

УДК 621.396.96

ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ НА ПРИНЦИПАХ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ КООРДИНАТОМЕТРИИ

*В.А. Симаков**

Белгородский государственный университет

Рассмотрены различные варианты построения адаптивных несимметричных систем пассивной радиолокации на принципах разностно-дальномерной координатометрии. Получены соотношения для определения прямоугольных и полярных координат целей. Произведена оценка точностных характеристик измеряемых в разностно-дальномерных системах координат источников радиоизлучения. Проведен анализ рассмотренных конфигураций разностно-дальномерных систем пассивной радиолокации.

Одним из эффективных средств определения координат источников радиоизлучения (ИРИ) являются разностно-дальномерные системы (РДС). Их использование позволяет даже при небольших базах (в несколько километров) в большинстве случаев определять координаты целей с относительно небольшими ошибками не только по дальности, но и по азимуту. При этом величина ошибок измерения при фиксированных размерах баз в основном определяется точностью измерения разностей расстояний R_i на независимых базах, точностью привязки приемных пунктов и их числом [1].

При выборе числа пунктов ограничивающим фактором является конструктивное усложнение РДС. В этой связи возможное число пунктов в ней колеблется в пределах 3-5. При выборе конфигурации РДС учитывается возможный вид обзора: секторный или круговой. В последнем случае целесообразно использовать симметричную конфигурацию РДС относительно центрального (опорного) приемного пункта. Кроме того, в строго симметричной конфигурации РДС более простым оказывается и алгоритм определения координат целей. Последнее объясняется тем, что уравнения для оценки дальности r и азимута β в такой РДС разделяются между собой. Вместе с тем, в реальных условиях размещения РДС на местности строгую симметрию обеспечить не представляется возможным. В этом случае уравнения для оценки дальности и угловых координат оказываются нелинейными, что затрудняет их решение, особенно при числе пунктов приема $n > 3$. Как будет показано ниже, систему нелинейных уравнений в несимметричной РДС можно заменить линейной, если общее число уравнений в такой системе по независимым базам на единицу превышает число неизвестных координат. При этом решение указанных уравнений можно находить применительно как к прямоугольным, так и к полярным координатам. Переход от нелинейной системы уравнений к линейной позволяет относительно просто решать задачи определения координат целей для произвольной конфигурации несимметричной РДС, при неодинаковых базах и их взаимных угловых положениях друг относительно друга. В дальнейшем переход от системы нелинейных к системе линейных уравнений производится применительно к прямоугольным координатам x, y, z , что несколько проще по сравнению с аналогичным переходом применительно к полярным координатам.

* E-mail: sham@bsu.edu.ru

Исходной информацией для вычисления координат целей с помощью РДС при этом являются: оценки разности расстояний R , на независимых базах, а также координаты приемных пунктов x_i, y_i, z_i . Процедуры определения координат цели для типовых симметричных конфигураций РДС рассмотрены в [1, 2]. В связи с этим остановимся лишь на РДС произвольной конфигурации с произвольным числом приемных пунктов (рис. 1).

В качестве исходного для оценки прямоугольных координат в РДС примем соотношение

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = (R_i + r)^2, \quad (1)$$

где

r_i – расстояние между целью и вынесенными приемными пунктами;

$i = 1, (n - 1)$, где n – общее число пунктов, включая опорный;

