



УДК 623.1/7
ГРНТИ 78.25.13:78.25.32

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ПОИСКА ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННЫМИ СРЕДСТВАМИ РАЗВЕДКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КООРДИНАТОМЕТРИИ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

*А.А. ДОНЦОВ, доктор технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Д.А. НАГАЛИН
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Р.Г. ХИЛЬЧЕНКО, кандидат военных наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
А.А. КОЗИРАЦКИЙ
АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж)*

В статье разработана методика расчета площади зоны поиска объектов огневого и радиоэлектронного поражения оптико-электронными средствами разведки беспилотных летательных аппаратов по результатам пеленгации источников радиоизлучения средствами радиоразведки. Методика основана на процедуре расчета среднеквадратического отклонения ошибок определения координат источников радиоизлучений по результатам попарной пеленгации заданного числа пар беспилотных летательных аппаратов радиоразведки с последующим их усреднением на основе композиции и правил преобразования законов распределения. Обоснованы состав и размеры зоны барражирования беспилотных летательных аппаратов со средствами радиоразведки для минимизации размеров зоны допоиска беспилотных летательных аппаратов с оптико-электронными средствами разведки.

Ключевые слова: источник радиоизлучения, беспилотный летательный аппарат, оптико-электронная система, поиск, допоиск.

METHOD OF DETERMINING THE SEARCH ZONE SIZE BY UNMANNED AERIAL VEHICLES RECONNAISSANCE OPTICAL- ELECTRONIC MEANS BASED ON THE RADIO EMISSION SOURCES LOCALIZATION

*A.A. DONTSOV, Doctor of Technical sciences, Associate Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
D.A. NAGALIN
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
R.G. KHILCHENKO, Candidate of Military sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
A.A. KOZIRATSKIY
JSC "Concern" Constellation" (Voronezh)*

The article describes a method for calculating the search zone area for objects of fire and radio-electronic destruction by unmanned aerial vehicles reconnaissance optical- electronic means based on the radio sources direction finding results by radio intelligence means. the method is based on the calculating procedure the standard deviation of errors in determining the radio sources coordinates based on pairwise direction finding results of a given number of pairs of radio intelligence unmanned aerial vehicles, followed by their averaging based on the composition and rules for converting the distribution



laws. the composition and unmanned aerial vehicles with radio intelligence means barrage zone size are justified in order to minimize the size of the additional search zone for unmanned aerial vehicles with optical-electronic intelligence means.

Keywords: radio source, unmanned aerial vehicle, optoelectronic system, search, additional search.

Введение. Совершенствование средств и способов защиты объектов вооружения и военной техники противника существенно затрудняет решение задачи обнаружения и определения их координат для последующего огневого или радиоэлектронного поражения [1, 2]. Вместе с тем практически все объекты противника оснащены средствами связи, что позволяет обеспечить оперативное обнаружение таких объектов с помощью средств радиоразведки, размещенных на беспилотных летательных аппаратах (БЛА), и с невысокой точностью определить их координаты. Высокую точность определения координат объектов противника позволяют обеспечить оптико-электронные средства (ОЭС) разведки на БЛА, однако из-за малой полосы обзора время поиска существенно возрастает.

Актуальность. Для повышения оперативности и достоверности поиска объектов поражения целесообразно применять двухэтапную процедуру обнаружения объектов огневого и радиоэлектронного поражения. На первом этапе необходимо использование средств радиоразведки БЛА, обеспечивающих высокую оперативность получения информации и целеуказание БЛА с ОЭС разведки для выполнения процедуры допоиска и точной координатометрии. Для обоснования требований к составу и параметрам средств радиоразведки на БЛА необходима разработка методики определения размеров зоны поиска с помощью средств радиоразведки с учетом ошибок координатометрии, взаимного пространственного расположения БЛА и источников радиоизлучений (ИРИ).

Цель статьи – разработка методики определения размеров зоны поиска ОЭС БЛА по результатам координатометрии источников радиоизлучения.

Будем считать, что средства радиоразведки размещены на N БЛА с координатами (x_i, y_i) , где $i = 1 \dots N$. Неподвижный ИРИ с координатами (x_n, y_n) находится на удалении D от линии расположения БЛА в соответствии с рисунком 1.

