

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.1>

УДК: 621.396.96

СПОСОБЫ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ПЕЛЕНГОВ В ДВУХПОЗИЦИОННЫХ УГЛОМЕРНЫХ СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

В. И. Меркулов, Д. А. Миляков, А. С. Пляшечник, В. С. Чернов

**Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега»
121170, Москва, Кутузовский проспект 34**

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2021 г.

Аннотация. Для авиационных угломерных систем радиомониторинга источников радиоизлучения (ИРИ) одной из первостепенных является задача отождествления пеленгов. Особенно сложно решается задача отождествления пеленгов при наличии в зоне наблюдения нескольких ИРИ в случае, когда они располагаются в одной плоскости с пеленгаторами. При этом задача отождествления пеленгов в угломерных двухпозиционных системах решается в процессе выполнения двухэтапной процедуры. На первом этапе первичное отождествление единичных замеров пеленгов производится отдельно на каждой приемной позиции (ПП) при приеме радиосигналов ИРИ, а на втором этапе осуществляется вторичное (межпозиционное) отождествление пеленгов, поступающих от обоих ПП. При первичном отождествлении используются алгоритмы стробового и бесстробового отождествления. При вторичном отождествлении для селекции истинных и ложных точек пересечения пеленгов на плоскости предлагается использовать кинематические параметры относительного ИРИ. Однако данный вид селекции не обеспечивает межпозиционное отождествление при произвольном характере движения ИРИ относительно ПП, а также предполагает неизменное углового положения базы

ПП на плоскости. Более практичными являются способы отождествления пеленгов с ИРИ, в которых используется процедура построения доверительной области (ДО) в виде круга с определенным радиусом. Однако более правильной формой ДО является эллипсообразная ДО, поскольку ошибки определения местоположения ИРИ характеризуются эллипсом ошибок, частным случаем которого является окружность. Поэтому были разработаны способы отождествления координатной информации, в которых используются эллипсообразные ДО. При этом в качестве координатной информации могут использоваться не только пеленги ИРИ, но и другие измеряемые параметры, например, оценки прямоугольных координат ИРИ, вычисляемые на основе триангуляционного метода. Целью статьи является систематизация и анализ разработанных способов отождествления пеленгов, позволяющих получить достаточно общее представление о путях решения проблемы отождествления пеленгов и косвенных измерений координат источников радиоизлучения в авиационных угломерных двухпозиционных системах радиомониторинга. В результате дана классификация способов отождествления. Проанализированы имеющиеся возможности и ограничения использования различных способов отождествления при решении задач радиомониторинга. Приведены необходимые сведения о способах и алгоритмах межпозиционного отождествления координатной информации о положении ИРИ, использующих при решении задачи отождествления эллипсообразные ДО. Практической значимостью представленных способов является повышение вероятности правильного отождествления координатной информации, а также точности местоопределения ИРИ за счет использования эллипсообразных ДО, более точно отражающих закономерность распределения ошибок определения местоположения ИРИ.

Ключевые слова: радиомониторинг, источник радиоизлучения, приемная позиция, пеленг, первичное и вторичное отождествление, доверительная область, координатная информации.

Abstract. For aeronautical goniometric systems for radio monitoring of radio emission sources (RES), one of the primary tasks is the identification of bearings. It is especially difficult to solve the problem of identifying bearings if there are several RESs in the observation area in the case when they are located in the same plane with the direction finders. In this case, the problem of identifying bearings in goniometric two-position systems is solved in the process of performing a two-stage procedure. At the first stage, the primary identification of single measurements of bearings is carried out separately at each receiving position (RP) when receiving radio signals from the RES, and at the second stage, the secondary (inter-positional) identification of bearings arriving from both RPs is carried out. In the initial identification, strobe and strobeless identification algorithms are used. In the secondary identification for selection of true and false points of intersection of bearings on the plane, it is proposed to use the kinematic parameters of the relative RES. However, this type of selection does not provide interposition identification with an arbitrary nature of the movement of the RES relative to the RP, and also assumes a constant angular position of the RP base on the plane. More practical are ways of identifying bearings with RES, in which the procedure for constructing a confidence region (CR) in the form of a circle with a certain radius is used. However, a more correct form of CR is an elliptical CR, since the errors in determining the position of the RES are characterized by an error ellipse, a particular case of which is a circle. Therefore, methods for identifying coordinate information have been developed, in which elliptical CRs are used. In this case, not only the bearings of the RES, but also other measured parameters, for example, estimates of the rectangular coordinates of the RES, calculated on the basis of the triangulation method, can be used as coordinate information. The purpose of the article is to systematize and analyze the developed methods for identifying bearings, which allow one to get a fairly general idea of how to solve the problem of identifying bearings and indirect measurements of the coordinates of radio emission sources in aviation goniometric two-position radio monitoring systems. As a result, a classification of identification methods is given. The existing possibilities and limitations of using various identification methods in solving radio monitoring problems are analyzed. The

necessary information on the methods and algorithms for interpositional identification of coordinate information about the position of the RES, using ellipsoidal CRs in solving the identification problem, is given. The practical significance of the presented methods is to increase the likelihood of correct identification of coordinate information, as well as the accuracy of the positioning of RES due to the use of elliptical CRs, which more accurately reflect the regularity of the distribution of errors in determining the position of RES.

Key words: radio monitoring, radio emission source, receiving position, bearing, primary and secondary identification, confidence region, coordinate information.

Введение.

При решении задач мониторинга источников радиоизлучения (ИРИ) значительная роль отводится авиационным угломерным двухпозиционным системам (УДПС), которые определяют параметры излучаемых радиосигналов, тип и координаты местоположения источников радиоизлучения [1,2]. Основу таких систем составляют пассивные средства радиоэлектронного наблюдения (радиопеленгаторы). При этом координаты местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) определяются по результатам пеленгования, выполняемого приемными позициями УДПС. Именно поэтому для угломерных систем, использующих, как правило, триангуляционный метод измерения координат ИРИ, одной из первостепенных является задача отождествления пеленгов ИРИ, измеренных в различных приемных точках.

Указанная задача установления соответствия между сигналами, принятыми в различных позициях от одного и того же источника, особенно актуальна, когда в секторе обзора угломерных систем пассивной локации имеется большое число ИРИ [1]. В этом случае для решения задачи отождествления возможно привлечение дополнительной информации о радиотехнических параметрах радиосигналов, излучаемых ИРИ.

