

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.6>

УДК: 621.396.75

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИРИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОДНОПОЗИЦИОННОГО ПОДВИЖНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОГО МЕТОДА ПЕЛЕНГОВАНИЯ

К.Л. Овчаренко, М.М. Тюстин

**Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13**

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2022

Аннотация. Определение местоположения излучающих в эфир радиоэлектронных средств является одной из основных задач радиоконтроля, при этом в условиях априорной неопределенности относительно параметров источников радиоизлучения наиболее высокой точностью оценивания координат обладает разностно-дальномерный метод. В статье предложен новый подход к определению координат источников радиоизлучения с применением однопозиционного подвижного измерителя на основе разностно-дальномерного пеленгования. В отличие от известных, он позволяет уменьшить число измерительных пунктов разностно-дальномерной системы без ухудшения точности оценивания координат источников радиоизлучения за счет применения подвижного измерителя и метода максимального правдоподобия для вычисления координат при многократных измерениях. Практическое применение разработанного подхода целесообразно при разработке комплексов радиоконтроля и позволяет не учитывать ориентацию измерителя на беспилотном летательном аппарате в пространстве, а также повысить точность средств определения координат источников радиоизлучения.

Ключевые слова: радиоконтроль, определение координат, подвижный измеритель, источник радиоизлучения, беспилотный летательный аппарат, разностно-дальномерный метод, пеленгование, метод максимального правдоподобия.

Abstract. Determination of the location of radio-electronic means radiating into the air is one of the main tasks of radio control, and under conditions of a priori uncertainty about the parameters of radio emission sources, the highest accuracy of coordinate estimation has a time difference of arrival method. The paper proposes a new approach to determine the coordinates of radio emission sources using a single-position mobile meter based on the difference-distance direction finding. In contrast to the known ones, it allows reducing the number of measuring points of the difference-distance direction finding system without worsening the accuracy of estimating the coordinates of radio emission sources owing to using the moving meter and the method of maximum likelihood to calculate the coordinates in multiple measurements. The practical application of the developed approach is expedient in the development of radio control complexes and allows not to consider the orientation of the meter on an unmanned aerial vehicle in space, as well as to increase the accuracy of radio emission source coordinates determination.

Key words: radio control, coordinate estimation, mobile meter, radio emission sources, unmanned aerial vehicle, time difference of arrival method, direction finding, maximum likelihood method.

Автор для переписки: Тюстин Михаил Михайлович, mix1987@yandex.ru

Введение

Активное внедрение новых информационных технологий, а также относительно низкие затраты на услуги связи и радиовещания привели к резкому увеличению числа функционирующих систем и средств радиосвязи коммерческого назначения. Принимая во внимание тот факт, что радиочастотный спектр имеет ограниченный ресурс, важно обеспечить его

рациональное использование с целью совместного функционирования разнородных систем без создания ими взаимных помех.

Радиочастотная служба является частью системы контроля и надзора в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Российской Федерации и выполняет контроль за излучениями радиоэлектронных средств (РЭС). Одной из основных задач радиоконтроля является определение координат источников радиоизлучения (ИРИ) в случае их несанкционированного функционирования и создания помех легитимным средствам радиосвязи [1]. При этом для создания пространственной и энергетической доступности к контролируемому ИРИ все большее применение находят пеленгаторы на беспилотных летательных аппаратах (БЛА).

Вместе с тем использование БЛА в качестве платформы для развертывания средств радиоконтроля приводит к возникновению ряда проблем, среди которых можно выделить: ограничение массогабаритных показателей (ОМП) полезной нагрузки на БЛА, которые не позволяют разместить на нем эффективные антенные системы и многоканальные радиоприемные устройства (РПУ), а также нестабильность ориентации БЛА в пространстве, приводящая к резкому увеличению ошибок пеленгования и снижению точности определения координат ИРИ [2].

Перспективным представляется применение метода разностно-дальномерного пеленгования [3], практическая реализация которого не требует точного учета ориентации БЛА в пространстве и позволяет снизить число измерителей разностно-дальномерной системы определения местоположения (ОМП) ИРИ. Таким образом, целью статьи является разработка подхода к определению координат ИРИ с применением однопозиционного подвижного измерителя (ОПИ) на базе БЛА методом разностно-дальномерного пеленгования.

