

ОЦІНЮВАННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДАЛЬНОСТІ ДІЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ

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

У тексті статті розглянуто питання оцінювання максимальної дальності дії радіонавігаційних маяків DME та NDB, що застосовуються для дотримання заданих ліній положення у процесі навігації цивільних літаків та для позиціонування на основі навігаційних сигналів у якості альтернативних методів визначення координат літака. Розглянуто діаграму спрямованості антенної системи та проведено моделювання зони дії радіонавігаційного засобу у вільному просторі та з урахуванням земної поверхні.

Ключові слова: максимальна дальність дії, радіонавігаційний засіб, діаграма спрямованості, антена, Земна поверхня, DME, NDB, зона дії.

Вступ

Максимальна дальність дії радіонавігаційного засобу (РНЗ) є вкрай важливою характеристикою навігаційної системи, що визначає зону дії РНЗ. У свою чергу зона дії РНЗ визначає доступність певних послуг аеронавігаційного обслуговування що можуть надаватися у обмеженому повітряному просторі. А від показників доступності та точності навігаційних систем залежить безпека авіаційних перевезень та функціонування авіатранспортної системи у цілому. У загальному випадку при дослідженні зон доступності застосовуються прості циліндричні моделі представлення зони дії РНЗ проте насправді характер цих зон залежить від характеристик обладнання зокрема потужності передавача, чутливості приймача, типу антенної системи та її діаграми спрямованості[1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У загальному випадку у більшості наукових досліджень розглядається спрощена модель зони дії РНЗ. Вона описує зону «гарантованого» функціонування РНЗ у її межах[2]. Спрощена модель дозволяє виконати взаємні обчислення для значних частин повітряного простору, проте вона є не точною оскільки не враховує характеристики антенних систем та фізику процесу розповсюдження радіохвиль у просторі. Крім того у більшості досліджень застосовують підхід «вільного простору», що не враховує вплив рельєфу місцевості. Так зокрема у працях [3-6] виконано оцінювання точності та доступності РНЗ за циліндричною моделлю зони «гарантованої» дії РНЗ для повітряного простору України. Крім того, питання оцінювання максимальної дії радіо засобів розглядалися у наступних працях [1, 7], проте подібних досліджень для DME та NDB не виконувалось.

Постановка завдання

Під час польоту важливою є інформація стосовно доступності РНЗ у певній точці повітряного простору, оскільки доступність впливає на точність характеристик навігаційних систем та пов'язана з безпекою повітряного руху. Відповідно до цього у статі розглядаються задачі підвищення точності оцінювання зони дії РНЗ у повітряному просторі на основі моделі розповсюдження радіохвиль. Крім того, на розповсюдження радіохвиль безпосередньо впливає земна поверхня, оскільки РНЗ розмішуються на земній поверхні врахування цього впливу є вагомим етапом оцінювання зони дії РНЗ.

Мета статті

Метою статті є оцінювання максимальної дальності дії РНЗ з урахуванням моделі розповсюдження радіохвиль у просторі з урахуванням перевідбивання від плоского рельєфу місцевості. Отримані результати дозволять більш точно оцінювати зону доступності РНЗ у порівнянні з циліндричною моделлю гарантованої зони дії.

Дальність дії радіонавігаційних засобів

Дальність дії радіонавігаційних є однією з головних характеристик. Оскільки за принципом функціонування радіонавігаційне обладнання складається з приймачів та передавачів радіонавігаційних сигналів, рознесених у просторі, тоді дальність дії залежить від характеристик обладнання передавача та приймача.

Максимальна дальність дії оцінюється виходячи з особливостей розповсюдження радіохвиль. У випадку використання ізотропної антени передавача потужність випромінюваного сигналу $P_{\text{прд}}$ рівномірно розподілилася по поверхні сфери (рис.1):

$$S_{\text{сф}}=4\pi D^2,$$

де D – радіус сфери.

