УДК 680.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Н. И. КОРСУНОВ
Д.В. ЕГОРОВ

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

e-mail:
korsunov@bsu.edu.ru
507181@bsu.edu.ru

В статье описаны этапы и представлены результаты разработки алгоритма определения пространственных координат источников радиоизлученияяна основе угломерного способа пеленгации и метода однопараметрических множеств.

Ключевые слова: угломерный алгоритм, методы определения координат, дальность, приемный пункт, пассивная радиолокация.

Введение

Основной задачей пассивной радиолокации является определение местоположения объектов по их собственным излучениям в радиодиапазоне. Кроме этого, методами пассивной радиолокации в ряде случаев могут быть определены направление и скорость перемещения объекта и другие его характеристики.

При пассивной радиолокации могут использоваться любые радио колебания, излучаемые объектами как с помощью специальных предметов, так и в результате собственного радиоизлучения.

Основные задачи пассивной радиолокации совпадают с задачами активной радиолокации. Однако их средства различаются. Активная радиолокация, в отличие от пассивной, для определения место положения объектов и их характеристик использует собственные радио колебания. Для их получения средства активной радиолокации имеют в своем составе мощные генераторные устройства, энергия которых излучается в требуемых направлениях с помощью специальных антенн. Для регистрации отраженных от них объектов сигналов необходимы приемные устройства. Средства же пассивной радиолокации имеют лишь приемные пункты.

Отсутствие мощных передающих устройств у средств пассивной радиолокации в значительной мере затрудняет определение радиолокационных позиций.

При известном расположении приемных пунктов (геометрии комплекса) положение объекта в пространстве определяется совокупность трех первичных координат объекта. Первичные координаты позволяют вычислить пространственные.

В зависимости от используемых первичных координатразличают следующие методы пассивной радиолокации.

1. Угломерные методы основаны на использовании угловых измерений. В простейших случаях достаточно лишь двух пунктов, в которых необходимо измерить два азимута и один угол места, либо два угла места и один азимут. Пространственные координатыдля первого случая определяется выражением:

$$x = \frac{y_1 - y_2}{b-1}\cot\beta_1 = \frac{Б}{b-1}\cot\beta_1,$$

$$y = \frac{y_1 b - y_2}{b-1} = \frac{Б}{2}\frac{b+1}{b-1},$$

$$z = \frac{\tan\varepsilon}{\sin\beta_1}\frac{y_1 - y_2}{b-1} = \frac{\tan\varepsilon}{\sin\beta_1}\frac{Б}{b-1},$$

где

$$b = \frac{\tan \beta_2}{\tan \beta_1}, \; y_1 - y_2 = Б$$

Б – база (расстояние между приемными пунктами), x, y, z – координаты ИРИ (источник радио излучения), x_i, y_i, z_i–координаты ПП (приемный пункт) [1].

Этот случай предпочтителен, если –ИРИ – находятся под малыми углами места. Если же комплекс предназначен для измерения положения объектов, находящихся в зените, то целесообразно измерять два угла места и один азимут.

Среди угломерных выделяется так называемый триангуляционный метод радиолокации. С помощью этого метода плоскостные координаты объекта x и y могут быть вычислены, если измерить лишь два азимута (пеленга) β_1 и β_2. Координат объекта можно определить по известной стороне (базе) и двум прилежащим к ней углам. Аналогичная задача встречается в геодезии, откуда и взят термин «триангуляция» [4].

2. Разностно-дальномерные методы определения координат используют в качестве первичных измерений три независимых разности дальностей. Для этого необходимо иметь не менее четырех приемных пунктов и пространственные координаты могут быть вычислены при известной геометрии комплекса. На практике встречаются различные варианты размещения приемных пунктов на местности. Однако даже при наличии симметрии в их расположении процесс вычисления пространственных координат достаточно сложен [3].

3. Угломерно-разностно-дальномерные методы используют в качестве первичных координат угломерные координаты и разность дальностей. Пространственные координаты могут быть определенны при наличии лишь двух приемных пунктов. В случае, когда наряду с измерением разности дальностей в одном из них измеряется азимут и угол места, вычисление координат производится с помощью выражений:

$$x = \frac{Б}{2} \frac{\left(1-\gamma^2\right)\cos\beta}{\gamma \sec\varepsilon - \sin\beta},$$

$$y = \frac{Б\gamma}{2} \frac{\sec\varepsilon - \gamma\sin\beta}{\gamma \sec\varepsilon - \sin\beta},$$

$$z = \frac{Б}{2} \frac{\left(1-\gamma^2\right)\tan\varepsilon}{\gamma \sec\varepsilon - \sin\beta}.$$

где

$$\gamma = \frac{r}{Б}$$

Б – база (расстояние между приемными пунктами),r–разность расстояний между ПП и ИРИ,x, y, z–координаты ИРИ, x_i, y_i, z_i–координаты ПП [1].

