

УДК 621.396.96

Метод определения координат сканирующего источника радиоизлучения в многопозиционной радиолокационной системе с некооперируемым подсветом

Лешко Н.А.*, **Петроченков Д.М.****, **Мозгонов М.Ю.*****, **Федотов А.В.******

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Московский проспект, 28, Ярославль, 150001, Россия

**e-mail: nikolai_zru@mail.ru*

***e-mail: pdm78@yandex.ru*

****e-mail: m-max007@yandex.ru*

*****e-mail: alekcandr1384@yandex.ru*

Статья поступила 01.10.2019

Аннотация

В радиолокации широко используются многопозиционные пассивные методы определения координат источников радиоизлучения. Одни из методов требуют точного знания временной и фазовой структуры сигналов, другие используют динамические свойства источника излучения и дополнительные пространственные измерения угловых координат. В обоих случаях следствием является сложность аппаратуры, способной реализовать необходимые измерения с заданным качеством. Поэтому разработка методов измерения координат источников радиоизлучения, позволяющих сократить число измерений является научно-технической проблемой, требующей решения. В статье предложен метод вычисления координат сканирующего источника радиоизлучения, основанный на измерении временных интервалов между последовательным облучением приемных пунктов многопозиционной системы. Основное достоинство предложенного метода

определения координат сканирующего источника – это минимальное количество измерений, отсутствие измеряемых угловых величин, независимость от пространственной ориентации пунктов приема относительно друг друга. Для определения координат источника излучения необходимы измерения временных задержек последовательного облучения пунктов приема и дальности между ними.

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная система, некооперируемый источник подсвета, метод определения координат источника радиоизлучения.

Введение

Анализ тенденций развития радиолокационной техники показывает, что одним из перспективных направлений является создание систем, объединяющих средства активной и пассивной локации, а также радиотехнической разведки. На основе такой интеграции разрабатываются полуактивные многопозиционные радиолокационные системы (МПРЛС) с кооперируемым (КИП) или некооперируемым источником подсвета (НИП) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

При использовании некооперируемого источника подсвета воздушных объектов процедуру обнаружения цели можно условно разделить на два этапа. Первый этап заключается в определении координат и параметров источника подсвета. Второй этап – обнаружение отраженных от целей сигналов источника подсвета на фоне его прямого излучения. Причем, эффективность работы МПРЛС с НИП непосредственно зависит от качества решения задачи на первом этапе.

В [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] предложены различные методы определения координат источников радиоизлучения, которые на сегодняшний момент уже стали традиционными. Эти методы основываются на когерентной обработке сигналов, принятых различными позициями. В [18] рассматривается применение искусственных нейронных сетей (ИНС) для решения задачи формирования оценки направления прихода сигнала в пассивных системах радиолокации, в [19] приводятся оценки погрешности измерения положения источника излучения относительно измерителей.

В МПРЛС с НИП условия пространственной и временной когерентности принятых сигналов в различных приемных пунктах, как правило, не выполняются [20, 21]. Поэтому необходимо искать методы определения координат, не зависящие от таких условий. Одним из динамических факторов, который может быть использован для определения местоположения источника подсвета, является режим сканирования диаграммы направленности (ДНА) его передающей антенны.

В [20, 21, 22] описаны варианты временного способа местоопределения сканирующих источников радиоизлучения (ИРИ) при наблюдении из нескольких приемных пунктов. Так, в [20] предложен способ определения дальности до ИРИ при известной конфигурации размещения приемных пунктов по измеренным пеленгам и интервалам времени между последовательным облучением приемных пунктов. В [21] предложен способ определения дальности до ИРИ только по измеренным интервалам времени между последовательным облучением приемных пунктов. Однако, указанные выше методы представляют собой решение задачи

определения координат на плоскости и не позволяют определить координаты ИРИ в пространстве.