Вместе с тем необходимо отметить, что в авиационных (воздушных), наземных и корабельных ИРИ могут применяться радиосигналы с

псевдослучайно изменяемыми параметрами (несущая частота, длительность и интервал следования импульсов, параметры модуляции и др.). Это обстоятельство затрудняет, а в ряде случаев исключает возможность использования указанных параметров для идентификации с ними пеленгов, измеряемых авиационными угломерными системами при решении задач радиомониторинга. Таким образом, возникает объективная необходимость использования для отождествления координатной информации, инвариантной к изменению радиотехнических параметров сигналов ИРИ. При этом под координатной информацией понимаются результаты непосредственного (прямого) измерения пеленгов ИРИ и косвенных измерений (замеров) [1,2]. Последние представляют собой первичные оценки относительных и абсолютных координат ИРИ, найденные в результате аналитических расчетов по математическим формулам, связывающим прямоугольные или сферические (полярные) координаты ИРИ с координатами точек пеленгования и угловыми положениями ИРИ относительно этих точек [1,3]. В качестве косвенных замеров могут использоваться и другие величины.

Следует подчеркнуть, что известны различные способы отождествления пеленгов для разных внешних условий и вариантов построения систем радиомониторинг [4-14]. Далее рассматривается ситуация, когда при определении координат ИРИ разности высот полета приемных позиций и ИРИ значительно меньше дальностей до ИРИ. В этом случае углы места приблизительно равны нулю и можно считать, что приемные позиции и ИРИ лежат в одной (горизонтальной) плоскости. При этом задача отождествления пеленгов ИРИ существенно усложняется по сравнению с отождествлением в трехмерном пространстве.

В сложности решения задачи отождествления на плоскости можно убедиться, рассмотрев ситуацию пеленгации двух ИРИ Ц1 и Ц2 из двух приемных позиций С1 и С2, показанную на рис. 1.

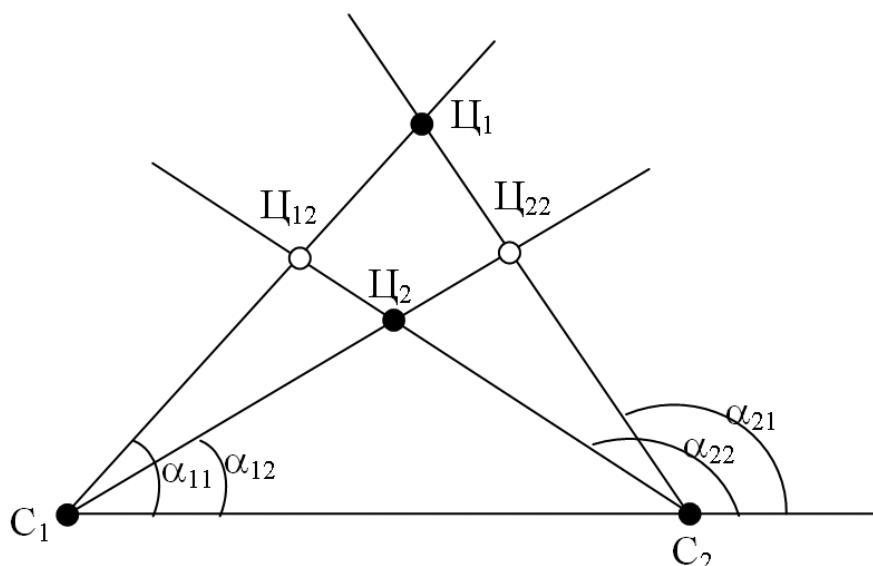


Рис. 1. Геометрия задачи отождествления пеленгов на плоскости.

В первой приемной позиции (ПП) измеряются пеленги α_{11} и α_{12} первого и второго ИРИ, а во второй позиции – соответственно пеленги α_{21} и α_{22} . Если информация о радиотехнических параметрах сигналов ИРИ на приемных позициях отсутствует, то неизвестно, каким ИРИ соответствуют измеренные значения пеленгов. Линии пеленгов пересекаются в четырех точках, из которых две представляют ложные цели. Необходимо распознать эти точки, определив какие из них принадлежат истинным ИРИ, а какие – ложным. Заметим, что в общем случае при наличии M ИРИ возникает M^2 точек пересечения пеленгов, из которых $M^2 - M$ – ложные.

Таким образом, при движении нескольких ИРИ в одной плоскости задача отождествления сводится к задаче селекции истинных и ложных точек пересечения пеленгов.

Как известно [1,2], задача отождествления пеленгов в УДПС решается в процессе выполнения двухэтапной процедуры. На первом этапе первичное отождествление единичных замеров пеленгов производится отдельно на каждой ПП при приеме радиосигналов ИРИ, а на втором этапе осуществляется вторичное (межпозиционное) отождествление пеленгов, поступающих от обеих ПП. Далее дается краткая характеристика способов первичного и вторичного отождествления пеленгов на плоскости.

1. Двухэтапное отождествление пеленгов.

1.1. Первичное отождествление пеленгов.

Необходимость выполнения первого этапа отождествления обусловлена следующим. Как правило, при ведении радиомониторинга окружающего пространства измерение пеленгов разных ИРИ на приемной позиции происходит в моменты времени, зависящие от конкретной текущей ситуации. В то же время обмен данными между ПП в децентрализованных УДПС либо передача данных с ПП в пункт обработки информации и управления в централизованных УДПС выполняется в заданные моменты времени, выделенные для каждой отдельной ПП. Кроме того, в общем случае темп передачи данных не совпадает с периодом обзора окружающего пространства пеленгаторами приемных позиций.

Для упрощения последующей процедуры межпозиционного отождествления целесообразно передавать с каждой ПП не просто неупорядоченный набор результатов измерений пеленгов, а определенным образом структурированную совокупность оценок пеленгов ИРИ, характеризующую по существу угловые траектории ИРИ, сформированные на ПП. Для этого пеленгаторы ПП должны функционировать в режиме постоянного контроля работы ИРИ, находящихся в поле обзора каждого пеленгатора. Данный режим функционирования в [4] называется многообъектным сопровождением (МОС).

