

М.І. Чернишев, В.В. Куценко

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

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ БПЛА РІЗНИЦЕВО-ДАЛЕКОМІРНИМ МЕТОДОМ В РУХОМІЙ СИСТЕМІ ПАСИВНОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ ЗЕНІТНИХ КОМПЛЕКСІВ МАЛОЇ ДАЛЬНОСТІ

У статті проведена оцінка точності визначення місця розташування радіовипромінюючих цілей різницево-daleкомірним методом в рухомій системі пасивної радіолокації (РСПЛ) на базі зенітних комплексів малої дальності (ЗК МД), з метою покращення визначення координат безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в зоні проведення антитерористичної операції (АТО). Отримані залежності дозволяють вибрати оптимальне з точки зору отримання мінімальних помилок виміру координат БПЛА розташування прийомних пунктів, покращити здатність вчасного виявлення БПЛА противника, що дозволить збільшити ефективність його знищення.

Ключові слова: триангуляція, пасивна радіолокація, БПЛА, різницево-daleкомірний метод.

Вступ

Постановка проблеми. Однією з головних проблем, що виникають перед підрозділами протиповітряної оборони Сухопутних військ в зоні проведення АТО, є забезпечення необхідної точності визначення координат малорозмірних БПЛА, захоплення на супроводження та знищення або недопущення виконання нею бойового завдання.

Тому, пошук технічних та теоретичних рішень забезпечення необхідної точності визначення координат малорозмірних БПЛА є досить актуальним, до таких рішень відноситься і використання інформаційних засобів які використовують методи пасивної радіолокації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій показує, що функціонування подібних систем є відомим та розглядається в [1–10].

У роботах [1; 2; 4] питання точності розглядаються стосовно задачі визначення дальності до радіовипромінюючих цілей в прямокутній системі координат в інтересах зенітних комплексів ближньої дії.

У роботах [3; 5–8] розглядаються питання визначення просторових координат радіовипромінюючих цілей кутомірними двобазовими системами. В інтересах зенітних комплексів (ЗК) малої дальності (МД) основні залежності для визначення точності вимірювання координат набувають дещо інший вигляд. Очевидно, що завдання оцінювання точності виміру координат БПЛА з урахуванням зазначених особливостей являє собою практичний інтерес.

Мета статті. Проведення оцінки точності визначення положення БПЛА різницево-daleкомірним методом в РСПЛ на базі зенітних комплексів малої дальності.

Виклад основного матеріалу

При різницево-daleкомірному методі безпосереднє вимірювання координат цілі не проводиться [13–14]. Як дальність до цілі, так і її кутові координати розраховуються за виміряним різниці відстаней від цілі до пунктів прийому. Він може застосовуватися тільки за наявності кооперативного прийому сигналів від цілі на рознесених в просторі пеленгатори.

Для практичного застосування різницево-daleкомірному методу у РСПЛ необхідне знання кількісних показників точності визначення місцезнаходження її складових, при різних просторових положеннях щодо цілі. Оскільки в цих системах точність визначення місцезнаходження залежить не тільки від точності пристроїв пеленгації, але і від "геометрії" системи визначення місцезнаходження, то в багатопозиційній системі можливо управляти точністю оцінювання координат цілей за рахунок зміни положення бойових машин (БМ), що утворюють цю систему.

З урахуванням особливостей бойового застосування ЗК МД та аналізуючи загальні принципи побудови багатопозиційних активно-пасивних систем радіолокації [1–14], можна виділити кілька варіантів побудови БМ ЗК МД при організації РСПЛ, один з яких представлений на рис. 1.

На рис. 1 наведено бойовий порядок батареї ЗК МД, побудований в прямокутній системі координат з масштабом 500 м, причому початок системи координат поєднано з точкою стояння командного пункту. У загальному випадку координати БМ задаються набором величин x_i, y_i, z_i , де z_i – висота антени пасивного радіопеленгатора в РСПЛ ЗК МД. У припущенні, що висоти стояння різних БМ на місцевості несуттєво відрізняються один від одного, то для

спрощення подальших розрахунків припустимо, що $z_i = 0$.

