

максимальная величина  $\tau_{\max}$ , при которой не происходит ложное обнаружение сигнала ЗД при приеме ИП, составляет 9 мкс.

Таблица 5  
Пиковые значения ВКФ сигнала ЗД и стопового сигнала канала Борт-земля для всех КК;  $\tau_{\max} = 10$  мкс

		Сигнал ЗД				
		№ КК				
		I	II	III	IV	
Стоповый сигнал Борт-земля	№ КК	I	1	2	2	2
		II	1	2	2	2
		III	2	2	2	2
		IV	2	2	2	2

#### Заключение

1. Предложенный формат сигналов обеспечивает защищенность информационного канала от внутрисистемных помех.

2. При наличии переотражений от местных предметов или земной поверхности предложенный формат сигналов информационного канала обеспечивает защищенность от внутрисистемных помех при задержках переотражённых сигналов канала Борт-земля не более 9 мкс (что позволяет использовать предложенный формат сигналов в условиях интенсивных переотражений).

#### Библиографический список

1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2004.
2. Бакулев П. А., Сосновский А. А. Радионавигационные системы: Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2005.
3. Глобус И. А. Двоичное кодирование в асинхронных системах. М.: Связь, 1972. 108 с.

УДК 621.396

### ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОМЕСТНЫХ КООРДИНАТ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г. А. Ершов, В. Д. Сухотерин, В. А. Синицын

*АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»  
Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова*

Одной из проблем, требующих своего практического решения, является проблема оценки угломестных координат низколетящих целей. Суть проблемы заключается в искаженных данных за счет многолучевого распространения радиоволн, возникающего из-за переотражений от земной поверхности и сопутствующих этому интерференционных явлений.

Рельеф земной поверхности может быть чрезвычайно разнообразным. Реальная поверхность почвы всегда в большей или меньшей степени шероховата. В зависимости от шероховатости поверхности, отражение от земной поверхности будет зеркальным или диффузным. Когда поверхность земли гладкая, то преобладает зеркальная составляющая отраженных сиг-

налов. Когда поверхность земли шероховатая, то отражение характеризуется как зеркальной, так и диффузной составляющими [1].

Каждая неровность, каждый бугорок является в своем роде некоторым вторичным излучателем, рассеивающим волны во все стороны, хотя и неравномерно (рисунок 1). В результате энергия в точку приема будет попадать не только от геометрической точки отражения в вышеуказанном смысле, но и от целого ряда точек. При этом фаза и поляризация волн, отраженных от этих неровностей, могут быть самыми различными.

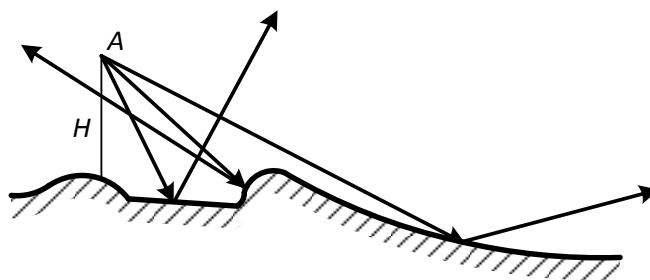


Рис.1. Отражение радиоволн от неровной поверхности

Совершенно строгого рассмотрения этого явления провести нельзя. Лишь при известных предположениях относительно характера неровностей можно сделать некоторые ориентировочные выводы.

Наиболее типичны два предельных случая. Первый соответствует условиям, когда можно принять, что поверхность имеет большое число достаточно малых, хаотически расположенных неоднородностей и неровностей. Физически это означает, что допускается изотропное нарушение гладкости и однородности земной поверхности, высота неровностей мала по сравнению с длиной волны, или они пологи. Второй случай соответствует условиям, когда имеются хорошо организованные, резко выделяющиеся крупномасштабные неоднородные области, например, переход от суши к морю, или единичные, достаточно большие препятствия и т. п.

