

Оптимизация маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов при местопределении 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 местопределения 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 местопределения 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 местопределения 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 местопределения излучателей за счет оптимизации маршрутов полета БЛА.

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

Будем полагать, что источник радиоизлучения расположен в начале полярной системы координат (R, φ) 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 γ_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 γ_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 σ_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 ϑ_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 γ_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-

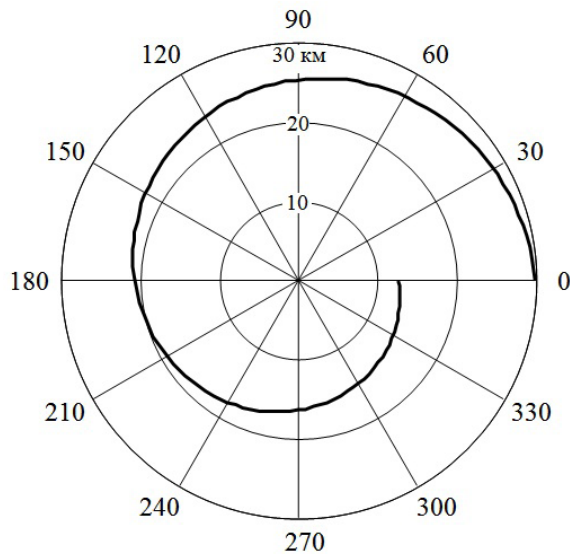


Рис. 1. Маршрут полета БЛА при изменении дисперсии оценки угловых координат объекта по закону $\sigma_{\varphi n}^2 / \sigma_{\varphi(n+1)}^2 = 2$, $n = 1, 2, 3 \dots$

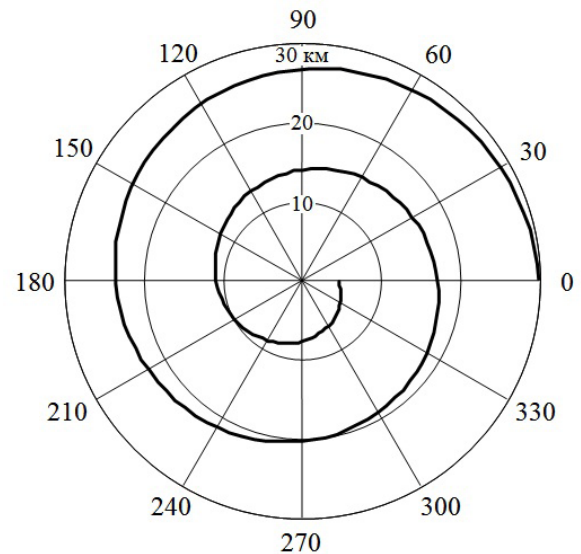


Рис. 2. Маршрут полета БЛА при изменении дисперсии оценки угловых координат объекта по закону $\sigma_{\varphi(n+1)}^2 / \sigma_{\varphi n}^2 = 2$, $n = 1, 2, 3 \dots$

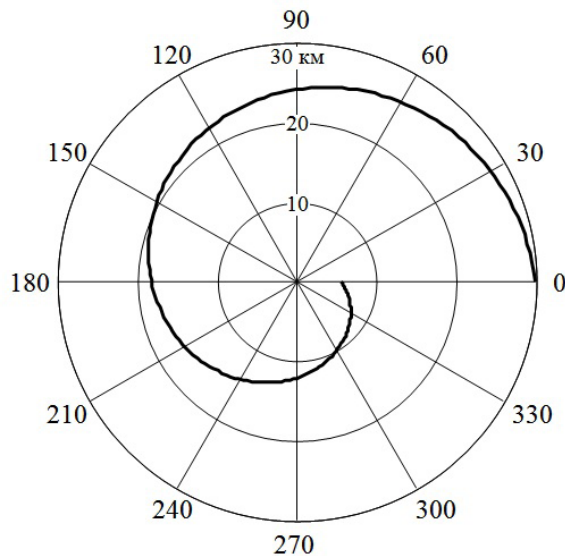


Рис. 3. Маршрут полета БЛА при дисперсии оценки угловых координат объекта $\sigma_{\varphi n}^2 = \sigma_{\varphi(n+1)}^2$, $n = 1, 2, 3 \dots$

