



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.3>

УДК: 621.396

ВОПРОСЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ОДНОПОЗИЦИОННОЙ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Д.В. Дубинин, А.А. Мещеряков

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

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2025 г.

Аннотация. В данной работе анализируются отражения радиоволн от элементов рельефа местности в пассивной однопозиционной системе определения координат источника радиоизлучения. Измеряемыми параметрами отражений являются их задержки относительно прямого сигнала и разность фаз на разнесенных антеннах. Показано, что анализируя отраженные сигналы можно получить сведения о виде отражающей поверхности в виде координат отдельных «блестящих точек».

Ключевые слова: отражения радиоволн, пеленгатор, измеритель задержки, разность фаз, точность измерения.

Финансирование: при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2023-0014.

Автор для переписки: Мещеряков Александр Алексеевич,

Aleksandr.Mescheryakov@tusur.ru

Введение

В статье рассматривается однопозиционная пассивная система определения местоположения импульсных источников радиоизлучения (ИРИ), основанная на использовании отражений этого излучения от элементов рельефа местности и местных предметов. Однопозиционный метод определения координат ИРИ разработан в НИИ РТС ТУСУР [1,2], применительно к условиям радиотехнической разведки. Классические методы определения местоположения ИРИ основаны на использовании пространственно разнесенного приема [3]. В предложенном методе пространственное разнесение создается за счет использования отражений радиоволн от объектов на трассе распространения. Предложенный алгоритм обработки сигналов достаточно подробно изложен в монографии [2] и нет необходимости полностью излагать его в данной работе. Важно только, что для определения координат ИРИ измеряются пеленги на него и каждый отражатель, от которого поступил достаточно сильный сигнал, а также задержки отраженных сигналов относительно прямого. Таким образом, однопозиционная система определения местоположения ИРИ представляет собой обзорный моноимпульсный пеленгатор с достаточно широким сектором одновременного обзора, дополненный устройством измерения задержек отраженных импульсов относительно прямого и устройством обработки результатов измерений.

Заметим, что предлагаемый алгоритм местоопределения ИРИ не требует знания от какого именно объекта на трассе распространения радиоволн пришел тот или иной отраженный сигнал, но требует использования карты местности, на которой различимы все возможные отражатели. В настоящее время эта проблема решается с помощью данных, получаемых системами дистанционного зондирования Земли с ее искусственных спутников. В частности, в теоретических выкладках удобно использовать доступный сервис Google Maps [4].

Отсутствие необходимости знания от какого именно объекта с известными координатами отражен тот или иной принятый импульс выгодно отличает предложенный однопозиционный метод от ранее известных [5-7].

1. Описание измерительного комплекса

Укрупненная структурная схема экспериментального комплекса, на котором получены данные, являющиеся основой данной статьи, приведена на рис. 1.

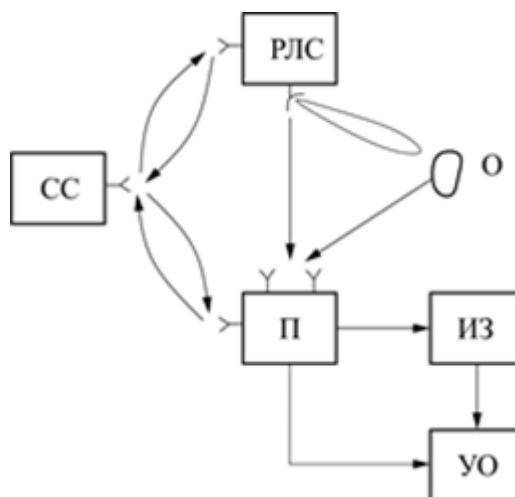


Рис. 1. Укрупненная структурная схема измерительного комплекса (П - пеленгатор; ИЗ – измеритель задержек; УО – устройство обработки; СС – система синхронизации; О - объект на трассе распространения).

Аппаратура, представленная на рис. 1, является частью радиофизического комплекса, созданного в НИИ РТС ТУСУР для экспериментального изучения особенностей распространения сантиметровых радиоволн на наземных трассах и не оптимизирована к изучению рассматриваемого однопозиционного метода [2]. В соответствии с рис. 1 она состоит из импульсной радиолокационной станции (РЛС) трехсантиметрового диапазона, пеленгатора (П), измерителя временных задержек (ИЗ) и системы синхронизации (СС) (системы единого времени). РЛС имеет направленную сканирующую в горизонтальной плоскости антенну с шириной главного лепестка диаграммы направленности 2 градуса и излучает простые немодулированные импульсы длительностью 0,3 мкс. Используется фазовый радиопеленгатор, антенная система которого состоит из двух линейных решеток. В одной решетке используются антенны, рассчитанные на прием сигналов вертикальной поляризации, другой – горизонтальной. Геометрически решетки идентичны и содержат две «параллельные»

фазометрические базы размерами 18 и 90 сантиметров [8]. Имелась возможность работать либо на одной, либо на другой решетке.

