

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.396.96

А.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ В ПРОСВЕТНЫХ РАДИОЛОКАТОРАХ С РАЗНЕСЕННЫМ ПРИЕМОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Разработка методов и средств радиопеленгации в системах радиолокации на просвет.

Методология / подход: Проводится теоретический анализ возможности использования доплеровской частоты для определения угловых координат цели. Основные выводы подтверждены численными экспериментами.

Результаты: Предложен способ определения угловых координат цели по измерениям доплеровских частот в двух разнесенных приемниках просветной радиолокационной системы. В основу способа положено интегрирование измерений доплеровских частот. Точность определения угловых координат оценена на численной модели и с помощью приближенных теоретических соотношений.

Применение: Многопозиционная и просветная радиолокация.

Оригинальность / значение: Предложенный способ облегчает поиск местоположения лоцируемых объектов в просветных радиолокационных системах с несколькими приемниками и (или) передатчиками.

Ключевые слова: способ радиопеленгации, просветная радиолокация, многопозиционная радиолокационная система, доплеровская частота.

В просветных радиолокационных системах (РЛС) используется явление увеличения интенсивности рассеянного излучения при нахождении цели между передатчиком и приемником. Такие системы способны успешно обнаруживать Stealth-объекты и малоразмерные низколетающие цели [1, 2].

Относительно легко решается задача построения просветных РЛС с монохроматическим излучением и измерениями доплеровской частоты рассеянного сигнала [3,4]. В них используются приемники с амплитудным детектированием суммарного колебания, образуемого в результате интерференции радиоволны, рассеянной на лоцируемом объекте, и более мощной радиоволны, излученной передатчиком.

В настоящей работе предложен способ определения угловых координат цели по измерениям доплеровских частот в синхронизованных по времени разнесенных приемниках просветной РЛС и рассмотрено его применение для оценки местоположения.

На рис. 1 показана схема простейшей просветной многопозиционной РЛС на плоскости. Система состоит из передатчика (П), расположенного на оси Ox в точке $(a, 0)$, и двух приемников $Пр_1$ и $Пр_2$, удаленных друг от друга на расстояние b , $a \gg b$. Центр отрезка между приемниками помещен в начало прямоугольной системы координат xOy ; ε – угол между нормалью \vec{n} к отрезку и осью Ox . a_1, a_2 – расстояния между передатчиком и приемниками $Пр_1$ и $Пр_2$ соответственно; r_n – расстояние от передатчика до цели; $r_{пр1}, r_{пр2}$ – расстояния от цели до приемников. Цель движется в плоскости xOy со скоростью \vec{v} ; x_T – абсцисса точки пересечения траектории цели с осью Ox , $0 < x_T < a$; ψ – угол наклона траектории к оси Ox ; φ – направление на цель из начала координат относительно нормали \vec{n} .

Доплеровские частоты рассеянного на лоцируемом объекте сигнала в приемных пунктах Пр_1 , Пр_2 выражаются в виде [4,5]

$$f_1(t) = -\frac{1}{\lambda} \frac{dl_1(t)}{dt}, \quad (1)$$

$$f_2(t) = -\frac{1}{\lambda} \frac{dl_2(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $l_1(t) = r_n(t) + r_{\text{пр}1}(t)$, $l_2(t) = r_n(t) + r_{\text{пр}2}(t)$, t – время, λ – длина волны излучения передатчика.

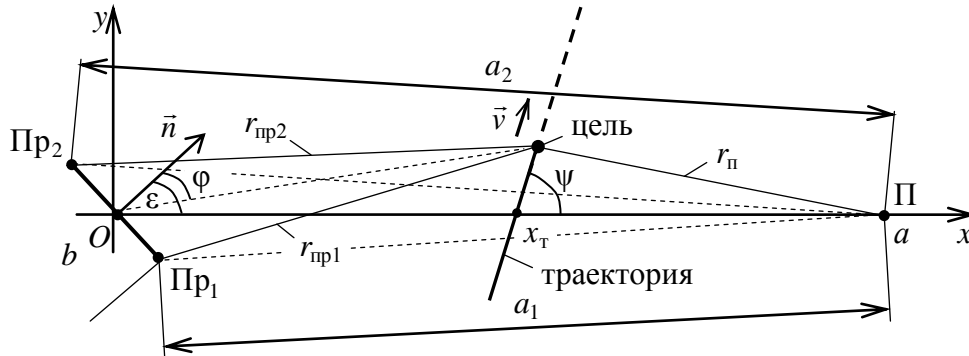


Рис. 1. Схема прозветной трехпозиционной РЛС

Интегрирование $f_1(t)$, $f_2(t)$ позволяет определять суммарные дальности l_1 , l_2 в произвольный момент времени t . Так, из (1) следует:

$$l_1(t) = l_1(t_n) - \lambda \int_{t_n}^t f_1(t) dt, \quad (3)$$

где $l_1(t_n)$ – значение дальности l_1 в момент t_n начала интегрирования.

