

К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. И. Мельничук¹, Н. В. Горячев², Н. К. Юрков³

¹ Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков
имени Героя Советского Союза А. К. Серова МО РФ, Ртищево, Саратовская обл., Россия
^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ pelmenio@mail.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Дается подход к проблеме обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Рассмотрены возможные варианты построения многопозиционной радиолокационных станций (МП РЛС) для обнаружения БПЛА с использованием сигналов передатчиков, расположенных на аэростатах. *Материалы и методы.* Предложено несколько вариантов построения многопозиционных систем в зависимости от количества приемных позиций и используемых передатчиков. Рассмотрен алгоритм оценки координат обнаруженного объекта в отдельной многочастотной радиолокационной системе с приемной позицией и несколькими различными типами передатчиков многопозиционной РЛС, расположенной на аэростатах. *Результаты и выводы.* Осуществлен выбор структуры, схемы построения МП РЛС, а также метода определения координат летящей цели.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, противодействие БПЛА, обнаружение малогабаритных БПЛА, многопозиционная радиолокационная станция, увеличение дальности обзора, РЛС на привязных аэростатах, разностно-дальномерный метод, полуактивная МП РЛС

Для цитирования: Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме синтеза многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 33–41. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-4

ON THE PROBLEM OF SYNTHESIS OF A MULTI-POSITION RADAR DETECTION STATION UNMANNED AERIAL VEHICLES

A.I. Mel'nichuk¹, N.V. Goryachev², N.K. Yurkov³

¹ Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after Hero
of the Soviet Union A.K. Serov of Russian Ministry of Defense, Rtishchevo, Saratov Region, Russia
^{2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹ pelmenio@mail.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* An approach to the problem of detection of unmanned aerial vehicles (UAVs) is given. Possible options for building a multi-position radar station (MP radar) for detecting UAVs using signals from transmitters located on balloons are considered. *Materials and methods.* Several options for constructing multi-position systems are proposed, depending on the number of receiving positions and the transmitters used. An algorithm for estimating the coordinates of a detected object in a separate multi-frequency radar system with a receiving position and several different types of transmitters of a multi-position radar located on balloons is considered. *Results and conclusions.* The choice of the structure, scheme for constructing the MP radar, as well as the method for determining the coordinates of a flying target has been made.

Keywords: unmanned aerial vehicles, UAV countermeasures, detection of small-sized UAVs, multi-position radar station, increase in viewing range, radar on tethered balloons, difference-range method, semi-active MP radar

For citation: Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of synthesis of a multi-position radar detection station unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3): 33–41. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-4

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты находят свое применение во многих сферах деятельности, даже в тех, где ранее их применение считалось невозможным. Увеличение численности применяемых БПЛА и ДПЛА, а также их доступность породили проблемы, связанные с различными аспектами жизнедеятельности общества. БПЛА могут применяться не только в мирных целях, но уже доработанные террористическими организациями гражданские модели несут угрозу здоровью и жизни людей, осуществляют разведку. Также создаются угрозы применения БПЛА для организации контрабанды, нанесению ущерба промышленных объектов, которые могут влиять на целые сектора экономики не только отдельных стран, но и мировых рынков.

При осуществлении противодействия БПЛА И ДПЛА одной из главных задач является задача пространственного обнаружения летательного аппарата. Своевременное обнаружение дает возможность эффективно противодействовать работе дронов, поэтому непрерывная работа средств обнаружения очень важна. Ввиду конструктивных особенностей дронов, малогабаритных размеров для обнаружения БПЛА и ДПЛА применяют как активные системы, так и пассивные.

Противодействуют БПЛА и ДПЛА комплексы ПВО, обладающие большой огневой мощностью, а также мощные РЛС, подходящие для противодействия средних и больших БПЛА, авиации, требуют больших финансовых затрат по сравнению со стоимостью малогабаритных дронов. Ракетное вооружение и управляемые снаряды затратны. Также своевременному обнаружению малогабаритных БПЛА мешают рельеф и плотная городская застройка, поэтому увеличение мощности, разработка перспективных ФАР и АФАР не всегда являются решением задачи. В данном случае предлагается решить задачу путем поднятия на определенную высоту небольшой двухчастотной многопозиционной РЛС для увеличения дальности обзора.