СС построена по принципам активной локации с активным ответом [9-10] и сложными ФКМ сигналами [3]. Система позволяет из совокупности импульсов, принятых пеленгатором, выделять прямые сигналы РЛС и следующие за ними отражения от объектов (О) на трассе распространения. Она позволяет также фиксировать угловое положение сканирующей антенны РЛС в каждый момент времени. ИЗ записывает на цифровые носители прямые и отраженные сигналы в системе единого времени с тактом 11 нс с целью дальнейшего измерения временной задержки между ними. Сигналы поступают в УО в виде квадратурных составляющих, по которым затем вычисляются их амплитуды и фазы [2]. УО вычисляет расстояние от пеленгатора до ИРИ по совокупности измеренных пеленгов и задержек. Тем самым вычисляются координаты ИРИ относительно пеленгатора.

На рис. 2 для наглядности приведена одна из реализаций огибающих и разности фаз на малой и большой базах, полученных в ходе эксперимента.

Реализации огибающих отраженных импульсов и соответствующих разностей фаз на малой и большой базах пеленгатора весьма разнообразны. Некоторая их типизация предложена нами в статье [11]. В частности, типовым является случай, когда разности фаз на большой и малой базах пеленгатора изменяются с течением времени почти линейно, если отбросить неизбежные флуктуации, связанные с тем, что реальные отражатели радиоволн на трассах распространения являются многоточечными [11,12]. Длительность отраженных импульсов в этом случае может быть значительно больше, чем зондирующий сигнал РЛС.

