

УДК 537.612.2(045)

Оцінювання доступності наземних радіонавігаційних засобів

Остроумов І. В.

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

E-mail: *ostroumov@ukr.net*

Наведено метод оцінювання доступності радіонавігаційних засобів для певної частини повітряного простору, що враховує циліндричну модель зони дії наземного радіонавігаційного засобу та цифрову карту рельєфу місцевості для обмеження зони “прямої” радіовидимості та врахування дифракції. Ефект дифракції враховується тільки для високих точок рельєфу. Представлені результати оцінювання доступності наземних радіонавігаційних засобів VOR та DME для повітряного простору України за даними збірника аеронавігаційної інформації. Оцінено загальну кількість комбінацій пар навігаційних засобів та відображено на контурному графіку.

Ключові слова: радіонавігаційний засіб; VOR; DME; доступність; зона дії; повітряний простір; цифрова карта місцевості; пара навігаційних засобів

Вступ

Під час переважної частини польоту повітряні кораблі (ПК) користуються послугами наземних радіонавігаційних систем. Зокрема, послуги далекомірного обладнання DME (Distance measurement equipment), кутомірного обладнання VOR (Very high frequency Omni Range) та NDB (Non directional beacons) є найбільш вживаними [1]. За своєю будовою ці системи є розподіленими та складаються з обладнання розміщеного на земній поверхні — наземних радіомаяків та бортового обладнання. Відповідно вимогам EUROCONTROL та EASA [2] до мінімального складу радіонавігаційного обладнання, ПК цивільного призначення мають бути укомплектовані бортовим обладнанням взаємодії з DME, приймачами сигналів VOR та автоматичним радіокомпасом, що приймає сигнали NDB та визначає напрямки на них. Причому, бортове обладнання має складатися з двох комплектів для забезпечення завдань навігації та резервування. При пілотуванні, наведені радіонавігаційні засоби (РНЗ) використовуються для витримування певних ліній положення та здебільшого для визначення місцеположення ПК у горизонтальній площині. Керування бортовим обладнанням виконується автоматично за заздалегідь закладеним планом польоту у обчислювальній системі літаководіння FMS (flight management system) [3]. FMS керує бортовими радіонавігаційними системами опосередковано через панель керування радіо-навігаційними засобами. Оскільки витримування певних ліній положень є найважливішим завданням навігації для забезпечення переміщення рухомого об'єкту у просторі за певною заздалегідь

запланованою траєкторією, то до функціонування цих систем висуваються жорсткі вимоги стосовно точності та доступності послуг радіонавігаційних засобів у певній частині повітряного простору [4].

Компанія провайдер послуг аеронавігаційного обслуговування у певній частині повітряного простору має забезпечувати доступність та точність використання цих навігаційних засобів для гарантування певного рівня безпеки авіаперевезень [5].

За результатами попередніх досліджень [1, 6] виконано аналіз зони дії окремих радіонавігаційних засобів для повітряного простору України на простій моделі радіонавігаційних засобів без урахування рельєфу місцевості та рефракції радіохвиль у атмосфері. Відповідно до цього основною метою дослідження є розробка нового підходу до оцінювання зони дії наземних радіонавігаційних засобів з урахування рельєфу місцевості представленого у вигляді цифрових карт та рефракції радіохвиль.

1 Зона дії радіонавігаційного засобу

Оцінювання зони дії певних навігаційних засобів виконують з використанням максимальної дальності їх дії, яка у загальному випадку визначається потужністю передавача, чутливістю приймача та направленими характеристиками антенних систем [3]. У випадку далекомірного обладнання DME розглядаються усі два канали: “до землі” та “вверх” причому дальність дії відповідає мінімальній з максимальних по кожному каналу.