Поскольку в момент $t_{\text{п}1}$ пересечения целью отрезка, соединяющего передатчик с приемником Пр_1 , доплеровская частота $f_1(t)$ переходит нулевой уровень

$$f_1(t_{\text{п}1}) = 0, \quad (4)$$

то в качестве начального значения суммарной дальности l_1 можно взять длину a_1 , а соответствующий ему момент времени $t_{\text{п}1}$ находить из условия (4) [3,4,5]. С учетом этого формула (3) принимает вид

$$l_1(t) = a_1 - \lambda \int_{t_{\text{п}1}}^t f_1(t) dt. \quad (5)$$

Аналогичным образом из (2) можно найти суммарную дальность $l_2(t)$:

$$l_2(t) = a_2 - \lambda \int_{t_{\text{п}2}}^t f_2(t) dt, \quad (6)$$

где момент $t_{\text{п}2}$ пересечения целью отрезка между передатчиком и приемником Пр_2 находится из условия $f_2(t_{\text{п}2}) = 0$.

Если расстояния $r_{\text{пр}1}$, $r_{\text{пр}2}$ в несколько раз превышают длину отрезка b между приемниками (рис. 1), то разность (5) и (6) позволяет определить направление на цель $\varphi(t)$ по значениям доплеровских частот $f_1(t)$ и $f_2(t)$:

$$\sin \varphi(t) = \frac{\Delta r(t)}{b}, \quad \Delta r(t) = r_{\text{пп1}}(t) - r_{\text{пп2}}(t) = l_1(t) - l_2(t),$$

$$\sin \varphi(t) = \frac{\Delta r(t)}{b} = \frac{1}{b} \left\{ a_1 - a_2 - \lambda \int_{t_{\text{п1}}}^t f_1(t) dt + \lambda \int_{t_{\text{п2}}}^t f_2(t) dt \right\}. \quad (7)$$

Точность определения угла φ по (7) исследовалась методом математического моделирования. Рассмотрена модель одновременных измерений доплеровских частот в приемниках, выполняемых с интервалом времени T . Ошибки измерений – независимые, дисперсия ошибок – одинаковая и не меняется со временем, $\sigma_f^2 = \text{const}$; смещение оценок частот отсутствует.

На рис. 2, 3 представлены вычисленные по результатам 1000 экспериментов оценки математического ожидания m_φ (штриховые линии) и среднеквадратичного отклонения σ_φ (сплошные линии) ошибок определения угла φ по (7) в зависимости от его фактической величины для системы с параметрами $a=40\text{км}$, $b=300\text{ м}$, $\varepsilon=0^\circ$, $\lambda=1\text{ м}$, $\sigma_f=0,25\text{ Гц}$, $T=1\text{ с}$. Цель двигалась равномерно со скоростью $v=200\text{ м/с}$ по прямолинейной траектории под углом $\psi=90^\circ$ и пресекала ось Ox в точке с абсциссой $x_\tau=10\text{ км}$ (рис. 2), $x_\tau=30\text{ км}$ (рис. 3). Обе траектории показаны на рис. 4 пунктиром. Зона действия РЛС условно ограничивалась значениями ординаты $|y|<3\text{ км}$; наблюдение цели в обоих случаях начиналось в момент $t=t_0=0$, когда цель имела координату $y_0=-3\text{ км}$.

На начальных участках траектории – до моментов времени $t_{\text{п1}}$ и $t_{\text{п2}}$ – непосредственное использование (7) затруднительно, поскольку не известны ни моменты $t_{\text{п1}}$ и $t_{\text{п2}}$, ни зависимости $f_1(t)$ и $f_2(t)$ на интервалах от текущего времени t до моментов $t_{\text{п1}}$ и $t_{\text{п2}}$. Оценка угла $\varphi(t)$ здесь осуществлялась интегрированием экстраполирующих измерения частоты полиномов первой степени:

$$f_1^{\text{э}}(t) = c_{01} + c_{11}t, \quad f_2^{\text{э}}(t) = c_{02} + c_{12}t. \quad (8)$$

Такой подход обусловлен квазилинейным изменением доплеровской частоты в случае равномерного движения цели поперек отрезка, соединяющего передатчик с приемником [4].