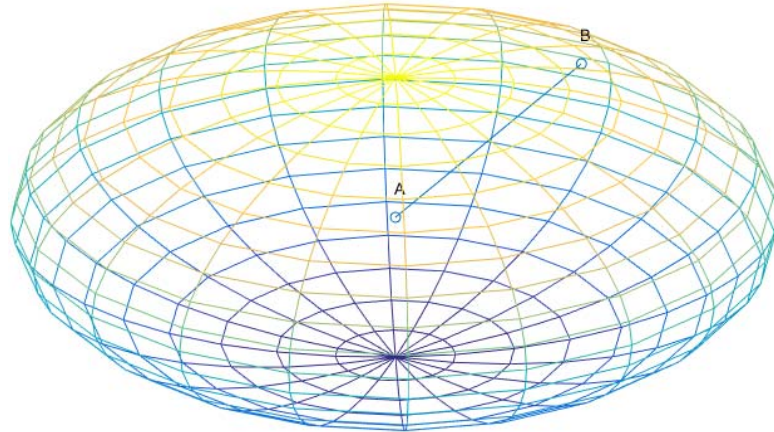


Рис. 1. Випромінювання ізотропної антени

Тоді, густина потоку потужності електромагнітної хвилі у точці В (ρ_B) може бути представлена у вигляді:

$$\rho_{Bi} = \frac{P_{\text{прд}}}{4\pi D^2}.$$

Враховуючи направлені властивості антени випромінювання[1]:

$$\rho_B = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}}}{4\pi D^2},$$

де $G_{\text{прд}}$ – коефіцієнт підсилення (направленої дії) антени передавача.

Коефіцієнт підсилення антени враховує направлені характеристики антени та в залежності від типу антени вказує на здатність антени до роботи у певному напрямку (рис. 2).

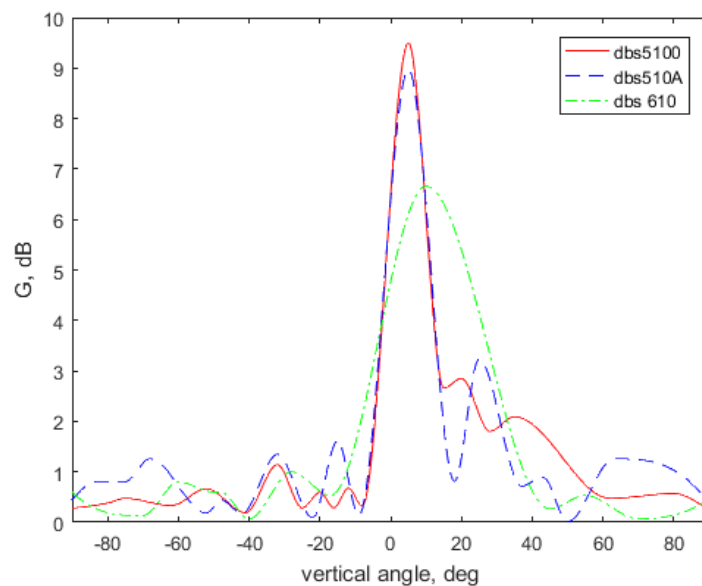


Рис. 2. Коефіцієнт підсилення у вертикальній площині для антен «dB Systems»

Так наприклад, для всенаправлених антен наземних станцій DME властива майже ідеальна випромінювана здатність у горизонтальній площині (діаграма спрямованості – коло), а вертикальній площині випромінювана здатність антен буде відрізнятись в залежності від конкретних технічних характеристик і буде різною для різних моделей. На рис. 2 представлено коефіцієнт підсилення у вертикальній площині для різних моделей антен «dbs5100», «dbs510A», «dbs 610» виробництва компанії «dB Systems»[8] для наземних станцій DME.

У декартовій системі координат відносно фазового центра антени рис. 2 можна представити у вигляді рис. 3. Під час розробки виробники намагаються зменшити випромінювання у напрямі земної поверхні, щоб зменшити дію відзеркалених від землі хвиль на діаграму спрямованості.

