

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ СИСТЕМА СОПРОВОЖДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЦЕЛИ

Предлагается техническое решение по построению радиолокационной доплеровской радиотехнической системы микроволнового диапазона. Система состоит из радиолокатора подсвета цели непрерывного излучения и одного наземного вынесенного приемного пункта. Работа системы основана на совместном использовании доплеровского, амплитудного и фазового методов пеленгования. Система предназначена для определения географических координат, скорости и курса цели, а в ряде случаев также позволяет оценить высоту полета в процессе сопровождения цели. Преимуществом предложения является то, что земля почти не влияет на результаты пеленгования по углу места и погрешность пеленгования зависит только от погрешности фазометра и угла места цели.

Ключевые слова: радиолокационная радиотехническая система, угол места цели, методы пеленгования

Постановка задачи и анализ известных публикаций. Известные доплеровские радиолокаторы (РЛС) [1] используются для измерения радиальной скорости цели по доплеровской частоте принимаемых эхо-сигналов. Однако использовать их для определения угловых координат, дальности и высоты полета цели не всегда возможно.

Наземные двухкоординатные радиолокаторы микроволнового диапазона [1] измеряют азимут и дальность воздушных целей, но не могут измерять углы места. Для измерения углов места и высоты целей двухкоординатным РЛС обычно придаются наземные радиовысотомеры, которые используют амплитудный, фазовый (и т.п.) методы измерения угла места. Эти методы и принципы построения высотомеров подробно описаны в литературе [1-4].

Известный наземный амплитудный высотомер измеряет угол места по максимуму сигнала при сканировании (качании) его антенны по углу места [4]. Недостатком такого высотомера является то, что его антенна имеет большой вертикальный размер и эту антенну требуется качать по углу места.

Известный фазовый высотомер [2] измеряет угол места цели по сдвигу фаз сигналов в двух разнесенных по высоте антеннах. Недостатком такого высотомера является то, он не может измерять средние и малые углы места из-за неоднозначности измерения сдвига фаз

сигналов, которая вызвана влиянием земли [5]. Искажения фазы сигнала в двух разнесенных по высоте антеннах из-за влияния радиоволн, отраженных от земли, различны и это вызывает дополнительные погрешности измерения сдвига фаз сигналов в этих антеннах и приводит к неоднозначности измерения угла места по сдвигу фаз.

В связи с этим в настоящее время имеется необходимость совершенствовать радиолокационные системы и обеспечить возможность измерения географических координат, высоты полета, скорости и курсового угла цели. Это требуется для сопровождения воздушной цели по трем координатам и скорости.

Решить эту задачу предлагается на основе совместного использования доплеровского, амплитудного и фазового методов измерения в специальной радиолокационной системе непрерывного излучения из радиолокатора подсвета цели и одного наземного вынесенного приемного пункта.

Цель статьи. Целью статьи является разработка технического решения по построению радиолокационной системы микроволнового диапазона из радиолокатора подсвета цели непрерывного излучения и одного наземного вынесенного приемного пункта для обеспечения возможности сопровождения воздушной цели по трем координатам и скорости.

Радиолокатор подсвета цели (РПЦ) непрерывного излучения имеет передающую антенну с узкой по азимуту диаграммой направленности (ДН) и имеется возможность вращать (сканировать) эту антенну по азимуту в процессе сопровождения воздушной цели. Передающая антенна РПЦ излучает непрерывный зондирующий сигнал, а эхо-сигнал цели принимают на РПЦ с помощью небольшой приемной антенны, которая расположена над передающей. Для того, чтобы мощный зондирующий сигнал РПЦ не мешал принимать эхо-сигналы цели, требуется обеспечить высокую развязку передающей и приемной антенн РПЦ. Азимут цели с РПЦ β_{0c} предлагается определять амплитудным методом по максимуму сигнала на доплеровской частоте (например, на выходе доплеровского фильтра) при сканировании антенны по азимуту. Кроме того, на РПЦ измеряют также доплеровскую частоту сигнала F_{g0} . При этом разрешение по азимуту обеспечивается за счет узкой ДН передающей антенны РПЦ.

На вынесенном приемном пункте также принимают эхо-сигнал цели и выделяют и измеряют его доплеровскую частоту F_{g1} , например, с помощью гетеродина на частоте передатчика РПЦ. Кроме того, на вынесенном приемном пункте требуется обеспечить возможность пеленгования цели по угловым координатам. Принцип работы вынесенного приемного пункта поясняется с помощью рис.1, где представлен упрощенный эскиз антенны этого пункта в двух проекциях.

