

УДК 621.396.96.1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НОСИТЕЛЯ
ОБЗОРНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ
ДВУХПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ
РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ РАЗНОСТНО-
УГЛОМЕРНО-ДАЛЬНОМЕРНО-ДОПЛЕРОВСКИМ
СПОСОБОМ**

Р. В. Антипенский, А. А. Волков, В. П. Лихачев

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Поступила в редакцию 10.05.2025 г.

Аннотация. Разработан способ определения координат носителя обзорной радиолокационной станции (РЛС) двухпозиционной системой радиотехнической разведки (РТР), основанный на совместном использовании угломерного, разностно-угломерного, разностно-дальномерного и разностно-доплеровского способов построения линий положения (ЛП). Установлено, что разностно-доплеровская ЛП представляет собой линию, близкую к окружности. Получено выражение радиуса этой окружности. Определены сочетания ЛП, позволяющих получить повышенную точность измерения координат. Получены аналитические выражения для определения координат носителя РЛС. Обоснованы операции разработанного способа.

Ключевые слова: радиолокационная станция, радиотехническая разведка, приемный пункт, линия положения, средняя квадратичная ошибка.

**DETERMINING THE LOCATION OF A SURVEILLANCE
RADAR CARRIER USING A TWO-POSITION RADIO
ENGINEERING INTELLIGENCE SYSTEM USING THE
DIFFERENCE-GONIOMETER-RANGEFINDER-DOPPLER
METHOD**

R. V. Antipensky, A. A. Volkov, V. P. Likhachev

Abstract. A method has been developed for determining the coordinates of a carrier of a surveillance radar station by a two-position radio engineering intelligence system, based on the combined use of goniometric, difference-goniometric, difference-rangefinding and difference-Doppler methods of constructing position lines. It has been established that the difference-Doppler position line is a line close to a circle. An expression for the radius of this circle has been obtained. Combinations of position lines have been determined that allow for increased accuracy of coordinate measurement. Analytical expressions have been obtained for determining the coordinates of the carrier of the radar station. The operations of the developed method have been substantiated.

Keywords: radar station, radio engineering intelligence, receiving point, position line, average square error.

ВВЕДЕНИЕ

Современные активные радиолокационные системы определения координат носителей источников излучения, как правило, обеспечивают требуемую точность, но имеют низкие показатели скрытности и ограниченные возможности в защите от помех. В этой связи перспективным представляется совершенствование систем пассивной радиолокации, позволяющих обеспечить требования к скрытности и помехозащищенности.

В системах РТР, использующих методы пассивной радиолокации, для решения задачи определения координат носителей источников излучения необходимо наличие не менее трех приемных пунктов (ПП), разнесенных в пространстве на известное расстояние [1]. Однако для практического использования наиболее удобны и просто реализуемы двухпозиционные системы РТР. Снижение точности таких систем, обусловленное уменьшением количества ПП, может быть компенсировано созданием избыточности измерений при сочетании известных способов построения ЛП носителя источника излучения [2]. Такой подход применялся в [3] при разработке алгоритма определения местоположения носителя обзорной РЛС, основанного на угломерном, разностно-угломерном и разностно-дальномерном способах построения ЛП. При этом в [3] не использовался разностно-доплеровский способ построения ЛП, являющийся модификацией доплеровского способа, и применяющийся в случае, когда частотные характеристики сигнала, излучаемого объектом, неизвестны [4]. Сочетание указанного способа с используемыми способами в [3] позволит повысить точность определения местоположения носителя обзорной радиолокационной станции двухпозиционной системой РТР.

Цель работы – обоснование операций совместного использования угломерного, разностно-угломерного, разностно-дальномерного и разностно-доплеровского способов построения ЛП для определения координат носителя обзорной РЛС двухпозиционной системой РТР.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ЛИНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ НОСИТЕЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Далее будем считать, что в состав пассивной системы РТР входят два синхронизированных во времени ПП, один из которых имеет антенну с широкой диаграммой направленности, а второй – антенну с узкой диаграммой направленности. В обоих пунктах осуществляется фиксация моментов прихода импульсов и максимумов огибающих импульсных последовательностей в пределах длительности принимаемых сигналов разведываемой РЛС, а также их несущих частот. При этом во втором ПП, кроме измерения указанных параметров, осуществляется фиксация пеленга сигналов разведываемой РЛС. Вместе с этим положим, что носитель РЛС движется в районе нормали к приемной базе системы РТР.