У задачах моделювання зони доступності групи радіонавігаційних засобів здебільшого використовують спрощені моделі [7]. Так, наприклад, за стандартом AC 00-31A розглядають певні просторові зони гарантованого функціонування РНЗ, а за межами цих зон сигнали РНЗ можуть як бути, так і не бути наявними. Відповідно до цього виділяють три типи РНЗ:

- Термінальні (Terminal — Т). Для висот від 305м (1000 фут)AGL до 3658м (12000фут) AGL дальність дії складає 46 км (25 м.милі);
- Малих висот (Low altitude — L). Для висот від 305м (1000 фут)AGL до 5486м (18000фут) AGL дальність дії складає 74 км (40 м.милі);
- Висотні (High Altitude — H). Для істинних висот від 305м (1000 фут)AGL до 4420м (14500 фут) дальність дії складає 74 км(40 м.милі), для висот від 4420м(14500 фут) до 18288м (60000фут) похила дальність дії складає 185 км(100 м.милі) та для висот від 5486м (18000 фут) до 13716м(45000фут) похила дальність дії складає 241 км (130 м.милі).

На рис. 1 та рис. 2 наведено відповідні зони гарантованого функціонування РНЗ для термінального та висотних РНЗ відповідно.

Наземним РНЗ властиві обмеження за кутом місця у вертикальній площині. Зокрема зона дії радіомаяка визначається для VOR у 60° , для TACAN — 40° над радіогоризонтом. На більших кутах послуги РНЗ не гарантуються. На висотах до 1000фут зона дії не відіграє великого значення. Тому у багатьох розрахунках нею можна знехтувати, обмежуючись рельєфом місцевості.

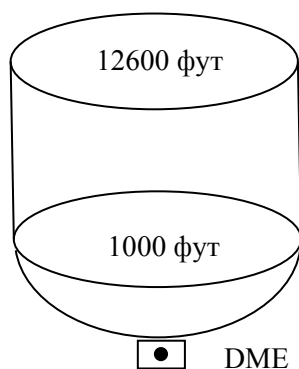


Рис. 1. Зона дії термінального РНЗ

Відповідно до АІР України за призначенням виділяють два основних типи РНЗ [8]:

- РНЗ підходу (approach — А). Для висот від 305м (1000 фут)AGL до 3658м (12000фут) AGL дальність дії складає 46 км (25 м.милі);

- маршрутні (en-route — Е). Для висот від 305м (1000 фут) AGL до 15240м (50000фут) AGL дальність дії складає 296.32 км (160 м.милі).

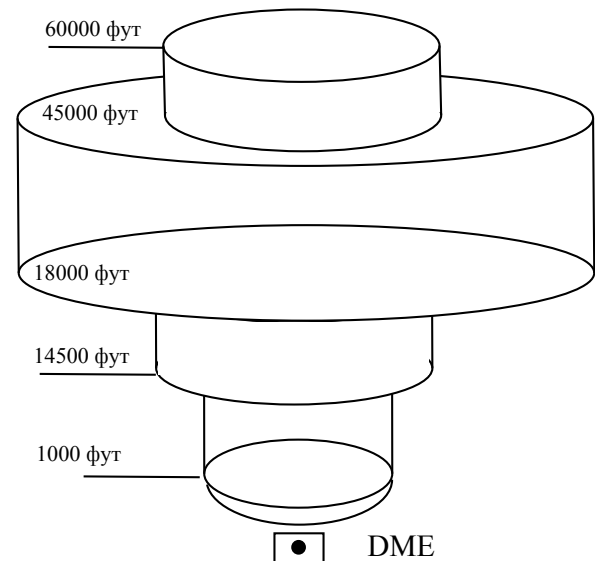


Рис. 2. Зона дії висотного РНЗ

2 Вплив рельєфу місцевості

Оточуючий рельєф місцевості відіграє значну роль у формуванні зони дії РНЗ. У загальному випадку радіохвилі радіонавігаційного обладнання можна вважати прямими, тобто такими, що розповсюджуються у вільному просторі за прямими траєкторіями у 3-вимірному просторі за різними напрямками.

Розповсюдження радіохвиль ультрависоких частот від РНЗ відбувається вздовж лінії прямої видимості. Хвилі таких частот не віддзеркалюються від іоносфери, а проходять крізь неї. Певний вплив має тропосферна рефракція, що дозволяє у разі значній потужності передавача оминати загоризонту зону. Проте у загальному випадку вважається, що радіохвилі ультрависоких частот розповсюджуються вздовж лінії прямої видимості. Відповідно до цього на малих висотах зону дії РНЗ може обмежувати високо-змінюваний рельєф місцевості. Такі обмеження призводять до появи “темних” зон за висотними елементами рельєфу (рис. 3).

