

УДК 629.7.052.3.058.43

І. В. ОСТРОУМОВ*Національний авіаційний університет, Україна*

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ДАЛЬНОМІРНОГО ОБЛАДНАННЯ

Сучасні тенденції розвитку систем позиціонування літальних апаратів поступово підвищують роль дальномірного обладнання (DME) у рамках аеронавігаційної системи, що висуває певні вимоги до точності навігаційних вимірювань. У статті проаналізовано підходи, що застосовуються до оцінювання точності вимірювань DME, запропоновано узагальнену модель оцінювання точності, проаналізовано шляхи підвищення точності. Вимірювання відстані DME розглядається в умовах дії адитивної похибки, що характеризується Гаусоподібним розподілом ймовірності з нульовим математичним сподіванням та певним значенням дисперсії. Похибка визначення відстані за DME розглядається як сума похибок, що виникають під час розповсюдження сигналу у просторі та похибки, що вноситься бортовим обладнанням. Результати комп'ютерного моделювання показали, що похибка вимірювання відстані сучасних систем DME менша у порівнянні з вимогами стандартизуючих документів.

Ключові слова: DME, дальність, радіонавігаційний засіб, точність, похибки, повітряний корабель, навігація.

Вступ

Точність визначення місцеположення повітряного корабля (ПК) відіграє важливе значення у безпеці повітряного руху та авіації в цілому. У загальному випадку, задача позиціонування у просторі відноситься до базисних завдань під час навігації ПК. Сучасна авіаційна система функціонує в умовах постійного зростання обсягів авіаперевезень. В умовах значної завантаженості повітряного простору одним з дієвих підходів до збільшення пропускної здатності повітряного простору є зменшення безпечних відстаней між користувачами, що можливо досягти шляхом підвищення точності визначення координат місцеположення. Функціонування систем навігації відбувається під дією спектру різних факторів, дія яких має ймовірнісний характер, що погіршує характеристики точності. Сьогодні задача позиціонування ПК вирішується великою кількістю різноманітних датчиків і систем. Глобальні навігаційні супутникові системи розглядаються у якості основної системи позиціонування та навігації [1], а алгоритми позиціонування за засобами зональної навігації у обчислювальній системі літаководіння використовуються у якості резервних методів позиціонування [2, 3].

Протягом багатьох років далекомірне обладнання DME використовувалось виключно для вимірювання певних відстаней у схемах польотів за

приладами чи для здійснення навігації «від точки до точки» під час польоту за маршрутом. У 2010 році роль далекомірного обладнання була переглянута після затвердження глобальної концепції навігації заснованої на характеристиках (PBN) у повітряному просторі України [4]. Відповідно до PBN [2] передбачається використання пар навігаційних засобів для визначення місцеположення ПК у просторі з метою здійснення навігації за будь-якої бажаною траєкторією [5]. Крім того, до ПК висуваються вимоги до точності визначення власного місцеположення у просторі (RNP/RNAV) [6, 7]. Відповідно до наземної мережі радіомаяків DME теж висуваються нові вимоги для забезпечення необхідної доступності та точності послуг радіомаяків [8-10]. Особливо актуальною проблемою оцінювання точності вимірювання дальності є в умовах впровадження нових більш точних вимог A-RNP та оцінювання перспектив розвитку повітряного простору [4].

Світове наукове товариство постійно досліджує актуальні питання, пов'язані з точністю обладнання DME, що відображається у численних наукових працях. Зокрема, Ш. Ло, Ю. Чен, П. Енге, Б. Петерсона, Р. Еріксона [11, 12] досліджують питання відповідності точності DME концепціям альтернативного позиціонування. Г. Берц та В. Вітан [13] оцінюють точність позиціонування за парами DME/DME. Н. Верма та Р. Гааг [14] проаналізували мережу наземного обладнання DME для забезпе-

чення майбутніх потоків повітряного руху. Е. Кім [15-17] досліджував питання підвищення точності шляхом покрашення форми навігаційних сигналів. Проте, питання порівняння існуючих моделей оцінювання точності DME та дослідження меж їх застосування залишаються відкритими.

