

## Оптимизация маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов при местоопределении источника радиоизлучения по оценкам угловых координат с их бортов

С.Н. Разиньков, А.В. Богословский

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
394064, Российская Федерация, г. Воронеж  
ул. Старых Большевиков, 54а

Исследованы возможности оптимизации маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов для повышения точности определения местоположения наземных источников радиоизлучения по оценкам угловых координат с их бортов. Найдены правила выбора точек пеленгования сигналов на траектории движения одиночного беспилотного летательного аппарата и курсовых углов двух синхронно барражирующих носителей приемников-пеленгаторов из состава триангуляционной системы, при которых достигается минимум дисперсии местоопределения объектов.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, приемник-пеленгатор, среднеквадратическая ошибка пеленгования, дисперсия оценки местоположения объекта.

### Введение

Для повышения достоверности контроля сложной радиоэлектронной обстановки в комплексах мониторинга на беспилотных летательных аппаратах (БЛА) требуется применять высокоточные методы местоопределения источников радиоизлучения [1]. Данные о координатах позволяют выполнять распознавание объектов при реализации мер маскировки, повышенной скрытности работы, использовании сигналов с адаптивно изменяющимися и перекрывающимися по значениям частотно-временными параметрами [1; 2].

Местоположение передатчиков сигналов большой длительности с характерными демаскирующими признаками [2] можно определять по результатам пеленгования в различных точках пространства на маршруте полета БЛА [1; 3]. Для оценки координат источников коротких (сверхкоротких) импульсов и излучателей с малым набором параметров идентификации [2] необходимо применять триангуляционный метод [4] при синхронном функционировании приемников-пеленгаторов, размещенных на бортах двух носителей, барражирующих в заданных позиционных районах [1].

При этом движение БЛА должно осуществляться по траекториям, выбираемым из условия обеспечения требуемой точности местоопределения объектов наличия эксплуатационных

погрешностей измерения углов прихода сигналов [3].

В предлагаемой работе представлены алгоритмы минимизации среднеквадратической ошибки (СКО) оценки координат наземных источников радиоизлучения за счет выбора точек их пеленгования с бортов одиночного БЛА и двух носителей приемников-пеленгаторов из состава триангуляционной системы.

Цель работы – достижение наилучшей точности местоопределения излучателей за счет оптимизации маршрутов полета БЛА.

### 1. Оптимизация маршрута полета беспилотного летательного аппарата при местоопределении объектов по многократным оценкам угловых координат

Будем полагать, что источник радиоизлучения расположен в начале полярной системы координат  $(R, \varphi)$  и в процессе выполнения измерений остается неподвижным; позиции, в которых определяются направления прихода сигналов в последовательные моменты времени  $t_n$  и  $t_{n+1}$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , характеризуются наклонными дальностями  $R_n$  и  $R_{n+1}$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Величины  $R_n$  и  $R_{n+1}$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , значительно превышают высоту полета БЛА и дистанцию  $L$  между точками пеленгования. Полет БЛА на интервале времени

$t_{n+1} - t_n$  осуществляется под курсовым углом  $\gamma_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , отсчитываемым от направления на излучатель в момент времени  $t_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , против часовой стрелки; направление  $\gamma_1$  определяется относительно  $\varphi = 0$ . Пространственное положение приемника-пеленгатора относительно источника радиоизлучения определяется по результатам пеленгования и данным аппаратуры навигационно-временного обеспечения [5] в бортовом решающем устройстве, построенном на основе линейного фильтра [1; 6].

Систематические погрешности фиксации угла места, тангажа и крена БЛА малы относительно СКО пеленгования сигналов  $\sigma_{\varphi n}$  и  $\sigma_{\varphi(n+1)}$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ ; погрешностями позиционирования приемников-пеленгаторов при определении дисперсии оценки местоположения излучателя  $\sigma_R^2$  можно пренебречь.

Время корреляции траекторной нестабильности БЛА в полете [5] существенно меньше длительности обрабатываемых сигналов, поэтому измерения в бортовых приемниках-пеленгаторах выполняются без аномальных ошибок [3; 6].

