

УГЛОМЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТРЕХКООРДИНАТНОЙ НАЗЕМНОЙ РЛС С ВИДЕОИМПУЛЬСНЫМ ЗОНДИРУЮЩИМ СИГНАЛОМ

В статье предлагаются принципы построения угломерной системы для наземной маловысотной РЛС со сверхширокополосным видеоимпульсным зондирующим сигналом без несущей частоты. Традиционные трехкоординатные РЛС микроволнового диапазона зачастую не обеспечивают требуемой точности измерения дальности, малых углов места и азимута маловысотных целей. При небольших размерах антенны погрешности измерения азимута сравнительно велики. Для улучшения точностных характеристик предложено использовать в РЛС сверхширокополосные видеоимпульсные зондирующие сигналы наносекундной длительности без несущей частоты. Предложение основано на использовании в РЛС зеркальной антенны с двумя облучателями, разнесенными вдоль оси зеркала, и двух каналов приема. Угловые координаты цели определяют по измерениям формы сигнала в двух каналах приема. Предложение может обеспечить пеленгование цели в секторе малых углов места над землей.

Ключевые слова: сверхширокополосный видеоимпульсный зондирующий сигнал, зондирующий сигнал без несущей частоты, трехкоординатный наземный радиолокатор.

Постановка задачи и анализ известных публикаций. Традиционные трехкоординатные РЛС микроволнового диапазона зачастую не обеспечивают требуемой точности измерения дальности, малых углов места и азимута маловысотных целей [2]. В секторе малых углов места земля искажает направленные свойства антенны РЛС, в результате чего обычно не удается достоверно измерить углы места менее 0.5° . При небольших размерах антенны погрешности измерения азимута сравнительно велики. Иногда имеется также потребность в повышении точности измерения дальности.

Для улучшения точностных характеристик в литературе [1] предложено использовать в РЛС сверхширокополосные видеоимпульсные зондирующие сигналы наносекундной длительности без несущей частоты. Это позволяет значительно улучшить точность измерения дальности. В литературе [1] предложены также принципы измерения угловых координат в такой РЛС. Азимут измеряют по времени запаздывания видеоимпульсов в двух приемных антеннах, разнесенных по горизонтали, а угол места – в двух антеннах, разнесенных по высоте. Угломерная система такой РЛС содержит четыре приемных антенны, что весьма затруднительно реализовать практически. Кроме того, известные принципы измерения угловых координат для такой РЛС также становятся неработоспособными в секторе малых углов места.

Поэтому в настоящее время имеется практическая потребность совершенствования наземных маловысотных РЛС с видеоимпульсным зондирующим сигналом и поиска новых принципов построения угломерных систем для такой РЛС.

Цель статьи. Целью статьи является разработка принципов построения угломерной системы для наземной маловысотной РЛС с видеоимпульсным зондирующим сигналом без несущей частоты.

Предлагаемые ниже новые принципы построения угломерной системы для наземной маловысотной РЛС с видеоимпульсным зондирующим сигналом без несущей частоты основаны на использовании в РЛС зеркальной антенны с двумя рупорными облучателями, разнесенными вдоль оси зеркала, и двух каналов приема, связанных с этими облучателями. При этом наличие отраженных от земли эхо-сигналов цели принципиально необходимо для построения угломерной системы.

В предложении используются следующие известные и экспериментально подтвержденные свойства видеоимпульсов поля радиоволн над землей, которые изложены в литературе [1].

При отражении видеоимпульсов поля радиоволн от земли (или цели) видеоимпульсы изменяют свою полярность. При отражении радиоволн от земли и цели зондирующий видеоимпульс поля радиоволн размножается и на вход приемника будут приходить три видеоимпульса эхо-сигналов цели:

первый видеоимпульс, распространяющийся по пути антенна – цель – антенна;

второй видеоимпульс, представляющий сумму полей, распространяющийся по пути антенна – цель – земля – антенна и антенна – земля – цель – антенна;

третий видеоимпульс, распространяющийся по пути антенна – земля – цель – земля – антенна.

Угол между направлениями от цели до антенны и от цели до антипода антенны относительно земли обычно ничтожно мал, поэтому приближенно можно считать, что видеоимпульсы эхо – сигналов цели в этих направлениях почти одинаковы.

Упрощенный эскиз антенной системы предлагаемой РЛС представлен на рис.1.