Відповідно до наведеного вище, основною метою статті є аналіз існуючих моделей оцінювання точності DME та дослідження меж їх застосування для задачі позиціонування в умовах дії концепції заснованої на характеристиках. Особливо актуальною ця задача є в умовах змін у повітряному просторі України.

Постановка задачі

Бортове обладнання DME призначене для визначення похилої відстані від ПК до наземного радіомаяка. Вимірювання дальності ґрунтується на вимірюванні часу проходження радіосигналу від ПК до наземної частини обладнання і у зворотному напрямку. Система DME складається з бортового та наземного обладнання. Бортове обладнання DME випромінює сигнали запиту на певній частоті, що містять два попарних радіоімпульси гаусоподібної форми. Під час запиту бортове обладнання DME генерує від 5 до 150 пар імпульсів, відстань між якими унікальна.

Приймач наземної станції приймає запитувальні сигнали і через деякий час затримки (в залежності від каналу канал X – 50 мкс; канал Y – 56 мкс) ініціює сигнал відповіді, який випромінюється через антенну систему передавача на іншій частоті (завичай на частоті вище чи нижче на 63 МГц) [18, 19]. Після початку запиту бортове обладнання DME постійно починає приймати сигнали відповідей, знаходячи свою відповідь за унікальним часовим інтервалом між парними імпульсами. Співпадіння часу між попарними імпульсами ініціює вимірювання часу між сигналом запиту та отриманням відповіді.

Обчислювач DME оцінює час, за який радіосигнал повернувся назад з урахуванням часу затримки у наземній частині обладнання.

Далекомір DME працює у діапазоні частот 960 – 1215 МГц [19]. Дальність його дії залежить від потужності відповідача. Типова дальність на трасах становить 365 км, у районах аеропортів – 95 км.

Наземне обладнання DME зазвичай розміщують разом з радіомаяками VOR. Таке розміщення дозволяє оцінити на борту ПК їх місцеположення відносно радіомаяка. Крім того, налаштування на роботу з наземною станцією DME відбувається одночасно з налаштуванням обладнання VOR.

У задачах позиціонування за парами наземних радіомаяків DME використовується горизонтальна відстань між ПК та DME, що розраховується з прямокутного трикутника похилої відстані DME та барометричної висоти польоту у системі координат, пов'язаної з місцеположенням ПК. Відповідно, похибка барометричного висотоміра має враховуватись при позиціонуванні. Чим ближче ПК розмішений до DME, тим вплив барометричної похибки є вагоміше.

Модель вимірювання дальності DME

Вимірювання відстані DME розглядається в умовах дії адитивної похибки вимірювання (ϵ):

$$D_v = D_i + \epsilon,$$

де D_v – виміряне значення відстані; D_i – істина відстань.

Похибка характеризується Гаусоподібним розподілом ймовірності з нульовим математичним сподіванням та певним значенням дисперсії (σ^2_{DME}):

$$E \sim N(0, \sigma^2_{DME}).$$

Значення середньоквадратичного відхилення σ_{DME} використовується у науковій літературі, у якості основної характеристики точності вимірювання DME. Оцінювання точності ґрунтується на застосуванні аналітичного чи статистичного методів оцінювання значень σ_{DME} .

У стандартизуючих документах похибка визначення відстані за DME розглядається як сума похибок, що виникають під час розповсюдження сигналу у просторі (signal in space) σ_{sis} та похибки, що вноситься бортовим обладнанням (airborne interagetor) σ_{air} [6, 19, 20]:

$$\sigma^2_{DME} = \sigma^2_{sis} + \sigma^2_{air}. \quad (1)$$

Максимально-допустиме значення σ_{sis} визначено на рівні 92,6 м (0,05 м. милі) [6]. У той час максимально-допустиме значення σ_{air} відповідно до RTCA DO-189 обмежується величиною у 157,42 м (0,085 м. милі) [19], а відповідно до AC90-100A [20] та ICAO DOC-9613 [6] може бути обчислене наступним чином:

$$\sigma_{air} = \max \{ 157,42 \text{ м (чи } 0,085 \text{ м. милі)}; 0,125\% R \},$$

де R – виміряна відстань.

