

УДК 621.396.67.01

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОМОБИЛЬНОГО ЦИФРОВОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ-ПЕЛЕНГАТОРА

С. Н. Разиньков, д.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем) ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия;

orcid.org/0000-0002-3987-0607, e-mail: razinkovsergey@rambler.ru

А. В. Богословский, к.т.н., заместитель начальника кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия;

orcid.org/0000-0002-6469-3366, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

С. А. Гордиенко, к.т.н., доцент, старший преподаватель кафедры Боевых авиационных комплексов КВВАУЛ, Краснодар, Россия;

orcid.org/0000-0002-4729-1429, e-mail: gordi.serhio2013@yandex.ru

Проведены экспериментальные исследования среднеквадратических ошибок определения местоположения радиопередатчиков с фиксированными и программно перестраиваемыми рабочими частотами в диапазоне 30...3000 МГц по многократным измерениям направлений прихода сигналов цифровым обнаружителем-пеленгатором, расположенным на борту высокомобильного носителя, в различных точках пространства. Исследованы изменения точности оценивания координат объектов при различных режимах функционирования, видах и параметрах излучений, а также траекториях перемещения обнаружителя-пеленгатора. Найдены погрешности определения местоположения источников радиоизлучений в условиях высокой априорной информированности о районах дислокации, когда движение обнаружителя-пеленгатора осуществляется по маршрутам в виде дуги с заданным максимальным углом засечки пеленга 120° и замкнутой траектории типа «коробочка». Проведен анализ возможностей минимизации среднеквадратических ошибок местоопределения излучателей при движении обнаружителя-пеленгатора по спирали с курсовым углом, определяемым дисперсиями апостериорных оценок направлений прихода сигналов в соседних поворотных пунктах маршрута.

Целью работы является исследование влияния видов, частотно-временных параметров сигналов и режимов работы радиопередатчиков на точность оценки их местоположения при различных траекториях движения и высотах подъема над земной поверхностью высокомобильного обнаружителя-пеленгатора.

Показано, что наименьшие среднеквадратические ошибки местоопределения, составляющие 2,2...8,4 % от дальности, получены для источников непрерывных излучений с фиксированными частотами.

Ключевые слова: обнаружитель-пеленгатор сигналов, оценка местоположения источников радиоизлучений, среднеквадратические ошибки пеленгования и определения местоположения объекта.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-21-31

Введение

Задача определения местоположения источников радиоизлучений имеет важное прикладное значение для обнаружения мест аварий, членов экипажей и пассажиров воздушных судов, потерпевших крушение, по сигналам маркеров при проведении поисково-спасательных мероприятий в районах со сложными природно-географическими условиями, контроля электромагнитной совместимости мобильных приемно-передающих устройств и выявления причин ее нарушения, а также анализа радиоэлектронной обстановки. Координатная информация инвариантна к степени проявления демаскирующих признаков излучателей в текущий момент времени. Поэтому на ее основе могут выполняться наблюдения динамических состо-

яний объектов с перестраиваемыми и перекрывающимися по значениям частотно-временными параметрами при адаптивной смене режимов и реализации требований скрытного функционирования, создании ложных целей и маскировке непреднамеренными и организованными помехами [1].

Базовые технологии мониторинга обстановки с функциями определения местоположения контролируемых объектов при минимально необходимом объеме измерительной аппаратуры и числе каналов связи (передачи данных) и управления базируются на применении обнаружителей-пеленгаторов, размещаемых на бортах высокоомобильных носителей, в частности, малогабаритных летательных аппаратов самолетного типа. Оценка координат излучателей выполняется путем совместной обработки многократных измерений направлений прихода их сигналов в пространственно разнесенных точках на маршрутах движения пеленгационных постов [1, 2]. Высокая мобильность носителей обнаружителей-пеленгаторов позволяет оперативно переносить усилия по контролю объектов в заданные районы и сосредотачивать их в зависимости от условий обстановки. Высота подъема обнаружителей-пеленгаторов над земной поверхностью при размещении на бортах воздушных судов обуславливает значительную дальность прямой видимости [1, 3], открывая возможности обзора территорий большой площади, в том числе со сложным профилем рельефа местности.

В [3, 4] показано, что в диапазоне частот 30...3000 МГц, где интенсивность потоков радиоизлучений, разрешаемых по частоте, может достигать нескольких десятков кГц [1], в качестве измерителей угловых координат излучателей целесообразно применять цифровые обнаружители-пеленгаторы [1, 5]. Принципы построения указанных устройств заключаются в совмещении на единой технической основе функций панорамного обнаружения [1] и оценки угловых координат источников радиоизлучений путем реализации взаимосвязанных процедур быстрого преобразования Фурье и синхронного спектрального анализа сигналов в каналах приема [1, 3].