В данной работе описываются предлагаемые разновидности построения активной многопозиционной РЛС, расположенной на привязных аэростатах, для обнаружения малогабаритных БПЛА, в целях своевременного обнаружения и принятия решения. В построении многопозиционной РЛС могут использоваться как разное количество передатчиков, расположенных на аэростатах, так и разное количество приемных позиций, расположенных на земной поверхности.

Структурная схема построения МП РЛС по обнаружению БПЛА

Схема размещения модулей ПРД и ПРМ определяется поставленной задачей, в соответствии с этим форма зоны обзора может быть различная.

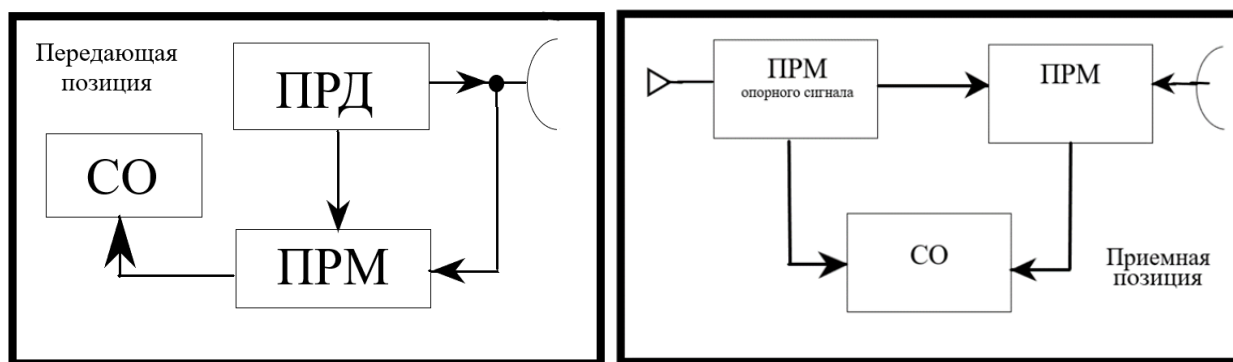


Рис. 1. Структурная схема полуактивной РЛС

Для обнаружения малогабаритных БПЛА целесообразно использовать небольшие МП РЛС. Позиции содержат модули передатчиков (ПРД) и модули приемников (ПРМ), которые работают в дециметровом и сантиметровом диапазоне волн, который описывается как рекомендуемый для обнаружения БПЛА. В полуактивной РЛС используются две разнесенные в пространстве разные позиции: приемная и передающие.

Варианты построения многопозиционной полуактивной радиолокационной системы

Тенденции развития радиоэлектронной техники в сфере радиолокационного обнаружения летательных аппаратов связаны с решением задач увеличения дальности обнаружения, повышения функциональных возможностей, совершенствованием основных характеристик.

В соответствии с решаемыми задачами используются многопозиционные радиолокационные системы. Они сложнее однопозиционных, но обладают положительными качествами: повышается надежность (устойчивость) работы системы при отказе отдельных позиций, входящих в систему. Также улучшаются такие характеристики, как надежность оценки параметров наблюдаемого объекта, точность системы, возможность сформировать сложную пространственную зону обзора.

Многопозиционная РЛС – система, состоящая из приемной(ых) позиции(ий) и передающих позиций, обработка сигналов которых выполняется в пункте обработки информации.

Варианты построения МП РЛС могут быть рассмотрены в нескольких вариациях:

1. С несколькими источниками, расположенными на аэростате, принимает отраженный сигнал одна приемная позиция (рис. 2).