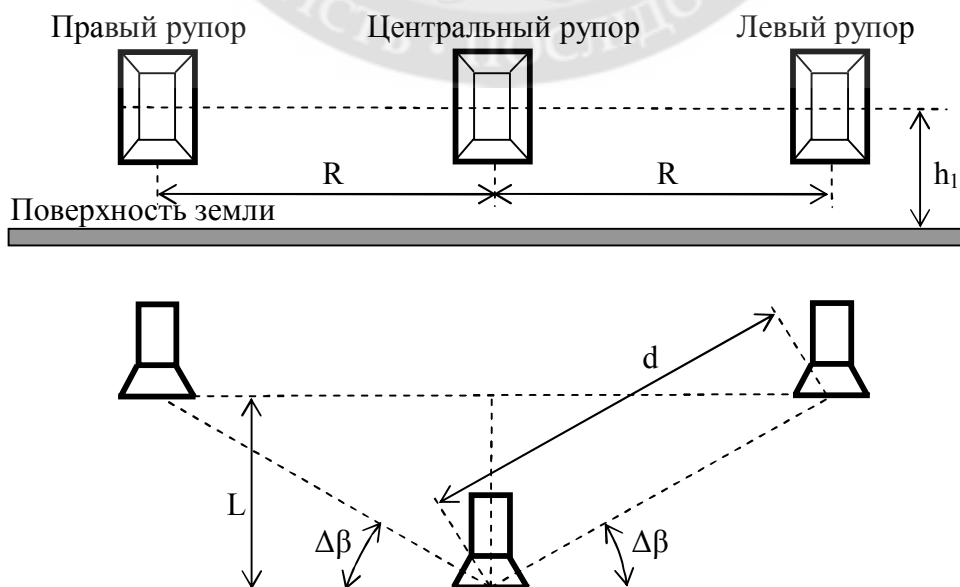


Рис. 1. Антенная система вынесенного приемного пункта

Антенная система вынесенного приемного пункта состоит из трех одинаковых элементов (например, небольших пирамидальных рупоров). Все три рупора находятся на одинаковой высоте над землей h_1 . Это принципиально важно для ослабления влияния земли на измерение угловых координат цели. Все рупоры работают только на прием, а для пеленгования цели по угловым координатам используется фазовый метод.

Измеряют сдвиги фаз $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ сигнала центрального рупора относительно сигналов левого и правого рупоров. Результаты таких измерений предлагается использовать для определения азимута β_{1C} и угла места цели θ_1 с этого пункта.

Радиоволны, отраженные от земной поверхности искажают фазы сигналов в трех рупорах. Эти искажения будут почти одинаковы во всех рупорах, так как все они находятся на одинаковой высоте над землей. Поэтому при измерении сдвигов фаз сигналов эти искажения будут вычитаться и земля почти не будет влиять на результаты измерения угловых координат. В этом состоит основная идея построения предлагаемого устройства.

Ниже рассматривается алгоритм работы предложенного устройства.

Сдвиги фаз $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ сигнала центрального рупора относительно сигналов левого и правого рупоров определяются следующими формулами

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_1 \sin(\beta_1 - \beta_{1C} - \Delta\beta); \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_2 = -\frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_1 \sin(\beta_1 - \beta_{1C} + \Delta\beta), \quad (2)$$

где d – расстояние от центрального рупора до правого (или левого) рупора;

λ – длина волны;

θ_1 – угол места цели с приемного пункта;

β_{1C} – азимут цели с приемного пункта;

β_1 – азимут направления оси антенны приемного пункта;

$\Delta\beta$ – угол отклонения направления от центрального рупора до правого (или левого) рупора относительно поперечной горизонтали антенны.

Формулы (1), (2) получены из геометрии антенной системы на рис.1. Следует отметить, что устройство не сможет работать при $\Delta\beta = 0$. Однако это проблемы не представляет и достаточно только расположить три рупора не на одной линии.

