

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕЛИ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫМ МЕТОДОМ

Бурдин Вячеслав Борисович, начальник цикла №10 войсковой части 36360
(Главное управление Генерального штаба ВС РФ)

Тюрин Владислав Алексеевич, 4 научная рота войсковой части 36360
(Главное управление Генерального штаба ВС РФ)

Тюрин Сергей Алексеевич, 4 научная рота войсковой части 36360
(Главное управление Генерального штаба ВС РФ)

Асирян Валерий Мишевич, 4 научная рота войсковой части 36360
(Главное управление Генерального штаба ВС РФ)

Аннотация. Рассматривается задача повышения эффективности систем контроля воздушной и наземной обстановки путем повышения точности определения координат целей посредством многопозиционных пассивных радиолокационных станций. В работе показывается, что многопозиционное размещение четырех приемных пунктов, синхронизированных по времени, с точной привязкой их координат делает возможным применение разностно-дальномерного метода для определения местоположения цели. В статье разрабатывается алгоритм определения координат цели, основанный на решении системы нелинейных уравнений, связывающих координаты цели с координатами пунктов приема системы и временными задержками распространения сигналов.

Ключевые слова: радиолокация, источник радиоизлучения, многопозиционные пассивные радиолокационные станции, разностно-дальномерный метод, метод Ньютона.

THE ESTIMATION OF TARGET POSITIONING BY MEANS OF THE RANGE-DIFFERENCE METHOD

Burdin Vyacheslav Borisovich, head of cycle №10 of the military unit 36360 (GU GSH)
Tyurin Vladislav Alekseevich, 4 scientific company of the military unit 36360 (GU GSH)
Tyurin Sergey Alekseevich, 4 scientific company of the military unit 36360 (GU GSH)
Asiryan Valery Mishevich, 4 scientific company of the military unit 36360 (GU GSH)

Abstract. The paper considers the task of increasing the effectiveness of control systems of the air and ground situation by increasing the accuracy of determining the coordinates of targets through multi-position passive radar station. The paper shows that the multi-positioning of four receiving points synchronized in time, with an exact binding of their coordinates, makes it possible to use a range-difference method for determining the position of a target. The article develops an algorithm for determining the coordinates of the target, based on solving a system of nonlinear equations that connect the coordinates of the target with the coordinates of the system reception points and the time delays of signal propagation.

Keywords: radiolocation, radio source, multipositional passive radar stations, range-difference method, Newton method.

Одной из основных проблем повышения эффективности систем управления войсками и вооружением является задача определения координат целей. Наиболее остро эта задача стоит перед системами контроля воздушной и наземной обстановки, управления оружием истребительной и тактической авиации, управления наземными (корабельными) средствами противовоздушной обороны. В настоящий момент для ее решения применяются многопозиционные пассивные радиолокационные станции (МПРЛС), представляющие собой радиолокационные системы, в которых получаемая информация об объектах (источниках радиоизлучения) обрабатывается в нескольких разнесенных в пространстве приемных позициях. Решение поставленной задачи с использованием МПРЛС на практике реализуется с применением одного из трех основных методов: пеленгационного [1], разностно-дальномерного [2] и доплеровского [3]. Каждый из перечисленных методов позволяет решить задачу определения координат цели, и имеет свои характерные особенности, а также достоинства и недостатки.

Для пеленгационного метода требуется сложная антенна, которую необходимо калибровать, юстировать. Для этого применяют двигатели, которые поворачивают антенну и изменяют ее форму, что приводит к усложнению бортовой аппаратуры спутника и увеличению габаритов. Если речь идет о фазовых системах пеленгования, то необходимо в каждом пункте реализовывать многоканальные антенные системы для устранения неоднозначности и повышения точности пеленгования. Увеличение числа приемных каналов приводит к усложнению системы, увеличению ее массы и стоимости. В свою очередь, доплеровские методы требуют точного знания частоты излучения, что для систем радиомониторинга не может быть выполнено. Таким образом, перечисленные требования ограничивают возможности использования пеленгационного и доплеровского методов [4, с. 23].

Разностно-дальномерный метод (РДМ), в отличие от пеленгационного, требует одновременной регистрации сигнала от источника радиоизлучения (ИРИ) сразу несколькими пунктами приема системы. Для определения пространственных координат источника радиоизлучения данным методом требуется четыре синхронизированных по времени пункта приема системы с точной привязкой их координат (рис. 1).