Відповідно до нормативної документації, похибка розповсюдження сигналу у просторі σ_{sis} включає в себе всі складові похибок, що діють на навіга-

ційний сигнал поза бортовим обладнанням та включають похибки, що вносяться наземним обладнанням DME. У загальному випадку, σ_{sis} включає три основні складові:

а) похибку фіксації приходу запитувального сигналу до наземної частини обладнання ($\sigma_{фікс}$). Дія цієї похибки зумовлена спотворенням навігаційного сигналу у просторі та методом детектування моменту приходу у DME;

б) похибку відліку часової затримки навігаційного сигналу у наземній частині обладнання DME ($\sigma_{затр}$);

с) похибку, пов'язану з розповсюдженням радіохвиль у просторі ($\sigma_{роз}$), що включає інтерференцію радіохвиль ($\sigma_{інтерф}$), дію тропосферних затримок ($\sigma_{троп}$) та вплив перевідбивання від природніх та штучних об'єктів простору ($\sigma_{multipath}$).

У загальному випадку маємо:

$$\sigma_{sis}^2 = \sigma_{фікс}^2 + \sigma_{затр}^2 + \sigma_{роз}^2$$

$$\sigma_{sis}^2 = \sigma_{фікс}^2 + \sigma_{затр}^2 + (\sigma_{інтерф}^2 + \sigma_{троп}^2 + \sigma_{multipath}^2)$$

Складові похибок визначення дальності великою мірою залежать від технічних засобів, що застосовуються як на борту ПК так і у наземній частині DME. Сучасна наземна мережа навігаційних засобів представлена значним різноманіттям існуючих систем. Тому, універсального точного значення для наземної складової похибки отримати неможливо. Значення σ_{DME} буде різним ще й тому, що поряд з сучасними DME працюють їх застарілі моделі. Часовий діапазон обладнання може сягати 20 років. Відповідно, технології, що задіяні у DME, різняться значною мірою. Проте, характеристики точності наземного обладнання не можуть виходити за межі, встановлені відповідними нормативними документами.

Основними складовими похибки, що вноситься бортовим обладнанням σ_{air} , є:

а) похибка формування запитувального сигналу ($\sigma_{фзап}$). Форма та характеристики запитувального навігаційного сигналу DME прямо впливають на дію перевідбивань хвиль від штучних споруд та на час детектування у наземній частині DME;

б) похибка вимірювання часу проходження сигналу ($\sigma_{час}$). Оскільки бортове обладнання має вимірювати відстань за проміжком часу між запитом та отриманням відповіді.

Загалом, для бортового обладнання матимемо:

$$\sigma_{air}^2 = \sigma_{фзап}^2 + \sigma_{час}^2$$

Широке різноманіття обладнання авіоніки унеможливує оцінювання одного універсального значення σ_{air} , що було універсальним для будь-якої

авіаційної системи. Кожному типу бортового обладнання DME властиві свої значення цих точнісних характеристик. На відміну від наземної частини DME, бортові системи замінюються вкрай рідко. У більшості випадків обладнання змінюють у випадку відмови чи значних відхилень від заявлених характеристик, що трапляється вкрай рідко. Тому, бортове обладнання DME експлуатується впродовж усього життєвого циклу ПК і вкрай рідко модернізується. Одночасне використання обладнання різного технологічного рівня ускладнює оцінювання точнісних характеристик навігації за DME/DME. Проведення розрахунків можливе лише обмежуючись максимально допустимими значеннями точності, визначеними у нормативних документах.

Відповідно до технічної документації [21], максимальна точність визначення дальності типової наземної станції DME складає:

- для відстаней від 0 до 120км (65 м.миль):

$$\sigma_{DME} = 222 \text{ м (чи 0,12 м.мили)} + 0,05\% R; \quad (2)$$

- для відстаней більших за 120км (65 м.миль):

$$\sigma_{DME} = 314 \text{ м (0,17 м.мили)} + 0,05\% R. \quad (3)$$

У якості максимальних значень похибок визначення відстаней DME можуть застосовуватись різні значення з документів RTCA DO-189, AC90-100A чи технічні характеристики встановленого обладнання. На рис. 1. представлені результати моделювання меж похибок з урахуванням впливу відстані за моделлю (1) та існуючого обладнання за (2) та (3), що вказують на можливість застосування у обчисленнях більш точних результатів на основі даних обладнання.

