

УДК 621.396.96

С. В. Шишанов

Нижегородский государственный технический
университет им. П. Е. Алексеева

Способ устранения неоднозначности измерения координат в многоцелевой обстановке для многопозиционной сверхширокополосной РЛС¹

Рассмотрен алгоритм однозначного определения координат в многопозиционной радиолокационной системе. Предложен алгоритм расчета размера строка, учитывающего коррелированность первичных измерений. Предложен способ уменьшения вычислительной сложности алгоритма идентификации отметок при вычислении координат аналитическими методами в многоцелевой обстановке.

Многопозиционная система, сверхширокополосные датчики, измерение координат, линии положения, коэффициент корреляции

Сверхширокополосные радиолокационные системы (СШП РЛС) обеспечивают высокую разрешающую способность по дальности и точность измерения координат целей [1], [2]. Это играет определяющую роль при построении систем ближнего действия, в задачи которых входит, например, обнаружение и определение координат объектов (людей) в закрытом помещении [3], [4]. Дополнительные преимущества по разрешающей способности и точности определения координат объектов обеспечиваются применением многопозиционной конфигурации СШП РЛС [1], [5]. В частности, подобная РЛС, обеспечивающая радиолокационный обзор вокруг автомобиля, может применяться для решения задач обеспечения безопасности дорожного движения [6].

В многопозиционных СШП РЛС для формирования совместной зоны обнаружения нескольких разнесенных позиций на расстояниях, сравнимых с расстоянием между позициями, могут применяться слабонаправленные антенны [5], [6]. При использовании короткоимпульсного СШП-сигнала на каждой из позиций такой системы можно измерить только дальность до объекта. Используя измерения дальностей до одного и того же объекта, полученные различными позициями, можно различными способами вычислить его координаты.

Для определения координат цели дальномерным методом необходимо не менее двух прием-

ных позиций, каждая из которых позволяет измерить время задержки отраженного сигнала и оценить дальность до цели [7]. Однако в многоцелевой ситуации дальномерный метод не позволяет однозначно измерить координаты целей [5].

В условиях многоцелевой обстановки для однозначного измерения координат целей необходимо использовать не менее трех позиций многопозиционной РЛС [5], [7] (рис. 1). В качестве первой группы оценок координат целей можно найти точки пересечения линий положения (окружностей), соответствующих крайним приемным позициям 1 и 2. Затем из полученной группы точек следует отобрать те, которые находятся на таких дальностях от фазового центра приемной пози-

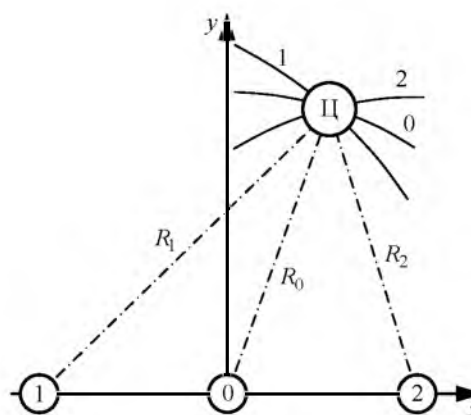


Рис. 1

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-37-20383 мол_а_вед.