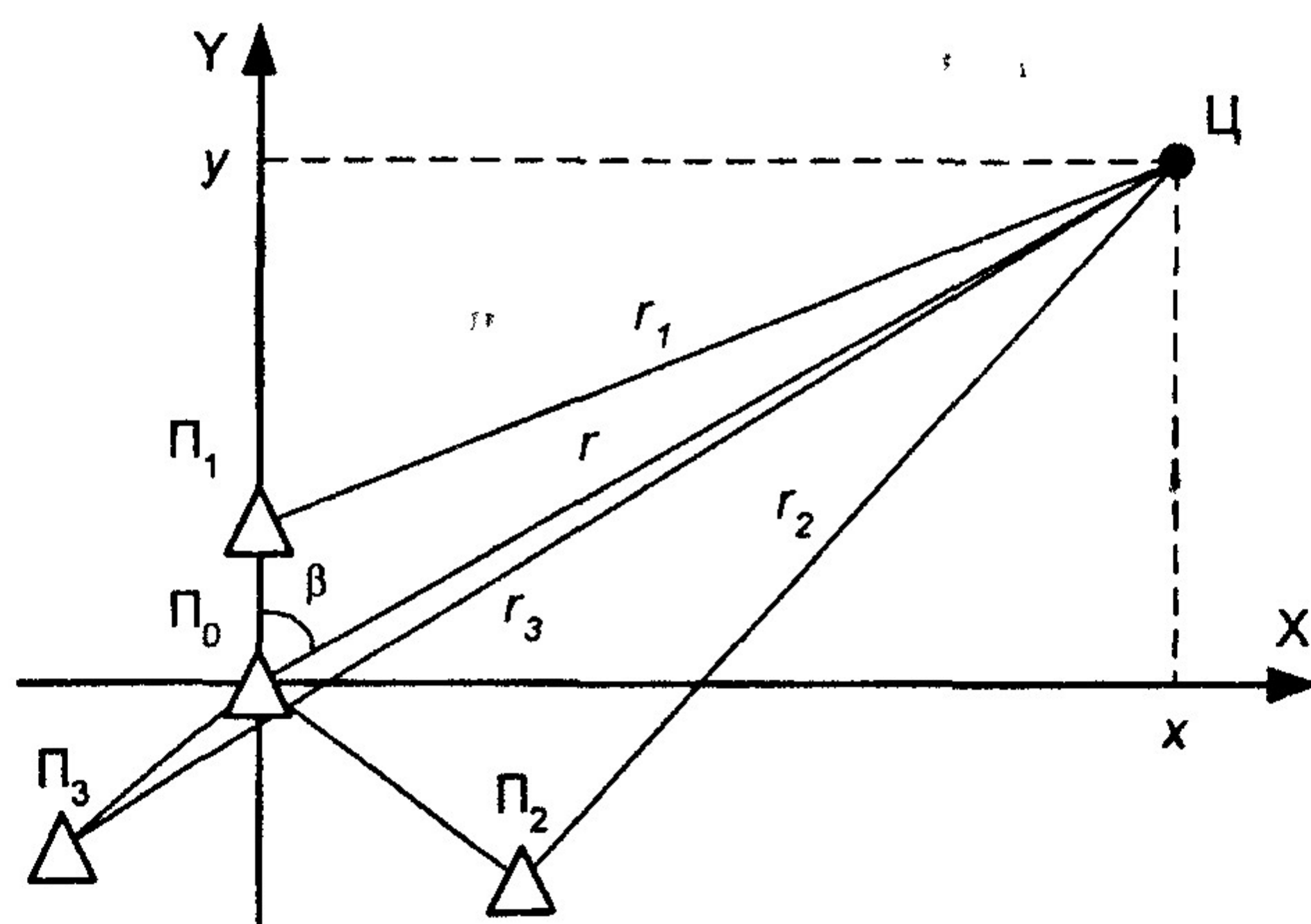
x, y, z – подлежащие оценке координаты цели относительно опорного пункта;

x_i, y_i, z_i – координаты вынесенных приемных пунктов относительно опорного, для которого $x_0 = y_0 = z_0 = 0$;

