

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.6>

УДК: 621.396.969

ОДНОПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ЗЕМНЫХ ТРАССАХ ПО СОВОКУПНОСТИ ОТРАЖЕНИЙ ЕГО СИГНАЛА ОТ МЕСТНЫХ ПРЕДМЕТОВ

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

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

Статья поступила в редакцию 08 августа 2021 г.

Аннотация. Радиотехническая разведка является важным элементом радиоэлектронной борьбы, которая «не объявляется и никогда не прекращается». Целью радиотехнической разведки является обнаружение излучающих радиоэлектронных средств вероятного противника, определение его местоположения и параметров излучения с помощью пассивной (неизлучающей аппаратуры). Радиоэлектронная борьба даже в мирное время является перспективным направлением разработки. Использование пассивных методов позволяет проводить работы скрытно, без обнаружения. Особенность предлагаемого метода заключается в том, что априори не требуется информация об объектах, отразивших сигнал. Определение координат излучателя проводится путем определения задержки между приходом прямого сигнала и совокупности отражений от рельефа местности. Применение детализированных, на сегодняшний день, спутниковых карт местности позволяет с некоторой точностью определять координаты отражающих объектов на местности. Координаты приемного пункта тоже могут быть определены с высокой точностью с помощью глобальных систем навигации. Внесенные данные в ЭВМ и полученный в результате наблюдения за эфиром запись сигналов позволяют определять координаты источника радиоизлучения. Предложенный в статье алгоритм позволяет свести количество приемных пунктов до одного и

использовать фазовый пеленгатор для определения направления прихода сигнала. Оценка потенциальной точности метода показала возможность практического применения, при этом могут быть получены и лучшие результаты при доработке алгоритма в части улучшения алгоритмов определения моментов прихода сигналов, алгоритмов их выделения и пост-обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: радиолокация, РЛС, однопозиционный метод, радиолокация, ИРИ, пеленг.

Abstract. Electronic intelligence is an important element of electronic warfare, which «is not announced and never stops». The purpose of electronic reconnaissance is to detect the emitting radio-electronic means of a potential enemy, to determine its location and radiation parameters using passive (non-emitting equipment). Electronic warfare, even in peacetime, is a promising area of development. The use of passive methods allows work to be carried out covertly, without detection. The peculiarity of the proposed method is that a priori information about the objects that reflected the signal is not required. Determination of the coordinates of the emitter is carried out by determining the delay between the arrival of the direct signal and the set of reflections from the terrain. The use of detailed, for today, satellite maps of the terrain allow with some accuracy to determine the coordinates of reflecting objects on the ground. The coordinates of the receiving point can also be determined with high accuracy using global navigation systems. The data entered the computer and the recording of signals obtained as a result of observing the air allows us to determine the coordinates of the radio emission source. The algorithm proposed in the article allows reducing the number of receiving points to one and using a phase direction finder to determine the direction of signal arrival. Evaluation of the potential accuracy of the method showed the possibility of practical application, while better results can be obtained when improving the algorithm in terms of improving the algorithms for determining the times of arrival of signals, algorithms for their extraction and post-processing of experimental data.

Key words: radiolocation, Radar station, single-position method, radar, radio emission source, bearing.

Введение

Наиболее распространенными методами определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) в системах радиомониторинга и разведки являются пеленгационный и разностно-дальномерный. Данные методы требуют наличия нескольких приемных пунктов и обеспечения устойчивой и стабильной связи между ними. Использование линии радиосвязи сводит на нет одно из важных достоинств системы – скрытую работу. Поэтому требуется изыскивать способы уменьшения пространственного разноса приемных пунктов, в пределе перейти на однопозиционные методы определения координат источника радиоизлучения. Принципиальная возможность создания однопозиционного дальномера имеется. Для этого надо создать виртуальную дальномерную базу за счет использования отражений излученных сигналов от объектов, находящихся в зоне действия дальномера. Сложность такой задачи заключается в том, что принятый сигнал содержит информацию обо всех объектах в зоне работы системы, тем самым невозможно точно определить от какого именно объекта произошло отражение сигнала.

1. Основные соотношения

Рассмотрим математические соотношения, имеющие место при определении дальности до ИРИ с использованием отражений. Будем считать, что как ИРИ, так и дальномер находятся на поверхности земли, которую будем считать плоской. Излагаемый текст основан, в основном, на монографии [1].

