

# Навігація

УДК 629.735.05(045)

doi: 10.26906/SUNZ.2018.3.003

І. В. Остроумов

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## ПОЄДНАННЯ КООРДИНАТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ЙМОВІРНІСНИМ ПІДХОДОМ

Розглянуто основні датчики координатної інформації літака цивільної авіації, що застосовуються для вирішення задачі позиціонування у просторі, а саме супутникову та інерціальну системи; алгоритми зональної навігації у обчислювальній системі літаководіння, що функціонують за сигналами наземних далекомірних (DME) та кутомірних (VOR) радіомаяків. Проаналізовано математичні підходи до об'єднання даних на різних рівнях обробки, зокрема розглянуто поєднання координатної інформації за методом максимальної достовірності. Вперше представлено структурну схему поєднання координат літака, отриманих за результатами попарного та множинного принципів позиціонування на основі даних наземних радіомаяків. Досліджено використання ймовірнісного підходу для поєднання координатної інформації літака у випадку, коли розподіли похибок вимірювання мають Гаусівський вигляд.

**Ключові слова:** координати, місцеположення, об'єднання інформації, Байєс, ймовірність, точність, повітряний корабель.

### Вступ

Визначення точного місцеположення повітряного корабля (ПК) є однією з найважливіших задач цивільної авіації. Зростаючі обсяги авіаперевезень вимагають постійного перегляду норм ешелонування для задоволення росту потреб авіаційного транспорту. Норми ешелонування ПК визначають максимально допустимі межі розділення ПК у просторі у вертикальній площині, боковому та повздовжньому відхиленнях. Єдиним можливим шляхом вирішення питання перевантаженості повітряного простору є збільшення пропускної здатності певної частини повітряного простору за рахунок зменшення безпечних відстаней між ПК. На практиці це реалізується шляхом введення більш точних вимог до визначення місцеположення ПК у просторі (RNP – Required Navigation Performance) [1]. Введення більш точних вимог до позиціонування ПК можливе лише за умов наявності відповідних систем здатних задовільнити їх. Функціонування систем позиціонування ПК цивільної авіації забезпечується полем аеронавігаційних сигналів, що створюється у просторі різними системами.

Сучасний літак цивільної авіації обладнаний цілою групою різноманітних датчиків, що забезпечують визначення координат місцеположення ПК у просторі. До основних систем відносяться: глобальна супутникова система позиціонування (GNSS – Global Navigation Satellite system) [2], інерціальна система (ІНС), алгоритми зональної навігації за наземними радіомаяками (далекомірними (DME – Distance Measure Equipment), всенаправлений кутовий (VOR – VHF Omni Range), ненаправлений (NDB – Non Directional Beacon) [3]. Кожна з систем визначається певними точнісними характеристиками та доступністю їх послуг у просторі. Відповідно, з точки зору проблеми позиціонування, ПК можна розглядати як мульти-датчикову систему. Оскільки кожний датчик застосовує різний метод визначення координат, то отриманим результатам позиціону-

вання будуть властиві різні ймовірнісні розподіли похибок. Питання поєднання координатної інформації є актуальними та важливими при прийнятті рішення про місцеположення ПК з метою здійснення навігації у просторі відповідно до вимог безпеки повітряного руху.

Питання поєднання інформації датчиків розглядались у працях багатьох вчених, зокрема Federico Castanedo [4] виконав розгорнутий аналіз існуючих методів поєднання координатної інформації; Martin E. Liggins, David L. Hall, James Llinas [5] та Guo D., Zhong M. [6] дослідили об'єднання інформації у мульти-датчикових системах; Jiang L., Yan L., Xia Y., Guo Q., Fu M. [7, 8] розглядали питання поєднання вимірювань датчиків під дією корельованих завад; Shimin Feng [9] та Panicker M. [10] досліджували питання поєднання координатної інформації при позиціонуванні роботів у просторі. Проте, питання поєднання координатної інформації на борту ПК не досліджені повністю в умовах сучасного різноманіття систем позиціонування та зростаючої ролі засобів зональної навігації.