1. Исходные данные и постановка задачи

При применении разностно-дальномерного метода ОМП ИРИ для однозначного определения координат РЭС на плоскости требуется не менее четырех разнесенных в пространстве измерительных пунктов. Вместе с тем, используя одиночный подвижный измеритель, представляется возможным сформировать «квазимногопозиционную» систему ОМП ИРИ. При этом для выполнения разностно-дальномерных измерений необходимо разместить на БЛА несколько радиоприемных устройств. Далее, с целью упрощения математических выкладок, ограничимся постановкой и решением задачи ОМП ИРИ на плоскости, поскольку полученные результаты могут быть распространены и для трехмерного пространства.

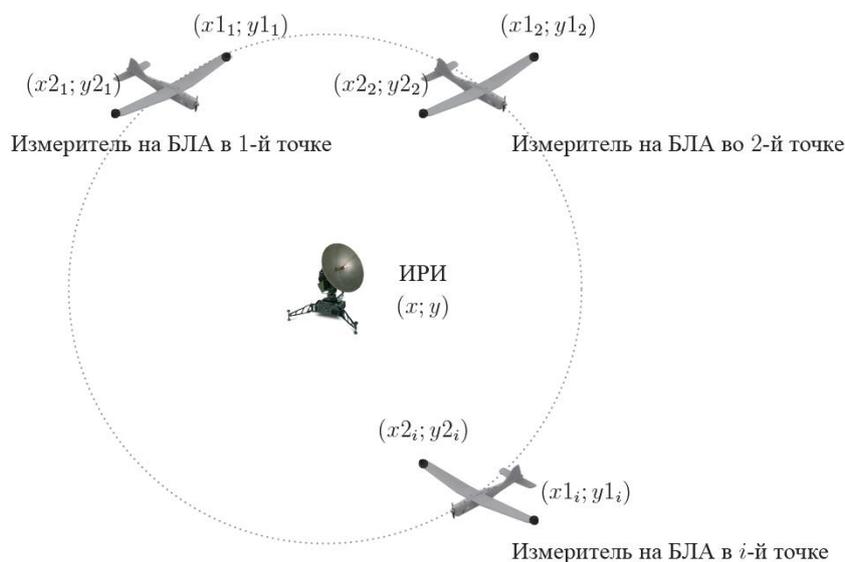


Рис. 1. Схема реализации подхода к ОМП ИРИ с применением ОПИ

Согласно предлагаемой схеме, изображенной на рис. 1, ИРИ находится в точке с неизвестными координатами $s=[x,y]^T$. Измеритель на БЛА барражирует в предполагаемом районе нахождения РЭС и производит разностно-дальномерные измерения в пространственно-разнесенных точках с координатами (x_i, y_i) , формируя тем самым «квазимногопозиционную» систему ОМП ИРИ.

Таким образом, исходными данными для разработанного подхода к ОМП ИРИ с применением одиночного подвижного измерителя являются:

– вектор оценок взаимной задержки сигналов ИРИ, полученных в пространственно-разнесенных точках нахождения БЛА (x_i, y_i) ,
 $\Delta \tilde{T} = [\Delta \tilde{\tau}_1, \Delta \tilde{\tau}_2, \dots, \Delta \tilde{\tau}_N]^T$;

– два вектора координат радиоприемных устройств на БЛА, в которых были сделаны измерения взаимной задержки сигналов ИРИ,

$$S1 = [s1_1, s1_2, \dots, s1_i]^T = [(x1_1, y1_1), (x1_2, y1_2), \dots, (x1_i, y1_i)]^T, \quad (1)$$

$$S2 = [s2_1, s2_2, \dots, s2_i]^T = [(x2_1, y2_1), (x2_2, y2_2), \dots, (x2_i, y2_i)]^T. \quad (2)$$

Для решения задачи ОМП ИРИ требуется выполнить преобразование $F_{\text{ОМП}}$ вектора оценок взаимной задержки сигналов ИРИ и векторов координат радиоприемных устройств на БЛА в оценку координат ИРИ $\tilde{S} = [\tilde{x}, \tilde{y}]^T$

$$[\Delta \tilde{T}, S1, S2]^T \xrightarrow{F_{\text{ОМП}}} = [\tilde{x}, \tilde{y}]^T. \quad (3)$$

2. Модель оценивания координат и потенциальная точность предлагаемого подхода

Оценку взаимной задержки сигналов ИРИ, для i -го измерения $\Delta \tilde{\tau}_i$, может быть представлена в виде следующего выражения:

$$\Delta \tilde{\tau}_i = C^{-1} (\|s - s1_i\| - \|s - s2_i\|) + \hat{\xi}_{\Delta\tau}, \quad (4)$$

где C – скорость распространения радиоволн;

$\|\bullet\|$ – знак евклидовой метрики;

$\hat{\xi}_{\Delta\tau}$ – случайная величина (погрешность оценивания задержки).