Обычно МОС выполняется в несколько этапов, включающих завязку траектории, прогноз состояния, отождествление измерений и коррекцию прогноза по отождествленным измерениям [4]. Спецификой этого режима является необходимость не только измерять параметры радиосигналов, но и выполнять их отождествление на принадлежность конкретному ИРИ.

Под отождествлением (идентификацией) понимается процедура принятия решения о принадлежности поступивших измерений конкретным образцам ИРИ. Наиболее известным способом является стробовое отождествление [5-7]. Суть этого способа в общем случае состоит в проверке попадания принятых в момент

времени t_k измерений x_{nji} , где j – номер ИРИ, i – номер измеренной координаты, в многомерный строб $\Delta x_{ji}(k)$, сформированный относительно результатов экстраполяции $x_{эji}(k)$ предыдущих оценок на момент поступления новых измерений. Если все компоненты измерений x_{nji} попадают внутрь $\Delta x_{ji}(k)$, то принимается решение об их принадлежности j -му ИРИ.

Достоинство стробового отождествления заключается в его простоте. Кроме того, он достаточно универсален и не предъявляет высоких требований к вычислительным ресурсам.

Существенным недостатком идентификации измерений в стробах отождествления является ее низкая достоверность при МОС маневрирующих носителей ИРИ. Это связано с необходимостью использования достаточно больших стробов как по пространственным координатам φ_r и φ_b (бортовым пеленгам в горизонтальной и вертикальной плоскостях), так и по радиотехническим параметрам (несущей частоте, длительности и частоте повторения импульсов, ширине спектра) f_n, t_n, F_{Π} и Δf . Последнее предопределено возможностью практически мгновенного изменения этих параметров в процессе функционирования ИРИ.

Необходимо отметить, что в пеленгаторах, использующих при МОС идентификацию в стробах отождествления, разрешающая способность по измеряемым координатам определяется не чувствительностью измерителей и параметрами антенн, а размерами стробов, что обуславливает ухудшение разрешающей способности.

Кроме того, использование в качестве решающего правила порогового критерия имеет определенные недостатки, по крайней мере, по двум причинам [4]. Одна из них обусловлена сложностью определения оптимального размера строба, адаптирующегося к быстро изменяющимся условиям функционирования. Другая предопределена низкой вероятностью правильного принятия решения вблизи границ стробов, когда даже небольшая погрешность измерений может изменить решение об их соответствии той или иной

траектории на противоположное.

Более совершенными являются алгоритмы бесстробовой идентификации, основанные на формировании решающего правила по минимуму того или иного квадратичного функционала [4], в котором можно учесть и предысторию движения, и вероятность появления тех или иных траекторий, а также важность отдельных слагаемых для процедуры идентификации в целом и т.д. Такой подход позволяет получить высокодостоверное решение, не принимая во внимание абсолютную величину функционала, а лишь определив его минимальное значение в процессе перебора траекторий.

В [4] исследована работоспособность МОС подвижных ИРИ с движущегося носителя пеленгатора с использованием бесстробовой идентификации измерений.

При этом предполагалось, что в контролируемом пространстве имеется J подвижных ИРИ, от каждого из которых на движущейся ПП формируется совокупность измерений x_{nji} . Необходимо сформировать оценки координат x_{ji} состояния и их производных \dot{x}_{ji} с использованием бесстробовой идентификации ИРИ. В работе рассматривался наиболее сложный для отождествления вариант, когда измеряются только бортовые пеленги φ_r, φ_b в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

При решении задачи отождествления предполагалось, что решение об обнаружении ИРИ уже принято и выполняется формирование оценок $\hat{\varphi}_r, \hat{\varphi}_b, \hat{\varphi}_v, \hat{\varphi}_w$ по алгоритму α, β -фильтрации.

Отождествление измерений осуществляется по минимуму наиболее простого варианта квадратичного функционала

$$I_j = \sum_{i=1}^J \frac{(x_{nji}(k) - x_{zji}(k))^2}{D_{ni}},$$

где D_{ni} – дисперсия центрированных ошибок измерений пеленгов, распределенных по гауссовому закону.

Суть бесстробовой процедуры отождествления состоит в следующем. Для

каждой группы измерений, полученных от конкретного ИРИ, вычисляется квадратичный функционал для всех сопровождаемых объектов по их экстраполированным значениям. Затем из всей серии рассчитанных функционалов выбирается наименьший, который и определяет номер идентифицированного ИРИ.

При исследовании эффективности МОС с бесстробовой идентификацией в качестве показателей эффективности использовались текущие ошибки сопровождения по пеленгам и их производным и СКО этих ошибок. При этом рассматривался наиболее сложный вариант движения ИРИ 1 и ИРИ 2 по пересекающимся траекториям.

Целью исследования чувствительности функционалов к приходу измерений от различных ИРИ являлась проверка возможности их достоверной идентификации при движении ИРИ по близкорасположенным и пересекающимся траекториям.

Было установлено, что алгоритм МОС с бесстробовой идентификацией обеспечивает высокую точность сопровождения даже на момент пересечения траекторий без их перепутывания, свойственного для стробовой идентификации [6]. Проведенные исследования способа МОС ИРИ с бесстробовой идентификацией подтвердили его способность сопровождать движущиеся ИРИ с подвижного пеленгатора с высокими показателями точности и достоверности даже на близко расположенных и пересекающихся трассах, что свидетельствует о перспективности данного способа первичного (внутрипозиционного) отождествления.

1.2. Вторичное отождествление пеленгов.

Под вторичным (межпозиционным) отождествлением пеленгов понимается разбиение значений пеленгов, измеренных в различных приемных позициях, на классы – по признаку принадлежности к данному ИРИ. Указанная задача установления соответствия между сигналами, принятыми в различных позициях от одного и того же источника, особенно актуальна, когда в секторе

обзора многопозиционных угломерных систем пассивной локации имеется большое число ИРИ. По сути, ее решением является кластеризация результатов измерений пеленгов, предполагающая совместную обработку пеленгов с разных позиций.

