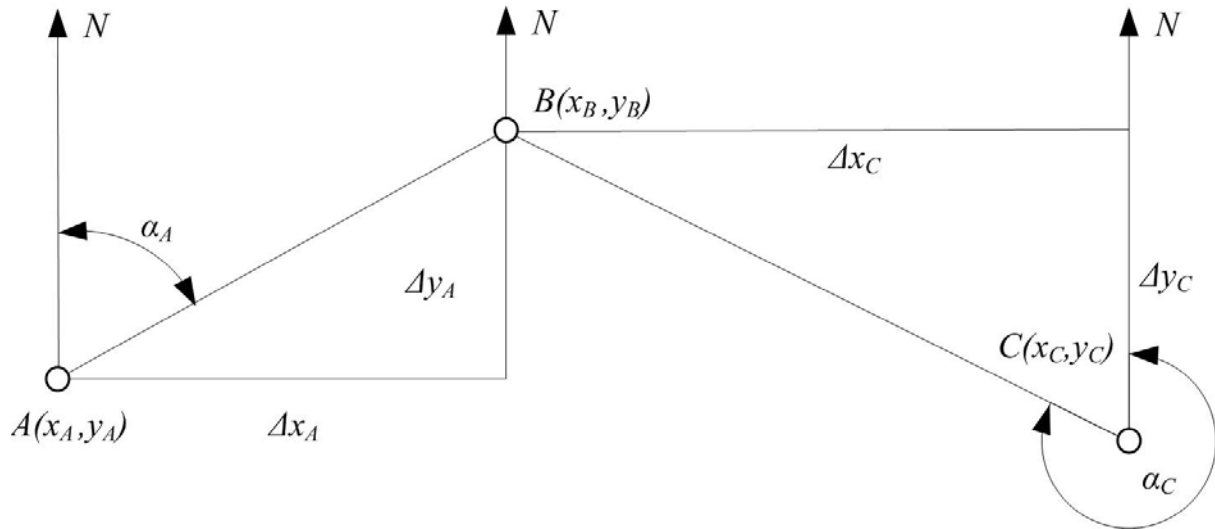


Рис.1. Кутомірний метод навігаційних визначень

Оцінка точності

Точність позиціонування кутомірного методу залежить від точності визначення азимутів (Δ_A, Δ_C) та геометрії розташування наземних радіомаяків відносно ПК (рис.2). Похибки визначення бортовим обладнанням азимуту утворюють два сектора місцеположення. Зона перетину секторів місцеположення вказує на можливе розташування ПК (заштрихована зона на рис.2 та рис.3).

Розміри зони можливого розташування залежать від взаємного розміщення наземних станцій та ПК. Важливою є відстань від ПК до радіомаяка, чим ближче, тим площа буде меншою. Як видно з рис.3, існують випадки неможливості позиціонування за кутомірним методом при потраплянні одного радіомаяка у сектор місцеположення іншого. У цих випадках необхідно використовувати інші доступні радіомаяки для вирішення навігаційної задачі. Вплив геометрії розташування наземних радіомаяків на результати позиціонування

призводить до появи ліній однакових похибок, врахування яких є необхідною вимогою виконання безпечного польоту. Точність позиціонування ($\sigma_{\text{П}}$) залежить від геометрії розташування та оцінюється за формулою [3]:

$$\sigma_{\text{П}} = \text{DOP} \sigma_{\text{В}},$$

де DOP – коефіцієнт зміни точності залежно від геометрії розташування радіомаяків (dilution of precision), $\sigma_{\text{В}}$ – похибка вимірювання.

Для підвищення точності позиціонування необхідно не тільки знижувати похибку вимірювання, а й приймати сигнал від більшої кількості радіомаяків.