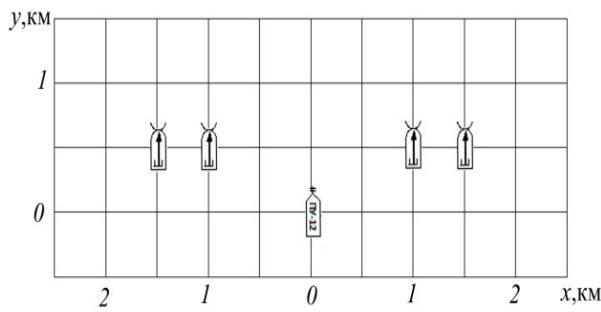


Рис. 1. Координатне представлення бойового порядку батареї в обороні

РСПЛ являє собою комплекс пасивної локації в складі кількох (як правило, чотирьох ідентичних) пасивних радіопеленгаторів (ПРП), кожен з яких розміщений на своїй БМ ЗК МД. Відстань між БМ не перевищує 3000 метрів. ПРП незалежно, шляхом огляду по частоті в межах виділених діапазонів, здійснюють виявлення випромінювань каналу управління БпЛА і вимір їх параметрів.

Для визначення координат БпЛА в РСПЛ ЗК МД доцільно використовувати різницево-далекомірний метод пасивної радіолокації. Цей метод дозволяє визначити координати x_u, y_u, z_u по одному вимірюваному параметру – часу приходу сигналу на ПРП. Знаючи час приходу сигналу на кожну прийомну позицію t_i , можна знайти відстань $R_{ui} = c \cdot t_i$ до цілі від приймальної позиції [13–14].

$$R_{ui} = \sqrt{x_u^2 + y_u^2 + z_u^2} - \sqrt{(x_u - x_i)^2 + (y_u - y_i)^2 + (z_u - z_i)^2}, \quad (1)$$

де $i = 1 \dots 3$ номери приймальних позицій.

Для визначення просторових координат БпЛА необхідно знати три незалежно виміряних різниці відстаней до цілі, тобто використовувати чотири прийомних позицій. На підставі (1) можна скласти систему рівнянь (2), вирішуючи яку, щодо координат командного пункту, можна знайти просторові координати БпЛА x_u, y_u, z_u .

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{x_u^2 + y_u^2 + z_u^2} - \sqrt{(x_u - x_1)^2 + (y_u - y_1)^2 + (z_u - z_1)^2}; \\ R_2 = \sqrt{x_u^2 + y_u^2 + z_u^2} - \sqrt{(x_u - x_2)^2 + (y_u - y_2)^2 + (z_u - z_2)^2}; \\ R_3 = \sqrt{x_u^2 + y_u^2 + z_u^2} - \sqrt{(x_u - x_3)^2 + (y_u - y_3)^2 + (z_u - z_3)^2}, \end{cases} \quad (2)$$

де x_i, y_i, z_i – координати використовуваних приймальних пунктів (БМ) (рис. 1);

R_i – похила дальність від відповідної приймальної позиції до БпЛА.

Однак необхідно дізнатися з якою точністю вони визначаються, і чи буде її достатньо для проведення стрільби по БпЛА. Для цього проведемо оцінку середньоквадратичної помилки визначення координат БпЛА в запропонованій системі координат РСПЛ ЗК МД методом статистичних випробувань з розміром статистичної вибірки $N = 500$, яка забезпечує необхідну достовірність отриманих результатів.

Припустимо, що середня квадратична помилка визначення часу приходу сигналу від БпЛА на ПРП БМ $\sigma_{ti} = 10^{-8}$ с розподілена за нормальним законом, координати прийомних БМ незмінні, висота польоту ПЦ z_u становить 800 м.

Отже, для проведення подальших розрахунків обираємо дві дальності:

- необхідна дальність виявлення БпЛА для БМ "Оса-АКМ", при якій БпЛА може бути вражено на дальній границі зони поразки дорівнює 15420 м;

- відстань до ближньої межі зони постановки вогневої задачі для БМ "Оса-АКМ", при якій БпЛА може бути вражено на ближній границі зони поразки дорівнює 4620 м;

- розглянемо помилку визначення координат для двох випадків: БпЛА знаходиться під однаковими кутами місця по відношенню до БМ і під різними кутами місця по відношенню до БМ.