Также будем считать, что шумы в приемно-измерительных трактах ПП независимы, а прием сигналов ведется в условиях прямой видимости при отсутствии неоднородностей в нижних слоях атмосферы. Такие допущения позволяют считать ошибки измерения параметров ЛП независимыми.

Рассмотрим плоскость, проходящую через ПП и носитель обзорной РЛС. В этой плоскости выберем систему отсчета координат таким образом, чтобы ее начало было совмещено с серединой базы между ПП, ось абсцисс была продолжением базы, а ось ординат была направлена перпендикулярно базе. Схема взаимного расположения ПП, носителя РЛС и выбранной системы отсчета показана на рисунке 1. На этой схеме обозначено: X , Y – оси декартовой системы координат; ПП1 – первый ПП, имеющий антенну с широкой диаграммой направленности; ПП2 – второй ПП, имеющий антенну с узкой диаграммой направленности; D – расстояние между ПП; \mathbf{r} , \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 – радиусы-векторы, указывающие положение носителя РЛС относительно начала системы отсчета координат, первого и второго ПП соответственно; ρ_1 и

ρ_2 – радиусы-векторы, указывающие положение первого и второго ПП относительно начала системы отсчета координат, соответственно; \mathbf{v} – вектор скорости носителя РЛС относительно начала системы отсчета координат; \mathbf{v}_1 и \mathbf{v}_2 – векторы радиальных скоростей носителя РЛС относительно первого и второго ПП соответственно; θ – угол между вектором \mathbf{r}_2 и осью ординат; γ – угол, под которым видна приемная база из точки расположения носителя РЛС.

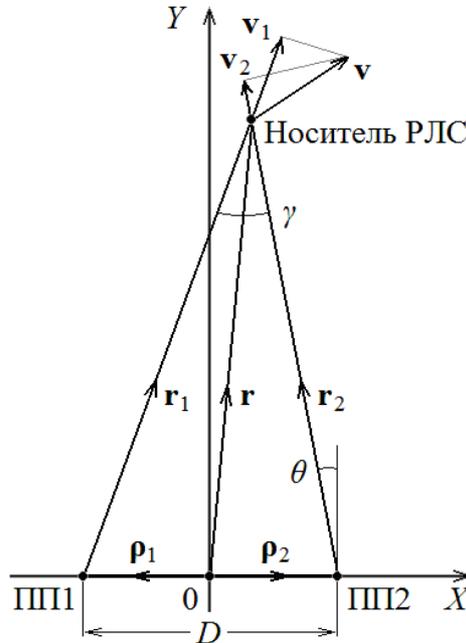


Рис. 1. Геометрия задачи.

В рамках угломерного способа на втором ПП определяется угол θ , который задает ЛП в виде прямой линии. Эта прямая описывается уравнением:

$$y = (x - 0,5D) \operatorname{tg}(0,5\pi + \theta). \quad (1)$$

В рамках разностно-угломерного способа осуществляется фиксация моментов прихода максимумов огибающих импульсных последовательностей сигнала РЛС в ПП и вычисляется угол γ по формуле:

$$\gamma = \frac{2\pi}{T_{\text{обз}}} |t_{m2} - t_{m1}|, \quad (2)$$

где t_{m1} , t_{m2} – моменты времени прихода максимумов огибающих импульсных последовательностей сигнала РЛС в первый и второй ПП соответственно; $T_{\text{обз}}$ – период сканирования антенны РЛС.

Все углы с постоянным значением γ и опирающиеся на приемную базу являются вписанными в окружность, проходящую через ПП и носитель обзорной РЛС. Центральный угол этой окружности, тоже опирающийся на приемную базу, равен 2γ [5], следовательно, ее радиус будет равен:

$$R_\gamma = \frac{0,5D}{\sin \gamma}. \quad (3)$$

Центр окружности находится на оси ординат с координатой:

$$y_\gamma = \frac{0,5D}{\operatorname{tg} \gamma} = R_\gamma \cos \gamma. \quad (4)$$