Основною метою статті є дослідження можливостей об'єднання координатної інформації стосовно місцеположення ПК у просторі з метою забезпечення вимог неперервності навігаційної інформації, у випадку погіршення точнісних характеристик певних систем чи їх повної недоступності. Для досягнення поставленої мети пропонується проаналізувати датчики координатної інформації, алгоритми поєднання даних позиціонування та застосувати ймовірнісний підхід для поєднання даних про місцеположення ПК.

### Аналіз джерел координатної інформації

Численні переваги GNSS зробили її основним джерелом координатної інформації, що визначають місцеположення ПК у просторі. Висока точність визначення координат, у порівнянні з іншими системами, доступність у глобальному масштабі та безо-

платний доступ до основних послуг GNSS затвердили обов'язковість її використання для цілей навігації ПК у численних міжнародних документах [2]. На сьогоднішній день GNSS представлені наступним супутниковими системами: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BeiDou, що функціонують разом з їх функціональними доповненнями GBAS (Ground Based Augmentation System) та SBAS (Satellite Based Augmentation System) (EGNOS, WAAS, MSAS) [11]. Проте, сьогодні послуги GNSS стикаються з проблемами електромагнітної сумісності з іншим електронним обладнанням та незумисного «глушіння» сигналів [12].

У такому випадку алгоритми обчислювальної системи літаководіння задіють інші джерела координатної інформації наприклад ІНС. ІНС ґрунтуються на використанні властивостей тіла залишатися в стані спокою чи рівномірного прямолінійного руху при відсутності зовнішніх впливів та протидіяти зміні своєї швидкості при прикладенні дії зовнішніх сил [11]. ІНС використовують два типи датчиків гіроскопи та акселерометри, що вимірюють швидкості за силами інерції, прикладених до певної інерційної маси всередині датчика. Гіроскопічні датчики оцінюють кути орієнтації ПК у просторі шляхом вимірювання кутових швидкостей. Акселерометри вимірюють складові прискорення чи швидкості за осями координат. За відомими координатами попереднього місцеположення ПК у просторі, зміною кутової орієнтації та складовими швидкості безплатформні ІНС оцінюють теперішнє місцеположення ПК. Необхідність використання попередньої позиції та інформації від датчиків зумовлюють поступове накопичення похибки, що обмежує час використання ІНС. Відомі різні схеми інтеграції приймачів GNSS та ІНС з метою підвищення доступності та неперервності інформації.

Іншими джерелами координатної інформації на борту ПК є застосування методів зональної навігації у обчислювальній системі літаководіння (FMS – Flight Management System). Методи зональної навігації застосовують навігаційні сигнали наземних радіомаяків для позиціонування у горизонтальній площині. Визначення координат за наземними радіомаяками ґрунтується на одночасному використанні двох комплектів бортового обладнання (DME, VOR чи автоматичного радіо компаса (АРК)) для визначення похилої дальності та кутової інформації двох радіомаяків з подальшим використанням далекомірного, кутомірного чи кутомірно-далекомірного методу позиціонування [13-15]. Крім того, відомі методи позиціонування за групою радіонавігаційних засобів, що використовують певні математичні методи прогнозування інформації датчиків для розширення вхідної інформації з метою підвищення точності за рахунок покращення геометрії місцерозташування [16]. Точність позиціонування за парними радіомаяками DME/DME, VOR/DME, VOR/VOR, АРК/АРК залежить від багатьох факторів зокрема від геометрії розташування у просторі та відстаней, проте, у загальному випадку є на порядок нижчою ніж GNSS.

## Модель поєднання координатної інформації

Забезпечення оптимальних характеристик точності та доступності позиціонування ПК для цілей навігації досягається за рахунок поєднання даних. Поєднання даних дозволяє комбінувати вимірювання від різних датчиків з метою підвищення точності та досягнення специфічних характеристик суміші, що не можуть бути отримані від одного датчика.