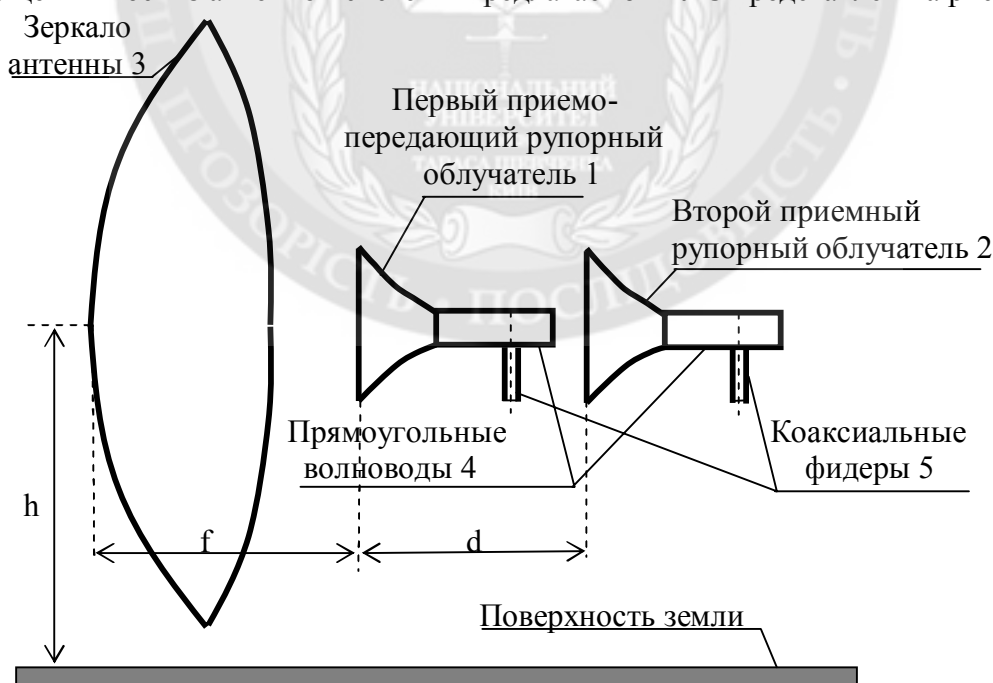


Рис. 1. Антенная система РЛС

Антенная система содержит зеркальную антенну с зеркалом 3 в виде эллиптической вырезки из параболоида вращения и с двумя облучателями 1, 2 в виде экспоненциальных рупоров с прямоугольной апертурой. Первый облучатель 1 расположен в фокусе зеркала и

работает поочередно на передачу и прием. Второй облучатель 2 работает только на прием и смещен вдоль оси зеркала на расстояние d относительно первого облучателя. Облучатели возбуждаются отрезками прямоугольных волноводов 4, которые запитываются коаксиальными фидерами 5. Антенна расположена на высоте h над землей, излучает радиоволны вертикальной поляризации, а ось зеркала направлена горизонтально. При обзоре пространства антенну вращают по азимуту, а сканирование антенны по углу места не используется.

Для пояснения сути предлагаемых принципов построения угломерной системы РЛС ниже приводятся необходимые математические соотношения.

Реальный видеоимпульсный зондирующий сигнал никогда не имеет форму одиночного видеоимпульса правильной прямоугольной формы, а представляет собой короткий волновой пакет (вейвлет) из нескольких положительных и отрицательных всплесков наносекундной длительности [1]. Для математического описания такого сигнала предлагается использовать следующее соотношение

$$U(t) = U_m \sin^M \frac{\pi t}{N\tau_0} \cos \frac{\pi(t - N\tau_0/2)}{\tau_0}, \quad (1)$$

где: $U(t)$ - напряжение сигнала генератора видеоимпульсов;

t - время (отсчет времени ведется от начала видеоимпульса);

U_m - амплитуда видеоимпульса;

τ_0 - длительность всплеска видеоимпульса (определяется средней частотой спектра сигнала $\tau_0 = 0.5/f_{cp}$);

M - показатель затухания всплесков сигнала;

N - количество всплесков напряжения на интервале видеоимпульса (N нечетное).

Эту модель можно использовать на временном интервале $0 < t < N\tau_0$.

