

А.В. Федоров, Т.М. Калімулін, О.В. Сердюк, Г.В. Худов

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПОВІТРЯНОГО ОБ'ЄКТА ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПРИЙМАЧІВ ADS-B

В статті розглянута методика оцінки потенційної точності вимірювання координат повітряного об'єкта на траєкторії польоту в залежності від просторової структури угруповання станцій прийому при використанні як одного, так і декількох приймачів ADS-B. Проведено розрахунки та отримані відповідні кореляційні матриці помилок визначення вектора траєкторних вимірювань при використанні як одного так і декількох приймачів ADS-B. Визначені можливі варіанти розміщення приймачів ADS-B на позиціях радіотехнічних підрозділів. Розглянуті можливості отримання даних від приймачів ADS-B. Розглянутий принцип роботи різницево-далекомірною методом, який лежить в основі роботи системи мультилатерації, при визначенні координат повітряних об'єктів.

Ключові слова: радіолокаційна станція, ADS-B, приймачі, джерела інформації, повітряна обстановка, залежне спостереження, незалежне спостереження, контроль повітряного простору, координати.

Вступ

Постановка проблеми. Відомо [1–4], що в теперішній час основними засобами ведення радіолокаційного контролю (РЛК) є радіолокаційні станції (РЛС) радіотехнічних військ (РТВ).

Поряд з активними первинними РЛС в цивільній авіації для контролю повітряного простору вже досить тривалий час використовують технологію системи мультилатерації (MLAT). В якості приймачів в системі MLAT використовуються приймачі ADS-B.

Використання приймачів ADS-B дає можливість супроводження повітряних об'єктів в режимі реального часу. Це наглядно можна простежити з використанням інтернет ресурсу FlightRadar24.

В той же час, в сучасних умовах, ведення РЛК існуючими радіолокаційними засобами значно ускладнено.

Таким чином, загострюються протиріччя між можливостями існуючих засобів РЛК та вимогами щодо точності визначення координат повітряного об'єкта (ПО). В якості шляхів вирішення указанного протиріччя в роботі запропоновано використання інформації зі сторонніх джерел, у якості яких розглядається система мультилатерації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як показав аналіз літератури, у світовій практиці у теперішній час проведено досить багато досліджень в рамках визначення потенційної точності вимірювання координат ПО [5–9].

Основні підходи, які були запропоновані раніше, можливо застосувати для оцінювання потенційної точності вимірювання координат ПО на траєкторії польоту в залежності від точності первинних вимірювань та просторової структури угруповання станцій прийому приймачів.

В світовій практиці у теперішній час існує декілька методів підвищення точності визначення координат ПО [10]:

використання багатопозиційних систем радіолокації;

використання інформації сторонніх джерел.

В якості стороннього джерела інформації в роботі запропоновано використання системи мультилатерації MLAT.

Систему MLAT відносять до систем незалежного кооперативного спостереження. Незалежність системи означає те, що система не залежить від даних навігаційних систем повітряного судна, а кооперативність означає можливість отримання інформації як наземними станціями підрозділів управління повітряного руху, так і повітряними судами [11; 14].

Система представляє собою сукупність ідентичних приймачів, які розташовані визначеним чином. В основу роботи системи покладений відомий різницево-далекомірний метод визначення координат ПО.

Важливим елементом ведення розвідки повітряного простору є визначення координат ПО. Ця задача може виконуватися, зокрема, із застосуванням системи MLAT, принцип дії якої заснований на різницево-далекомірному методі визначення координат ПО. Сутність методу полягає в отриманні сигналу з ПО на декількох наземних станціях та визначенні часових затримок, за якими і визначаються координати ПО.

