

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.396.67.01
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.74-81

Дата поступления: 11.09.2019
Дата принятия: 02.10.2019

Экспериментальные оценки угловых координат и местоположения источников радиоизлучения высокомобильными обнаружителями-пеленгаторами

С.Н. Разиньков

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

С применением панорамного цифрового обнаружителя-пеленгатора, расположенного на борту беспилотного летательного аппарата самолетного типа малой дальности, в условиях радиоизмерительного полигона проведены экспериментальные оценки угловых координат и местоположения источников радиоизлучения, функционирующих на фиксированных частотах и в режиме программной перестройки рабочей частоты. Угловые координаты объектов определялись фазовым методом с использованием процедур быстрого преобразования Фурье, синхронного спектрального анализа сигналов в приемных каналах и устранения неоднозначности измерений набегов фаз путем нахождения показателей их кратности. При местоопределении излучателей выполнялся выбор траектории полета беспилотного летательного аппарата по критерию минимума среднеквадратических ошибок оценок местоположения; реализованы варианты движения носителя пеленгационной аппаратуры по дуге с максимальным углом засечки пеленга 120° и спирали при задании курсовых углов в поворотных пунктах маршрута на основе апостериорных значений дисперсии координат объектов. Проведен анализ среднеквадратических ошибок измерения угловых координат и местоопределения имитаторов источников радиоизлучения, выполненных на базе генераторов стандартных сигналов, и радиостанций в диапазоне частот 30...3000 МГц.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, обнаружитель-пеленгатор, быстрое преобразование Фурье, оценка угловых координат, определение местоположения источника радиоизлучения, среднеквадратическая ошибка измерений.

Введение

В [1; 2] определены пути построения, а в [3-5] – способы применения высокомобильных комплексов мониторинга на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА) самолетного типа малой дальности с бортовыми панорамными цифровыми обнаружителями-пеленгаторами [6; 7]. Такие комплексы обладают функциями местоопределения источников радиоизлучения (ИРИ) по результатам многократного измерения их угловых координат в различных точках траектории полета БЛА [1-5], позволяющими выполнять пространственную селекцию радиоэлектронных объектов и их распознавание при изменении режимов работы и применении мер радиомаскировки [2]. За счет мобильности носителей аппаратуры мониторинга возможно оперативное сосредоточение усилий по добыванию данных об ИРИ в заданных районах, обеспечивающее контроль электромагнитной обстановки на территории значительной площади.

Основными задачами создания высокомобильных комплексов мониторинга являются разработка технологий измерения пеленгов и рационального выбора позиций для выполнения указанных

✉ razinkovsergey@rambler.ru (Разиньков Сергей Николаевич)

измерений в интересах минимизации среднеквадратических ошибок (СКО) оценивания местоположения объектов [3].

В предлагаемой работе представлены результаты экспериментальных исследований точности измерения угловых координат и местоположения ИРИ диапазона частот 30...3000 МГц, функционирующих на фиксированных частотах (ФЧ) и в режиме программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), с применением панорамного цифрового обнаружителя-пеленгатора [6; 7], размещенного на борту БЛА самолетного типа малой дальности.

Цель работы – анализ СКО определения направлений прихода сигналов и пространственного положения их источников высокомобильным обнаружителем-пеленгатором.

1. Принципы построения панорамного цифрового обнаружителя-пеленгатора и результаты измерения угловых координат ИРИ

При проведении измерений полагалось, что приемные каналы обнаружителя-пеленгатора связаны по электрическим цепям и работают в ли-

нейном режиме с одинаковыми коэффициентами передачи; их собственные шумы можно считать гауссовскими, аддитивными, некоррелированными в различных каналах, обладающими одинаковыми значениями спектральной плотности мощности. Комплексные коэффициенты передачи каналов сохраняют свои значения в процессе измерений.