Отсюда следует, что постоянному значению угла γ соответствует ЛП в виде окружности, описываемой уравнением:

$$x^2 + (y - y_\gamma)^2 = R_\gamma^2. \quad (5)$$

В рамках разностно-дальномерного способа осуществляется фиксация моментов прихода импульсов сигнала разведываемой РЛС в ПП и вычисляется разность дальностей расстояний от носителя РЛС до ПП по формуле:

$$\Delta r = |r_1 - r_2| = c |t_1 - t_2| = c\Delta t, \quad (6)$$

где $r_1 = |\mathbf{r}_1|$, $r_2 = |\mathbf{r}_2|$ – расстояния от первого и второго ПП до носителя РЛС соответственно; t_1, t_2 – моменты времени прихода импульсов сигнала РЛС в первый и второй ПП соответственно; $\Delta t = |t_1 - t_2|$; c – скорость распространения электромагнитных волн.

Постоянному значению разности расстояний Δr соответствует ЛП в виде гиперболы. В выбранной системе координат эта гипербола описывается каноническим уравнением [6]:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (7)$$

где $a = 0,5\Delta r$; $b = 0,5\sqrt{D^2 - \Delta r^2}$.

В рамках разностно-доплеровского способа осуществляется измерение несущих частот принимаемых сигналов РЛС в ПП. Эти частоты связаны с несущей частотой излученного сигнала и доплеровским смещением частоты, вызванным движением РЛС относительно ПП:

$$f_1 = f_0 + f_{д1}, \quad (8)$$

$$f_2 = f_0 + f_{д2}, \quad (9)$$

где f_1, f_2 – несущие частоты принимаемых сигналов РЛС в первом и втором ПП соответственно; f_0 – несущая частота излученного сигнала РЛС; $f_{д1}, f_{д2}$ – доплеровские смещения частоты в первом и втором ПП соответственно.

Для схемы, показанной на рисунке 1, доплеровские смещения частоты равны [7]:

$$f_{д1} = -f_0 v_1/c, \quad (10)$$

$$f_{д2} = -f_0 v_2/c, \quad (11)$$

где $v_1 = |\mathbf{v}_1|$, $v_2 = |\mathbf{v}_2|$ – радиальные скорости носителя РЛС относительно первого и второго ПП соответственно.

Несущая частота излученного сигнала не известна, однако ее можно выразить через измеренные частоты принимаемого сигнала и соответствующие радиальные скорости:

$$f_0 = \frac{f_1}{1 - v_1/c} = \frac{f_2}{1 - v_2/c}. \quad (12)$$

Из (12) следует соотношение между радиальными скоростями:

$$f_1 v_2 - f_2 v_1 = c\Delta f. \quad (13)$$

где $\Delta f = f_1 - f_2$.

Радиальные скорости v_1 и v_2 могут быть определены по формулам:

$$v_1 = \frac{\mathbf{v}\mathbf{r}_1}{r_1} = \frac{\mathbf{v}(\mathbf{r} - \rho_1)}{r_1} = \frac{v_x(x + 0,5D) + v_y y}{\sqrt{(x + 0,5D)^2 + y^2}}, \quad (14)$$

$$v_2 \frac{\mathbf{v}\mathbf{r}_2}{r_2} = \frac{\mathbf{v}(\mathbf{r} - \rho_2)}{r_2} = \frac{v_x(x - 0,5D) + v_y y}{\sqrt{(x - 0,5D)^2 + y^2}}. \quad (15)$$

где v_x, v_y – проекции вектора скорости носителя РЛС на оси абсцисс и ординат соответственно. В разностно-доплеровском способе определения ЛП эти величины должны быть известны.

Подстановка (14) и (15) в (13) приводит к уравнению ЛП в следующем виде:

$$f_1 \frac{v_x(x - 0,5D) + v_y y}{\sqrt{(x - 0,5D)^2 + y^2}} - f_2 \frac{v_x(x + 0,5D) + v_y y}{\sqrt{(x + 0,5D)^2 + y^2}} = c\Delta f. \quad (16)$$

При больших по сравнению с приемной базой расстояниях от носителя РЛС до начала координат, т.е. при $r \gg D$, где $r = |\mathbf{r}|$, можно приближенно полагать: $r_1 \approx r, r_2 \approx r$. В этом случае ЛП будет описываться приближенным равенством:

$$f_1 \frac{v_x(x - 0,5D) + v_y y}{\sqrt{x^2 + y^2}} - f_2 \frac{v_x(x + 0,5D) + v_y y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \simeq c\Delta f. \quad (17)$$

С учетом того, что составляющие скорости носителя РЛС на несколько порядков меньше скорости света ($v_x, v_y \ll c$), формула (17) может быть преобразована к уравнению несмещенной окружности:

$$x^2 + y^2 = R_f^2, \quad (18)$$

где R_f – радиус окружности:

$$R_f = \frac{0,5Dv_x(f_1 + f_2)}{c\Delta f}. \quad (19)$$

Из (19) видно, что радиус R_f зависит не только от разности несущих частот, но и от их суммы, а также от размера приемной базы и проекции скорости носителя РЛС на ось абсцисс.

