

## ТРЕХКООРДИНАТНЫЙ НАЗЕМНЫЙ РАДИОЛОКАТОР С ВИДЕОИМПУЛЬСНЫМ ЗОНДИРУЮЩИМ СИГНАЛОМ

*У статті розглядається новий принцип побудови наземної маловисотної РЛС з надширококутовим відеоімпульсним зондувальним сигналом без несучої частоти. Запропоновано використовувати в РЛС двох однакових дзеркальних антен, рознесених по горизонталі і висоті. При цьому кут місця цілі визначають по ехо-сигналу цілі у верхній антені, а азимут цілі - за сигналами двох антен. Запропоноване рішення може забезпечити пеленгацію цілі в секторі малих кутів місця над землею.*

*Ключові слова: надширококутовий відеоімпульсний зондувальний сигнал, зондувальний сигнал без несучої частоти, трикоординатний наземний радіолокатор.*

*В статье рассматривается новый принцип построения наземной маловысотной РЛС с сверхширокополосным видеоимпульсным зондирующим сигналом без несущей частоты. Предложено использовать в РЛС двух одинаковых зеркальных антенн, разнесенных по горизонтали и высоте. При этом угол места цели определяют по эхо-сигналу цели в верхней антенне, а азимут цели – по сигналам двух антенн. Предложенное решение может обеспечить пеленгацию цели в секторе малых углов места над землей.*

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

*The article discusses a new principle of land low altitude radar video pulse ultra-wideband ranging signal without carrier frequency. Proposed to use two identical radar reflector antennas spaced horizontal and height. The angle of the target is determined by the target echo signal at the top of the antenna, and bearing to a target - the signals of two antennas. The proposed solution 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.*

**Вступлення.** Традиційні тріхкоординатні РЛС мікрохвильового діапазону зазвичай не забезпечують необхідної точності вимірювання дальності, малих кутів місця і азимута маловисотних цілей [2]. В секторі малих кутів місця земля искажає направлені властивості антени РЛС, в результаті чого зазвичай не вдається достовірно виміряти кути місця менше  $0.5^\circ$ . При невеликих розмірах антени похибки вимірювання азимута порівняно великі. Іноді існує також потреба в підвищенні точності вимірювання дальності.

**Постановка задачі.** Для покращення точнісних характеристик в літературі [1] запропоновано використовувати в РЛС надширокополосні відеоімпульсні зондувальні сигнали наносекундної тривалості без несучої частоти. Це дозволяє значно покращити точність вимірювання дальності. В літературі [1] запропоновано також принципи вимірювання кутових координат в такій РЛС. Азимут вимірюють по часу затримки відеоімпульсів в двох прийомних антенах, рознесених по горизонталі, а кут місця – в двох антенах, рознесених по висоті. Угломерна система такої РЛС містить чотири прийомні антени, що дуже складно реалізувати практично. Крім того, відомі принципи вимірювання кутових координат для такої РЛС також стають непрацоспособними в секторі малих кутів місця.

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 новых принципов построения угломерных систем для наземной маловысотной РЛС с видеоимпульсным зондирующим сигналом без несущей частоты.

**Изложение основного материала.** Предлагаемые ниже новые принципы построения угломерных систем для наземной маловысотной РЛС с видеоимпульсным зондирующим сигналом без несущей частоты основаны на использовании в РЛС двух разнесенных по горизонтали и высоте одинаковых зеркальных антенн и эхо-сигналов цели, приходящих прямыми и отраженными от земли радиоволнами. При этом наличие отраженных от земли эхо-сигналов цели принципиально необходимо для построения угломерных систем.

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.