Коэффициенты полиномов c_{0j} и c_{1j} , $j=\overline{1,2}$, вычислялись по $N=10$ измерениям доплеровских частот методом наименьших квадратов:

$$\vec{c}_j = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \hat{f}_j,$$

где \vec{c}_j – вектор коэффициентов j -го полинома; \hat{f}_j – N -мерный вектор измерений доплеровской частоты в j -м приемнике; \mathbf{P} – матрица временных отсчетов;

$$\vec{c}_j = \begin{bmatrix} c_{0j} \\ c_{1j} \end{bmatrix}, \quad \hat{f}_j = \begin{bmatrix} \hat{f}_j(t_{n-N+1}) \\ \hat{f}_j(t_{n-N+2}) \\ \vdots \\ \hat{f}_j(t_n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & t_{n-N+1} \\ 1 & t_{n-N+2} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_n \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$t_n = t = (n-1)T$ – текущий момент наблюдения, n – количество измерений. Знак $\hat{}$ означает оценку величины; T – знак транспонирования.

В начале наблюдения, когда $n < N$, в экспериментах использовались все имеющиеся измерения, и в (9) принималось $N = n$. Моменты $t_{\text{п1}}$ и $t_{\text{п2}}$ вычислялись, исходя из условий $f_1^{\text{э}}(t) = 0$ и $f_2^{\text{э}}(t) = 0$, по формулам:

$$\hat{t}_{\text{п1}} = -\frac{c_{01}}{c_{11}} \quad \text{и} \quad \hat{t}_{\text{п2}} = -\frac{c_{02}}{c_{12}}. \quad (10)$$

Величину погрешности за счет экстраполяции для рассмотренных случаев отражают графики m_φ на рис. 2, 3 (область углов $\varphi < 0$).

После моментов $t_{п1}, t_{п2}$ – когда цель пересекала отрезки между передатчиком и приемниками – угол φ определялся по (7) путем дискретного интегрирования измеренных доплеровских частот. Моменты $t_{п1}, t_{п2}$ находились по нескольким измерениям частот в окрестности их нулевых значений как момент времени, в который зависимости, аппроксимирующие измерения частоты, обращались в нуль. Для аппроксимации также использовались полиномы первой степени (см. (8) ÷ (10)).

Из приведенных графиков видно, что точность оценки угла ухудшается по мере удаления цели от оси Ox (область углов $\varphi > 0$), что обусловлено увеличением числа суммируемых случайных слагаемых в (7).

В этой области для рассмотренных траекторий в системе с $\varepsilon = 0^\circ$ и малыми значениями φ , точность оценки угла φ совпала с теоретической точностью, получаемой из (7) для дискретной модели измерений при малых σ_f :

$$\sigma_{\varphi, \text{теор}}^2(\tau) = \frac{2M\lambda^2 T^2 \sigma_f^2}{b^2}, \tag{11}$$

где M – число пар измерений частоты в системе после пересечения целью отрезков, соединяющих передатчик с приемниками; предполагается $M \gg 1, t_{п1} \approx t_{п2}, \tau = t - t_{п2} = MT$. Значению дисперсии по (11) соответствует направление на цель $\varphi(\tau) = \arctg(y(\tau)/x(\tau))$.

Из сравнения рис. 2 и 3 легко видеть заметную разницу в относительной точности измерения угла для рассмотренных случаев: при одном и том же значении φ ошибка измерения угла для траектории с $x_T = 10$ км намного меньше, чем для траектории с $x_T = 30$ км. Это связано с величиной изменения угла при одинаковом числе измерений доплеровской частоты. У траекторий, более удаленных от приемников, угол меняется меньше, и относительная точность его измерения будет хуже.

