

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2022.6.4.003

УДК 621.396.969

Модели сигналов импульсной РЛС, принимаемых однопозиционной станцией радиотехнической разведки на наземных трассах

В. П. Денисов, М. В. Крутиков, А. А. Мещеряков,
П. А. Полянских ✉

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

✉ msch@rts.tusur.ru

Аннотация

Излагаются основы однопозиционного пассивного метода определения координат источника радиоизлучения путем использования множества отражений излученных сигналов от естественных и искусственных образований на трассе распространения радиоволн. Алгоритм основан на сравнении координат возможных отражателей, нанесенных на карту местности, с координатами, вычисленными по измеренным пеленгам источников отражений и задержек отраженных сигналов относительно прямого. Приводятся данные радиофизического эксперимента по изучению отражений, выполненного в трехсантиметровом диапазоне волн, позволяющие оценить пригодность принимаемых сигналов для реализации метода. Принимаемые сигналы представлены в виде простейших математических моделей. Показано, что их статистический характер не препятствует реализации метода.

Ключевые слова

источник радиоизлучения, отражающий объект, однопозиционный метод, распределенная цель, фазовый радиопеленгатор

Для цитирования

Денисов В. П., Крутиков М. В., Мещеряков А. А., Полянских П. А. Модели сигналов импульсной РЛС, принимаемых однопозиционной станцией радиотехнической разведки на наземных трассах. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(4):390–413. DOI: 10.15826/urej.2022.6.4.003.

Models of Pulse Radar Signals Received by a Single-position Radio Reconnaissance Station on Ground Tracks

V. P. Denisov, M. V. Krutikov, A. A. Mescheryakov,
P. A. Polyanskih ✉

Tomsk State University of Control System and Radio Electronics,
40, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

✉ msch@rts.tusur.ru

Abstract

This article represents the basics of a single-position passive method of determining the coordinates of a radio emission source by using a set of reflections of the emitted signals from natural and artificial formations on the radio waves propagation path. The algorithm is based on comparing the coordinates of possible reflectors plotted on the terrain map with the coordinates calculated from the measured bearings of the reflection sources and the delays of the reflected signals in relation to the direct signal. The data of a radiophysical experiment on the study of reflections carried out in the three-centimeter wavelength range are provided, which makes it possible to assess the suitability of the received signals for the implementation of the method. The received signals are presented in the form of the simplest mathematical models. It is demonstrated that their statistical nature does not interfere with the implementation of the method.

Keywords

radio source, reflecting object, one-position method, point target, phase direction finder

For citation

Denisov V. P., Krutikov M. V., Mescheryakov A. A., Polyanskih P. A. Models of Pulse Radar Signals Received by a Single-position Radio Reconnaissance Station on Ground Tracks. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(4):390–413. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.4.003.

Однопозиционный метод определения координат источника радиоизлучения

Цель настоящей статьи – рассмотреть ограничения на точность определения координат работающей импульсной РЛС из одного пункта по параметрам принимаемых сигналов. Рассматриваемый алгоритм однопозиционного определения местоположения источника излучения основан на использовании отражений радиоволн от различных объектов на трассе распространения: элементов рельефа местности, растительности, искусственных сооружений. Предполагается, что отражения радиоволн однократные. Однако процесс образования принимаемых сигналов на реальных трассах более сложен. Он включает в себя многолучевое

распространение, рассеяние и дифракцию радиоволн на препятствиях. Поставленная цель достигается путем анализа данных радиофизического эксперимента по изучению особенностей распространения сантиметровых радиоволн на наземных трассах. Принимаемые сигналы представляются в виде простейших математических моделей с целью нахождения рациональных алгоритмов их дальнейшей обработки в интересах метода.

Анализ проводится применительно к однопозиционному методу определения координат работающей РЛС по совокупности отражений радиоволн от элементов рельефа местности на трассе распространения радиоволн между РЛС и измерительным пунктом. Метод разработан в НИИ РТС ТУСУР [1; 2]. Классические пассивные методы местоопределения (пеленгационный, разностно-дальномерный) основаны на использовании пространственно разнесенного приема, что создает дальномерную базу [3]. В предложенном методе дальномерная база образуется за счет отражений радиоволн от объектов на трассе распространения.

Идея использования отражающего объекта для определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) из одного приемного пункта иллюстрируется рис. 1. С помощью пеленгатора, находящегося в приемном пункте, измеряются направления на ИРИ и отражающий объект S . Для определения координат ИРИ достаточно вычислить дальность до него, так как направление определяется пеленгатором. Линия измеренного пеленга на ИРИ является первой линией положения. Для нахождения координат ИРИ необходимо провести вторую линию положения. Эта линия положения – эллипс, параметром которого является разность путей распространения прямого и отраженного сигналов

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

где c – скорость распространения радиоволн, τ – задержка отраженного сигнала относительно прямого.

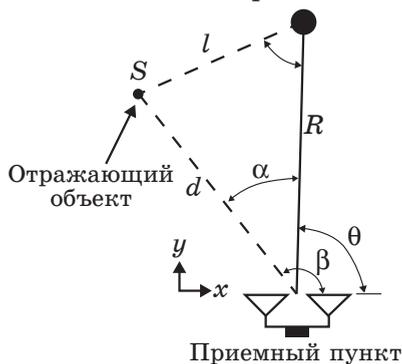


Рис. 1. Геометрия системы
Fig. 1. System geometry

Если координаты отражающего объекта известны, то расстояние R от измерительного пункта до ИРИ можно определить по формуле

$$R = \frac{2d\delta - \delta^2}{2(\delta - d(1 - \cos\alpha))}. \quad (2)$$

Угол α между направлениями от приемного пункта на ИРИ и отражатель находится по формуле

$$\alpha = |\theta - \beta|. \quad (3)$$

Измеряемые углы θ и β обозначены на рис. 1.

С другой стороны, если известно расстояние R от измерительного пункта до ИРИ, координаты отражающего объекта можно найти по формулам [2]

$$x = \frac{(2R + \delta) \left(R + \frac{R + \delta}{\cos\alpha} \right)}{2(R^2 \sin^2 \alpha + 2R\delta + \delta^2)} \cos\alpha \cdot \sin\alpha, \quad (4)$$

$$y = \frac{\delta(2R + \delta) \left(R + \frac{R + \delta}{\cos\alpha} \right)}{2(R^2 \sin^2 \alpha + 2R\delta + \delta^2)} \cos^2 \alpha, \quad (5)$$

где δ – пространственная разность путей распространения прямого и отраженного сигналов.

В основе предлагаемого однопозиционного определения координат ИРИ лежит оценка дальности до него путем сравнения действительных координат отражателя x_{ni} , y_{ni} , занесенных в память компьютера, с рассчитанными по формулам (4) и (5), в которые подставлены измеренные значения угла α , пространственная разность путей распространения сигналов δ и искомая 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:

$$R = \arg \min_R [(x_i(R, \alpha, \delta) - x_{ni})^2 + (y_i(R, \alpha, \delta) - y_{ni})^2], \quad (6)$$

где $x_i(R, \alpha, \delta)$ и $y_i(R, \alpha, \delta)$ – координаты i -го отражающего объекта, рассчитанные по формулам (4) и (5).