Специфической проблемой, возникающей в пассивной радиолокации, является отождествление измерений при наличии нескольких объектов в зоне обзора комплекса. Отождествление необходимо, если измерения первичных координат производится независимо. Действительно, даже в простейшем триангуляционном комплексе при наличии двух близко расположенных объектов линии пеленга дают четыре точки пересечения (рис. 1), а истинным координатам соответствуют лишь две из них. Более сложная ситуация возникает при определении пространственных координат. В общем случае, если n – общее количество объектов, то в результате измерений будет получено $3n$ независимых поверхностей положения. Их пересечение может дать до n^3 точек положения, среди которых лишь n соответствуют истинным координатам объектов, а остальные $n^2(n-1)$ – ложным[1].

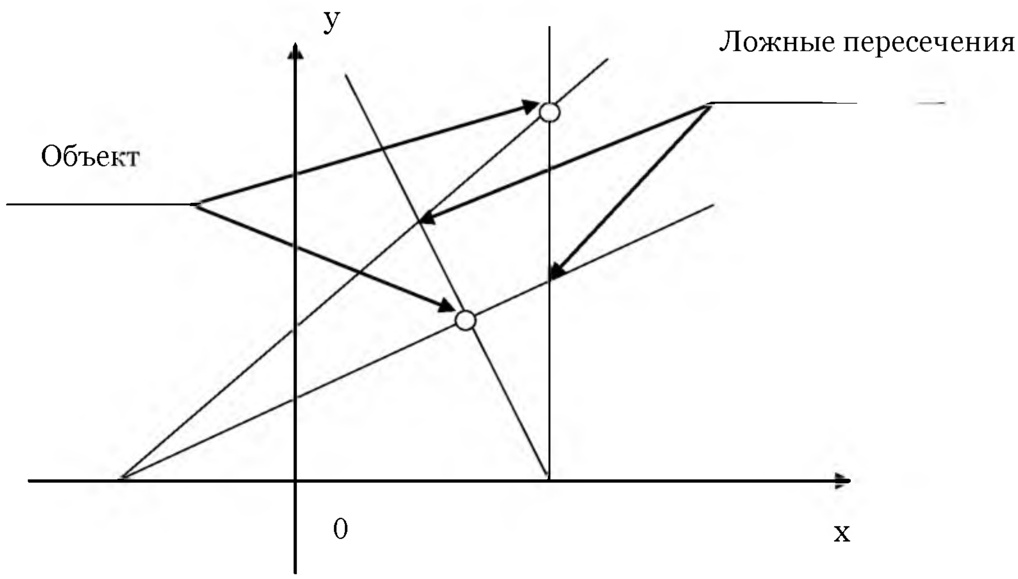

Рис. 1. Проявление феномена истинных и ложных линий пересечения пеленгов

Приведенные выше методы, обладают существенным недостатком появлением ложных пересечений (объектов). Устранение появление неоднозначности в определении координат объекта за счет введения однопараметрических множеств при постарении математических моделей, используемых в пассивной радиолокации. является целью исследований, приведенных в данной статье.

Рассмотрим комплекс пассивной локации (КПЛ), состоящий из нескольких приемных пунктов (ПП), которые регистрируют электромагнитный импульс, испускаемый точечным источником радиоизлучения (ИРИ). На каждом ПП с некоторой погрешностью измеряются азимут и угол места ИРИ в заранее выбранной прямоугольной системе координат (ПСК) и затем по этим данным рассчитываются координаты ИРИ в ПСК. Данный метод, называемый также триангуляционным, используется как в активной, так и в пассивной радиолокации [1, 2]. Одним из его недостатков является так называемый феномен ложных объектов, проявляющийся в том, что линии пеленга пересекаются не только в точке истинного местоположения ИРИ (рис. 2).