Сложность использования формул (1), (2) для определения пеленгов цели состоит в том, что реальные фазометры измеряют сдвиг фаз с неопределенностью $\pm 2\pi n$ (n – целое число). Поэтому измеренные значения сдвигов фаз будут отличаться на указанную неопределенность от действительных. Это затрудняет непосредственное использование формул (1), (2). Условно полагается, что фазометр устройства измеряет сдвиг фаз в интервале от нуля до 2π . Для исключения указанной неопределенности азимут цели β_{1C} предлагается определять путем решения следующего трансцендентного уравнения

$$\frac{\sin(\beta_1 - \beta_{1C} - \Delta\beta)}{\sin(\beta_1 - \beta_{1C} + \Delta\beta)} + \frac{\Delta\varphi_{1i} - 2\pi - 2\pi \text{entier} \left| \frac{d \sin(\beta_1 - \beta_{1C} - \Delta\beta)}{\lambda} \right|}{\Delta\varphi_{2i} - 2\pi \text{entier} \frac{d \sin(\beta_1 - \beta_{1C} + \Delta\beta)}{\lambda}} = 0, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi_{1i}, \Delta\varphi_{2i}$ – сдвиги фаз сигнала центрального рупора относительно сигналов левого и правого рупоров, измеренные фазометром устройства;

entier – целая часть числа, а другие обозначения были пояснены выше.

После определения азимута цели β_{1C} из уравнения (3) угол места цели θ_1 предлагается определять по следующей формуле

$$\theta_1 = \arccos \frac{\Delta\varphi_i - 2\pi - 2\pi \text{entier} \left| \frac{d \sin(\beta_1 - \beta_{1c} - \Delta\beta)}{\lambda} \right|}{\left| \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\beta_1 - \beta_{1c} - \Delta\beta) \right|}. \quad (4)$$

Формулы (3), (4) получены путем нахождения отношений формул (1), (2) с учетом указанной неопределенности.

С увеличением разноса рупоров L, R на приемном пункте (см. рис.1) точность пеленгования возрастает. Для повышения точности пеленгования желательно также учесть поправки к углу места θ_1 из-за рефракции радиоволн в нижней атмосфере. Методика учета таких поправок известна, описана в литературе [5] и здесь не обсуждается.

Точностные характеристики определения углов места цели с приемного пункта зависят от угла места цели и точности фазометра.

Пример расчета погрешности пеленгования по углу места цели в зависимости от погрешности фазометра для различных значений угла места представлен на рис.2.

Погрешность определения угла места значительно возрастает с уменьшением угла места и очень сильно зависит от погрешности фазометра. Поэтому для реализации предложенного устройства потребуется реализовать очень жесткие требования к фазометру. Положительным фактором является то, что на эти погрешности $\Delta\theta_1$ почти не влияют радиоволны, отраженные от земной поверхности, поэтому они устранимы, так как зависят только от инструментальной погрешности фазометра и отношения сигнал/шум в канале приема. Это позволяет надеяться на то, что при современном развитии техники фазометрии предложенное устройство метод может быть реализован на практике в будущем.

Главным преимуществом предложенного устройства является то, что его антенна на приемном пункте имеет сравнительно малые размеры и качать ее по углу места не требуется.



Рис. 2. Погрешность определения угла места

Недостаток предложения состоит в том, что антенны на приемном пункте имеют сравнительно малый коэффициент усиления. Поэтому для получения требуемого соотношения сигнал/шум в каналах приема потребуется использовать в РПЦ передающую антенну с большим коэффициентом усиления и передатчик большой мощности.

Результаты пеленгования β_{1C} , θ_1 и значение доплеровской частоты F_{g1} , полученные на вынесенном приемном пункте, передают по линии связи на РПЦ, где предварительно измерили азимут цели β_{0C} и доплеровскую частоту F_{g0} . Полученных данных достаточно для определения географических координат, высоты полета, курсового угла и полной скорости цели. Ниже рассматривается алгоритм использования для этого полученных данных β_{1C} , θ_1 , β_{0C} , F_{g0} , F_{g1} .

Геоцентрическую широту цели φ_c предлагается определять путем решения следующего трансцендентного уравнения

$$\operatorname{tg}\left\{\left(\lambda_0 - \lambda_1\right) \cos \varphi_c + \operatorname{arctg}\left[\operatorname{tg} \beta_{0C} \sin\left(\varphi_c - \varphi_0\right)\right]\right\} - \operatorname{tg} \beta_{1C} \sin\left(\varphi_c - \varphi_1\right) = 0, \quad (5)$$

где (λ_0, φ_0) – долгота и широта РПЦ;

(λ_1, φ_1) – долгота и широта вынесенного приемного пункта.

После этого можно определить географическую долготу цели λ_c по формуле

$$\lambda_c = \lambda_0 + \frac{\operatorname{arctg}\left[\operatorname{tg} \beta_{0C} \sin\left(\varphi_c - \varphi_0\right)\right]}{\cos \varphi_c}. \quad (6)$$

Следует отметить, что с увеличением разноса между РПЦ и приемным пунктом точность определения координат цели будет выше.