Поскольку в зоне действия приемного пункта (пеленгатора) обычно имеется несколько или множество отражающих объектов, которые могут быть использованы для определе-

ния дальности R , формула для оценки дальности R (6) приводится к виду:

$$R = \arg \min_R \sum_{i=1}^N [(x_i(R, \alpha_i, \delta_i) - x_{ni})^2 + (y_i(R, \alpha_i, \delta_i) - y_{ni})^2]. \quad (7)$$

Дальность R , удовлетворяющая (7), принимается за истинную.

Формула (7) соответствует сглаживанию статистических данных по методу наименьших квадратов [4] и допускает различные алгоритмы практической реализации. Нами принят алгоритм, изложенный в монографии [2]. Он заключается в следующем. Для каждого нанесенного на карту объекта, который может быть отражателем и от которого отражения могут быть приняты, по измеренным пеленгам и задержкам рассчитывается дальность R_i . Если это действительно тот объект, по которому измерены пеленг и задержка, рассчитанная дальность равна истинной с точностью до погрешности измерений. В противном случае рассчитанная дальность не равна истинной и принадлежит некоторому интервалу, который можно определить априорно. По всем измеренным R_i (т.е. по всем потенциальным отражателям для каждой пары α и δ), строится гистограмма. Значение R , соответствующее максимуму гистограммы (мода распределения) принимается за оценку дальности. Заметим, что при таком подходе не надо знать, от какого объекта отразился тот или иной сигнал. Достаточно, чтобы все возможные отражатели были нанесены на карту местности, а их координаты внесены в память ЭВМ. Это обстоятельство является важной отличительной особенностью рассматриваемого однопозиционного метода. В других известных нам методах определения координат источников радиоизлучения с помощью одного приемного устройства, установленного на подвижном носителе или на земле, координаты объекта, от которого отразился сигнал, должны быть известны [5–7].

Дальность определяется правильно с точностью до шага гистограммы, если число действительных отражателей больше, чем ложных (потенциальных), расчетная дальность до которых попадает в один и тот же шаг гистограммы. Шаг гистограммы должен определяться по реальной точности расчета с учетом ошибок измерения пеленгов и задержек.

На рис. 2 для иллюстрации метода приведена гистограмма, построенная по результатам измерений на открытой трассе протяженностью 16,68 км в декабре 2008 г. Вид гистограммы существенно зависит от метода измерения временных задержек отраженных сигналов и от того, какие объекты, имеющиеся на карте, используются в качестве потенциальных отражателей.

В данном случае использовался «пороговый» метод измерения задержек, а в качестве отражателей – границы лесных массивов. Рисунок показывает реальность предлагаемого однопозиционного метода измерения дальности.

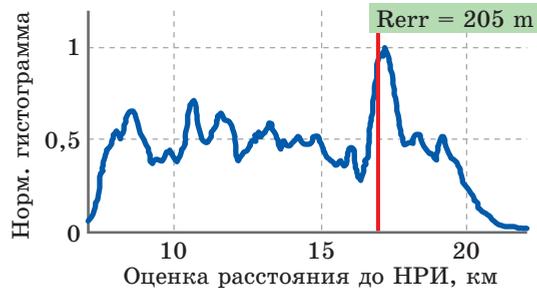


Рис. 2. Нормированная гистограмма оценок дальности

Fig. 2. Normalized histogram of range estimates

Для реализации предлагаемого однопозиционного метода определения координат ИРИ необходима электронная карта местности исследуемого района, на которой различимы 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 [8].

Точность измерения дальности от измерительного пункта до ИРИ зависит от соответствия координат отражателей, вычисленных по формулам (4), (5), их действительному положению на местности. Указанные формулы показывают, что практически она зависит от соответствия измеряемых величин: временных задержек и пеленгов на ИРИ и отражатели, их действительному значению. В работе рассматриваются ограничения на точность измерения этих величин, связанные с процессами на трассе распространения радиоволн. Алгоритм однопозиционного метода определения координат РЛС основан на предположении об однократном отражении радиоволн от объектов, нанесенных на карту местности. Однако на реальных наземных трассах, кроме однократного отражения, возможны и многократные, возможен прием сигналов, отраженных от различных объектов, одновременно облучаемых главным и боковыми лепестками диаграммы излучения РЛС, имеют место рассеяние радиоволн элементами рельефа местности, деревьями, кустарником, искусственными сооружениями, дифракция радиоволн на препятствиях [2]. В результате принимаемый «отраженный» сигнал может сильно отличаться от зондирующего сигнала РЛС как по форме, так и по

длительности. В статье принимаемые сигналы представляются в виде упрощенных математических моделей, чтобы впоследствии оценить по ним возможность измерения пеленгов на отражатели и временных задержек отраженных сигналов, а также отыскать рациональные методы их измерения.

В соответствии с (4) и (5), координаты отражателей – это точки на поверхности земли. Однако реально отражающие объекты должны иметь достаточную пространственную протяженность, чтобы обладать эффективной бистатической ЭПР [9], обеспечивающей прием отраженных сигналов в точке расположения пеленгатора. В зависимости от параметров РЛС, пеленгатора и расположения отражателя на местности бистатическая ЭПР должна составлять десятки и сотни квадратных метров. Поэтому возникает вопрос о нахождении кажущегося центра отражения на поверхности земли и оценки его пространственных флуктуаций с учетом эффекта «парной цели» [10].

Подводя итог раздела, отметим, что однопозиционная станция радиотехнической разведки представляет собой обзорный моноимпульсный пеленгатор, способный пеленговать как РЛС, так и отражающие объекты, дополненный устройством измерения задержек отраженных сигналов относительно прямого и устройством вычисления расстояния до РЛС (дальности) по предлагаемому алгоритму. Для оптимизации обработки необходимо знать статистические характеристики отражений.

Экспериментальные данные и их анализ

Данные о характеристиках пеленгов на источники отражений и задержках отражений относительно прямого сигнала РЛС получены как побочные в ходе радиофизического эксперимента по изучению распространения радиоволн сантиметрового диапазона на наземных трассах, проводившегося в НИИ РТС ТУСУР [2]. Составная часть радиофизического комплекса, использованная для получения соответствующих данных, состояла из импульсного радиолокатора трехсантиметрового диапазона и двухбазового фазового пеленгатора, как показано на рис. 1. Излучались прямоугольные радиоимпульсы длительностью 0,3 мкс, антенна РЛС сканировала в горизонтальной плоскости. В дополнение к аппаратуре, показанной на рис. 1, приемный и передающий пункты были охвачены локальной системой единого времени [2], что позволяло записывать в цифровой форме прямые сигналы РЛС и следующие за ними переотражения в некотором временном интервале, называемом далее окном регистрации. Записывались огибающие сигналов и разности фаз на большой (90 см) и малой (18 см) базах пеленгатора, что позволяло однозначно

определить пеленги как на РЛС, так и на источники отражений. Временной дискрет записи сигналов в окне регистрации (такт АЦП) составлял 11 нс. Аппаратурная погрешность фазовых измерений оценивалась в 8–12 градусов.