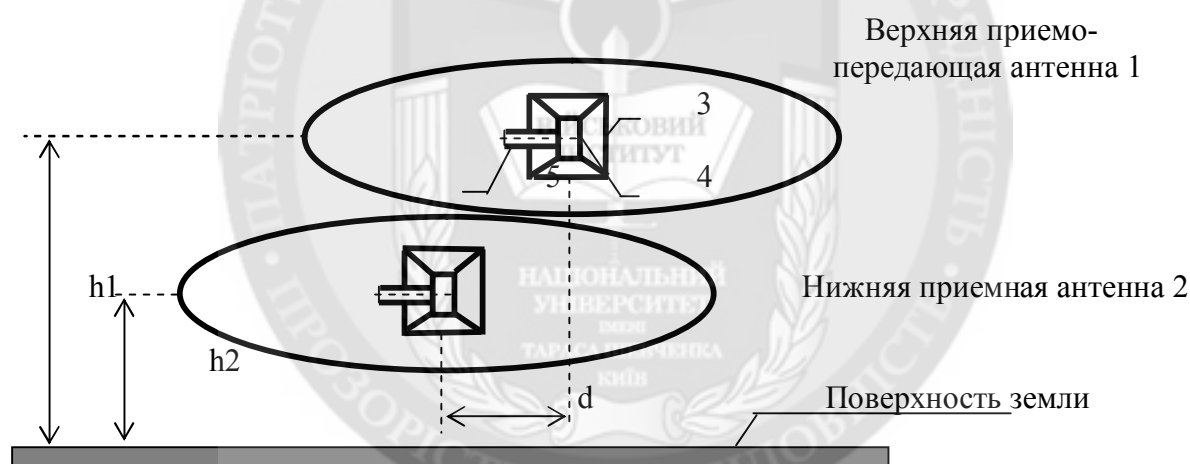


Рис. 1. Антенная система РЛС

Антенная система содержит две одинаковые зеркальные антенны с зеркалом в виде эллиптической вырезки из параболоида вращения. Верхняя приемно-передающая антенна 1 расположена на высоте  $h_1$  над землей, а нижняя приемная антенна 2 расположена ниже на высоте  $h_2$ . Антенны смещены по горизонтали на расстояние  $d$ .

Облучатель зеркальной антенны представляет экспоненциальный рупор 3 с прямоугольной апертурой, который возбуждается отрезком прямоугольного волновода 4. Волновод запитывается коаксиальным фидером 5. Антенна излучает радиоволны горизонтальной поляризации. Оси зеркал направлены горизонтально. При обзоре пространства антенну вращают по азимуту, а сканирование антенны по углу места не используется.

Для пояснения сути предлагаемых новых принципов построения угломерных систем 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;  $\tau_0$  - 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 радиоволн вблизи центра апертуры верхней антенны 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);

$\Delta t_1$  - время запаздывания видеоимпульса отраженной от земли радиоволны относительно видеоимпульса прямой волны, равное

$$\Delta t_1 = \frac{2h_1 \sin \theta}{c}; \quad (3)$$

$h_1$  - высота подъема верхней антенны РЛС над поверхностью земли;

$\theta$  - 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 на выходе верхней антенны 1 представлены на рис. 2, 3 для углов места цели  $\theta = 3^\circ$  и  $0.5^\circ$  соответственно. Расчеты проведены для следующих значений параметров  $\tau_0 = 1/3$  нс;  $M = 2$ ;  $N = 11$ ;  $A_m = 1$ ;  $h_1 = 11$  м; для влажной земли с мелкомасштабными неровностями высотой 0.3 м.