В предлагаемой работе представлены результаты экспериментального определения местоположения радиопередатчиков с фиксированными и программно перестраиваемыми рабочими частотами в диапазоне 30...3000 МГц по многократным измерениям направлений прихода сигналов цифровым обнаружителем-пеленгатором, расположенным на борту малогабаритного беспилотного летательного аппарата самолетного типа, в условиях радиоизмерительного полигона [3, 4]. Измерения выполнялись при натурном воспроизведении условий высокой априорной осведомленности о районе наиболее вероятного расположения излучателей и достижения максимальной точности оценок местоположения за счет рационального выбора позиций для измерения направлений прихода сигналов при перемещении обнаружителя-пеленгатора.

При наличии предварительной координатной информации движение высокоомобильного обнаружителя-пеленгатора осуществлялось по траекториям следующих видов:

а) дуга с максимальным углом засечки пеленга 120° , представляющая собой фрагмент окружности, в центре которой располагался контролируемый объект (маршрут № 1);

б) периметр квадрата (траектория «коробочка») с излучателем, размещенным в точке пересечения диагоналей (маршрут № 2).

Для определения местоположения с максимальной точностью при ограничениях на достижимую эксплуатационную точность обнаружителя-пеленгатора [4, 6] направления прихода сигналов оценивались при движении по маршруту в виде спирали (маршрут № 3), прокладка которого путем задания курсовых углов по апостериорным значениям дисперсий выполняемых измерений в соседних поворотных пунктах [4].

В качестве характеристики точности оценки местоположения использовалась статистически усредненная в серии измерений среднеквадратическая ошибка (СКО) определения координат источников радиоизлучений. Для обеспечения общности выводов о точности выполняемых измерений погрешность местоопределения представлялась в виде отношения абсолютного значения СКО (измеряемой в м) к наклонной дальности до излучателя из началь-

ной точки траектории. Исходная наклонная дальность при перемещении высококомобильного обнаружителя-пеленгатора по маршруту № 1 устанавливалась равной радиусу дуги, при движении по маршруту № 2 – половине диагонали квадрата. Исходная точка маршрута № 3 совпадала с позицией обнаружителя-пеленгатора в начальный момент времени при движении по маршруту № 1. Величина нормированной СКО измерялась в % от дальности.

Цель работы – исследование влияния видов, частотно-временных параметров сигналов и режимов работы радиопередатчиков на точность оценки их местоположения при различных траекториях движения и высотах подъема над земной поверхностью высококомобильного обнаружителя-пеленгатора.

Принципы построения цифрового обнаружителя-пеленгатора и условия определения местоположения источников радиоизлучения

Принципы построения цифрового обнаружителя-пеленгатора базируются на комплексировании функций панорамного обнаружения и оценки угловых координат источников радиоизлучений в едином радиотехническом устройстве. Оценка направления прихода сигнала при принятии решения о его наличии в аддитивном потоке, поступающем на вход приемного устройства, находится при априорной неопределенности относительно дисперсии собственных шумов приемных каналов в результате выполнения быстрого преобразования Фурье и синхронного спектрального анализа обрабатываемых процессов. Спектральное представление сигналов [1] позволяет распознавать законы их модуляции [1, 5] при неизвестных способах кодирования информации за счет разложения в базисе ортогональных функций и выполнять обнаружение и распознавание передатчиков при неопределенности параметров принимаемых радиоизлучений.

Используемый для измерений цифровой обнаружитель-пеленгатор представлял собой радиосистему с тождественными структурами приемных каналов и одинаковыми формами диаграмм направленности. Антенные системы обнаружителя пеленгатора были выполнены в виде пяти концентрических кольцевых решеток вертикальных штырей, закрепленных на крыле носителя в верхней полуплоскости, с диапазонами рабочих частот 30...100 МГц, 100...200 МГц, 200...400 МГц, 400...700 МГц и 700...3000 МГц. Синхронный спектральный анализ сигналов, поступающих с антенных элементов, выполнялся в полосе частот 10 МГц при устранении неоднозначности измерений фаз с использованием статистически оптимального алгоритма нахождения показателей кратности [7].