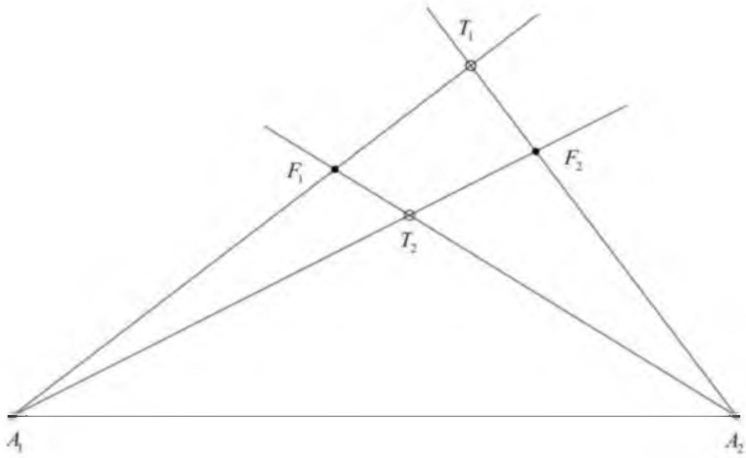

Рис. 2. Истинные (T_1 и T_2) и ложные (F_1 и F_2) пересечения линий пеленгов A_1T_1 и A_2F_1

В данной работе предлагается способ устранения указанного недостатка при помощи вводимого метода **однопараметрических множеств.**Рассмотрим математические модели представления ПП (приемных пунктов).

Моделирование отдельного ПП

Пусть ПП, расположенный в точке $A(x_0, y_0, 0)$ горизонтальной плоскости, принял сигнал ИРИ, находящегося в точке $P(x_c, y_c, z_c)$ с неизвестными координатами (рис. 3).

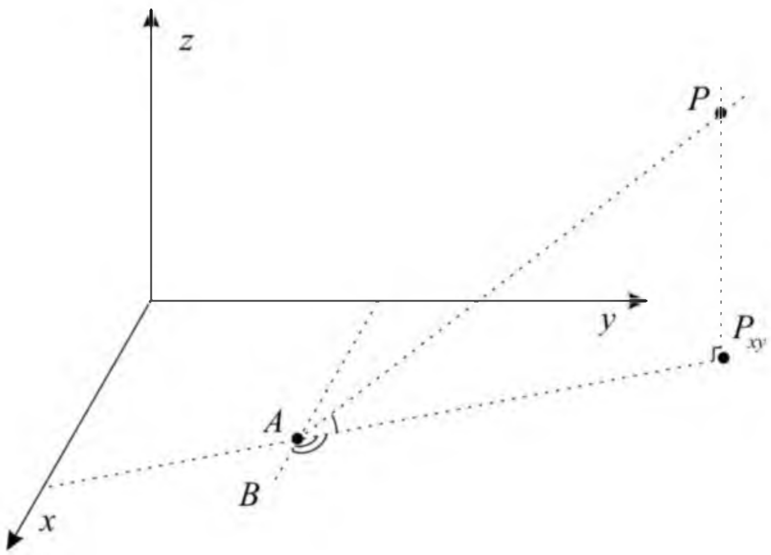

Рис. 3. Определение азимута и угла места ИРИ

При этом стали известны азимут $\angle P_{xy}AB = \beta$ и угол места $\angle PAP_{xy} = \varepsilon$ ИРИ. Указанные величины являются исходными данными модели. Предположим также, что

$$\beta \neq \frac{\pi}{2} + \pi m, m \in Z \text{ и} \tag{1}$$

$$\varepsilon \neq \frac{\pi}{2} + \pi k, k \in Z\,. \tag{2}$$

Рассмотрим проекцию точки P на горизонтальную плоскость $P_{xy}(x_c, y_c, 0)$. Поскольку уравнение прямой AP_{xy} имеет вид $y = (x - x_0)\operatorname{tg}\beta + y_0$, и точка P_{xy} принадлежит этой прямой, получим

$$y_c = (x_c - x_0)\operatorname{tg}\beta + y_0\,. \tag{3}$$

Рассмотрим вектор $\overline{AP_{xy}}$ с координатами $(x_c - x_0; y_c - y_0, 0)$. С учетом выражения (3), его модуль легко представить в виде

$$\left|\overline{AP_{xy}}\right| = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2} = \left|\frac{x_c - x_0}{\cos\beta}\right|. \tag{4}$$