Применительно к радиомониторингу ИРИ, осуществляемому в горизонтальной плоскости, разработаны различные способы отождествления [8-13]. В частности, для селекции истинных и ложных точек пересечения пеленгов на плоскости предлагается использовать кинематические параметры движения (относительного перемещения) ИРИ [9-12]. Однако в настоящее время неизвестны эффективные способы селекции истинных и ложных точек пересечения пеленгов на плоскости с использованием кинематических информационных признаков, обеспечивающих межпозиционное отождествление при произвольном характере движения (относительного перемещения) ИРИ. Разработаны лишь способы селекции применительно к некоторым частным видам относительного перемещения ИРИ, реализуемые при двух моделях движения ИРИ и при условии неизменного углового положения базы ПП. При первой модели все пеленгуемые ИРИ движутся параллельно в одной и той же плоскости с равными по величине и направлению скоростями, а при второй – предполагается движение ИРИ прямолинейным с постоянными продольными ускорениями, которые могут быть неодинаковыми для разных ИРИ. *При первой модели* [9] в качестве кинематического параметра принимают величину кратчайшего расстояния между линией относительной скорости ИРИ и ПП, т.е. минимальное расстояние между ИРИ и приемной позицией, которое было бы, если, начиная с текущего момента времени, движение ИРИ сохранялось прямолинейным и равномерным. *Для второй модели* [10,11] в качестве кинематического параметра берется значение угла между прямой, по которой движется ИРИ, и базой, на которой расположены ПП, поскольку оно инвариантно во времени и может быть найдено по результатам измерений, осуществляемых как в первой, так и во второй позициях. Однако для ИРИ, движущихся параллельно, данный кинематический параметр для

отождествления не подходит в силу его нереализуемости. В таком случае для селекции целесообразно использовать время перемещения ИРИ относительно текущей точки наблюдения до линии базы, вычисляемое (прогнозируемое) в каждой ПП, которое и принимают в качестве кинематического параметра.

К недостаткам рассматриваемого способа отождествления следует отнести также то, что при больших дальностях до ИРИ могут возникать сложности в нахождении оценок второй и третьей производных пеленга, необходимых для расчета кинематических параметров. Отмеченное обстоятельство делает проблематичным реализацию указанных алгоритмов селекции точек пересечения пеленгов и потенциально сужает класс практически важных задач, решаемых для пассивной локации.

Другой способ отождествления пеленгов основан на использовании критерия минимума дисперсии разброса совокупности линий положения (ЛП) относительно пеленга опорной позиции [12]. В качестве опорной точки (позиции) может быть выбрана первая ПП угломерных многопозиционных систем. Алгоритмическая реализация такого способа отождествления достаточно проста, так как в этом случае определяют дальности до точек пересечения ЛП опорной позиции с ЛП, образовавшимися при измерениях в остальных ПП угломерной системы, по критерию минимума расстояния между ЛП, что при ошибках измерений приводит к решению оптимизационной задачи. При использовании данного способа отождествления для устранения ложных пересечений требуется получить избыточную информацию, что обеспечивается применением нескольких (более двух) приемных позиций. В результате отождествление пеленгов осуществляется на основе определения точек пересечения трех и более линий пеленга [8,12], что ограничивает область применения этого способа на практике.

В [12] приведены результаты экспериментальной оценки эффективности рассмотренных выше альтернативных способов межпозиционного отождествления пеленгов, подтвердившие возможность достижения относительно высокой вероятности правильного отождествления в угломерной

многопозиционной системе. В процессе математического моделирования предполагалось, что пеленгуются два ИРИ с помощью трех-, четырех- и шести ПП при способе отождествления по критерию минимума расстояния между ЛП и посредством трех ПП при отождествлении по критерию минимума дисперсии их разброса.

Более практичными являются способы, рассмотренные в [7,13,14]. При реализации этих способов в процессе отождествления решаются задачи обеспечения заданной вероятности правильного отождествления пеленгов и минимизации ошибочных решений о принадлежности пеленгов с использованием принципа совпадения текущих данных координатной информации с доверительной областью (ДО) местонахождения ИРИ. При решении этих задач важная роль отводится рациональному выбору зоны пространства вокруг ИРИ, при попадании в которую полученные пеленги считаются принадлежащими данному ИРИ. При этом в известных способах отождествления предлагается использовать в качестве ДО круг с заданным значением «порогового» радиуса. Однако более достоверной является ДО, форма и геометрические размеры которой ограничиваются эллипсом, а круговая ДО является лишь частным случаем.

Наряду с отождествлением пеленгов в угломерных системах может решаться задача отождествления косвенных измерений прямоугольных координат ИРИ либо дальностей до ИРИ. В этом случае, как правило, применяют алгоритмы стробового отождествления, аналогичные используемым для отождествления измерений в однопозиционной активной радиолокационной системе при построении траекторий нескольких одновременно сопровождаемых объектов и обеспечивающие селекцию отметок, попавших в строб, за счет выбора отметки, вероятность принадлежности которой к сопровождаемой траектории наибольшая. При этом основной задачей, возникающей в процессе селекции траекторий путем стробирования, является выбор формы и размеров стробов на основе детального изучения статистических характеристик отклонения истинных отметок, принадлежащих сопровождаемой траектории, от

соответствующих экстраполированных точек.

Установлено, что оптимальной формой стробов является эллипсообразная. В то же время на практике в качестве строба вместо эллипса используется прямоугольник (параллелепипед вместо эллипсоида в пространстве), охватывающий эллипс ошибок, либо простейший строб, задаваемый размером по дальности и угловым размером по азимуту. Однако площадь таких стробов больше площади эллипса. Это приводит к увеличению вероятности попадания в строб ложных отметок или отметок, принадлежащих другим траекториям, и, следовательно, к ухудшению селективирующей и разрешающей способности процедуры стробирования. Отсюда следует вывод о том, что необходима разработка способов отождествления, в которых селекция отметок осуществляется в эллипсообразных стробах.

В пространстве эллипс ошибок имеет определенные геометрические размеры и угловую (пространственную) ориентацию, в общем случае определяемых векторами \vec{a}_0 и \vec{b}_0 . Модули этих векторов определяют геометрические размеры соответственно $a_0 = |\vec{a}_0|$ и $b_0 = |\vec{b}_0|$ полуосей эллипса, а направления – пространственное (плоскостное) положение относительно точки пересечения пеленгов.

В общем случае размеры полуосей (a_0, b_0), а также их ориентация могут быть вычислены по приведенным в [2,15-17] формулам, отличающимся в зависимости от используемого способа оценивания точности местоположения (МП) ИРИ. При этом были рассмотрены три основных способа оценивания точности МП ИРИ на плоскости:

1) оценивание точности с помощью эллипса, определяемого величиной и ориентацией большей полуоси эллипса ошибок при заданной вероятности нахождения ИРИ внутри эллипса;

2) оценивание точности с помощью среднего квадрата ошибок линий положения ИРИ;

3) оценивание точности с помощью корреляционной матрицы ошибок оценивания прямоугольных координат МП ИРИ.

