

УДК 621.396.96

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ РАССТОЯНИЙ ДО ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА В ПРОСВЕТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С РАЗНЕСЁННЫМ ПРИЁМОМ

А. Н. Ковалёв, Ф. Н. Ковалёв*

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия

Рассматривается метод определения разности расстояний от приёмных антенн до движущегося объекта в системах, основанных на наблюдении рассеянного вперёд поля. Метод может использоваться в задаче определения местоположения объекта в просветных радиолокаторах с несколькими приёмниками.

В просветных системах используется явление увеличения интенсивности рассеянного объектом излучения, наблюдаемое при малых углах дифракции. Сложность снижения мощности рассеянного вперёд поля с помощью радиопоглощающих покрытий [1] делает особенно привлекательными просветные радары для обнаружения объектов, выполненных по технологии Stealth.

Одним из направлений развития просветных радиолокационных систем является использование нескольких разнесённых в пространстве синхронизированных по времени приёмников, в которых осуществляется одновременное наблюдение рассеянного поля, а оценка координат производится только по измерениям доплеровских смещений [2]. В настоящей работе для подобных систем предлагается метод оценки разности расстояний от приёмников до объекта и созданный на его основе подход к определению местоположения объекта в простейшем доплеровском радиолокаторе с двумя приёмниками.

Разнесённые приёмники используются и в просветных гидролокаторах с учётом специфики их работы (см., например, [3]).

Сущность метода удобно рассмотреть на схеме двухкоординатного просветного радиолокатора, представленной на рис. 1. Элементы радиолокатора (передатчик, объект, приёмники) расположены на плоскости Oxy . Начало координат совмещено с серединой отрезка $[Pr_1, Pr_2]$, соединяющего пункты приёма Pr_1 и Pr_2 , n — нормаль к нему, b — его длина, γ — угол между нормалью и направлением на объект из точки O , ε — угол между нормалью и направлением на передатчик. Передатчик Π размещён на оси Ox на расстоянии a от точки O . Длины отрезков $[Pr_1, \Pi]$ и $[Pr_2, \Pi]$ между приёмниками и передатчиком равны a_1 и a_2 ; $\{a_1, a_2\} \gg b$. Объект движется со скоростью v , пересекая под углом ψ ось Ox в точке $(x_T, 0)$. Величина v мала по сравнению со скоростью радиоволн. На рис. 1 также обозначены $r_{пр}$, $r_{пр1}$, $r_{пр2}$ — расстояния от объекта до точки O и до приёмников и r_n — расстояние от объекта до передатчика.

Предполагается, что в радиолокаторе используются приёмники с амплитудным детектированием суммарного колебания, образуемого в результате интерференции мощной радиоволны, излучённой передатчиком, и радиоволны, рассеянной на объекте [4, 5], а оценка координат производится по измерениям доплеровских смещений частоты [2]

