

УДК 621.396

С.М. Порошин¹, В.Б. Бахвалов², И.Г. Леонов¹¹ Национальный технический университет ХПИ, Харьков² Военный институт при Киевском национальном университете им. Т. Шевченко, Киев**ФАЗОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УГЛОВ МЕСТА ДЛЯ ДВУХКООРДИНАТНОЙ РЛС**

Предлагаются принципы построения наземного радиолокационного измерителя углов места (или высоты полета) воздушных целей в микроволновом диапазоне радиоволн. Такой измеритель используется совместно с импульсной двухкоординатной РЛС и работает только на прием. Антенна предлагаемого устройства состоит из двух рупоров, разнесенных по высоте и вдоль оси антенны. Такая антенна расположена на малой высоте над землей, а сканировать (или качать) ее по углу места не требуется. Работа высотомера основана на измерениях сдвига фаз сигналов в рупорах. Предложение может обеспечить измерение углов места и высоты полета воздушной цели над землей.

радиолокационный высотомер, угол места, фазовый измеритель, двухкоординатная РЛС

Введение

Постановка задачи и анализ известных публикаций. Известные наземные двухкоординатные радиолокаторы (РЛС) 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 высотомеры, которые используют амплитудный, фазовый (и т.п.) методы измерения угла места. Эти методы и принципы построения высотомеров подробно описаны в литературе [1, 3, 4]. Недостатком известных наземных высотомеров является то, что они не могут достоверно измерять малые углы места (менее 0,5). Это обусловлено влиянием отраженных от земли эхосигналов цели [2].

Известный наземный амплитудный высотомер измеряет угол места по максимуму сигнала при сканировании (качании) его антенны по углу места [5]. Недостатком такого высотомера является то, что его антенна имеет большой вертикальный размер и эту антенну требуется качать по углу места.

Известный фазовый высотомер [1] измеряет угол места цели по сдвигу фаз сигналов в двух разнесенных по высоте антеннах. Недостатком такого высотомера является то, что он не может измерять средние и малые углы места из-за неоднозначности измерения сдвига фаз сигналов, которая вызвана влиянием земли [2].

В связи с этим в настоящее время имеется необходимость совершенствовать наземные высотомеры для двухкоординатных РЛС для устранения указанных недостатков.

Поставленную задачу предлагается решить на основе использования фазового метода измерения углов места.

Цель статьи. Целью статьи является разработка принципов построения наземного фазового радиолокационного высотомера микроволнового диа-

пазона для двухкоординатной РЛС для обеспечения возможности однозначного измерения средних и малых углов места воздушных целей.

Результаты исследований

Высотомер предполагается использовать в составе двухкоординатной РЛС, измеряющей азимут и дальность целей.

Для пояснения принципов предлагаемого технического решения на рис. 1 представлен упрощенный эскиз антенной системы РЛС с высотомером в двух проекциях.

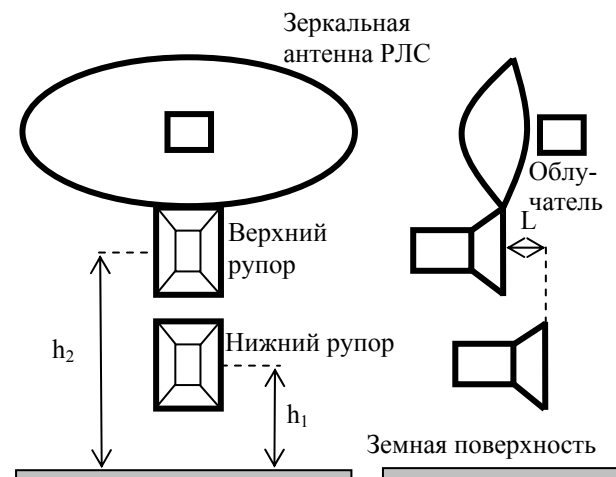


Рис. 1. Антенная система РЛС

РЛС содержит основную приемо-передающую зеркальную антенну, которая используется для измерения дальности и азимута целей, и приемную антенну высотомера из двух рупорных элементов, разнесенных по высоте и дальности вдоль оси антенной системы.

Угломестный сектор работы РЛС определяется основной приемо-передающей зеркальной антенной РЛС.

Принцип работы предлагаемого высотомера основан на использовании эхо-сигналов цели, отраженных от земной поверхности. Поэтому приемопередающую кабину РЛС рекомендуется устанавливать на ровной земной поверхности без использования горки под кабиной. Обычно отраженные от земли эхо-сигналы цели мешают работе высотомеров. Однако в предлагаемом случае наличие таких сигналов принципиально необходимо для работы высотомера.