Геометрия системы представлена на рис. 1. Направление на ИРИ и на отражающий объект S измеряется с помощью пеленгатора, находящегося в приемном пункте. Для определения координат ИРИ достаточно вычислить дальность R , так как направление на ИРИ определяется пеленгатором. Линия измеренного пеленга на ИРИ является первой линией положения, для нахождения координат ИРИ, необходимо провести вторую линию положения,

соответствующую постоянному значению измеренной задержки между временами распространения прямого и отраженного сигналов. Согласно рис. 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.

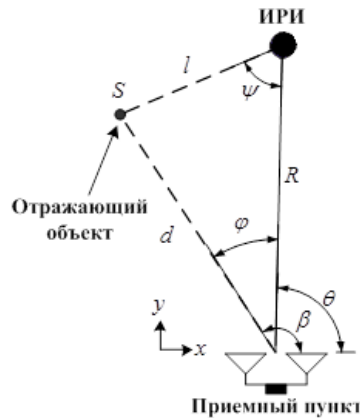


Рис. 1. Геометрия системы.

Полагая, что координаты отражающего объекта известны, а угол ψ можно определить по результатам измерений углов θ и β как:

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

преобразуем выражение (1) к виду:

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

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

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

Тогда декартовы координаты ИРИ можно найти как:

$$\begin{cases} x_{ИРИ} = R \cos(\theta) \\ y_{ИРИ} = R \sin(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

Использование описанного метода требует точно определенных координат отражающего объекта. Такая ситуация возможна в случае большого пространственного разнеса отражающих объектов.

Рассмотрим математические соотношения, имеющие место при определении дальности до ИРИ с использованием отражений. Будем считать, что как ИРИ, так и дальномер находятся на поверхности земли, которую будем считать плоской.

Предлагаемый метод однопозиционного измерения дальности основан на том, что в зоне действия дальномера имеется множество отражающих объектов, положение которых относительно приемного пункта известно. Отражения принимаются от многих (некоторых) из них, однако не известно от каких именно.

Для реализации метода необходимо:

- иметь карту местности, на которую нанесены дальномер и объекты, способные отражать радиосигналы (потенциальные отражатели);
- измерять в приемном пункте пеленги на ИРИ и каждый из источников отражений, а также временные задержки между прямым сигналом ИРИ и каждым из отраженных.

Таким образом, однопозиционный дальномер представляется моноимпульсным пеленгатором, дополненным устройством анализа сигналов, способным селективировать из совокупности принимаемых сигналов сигналы определенного ИРИ и измерять задержки отраженных сигналов относительно прямого.

На рис. 2, в точке T_x расположен импульсный передатчик, в точке R_x – приемный пункт, в точке $O(x, y)$ – единственный отражающий объект. Импульсы, излученные передатчиком, приходят в точку приема по прямому пути « $T_x - R_x$ » и по пути « $T_x - O - R_x$ », отразившись от объекта $O(x, y)$. По задержке τ определяется разность длин путей прямого и отраженного сигнала $\delta = c\tau = "T_x - O" + "O - R_x" - "T_x - R_x"$. Из последнего соотношения следует, что $"T_x - O" + "O - R_x" = R + \delta$. Это означает, что точка $O(x, y)$ лежит на эллипсе, в фокусах которого расположены передающее и приемное устройства, и что сумма расстояний от любой точки эллипса до его фокусов равна $R + \delta$. Уравнение этого эллипса имеет вид:

$$\frac{4 - \left(y - \frac{R}{2}\right)^2}{(R + \delta)^2} + \frac{4x^2}{(R + \delta)^2 - R^2} = 1 \quad (6)$$

Из рис. 2 также следует, что для любой точки, находящейся на эллипсе, выполняется соотношение:

$$x = y \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (7)$$

Подставляя формулу (6) в уравнение эллипса (7), находим координаты отражающего объекта:

$$x = \frac{\delta(2R + \delta) \left(R + \frac{R + \delta}{\cos \alpha}\right)}{2(R^2 \sin^2 \alpha + 2R\delta + \delta^2)} \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

$$y = \frac{\delta(2R + \delta) \left(R + \frac{R + \delta}{\cos \alpha}\right)}{2(R^2 \sin^2 \alpha + 2R\delta + \delta^2)} \cos^2 \alpha \quad (9)$$

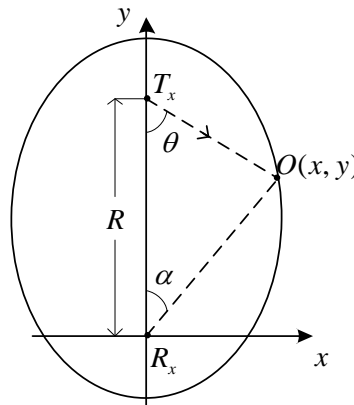


Рис. 2. Геометрические соотношения при определении координат ИРИ с использованием отражающего объекта.