На рисунке 2 показаны графики всех рассмотренных ЛП в выбранной системе координат. Из этого рисунка видно, что линия пеленга и гипербола пересекаются с обеими окружностями под углом, близким к прямому. Следовательно, высокоточное определение местоположения носителя РЛС может быть получено при оценке координат по пересечению следующих ЛП: линии пеленга с окружностью радиуса R_γ (первый способ), линии пеленга с окружностью радиуса R_f (второй способ), гиперболы с окружностью радиуса R_γ (третий способ), гиперболы с окружностью радиуса R_f (четвертый способ).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ НОСИТЕЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

При определении местоположения носителя РЛС по пересечению линии пеленга с окружностью радиуса R_γ искомые координаты находятся путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} y = (x - 0,5D) \operatorname{tg}(0,5\pi + \theta), \\ x^2 + (y - y_\gamma)^2 = R_\gamma^2. \end{cases} \quad (20)$$

Решение системы уравнений (20) относительно координаты x дает два корня, один из которых соответствует положению второго ЛП, а второй – истинному положению носителя РЛС. Последний определяется формулой:

$$x_1 = 0,5D \frac{\sin(\gamma - 2\theta)}{\sin \gamma}. \quad (21)$$

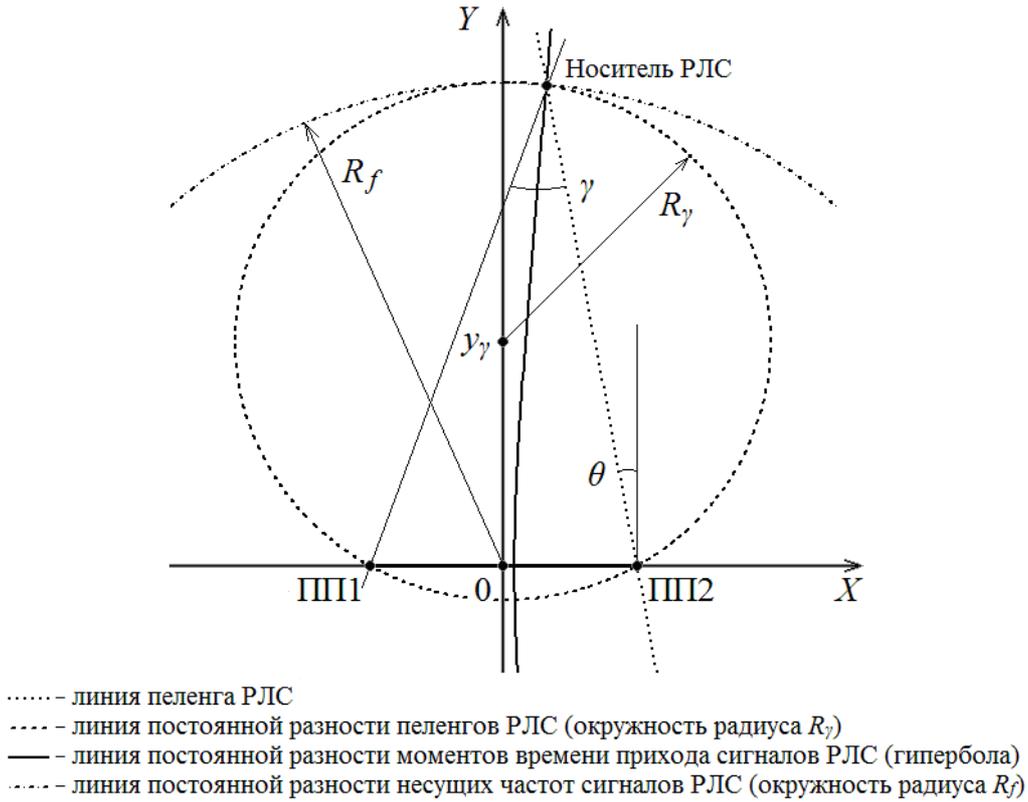


Рис. 2. Графики ЛП.