Поскольку спектральная плотность шумов приемных каналов, постоянная на интервале наблюдения и равномерная в полосе частот, занимаемых сигналом, может быть неодинаковой для различных участков диапазона частот и изменяться во времени, условия обнаружения-пеленгования ориентированы на вариант приема радиоизлучений на фоне шумов неизвестной интенсивности.

В рамках данного подхода достаточной статистикой при обнаружении сигналов являются их взаимные спектры и спектры мощности в различных каналах приема, усредненные в границах спектров [1, 7]. Выбранная структура достаточной статистики обеспечивает инвариантность пороговых значений при принятии решений о наличии или отсутствии сигналов на входе приемного устройства к их параметрам и параметрам шумов в каналах приема [4].

Разрешение сигналов, одновременно наблюдаемых на входах обнаружителя-пеленгатора, по частоте осуществлялось на основе многоканальной обработки в широкополосных системах с последующим уточнением полученных оценок частот в цифровом процессоре быстрого преобразования Фурье [1, 5]. Для разрешения направлений прихода сигналов с идентифицированной принадлежностью различным частотам вычислялись собственные и взаимные произведения их комплексных амплитуд в приемных каналах и формировалась решающая статистика для сравнения с порогом, определяемым по критерию Неймана-Пирсона, в соответствии с принципом двойного дробления сигналов при исходном равенстве пеленгов [4, 7]. При равномерном распределении начальной фазы пеленгуемого сигнала на интервале 2π в

решающем устройстве обнаружителя-пеленгатора вырабатывалась оценка максимального правдоподобия угловых координат излучателя [7].

Пеленгование передатчиков сигналов проводилось в режиме сканирования диапазонов частот при отношении сигнал-шум на входе приемника не менее 15 дБ. Оценка координат излучателей выполняется путем совместной обработки многократных измерений направлений прихода их сигналов в пространственно разнесенных точках на маршрутах движения. При многократных измерениях из массива пеленгов выбирались значения, определенные в последовательные моменты времени t_n , $n \geq 1$, с шагом $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, составляющим (5...7) с.

В качестве оценок местоположения объектов принимались координаты, при которых достигался максимум плотности их распределения, в серии из 10 измерений. Среднеквадратические ошибки (СКО) местоопределения вычислялись как математические ожидания квадрата отклонения результатов измерений от полученных оценок координат в степени 1/2.

Высота подъема обнаружителя-пеленгатора над земной поверхностью в различных сериях измерений составляла 400 м или 1000 м, сохраняя неизменное значение. Его перемещение в пространстве выполнялось в горизонтальной плоскости с воздушной скоростью $v = (20...40)$ м/с при скорости ветра у земли до 10 м/с и порывах ветра на рабочей высоте не более 15 м/с.

Незначительная аэродинамическая асимметрия конструкции носителя и равномерное размещение антенных систем относительно его центральной продольной оси исключали проявление эффектов скольжения на траектории [8, 9], приводящих к отклонению направления движения от курсового угла γ_n в момент времени t_n , $n \geq 1$.

Методика расчета курсовых углов движения высокоавтомобильного обнаружителя-пеленгатора в поворотных пунктах маршрута № 3 приведена в [2]. Корректировка траектории осуществлялась по командам управления в виде регулярных импульсных последовательностей, поступающим с наземного пункта управления беспилотным летательным аппаратом, выступающим в качестве носителя, по широкополосным каналам связи. Расстояния между поворотными пунктами маршрута выбирались равными 10 % от наклонной дальности; согласно [2, 6], курсовой угол движения носителя γ_1 в начальной точке маршрута № 3 составил 81° .

Местоположение обнаружителя-пеленгатора в текущий момент времени определялось по данным навигационно-временного обеспечения в бортовом решающем устройстве носителя на базе линейного фильтра [6]. Пространственная стабилизация беспилотного летательного аппарата по угловым координатам относительно строительных осей сохранялась за счет применения автопилота канала крена с астатизмом первого порядка [8], позволяющего достичь высоких показателей устойчивости управляемости при простоте конструктивного исполнения бортовой системы автоматического управления полетом [8, 9].

Аномальные ошибки, обусловленные изменением пространственной ориентации обнаружителя-пеленгатора вследствие порывов ветра на рабочей высоте, идентифицировались на наземном пункте управления при превышении угла скольжения носителя 3° . Измерения, выполненные в эти моменты времени, исключались из рассмотрения.