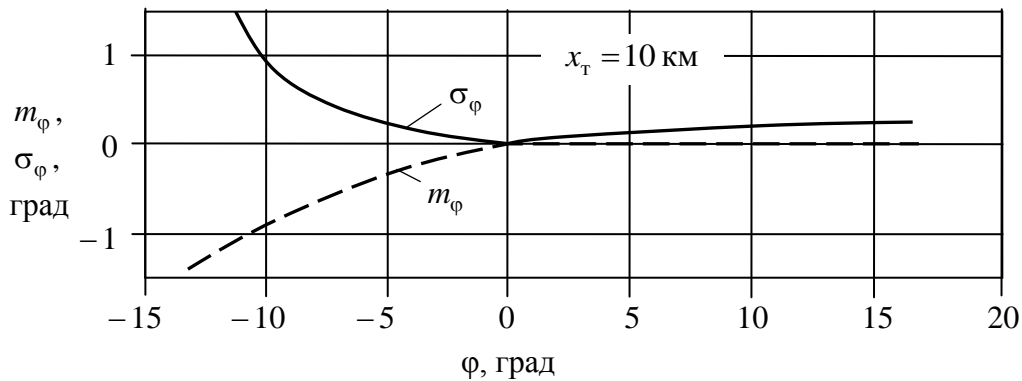


Рис. 2. Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение ошибок определения угла φ в зависимости от его фактического значения, построенные по результатам математического моделирования для траектории с параметрами $\Psi = 90^\circ, x_T = 10$ км

Полученные по (7) оценки направления на цель удобно далее использовать для определения текущих координат цели. Так, в рассматриваемой на рис. 1 системе с передатчиком и двумя приемниками местоположение цели находится по пересечению луча, задаваемого углом φ , и эллипса $l_1 = \text{const}$ с фокусами в пунктах Пр_1 и П . Дальность $l_1(t)$ оценивается по (5). Как альтернативу обозначенному эллипсу можно взять эллипс $l_2 = \text{const}$ с фокусами в

пунктах Пр₂ и П. Таким образом, удается свести задачу местоопределения к угломерно-дальномерному методу, используемому в бистатических радиолокаторах [6].

На рис. 4 сплошными линиями показаны результаты независимых экспериментов по определению местоположения цели по оценкам φ и суммарной дальности l_1 . Использование оценок суммарной дальности l_2 вместо l_1 не приводило к значимому изменению результатов. Параметры системы и траекторий (пунктирные линии) заданы ранее. На начальных участках траектории ($t < t_{п1}, t_{п2}$) оценки φ и l_1 определялись по экстраполированным значениям доплеровских частот в приемниках.

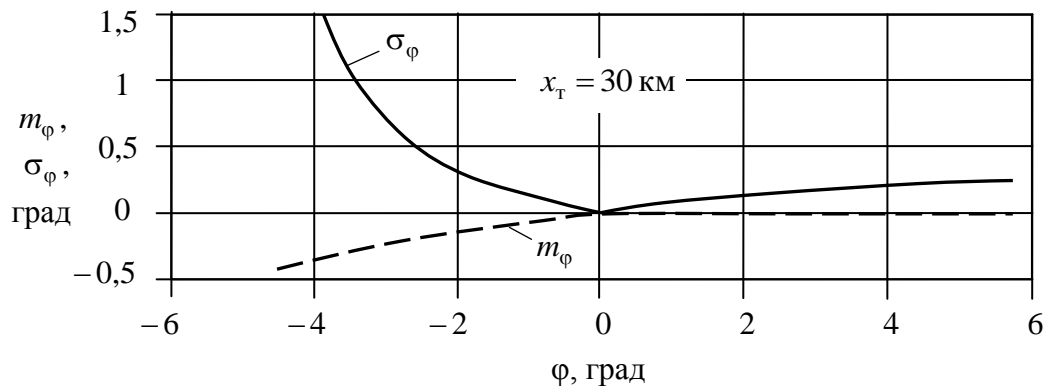


Рис. 3. Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение ошибок определения угла φ в зависимости от его фактического значения, построенные по результатам математического моделирования для траектории с параметрами $\psi = 90^\circ$, $x_T = 30$ км

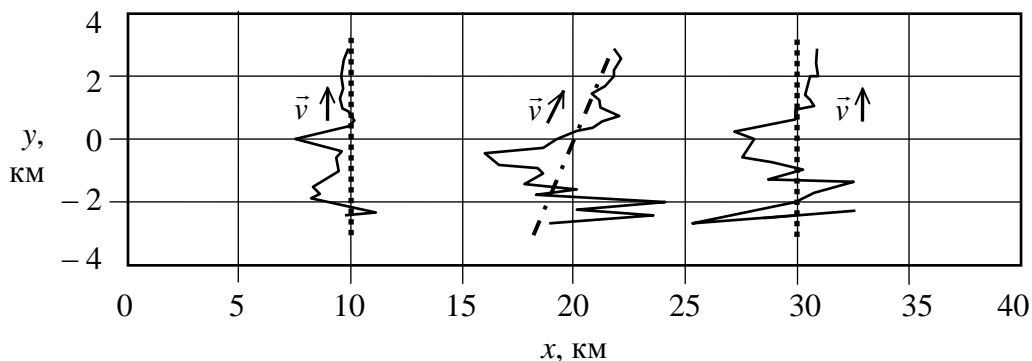


Рис. 4. Результаты определения местоположения цели в просветной трехпозиционной системе, изображенной на рис. 1