На рис. 3 дано геометрическое представление трассы РЛС-пеленгатор. Антенна пеленгатора имеет широкую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости, так что возможен прием сигналов, отраженных от объектов, расположенных на обширной территории. Принимаемые сигналы могут быть следствием отражений радиоволн от объекта на трассе распространения радиоволн при облучении его основным или одним из боковых лепестков диаграммы направленности антенны РЛС.

Участок местности, где расположены индицируемые приемной аппаратурой объекты, определяется длительностью окна регистрации. На рис. 3 он ограничен двумя эллипсами равных задержек. Меньший эллипс характеризуется минимальной задержкой отраженного импульса относительно прямого, которую можно измерить. Очевидно, она не может быть меньше длительности зондирующего сигнала РЛС. Большой эллипс задается длительностью окна регистрации. В условиях эксперимента она устанавливалась в пределах от единицы до двадцати микросекунд.

На рис. 3 показаны также два эллипса равных задержек, отличающиеся по задержке на длительность импульса τ_u друг от друга. Точечные объекты должны укладываться в полосу между двумя такими эллипсами, положение которых на местности может быть различным. В условиях эксперимента расстояние между эллипсами соответствовало расстоянию $c\tau_u = 90$ м.

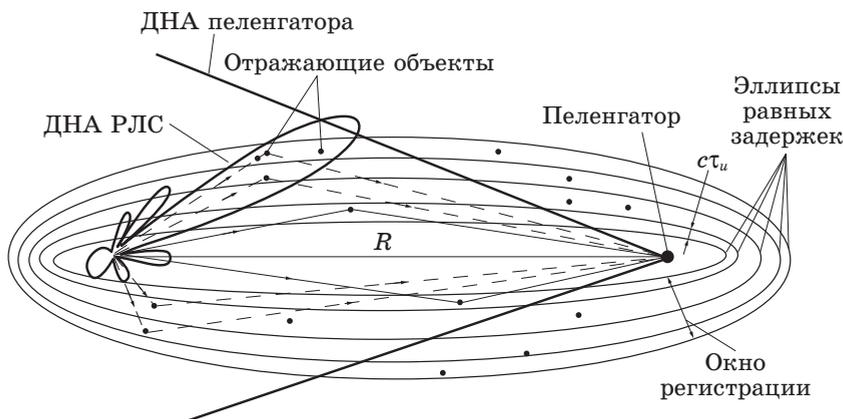


Рис. 3. Схематическое представление трассы распространения радиоволн

Fig. 3. Schematic representation of the radio wave propagation path

Пример записи сигналов в окне регистрации дан на рис. 4 при отвороте антенны РЛС от направления на пеленгатор на 60 градусов. На рис. 4а показана огибающая сигналов (виден прямой импульс РЛС и ряд отраженных), на рис. 4б и 4в разности фаз на малой и большой базах пеленгатора. «Начало» прямого импульса в окне регистрации устанавливалось системой синхронизации и соответствовало тридцатому такту АЦП относительно начала окна регистрации. Видно, что в течение как прямого, так и отраженных импульсов разности фаз сигналов на малой и большой базах изменяются не так резко, чтобы их нельзя было измерить в заданный момент времени. Это позволило пеленговать как РЛС, так и отражающие объекты. Вне интервалов существования импульсов разности фаз хаотично менялись в пределах ± 180 градусов.

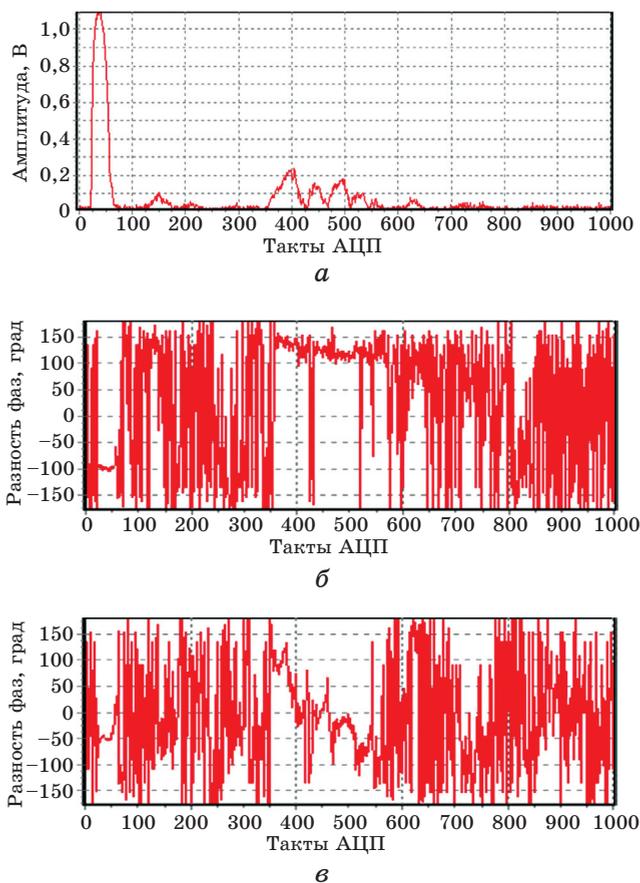


Рис. 4. Пример записи сигналов в окне регистрации: *a* – огибающая сигналов; *б, в* – разности фаз на большой и малой базах пеленгатора

Fig. 4. Example of recording signals in the registration window *a* envelope of signals; *b, c* phase differences at large and small bases of the direction finder

Отражающими объектами на трассе распространения могут быть искусственные сооружения, крутые берега водоемов, холмы, группы деревьев, опушки леса, кустарников и т. д. В проводившихся экспериментах ширина главного луча ДНА РЛС в вертикальной плоскости составляла приблизительно два градуса и ось ДНА была направлена горизонтально. При такой ширине луча деревья высотой в 20 метров, расположенные более, чем в 600 метров от РЛС, уже не являлись препятствием для распространения излучения: волна распространялась над лесом. Кроны деревьев поглощают, отражают и преломляют радиоволны [11; 12]. В данной работе используется только факт наличия отражений. Отдельные деревья или группы деревьев, возвышающиеся над преимущественной высотой леса, могут рассматриваться как точечные отражатели.

На рис. 5 приведен пример определения координат отражателей рассматриваемым методом [2]. Отражатели показаны на карте белыми точками. Видно, что они покрывают всю площадь некоторых лесных массивов, а не только отражаются от их границ. На некоторых участках точки сливаются, образуя сплошное белое поле, что свидетельствует о большом их количестве. Но в окнах регистрации в условиях проводившихся экспериментов отражателей не более десяти. Множество точек появляется вследствие того, что рисунок построен по ряду окон, зарегистрированных в процессе сканирования антенны РЛС.