Экспериментальные значения СКО определения местоположения при однократных измерениях пеленгов в моменты времени t_n и t_{n+1} , $n \geq 1$, находятся с использованием выражения [2]

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

где $\sigma_{\varphi n}^2$ и $\sigma_{\varphi(n+1)}^2$ – дисперсии оценок направлений прихода сигналов при значениях наклонной дальности до излучателя R_n и R_{n+1} ; ϑ_n – угловое расстояние между точками пеленгования, определяемое из позиции пеленгуемого объекта, в моменты времени t_n и t_{n+1} , $n \geq 1$. Его

взаимосвязь с текущим местоположением (R_{n+1}) и параметрами перемещения обнаружителя-пеленгатора (v, γ_n) по маршруту № 3 имеет вид [2, 6]

$$\sin \vartheta_n = \frac{v\Delta t}{R_{n+1}} \sin \gamma_n, \quad n \geq 1, \quad (2)$$

при рациональном выборе позиций для пеленгования, характеризуемых значениями R_n и R_{n+1} , из условия [2, 6]

$$R_{n+1} = \sqrt{R_n^2 + (v\Delta t)^2 - 2 R_n v\Delta t \cos \gamma_n}, \quad n \geq 1. \quad (3)$$

Перечень передатчиков, используемых в качестве объектов определения местоположения, включает в себя:

- генераторы стандартных сигналов (ГСС) для имитации непрерывного (квазинепрерывного) излучения на фиксированных частотах (ФЧ);
- компактные носимые радиостанции любительской связи YAESU YX-110 с системами сохранения ресурса энергии аккумуляторных батарей при оптимальном соотношении времени паузы и прослушивания частоты, Midland CT-400 со встроенными скремблерами и помехозащищенные программируемые портативные радиостанции Harris Falcon II с функциями информационного обмена на ФЧ и в режиме программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ);
- приемопередающая авиационная наземная радиостанция малой мощности Р-845 для обеспечения открытой и закрытой телефонной и телеграфной связи с самолетными и наземными радиостанциями;
- спутниковые абонентские терминалы Thuraya с ФЧ для передачи-приема сигналов;
- базовые станции системы сотовой связи стандарта GSM-1800.

Для проведения экспериментальных исследований по определению местоположения ГСС, портативные радиостанции и спутниковые абонентские терминалы размещались на равнинной местности, при отсутствии препятствий, способных экранировать сектора углов их работы, затрудняя (исключая) прием радиоизлучений высокомобильным обнаружителем-пеленгатором в каждой точке пространства. Ввиду того, что в соответствии с тактико-техническими характеристиками радиостанции YAESU YX-110, Midland CT-400 и Harris Falcon II обеспечивают дистанции связи 0,8...1,1 км, в районе, контролируемом обнаружителем-пеленгатором, на их основе разворачивались корреспондирующие пары. Базовые станции системы сотовой связи стандарта GSM-1800 располагались в городской местности со средневысотной застройкой; плотность покрытия зоны связи составляла 0,2...0,3 км².

Для радиостанции Р-845 и спутникового абонентского терминала Thuraya устанавливались сеансы связи продолжительностью от 40 с до 90 с при длительности паузы между сообщениями от 280 с до 450 с. Средства радиосвязи, образующие корреспондирующие пары, излучали сигналы в соответствии со следующим регламентом:

- время передачи сообщения первым абонентом – от 40 с до 90 с;
- время передачи квитанции о получении сообщения вторым абонентом – от 1 с до 3 с;
- длительность паузы после передачи квитанции от 280 с до 450 с.

Местоположение ГСС, портативных радиостанций и спутниковых абонентских терминалов устанавливалось в начале локальной цилиндрической системе координат (R, ϑ), где измерялись входящие в (1), (2) наклонные дальности R_n и угловые расстояния между точками пеленгования ϑ_n , $n \geq 1$. Истинные координаты базовых станций системы сотовой связи стандарта GSM-1800 и результаты их оценивания представлялись в системе географических координат. Способ оценки местоположения объекта в географических координатах представлен в [3, 4]. Для нахождения СКО местоопределения излучателей по истинным и оцененным географическим координатам выполнялся расчет отклонений оценок относительно заданных позиций (измеряемых м) в каждой серии измерений. Для вычисления нормированных СКО зада-

вались локальные полярные системы координат, центральные точки которых совмещены с истинными позициями базовых станций.