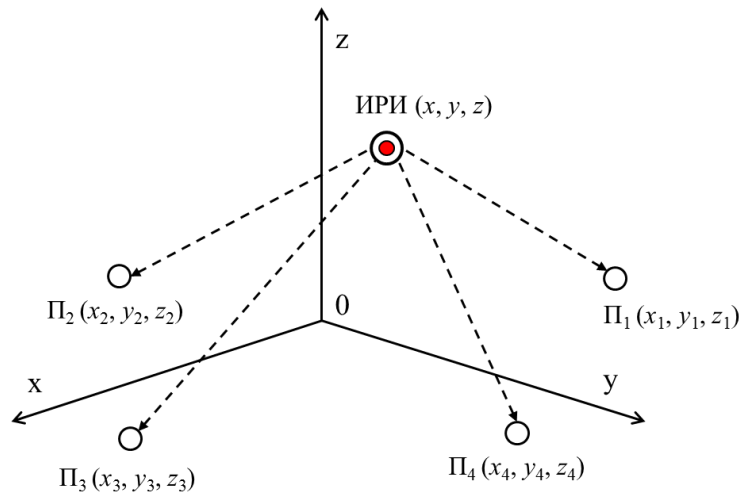


Рисунок 1. Многопозиционная система определения местоположения источника радиоизлучения

Данное требование обуславливает применение антенн с широкой диаграммой направленности (с малым коэффициентом усиления), что является несомненным достоинством системы, поскольку это позволяет уменьшить габариты аппаратуры и ее стоимость. Таким образом, для решения поставленной задачи наиболее целесообразно применение именно разностно-дальномерного метода.

1. Преобразование геодезических координат в прямоугольные пространственные координаты

При решении задачи определения местоположения цели следует учитывать, что координаты пунктов приема многопозиционной системы на практике зачастую представлены в виде геодезической широты B , долготы L и высоты H соответственно. Объясняется это использованием глобальных спутниковых систем навигации, таких как GPS или ГЛОНАСС [5, с. 6], для отображения на карте местности или радаре. Между тем, для применения разностно-дальномерного метода необходимо выполнить преобразование геодезических координат в прямоугольные пространственные:

$$\begin{cases} x = (N + H) \cos B \cos L, \\ y = (N + H) \cos B \sin L, \\ z = [(1 - e^2)N + H] \sin B, \end{cases} \quad (1)$$

где x, y, z – прямоугольные пространственные координаты, N – радиус кривизны первого вертикала, e – эксцентриситет эллипсоида.

Радиус кривизны первого вертикала и квадрат эксцентриситета эллипсоида вычисляются по следующим формулам:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}},$$

$$e^2 = 2\alpha - \alpha^2,$$

где $a = 6378137$, м – большая полуось эллипсоида, $\alpha \approx 1 / 298,3$ – сжатие эллипсоида.

2. Разностно-дальномерный метод определения координат источника радиоизлучения

Разностно-дальномерный метод основывается на формировании системы уравнений, связывающих координаты цели с координатами пунктов приема системы и временными задержками распространения сигналов. При этом расстояние между двумя любыми пунктами приема системы не должно превышать радиус охватываемой области одной антенной. Расстояние между i -м пунктом системы и источником радиоизлучения определяется по формуле:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad (2)$$

где x_i, y_i, z_i – прямоугольные пространственные координаты i -го пункта приема системы, вычисленные по формуле (1), $i = 1, 2, 3, 4$.

Проведем ряд преобразованием над (2). Для этого возведем левые и правые части уравнения в квадрат:

$$r_i^2 = p^2 + p_i^2 - 2(xx_i + yy_i + zz_i), \quad (3)$$

где $p^2 = x^2 + y^2 + z^2$, $p_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$.

Введем обозначение

$$\tilde{r} = r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \quad (4)$$

и преобразуем выражение (3) к виду

$$x(x_j - x_1) + y(y_j - y_1) + z(z_j - z_1) = a_{j1} - z(z_j - z_1), \quad (5)$$

где $a_{j1} = 0.5(p_j^2 - p_1^2 + r_j^2 - \tilde{r}^2)$, $j = 2, 3, 4$.

Сделаем замену $c \cdot \Delta t_{j1} = r_j - \tilde{r}$ и перенесем правую часть уравнения (5) влево:

$$x(x_j - x_1) + y(y_j - y_1) + z(z_j - z_1) - 0.5(p_j^2 - p_1^2 - (c \cdot \Delta t_{j1})^2) + c \cdot \Delta t_{j1} \tilde{r} = 0, \quad (6)$$

где c – скорость света, Δt_{j1} – разница моментов прихода сигналов от источника радиоизлучения на j -й и первый пункты приема системы.