Для оцінки DOP на основі азимутів формується матриця плану [3] виду:

$$G = \begin{bmatrix} \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) \\ \sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) \\ \vdots & \vdots \\ \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

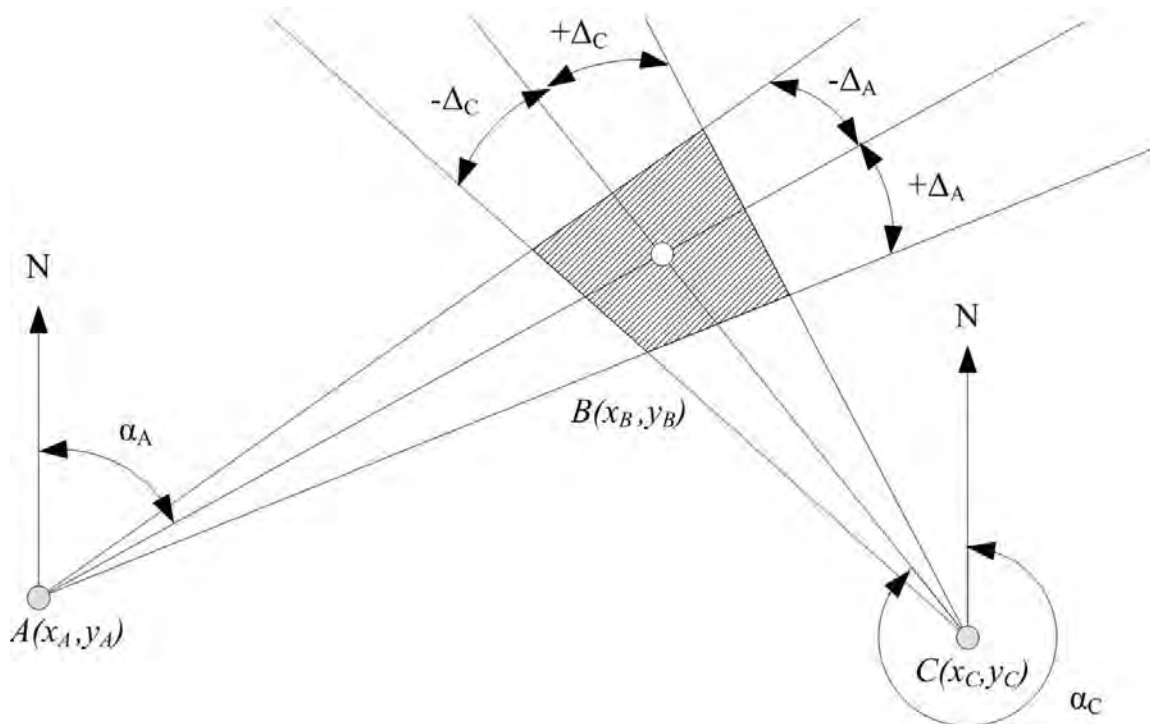


Рис.2. Точність позиціонування

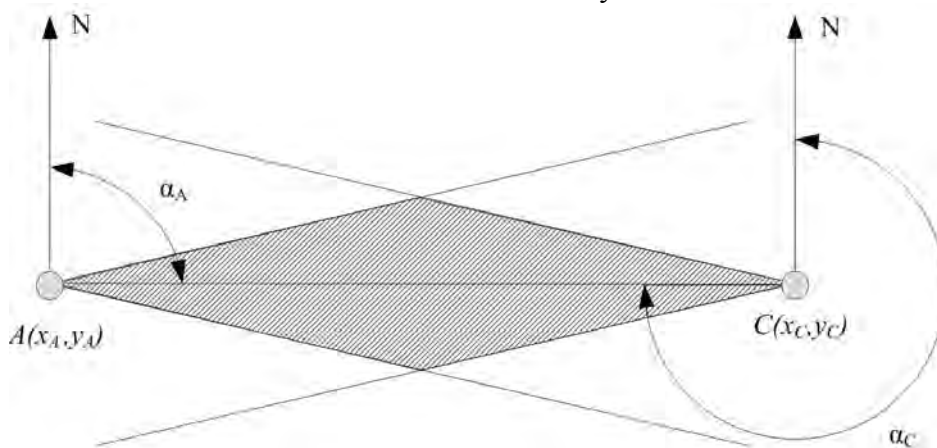


Рис. 3. Приклад невдалої геометрії розташування

На основі матриці G будується ко-варіаційна матриця похибок місцеположення, що містить DOP коефіцієнти:

$$(G^T G)^{-1} = \begin{bmatrix} EDOP^2 & g \\ g & NDOP^2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де
 $EDOP$ – коефіцієнт зміни точності у східному напрямку,
 $NDOP$ – коефіцієнт зміни точності у північному напрямку,
 g – коефіцієнти коваріаційної матриці похибок місцеположення.