Анализ точности местоопределения источников радиоизлучения

Значения СКО определения местоположения источников радиоизлучений, полученные с использованием выражений (1), (2), а при перемещении обнаружителя-пеленгатора по маршруту № 3 – с учетом правила выбора позиций для выполнения измерений в соответствии с (3), диапазонах частот приведены в таблицах 1 – 5. Знак «–» означает, что в ходе эксперимента отсутствовал устойчивый прием сигналов. Можно полагать, что основными причинами срыва измерений являлись:

а) смещение диаграммы направленности приемной антенны за счет поворота беспилотного летательного аппарата вокруг продольной строительной оси, приводящее к существенному снижению отношения сигнал-шум на входе приемника относительно уровня 15 дБ, соответствующему нормальным условиям обнаружения и определения направлений прихода сигналов [3, 4, 7];

б) траекторная нестабильность и ветровой снос носителя [8, 9], обуславливающие аномальные ошибки пеленгования [6] в каждый выбранный момент времени t_n , $n \geq 1$.

Таблица 1 – Нормированная СКО определения местоположения передатчиков сигналов в диапазоне частот 30...100 МГц

Table 1 – Normalized RMSE in determining the location of signal transmitters in the frequency range of 30...100 MHz

Номер маршрута движения обнаружителя-пеленгатора	Высота подъема обнаружителя-пеленгатора над земной поверхностью, м	СКО определения местоположения передатчика сигналов (% от дальности)	
		Имитатор источника непрерывного излучения на ФЧ 68 МГц	Имитатор радиостанции на ФЧ 68 МГц
№ 1	400	8,1	9,8
	1000	8,4	10,2
№ 2	400	7,6	–
	1000	7,9	–
№ 3	400	7,9	9,0
	1000	8,2	9,4

Таблица 2 – Нормированная СКО определения местоположения передатчиков сигналов в диапазоне частот 100...200 МГц

Table 2 – Normalized RMSE in determining the location of signal transmitters in the frequency range of 100...200 MHz

Номер маршрута движения обнаружителя-пеленгатора	Высота подъема обнаружителя-пеленгатора над земной поверхностью, м	СКО определения местоположения передатчика сигналов (% от дальности)	
		Имитатор источника непрерывного излучения на ФЧ 160 МГц	Радиостанции YAESU YX-110 на ФЧ 161 МГц
№ 1	400	5,5	–
	1000	5,9	–
№ 2	400	5,6	–
№ 3	400	5,5	–
	1000	5,7	–

Таблица 3 – Нормированная СКО определения местоположения передатчиков сигналов в диапазоне частот 200...400 МГц**Table 3 – Normalized RMSE in determining the location of signal transmitters in the frequency range of 200...400 MHz**

Номер маршрута движения обнаружителя-пеленгатора	Высота подъема обнаружителя-пеленгатора над земной поверхностью, м	СКО определения местоположения передатчика сигналов (% от дальности)	
		Имитатор источника непрерывного излучения на ФЧ 301 МГц	Радиостанция Р-845 на ФЧ 254,3 МГц
№ 1	400	2,7	9,1
	1000	3,1	9,3
№ 2	400	2,2	–
	1000	2,8	–
№ 3	400	2,5	8,7
	1000	2,8	9,0

Таблица 4 – Нормированная СКО определения местоположения передатчиков сигналов в диапазоне частот 400...700 МГц**Table 4 – Normalized RMSE in determining the location of signal transmitters in the frequency range of 400...700 MHz**

Номер маршрута движения обнаружителя-пеленгатора	Высота подъема обнаружителя-пеленгатора над земной поверхностью, м	СКО определения местоположения передатчика сигналов (% от дальности)	
		Имитатор источника непрерывного излучения 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	2,2	–
	1000	2,4	8,7
№ 3	400	2,4	9,3
	1000	2,8	9,4

Таблица 5 – Нормированная СКО определения местоположения передатчиков сигналов в диапазоне частот 700...3000 МГц**Table 5 – Normalized RMSE in determining the location of signal transmitters in the frequency range of 700...3000 MHz**

Номер маршрута движения обнаружителя-пеленгатора	Высота подъема обнаружителя-пеленгатора над земной поверхностью, м	СКО определения местоположения передатчика сигналов (% от дальности)	
		Имитатор источника непрерывного излучения на ФЧ 870 МГц	Спутниковые абонентские терминалы Thuraya (1657,1 МГц)
№ 1	400	2,2	13,8
	1000	3,9	–
№ 2	400	2,2	13,3
	1000	3,6	–

При барражировании по маршруту № 2, где углы места источников радиоизлучений принадлежат сектору от 63° до 79°, проявляется эффект экранирования бортовой антенной системы обнаружителя-пеленгатора планером [3, 4], способствующий уменьшению сектора углов приема и энергии сигналов вследствие дифракции на носителе [10].