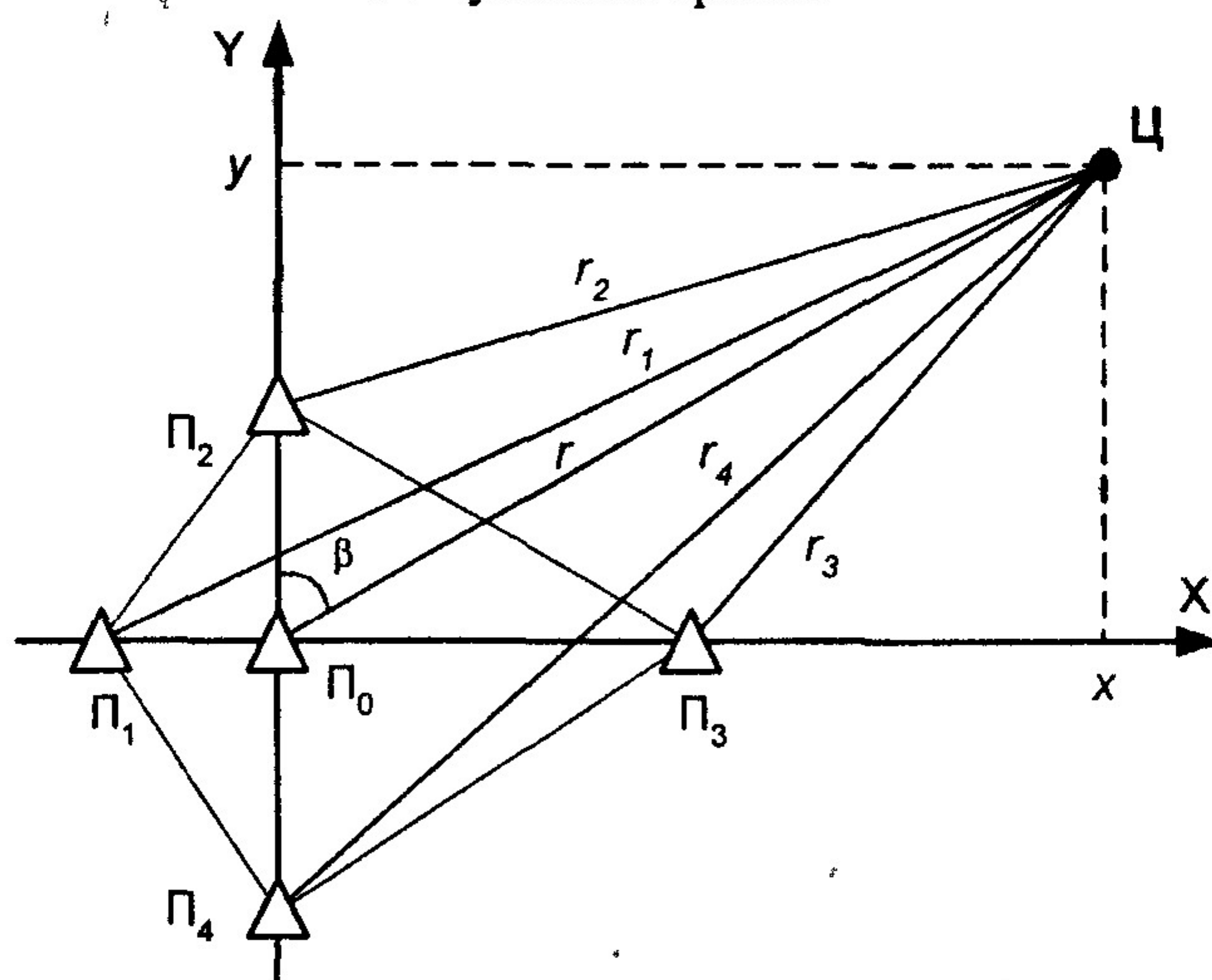
r – наклонная дальность цели относительно опорного пункта

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2};$$

R_i – разности расстояний $R_i = r_i - r$ по независимым базам $i = 1 \dots (n - 1)$.



а) Несимметричная конфигурация РДС с 4 пунктами приема



б) Несимметричная конфигурация РДС с 5 пунктами приема

В результате несложного преобразования систему уравнений (1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 x \cdot x_1 + y \cdot y_1 + z \cdot z_1 + R_1 \cdot r &= 0.5 \cdot a_1, \\
 x \cdot x_2 + y \cdot y_2 + z \cdot z_2 + R_2 \cdot r &= 0.5 \cdot a_2, \\
 \dots\dots\dots \\
 x \cdot x_{n-1} + y \cdot y_{n-1} + z \cdot z_{n-1} + R_{n-1} \cdot r &= 0.5 \cdot a_{n-1},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где $a_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - R_i^2, i = 1 \dots (n-1)$.

В дальнейшем систему уравнений (2) удобно представить в матричной форме:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{P} = 0,5 \cdot \mathbf{a},
 \tag{3}$$

где \mathbf{A} – матрица $(n-1) \times l$, l – число измеряемых координат, в данном случае $l = 4$.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & R_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & R_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n-1} & y_{n-1} & z_{n-1} & R_{n-1} \end{pmatrix};$$

\mathbf{P} – вектор $(l \times 1)$,

$$\mathbf{P} = \|x \ y \ z \ r\|,$$

\mathbf{a} – вектор $(n-1) \times 1$,

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - R_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - R_2^2 \\ \dots\dots\dots \\ x_{n-1}^2 + y_{n-1}^2 + z_{n-1}^2 - R_{n-1}^2 \end{pmatrix}.$$

Определению в матричном уравнении (3) подлежит вектор \mathbf{P} , содержащий в общем (пространственном) случае прямоугольные координаты x, y, z и полярную координату дальности r .

В плоскостном варианте РДС вектор \mathbf{P} включает координаты x, y и r ($l = 3$).

При решении уравнения (2) может оказаться, что число строк матрицы \mathbf{A} больше l , т.е. $(n-1) > l$. При этом матрица \mathbf{A} оказывается прямоугольной, а система уравнений (2) – переопределенной. В этом случае решение (3) целесообразно находить с помощью метода наименьших квадратов.

$$\mathbf{P} = 0,5 \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{a},
 \tag{4}$$

где знак "т" означает транспонирование.