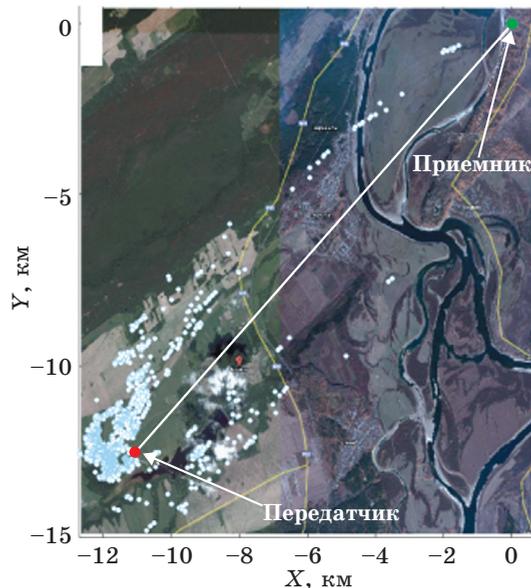


Рис. 5. Расположение отражающих объектов на карте местности
Fig. 5. Location of reflecting objects on the terrain map

Отражающие объекты с различной степенью отражающей способности могут находиться в любой точке рабочей области однопозиционной станции разведки, ограниченной диаграммой направленности антенны пеленгатора и длительностью окна регистрации. Поэтому рабочую область удобно описать с помощью «функции плотности интенсивности светящихся точек» $F_r(x, y, z)$. Эта функция введена в монографии [13] для описания распределенной радиолокационной цели однопозиционного локатора. Используем ее для описания рабочей области двухпозиционного локатора, чем по существу является рассматриваемая станция разведки в совокупности с разведваемой РЛС. Освещаемая РЛС часть области представляется как совокупность светящихся точек. Интенсивность сигналов, переизлученных элементом области $\Delta x_i, \Delta y_j, \Delta z_k$ с центром в точке x_i, y_j, z_k в сторону пеленгатора, задается формулой [13]

$$F_r(x_i, y_j, z_k) \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = \langle u_{i,j,k}^2 \rangle = \langle v_{i,j,k}^2 \rangle, \quad (8)$$

где $u_{i,j,k}, v_{i,j,k}$ – квадратурные составляющие сигнала, принятого от указанной области, которая и представляет собой светящуюся точку. Угловые скобки обозначают усреднение по совокупности реализаций.

Если точка на местности с координатами x_i, y_j, z_k не содержит отражающих элементов, функция F_r равна нулю. F_r – функция трех координат, что в действительности имеет место на пересеченных наземных трассах. Однако в работе нас интересуют отражения только в горизонтальной плоскости, поэтому зависимость F_r от вертикальной координаты z мы в дальнейшем опускаем.

Похожий по смыслу термин «интенсивность помеховых отражений» использован в справочнике [14] для описания неоднородной рассеивающей поверхности.

На пересеченных наземных трассах между передающим и приемным пунктами может быть бесконечно большое число реализаций рельефа. Не претендуя на полноту описания возможных ситуаций, выделим три типа отражающих объектов, сознавая условность вводимой классификации.

1. Точечные отражатели

В терминах радиолокации введенное определение соответствует точечной цели, то есть такой цели, размеры которой меньше элемента разрешения радиолокатора. В проведенном радиофизическом эксперименте в приемном пункте используется фазовый радиопеленгатор со слабонаправленными антеннами, который угловой разрешающей способностью не обладает. Поэтому существенно разрешение сигналов только по задержке (дальности). Отражаю-

щие объекты наносятся на карту местности в виде отдельных точек, когда отражения от них разрешаются по задержке, то есть на временной развертке выглядят как отдельные импульсы. Для этого интервал между соседними импульсами должен быть не менее длительности зондирующего сигнала РЛС τ_u . В условиях эксперимента это соответствует расстоянию на местности $c\tau_u = 90$ м.

Пример записи сигналов точечного отражателя показан на рис. 6 при отвороте антенны РЛС от направления на пеленгатор на $78,2^\circ$. На рисунке четко видны прямой и один отраженный импульс. Разность фаз на разнесенных антеннах в течение как прямого, так и отраженного импульса остается приблизительно постоянной.

Точечный отражатель характеризуется интенсивностью святиющихся точек в виде δ -функции и эффективной двухпозиционной ЭПР σ_{ui} . Мощность сигнала, отраженного от i -го точечного отражателя на входе пеленгационного приемника, рассчитывается по формуле

$$P_{np.i} = \frac{P_u G_u \cdot \sigma_{ui}(\alpha_p, \alpha_n) \cdot S_a(\alpha_n)}{16\pi^2 R_1^2 R_2^2}, \quad (9)$$

где $P_u G_u$ – энергетический потенциал РЛС; $\sigma_{ui}(\alpha_p, \alpha_n)$ – двухпозиционная ЭПР отражателя, зависящая от его вида, ориентации относительно РЛС и пеленгатора; $S_a(\alpha_n)$ – эффективная приемная площадь антенны пеленгатора, зависящая от направления прихода волны; R_1 и R_2 – расстояния от отражателя до РЛС и пеленгатора, соответственно.

Формула (9) позволяет определить положение на местности объектов с определенной двухпозиционной ЭПР, отражения от которых могут быть приняты, с учетом диаграмм направленности передающей и приемной антенн. Численные расчеты показывают, что в условиях работы станции разведки по сканирующей РЛС они располагаются преимущественно в области РЛС. Полевые эксперименты [2] подтверждают это, что, в частности, следует из рис. 5.

Принятый сигнал можно записать в виде

$$s_{omp}(t) = ks(t - \tau_s) + n(t - \tau_s), \quad (10)$$

где $s_{omp}(t)$ – сигнал, принимаемый от отражающего объекта; $s(t)$ – прямой сигнал РЛС в месте приема; k – коэффициент, зависящий от бистатической ЭПР отражающего объекта, его положения относительно диаграмм направленности антенн приемного и передающего пунктов; $n(t)$ – аддитивная смесь внутренних шумов аппаратуры и отражений от местных предметов, находящихся вне эллипсов равных задержек, в пределах которых расположен индицируемый объект.