Використовуючи вираз (2) знайдемо апроксимацію рядом Тейлора величини сумарної дальності при сумарно-далекомірному методі визначення координат розкриваючи рівняння та скорочуючи отримуємо сумарні помилки місцевизначення (відхилень від КП, що є центом координат) величин помилок азимуту, дальності, висоти. Побудуємо на площині значення цих помилок відносно КП – початку координат. Для кожної дальності та варіанту нальоту цілі, будуть побудовані відповідні графіки, що відповідатимуть середньоквадратичним відхиленням координат БпЛА.

Побудуємо графіки, що відповідатимуть нальоту БпЛА під однаковими кутами місця по відношенню до БМ бойового порядку батареї ЗК МД.

Коли БпЛА знаходиться на розрахунковій необхідній дальності виявлення для БМ "Оса-АКМ" і має координати $x_u = 0, y_u = 15620$ середньоквадратична помилка матиме такий вигляд (рис. 2).

Коли БпЛА знаходиться на ближній межі зони постановки вогневої задачі для БМ "Оса-АКМ", при якій може бути вражений на ближній границі зони поразки і має координати $x_u = 0, y_u = 4620$, середньоквадратична помилка матиме такий вигляд (рис. 3).

Результати статистичних випробувань за оцінкою середньоквадратичної помилки визначення ко-

ординат БпЛА, зображених на рис. 2–3 наведені в табл. 1.

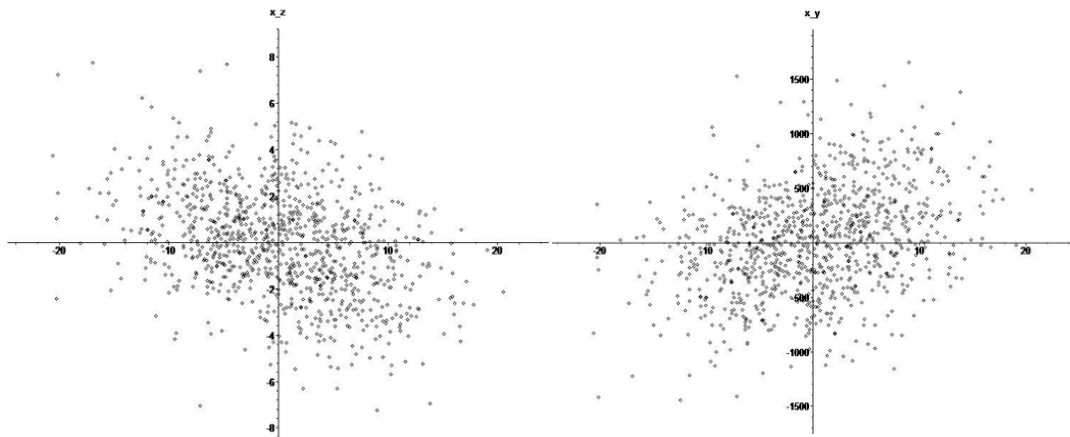


Рис. 2. Середньоквадратична помилка виміру координат БпЛА ($x_{ц} = 0$, $y_{ц} = 15620$)

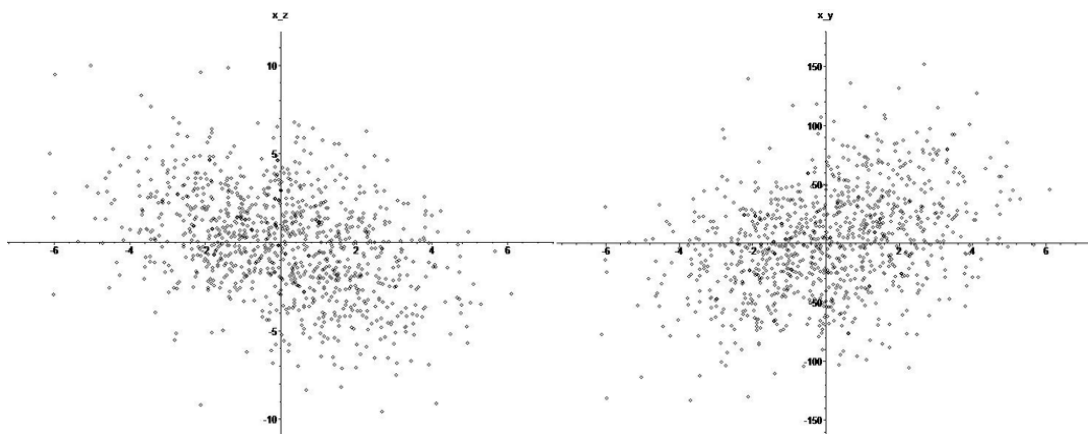


Рис. 3. Середньоквадратична помилка виміру координат БпЛА ($x_{ц} = 0$, $y_{ц} = 4620$)

Використовуючи умови, наведені у попередню побудуємо графіки, що відповідатимуть нальоту БпЛА під різними кутами місця по відношенню до БМ бойового порядку батареї ЗК МД.