Для кутомірного методу навігаційних визначень важливе значення відіграє горизонтальний геометричний фактор зміни точності HDOP:

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

Модельовання

Оцінювання точності позиціонування за сигналами радіонавігаційних маяків VOR доцільно розпочати з оцінки доступності кутомірного методу навігаційних визначень. На території України розміщено вісім наземних радіо-маячних станцій VOR/DME. Основні технічні характеристики радіомаяків наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. VOR/DME станції розміщені на території України

Ідентифікаційний код	Назва	Робоча частота, кГц	Широта, град	Довгота, град	Висота, м	Частота DME, кГц
BRP	Boryspil	115900	50.2855987548828	30.899299621582	152	115900
DNP	Dnipropetrovsk	112500	48.3595008850098	35.1025009155273	155	112500
DON	Donetsk	115000	48.0718002319336	37.7359008789062	231	115000
IVF	Ivano Frankivsk	114200	48.8847007751465	24.6898994445801	285	114200
KHR	Kharkiv	116500	49.9267997741699	36.2853012084961	163	116500
LIV	Lviv	115500	49.8115997314453	23.951000213623	333	115500
ODS	Odesa	113950	46.4300003051758	30.6702995300293	60	113950
SMF	Simferopol	116600	45.051399230957	33.9793014526367	189	116600

Виконаємо оцінку доступності позиціонування за радіомаяками для території України. Для кожної точки повітряного простору на висоті 5000м розрахуємо відстані до наземних станцій VOR/DME та порівняємо їх з максимальною дальністю дії радіомаяків. Дальність дії радіомаяків у горизонтальній площині у середньому становить 370 км відпо-

відно до технічних характеристик обладнання [6]. Крім того, при визначенні доступності використовується похила дальність дії, що враховує висоту спостереження. Обчислення похилої дальності виконаємо у геоцентричній системі координат.

Результати визначення доступності наведено на рис. 4.