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 γ_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° до 1° 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-

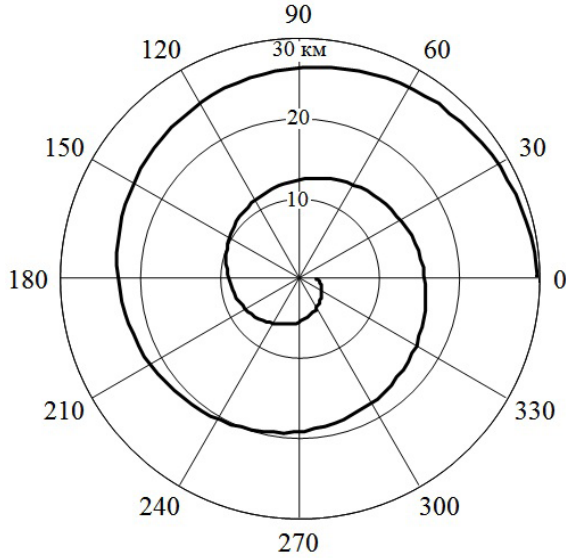


Рис. 4. Маршрут полета БЛА при СКО пеленгования объекта $\sigma_{\varphi n} = 1^\circ$ в секторе углов $\varphi \in [0; 180^\circ)$ и $\sigma_{\varphi n} = 10^\circ$ в секторе углов $\varphi \in [180^\circ; 360^\circ)$

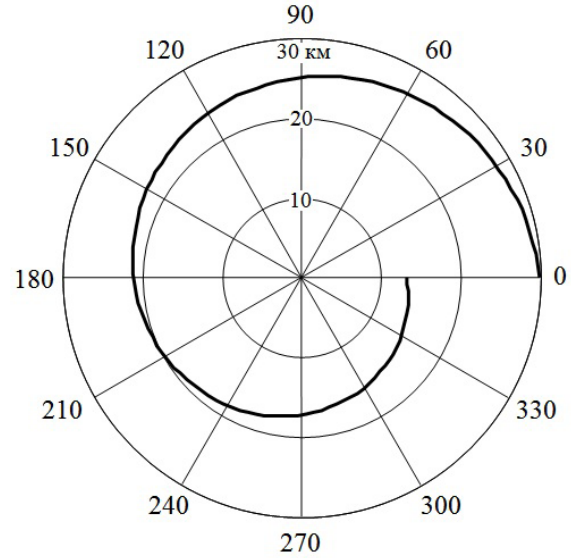


Рис. 5. Маршрут полета БЛА при СКО пеленгования объекта $\sigma_{\varphi n} = 10^\circ$ в секторе углов $\varphi \in [0; 180^\circ)$ и $\sigma_{\varphi n} = 1^\circ$ в секторе углов $\varphi \in [180^\circ; 360^\circ)$

тра 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 σ_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

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

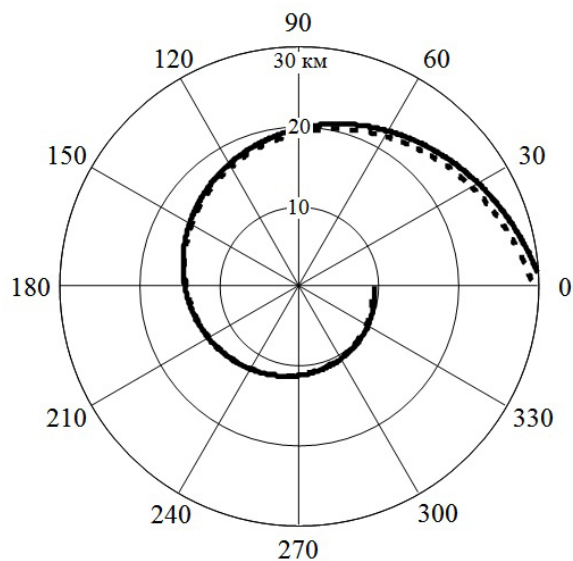


Рис. 6. Маршруты полета БЛА при местоопределении объектов триангуляционной системой с пеленгационной базой $d = 2$ км

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

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.