Предположим, что БЛА со средствами радиоразведки осуществляют одновременное определение азимутального направления на ИРИ:

$$\alpha_i = \operatorname{arctg} \frac{y_n - y_i}{x_n - x_i} . \quad (1)$$

Координаты ИРИ могут быть определены по результатам измерения пеленгов $\alpha_i, \beta_i(t)$ каждым средством радиоразведки БЛА на основе выражений для уравнений прямых, проходящих через точки с координатами БЛА:

$$\frac{x - x_i}{\cos(\alpha_i)} = \frac{y - y_i}{\sin(\alpha_i)} . \quad (2)$$

Так, текущие координаты ИРИ по результатам парного пеленгования средств радиоразведки на БЛА определяются решением системы уравнений:

$$\begin{cases} y_n = (x_n - x_{0n}) \operatorname{tg}(\alpha_{0n}) + y_{0n}, \\ y_n = (x_n - x_{1n}) \operatorname{tg}(\alpha_{1n}) + y_{1n}, \end{cases} \quad (3)$$

где $n = 1 \dots N_v$ – номер пары БЛА со средствами радиоразведки;



$Nv = N!/[2(N-2)!]$ – число пар БЛА;

$\{x0_n, y0_n\}, \{x1_n, y1_n\}$ – координаты n -ной пары БЛА;

$\alpha0_n, \alpha1_n$ – пеленги n -ной пары БЛА.

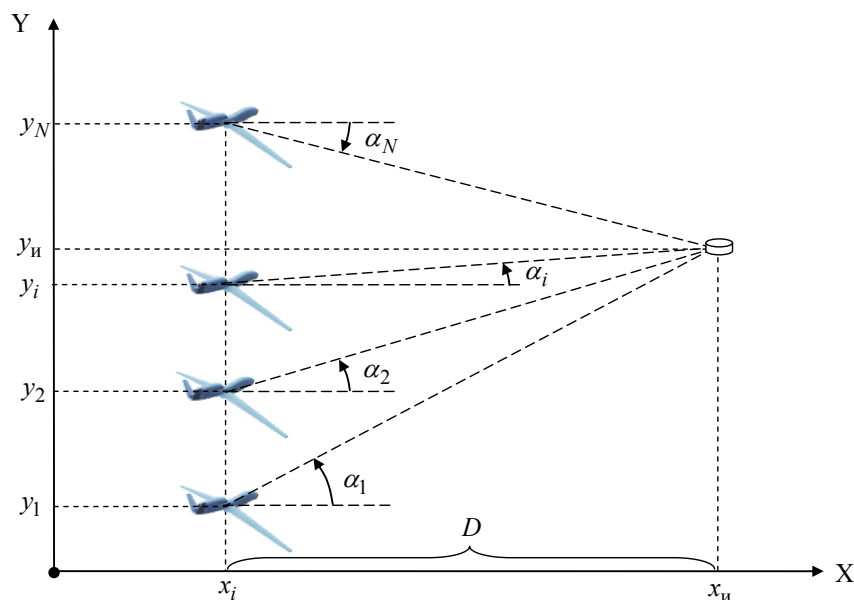


Рисунок 1 – Геометрическая постановка задачи

После решения системы уравнений (3) получим координаты ИРИ по результатам пеленгации каждой парой средств радиоразведки БЛА:

$$x_n = \frac{y1_n + x0_n \operatorname{tg}(\alpha0_n) - y0_n - x1_n \operatorname{tg}(\alpha1_n)}{\operatorname{tg}(\alpha0_n) - \operatorname{tg}(\alpha1_n)}. \quad (4)$$

Получим выражения для оценки ошибок определения ИРИ по оси ОХ. Считаем, что погрешности определения координат БЛА пренебрежимо малы. На основе положений теории ошибок измерений [3] введем в рассмотрение погрешности определения углов пеленга ИРИ каждой парой БЛА в горизонтальной плоскости $\Delta\alpha0_n$ и $\Delta\alpha1_n$.

Полагая значения этих погрешностей малыми, разложим выражение (4), записанное в приращениях, в ряд Тейлора и, исключив из рассмотрения члены разложения 2-го и более порядков, получим выражения для погрешностей определения координат ИРИ каждой парой постов радиоразведки на БЛА:

$$\Delta x_n = \left| \frac{\partial x_n}{\partial \alpha0_n} \quad \frac{\partial x_n}{\partial \alpha1_n} \right| \cdot \begin{vmatrix} \Delta \alpha0_n \\ \Delta \alpha1_n \end{vmatrix}. \quad (5)$$

После умножения векторов в правой части выражения (5), возведения правых и левых частей уравнений в квадрат, их дальнейшего усреднения, получим выражение для дисперсии ошибок определения координат ИРИ по оси ОХ n -ной парой постов радиоразведки на БЛА:

$$\sigma_{x_n}^2 = \left(\frac{\partial x_n}{\partial \alpha0_n} \right)^2 \sigma_{\alpha0_n}^2 + \left(\frac{\partial x_n}{\partial \alpha1_n} \right)^2 \sigma_{\alpha1_n}^2, \quad (6)$$



где $\sigma_{\alpha 0_n}^2$ и $\sigma_{\alpha 1_n}^2$ – дисперсии ошибок определения пеленгов ИРИ первым и вторым средством радиоразведки n -ной пары БЛА в горизонтальной плоскости.