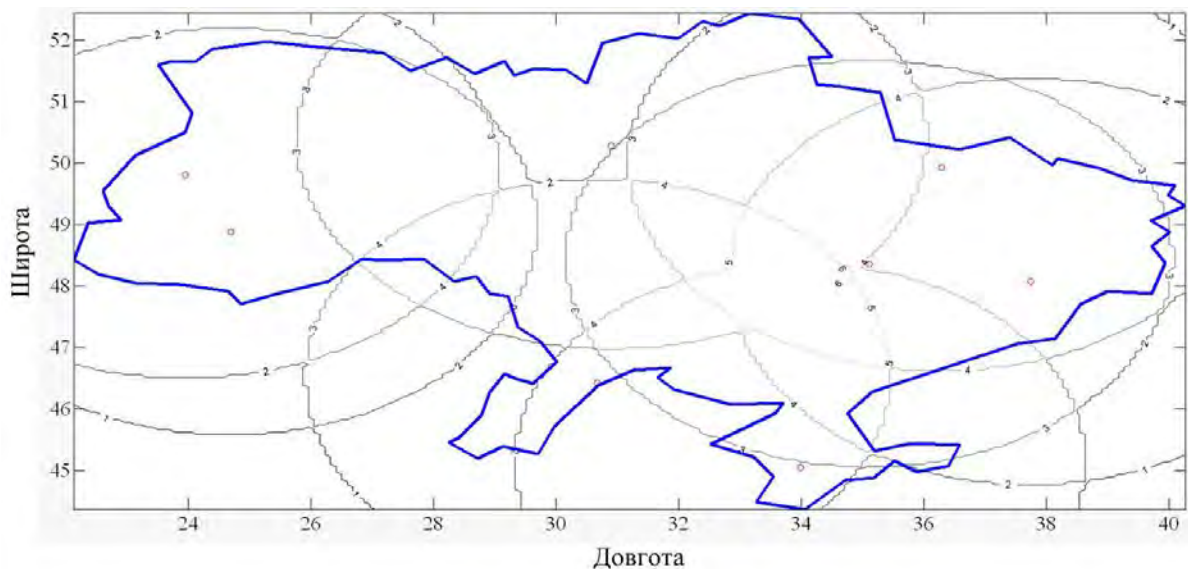


Рис. 4. Доступність позиціонування за радіомаяками для території України

Зони контурного рисунку вказують на кількість радіонавігаційних станцій, що доступні у відповідному повітряному просторі. Результати комп'ютерного моделювання, наведені на рис. 4, вказують на доступність більше двох навігаційних станцій у більшій частині повітряного простору України, що вказує на теоретичну можливість застосування кутомірного методу. Крім того, під час вирішення навігаційної задачі у повітряному просторі

України можуть використовуватись сигнали VOR станцій розміщених поза територіальними межами країни (рис.5). Використання азимутів всіх доступних радіонавігаційних VOR станцій підвищує точність позиціонування.

Виконаємо оцінку величини коефіцієнта, що характеризує геометричний фактор зміни точності у горизонтальній площині (HDOP) для повітряного простору України у зоні доступності (рис.4-5).

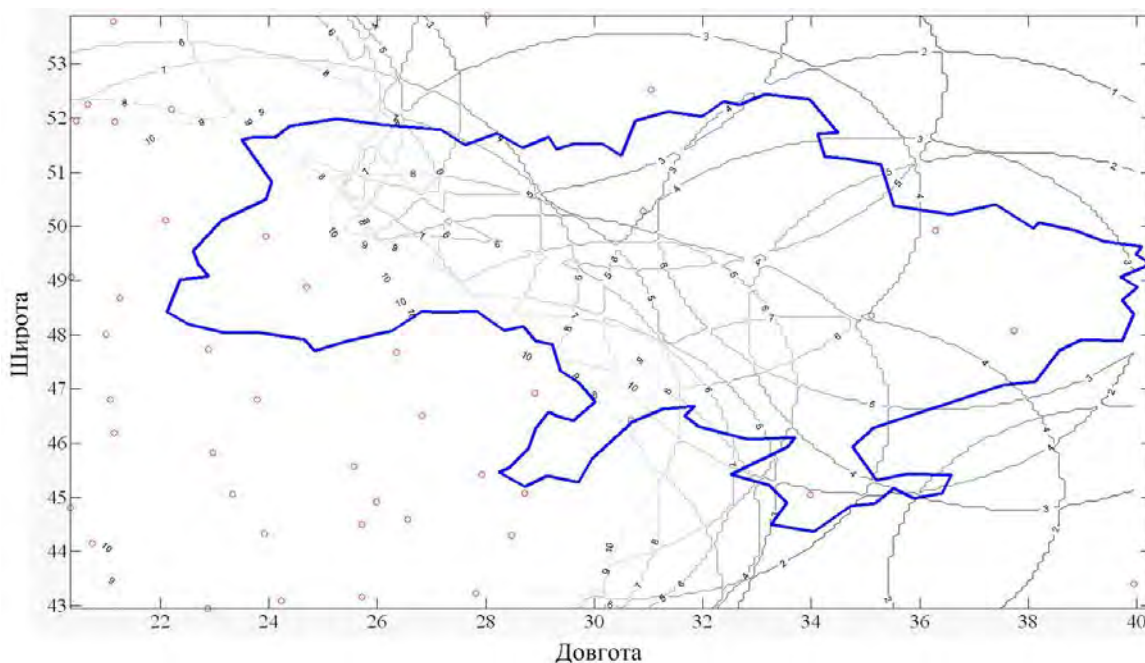


Рис.5. Доступність позиціонування за радіомаяками для території України з урахуванням зарубіжних VOR