Рассеивающее влияние неровностей земной поверхности зависит от их формы, расположения, относительной высоты  $\Delta h / \lambda$  (здесь  $\Delta h$  – высота неровностей, которую в общем случае следует определять как среднеквадратичное отклонение высот данной поверхности от уровня ровной местности) и угла скольжения  $\psi$ , причем при малых углах скольжения влияние этих неровностей как бы сглаживается.

Простым опытом, посредством которого можно представить влияние неровностей, является наблюдение за отражением света от листа бумаги, имеющего шероховатую поверхность. Под большим углом скольжения поверхность кажется тусклой, но при достаточно малом угле она кажется блестящей и ведет себя подобно зеркалу, давая грубое изображение источника света. Такие же явления имеют место, когда, например, асфальтовая дорога дает зеркальное отражение (блестит) при скользящем падении лучей.

Для качественного пояснения этого явления рассмотрим отражение плоской волны от местности с неровностями высотой  $\Delta h$  (рис. 2, а).

Для этого необходимо выделить два луча  $A_1C_1$  и  $A_2C_2$ . Если бы неровности не было, то точка падения второго луча  $C_2$  переместилась бы в точку  $C_2'$  (рисунок 2, б), и фаза волны в точках  $B_1$  и  $B_2'$ , лежащих в плоскости перпендикулярной лучам  $C_1B_1$  и  $C_2'B_2'$  была бы одинаковой, так как путь  $A_1C_1B_1 = A_2C_2'B_2'$  и плоскость  $B_1B_2'$  является фронтом волны. Но при наличии неровности путь  $A_1C_1B_1 > A_2C_2B_2$  и фронт волны искажается.

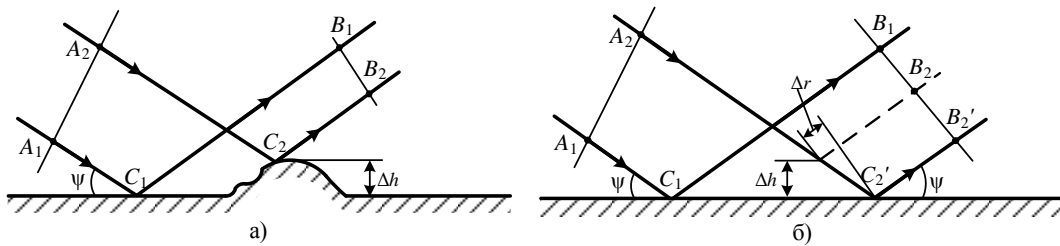


Рис. 2. К учету влияния высоты неровностей

Степень этого искажения зависит от разности хода [2]

$$\Delta r = A_2 C_2' B_2' - A_2 C_2 B_2 = \frac{\Delta h}{\sin \psi} [1 - \sin(90 - 2\psi)] = 2\Delta h \sin \psi \quad (1)$$

Если условиться что, изменения фазы в плоскости  $B_1 B_2$  не должно выходить за пределы  $\frac{\pi}{2}$ , то получим, что «допустимая» высота неровностей

$$\Delta h \leq \frac{\lambda}{8 \sin \psi} \quad (2)$$

Более «жесткому» условию, когда изменение фазы в плоскости  $B_1 B_2$  не должно выходить за пределы  $\frac{\pi}{4}$ , соответствуют значения

$$\Delta h \leq \frac{\lambda}{16 \sin \psi} \quad (3)$$

Пока эти неравенства выполняются, отражение можно считать зеркальным, а когда они не выполняются отражение характеризуется также диффузной составляющей.

Эта формула представляет собой так называемый критерий Релея для зеркального отражения. Из этой формулы видим, что высоты допустимых неровностей для зеркального отражения определяются не только длиной волны, но и существенно зависят от угла скольжения  $\psi$ . Допустимый размер неровностей тем больше, чем меньше угол скольжения. С этой точки зрения практические требования к участку поверхности, для которого справедливо переотражение радиоволны, с уменьшением угла скольжения  $\psi$  понижаются и, следовательно, допустимые неровности могут быть большими.