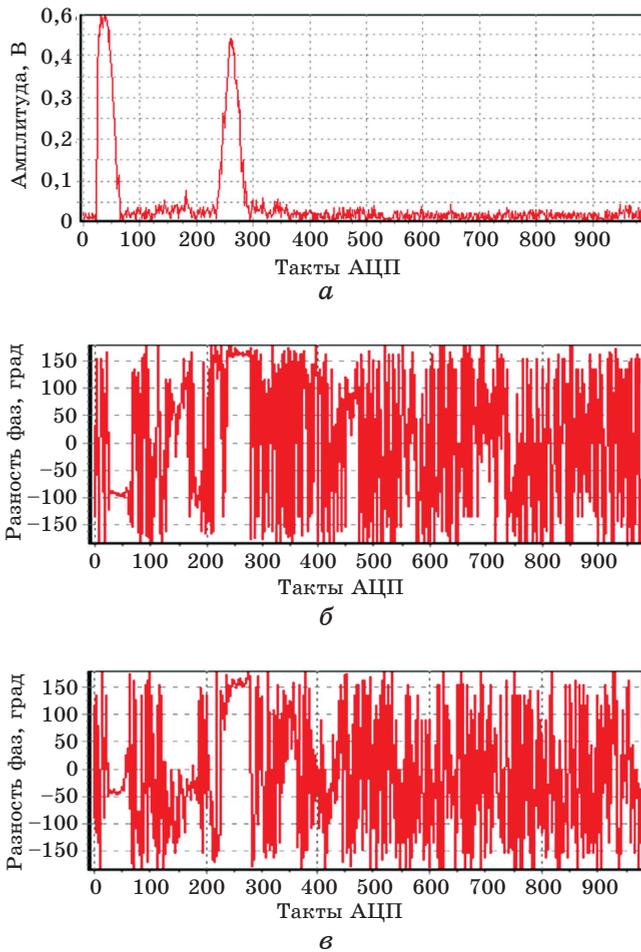


Рис. 6. Пример записи сигналов в окне регистрации: *a* – огибающая сигналов; *б, в* – разности фаз на большой и малой базах пеленгатора

Fig. 6. Example of recording signals in the registration window
a – envelope of signals; *b, c* – phase differences at large and small bases of the direction finder

Поскольку отраженные сигналы по форме соответствуют прямому, измерять задержку между ними можно по любому уровню, где отношение сигнал – шум достаточно велико. Постоянство разности фаз сигналов на базах пеленгатора в течение импульса обеспечивает измерение пеленга на отражающий объект.

В течение длительности импульса могут приниматься сигналы, отраженные не только от индицируемого объекта, но и от других отражателей, находящихся в соответствующей полоске эллипса равных задержек шириной σ_{μ} . Это может привести к искажению фазового фронта принимаемого сигнала (10) и, как

следствие, к погрешностям измерения его пеленга. Индицируемый и помеховый отражатели могут находиться в разных частях эллипса равных задержек, иметь значительный угловой разнос относительно пеленгатора, например, как показано на рис. 3 сплошными линиями. Если переизлучаемые ими волны соизмеримы по амплитуде, результирующий фазовый фронт не будет соответствовать направлению ни на один из них, создавая для измерителя видимость несуществующего объекта. Простейшая модель для оценки количественных характеристик погрешностей – двухточечная радиолокационная цель. Погрешности пеленгования при различных амплитудных и фазовых соотношениях интерферирующих волн рассмотрены в монографии [10], а возможность их раздельного пеленгования (углового разрешения) в монографии [15]. К сожалению, используемый экспериментальный комплекс не позволял разрешать сигналы по углу. Математическая запись суммарного сигнала в приемной антенне в рассматриваемой ситуации по-прежнему подчиняется формуле (10), а модель его формирования соответствует рис. 7 и формуле (12). При этом в точках A и B на рис. 7 расположены точечные отражатели, создающие на приемной антенне сигналы с амплитудами E_1 и E_2 , а в формуле (12) $N = 2$, а l_i – половина отрезка AB с разными знаками для $i = 1, 2$.

2. Множественные отражатели

Как следует из результатов экспериментов, приведенных в монографии [2], большинство отражающих объектов это группы деревьев, опушки леса или кустарников. Ко второму типу отражающих объектов мы отнесем группы деревьев или кустарников с размерами порядка элемента разрешения (в нашем случае $\sigma_{\text{н}}$) или меньше, то есть отображаемые на карте местности в виде точек. Особенностью таких объектов является то, что они состоят из ряда (множества) отдельных отражающих предметов. Принятые от них сигналы являются суперпозицией отражений от отдельных деревьев или их небольших групп («светящихся точек» [13]), находящихся в случайных фазовых соотношениях. В соответствии с терминологией монографии [13] такой объект можно считать распределенной радиолокационной целью. Далее мы будем использовать термин «множественная цель», заимствованный нами из статьи [16]. Интерференция в месте приема отражений от различных «светящихся точек» приводит к флуктуациям амплитуды и фазы регистрируемого сигнала в течение его длительности. В окне регистрации могут одновременно присутствовать сигналы от нескольких отражателей. Примером подобной ситуации может

служить рис. 4. Ранее мы, анализируя рис. 5, предположили, что отражения от лесных массивов по всей их площади связаны с наличием точечных отражателей. Не отвергая такую возможность, отметим, что «множественные отражатели» в этой ситуации более вероятны.

Математически сигнал от «множественного отражателя» можно записать в виде суммы отражений от «светящихся точек»

$$s_{omp}(t) = \sum_{i=1}^N k_i s(t - \tau_i) + n(t), \quad (11)$$

где k_i , τ_i – случайные амплитудные коэффициенты и задержки парциальных сигналов, $N \geq 2$ – количество светящихся точек, формирующих сигнал.

Если зондирующий сигнал РЛС – модулированное гармоническое колебание и амплитуды парциальных сигналов не сильно отличаются друг от друга, то $s_{omp}(t)$ – узкополосный гауссов случайный процесс. Его огибающая подчиняется релеевскому закону распределения вероятностей [3]. Однако среди парциальных сигналов может быть один, значительно превышающий по амплитуде остальные. Такая ситуация не противоречит физическим явлениям на трассе распространения радиоволн, так как в составе множественного отражателя могут быть элементы, для которых выполняются условия зеркального отражения (фацеты, [14]). Возможность описания распределенной цели такой моделью показана в монографии [13]. В этом случае распределение вероятностей огибающей подчиняется обобщенному релеевскому закону (закону Райса).

При зеркальном отражении от плоскости длительность отраженного импульса равна длительности падающего на плоскость. В нашем случае так ведет себя зеркальная составляющая сигнала. Наличие рассеянной составляющей может привести к расширению импульса. Если размеры множественной цели не превосходят элемента пространственного разрешения измерительной аппаратуры, задержки τ_i парциальных сигналов не превосходят длительности зондирующего сигнала пеленгуемой РЛС. Вследствие этого длительность принимаемого импульса не может увеличиться более, чем вдвое. Интерференция волн в месте приема может привести и к сокращению длительности принимаемого импульса, что и показали эксперименты.

Множественные отражатели имеют центр излучения – точку, якобы из которой на приемный пункт приходят сигналы. Эта точка называется «кажущимся» центром излучения [13]. Положение «кажущегося» центра излучения в пределах площади объекта случайно как в поперечном, так и в продольном направлениях.