Дальность до источника оценивается путем сравнения истинных координат с рассчитанными по формулам (8, 9), в которые были подставлены измеренные значения угла направления на объект α , пространственная разность путей распространения сигналов δ и переменная величина R . За оценку дальности принимается такое значение R при котором разность между рассчитанными и заложенными в память компьютера координатами минимальна. Вследствие неизбежности ошибок измерений полное совпадение рассчитанных координат и координат, занесенных в память компьютера, маловероятно, поэтому, формула для оценки дальности до источника

радиоизлучения при использовании одного отражающего объекта может быть записана как:

$$R = \operatorname{argmin}_R [(x_i(R, \alpha, \delta) - x_{ni})^2 + (y_i(R, \alpha, \delta) - y_{ni})^2] \quad (10)$$

где $x_i(R, \alpha, \delta)$ и $y_i(R, \alpha, \delta)$ координаты i -ого отражающего объекта, рассчитанные по формулам (8, 9).

Поскольку, как показывает практика, в зоне действия приемного пункта (пеленгатора) обычно имеется несколько отражающих объектов, которые могут быть использованы для определения дальности R формула для оценки дальности R (10) с учетом этого обстоятельства примет вид:

$$R = \operatorname{argmin}_R \sum_{i=1}^N [(x_i(R, \alpha_i, \delta_i) - x_{ni})^2 + (y_i(R, \alpha_i, \delta_i) - y_{ni})^2]. \quad (11)$$

Дальность, удовлетворяющая формулам (10, 11), принимается за истинную [1, 4, 5].

2. Результаты моделирования

В 1995–2010 годах лаборатория распространения радиоволн НИИ радиотехнических систем ТУСУР провела обширные эксперименты по исследованию пространственно-временной структуры импульсных сигналов, распространяющихся на пересечённых наземных трассах. Основное отличие исследований от проведённых ранее, заключалось в том, что в течение каждого принятого импульсного сигнала производилось не одно, а целый ряд последовательных амплитудно-фазовых измерений с малым временным интервалом. Результаты измерений записывались на цифровые носители, что позволило в последующем опробовать и сравнить между собой различные варианты разностно-временных и фазовых измерений [2, 3].

Основные эксперименты были проведены в трёхсантиметровом диапазоне волн. Для проведения измерений был спроектирован и изготовлен специальный автоматизированный радиофизический комплекс. Здесь мы отметим только то, что комплекс позволял отдельно записывать на цифровые носители прямой сигнал источника излучения (импульсной радиолокационной станции) а также отражения от различных объектов на трассе распространения радиоволн и

рассчитывать пеленги по каждому из них. На рис. 3 приведен пример записи принимаемых сигналов.

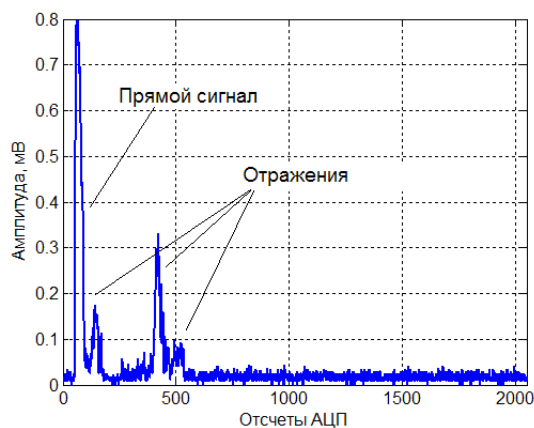


Рис. 3. Пример записи принимаемых сигналов.

Полученные экспериментальные данные позволили проанализировать возможность воплощения в жизнь однопозиционного метода измерения дальности.