Используя (4) и (6), получим систему нелинейных уравнений (СНУ)

$$\begin{cases} x(x_2 - x_1) + y(y_2 - y_1) + z(z_2 - z_1) - 0.5(p_2^2 - p_1^2 - (c \cdot \Delta t_{21})^2) + c \cdot \Delta t_{21} \tilde{r} = 0, \\ x(x_3 - x_1) + y(y_3 - y_1) + z(z_3 - z_1) - 0.5(p_3^2 - p_1^2 - (c \cdot \Delta t_{31})^2) + c \cdot \Delta t_{31} \tilde{r} = 0, \\ x(x_4 - x_1) + y(y_4 - y_1) + z(z_4 - z_1) - 0.5(p_4^2 - p_1^2 - (c \cdot \Delta t_{41})^2) + c \cdot \Delta t_{41} \tilde{r} = 0, \\ \tilde{r} = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2}. \end{cases} \quad (7)$$

Для решения полученной СНУ (7) воспользуемся методом Ньютона, изложенным в [6, с. 17]. В основе данного метода решения системы нелинейных уравнений лежит использование разложения функций:

$$f_i(V) = 0, \quad (8)$$

$$V = \{x, y, z, \tilde{r}\}^T$$

в ряд Тейлора, причём члены, содержащие вторые и более высокие порядки производных, отбрасываются. Такой подход позволяет решение одной системы нелинейных уравнений заменить решением ряда линейных систем.

Согласно методу Ньютона для решения системы (7), имеем

$$f_i(V_k) \cong f_i(V_k) + \frac{\partial f_i}{\partial x} \Delta x_k + \frac{\partial f_i}{\partial y} \Delta y_k + \frac{\partial f_i}{\partial z} \Delta z_k + \frac{\partial f_i}{\partial \tilde{r}} \Delta \tilde{r}_k, \quad k = \{0, 1, \dots, \infty\}, \quad (9)$$

где $V_k = \{x_k, y_k, z_k, \tilde{r}_k\}^T$ – вектор-столбец аргументов, а $\Delta x_k = x_{k+1} - x_k$, $\Delta y_k = y_{k+1} - y_k$, $\Delta z_k = z_{k+1} - z_k$, $\Delta \tilde{r}_k = \tilde{r}_{k+1} - \tilde{r}_k$.

В качестве начального приближения к точному решению исходной системы выберем точку V_0 такую, что $x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0, \tilde{r}_0 = 0$, и введем условие останова:

$$\max(\Delta V_k) < \varepsilon \approx 10^{-6}, \quad (10)$$

где $\Delta V_k = \{\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k, \Delta \tilde{r}_k\}^T$ – вектор-столбец поправок.

Заметим, что поскольку левые части (9) должны обращаться в ноль согласно (8), то и правые части (9) тоже должны обращаться в ноль. Поэтому имеем:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x} \Delta x_k + \frac{\partial f_i}{\partial y} \Delta y_k + \frac{\partial f_i}{\partial z} \Delta z_k + \frac{\partial f_i}{\partial \tilde{r}} \Delta \tilde{r}_k = -f_i(V_k). \quad (11)$$

Представим полученную систему линейных уравнений (11) в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x & \partial f_1 / \partial y & \partial f_1 / \partial z & \partial f_1 / \partial \tilde{r} \\ \partial f_2 / \partial x & \partial f_2 / \partial y & \partial f_2 / \partial z & \partial f_2 / \partial \tilde{r} \\ \partial f_3 / \partial x & \partial f_3 / \partial y & \partial f_3 / \partial z & \partial f_3 / \partial \tilde{r} \\ \partial f_4 / \partial x & \partial f_4 / \partial y & \partial f_4 / \partial z & \partial f_4 / \partial \tilde{r} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x_k \\ \Delta y_k \\ \Delta z_k \\ \Delta \tilde{r}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1(V_k) \\ -f_2(V_k) \\ -f_3(V_k) \\ -f_4(V_k) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Для практического применения алгоритма выразим производные, тогда система линейных уравнений (12) принимает конечный вид:

$$\begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 & c \cdot \Delta t_{21} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 & c \cdot \Delta t_{31} \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 & c \cdot \Delta t_{41} \\ \frac{x_1 - x_k}{\tilde{r}_k} & \frac{y_1 - y_k}{\tilde{r}_k} & \frac{z_1 - z_k}{\tilde{r}_k} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x_k \\ \Delta y_k \\ \Delta z_k \\ \Delta \tilde{r}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_1(V_k) \\ -f_2(V_k) \\ -f_3(V_k) \\ -f_4(V_k) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Решение (13) происходит относительно вектора-столбца поправок ΔV_k до тех пор, пока не будет выполнено условие окончания итераций (10), в то время как уточнение координат производится по окончании каждой k -й итерации.