После определения прямоугольных координат x, y, z и полярной координаты дальности r можно определить полярные координаты азимута β и угла места ϵ . При этом азимут цели относительно опорного пункта определяется следующим соотношением:

$$\beta = \arctg\left(\frac{z}{y}\right) + \varphi,
 \tag{5}$$

где $\varphi = (\pi/2) \cdot (2 - \operatorname{sgn} x - \operatorname{sgn} x \cdot \operatorname{sgn} y)$.

В свою очередь, $\operatorname{sgn} x = 1$ при $x > 0$ и $\operatorname{sgn} x = -1$ при $x < 0$ и $\operatorname{sgn} y = 1$ при $y > 0$ и $\operatorname{sgn} y = -1$ при $y < 0$. Значения φ в различных четвертях при отсчете азимута относительно оси Y по часовой стрелке будут следующие:

$$\begin{aligned}x > 0, y > 0, \varphi = 0; \\x > 0, y < 0, \varphi = \pi; \\x < 0, y < 0, \varphi = \pi; \\x < 0, y > 0, \varphi = 2\pi.\end{aligned}$$

Значение угла места ε относительно опорного пункта определяется высотой цели Z и ее наклонной дальностью r с помощью соотношения

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{z}{r}\right). \quad (6)$$

Как следует из анализа уравнений, при оценке l координат минимальное число вынесенных приемных пунктов в РДС должно быть не менее l , т.е. $(n - 1) \geq l$, а общее их число – $n \geq l + 1$. Так, при оценке плоскостных координат ($l = 3$) общее число приемных пунктов в РДС должно быть не менее $n = l + 1 = 4$, а при оценке пространственных координат ($l = 4$) не менее $n = l + 1 = 5$.

В несимметричной РДС типа трехконечной «звезды» при использовании линейных уравнений (2) можно решать плоскостную задачу определения координат x, y, r , а в РДС, близкой по конфигурации к квадрату, пространственную задачу определения координат x, y, z, r .

Вместе с тем, по логике вычислений оценивание координаты дальности по сравнению с координатами x, y, z является избыточным, поскольку $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. В то же время отказ от вычисления r приводит к сложно решаемой нелинейной системе уравнений, в то время как дополнительное вычисление r позволяет нелинейную систему уравнений заменить линейной.

Таким образом, дополнительное измерение параметра r является своеобразной платой за существенное упрощение вычислительной процедуры определения координат в несимметричной РДС. В то же время в симметричной РДС при использовании линейных уравнений (2) дополнительного увеличения числа вынесенных приемных пунктов $n-1$ по сравнению с числом l вычисляемых координат не требуется.

Полученные соотношения позволяют определять плоскостные и пространственные координаты цели при достаточно произвольном размещении приемных пунктов на местности без предъявления к ним жестких требований по их расположению.

Оценку точностных характеристик измеряемых в РДС координат ИРИ произведем в двух системах координат – прямоугольной и полярной. Качество оценок измеряемых координат будем оценивать по величине среднеквадратических ошибок (СКО) определения прямоугольных $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и полярных $\sigma_r, \sigma_\beta, \sigma_\varepsilon$ координат.

Основными источниками ошибок в РДС с фиксированными размерами баз являются ошибки оценивания разностей расстояний между целью и пунктами приема $R_i, i=1...n-1$. При этом как прямоугольные x, y, z , так и полярные r, σ, β координаты связаны с R_i нелинейными зависимостями. Последнее исключает возможность непосредственного вычисления $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и $\sigma_r, \sigma_\beta, \sigma_\varepsilon$ на основе соответствующих оценок σ_{R_i} разностей расстояний. На практике эту трудность обычно преодолевают путем линеаризации указанных зависимостей.

Линеаризация осуществляется достаточно просто для симметричных конфигураций, когда измеряемый параметр, например, дальность r или азимут цели β , выражаются нелинейно непосредственно, через наблюдаемые параметры, в данном случае через разности расстояний R_i .

В случае же несимметричных РДС приходится иметь дело с более сложным случаем, когда вектор наблюдаемых параметров $\mathbf{R} = \{R_i\}, i = 1 \dots n-1$ выражается нелинейно через искомые прямоугольные x, y, z или полярные r, β, ε координаты, образующие векторы состояния цели; $\alpha = \|x y z\|^T$ или $\alpha = \|r \beta \varepsilon\|^T$.