Высоту полета цели h_c над уровнем моря предлагается определить путем решения следующего уравнения

$$\frac{x_1(x_c - x_1) + y_1(y_c - y_1) + z_1(z_c - z_1)}{(R_z + h_1)\sqrt{(x_c - x_1)^2 + (y_c - y_1)^2 + (z_c - z_1)^2}} - \sin \theta_1 = 0, \quad (7)$$

где R_z – радиус Земли в районе цели;

h_1 – высота подъема антенны приемного пункта над уровнем моря;

(x_1, y_1, z_1) – прямоугольные координаты вынесенного приемного пункта (начало прямоугольной системы координат находится в центре Земли, ось x проходит через нулевой меридиан, а ось y – через северный полюс), равные

$$x_1 = (R_z + h_1) \cos \varphi_1 \cos \lambda_1; \quad (8)$$

$$y_1 = (R_z + h_1) \cos \varphi_1 \sin \lambda_1; \quad (9)$$

$$z_1 = (R_z + h_1) \sin \varphi_1; \quad (10)$$

(x_c, y_c, z_c) – прямоугольные координаты цели, равные

$$x_c = (R_z + h_c) \cos \varphi_c \cos \lambda_c; \quad (11)$$

$$y_c = (R_z + h_c) \cos \varphi_c \sin \lambda_c; \quad (12)$$

$$z_c = (R_z + h_c) \sin \varphi_c. \quad (13)$$

Формулы (5-13) получены на основе сферической геометрии взаимного расположения РПЦ, вынесенного приемного пункта и воздушной цели. Следует отметить, что уравнение (7) имеет аналитическое решение, но оно сложно. Поэтому для упрощения алгоритма реализации рекомендуется решать его численно как трансцендентное.

Курсовой угол цели β_c предлагается определять из решения следующего трансцендентного уравнения

$$F_{g1} + \frac{V_{p0c} + V_{p1c}}{\lambda} = 0, \quad (14)$$

где V_{p0c} , V_{p1c} – радиальные скорости цели в направлении на РПЦ и приемный пункт, равные

$$V_{p0c} = \frac{V_x(x_c - x_0) + V_y(y_c - y_0) + V_z(z_c - z_0)}{\sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2 + (z_c - z_0)^2}}; \quad (15)$$

$$V_{plc} = \frac{V_x(x_c - x_1) + V_y(y_c - y_1) + V_z(z_c - z_1)}{\sqrt{(x_c - x_1)^2 + (y_c - y_1)^2 + (z_c - z_1)^2}}; \quad (15)$$

V_x, V_y, V_z – составляющие вектора скорости цели, равные

$$V_x = -V \sin \beta_c \sin \lambda_c - V \cos \beta_c \sin \varphi_c \cos \lambda_c; \quad (16)$$

$$V_y = V \sin \beta_c \cos \lambda_c - V \cos \beta_c \sin \varphi_c \sin \lambda_c; \quad (17)$$

$$V_z = V \cos \beta_c \cos \varphi_c; \quad (18)$$

V – полная скорость цели, равная

$$V = -\frac{\lambda F_{g0} \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2 + (z_c - z_0)^2}}{2} \left\{ -(x_c - x_0)(\sin \beta_c \sin \lambda_c + \cos \beta_c \sin \varphi_c \cos \lambda_c) + \right. \quad (19)$$

$$\left. + (y_c - y_0)(\sin \beta_c \cos \lambda_c - \cos \beta_c \sin \varphi_c \sin \lambda_c) + (z_c - z_0) \cos \beta_c \cos \varphi_c \right\}^{-1};$$

(x_0, y_0, z_0) – прямоугольные координаты РПЦ, равные

$$x_0 = (R_z + h_0) \cos \varphi_0 \cos \lambda_0; \quad (20)$$

$$y_0 = (R_z + h_0) \cos \varphi_0 \sin \lambda_0; \quad (21)$$

$$z_0 = (R_z + h_0) \sin \varphi_0; \quad (22)$$

h_0 – высота подъема передающей антенны РПЦ над уровнем моря.

Формулы (14-22) получены из известных соотношений для доплеровской частоты и геометрии взаимного расположения РПЦ, приемного пункта и цели.

Расчетные точностные характеристики предложенной радиолокационной системы представлены на рис.2, 3, где показаны погрешности определения курсового угла и скорости цели от погрешности измерения доплеровской частоты.