Взаимное расположение приёмного и передающего пунктов на одной из экспериментальных трасс, наложенное на спутниковый снимок местности, полученный из программы «*GoogleMaps*», изображено на рис. 4, 5. На координатных осях, (рис. 4 и далее) указано расстояние относительно позиции приёмного пункта в километрах. Светлыми окружностями на рис. 4, 5 обозначены отражающие объекты, координаты которых рассчитаны по экспериментальным данным. Как видно из рис. 4, было обнаружено множество отражающих объектов. В ходе обработки сигналов, принятых на других трассах РРВ, были получены схожие результаты.

Анализ приведенных и подобным им карт показал, что основная масса отражателей сосредоточена вдоль кромок протяженных объектов (опушек леса, холмов и т. д.) (рис. 4). При этом, если протяженный объект имел небольшую глубину, то фиксировались и отражения от дальних по отношению к позициям границ объекта, так что отражения заполняли всю его площадь (рис. 5).

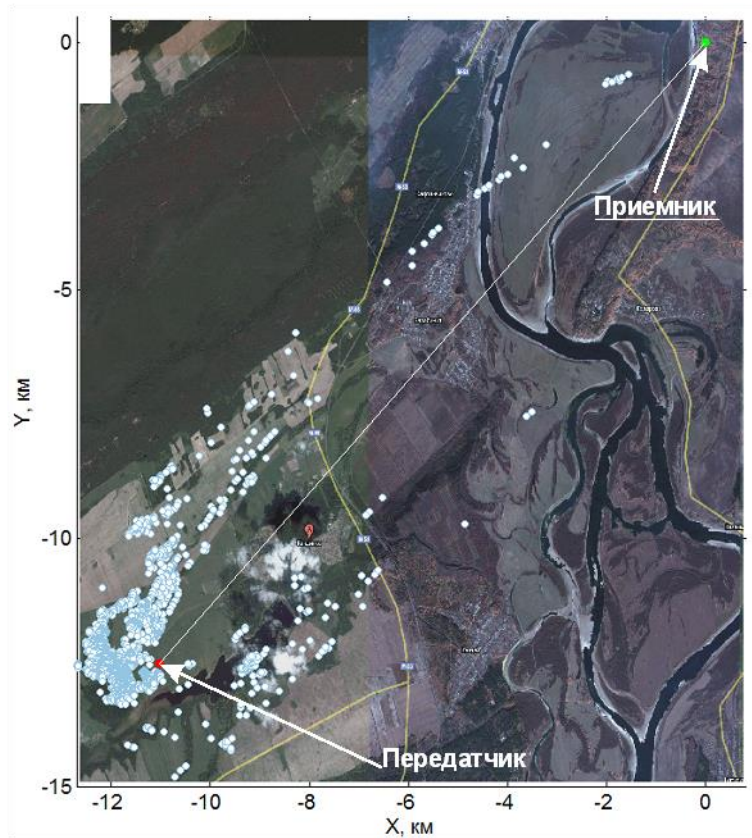


Рис. 4. Топографическая съемка района проведения эксперимента с нанесенными координатами отражателей.