При скользящем падении, когда угол  $\psi$  очень мал, даже большие неровности не препятствуют считать землю за плоскость. Это и объясняет тот непонятный на первый взгляд факт, что при очень малых углах падения влияние неровностей местности (если она не является пересеченной, в том смысле, как это обычно принято понимать) сглаживается, и интерференционные формулы, характеризующие отражение от гладкой идеализированной плоской поверхности, дают результаты, находящиеся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными для реальной местности.

Из самой природы этого фактора ясно, что весьма затруднительно дать неравномерностям количественную характеристику неровностей. Этим критерием можно также пользоваться при расчетах с помощью интерференционных, отражательных формул. При сильном нарушении этого критерия отраженное поле становится изотропным, диффузным и интенсивность рассеянных волн, как и в оптике, удовлетворяет закону Ламберта - она пропорциональна косинусу угла с нормалью к рассеивающей поверхности.

Рассмотрение простой лучевой картины автоматически исключает из рассмотрения местные дифракционные явления, обусловленные неровностями, сравнимыми с длиной волны. Так как в действительности поверхность не может быть хорошо представлена какой-либо

простой геометрической формой, приходится ограничить настоящее обсуждение рассмотрением влияния неровностей в рамках теории дифракции Френеля.

В общем случае для того, чтобы учесть диффузную составляющую, коэффициент отражения следует представить следующим образом

$$\rho = \rho_s + \rho_d \quad (4)$$

где  $\rho_d$  – составляющая диффузного отражения;  $\rho_s$  – составляющая зеркального отражения, которая имеет следующее среднеквадратическое значение [3]

$$\rho = \exp\left[-2\left(\frac{2\pi\sigma_h \sin \psi}{\lambda}\right)^2\right] \quad (5)$$

Здесь  $\sigma_h$  – стандартное отклонение высоты поверхности,  $\psi$  – угол скольжения,  $\lambda$  – электромагнитная длина волны. Экспериментальные измерения зеркального отражения от шероховатой поверхности имеют разумное согласие с (3).

По мере приближения угла скольжения к нулю  $\rho_s$  приближаются к единице, а фаза коэффициента отражения приближается к  $180^\circ$  для всех поляризаций (рис. 3) [4].

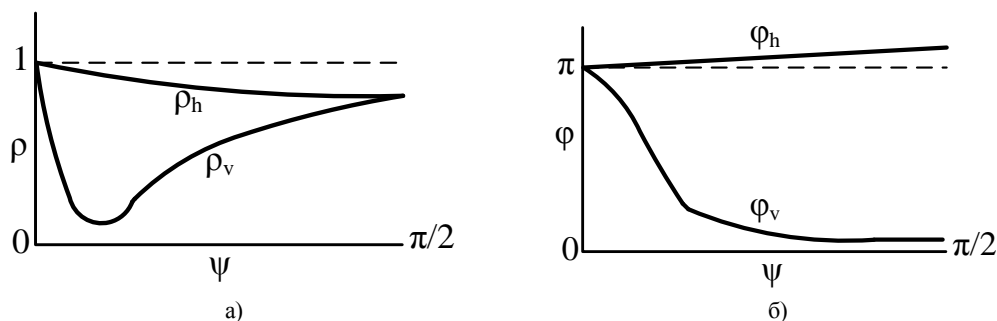


Рис. 3. Зависимости от угла скольжения  $\psi$ :

- а) модулей коэффициента отражения для вертикально поляризованной волны  $\rho_v$  и горизонтально поляризованной волны  $\rho_h$ ;
- б) фаз коэффициента отражения для вертикально поляризованной волны  $\varphi_v$  и горизонтально поляризованной волны  $\varphi_h$

Для очень малых углов скольжения (менее  $1^\circ$ ), коэффициенты отражения для горизонтальной и вертикальной поляризаций примерно равны, т.е.  $\rho_v = \rho_h \approx 1$ ,  $\varphi_v = \varphi_h \approx \pi$ . Это означает, что свойства отражения будут одинаковыми для радиоволн с горизонтальной и вертикальной поляризацией для малых углов скольжения.