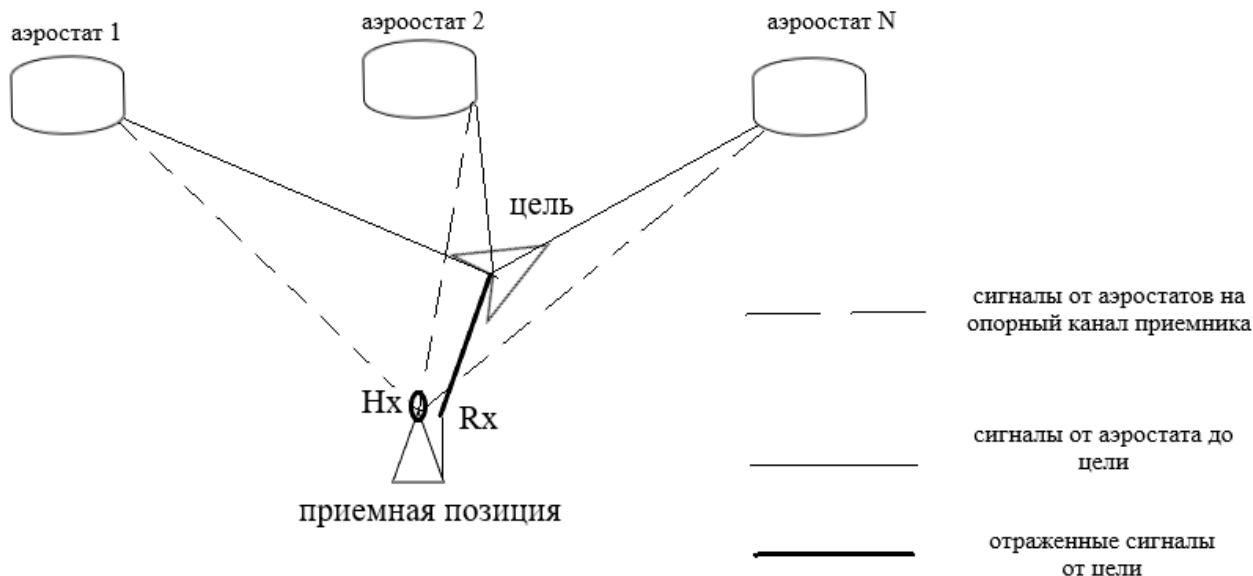


Рис. 2. Структура МП РЛС с множеством передатчиков

2. С несколькими позициями приема и одним передатчиком (каждый системный компонент «РЛС аэростата – цель – приемная позиция» может быть представлена как отдельная бистатическая ПАРЛС) (рис. 3).

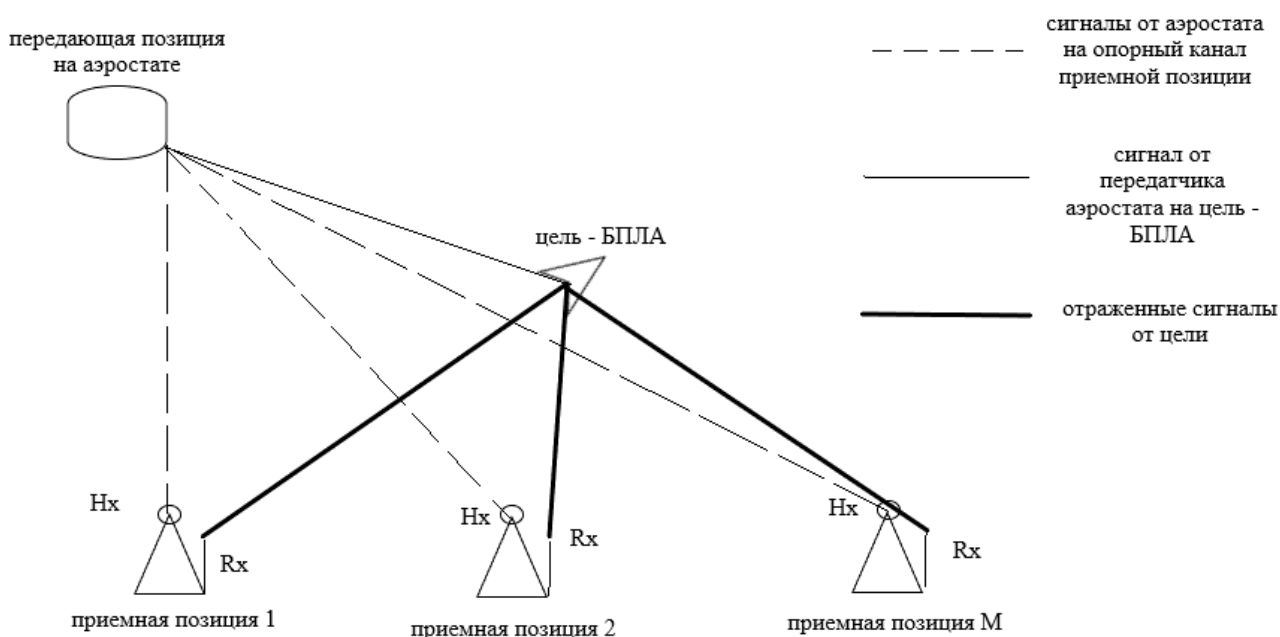


Рис. 3. Структура МП РЛС с множеством приемников

3. С несколькими позициями приема и несколькими передатчиками (РЛС на аэростатах) – более сложная (рис. 4).