$$f_i(t) = -\frac{1}{\lambda} \frac{dl_i(t)}{dt}, \quad (1)$$

* kovalev@nntu.nnov.ru

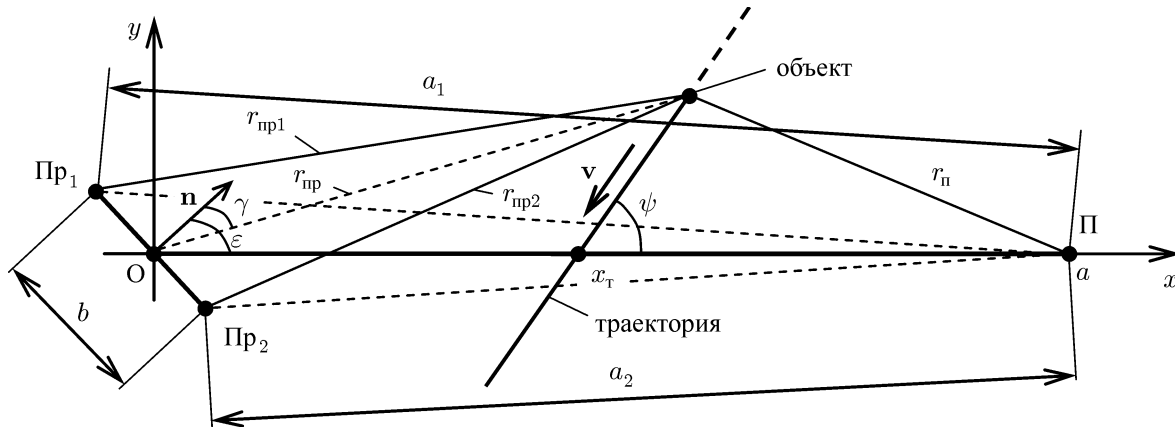


Рис. 1. Схема просветной радиолокационной системы с двумя приёмниками

где i — номер приёмника, $i = 1, 2$, $l_i(t) = r_{\Pi}(t) + r_{\text{пр}i}(t)$ — суммарная дальность объекта до передатчика и до i -го приёмника, t — время, λ — длина волны излучения.

Величину смещения $|f_i|$ определяют по значению частоты продетектированного сигнала в i -м приёмнике, а знак смещения — по знаку приращения частоты. Уменьшение частоты во времени является следствием приближения объекта к отрезку $[\text{Пр}_i, \Pi]$, т. е. доплеровское смещение положительно ($f_i > 0$), а увеличение частоты продетектированного сигнала — следствием удаления от этого отрезка ($f_i < 0$).

Интегрирование (1) позволяет получить суммарные дальности

$$l_i(t) = l_i(t_{\text{н}i}) - \lambda \int_{t_{\text{н}i}}^t f_i(t) dt, \quad (2)$$

где $l_i(t_{\text{н}i})$ — начальное значение суммарной дальности для i -го приёмника в момент $t_{\text{н}i}$ начала интегрирования.

В качестве значений $l_i(t_{\text{н}i})$ можно взять длины a_i , а соответствующие им моменты времени $t_{\text{н}i}$ — моменты пересечения объектом отрезков $[\text{Пр}_i, \Pi]$ — находить из условий $f_i(t_{\text{н}i}) = 0$ [6, 7]. С учётом этого формула (2) принимает вид

$$l_i(t) = a_i - \lambda \int_{t_{\text{н}i}}^t f_i(t) dt \quad (3)$$

Тогда разность расстояний от приёмников до объекта можно определить по измерениям доплеровских смещений с помощью формулы

$$\Delta r = r_{\text{пр}2} - r_{\text{пр}1} = l_2 - l_1 = a_2 - a_1 + \lambda \int_{t_{\text{н}1}}^t f_1(t) dt - \lambda \int_{t_{\text{н}2}}^t f_2(t) dt. \quad (4)$$

Эффективность использования (4) для определения разности расстояний до объекта оценивалась методом математического моделирования.

На рис. 2 линиями 1 показаны найденные по результатам 1 000 экспериментов оценки математического ожидания $m_{\Delta r}(t)$ и среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\Delta r}(t)$ ошибки определения

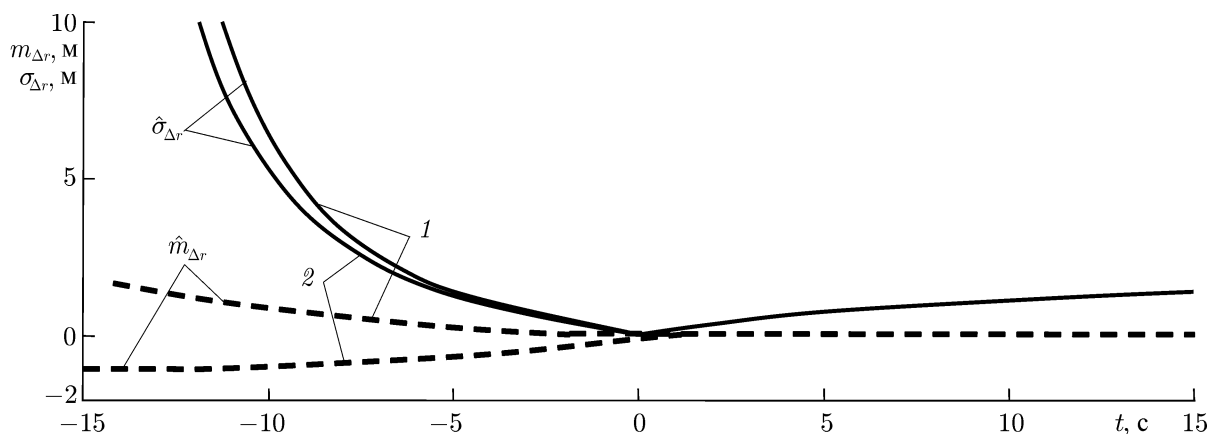


Рис. 2. Математическое ожидание $m_{\Delta r}(t)$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\Delta r}(t)$ ошибки определения разности расстояний до объекта