Исследования показали, что при отражении видеоимпульса поля радиоволн от земли (или цели) полярность сигнала изменяется, уменьшается амплитуда видеоимпульса, но форма видеоимпульса почти не изменяется. Это позволяет для модели сигнала (1) записать следующее соотношение для видеоимпульса поля принимаемых радиоволн в канале первого облучателя 1

$$U_1(t) = -A_m \sin^M \frac{\pi t}{N\tau_0} \cos \frac{\pi(t - N\tau_0/2)}{\tau_0} + 2A_m |R_0| K_S \sin^M \frac{\pi(t - \Delta t_1)}{N\tau_0} \cos \frac{\pi(t - N\tau_0/2 - \Delta t_1)}{\tau_0} - A_m |R_0|^2 K_S^2 \sin^M \frac{\pi(t - 2\Delta t_1)}{N\tau_0} \cos \frac{\pi(t - N\tau_0/2 - 2\Delta t_1)}{\tau_0}, \quad (2)$$

где A_m - неизвестный амплитудный коэффициент, зависящий от мощности передатчика, характеристик антенны, отражательных характеристик цели и дальности;

t - время (отсчет времени от начала прихода эхо-сигнала);

Δt_1 - время запаздывания видеоимпульса отраженной от земли радиоволны относительно видеоимпульса прямой волны, равное

$$\Delta t_1 = \frac{2h \sin \theta}{c}; \quad (3)$$

h - высота подъема антенны РЛС над поверхностью земли;

θ - угол места маловысотной цели; c - скорость света;

R_0 , K_S - коэффициенты отражения Френеля и шероховатости [2] на средней частоте спектра сигнала, а другие обозначения были пояснены выше.

Формула (2) является приближенной, не учитывает искажения формы видеоимпульса сигнала антенной и целью и справедлива только в секторе малых углов места.

Первое слагаемое в формуле (2) рассчитывается на временном интервале $0 < t < N\tau_0$, второе слагаемое справедливо на интервале $\Delta t_1 < t < \Delta t_1 + N\tau_0$, а третье слагаемое имеет отличные от нуля значения на интервале $2\Delta t_1 < t < 2\Delta t_1 + N\tau_0$.

Примеры расчета формы видеоимпульса эхо-сигнала цели в канале первого облучателя 1 представлены на рис.2, 3 для углов места цели $\theta=2^\circ$ и 0.5° соответственно. Расчеты проведены для следующих значений параметров $\tau_0 = 1/3$ нс; $M = 2$; $N = 11$; $A_m = 1$; $h = 20$ м; для влажной земли с мелкомасштабными неровностями высотой 0.3 м.

Угол места 2°

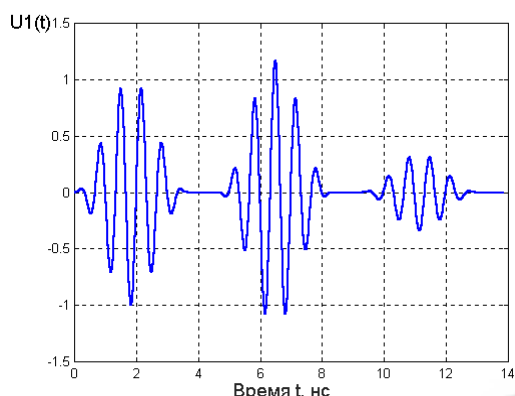


Рис. 2. Эхо-сигнал цели

Угол места 0.5°

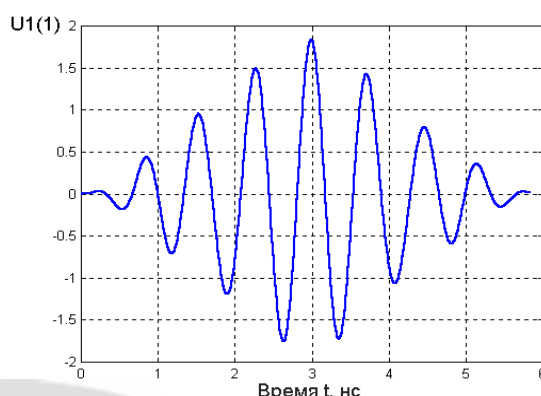


Рис. 3. Эхо-сигнал цели

Из этих рисунков видно, что форма видеоимпульса эхо-сигнала существенно зависит от угла места цели и содержит информацию об этом угле. Предлагаемый метод определения угла места цели по эхо-сигналу в канале первого облучателя 1 основан на анализе формы видеоимпульса эхо-сигнала и получения из нее информации об этом угле. От одного зондирующего видеоимпульса РЛС к верхней антенне приходят три видеоимпульса эхо-сигнала цели. При сравнительно больших углах места цели (более 1°) эти видеоимпульсы разделяются по времени. Это позволяет измерить время запаздывания Δt_1 второго видеоимпульса относительно первого и из формулы (3) определить угол места цели. При этом погрешность угла места определяется погрешностью измерений Δt_1 . Время запаздывания Δt_1 следует измерять по запаздыванию пиковых значений видеоимпульсов с учетом того, что они имеют противоположную полярность.