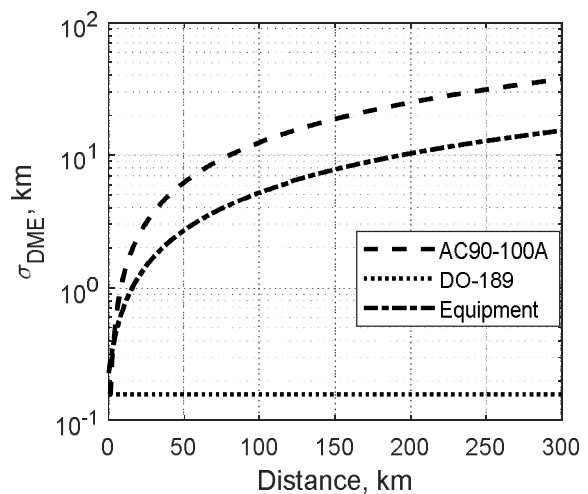


Рис. 1. Результати комп'ютерного моделювання меж похибок з урахуванням впливу відстані

Результати дослідження перспективних систем для APNT виконані у [11], для вивчення характеристик існуючої мережі наземних станцій DME, підтверджують факт більшої точності у визначенні відстані ніж у [6, 19, 20]. Дослідження засновувалося на зборі даних вимірювань DME та порівнянням з результатами точних вимірювань за GPS. Обсяг навчальної вибірки складав більше 2 млн вимірів з точністю позиціонування за GPS в 1,5 м (95%). У дослідженні були задіяні дані з об'єктів 125 наземних станцій DME у США. Результати [11] вказують, що у 95,5% наземних станцій значення σ_{DME} було менше за 92 м.

Результати оцінки складових похибки визначення відстані у DME, що притаманні сучасним системам мають наступні значення [11]:

- похибка розповсюдження сигналу у просторі – 80 м;
- похибка, пов'язана з неточним генеруванням сигналу відповіді у наземному радіомаяку –10 м;
- похибки затримки сигналу у наземних станцій – 30м;
- похибка визначення часу у бортовому обладнанні –3м;
- похибка генерування сигналу запиту –20 м.

Математична модель навігаційного сигналу DME

Наукові дослідження [15, 17] показують про наявність можливості підвищення точності визначення відстані за рахунок впровадження нових форм навігаційних сигналів, що дозволяє знизити похибку фіксації приходу запитального сигналу до наземної частини обладнання DME.

У якості навігаційного сигналу, обладнання DME використовує пару імпульсів. Для системи DME застосовуються імпульси Гаусоподібної форми, математична модель їх ідеальної форми може бути наступною:

$$U = \exp\left(\frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

де t – час, μ – час пікового значення імпульсу, σ – середньо квадратичне відхилення імпульсу.

Основні характеристики навігаційного імпульсу DME визначені у нормативних вимогах до бортового обладнання. Основними з них є: час росту та спаду – 2,5 ($\pm 0,5$) мкс та тривалість – 3,5 ($\pm 0,5$) мкс [19]. У навігаційному сигналі DME використовуються два імпульси, відстань між якими 12 мкс (канал X) чи 36 мкс (канал Y), що визначається на рівні половин між амплітудами імпульсів. На рис. 2 наве-

дено приклад гаусівського імпульсу за нормалізованою амплітудою з відстанню між імпульсами, характерною для каналу X.

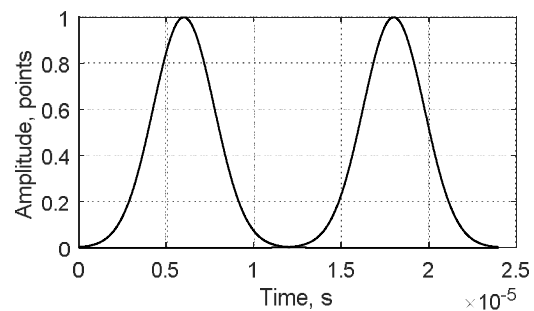


Рис. 2. Приклад подвійного імпульсу DME

На рис.3 наведено приклад навігаційного сигналу ідеальної форми запиту DME BAX на каналі 114 X (що відповідає частоті 1138 МГц).