В первом случае систему нелинейных уравнений связи между R_i и α_i можно записать в виде

$$R_i = h^{(i)}(\alpha) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (7)$$

где x, y, z – прямоугольные координаты цели относительно опорного приемного пункта с координатами $x = y = z = 0$;

x_i, y_i, z_i – координаты вынесенных приемных пунктов.

Переход ко второму случаю осуществляется с учетом замены x, y, z очевидными равенствами:

$$x = r_2 \sin \beta, \quad y = r_2 \cos \beta, \quad z = r \sin \varepsilon, \quad r^2 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

где r – наклонная, а r_2 – горизонтальная дальности,

$$r_2 = r \cos \varepsilon.$$

При этом получаем

$$R_i = h^{(i)}(\alpha) = \sqrt{(r \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \beta - x_i)^2 + (r \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta - y_i)^2 + (r \cdot \sin \varepsilon - z_i)^2} - r. \quad (8)$$

Начнем с оценки СКО измерения прямоугольных координат $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ на основе уравнения (7). Представляя последнее в матричном виде $\mathbf{R} = \mathbf{h}(\alpha)$ и разлагая его в многомерный ряд Тейлора в области оценки $\hat{\alpha}$, получим

$$\mathbf{R} = \mathbf{h}(\hat{\alpha}) + \mathbf{H}(\alpha - \hat{\alpha}). \quad (9)$$

Здесь \mathbf{H} – матрица пересчета измерений вектора состояния α в измерения вектора наблюдаемых параметров \mathbf{R} (матрица Якоби):

$$\mathbf{H} = \left\| \frac{\partial h^{(i)}}{\partial \alpha^{(j)}} \right\|, \quad (10)$$

где $i = 1 \dots n-1$ – номер строки, $j = 1 \dots l$ – номер столбца матрицы \mathbf{H} .

В данном случае $l=3$, при этом $\alpha^{(1)} = x, \alpha^{(2)} = y, \alpha^{(3)} = z$.

На основе (9) установим связь между точностными характеристиками векторов \mathbf{R} и α . С этой целью запишем выражение для оценки $\hat{\mathbf{R}}$

$$\mathbf{R} = \mathbf{h}(\alpha) + \mathbf{H}(\hat{\alpha} - \alpha) = \mathbf{h}(\hat{\alpha})$$

и вычтем его из (9). В результате получим

$$\varepsilon_R = \mathbf{H} \cdot \varepsilon_\alpha, \quad (11)$$

где $\varepsilon_R = \mathbf{R} - \hat{\mathbf{R}}$ и $\varepsilon_\alpha = \alpha - \hat{\alpha}$ – текущие ошибки оценивания векторов \mathbf{R} и α . От текущих ошибок перейдем к матрицам ошибок, вычисляя математические ожидания

$$M(\varepsilon_R \varepsilon_R^T) = \mathbf{C}_R^{-1} \quad \text{и} \quad M(\varepsilon_\alpha \varepsilon_\alpha^T) = \mathbf{C}_\alpha^{-1},$$

где \mathbf{C}_R^{-1} и \mathbf{C}_α^{-1} – матрицы ошибок ε_R и ε_α , обратные по отношению к матрицам точности \mathbf{C}_R и \mathbf{C}_α .

В результате на основе (11) получаем матричное уравнение для матрицы ошибок \mathbf{C}_α^{-1} в виде

$$\mathbf{C}_R^{-1} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{C}_\alpha^{-1} \mathbf{H}^T. \quad (12)$$

В общем случае матрица H – прямоугольная. Поэтому определение матрицы ошибок C_α^{-1} по уравнению (12) найдем, умножая его левую и правую части сначала на матрицу точности C_R , а затем на матрицу H . Учитывая при этом, что $C_R C_R^{-1} = I$ есть единичная матрица, сводим (12) к виду

$$H = H(C_\alpha^{-1} H^T C_R H). \quad (13)$$

Из (13) следует, что матрица в круглых скобках должна быть единичной, откуда следует, что матрицы точности C_α и ошибок C_α^{-1} вектора состояния α определяются соотношениями

$$C_\alpha = H^T C_R H \text{ и } C_\alpha^{-1} = C1 = (H^T C_R H)^{-1}. \quad (14)$$

При этом дисперсии ошибок σ_x^2 , σ_y^2 и σ_z^2 соответствуют элементам главной диагонали матрицы ошибок $C_\alpha^{-1} = C1$. Поэтому СКО σ_x , σ_y , σ_z можно определить соотношениями

$$\sigma_x = \sqrt{C1_{11}}, \quad \sigma_y = \sqrt{C1_{22}}, \quad \sigma_z = \sqrt{C1_{33}}, \quad (15)$$

где $C1_{ii}$ ($i = 1 \dots 3$) – элементы главной диагонали матрицы ошибок.