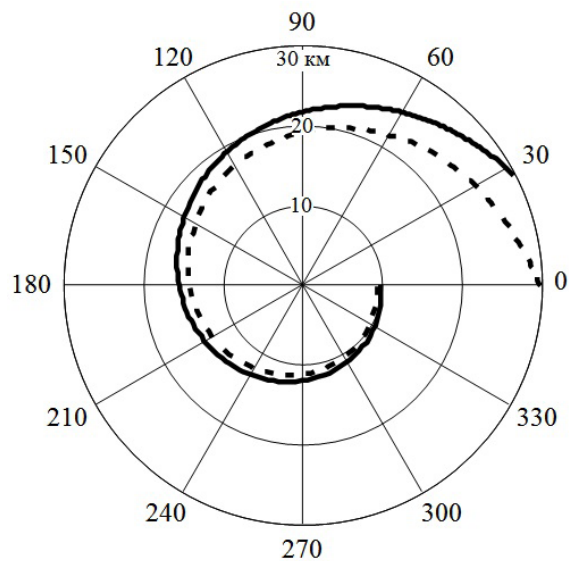
На рис. 6 приведены маршруты полета БЛА при триангуляционном местоопределении излучателей с пеленгационной базой $d = 2$ км; на рис. 7 – с базой, при которой $\alpha_n = 10$ (а) и $\alpha_n = 5$ (б). Штриховой линией представлены траектории, построенные при выборе перед функцией $\operatorname{ctg}(\dots)$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

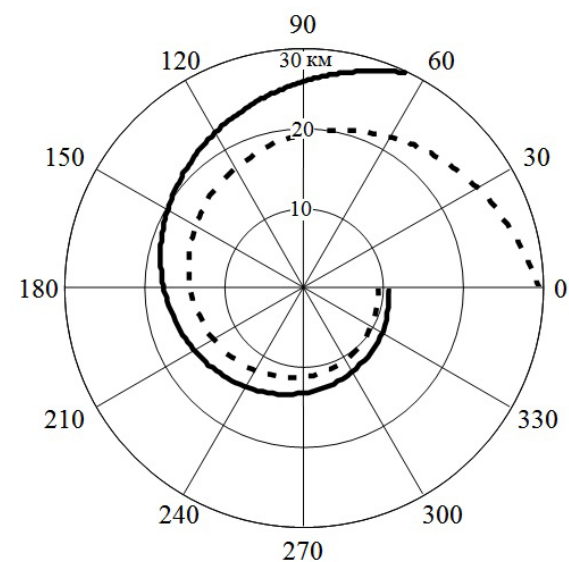


Рис. 7. Маршруты полета БЛА при местоопределении объектов в триангуляционной системе с параметром $\alpha_n = 10$ (а) и $\alpha_n = 5$ (б)

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

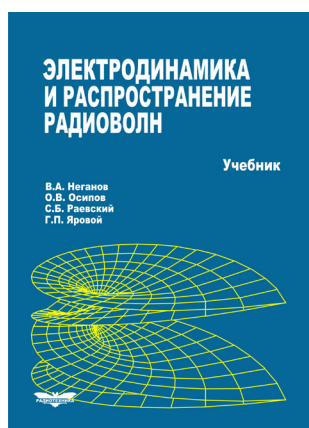
S.N. Razin'kov, A.V. Bogoslovsky

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 receivers-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.