Антенная система обнаружителя-пеленгатора выполнена в виде концентрических кольцевых решеток из трех несимметричных вертикальных штырей, закрепленных на крыле БЛА в верхней полуплоскости, с диапазонами рабочих частот 30...100 МГц, 100...200 МГц, 200...400 МГц, 400...700 МГц и 700...3000 МГц. Диаграммы направленности элементов решетки в каждом диапазоне частот являются идентичными. Полоса частот одновременного технического анализа для установления наличия сигналов на входе приемника и получения их спектральных характеристик равна 10 МГц.

Пеленгование сигналов осуществляется фазовым методом [8] с использованием процедур быстрого преобразования Фурье и их синхронного спектрального анализа в приемных каналах при адаптивной фиксации моментов времени прихода импульсов и корреляционной обработке непрерывных излучений [2]. При дискретизации сигналов в частотной области реализуются процедуры их обнаружения в каждом разрешаемом по частоте элементе и идентификации с сигналами, обнаруженными в соседних элементах [2; 6; 7].

Разрешение сигналов, одновременно наблюдаемых на входах обнаружителя-пеленгатора, по частоте выполняется на основе многоканальной обработки в широкополосных системах с последующим уточнением полученных оценок частот в цифровом процессоре быстрого преобразования Фурье [1]. В целях разрешения направлений прихода сигналов с идентифицированной принадлежностью различным частотам вычисляются собственные и взаимные произведения их комплексных амплитуд в приемных каналах и формируется решающая статистика для сравнения с порогом, определяемым по критерию Неймана – Пирсона, в соответствии с принципом дробления сигналов на два при исходном равенстве пеленгов [7].

Измерения проводились при отношении сигнал – шум в каналах приема не менее 15 дБ. По аналогии с [6] критерием наличия аномальной ошибки пеленгования являлось превышение погрешности оценки направления на ИРИ 5°.

При равномерном распределении начальной фазы пеленгуемого сигнала на интервале $[-\pi; \pi]$ в решающем устройстве обнаружителя-пеленгатора в m -й позиции на маршруте БЛА, $m = 0, 1, 2, \dots$, вырабатывается оценка максимального правдоподобия [9] угловых координат $\theta^{(m)}$ излучателя [4]:

$$\hat{\theta}^{(m)} = \arctg\left(\hat{\Psi}^{(m)} / \hat{\Omega}^{(m)}\right), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где

$$\hat{\Psi}^{(m)} = \frac{4}{3} \sum_{n=0}^2 \Delta \hat{\phi}_n^{(m)} \sin(2\pi n/3),$$

$$\hat{\Omega}^{(m)} = \frac{4}{3} \sum_{n=0}^2 \Delta \hat{\phi}_n^{(m)} \cos(2\pi n/3), \quad (2)$$

$m = 0, 1, 2, \dots$,

представляют собой оценки максимального правдоподобия параметров, характеризующих разности фаз сигналов $\Delta \phi_n^{(m)}$, $m = 0, 1, 2, \dots$, $n = 0, 1, 2$ [6; 7].

Выборка оценок $\Delta \hat{\phi}_n^{(m)}$ разностей фаз сигналов $\Delta \phi_n^{(m)}$, $m = 0, 1, 2, \dots$, $n = 0, 1, 2$, формируется в виде [6]

$$\hat{\Psi}^{(m)} = \frac{4}{3} \sum_{n=0}^2 \Delta \hat{\phi}_n^{(m)} \sin(2\pi n/3),$$

$$\hat{\Omega}^{(m)} = \frac{4}{3} \sum_{n=0}^2 \Delta \hat{\phi}_n^{(m)} \cos(2\pi n/3), \quad (3)$$

$m = 0, 1, 2, \dots$;

значения $\Delta \hat{\phi}_n^{(m)}$, $m = 0, 1, 2, \dots$, $n = 0, 1, 2$, определяются по правилу [6]

$$\Delta \hat{\phi}_n^{(m)} = \arg\left(\dot{U}_{n \oplus (-2)}^{(m)} \dot{U}_{3-n \oplus (-2)}^{(m)*}\right), \quad (5)$$

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

где $\dot{U}_n^{(m)}$ – комплексная амплитуда напряжения на выходе n -го элемента антенной решетки, $m = 0, 1, 2, \dots$, $n = 0, 1, 2$; «*» – знак комплексного сопряжения.