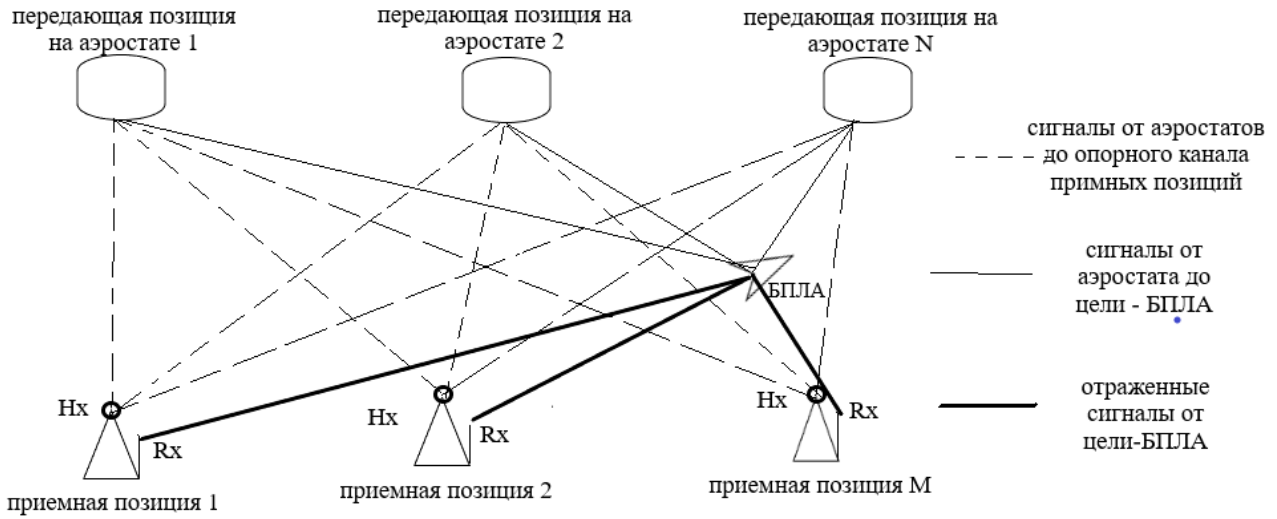


Рис. 4. Структура МП РЛС с распределенным множеством приемников и передатчиков

Обработка информации может быть организована также в нескольких вариантах. В любом из представленных вариантов возможна обработка информации в каждой отдельной приемной позиции, после чего обработанная информация подается в центр обработки информации. Центром обработки может выступать как одна позиция приема, так и несколько таких позиций. Также возможен прием не обработанной информации сразу на центр обработки информации, где она обрабатывается и объединяется с последующим отображением воздушной обстановки.

Исходя из вышеописанного, РЛС может быть реализована по нескольким схемам:

- а) один передатчик и несколько приемных позиций M ;
- б) несколько передатчиков N и одна приемная позиция;
- в) несколько приемников M и несколько передатчиков N .

Системность и комплексность подхода к задаче мониторинга воздушного пространства в интересах противодействия БПЛА и ДПЛА и создания единой системы эшелонированной ПВО (создания единого информационного поля для борьбы со всеми типами летательных аппаратов). Предполагается, что все рассмотренные варианты построения многопозиционной РЛС должны быть в дальнейшем интегрированы с другими используемыми системами.

Определение координат цели в МП РЛС

При построении многопозиционной РЛС, реализованной по схеме с несколькими передатчиками, расположенными на аэростатах, и одним приемником, расположенным на земной поверхности, целесообразно воспользоваться следующим алгоритмом определения координат цели с использованием разностно-дальномерного метода.

В прямоугольной системе координат представлена рассматриваемая многопозиционная РЛС (рис. 5). Согласно схеме приемник находится в ее начале с координатой $(0, 0, 0)^T$, обнаруженная цель $x = (x, y, z)^T$, координаты i -передатчика – $(x_i, y_i, z_i)^T$, причем $i = 1, \dots, N$.