При выводе формул полагалось, что зависимость между величиной угловой ошибки пеленгации и вероятностью ее появления может быть представлена гауссовским законом.

Отметим, что недостатком применения способов отождествления, использующих ДО, является необходимость априорного знания начальных координат ИРИ.

Ниже рассматриваются процедуры и соответствующие алгоритмы, обеспечивающие практическую реализацию новых способов пространственного отождествления координатной информации с ИРИ для случая эллипсообразной ДО [17].

2. Способы отождествления координатной информации при эллипсообразной ДО.

При разработке способов отождествления координатной информации о местоположении ИРИ с использованием эллипсообразных ДО следует учитывать необходимость осуществления идентификации как неподвижных, так и движущихся ИРИ. В случае подвижного ИРИ положение центра эллипса ошибок в двухпозиционных угломерных системах должно изменяться по мере перемещения ИРИ относительно точек пеленгования. Для этого требуется отслеживать местоположение ИРИ с использованием соответствующих алгоритмов оценивания. Решение этой задачи существенно облегчается при наличии начального целеуказания о координатах ИРИ от других информационных датчиков летательных аппаратов, например, от бортовых РЛС [17]. При отсутствии такой возможности целесообразно осуществлять завязку траектории ИРИ и дальнейшее его сопровождение на основе результатов косвенных измерений координат ИРИ, которые в УДПС можно однозначно определить в случае, если нет ложных точек пересечения пеленгов (рис. 1). Такая ситуация в УДПС возможна в случае, когда из всех наблюдаемых ИРИ только один из них не идентифицируется по радиотехническим параметрам. Это позволит иметь некоторую опорную точку (точку пересечения начальных

опорных пеленгов ИРИ), соответствующую оценке местоположения ИРИ. В результате отслеживания местоположения ИРИ местонахождение центра эллипса ошибок будет определяться прогнозируемыми (экстраполируемыми) на момент отождествления оценками координат ИРИ.

Следует отметить, что угловое отождествление пеленгов целесообразно использовать и в ситуации, когда межпозиционное отождествление ИРИ выполняется на основе идентификации измеренных значений их радиотехнических параметров. Объясняется это тем, что в случае ошибочного параметрического отождествления при оценивании координат ИРИ будет использоваться ложное значение пеленга. Это может привести к формированию ошибочного значения косвенного измерения координат и как, следствие, к нарушению процедуры точного оценивания прямоугольных координат ИРИ либо дальности до него. В подобном случае для минимизации ошибок оценивания координат ИРИ следует воспользоваться процедурой отождествления пеленгов, связанной с применением ДО местоположения ИРИ. При этом дополнительно можно воспользоваться алгоритмом решения задачи отождествления, обеспечивающего минимизацию суммарной вероятности ошибочного отождествления «ложных» пеленгов и пропуска пеленгов «своего» ИРИ, приведенного в [18].

Далее рассматриваются новые способы отождествления пеленгов и косвенных замеров координат МП ИРИ с эллипсообразной ДО.

2.1. Способ отождествления пеленгов при эллипсообразной ДО.

Специфика данного способа обусловлена тем, что границы ДО ограничены эллипсом ошибок, размеры и ориентация которого определяются соотношениями, приведенными в [16,17]. Поэтому при реализации предлагаемого способа отождествления пеленгов, прежде всего, должны быть определены размеры полуосей и угловое положение эллипса с учетом заданной вероятности правильного отождествления, взаимного положения ИРИ и точек пеленгования на плоскости, а также точности пеленгования. Затем необходимо

оценить возможность пересечения на плоскости текущим пеленгом полученного эллипса. Для этого определяют угловое положение касательных CP_1 и CP_2 к эллипсу из точки C местонахождения пеленгатора (рис. 2) и находят численные значения величин, характеризующих пространственное положение текущего пеленга относительно эллипса. Далее на основе результатов вычислений оценивают текущую ситуацию, характеризуемую параметрами пересечения пеленга и ДО, с помощью методики, приведенной в [19]. Геометрия решения задачи отождествления пеленгов с ИРИ иллюстрируется рис. 2.

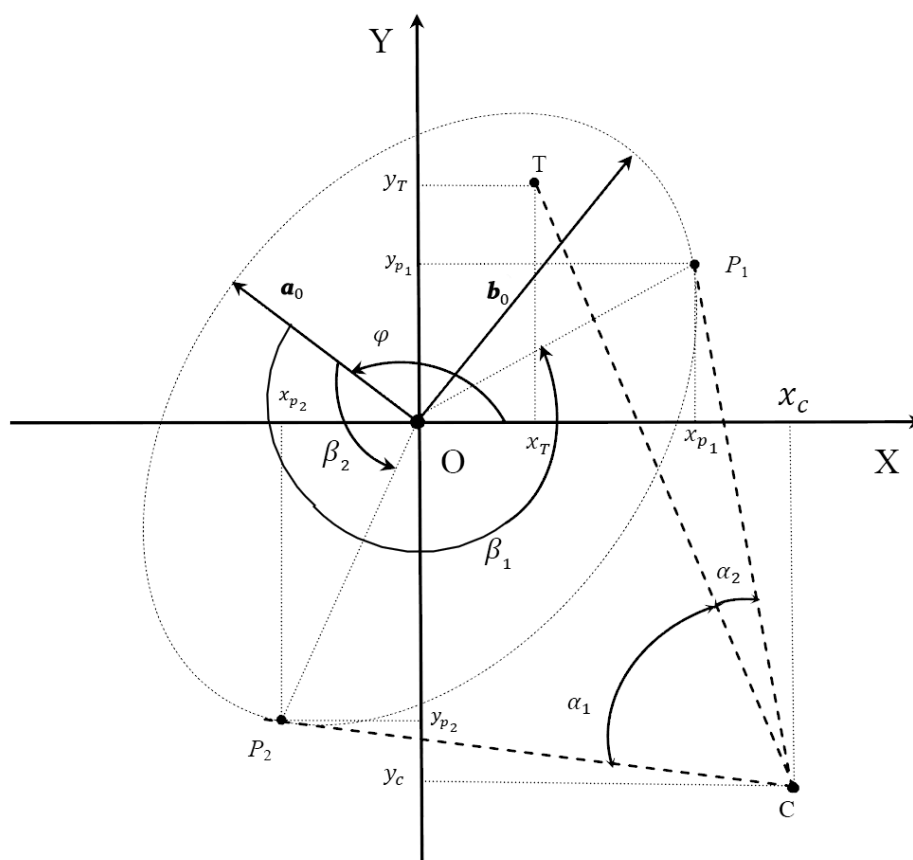


Рис. 2. Геометрия взаимного расположения пеленгатора, ИРИ и эллипсообразной ДО.