Область измерения разностей фаз сигналов лежит в пределах $[-\pi; \pi]$; их оценки (5) являются некоррелированными, циклическими с периодом 2π и характеризуются одинаковыми значениями дисперсии σ^2 .

Алгоритм пеленгования, представленный выражениями (1)–(5), в отличие от алгоритмов пеленгования [2; 6; 8], базирующихся на измерении фазовых набегов сигналов и нахождении максимума плотности их распределения, соответствующего оценке максимального правдоподобия угловых

координат ИРИ [6], позволяет расширить диапазон рабочих частот обнаружителя-пеленгатора вследствие учета цикличности фазовых измерений. При этом однозначная оценка угловых координат излучателя может быть получена при превышении размеров пеленгационной базы $\frac{1}{4}$ длины волны. В результате обеспечиваются возможности снижения уровня пространственно-коррелированных помех, обусловленных вторичным излучением принимаемых сигналов антенной решеткой [1; 2], за счет увеличения расстояния между ее элементами.

Согласно [6; 7], для $\Delta\hat{\varphi}_n^{(m)}$, $m=0, 1, 2, \dots$, $n=0, 1, 2$, функция правдоподобия может быть представлена усеченным нормальным законом распределения

$$w\left(\Delta\hat{\varphi}_n^{(m)} \mid \Delta\varphi_n^{(m)}\right) = \alpha_0 \exp\left(-L\left(\Delta\varphi_n^{(m)}\right)/\sigma^2\right), \quad (6)$$

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

где α_0 – множитель, определяемый из условия нормировки функции правдоподобия, $L\left(\Delta\varphi_n^{(m)}\right)$ – функционал разностей фаз сигналов, представляемый в виде [6]

$$L\left(\Delta\varphi_n^{(m)}\right) = \sum_{n=1}^2 \left\langle \left\langle \Delta\hat{\varphi}_n^{(m)} - \Delta\varphi_n^{(m)} \right\rangle \right\rangle^2, \quad (7)$$

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

где $\langle \langle \cdot \rangle \rangle$ – операция нахождения остатка от округления до ближайшего целого числа периодов (по модулю 2π).

В соответствии с требованием однозначности циклических оценок $\Delta\hat{\varphi}_n^{(m)}$, $m=0, 1, 2, \dots, \quad n=0, 1, 2$, выполнимом при условии

$$\left| \Delta\hat{\varphi}_n^{(m)} - \Delta\varphi_n^{(m)} \right| < \pi, \quad (8)$$

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

из (7) следует, что

$$L\left(\Delta\varphi_n^{(m)}\right) = \min_{\Delta\varphi_n^{(m)}} \left\{ \sum_{n=1}^M \left(\Delta\hat{\varphi}_n^{(m)} - \Delta\varphi_n^{(m)} - 2\pi\eta_n^{(m)} \right)^2 \right\}, \quad (9)$$

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

где $\eta_n^{(m)}$ – показатели кратности разностей фаз сигналов с периодом 2π , $\eta_n^{(m)} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, $m=0, 1, 2, \dots$, $n=0, 1, 2$.

На основании (6), (8), (9) установлено, что оценка разностей фаз сигналов на элементах антенной

решетки обнаружителя-пеленгатора заключается в минимизации функционала (9) по множеству их возможных значений и нахождении показателей кратности.