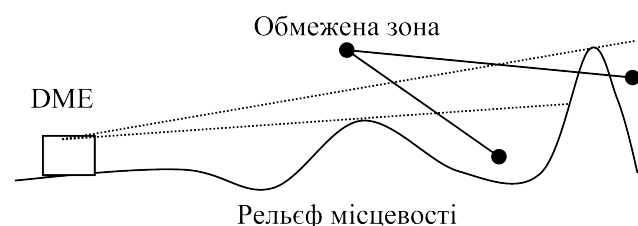


Рис. 3. Обмеження зони “прямої” видимості

На розповсюдження прямих радіохвиль впливає процес дифракції. Ефект дифракції радіохвиль дозволяє оминати перешкоди на шляху розповсюдження радіохвиль (рис. 4). У якості таких перешкод можуть виступати: гори, змінюваний рельєф місцевості, штучні споруди. Ефект дифракції радіохвиль виникає у результаті природнього повторного випромінювання радіохвиль високої частоти поверхнею перешкод на які вони падають [10]. Тобто, падаюча на поверхню гори хвиля призводить до збурення на її поверхні високо-частотних коливань, що розповсюджуючись збуджують сусідні зони поверхні (принцип Гюйгенса-Френеля). Послідовне збурення сусідніх зон у сумі призводить до передачі частини енергії хвилі у зону, що знаходиться у “тіні” прямої видимості від антени передавача. При ефекті дифракції слід мати на увазі, що частина енергії хвилі втрачається на взаємодію з рельєфом (нагрівання та затухання [10]). Окрім того, перевипромінені радіохвилі у разі дифракції можуть змінювати свою фазу. Як результат, за перепоною виникають зони прийому сигналу у поєднанні з зонами відсутності сигналу. Для розрахунку зони дії за нерівностями рельєфу місцевості його зазвичай апроксимують клиноподібною фігурою або іншою спрощеною геометричною фігурою для полегшення обчислень.

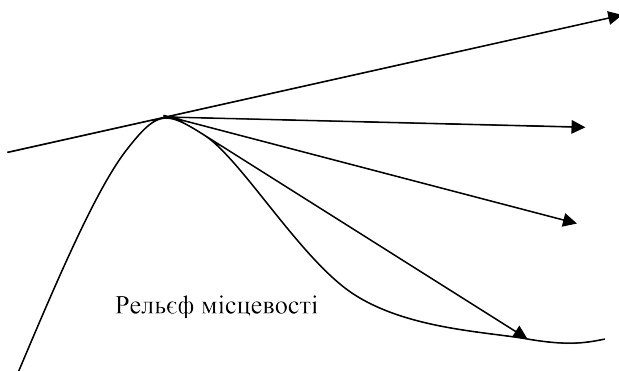


Рис. 4. Ефект дифракції радіохвиль від поверхні землі

Для оцінювання впливу високих елементів рельєфу та дифракції радіохвиль зазвичай застосовують цифрові карти місцевості (DEM — Digital Elevation Models) [11]. Зокрема за інформацією що містить DEM виділяють: цифрові карти рельєфу місцевості (DTM — Digital Terrain Model) та цифрові карти поверхні (DSM — Digital Surface Model).

DTM містять три-вимірну модель рельєфу певної Земної поверхні. Зазвичай DTM Земної поверхні отримуються за допомогою радіолокаційного зондування штучними супутниками спостереження, як результат містить інформацію про об'єкти, що відбивають радіохвилі певної частоти [11].

DSM складається з даних про Земну поверхню та містить інформацію про об'єкти, розміщені на її поверхні. На DSM можуть відобразитися штучні

перешкоди та природні об'єкти такі як дерева, кущі та інше. Найчастіше DSM будують за інформацією від лазерних далекомірних систем (LIDAR), радіолокаторів, оптичних фотокамер за методами стереофотограметрії. Роздільна здатність супутникових систем є недостатньою для розпізнавання окремих елементів споруд на Земній поверхні, відповідно до цього DSM отримують з використанням низьколітаючих пристроїв: літаків чи безпілотних літальних апаратів.

