

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.5>

УДК 621.396.969

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНОГО ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С БОРТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПАССИВНЫМ ОДНОПОЗИЦИОННЫМ МЕТОДОМ ПУТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

П. А. Полянских, А. А. Мещеряков, В. П. Денисов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, Томск, пр. Ленина, 40

Статья поступила в редакцию 23 марта 2021 г., после доработки – 15 июля 2021 г.

Аннотация. Оценивается возможность оценки дальности с борта летательного аппарата до работающей наземной радиолокационной станции по совокупности отражений ее сигналов от местности и местных предметов. Особенность алгоритма измерения – в том, что априори не надо знать, от какого объекта отразился тот или иной сигнал. Координаты отражателей хранятся в памяти компьютера в виде электронной карты местности. Позиция источника радиоизлучения определяется по разнице времени прихода прямого и отраженных сигналов, а также измеренных по ним пеленгов.

Ключевые слова: однопозиционный метод, пассивные системы, летательный аппарат, определение дальности, пеленгование.

Abstract. The possibility of assessing the distance from the aircraft to an operating ground-based radar based on the totality of reflections of its signals from the terrain and local objects is evaluated. The peculiarity of the measurement algorithm is that a priori it is not necessary to know from which object one or the other signal was reflected. The coordinates of the reflectors are stored in the computer memory in the form of an electronic map of the area. The position of the radio emission source is determined by the difference in the arrival times of the direct and reflected signals, as well as the bearings measured from them.

Key words: single-position method, passive systems, aircraft, range determination, direction finding.

Введение

Радиотехническая разведка является важным элементом радиоэлектронной борьбы [1,2,3], которая «не объявляется и никогда не прекращается» [4]. Целью радиотехнической разведки является обнаружение излучающих радиоэлектронных средств вероятного противника, определение его местоположения и параметров излучения с помощью пассивной (неизлучающей аппаратуры). Разведывательная аппаратура, установленная на борту летательного аппарата (ЛА) может предназначаться также для обнаружения наземных радиолокационных станций (РЛС), работающих в составе комплекса управления зенитным огнем. Важно определять дальность до РЛС с борта ЛА, чтобы не попасть в зону обстрела. Классические способы определения положения источника радиоизлучения (ИРИ) пассивными средствами – пеленгационными, разностно-дальномерными, предполагает прием излучения в двух или более разнесенных точках пространства [5].

Наметившаяся тенденция создания в зоне возможных боевых действий единого информационного поля способствует созданию многопозиционных систем [3]. Однако, задача разведки с борта одного ЛА (самолета, БПЛА) остается актуальной, т.к. при этом он не обнаруживает себя излучением и сохраняет автономность. В этом случае можно применить пеленгационный метод местоопределения ИРИ, выполняя пеленгование в разных точках траектории полета ЛА. Для образования дальномерной базы ЛА должен маневрировать, в частности, отклоняться от полета к ИРИ по прямой [7]. Альтернативой может служить метод, в котором станцией разведки принимаются как прямые сигналы ИРИ, так и сигналы, переизлученные объектом, координаты которого известны. Направление на ИРИ измеряется, а дальность до него рассчитывается по разности пеленгов на ИРИ и переизлучатель, а также временной задержке отраженного сигнала

относительно прямого. Недостатком такого подхода является то, что в «зоне видимости» станции разведки может находиться много отражающих объектов: неровности рельефа, искусственные сооружения, опушки леса, массивы кустарника и т.д. Поэтому точно определить, от чего отразился сигнал, достаточно сложно. В НИИ РТС ТУСУР разработан метод измерения дальности до ИРИ по его прямому сигналу и совокупности переотражений от местности и местных предметов, причем априори не надо знать, от какого именно объекта отразился тот или иной сигнал. Требуется только электронная карта местности, на которую нанесены все возможные отражатели [8]. Метод экспериментально проверен на трассах «земля-земля» и показал свою состоятельность [9]. Численным моделированием метод проверен на трассах «воздух-земля», когда станция разведки находится на поверхности земли и определяет дальность до самолета, РЛС которого облучает земную поверхность [10]. В данной работе моделированием оценивается возможность решения «обратной» задачи – определение дальности с борта самолета до излучающей наземной РЛС.