Коли БпЛА знаходиться на розрахунковій не

обхідній дальності виявлення для БМ "Оса-АКМ" і має координати і ціль матиме координати $x_{ц} = 1500$, $y_{ц} = 15420$ середньоквадратична помилка матиме такий вигляд (рис. 4).

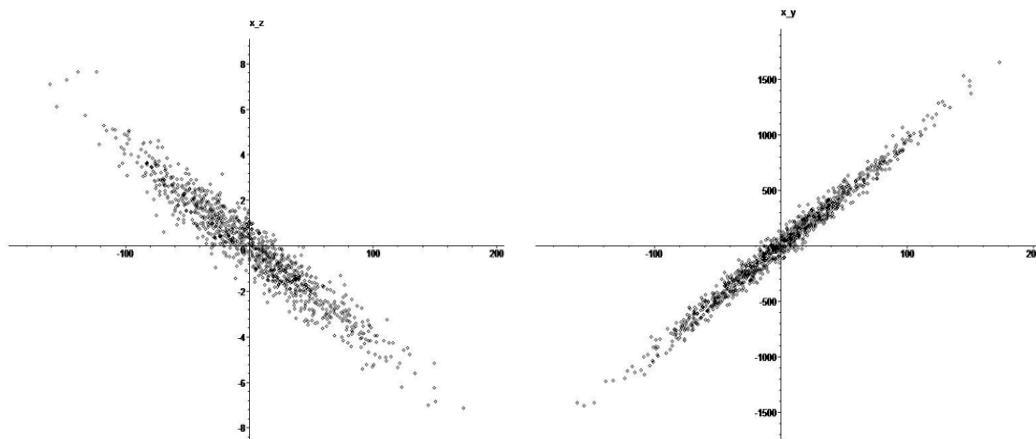


Рис. 4. Середньоквадратична помилка виміру координат БпЛА ($x_{ц} = 1500$; $y_{ц} = 15620$)

А коли ціль знаходиться на ближньому рубежі видачі цілевказівки на БМ ЗК МД і має координати $x_{ц} = 1500$; $y_{ц} = 4620$, середньоквадратична помилка матиме такий вигляд (рис. 5)

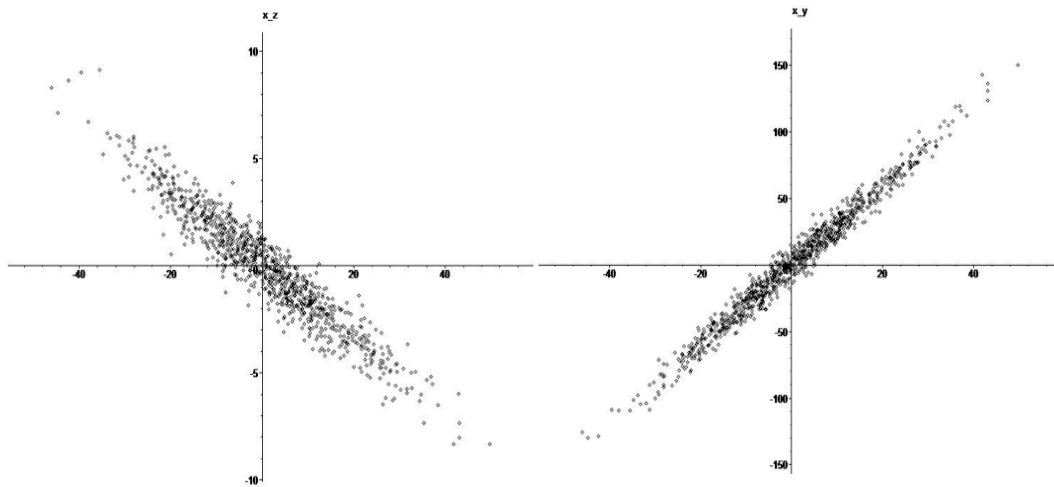


Рис. 5. Середньоквадратична помилка координат БпЛА ($x_{ц} = 1500$; $y_{ц} = 4620$)