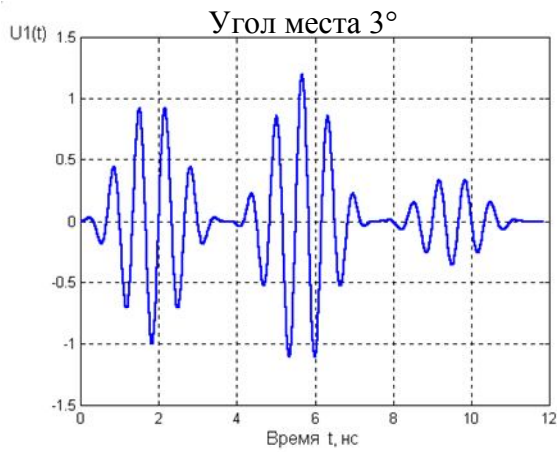


Рис. 2. Эхо-сигнал цели

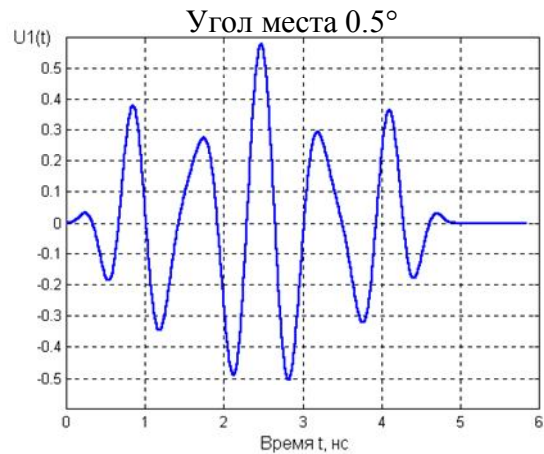


Рис. 3. Эхо-сигнал цели

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 верхней антенне 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  $2^\circ$ ) эти видеоимпульсы разделяются по времени. Это позволяет измерить время запаздывания  $\Delta t_1$  второго видеоимпульса относительно первого и из формулы (3) определить угол места цели. При этом погрешность угла места определяется погрешностью измерений  $\Delta t_1$ . Время запаздывания  $\Delta t_1$  следует измерять по запаздыванию пиковых значений видеоимпульсов с учетом того, что они имеют противоположную полярность.

При малых углах места цели (менее  $2^\circ$ ) три видеоимпульса эхо-сигнала накладываются, частично подавляют друг друга и сливаются в один видеоимпульс меньшей амплитуды. В этом случае измерить время запаздывания  $\Delta t_1$  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  $0-2^\circ$  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  $0.3^\circ$ , а параметры сигнала и угломерной системы указаны выше.

Для определения азимута цели используют эхо-сигналы в антеннах 1, 2. Грубо оценить азимут можно известным амплитудным методом [2]. При вращении антенной системы по азимуту находят, при каком азимуте оси антенны эхо-сигнал в любой из антенн будет максимален. Однако ошибка пеленгования при этом может составить несколько градусов, что зачастую совершенно неприемлемо. В литературе [1] предложено уточнить азимут цели по результату измерения времени запаздывания эхо-сигналов в антеннах 1, 2. При этом азимутальный угол цели  $\beta$  относительно положения оси антенны связан с этим временем запаздывания  $\Delta t$  простым геометрическим соотношением

$$\Delta t = [d \cos \theta \sin \beta + (h_1 - h_2) \sin \theta] / c, \quad (5)$$

где  $d$  – разнос антенн по горизонтали;

$h_2$  – высота подъема над землей нижней антенны 2.

Этот известный метод измерения азимута цели можно использовать либо при больших углах места (более  $2^\circ$ ), либо, когда антенны расположены на одинаковой высоте над землей. Однако расположение антенн на одинаковой высоте приведет к значительному увеличению горизонтального размера антенной системы, что не желательно.

Ниже предлагается новый метод уточнения азимутального пеленга цели в секторе малых углов места для угломерной системы рис. 1 и приводятся необходимые для этого математические соотношения.

Для эхо-сигнала цели в нижней антенне 2 можно записать соотношение

$$\begin{aligned} U_2(t) = & -A_m \sin^M \frac{\pi(t - \Delta t)}{N\tau_0} \cos \frac{\pi(t - N\tau_0/2 - \Delta t)}{\tau_0} + \\ & + A_m |R_0| K_S \sin^M \frac{\pi(t - \Delta t - \Delta t_1)}{N\tau_0} \cos \frac{\pi(t - \Delta t - N\tau_0/2 - \Delta t_1)}{\tau_0} + \\ & + A_m |R_0| K_S \sin^M \frac{\pi(t - \Delta t - \Delta t_2)}{N\tau_0} \cos \frac{\pi(t - \Delta t - N\tau_0/2 - \Delta t_2)}{\tau_0} - \\ & - A_m |R_0|^2 K_S^2 \sin^M \frac{\pi(t - \Delta t - \Delta t_1 - \Delta t_2)}{N\tau_0} \cos \frac{\pi(t - N\tau_0/2 - \Delta t - \Delta t_1 - \Delta t_2)}{\tau_0} \end{aligned}, \quad (6)$$

где  $\Delta t$  определено формулой (5), а  $\Delta t_2$  – формулой (3) при замене  $h_1$   $h_2$ .