Враховуючи технічні характеристики приймачів ADS-B, є можливість отримання інформації про ПО та підвищення точності визначення їх координат. А враховуючи максимальну дальність дії, що складає приблизно 400 км, можна отримувати дані від ПО, що не входять у повітряний простір України

і, відповідно, про які нема відомостей у органах управління повітряним рухом України [13]. Тобто з'являється можливість отримувати дані про ПО, що здійснюють польоти вздовж кордону України, не перетинаючи його. Не дивлячись на те, що використання навіть одного приймача ADS-B дає можливість отримувати інформацію про повітряну обстановку, використовуючи принцип технології MLAT, можна розмістити декілька приймачів ADS-B певним чином, створивши необхідну геометрію розташування приймачів в системі MLAT. Це, по-перше, приведе до обчислення координат ПО з підвищеною точністю в необхідній зоні, по-друге, значно підвищить живучість системи.

В той же час, визначення потенційної точності вимірювання координат ПО при розміщенні приймачів системи MLAT на позиціях радіотехнічних підрозділів (в якості додаткового джерела інформації) не проводилися.

Метою статті є розробка методу підвищення точності визначення координат ПО за рахунок застосування багатопозиційної системи приймачів ADS-B.

Виклад основного матеріалу

Точність визначення координат ПО буде залежати від декількох факторів [6; 9; 12]:

- геометрія розміщення приймачів,
- розташування ПО відносно приймачів,
- кількість використання приймачів,
- точність вимірювань системою координат ПО на траєкторії польоту (далі – від точність траєкторних вимірювань).

Ця точність може бути підвищена шляхом застосування багатопозиційної локації.

Нехай ПО в момент часу t_c знаходиться на траєкторії польоту в точці C з координатами (x_c, y_c, z_c) . Радіолокаційний сигнал приймається приймачами системи, розташованими в точках A_i з координатами (x_i, y_i, z_i) , $i = \overline{1, N}$, N – загальна кількість приймачів системи. Розглянемо випадок, коли приймачі синхронізовані в часі, тобто вимірювання всіма приймачами здійснюються одночасно в момент часу t_c . В результаті спостережень на кожному з N приймачів вимірюється азимут α_i , кут місця β_i та нахильна дальність D_i до джерела сигналу (снаряду чи міни). Маємо вибірку незалежних вимірювань або вектор спостережень, який надаємо в вигляді:

$$U = (\alpha_1, \beta_1, D_1, \alpha_2, \beta_2, D_2, \dots, \alpha_N, \beta_N, D_N)^T, \quad (1)$$

де елементи вектора спостережень можна визначити як (рис. 1):

$$\alpha_i = \arctg \frac{y_c - y_i}{x_c - x_i}, \quad (2)$$

$$\beta_i = \arctg \frac{z_c - z_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}}, \quad (3)$$

$$D_i = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}. \quad (4)$$

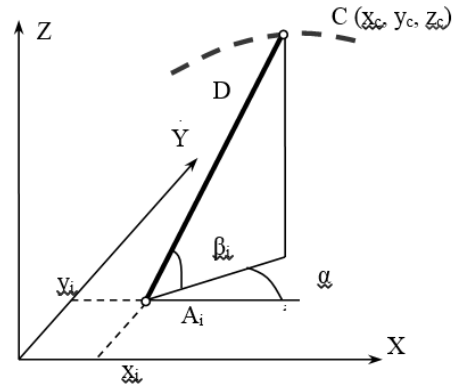


Рис. 1. Визначення елементів вектора спостережень

В результаті застосування методики визначається вектор траєкторних вимірювань $\xi = (x_c, y_c, z_c)$. Помилки визначення елементів вектора ξ залежать від помилок траєкторних вимірів:

$$\begin{cases} \Delta\alpha_i \approx \left(\frac{\partial\alpha_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial\alpha_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial\alpha_i}{\partial z_c} \delta z_c \right), \\ \Delta\beta_i \approx \left(\frac{\partial\beta_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial\beta_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial\beta_i}{\partial z_c} \delta z_c \right), \\ \Delta D_i \approx \left(\frac{\partial D_i}{\partial x_c} \delta x_c + \frac{\partial D_i}{\partial y_c} \delta y_c + \frac{\partial D_i}{\partial z_c} \delta z_c \right). \end{cases} \quad (5)$$