У залежності від системи координат DEM даних розрізняють два основні формати даних: дані у декартовій системі координат відносно певної точки та геодезичний формат даних (використовує параметри широти, довготи та висоти кожної точки — LLA). Декартові дані зазвичай використовуються у DSM та мають роздільну здатність у 1, 5 чи 30 метрів. Геодезичний формат найчастіше застосовується у даних DTM з властивою їм роздільною здатністю у:

- 1 секунду (що відповідає приблизно 30-33 метрам);
- 3 секунди (що відповідає приблизно 90-100 метрам);
- 30 секунд (що відповідає приблизно 1 км).

Дані DEM зазвичай зберігаються у певних цифрових форматах (наприклад, .las, .hgt), що забезпечують пакування цифрових даних для зменшення розміру файлу. Відповідно перед їх застосуванням необхідно виконати відновлення даних до первинного вигляду з подальшою перековертацією до відповідного формату у певній системі числення. Після підготовки даних DEM вони будуть містити значення висоти шматочка рельєфу для певної широти та довготи.

Визначення частин рельєфу місцевості, що накладають обмеження на зону прямої видимості, доцільно виконувати з використанням скануючого проміння від місця розташування РНЗ. Простір цього проміння складається з секторів, що відповідають роздільній здатності за дальністю та азимутом.

Пошук завадових частин рельєфу виконується шляхом порівняння кожного елемента (пікселя) рельєфу місцевості з місцезоташуванням у просторі секторів “скануючого” проміння (рис. 5). У разі перетинання проміння з елементом рельєфу в певному секторі виконується порівняння висоти. Якщо висота рельєфу більша за висоту “скануючого” проміння, тоді цей елемент DEM вважається завадою, причому найближчий до РНЗ елемент вважається обмежуючим, а усі наступні — такими, що знаходяться у зоні обмеження видимості. У процесі порівняння задіюються усі дотичні елементи. Уся зона дії РНЗ розбивається на скануючі промінні з певною роздільною здатністю. Елементи DEM, що були попередньо порівнянні у сусідньому секторі, у

інших секторах не порівнюються для підвищення швидкодії алгоритму роботи.

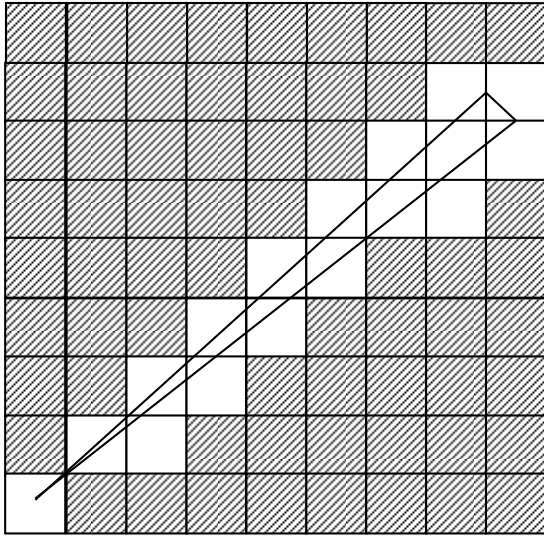


Рис. 5. Пошук елемента — завади рельєфу

Слід відмітити, що застосування секторного огляду обумовлюється більшою швидкістю порівняння елементів у порівнянні з перевіркою кожного елемента DEM, оскільки кількість променів набагато менша за загальну кількість елементів DEM.

3 Метод оцінювання доступності навігаційних засобів

Для оцінювання зон доступності РНЗ розглянемо поелементне оцінювання доступності для кожної частини повітряного простору. Загальна зона доступності будується за результатами об'єднання елементарних зон. Причому оцінювання кількості доступних РНЗ у певній частині повітряного простору доцільно виконувати у тривимірному просторі для більшої інформативності. Вхідними даними методу є межі зони простору для якого необхідно оцінити доступність РНЗ. Межі задаються у вигляді граничних значень широти та довготи. Висота над поверхнею еліпсоїдальної моделі WGS 84 теж може задаватися, проте у випадку її відсутності висотою вважається максимальна висота дії РНЗ, що знаходиться у граничних межах зони оцінювання. У граничних межах заданої зони дії виконується пошук РНЗ, прийом сигналів яких теоретично можливий шляхом грубого порівняння приблизної максимальної дальності дії РНЗ з геометричними розмірами досліджуваного простору.