Целью работы является разработка метода определения координат ИРИ со сканирующей ДНА на основе измеренных интервалов времени между последовательным облучением приемных пунктов.

Если в системе [21, 22], состоящей из трех приемных пунктов и сканирующего ИРИ, последовательно облучающего их (рис. 1), известны расстояния между приемными пунктами (h_{31} , h_{12} , h_{32}) и углы между направлениями от ИРИ на приемные пункты (γ_{31} , γ_{32} , γ_{12}), которые вычисляются по времени задержки между последовательным облучением приемных пунктов при известной угловой скорости сканирования ИРИ, то местоположение сканирующего ИРИ можно определить как точку пересечения окружностей, описывающих возможное местоположение ИРИ относительно пары приемных пунктов при заданном угле между направлениями от ИРИ на приемные пункты (γ_{31} , γ_{32} , γ_{12}), с радиусами, рассчитываемыми по выражениям (1) – (3):

$$R_{31} = \frac{h_{31}}{2 \sin(\gamma_{31})}, \quad (1)$$

$$R_{32} = \frac{h_{32}}{2 \sin(\gamma_{32})}, \quad (2)$$

$$R_{12} = \frac{h_{12}}{2 \sin(\gamma_{12})}. \quad (3)$$

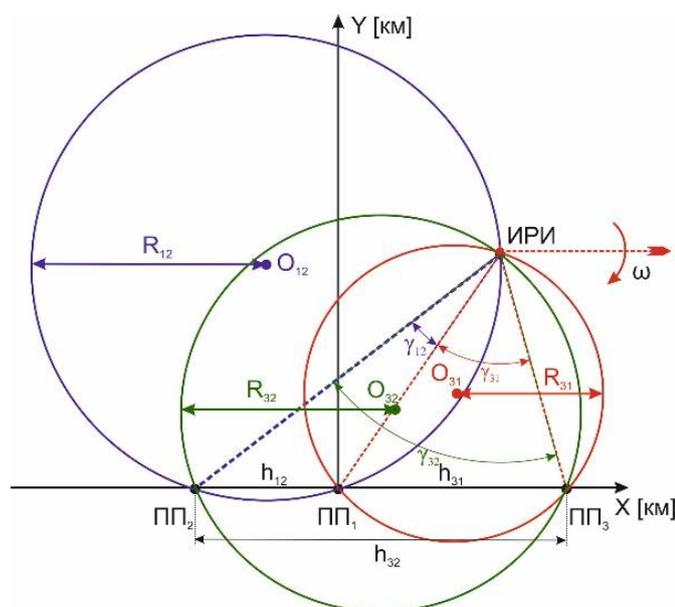


Рис. 1 – Определение координат сканирующего источника МПРЛС

При известных координатах приемных пунктов $ПП_1(x_1, y_1)$, $ПП_2(x_2, y_2)$, $ПП_3(x_3, y_3)$, координаты ИРИ определяются следующим образом:

1) Рассчитываются координаты центров окружностей $\{x_{12}, y_{12}\}$, $\{x_{32}, y_{32}\}$, $\{x_{31}, y_{31}\}$ путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} (x_{ППn} - X_{Omn})^2 + (y_{ППn} - Y_{Omn})^2 = R_{mn}^2, \\ (x_{ППm} - X_{Omn})^2 + (y_{ППm} - Y_{Omn})^2 = R_{mn}^2, \end{cases} \quad (4)$$

где X_{Omn} , Y_{Omn} – искомые координаты центра соответствующей окружности

O_{mn} ;

$x_{ППn}$, $x_{ППm}$, $y_{ППn}$, $y_{ППm}$ – координаты соответствующих приемных пунктов;

R_{mn} – радиус окружности.

