

*І.В. СВИД, канд. техн. наук, І.В. ІГНАТЮК, О.Д. ШУНІБОРОВ,
Г.В. МАЙСТРЕНКО, М.В. ТУЛЕНКО*

ОЦІНКА ЯКОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ СИСТЕМ ЗАЛЕЖНОГО КООПЕРАТИВНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Вступ

В даний час спостереження та визначення місця розташування повітряного судна в повітряному просторі здійснюються за допомогою первинних [1 – 4] однопозиційних [5 – 7], багатопозиційних [8 – 10] та вторинних [11 – 15] оглядових радіолокаторів, систем ADS тощо. Первинний оглядовий радіолокатор визначає місце розташування повітряного судна на основі прийому відбитих радіолокаційних сигналів. Вторинний радіолокатор використовується для передачі та прийому одержуваних на борту повітряного судна даних, таких як висота, розпізнавальний індекс тощо. Однак є проблеми надскладної установки сучасних первинних та вторинних радіолокаторів в океанічних районах або важкодоступній місцевості, такий як гірські райони, які залежать від можливості установки механічного обладнання, що вимагає виконання великого обсягу робіт з монтажу і технічного обслуговування. Основою служби спостереження повітряного простору може бути сукупність трьох основних видів спостереження [16 – 18]:

- незалежне некооперативне спостереження, в якому місце розташування повітряного судна визначається на основі даних вимірювань без допомоги повітряних суден, що знаходяться на віддаленні;

- незалежне кооперативне спостереження, в якому місце розташування повітряного судна визначається на основі даних вимірювань, що виконуються підсистемою локального спостереження з використанням повідомлень з борту повітряного судна. Ці повідомлення можуть містити інформацію, отриману на борту повітряного судна (наприклад, дані про барометричну висоту, розпізнавальний індекс повітряного судна тощо);

- залежне кооперативне спостереження, у якому місце розташування повітряного судна визначається на борту повітряного судна, і ця інформація передається підсистемі локального спостереження поряд з можливими додатковими даними.

Залежні кооперативні системи спостереження [19 – 21] займають значне місце у інформаційному забезпеченні системи контролю повітряного простору та управління повітряним рухом. Можливо стверджувати, що залежні системи спостереження, що розглядаються, в даний час є перспективними системами спостереження для управління повітряним рухом. У зв'язку з тим, що координати кожного повітряного судна визначаються на борту і, в подальшому, передаються споживачам, тому питання забезпечення цілісності інформації в залежних системах спостереження є актуальним.

Оцінка імовірності цілісності інформації систем залежного кооперативного спостереження

Визначені на борту повітряного судна координати, на основі вимірів глобальної навігаційної супутникової системи, характеризуються високою точністю. Однак відмови, що виникають в системі глобальної навігаційної супутникової системи, можуть призводити до значного збільшення помилок визначення координат повітряного судна, переданих за каналами залежних систем спостереження [22 – 25]. Для користувача системи залежних систем спостереження важливо, щоб була можливість виявляти ситуації, коли помилки визначення координат повітряного судна, переданих в повідомленнях залежних систем спостереження, перевищують заздалегідь встановлений радіус утримання R_s . Будемо вважати, що в цьому випадку подається сигнал тривоги.

Під цілісністю будемо розуміти імовірність події, при якій помилка визначення місцеположення повітряного судна не перевищує деякий поріг R_s або помилка виявлена протягом інтервалу часу, що не перевищує T_a .

Будемо враховувати, що (\bar{x}, \bar{y}) – горизонтальні координати фактичного положення повітряного судна, (x_N, y_N) – координати, виміряні залежною системою спостереження повітряного простору. Помилки вимірювання є випадкові величини, що дорівнюють $\xi_N = x_N - \bar{x}$ і $\eta_N = y_N - \bar{y}$.

Якщо функція $f_N(\xi_N, \eta_N)$ є спільною щільністю імовірності помилок (ξ_N, η_N) , то імовірність того, що помилки не перевищують R_s , можливо визначити з виразу

$$P = \iint_{\xi_N^2 + \eta_N^2 \leq R_s} f_N(\xi_N, \eta_N). \quad (1)$$

Слід зазначити, що вираз (1) не може бути основою забезпечення цілісності вимірювань залежних радіолокаційних систем спостереження, так як для кожного конкретного виміряного положення повітряного судна (x_N, y_N) вона не дозволяє зробити висновок про те, що помилки залежних систем спостереження повітряного простору перевершили величину R_s . Таким чином, на підставі наведеного виразу (1) неможливо реалізувати функцію подачі тривоги.