Конкретизируем далее методику расчета элементов матриц H и C_R , на основе которых вычисляется матрица ошибок $C_\alpha^{-1} = C1$. С этой целью на основе (10) запишем элементы матрицы H в виде

$$h_{i1} = \frac{\partial h^{(i)}}{\partial x}, \quad h_{i2} = \frac{\partial h^{(i)}}{\partial y}, \quad h_{i3} = \frac{\partial h^{(i)}}{\partial z}, \quad i = 1 \dots n-1. \quad (16)$$

При этом матрица H имеет размерность $(n-1) \times 3$ и может быть представлена в виде

$$H = \parallel h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3} \parallel, \quad i = 1 \dots n-1. \quad (17)$$

С учетом (15) элементы матрицы H выражаются следующими соотношениями:

$$h_{i1} = \frac{\partial h^{(i)}(\alpha)}{\partial x}, \quad h_{i2} = \frac{\partial h^{(i)}(\alpha)}{\partial y}, \quad h_{i3} = \frac{\partial h^{(i)}(\alpha)}{\partial z}, \quad (18)$$

где

$$h^{(i)}(\alpha) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (19)$$

После взятия производных в (18) окончательно получаем

$$\begin{aligned} h_{i1} &= -\frac{(xR_i + rx_i)}{r_i r}, \\ h_{i2} &= -\frac{(yR_i + ry_i)}{r_i r}, \\ h_{i3} &= -\frac{(zR_i + rz_i)}{r_i r}. \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь x , y , z , r , R_i , r_i – соответствующие оценки прямоугольных координат, наклонной дальности, разности расстояний и расстояний между целью и приемными пунктами в РДС.

Зададимся далее видом матрицы точности C_R , обратной по отношению к матрице ошибок C_R^{-1} вектора наблюдаемых параметров $R = \| R_i \|$, $i = 1 \dots n-1$. Из физических соображений очевидно, что ошибки $R_i - \hat{R}_i$ элементов вектора наблюдаемых параметров R_i , соответствующие различным базам РДС, являются независимыми. Поэтому матрица C_R является диагональной. Имеем

$$C_R = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{R_1}^2} & & & \\ & \frac{1}{\sigma_{R_2}^2} & & \\ & & \dots & \\ & & & \frac{1}{\sigma_{R_{(n-1)}}^2} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где $\sigma_{R_1}^2$, $\sigma_{R_2}^2$, $\sigma_{R_{(n-1)}}^2$ дисперсии ошибок определения элементов вектора наблюдаемых параметров $R = \| R_i \|$, $i = 1 \dots n-1$. В частном случае одинаковых значений дисперсии ошибок $\sigma_{R_i}^2 = \sigma_R^2$ имеем

$$C_R = \frac{I}{\sigma_R^2}. \quad (22)$$

Существенно, что при равноточных измерениях разности расстояний R_i корреляционная матрица ошибок C_α^{-1} оказывается точно пропорциональной дисперсии разности расстояний σ_R^2 . При этом СКО σ_x , σ_y , σ_z будут линейно зависеть от СКО σ_R .

Располагая оценками матриц H и C_R , в соответствии с (14), можно получить оценку матрицы ошибок $C_\alpha^{-1} = C_1$, а также в соответствии с (15) СКО измерений прямоугольных в общем случае пространственных координат цели σ_x , σ_y , σ_z .

В случае решения плоской задачи размерность матриц H и C_R уменьшается на единицу и будет равной $(n-1) \times 2$. В этом случае, в частности, в соответствии с (20) учитываются лишь элементы h_{11} , h_{12} матрицы H .

По рассмотренной выше методике найдем также соответствующие выражения для элементов матрицы H для случая, когда элементами вектора состояния являются полярные координаты, т.е. когда $\alpha = \| r \ \beta \ \varepsilon \|^T$.