Пусть в системе координат с началом в центре эллипса ошибок точка пеленгования C имеет координаты (x_c, y_c) . Угол наклона полуоси a_0 эллипса равен φ . На рис. 2 представлена также точка T , имитирующая текущее местоположение ИРИ и расположенная соответственно на линии пеленга, удаленная от точки C на расстояние, превышающее расстояние между точками C и O на величину не более, чем размер полуоси a_0 эллипса. Необходимо

убедиться в том, что луч из точки С (местоположение пеленгатора) в точку Т с координатами (x_T, y_T) пересекает эллипс, а затем найти углы α_1 и α_2 . Для этого сначала найдем координаты (x_{p1}, y_{p2}) соответственно точек P_1 и P_2 , лежащих на огибающей эллипса, через которые проходят касательные CP_1 и CP_2 к эллипсу из точки С. При этом считаем, что точка С лежит вне эллипса и поэтому существует ровно две таких касательных. Перейдем в систему координат с направлением оси X вдоль полуоси эллипса a_0 . Для этого зададим матрицу поворота $M(\varphi)$, представляемую выражением

$$M(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

Тогда координаты (x_C, y_C) точки С в новой системе координат могут быть представлены в виде

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_C \\ \tilde{y}_C \end{pmatrix} = M(\varphi) \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \end{pmatrix}.$$

Затем решим уравнение, определяющее угловое положение точек касания на эллипсе

$$a_0 \tilde{y}_C \cos \beta + b_0 \tilde{x}_C \sin \beta - a_0 b_0 = 0.$$

Для этого возьмем угол ψ такой, что

$$\sin \psi = \frac{a_0 \tilde{y}_C}{\sqrt{(a_0 \tilde{y}_C)^2 + (b_0 \tilde{x}_C)^2}}; \quad \cos \psi = \frac{b_0 \tilde{x}_C}{\sqrt{(a_0 \tilde{y}_C)^2 + (b_0 \tilde{x}_C)^2}}.$$

Тогда уравнение (17) можно представить в виде

$$\sin(\beta + \psi) = \frac{a_0 b_0}{\sqrt{(a_0 \tilde{y}_C)^2 + (b_0 \tilde{x}_C)^2}}.$$

При этом правая часть этого уравнения меньше единицы, если точка С лежит вне эллипса. Это уравнение имеет два решения для угла β : $\beta = \beta_1$ и $\beta = \beta_2$:

$$\beta_1 = \theta - \psi;$$

$$\beta_2 = \pi - (\theta + \psi),$$

где угол θ равен

$$\theta = \arcsin \left(\frac{a_0 b_0}{\sqrt{(a_0 \tilde{y}_C)^2 + (b_0 \tilde{x}_C)^2}} \right).$$

Углы β_1, β_2 отсчитываются от полуоси \mathbf{a}_0 против часовой стрелки до точек P_1 и P_2 соответственно (рис. 2). Тогда на основании вышеизложенного координаты точки касания P_k на огибающей эллипса в новой системе координат могут быть представлены выражением $(a_0 \cos\beta_k, b_0 \sin\beta_k)$.

Однако так как исходная система координат повернута на угол $-\varphi$ относительно новой системы, то координаты (x_{P_k}, y_{P_k}) точки касания P_k должны быть откорректированы в соответствии с выражением

$$\begin{pmatrix} x_{P_k} \\ y_{P_k} \end{pmatrix} = M(-\varphi) \begin{pmatrix} a_0 \cos\beta_k \\ b_0 \sin\beta_k \end{pmatrix}, \text{ где } k = 1, 2.$$

Определим векторы $\mathbf{r}_1 = \overrightarrow{CP_1}, \mathbf{r}_2 = \overrightarrow{CP_2}, \mathbf{r} = \overrightarrow{CT}, \mathbf{R} = \overrightarrow{CO}$ и зададим следующие операции: операцию векторного произведения двух векторов по формуле $[\mathbf{a}, \mathbf{b}] = a_x b_y - a_y b_x$ и операцию скалярного произведения этих векторов по формуле $[\mathbf{a}, \mathbf{b}] = a_x b_x + a_y b_y$. Из рис. 2 видно, что луч \overrightarrow{CT} пересекает эллипс, если лучи \overrightarrow{CT} и \overrightarrow{CO} лежат по одну (левую) сторону от луча $\overrightarrow{CP_1}$ и по одну (правую) сторону от луча $\overrightarrow{CP_2}$. Векторное произведение выражается через синус угла между векторами и соответственно его знак определяет сторону, на которой лежит один вектор относительно другого. Поэтому, используя операцию векторного произведения, вычислим величины d_1, d_2 , характеризующие совместное положение точек Т и О относительно касательных: $d_1 = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}][\mathbf{r}_1, \mathbf{R}]; d_2 = [\mathbf{r}_2, \mathbf{r}][\mathbf{r}_2, \mathbf{R}]$. Величины d_k ($k = 1, 2$) имеют следующий геометрический смысл. Если $d_k > 0$, то точки Т и О лежат по одну сторону относительно отрезка CP_k , если $d_k < 0$, то по разные стороны. При этом, если оба числа d_1 и d_2 неотрицательны, то луч \overrightarrow{CT} пересекает эллипс, а если хотя бы одно отрицательно, то не пересекает. В случае, если d_1 и d_2 неотрицательны, то углы α_k ($k = 1, 2$) можно найти по формуле

$$\alpha_k = \arccos \frac{(\mathbf{r}_k, \mathbf{r})}{r_k r},$$

где численное значение α_k выбирается в интервале $[0, \pi]$.