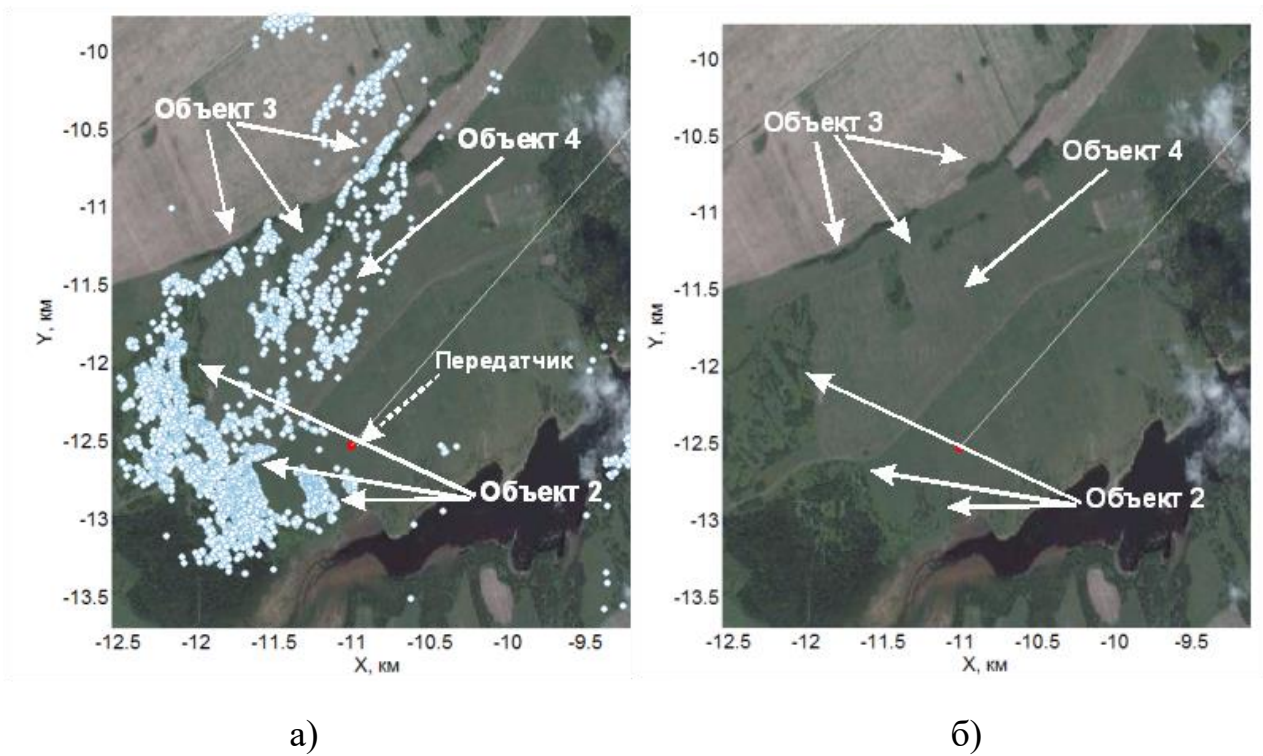


Рис. 5. Область рис. 4, где сосредоточены отражатели. а) – с наложением координат объектов; б) – без наложения.

В целом можно утверждать, что полученные изображения позволяют выделить отдельные группы рассеивателей, соответствующие вполне конкретным объектам на местности. Утверждение о том, что основная масса отражателей сосредоточена вдоль кромок протяженных объектов можно принять только в сочетании со словами «в основном». На рис. 6 приведен пример, где действительно отражающая кромка массива существенно отличается от видимой.