Подход к определению положения «кажущегося» центра «множественной цели» для однопозиционного локатора разработан в монографии [13]. Применим его к нашему случаю для анализа угловых флуктуаций кажущегося центра множественного отражателя. Следуя [13], представим модель множественного отражателя отрезком прямой AB в горизонтальной плоскости на котором расположены «светящиеся точки». Схематически это изображено на рис. 7.

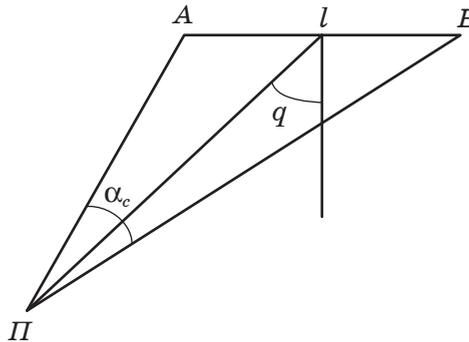


Рис. 7. Схематическое представление простейшего «множественного отражателя»

Fig. 7. Schematic representation of the simplest “multiple reflector”

Пеленг на кажущийся центр излучения из точки расположения пеленгатора Π определяется по фазовому фронту принимаемой суммарной волны. Опуская шумы, и представляя сигналы $s(t)$ в развернутом виде, суммарный сигнал в точке приема (11) запишем в виде [13]

$$s_{omp}(t) = \sum_{i=1}^N E_i \cos\left(\omega t - \frac{\omega}{c} l_i \sin(q) + \delta_i\right), \quad (12)$$

где E_i – случайные амплитуды сигналов, отраженных от «светящихся точек»; l_i – расстояние от i -й светящейся точки до центра отрезка AB ; q – угол под которым наблюдается множественный отражатель (см. рис. 7); δ_i – случайная начальная фаза отражения от i -й «светящейся точки».

Интенсивность отражений в разных точках модели может быть различной. Учтем это с помощью функции плотности интенсивности сигналов «светящихся точек» (8). В простейшем случае, когда множественный отражатель представляется отрезком прямой, можно записать

$$F_r(l_i) \Delta l = \langle u_i^2 \rangle = \langle v_i^2 \rangle, \quad (13)$$

где u_i , v_i – квадратурные составляющие парциальных сигналов из (12), Δl – элемент длины, заменяющий элемент объема из (8).

Фазу суммарного сигнала (12) найдем по формуле

$$\Phi = \arctg \frac{\sum_{i=1}^N E_i \sin\left(\frac{\omega}{c} l_i \sin(q) + \delta_i\right)}{\sum_{i=1}^N E_i \cos\left(\frac{\omega}{c} l_i \sin(q) + \delta_i\right)} = \arctg \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{\sum_{i=1}^N u_i}, \quad (14)$$

где v_i, u_i – квадратурные составляющие парциальных сигналов.

Ошибка пеленгования по отношению к центру объекта находится как производная от фазы Φ (14) по углу q . Обозначив ее символом ε , запишем

$$\varepsilon = \frac{u_H u_B + v_H v_B}{u_H^2 + v_H^2}, \quad (15)$$

где

$$u_H = \sum_1^N E_i \cos \psi_i, \quad (16)$$

$$v_H = \sum_1^N E_i \sin \psi_i, \quad (17)$$

$$u_B = \sum_1^N \frac{y_i}{2L} \cos \psi_i, \quad (18)$$

$$v_B = \sum_1^N \frac{y_i}{2L} \sin \psi_i, \quad (19)$$

а

$$\psi_i = \frac{\omega}{c} l_i \cos(q) + \delta_i -$$

начальные фазы парциальных сигналов; $L = l \cos(q)$ – поперечный размер отражателя из точки наблюдения; $y_i = l_i \cos(q)$ – отклонение i -й светящейся точки от прямой «пеленгатор – центр цели».

Формула (15) для активного однопозиционного локатора получена в монографии [13]. Приведенные выкладки показывают, что она справедлива и в рассматриваемом случае.

Величина ε случайна, так как она зависит от случайных амплитуд и фаз парциальных сигналов, что видно из (9)–(13). В монографии [13] описана плотность распределения ее вероятностей в предположении, что сигналы, излучаемые «светящимися точками», – узкополосные стационарные гауссовы процессы. Плотность распределения вероятностей зависит от соотношения рассеянной и зеркальной составляющих сигнала (если таковая существует) и распределения по отражающему объекту интенсивности «светящихся точек». Это симметричное одномодовое распределение. При равномерном распределении «светящихся точек» по объекту наблюдения мода распределения (одновременно и математическое ожидание) совпадает с положением зеркальной составляющей

щей ($\varepsilon = 0$). При большом отношении зеркальной составляющей к рассеянной распределение узкое, а при увеличении доли рассеянной составляющей оно «расплывается», так что становится значимой вероятность выхода кажущегося центра отражения за пределы отражающего объекта ($|\varepsilon| > 1$). В крайнем случае, когда зеркальная составляющая отсутствует, а рассеиватели равномерно распределены по объекту, вероятность выхода кажущегося центра излучения за его пределы равна 0,134.

Сделанные выводы распространяются не только на отражающие объекты, модель которых представима в виде отрезка прямой с расположенными на ней «светящимися точками», но и на плоские объекты [13].

Перейдем теперь к рассмотрению оценки временного запаздывания отражений относительно прямого сигнала РЛС. Как известно, временное положение прямого сигнала РЛС в условиях переотражений определяется по его переднему фронту, так как все переотражения запаздывают относительно него. Иная ситуация при определении положения сигнала, принятого от множественного отражателя. Его передний фронт обычно затянут и не определяет положение какой-либо конкретной точки в пределах элемента разрешения. Поэтому как временное положение импульса, так и пеленг на отражатель рационально определять в момент максимума огибающей, так как при этом минимизируется шумовая составляющая погрешности измерения.

Подводя итог, отметим, что положение «множественного отражателя», измеренное идеальной аппаратурой, не имеющей погрешностей, может отличаться от истинного более, чем на размеры этого отражателя. Однако вероятность этого события не велика.

3. Отражения зондирующего сигнала РЛС от кромок лесных массивов и кустарников

Кромки лесных массивов (кустарников) можно рассматривать как вертикальную (в общем случае изогнутую) шероховатую поверхность, от которой происходят отражения в горизонтальной плоскости. Подобная модель используется в активной радиолокации для описания отражений радиоволн от неровной (шероховатой) поверхности земли в вертикальной плоскости. Поверхность считается шероховатой, если размеры ее неровностей не удовлетворяют условию Релея [3]:

$$h \leq \frac{\lambda}{16 \sin \varepsilon}, \quad (20)$$

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

Для границ лесных массивов и кустарников в сантиметровом диапазоне волн условие (20) безусловно выполняется.