Вимірювання одного параметра типовими датчиками забезпечить результат з певною варіаційною компонентою. У випадку застосування типових датчиків для вимірювання одного параметра отримані значення будуть різнитися внаслідок дії похибок вимірювання, що зазвичай мають Гаусоподібний розподіл ймовірностей. Поєднання даних у такому випадку можливе шляхом пошуку середнього значення.

Поєднання координатної інформації є більш складним процесом, оскільки однакові параметри вимірюються за допомогою принципово різних датчиків з різними розподілами похибок.

У загальному випадку, поєднання інформації у цифрових системах можливе на різних етапах обробки даних:

- низький рівень поєднання інформації оперує безпосередньо з результатами вимірювань певних датчиків (наприклад дальності у DME чи кутовою інформацією у VOR) з метою отримання більш точних результатів;

- середній рівень поєднання інформації відбувається на рівні характеристик чи певних особливостей вимірюваного параметру з метою отримання інших похідних характеристик, що необхідні для вирішення певних завдань;

- високий рівень поєднання інформації забезпечує прийняття рішення на основі чисельного представлення джерел інформації та поєднання їх з метою отримання більш точного рішення.

Задача поєднання координатної інформації вирішується програмно у внутрішній пам'яті FMS. Запропонована модель поєднання координатної інформації наведена на рис. 1. У якості вхідних даних використовується координатна інформація від GNSS та ІНС, дані вимірювань DME, VOR та АРК.

Результати вимірювань датчиків використовуються відповідними методами позиціонування. Для позиціонування за сукупністю навігаційних сигналів датчики розглядаються як окремі системи, що містять внутрішню базу даних для накопичення результатів попередніх вимірювань та засоби для прогнозування [16]. Об'єднання навігаційних даних відбувається на різних рівнях. Зокрема, позиціонування за даними суміші від кутомірної та далекомірної систем VOR/DME може розглядатися як метод поєднання навігаційних даних на нижньому рівні. Кожний датчик розглядаються з властивою йому сукупністю похибок вимірювання. Кожному методу визначення координат місцеположення ПК притаманні певні похибки, оцінювання значень яких відбувається одночасно з позиціонуванням.