В этом случае в соответствии с (8) вместо (18) и (19) получим следующие соотношения:

$$h_{11} = \frac{\partial h^{(i)}(\alpha)}{\partial r}, \quad h_{12} = \frac{\partial h^{(i)}(\alpha)}{\partial \beta}, \quad h_{13} = \frac{\partial h^{(i)}(\alpha)}{\partial \varepsilon}, \quad i = 1 \dots n-1, \quad (23)$$

где

$$h_{(\alpha)}^{(i)} = \sqrt{(r \cos \varepsilon \sin \beta - x_i)^2 + (r \cos \varepsilon \cos \beta - y_i)^2 + (r \sin \varepsilon - z_i)^2} - r. \quad (24)$$

После вычисления производных в (23) с учетом (24) соответственно получаем

$$\begin{aligned}
 h_{i1} &= \frac{[r - (x_i \sin \beta + y_i \cos \beta) \cos \varepsilon - z_i \sin \varepsilon]}{r_i} - 1, \\
 h_{i2} &= \frac{[y_i x - x_i y]}{r_i}, \\
 h_{i3} &= \frac{[z(x_i \sin \beta + y_i \cos \beta) - z_i r \cos \varepsilon]}{r_i}.
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Полученные соотношения (20) и (25), необходимые для оценки СКО σ_x , σ_y , σ_z и σ_r , σ_β , σ_ε , имеют достаточно универсальный характер. Путем элементарной коррекции их можно использовать для РДС с различной конфигурацией. Для этого необходимо знать число приемных пунктов в РДС и их координаты, а также оценки разности расстояний и координат цели. Так, например, в случае определения СКО измерения плоскостных координат x , y в РДС типа трехконечной звезды на основе (20) и (25) получаем соответственно следующие две пары соотношений:

для вектора состояния цели $\alpha = \|x \ y\|^T$

$$h_{i1} = -\frac{|xR_i + rx_i|}{r_i r},$$

$$h_{i2} = -\frac{|yR_i + ry_i|}{r_i r};$$

для вектора состояния $\alpha = \|r \ \beta\|$

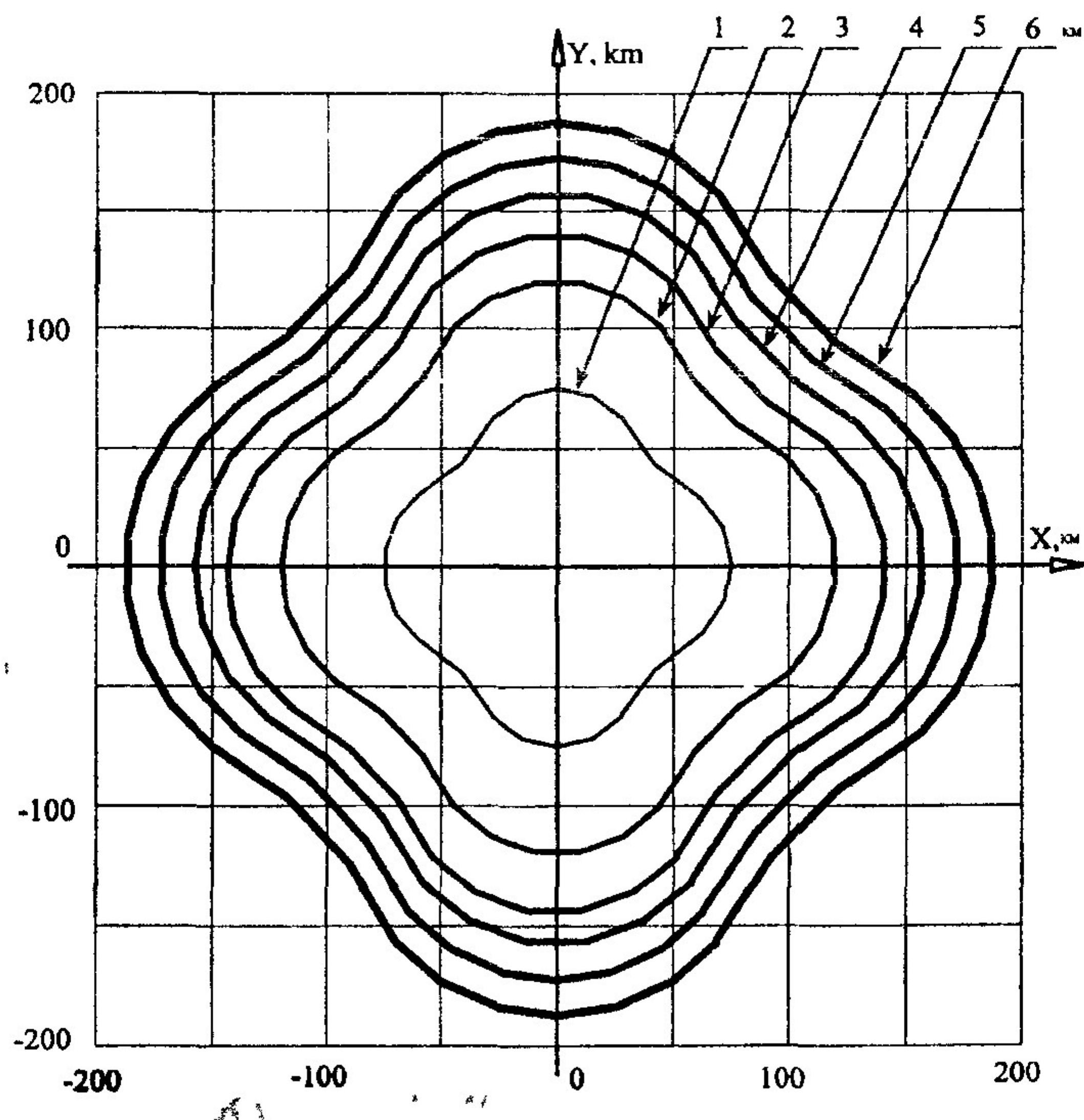
$$h_{i1} = \frac{[r - (x_i \sin \beta + y_i \cos \beta)]}{r_i} - 1,$$