Радіосигналу, що використовує Гаусоподібну форму імпульсу, властива вузька спектральна щільність, що може передаватись з потужністю до 1 кВт [15]. З іншого боку, наприклад у DME/P, що використовується у якості складового елементу мікрохвильової системи посадки, використовує форму радіоімпульсу \cos/\cos^2 імпульс. Імпульсу \cos/\cos^2 властива набагато більша швидкість наростання, ніж для форми імпульсу Гауса, що забезпечує набагато більшу точність вимірювань. Однак така форма імпульсу підвищує спектральну щільність, що обмежує потужність передавача до 100 Вт для попередження інтерференції з сусідніми каналами [15]. Відповідно, зона покриття DME/P набагато менша ніж у звичайного DME [19].

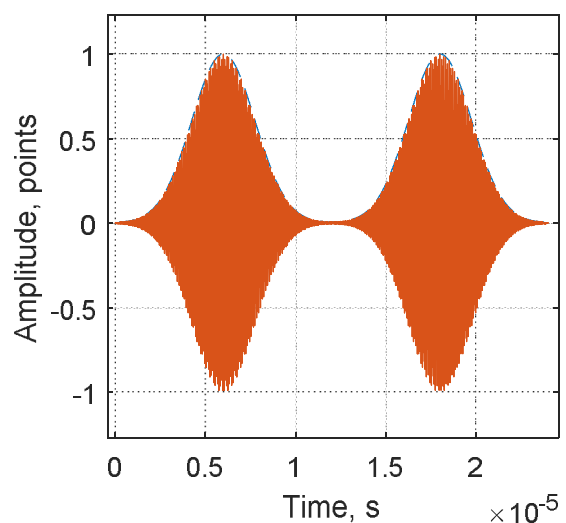


Рис. 3. Навігаційний сигнал запиту DME BAX

Одним з шляхів підвищення точності DME є використання альтернативних форм імпульсів, що

відповідатимуть спектральним вимогам та забезпечуватимуть функціонування існуючого бортового обладнання DME. Сучасні дослідження [15] обґрунтовують застосування гладкого ввігнутого шестикутного імпульсу (Smoothed Concave Hexagonal Pulse – SCP), у якості форми сигналів DME, у порівнянні з іншими формами, що не складно отримати. Зокрема, розглядалися асиметричний Гаусоподібний, трикутний та гладкий трапецеїдальний імпульси [15]. Впровадження SCP імпульсів у наземному та бортовому обладнанні DME дозволить значно підвищити точність визначення відстані. У більшості сучасного бортового обладнання форма імпульсів може бути змінена шляхом зміни програмного забезпечення. Проте, певне обладнання потребуватиме заміни. Форма імпульсів у наземному обладнанні DME у сучасних цифрових системах теж може бути змінена шляхом програмного керування і, у більшості випадків, не потребуватиме зміни у обладнанні. Окрім того, наземні станції DME з SCP формою імпульсів можуть взаємодіяти з наявним бортовим обладнанням. У цьому випадку, підвищення точності визначення дальності буде спостерігатися тільки на лінії зв'язку земля-літак.

Крім того, певні наукові дослідження пропонують різні методи підвищення точності DME (зокрема зміни формату цифрових сигналів), що потребують одночасної заміни як наземного так і бортового обладнання, що є неможливим для практичної реалізації у глобальному масштабі.