Когда действующая часть отражающей поверхности очень гладкая, измеренный коэффициент  $\rho$  мало отличается от теоретического для гладкой поверхности с теми же проводимостью и диэлектрической проницаемостью. При неровной поверхности имеется значительное рассеяние излучения; в частности, если оно поляризовано горизонтально, то уменьшение средней интенсивности отраженной волны достаточно ощутимо. Это особенно заметно на протяженных трассах, для которых маловероятно, чтобы вся отражающая поверхность была достаточно гладкой для эффективного зеркального отражения. Неровности поверхности не только способствуют уменьшению модуля коэффициента отражения, но и являются причиной его значительных и быстрых колебаний.

Эти закономерности можно использовать для анализа зеркального многолучевого пространства с очень малыми углами места цели.

#### Библиографический список

1. Barton D. K. Radar System Analysis and Modeling, Artech House, 2005.
2. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972.
3. Sherman S. M., Barton D. K. Monopulse Principles and Techniques, Artech House, 2011.
4. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. М.: Зарубежное радио, 1972.

УДК 621.396

### КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г. А. Ершов, В. Д. Сухотерин, В. А. Сеницын

*АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»  
Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова*

Рассмотрен метод комплексной оценки угловых координат низколетящих летательных аппаратов в условиях влияния переотражений от земной поверхности. Представлены аналитические выражения для вычисления угла места летательного аппарата, находящегося на малых углах места, при работе посадочного радиолокатора в условиях многопутного распространения радиоволн.

Посадочные радиолокаторы (ПРЛ) обеспечивают самый сложный и ответственный элемент полета летательного аппарата (ЛА) – заход на посадку, поэтому к ПРЛ предъявляются довольно жесткие требования по точности и достоверности радиолокационной информации. Точность измерения угловых координат летательных аппаратов, заходящих на посадку, является важной задачей при обеспечении безопасности полетов военной авиации.

На точность определения угловых координат летательных аппаратов моноимпульсным посадочным радиолокатором влияет ряд факторов. Одним из основных факторов, связанным условиями распространения радиоволн, является переотражения от поверхности земли.

Физическая причина возникающих трудностей точного определения угломестных координат низколетящих целей связана с тем, что облучение ЛА, располагающихся на малых углах места над подстилающей поверхностью, сопровождается облучением этой поверхности и, как следствие, формированием не только сигнала, отраженного от ЛА, но и сигнала, отраженного от подстилающей поверхности. Это обстоятельство влияет на работу РЛС и приводит к ошибке определения угломестной координаты ЛА вследствие искажений пеленгационной характеристики РЛС в угломестной плоскости, вид и степень которых зависят от взаимного расположения ЛА и антенной системы РЛС, а также от отражательных и поглощающих свойств подстилающей поверхности. В частности, изменяется крутизна пеленгационной характеристики и смещается положение ее нуля в угломестной плоскости, что приводит к ошибкам определения угломестной координаты цели, а при определенных условиях – к срыву сопровождения.

Моноимпульсный радиолокатор формирует в вертикальной плоскости две перекрещивающиеся диаграммы направленности (ДН) антенны, разнесенные на определенный угол от равносигнального направления (РСН) (рисунок 1). Разница между напряжениями, измеренными по верхнему и нижнему лепестку диаграммы направленности дает информацию об угле отклонения цели от равносигнального направления. Если  $V_1 - V_2 > 0$ , то цель находится в области