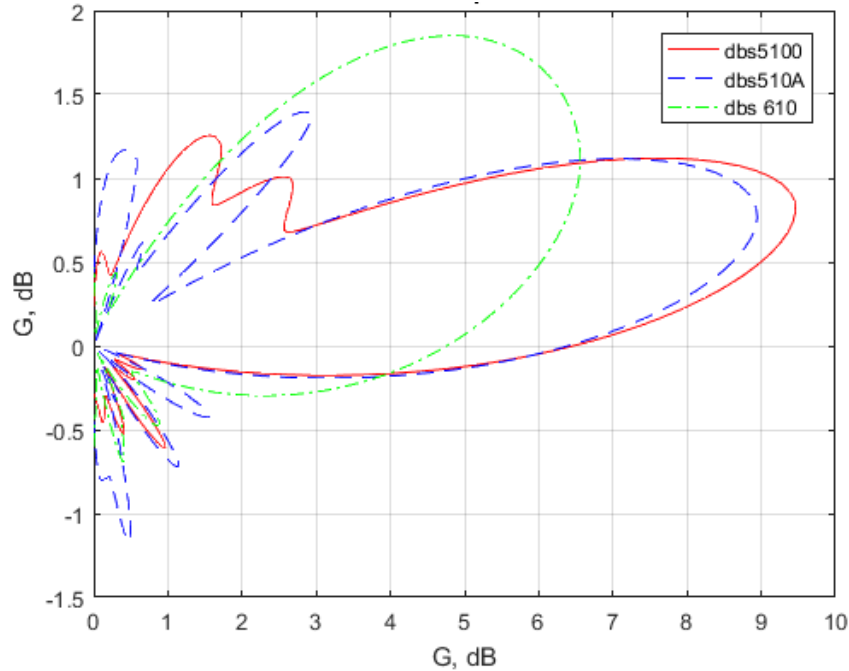


Рис. 3. Коефіцієнт підсилення у вертикальній площині

Загалом діаграма спрямованості антени у тривимірному просторі має пелюстковий вигляд рис.4.

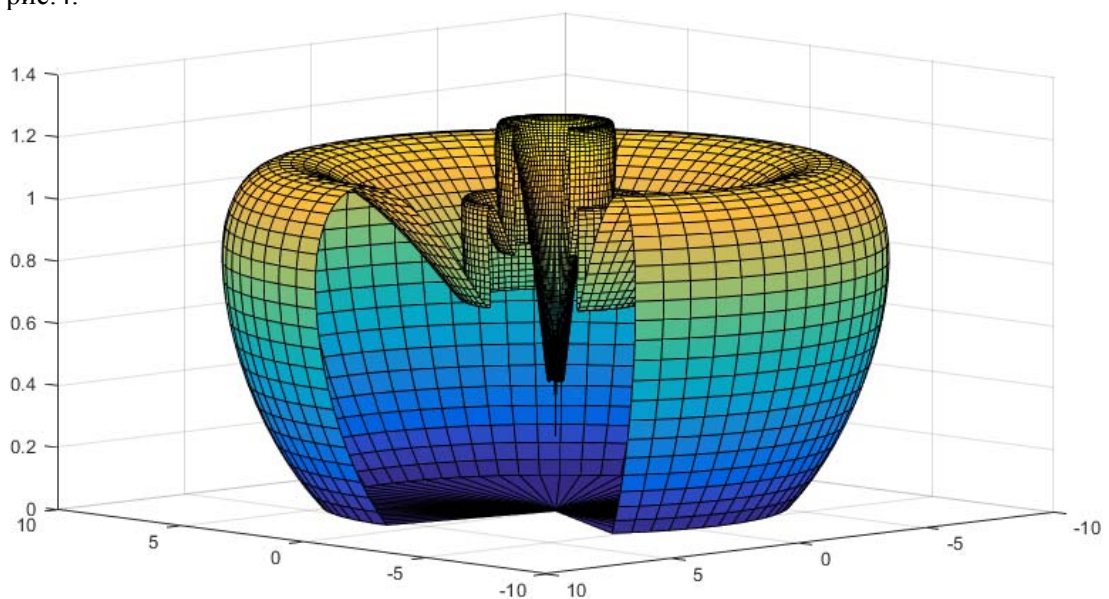


Рис. 4. Діаграма спрямованості антени «dbs5100» у вільному просторі

На вхід приймача з антеною розміщеною у точці В (рис.1) з ефективною площею $S_{\text{прм}}$ на поверхні сфери поступає сигнал з потужністю:

$$P_{\text{прм}} = \rho_B S_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} S_{\text{прм}}}{4\pi D^2}.$$

Оскільки частіше використовується коефіцієнт підсилення антени ніж ефективна площа антени приймача, що пов'язані між собою співвідношенням:

$$S = \frac{G\lambda^2}{4\pi},$$

тоді потужність сигналу на вході приймача:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{16\pi^2 D^2},$$

де $G_{\text{прд}}$ – коефіцієнт підсилення антени приймача.