Висновки

Результати аналізу нормативної документації стосовно точності вимірювань дальності обладнанням DME вказують на різні підходи до обмеження максимальних значень похибок. Результати порівняння значень точності сучасного обладнання з нормативними документами вказують на можливість отримання більш точних значень, ніж це визначено у документах. Зокрема, це підтверджується комп'ютерним моделюванням. Розглянуто детальну модель похибок, що враховує поширення радіохвиль у просторі та похибок, що вносяться бортовим обладнанням, проаналізовані їх основні складові. Розглянуто основні шляхи підвищення точності, зокрема впровадження гладкого ввігнутого шестикутного імпульсу, у якості форми навігаційних сигналів DME, що сприятимуть до значного зниження складових похибок, пов'язаних з детектуванням сигналу на вході приймача. У загальному випадку, складові похибок вимірювання дальності оцінюються статистично, виходячи з результатів тестових польотів. Дослідження складових похибок, що вносяться бортовим обладнанням ПК ускладнюються

великим різноманіттям систем, що експлуатуються одночасно.

Література

1. Doc 9849. *Global Navigation Satellite System (GNSS). Manual [Text]*. – ICAO, 2012. – 68 p.
2. Ostroumov, I. V. *Nav aids facility for aircraft positioning [Text] / I. V. Ostroumov // Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies : proceedings of The Sixth World Congress*. – K, 2014. – Vol. 2. – P. 3.2.1–3.2.5.
3. *Design, implementation and flight testing of advanced RNP to SBAS LPV approaches in Germany [Text] / T. Dautermann, V. Mollwitz, H. Többen, M. Altenscheidt, S. Bürgers, O. Bleeker, S. Bock-Janning // Aerospace Science and Technology*. – 2015. – Vol. 47. – P. 280–290.
4. *Проект розвитку навігаційної інфраструктури Украероруху до 2015 року для забезпечення навігації, заснованої на характеристиках [Текст]*. – Украерорух, 2017. – 162 с.
5. Helfrick, A. *The centennial of avionics: Our 100-year trek to performance-based navigation [Text] / A. Helfrick // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. – 2015. – Vol. 30, № 9. – P. 36–45.
6. Doc 9613. *Performance-based Navigation (PBN). Manual [Text]*. – ICAO, 2008. – 304 p.
7. Berz, G. *Guideline for P-RNAV Infrastructure Assessment. Manual [Text] / G. Berz. – EUROCONTROL, 2008. – 35 p.*
8. Остроумов, І. В. *Оцінювання точності DME/DME позиціонування для повітряного простору України [Текст] / І. В. Остроумов // Проблеми інформатизації та управління : Збірник наукових праць*. – 2013. – Т. 43, № 3. – С. 61–67.
9. Остроумов, І. В. *Використання радіомаяків DME для визначення місцеположення у повітряному просторі України [Текст] / І. В. Остроумов, Т. Б. Лопатко // Вісник інженерної академії України*. – 2013. – № 4. – С. 300–305.
10. Ostroumov, I. V. *Analysis of DME/DME positioning facility for Ukrainian airspace [Text] / I. V. Ostroumov // Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies : proceedings of The Sevens World Congress*. – K, 2016. – Vol. 2. – P. 3.6.1–3.6.4.
11. *Distance measuring equipment accuracy performance today and for future alternative position navigation and timing (APNT) [Text] / S. Lo, Y. H. Chen, P. Enge, B. Peterson, R. Erikson, R. Lilley // Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2013)*. – Nashville, 2013. – P. 711–721.
12. *Alternative Positioning, Navigation & Timing (PNT) Study [Text] / L. Eldredge, P. Enge, M. Harrison, R. Kenagy, S. Lo, R. Loh, R. Lilly, M. Narins, R. Niles // International Civil Aviation Organisation Navigation Systems Panel (NSP), Working Group Meetings*. – Montreal, 2010. – 19 p.
13. Vitan, V. *Assessment of current DME performance and the potential to support a future APNT solution [Text] /*

V. Vitan, G. Berz, N. Solomina // *Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. – IEEE/AIAA, 2015. – P. 2A2-1–2A2-17.

14. Verma, N. DME-DME Network and Future Air Traffic Capacity [Text] / N. Verma, M. R. Hague // *Journal of Modern Science and Technology*. – 2013. – № 1. – P. 45–51.

15. Kim, E. Alternative DME/N pulse shape for APNT [Text] / E. Kim // *Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. – IEEE/AIAA, 2013. – P. 4D2-1–4D2-10.

16. Kim, E. Investigation of APNT optimized DME/DME network using current state-of-the-art DMEs: Ground station network, accuracy, and capacity [Text] / E. Kim // *Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*. – IEEE/ION, 2012. – P. 146–157.