Из прямоугольного треугольника ΔAPP_{xy} (рис. 2) находим

$$\operatorname{tg}\varepsilon = \frac{z_c}{\left|\overline{AP_{xy}}\right|}\,. \tag{5}$$

Из выражений (4) и (5) получаем $z_c = \left|\dfrac{(x_c - x_0)\operatorname{tg}\varepsilon}{\cos\beta}\right|$ или в более общем случае (если ПП лежит не в горизонтальной плоскости, а имеет координаты $A(x_0, y_0, z_0)$):

$$z_c = \left|\frac{(x_c - x_0)\operatorname{tg}\varepsilon}{\cos\beta}\right| + z_0\,. \tag{6}$$

Пусть координата x_c равна некоторому неизвестному параметру $t \in R$. Тогда, подставив $x_c = t$ в формулы (3) и (6), придем к системе

$$\begin{cases} x_c = t, \\ y_c = (t - x_0)\operatorname{tg}\beta + y_0, \\ z_c = \left|\dfrac{(t - x_0)\operatorname{tg}\varepsilon}{\cos\beta}\right| + z_0. \end{cases} \tag{7}$$

Выражение (7) представляет собой систему уравнений, связывающую координаты искомой точки $P(x_c, y_c, z_c)$ с исходными данными задачи, и является ее математической моделью для отдельного ПП. Условия (1) и (2) обеспечивают корректность построенной модели, однако, они не всегда выполнимы.

Пусть имеется n приемных пунктов, расположенных в точках $A_i(x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \ldots, n$, каждый из которых регистрирует азимут $\beta_i \neq \dfrac{\pi}{2} + \pi m$ и угол места $\varepsilon_i \neq \dfrac{\pi}{2} + \pi k$, $k, m \in Z$ (см. условия (1)-(2)) по излучению ИРИ, находящегося в точке $P(x_c, y_c, z_c)$ с неизвестными координатами.

Тогда для каждого из них можно составить систему вида (7). В результате получим однопараметрическое множество (ОМ) точек

$$P_i(t) = \left(t, (t - x_i)\operatorname{tg}\beta_i + y_i, \left|\frac{(t - x_i)\operatorname{tg}\varepsilon_i}{\cos\beta_i}\right| + z_i\right). \tag{8}$$

При фиксированном i и различных значениях параметра $t \in R$ точки $P_i(t)$ лежат на прямой $l_i = A_iP$ в силу построения множества (8). Все эти прямые, очевидно, пересекаются в точке P (рис. 4), поэтому $P = \bigcap_{i=1}^{n} l_i$ или $P \in P_i(t)$.

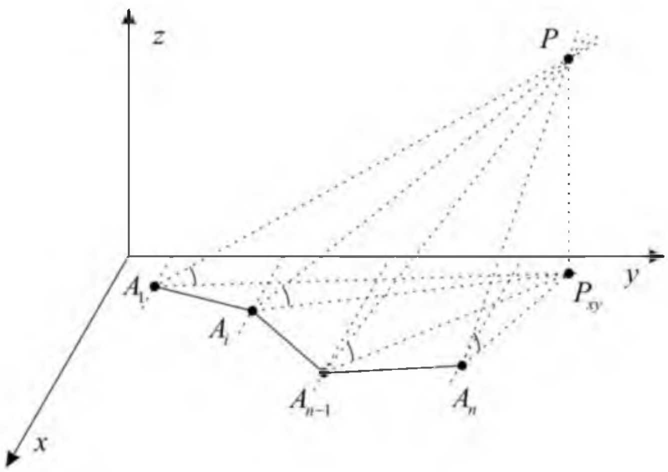

Рис. 4. Моделирование нескольких приемных пунктов

Тогда существует такое значение параметра $t = t_c$, при котором $P = P_i(t_c)$. Найдем его из равенства

$$P_i(t_c) = P_j(t_c), \tag{9}$$

где $i, j = 1, 2, \ldots, n, i \neq j$.