Основные соотношения

Геометрические соотношения «приемный пункт – отражающий объект – ИРИ» изображены на рис. 1.

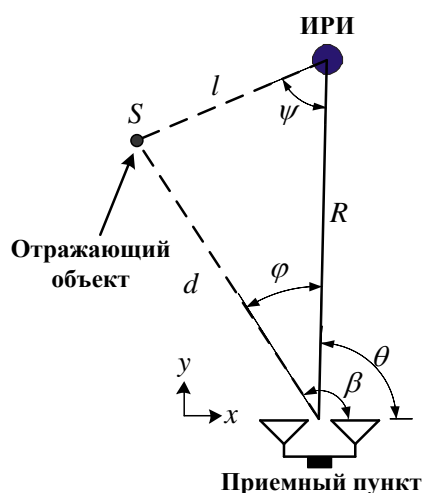


Рис. 1. Геометрия системы при определении координат ИРИ.

Направление на ИРИ и на отражающий объект S измеряется с помощью пеленгатора, находящегося в приемном пункте. Для определения координат

ИРИ достаточно вычислить дальность R , т.к. направление на ИРИ θ определяется пеленгатором. Линия измеренного пеленга на ИРИ является первой линией положения, для нахождения координат ИРИ необходимо провести вторую, соответствующую измеренной задержке τ между временами распространения прямого и отраженного сигналов. Согласно рисунку 1, разность между длинами путей распространения прямого и отраженного сигналов можно записать как

$$\Delta r = c\tau = d + l - R, \quad (1)$$

где c – скорость распространения радиоволн.

Полагая, что координаты отражающего объекта известны, а угол φ можно определить по результату измерения углов θ и β как

$$\varphi = |\theta - \beta|, \quad (2)$$

преобразуем выражение 1 к виду

$$\Delta r = d + \sqrt{d^2 + R^2 - 2dR\cos\varphi} - R. \quad (3)$$

Решая уравнение (3) относительно R , получим простое выражение для определения дальности до ИРИ,

$$R = \frac{2d\Delta r - \Delta r^2}{2(\Delta r - d(1 - \cos\varphi))}. \quad (4)$$

В рассматриваемом методе положение объекта, от которого отразился сигнал ИРИ, неизвестно. Зато известно положение на местности всех объектов, которые могут быть отражателями. Расчет дальности R проводится для каждого из них в предположении, что он может находиться в секторе углов $\varphi \pm \Delta\alpha$, где φ - измеренное угловое положение отражателя, относительно ИРИ; $\Delta\alpha$ - прогнозируемая максимальная погрешность измерений.

Расчет производится для измеренной задержки τ с учетом возможной погрешности. Совокупность рассчитанных таким образом оценок дальности содержит истинные ее значения, когда расчеты проводились относительно действительных отражателей, и ложных, в иных ситуациях. Оценка дальности находится по максимуму гистограммы полученного распределения. Алгоритм вычисления подробно изложен в [8,10]. Определим далее область пространства,

в которой могут находиться отражающие объекты, энергетически доступные в точке приема на борту ЛА. Такие объекты должны находиться в зоне прямой радиовидимости как со стороны приемника, так и со стороны передатчика. С учетом нормальной тропосферной рефракции дальность прямой радиовидимости $R_{пв}$ между двумя точками, поднятыми над землей h_1 и h_2 , (в метрах), определяется формулой

$$R_{пв} = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \text{ (в километрах)} \quad (5)$$

Если h_1 высота полета самолета, а h_2 высота антенны РЛС, $h_1 \gg h_2$, и из приведенного соотношения получаем, что при высоте полета 5-10 км, локатор может быть обнаружен на дальности 100-400 км. Прямая радиовидимость должна быть также между антенной РЛС и отражающими объектами. Полагая, что высота антенной системы РЛС над землей $5 \div 20$ метров, а высота отражателей $5 \div 10$ метров, получим из формулы (5), что отражающие объекты должны находиться в круге радиуса $20 \div 30$ км с центром в точке расположения РЛС.