Оптимизация маршрута полета БЛА для достижения наилучшей точности местоопределения источника радиоизлучения состоит в нахождении направления движения  $\hat{\gamma}_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  в момент времени  $t_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  по критерию

$$\begin{cases} \hat{\gamma}_n = \arg \min_{\gamma_n} \sigma_R^2; \\ \gamma_n \neq \pi m, \quad n = 1, 2, 3 \dots, \quad m = 0, 1, 2 \dots \end{cases} \quad (1)$$

Второе уравнение в (1) исключает из рассмотрения направление движения БЛА непосредственно на источник радиоизлучения, поскольку его угловые координаты априори неизвестны [3].

Дисперсия оценки местоположения излучателя имеет вид [4]

$$\sigma_R^2 = \frac{\sigma_{\varphi n}^2 R_n^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2 R_{n+1}^2}{\sin^2 \vartheta_n}, \quad n = 1, 2, 3 \dots, \quad (2)$$

где  $\vartheta_n$  – угловое расстояние между пеленгами, измеренными в моменты времени  $t_n$  и  $t_{n+1}$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$

Согласно теореме синусов [7],

$$\sin \vartheta_n = \frac{L}{R_{n+1}} \sin \gamma_n, \quad n = 1, 2, 3 \dots; \quad (3)$$

в соответствии с теоремой косинусов [7] наклонные дальности  $R_n$  и  $R_{n+1}$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  связаны соотношением

$$R_{n+1}^2 = R_n^2 + L^2 - 2R_n L \cos \gamma_n, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

В результате подстановки (3), (4) в (2) находим

$$\sigma_R^2 = \left( \sigma_{\varphi n}^2 R_n^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2 \left( 2R_n^2 + L^2 - 2R_n L \cos \gamma_n \right) \right) \left( R_n^2 + L^2 - 2R_n L \cos \gamma_n \right) / L^2 \sin^2 \gamma_n \quad (5)$$

Минимальная дисперсия местоопределения объекта достигается для курсового угла БЛА  $\hat{\gamma}_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , при котором первая производная (5) обращается в нуль. С учетом условия  $\gamma_n \neq \pi m$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ ,  $m = 0, 1, 2 \dots$  при  $\alpha_n = R_n / L \gg 1$  направление движения в момент времени  $t_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  удовлетворяет уравнению

$$\cos^2 \gamma_n - \beta_n \cos \gamma_n + 1 = 0, \quad n = 1, 2, 3 \dots, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \beta_n = & \left[ \left( \sigma_{\varphi n}^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2 \right) \alpha_n^4 + \right. \\ & \left. + \left( 2\sigma_{\varphi n}^2 + 5\sigma_{\varphi(n+1)}^2 \right) \alpha_n^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2 \right] / \\ & / \left[ \left( \sigma_{\varphi n}^2 + 2\sigma_{\varphi(n+1)}^2 \right) \alpha_n^3 + 2\sigma_{\varphi(n+1)}^2 \alpha_n \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

$n = 1, 2, 3 \dots$

На основе решения (6) имеем:

$$\gamma_n = \pm \arccos \left( \frac{\beta_n - \sqrt{\beta_n^2 - 4}}{2} \right) + 2\pi m, \quad (8)$$

$n = 1, 2, 3 \dots, \quad m = 0, 1, 2 \dots$

Знак обратной тригонометрической функции и число  $m$  выбираются таким образом, чтобы угол  $\gamma_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  принадлежал полупространству с вертикальной границей вдоль продольной строительной оси БЛА, в котором расположен пеленгуемый источник радиоизлучения. На практике неоднозначность решения (8) устраняется путем селекции направлений прихода сигналов по бортам носителя в многошкальных измерителях с неэквидистантными антенными решетками или пеленгаторов с секторными антеннами [8].