Ордината носителя РЛС будет равна:

$$y_1 = 0,5D \operatorname{ctg} \theta \left(1 - \frac{\sin(\gamma - 2\theta)}{\sin \gamma} \right). \quad (22)$$

Координаты x_1 и y_1 однозначно определяют квадрант системы координат, в котором находится носитель РЛС.

При определении местоположения носителя РЛС по пересечению линии пеленга с окружностью радиуса R_f искомые координаты находятся путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} y = (x - 0,5D) \operatorname{tg}(0,5\pi + \theta), \\ x^2 + y^2 = R_f^2. \end{cases} \quad (23)$$

Система (23) определяет координаты пары точек:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{cases} \left(\begin{array}{l} 0,5D \cos^2 \theta + \sin \theta \sqrt{R_f^2 - 0,25D^2 \cos^2 \theta} \\ 0,5D \operatorname{ctg} \theta - \cos \theta \left(0,5D \cos \theta \operatorname{ctg} \theta + \sqrt{R_f^2 - 0,25D^2 \cos^2 \theta} \right) \end{array} \right), \\ \left(\begin{array}{l} 0,5D \cos^2 \theta - \sin \theta \sqrt{R_f^2 - 0,25D^2 \cos^2 \theta} \\ 0,5D \operatorname{ctg} \theta - \cos \theta \left(0,5D \cos \theta \operatorname{ctg} \theta - \sin \theta \sqrt{R_f^2 - 0,25D^2 \cos^2 \theta} \right) \end{array} \right). \end{cases} \quad (24)$$

При определении местоположения носителя РЛС по пересечению гиперболы с окружностью радиуса R_γ искомые координаты находятся путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \\ x^2 + (y - y_\gamma)^2 = R_\gamma^2. \end{cases} \quad (25)$$

Система (25) определяет координаты четырех точек:

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0,5\Delta r \sqrt{1 + \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \left(\frac{\cos \gamma + 1}{\sin \gamma}\right)^2} \\ 0,5D \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \frac{\cos \gamma + 1}{\sin \gamma} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} -0,5\Delta r \sqrt{1 + \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \left(\frac{\cos \gamma + 1}{\sin \gamma}\right)^2} \\ 0,5D \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \frac{\cos \gamma + 1}{\sin \gamma} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0,5\Delta r \sqrt{1 + \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \left(\frac{\cos \gamma - 1}{\sin \gamma}\right)^2} \\ 0,5D \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \frac{\cos \gamma - 1}{\sin \gamma} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} -0,5\Delta r \sqrt{1 + \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \left(\frac{\cos \gamma - 1}{\sin \gamma}\right)^2} \\ 0,5D \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \frac{\cos \gamma - 1}{\sin \gamma} \end{pmatrix}. \end{cases} \quad (26)$$

При определении местоположения носителя РЛС по пересечению гиперболы с окружностью радиуса R_f искомые координаты находятся путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \\ x^2 + y^2 = R_f. \end{cases} \quad (27)$$

Система (27) определяет координаты четырех точек:

$$\begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\Delta r^2}{D^2} R_f^2 + 0,25 \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \Delta r^2} \\ \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \left(R_f^2 - 0,25 \Delta r^2\right)} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\Delta r^2}{D^2} R_f^2 + 0,25 \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \Delta r^2} \\ -\sqrt{\left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \left(R_f^2 - 0,25 \Delta r^2\right)} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} -\sqrt{\frac{\Delta r^2}{D^2} R_f^2 + 0,25 \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \Delta r^2} \\ \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \left(R_f^2 - 0,25 \Delta r^2\right)} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} -\sqrt{\frac{\Delta r^2}{D^2} R_f^2 + 0,25 \left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \Delta r^2} \\ -\sqrt{\left(1 - \frac{\Delta r^2}{D^2}\right) \left(R_f^2 - 0,25 \Delta r^2\right)} \end{pmatrix}. \end{cases} \quad (28)$$