Значения $\hat{\eta}_n^{(m)}$, $n=0, 1, 2$, при которых функционал (9) достигает минимума, вычисляются по правилу

$$\hat{\eta}_n^{(m)} = \arg \min_{\Delta\varphi_n^{(m)}} \left\{ \sum_{n=1}^2 \left(\Delta\hat{\varphi}_n^{(m)} - 2\pi\eta_n^{(m)} \right)^2 \times \sum_{n=1}^2 \sin^2(2\pi n/3) - \left(\sum_{n=1}^2 \left(\Delta\hat{\varphi}_n^{(m)} - 2\pi\eta_n^{(m)} \right) \sin^2(2\pi n/3) \right)^2 \right\}, \quad (10)$$

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

При нахождении показателей кратности с использованием с (10) разности фаз сигналов в (9) соответствуют величинам, при которых плотность их распределения достигает максимума, что позволяет сделать вывод о потенциально высокой точности определения направлений на ИРИ на основе (1).

Измерения угловых координат объектов проводились в фиксированной точке пространства ($m=0$) на открытой площадке радиоизмерительного полигона на частотах, где уровень фоновых радиоизлучений, контролируемый измерителем напряженности поля, не превышал 2 мкВ/м. Для уменьшения эффектов интерференции поля пеленгуемого источника и вторичных излучений подстилающей поверхности носитель обнаружителя-пеленгатора размещался на высоте 3 м.

Значения СКО пеленгов ИРИ находились как математические ожидания квадратов отклонения их оценок от математического ожидания, определенного в серии из 20 измерений на каждой частоте, в степени $\frac{1}{2}$.

В табл. 1 приведены СКО $\sigma_{\theta m}$, $m=0, 1, 2, \dots$, оценок направлений на ИРИ типа генераторов стандартных сигналов (ГСС), функционирующих в режиме непрерывного излучения на фиксированных частотах (ФЧ). В процессе измерений обнаружитель-пеленгатор был настроен на рабочую частоту излучателя.

Согласно данным табл. 1, за счет измерений фазовых набегов сигналов в панорамном цифровом обнаружителя-пеленгаторе с диапазоном рабочих частот 30...3000 МГц в соответствии с методикой (1)–(3), (10) достигается СКО оценки угловых координат ИРИ 3,3...4,9°.

Таблица 1

Значения СКО измерения угловых координат ИРИ с применением панорамного цифрового обнаружителя-пеленгатора

| Номер серии измерений | Частота настройки ГСС, МГц | СКО пеленгования ИРИ, град. |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 30 | 4,9 |
| 2 | 100 | 4,1 |
| 3 | 200 | 4,0 |
| 4 | 398 | 3,4 |
| 5 | 497 | 4,3 |
| 6 | 628 | 4,1 |
| 7 | 1155 | 3,6 |
| 8 | 2994 | 3,3 |

2. Методика определения и результаты экспериментальной оценки СКО местоположения ИРИ

Измерения координат ИРИ по результатам многократного пеленгования их сигналов на маршруте полета БЛА, оснащенного бортовым обнаружителем-пеленгатором, проводилось в соответствии с методикой (1)–(4).

Полеты БЛА выполнялись на высотах 400 м и 1000 м со скоростями в горизонтальной плоскости, изменяющимися в пределах от 70 км/ч до 150 км/ч, при скорости ветра у земли до 10 м/с и порывах ветра на рабочем эшелоне высоты не более 15 м/с.

В целях обоснования правил рационального выбора позиций для измерений пеленгов сигналов, при котором обеспечивается наибольшая точность оценок местоположения объектов, движение БЛА осуществлялось по следующим траекториям:

- маршрут № 1 – облет ИРИ по дуге с максимальным углом засечки пеленга 120°;
- маршрут № 2 – полет по спирали при задании курсовых углов в поворотных пунктах маршрута (ППМ) по критерию минимизации дисперсии местоположения [3] при фиксированных СКО пеленгования ИРИ.

Для минимизации экранирования антенной системы обнаружителя-пеленгатора центропланом и консолями крыла БЛА [10; 11] радиус кривизны дуги на маршруте № 1 выбирался таким образом, чтобы угол места пеленгуемого ИРИ превышал 10°; при высотах полета носителя 400 м и 1000 м его величина составляла 6 км и 10 км соответственно.