Рівняння (5) перепишемо у матричному вигляді наступним чином:

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\beta_1 \\ \Delta D_1 \\ \Delta\alpha_2 \\ \dots \\ \Delta D_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial\alpha_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\beta_1}{\partial x_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial y_c} & \frac{\partial\beta_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial D_1}{\partial x_c} & \frac{\partial D_1}{\partial y_c} & \frac{\partial D_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial\alpha_2}{\partial x_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial y_c} & \frac{\partial\alpha_2}{\partial z_c} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial D_N}{\partial x_c} & \frac{\partial D_N}{\partial y_c} & \frac{\partial D_N}{\partial z_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta x_c \\ \delta y_c \\ \delta z_c \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Введемо наступні позначення:

$$F_\Delta = \begin{pmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\beta_1 \\ \Delta D_1 \\ \Delta\alpha_2 \\ \dots \\ \Delta D_N \end{pmatrix}, \quad \Delta_c = \begin{pmatrix} \delta x_c \\ \delta y_c \\ \delta z_c \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_c} & \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_c} & \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial \beta_1}{\partial x_c} & \frac{\partial \beta_1}{\partial y_c} & \frac{\partial \beta_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial D_1}{\partial x_c} & \frac{\partial D_1}{\partial y_c} & \frac{\partial D_1}{\partial z_c} \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_c} & \frac{\partial \alpha_2}{\partial y_c} & \frac{\partial \alpha_2}{\partial z_c} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial D_N}{\partial x_c} & \frac{\partial D_N}{\partial y_c} & \frac{\partial D_N}{\partial z_c} \end{pmatrix}.$$

Матриця В має розмірність $(m \times 3)$, де m – число незалежних вимірювань.

Після диференціювання рівнянь (2–4) по x_c , y_c і z_c отримаємо вирази:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_c} &= \frac{y_c - y_i}{\left(1 + \frac{(y_c - y_i)^2}{(x_c - x_i)^2}\right) \cdot (x_c - x_i)^2}, \\ \frac{\partial \alpha_i}{\partial y_c} &= \frac{1}{\left(1 + \frac{(y_c - y_i)^2}{(x_c - x_i)^2}\right) \cdot (x_c - x_i)}, \\ \frac{\partial \alpha_i}{\partial z_c} &= 0, \\ \frac{\partial \beta_i}{\partial x_c} &= \frac{(x_c - x_i)(z_c - z_i)}{\left(1 + \frac{(z_c - z_i)^2}{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}\right) \cdot \frac{1}{\left((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2\right)^{3/2}}}, \\ \frac{\partial \beta_i}{\partial y_c} &= \frac{(y_c - y_i)(z_c - z_i)}{\left(1 + \frac{(z_c - z_i)^2}{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}\right) \cdot \frac{1}{\left((x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2\right)^{3/2}}}, \\ \frac{\partial \beta_i}{\partial z_c} &= \frac{1}{\left(1 + \frac{(z_c - z_i)^2}{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}\right) \cdot \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}}, \\ \frac{\partial D_i}{\partial x_c} &= \frac{x_c - x_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_i}{\partial y_c} &= \frac{y_c - y_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}, \\ \frac{\partial D_i}{\partial z_c} &= \frac{z_c - z_i}{\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2}}. \end{aligned}$$

Рівняння (6) с урахуванням (7) перепишемо в наступному вигляді:

$$F_{\Delta} = B \Delta_c. \quad (8)$$

Після перемноження лівої і правої частини рівняння (8) на транспоновані цим частинам матриці і взяття середнього результату отримаємо:

$$\begin{aligned} F_{\Delta} F_{\Delta}^T &= B \Delta_c (B \Delta_c)^T, \\ F_{\Delta} F_{\Delta}^T &= B \Delta_c \Delta_c^T B^T. \end{aligned}$$

Позначимо через K_r – кореляційну матрицю $(m \times m)$ помилок вимірювань азимутів, кутів місця та нахильних дальностей:

$$K_r = \overline{F_{\Delta} F_{\Delta}^T}.$$

При незалежних вимірюваннях та використанні однакових приймачів ця матриця буде діагональною:

$$K_r = \begin{pmatrix} \sigma_{\alpha}^2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_D^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_D^2 \end{pmatrix},$$

де σ_{α} , σ_{β} , σ_D – середньоквадратичні відхилення помилок вимірювання приймачами, відповідно, азимуту, куту місця та нахильної дальності.