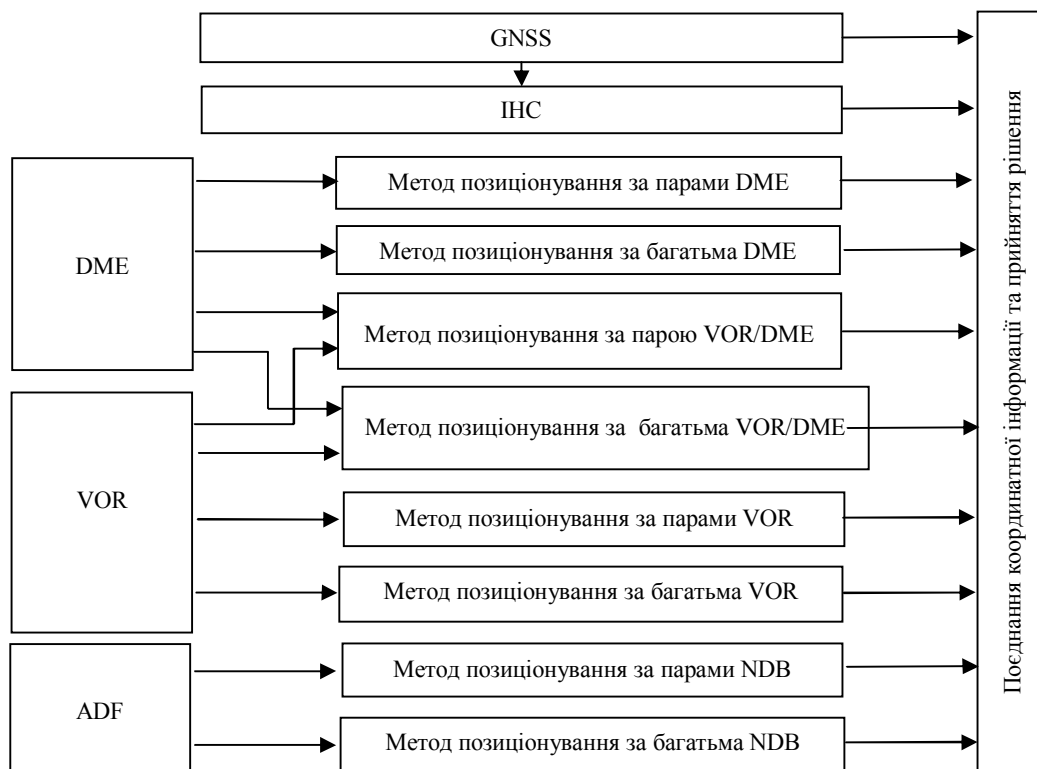


Рис. 1. Модель поєднання координатної інформації

Отримані позиції ПК разом з величинами, що характеризують похибки використовуються при об'єднанні координатної інформації на високому рівні поєднання даних.

Поєднання інформації та прийняття рішення на високому рівні зазвичай забезпечуються ймовірнісними методами, оскільки дані на цьому рівні характеризуються різними ймовірнісними законами розподілу випадкових величин. Ймовірнісні методи найкращим чином враховують невизначеність кожного з методів позиціонування за допомогою математичного апарату теорії ймовірності. В динамічних системах стан системи визначається виходячи з результатів вимірювань певних параметрів, що характеризують її стан. Результат визначення стану завжди пов'язаний з певною невизначеністю, оскільки вимірним параметрам властива дія похибок, що здебільшого має різні характеристики розподілу випадкової величини та різну частоту вимірювань.

Об'єднання координатної інформації за ймовірнісним підходом гуртується на формулі Байєса, що вказує на те, що апостеріорна щільність розподілу випадкової величини  $x$  ( $\rho(x/Z)$ ) пропорційна добутку апіорної щільності ймовірності ( $\rho(x)$ ) та відповідних функцій правдоподібності  $x$  за відомими вимірюваннями  $z$  ( $\rho(z_i/x)$ ) [5]:

$$\rho(x/Z) \approx \rho(x) \prod \rho(z_i/x).$$

У випадку, коли функції правдоподібності мають Гаусівський розподіл, а апіорну щільність ймовірності можна вважати рівній одиниці, тоді:

$$\rho(x/Z) = \prod_z \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-0.5 \left(\frac{x-z_i}{\sigma_i}\right)^2\right). \quad (1)$$

Оцінка  $x$  може бути отримана за критерієм максимальної правдоподібності шляхом знаходження похідної від (1) та прирівнювання її значення до нуля:

$$\sum_z (\hat{x} - z_i) / \sigma_i^2 = 0,$$

$$\text{чи} \quad \hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i}, \quad (2)$$

де  $\omega = \sigma_i^2$  – ваговий коефіцієнт.

Дисперсія оцінки може бути записана наступним чином:

$$\sigma_c^2 = 1 / \sum_{i=1}^N \omega_i. \quad (3)$$

Досліджуючи характеристики об'єднання інформації за (2) для випадку двох датчиків ( $\sigma_1=10$ ,  $x_1=0$ ) з рис. 2 видно, що значення  $\sigma_c$  оцінені за (3) прокрашують окремі значення  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  у зоні значень до  $\sigma_2=3\sigma_1$ . Для більших значень  $\sigma_2$  функція (3) зростає поступово наближуючись до значення  $\sigma_1$ . Поєднання інформації за (2) максимізує функції правдоподібності кожного з датчиків та забезпечує зменшення результуючої дисперсії у порівнянні з кожним датчиком окремо.

На рис. 3 наведено приклад поєднання параметра вимірюного трьома датчиками, що характеризуються Гаусівськими щільностями з різними параметрами  $z$  та  $\sigma$ . Геометрично об'єднання координатних даних за (2) можна представити у вигляді еліпсів як показано на рис. 4.