Розрахунок HDOP виконаємо за формулами (2, 3, 4). Вихідними даними для розрахунку є кути азимуту від кожної точки повітряного простору до радіонавігаційних станцій, сигнали від яких при-

маються. Для визначення цих азимутів спершу знаходяться координати ПК у локальній системі координат (S, E, Z), пов'язаної з радіонавігаційним маяком:

$$\begin{bmatrix} S \\ E \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi)\cos(\lambda) & \sin(\varphi)\sin(\lambda) & -\cos(\varphi) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ \cos(\varphi)\cos(\lambda) & \cos(\varphi)\sin(\lambda) & \sin(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ECEF} \\ y_{ECEF} \\ z_{ECEF} \end{bmatrix},$$

де x_{ECEF} , y_{ECEF} , z_{ECEF} - координати точки спостереження у геоцентричній системі (ECEF), φ , λ - широта та довгота радіомаяка.

За отриманими координатами (S, E) розраховується азимут [5, 7]:

$$\alpha = \arctg\left(-\frac{E}{S}\right).$$

Результати моделювання HDOP для повітряного простору України з використанням національних радіомаяків наведено на рис.6, а з урахуванням зарубіжних радіомаяків на рис.7.

Висновки

На сьогоднішній день супутникові навігаційні системи забезпечують достатній рівень точності позиціонування для виконання польотів, проте у випадках відмови, кутотвірний метод навігаційних визначень

за сигналами радіонавігаційних маяків VOR може бути застосований у переважній частині повітряного простору України (рис. 4-5). Оскільки точність цього методу позиціонування залежить від геометрії розташування наземних радіомаяків визначено коефіцієнти HDOP для повітряного простору (рис. 6-7). Отримані результати вказують на доцільність використання цього методу у західній частині країни, оскільки там більш щільніше розташування наземних станцій VOR, що призводить до пониження HDOP, та робить його меншим за одиницю. Використання для позиціонування радіомаяків VOR у іншій частині повітряного простору доцільним є тільки у випадку відмови інших систем позиціонування у якості резервної системи у зв'язку з численими похибками.