Для вирішення зазначеної задачі передбачається, що необхідно здійснювати забезпечення цілісності радіолокаційної інформації залежних систем спостереження шляхом порівняння кожного вимірювання координат повітряного судна (x_N, y_N) з координатами (x_R, y_R) , які отримані від незалежних систем спостереження повітряного простору.

У подальшому будемо вважати, що незалежний від залежної системи спостереження вимір має помилки $\xi_R = x_R - \bar{x}$ і $\eta_R = y_R - \bar{y}$, а також відома їх спільна щільність розподілу $f_R(\xi_R, \eta_R)$.

Також будемо вважати, що за час спостереження $(0, T_a)$ щільність імовірності помилок координатної інформації незалежної системи спостереження (x_R, y_R) не змінює ні вид розподілу, так і ні параметри розподілу.

З урахуванням справедливості зазначеної вище гіпотези, для забезпечення цілісності координатної інформації залежних систем спостереження повітряного простору пропонується наступний спосіб.

Якщо різниця координат двох незалежних вимірювань одного і того ж положення повітряного судна більше деякої наперед заданої величини D_t , то передбачається, що якість координатної інформації залежної системи спостереження незадовільна, і подається сигнал тривоги (за час, що не перевищує T_a). Це обумовлює, що мітка (x_n, y_n) не повинна використовуватися для цілей управління повітряним рухом. В іншому ж випадку передбачається, що координатна інформація залежної системи спостереження, що розглядається, має достатню якість і може використовуватися для управління повітряним рухом.

Наведене вище підкреслює, що забезпечення цілісності з використанням зазначеного вище алгоритму об'єктивно пов'язане з наступними випадковими подіями [1, 6 – 18]:

- «правильне виявлення» – подія, при якій подається сигнал тривоги для диспетчера, оскільки відстань між незалежними випадковими мітками більше величини D_t і помилки визначення фактичного стану повітряного судна залежною системою спостереження, що розглядається більше $R_s (\xi_N^2 + \eta_N^2 < R_s)$;

- «правильне невиявлення» – подія, при якій відстань між незалежними випадковими мітками не перевищує величини D_t , сигнал тривоги у цьому разі не подається, а помилки

визначення фактичного стану повітряного судна залежною системою спостереження, що розглядається, не перевищують $R_s (\xi_N^2 + \mu_N^2 < R_s)$;

- «хибна тривога» – подія, при якій відстань між незалежними випадковими мітками більше D_t і подається сигнал тривоги для диспетчера, але помилки визначення фактичного стану повітряного судна залежною системою спостереження, що розглядається, не перевищують величину $R_s (\xi_N^2 + \mu_N^2 < R_s)$. При цьому слід зазначити, що імовірність появи події хибної тривоги $P_{F.A.}$ не повинна перевищувати прийнятну величину $\bar{P}_{F.A.}$;

- «пропуск виявлення» – подія, при якій сигнал тривоги для диспетчера не подається, оскільки відстань між незалежними випадковими мітками не перевищує величини D_t , а помилки визначення фактичного стану повітряного судна залежною системою спостереження, що розглядається, більше величини $R_s (\xi_N^2 + \mu_N^2 \geq R_s)$. Слід зазначити, що імовірність появи події пропуску виявлення (ризик цілісності) $P_{I.R.}$ не повинна перевищувати прийнятну величину $\bar{P}_{I.R.}$.

Оскільки поява подій хибної тривоги та пропуску виявлення вкрай негативно впливає на безпеку польотів при використанні інформації залежних систем спостереження в цілях управління повітряним рухом, завданням даної роботи є формалізація моделей оцінки імовірності помилкової тривоги $P_{F.A.}$, а також ризику цілісності $P_{I.R.}$. Після того, як труднощі формалізації будуть подолані, введемо міру цілісності радіолокаційної інформації залежної систем спостереження, що розглядається.