Из (7) следует, что при равных значениях СКО пеленгования сигналов в моменты времени  $t_n$  и  $t_{n+1}$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  курсовой угол БЛА определяется выражением (8), в котором [3]

$$\beta_n = \frac{2\alpha_n^4 + 7\alpha_n^2 + 1}{\alpha_n (3\alpha_n^2 + 2)}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (9)$$

На рис. 1 приведены найденные с использованием (7), (8) траектории движения БЛА относительно объекта при исходном значении наклонной дальности  $R_1 = 30$  км, при СКО пе-

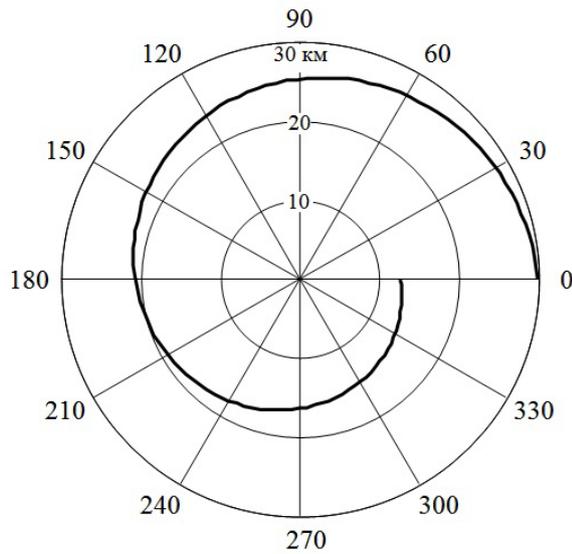


Рис. 1. Маршрут полета БЛА при изменении дисперсии оценки угловых координат объекта по закону  $\sigma_{\varphi n}^2 / \sigma_{\varphi(n+1)}^2 = 2$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$

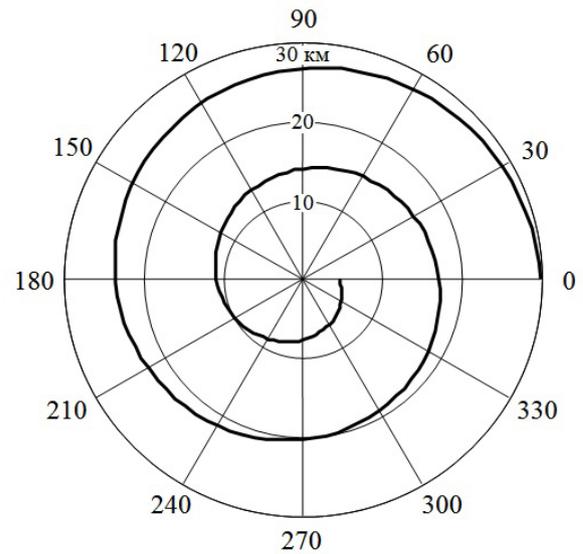


Рис. 2. Маршрут полета БЛА при изменении дисперсии оценки угловых координат объекта по закону  $\sigma_{\varphi(n+1)}^2 / \sigma_{\varphi n}^2 = 2$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$

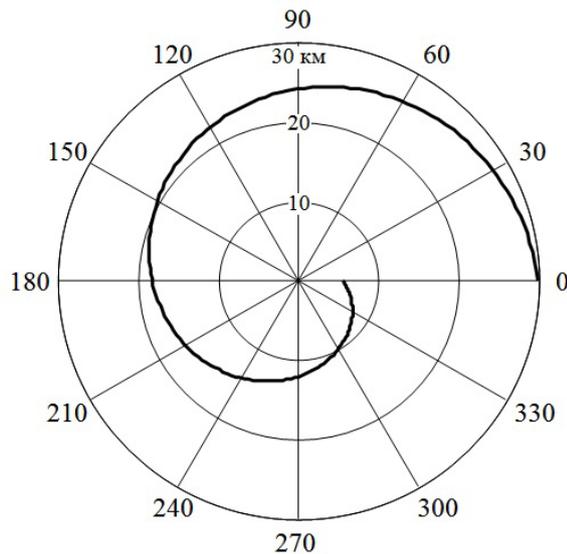


Рис. 3. Маршрут полета БЛА при дисперсии оценки угловых координат объекта  $\sigma_{\varphi n}^2 = \sigma_{\varphi(n+1)}^2$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$