Позначимо через K_c – кореляційну матрицю помилок визначення вектора траєкторних вимірювань ξ розмірності (3×3) :

$$K_c = \overline{\Delta_c \Delta_c^T}.$$

С врахуванням введених позначень отримуємо рівняння:

$$K_r = B K_c B^T. \quad (9)$$

В рівнянні (9) матриця В являється прямокутною розмірності $(m \times 3)$, що ускладнює безпосереднє знаходження матриці K_c . Для подолання вказаних труднощів перемножимо обидві частини рівняння (9) з лівої сторони на B^T , а з правої на В. Отримаємо:

$$B^T K_r B = B^T B K_c B^T B. \quad (10)$$

Зауважимо, що в правій частині рівняння (10) отримана квадратна матриця $(B^T B)$ розмірності (3×3) .

Після перемноження обох частин рівняння (10) з лівої і правої сторони на матрицю $(B^T B)^{-1}$, обернену $(B^T B)$, отримуємо:

$$\begin{aligned} (B^T B)^{-1} B^T K_r B (B^T B)^{-1} = \\ = (B^T B)^{-1} B^T B K_C B^T B (B^T B)^{-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

З урахуванням того, що

$$(B^T B)^{-1} (B^T B) = I,$$

де I – одинична матриця, знайдемо рівняння для розрахунку кореляційної матриці помилок визначення вектора траєкторних вимірювань:

$$K_C = \left[(B)^T K^{-1} B \right]^{-T}. \quad (12)$$

Результати розрахунків

Розрахунки проведені для двох варіантів побудови угруповання приймачів.

1 варіант (рис. 2):

кількість приймачів: $N = 5$;

координати точки траєкторії, для якої оцінювалась точність: $x_c = 5$ км, $y_c = 6$ км, $z_c = 7$ км;

координати приймачів:

$(x_1, y_1) = (2; 4, 2)$;

$(x_2, y_2) = (6, 2; 0, 8)$;

$(x_3, y_3) = (9, 3; 3, 2)$;

$(x_4, y_4) = (7, 4; 7, 8)$;

$(x_5, y_5) = (3; 7, 7)$;

значення середньоквадратичних відхилень вимірювань є однаковими для всіх приймачів та дорівнюють: $\sigma_\alpha = 0,3^\circ$, $\sigma_\beta = 0,3^\circ$, $\sigma_D = 10$ м.

2 варіант відрізняється наявністю тільки одного приймача, розташованого в точці з координатами $(x_1, y_1) = (2; 4, 2)$ (рис. 2).

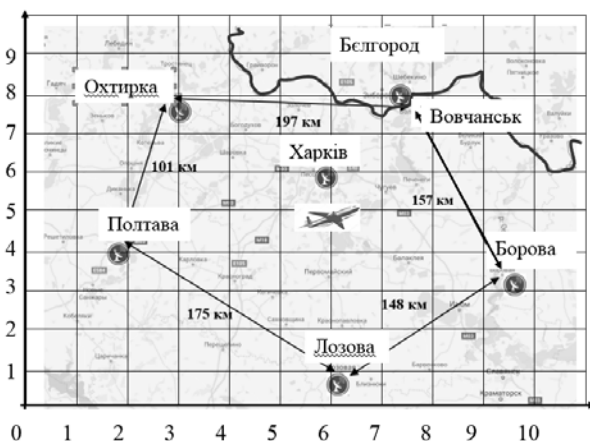


Рис. 2. Вихідні дані для розрахунків

В результаті розрахунків за виразом (12) отримані наступні кореляційні матриці помилок визначення вектора траєкторних вимірювань:

Варіант 1:

$$K_{C5} = \begin{pmatrix} 33,946 & 11,988 & -6,329 \\ 11,988 & 33,948 & -6,33 \\ -6,329 & -6,33 & 39,689 \end{pmatrix},$$

варіант 2:

$$K_{C1} = \begin{pmatrix} 550,045 & 275,033 & -91,67 \\ 275,033 & 550,018 & -91,67 \\ -91,67 & -91,67 & 61,111 \end{pmatrix}.$$

Діагональні елементи кореляційних матриць відповідають значенням квадратів похибок координат ПО $(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2)$, де

σ_x^2 – квадрат похибки по координаті x ;

σ_y^2 – квадрат похибки по координаті y ;

σ_z^2 – квадрат похибки по координаті z .

Решта елементів відповідають значенням коефіцієнтів кореляції еліпсоїду розсіювання і показують орієнтацію еліпсоїда розсіювання у просторі.

Таким чином, запропонована методика дозволяє провести розрахунки та провести аналіз потенційної точності траєкторних вимірювань угрупованням приймачів ADS-B.

Висновки

В роботі основна увага приділена системі незалежного кооперативного спостереження MLAT. Розглянута методика оцінки потенційної точності вимірювання координат ПО на траєкторії польоту в залежності від просторової структури угруповання станцій прийому. У якості приймачів системи мультilaterації запропоновано використання приймачів системи ADS-B.

В результаті застосування методики на прикладі продемонстровано підвищення точності траєкторних вимірювань та точності визначення координат ПО при застосуванні багатопозиційної локації (застосуванні п'яти приймачів замість одного). Середня квадратична похибка по координатам x та y зменшилась у 16 разів. По координаті z – у 1,5 рази, що свідчить про підвищення точності визначення координат ПО із застосуванням багатопозиційної радіолокації.

В той же час враховується, що інформація системи MLAT розглядається як допоміжне джерело інформації. Основним джерелом й надалі залишатимуться радіолокаційні системи.

В подальших дослідженнях заплановано вирішення наступних питань:

оптимізація геометричної побудови системи MLAT на позиції радіотехнічних підрозділів;

розробка методу сумісної обробки радіолокаційної інформації та інформації від системи MLAT при веденні радіолокаційної розвідки.

Список літератури

1. Артеменко А.М. Тенденції розвитку Повітряних Сил Збройних Сил України на основі аналізу досвіду проведення АТО / А.М. Артеменко, Г.В. Певцов // *Новітні технології – для захисту повітряного простору*. – 2015. – XI наук. конф. Харк. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – С. 16.
2. Довідник учасника АТО: озброєння і військова техніка Збройних Сил Російської Федерації / А.М. Алімпієв, Г.В. Певцов, Д.А. Гриб (ред.). – Х.: Оригінал, 2015. – 732 с.
3. Fewell M.P. Area of common overlap of three circles / M.P. Fewell // *Defence science and technology organization. Maritime operations div.* – Australia, Edinburgh. – 2006. – P. 1-30.
4. Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX Part 12 Category 21 ADS-B Target Reports, EUROCONTROL, 2015.
5. Barton D.K. Radar System Analysis and Modeling / D.K. Barton. – Norwood. Artech House, 2005. – 545 p.
6. Jian Li. MIMO Radar Signal Processing / Jian Li, Petre Stoica. – New Jersey: John Wiley & Sons. – 448 p.
7. Свид І.В. Синтез структури інформаційного забезпечення споживачів інформаційними системами спостереження повітряного простору / І.В. Свид, А.І. Обод // *Збірник наукових праць ХУПС*. – 2015. – №2 (43). – С. 67-70.
8. Обод І.І. Інформаційна модель систем спостереження повітряного простору / І.І. Обод, О.О. Стрельницький, В.А. Андрусевич. – Х.: ХНУРЕ, 2015. – 270 с.
9. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман. – М.: Сов.радио, 1970. – 560 с.
10. Зайцев Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы / Д.В. Зайцев. – М.: Радиотехника, 2007. – 114 с.
11. Гонца Д.І. Використання складних широкополосних сигналів у системі мультиратерації MLAT [Електронний ресурс] / Д.І. Гонца // *Науковий вісник ДонНТУ*. – 2016. – №1(23). – С. 33-46. Режим доступу: <http://masters.donntu.org/2014/frt/gontsa/diss/indexu.htm> (дата звернення 10 січня 2019).
12. Мультилатераційні системи спостереження повітряного руху / Під ред. О.І. Яковлева. – К.: ДПОПР України. – 2010. – 192 с.
13. Використання інформації ADS-B в інтересах підвищення якості ведення радіолокаційної розвідки повітряного простору / С.П. Лещенко, О.М. Колесник, С.А. Грицаєнко, С.І. Бурковський // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2017. – №3(28). – С. 69-75. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.28.09>.
14. Standards of USA. RTCA DO-260B. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B). – Washington, 2009. – 185 p. .