В прямоугольной системе координат можно измерить расстояние между двумя точками с помощью прямой, используя евклидово расстояние. Согласно теореме Пифагора, учитывая координату z , евклидово расстояние между позицией приемника и целью

$$R_r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \|x\|. \tag{1}$$

Расстояние, от i -го аэростата РЛС до позиции приема:

$$L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} = \|x_i\|. \tag{2}$$

Расстояние равное от i -го аэростата с РЛС до цели выражается соотношением

$$R_{ii} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} = \|x_i - x\|. \quad (3)$$

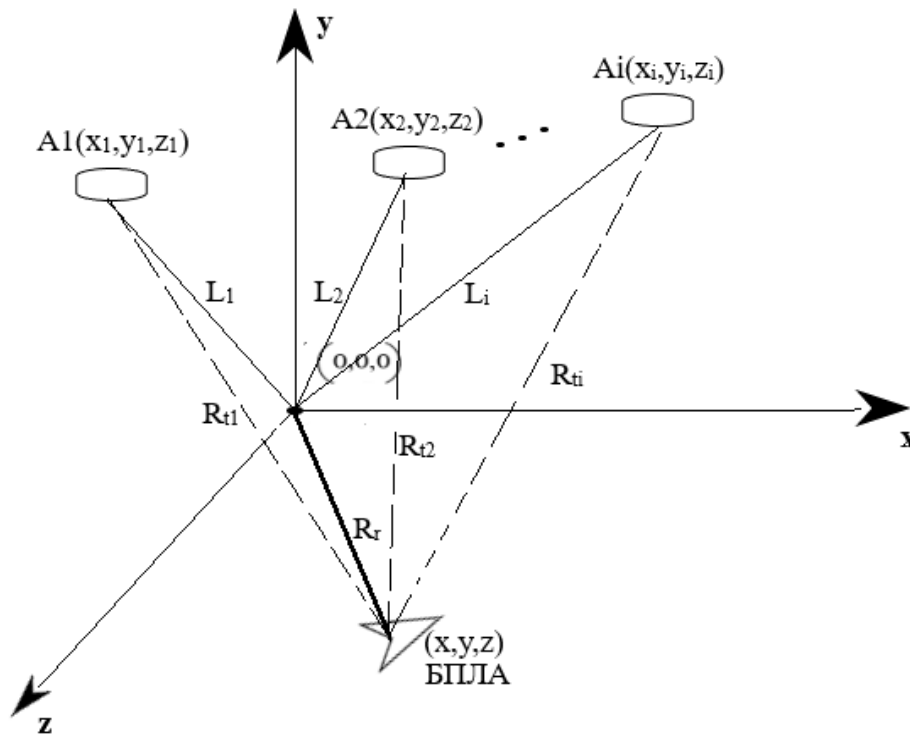


Рис. 5. Векторное представление работы МПРЛС

При реализации схемы с несколькими передатчиками и одной приемной позицией содержится несколько бистатических геометрий. Для установления координат объекта на плоскости приемная позиция измеряет азимут объекта и время запаздывания τ отраженного сигнала относительно прямого.

По задержке сигнала можно определить бистатическую дальность $r_b = c \tau = r_\Sigma - L$, где $r_\Sigma = R_r + R_i$ – суммарная дальность.

Бистатическая дальность для i -го аэростата с РЛС рассмотрена в следующем уравнении:

$$r_{bi} = R_r + R_{ii} - L_i.$$

Выполнив перестановку $R_r - L_i$ в правую часть уравнения и подставив (1)–(3) в выражение (4), последнее принимает вид

$$r_{bi} + L_i - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}. \quad (5)$$

Преобразовав и возведя в квадрат уравнение, получено

$$(L_i^2 - (r_{bi} + L_i)^2) / 2 + (r_{bi} + L_i) \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = xx_i + yy_i + zz_i. \quad (6)$$

В матричном виде уравнение (6) можно представить

$$S_x = k + dR_r, \quad (7)$$

где S – матрица координат местоположений аэростатных передатчиков:

$$S = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_m & y_m & z_m \end{pmatrix}_{N \times 3}; \quad (8)$$

k – вектор постоянных коэффициентов:

$$k = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} L_1^2 - (r_{b1} + L_1)^2 \\ \dots \\ L_M^2 - (r_{bM} + L_M)^2 \end{vmatrix}_{N \times 1} ; \quad (9)$$

d – сумма векторов значений бистатистических дальностей r и базы l :

$$d = r + l = \begin{vmatrix} r_{b1} + L_1 \\ \dots \\ r_{bM} + L_M \end{vmatrix}_{N \times 1} . \quad (10)$$