ленгования сигналов  $\sigma_{\varphi 1} = 10^\circ$  с тенденцией изменения точности последующих измерений  $\sigma_{\varphi n}^2 / \sigma_{\varphi(n+1)}^2 = 2$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ . На рис. 2 представлены результаты, полученные при  $\sigma_{\varphi 1} = 1^\circ$  и закономерности увеличения дисперсии оценки угловых координат источника радиоизлучения вида  $\sigma_{\varphi(n+1)}^2 / \sigma_{\varphi n}^2 = 2$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Снижение точности пеленгования при подлете к объекту возможно вследствие уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности его антенны, по которым осуществляется перехват сигналов в точках пространства, разнесенных в азимутальной плоскости на угол  $\gamma_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$

Анализ приведенных результатов показывает, что наилучшая точность определения местоположения источника радиоизлучения достигается

при движении носителя приемника-пеленгатора по траектории в виде спирали. Изменение курсового угла, определяемое значениями дисперсии оценки угловых координат излучателя, возрастает относительно начального значения по мере уменьшения наклонной дальности  $R_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ . За счет повышения точности пеленгования при приближении к объекту сжатие спирали уменьшается. При этом протяженность маршрута полета БЛА на рис. 2 превышает длину траектории движения на рис. 1 примерно в 1,7 раза.

На рис. 3 приведен маршрут полета БЛА, проложенный с использованием (8), (9), при равной точности пеленгования излучателя в моменты времени  $t_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Согласно (9), траектория движения БЛА не зависит от СКО оценки угловых координат излучателя; точность оценки его местоположения при  $\sigma_{\varphi n}^2 = \sigma_{\varphi(n+1)}^2$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , определяется дальностью до приемно-пеленгационного поста. При уменьшении СКО пеленгования сигналов с  $10^\circ$  до  $1^\circ$  протяженность маршрута полета БЛА сокращается в 1,4 раза.

На рис. 4 представлены траектории движения БЛА при местопределении излучателя по оценкам его угловых координат с СКО  $\sigma_{\varphi n} = 1^\circ$  в секторе углов  $\varphi \in [0; 180^\circ)$  и  $\sigma_{\varphi n} = 10^\circ$  в секторе углов  $\varphi \in [180^\circ; 360^\circ)$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , а на рис. 5 – результаты при  $\sigma_{\varphi n} = 10^\circ$  в секторах углов  $\varphi \in [0; 180^\circ)$  и  $\sigma_{\varphi n} = 1^\circ$  в секторе углов  $\varphi \in [180^\circ; 360^\circ)$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$

Согласно приведенным зависимостям, маршрут полета БЛА существенно зависит от дисперсии ошибки оценки угловых координат объекта в начальный момент времени. При этом, несмо-

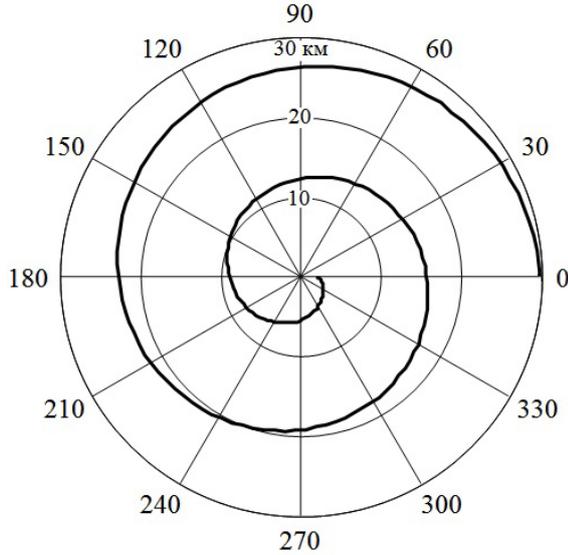


Рис. 4. Маршрут полета БЛА при СКО пеленгования объекта  $\sigma_{\varphi n} = 1^\circ$  в секторе углов  $\varphi \in [0; 180^\circ)$  и  $\sigma_{\varphi n} = 10^\circ$  в секторе углов  $\varphi \in [180^\circ; 360^\circ)$