Таблиця 1

Результати статичних випробувань

Координати цілі	Перетин області середньоквадратичної помилки визначення координат цілі, м	
	X – Y	X – Z
	2	3
$x_{ц} = 0$; $y_{ц} = 15420$	X=-6,1 – 6,1 Y=-420 – 420	X=-1,8 – 1,8 Z=-4 – 4
$x_{ц} = 0$; $y_{ц} = 4620$	X=-1,81 – 1,81 Y=-37,7 – 37,7	X=-2,14 – 2,14 Z=-1,24 – 1,24
$x_{ц} = 1500$; $y_{ц} = 15420$	X=-39,4 – 39,4 Y=-411 – 411	X=-1,7 – 1,1 Z=-39,4 – 39,4
$x_{ц} = 1500$; $y_{ц} = 4620$	X=-11,4 – 11,4 Y=-37,7 – 37,3	X=-1,23 – 1,23 Z=-11,7 – 11,7

Висновок

З аналізу даних наведених в табл. 1 випливає, що помилки вимірювання координат при різницево-далекомірному методі є несуттєвими і при деяких положеннях БпЛА мають значення порівняні з його розмірами. Ці помилки зменшуються під час наближення до позицій БМ і в разі, коли ціль знаходиться під однаковими кутами місця по відношенню до БМ.

Отримані залежності дозволяють вибрати оптимальне з точки зору отримання мінімальних помилок виміру координат БпЛА розташування БМ з ПРП.

Список літератури

1. Куценко В.В. Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distancemeasuring passive location method / В.В. Куценко, С.П. Коваленко, Д.Д. Добровольський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 1. — С. 82-84. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.
2. Ермаков Г.В. Анализ точности измерения координат воздушных целей при разностно-дальномерном методе пассивной радиолокации / Г.В. Ермаков, В.В. Куценко, С.Н. Телюков / Системи обробки інформації. – 2011. – № 8. – С. 70-74.
3. Способы оценивания точности определения местоположения источников радиоизлучения пассивной угломерной двухпозиционной бортовой радиолокационной системой / В.В. Дрогалин, В.А. Ефимов, А.И. Канащенко, В.И. Меркулов и др. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – № 5. – С. 22-38.
4. Куценко В.В. Оценивание точности определения местоположения радиоизлучающих целей триангуляционным методом в подвижной системе пассивной радиолокации зенитных комплексов ближнего действия / В.В. Куценко, Г.В. Ермаков, С.Н. Телюков, Г.М. Дементюк // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2010. – № 4. – С. 77-82.
5. Корсунов Н.И. Математическая модель определения пространственных координат методом пассивной радиолокации / Н.И. Корсунов, Д.В. Егоров [Електронний ресурс] Режим доступу: www.cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-opredeleniya-prostranstvennyh-koordinat-metodom-passivnoy-radiolokatsii.
6. Булычев Ю.Г. Оптимальное оценивание координат местоположения летательных аппаратов на базе пассивных угломерно-плоскостных систем / Ю.Г. Булычев, С.В. Ливинский, В.Н. Соловьев [Електронний ресурс] Режим доступу

www.cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-otsenivanie-koordinat-mestopolozheniya-letatelnyh-apparatov-na-baze-passivnyh-uglomerno-ploskostnyh-sistem.

7. Лешко, Н.А. (2015). Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета / Н.А. Лешко, И.С. Ашурков // Труды МАИ, (83). – С. 27-27.

8. Perruchot, Ludovic, et al. "Airborne optoelectronic equipment for imaging, monitoring and/or designating targets." U.S. Patent Application No. 15/325,044. [Електронний ресурс] Режим доступу: www.patents.google.com/patent/US20170214879A1/en.

9. Pozdniakov Y.K. Increase of accuracy of definition of coordinates by multi-position passive complexes on a basis of difference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions / Y.K. Pozdniakov, V.N. Tkachenko, V.V. Korotkov // Radio electronics and Communications Systems. – 2014. – Vol. 57, No. 9. – 394 p.