Оценим энергетическую доступность отражателей, находящихся в зоне прямой радиовидимости. Границы соответствующей зоны определяются формулой

$$P_r(x, y) = P_{r \min}, \quad (6)$$

где $P_r(x, y)$ - мощность принимаемого сигнала в точке (x, y) ; $P_{r \min}$ - реальная чувствительность приемника; x, y - координатные оси.

Используя решение уравнения (6), приведенного в работе [10], получим

$$y = \pm \sqrt{\sqrt{a^4 + 4R^2x^2} - x^2 - R^2}, \quad (7)$$

$$\text{где } a^4 = \frac{P_{tr}}{P_{r \min}} * \frac{\lambda^2 G_{tr} G_r \sigma_0 F_t(\alpha_t(x, y)) F_r(\alpha_r(x, y))}{(4\pi)^2},$$

R - расстояние между приемником и передатчиком; P_{tr} - мощность, излучаемая передатчиком; $F_t(\alpha_t(x, y))$ - функция, аппроксимирующая ДН антенны передатчика; $\alpha_t(x, y)$ - угол между направлением на объект и направлением максимума ДН антенны передатчика; $F_r(\alpha_r(x, y))$ - функция, аппроксимирующая ДН антенны приемника; $\alpha_r(x, y)$ - угол между

направлением на объект и направлением максимума ДН антенны приемника; σ_6 – эффективная бистатическая поверхность рассеяния отражающего объекта (БЭПР).

Кривые, соответствующие уравнению (7), называются овалами Кассини.

БЭПР зависит от угла между падающей на объект и отраженной волнами (бистатического угла). В НИИ РТС ТУСУР экспериментально оценена БЭПР наземных объектов на волне $\lambda = 3$ см. При величине бистатического угла больше 50 градусов она превышает $10^2 - 10^3$ м².

Результаты моделирования

Оценим точность предлагаемого метода путем компьютерного моделирования.

При моделировании область энергетической доступности отражателей (окружность радиусом 30 км с центром в точке расположения ИРИ) «накрывается» прямоугольной координатной сеткой. Потенциальные отражатели размещаются в каждом из узлов сетки, их общее количество при заданной геометрии системы и шаге сетки 100 м получается равным 282600 штук. Количество действительных отражателей принимаем равным 0.005% от общего числа возможных, т.е. 14. В пределах области энергетической доступности они распределены равномерно. Остальные исходные данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметр	Значение	Комментарий
σ_τ	40 – 100 нс	СКО оценки времени прихода
σ_θ	0,1 – 0,8 град	СКО определения пеленга
ΔR	2000 м	Шаг гистограммы
$\Delta\alpha$	0,1 – 0,8 град	Угловой сектор ошибок
	100 м	Шаг координатной сетки
n	14	Число действительных отражателей
d	30 км	Зона прямой видимости

Алгоритм имеет некоторые ограничения на расположение отражающих объектов. Если отражатель находится на линии «передатчик - приемник», то формула расчета дальности обращается в неопределенность вида $0/0$. Поэтому алгоритм не будет учитывать такие пеленги.

Получив расположение отражающих объектов в исследуемой зоне, производим вычисления, описанные выше. В результате вычислений выводим информацию о дальности в виде гистограммы. Вертикальные линии на графике показывают действительное расстояние между приемником и передатчиком (на рис. 2 – красная линия) и оценку дальности, полученную в результате работы алгоритма с указанием ошибки в метрах (на рис. 2 – зеленая линия).