При малых углах места цели (менее 1°) три видеоимпульса эхо-сигнала накладываются, частично подавляют друг друга и сливаются в один видеоимпульс. В этом случае измерить время запаздывания Δt_1 и воспользоваться формулой (3) нельзя. Однако форма результирующего видеоимпульса также будет содержать информацию об угле места цели. Ниже поясняется, как можно определить угол места цели в этом случае.

Предлагается определять угол места маловысотной цели путем анализа и цифровой обработки формы видеоимпульса эхо-сигнала. Суть предлагаемого метода состоит в следующем. Наблюдают эхо-сигнал цели на временном интервале видеоимпульса $0-t_k$, измеряют мгновенные значения сигнала и запоминают массив $U(t)$ время – напряжение сигнала (с учетом знака, так как сигнал имеет положительные и отрицательные всплески). Такой массив иногда можно получить, например, с помощью аналого-цифровых преобразователей. Из этого массива определяют максимальное пиковое значение сигнала U_{m1} и момент времени t_{m1} его появления.

После этого угол места цели предлагается определять из решения следующего трансцендентного уравнения

$$\min \left\{ \frac{1}{U_{m1}^2} \int_0^{t_k} U^2(t) dt + \frac{1}{U_{m2}^2} \int_0^{t_k} U_1^2(t) dt - \frac{2}{U_{m1} U_{m2}} \int_0^{t_k} U(t) U_1(t - t_{m1} + t_{m2}) dt \right\}, \quad (4)$$

где $U_1(t)$ – напряжение сигнала, определенное формулой (2);

U_{m2} , t_{m2} – расчетные максимальное пиковое значение сигнала $U_1(t)$ и соответствующее ему время на интервале $0-t_k$.

Решение уравнения (4) производится следующим образом. В интервале малых углов места $0-1^\circ$ задают текущее значение угла. По формуле (2) рассчитывают сигнал $U_1(t)$ и находят U_{m2} , t_{m2} . После этого вычисляют функционал (4) и запоминают результат. Повторяя

такие расчеты для множества значений угла места, находят, при каком угле функционал минимален и этот угол будет соответствовать углу места цели.

Пример графического решения уравнения (4) представлен на рис.4. При этом угол места цели был 0.2° , а параметры сигнала и угломерной системы указаны выше.

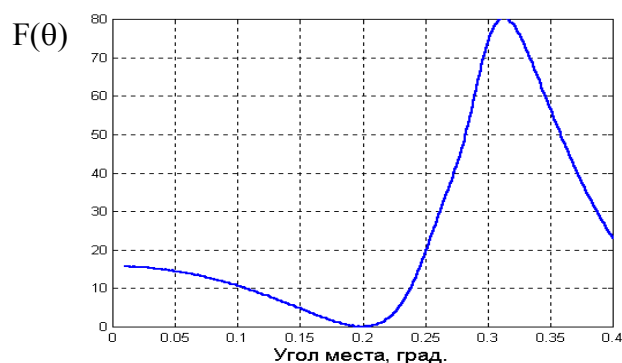


Рис. 4. Решение уравнения (4)

Для определения азимута цели используют эхо-сигналы в каналах приема первого и второго облучателей антенны. Грубо оценить азимут можно известным амплитудным методом [2]. При вращении антенной системы по азимуту находят, при каком азимуте оси антенны эхо-сигнал в любом из каналов будет максимален. Однако ошибка пеленгования при этом может составить несколько градусов, что зачастую совершенно неприемлемо. Уточнить азимутальный угол цели β относительно оси антенны предлагается на основе измерения времени запаздывания Δt эхо-сигналов в каналах приема первого и второго облучателей антенны. Проведенные расчеты показали, что форма видеоимпульса сигнала в канале второго облучателя 2 будет примерно такой же, как и в первом облучателе 1, но видеоимпульс второго канала придет позднее, а время запаздывания определяется геометрией системы и будет равно

$$\Delta t = \frac{d \cos \theta \cos \beta}{c}, \quad (5)$$

где θ, β - угловые координаты цели;

d – смещение второго облучателя 2 вдоль оси зеркала относительно первого облучателя 1.