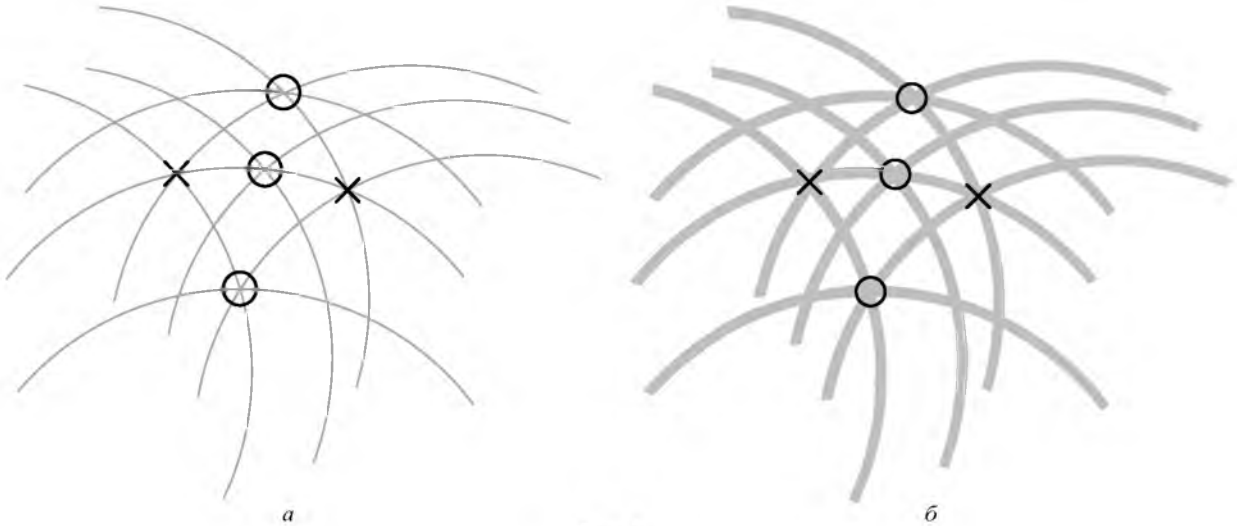


Рис. 2

ции 0, в окрестности которых в центральном приемном канале также обнаружены цели.

Местоположение целей (рис. 2, окружности) определяется по пересечению линий положения (рис. 2, а, кривые). Недостатком описанного метода является то, что в центральном канале в окрестности той же дальности могут быть обнаружены другие объекты, находящиеся в иной азимутальной позиции (рис. 2, а, крестообразные маркеры). При наличии случайных ошибок измерения дальностей вместо линий положения получим области конечной ширины (рис. 2, б, области с заливкой). Увеличение числа целей и среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок измерения координат пересечения этих областей неопределенности приводит к повышению вероятности появления ложных отметок. Среднее число возникающих ложных отметок целей тем больше, чем больше целей в зоне обнаружения и больше СКО ошибок измерения дальности каждой из позиций.

В [5] предложен способ уменьшения вероятности появления ложных отметок, заключающийся в вычислении координат целей двумя различными методами и выборе совпадающих результатов.

При наличии измерений дальностей до цели, полученных в трех разнесенных позициях, координаты цели можно определить пеленгационно-дальномерным, дальномерным-суммарно-дальномерным и разностно-дальномерным методами [6], [7]. Однако при малом по сравнению с дальностью до цели расстоянии между приемными позициями точность определения координат дальномерным, суммарно-дальномерным и разностно-дальномерным методами оказывается неудовлетворительной [6].

При использовании алгоритма объединения векторов, описанного в [5], в качестве первой

группы отметок могут использоваться точки пересечения линий положения, построенных по измерениям дальностей R_1 и R_2 до цели (рис. 1) в крайних приемных позициях системы, а в качестве второй группы – оценки местоположения целей, полученные по измерениям разности дальностей в крайних позициях и дальности R_0 в центральной приемной позиции.

В многоцелевой ситуации каждая группа точек будет содержать как правильные, так и ложные отметки целей. Обозначим две группы отметок векторами:

$$\mathbf{G}_д = \begin{bmatrix} x_{д1} & y_{д1} \\ x_{д2} & y_{д2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{дN_д} & y_{дN_д} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_д \begin{bmatrix} R_{11} & R_{21} \\ R_{12} & R_{22} \\ \vdots & \vdots \\ R_{1N} & R_{2N} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G}_{пд} = \begin{bmatrix} x_{пд1} & y_{пд1} \\ x_{пд2} & y_{пд2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{пдN_{пд}} & y_{пдN_{пд}} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_{пд} \begin{bmatrix} R_{01} & \Delta R_1 \\ R_{02} & \Delta R_2 \\ \vdots & \vdots \\ R_{0N} & \Delta R_L \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{G}_д$, $\mathbf{G}_{пд}$ – векторы отметок, полученных дальномерным и пеленгационно-дальномерным методами соответственно; $x_{д1}, \dots, x_{дN_д}, y_{д1}, \dots, y_{дN_д}$ – координаты цели, вычисленные дальномерным методом; $N_д$ – размер вектора $\mathbf{G}_д$; $x_{пд1}, \dots, x_{пдN_{пд}}, y_{пд1}, \dots, y_{пдN_{пд}}$ – координаты цели, вычисленные пеленгационно-дальномерным методом; $N_{пд}$ – размер вектора $\mathbf{G}_{пд}$; $\mathbf{F}_д$ и $\mathbf{F}_{пд}$ – нелинейные векторные функционалы, реализующие операцию оценки координат целей