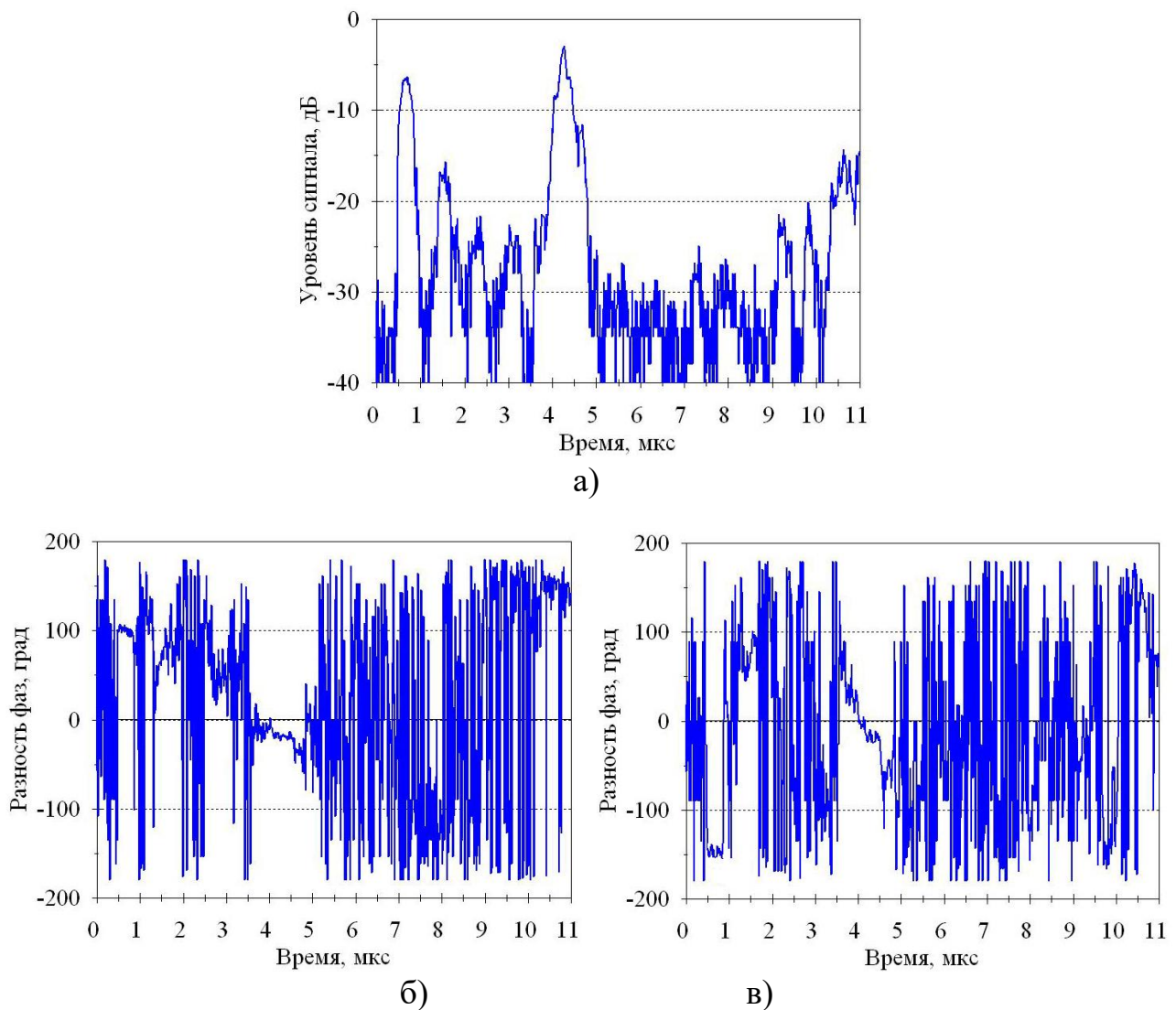


Рис. 2. Пример записи сигналов в окне регистрации: а) – огибающая сигналов; б), в) – разности фаз на малой и большой базах пеленгатора.

Цель данной статьи – объяснить подобное поведение разностей фаз и сделать выводы относительно разумного измерения пеленга и задержки в этом случае.

Алгоритм определения дальности до ИРИ предполагает одно измерение задержки и пеленга по каждой принятой реализации огибающей и разностей фаз. Фактически в терминах радиолокации каждый отражатель представляется точечной целью. В этой связи представляет интерес выяснение, в какой временной точке принятой реализации следует измерять задержку и пеленг для получения наивысшей точности определения дальности.

2. Модель формирования принимаемых сигналов и их обработка

Рассмотрим случай, когда отражающий объект можно представить в виде вертикальной диффузно рассеивающей поверхности. Понятие диффузно рассеивающей поверхности широко используется в активной радиолокации для представления отражений радиоволн от неровной (шероховатой) поверхности земли в вертикальной плоскости. Поверхность считается шероховатой, если размеры ее неровностей не удовлетворяют условию Релея [3,13]:

$$h \leq \frac{\lambda}{16 \sin \varepsilon}, \quad (1)$$

где h – высота неровностей, λ – длина волны, ε – угол скольжения падающей на поверхность волны.

На пересеченных наземных трассах такой моделью можно представить кромки лесных массивов и кустарников с той лишь разницей, что рассеяние радиоволн происходит в вертикальной плоскости. Условие Релея (1) в сантиметровом диапазоне при этом безусловно выполняется. Для подобных поверхностей характерно, что каждая облучаемая локатором точка рассеивает сигналы во все стороны приблизительно равномерно.

Рассмотрим процесс формирования сигнала на входе антенной системы пеленгатора в этих условиях. Схематически ситуация представлена на рис. 3.

Радиолокационная станция (РЛС) облучает участок поверхности главным лучом диаграммы направленности антенны (ДНА) в процессе сканирования. Пеленгатор имеет антенны с широкой ДНА, поэтому принимает сигналы, переизлученные разными точками облучаемой поверхности. При этом сигналы приходят на вход пеленгатора в разное время и под разными углами. Поскольку рассеяние имеет место в широком угловом секторе, правило «угол отражения равен углу падения» в общем случае не выполняется. Рассмотрим ситуацию более подробно. Возьмем на рассеивающей поверхности две близко расположенные «блестящие» [12] точки 1 и 2 (см. рис. 4).

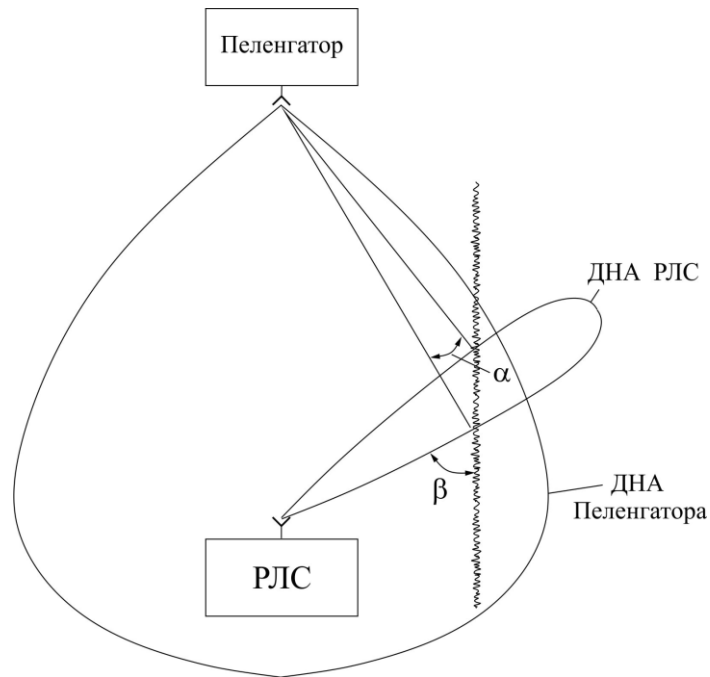


Рис. 3. Рассеяние излучения РЛС шероховатой поверхностью.