Для нахождения истинного местоположения носителя РЛС необходимо предварительно рассчитать значения координат (21), (22) и определить квадрант системы отсчета, в котором находится носитель РЛС, а затем выбрать соответствующие этому квадранту решения.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НОСИТЕЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Средние квадратичные ошибки определения координат местоположения носителя РЛС рассмотренными выше способами определяются формулами [8]:

$$\sigma_{r1} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{цел}}^2 + \sigma_{\text{окр } \gamma}^2}}{\sin \psi_1}, \quad (29)$$

$$\sigma_{r 2} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{пел}}^2 + \sigma_{\text{окр } f}^2}}{\sin \psi_2}, \quad (30)$$

$$\sigma_{r 3} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{гип}}^2 + \sigma_{\text{окр } \gamma}^2}}{\sin \psi_3}, \quad (31)$$

$$\sigma_{r 4} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{гип}}^2 + \sigma_{\text{окр } f}^2}}{\sin \psi_4}, \quad (32)$$

где $\sigma_{r i}$ – средняя квадратичная ошибка определения координат i -м способом; ψ_i – угол, под которыми пересекаются ЛП в i -м способе; $\sigma_{\text{пел}}$ – средняя квадратичная ошибка линии пеленга РЛС; $\sigma_{\text{окр } \gamma}$ – средняя квадратичная ошибка линии постоянной разности пеленгов РЛС; $\sigma_{\text{гип}}$ – средняя квадратичная ошибка линии постоянной разности моментов времени прихода сигналов РЛС; $\sigma_{\text{окр } f}$ – средняя квадратичная ошибка линии постоянной разности несущих частот сигналов РЛС.

Средние квадратичные ошибки линий положения рассчитываются по формулам [8]:

$$\sigma_{\text{пел}} = r\sigma_{\theta}. \quad (33)$$

$$\sigma_{\text{окр } \gamma} = \sigma_{R\gamma}. \quad (34)$$

$$\sigma_{\text{гип}} = \frac{\sigma_{\Delta r}}{2 \sin(0,5\gamma)}. \quad (35)$$

$$\sigma_{\text{окр } f} = \sigma_{Rf}. \quad (36)$$

где σ_{θ} – средняя квадратичная ошибка определения угла θ ; $\sigma_{R\gamma}$ – средняя квадратичная ошибка определения радиуса R_{γ} ; $\sigma_{\Delta r}$ – средняя квадратичная ошибка определения разности расстояний Δr ; σ_{Rf} – средняя квадратичная ошибка определения радиуса R_f .

Поскольку равенство средних квадратичных ошибок (29) – (32) маловероятно, то объединение четырех полученных результатов следует проводить согласно методу взвешенного среднего [9]. Согласно этому методу средневзвешенные координаты носителя РЛС x_0 и y_0 рассчитываются по формулам:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{x_i}{\sigma_{r i}^2}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\sigma_{r i}^2}}, \quad (37)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{y_i}{\sigma_{r i}^2}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\sigma_{r i}^2}}. \quad (38)$$

Средняя квадратичная ошибка определения координат x_0 и y_0 определяется выражением [9]:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\sigma_{r i}^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sin \psi_1}{\sigma_{\text{пел}}^2 + \sigma_{\text{окр } \gamma}^2} + \frac{\sin \psi_2}{\sigma_{\text{пел}}^2 + \sigma_{\text{окр } f}^2} + \frac{\sin \psi_3}{\sigma_{\text{гип}}^2 + \sigma_{\text{окр } \gamma}^2} + \frac{\sin \psi_4}{\sigma_{\text{гип}}^2 + \sigma_{\text{окр } f}^2}}}. \quad (39)$$

На рисунке 3 показан график зависимости средней квадратичной ошибки определения местоположения носителя РЛС от средней квадратичной ошибки линии постоянной разности несущих частот сигналов РЛС при $\psi_1 \approx \psi_2 \approx \psi_3 \approx \psi_4 \approx 0,5\pi$ рад и $\sigma_{\text{пел}} = \sigma_{\text{окр } \gamma} = \sigma_{\text{гип}} = 100$ м.