дальномерным и пеленгационно-дальномерным методами соответственно; R_{11}, \dots, R_{1N} – оценки дальностей от приемной позиции 1 до целей; R_{21}, \dots, R_{2N} – оценки дальностей от приемной позиции 2 до целей; $\Delta R_1, \dots, \Delta R_L$ – оценки разности дальностей от крайних приемных позиций до целей; N – количество целей; $L = N^2$ – количество возможных сочетаний разностей дальностей от крайних приемных позиций до целей.

В качестве оценок местоположения объектов следует выбирать те элементы векторов \mathbf{G}_d ($\mathbf{G}_{\text{пд}}$), для которых выполняется условие $d_{ij} < R_{ij}$, где d_{ij} – евклидово расстояние между отметками; i, j – номера отметок цели, полученных дальномерным и пеленгационно-дальномерным методами; R_{ij} – размер строка для привязки отметок целей в точках $\mathbf{r}_{di}, \mathbf{r}_{pdj}$. Расстояние определяется как

$$d_{ij} = \sqrt{(x_{di} - x_{pdj})^2 + (y_{di} - y_{pdj})^2},$$

где x_{di}, y_{di} – элементы вектора \mathbf{G}_d с номером i ; x_{pdj}, y_{pdj} – элементы вектора $\mathbf{G}_{\text{пд}}$ с номером j .

Размер строка для привязки отметок R_{ij} зависит от СКО определения координат соответствующими методами и от коэффициента корреляции между измерениями первичных параметров:

$$R_{ij} = k \sqrt{\sigma_{\Delta x}^2 + \sigma_{\Delta y}^2},$$

где k – коэффициент, определяемый допустимыми вероятностями появления ложной отметки и пропуска цели; $\sigma_{\Delta x}, \sigma_{\Delta y}$ – СКО разностей измерений координат, полученные различными методами:

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\sigma_{dx}^2 + \sigma_{\text{пд}x}^2 - \sigma_{dx} \sigma_{\text{пд}x} r_x};$$

$$\sigma_{\Delta y} = \sqrt{\sigma_{dy}^2 + \sigma_{\text{пд}y}^2 - \sigma_{dy} \sigma_{\text{пд}y} r_y},$$

причем σ_{dx}, σ_{dy} – СКО ошибок определения координат x и y дальномерным методом; $\sigma_{\text{пд}x}, \sigma_{\text{пд}y}$ – СКО ошибок определения координат x и y пеленгационно-дальномерным методом; r_x, r_y – выборочные коэффициенты корреляции ошибок измерения координат x и y двумя разными методами.

Для нахождения выборочного коэффициента корреляции между истинными значениями координат для дальномерного и пеленгационно-дальномерного

методов разложим формулы из [6] в ряд Тейлора в окрестности истинного значения координат (x_0, y_0) и ограничимся первым членом разложения:

$$\Delta x_d = (\partial x_d / \partial R_1)(R_1 - R_{10}) + (\partial x_d / \partial R_2)(R_2 - R_{20});$$

$$\Delta y_d = (\partial y_d / \partial R_1)(R_1 - R_{10}) + (\partial y_d / \partial R_2)(R_2 - R_{20});$$

$$\Delta x_{\text{пд}} = (\partial x_{\text{пд}} / \partial R_1)(R_1 - R_{10}) +$$

$$+ (\partial x_{\text{пд}} / \partial R_2)(R_2 - R_{20}) + (\partial x_{\text{пд}} / \partial R_0)(R_0 - R_{00});$$

$$\Delta y_{\text{пд}} = (\partial y_{\text{пд}} / \partial R_1)(R_1 - R_{10}) +$$

$$+ (\partial y_{\text{пд}} / \partial R_2)(R_2 - R_{20}) + (\partial y_{\text{пд}} / \partial R_0)(R_0 - R_{00}),$$