Приемо-передающая антенна РЛС излучает зондирующие радиопульсы, а антенны высотомера принимает прямые и отраженные от земли эхо-сигналы воздушной цели. Измеряют сдвиг фаз $\Delta\varphi$ сигналов в нижнем и верхнем рупоре высотомера и по этому сдвигу фаз предлагается определять угол места цели θ . Это можно сделать путем решения следующего трансцендентного уравнения [2]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [(h_1 - h_2) \sin \theta + L \cos \theta] + \arg \left\{ 1 + K_s(\theta) R(\theta) \exp \left(-j \frac{4\pi h_1}{\lambda} \sin \theta \right) \right\} - \arg \left\{ 1 + K_s(\theta) R(\theta) \exp \left(-j \frac{4\pi h_2}{\lambda} \sin \theta \right) \right\}, \quad (1)$$

где h_1, h_2 – высоты подъема над землей нижнего и верхнего рупоров антенны высотомера; λ – длина волны передатчика РЛС; L – разнос рупоров высотомера вдоль оси антенной системы; $K_s(\theta), R(\theta)$ – коэффициенты шероховатости и отражения радиоволн от земной поверхности (формулы для этих коэффициентов известны, описаны в литературе [2, 6] и здесь не приводятся).

Трудность решения трансцендентного уравнения (1) состоит в том, что оно не однозначно и обычно содержит множество корней в угломестном секторе работы РЛС. При этом выбрать правильный корень из множества других весьма затруднительно. Количество корней зависит от высот подъема антенн высотомера, длины волны, ширины угломестного сектора работы РЛС и высоты неровностей земной поверхности на площадке РЛС.

Устранить указанную неоднозначность предлагается подходящим выбором высот подъема антенн высотомера h_1, h_2 и выбором смещения L рупоров вдоль оси антенной системы. Такой выбор можно сделать на основании расчетов по формуле (1) для широкого набора указанных параметров.

Проведенные расчеты показали, что уравнение (1) будет иметь единственное решение при $h_1 = (2-4)\lambda$; $h_2 = h_1 + 2\lambda$; $L = \lambda/2$ для ширины угломестного сектора РЛС 10° и средней высоты мелкокомасштабных неровностей земной поверхности 0,5 м. Антенны предложенного высотомера расположены на необычно малой высоте над землей. Это необходимо для обеспечения однозначного определения угла места цели по сдвигу фаз сигналов.

В известных наземных маловысотных РЛС трудность состояла в том, чтобы обеспечить боль-

шую высоту подъема антенны над землей. В предложенном высотомере, наоборот, трудность состоит в том, чтобы обеспечить работоспособность высотомера при малой высоте подъема его антенн. Эта трудность обусловлена тем, что местные предметы на площадке РЛС (кусты, деревья и т.п.) могут затенить антенну высотомера и сорвать его работу. Поэтому рекомендуется расчистить площадку РЛС от местных предметов, а использование горки под приемопередающей кабиной РЛС в данном случае не допустимо.

Примеры расчета сдвига фаз сигналов в нижнем и верхнем рупорах высотомера по формуле (1) в зависимости от угла места цели представлены на рис. 2.

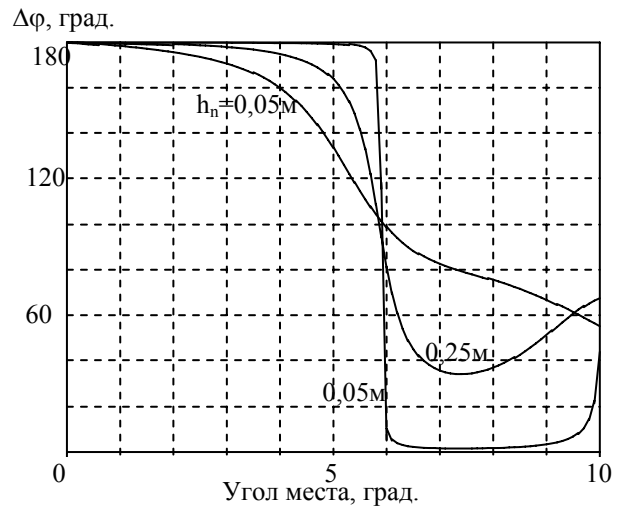


Рис. 2. Сдвиг фаз сигналов в разнесенных антеннах

Расчеты проведены для трех значений средней высоты мелкокомасштабных неровностей земли на площадке РЛС $h_n = 0,05; 0,25; 0,5$ м при следующих значениях исходных данных: длина волны $\lambda = 0,35$ м; высоты подъема над землей нижнего и верхнего рупоров высотомера $h_1 = 1$ м; $h_2 = 1,7$ м; разнос рупоров вдоль оси антенной системы $L = 0,175$ м для влажной земли при горизонтальной поляризации радиоволн.

Из рис. 2 видно, что уравнение (1) имеет единственное решение при любых углах места при средней высоте мелкокомасштабных неровностей земли $h_n = 0,5$ м для указанных параметров высотомера. При высоте мелкокомасштабных неровностей $h_n = 0,25$ м однозначное решение уравнения (1) будет при углах места менее 7° . При увеличении высоты мелкокомасштабных неровностей земли точность измерения угла места цели предложенный высотомером улучшается и расширяется возможный угломестный сектор его работы. На идеально гладкой площадке предложенный высотомер работать не сможет. Поэтому желательно, чтобы высота мелкокомасштабных неровностей земли на площадке РЛС была больше. Наличие мелкокомасштабных неровностей земли на площадке высотомера принципиально необходимо для его работы. С эти проблем не возникает, так как реальные площадки РЛС всегда содержат неровности и сглаживать

их не требуется. Точность измерения угла места пропорциональна крутизне кривых рис. 2.