2) Определяются координаты ИРИ решением системы уравнений

$$\begin{cases} (x - x_{31})^2 + (y - y_{31})^2 = R_{31}^2, \\ (x - x_{12})^2 + (y - y_{12})^2 = R_{12}^2, \\ (x - x_{32})^2 + (y - y_{32})^2 = R_{32}^2, \end{cases} \quad (5)$$

где x, y – искомые координаты ИРИ;

$\{x_{31}, y_{31}\}, \{x_{12}, y_{12}\}, \{x_{32}, y_{32}\}$ – координаты центров окружностей.

Система уравнений (5) обладает избыточностью. Решение двух любых уравнений из системы (5) будет давать два решения, то есть две точки пересечения двух окружностей из трех. При этом первая точка определяет координаты ИРИ, а вторая точка пересечения будет являться точкой местоположения одного из приемных пунктов системы (рис. 1). По вычисленным координатам определяются наклонные дальности до ИРИ.

Вышеприведенный порядок определения координат ИРИ работоспособен лишь на плоскости. Для определения координат сканирующего ИРИ в пространстве требуется увеличение количества приемных пунктов. Рассмотрим один из вариантов (рис. 2) построения пространственно-распределенной системы, состоящей из пяти приемных пунктов и ИРИ воздушного базирования со сканирующей ДНА.

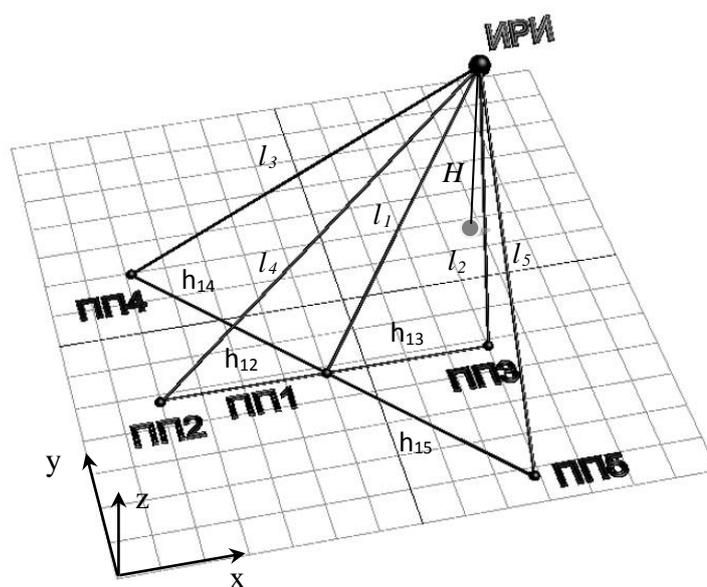


Рис. 2 – Вариант размещения пяти приемных позиций и источника радиоизлучения
в пространстве

Представленную систему можно условно разделить на две подсистемы. Первая включает в себя ПП1, ПП2, ПП3, ИРИ, а вторая соответственно ПП1, ПП4, ПП5, ИРИ. В каждой подсистеме возможно определить наклонные дальности способом, указанным выше [21], однако углы наклона плоскостей к горизонтальной поверхности можно определить лишь в системе в целом.

По аналогии с решением плоскостной задачи рассмотрим кривые, характеризующие возможное местоположение ИРИ в пространстве при заданных наклонных дальностях l_1, l_2, l_4 , для подсистемы ПП1 – ПП2 – ПП3 – ИРИ и l_1, l_3, l_5 для подсистемы ПП1 – ПП4 – ПП5 – ИРИ (рис. 3). Они представляют собой полуокружности, проекции которых на горизонтальную плоскость дают прямые, перпендикулярные прямой, проходящей через точки местоположения приемных пунктов ПП1 – ПП2 – ПП3 и ПП1 – ПП4 – ПП5, соответственно. Точка пересечения полуокружностей определяет местоположение ИРИ в пространстве (рис. 3). Обозначим точки пересечения кривых возможного положения источника излучения с горизонтальной плоскостью как ИРИ1 (для подсистемы ПП1 – ПП4 – ПП5) и ИРИ2 (для подсистемы ПП1 – ПП2 – ПП3) (рис. 3). Точки местоположения ИРИ с максимально возможной высотой над горизонтальной поверхностью обозначим, как ИРИ4 и ИРИ3, соответственно. Проекцию точки пересечения кривых на горизонтальную плоскость точкой ИРИ5. Пересечения проекций кривых с прямыми, проходящими через точки ПП1 и ПП4 обозначим как Ц1, а ПП1 и ПП3 как Ц2.