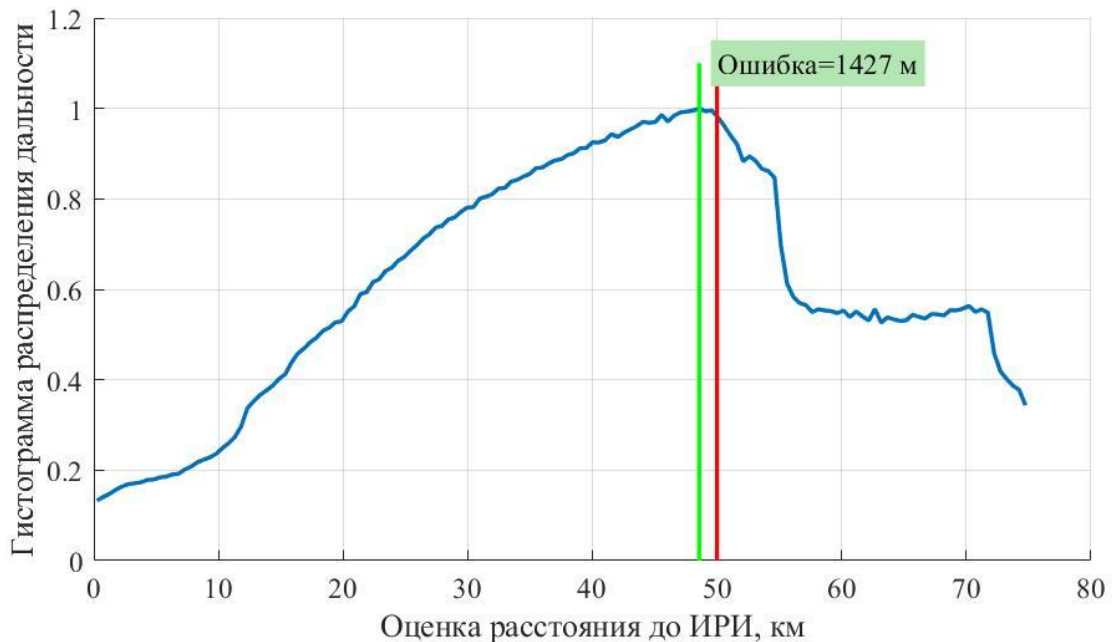


Рис. 2. Распределение оценок дальности.

Полученный результат является достаточно точным для ряда приложений. Определив, что предложенный алгоритм работоспособен, исследуем влияние различных факторов на точность определения дальности. Факторами, влияющими на точность, являются: $\Delta\alpha$ и σ_θ , а также σ_r . Помимо погрешностей измерений, на точность будут влиять параметры, вносимые в модель пользователем, такие как шаг гистограммы, шаг координатной сетки и используемое число действительных отражателей. Рассмотрим влияние этих

факторов. Расширение сектора угловых ошибок $\Delta\alpha$ ведет к увеличению количества потенциальных отражающих объектов и, соответственно, оценок дальности, входящих в итоговое распределение.