У процесі порівняння досліджувані зони простору розширюються на величину максимальної дальності дії подібного типу радіообладнання, РНЗ координати місцезосташування яких знаходяться у

цій межі будуть використані для подальших обчислень. У якості такої дальності може виступати дальність у 700 км. У загальному випадку вибір цієї величини є не критичним оскільки це грубе відкидання непотрібних РНЗ з подальших розрахунків з метою підвищення продуктивності комп'ютерних обчислень. Збільшення зони можна виконувати у LLA системі координат, при цьому застосовуються наступні формули для перерахунку широти:

$$\begin{aligned}\varphi_{maxnav} &= \varphi_{max} + 2 \arcsin \left(\frac{R_{max}}{2R_e} \right) \\ \varphi_{minnav} &= \varphi_{min} - 2 \arcsin \left(\frac{R_{max}}{2R_e} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

де $R_{max} = 700$ км — максимальна дальність дії у метрах; $R_e = 6371.3$ км — радіус Землі.

У якості даних про РНЗ пропонується використовувати дані AIS (Aeronautical Information Service) EUROCONTROL [9] чи дані національних AIP (Aeronautical Information Publication) країн, що знаходяться у межах зон оцінюваної зони [8].

Оцінювання зон доступності методом елементарних часток потребує оцінювання та моделювання сітки елементарних просторових елементів. Геометричні розміри елементарних просторових елементів визначають роздільну здатність оцінювання та пов'язані з точністю результатів, що будуть отримані. У межах просторового елемента доступність РНЗ вважається сталою. 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).

Відповідно до цього трансформуємо координати місцезосташування РНЗ та сітки елементарних просторових елементів до ECEF. На наступному етапі обчислюється кут місця та похила відстань між центром кожної елементарної частинки та місцезосташуванням РНЗ:

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

У якості моделі зони дії РНЗ можуть використовуватись:

- оцінена максимальна дальність дії РНЗ;
- межі гарантованого функціонування РНЗ відповідно до нормативних документів;
- представлення меж зон дії у вигляді циліндричної поверхні з певним радіусом, висотою та обмежувальними кутами.

На низьких висотах у межах будь-якої з моделей виконується оцінювання впливу рельєфу місцевості на модель РНЗ, тобто обмеження, що накладаються на зону "прямої" видимості. У якості даних рельєфу місцевості обрано відкриту модель DTM NASA. Таким чином для оцінювання зони дії застосовується

модель максимальної дальності дії РНЗ у вільному просторі з урахуванням земної поверхні з подальшим обмеженням по лінії прямої видимості шляхом порівняння з рельєфом місцевості. Оскільки у загальному випадку діаграма спрямованості антенної системи РНЗ має кругову форму у горизонтальній площині, тоді оцінювання “видимості” елементарної частинки простору доцільно виконувати у полярній системі координат з порівнюванням по дальності та куту місця. Оцінювання видимих елементів виконується для кожної висоти з набору та для кожного з наявних РНЗ. Після чого виконується порівнювання результатів для різних РНЗ у межах одного елемента з подальшим формуванням матриці кількості доступних РНЗ для кожного елемента повітряного простору. На наступних кроках виконується обладнання елементарних частинок у горизонтальних площинах і вертикальних з метою інтерполяції граничної поверхні, що обмежує певний простір з однаковою кількістю доступних засобів. В залежності від умов візуалізації даних можливе відображення усіх оцінених зон та зон з однаковою кількістю РНЗ. Як додатковий результат дані про ІСАО код РНЗ для кожної елементарної частинки простору доступні у системі.