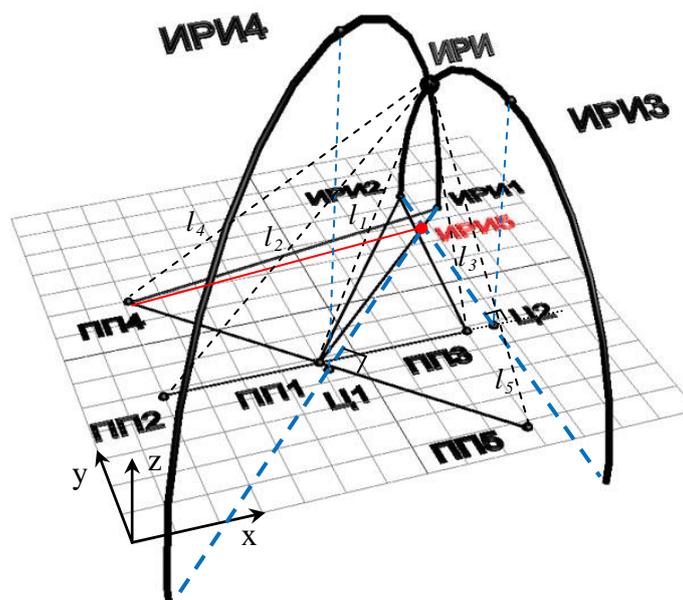


Рис. 3 – Определение горизонтальной дальности ИРИ до приемного пункта

Так как при известных наклонных дальностях в системе из пяти приемных пунктов появляется избыточность, то далее рассмотрим систему, образованную частями подсистем, указанных выше, и состоящую из ПП1, ПП3 от первой подсистемы и ПП1, ПП4 от второй подсистемы.

Вариант расположения такой системы, представленной в виде проекции на горизонтальную плоскость, изображен на рис. 4.

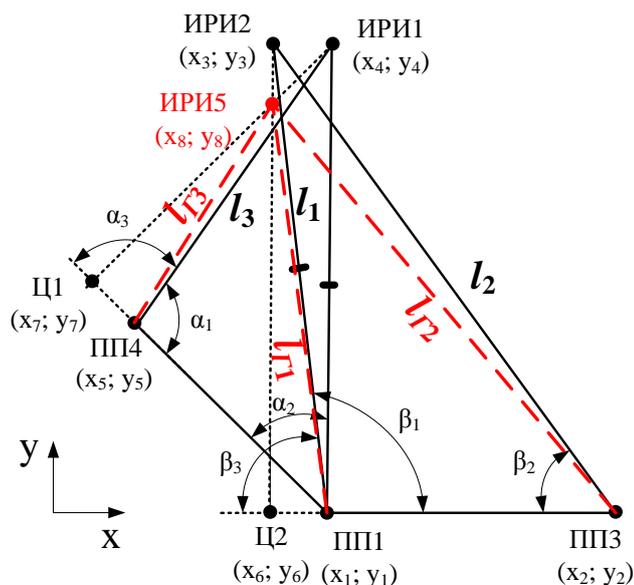


Рис. 4 – Геометрия размещения ПП и ИРИ, когда $\alpha_2 < 90 < \alpha_1$, $\beta_2 < 90 < \beta_1$

$$(\alpha_3 = 180 - \alpha_1, \beta_3 = 180 - \beta_1)$$

Определим координаты точки ИРИ5 и проекции линий наклонных дальностей $l_{Г1}$, $l_{Г2}$, $l_{Г3}$.