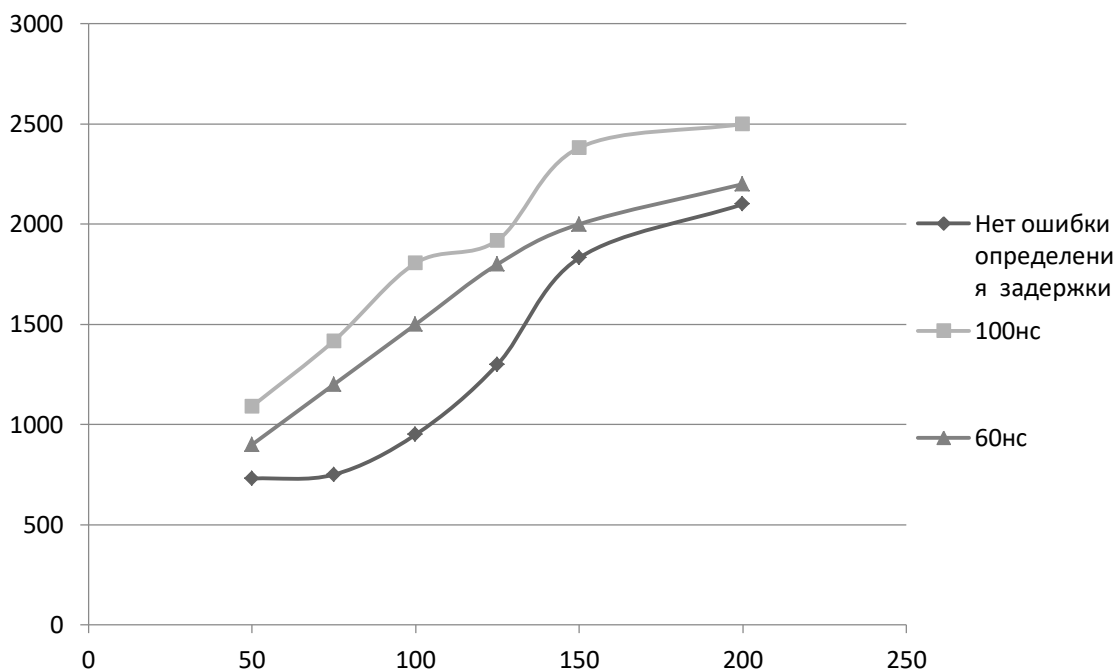


Рис. 3. Оценка ошибки определения дальности до ИРИ при различных СКО оценки времени прихода сигналов.

Проведено исследование влияния ширины сектора на точность оценки. Результаты исследования показали, что расширение сектора до 4 раз не оказывает существенного влияния на характер гистограммы и ошибку. Ширина углового сектора должна быть равна СКО определения пеленга, в противном случае действительный отражатель может не попасть в сектор обзора. На рисунках 3 и 4 приведены зависимости ошибки определения дальности до ИРИ при различных СКО оценки времени прихода сигналов и различных СКО оценки пеленга соответственно. На рис. 3, 4 по вертикальной оси откладывается значение величины ΔR - максимум ошибки оценки определения дальности (в метрах), по горизонтали – расстояние между приемником и ИРИ (в километрах).

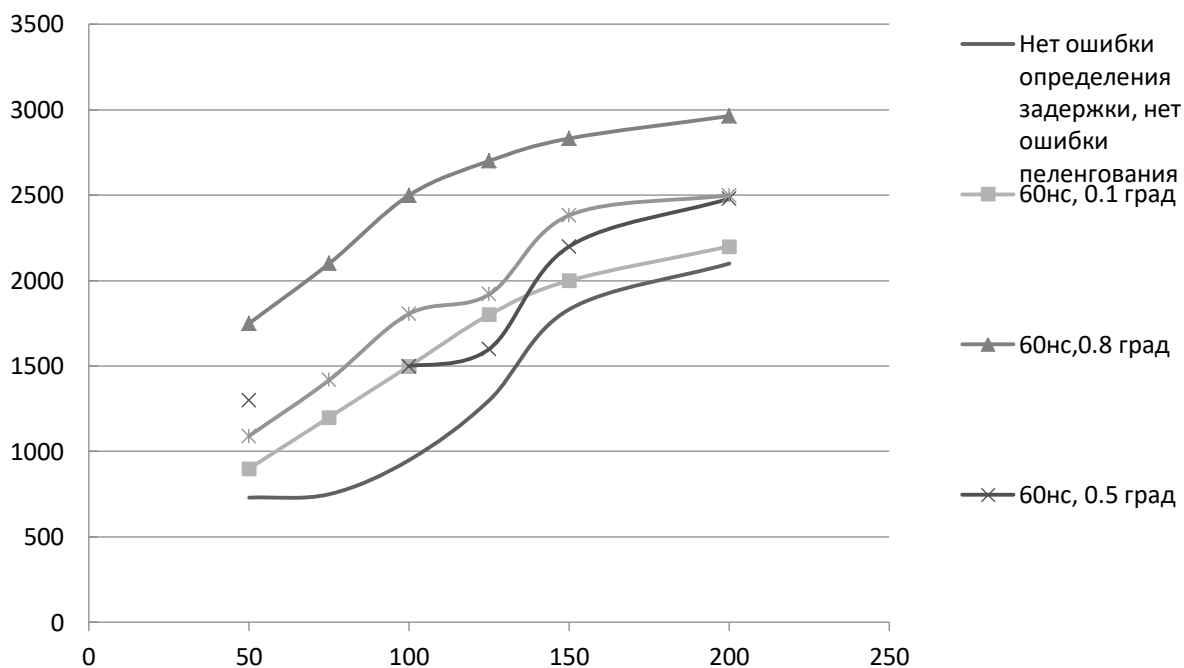


Рис. 4. Оценка ошибки определения дальности до ИРИ при различных СКО оценки пеленга.