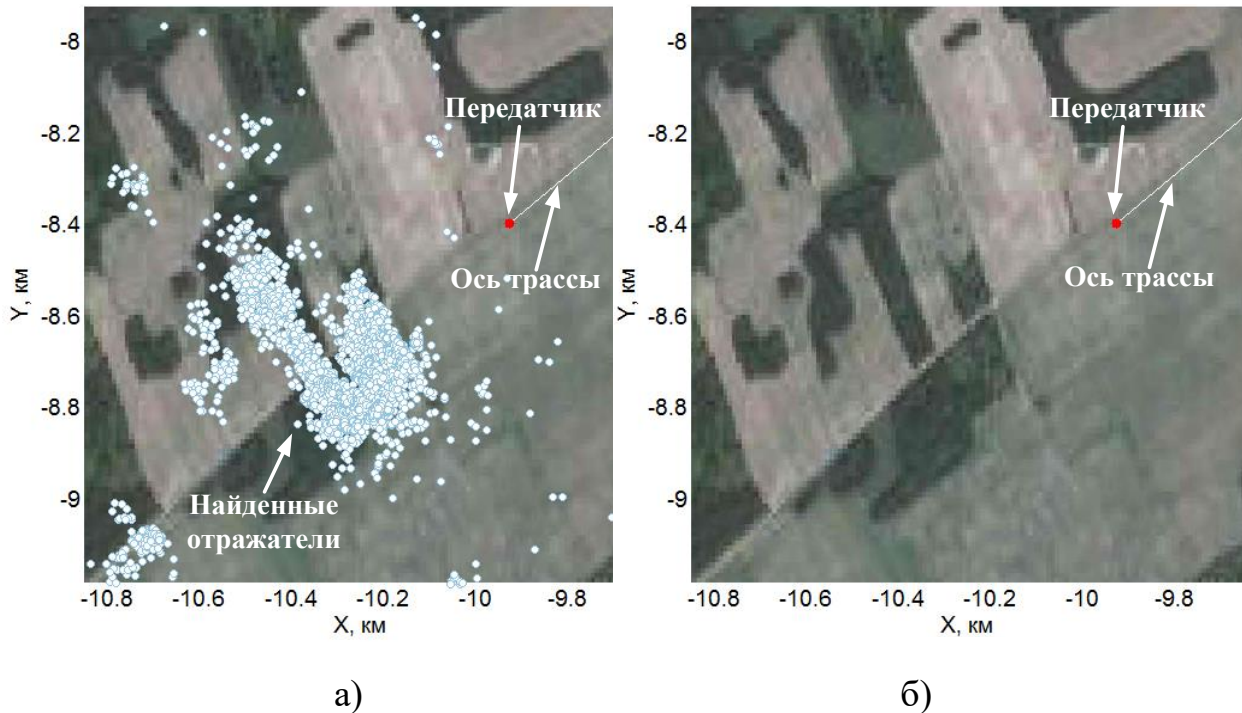


Рис. 6. Область вблизи передатчика на одной из трасс: а) с наложением координат объектов, б) без наложения.

Ошибки определения координат отражающих объектов, по мнению экспериментаторов, не превышала 10–20 метров. Точность определения координат оценивалась по кромкам лесных массивов, так на представленных трассах нет характерно выраженных искусственных или естественных объектов, координаты которых можно было бы точно измерить геодезическими средствами.

В целом результаты, полученные по экспериментальным данным, позволяют сделать вывод о возможности локализации отдельных объектов на

карте и, как следствие, использования отраженных от местных предметов сигналов для определения координат ИРИ на приземных трассах.

При разработке алгоритма определения дальности до ИРИ использовалась модель, в которой отражающие объекты были распределены в пределах протяжённого объекта. Однако реальные протяжённые объекты, такие как лесные массивы, могут ей не соответствовать. Поэтому при обработке экспериментальных данных, для описания отражающих объектов использовались два подхода:

1. Потенциальными отражателями являются все точечные объекты (деревья) внутри протяжённого объекта;
2. Потенциальными отражателями являются только границы протяжённых объектов.

Для извлечения данных о координатах протяжённых объектов из спутникового снимка района проведения экспериментов был проведен ряд операций по обработке изображений.

Обработка результатов показала, что относительная ошибка определения дальности до ИРИ $\frac{R_{err}}{R}$ лежит в пределах от 3,6% до 1,2%

Наименьшее значение ошибок имеет место, когда в качестве потенциальных отражающих объектов использовались границы лесных массивов.

Заключение

В целом по результатам теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- Точность определения координат предложенным однопозиционным методом может достигать значений, сопоставимых с точностью многопозиционных методов. На четырёх из пяти исследуемых трасс РРВ полная относительная ошибка определения дальности до ИРИ $\frac{R_{err}}{R}$ находится в пределах 1%–2% (при использовании в качестве потенциальных отражателей границ протяжённых объектов);

- Точность оценки координат зависит от соответствия используемой карты потенциальных отражающих объектов действительности. Присутствие на карте объектов, от которых не может отразиться сигнал ИРИ, может привести к возникновению неоднозначных или некорректных оценок;
- Полученная экспериментально точность однопозиционного измерения дальности не является предельно высокой. Во многом она зависит от методов и точности измерений разности пеленгов и разности времени прихода прямых и отраженных сигналов в приемный пункт.

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

Литература

1. 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.
2. Сырямкин В.И., Шидловский В.С. *Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы*. Томск, ТГУ. 2010. 316 с.
3. Ровкин М.Е., Крутиков М.В., Мещеряков В.А., Зайцев В.А., Бутырин Е.А. Измерительный комплекс для исследования пространственно-временных искажений радиосигналов трехсантиметрового диапазона на наземных трассах. *Известия вузов России, Радиоэлектроника*. 2006. №6. С.7–11.
4. Денисов В.П., Дубинин Д.В. *Фазовые радиопеленгаторы*. Томск, ТУСУР. 2002. 251 с.
5. Денисов В.П., Дубинин Д.В., Ерофеев Д.В. Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток. *Доклады ТУСУР*. Томск. 2017. Т.20. №.4. С.11–16.

Для цитирования:

Полянских П.А., Мещеряков А.А., Денисов В.П., Гельцер А.А. однопозиционный метод определения координат источника радиоизлучения на земных трассах по совокупности отражений его сигнала от местных предметов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.6>