разности расстояний до объекта, движущегося со скоростью $v = 200$ м/с по линейной траектории с параметрами $\psi = 100^\circ$ и $x_T = 15$ км. Кривые 2 рассчитаны для траектории с $\psi = 70^\circ$ и $x_T = 30$ км. Траектории объекта изображены пунктиром на рис. 3. Система имела следующие параметры (рис. 1): $a = 40$ км, $b = 300$ м, $\lambda = 1$ м, $\varepsilon = 0^\circ$. Зона действия радиолокационной системы условно была ограничена значениями ординаты $y = \pm 3$ км, причём предполагалось, что время наблюдения за объектом, определяемое угловым диапазоном повышенного рассеянного излучения (см. начало статьи), превышает 30 с. Оценки частоты в приёмниках задавались независимо с интервалом $T = 1$ с; среднеквадратичное отклонение измерений частоты бралось неизменным: $\sigma_f = 0,25$ Гц; смещение оценок частоты отсутствовало. На рис. 2 и далее значок « $\wedge$ » обозначает оценку стоящей под ним величины. Время $t = 0$ принято равным моменту пересечения объектом оси Ox .

На начальных участках траекторий — до пересечения объектом отрезков [Пр₁, П] и [Пр₂, П] — непосредственное использование (4) затруднительно, поскольку не известны ни моменты t_{n1} и t_{n2} , ни зависимости $f_1(t)$ и $f_2(t)$ на интервалах от текущего времени t до моментов t_{n1} и t_{n2} . Формирование оценок $\Delta \hat{r}$ на этих участках осуществлялось экстраполированием зависимостей $\hat{f}_1(t)$ и $\hat{f}_2(t)$. Для экстраполяции использовались полиномы первой степени, что связано с квазилинейным характером функций $f_1(t)$ и $f_2(t)$ для объектов, движущихся равномерно поперёк отрезков [Пр₁, П] и [Пр₂, П] [2], т. е. для наиболее часто рассматриваемых в просветной радиолокации целей [4, 5]. Коэффициенты полиномов находились методом наименьших квадратов по поступившим оценкам доплеровских смещений. Начиная с десятого измерения в каждом приёмнике использовались последние десять оценок. Величину погрешности за счёт экстраполяции ($t < t_{n1}, t_{n2}$), отражают графики $\hat{m}_{\Delta r}$ на рис. 2.

После пересечения объектом отрезков [Пр₁, П] и [Пр₂, П] (при $t > \hat{t}_{n1}, \hat{t}_{n2}$) значение Δr оценивалось с помощью формулы (4) путём дискретного интегрирования оценок частоты. Моменты $\hat{t}_{n1}$, $\hat{t}_{n2}$ определялись по линейным аппроксимирующим зависимостям, которые строились методом наименьших квадратов по нескольким оценкам доплеровского смещения частоты в окрестности его нулевого значения. Полученные таким образом оценки $\Delta \hat{r}$ характеризуются графиками на рис. 2 в области $t > 0$. В этой области при большом числе измерений дисперсия ошибок $\sigma_{\Delta r}^2$ описывается формулой, получаемой из (4) для дискретной модели измерений при малых σ_f :

$$\sigma_{\Delta r}^2(NT) = 2N\lambda^2 T^2 \sigma_f^2, \quad (5)$$

где N — число измерений частоты в каждом из приёмников Пр_1 и Пр_2 после пересечения отрезков $[\text{Пр}_1, \Pi]$ и $[\text{Пр}_2, \Pi]$.