References

1. Artemenko, A.M. and Pevtsov, H.V. (2015), “Tendentsii rozvytku Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy na osnovi analizu dosvidu provedennia ATO” [Trends in the development of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine on the basis of analysis of the ATO experience], *Novitni tekhnologii – dlia zakhystu povitrianoho prostoru: XI scientific and technical conference of Kharkiv National Air Force University*, Kharkiv, pp. 16.
2. Alimpiiev, A.M., Pevtsov, G.V. and Gryb, D.A. (2015), “Dovidnyk uchasnyka ATO: ozbroiennia i viiskova tekhnika Zbroinykh Syl Rosiiskoi Federatsii” [Reference book of the participant of the ATO: armament and military equipment of the Armed Forces of the Russian Federation], Original, Kharkiv, 732 p.
3. Fewell, M.P. (2006), Area of common overlap of three circles, *Defence science and technology organization*, Edinburgh, Australia, pp. 1-30.
4. EUROCONTROL (2015), *Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX Part 12 Category 21 ADS-B Target Reports*.
5. Barton, D.K. (2005), *Radar System Analysis and Modeling*, Artech House, Norwood, 545 p.
6. Li, Jian and Stoica, Petre (2009), *MIMO Radar Signal Processing*, John Wiley & Sons, New Jersey, 448 p.
7. Svyd, I.V. and Obod, A.I. (2015), “Syntez struktury informatsiynoho zabezpechennya spozhyvachiv informatsiynymy systemamy sposterezhennya povitrianoho prostoru” [Synthesis of the structure of information provision of consumers by information systems of observation of airspace], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 2(43), pp. 67-70.
8. Obod, I.I., Strel'nyts'kyu, O.O. and Andrusевич, V.A. (2015), “Informatsiyna model' system sposterezhennya povitrianoho prostoru” [Information model of airspace surveillance systems], KHNURE, Kharkiv, 270 p.
9. Shirman, J.D. (1970), “Teoretycheskye osnovy radyolokatsyy” [Theoretical basis of radar], Moscow, 560 p.
10. Zaytsev, D.V. (2007), “Mnogopozicionnye radiolokacionnye sistemy” [Multi-position radar systems], Moscow, 114 p.
11. Hontsa, D.I. (2017), “Vykorystannya skladnykh shyrokopolosnykh syhnaliv u systemi mul'tyrateratsiyi MLAT” [The use of complex broadband signals in the Multilateration system MLAT], Donetsk NTU, available at: www.masters.donntu.org/2014/frt/gontsa/diss/indexu.htm (accessed 10 January 2019).
12. Yakovlev, O.I. (2010), “Multylateratsiini systemy sposterezhennya povitrianoho rukhu” [Multi-lateral air traffic monitoring systems], Kyiv, 192 p.
13. Leshchenko, S.P., Kolesnik, O.M., Hrytsayenko, S.A. and Burkovskii, S.I. (2017), “Vykorystannia informatsii ADS-B v interesakh pidvyshchennia yakosti vedennia radiolokatsiinoi rozvidky povitrianoho prostoru” [Ways to create a single picture of the air environment to identify threatening and crisis situations in the air], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 3(28), pp. 69-75. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.28.09>.
14. Standards of USA (2009), *RTCA DO-260B. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B)*, Washington, 185 p.