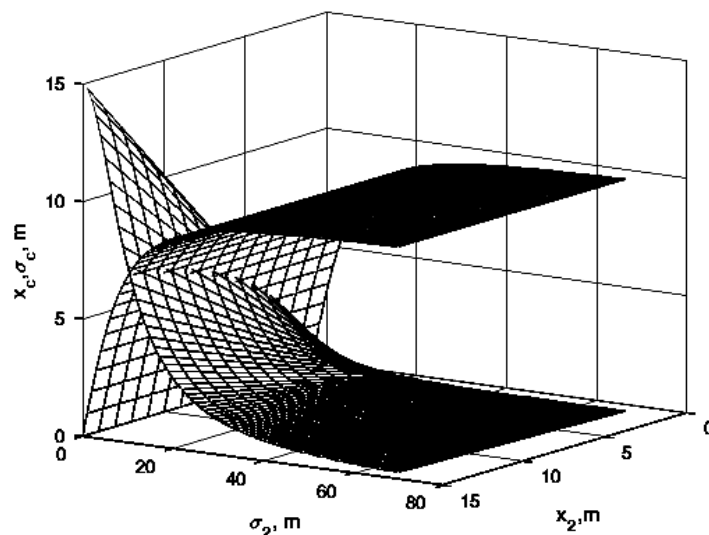
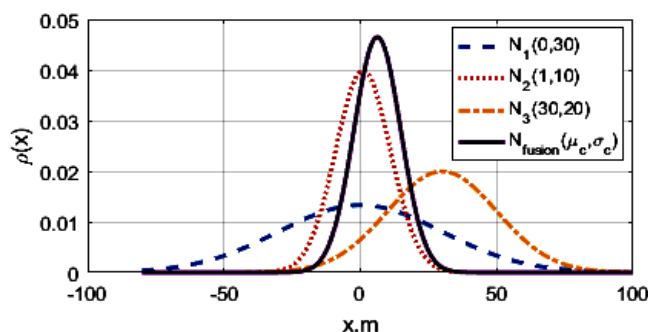
Рис. 2. Значення  $\sigma_c$ ,  $x_c$  при поєднанні інформації від двох датчиків

Рис. 3. Об'єднання інформації від трьох датчиків

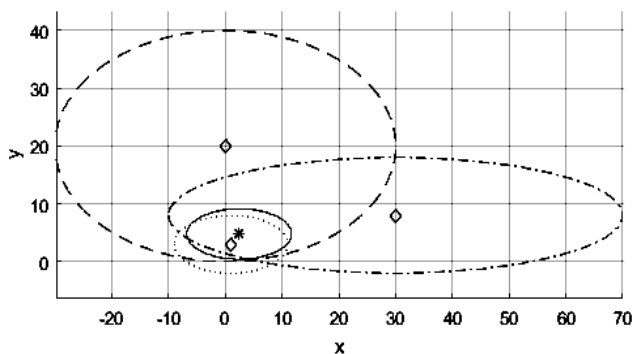


Рис. 4. Об'єднання координатної інформації за методом максимальної достовірності

Результат об'єднання є зваженим середнім значенням, а зважена похибка буде обмежувати зону перетину кожного з еліпсів похибок.

### Результати комп'ютерного моделювання

Верифікацію запропонованої моделі поєднання координатної інформації виконано за допомогою методу комп'ютерного моделювання з використанням траєкторної інформації. Дані траєкторії руху ПК зафіксовані за допомогою приймача сигналів ADS-B [11] у форматі 1090ES декодуються та зберігаються у базі даних за кожним ПК окремо. У якості прикладу, був обраний довільний маршрут польоту

«AUI58» з сполученням Бориспіль (UKBB) – Одеса (UKOO). Зафіксовані дані місцезположення ПК у форматі широта, довгота, висота містили несинхронізовані по часу вимірювання, що є результатом роботи бортового обладнання та похибок у розпізнаванні. Для зведення до єдиної системи часу виконано інтерполяцію на певний час. Таким чином була отримана траєкторія руху ПК через певні проміжки часу ( $t_s=1c$ ). Отримані дані траєкторії руху були використані у якості істинної траєкторії для моделювання вимірювань DME та VOR, на основі яких були задіяні алгоритми позиціонування за параметрами радіонавігаційних засобів. У процесі позиціонування задіявались алгоритми пошуку доступних радіонавігаційних засобів, вибору оптимальної пари, моделювання вимірювань параметрів від оптимальних засобів, дальномірний та кутомірний метод позиціонування. На рис. 5 наведено структурну схему процесу моделювання вимірювань.