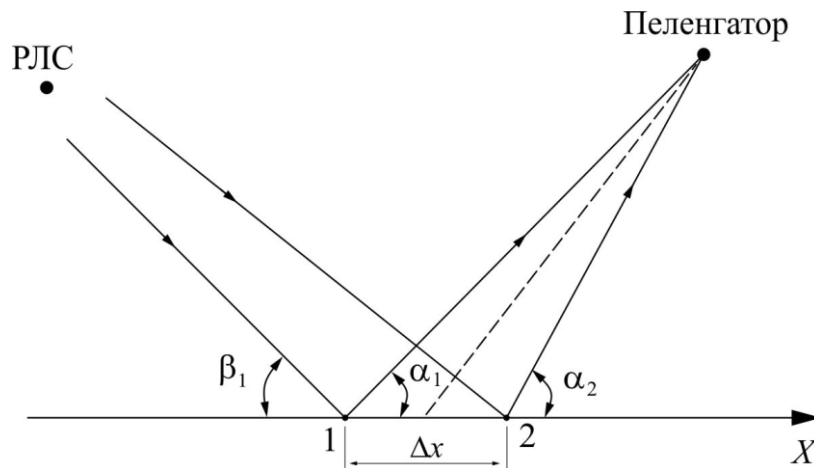


Рис. 4. Формирование сигнала на входе пеленгатора.

Обозначим расстояние между точками 1 и 2 как Δx .

В соответствии с принципом Гюйгенса рассматриваемые точки рассеивают сигналы во все стороны равномерно. Задержка сигнала, переизлученного точкой 1, относительно переизлученного точкой 2 может быть приблизительно оценена как:

$$\tau_3 = \frac{\Delta x}{c} \sin \alpha,$$

где $\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$, углы α_1 и α_2 обозначены на рис. 4.

Изменение угла прихода сигнала на антенны пеленгатора при переходе от точки 2 к точке 1 можно записать как:

$$\Delta\alpha \approx \frac{\Delta x \sin \alpha}{r_0},$$

где r_0 – расстояние от центра точек 1 и 2 до пеленгатора. Из последних соотношений получаем:

$$\Delta\alpha = \frac{c\tau_z}{r_0}, \quad (2)$$

то есть угол прихода рассеянной волны линейно изменяется с задержкой сигнала. Соответственно линейно меняется и разность фаз сигналов на разнесенных антеннах φ , поскольку:

$$\varphi = \frac{2\pi l}{\lambda} \sin \alpha,$$

где l – разнос антенн (база пеленгатора), α – угол прихода волны относительно «нормали к базе».

В экспериментальных данных линейная зависимость разности фаз от времени в течение длительности отраженного импульса проявляется довольно часто. Рис. 2 иллюстрирует такую зависимость по малой и большой базам пеленгатора на временных интервалах 1,3-1,8 мкс и 3,5-5,0 мкс.

Очевидно, по полному изменению разности фаз и расстоянию до рассеивающей поверхности можно оценить длину ее горизонтального участка L , приводящему к линейному изменению φ :

$$L = \frac{r_0 \Delta\alpha}{\cos \alpha},$$

где r_0 – расстояние до рассеивающего объекта, $\Delta\alpha$ – угловое изменение, соответствующее линейному ходу разности фаз.

Участок рассеивающей поверхности протяженностью L одновременно «засвечивается» излучением РЛС и определяет длительность отраженного импульса, принимаемого пеленгатором:

$$\tau_{\text{отр}} = \frac{L}{c \cos \alpha}, \quad (3)$$

где c – скорость распространения радиоволн.

Таким образом, в данной модели отражений длительность отраженного импульса зависит от расстояния между пеленгатором и отражателем и угла, под которым отражающая поверхность расположена по отношению к пеленгатору.

Приведенные выкладки получены в предположении, что рассеяние поля поверхностью носит чисто диффузный характер. Однако, большинство реальных рассеивающих поверхностей в радиолокационном диапазоне создают как диффузное рассеяние, так и зеркальную компоненту, соотношение между которыми зависит от целого ряда факторов [14]. Зеркальная компонента создает в месте приема узкий импульс, в идеале равный по длительности излученному РЛС, причем пеленг на точку отражения в течение длительности импульса не изменяется. Направление на точку зеркального отражения наиболее точно определяется в момент максимума приема, так как в этот момент имеет место наилучшее соотношение диффузного и зеркального компонентов. Диффузный компонент выступает в этом случае в роли помехи.

Реальные отражатели, как-то крошки лесных массивов и кустарников, в общем случае не являются статистически однородными поверхностями. Они могут содержать сосредоточенные объекты, отражения от которых преимущественно зеркальные. Такими объектами могут быть, например, плотные группы высоких деревьев. На приемном конце трассы отражения от них выглядят в виде коротких импульсов. Очевидно, что и в этом случае наивысшая точность пеленгования будет иметь место, если оно осуществляется в момент максимума приема в силу изложенных выше причин.