Полученную оценку $\Delta \hat{r}(t)$ можно далее использовать для определения координат и других характеристик движения лоцируемых объектов. Так, в рассматриваемой системе с передатчиком и двумя приёмниками, показанной на рис. 1, местоположение объекта находится, например, по пресечению гиперболы $\Delta r = \text{const}$ с фокусами в пунктах Пр_1 и Пр_2 и эллипса $l_1 = \text{const}$ с фокусами в пунктах Пр_1 и Π . Дальность $l_1(t)$ оценивается с помощью (3). Как альтернативу обозначенному эллипсу можно взять эллипс $l_2 = \text{const}$ с фокусами в пунктах Пр_2 и Π .

В случае не слишком малых расстояний $r_{\text{пр}1}$ и $r_{\text{пр}2}$ задача определения координат объектов существенно упрощается. Тогда гиперболу удобно заменить лучом, исходящим из центра отрезка $[\text{Пр}_1, \text{Пр}_2]$ под углом γ к нормали $\mathbf{n}$ (рис. 1):

$$\sin \gamma(t) = \frac{\Delta r(t)}{b} = \frac{1}{b} \left[a_2 - a_1 + \lambda \int_{t_{\text{н}1}}^t f_1(t) dt - \lambda \int_{t_{\text{н}2}}^t f_2(t) dt \right], \quad (6)$$

а местоопределение можно свести к нахождению точки пересечения луча и эллипса [7, 8].

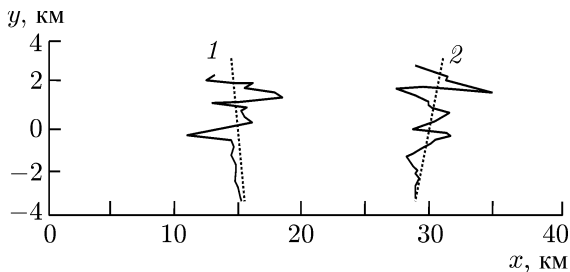


Рис. 3. Траектории объекта и результаты их восстановления

На рис. 3 сплошными линиями показаны результаты двух численных экспериментов по определению местоположения объекта с использованием (3) и (6) (местоположение определялось по пересечению эллипса $l_1 = \text{const}$ и луча, заданного углом γ). Параметры системы и движения лоцируемого объекта (пунктирные линии) заданы выше. До моментов времени $t_{\text{н}1}$, $t_{\text{н}2}$ оценки суммарной дальности l_1 и угла γ производились, как и раньше, по экстраполированным зависимостям доплеровского смещения. При числе измерений

в каждом из приёмников меньшем четырёх, ввиду больших погрешностей определения l_1 и Δr (рис. 2), координаты объекта не вычислялись.

На рис. 4 приведены графики математического ожидания $m_x(t)$ и среднеквадратичного отклонения $\sigma_x(t)$ ошибки определения координаты x объекта для двух рассматриваемых на рис. 3 траекторий (отмечены цифрами 1 и 2). Графики 1 и 2 построены по результатам 1 000 экспериментов.

Из приведённых на рис. 4 графиков видно, что к моменту выхода объекта из зоны действия радиолокационной системы среднеквадратичное отклонение ошибки определения координаты x для обеих траекторий не превосходило 1 000 м; ошибки определения координаты y были существенно меньше ошибок x , и их характеристики не приводятся.

Худшую точность определения координат в случае перемещения объекта по траектории 2 в сравнении с траекторией 1 можно объяснить уменьшением угла между линиями положения (лучом и эллипсом) для 2-й траектории [8].

К почти таким же, как на рис. 3 и 4, результатам приводил и подход к оценке местоположения объекта, основанный на предварительном вычислении среднеарифметического значения смещений частот f_1 и f_2 ,

$$f_0(t) = [f_1(t) + f_2(t)]/2,$$

и последующем вычислении суммарной дальности $l = r_{\text{п}} + r_{\text{пр}}$ из (3) при условии $a_i = a$ и $t_{\text{н}i} = t_0$, $f_0(t_0) = 0$. В этом случае местоположение объекта находится по пересечению луча, исходящего из