Результати об'єднання координатної інформації для перших 303 с польотного часу наведено на рис. 6.

Розмах даних GNSS визначається похибкою позиціонування у горизонтальній площині, що протягом досліджуваного часу знаходилась у межах 25 м. Похибки позиціонування за парою DME/DME, VOR/VOR, VOR/DME значно варіюються під час польоту, оскільки залежать від геометрії розташування наземних станцій та відстані до них (рис. 7).

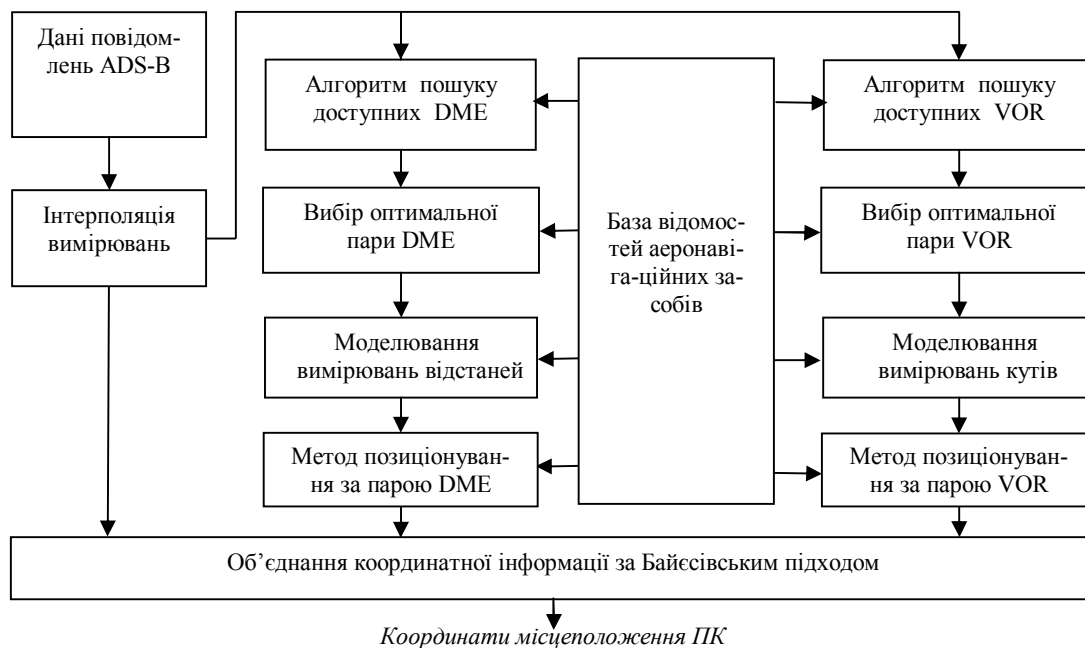


Рис. 5. Структурна схема моделювання отримання та об'єднання координатної інформації