Пеленги на ИРИ и отражатель можно измерять в каждой временной точке реализации принятого отраженного импульса. Поскольку используется фазовый пеленгатор, необходимо устранять неоднозначность измерений. Четырехэлементная симметричная антенная система пеленгатора с малой базой 18 см и большой 90 см позволяет использовать два пути раскрытия неоднозначности и вычисления пеленга: метод уточнений с двумя базами и метод максимального правдоподобия с полной системой баз [8]. При четырех антеннах полная система содержит три базы, организованные, например, как «с опорной антенной» [8].

Особенностью обработки является то, что в алгоритм расчета дальности до ИРИ пеленги на отражатель и ИРИ входят как их разность. Рассмотрим эту особенность для «метода уточнений» как более наглядного.

Обозначим $\alpha_{\text{И}}$ – пеленг на ИРИ, $\alpha_{\text{О}}$ – пеленг на отражатель, $v_{\text{И}} = \sin \alpha_{\text{И}}$, $v_{\text{О}} = \sin \alpha_{\text{О}}$.

На грубой (малой) базе пеленгатора разности фаз будут равны:

$$\varphi_{1\text{И}} = 2\pi \frac{l_1}{\lambda} v_{\text{И}}, \quad \varphi_{1\text{О}} = 2\pi \frac{l_1}{\lambda} v_{\text{О}}.$$

На рабочей частоте 9220 МГц измерительного комплекса интервал однозначного пеленгования составляет $\pm 5,15$ градуса относительно нормали к антенной системе.

На точной (большой) базе пеленгатора разности фаз запишутся как:

$$\varphi_{2\text{И}} + 2\pi k_{\text{И}} = 2\pi \frac{l_2}{\lambda} v_{\text{И}}, \quad \varphi_{2\text{О}} + 2\pi k_{\text{О}} = 2\pi \frac{l_2}{\lambda} v_{\text{О}},$$

где $k_{\text{И}}$, $k_{\text{О}}$ – полное число периодов разности фаз, утраченных при измерениях.

Интервал однозначного пеленгования на большой базе составляет $\pm 1,03$ градуса относительно нормали к антенной системе. Измерения на большой и малой базах ведутся одновременно (в один и тот же такт АЦП) для устранения влияния временных флуктуаций разностей фаз на точность измерения.

Целое число периодов разности фаз при измерении пеленгов на ИРИ и отражатель найдем по формулам, полученным для «метода уточнений» [8],

$$k_{\text{И}}^* = \left[\varphi_{1\text{И}} \frac{l_2}{l_1} - \varphi_{2\text{И}} \right], \quad (4)$$

$$k_{\text{О}}^* = \left[\varphi_{1\text{О}} \frac{l_2}{l_1} - \varphi_{2\text{О}} \right], \quad (5)$$

где разность фаз выражена в $\text{рад}/2\pi$, а квадратные скобки означают округление до ближайшего целого.

Из приведенных соотношений получаем:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{И}} - \alpha_{\text{О}} = \\ = \arcsin \frac{\lambda}{l_2} \left\{ \varphi_{2\text{И}} + \left[\varphi_{1\text{И}} \frac{l_2}{l_1} - \varphi_{2\text{И}} \right] \right\} - \arcsin \frac{\lambda}{l_2} \left\{ \varphi_{2\text{О}} + \left[\varphi_{1\text{О}} \frac{l_2}{l_1} - \varphi_{2\text{О}} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

В экспериментальной установке разрешение неоднозначности производится в малом угловом секторе $\pm 5,15$ градуса, так что $\arcsin$ можно заменить его аргументом. Получим:

$$\alpha_{\text{И}} - \alpha_{\text{О}} = \frac{\lambda}{l_2} (\varphi_{2\text{И}} - \varphi_{2\text{О}} + k_{\text{И}}^* - k_{\text{О}}^*), \quad (7)$$

где $k_{\text{И}}^*$, $k_{\text{О}}^*$ – целые числа.

Алгоритм раскрытия неоднозначности (4), (5) имеет следующий физический смысл: выбирается такое целое число периодов разности фаз на большой базе $k_{\text{И}}^*$, $k_{\text{О}}^*$ при котором пеленги на большой и малой базах различаются не более чем на половину интервала однозначности по большой базе, равного λ/l_2 . Такое число при использовании алгоритма (4), (5) всегда найдется, хотя оно может соответствовать и аномально большим ошибкам пеленгования [2]. Для исключения самых больших ошибок установим, что разность пеленгов на большой и малой базах не должна превышать

некоторого порога Δ , меньшего $0,5 \frac{\lambda}{l_2}$. Для реализации этой возможности необходимо проверить $k_{и}^*$ и $k_{о}^*$, полученные по формулам (4), (5) следующим образом:

$$\left| \varphi_{1и} \frac{l_2}{l_1} - \varphi_{2и} - k_{и}^* \right| < \Delta, \quad (8)$$

$$\left| \varphi_{1о} \frac{l_2}{l_1} - \varphi_{2о} - k_{о}^* \right| < \Delta, \quad (9)$$

где $\Delta < 0,5$.