Направление движение БЛА в m -м ППМ, $m = 0, 1, 2, \dots$, на маршруте № 2 будем задавать курсовым углом γ_m , который удовлетворяет критерию [3]

$$\begin{cases} \hat{\gamma}_m = \arg \min_{\gamma_m} \sigma_R^2; \\ \gamma_m \neq \pi k, \end{cases} \quad (11)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

где

$$\sigma_R^2 = \left(\sigma_{\theta(m-1)}^2 R_{(m-1)}^2 + \sigma_{\theta m}^2 R_m^2 \right) / \sin^2 \vartheta_m, \quad (12)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

– дисперсия оценки местоположения излучателя, R_m и $\sigma_{\theta m}$ – его удаление от позиции обнаружителя-пеленгатора и СКО измерения направления прихода сигнала в m -м ППМ, ϑ_m – угловое расстояние между точками пеленгования, для которого выполняется условие [12]

$$\sin \vartheta_m = L \sin \gamma_m / R_m, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (13)$$

где L – расстояние между ППМ. Второе уравнение в (5) исключает из рассмотрения направление движения БЛА непосредственно на ИРИ, поскольку его положение в пространстве априори неизвестно.

Решение системы уравнений (11) с учетом (12), (13) имеет вид

$$\hat{\gamma}_m = \pm \arccos \left(0,5 \left(\beta_n - \sqrt{\beta_n^2 - 4} \right) \right) + 2\pi k, \quad (14)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

где

$$\beta_n = \left\{ \left(\sigma_{\varphi(m-1)}^2 + \sigma_{\varphi m}^2 \right) \alpha_{(m-1)}^4 + \left(2\sigma_{\varphi(m-1)}^2 + 5\sigma_{\varphi m}^2 \right) \alpha_n^2 + \sigma_{\varphi m}^2 \right\} / \left\{ \left(\sigma_{\varphi(m-1)}^2 + 2\sigma_{\varphi m}^2 \right) \alpha_{(m-1)}^3 + 2\sigma_{\varphi m}^2 \alpha_{(m-1)} \right\}, \quad (15)$$

$\alpha_m = R_m / L$, $m = 0, 1, 2, \dots$; курсовой угол полета БЛА в начальной точке маршрута, согласно (8), (9), равен 81°.

В качестве ИРИ использовались ГСС в режиме непрерывного излучения на ФЧ, радиостанции

Таблица 2

Значения СКО оценки местоположения ИРИ в диапазоне частот 30...100 МГц

| Номер маршрута полета БЛА | Высота полета БЛА, м | СКО местоположения ИРИ (% от дальности) | |
|---------------------------|----------------------|---|------------------------------------|
| | | ГСС с ФЧ 68 МГц | Имитатор радиостанции на ФЧ 68 МГц |
| 1 | 400 | 8,1 | 9,8 |
| | 1000 | 8,4 | 10,2 |
| 2 | 400 | 7,9 | 9,0 |
| | 1000 | 8,2 | 9,4 |

Таблица 3

Значения СКО оценки местоположения ИРИ в диапазоне частот 100...200 МГц

| Номер маршрута полета БЛА | Высота полета БЛА, м | СКО местоположения ИРИ (% от дальности) | |
|---------------------------|----------------------|---|---|
| | | ГСС на ФЧ 160 МГц | Радиостанции YAESU YX-110 на ФЧ 160 МГц |
| 1 | 400 | 5,5 | - |
| | 1000 | 5,9 | - |
| 2 | 400 | 5,5 | - |
| | 1000 | 5,7 | - |

Таблица 4

Значения СКО оценки местоположения ИРИ в диапазоне частот 200...400 МГц

| Номер маршрута полета БЛА | Высота полета БЛА, м | СКО местоположения ИРИ (% от дальности) | |
|---------------------------|----------------------|---|------------------------------------|
| | | ГСС на ФЧ 301 МГц | Радиостанция P-845 на ФЧ 254,3 МГц |
| 1 | 400 | 2,7 | 9,1 |
| | 1000 | 3,1 | 9,3 |
| 2 | 400 | 2,5 | 8,7 |
| | 1000 | 2,8 | 9,0 |