По измеренным ранее значениям Δt и θ из формулы (5) можно определить уточненное значение азимутального угла цели.

Достоинством предложенных методов измерения угла места и азимута цели является то, что они могут быть реализованы для работы в секторе малых углов места над землей с приемлемой для практики точностью. Предложенная РЛС может измерить такие малые углы места, которые известными методами измерить пока не удается.

Недостатком предложений является то, что для их реализации потребуется обеспечить очень жесткие требования к измерительной аппаратуре по измерению мгновенных значений сигнала с очень малой временной дискретой. Современное состояние развития радиотехники и вычислительной техники позволяет надеяться на то, что эти трудности могут быть преодолены.

Вывод. Предложены принцип построения угломерной системы для наземной маловысотной трехкоординатной РЛС с несинусоидальным сверхширокополосным видеоимпульсным зондирующим сигналом без несущей частоты на основе использования в ней зеркальной антенны с двумя облучателями, разнесенными вдоль оси зеркала, и двух каналов приема. Предложены также новые методы углометрии для такой РЛС. Эти методы позволяют обеспечить измерения угла места и азимута цели в секторе малых углов места над землей с приемлемой точностью. Другие известные методы этого пока обеспечить не могут.

Предложения могут быть реализованы при построении новых образцов наземных маловысотных РЛС.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985.
2. Справочник по радиолокации: в 4-х т. / Под ред. М.Сколника. - М.: Сов. радио, 1976-1979.

Рецензент: д.т.н., проф. Жердев М.К., провідний науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н., доц. Бахвалов В.Б.

**КУТОМІРНА СИСТЕМА ДЛЯ ТРЕХКООРДИНАТНОЇ НАЗЕМНОЇ
РЛС ІЗ ВІДЕОІМПУЛЬСНИМ ЗОНДУЮЧИМ СИГНАЛОМ**

У статті пропонуються принципи побудови кутомірної системи для наземних маловисотних РЛС із надширокопasmовим відеоімпульсним зондуючим сигналом без несучої частоти. Традиційні трьохкоординатні РЛС мікрохвильового діапазону часто не забезпечують необхідної точності виміру дальності, малих кутів місця і азимута маловисотних цілей. При невеликих розмірах антени похибки вимірювання азимута порівняно великі. Для поліпшення точностних характеристик запропоновано використовувати в РЛС надширокопasmові відеоімпульсні зондувальні сигнали наносекундної тривалості без несучої частоти. Пропозиція заснована на використанні в РЛС дзеркальної антени з двома опромінювачами, рознесеними уздовж осі дзеркала, і двох каналів прийому. Кутові координати цілі визначають за вимірюваннями форми сигналу в двох каналах прийому. Пропозиція може забезпечити пеленгація цілі в секторі малих кутів місця над землею.

Ключові слова: надширокопasmовий відеоімпульсний зондувальний сигнал, зондувальний сигнал без несучої частоти, трикоординатний наземний радіолокатор

V. Bahvalov

**ANGLE DETECTING SYSTEM OF THREE-COORDINATE GROUND RADAR VIDEO PULSE
ULTRA-WIDEBAND RANGING SIGNAL.**

The article proposes principles of goniometric system for on - Earth low altitude radar with ultra-wideband video pulse signal probing schim without nesuscheyz frequency. Triaxial traditional radar microwave band often do not provide the required accuracy of measurement range , low elevation angle and azimuth low-altitude targets. When small - large size antenna azimuth measurement errors are relatively large. To improve the accuracy characteristics] proposed to use ultra-wideband radar video pulse probing signals of nanosecond duration of the free carrier. The proposal is based on the use of a radar reflector antenna with two illuminators, spaced along the axis of the mirror, and two receiving channels. Angular coordinates of the target is determined by measuring the shape of the signal in the two channels reception. Offer can provide direction finding purpose in the small elevations above the ground.

Keywords: ultra-wideband video pulse ranging signal, ranging signal without carrier frequency, three-coordinate ground radar.