$$h_{i2} = \frac{[y_i x - x_i y]}{r_i}.$$

Наиболее обобщенной характеристикой РДС является семейство изолиний СКО измерения дальности σ_r в координатах x , y . График семейства изолиний для случая СКО измерения разности расстояний в РДС $\sigma_R = 3$ м иллюстрируется на рис.2. Центральная точка графика соответствует координатам опорного приемного пункта $x = y = 0$. Каждая последующая изолиния, начиная от центра, ограничивает область, где ошибка не превосходит N километров, где, в свою очередь, N – порядковый номер изолинии. Так, например, первая изолиния ограничивает область, где $\sigma_r \leq 1$ км, второй изолинии соответствует СКО $\sigma_r \leq 2$ км и т.д. Задавая таким образом допустимое значение СКО σ_r доп, можно определить область дальностей, в пределах которой значение СКО будет равно $\sigma_r \leq \sigma_r$ доп.

Как следует из рис.2, изолинии по форме приближаются к окружности с радиусом R . Если, например, задать σ_r доп = 3 км, то с учетом масштаба рис.2 область, в пределах которой будет выполняться неравенство $\sigma_r \leq 3$ км, имеет примерный радиус $R = 116$ км. При увеличении СКО σ_R области с тем же значением σ_r пропорционально уменьшаются.

По скорости изменения расстояний между изолиниями можно также выявить азимутальные направления, где ошибки по мере удаления от центра растут более медленно или более быстро. Так, для РДС в виде трехконечной звезды ошибки на азимутах 0° , 60° , 120° , 180° и 240° растут более медленно, а на азимутах 30° , 90° , 150° , 210° и 270° – более быстро, чем на других азимутах. Первая последовательность азимутов в этом смысле соответствует благоприятным направлениям, вторая – неблагоприятным. Очевидно, что данные о точностных характеристиках РДС по указанным направлениям позволяют достаточно полно судить о возможностях данной системы.



Р и с . 2 График семейства изолиний для случая СКО измерения разности расстояний в РДС $\sigma_R = 3$ м

Проведенное исследование РДС с различными конфигурациями показало, что точностные характеристики РДС с конфигурацией в виде квадрата несколько лучше, чем с конфигурацией в виде трехконечной звезды. Так, например, радиус области с допустимым значением $\sigma_{r \text{ доп}} = 3$ км при $\sigma_R = 3$ м для конфигурации в виде квадрата составляет $R = 138$ км, в то время как для «трехконечной звезды» – $R = 116$ км. Изменяются также направления благоприятных и неблагоприятных азимутов. Благоприятные и неблагоприятные угловые направления в данном случае соответствуют азимутам 0° , 90° , 180° , 270° и 45° , 135° , 225° , 315° .

ЛИТЕРАТУРА

1. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. М.: Радио и связь, 1993.
2. Вакин, С.А. Радиопротиводействие и радиотехническая разведка / С.А. Вакин, Л.Н. Шустов. М.: Сов. радио, 1968.

ADAPTIVE PASSIVE LOCATION SYSTEMS BASED ON TDOA (TIME-DIFFERENCE-OF-ARRIVAL) MEASUREMENT PRINCIPLES

V.A. Simakov

Belgorod State University

Different design variants of adaptive non-symmetrical TDOA systems are considered. Correlations for Cartesian and polar coordinates determination are obtained. Accuracy estimation of parameters measured in TDOA systems is performed. Analysis of different TDOA system configurations is carried out.