Подробный анализ вторичного излучения шероховатых поверхностей дан в работе [17], где рассматривается влияние подобных поверхностей на работу активного радиолокатора. В работе теоретические построения сопоставляются с экспериментальными данными, полученными многими исследователями. На основании проведенного анализа утверждается, что вторичное излучение шероховатых поверхностей содержит зеркальный и рассеянный компоненты. Это основополагающее положение использовалось для анализа вторичного излучения множественных целей [13]. Соотношение уровней компонентов зависит от многих факторов: вида поверхности (сельскохозяйственные угодья, холмы поросшие лесом), степени шероховатости поверхности, угла, под которым по отношению к поверхности находятся РЛС и цель и т.д. Уменьшение доли зеркального компонента в общем сигнале ведет к увеличению доли рассеянного (диффузного), и наоборот. Амплитуду зеркального компонента представляют как

$$E_s = E_0 \rho_0 \rho_s,$$

амплитуду рассеянного как

$$E_d = E_0 \rho_0 \rho_d,$$

где E_0 – амплитуда падающей волны; ρ_0 – коэффициент отражения от гладкой поверхности; ρ_s, ρ_d – коэффициенты, показывающие соотношение компонентов.

В работе [17] приводятся количественные соотношения между коэффициентами для неровной земной поверхности. Если высота неровностей рассеивающей поверхности такова, что неравенство (20) переходит в равенство, доля зеркального и диффузного компонентов примерно одинаковы. При меньшей шероховатости можно пользоваться моделью зеркального отражения, полагая коэффициент отражения равным $\rho_0 \rho_s$, а при большей полагать рассеяние чисто диффузным. Очевидно, нельзя применять количественные соотношения, полученные для отражений от земной поверхности, к отражениям от леса в горизонтальной плоскости. В то же время нет оснований отвергать представление принимаемого сигнала в виде суммы двух компонентов, так что возрастание одного приводит к убыванию другого. Кромки лесных массивов могут быть очень разнообразными. Если лесной массив – искусственное насаждение, например, снегозащитная полоса вдоль дороги, его края довольно плотные, и можно ожидать преобладания зеркального компонента. При зеркальном отражении принимаемый сигнал подобен излучаемому РЛС, его модель можно описать формулой (10), а визуальное представление о его огибающей в условиях эксперимента дает рис. 5.

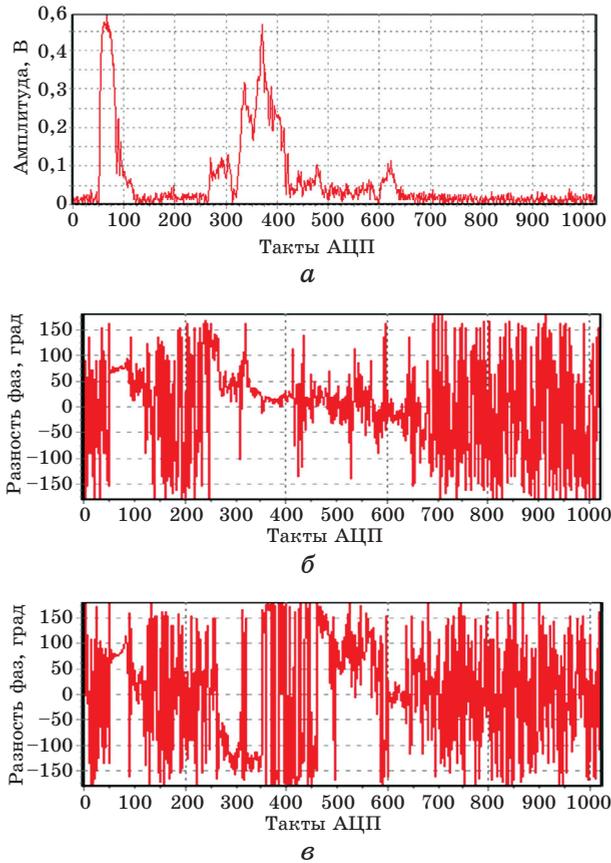


Рис. 8. Пример записи сигналов в окне регистрации: *a* – огибающая сигналов; *b*, *c* – разности фаз на большой и малой базах пеленгатора

Fig. 8. Example of recording signals in the registration window
a – envelope of signals; *b*, *c* – phase differences at large and small bases of the direction finder

Если облучаемая локатором поверхность существенно превышает элемент разрешения измерительной установки ct_u , рассеянные разными элементами поверхности сигналы могут иметь вид отдельных импульсов, например, как на рис. 4, или сливаться в один длинный импульс, как на рис. 8. В последнем случае на фоне относительно слабых отражений могут проявляться более сильные сигналы с длительностью, сравнимой с зондирующим сигналом РЛС. Это говорит о наличии зеркальной составляющей в суммарном принимаемом сигнале или о существовании обособленного множественного отражателя в кромке лесного массива. Подобная ситуация присутствует на рис. 8 при отвороте антенны РЛС от направления на пеленгатор на 125° . На рис. 8 видно, что в максимумах огибающей разности фаз на ма-

лой и большой баззах пеленгатора измеримы, что означает возможность пеленгования отражающих объектов.

На основании изложенного представим сигналы, отраженные от границы лесного массива в виде следующей модели,

$$s(t) = \sum_{i=1}^N k_i s(t - \tau_i) + \sum_{i=N+1}^M k_i s(t - \tau_i) + \sum_{i=M+1}^L k_i s(t - \tau_i) + n(t), \quad (21)$$

где k_i и τ_i – случайные амплитудные коэффициенты и временные задержки парциальных сигналов; N , $M - (N + 1)$, $L - (M + 1)$ – количество парциальных сигналов (отраженных волн на входе приемника), формирующих один принимаемый импульс.

В зависимости от значений перечисленных параметров формула (21) представляет принимаемые сигналы в виде отдельных импульсов, подобных изображенным на рис. 4, либо одного длинного импульса, например, как изображенного на рис. 8. Количество сумм в формуле (21) зависит от вида трассы и априори не предсказуемо.

Очевидно, в рассматриваемой ситуации применим тот же подход к определению статистических характеристик положения «кажущегося центра отражения», что и при рассмотрении «множественных отражателей».

Заключение

Анализ данных радиофизического эксперимента показал, что большинство отражений сигналов сканирующего импульсного локатора от объектов на трассе распространения радиоволн пригодны для реализации предлагаемого однопозиционного метода определения координат ИРИ. Предлагаемый однопозиционный метод местоопределения источников радиоизлучения применим не везде. Он не применим в степной местности, на море, в тайге. Он применим в лесостепной местности, где может быть дополнением к традиционным пеленгационным станциям разведки. В соответствующих условиях координаты источников отражений, вычисленные по измеренным пеленгам на них и задержкам отражений относительно прямого сигнала ИРИ, могут отличаться от действительных в силу множественности отражений. Это следует из результатов полевых экспериментов и описания принимаемых сигналов упрощенными математическими моделями. Если принимаются сигналы от одного «множественного отражателя», вероятность выхода «кажущегося центра отражения» за пределы наблюдаемого объекта невелика. Если же принимаемые сигналы являются суперпозицией отражений от двух объектов, находящихся в разных точках пространства, но одинаково задержанных относительно прямого сигнала РЛС, то в результате измерений может индицироваться не существующий объект.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FEWM-2020-0039.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FEWM-2020-0039.