Если условия (8), (9) не выполняются, то результаты измерений должны быть исключены из дальнейшей обработки. При раскрытии неоднозначности методом максимального правдоподобия алгоритм отбраковки максимально больших ошибок несколько более сложен, но его физическая сущность соответствует изложенному выше.

Данный алгоритм проверен при работе по источнику излучения [15,16]. Рациональным оказался порог $\Delta = 0,3$. При работе по отражателям порог должен быть подобран экспериментально.

3. Методика определения координат источников переотражений

В рассматриваемой задаче интересно определить положение отражателя относительно пеленгатора и РЛС и его вид. Это можно сделать, если известно положение на местности РЛС и пеленгатора. В проведенных экспериментах это условие выполнялось.

Расчеты проводились в системе координат, показанной на рис. 5, в центре которой был расположен пеленгатор, а передатчик находится на оси ординат на удалении R .

Нахождение координат отражателей проводилось двумя методами: по положению антенны РЛС, когда отражатель облучается главным лепестком ее ДНА, и по измерениям фазового пеленгатора. В первом методе оценки

координат отражателя получались по результатам обработки времени задержки τ_{Π} переотраженного сигнала относительно прямого сигнала и угла отворота ψ передающей антенны. Во втором методе – времени задержки переотраженного сигнала τ_{Π} и совокупности фазовых измерений $\vec{\phi}$.

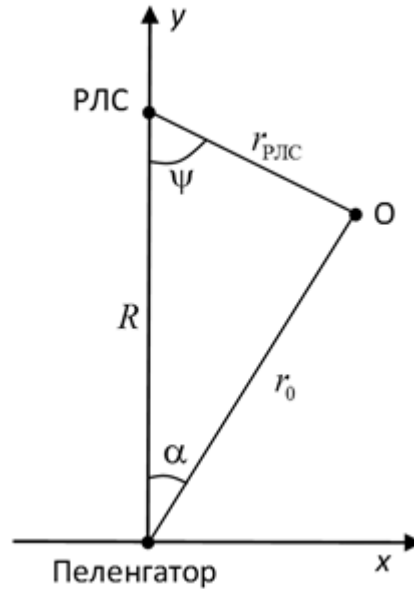


Рис. 5. Геометрия расположений РЛС, пеленгатора и отражающего объекта (O).

Определение координат отражающего объекта по положению передающей антенны основано на формуле:

$$r_0^2 = R^2 + r_{\text{РЛС}}^2 - 2Rr_{\text{РЛС}} \cos \psi. \quad (10)$$

Расстояния между РЛС и отражающим объектом $r_{\text{РЛС}}$, РЛС и пеленгатором R , пеленгатором и отражающим объектом r_0 связаны соотношением:

$$r_0 + r_{\text{РЛС}} = c\tau_{\Pi} + R. \quad (11)$$

Выразив из этого соотношения r_0 и подставив его в (10), после математических преобразований получим:

$$r_{\text{РЛС}} = \frac{(R + c\tau_{\Pi})^2 - R^2}{2(R + c\tau_{\Pi} - R \cos \psi)}. \quad (12)$$

Оценки координаты отражающего объекта в выбранной системе координат описываются соотношениями:

$$\begin{aligned} x_O &= r_{\text{РЛС}} \sin \psi, \\ y_O &= R - r_{\text{РЛС}} \cos \psi. \end{aligned} \quad (13)$$

При определении координат отражающего объекта фазовым методом используется соотношение:

$$r_{\text{РЛС}}^2 = R^2 + r_0^2 - 2Rr_0 \cos \alpha. \quad (14)$$

Выразив из (11) $r_{\text{РЛС}}$ и подставив его в (14), после математических преобразований получим:

$$r_0 = \frac{(R + c\tau_{\Pi})^2 - R^2}{2(R + c\tau_{\Pi} - R \cos \alpha)}. \quad (15)$$

Оценки координаты отражающего объекта фазовым методом в выбранной системе координат описываются соотношениями:

$$\begin{aligned} x_O &= r_0 \sin \alpha, \\ y_O &= r_0 \cos \alpha. \end{aligned} \quad (16)$$

Оценка угла α^* определяется по результатам измерений разностей фаз сигналов, принятых линейной антенной решеткой.