На первом этапе требуется определить координаты точек ИРИ1 (x_4 , y_4) и ИРИ2 (x_3 , y_3). Для этого составим две системы уравнений для треугольников ПП4–ПП1–ИРИ1 и ПП1–ПП3–ИРИ2:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} = l_1, \\ \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} = l_2; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2} = l_1, \\ \sqrt{(x_4 - x_5)^2 + (y_4 - y_5)^2} = l_3. \end{cases} \quad (7)$$

Решим первую систему уравнений относительно неизвестных координат (x_3 , y_3) точки ИРИ2.

$$y_3 = \frac{-M_2 \pm \sqrt{M_2^2 - 4M_1M_3}}{2M_1}, \quad (8)$$

где $M_1 = 4[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]$;

$$M_2 = -4[(y_1 - y_2)(x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 + l_2^2 - l_1^2) - 2x_2(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) + 2y_2(x_1 - x_2)^2];$$

$$M_3 = 4(x_1 - x_2)^2(x_2^2 + y_2^2 - l_2^2) - 4x_2(x_1 - x_2)(x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 + l_2^2 - l_1^2) + (x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2 + l_2^2 - l_1^2)^2.$$

Найденное значение y_3 может принимать два значения, положительное и отрицательное. С учетом известного направления прихода сигнала от ИРИ отрицательное значение y_3 далее не учитывается.

Значение x_3 определяется как

$$x_3 = \frac{2x_2 \pm \sqrt{4x_2^2 - 4(x_2^2 + y_3^2 - 2y_3y_2 + y_2^2 - l_2^2)}}{2}, \quad (9)$$

найденное значение x_3 может принимать два значения, выбор того или иного выполняется аналогично y_3 .

Таким же способом определяются координаты точки ИРИ1 (x_4, y_4).

На втором этапе требуется определить координаты точек Ц2 (x_6, y_6) и Ц1 (x_7, y_7). Из рис. 4 видно, что $x_6 = x_3$, а $y_6 = y_1 = y_2$.

Для определения координат точки Ц1 составим систему уравнений

$$\begin{cases} \sqrt{(x_7 - x_4)^2 + (y_7 - y_4)^2} = \sin(\alpha_3)l_3, \\ \sqrt{(x_7 - x_5)^2 + (y_7 - y_5)^2} = \cos(\alpha_3)l_3. \end{cases} \quad (10)$$

Решив данную систему, получим координаты x_7, y_7 . Найденное значение y_7 может принимать два значения. Для выбора одного из двух решений используем условия: $y_7 > y_5, x_7 < x_5$.

На третьем этапе определяются координаты точки ИРИ5.

Составим систему уравнений

$$\begin{cases} A_1 x_8 + B_1 y_8 + C_1 = 0, \\ A_2 x_8 + B_2 y_8 + C_2 = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где $A_1 = y_4 - y_6, B_1 = x_6 - x_4, C_1 = x_4 y_6 - x_6 y_4; A_2 = y_3 - y_7, B_2 = x_7 - x_3, C_2 = x_3 y_7 - x_7 y_3$.

Решив систему уравнений, получим:

$$y_8 = \frac{A_2 C_1 - A_1 C_2}{A_1 B_2 - A_2 B_1}, \quad (12)$$

$$x_8 = \frac{-B_1 y_8 - C_1}{A_1}. \quad (13)$$

На четвертом этапе определяется горизонтальная дальность до любого из приемных пунктов, например:

$$l_{Г3} = \sqrt{(x_5 - x_8)^2 + (y_5 - y_8)^2}. \quad (14)$$

При этом высота

$$H = \sqrt{l_3^2 - l_{Г3}^2}. \quad (15)$$

Разработанный метод позволяет определить координаты ИРИ со сканирующей ДНА по каждому одиночному циклу обзора.