Если нет необходимости в вычислении углов и положения касательных, а

нужен лишь факт пересечения эллипса лучом \overrightarrow{CT} , свидетельствующий об относительно простом способе отождествления координат, то координаты точки Т в новой системе могут быть представлены выражением

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_T \\ \tilde{y}_T \end{pmatrix} = M(\varphi) \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix}.$$

На основании вышеизложенного можно записать квадратное уравнение

$$\frac{(\tilde{x}_C + t(\tilde{x}_T - \tilde{x}_C))^2}{a_0^2} + \frac{(\tilde{y}_C + t(\tilde{y}_T - \tilde{y}_C))^2}{b_0^2} = 1,$$

которое имеет решение, свидетельствующее о пересечении эллипса лучом \overrightarrow{CT} , для $t \geq 0$. Здесь переменная t задает координату на прямой \overrightarrow{CT} с началом отсчета в точке С и положительным направлением в сторону точки Т.

2.2. Способ отождествления косвенных замеров с ДО ИРИ.

При определении МП ИРИ с применением триангуляционного метода возможно также применение способов отождествления координатной информации о МП ИРИ, в качестве которой могут использоваться оценки косвенных замеров координат ИРИ на плоскости. Эффективность отождествления по оценкам двух прямоугольных координат ИРИ либо дальности до ИРИ будет выше, чем в случае отождествления по одной координате (пеленгу). Действительно, объекты, расположенные на разных дальностях, но близких пеленгах при линейном (угловом) отождествлении идентифицируются с малой вероятностью, тогда как при использовании информации о прямоугольных координатах на плоскости отождествление может быть более достоверным [7].

При выборе круговой ДО достаточно простой алгоритм отождествления состоит в том, что определяется линейное отклонение текущей отметки МП ИРИ от его экстраполированного значения, которое затем сравнивается с «пороговым» радиусом ДО. Для вычисления значения линейного (радиального) отклонения достаточно знания оценок прямоугольных координат текущего и прогнозируемого положений ИРИ.

Следует отметить, что некоторые варианты отождествления по координатной информации в случае круговой ДО рассмотрены в [7].

В то же время в доступных научных источниках алгоритмов отождествления результатов косвенных измерений, к которым относятся оценки прямоугольных координат ИРИ либо дальностей до ИРИ, при эллипсообразной ДО в явном виде не обнаружено.

Для эллипсообразной ДО алгоритмы отождествления координатной информации о местоположении ИРИ на плоскости могут быть получены на основе решения задачи о попадании отметки косвенного замера во внутрь эллипса ошибок.

Рассмотрим ситуацию, отображаемую на рис. 2. Требуется определить, находится ли точка Т внутри эллипса ошибок, представляемого уравнением [19]

$$k_{xx}x^2 + k_{xy}xy + k_{yy}y^2 = 1, \quad (1)$$

где коэффициенты k_{xx} , k_{xy} , k_{yy} вычисляются по следующим формулам

$$\begin{aligned} k_{xx} &= \cos^2\varphi/a_0^2 + \sin^2\varphi/b_0^2, \\ k_{xy} &= 2\cos\varphi \sin\varphi(1/a_0^2 - 1/b_0^2), \\ k_{yy} &= \cos^2\varphi/b_0^2 + \sin^2\varphi/a_0^2. \end{aligned}$$

Произведя замену в (1) координат (x, y) на координаты точки Т (x_T, y_T) и приравняв к некоторой величине d , получим выражение

$$k_{xx}x_T^2 + k_{xy}x_Ty_T + k_{yy}y_T^2 = d. \quad (2)$$

Если после подстановки исходных данных и произведенных вычислений по (2) полученное численное значение величины d окажется меньше 1, т.е. ($d < 1$), то точка Т с координатами (x_T, y_T) , отображающая косвенные измерения координат текущего местоположения ИРИ, лежит внутри эллипса.

При использовании в качестве косвенных замеров *дальности* до ИРИ можно воспользоваться следующим приемом: сначала измеренное значение пеленга ИРИ и результат косвенного измерения дальности пересчитываются в текущие оценки прямоугольных координат МП ИРИ, а затем выполняются действия по их отождествлению с прогнозируемым положением ИРИ,

аналогичные приведенным выше.

Дальнейший процесс обработки результатов косвенных измерений связан с селекцией истинных и ложных отметок, находящихся внутри строба отождествления. Для этого могут быть использованы известные способы селекции, применяемые в активных радиолокационных системах. Например, известен способ, предусматривающий выбор одной отметки в стробе, вероятность принадлежности которой к сопровождаемой траектории наибольшая, а остальные отбрасываются как ложные. В этом случае, в качестве отметки для продолжения траектории нужно брать ту, эллипсоидальное отклонение которой от центра строба минимально.

Таким образом, разработанные способы отождествления обеспечивают решение задачи отождествления как пеленгов, так и косвенных измерений координат местоположения ИРИ. Реализация таких алгоритмов позволит повысить точность оценивания отслеживаемых координат ИРИ, а также уменьшить вероятность ложного отождествления оценок координат «чужих» ИРИ.

Заключение.

В качестве выводов можно отметить следующее.

1) В угломерных системах радиомониторинга решение задачи оценивания координат и параметров движения ИРИ осуществляется в несколько этапов. Одним из важнейших является этап отождествления результатов измерений. В свою очередь, в УДПС решение задачи отождествления пеленгов предполагает выполнение двухэтапной обработки данных: первичное (однопозиционное) отождествление и вторичное (межпозиционное) отождествление. Для однопозиционного отождествления могут применяться алгоритмы стробового и бесстробового отождествления. Алгоритмы бесстробового отождествления обеспечивают более высокую эффективность.

2) Применительно к радиомониторингу ИРИ, осуществляемому в горизонтальной плоскости, разработаны различные способы межпозиционного

отождествления. В частности, для селекции истинных и ложных точек пересечения пеленгов на плоскости предлагается использовать кинематические параметры движения ИРИ. Однако в настоящее время неизвестны эффективные способы селекции истинных и ложных точек пересечения пеленгов на плоскости с использованием кинематических информационных признаков, обеспечивающие межпозиционное отождествление при произвольном характере движения ИРИ. Разработаны лишь способы селекции применительно к некоторым частным видам движения ИРИ, реализуемые при двух моделях движения ИРИ и при условии неизменного углового положения базы ПП. При первой модели все пеленгуемые ИРИ движутся параллельно в одной и той же плоскости с равными по величине и направлению скоростями, а при второй - предполагается движение ИРИ прямолинейно с постоянными продольными ускорениями, которые могут быть неодинаковыми для разных ИРИ.