Таблица 5

Значения СКО оценки местоположения ИРИ в диапазоне частот 400...700 МГц

| Номер маршрута полета БЛА | Высота полета БЛА, м | СКО местоположения ИРИ (% от дальности) | |
|---------------------------|----------------------|---|---|
| | | ГСС на ФЧ 440 МГц | Радиостанции Midland CT-400 на ФЧ 459 МГц |
| 1 | 400 | 2,6 | 9,3 |
| | 1000 | 3,1 | 9,9 |
| 2 | 400 | 2,4 | 9,3 |
| | 1000 | 2,8 | 9,4 |

Таблица 6

Значения СКО оценки местоположения ИРИ в диапазоне частот 700...3000 МГц

| Номер маршрута полета БЛА | Высота полета БЛА, м | СКО местоположения ИРИ (% от дальности) | |
|---------------------------|----------------------|---|--|
| | | ГСС на ФЧ 870 МГц | Спутниковые абонентские терминалы Thuraya на ФЧ 1657,1 МГц |
| 1 | 400 | 2,2 | 13,8 |
| | 1000 | 3,9 | - |
| 2 | 400 | 2,2 | 13,3 |
| | 1000 | 3,6 | - |

YAESU YX-110 (Япония), P-845 (Россия), Midland CT-400 (США), Harris Falcon II (США), образующие корреспондирующие пары с дистанцией связи 0,8...1,1 км, и спутниковые абонентские терминалы Thuraya (ОАЭ). Радиостанции YAESU YX-110, P-845, Midland CT-400 и спутниковые абонентские терминалы Thuraya функционировали на ФЧ, радиостанции Harris Falcon II – в режиме с программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ). В сеансах связи между абонентами корреспондирующих пар передавались сообщения длительностью 40...90 с и квитанции об их получении длительностью 1...3 с при длительности паузы между сообщениями 5...7 мин.

Значения СКО местоопределения ИРИ σ_R (в процентах от дальности) в диапазонах частот комплекса мониторинга приведены в табл. 2–6.

Знак «–» означает, что в ходе эксперимента отсутствовал устойчивый прием сигналов. Основными причинами срыва измерений являлись смещение диаграммы направленности антенной системы за счет поворота БЛА вокруг строительной оси, приводящее к снижению отношения сигнал – шум на входе приемника относительно уровня 15 дБ, а также траекторная нестабильность и ветровой снос носителя, обуславливающие аномальные ошибки пеленгования. При барражировании БЛА по маршруту № 2 проявляется эффект экранирования бортовой антенной системы его корпусом [5; 10], способствующий уменьшению сектора углов приема и мощности сигналов вследствие дифракции на носителе.

Из представленных результатов следует, что СКО определения местоположения ГСС в режиме непрерывного излучения на ФЧ лежит в пределах 2,2...8,4 % от дальности. Для радиостанций Midland CT-400, работающих в составе корреспондирующей пары, и спутниковых абонентских терминалов Thuraya эти показатели достигают 9,3...9,9 % и 13,8 % соответственно. При барражировании беспилотного комплекса мониторинга по маршруту № 1 местоопределение радиостанции P-845 выполняется с СКО 9,1...9,3 % от дальности; при выборе маршрута № 2 точность выполняемых измерений возрастает до 8,7...9,0 % от дальности.

Координаты радиостанций YAESU YX-110 в составе корреспондирующих пар с дистанцией связи 0,8...1,1 км по результатам пеленгования на маршрутах полета БЛА измерены быть не могут ввиду отсутствия пространственной селекции сигналов различных абонентов. В процессе мониторинга

оценивается положение центра поля засечек координат от двух радиостанций, определяемое соотношением мощностей и длительностей их излучений.