К нижней антенне 2 приходят четыре видеоимпульса поля радиоволн, которые при малых углах места сливаются в один и частично подавляют друг друга. Измеряют время запаздывания  $\Delta t_i$  пикового значения видеоимпульса нижней антенны 2 относительно пикового значения видеоимпульса верхней антенны 1.

Если после измерения времени запаздывания  $\Delta t_i$  определить азимутальный угол  $\beta$  из формулы (5), то получим неверный результат. Это объясняется тем, что в секторе малых углов места время запаздывания определяется не только разном антенн по горизонтали, но и высотами подъема антенн, которые отличаются друг от друга и для которых влияние отраженных от земли эхо-сигналов цели проявляется по разному.

Уточнить азимутальный угол цели  $\beta$  предлагается путем решения следующего трансцендентного уравнения

$$\Delta t_H - t_{m_2} + t_{m_1} = 0, \quad (7)$$

где  $t_{m_1}$  – время максимума сигнала, рассчитанное из формулы (2);

где  $t_{m_2}$  – время максимума сигнала, рассчитанное из формулы (6).

Пример графического решения уравнения (7) представлен на рис. 5.

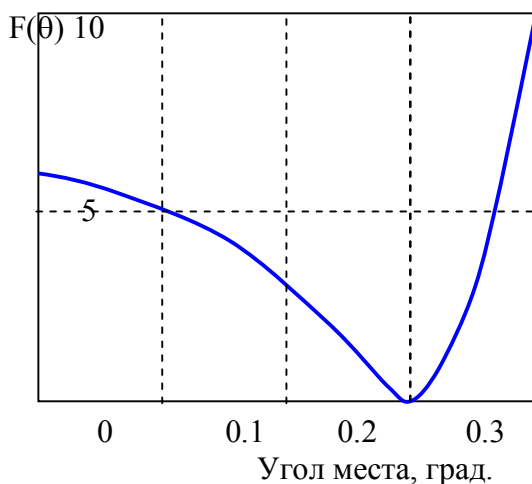


Рис. 4. Решение уравнения (4)

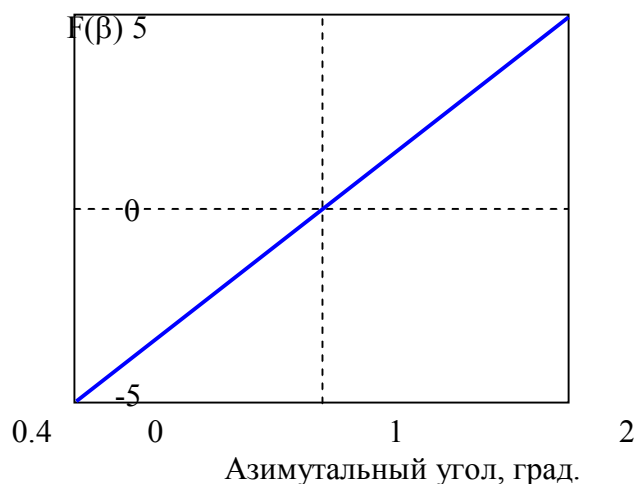


Рис. 5. Решение уравнения (7)

При этом азимутальный угол цели был  $\beta=1^\circ$ , высота подъема над землей нижней антенны  $h_2 = 10$  м, расстояние между центрами апертур антенн по горизонтали  $d=1$  м, а другие параметры сигнала и угломерной системы были указаны выше.

Предложенный метод измерения азимутального угла цели не уступает по точностным характеристикам известному методу [1], но отличается от последнего тем, что может обеспечить измерения в секторе малых углов места над землей.

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 наземной маловысотной трехкоординатной РЛС с несинусоидальным сверхширокополосным видеоимпульсным зондирующим сигналом без несущей частоты на основе использования в ней двух одинаковых зеркальных антенн, разнесенных по высоте и горизонтали, и 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 / Х.Ф. Хармут // – 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., доц. Вишнівський В.В.