Из графика на рисунке 3 видно, что добавление разностно-доплеровского способа построения ЛП может существенно повысить точность определения координат носителя РЛС. В частности, при $\sigma_{\text{окр } f} = 100$ м средняя квадратичная ошибка определения местоположения

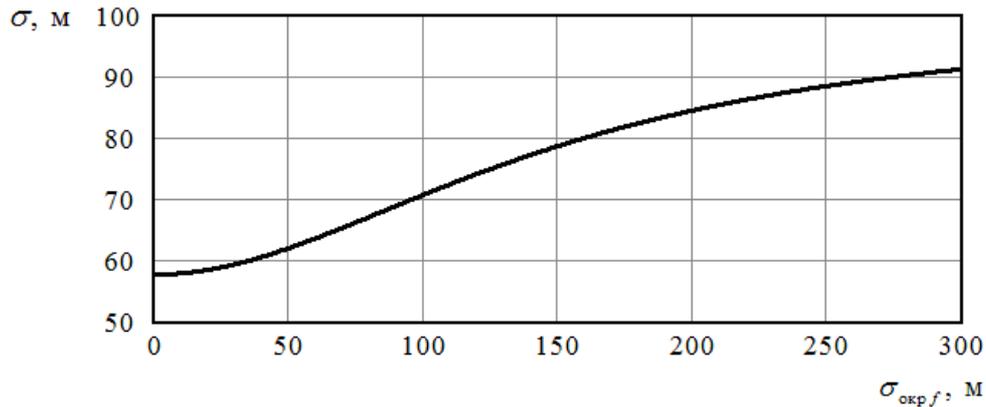


Рис. 3. Зависимость средней квадратичной ошибки определения местоположения носителя РЛС от средней квадратичной ошибки линии постоянной разности несущих частот сигналов РЛС.

носителя РЛС снижается почти на 30% по сравнению с разностно-угломерно-дальномерным способом, описанным в [3].

ОПЕРАЦИИ РАЗНОСТНО-УГЛОМЕРНО-ДАЛЬНОМЕРНО-ДОПЛЕРОВСКОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НОСИТЕЛЯ

Проведенный анализ позволяет установить, что рассматриваемый способ определения местоположения носителя РЛС двухпозиционной системой РТР должен включать следующие операции:

1. Сначала в первом ПП фиксируются моменты времени приема импульсов и максимума пачки импульсов РЛС, а во втором ПП – измеряется пеленг на РЛС и фиксируются моменты времени приема импульсов и максимума пачки импульсов РЛС.

2. Рассчитываются координаты x_1 и y_1 , определяется квадрант системы координат в котором находится носитель РЛС, выбирается соответствующее решение системы уравнений (25) и оценивается абсцисса носителя разностно-угломерно-дальномерным способом (по формуле (37) при $\sigma_{окр f} \rightarrow \infty$).

3. Через время $T_{обз}$ в первом ПП фиксируются моменты времени приема импульсов РЛС и времени приема максимума пачки импульсов РЛС, измеряется несущая частота сигнала РЛС, а во втором ПП – измеряется пеленг на РЛС, фиксируются моменты времени приема импульсов РЛС и времени приема максимума пачки импульсов РЛС, измеряется несущая частота сигнала РЛС.

4. Выполняются операции пункта 2.

5. С использованием оценок координат носителя, полученных в предыдущих пунктах, оценивается проекция скорости носителя РЛС на ось абсцисс v_x .

6. Выбираются соответствующие решения систем уравнений (23) и (27) и оцениваются координаты носителя по формулам (37), (38).

7. Далее выполняются операции по пунктам 3-6 до команды завершения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе совместного использования угломерного, разностно-угломерного, разностно-дальномерного и разностно-доплеровского способов построения ЛП