Максимальна дальність каналу радіозв'язку обмежується пороговим значенням чутливості приймача ($P_{\text{прмчут}}$), тоді

$$D = \sqrt{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{16\pi^2 P_{\text{прмчут}}}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}}}{P_{\text{прмчут}}}}.$$

Формула вказує на максимальну дальність дії у вільному просторі. На рис. 5 наведено результат розрахунку зони дії антени «dbs5100» за максимальною дальністю дії каналу радіозв'язку.

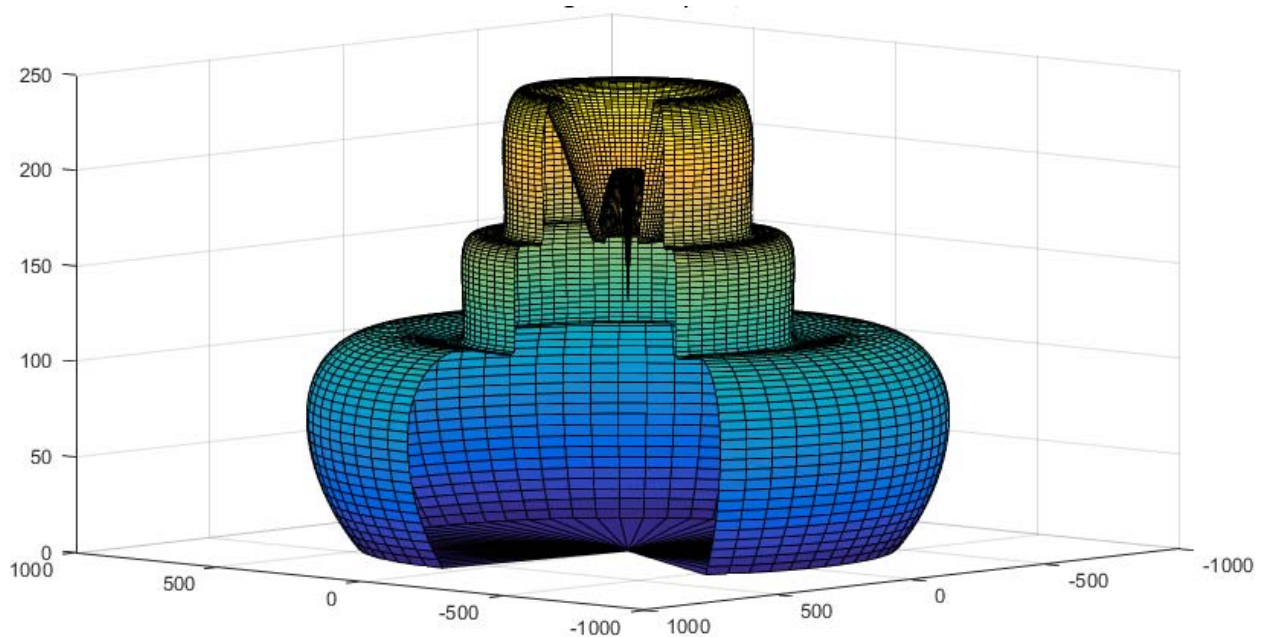


Рис. 5. Зона дії антени dbs5100 у вільному просторі

У випадку обладнання DME використовується два канали: канал запиту та канал відповіді. Кожний з каналів характеризується своєю дальністю дії, а у якості загальної дальності дії системи обирається найменша, що відповідає одночасній роботі двох каналів.

Вплив земної поверхні

На вільне розповсюдження радіохвиль впливає поверхня Землі. Радіохвилі відбиваються від поверхні Землі, а у точці прийому отримується сума полів прямої та відбитої хвилі (рис. 6). Поле відбитої від землі хвилі відрізняється за фазою та амплітудою.