Исходя из того, что выражение (7) является линейным с двумя переменными x и R_r , и полагая, что расстояние от приемной позиции до цели R_r уже известно, то решение для координат местоположения цели x :

$$x = (S^T S)^{-1} S^T z + (S^T S)^{-1} S^T d R_r. \quad (11)$$

Следует определить R_r , чтобы выражение (11) было решено. Для этого вводятся дополнительные переменные:

$$a = (S^T S)^{-1} S^T z; \quad (12)$$

$$b = +(S^T S)^{-1} S^T d. \quad (13)$$

Тогда

$$x = a + b R_r. \quad (14)$$

Далее выразив $x^T x = \|x\|^2 = R_r^2$, подставив это выражение в формулу (11), возведя в квадрат, приводим к квадратному уравнению

$$(b^T b - 1) R_r^2 + 2 a^T b R_r + a^T a = 0. \quad (15)$$

Решая это уравнение относительно расстояния от приемника до наблюдаемого объекта R_r , получаем

$$R_r = \frac{-a^T b \pm \sqrt{(a^T b)^2 - (b^T b - 1) a^T a}}{b^T b - 1}.$$

Определив R_r и подставив значение в формулу (11), можно определить координаты местоположения объекта x .

Заключение

В статье рассмотрены различные схемы построения активной многопозиционной РЛС, позиции которой в целях увеличения дальности обнаружения малогабаритных БПЛА и ДПЛА располагаются на аэростатах (дирижаблях). Приведена предполагаемая структурная схема построения многопозиционной полуактивной РЛС. В случае расположения аэростатов (дирижаблей) в определенной области пространства позволяет применить несколько схем построения непозиционной РЛС – «несколько передатчиков – одна позиция приема», «один передатчик – несколько позиций приема», «несколько позиций передатчиков – несколько позиций приема».

В качестве метода определения координат цели для обнаружения БПЛА описан разностно-дальномерный метод с несколькими передатчиками на привязных аэростатах и приемной позицией, расположенной на земле.

Список литературы

1. Кондратьев А. Перспективы развития и применения беспилотных и роботизированных средств вооруженной борьбы в ВС ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2011. № 5. С. 14–21.
2. Юрков Н. К., Полтавский А. В. Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8
3. Ильинский Н. Б., Абзалилов Д. Ф. Математические проблемы проектирования крыловых профилей. Казань : Казанский университет, 2011. 284 с.
4. Лопота А. В., Николаев А. Б. Беспилотные летательные аппараты. М. : Государственный научный центр Российской Федерации ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2015. 18 с.
5. Балык В. М., Комягин В. А. Надежность и эффективность двухсредных ЛА : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2005. 160 с.
6. Reznik S. V., Prosuntsov P. V., Azarov A. V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length // Journal of engineering physics and thermophysics. 2015. Vol. 88, № 3. P. 699–705. doi: 10.1007/s10891-015-1239-x
7. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 62–70.
8. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Бикеев Р. Р. Имитационное моделирование характеристик комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 16–23.
9. Полтавский А. В., Юрков Н. К., Семенов С. С. Информатизация образования: семантика термина «беспилотный летательный аппарат» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 301–302.
10. Балык В. М., Игнатьев И. Н., Кулакова Р. Д. [и др.]. Выбор оптимальных законов управления летательным аппаратом по аппроксимирующим алгоритмам // Сборник тезисов докладов XXX Чтений К. Э. Циолковского. Калуга, 2003. Часть II. С. 79–80.
11. Балык В. М. Статистический синтез проектных решений при разработке сложных систем. М. : Изд-во МАИ, 2011. 280 с.
12. Бецов А. В., Прокопьев И. В. Анализ живучести беспилотного летательного аппарата // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 3–6.
13. Бархатов А. В., Веремьев В. И., Ковалев Д. А. [и др.]. Радиолокация по сигналам сторонних источников. Ч. 1: Современное состояние // Инновации. 2013. № 9. С. 114–119.
14. Нгуен Ван Куан, Маркелова М. А., Веремьев В. И. Анализ возможности использования спутниковых сигналов подсвета для пассивной радиолокационной системы // Вестник Новгородского государственного ун-та. Сер.: Технические науки. 2019. № 4. С. 86–91.
15. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. М. : Радио и связь, 1993. 416 с.
16. Бакулев П. А. Радиолокационные системы : учебник для вузов. М. : Радиотехника, 2004. 320 с.
17. Нгуен Ван Куан. Мониторинг судоходства в прибрежных морских районах полуактивной радиолокационной системы с использованием сигналов подсвета спутникового базирования // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2022. № 25. С. 6–16.
18. Юрков Н. К., Жумабаева А. С., Полтавский А. В. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.