Вычисляя частные производные функций (6) получим в явном виде выражения для расчета дисперсии ошибок определения координат ИРИ по оси ОХ n -ной парой БЛА радиоразведки:

$$\sigma_{x_n}^2 = \left[\frac{(tg^2(\alpha 0_n) + 1)(y 0_n - y 1_n - x 0_n tg(\alpha 1_n) + x 1_n tg(\alpha 1_n))}{(tg(\alpha 0_n) - tg(\alpha 1_n))^2} \right]^2 \sigma_{\alpha 0_n}^2 + \left[\frac{(tg^2(\alpha 1_n) + 1)(y 0_n - y 1_n - x 0_n tg(\alpha 0_n) + x 1_n tg(\alpha 0_n))}{(tg(\alpha 0_n) - tg(\alpha 1_n))^2} \right]^2 \sigma_{\alpha 1_n}^2. \quad (7)$$

Считаем, что ошибки определения координат распределены по нормальному закону. Координаты ИРИ по результатам пеленгации $N\nu$ пар средств радиоразведки БЛА целесообразно рассчитать как среднее значение. Тогда на основе композиции и правил преобразования законов распределения можно показать, что дисперсия определения координат ИРИ по оси ОХ определяется выражением:

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{n=1}^{N\nu} \sigma_{x_n}^2}{N\nu^2}. \quad (8)$$

С учетом выражений (7) и (8), а также в предположении равенства дисперсий ошибок определения пеленгов в горизонтальной плоскости, получим выражение для расчета СКО погрешностей определения координат ИРИ по оси ОХ:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_\alpha}{N\nu} \sqrt{\sum_{n=1}^{N\nu} \frac{\left[\frac{(tg^2(\alpha 0_n) + 1)(y 0_n - y 1_n - x 0_n tg(\alpha 1_n) + x 1_n tg(\alpha 1_n))}{(tg(\alpha 0_n) - tg(\alpha 1_n))^2} \right]^2 + \left[\frac{(tg^2(\alpha 1_n) + 1)(y 0_n - y 1_n - x 0_n tg(\alpha 0_n) + x 1_n tg(\alpha 0_n))}{(tg(\alpha 0_n) - tg(\alpha 1_n))^2} \right]^2}{[tg(\alpha 0_n) - tg(\alpha 1_n)]^4}}. \quad (9)$$

Очевидно, что СКО в выражении (9) зависит от текущего местоположения БЛА, так как от него зависят и пеленги каждой пары средств радиоразведки.

Подставляя (4) в первое уравнение системы (3) получим выражение для расчета координат ИРИ по оси ОУ:

$$y_n = \left(\frac{y 1_n + x 0_n tg(\alpha 0_n) - y 0_n - x 1_n tg(\alpha 1_n)}{tg(\alpha 0_n) - tg(\alpha 1_n)} - x 0_n \right) tg(\alpha 0_n) + y 0_n. \quad (10)$$

По аналогии с приведенными выше рассуждениями можно показать, что СКО погрешностей определения координат ИРИ по оси ОУ в результате попарной пеленгации N БЛА радиоразведки определяется выражением:



$$\sigma_y = \frac{\sigma_\alpha}{N_V} \sqrt{\sum_{n=1}^{N_V} \left[\frac{[tg(\alpha_{1_n})(tg^2(\alpha_{0_n})+1)(y_{0_n} - y_{1_n} - x_{0_n}tg(\alpha_{1_n}) + x_{1_n}tg(\alpha_{1_n}))]^2 + [tg(\alpha_{0_n})(tg^2(\alpha_{1_n})+1)(y_{0_n} - y_{1_n} - x_{0_n}tg(\alpha_{0_n}) + x_{1_n}tg(\alpha_{0_n}))]^2}{[tg(\alpha_{0_n}) - tg(\alpha_{1_n})]^4} \right]} . \quad (11)$$

Очевидно, что для учета погрешностей местоопределения БЛА необходимо в выражения (9) и (11) добавить слагаемые, которые равны СКО определения координат БЛА.