10. Tkachenko V.N. New methods for radio sources coordinates determination in the multi position passive radar system / V.N. Tkachenko, Y.K. Pozdnyakov, R.L. Pantyeyev // Conference: 2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Year: 2016, Page 259 DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783156.

11. Вчасно виявити – значить вчасно відреагувати [Електронний ресурс] Режим доступу: www.defence-ua.com/index.php/statti/258-vchasno-viyaviti-znachit-vchasno-vidreaguвати.

12. Справочник участника АТО: вооружение и военная техника Вооруженных сил Российской Федерации / А.Н. Алимиев, Г.В. Певцов, Д.А. Гриб и др. / под общ. ред. А.М. Алимиева. – Х. Оригинал, 2015 – 732 с.

13. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

14. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю.Г. Сосулин. – М.: Радио и связь, 1992. – 480 с.

References

1. Kutsenko, V.V., Kovalenko, S.H. and Dobrowolski, D.D. (2017), Parameters numerical values of errors distribution in a coordinate measuring process at the difference-distance measuring passive location method. *Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine*, No. 1, pp. 82-84, <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.

2. Ermakov, G.V., Kutsenko, V.V. and Telyukov, S.N. (2011), "Analiz tochnosti izmereniya koordinat vozdukhnykh tseley pri raznostno-dalnomernom metode passivnoy radiolokatsii" [The analysis of measurement accuracy of coordinates of air targets at a difference and ranging method of a passive radar-location], *Systems information processing*, No. 8(98), pp. 70-74.

3. Drogalin, V.V., Yefimov, V.A., Kanashchenkov, A.I. and Merkulov, V.I. (2003), "Puti otsenki tochnosti pozitsionirovaniya istochnikov passivnoy goniometricheskoy bortovoy radiolokatsionnoy sistemy radioizlucheniya" [Ways of estimation of accuracy of positioning of sources of a radio emission passive goniometric on-off onboard radar-tracking system], *The successes of modern radio electronics*. No. 5, pp. 22-38.

4. Kutsenko, V.V., Ermakov, G.V., Telyukov, S.N. and Dementiyuk, G.M. (2010), "Otsenivaniye tochnosti opredeleniya mesto-polozheniya radioizluchayushchikh tseley triangulyatsionnym metodom v podvizhnoy sisteme passivnoy radiolokatsii zenitnykh kompleksov blizhnego deystviya" [Estimation of accuracy of determination of location of the radio radiating purposes by a triangulable method in a relative frame of reference of a passive radar-location of short-range surface-to-air missile systems], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 4, pp. 77-82.

5. Korsunov, N.I. and Egorov, D.V. "Matematicheskaya model' opredeleniya prostranstvennykh koordinat metodom passivnoy radiolokatsii" [Mathematical model of definition of spatial coordinates by method of a passive radar-location], www.cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-opredeleniya-prostranstvennykh-koordinat-metodom-passivnoy-radiolokatsii.

6. Bulychev, Yu.G., Livinsky, S.V. and Soloviev, V.N. "Optimal'noye otsenivaniye koordinat mestopolozheniya letatelnykh apparatov na baze passivnykh uglomerno-ploskostnykh sistem" [Optimal estimation of the coordinates of the location of aircraft on the basis of passive angular-planar systems], www.cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-otsenivanie-koordinat-mestopolozheniya-letatelnyh-apparatov-na-baze-passivnyh-uglomerno-ploskostnyh-sistem.

7. Leschko, N.A. and Ashurkov, I.S. (2015), Raschet rabochey zony mnogopozitsionnoy radiolokatsionnoy sistemy po storon-nemu istochniku podsveta [Calculation of the working area of the multi-position radar system on the side of the source of the illumination], *Proceedings of the MAI*, No. 83, pp. 27-27.

8. Perruchot, Ludovic, et al. "Airborne optoelectronic equipment for imaging, monitoring and/or designating targets." U.S. Patent Application No. 15/325,044. www.patents.google.com/patent/US20170214879A1/en.

9. Pozdniakov, Y.K., Tkachenko, V.N. and Korotkov, V.V. (2014), Increase of accuracy of definition of coordinates by multi-position pas-sive complexes on a basis of difference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions, *Radio electronics and Communications Systems*, Vol. 57, No. 9, p. 394.