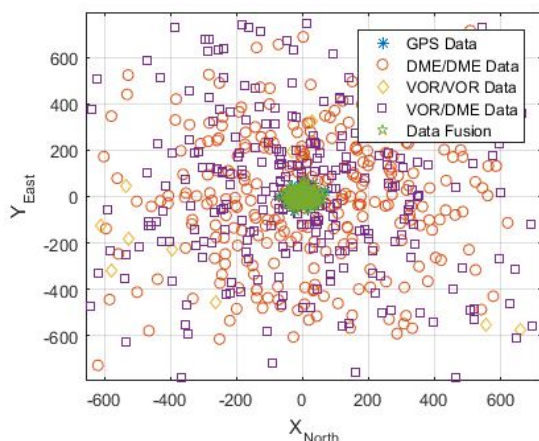


Рис. 6. Об'єднання координатної інформації

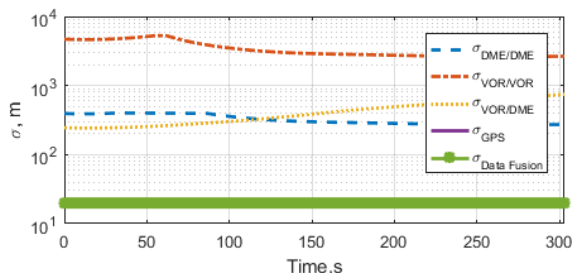


Рис. 7. Середньоквадратичні відхилення

Похибки позиціонування за VOR/VOR значно перевищують значення для далекомірного методу позиціонування за DME, що пов'язано з малою кількістю доступних VOR для навігації у повітряному просторі України.

З рис. 6 бачимо, що результат поєднання інформації наближається до значень найточнішого датчика, та практично співпадатиме з значеннями GPS для наведеного проміжку польоту. Цікавим є період зміни точності позиціонування, наприклад значного погіршення точності за GPS. У такому випадку, результат об'єднання буде змінюватись і наближатись до точнішого значення.

## Висновки

Запропонована модель поєднання координатної інформації, отриманої від різних датчиків з Гаусоподібним розподілом ймовірностей похибок дозволяє отримати оптимальну з точки зору функції правдоподібності оцінку місцеположення ПК. Результати дослідження польотних даних вказують на значну різницю в точності різних методів позиціонування. Дані GNSS є найбільш точними, проте, у випадку погіршення точності методи зональної навігації мають застосовуватися для визначення місцеположення ПК, зокрема позиціонування за парами DME/DME, VOR/VOR чи VOR/DME. Точність зональної навігації залежить від геометрії розташування та відстані до навігаційного засобу. У випадку вагового поєднання координатної інформації (3) від різних датчиків дані поєднуються відповідно їх точності, що наближає результат до більш точних даних. У випадку поєднання координатної інформації ПК, результат об'єднання даних буде майже збігатися з найбільш точними даними GNSS, оскільки, всі іншим методам властива на порядок нижча точність позиціонування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Performance-based Navigation (PBN) Manual. Doc 9613. – ICAO, 2008. – 304 p.
2. Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. Doc 9849. – ICAO, 2012. – 68 p.
3. Ostroumov I. Accuracy estimation of alternative positioning in navigation / I. Ostroumov, N. Kuzmenko // 2016 IEEE 4<sup>th</sup> International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control» (MSNMC), October 18-20, – 2016 : proceedings. – Kyiv, 2016. – P. 291-294.

4. Castanedo F. A review of data fusion techniques / F. Castanedo // The Scientific World Journal. – 2013. – 19 p.
5. Handbook of multisensor data fusion: theory and practice / M. E. Liggins, D. L. Hall, J. Llinas. – CRC press, 2017. – 872 p. ISBN 978-1-4200-5308-1
6. Guo D. Multisensor Data-Fusion-Based Approach to Airspeed Measurement Fault Detection for Unmanned Aerial Vehicles / D. Guo, M. Zhong, D. Zhou // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2018. – № 67(2). – P. 317-327.
7. Jiang L. Asynchronous Multirate Multisensor Data Fusion over Unreliable Measurements with Correlated Noise / L. Jiang, L. Yan, Y. Xia, Q. Guo, M. Fu, K. Lu // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2017. – P. 2427 – 2437.
8. Jiang L. Event-triggered multisensor data fusion with correlated noise / L. Jiang, L. Yan, Y. Xia, Q. Guo, M. Fu, B. Xiao // In Information Fusion (Fusion), 2017 20th International Conference on IEEE. – 2017. – P. 1-8.
9. Shimin F. Fusing Kinect sensor and inertial sensors with multi-rate Kalman filter / F. Shimin, R. Murray-Smith. – 2014. – 192 p.
10. Panicker M. Multisensor data fusion for an autonomous ground vehicle / M. Panicker, T. Mitha, K. Oak, A.M. Deshpande, C. Ganguly // Advances in Signal Processing (CASP), Conference on IEEE. – 2017. – P. 507-512.
11. Авіоніка: навч. посіб. / В.П. Харченко, І.В. Остроумов – К.: НАУ, 2012 – 281 с.
12. Lubbers B. A study on the accuracy of GPS positioning during jamming / B. Lubbers, S. Mildner, P. Onincx, A. Scheele // Navigation World Congress (AIN), – 2015, International Association of Institutes, IEEE. – P. 1–6.
13. Остроумов І.В. Оцінювання точності визначення лінії положення за парою далекомірною обладнання DME при вирішенні навігаційних задач / І.В. Остроумов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – № 2 (42). – С. 8-12.
14. 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.
15. Ostroumov I.V. Analysis of DME/DME positioning facility for Ukrainian airspace // The Seventh World Congress “Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies”. Volume 2. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 3.6.1-3.6.4
16. Ostroumov I.V. Timing problem of multi DME/DME approach // The Seventh World Congress “Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies”. Volume 2. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 3.6.5-3.6.7.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О. В. Козелков,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.05.2018