Відомо, що процедура забезпечення цілісності заснована на аналізі різниці координат незалежних міток горизонтального положення повітряного судна (x_N, y_N) та (x_R, y_R) .

Введемо наступні двовимірні випадкові величини: $\vec{N} = \|X_N Y_N\|$ – вектор оцінки координат повітряного судна залежної систем спостереження; $\vec{R} = \|X_R Y_R\|$ – вектор оцінки координат повітряного судна незалежної систем спостереження; $\vec{S} = \|S_x, S_y\|$ – відстань між векторами \vec{N} та \vec{R} .

Слід зазначити, що вектори \vec{N} та \vec{R} являються незалежними з відомими щільностями, а компоненти векторів \vec{N} та \vec{R} також незалежні як всередині \vec{N} та \vec{R} , так і між векторами.

Будемо вважати, що математичні очікування компонент вектору \vec{R} збігаються з координатами фактичного положення повітряного судна, а математичні очікування компонент вектору \vec{N} можуть мати зміщення за координатами Δx та Δy по відношенню до фактичних координат повітряного судна, що спостерігається. При цьому слід зазначити, що зміщення за координатами такі, що виконується рівність $\Delta x^2 + \Delta y^2 = R_s^2$.

Будемо вважати, що \vec{N} і \vec{R} – незалежні випадкові величини з щільностями $\omega_N(x)$ та $\omega_R(x)$. У загальному вигляді \vec{N} і \vec{R} – це двовимірні випадкові величини, але всі співвідношення будуть справедливі й для одновимірних випадкових незалежних величин.

Позначимо щільність випадкової величини $S = R - N$ як $q(s)$ та розглянемо дві пари випадкових величин: (N, R) – вихідна пара; (N, S) - пара, яка бере участь у процедурі забезпечення цілісності інформації залежної систем спостереження, що розглядається.

В цьому разі завжди апріорна (до застосування процедури забезпечення цілісності) спільна щільність імовірності пари випадкових векторів (N, S) , яка буде дорівнювати $w_N(x) \cdot w_R(x + s)$.

При цьому слід зазначити, що знаючи апріорну спільну щільність імовірності пари випадкових векторів (N, S) , можна обчислити умовну щільність імовірності $w_{w/s}(x; s)$ випадкової величини N за умови, що виконується наступна рівність $S = s$;

$$w_{w/s}(x; s) = \frac{w_N(x)w_R(x+s)}{g(s)}. \quad (2)$$

За умови, що відомі щільності імовірності $w_N(x)$ та $w_R(x+s)$, різницю випадкових незалежних вимірювань можливо обчислити як

$$g(s) = \int_{-\infty}^{\infty} w_N(x) \cdot w_R(x+s) dx. \quad (3)$$

Слід зазначити, що процедура забезпечення цілісності заснована на досвіді, при якому випадкова величина S приймає конкретне значення $s: S = s$. У цьому разі значення s порівнюють з порогом виявлення D_t та приймають рішення про подачу сигналу тривоги. При міркуванні про те, чи вийшли помилки залежної систем спостереження за межі радіусу утримання R_s або не вийшли за умови, що $S = s$, апіорна щільність помилок вимірювання залежної систем спостереження повинна бути замінена на умовну $u_{N/s}(x; s)$. Виходячи з викладеного, моделі оцінок імовірностей $P_{F.A.}$, $P_{I.R.}$ і P_I повинні будуватися не на щільності $q(s)$ і $w_N(x)$, а на щільності $q(s)$ та $u_{N/s}(x; s)$.

У цьому разі, виходячи із загальних міркувань формалізації імовірності помилкової тривоги і ризику цілісності, можемо записати:

$$P_{F.A.} = P\{|s| > D_t, |x| \leq R_s\}; \quad P_{I.R.} = P\{|s| \leq D_t, |x| \leq R_s\}.$$

З урахуванням того, що випадкові величини s і x мають щільності імовірності, рівні $q(s)$ та $u_{N/s}(x; s)$, отримаємо наступні значення шуканих імовірностей:

$$P_{F.A.} = \int_{|s| > D_t} q(s) \left[\int u_{N/s}(x; s) dx \right] ds; \quad (4)$$

$$P_{I.R.} = \int_{|s| > D_t} q(s) \left[\int_{|x| > R_s} u_{N/s}(x; s) dx \right] ds. \quad (5)$$