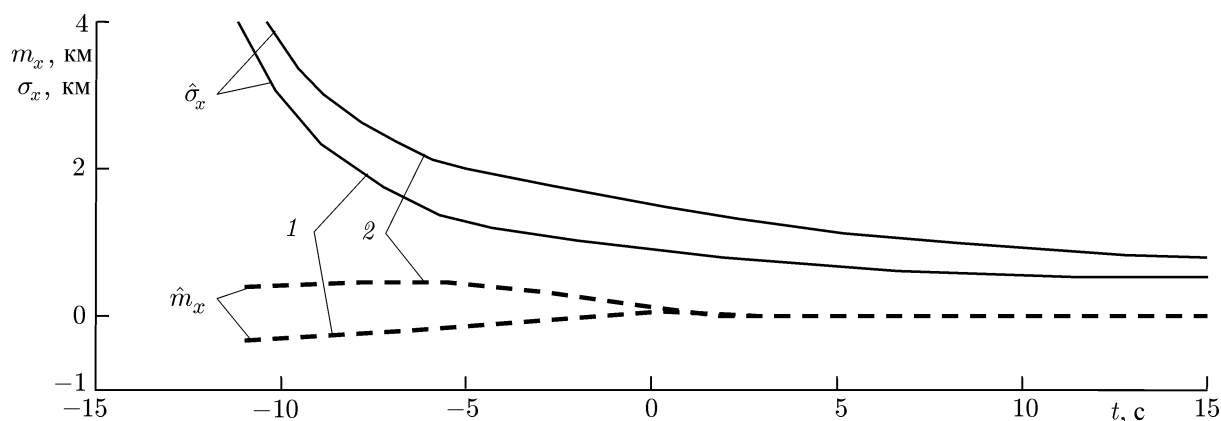


Рис. 4. Математическое ожидание $m_x(t)$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma_x(t)$ ошибки определения координаты x объекта

точки О под углом $\alpha = \gamma - \varepsilon$ (ε задан, γ находится из (6)), и эллипса с фокусами в точках О и П. Формулы для вычисления координат здесь несложно получить из рассмотрения треугольника с вершинами в точке О и местах размещения передатчика и объекта:

$$x = \frac{l^2 - a^2}{2(l - a \cos \alpha)} \cos \alpha, \quad y = \frac{l^2 - a^2}{2(l - a \cos \alpha)} \sin \alpha.$$

Таким образом, формулы (4) и (6) позволяют оперативно оценивать разность расстояний от приёмных пунктов до объекта и направление на объект в просветной системе по измерениям доплеровских смещений частот принимаемых сигналов. Выражение (5) характеризует точность получаемых оценок.

Рассмотренный подход можно положить в основу позиционных методов оценки местоположения объектов в просветных системах, например разностно-дальномерного или пеленгационного методов. Использование этих методов возможно при увеличении числа приёмников и основано на местопределении по пересечению двух линий положений — гипербол или лучей. Кроме этого данный подход дополняет возможные способы измерения угловых координат объектов в просветных радиолокаторах с использованием оценок доплеровского смещения частоты в разнесённых приёмниках [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уфимцев П. Я. // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34, № 12. С. 2519.
2. Ковалёв Ф. Н. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 3. С. 331.
3. Зверев В. А., Коротин П. И., Матвеев А. Л. // Акустический журнал. 2001. Т. 47, № 2. С. 227.
4. Бляхман А. Б., Рунова И. А. // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 4. С. 424.
5. Саблин В. Н., Чапурский В. В., Шейко А. П. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 2. С. 184.
6. Пат. 2133480 РФ. Радиолокационный способ определения параметров движения объекта / А. Б. Бляхман, А. В. Самарин. Заявл. 02.02.1998; Опубл. 20.07.1999.
7. Бляхман А. Б., Ковалёв Ф. Н., Рындык А. Г. // Радиотехника. 2001. № 1. С. 4.
8. Ковалёв А. Н., Ковалёв Ф. Н. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2014. Т. 57, № 3. С. 3.
9. Ковалёв Ф. Н., Кондратьев В. В. // Докл. АН. 2014. Т. 455, № 4. С. 401.

Поступила в редакцию 11 июня 2013 г.; принята в печать 14 июля 2014 г.

**DETERMINATION OF THE DIFFERENCE OF THE DISTANCE TO A MOVING
OBJECT IN THE FORWARD-SCATTERING RADAR SYSTEMS
WITH DIVERSITY RECEPTION**

A. N. Kovalev and F. N. Kovalev

We consider the method for determining the difference of the distances from the receiving antennas to a moving object in the systems based on the observation of a forward-scattered field. The method can be used for determining the object location in the forward-scattering radars with several receivers.