### Объединение координатной информации по вероятностному подходу

И. В. Остроумов

Рассмотрены основные датчики координатной информации самолёта гражданской авиации, которые используются для решения задачи позиционирования в пространстве, а именно спутниковую и инерциальную системы; алгоритмы зональной навигации в вычислительной системе самолётовождения по данным наземных радиомаяков. Проанализированы математические подходы к объединению данных на разных этапах обработки информации, кроме того рассмотрено объединение информации по методу максимальной правдоподобности. Впервые представлено структурную схему объединения координат самолёта, полученных по результатам парного и множественного принципов позиционирования на основании данных наземных радиомаяков. Исследовано использование вероятностного подхода при объединении координатной информации самолёта для случая когда распределения ошибок имеют Гауссообразный вид.

**Ключевые слова:** координаты, местоположение, объединение информации, Байес, вероятность, точность, летательный аппарат

### Coordinates data fusion with probabilistic approach

I. Ostroumov

The paper is devoted to the task of positioning that plays an important role in navigating an aircraft in airspace, the accuracy of which depends on the safety of aviation. The paper considers the most common avionics of civil aircraft that includes equipment of Global Navigation Satellite System (GNSS), Inertial Navigation System, and area navigation positioning algorithms within Flight Management System (FMS) functionality for positioning using signals from navigational aids. Each of considered equipment meets the required level of accuracy, continuity, and integrity of coordinate data, which depend on a variety of factors. In terms of global availability and the best accuracy, GNSS is considered as a primary source of data, however positioning by navigational aids data can be used in case of GNSS lock or pure accuracy positioning. In addition, the paper regards different algorithms of coordinate's detection in FMS: positioning by Distance Measurement Equipment (DME) realizing time of arrival method, positioning by VHF Omni-directional radio Range (VOR) or Automatic Directional Finder (ADF) data that uses angle of arrival methods. Data fusion process is considered at different levels. VOR/DME data processing is represented at the paper as a particular case of low-level data fusion. A block-diagram of sensor coordinate data fusion that includes lower level of sensor data fusion and multi sensor coordinates fusion from pair based and multi sensors approaches is proposed. Proposed approach of data fusion is grounded on weight coefficients that indicate accuracy of each positioning algorithm at high level of integration. At high level of data fusion, a probabilistic approach for a case when the distribution of measurement errors have Gaussian form is proposed. Verification of probabilistic data fusion approach has been performed with iterative computer based simulation. Trajectory of AUI58 flight was recorded by ADS-B equipment and used in simulation part. Stochastic simulation of DME and VOR measured data was used in pair-based (DME/DME, VOR/DME, VOR/VOR) and multi navigational aids algorithms of coordinates detection. Results of simulation indicate the possibility of data fusion weighted algorithm application for civil aviation.

**Keywords:** coordinates, position, data fusion, Bayesian, probability, accuracy, aircraft.