Чтобы перейти от взаимной задержки сигналов ИРИ к параметру положения – разности дальностей, необходимо умножить вектор оценок взаимной задержки сигналов $\Delta \tilde{T}$ на скорость распространения радиоволн в свободном пространстве C

$$\Delta \tilde{R} = \Delta \tilde{T} C = [\Delta R_1 + \hat{\xi}_{\Delta R}, \Delta R_2 + \hat{\xi}_{\Delta R}, \dots, \Delta R_N + \hat{\xi}_{\Delta R}]^T, \quad (5)$$

где ΔR_i – истинное значение разности дальностей при i -м измерении;

$\hat{\xi}_{\Delta R}$ – случайная величина погрешности, $\hat{\xi}_{\Delta R} = \hat{\xi}_{\Delta\tau} C$.

Принимая во внимание тот факт, что погрешность оценивания разностей дальностей $\hat{\xi}_{\Delta R}$ пропорциональна погрешности вычисления взаимной задержки сигналов ИРИ $\hat{\xi}_{\Delta \tau}$, а также то, что случайная величина $\hat{\xi}_{\Delta \tau}$ подчиняется нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием (МО) [4, 5], можно сделать вывод о том, что $\hat{\xi}_{\Delta R}$ также будет распределена по нормальному закону с МО равным нулю $M(\hat{\xi}_{\Delta R}) = 0$.

$$\hat{\xi}_{\Delta R} = \Delta \tilde{R}_i - \Delta R_i = \Delta \tilde{R}_i - (\|s - s1_i\| - \|s - s2_i\|). \quad (6)$$

Если считать измерения разностей дальностей в рамках рассматриваемой модели независимыми, а также то, что погрешность их оценок подчиняется нормальному закону распределения и имеет нулевое МО, возникает возможность применить метод максимального правдоподобия для оценивания координат ИРИ. Как известно, функция правдоподобия представляет собой произведение условных гауссовских функций плотности вероятности погрешности оценок разностей расстояний [6]:

$$L_{\hat{\xi}_{\Delta R}}(\Delta \tilde{R} | x, y) = \prod_{i=1}^N \varphi_{\hat{\xi}_{\Delta R}}(\Delta \tilde{R}_i | x, y) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right)^N \prod_{i=1}^N \sigma_{\Delta R_i}^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta R_i}^{-2} (\Delta \tilde{R}_i - (\|s - s1_i\| - \|s - s2_i\|))^2 \right), \quad (7)$$

где $\sigma_{\Delta R_i}$ – среднеквадратическое отклонение случайной величины $\hat{\xi}_{\Delta R}$ в условиях i -го измерения разности дальностей.

Несложно заметить, что функция правдоподобия (7) достигает наибольшего значения при максимальной величине аргумента экспоненты. Следовательно, оценкой координат ИРИ по результатам измерений параметра положения является аргумент минимизации целевой функции вида

$$F_{\Pi}(x, y) = \sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta R_i}^{-2} (\Delta \tilde{R}_i - (\|s - s1_i\| - \|s - s2_i\|))^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta R_i}^{-2} \left(\Delta \tilde{R}_i - \left(\sqrt{(x - x1_i)^2 + (y - y1_i)^2} - \sqrt{(x - x2_i)^2 + (y - y2_i)^2} \right) \right)^2, \quad (8)$$

$$[\tilde{x}, \tilde{y}]^T = \arg \max_{\{x, y\}} (L_{\hat{\xi}_{\Delta R}}(\Delta R | x, y)) =$$

$$= \arg \max_{\{x,y\}} (\ln(L_{\xi_{AR}}(\Delta R | x, y))) = \arg \min_{\{x,y\}} (F_{\Pi}(x, y)). \quad (9)$$