Исходя из определения (8), приравняем соответствующие координаты точек $P_i(t_c)$ и $P_j(t_c)$. Тогда равенство (8) запишется в эквивалентном виде

$$\begin{cases} t_c = t_c \\ (t_c - x_i)\operatorname{tg}\beta_i + y_i = (t_c - x_j)\operatorname{tg}\beta_j + y_j \\ \left|\dfrac{(t_c - x_i)\operatorname{tg}\varepsilon_i}{\cos\beta_i}\right| + z_i = \left|\dfrac{(t_c - x_j)\operatorname{tg}\varepsilon_j}{\cos\beta_j}\right| + z_j \end{cases} \tag{10}$$

Выразив параметр t_c из второго уравнения системы (10), получим

$$t_c = \frac{x_i \operatorname{tg}\beta_i - x_j \operatorname{tg}\beta_j + y_j - y_i}{\operatorname{tg}\beta_i - \operatorname{tg}\beta_j}. \tag{11}$$

Отметим, что это выражение имеет смысл при выполнении условий (1)-(2), а требование $\operatorname{tg}\beta_i - \operatorname{tg}\beta_j \neq 0$ удовлетворяется при $i \neq j$, так как при точных измерениях с различных точек (объекта) наблюдается под разными азимутами без учета периода.

Учитывая, что $P = P_i(t_c)$, подставим значение t_c, найденное по формуле (11), в однопараметрическое множество (8). В результате получим точку пересечения всех прямых A_iP, т.е. искомые координаты ИРИ:

$$P = (t_c, (t_c - x_i)\operatorname{tg}\beta_i + y_i, \left|\frac{(t_c - x_i)\operatorname{tg}\varepsilon_i}{\cos\beta_i}\right| + z_i). \tag{12}$$

Таким образом, построенная однопараметрическая модель (11)-(12) позволяет определить координаты ИРИ в ПСК при наличии $n > 1$ приемных пунктов и выполнении условий (1)-(2) на всех ПП. При нарушении условия (1) уравнения (7) заменим системой. В этом случае получим

$$t_c = \frac{y_i \operatorname{tg}\varepsilon_i - y_j \operatorname{tg}\varepsilon_j + z_j - z_i}{\operatorname{tg}\varepsilon_i - \operatorname{tg}\varepsilon_j}, \tag{13}$$

$$P = (x_0, t_c, |(t_c - y_i)\operatorname{tg}\varepsilon_i + z_i|). \tag{14}$$

И наконец, при нарушении (2), использовав систему (9), будем иметь

$$t_c = t_i, \tag{15}$$

$$P = (x_0, y_0, |t_c|). \tag{16}$$

Формулы (11)-(16), которые являются решением задачи определения местоположения ИРИ, получены в предположении, что азимуты β_i и углы места ε_i на каждом приемном пункте A_i измерены точно.

Данный метод устраняет феномен появления ложных объектов, путем построения однопараметрического множества тем самым получить искомую точку, в нашем случае, объект.

Вывод

Предложенная математическая модель, устранения феномена ложных пересечений, определенный пассивной радиолокацией, устраняет данный недостаток путем введения однопараметрического множества. Данная модель сравнивался с моделью **отождествления измерений**. Приведенная математическая модель в статье оказалась более эффективной и с точки зрения вычислительной сложности, более простой.

Список литературы

1. Алмазов В.Б. Методы пассивной радиолокации / В.Б. Алмазов. – Издательство Военной инженерной радиотехнической ордена отечественной войны академии противовоздушной обороны имени маршала Советского союза Говорова Л.А., 1974. – 85 с.

2. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

3. Ширяев А.Н. Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений / А.Н. Ширяев. – М.: ФМОП, МЦНМО, 2011. – 144 с.

4. Быстров Р.П., Загорин Г.К., Соколов А.В., Федорова Л.В. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / Монография. Под ред. Р.П. Быстров, А.В. Соколов – М.: Радотехника, 2008. – 320 с.

5. Травин Г.А., Горюнов В.В., Суровцев В.И., Перепелкин И.Н. Пеленгование и распознавание сложных дискретно-кодированных (шумоподобных) сигналов малозаметных РЛС на основе применения компьютерных технологий // Научные ведомости БелГУ: компьютерное моделирование – Б.: Белгородский государственный университет, 2012 г. No13(132)2012. Выпуск 23/1 – с. 123-127

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE SPATIAL COORDINATES BY PASSIVE RADAR

N.I. KORSUNOV
D.V. EGOROV

Belgorod State National Research University

e-mail:
korsunov@bsu.edu.ru
507181@bsu.edu.ru

This article describes the steps and presents the results of the algorithm for determining the spatial coordinates of radio sources based on goniometric direction finding method and the method of one-parameter sets.

Keywords: goniometric algorithm, methods for determining the coordinates , range, collection point , passive radar.