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 определение местоположения радиостанции Р-845 выполняется с СКО до 9,9 % от дальности; при выборе маршрута № 3 точность выполняемых измерений возрастает до 9,3...9,4 % от дальности.

Координаты радиостанций YAESU YX-110 в составе корреспондирующих пар с дистанцией связи 0,8...1,1 км по результатам пеленгования на маршрутах движения высокомобильного обнаружителя-пеленгатора 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.

Сигналы радиостанций Harris Falcon II с ППРЧ энергетически недоступны для обнаружителя-пеленгатора, поднятого на высоту 1000 м над земной поверхностью. При требуемом отношении сигнал-шум на входе приемника свыше 15 дБ установлены возможности вскрытия не менее 80 % процентов частот группового набора этих объектов за 10 с непрерывного излучения.

Оценка местоположения базовых станций системы сотовой связи стандарта GSM-1800 выполнялось при движении носителя обнаружителя-пеленгатора по маршруту № 1 при отсутствии априорной информации об их числе в контролируемом районе. По результатам многократного пеленгования обеспечивается определение координат центра поля засечек позиций источников радиоизлучений по усредненному соотношению мощностей сигналов в точках приема.

В таблице 6 представлены частоты излучения, истинные значения и оценки географических координат, а также СКО местоположения базовых станций системы сотовой связи. Знак «—» означает, что точность оценки координат объектов не вычислена вследствие отсутствия данных об их истинном местоположении; знак «*» означает, что местоопределение базовой станции сопровождается значительными аномальными ошибками ввиду ее нахождения на внешней стороне дуги, по которой движется обнаружитель-пеленгатор, и ширины сектора углов засечек пеленгов, значительно меньше требуемых 120 град.

Таблица 6 – Нормированная СКО определения местоположения базовых станций стандарта GSM-1800

Table 6 – Normalized RMSE in determining the location GSM-1800 standard base stations

Частота, МГц	Истинные географические координаты		Оценки географических координаты		СКО местоопределения (% от дальности)
	широта	долгота	широта	долгота	
<u>1812,4</u> 1813,0	48:17:41,82	46:09:25,98	<u>48:16:36,70</u> 48:17:55,91	<u>46:09:11,30</u> 46:10:36,60	<u>12,3</u> 15,0
1813,6	48:17:06,42	46:10:18,90	48:17:20,00	46:11:03,60	9,8
<u>1814,2</u> 1814,6	Нет данных		<u>48:24:30,90</u> 48:24:30,81	<u>46:15:25,89</u> 46:15:29,50	—
<u>1815,4</u> 1819,0	Нет данных		<u>48:18:32,11</u> 48:18:55,02	<u>46:06:27,60</u> 46:07:01,31	—
<u>1817,8</u> 1818,4	Нет данных		<u>48:16:28,50</u> 48:16:38,69	<u>46:05:02,60</u> 46:04:59,12	—
<u>1821,2</u> 1823,2	48:16:30,72	46:11:12,42	<u>48:16:36,70</u> 48:15:40,02	<u>46:12:12,20</u> 46:08:30,50	<u>14,0</u> *

Для селекции объектов выполнялась идентификация излучений в системах «пеленг – время» и «время – мощность сигнала» [7]. По оценкам направлений прихода сигналов в фиксированные моменты времени выполнялось разрешение базовых станций по угловым коор-

динатам. При совпадающих значениях пеленгов, характерных для ситуации нахождения обнаружителя-пеленгатора и нескольких однотипных излучателей на одной прямой, по оценкам уровней принимаемых сигналов идентифицировались следующие классы объектов:

- а) компактно расположенные базовые станции, работающие на одной частоте;
- б) одиночные базовые станции, излучающие сигналы на множестве частот.

Решение о принадлежности сигналов различным источникам принималось по критерию различия их уровней не менее 10 дБ.

По результатам пеленгования на маршруте № 1 была достигнута СКО местоопределения базовых станций систем сотовой связи стандарта GSM-1800, не превышающая 8,2...13,8 % от дальности.