Тогда с учетом ошибок координатометрии ИРИ средствами радиоразведки на БЛА для обеспечения попадания цели в зону поиска БЛА с ОЭС разведки с вероятностью не менее 0,99 площадь зоны поиска должна быть не менее:

$$S = 9\sigma_x\sigma_y . \quad (12)$$

Зная размеры зоны поиска, площадь обзора ОЭС и скорость БЛА легко оценить время ведения разведки на втором этапе обнаружения объектов огневого и радиоэлектронного поражения.

Оценим возможные размеры зоны поиска БЛА с ОЭС разведки. Считаем, что обнаружение и пеленгование ИРИ осуществляется в зоне, размерами по фронту и глубине 25×15 км, общей площадью 375 км². БЛА со средствами радиоразведки барражируют по фронту в зонах, расположенных симметрично относительно центра зоны поиска ИРИ. Их координаты определим выражениями:

$$x_i = D; y_i = \frac{L(N - 2i - 1)}{2(N + 1)} , \quad (13)$$

где L – ширина зоны барражирования БЛА по фронту; D – дальность по глубине до ИРИ (от 10 до 25 км).

Расположение ИРИ относительно центра зоны поиска по фронту будем характеризовать значением $\Delta y_{И}$. На рисунке 2 представлены зависимости требуемой площади зоны поиска ОЭС БЛА от дальности ИРИ, рассчитанные при различных значениях $\Delta y_{И}$ при $\sigma_\alpha = 2$ град; $L = 30$ км.

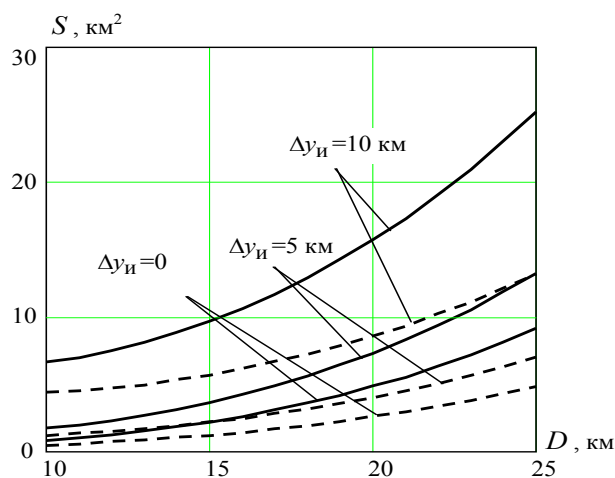


Рисунок 2 – Зависимости требуемой площади зоны поиска ОЭС БЛА от дальности ИРИ



Сплошной линией показаны графики, рассчитанные для трех БЛА радиоразведки; пунктиром – для пяти.

Из рисунка 2 видно, что площадь зоны допоиска с помощью ОЭС на основе предварительного целеуказания БЛА со средствами радиоразведки существенно возрастает при увеличении дальности ИРИ и его смещении по фронту относительно центра зоны поиска. Так, при использовании трех БЛА радиоразведки и расположении ИРИ в центре зоны поиска площадь зоны поиска с помощью ОЭС возрастает в 9 раз (с 1 км^2 до 9 км^2). При смещении ИРИ относительно центра зоны поиска по фронту существенно возрастают ошибки пеленгования и, как следствие, площадь допоиска ($7...25 \text{ км}^2$ на дальностях $10...25 \text{ км}$). Увеличение количества БЛА радиоразведки до пяти позволит уменьшить площадь зоны допоиска БЛА с ОЭС разведки в $1,5...2$ раза.

На рисунке 3 представлены результаты расчета среднего (с учетом смещения $\Delta y_{и}$) значения площади зоны поиска БЛА с ОЭС разведки \bar{S} от ширины зоны барражирования при различном количестве БЛА радиоразведки. Дальность ИРИ варьировалась от 10 до 25 км, смещение – до 15 км, точность пеленгования – 2 град.

Анализ рассчитанных зависимостей показывает, что средняя площадь зоны поиска БЛА с ОЭС разведки на втором этапе может быть существенно снижена за счет увеличения размеров зоны барражирования БЛА при поиске ИРИ в заданном секторе. Так, при использовании двух БЛА радиоразведки целесообразно установить ширину зоны барражирования около 70 км, при этом средняя площадь зоны допоиска составит $6...7 \text{ км}^2$.