где $\partial x_d / \partial R_1; \partial x_d / \partial R_2; \partial y_d / \partial R_1; \partial y_d / \partial R_2; \partial x_{\text{пд}} / \partial R_1; \partial x_{\text{пд}} / \partial R_2; \partial x_{\text{пд}} / \partial R_0; \partial y_{\text{пд}} / \partial R_1; \partial y_{\text{пд}} / \partial R_2; \partial y_{\text{пд}} / \partial R_0$ – частные производные координат $x_d, y_d, x_{\text{пд}}, y_{\text{пд}}$ по измеряемым расстояниям R_1, R_2, R_0 от цели до приемных позиций 1, 2 и 0 соответственно; R_{10}, R_{20}, R_{00} – истинные значения изменяемых параметров R_1, R_2, R_0 .

В предположении, что случайные ошибки оценивания координат обусловлены ошибками измерения дальностей R_1, R_2, R_0 , смешанные выборочные начальные моменты второго порядка определяются следующим образом:

$$M \{ \Delta x_d, \Delta x_{\text{пд}} \} =$$

$$= M \left\{ \left[\frac{\partial x_d}{\partial R_1} (R_1 - R_{10}) + \frac{\partial x_d}{\partial R_2} (R_2 - R_{20}) \right] \times \right.$$

$$\times \left[\frac{\partial x_{\text{пд}}}{\partial R_1} (R_1 - R_{10}) + \frac{\partial x_{\text{пд}}}{\partial R_2} (R_2 - R_{20}) + \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\partial x_{\text{пд}}}{\partial R_0} (R_0 - R_{00}) \right] \right\};$$

$$M \{ \Delta y_d, \Delta y_{\text{пд}} \} =$$

$$= M \left\{ \left[\frac{\partial y_d}{\partial R_1} (R_1 - R_{10}) + \frac{\partial y_d}{\partial R_2} (R_2 - R_{20}) \right] \times \right.$$

$$\times \left[\frac{\partial y_{\text{пд}}}{\partial R_1} (R_1 - R_{10}) + \frac{\partial y_{\text{пд}}}{\partial R_2} (R_2 - R_{20}) + \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\partial y_{\text{пд}}}{\partial R_0} (R_0 - R_{00}) \right] \right\},$$

где $M \{ \cdot \}$ – оператор выборочного центрального момента.

При раскрытии скобок в (1) образуются слагаемые, в которые множители $(R_1 - R_{10}), (R_2 - R_{20})$ входят в первой и второй степени. Слагаемые, содержащие смешанные произведения этих множителей в первой степени, равны нулю ввиду независимости измерений дально-

стей, полученных разными датчиками. Слагаемые, в которые разности входят во второй степени, определяют дисперсию флуктуационной составляющей ошибки оценивания.

Выборочные коэффициенты корреляции по координатам x и y определяются по формулам

$$r_x = \frac{M\{\Delta x_d, \Delta x_{пд}\}}{\sigma_{x_d} \sigma_{x_{пд}}}, \quad r_y = \frac{M\{\Delta y_d, \Delta y_{пд}\}}{\sigma_{y_d} \sigma_{y_{пд}}}.$$

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов корреляции в зависимости от координаты x при расположении приемопередающих позиций вдоль этой оси. Расстояние по координате y составляет 20 м. Ширина спектра частот сигнала равна 4 ГГц, расстояние между приемными позициями 1 м.

При стремлении значения координаты x к 0 коэффициенты корреляции r_x и r_y также стремятся к 0 (рис. 3). Это объясняется тем, что при $x \rightarrow 0$ производные координат $x_d, y_d, x_{пд}, y_{пд}$ по измеряемым параметрам R_1 и R_2 также стремятся к нулю. В этой позиции координаты цели, оцениваемые пеленгационно-дальномерным методом, полностью определяются измерением дальности из центральной приемной позиции, независимым по отношению к измерениям дальностей из крайних приемных позиций. При отдалении координаты цели от 0 коэффициенты корреляции r_x и r_y стремятся к 1, что объясняется тем, что производные координат $x_d, y_d, x_{пд}, y_{пд}$ по измеряемым параметрам R_1 и R_2 стремятся к одному и тому же значению. В этом случае координаты цели практически полностью определяются измерениями дальностей из крайних приемных позиций.