Библиографический список

1. Кобан А.Я., Самотонин Д.Н. Научно-технические проблемы развития федеральной системы разведки и контроля воздушного пространства Российской Федерации и пути их решения // Военная мысль. 2017. № 4. С. 14 - 18.
2. Астапенко Ю., Гуменюк А., Менячихин А. РТВ надо иметь дополнительные средства разведки // Воздушно-космический рубеж. 2018. № 1(3). С. 38 – 42.
3. Ильин Е.М., Климов А.Э., Пашин Н.С., Полубехин А.И., Черевко А.Г., Шумский В.Н. Пассивные локационные системы. Перспективы и решения // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 7 - 20.
4. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Живучесть радиолокационных систем // Радиотехника. 2006. № 11. С. 5 - 10.
5. Ашурков И.С., Какаев В.В., Лешко Н.А. Оптимизация пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6 (79). С. 81 - 85.
6. Ашурков И.С., Лешко Н.А. Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62297>
7. Bergin J., Guerci J.R. MIMO Radar: Theory and Application. Boston, London, Artech House, 2018, 280 p.
8. Wang R., Deng Y. Bistatic SAR System and Signal Processing Technology, Springer, 2018, 286 p.

9. Griffiths H.D., Baker C.J. An Introduction to Passive Radar, New York, Artech House, 2017, 110 p.
10. Aubain A., Lobert B. Patent 6 417 799 US. Method of locating an interfering transmitter for a satellite telecommunications system, Int. Cl. H 04 D 7/19, 9.07.2002.
11. Webber J.C., Knight C.A. Patent 5 594 452 US. Method and System for Locating an Unknown Transmitter Using Calibrated Oscillator Phases, Int. Cl. H 04 B 7/185, 14.01.1997.
12. Dillman D.J. Patent 6 839 017 US. Method and apparatus for using anti-jam technology to determine the location of an electromagnetic radiation source, Int. Cl. G 01 S 7/36, 4.01.2005.
13. Aubain A. and Lobert B. Patent no. 6417799 US. Method of locating an interfering transmitter for a satellite telecommunications system, 2002.
14. N.J. Willis. Bistatic Radar, 2nd Ed., Silver Spring, MD: Technology Service Corp., 1995. Corrected and republished by Raleigh, NC: SciTech Publishing, Inc., 2005, 337 p.
15. Борисов Е.Г. Определение местоположения воздушных объектов в полистатической радиолокационной системе, паразитирующей на излучении телекоммуникационных систем // Научный вестник московского государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21. № 5. С. 105 - 116.
16. Кирюшкин В.В., Волков Н.С. Межпозиционное отождествление результатов измерений и определение координат воздушных целей в многопозиционной радиолокационной системе на беспилотных летательных аппаратах // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 1. С. 107 - 116.

17. Меркулов В.И., Садовский П.А. Оценивание дальности и ее производных в двухпозиционной пассивной радиолокационной системе // Труды СПИИРАН. 2018. № 1 (56). С. 122 - 143.
18. Ефимов Е.Н., Шевгунов Т.Я. Формирование оценки направления прихода сигнала с использованием искусственных нейронных сетей // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58786>
19. Анненкова И.Ю., Грибанов А.С. Ошибки линий положения для различных методов определения направления на источник излучения // Труды МАИ. 2011. № 42. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24260>
20. Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. Методы оценки местопределения источников излучения. - М.: Радиотехника, 2008. 432 с.
21. Петроченков Д.М., Федотов А.В. Временной метод определения дальности до сканирующего источника радиоизлучения в многопозиционной радиолокационной системе с некооперируемым подсветом // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2018. № 2 (3). С. 78 - 84.
22. Петроченков Д.М., Федотов А.В. Организация обзора пространства в многопозиционной радиолокационной системе с некооперируемым источником подсвета на основе комбинаторного принципа // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. 2018. Т. 11. № 7. С. 831 - 841.