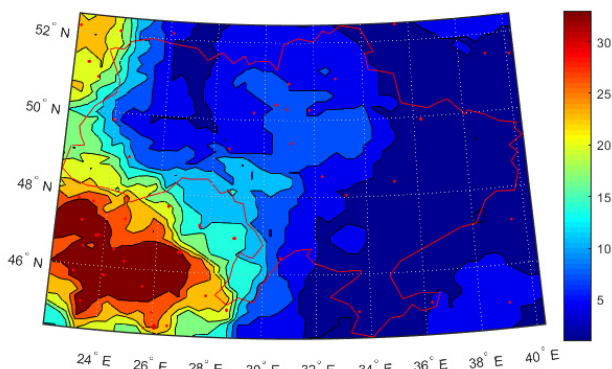


Рис. 6. Загальна кількість доступних для позиціонування РНЗ

4 Результати комп'ютерного моделювання

На рис. 6 наведено результати комп'ютерного моделювання для оцінювання кількості доступних РНЗ у певній точці повітряного простору України з використанням зон гарантованого функціонування РНЗ та врахуванням цифрової карти місцевості. Моделювання виконано для висоти 7600 м, що відповідає ешелону польоту FL250. Оскільки на борту ПК наявним є лише два комплекти обладнання, то важливим є оцінювання максимально-доступної кількості пар, тобто комбінацій РНЗ доступних для виконання завдань навігації у певній точці повітряного простору. Результати оцінювання пар наведено на рис. 7.

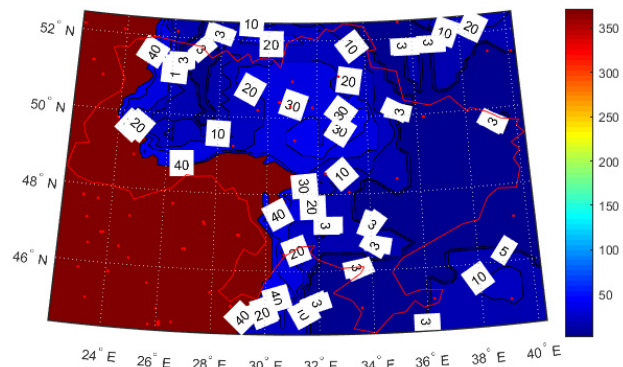


Рис. 7. Кількість доступних для позиціонування пар РНЗ

Висновки

Запропонований метод до оцінювання доступності дозволяє оцінити зону дії кожного РНЗ окремо та виконати поєднання зон доступності РНЗ для оцінювання загальної кількості РНЗ доступних у певному сегменті повітряного простору. Використання спрощеної циліндричної моделі оцінювання зони дії РНЗ дозволяє пришвидшити процес моделювання за рахунок використання простих математичних операцій та дозволяє отримати зону гарантованого функціонування РНЗ. Крім того пропонується враховувати цифрову карту місцевості для обмеження зони “прямої” радіовидимості та ефект рефракції у тропосфері та дифракції від високих елементів рельєфу.

Результати комп'ютерного моделювання доступності РНЗ DME/VOR для повітряного простору України показали високе число доступних РНЗ у центральній частині країни, проте загальна картина гірша у порівнянні з повітряним простором країн заходу. Крім того, слід відмітити вплив нерівності рельєфу місцевості на переважній частині країни незначний, оскільки висота зміни рельєфу не значна у порівнянні з робочою зоною РНЗ у нижній частині повітряного простору.

Перелік посилань

- 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. – р. 3.2.1-3.2.5.
- Certification Specifications for Large Aeroplanes CS-25. – EASA, 2010. – 807 p.
- Авіоніка: навч. посіб. / В.П. Харченко, І.В. Остроумов. – К.: НАУ, 2012. – 281 с. – ISBN 978 –966 –598 –783 –3
- Lilley R.W. DME/DME for Alternate Position, Navigation, and Timing (APNT) / R.W. Lilley, R. Erikson // APNT White Paper. – 2012. – 10 p.

5. Tromboni P. D. An algorithm to rationalize a DME network as a backup for GNSS aircraft navigation / P. D. Tromboni, G. B. Palmerini // *Journal of Air Transport Management*. – Volume 34. – Elsevier, 2014. – P. 6-11
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. AC 90-100A U.S. Terminal and En Route Area Navigation (RNAV) Operations. Advisory Circular. – FAA, March 1, 2007. – 32 p.
8. Aeronautical Information Publication of Ukraine. Published by AIS of Ukraine under the authority conferred by the State Aviation Administration. – 2017. – electronic version, available by link: <http://www.aisukraine.net>.
9. European Aeronautical Information Services Database - EAD. SDO Reporting. – Eurocontrol, Brussels. – 2016. – electronic version, available by link: <https://www.ead.eurocontrol.int/eadcms/eadsite/index.php.html>
10. Fujii M. A new mode of radio wave diffraction via the terrestrial surface plasmon on mountain range / M Fujii // *Radio Science*, Volume 51, Issue 8. – Wiley Online Library, 2016. – p. 1396–1412.
11. Sayantan Das. Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin–Upper Tons Basin, Indian Himalayas / Sayantan Das, Priyank Pravin Patel, Somasis Sengupta. –SpringerPlus, 2016. – 38 p. DOI: 10.1186/s40064-016-3207-0.