Таким образом, некоррелированность оценок координат при нахождении цели на траверсе центральной позиции приводит к тому, что СКО разности оценок, полученных дальномерным и пеленгационно-дальномерным методами, в этой области оказывается наибольшим. Следовательно, для сохранения требуемой вероятности правильной привязки отметок целей размер строга здесь необходимо увеличивать.

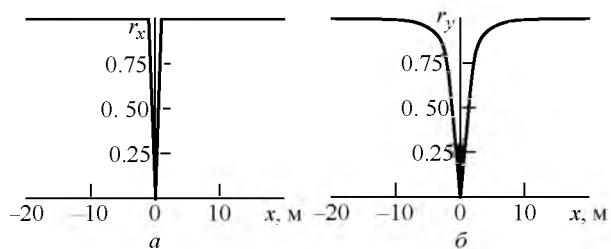


Рис. 3

В рассмотренной конфигурации приемных позиций при нормальном законе распределения ошибок измерения и $k=3$ вероятность пропуска истинной отметки составляет около 0.3 %.

Способ уменьшения размеров анализируемых векторов. С увеличением количества целей резко возрастают размеры векторов \mathbf{G}_d и $\mathbf{G}_{пд}$, поскольку размер \mathbf{G}_d равен N^2 , а размер $\mathbf{G}_{пд}$ составляет $2N^3$ при N целях, обнаруженных в центральной позиции [7].

При вычислении координат дальномерным методом следует учесть, что, если дальность до фиксируемой цели от левой приемной позиции равна R_1 , то дальность до этой же цели от правой приемной позиции будет лежать в области, ограниченной максимально и минимально возможными дальностями R_{max} и R_{min} , которые определяются как длины отрезков от правой приемной позиции до точек пересечения окружности радиуса R_1 с границами зоны обнаружения (рис. 4, а).

При вычислении координат пеленгационно-дальномерным методом следует учесть, что при дальности до цели от центральной приемной позиции R_0 дальности до этой же цели из крайних позиций по этой же причине будут лежать в областях, ограниченных максимально и минимально возможными дальностями $R_{max1}, R_{min1}, R_{max2}$ и R_{min2} , которые определяются как длины отрезков от крайних приемных позиций до точек пересечения окружности радиуса R_0 с границами зоны обнаружения (рис. 4, б).

Таким образом, для уменьшения размеров векторов \mathbf{G}_d и $\mathbf{G}_{пд}$ при оценке координат целей необходимо учитывать только те значения дальностей, которые принадлежат следующим интервалам:

$$R_{min1} < R_1 < R_{max1}; \quad R_{min2} < R_2 < R_{max2}.$$

Для пары измерений, включающей разности дальностей до цели $\Delta R = R_1 - R_2$ и дальность до цели в центральной позиции R_0 , пеленгационно-дальномерный метод даст две оценки координат [6]. При вычислении координат цели можно исключить часть ложных отметок, определив положение цели относительно центральной приемной позиции (рис. 4, б). Если разность дальностей $\Delta R < 0$, то цель располагается в левой полуплоскости (I), если же разность $\Delta R > 0$, то цель находится в правой полуплоскости (II). Таким образом, при