4. Результаты обработки экспериментальных данных

Для проверки теоретических предпосылок были взяты данные, записанные в ходе проведения экспериментальных исследований, описанных в монографии [2]. Имеются ввиду эксперименты по исследованию однопозиционного метода местоопределения. Данные получены на наземной трассе протяженностью 13,3 км и записаны в файл данных. Общее количество реализаций N_p , записанных в файле данных, равно 2710. Каждая реализация содержала 1024 отсчета

квадратур 8-ми приемных каналов: 4 для приема сигналов с вертикальной поляризацией (каналы 1, 3, 5 и 7) и 4 – с горизонтальной (каналы 2, 4, 6 и 8 в той же системе обозначений). По максимальным значениям амплитуд принимаемых сигналов было установлено, что антенна передатчика была направлена на пеленгатор при записи $N_0 = 1437$ реализации. При этом значения измеренных разностей фаз составили: -114° для сигналов 2 и 4 приемных каналов, 153° для сигналов 2 и 6 приемных каналов и 164° для сигналов 2 и 8 приемных каналов. Эти значения в дальнейшем использовались в качестве калибровочных для получения разности между направлениями на отражатель и РЛС в соответствии с формулой (7).

Угол отворота передающей антенны ψ_i относительно пеленгатора при записи i -ой реализации определялся по формуле:

$$\psi_i = \frac{360^\circ}{N_p} \cdot (N_0 - i). \quad (16)$$

Значения совокупности измеренных разностей фаз $\vec{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T$ после внесения поправок использовались для вычисления координат отражающих объектов. Для нахождения оценки угла α^* требовалось предварительно разрешить неоднозначность фазовых измерений. Разрешение неоднозначности было выполнено двумя способами: методом уточнений (4), (5) и разработанным нами максимально правдоподобным алгоритмом, описанным в [8]. В данной работе использовался несколько упрощенный вариант максимально правдоподобного алгоритма, названный нами как «квазиоптимальным». При разрешении методом уточнений и вертикальной поляризации приема однозначная фазометрическая база 18 см была образована между 4 и 6 приемными каналами, а большая база пеленгатора 90 см – между 2 и 8 каналами.

При разрешении неоднозначности максимально правдоподобным алгоритмом были образованы три фазометрические базы. Второй канал использовался в качестве опорного. Размеры фазометрических баз получились 36 см, 54 см и 90 см.

Результаты разрешения неоднозначности оказались схожими. Вероятность правильного устранения неоднозначности фазовых измерений P_0 [8] без использования отбраковки аномальных ошибок в соответствии с формулами (8), (9) оказалось несколько выше в случае максимально правдоподобного алгоритма. А применением алгоритма отбраковки удалось повысить значение P_0 до 1.

Порог Δ для отбраковки (см. формулы (8) и (9)) был принят равным 0,3. Такое значение оказалось оптимальным в более ранних измерениях по прямому сигналу [15]. Пеленг на источник отражений мог оказаться большим, чем сектор однозначного пеленгования примененной системой фазометрических баз. При максимально правдоподобном устранении неоднозначности он превышал сектор однозначного пеленгования $\pm 5,19$ градусов. Для определения в какой сектор однозначности системы попал отражатель в данной работе использовалось положение направленной антенны РЛС. Здесь мы не приводим соответствующий алгоритм, так как он лежит в стороне от основного содержания статьи, а его описание заняло бы много места.

На рис. 6 приведены результаты определения координат отражающих объектов фазовым методом (кривые 1) и по положению антенны передатчика (кривые 2).

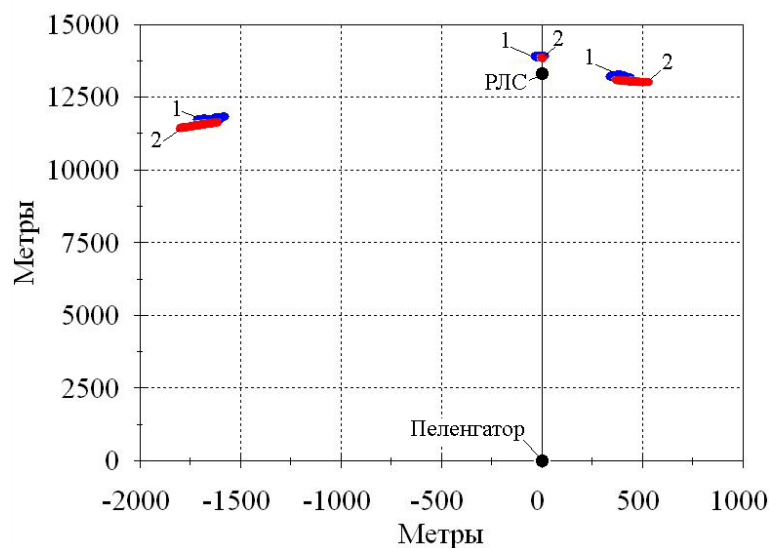


Рис. 6. Координаты трех отражающих объектов, полученные фазовым методом (кривые 1) и по диаграмме направленности антенны РЛС (кривые 2).

Из рис. 6 видно, что координаты отражателей, полученные путем использования направленной антенны РЛС и фазового пеленгатора близки, хотя и не совпадают. Но они и не должны совпадать, так как антенна РЛС и пеленгатор «смотрят» на отражатель с разных сторон. Полное совпадение возможно только в том случае, когда отражатель точечный.