3) При решении задачи отождествления координатной информации важная роль отводится выбору формы и размеров ДО. Оптимальной формой для ДО является эллипс ошибок, параметры которого выбираются на основе известных статистических характеристик отклонений истинного местоположения ИРИ от его оценочного значения. Известные способы построения эллипсов ошибок базируются на знании линейных ошибок определения местоположения ИРИ, найденных в результате преобразования линейных смещений измеренных пеленгов относительно истинных, а также на основе корреляционной матрицы ошибок косвенных измерений, либо оценок прямоугольных координат ИРИ. Параметры эллипсов ошибок зависят от ошибок измерения пеленгов, взаимного пространственного положения точек пеленгования и ИРИ, а также от заданной вероятности нахождения ИРИ внутри эллипса.

4) При реализации способа отождествления пеленгов с использованием эллипсообразной ДО прежде всего должны быть вычислены размеры полуосей и угловое положение эллипса с учетом заданной вероятности правильного отождествления, взаимного положения ИРИ и точек пеленгования, а также точности пеленгования. Далее необходимо определить угловое положение

касательных к эллипсу из точки местонахождения пеленгатора и затем проверить выполнение условий пересечения эллипса измеренным пеленгом (азимутом). Более простым вариантом отождествления является определение самого факта пересечения эллипса ошибок текущим пеленгом (азимутом).

5) Эффективность способа отождествления на основе полученных оценок косвенных замеров координат ИРИ будет выше, чем в случае отождествления по одной координате, так как объекты, расположенные на разных дальностях, но близких пеленгах при линейном (угловом) отождествлении идентифицируются с меньшей вероятностью, чем при использовании информации о прямоугольных координатах ИРИ. Для эллипсообразной ДО алгоритмы отождествления координатной информации о местоположении ИРИ на плоскости получают на основе решения задачи о попадании отметки, соответствующей оцененному его положению, внутрь эллипса ошибок.

Финансирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №19-08-00060-а, 19-08-01226-а).

Литература

1. Белик Б.В., Белов С.Г., Верба В.С. и др. *Авиационные системы радиоуправления*. Москва, Радиотехника. 2014. 376 с.
2. Верба В.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. и др. *Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч.3*. Москва, Радиотехника. 2010. 472 с.
3. Чернов В.С., Меркулов В.И., Белик Б.В. Комплексная обработка информации в многопозиционных системах радиомониторинга воздушного базирования. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016. №4. С.3-10.
4. Белик Б.В., Верба В.С., Меркулов В.И. Мониторинг подвижных источников радиоизлучений с бесстробовым отождествлением измерений. *Автоматизация. Современные технологии*. 2017. Т.71. №3. С.129-133.

5. Меркулов В.И., Тетеруков А.Г., Гребенников В.Б. Стробовое отождествление сигналов с источниками радиоизлучения в условиях многоцелевой обстановки. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2014. Т.12. №3. С.35-38.
6. Белик Б.В., Верба В.С., Меркулов В.И. Мониторинг подвижных источников радиоизлучения со стробовым отождествлением измерений. *Автоматизация. Современные технологии*. 2016. Т.70. №6. С.29-32.
7. Мельников Ю.П. *Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности)*. Москва, Радиотехника. 2005. 304 с.
8. Ануфриев О.Н., Дрогалин В.В., Меркулов В.И. и др. Способы отождествления пеленгов в пассивных угломерных двухпозиционных радиолокационных системах. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2004. №2. С.16-29.
9. Катулев А.Н., Тухватулин В.В. Селекция ложных пересечений пеленгов в угломерных системах. *Радиотехника*. 1986. №5. С.16-18.
10. Булычев Ю.Г., Коротун А.А. Применение совокупности инвариантов для решения задачи отождествления пеленгов в угломерных системах. *Радиотехника*. 1988. №4. С.38-43.
11. Булычев Ю.Г., Коротун А.А. Применение кинематических информационных признаков в задаче селекции ложных пересечений пеленгов в двухпунктных угломерных системах. *Радиотехника и электроника*. 1989. Т.34. №1. С.96-105.
12. Охрименко А.Г. Варианты решения задачи отождествления пеленгов в пассивных многопозиционных угломерных системах. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2002. №6. С.12-19.
13. Мельников Ю.П., Попов С.В. *Радиотехническая разведка*. Москва, Радиотехника. 2008. 432 с.
14. Меркулов В.И., Миляков Д.А., Чернов В.С. Способы двухэтапного отождествления пеленгов в многопозиционных системах радиомониторинга воздушного базирования. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2017. №7. С.3-14.

15. Виноградов А.Д., Дмитриев И.С. Статистический подход к задаче местоопределения источников радиоизлучения угломерным методом. *Антенны*. 2014. №5 (204). С.20-41.
16. Дрогалин В.В., Меркулов В.И., Чернов В.С. и др. Способы оценивания точности определения местоположения источников радиоизлучений пассивной угломерной двухпозиционной радиолокационной системой. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2003. №5. С.22-39.
17. Меркулов В.И., Пляшечник А.С., Тетеруков А.Г., Чернов В.С. Новые способы пространственного отождествления координатной информации с источниками радиоизлучения в авиационных угломерных системах радиомониторинга. *Радиотехника*. 2020. Т.84. №9(17). С.5-25. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202009\(17\)-01](https://doi.org/10.18127/j00338486-202009(17)-01)
18. Меркулов В.И., Тетеруков А.Г., Чернов В.С., Гребенников В.Б. Адаптивный способ пространственного отождествления пеленгов с наземными источниками радиоизлучения и его модификация. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2020. Т.74. №6. С.17-34. <https://doi.org/10.18127/j20700784-202006-02>
19. Меркулов В.И., Пляшечник А.С. Способ обхода опасных зон в горизонтальной плоскости. *Автоматика и телемеханика*. 2019. №1. С.153-169. <https://doi.org/10.1134/S0005231019010112>

Для цитирования:

Меркулов В.И., Миляков Д.А., Пляшечник А.С., Чернов В.С. Способы отождествления пеленгов в двухпозиционных угломерных системах радиомониторинга воздушного базирования. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.12.1>