Равенству (9) удовлетворяют такие значения $[\tilde{x}, \tilde{y}]^T$, которые соответствуют минимуму целевой функции $F_{\Pi}(x, y)$ и могут быть найдены путем решения системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial F_{\Pi}(x, y)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial F_{\Pi}(x, y)}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Известно, что нижнюю границу дисперсии несмещенной оценки дает неравенство Рао-Крамера. Ковариационная матрица **COV** не может быть меньше, чем обратная матрица Фишера **I** [7, 8]:

$$\mathbf{COV} \geq \mathbf{I}^{-1}. \quad (11)$$

В свою очередь, матрицу Фишера можно связать с функцией правдоподобия следующим образом:

$$\mathbf{I}_{\theta} = -\mathbf{M} \left(\frac{\partial^2 \ln L_{\xi_{AR}}(\Delta \tilde{R} | \theta)}{\partial \theta^2} \right). \quad (12)$$

При подстановке функции правдоподобия (7) в выражение (12) информационная матрица Фишера принимает следующий вид:

$$\mathbf{I}_{\theta} = -\mathbf{M} \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \ln L_{\xi_{AR}}(\Delta \tilde{R} | x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 \ln L_{\xi_{AR}}(\Delta \tilde{R} | x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \ln L_{\xi_{AR}}(\Delta \tilde{R} | x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 \ln L_{\xi_{AR}}(\Delta \tilde{R} | x, y)}{\partial y^2} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Далее, используя математические операции, аналогичные тем, которые применяются в работах [6, 9, 10, 11], можно найти частные производные и получить аналитические выражения для построения области возможного местоположения ИРИ (с заданной вероятностью).

Заключение

Предложенный в данной работе подход к определению координат ИРИ может быть использован при разработке методов оценивания координат РЭС с применением ОПИ. Это позволит повысить точность ОМП ИРИ без увеличения числа измерительных пунктов разностно-дальномерной системы.

Следует отметить, что дальнейшему исследованию подлежат как теоретические вопросы получения аналитических выражений для решения задачи оценивания координат ИРИ в пространстве, так и практические аспекты выбора носителя для разностно-дальномерного пеленгатора и обоснования оптимального маршрута его перемещения.

Автор для переписки: Тюстин Михаил Михайлович, mix1987@yandex.ru

Литература

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. *Радиомониторинг – задачи, методы, средства*. Под ред. А.М. Рембовского. 2-е изд. Москва, Горячая линия – Телеком. 2010. 624 с.
2. Богдановский С.В., Овчаренко К.Л., Симонов А.Н. Метод определения координат источников радиоизлучения на основе поляризационных измерений. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2017. В.65 7. С.38-43.
3. Босый А.С., Шленских Д.А., Овчаренко К.Л., Тимошенко А.В. Разностно-дальномерный метод оценивания координат источников радиоизлучения на основе искусственных нейронных сетей с пеленгованием в дальней зоне. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*. 2020. Т.14. №2. С.4-8.
4. Овчаренко К.Л. Потенциальная точность оценивания задержки сигналов при наличии частотного рассогласования на основе вычисления взаимной

корреляционной функции модифицированных комплексных огибающих. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2017. №7. С.39-44.

5. Овчаренко К.Л., Еремеев И.Ю., Сазонов К.В. и др. Разностно-дальномерный метод определения местоположения земных станций спутниковых систем связи с применением ретранслятора на беспилотном летательном аппарате. *Труды СПИИРАН*. 2019. Т.18. №1. С.176-201.
6. Овчаренко К.Л. Алгоритм расчета координат источника радиоизлучения дальномерным методом при однопозиционных измерениях с систематической ошибкой. *Телекоммуникации*. 2014. №6. С.6-13.
7. Steven M.K. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. – *First edition*. Prentice Hall PTR. 1993. V.1. P.595.
8. Леман Э. *Теория точечного оценивания*. Москва, Наука, 1991. 448 с.
9. Овчаренко К.Л. Определение координат источников радиоизлучения дальномерным методом на базе однопозиционного подвижного измерителя. *Телекоммуникации*. 2013. №10. С.27-34.
10. Овчаренко К.Л., Еремеев И.Ю., Гайчук Ю.Н., Петухов П.Е. Методика построения эллипсоида ошибок для оценивания точности определения местоположения земных станций систем спутниковой связи с применением беспилотного летательного аппарата. *Научные технологии*. 2017. Т.18. №11. С.22-26.
11. Босый А.С., Еремеев И.Ю., Овчаренко К.Л. и др. Метод определения земных станций по ретранслированным сигналам в условиях неопределенности координат космического аппарата-ретранслятора с применением беспилотного летательного аппарата. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2019. В.667. С.161-169.

Для цитирования:

Овчаренко К.Л., Тюстин М.М. Определение местоположения ИРИ с применением однопозиционного подвижного измерителя на основе разностно-дальномерного метода пеленгования. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.6>