References

- [1] Ostroumov I.V. (2014) Nav aids facility for aircraft positioning. *The Sixth World Congress "Aviation in the XXI-st century — Safety in Aviation and Space Technologies"*, Vol. 2. pp. 3.2.1-3.2.5.
- [2] CS-25 (2010) *Certification Specifications for Large Aeroplanes*, EASA, 807 p.
- [3] Kharchenko V. P. and Ostroumov I. V. (2012) *Avionics*, Kyiv, NAU publ., 281p. (in Ukrainian)
- [4] Lilley R. W. and Erikson R. (2012) *DME/DME for Alternate Position, Navigation, and Timing (APNT)*, APNT White Paper, 10 p.
- [5] Tromboni P. D. and Palmerini G. B. (2014) An algorithm to rationalize a DME network as a backup for GNSS aircraft navigation. *Journal of Air Transport Management*. Vol. 34, pp. 6-11.
- [6] Ostroumov I. and Kuzmenko N. (2016) Accuracy estimation of alternative positioning in navigation. *IEEE 4th International Conference Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), October 18-20*, pp. 291-294.
- [7] AC 90-100A (2007) *U.S. Terminal and En Route Area Navigation (RNAV) Operations*. Advisory Circular. FAA, 32p.
- [8] AIP of Ukraine (2017) *Aeronautical Information Publication of Ukraine*. Published by AIS of Ukraine under the authority conferred by the State Aviation Administration.
- [9] AIS (2016) *Aeronautical Information Services*. SDO Reporting — DME. Eurocontrol, Brussels.

[10] Fujii M. A (2016) New mode of radio wave diffraction via the terrestrial surface plasmon on mountain range. *Radio Science*, Vol. 51, Iss. 8, pp. 1396–1412.

[11] Sayantan Das, Priyank Pravin Patel and Somasis Sengupta (2016) *Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin–Upper Tons Basin, Indian Himalayas*, SpringerPlus, 38p.

Оценивание доступности наземных радионавигационных средств

Остроумов И. В.

Представлен метод оценки доступности радионавигационных средств для определенной части воздушного пространства, учитывающий цилиндрическую модель зоны действия наземного радионавигационного средства и цифровую карту рельефа местности для ограничения зоны “прямой” радиовидимости и учета дифракции. Эффект дифракции учитывается только для высоких точек рельефа. Представлены результаты оценки доступности наземных радионавигационных средств VOR и DME для воздушного пространства Украины по данным сборника аэронавигационной информации. Оценено общее количество комбинаций пар навигационных средств и отражено на контурном графике.

Ключевые слова: радионавигационная средство; VOR; DME; доступность; зона действия; воздушное пространство; цифровая карта местности; пара навигационных средств

Availability estimation of navigation aids

Ostroumov I. V.

Ground network of waypoints has been commonly used for different navigation tasks. Detection and positioning of aircraft location line in 3D airspace are the most important of them. Aircraft location determination by signals from ground-based waypoints is a part of alternative positioning algorithms in flight management system. A new method of radio navigation aids availability in particular airspace volume has been represented in paper. It includes cylindrical model of NAVAIDS service volume according to three basic types: Terminal, Low altitude and High Altitude. Proposed method uses digital elevation model of terrain data for detection of radio sight line and availability estimation in 3D space of NAVAIDS. The simple model of diffraction process was considered to increase accuracy of the method. However, diffraction model has been used only for peaks of relief. Represented method has been used for availability areas estimation of VOR and DME waypoints network for Ukrainian airspace. Availability areas of waypoints were highlighted in contour lines according to data in Aeronautical Information Publication. Also, the total number of NAVAIDS combination was estimated and indicated in contour graph for region.

Key words: Navigation aids; VOR; DME; availability; service volume; airspace; digital elevation model; pair of NAVAIDS