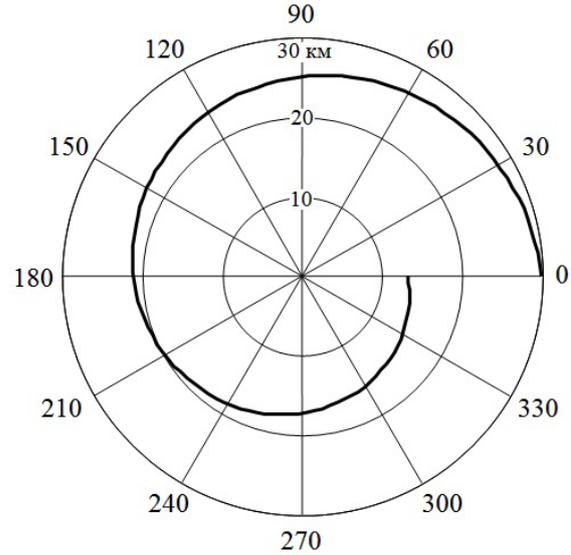


Рис. 5. Маршрут полета БЛА при СКО пеленгования объекта  $\sigma_{\varphi n} = 10^\circ$  в секторе углов  $\varphi \in [0; 180^\circ)$  и  $\sigma_{\varphi n} = 1^\circ$  в секторе углов  $\varphi \in [180^\circ; 360^\circ)$

тря на различие точности измерений в секторах углов, для траектории движения нехарактерна значительная асимметрия ввиду свойства спирали восстанавливать свою форму после воздействий [9].

## 2. Оптимизация маршрутов полета двух беспилотных летательных аппаратов при местоопределении объектов по результатам синхронного пеленгования

Будем полагать, для местоопределения источника радиоизлучения выполняются синхронные измерения его угловых координат с бортов двух БЛА, барражирующих на удалении  $d$  друг от друга, в моменты времени  $t_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Наклонная дальность  $R_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  определяется как расстояние между объектом и центральной точкой пеленгационной базы; ее величина значительно превышает  $d$ , смещение центра пеленгационной базы  $L$  и дистанцию  $L^{(k)}$ , преодолеваемую  $k$ -м носителем,  $k = 1, 2$ , за интервал времени  $t_{n+1} - t_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$

Для минимизации дисперсии оценки координат излучателя  $\sigma_R^2$  пеленгационная база ориентирована перпендикулярно линии, по которой измеряется наклонная дальность. При этом курсовые углы БЛА  $\gamma_n^{(k)}$ ,  $k = 1, 2$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  определяются на удалении от объекта

$$\tilde{R}_n = \frac{R_n}{\cos \Omega_n}, \quad (10)$$

где

$$\Omega_n = \arctg \left( \frac{1}{2\rho_n} \right) + \pi m, \quad \rho_n = \frac{R_n}{d},$$

$$n = 1, 2, 3 \dots, \quad m = 0, 1, 2 \dots;$$

угловое расстояние относительно центра системы координат между точками пеленгования

$$\vartheta_n^{(k)} = \vartheta_n + (-1)^{k+1} \Omega_n + (-1)^k \Omega_{n+1}, \quad (11)$$

$$n = 1, 2, 3 \dots,$$

а дистанция

$$L^{(k)} = \sqrt{\tilde{R}_n^2 + \tilde{R}_{n+1}^2 - 2\tilde{R}_n\tilde{R}_{n+1} \cos \vartheta_n^{(k)}}, \quad (12)$$

$$k = 1, 2, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Ввиду того, что  $\alpha_n \gg 1$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$ , траектория движения центра пеленгационной базы удовлетворяет (8). Курсовые углы носителей приемников-пеленгаторов  $\gamma_n^{(k)}$ ,  $k = 1, 2$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  по аналогии с (3) удовлетворяют соотношению

$$\sin \gamma_n^{(k)} = \frac{\tilde{R}_{n+1}}{L^{(k)}} \sin \vartheta_n^{(k)}, \quad (13)$$

$$k = 1, 2, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Из (12), (13) с учетом (10), (11) находим, что направление движения  $k$ -го БЛА,  $k = 1, 2$  в момент времени  $t_n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  соответствует главному значению аргумента функции