Радиостанции Harris Falcon II с ППРЧ, обеспечивающие дистанцию связи до 800 м, при высоте полета БЛА 1000 м энергетически недоступны для обнаружителя-пеленгатора. При отношении сигнал – шум на входе приемника-обнаружителя 15 дБ установлены возможности вскрытия не менее 80 % процентов частот группового набора этих объектов за 10 с непрерывного излучения.

Наилучшая точность измерения координат ИРИ достигается при движении носителя обнаружителя-пеленгатора по маршруту № 2. Изменение курсового угла, определяемое значениями дисперсии оценки угловых координат излучателя, возрастает относительно начального значения по мере уменьшения дальности. За счет повышения точности пеленгования при приближении к объекту сжатие спирали уменьшается, протяженность маршрута полета БЛА по сравнению с длиной траектории, построенной при монотонном возрастании СКО измерения направлений прихода сигналов, сокращается в 1,7 раза. При равной точности пеленгования сигналов в каждом ППМ траектория движения БЛА не зависит от СКО измерения угловых координат ИРИ; ее вид определяется дисперсией оценки угловых координат объекта в начальный момент времени.

Заключение

Выполнены экспериментальные исследования СКО пеленгования и определения координат ИРИ с применением панорамного цифрового обнаружителя-пеленгатора, расположенного на борту БЛА самолетного типа.

Показано, что потенциально высокая точность оценок направлений на излучатели фазовым методом достигается при измерении разностей фаз сигналов на элементах антенной решетки и устранении их неоднозначности путем вычисления показателей кратности с периодом 2π . Точность определения местоположения ИРИ повышается за счет рационального выбора позиций для измерения пеленгов. Минимальные СКО измерения координат объектов характерны для вариантов движения БЛА по маршруту в форме спирали при задании курсовых углов по результатам оценки дисперсии пеленгов в ППМ.

Список литературы

1. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.
2. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / под ред. В.Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2006. 424 с.
3. Разиньков С.Н., Богословский А.В. Оптимизация маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов при местопределении источника радиоизлучения по оценкам угловых координат с их бортов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 4. С. 61–66.
4. Разиньков С.Н., Богословский А.В. Оптимизация маршрутов движения мобильных измерителей времени прихода импульсных сигналов при оценке координат их источников // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2016. Т. 19. № 1. С. 34–39.
5. Разиньков С.Н., Жидко Е.А., Лукин М.Ю. Экспериментальное местопределение источников радиоизлучения по многократным оценкам угловых координат в беспилотных комплексах мониторинга // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 6. С. 57–63.
6. Уфаев В.А., Разиньков С.Н. Алгоритмы пеленгования радиосигналов по фазовым измерениям в кольцевых антенных решетках // Радиотехника. 2003. № 10. С. 78–81.
7. Уфаев В.А., Разиньков С.Н., Чикин М.Г. Обнаружение и идентификация сигналов в панорамных фазометрических радиопеленгаторах // Антенны. 2008. № 3 (130). С. 57–62.
8. Проектирование фазовых автоматических радиопеленгаторов / А.С. Саидов [и др.]. М.: Радио и связь, 1997. 160 с.
9. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Советское радио, 1977. 432 с.
10. Резников Г.Б. Антенны летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1967. 416 с.
11. Простаков Е.И. Влияние экрана на диаграмму направленности решетки вибраторов, перпендикулярных ее плоскости // Техника средств связи. Серия: Теория радиосвязи. 1979. № 4 (21). С. 109–111.
12. Коренной А.В. Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы. М.: Радиотехника, 2012. 112 с.