Надійшла до редколегії 14.12.2018

Схвалена до друку 17.01.2019

Відомості про авторів:

Федоров Андрій Володимирович
ад'юнкт
Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3666-2466>

Калімулін Темір Муратович
курсант
Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7636-7218>

Сердюк Олексій Володимирович
викладач кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3600-0611>

Худов Геннадій Володимирович
доктор технічних наук професор
начальник кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>

Information about the authors:

Andrii Fedorov
Doctoral Student
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-3666-2466>

Temir Kalimulin
Cadet
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7636-7218>

Oleksii Serdiuk
Instructor of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3600-0611>

Hennadii Hudov
Doctor of Technical Sciences Professor
Head of Department of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УСТРОЙСТВ ADS-B**

А.В. Федоров, Т.М. Калимулин, О.В. Сердюк, Г.В. Худов

В статье рассмотрена методика оценки потенциальной точности измерения координат воздушного объекта на траектории полета в зависимости от пространственной структуры группировки станций приема при использовании как одного, так и нескольких приемников ADS-B. Проведены расчеты и получены соответствующие корреляционные матрицы ошибок определения вектора траекторных измерений при использовании как одного, так и нескольких приемников ADS-B. Определены возможные варианты размещения приёмников ADS-B на позициях радиотехнических подразделений. Рассмотрены возможности получения данных от приёмников ADS-B. Рассмотрен принцип работы разностно-дальномерного метода, который лежит в основе работы системы мультilaterации, при определении координат воздушных объектов.

Ключевые слова: радиолокационная станция, ADS-B, приемники, источники информации, воздушная обстановка, зависящее наблюдения, независимое наблюдение, контроль воздушного пространства, координаты.

**METHODS TO INCREASE ACCURACY OF THE COORDINATES OF AIR OBJECT
THROUGH THE MULTI RECEIVERS ADS-B SYSTEM USE**

A. Fedorov, T. Kalimulin, O. Serdiuk, G. Hudov

The article analyzes the possibility of using a multilateration system in cooperation with existing radar facilities during the conduct of radar surveillance of airspace. Possible variants of detection, determination of coordinates and tracking of air objects that seek to be undetected or to lead mimicry are given. The information possibilities of the ADS-B receivers are reviewed. The directions of consolidation of the capabilities of the multilateration system and information from radar facilities are determined. The possibilities of obtaining data from the ADS-B receivers in radio engineering units and the technical means of determining such information are considered. The methods used are: methods for determining the coordinates of the air object, the distance-range method, the methods of passive radar, methods for determining the coordinates of the air object using the information of satellite navigation systems. The principles of the Time Difference of Arrival method (difference-ranging method) is considered, which is the basis of using of the ADS-B receivers in determining the coordinates of air objects. The factors that influence the accuracy of determining the coordinates of an air object are shown. In conducting calculations, the geometry of the ADS-B receivers placement, the location of the airborne object relative to ADS-B receivers, the amount of ADS-B receivers use, and the accuracy of the airborne object coordinate system on the flight path are taken into account. The calculations were made taking into account the location of the ASD-B receivers in the area of radio-technical units location. Features and limitations of using the information from the multilateration system are considered. As receivers of the multilateration system, proposed to use the ADS-B system receivers. The existing problems of airspace control are identified and solutions are offered. The results obtained with regard to the improvement of the accuracy of trajectory measurements and the reduction of the squared error of the calculation of the coordinates of the air facility in the application of the multipositional location ADS-B receivers.

Keywords: radars, control point, ADS-B, recovers, information source, air situation, dependent observation, independent observation, airspace, airspace control, coordinates.