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \gamma_n^{(k)} &= \\ &= \pm \frac{1}{\sin \left( \vartheta_n + (-1)^{k+1} \Omega_n + (-1)^k \Omega_{n+1} \right)} \times \\ &\times \frac{R_n \cos \Omega_{n+1}}{R_{n+1} \cos \Omega_n} \mp \end{aligned} \quad (14)$$

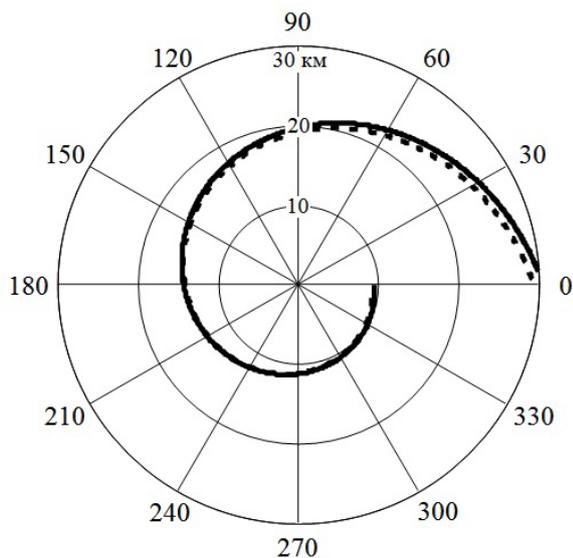


Рис. 6. Маршруты полета БЛА при местоопределении объектов триангуляционной системой с пеленгационной базой  $d = 2$  км

$$\mp \operatorname{ctg} \left( \vartheta_n + (-1)^{k+1} \Omega_n + (-1)^k \Omega_{n+1} \right).$$

Правило выбора знака перед первым слагаемым аналогично использованному при устранении неопределенности решения (8); знаки «-» и «+» перед функцией  $\operatorname{ctg}(\dots)$  определяют траектории движения БЛА, смещенные относительно центра пеленгационной базы на  $-d/2$  и  $d/2$  соответственно.

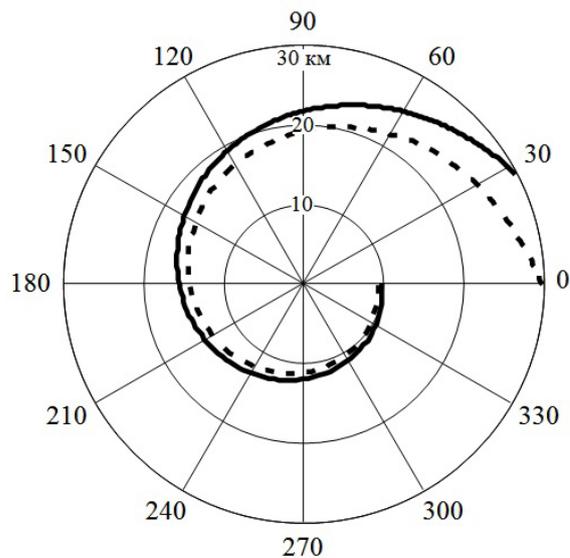
На рис. 6 приведены маршруты полета БЛА при триангуляционном местоопределении излучателей с пеленгационной базой  $d = 2$  км; на рис. 7 – с базой, при которой  $\alpha_n = 10$  (а) и  $\alpha_n = 5$  (б). Штриховой линией представлены траектории, построенные при выборе перед функцией  $\operatorname{ctg}(\dots)$  знака «-», сплошной – знака «+».

Из представленных результатов следует, что существенное различие маршрутов полета БЛА при постоянной и варьируемой пеленгационной базе наблюдается на значительном (свыше 20 км) удалении от источника радиоизлучения. По мере приближения к объекту влияние размеров базы на траектории движения БЛА, определяемые по критерию (1), снижается.