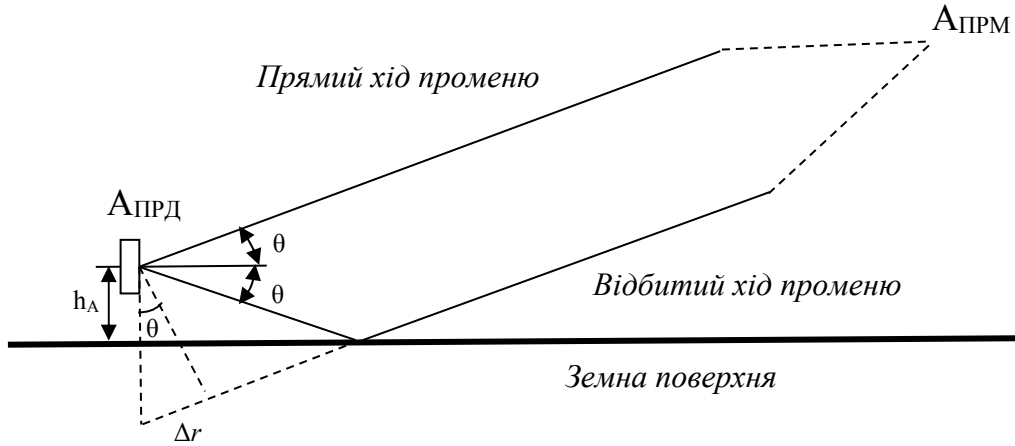


Рис. 6. Процес відбивання радіохвиль від земної поверхні

Зсув фази відбитого сигналу через різницю ходу радіосигналів Δr можна представити у наступному вигляді:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} h_A \sin(\theta),$$

де h_A – висота фазового центру антени на земною поверхнею.

Напруженість поля віддзеркаленої хвилі[1]:

$$E_2 = E_1 G(-\theta) K_\phi e^{j\Delta\varphi},$$

де E_1 – напруженість поля прямої хвилі, $G(\theta)$ – значення діаграми направленості антенної системи, $K_\phi = K e^{j\phi}$ – френелевський коефіцієнт віддзеркалення за напруженістю поля для випадку зеркального віддзеркалення.

Тоді, амплітуда поля хвилі у приймачі буде сумою прямого ходу променю та віддзеркаленого:

$$E_{\text{прм}} = E_1 + E_2 = E_1 G(\theta) + E_1 G(-\theta) K_\phi e^{j\Delta\varphi} = E_1 G(\theta) \left(1 + \frac{G(-\theta)}{G(\theta)} K_\phi e^{j\Delta\varphi} \right),$$

$$E_{\text{прм}} = E_1 G(\theta) \left(1 + \frac{G(-\theta)}{G(\theta)} K e^{j\phi} e^{j\Delta\varphi} \right) = E_1 G(\theta) \left(1 + \frac{G(-\theta)}{G(\theta)} K e^{j(\phi+\Delta\varphi)} \right).$$

Введемо позначення

$$G_3(\theta) = \left| 1 + \frac{G(-\theta)}{G(\theta)} K e^{j(\phi+\Delta\varphi)} \right| = \sqrt{1 + K^2 \left(\frac{G(-\theta)}{G(\theta)} \right)^2 + 2K \frac{G(-\theta)}{G(\theta)} \cos(\phi + \Delta\varphi)}.$$

У випадку якщо $K=1$ та $\phi=180^\circ$, а діаграма спрямованості антени симетрична відносно горизонту тоді $G(\theta)=G(-\theta)$, матимемо:

$$G_3(\theta) = \sqrt{2 + 2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h_A \sin(\theta) + \pi\right)} = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} h_A \sin(\theta)\right) \right|.$$

Відповідно максимальна дальність дії з урахуванням впливу Земної поверхні може бути оцінена наступним чином:

$$D_3(\theta) = D G_3(\theta) = 2D \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} h_A \sin(\theta)\right) \right|.$$

А для випадку несиметричної діаграми спрямованості:

$$D_3(\theta) = D \sqrt{1 + \left(\frac{G(-\theta)}{G(\theta)} \right)^2 + 2 \frac{G(-\theta)}{G(\theta)} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h_A \sin(\theta) + \pi\right)}.$$

На рис.7 наведено результати оцінювання максимальної дальності дії для антени db5100 з урахуванням вторинного випромінювання земної поверхні.

Порівнюючи рис.5 з рис.7 можна помітити, що зона дії системи з урахуванням земної поверхні приблизно у 1,5 рази більша за розповсюдження у вільному просторі, що є результатом підсилення сигналу при додаванні сигналів з однаковими фазами. Крім того, вплив земної поверхні проявляється через появу «мертвих зон», що є результатом додавання сигналів з протилежною фазою.