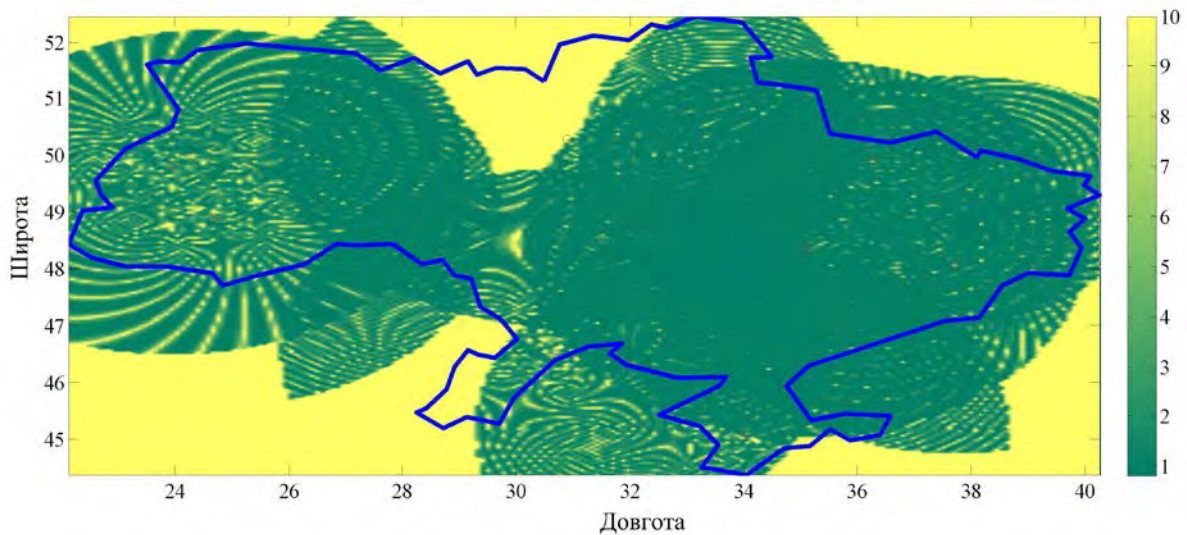


Рис.6. HDOP

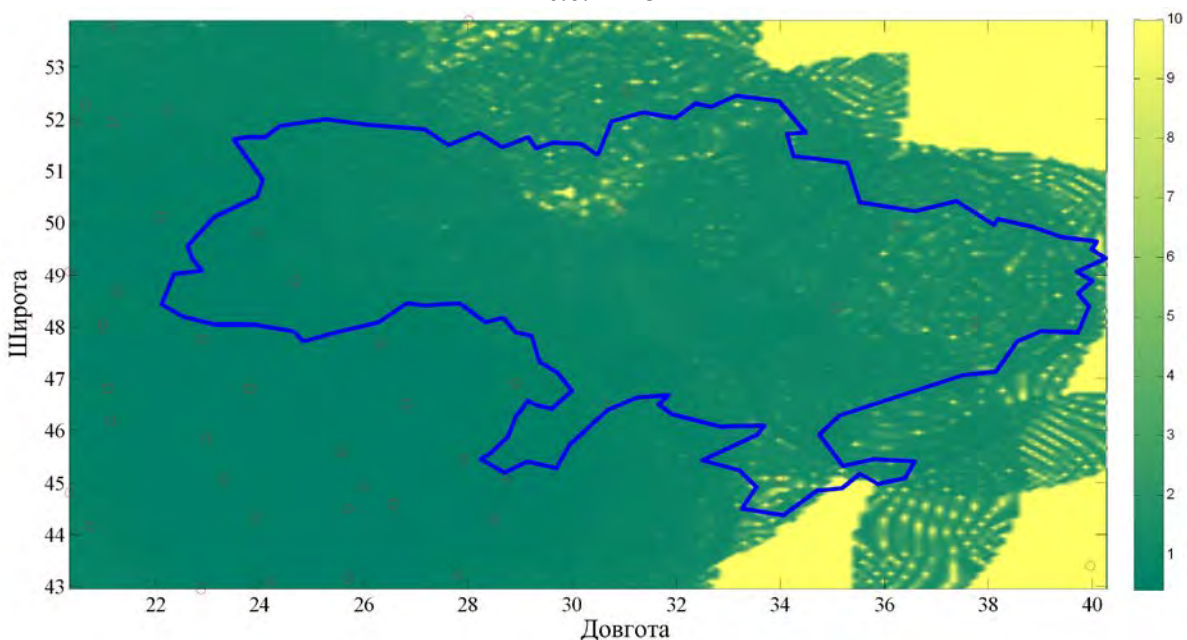


Рис.7. HDOP для території України з урахуванням зарубіжних VOR

Список літератури

1. *Global Navigation Satellite System Manual*. Doc 9849. AN/457. – ICAO, 2005. – 69p.
2. *Bobick J. C.* Improved Navigation by Combining VOR/DME Information with Air or Inertial Data. PhD thesis / John C. Bobick. – Stanford University, Stanford, California, 1972 –153p.
3. *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.
4. Xiwu Lv. Geometry Influence on GDOP in TOA and AOA Positioning Systems / L. Xiwu, L. Kaihua, H. Po // proceedings of the 2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing - Volume 02. – pp 58-61.
5. *Конін В.В.* Системи спутникової радіонавігації / В.В. Конін, В.П. Харченко; Національний авіаційний університет. – К.:Холтех, 2010. – 520 с.
6. *Харченко В.П.* Радіомаячні системи ближньої аеронавігації: навч. посіб. / В.П. Харченко, В.Г. Мелкумян, О.П. Сушич. – К.:НАУ, 2011. – 208 с.
7. *Curtis, H. D.* Orbital Mechanics for Engineering Students / H. D. Curtis. –Florida: Elsevier, 2005. – 692 p.