References

1. Radzievskij V.G., Sirota A.A. *Theoretical Foundations of Electronic Intelligence*. Moscow: Radiotekhnika, 2004, 432 p. [In Russian].
2. *Modern Electronic Warfare. Methodological Issues*. Ed. by V.G. Radzievsky. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 424 p. [In Russian].
3. Razin'kov S.N., Bogoslovskij A.V. Route optimization flight of unmanned aerial vehicles at Location-radiation source estimated angular coordinates with their boards. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 61–66. [In Russian].
4. Razin'kov S.N., Bogoslovskij A.V. Optimization of mobile time meters traffic routes joining pulse signals when evaluating the origin of their sources. *Fizika volnovyh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 34–39. [In Russian].
5. Razin'kov S.N., Zhidko E.A., Lukin M.Ju. Experimental GPS fix radio sources over multiple estimates the angular coordinate in the unmanned monitoring complexes. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravljajuschie sistemy*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 57–63. [In Russian].
6. Ufaev V.A., Razin'kov S.N. Radio direction finding algorithms for phase measurements in the circular antenna array. *Radiotekhnika*, 2003, no. 10, pp. 78–81. [In Russian].
7. Ufaev V.A., Razin'kov S.N., Chikin M.G. Detection and identification of signals in the panoramic fazometricheskikh finders. *Antenny*, 2008, no. 3 (130), pp. 57–62. [In Russian].
8. Saidov A.S. et al. *Design Phase Automatic Direction Finders*. Moscow: Radio i svjaz', 1997, 160 p. [In Russian].
9. Repin V.G., Tartakovskij G.P. *Statistical Synthesis With The A Priori Uncertainty And Adaptation Information Systems*. Moscow: Sovetskoe radio, 1977, 432 p. [In Russian].
10. Reznikov G.B. *Antenna Aerial Vehicles*. Moscow: Sovetskoe radio, 1967, 416 p. [In Russian].
11. Prostavok E.I. Effect on screen diagram vibrators lattice orientation perpendicular to the plane. *Tehnika sredstv svyazi. Serija: Teorija radiosvyazi*, 1979, no. 4 (21), pp. 109–111. [In Russian].
12. Korennoj A.V. *Detection, Identification and Determination of Parameters of Objects of Images. Methods and Algorithms*. Moscow: Radiotekhnika, 2012, 112 p. [In Russian].

Experimental estimates of angular coordinates and location of radio sources by highly mobile detector direction finders

S.N. Razinkov

MERC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy»
54a, Saryh Bolshevnikov Street
Voronezh, 394064, Russian Federation

Using the panoramic digital detector direction finder located onboard the pilotless aircraft of plane type of small range in the conditions of a radio measuring polygon experimental estimates of angular data and location of the sources of a radio emission functioning at fixed frequencies and in the mode of program reorganization of operating frequency are carried out. Angular data of objects decided by a phase method on use of procedures of fast Fourier transform, synchronous spectrum analysis of signals in receiving channels and elimination of ambiguity of measurements of attacks of phases by finding of indicators of their multiplicity. At a fixing of radiators the choice of a flight trajectory of the pilotless aircraft by criterion of a minimum of mean square errors of estimates of location was carried out; options of the movement of the carrier of the direction finder equipment on an arc with the maximum corner of a notch of a bearing 120° are implemented and filched at a task of course corners in turning points of a route on the basis of a posteriori values of dispersion of coordinates of objects. The analysis of mean square measurement errors of angular data and fixing of simulators of the sources of a radio emission executed on the basis of standard signal generators, and radio stations in frequency range 30...3000 MHz is carried out.

Keyword: pilotless aircraft, detector direction finder, fast Fourier transform, assessment of angular data, position fix of a source of a radio emission, mean square error of measurements.

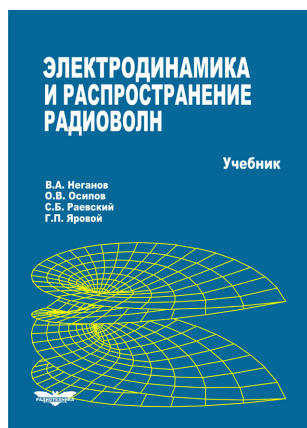
Разиньков Сергей Николаевич, 1971 г. р., доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж).

Область научных интересов: информационно-измерительные системы, методы обработки информации в радиосистемах, способы и средства пеленгования и местоопределения источников радиоизлучения

E-mail: razinkovsergey@rambler.ru

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.