Кроме исследования траекторий, ортогональных оси Ox , проводились численные эксперименты и для цели, двигающейся под углом ψ , отличным от 90° . Так, на рис. 4 также сплошной линией отражен результат эксперимента для цели, двигающейся со скоростью $v = 200$ м/с по траектории с $x_T = 20$ км, $\psi = 60^\circ$ (штрих-пунктир). Как видно, система определяет координаты и в этом случае. К недостаткам использованного алгоритма следует однако отнести невысокую точность на начальных участках траектории. Это связано с увеличивающимся отличием законов изменения $f_1(t)$, $f_2(t)$ от линейного при отклонении ψ от 90° и увеличении расстояния между целью и осью Ox , что, в свою очередь, приводит к повышенным ошибкам из-за экстраполяции, особенно при малом числе измерений доплеровских частот.

Для исследованных траекторий точность оценки координаты x к моменту выхода цели

из зоны действия РЛС составляла $\sigma_x < 2$ км. Среднеквадратичное отклонение ошибки определения координаты y было значительно меньше $\sigma_y \ll \sigma_x$.

Заключение

Таким образом, по измерениям доплеровских частот в двух разнесенных приемниках просветной РЛС оценку направления на цель нетрудно найти по (7). Предложенный способ может использоваться и в системах с большим числом приемников, позволяя вычислять направление на цель относительно каждой пары близкорасположенных приемников. Совместно с [7] он расширяет возможности для оценки местоположения в многопозиционных радиолокаторах.

Интегрированием доплеровских частот можно определять угловое положение цели и относительно пары передатчиков. Построение систем с несколькими передатчиками должно предусматривать частотную или временную селекцию сигналов [8].

Библиографический список

1. Уфимцев, П.Я. Основы физической теории дифракции / П.Я. Уфимцев. – М.: БИНОМ, 2011. – 351 с.
2. Чапурский, В.В. Синтезированная теневая радиоголография в бистатической радиолокации // Радиотехника. 2009. № 3. С. 52–69.
3. Bistatic Radar. Principles and Practice / Ed. M. Cherniakov. – England: Wiley, 2007. – 504 p.
4. Ковалев, Ф.Н. Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением “на просвет” // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 331–339.
5. Ковалев, Ф.Н. Просветные многопозиционные радиолокационные системы на основе измерений доплеровской частоты // Труды НГТУ. 2011. Т. 78. № 3. С. 30–37.
6. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Сов. Радио, 1970. – 560 с.
7. Ковалев, Ф.Н. Интегральный доплеровский метод измерения угловых координат в просветных радиолокаторах // Труды 1-ой рос.-белорус. науч.-техн. конференции “Элементная база отечественной радиоэлектроники”, Нижний Новгород, 11-14 сентября 2013 г. – Н.Новгород: НГТУ, 2013. Т. 1. – С. 244–47.
8. Ковалев, Ф.Н. Организация когерентно-импульсного режима работы РЛС с обнаружением “на просвет” // Труды НГТУ. 2012. Т. 94. № 1. С. 20–25.

*Дата поступления
в редакцию 21.10.2013*

A.N. Kovalev, F.N. Kovalev

ESTIMATING THE ANGULAR COORDINATES OF MOVING TARGET IN FORWARD-SCATTERING MULTISTATIC RADARS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The research of methods and means for measuring angle in forward-scattering radars.

Methodology / approach: Theoretical analysis of the possibility of measuring the target angular coordinates from Doppler frequency is given. The main results are confirmed by a simulations experiment.

Findings: Method for estimating the target angular coordinates by measuring the Doppler frequencies in the two spaced apart receivers of forward-scattering radar system is proposed. The method is based on integrating the Doppler frequency measurements. Accuracy of angular coordinates estimated on a simulations model and by approximate theoretical relations.

Research limitations/implications: Multistatic and forward-scattering radar.

Originality/value: The proposed method simplifies finding a location of targets in forward-scattering radar systems with several transmitters and (or) receivers.

Key words: methods for measuring angle, forward-scattering radar, multistatic radar systems, Doppler frequency.