По полученным зависимостям можно сделать вывод, что с ростом СКО оценки момента прихода сигнала ошибка значительно увеличивается.

В реальных бортовых системах РЭБ точность пеленгования составляет несколько десятых долей градусов [3].

Заключение

Из приведенного материала можно сделать следующие выводы.

1. С помощью пассивной аппаратуры, установленной на борту летательного аппарата, можно определять координаты наземных источников радиоизлучения, по совокупности сигналов, отраженных объектами, находящимися в зоне прямой радиовидимости относительно пеленгуемого источника. При этом, априори не надо знать, от какого объекта отразился тот или иной сигнал. По предварительным оценкам, погрешность измеряемой дальности составляет 1-1,5%.

2. Полученные результаты, на взгляд авторов, свидетельствуют о перспективности рассматриваемого пассивного однопозиционного метода определения координат источника радиоизлучения. Поскольку проведение

натурного эксперимента с целью выяснения действительных характеристик метода проблематично, дальнейшие исследования рационально провести с помощью компьютерного моделирования, в котором должны быть учтены характеристики отраженных сигналов, вероятностное распределение отражателей на местности, движение летательного аппарата и даны статистические характеристики точности определения координат источника наземного радиоизлучения с борта летательного аппарата.

Работа выполнена в рамках проекта по госзаданию Минобрнауки № FEWM-2020-0039.

Литература

1. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. *Радиоэлектронная борьба. Основы теории.* Москва, Вузовская книга. 2011. 800 с.
2. Смирнов Ю.А. *Радиотехническая разведка.* Москва, Воениздат. 2001. 456 с.
3. Барабанов М.С., Денисенцев С.А., Кашин В.Б., Лавров А.В., Пухов Р.Н., Федутинов Д.В., Хетагуров А.А., Шеповаленко М.Ю. *Радиоэлектронная борьба. От экспериментов прошлого до решающего фронта будущего.*, под ред. Колесова Н.А. и Насенкова И.Г. Москва. Центр анализа стратегий и технологий. 2015. 248 с.
4. Палий А.И. *Радиовойна.* Москва. Воениздат. 1963. 209 с.
5. Казаринов Ю.М. *Радиотехнические системы: учебник для вузов.*, под ред. Казаринова Ю.М. Москва. Изд. Центр «Академия». 2008. 592 с.
6. Вартанесян В.А. *Радиотехническая разведка.* Москва. Воениздат. 1975. 255 с.
7. Мельников Ю.П. *Воздушная радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности.* Москва. Изд. Радиотехника. 2005. 304 с.
8. Патент РФ № 2010140174. Гельцер А.А., Денисов В.П., Мещеряков А.А. Способ измерения дальности до цели и устройство для его реализации. Заявка от 30.09.2010. Оpubл. 10.04.2012.

9. Денисов В.П. *Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения*. Томск. ТУСУР. 2014. 502 с.
10. Денисов В. П., Гельцер А. А. Оценка двухпозиционной ЭПР отражающих объектов на наземных трассах распространения радиоволн. Научная сессия ТУСУР - 2009. Томск. В-Спектр. 2009. Ч. 1. С. 21-24.
11. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. *Статистическая теория радиолокации протяженных целей: научное издание*. Москва. Радио и связь. 1982. 231с.
12. Бартон Д. К. Модели мешающих отражений от земной поверхности для анализа и проектирования РЛС. *ТИИЭР*. 1985. Т. 73. №2. С. 27-35.

Для цитирования:

Полянских П.А., Мещеряков А.А., Денисов В.П. Оценка точности определения координат наземного источника радиоизлучения с борта летательного аппарата пассивным однопозиционным методом путем компьютерного моделирования. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.5>