17. Kim, E. Benefit analysis of a GA-based DME/N pulse on PBN [Text] / E. Kim // *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. – IEEE, 2017. – P. 4B1-1–4B1-7.

18. FAA-E-2996. Performance specification distance measuring equipment (DME). Manual [Text]. – FAA, 2008. – 80 p.

19. DO-189. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Distance Measuring Equipment (DME) Operating Within the Radio Frequency Range of 960-1215 Megahertz. Manual [Text]. – RTCA, 1985. – 308 p.

20. AC 90-100A, U.S Terminal and En Route Area Navigation (RNAV) Operations. Manual [Text]. – FAA, 2007. – 273 p.

21. DME ground beacon. Distance measuring equipment. DME 415/435. Technical manual. [Text]. – Thales, 2004. – 486 p.

References

1. Doc 9849. *Global Navigation Satellite System (GNSS)*, Manual, ICAO, 2012. 68 p.

2. Ostroumov, I. V. Nav aids facility for aircraft positioning. *Proc. 6th World Congress “Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies”*. Kyiv, 2014, vol. 2, pp. 3.2.1-3.2.5.

3. Dautermann, T., Mollwitz, V., Többen, H. H., Altscheidt, M., Bürgers, S., Blecker, O., Bock-Janning, S. Design, implementation and flight testing of advanced RNP to SBAS LPV approaches in Germany. *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 47, pp. 280-290.

4. Proekt rozvytku navihatsiynoyi infrastruktury Ukraerorukhu do 2015 roku dlya zabezpechennya navihatsiyi, zasnovanoyi na kharakterystykakh [UkSATSE navigation infrastructure development road map for 2015 to provide navigation based on characteristics], UkSATSE, 2017. 162 p.

5. Helfrick, A. The centennial of avionics: Our 100-year trek to performance-based navigation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2015, vol. 30, no. 9, pp. 36-45.

6. Doc 9613. Performance-based Navigation (PBN) Manual, ICAO, 2008. 304 p.

7. Berz G. *Guideline for P-RNAV Infrastructure Assessment*, EUROCONTROL, 2008. 35 p.

8. Ostroumov, I. V. Otsinyuvannya tochnosti DME/DME pozysionuvannya dlya povitryanoho prostoru Ukrainy [Accuracy of DME/DME positioning for Ukrainian airspace]. *Problemy informatyzatsiyi ta upravlinnya*, 2013, vol. 43, no. 3, pp. 61-67.

9. Ostroumov, I. V., Lopatco, T. B. Vykorystannya radiomayakiv DME dlya vyznachennya mistsepolozhennya u povitryanomu prostori Ukrainy [DME usage for positioning in Ukrainian airspace]. *Visnyk inzhenernoyi akademiyi Ukrainy*, 2013, vol. 4, pp. 300-305.

10. Ostroumov, I. V. Analysis of DME/DME positioning facility for Ukrainian airspace. *Proc. 7th World Congress “Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies”*, 2016, vol. 2, pp. 3.6.1-3.6.4.

11. Lo, S., Chen, Y. H., Enge, P., Peterson, B., Erikson, R., Lilley, R. Distance measuring equipment accuracy performance today and for future alternative position navigation and timing (APNT). *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2013)*, Nashville, TN, USA, 2013, pp. 711-721.

12. Eldredge, L., Enge, P., Harrison, M., Kenagy, R., Lo, S., Loh, R., Lilly, R., Narins, M., Niles, R. Alternative Positioning, Navigation & Timing (PNT) Study. *International Civil Aviation Organisation Navigation Systems Panel (NSP)*, Working Group Meetings, Montreal, Canada, 2010. 19 p.

13. Vitan, V., Berz, G., Solomina, N. Assessment of current DME performance and the potential to support a future APNT solution. *Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, IEEE/AIAA, 2015, pp. 2A2-1-2A2-17.

14. Verma, N., Hague, M. R. DME-DME Network and Future Air Traffic Capacity. *Journal of Modern Science and Technology*, 2013, vol. 1, pp. 45-51.