Установлено, что изменение курсового движения высококомобильного обнаружителя-пеленгатора на маршруте № 3 возрастает относительно начального значения по мере уменьшения дальности. За счет повышения точности пеленгования при приближении к объекту сжатие спирали уменьшается. В ситуации, когда соотношение СКО оценок угловых координат источников радиоизлучений в последующем и предыдущем поворотных пунктах маршрута составляет 1,4, длина траектории движения обнаружителя-пеленгатора возрастает примерно в 1,7 раз по сравнению с ситуацией, в которой прослеживается тенденция убывания погрешности пеленгования с аналогичной скоростью [2]. При равной точности пеленгования сигналов в каждом поворотном пункте траектория движения носителя аппаратуры обнаружения-пеленгования не зависит от СКО текущей оценки угловых координат и определяется ее значением только в момент времени выбора первого курсового угла.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования по определению местоположения источников радиоизлучений по измерениям угловых координат высококомобильным обнаружителем-пеленгатором. Измерения выполнялись с борта беспилотного летательного самолетного типа, барражирующего по дуге, замкнутой траектории «коробочка» и спирали с курсовым углом, определяемым из соотношения дисперсий пеленгов в поворотных пунктах маршрутов. Найдены СКО местоопределения ГСС, средств радиосвязи, работающих на фиксированной частоте и с ППРЧ, и базовых станций систем сотовой связи стандарта GSM-1800 при различных маршрутах и значениях высоты подъема обнаружителя-пеленгатора над земной поверхностью. Выявлены закономерности влияния видов, частотно-временных параметров сигналов и режимов работы радиопередатчиков на точность оценки их местоположения при различных траекториях движения и высотах подъема над земной поверхностью высококомобильного обнаружителя-пеленгатора.

Установлено, что СКО определения местоположения источников 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 летательного аппарата с бортовым обнаружителем-пеленгатором по дуге с максимальным углом засечки пеленгов 120° местоположение радиостанции P-845 определяется с СКО до 9,9% от дальности; при движении носителя пеленгационной аппаратуры по спирали точность выполняемых измерений возрастает до 9,3...9,4 % от дальности. Координаты радиостанций YAESU YX-110 в составе корреспондирующих пар с дистанцией связи 0,8...1,1 км по результатам пеленгования измерены быть не могут ввиду отсутствия пространственной селекции сигналов различных абонентов.

При определении координат базовых станций системы сотовой связи стандарта GSM-1800 требуется выполнять разрешение направлений прихода сигналов в фиксированные моменты времени и селекцию групп компактно расположенных базовых станций, работающих на одной частоте, и одиночных базовых станций, излучающих сигналы на множестве частот.

Достижимая в результате этих действий точность оценки их координат составляет 9,8...15 % от дальности до обнаружителя-пеленгатора.

Библиографический список

1. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Под ред. В. Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2006. 424 с.
2. Разиньков С. Н., Богословский А. В. Оптимизация маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов при местоопределении источника радиоизлучения по оценкам угловых координат с их бортов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2015. Т. 18. № 4. С. 61-66.
3. Разиньков С. Н., Жидко Е. А., Лукин М. Ю. Экспериментальное местоопределение источников радиоизлучения по многократным оценкам угловых координат в беспилотных комплексах мониторинга // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2018. Т. 16. № 6. С. 57-63.
4. Жидко Е. А., Разиньков С. Н. Методики определения угловых координат и местоположения источников радиоизлучения в беспилотных комплексах мониторинга и экспериментальные оценки точности этих параметров // Измерительная техника, 2019. № 10. С. 41-46.
5. Артемов М. Л., Афанасьев О. В., Сличенко М. П. Методы статистической радиотехники в современном решении задач радиомониторинга // Антенны, 2016. № 6 (226). С. 55-62.
6. Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы / Под ред. А. В. Коренного. М.: Радиотехника, 2012. 112 с.
7. Боев С. Ф., Тимошенко А. В., Разиньков С. Н., Шевцов В. А. Отождествление воздушных объектов при обнаружении и сопровождении всеатмосферным радиолокатором // Известия вузов. Авиационная техника, 2022. № 1. С. 50-59.
8. Лебедев А. А., Чернобрыкин Л. С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1973. 268 с.
9. Пашковский И. М. Динамика и управляемость самолета. М.: Машиностроение, 1987. 297 с.
10. 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.