3. Преобразование прямоугольных пространственных координат в геодезические координаты

На выходе алгоритма, описанного в разделе 2 статьи, получим прямоугольные пространственные координаты источника радиоизлучения x, y, z . Для их обратного преобразования в геодезические координаты воспользуемся алгоритмом, изложенным в [5, с. 6].

1) Вычисляется вспомогательная величина D по формуле

$$D = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

2) Анализируется полученное значение D :

2.1) Если $D = 0$, то

$$B = \frac{\pi}{2} \frac{z}{|z|},$$

$$L = 0,$$

$$H = z \sin B - a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}.$$

2.2) Если $D \neq 0$, то при

$$\begin{cases} y < 0, x > 0, L = 2\pi - L_a \\ y < 0, x < 0, L = \pi + L_a \\ y > 0, x < 0, L = \pi - L_a \\ y > 0, x > 0, L = L_a \\ y = 0, x > 0, L = 0 \\ y = 0, x < 0, L = \pi, \end{cases}$$

где $L_a = \left| \arcsin\left(\frac{y}{D}\right) \right|$.

3) Анализируется значение z :

3.1) Если $z = 0$, то

$$B = 0,$$

$$H = D - a.$$

3.2) Если $z \neq 0$, то вычисляются значения вспомогательных величин r, c, p по формулам:

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

$$c = \arcsin\left(\frac{z}{r}\right),$$

$$p = \frac{e^2 a}{2r}$$

и реализуется итеративный процесс, используя вспомогательные величины s_1 и s_2 :

$$s_1 = 0,$$

$$b = c + s_1, \quad (14)$$

$$s_2 = \arcsin\left(\frac{p \sin(2b)}{1 - e^2 \sin^2 b}\right), \quad (15)$$

$$d = |s_2 - s_1|. \quad (16)$$

Причем, если значение d , определяемое по формуле (16), меньше установленного значения допуска $d < \varepsilon$, то

$$B = b,$$

$$H = D \cos B + z \sin B - a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B},$$

иначе $s_1 = s_2$ и вычисления по формулам (14-16) повторяются.

Таким образом, представленный в работе алгоритм определения координат источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом может применяться при решении задачи определения местоположения цели многопозиционной пассивной радиолокационной станцией. При этом результатами вычислений являются геодезические координаты цели: широта, долгота и высота соответственно.

Контактная информация

Тюрин Владислав Алексеевич, vst123@yandex.ru, +79654388769

Тюрин Сергей Алексеевич, bwert@yandex.ru, +79651502994

Асирян Валерий Мишевич, dmc5mod@yandex.ru, +79162453196

Литература

1. *Денисов В.П.* Фазовые радиопеленгаторы. // Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2001. С. -251.
2. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. // М.: Радио и связь, 1993. С. -416.
3. *Сколник М.И.* Справочник по радиолокации. Основы радиолокации: Справочное издание. // М.: Советское радио, 1976. С. -456.
4. *Ворошилин Е.П., Миронов М.В., Громов В.А.* Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов. // Доклады ТУСУРа, № 1 (21), часть 2, 2010. С. 23-28.
5. ГОСТ 32453-2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. // М.: Стандартиформ, 2017. С. -20.
6. *Копнина В.И., Вельмисова А.И.* Численные методы линейной и нелинейной алгебры. Методическое руководство к практическим работам по методам вычислений для студентов естественных наук. // Саратов, 2011. С. -35.

References

1. *Denisov V.P.* Phase direction finders. // Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2001. Pp. -251.
2. *Chernyak V.S.* Multipoint radar. // Moscow: Radio and communication, 1993. Pp. -416.
3. *Skolnik M.I.* Handbook of radar. Basics of radar: reference book. // Moscow: Soviet radio, 1976. Pp. -456.
4. *Voroshilin EP, Mironov MV, Gromov V.A.* The estimation of radio source positioning by means of the range-difference method using the multiposition passive satellite system. // Reports of TUSUR, № 1 (21), part 2, 2010. Pp. 23-28.
5. GOST 32453-2017. Global navigation satellite system. Coordinate systems. Methods for converting coordinates of defined points. // Moscow: Standardinform, 2017. Pp. -20.
6. *Kopnina V.I., Velmisova A.I.* Numerical methods of linear and nonlinear algebra. Methodological guide to practical work on methods of computing for students of natural sciences. // Saratov, 2011. Pp. -35.