Помилки у визначенні координат повітряного судна за допомогою залежної систем спостереження в загальному вигляді можуть мати ненульовий зсув $\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_x^2} = R_s$. Стан, в якому залежна система спостереження вимірює координати повітряного судна із зсувами, будемо називати відмовою. Така імовірність стану дорівнює P_f . Апіорна щільність імовірності помилок вимірювання координат повітряного судна за допомогою залежної системи спостереження при відмові позначимо як $w_N^f(x; \Delta)$. Тоді й щільність різниці випадкових величин $R-N$ також матиме параметр зсуву Δ . Отже, умовну щільність помилок вимірювання координат повітряного судна залежної систем спостереження при відмові слід записувати зі зміщенням $w_{N/s}^f(x; s, \Delta)$.

Облік стану відмови залежної системи спостереження доповнює моделі хибної тривоги та ризику цілісності:

$$R_{F.A.} = (1 - P_f) P_{F.A.}^{n.f.} + P_f P_{F.A.}^f; \quad (6)$$

$$R_{I.R.} = (1 - P_f) P_{I.R.}^{n.f.} + P_f P_{I.R.}^f; \quad (7)$$

в яких $P_{F.A.}^{n.f.}$ та $P_{I.R.}^{n.f.}$ визначаються із співвідношень (4) та (5):

$$P_{F.A.}^f = \int_{|s| > D_t} q^f(s; \Delta = R_s) \left[\int_{|x| \leq R_s} U_{N/s}^F(x; s, \Delta = R_s) dx \right] ds,$$

$$P_{I.R.}^f = \int_{|s| > D_t} q^f(s; \Delta = R_s) \left[\int_{|x| > R_s} U_{N/s}^F(x; s, \Delta = R_s) dx \right] ds.$$

Слід зауважити, що імовірність події, при якій помилка визначення місцеположення повітряного судна не перевищує заданий поріг R_s або помилку виявлення, тобто цілісність P_I об'єднує в собі три з чотирьох можливих подій: «правильне виявлення», «правильне виявлення» та «хибну тривогу», внаслідок чого $P_I = 1 - R_{I.R.}$, де $R_{I.R.}$ визначається із виразу (7). Таким чином, цілісність координатної інформації залежних систем спостереження визначає імовірність того, що інформація про координати повітряного судна, що передається в повідомленнях залежних систем спостереження та використовується диспетчером в цілях управління повітряним рухом, не містить невиявлених помилок, які перевищують поріг R_s .

Висновки

Отримані результати дозволяють зробити висновки:

- показано, якщо різниця координат двох незалежних вимірювань одного і того ж положення повітряного судна більше деякої наперед заданої величини, то передбачається, що якість координатної інформації залежної системи спостереження, що розглядається, незадовільна і подається сигнал тривоги;

- цілісність координатної інформації зазначених залежних систем спостереження визначає імовірність того, що радіолокаційна інформація про координати повітряного судна, які передаються в повідомленнях залежних систем спостереження та використовуються диспетчером в цілях управління повітряним рухом, не містить невиявлених помилок, які перевищують поріг встановленого радіуса утримання.

Список літератури:

1. Neindre F. L., Ferre G., Dallet D., Letellier F., and Pitois K., A successive interference cancellation-based receiver for Secondary Surveillance Radar // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 1–12, 2022. doi:10.1109/taes.2022.3193649
2. Свид І.В., Обод І.І. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий» : монографія. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 254 с.
3. Gao J., Zou J., and Guo N. A secondary surveillance radar data analysis technique based on geometrical method // *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pp. 707–715, Jun. 2019.
4. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Структура та показники якості обробки інформації систем спостереження повітряного простору // *Системи обробки інформації*. 2013. № 8(115). С. 80–83.
5. Kim W.-H., Jung S.-Y., Lee Y.-S., and Chang S.-M. Mark XIIA (Mode 5) IFF system integration and certification test for surface to air missile system // *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 160–168, Apr. 2022.
6. Обод І.І., Свид І.В. Порівняльний аналіз якості виявлення повітряних об'єктів запитальними системами спостереження // *Системи обробки інформації*. 2010. Вип. 9 (90). С. 74–76.
7. Svyd I. V. Comparative analysis of the quality of detection of air objects by secondary radar systems // *Radiotekhnika*. 2023. № 213. P. 78–87. doi:10.30837/rt.2023.2.213.09.
8. Васишин В.І., Лебедев В.О., Висоцький О.В., Коцюба В.П. Вторинна радіолокація як основа сучасних систем спостереження за повітряною обстановкою // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2021. № 2(43). С. 94–103. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.13>.
9. Обод І.І., Шевцова В.В. Порівняльний аналіз запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // *36. наук. пр. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил*. 2013. № 1(34). С. 123–125.
10. Svyd I. et al. Optimal measurement of signal data parameters of requesting radar systems, 2021 // *IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2021. doi:10.1109/ukrcon53503.2021.9575235
11. Obod I. I. Integrated coordinate-and-time support for the Address Inquiry in the secondary radar systems // *Telecommunications and Radio Engineering*. 1999. Vol. 53, No 3. P. 54–56, doi:10.1615/telecomradeng.v53.i3.100

12. Свид І.В. Показники якості інформаційного забезпечення користувачів сполученими системами спостереження повітряного простору // Радіотехніка. 2011. Вип. 165. С. 157–160.
13. Beel J. J. Anti-UAV Defense For Ground Forces and Hypervelocity Rocket Lethality Models, Monterey, California : Naval Postgraduate School, 1992. P. 36–46.
14. Moses A., Rutherford M. J., and Valavanis K. P. Radar-based detection and identification for Miniature Air Vehicles // 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 2011. doi:10.1109/csa.2011.6044363
15. Sadasivan S., Gurubasavaraj M., Sekar S.R. Acoustics signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation // Eronautical DEF SCI J. 2001. Vol. 51, № 3. P. 279–283.
16. Svyd I. et al., Optimizing the request signals detection of aircraft secondary radar system transponders // 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2022. doi:10.1109/elnano54667.2022.9926991
17. Обод І.І., Стрельницький О.О. Інформаційна безпека інформаційної мережі систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2015. № 9(134). С. 96–98.
18. Dhripu T. M., Rishabh V., and Rajesh R. Identification friend or foe mode code detection using Deep Pulse Detector Network // Journal of Aerospace Information Systems. 2023. Vol. 20. No. 1, P. 17–24.
19. Semenets V. et al. Method of increasing the relative throughput of requesting radar systems // Przegląd Elektrotechniczny. 2022. Vol. 1, No. 11. P. 99–103, doi: 10.15199/48.2022.11.17.
20. Обод І.І., Шевцова В.В. Пропускна спроможність відповідачів запитальних систем передачі польотної інформації // Системи обробки інформації. 2013. № 1(108). С. 105–108.
21. Andrushevich V., Obod I. Assessment of the quality of information support by air radar surveillance systems // Advanced Information Systems. 2021. Vol. 5, No. 2. P.78–82. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.10>.
22. Pavlova D. B. et al. Comparative analysis of data consolidation in Surveillance Networks // 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 2019. doi:10.1109/dessert.2019.8770008.
23. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Методи підвищення якості інформаційного забезпечення системами спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2014. № 4(120). С. 53–55.
24. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони / В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. Київ : МОУ, 2004. 342 с.
25. Федоров А.В., Дергоусов М.Ю., Шевченко О.О., Пилипович О.М., Сердюк О.В. Визначення координат повітряних об'єктів системою приймачів ADS-B з застосуванням технології MLAT в умовах багатоцільової обстановки // Системи обробки інформації. 2022. № 1 (168). С. 43–51. <https://doi.org/10.30748/soi.2022.168.05>.

Надійшла до редколегії 17.02.2024

Відомості про авторів:

Свид Ірина Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна; email: iryna.svyd@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4635-6542>

Ігнатюк Іван Валентинович – магістрант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: ivan.ihnatiuk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1988-543X>

Шуніборов Олег Дмитрович – магістрант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: oleh.shuniborov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0352-0027>

Майстренко Галина Валеріївна – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: halyna.maistrenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8126-9997>

Туленко Михайло Володимирович – старший викладач кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна; email: super-tulenko@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4484-2069>