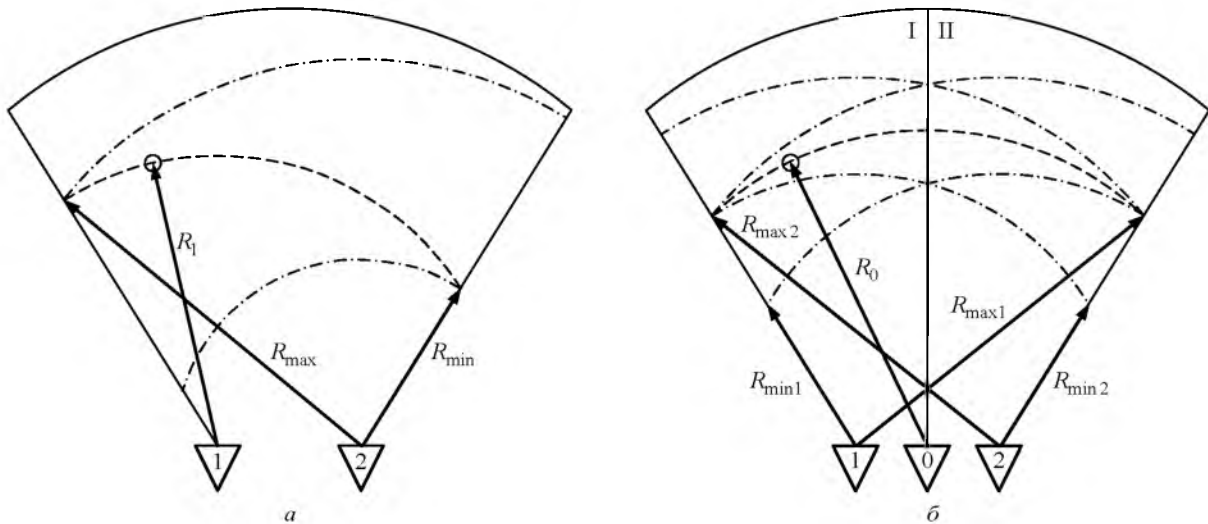


Рис. 4

использовании пеленгационно-дальномерного метода измерения координат размер вектора измерений $\mathbf{G}_{\text{ПД}}$ уменьшается в 2 раза.

В пределе размеры векторов $\mathbf{G}_{\text{д}}$ и $\mathbf{G}_{\text{ПД}}$ уменьшаются до количества обнаруженных целей в центральной приемной позиции N .

Результаты математического моделирования. Предложенный способ уменьшения числа ложных отметок исследован методом математического моделирования. Параметры модели: ширина спектра частот сигнала 4 ГГц, расстояние между приемными позициями $d=1$ м, сектор обзора 120° , максимальная дальность обнаружения 30 м. Результаты усреднялись по 100 реализациям случайного размещения целей в зоне обнаружения.

На рис. 5 приведены графики зависимости размеров $N_{\text{д}}$ и $N_{\text{ПД}}$ векторов $\mathbf{G}_{\text{д}}$ и $\mathbf{G}_{\text{ПД}}$ от числа целей N . Кривые 1 соответствуют исходным размерам векторов, кривые 2 – размерам при приме-

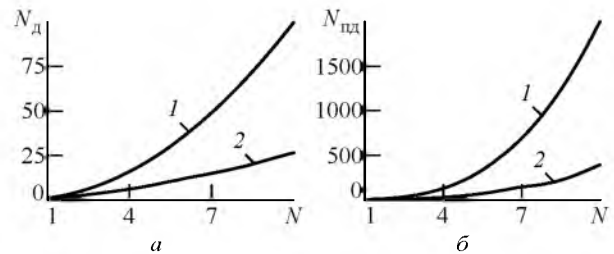


Рис. 5

нении предложенного способа уменьшения числа ложных отметок.

Из представленных результатов следует, что предложенный способ уменьшения размерности объединяемых векторов $\mathbf{G}_{\text{д}}$ и $\mathbf{G}_{\text{ПД}}$ при количестве обнаруженных целей больше 5 обеспечивает существенное сокращение вычислительных затрат при объединении оценок координат, соответствующих этим векторам. При обнаружении более 10 целей размеры векторов $\mathbf{G}_{\text{д}}$ и $\mathbf{G}_{\text{ПД}}$ уменьшаются в среднем в 5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чапурский В. В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 279 с.
2. Иммореев И. Я. Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 1. С. 5–31.
3. Устройства для обнаружения и мониторинга живых движущихся объектов с использованием короткоимпульсных сверхширокополосных измерительных сигналов / А. В. Андриянов, Г. С. Икрамов, М. В. Пугин, А. А. Рябинкин // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. Вып. 1–2. С. 73–82.
4. Андриянов А. В., Мякинков А. В. Обработка сигналов сверхширокополосного радара с антенной решеткой // Радиотехника. 2011. № 6. С. 31–36.
5. Myakinkov A. V., Smirnova D. M. Measurement of Coordinates of the Targets Placed Behind of Radio-Transparent Barrier with Multi-Static Ultra-Wide Band Radar // 5th Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS 2010). Sevastopol, Ukraine, 6–12 Sept. 2010 г. Piscataway: IEEE, 2010. P. 147–149.
6. Шишанов С. В., Мякинков А. В. Система кругового обзора транспортных средств на основе сверхширокополосных датчиков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 2. С. 55–60.
7. Кондратьев В. С., Котов А. Ф., Марков Л. Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В. В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.