### Заключение

Таким образом, проведена оптимизация маршрутов полета БЛА с бортовыми приемниками-пеленгаторами, для обеспечения наилучшей точности местоопределения наземных источников радиоизлучения при различных СКО измерений углов прихода сигналов в точках пространства выполнена оптимизация. Найдены правила выбора позиций пеленгования объектов и проведен

а)



б)

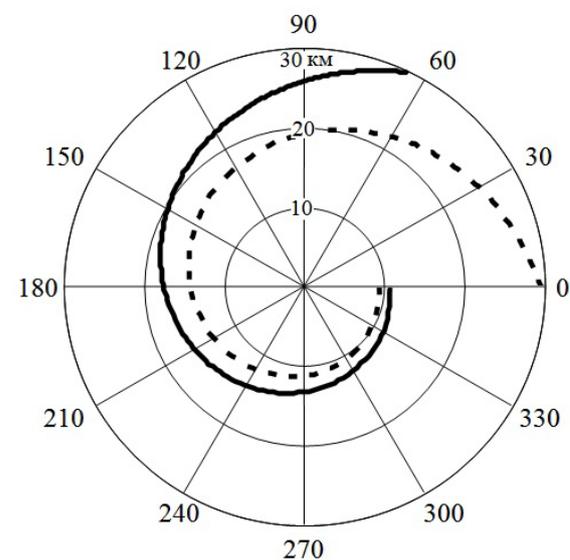


Рис. 7. Маршруты полета БЛА при местоопределении объектов в триангуляционной системе с параметром  $\alpha_n = 10$  (а) и  $\alpha_n = 5$  (б)

анализ траекторий движения одиночного БЛА и курсовых углов двух синхронно барражирующих носителей приемников-пеленгаторов из состава триангуляционной системы.

### Список литературы

1. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.
2. Иванкин Е.Ф., Понькин В.А. Теоретические основы получения и защиты информации об объектах наблюдения. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 386 с.
3. Пономарев А.А., Межуев А.М. Оптимизация маршрута летательного аппарата, определяющего местоположение цели по ее угловым координатам // Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы / под ред. А.В. Коренного. М.: Радиотехника, 2012. С. 21–29.

4. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
5. Методы анализа и синтеза в прикладных задачах навигации, связи и управления / под ред. А.В. Коренного. М.: Радиотехника, 2015. 162 с.
6. Осипов Е.Б. Способ вывода летательного аппарата на радиоизлучающий объект с использованием оптимальной обработки результатов многократного пеленгования // Вестник Воронежского государственного технического университета. Сер.: Системы автоматизированного проектирования и системы автоматизации производства. 2003. Вып. 3.3. С. 21–25.
7. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука, 1966. 424 с.
8. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / под ред. А.М. Рембовского. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 356 с.
9. Савелов А.А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применение / под ред. А.П. Нордена. М.: Наука, 1960. 293 с.

## Optimization of routes of flight of the pilotless flying devices when determining a place of a source of a radio emission by estimates of angular coordinates from their boards

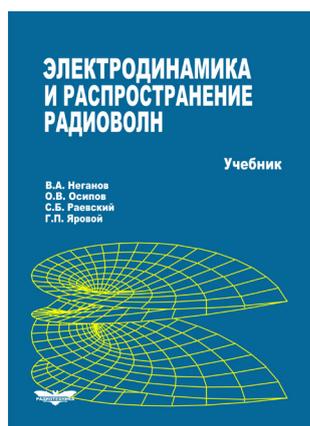
*S.N. Razin'kov, A.V. Bogoslovsky*

Possibilities of optimization of routes of flight of pilotless aircrafts for the increase of exactness of position-fix of surface sources of радиоизлучения on the estimations of angular coordinates from their sides are investigated. The rules of choice of points of direction-finding of signals are found on the trajectory of motion of single pilotless aircraft and course corners of two synchronously flying carriers of direction receiver-fingers from composition of the angle system, at that a minimum of dispersion of measurement of the coordinates of objects is arrived at.

*Keywords:* pilotless aircraft, direction receiver-finger, dispersion of direction-finding, dispersion of estimation of location.

**Неганов, В.А.**

**Электродинамика и распространение радиоволн:** учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



**ISBN 978-5-88070-154-4**

УДК 537.87(075.3)  
ББК 22.3  
Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

*Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.*