Рис. 2. Погрешность курса цели

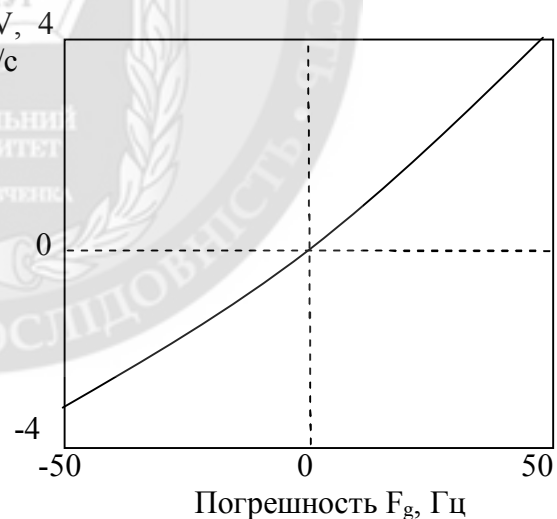


Рис. 3. Погрешность скорости цели

Расчеты проведены для следующих значений исходных данных: длина волны 0.15 м; дальность от РПЦ до цели 125 км; дальность от вынесенного приемного пункта до РПЦ 55 км; дальность от вынесенного приемного пункта до цели 106 км; высоты антенн РПЦ и приемного пункта 15 м и 20 м, высота полета цели 1500 м; скорость цели 300 м/с; курс цели 30°. Оценки показали, что предложенная доплеровская радиотехническая система может обеспечить определение с приемлемой точностью координат, полной скорости и курсового угла цели. Однако для достоверного определения высоты цели потребуется обеспечить очень жесткие требования к фазометру приемного пункта, которые пока реализовать не удастся.

Вывод. Разработаны предложения по построению радиолокационной доплеровской радиотехнической системы из радиолокатора подсвета цели непрерывного излучения и вынесенного наземного приемного пункта. Система предназначена для определения географических координат, скорости и курса цели, а в ряде случаев также позволяет оценить высоту полета в процессе сопровождения цели. Работа системы основана на совместном использовании доплеровского, амплитудного и фазового методов пеленгования. Предложен алгоритм работы системы и оценены ее точностные характеристики. Достоинством предложения является то, что в нем земля почти не влияет на результаты пеленгования цели по углу места и погрешность пеленгования зависит только от погрешности фазометра и угла места цели.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения). – М.: Сов. радио, 1970.
2. Справочник по основам радиолокационной техники. Под редакцией В.В.Дружинина. –М.: Военное издательство, 1967.
3. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. “Радиотехника” / Ю.П.Гришин, В.П.Ипатов, Ю.М.Квзаринов и др. Под ред. Ю.М.Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990.
4. Справочник по радиолокации. Под ред. М.Сколника (в четырех томах) под общей ред. К.Н.Трофимова. Том 4. Радиолокационные станции и системы. Под ред. М.М.Вейсбейна. – М.: Сов. радио, 1978.
5. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972.

Рецензент: д.т.н., проф. Сбитнев А.І., провідний науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н. Хіркх-Ялан В.І., к.т.н., доц. Бахвалов В.Б.

РАДИОЛОКАЦІЙНА ДОПЛЕРІВСЬКА СИСТЕМА СУПРОВОДУ ПОВІТРЯНОЇ ЦІЛІ

Запропоновано технічне рішення з побудови радіолокаційної доплерівської радіотехнічної системи мікрохвильового діапазону. Система складається з радіолокатора підсвітлення цілі безперервного випромінювання і одного наземного виносного прийомного пункту. Робота системи заснована на спільному використанні доплерівського, амплітудного і фазового методів пеленгування. Система призначена для визначення географічних координат, швидкості та курсу цілі, а в ряді випадків також дозволяє оцінити висоту польоту в процесі супроводу цілі. Перевагою пропозиції являється те, що земля майже не впливає на результати пеленгування по куту місця і похибка пеленгування залежить тільки від похибки фазометра і кута місця цілі.

Ключові слова: радіолокаційна радіотехнічна система, кут місця цілі, методи пеленгування

Ph.D. Khirkh-Ialan V.I., Ph.D. Bahvalov V.B.,

RADAR DOPPLER TRACKING SYSTEM FOR AERIAL TARGETS

Proposed technical solution to build radar Doppler system radio microwave range. The system consists of radar target goal of continuous radiation and one terrestrial pronounced receiving item system is based on the joint use of the Doppler, amplitude and phase detection methods. The system is designed to determine the geographical coordinates, speed and course objectives, and in some cases also allows to estimate altitude target tracking process. Advantage is that land has little effect on the results of detection on elevation and direction finding accuracy depends only on error faze meter and elevation of purpose.

Keywords: electronic radar system, position angle, direction finding methods