References

1. Kondrat'ev A. Prospects for the development and application of unmanned and robotic means of military warfare in the armed forces of leading foreign countries. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie = Foreign Military Review*. 2011;(5):14–21. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Poltavskiy A.V. Selection of operators of automated workplaces for multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):70–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8
3. Il'inskiy N.B., Abzalilov D.F. *Matematicheskie problemy proektirovaniya krylovykh profiley = Mathematical problems of designing wing profiles*. Kazan': Kazanskiy universitet, 2011:284. (In Russ.)
4. Lopota A.V., Nikolaev A.B. *Bespilotnye letatel'nye apparaty = Unmanned aerial vehicles*. Moscow: Gosudarstvennyy nauchnyy tsentr Rossiyskoy Federatsii TsNII robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki, 2015:18. (In Russ.)
5. Balyk V.M., Komyagin V.A. *Nadezhnost' i effektivnost' dvukhsrednykh LA: ucheb. posobie = Reliability and efficiency of two-medium aircraft : textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2005:160. (In Russ.)

6. Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length. *Journal of engineering physics and thermophysics*. 2015;88(3):699–705. doi: 10.1007/s10891-015-1239-x
7. Godunov A.I., Shishkov S.V., Yurkov N.K. Complex of detection and control of small-sized unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):62–70. (In Russ.)
8. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Bikeev R.R. Simulation modeling of the characteristics of a complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):16–23. (In Russ.)
9. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Semenov S.S. Informatization of education: semantics of the term "unmanned aerial vehicle". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:301–302. (In Russ.)
10. Balyk V.M., Ignat'ev I.N., Kulakova R.D. et al. The choice of optimal aircraft control laws by approximating algorithms. *Sbornik tezisov dokladov KhKhKh Chteniy K. E. Tsiolkovskogo = Collection of abstracts of the XXX Readings of K.E. Tsiolkovsky*. Kaluga, 2003;Part P.C.:79–80. (In Russ.)
11. Balyk V.M. *Statisticheskii sintez proektnykh resheniy pri razrabotke slozhnykh system = Statistical synthesis of design solutions in the development of complex systems*. Moscow: Izd-vo MAI, 2011:280. (In Russ.)
12. Betskov A.V., Prokop'ev I.V. Analysis of the survivability of an unmanned aerial vehicle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):3–6. (In Russ.)
13. Barkhatov A.V., Verem'ev V.I., Kovalev D.A. et al. Radar based on signals from third-party sources. Part 1: Current state. *Innovatsii = Innovations*. 2013;(9):114–119. (In Russ.)
14. Nguen Van Kuan, Markelova M.A., Verem'ev V.I. Analysis of the possibility of using satellite illumination signals for a passive radar system. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Novgorod State University. Ser.: Technical Sciences*. 2019;(4):86–91. (In Russ.)
15. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya = Multi-position radar*. Moscow: Radio i svyaz', 1993:416. (In Russ.)
16. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy: uchebnik dlya vuzov = Radar systems : textbook for universities*. Moscow: Radiotekhnika, 2004:320. (In Russ.)
17. Nguen Van Kuan. Monitoring of navigation in coastal marine areas of a semi-active radar system using satellite-based illumination signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = Proceedings of higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 2022;(25):6–16. (In Russ.)
18. Yurkov N.K., Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a mobile object on examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Иванович Мельничук

инженер группы обслуживания и ремонта бортовой контрольно-записывающей аппаратуры,
Учебная авиационная база Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков имени Героя Советского Союза
А. К. Серова МО РФ,
(Россия, Саратовская обл., г. Ртищево,
ул. Котовского, 1/1)
E-mail: pelmenio@mail.ru

Николай Владимирович Горячев

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Anton I. Mel'nichuk

Engineer of the service and repair group
of on-board recording equipment,
Training Aviation Base of the Krasnodar
Higher Military Aviation School of Pilots
named after Hero of the Soviet Union
A.K. Serov of Russian Ministry of Defense
(1/1 Kotovskogo street, Rtishchevo,
Saratov Region, Russia)

Nikolay V. Goryachev

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 17.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022