разработан способ определения координат носителя обзорной РЛС двухпозиционной системой РТР в двумерной системе координат. Установлено, что при больших по сравнению с размером приемной базы дальностях до РЛС разностно-доплеровская ЛПП представляет собой окружность. Получено соотношение, связывающее радиус этой окружности с несущими частотами сигналов, принимаемых в ПП, а также с размером приемной базы и проекцией скорости носителя РЛС на ось абсцисс. Определены сочетания ЛПП, позволяющих получить повышенную точность измерения координат. Получены аналитические решения систем уравнений для указанных сочетаний ЛПП. Координаты носителя РЛС определены путем объединения полученных решений методом взвешенного среднего. Получено выражение средней квадратичной ошибки определения координат носителя РЛС разработанным способом. Установлено, что добавление разностно-доплеровского способа позволяет повысить точность определения координат носителя РЛС. На основе проведенного анализа обоснованы операции разработанного способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, Ю. А. Радиотехническая разведка / Ю. А. Смирнов. — М. : Воениздат, 2001. — 456 с.
2. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. — М. : Радио и связь, 1993. — 416 с.
3. Саркисян, А. П. Способ определения местоположения носителя бортового обзорного радара при двухпозиционной пассивной локации / А. П. Саркисян, В. П. Лихачев // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции. — Воронеж: ВГУ, 2014. — С. 1760–1765.
4. Власов, И. Б. Глобальные навигационные спутниковые системы / И. Б. Власов. — М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 182 с.
5. Выгодский, М. Я. Справочник по элементарной математике / М. Я. Выгодский. — М. : Наука, 1986. — 320 с.
6. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. — М. : Наука, 1974. — 832 с.
7. Колчинский, В. Е. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / В. Е. Колчинский, И. А. Мандуровский, М. И. Константиновский. — М. : Советское радио, 1975. — 432 с.
8. Сайбель, А. Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения / А. Г. Сайбель. — М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1958. — 55 с.
9. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор. — М. : Мир, 1985. — 272 с.

REFERENCES

1. Smirnov Yu.A. Radiotechnical intelligence. [Smirnov Yu.A. Radiotekhnicheskaya razvedka]. Moscow: Voenizdat, 2001, 456 p.
2. Chernyakh V.S. Multi-position radar. [Chernyakh V.S. Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 416 p.
3. Sarkisyan A.P., Likhachev V.P. Method for determining the location of an airborne surveillance radar carrier with two-position passive location. [Sarkis'yan A.P., Likhachev V.P. Sposob opredeleniya mestopolozheniya nosatelya bortovogo obzornogo radara pri dvukhpozitsionnoy passivnoy lokatsii]. Radiolocation, navigation, communication: Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference. Voronezh: VGU, 2014, pp. 1760–1765.
4. Vlasov I.B. Global navigation satellite systems. [Vlasov I.B. Global'nyye navigatsionnyye sputnikovyye sistemy]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2008, 182 p.

5. Vygotsky M.Ya. Handbook of Elementary Mathematics. [Vygodskiy M.Ya. Spravochnik po elementarnoy matematike]. Moscow: Nauka, 1986, 320 p.

6. Korn G., Korn T. Handbook of Mathematics (for scientists and engineers). [Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)]. Moscow: Nauka, 1974, 832 p.

7. Kolchinsky V.E., Mandurovsky I.A., Konstantinovskiy M.I. Autonomous Doppler devices and navigation systems for aircraft. [Kolchinskiy V.Ye., Mandurovskiy I.A., Konstantinovskiy M.I. Avtonomnyye doplerovskiyе ustroystva i sistemy navigatsii letatel'nykh apparatov]. Moscow: Sovetskoye radio, 1975, 432 p.

8. Saibel A.G. Fundamentals of the Theory of Accuracy of Radiotechnical Location Methods. [Saybel' A.G. Osnovy teorii tochnosti radiotekhnicheskikh metodov mestoopredeleniya]. Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo oboronnoy promyshlennosti, 1958, 55 p.

9. Taylor J. Introduction to the Theory of Errors. [Teylor Dzh. Vvedeniye v teoriyu oshibok]. Moscow: Mir, 1985, 272 p.

*Антипенский Роман Валериевич, начальник кафедры Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина” (Воронеж), кандидат технических наук, доцент, Воронеж, Россия
E-mail: antipensky@yandex.ru*

*Antipensky Roman Valerievich, Head of the Department of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin” (Voronezh), candidate of engineering sciences, associate professor, Voronezh, Russia
E-mail: antipensky@yandex.ru*

*Волков Алексей Анатольевич, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина” (Воронеж), кандидат технических наук, Воронеж, Россия
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru*

*Volkov Aleksey Anatolevich, Lecturer of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin” (Voronezh), candidate of engineering sciences, Voronezh, Russia
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru*

*Лихачев Владимир Павлович, профессор Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина” (Воронеж), доктор технических наук, профессор, Воронеж Россия
E-mail: lvp_home@mail.ru*

*Likhachev Vladimir Pavlovich, professor of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin” (Voronezh), doctor of engineering sciences, professor, Voronezh, Russia
E-mail: lvp_home@mail.ru*