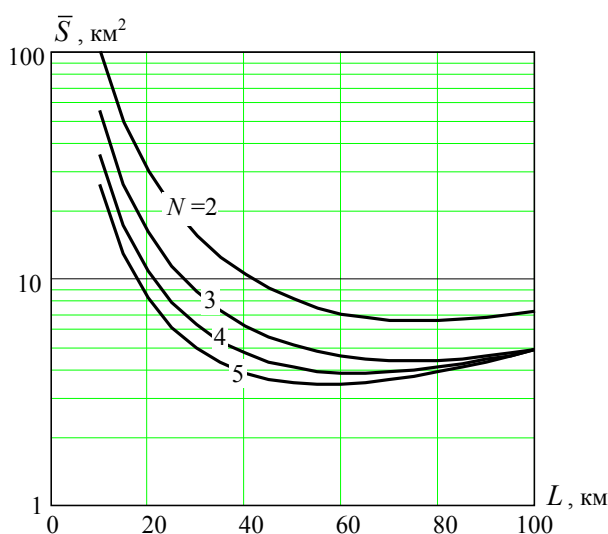


Рисунок 3 – Зависимости среднего значения площади зоны поиска ОЭС БЛА от ширины зоны барражирования

Применение трех БЛА радиоразведки обеспечит возможность уменьшить площадь зоны допоиска до $4...5 \text{ км}^2$, при тех же размерах зоны барражирования. При увеличении количества БЛА радиоразведки до пяти ширину зоны барражирования целесообразно уменьшить до $50...60 \text{ км}$, при этом средняя площадь зоны поиска с помощью ОЭС БЛА на втором этапе составит $3...4 \text{ км}^2$.

Выводы. Таким образом, разработана методика определения размеров зоны поиска ОЭС разведки БЛА по результатам координатометрии источников радиоизлучения средствами радиоразведки. В основу методики положен расчет СКО ошибок определения координат ИРИ по результатам попарной пеленгации заданного числа пар БЛА радиоразведки с последующим их усреднением на основе композиции и правил преобразования законов распределения, что



позволило определить размеры зоны допояска, которые с учетом ошибок координатометрии обеспечат нахождение в ней ИРИ с вероятностью не менее 0,99.

Выполнена оценка размеров зоны поиска ОЭС разведки БЛА по результатам координатометрии 2...5 БЛА радиоразведки, барражирующих на дальности 10 км от зоны расположения ИРИ размером 25 км по фронту и 15 км в глубину. Показано, что для минимизации площади зоны допояска при использовании заданного количества БЛА радиоразведки необходимо изменять размеры зоны их барражирования.

Установлено, что при использовании трех БЛА радиоразведки, точность пеленгования которых составляет 2 градуса, целесообразно обеспечить ширину зоны барражирования около 70 км, при этом средняя площадь зоны допояска составит 4...5 км². При увеличении количества БЛА радиоразведки до пяти ширину зоны барражирования целесообразно уменьшить до 50...60 км, при этом средняя площадь зоны поиска с помощью ОЭС БЛА на втором этапе поиска объектов огневого и радиоэлектронного поражения составит 3...4 км².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов / под ред. Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2015. 456 с.
2. Радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / под ред. В.Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2006. 424 с.
3. Кемниц Ю.В. Теория ошибок измерений. М.: Издательство геодезической литературы, 1961. 112 с.

REFERENCES

1. Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-`elektronnyh sredstv, ocenka parametrov ih signalov / pod red. Yu.L. Kozirackogo. M.: Radiotekhnika, 2015. 456 p.
2. Radio`elektronnaya bor'ba. Voprosy metodologii / pod red. V.G. Radzievskogo. M.: Radiotekhnika, 2006. 424 p.
3. Kemnic Yu.V. Teoriya oshibok izmerenij. M.: Izdatel'stvo geodezicheskoy literatury, 1961. 112 p.

© Донцов А.А., Нагалин Д.А., Хильченко Р.Г., Козирацкий А.А., 2020

Донцов Александр Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор 203 кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, addoncov1@mail.ru.

Нагалин Данила Александрович, адъюнкт 51 кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, danil.nagalin@yandex.ru.

Хильченко Роман Геннадьевич, кандидат военных наук, преподаватель 51 кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, hrg-1984@yandex.ru.

Козирацкий Антон Александрович, инженер, АО «Концерн «Созвездие», Россия, 394018, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14, akoziratskiy@gmail.com.