S. V. Shishanov
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev

The Technique of Cancellation Ambiguity Coordinates Measurement in the Multi-Target Environment for Ultra-Wideband Radar

The technique of cancellation ambiguity coordinates measurement in the multi-target environment for ultra-wideband radar is proposed. The method for reducing the computational complexity of the algorithm identifying targets in the multi-target environment is proposed.

Multi-Static System, Ultra-Wideband Sensors, Coordinate Measurements, Line Positions, Accuracy Estimations, Correlation Coefficient
Статья поступила в редакцию 15 апреля 2016 г.

УДК 621.396.96

А. В. Кваснов
АО "Заслон" (Санкт-Петербург)

Метод отождествления радиоизлучающих целей пространственно-разнесенными пассивными радиоэлектронными станциями на основе t -критерия Стьюдента

Рассмотрен метод отождествления принимаемых отметок цели пространственно-разнесенными пассивными радиоэлектронными станциями. В качестве математической модели использован t -критерий Стьюдента для проверки статистических гипотез о средних значениях. Проведено имитационное моделирование алгоритма, показавшее его эффективность; рассмотрен пример его реализации.

Отождествление целей, радиоизлучающая цель, идентификация радиоизлучающих целей, пассивные радиоэлектронные станции, пространственно-разнесенные станции

Существующая в настоящее время проблема отождествления источников радиоизлучения (ИРИ), сигналы от которых принимаются двумя и более пространственно-разнесенными пассивными радиоэлектронными станциями (РЭС), крайне актуальна в условиях информационного взаимодействия объектов различного типа и класса [1]. Подобная проблема может существовать для наземных радиоэлектронных комплексов, комплексов морского базирования, а также для воздушных средств освещения обстановки. Принимаемые двумя и более РЭС отметки ИРИ требуют идентификации и отождествления по некоторому алгоритму. Возможны ошибки типа пропуска отметки цели, принятия истинной отметки за ложную, а ложной за истинную.

Рассмотрим описанную проблему на примере двух ИРИ1 и ИРИ2, сигналы от которых поступают на две РЭС1 и РЭС2 (рис. 1). Пространственно-разнесенные РЭС1 и РЭС2 принимают сигналы и обрабатывают формуляры целей ИРИ1

и ИРИ2. РЭС1 принимает сигнал с двух пеленгов ε_{11} и ε_{12} , а РЭС2 – с пеленгов ε_{21} и ε_{22} (первый индекс соответствует номеру РЭС, второй – номеру ИРИ). Без отождествления возможны си-

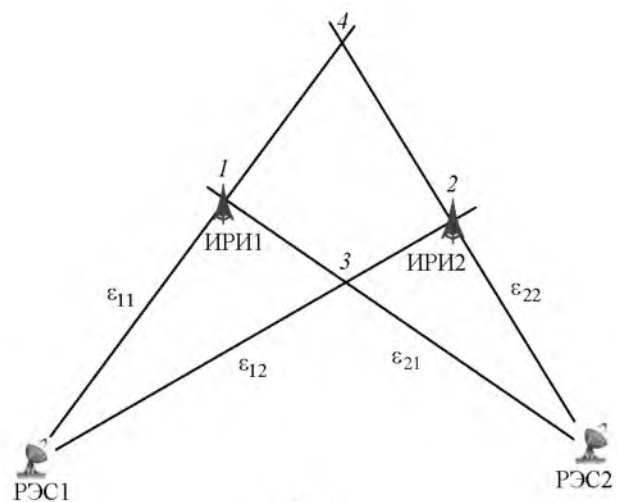


Рис. 1