Близкое совпадение результатов свидетельствует о том, что фазовый пеленгатор с принятой системой баз и отбраковкой аномально больших ошибок пригоден в однопозиционной пассивной системе определения координат источников излучения. Кроме того, из рисунка видно, что «изображения» отражателя, полученные с помощью фазового пеленгатора, представляются как ряд отдельных точек. Эти точки получены при разных задержках отражений и разных пеленгах и показывают, от какой области рассеивающей поверхности пришел сигнал на вход пеленгатора. На наш взгляд получившиеся «изображение» отражателя показывает его структуру, то есть координаты точек на отражающей поверхности.

Заключение

В данной работе анализируются отражения радиоволн от элементов рельефа местности в двухпозиционной радиолокационной системе. Рассматриваются их задержки относительно прямого сигнала и разности фаз на базах фазового пеленгатора, определяющего направления как на излучающую РЛС, так и на источник отражений.

В работе получены следующие результаты.

1) Показано с помощью простейших математических выкладок, почему во многих реализациях принятого сигнала разность фаз на разнесенных антеннах фазового пеленгатора меняется линейно во времени. Считалось, что принятая радиоволна отражена от вертикальной диффузно рассеивающей поверхности, какой, на наш взгляд, можно представить в виде случаев кромки лесных массивов и кустарников. Для выявления линейного хода разности фаз надо

усреднить неизбежные флуктуации, связанные с многоточечным характером отражателя.

2) Показано, что при считывании амплитуд и разности фаз в системе обработки информации с интервалом 11 нс (как это имело место в экспериментальном комплексе) можно приблизительно определить структуру отражающей поверхности в виде координат ее отдельных светящихся точек.

3) Близкое совпадение координат отражающих объектов, определенных с помощью фазового пеленгатора (параллельные базы 18 и 90 см [8]) и направленной антенны РЛС, а также малый разброс отражающих точек, определенных фазовым методом говорят о том, что фазовый пеленгатор с принятой системой баз пригоден для работы в пассивной однопозиционной системе координат ИРИ в трехсантиметровом диапазоне волн.

4) Сложная форма огибающей, относительно длинных отраженных импульсов, является следствием отражений радиоволн от различных участков отражающей поверхности, с различными отражающими свойствами разделенных по времени. Поэтому, если по импульсу делается одно измерение задержки и разности фаз, его разумно выполнить в момент максимума огибающей, так как при этом будет минимальное влияние различного рода шумов.

Финансирование: при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2023-0014.

Литература

1. Гельцер А.А., Денисов В.П., Мещеряков А.А. Устройство для определения местоположения работающей радиолокационной станции: пат. 2457505 Россия. – 2012.
2. Денисов В.П. и др. Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения. – 2014.
3. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы: Учебник для вузов. – Издательский центр «Академия», 2008.

4. Google Карты: геоинформационный ресурс - Режим доступа: www.google.ru/maps.
5. Ronald E.H. Method for locating a radio frequency emitter : пат. 4882590 США. – 1989.
6. Fales D. Passive method and apparatus for radar locating and parasitic surveillance: пат. 4176357 США. – 1979.
7. Shreve J.S. Self survey means: пат. 4438439 США. –1984.
8. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. - Изд. ТУСУР, 2002.
9. Корниенко В.Г., Лебедев В.Ю., Крутиков М.В. Синхронизация пространственно-разнесенных пунктов радиотехнической системы с использованием многоточечного измерения взаимной корреляционной функции запросных и ответных сигналов //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2006. – №. 6. – С. 44-47.
10. Танцай П.И., Корниенко В.Г. Экспериментальные исследования точности синхронизации шкал времени в пространственно разнесенных пунктах методом запросной радиолокации //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – №. 2-2 (18). – С. 25-31.
11. Денисов В.П. и др. Модели сигналов импульсной РЛС, принимаемых однопозиционной станцией радиотехнической разведки на наземных трассах //Ural Radio Engineering Journal. – 2022. – Т. 6. – №. 4. – С. 390-413.
12. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных цепей. – Радио и связь, 1982.
13. Скольник М.И. Справочник по радиолокации. – 2014.
14. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места //ТИИЭР. – 1974. – Т. 62. – №. 6. – С. 37-61.
15. Денисов В.П. и др. Устранение аномально больших ошибок в двухбазовых фазовых пеленгаторах, работающих по сканирующему источнику излучения //Радиотехника. – 2013. – №. 2. – С. 010-017.

16. Денисов В.П., Дубинин Д.В., Мещеряков А.А. Исключение аномально больших ошибок пеленгования в процессе устранения неоднозначности измерений в фазовых пеленгаторах, реализующих метод максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61. – №. 10. – С. 957-963.

Для цитирования:

Дубинин Д.В., Мещеряков А.А. Вопросы обработки сигналов в однопозиционной пассивной системе определения координат источника радиоизлучения. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.3>