15. Kim, E. Alternative DME/N pulse shape for APNT. *Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, IEEE/AIAA, 2013, pp. 4D2-1-4D2-10.

16. Kim, E. Investigation of APNT optimized DME/DME network using current state-of-the-art DMEs: Ground station network, accuracy, and capacity. *Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*, IEEE/ION, 2012, pp. 146-157.

17. Kim, E. Benefit analysis of a GA-based DME/N pulse on PBN. *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, 2017, pp. 4B1-1-4B1-7.

18. FAA-E-2996 *Performance specification distance measuring equipment (DME)*, FAA, 2008. 80 p.

19. DO-189. *Minimum Operational Performance Standards for Airborne Distance Measuring Equipment (DME) Operating Within the Radio Frequency Range of 960-1215 Megahertz*. RTCA, 1985. 308p.

20. AC 90-100A, *U.S Terminal and En Route Area Navigation (RNAV) Operations*. FAA, 2007. 273p.

21. DME ground beacon. *Distance measuring equipment. DME 415/435. Technical manual*, Thales, 2004. 486 p.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДАЛЬНОМЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И. В. Остроумов

Современные тенденции развития систем позиционирования летательных аппаратов постепенно повышают роль дальномерного оборудования (DME) в современной аэронавигационной системе, выдвигая определенные требования к точности навигационных измерений. В статье проанализированы подходы, применяемые к оценке точности измерений DME, предложена обобщённая модель оценки точности, проанализированы пути повышения точности измерений DME. Измерение расстояния DME рассматривается в условиях действия аддитивной ошибки, которая характеризуется Гаусоподобным распределением вероятности с нулевым математическим ожиданием и определённым значением дисперсии. Ошибка определения расстояния по DME рассматривается как сумма ошибок, которые связаны с распространением сигнала в пространстве и ошибки, которая вносится бортовым оборудованием. Результаты компьютерного моделирования показали, что ошибка измерения расстояния современных систем DME меньше в сравнении с требованиями стандартизирующих документов.

Ключевые слова: DME, дальность, радионавигационное средство, точность, ошибки, воздушный корабль, навигация.

ESTIMATION OF DISTANCE MEASUREMENT EQUIPMENT ACCURACY

I. V. Ostroumov

Determination of the location of the aircraft is one of the important tasks of navigation. The accuracy of aircraft positioning in the airspace is directly related to the safety of aviation. Modern trends in the development of aircraft positioning systems gradually increase the role of DME in the modern air navigation system, which sets certain requirements for the accuracy of navigation measurements.

Measurement of DME distance is considered under the influence of additive measurement error characterized by Gaussian probability distribution with zero mathematical expectation and a certain value of dispersion. In accordance with regulative documents, DME error is considered as the sum of errors such as an error connected with signal propagation in space and airborne interagetor error. However, different regulative documents set up different requirements for the maximum permissible dispersion value. In particular, FAA AC90-100A and ICAO DOC-9613, consider the error of on-board equipment as a function of distance between an interrogator and DME, while the RTCA DO-189 limits it to a certain value. In the general case, the components of error of signal propagation in space are the following: an error of signal arrival detection at the ground part of equipment; an error of delay of navigation signal at the ground part of DME; an error associated with the propagation of radio waves in the airspace. Computer simulation shows that error of modern DME systems is much more smaller then associated requirements of regulative documents.

An article analyzes the approaches used to estimate accuracy of DME measurements, proposes a generalized model for estimating accuracy, and analyzes the ways to improve accuracy of DME measurements.

One of the effective means of DME accuracy increasing is the introduction of new forms of interrogating signal that is completely compatible with existing equipment, which, in contrast to the change of navigation signal, does not require the change of ground infrastructure.

Keywords: DME, distance, navigation aid, precision, error, aircraft, navigation.

Остроумов Иван Вікторович – канд. техн. наук, доцент кафедри Аеронавігаційних систем, Національний Авіаційний Університет, Київ, Україна, e-mail: ostroumovv@ukr.net.

Ostroumov Ivan Victorovich – PhD, Assistant Professor of Dept. of Air Navigation Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: ostroumovv@ukr.net.