Список литературы

1. Гельцер А. А., Денисов В. П., Мещеряков А. А. *Устройство для определения местоположения работающей радиолокационной станции*. Патент № RU2457505C2. Оpubл. 27.07.2012, бюлл. № 21.
2. Денисов В. П., Шарыгин Г. С., Крутиков М. В., Лебедев В. Ю., Мещеряков А. А. и др. *Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения*. Томск: Изд. ТУСУР; 2014. 502 с.
3. Казаринов Ю. М. (ред.) *Радиотехнические системы*. М.: Академия; 2008. 592 с.
4. Вентцель Е. С. *Теория вероятностей*. М.: Гос. изд-во физ.-матем. лит.; 1958. 464 с.
5. Ягольников С. В. Разностный метод определения координат летательных аппаратов по сигналам их радиовысотомеров одним бортовым средством разведки. *Радиотехника*, 1997;(5):49–52.
6. Robinson C.F. *Distant transmitter range measurement*. UK Patent Application. No. 2094089. 1982.
7. Holt B. *System and method for determining the location of a transmitter using passive reflectors or refractors as proxy receivers and using database querying*. United States Patent. No. 6580393. 2003.
8. GoogleMaps: геoinформационный ресурс. Режим доступа: <https://www.google.com/maps/> (дата обращения: 03.11.2022).
9. Кобак В. О. *Радиолокационные отражатели*. М.: Советское Радио; 1975. 348 с.
10. Леонов А. И., Фомичев К. Н. *Моноимпульсная радиолокация*. М.: Радио и связь; 1984. 312 с.
11. Морозов В. П. Методика учета рельефа местности при планировании РЭБ на основе ее статистической типизации. В: *Проблемы развития и совершенствования техники РЭБ: материалы всерос. научно-техн. конф.* Воронеж: ЦНИИ МО РФ; 2001. С. 17–25.
12. Новак С. Н. *Исследование взаимодействия электромагнитного взаимодействия с лесным пологом: дисс. канд. физ.-мат. наук*. Томск; 2007. 197 с.
13. Островитянов Р. В., Басалов Ф. А. *Статистическая теория радиолокации протяженных целей*. М.: Радио и связь; 1982. 232 с.
14. Сколник М. И. (ред.) *Справочник по радиолокации*. М.: Техносфера; 2014. Кн. 2, 680 с.
15. Денисов В. П., Дубинин Д. В. *Фазовые радиопеленгаторы*. Томск: ТУСУР; 2002. 251 с.

16. Ильин Е. М., Репников Д. А., Савостьянов В. Ю., Самарин О. Ф., Полубехин А. И., Черевко А. Г. Режимы функционирования многофункциональной бортовой РЛС БЛА малой и средней дальности. *Вестник СибГУТИ*. 2019;(2):68–86. Режим доступа: <https://vestnik.sibsutis.ru/jour/article/view/82>

17. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места. *ТИИЭР*. 1974;62(6):37–61.

References

1. Geltser A. A., Denisov V. P., Mescheryakov A. A. *Device for determining the location of a working radar station*. Patent number RU2457505C2. Published on 27.07.2012, No. 21. (In Russ.)

2. Denisov V. P., Sharygin G. S., Krutikov M. V., Lebedev V. Y., Mescheryakov A. A. et al. *Spatial and temporal distortions of the centimeter radio signals on the ground distribution routes and their influence on the accuracy of the passive positioning systems*. Tomsk: TUSUR; 2014. 502 p. (In Russ.)

3. Kazarinov Yu. M. (ed.) *Radiotechnical systems*. Moscow: Academia; 2008. 592 p. (In Russ.)

4. Venttsel E. S. *Probability Theory*. Moscow: Fizmatlit; 1958. 464 p. (In Russ.)

5. Yagolnikov S. V. Difference method for determining the coordinates of aircraft from the signals of their radio altimeters by one airborne reconnaissance tool. *Radio Engineering*, 1997;(5):49–52. (In Russ.)

6. Robinson C. F. *Distant transmitter range measurement*. UK Patent Application. No. 2094089. 1982.

7. Holt B. *System and method for determining the location of a transmitter using passive reflectors or refractors as proxy receivers and using database querying*. United States Patent. No. 6580393. 2003.

8. GoogleMaps: *geoinformation resource*. (In Russ.) Available at: <https://www.google.com/maps/> (accessed: 03.11.2022).

9. Kobak V. O. *Radiolocation reflectors*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1975. 348 p. (In Russ.)

10. Leonov A. I., Fomichev K. N. *Monopulse radiolocation*. Moscow: Radio i svyaz; 1984. 312 p. (In Russ.)

11. Morozov V. P. Methodology of taking into account terrain relief when planning REB on the basis of its statistical typing. In: *Problems of Developing and Improving REB Techniques: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Voronezh: TsNII of the RF Ministry of Defense; 2001, pp. 17–25. (In Russ.)

12. Novak S. N. *Investigation of interaction of electromagnetic interaction with forest canopy. Dissertation of Candidate of Physical and Mathematical Sciences*. Tomsk; 2007. 197 p. (In Russ.)

13. Ostrovityanov R. V., Basalov F. A. *Statistical theory of radiolocation of extended targets*. Moscow: Radio i svyaz; 1982. 232 p. (In Russ.)

14. Skolnik M. I. (ed.) *Reference Book on Radiolocation*. Moscow: Tekhnosfera; 2014. Book 2, 680 p. (In Russ.)

15. Denisov V. P., Dubinin D. V. *Phase radio direction finders*. Tomsk: TUSUR; 2002. 251 p. (In Russ.)

16. Il'in E. M., Repnikov D. A., Savost'yanov V. Yu., Samarin O. F., Polubekhin A. I., Cherevko A. G. The operation modes of airborne multifunctional radar of short- medium range UAVs. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics*. 2019;(2):68–86. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.sibsutis.ru/jour/article/view/82>

17. Barton D. Radar tracking of targets at small angles of position. *TIIER*. 1974;62(6):37–61. (In Russ.)

Информация об авторах

Денисов Вадим Прокопьевич, доктор технических наук, профессор кафедры РТС Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия.

Крутиков Михаил Владимирович, старший научный сотрудник, НИИ РТС Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация.

Мещеряков Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИИ РТС Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия.

Полянских Петр Андреевич, старший преподаватель кафедры РТС Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия.

Information about the authors

Vadim P. Denisov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk, Russian.

Michail V. Krutikov, Senior Research Scientist, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk, Russia.

Alexander A. Mescheryakov Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Leading Research Scientist, Research Institute of Radio Engineering systems, Tomsk State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk, Russia.

Peter A. Polyanskih, Senior Lecturer, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk, Russia.

Поступила / Received: 10.11.2022

Принята в печать / Accepted: 12.12.2022