10. Tkachenko, V.N., Pozdnyakov, Y.K. and Pantyeyev, R.L. (2016), New methods for radio sources coordinates determination in the multi position passive radar system. *Conference: 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, p. 259, <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2016.7783156>.

11. "Vchasno vyavity – znachyt vchasno vidreahuвати" [In time to detect – it means to respond in a timely manner] www.defence-ua.com/index.php/statti/258-vchasno-viyaviti-znachit-vchasno-vidreaguвати.

12. Alimiev, A.M., Pevtsov, G.V., Grib, D.A. and others (2015), "Dovidnyk uchasnyka ATO: ozbroiennia i viiskova tekhnika Zbroinykh syl Rosiiskoi Federatsii" [Directory of participants of the CTO: Arms and Military Equipment of the Armed Forces of the Russian Federation], For zag Ed. Alimpiev, A.M., Original, Kharkiv, 732 p.

13. Chernyak, V.S. (1993), "Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya" ["Multiposition radiolocation"], Radio and Communication, Moscow, 416 p.

14. Sosulin, Yu.G. (1992), "Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii i radionavigatsii" [Theoretical foundations of radar and radio navigation], Radio and Communication, Moscow, 480 p.

Надійшла до редколегії 19.04.2018

Схвалена до друку 22.05.2018

Відомості про авторів:

Чернишев Максим Ігорович

бакалавр
курсант Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5912-138X>

Куценко Володимир Валерійович

кандидат технічних наук
старший викладач Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4174-2145>

Information about the authors:

Maksym Chernyshev

Bachelor
Cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5912-138X>

Vladimir Kutsenko

Candidate of Technical Sciences
Senior Instructor of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4174-2145>

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ БПЛА РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫМ МЕТОДОМ В ПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ЗЕНИТНЫХ КОМПЛЕКСОВ МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ

В.В. Куценко, М.И. Чернышов

В статье проведена оценка точности определения местоположения радиоизлучающих целей разностно-дальномерным методом в подвижной системе пассивной радиолокации (ПСПЛ) на базе зенитных комплексов малой дальности (ЗК МД), с целью улучшения определения координат беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в зоне проведения антитеррористической операции (АТО). Полученные зависимости позволяют выбрать оптимальное с точки зрения получения минимальных ошибок измерения координат БПЛА расположения приемных пунктов, улучшить способность своевременного выявления БПЛА противника, что позволит увеличить эффективность его уничтожения.

Ключевые слова: триангуляция, пассивная радиолокация, БПЛА, разностно-дальномерный метод, зона АТО.

ASSESSMENT OF ACCURACY OF DEFINITION OF POSITION OF THE UAV BY A DIFFERENCE-RANGING METHOD IN THE MOVING SYSTEM OF A PASSIVE RADAR-LOCATION IN AIR DEFENSE COMPLEXES GROUND FORCES OF SMALL RANGE

V. Kucenko, M. Chernyshev

One of the main problems arising before divisions of air defense of Ground forces in a zone of carrying out the anti-terrorist operation (ATO) is ensuring the required accuracy of determination of coordinates of small-sized UAVs, capture on maintenance and destruction or prevention of execution of a fighting task by it. Therefore searching of technical and theoretical solutions of ensuring the required accuracy of determination of coordinates of small-sized UAVs is very relevant, use of informational tools which use methods of a passive radar-location also belongs to such decisions.

In article assessment of accuracy of determination of coordinates of radio of the radiating purposes by a difference-ranging method in a relative frame of reference of a passive radar-location based on antiaircraft missile systems of small range, for the purpose of improvement of determination of coordinates of the UAV in a zone of conducting ATO is carried out.

Follows from the analysis of the provided data that biases of coordinates at difference-ranging a method are unessential and at some provisions of the UAV equal to its sizes. These mistakes decrease at an approximation to receiving positions. The received dependences allow choosing an arrangement of places of acceptance, optimum from the point of view of receiving minimum biases of coordinates of the UAV, to improve ability of well-timed detection of the UAV of the opponent that will allow increasing effectiveness of his destruction.

Keywords: triangulation, passive radar-location, UAV, difference-ranging method, anti-terrorist operation (ATO) zone.