Расчеты показали, что в секторе углов места ниже 5° электрические параметры земли (диэлектрическая проницаемость и проводимость) почти не влияют на точность измерения угла места цели с помощью предложенного высотомера. Поэтому эти параметры можно задать приближенно, исходя из характера земной поверхности на площадке РЛС. Однако средняя высота мелкокомасштабных неровностей земли очень сильно влияет на точность измерения угла места цели. Поэтому для работы высотомера необходимо знать среднюю высоту мелкокомасштабных неровностей земной поверхности h_n на площадке РЛС. Эта высота обычно не известна.

Ниже предлагается, как можно измерить среднюю высоту мелкокомасштабных неровностей земли h_n с помощью того же предложенного высотомера. Для этого требуется иметь источник радиоизлучения на частоте РЛС, угол места которого θ известен с высокой точностью. Такой источник может быть установлен на площадке РЛС, или может располагаться на своем самолете, текущие координаты которого известны или определены (например, с помощью известной бортовой спутниковой навигационной системы [5]).

Сигнал источника принимают с помощью антенн предложенного высотомера и измеряют сдвиг фаз $\Delta\varphi$ сигналов в нижнем и верхнем рупорах высотомера. По результату измерения можно определить среднюю высоту h_n неровностей земной поверхности на площадке РЛС. Для этого рекомендуется использовать следующие формулы

$$h_n = \frac{\lambda}{2\pi \sin \theta} \sqrt{\frac{-\ln K_s}{2}}, \quad (2)$$

где θ – угол места источника радиоизлучения;

K_s – коэффициент шероховатости земной поверхности, вычисляемый по формулам:

$$K_s = \left(-B + \sqrt{B^2 + AC} \right) / A; \quad (3)$$

$$C = \operatorname{tg} \left\{ \Delta\varphi - \frac{2\pi}{\lambda} [(h_1 - h_2) \sin \theta + L \cos \theta] \right\}; \quad (4)$$

$$A = \sin \left[\frac{4\pi}{\lambda} (h_2 - h_1) \sin \theta \right] - C \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} (h_2 - h_1) \sin \theta \right]; \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{2} \sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} h_1 \sin \theta \right) - \frac{1}{2} \sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} h_2 \sin \theta \right) + \frac{C}{2} \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} h_1 \sin \theta \right) + \frac{C}{2} \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} h_2 \sin \theta \right). \quad (6)$$

Формулы (2 – 6) получены на основе уравнения (1) при допущении, что коэффициент отражения радиоволн от земли близок к -1 . Это справедливо при углах места менее 5° .

Недостаток предложенного устройства состоит в том, что нижняя и верхняя антенны высотомера имеют сравнительно малый коэффициент усиления. Поэтому для получения требуемого соотношения

сигнал/шум в приемных каналах высотомера требуется использовать в РЛС передающую антенну с большим коэффициентом усиления и передатчик большой мощности.

Главным преимуществом предложенного высотомера является то, что его антенна имеет сравнительно малые размеры и качать (сканировать) ее по углу места не требуется, что значительно упрощает конструкцию высотомера без ухудшения его точностных характеристик.

Недостаток предложения состоит в том, что антенна высотомера имеет сравнительно малый коэффициент усиления. Поэтому для получения требуемого соотношения сигнал/шум в приемных каналах высотомера требуется использовать в РЛС передающую антенну с большим коэффициентом усиления и передатчик большой мощности.

Выводы

Разработаны принципы построения наземного радиолокационного фазового измерителя углов места (или высоты полета) воздушных целей. Такой измеритель используется совместно с двухкоординатной импульсной РЛС и работает только на прием. Антенна высотомера состоит из двух разнесенных по высоте и вдоль оси антенны приемных рупоров, размещенных на малой высоте над землей. Качать (или сканировать) эту антенну по углу места не требуется. Работа высотомера основана на измерениях сдвига фаз сигналов в нижнем и верхнем рупорах высотомера. Предложен алгоритм работы высотомера и метод использования предложенного устройства для измерения средней высоты мелкокомасштабных неровностей земной поверхности на площадке РЛС. Информация об этих неровностях необходима для реализации алгоритма работы предложенного высотомера. Предложение может обеспечить измерение средних и малых углов места и высоты полета воздушных целей.

Список литературы

1. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения). – М.: Сов. радио, 1970. – 322 с.
2. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972. – 280 с.
3. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / Под ред. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 394 с.
4. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. "Радиотехника" / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Квзарин и др. Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 512 с.
5. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. – М.: Эко – Трендз, 2003. – 242 с.

Поступила в редколлегию 24.12.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.