UDK 621.396.67.01

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RADIO EMISSION SOURCES LOCATION USING HIGHLY MOBILE DIGITAL DIRECTION FINDER DETECTOR

S. N. Razinkov, Dr. Sc. (Phys. and Math.), associate professor, associate professor of the department of automation of control of aircraft (and computer systems) VUNC VVS «VVA», Voronezh, Russia;
orcid.org/0000-0002-3987-0607, e-mail: razinkovsergey@rambler.ru

A. V. Bogoslovsky, Ph.D. (Tech.), deputy head of the department of radio electronics, VUNC VVS «VVA», Voronezh, Russia;
orcid.org/0000-0002-6469-3366, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

S. A. Gordienko, Ph.D. (Tech.), associate professor, lecturer department of combat aviation complexes, KVVAUL, Krasnodar, Russia;
orcid.org/0000-0002-1265-7195, e-mail: gordi.serhio2013@yandex.ru

Experimental studies of root-mean-square errors to determine the location of radio transmitters with fixed and programmable operating frequencies in the range of 30... 3000 MHz were carried out by multiple measurements of signal arrival directions by a digital direction-finding device located on board a highly mobile carrier at various points in space. Changes in accuracy of estimating the coordinates of objects under various modes of operation, types and parameters of radiation, as well as trajectories of detector-direction finder motion are investigated. Errors were found in determining the location of radio emission sources in conditions of high a priori awareness about the areas of deployment, when the motion of detector-direction finder is carried out along the routes in the form of arc with a 120° given maximum angle of bear-

ing marking and closed trajectory of "box" type. The analysis of possibilities to minimize standard errors of radiators location during the movement of detector-direction finder along spiral with heading angle determined by variances of posterior estimates of signal arrival directions in adjacent turning points of route is carried out.

The aim of the work is to study the influence of types, frequency-time parameters of signals and operating modes of radio transmitters on the accuracy of estimating their location at various trajectories and elevations of highly mobile detector-direction finder above the ground surface.

It is shown that minimum root-mean-square errors of location, amounting to 2,2...8,4% of the range, were obtained for simulators of continuous radiation sources based on generators of standard signals with fixed frequency.

Key words: pilotless complex of monitoring, panoramic detector direction finder, assessment of location of an object, mean square error of direction finding.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-21-31

References

1. *Sovremennaya radioelektronnaya bor'ba. Voprosy metodologii* / Pod red. V. G. Radzievskogo. Moscow: Radiotekhnika, 2006. 424 p. (in Russian).
2. **Razinkov S. N., Bogoslovskiy A. V.** Optimizatsiya marschutov poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri mestoopredelenii istoschnika radioizluscheniya po ocenkam uglovykh koordinat s ih bortov. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie system.* 2015, vol. 18, no. 4, pp. 61-66. (in Russian).
3. **Razinkov S. N., Zhidko E. A., Lukin M. Yu.** Eksperimental'noe mestoopredekenie istoschnikov radioizlucheniya po mnogokratnym ocenkam uglovykh koordinat v bespilotnykh kompleksakh. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushie sistemy.* 2018, vol. 16, no. 6, pp. 57-63. (in Russian).
4. **Zhidko E. A., Razinkov S. N.** Metodiki opredeleniya uglovykh koordinat i mestopolozheniya istoschnikov radioizluscheniya v bespilotnykh kompleksakh monitoringa i eksperimental'nye ocenki tochnosti etikh parametrov. *Izmeritel'naya tekhnika.* 2019, no. 10, pp. 41-46. (in Russian).
5. **Artemov M. L., Afanasiev O. V., Slishtenko M. P.** Metody statisticheskoy radiotekhniki v sovremennom reshenii zadach radiomonitoringa. *Antenny,* 2016, no. 6 (226), pp. 55-62. (in Russian).
6. *Obnaruzhenie, raspoznavanie i opredelenie parametrov obrazov ob'ektov. Metody i algoritmy* / Pod red. **A. V. Korennogo.** Moscow: Radiotekhnika. 2012. 112 p. (in Russian).
7. **Boev S. F., Timoshenko A. V., Razinkov S. N., Shevcov V. A.** Otozhdestbienie vozdukhnykh ob'ektov pri obnaruzhenii i soprovozhdenii vseatmosfernym rafiolokatorom. *Izvestiya vuzov. Aviacionnaya tekhnika.* 2022, no. 1, pp. 50-59. (in Russian).
8. **Lebedev A. A., Schernobryvkin L. S.** *Dinamika poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov.* Moscow: Mashinostroenie. 1973. 268 p. (in Russian).
9. **Pachkovskiy I. M.** *Dinamika i upravlyaemost' samoleta.* Moscow: Mashinostroenie, 1987. 297 p. (in Russian).
10. **Prostakov E. I.** Vliyeniye ekrana na diagrammu napravlenosti reshetki vibratorov, perpendikulyarnykh ee ploskosti. *Tekhnika sredstv svyazi. Seriya: Teoriya radiosvyazi.* 1979, no. 4(21), pp. 109-111. (in Russian).