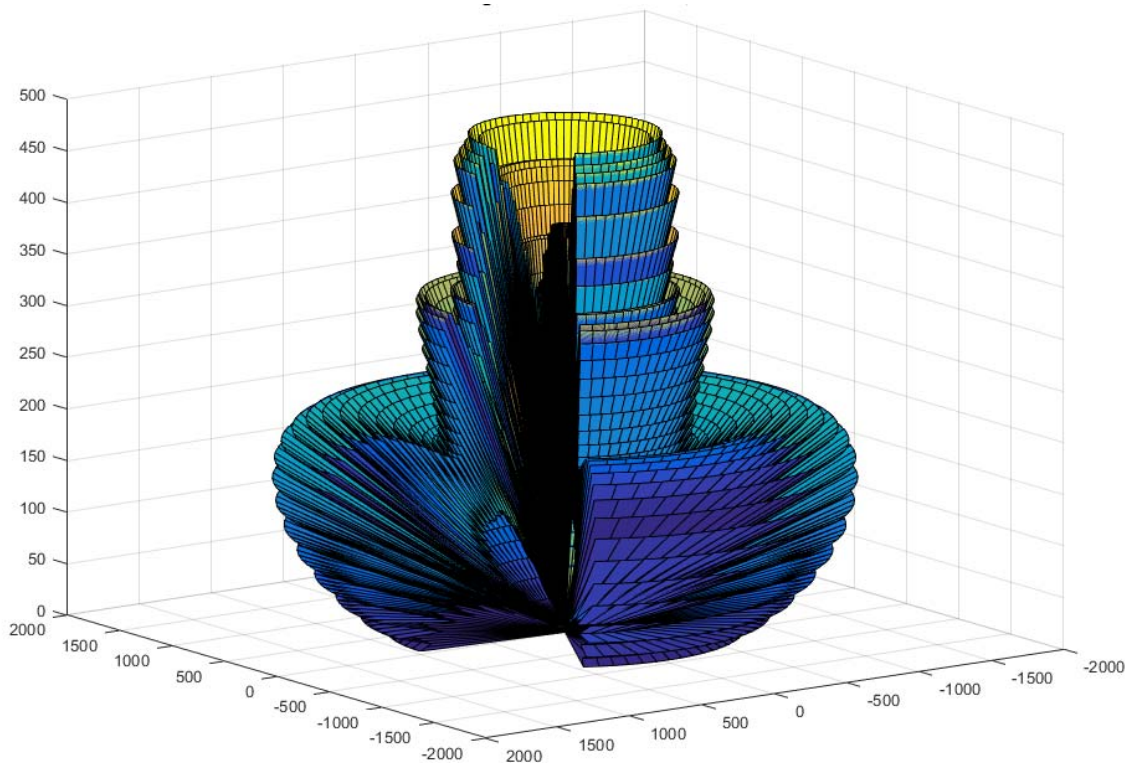


Рис. 7. Зона дії антени db5100 з урахуванням впливу земної поверхні

Висновки

У результаті виконано оцінювання максимальної дальності дії РНЗ DME у тривимірному просторі на прикладі антенної системи «db5100» виробництва компанії «dB Systems». Досліджено вплив земної поверхні на розповсюдження радіохвиль у тривимірному просторі. Отримана зона дії має пелюстковий характер, за рахунок перевідбивання радіохвиль від земної поверхні, відповідно до цього з'являються «темні» зони поза межами пелюсток у межах яких послуги РНЗ є недоступними. Проте, сигнали однакової фази смутуються у просторі, що підвищує їх потужність у точці прийому, а як наслідок розширює максимальну дальність дії. Отримані результати є основою до оцінювання точності та доступності РНЗ до витримування певних ліній положення та позиціонування.

Список літературних джерел

1. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. Учебник для вузов. М. Сов радио, 1973.– 496с.
2. U.S. National aviation standard for the VOR/DME/TACAN systems. – Department of transportation. FAA, 1982. –70 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Blake L. V. Radar range-performance analysis / L. V.Blake. Norwood, MA, Artech House, Inc., 1986. – 467 p.
8. dB Systems Inc. Офіційний веб сайт компанії. <http://www.dbsant.com>