

УДК 621.371 : 523.164

## АНАЛИЗ ФОРМЫ ДОПЛЕРОВСКИХ СПЕКТРОВ РАДИОВОЛН, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

*А. Г. Павельев, О. И. Яковлев, А. И. Кучерявенков, О. Е. Милехин,  
Р. В. Бакитъко, В. И. Рогальский, Е. Г. Дегтяренко*

Представлены результаты теоретического анализа влияния рефракции и крупномасштабных особенностей рельефа Венеры на форму доплеровских спектров отраженных от ее поверхности радиоволн. Влияние рефракции приводит к асимметрии спектров, а крупномасштабные особенности рельефа вызывают изрезанность распределения энергии по доплеровским частотам. Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными указывает на хорошую точность развитой теории, а также свидетельствует о возможности определения формы рельефа отражающей области с помощью спектральных измерений. Наилучшей для исследования рельефа планеты представляется схема бистатической радиолокации с использованием ретрансляции отраженного сигнала с помощью спутника Венеры.

Исследование характеристик отраженных от планет сигналов имеет двоякое значение для практических приложений. С одной стороны, отражения являются мешающим фактором, например, в случае, когда трасса радиосвязи космического аппарата с Землей проходит вблизи планеты. Для оценки важности этого фактора необходимо иметь возможность заранее определять ожидаемую величину мощности помехи, распределение ее по спектру, поляризационные и другие характеристики. С другой стороны, отраженные радиоволны содержат информацию о свойствах рельефа и атмосферы планеты. Этую информацию можно извлечь путем соответствующей обработки отраженного сигнала [1-3] при условии, что избранная схема локации обеспечивает требуемое соотношение сигнал/шум.

Существующая к настоящему времени теория [4, 5] объяснила многие закономерности, наблюдающиеся при отражении радиоволн от поверхностей планет. Она позволяет рассчитывать мощность и форму спектров отраженных сигналов и служит основой для интерпретации экспериментальных данных. Однако применение известной методики [4, 5] для расчета отражений от Венеры встречается с трудностями, которые связаны с необходимостью учета рефракции в плотной атмосфере и влияния крупномасштабной составляющей рельефа.

В работах [6, 7] при решении этой задачи использовались лучевые представления для описания рефракции в атмосфере, а для описания рассеяния на шероховатой поверхности применялось приближение Кирхгофа.

В данной работе исследуется влияние крупномасштабных особенностей рельефа и рефракции на форму доплеровских спектров радиоволн, отраженных от поверхности Венеры. Другая цель статьи заключается в том, чтобы показать эффективность варианта бистатической радиолокации Венеры с использованием ретрансляции отраженного сигнала.

## 1. ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим типичное положение спутника и планеты при радиосвязи с Землей (рис. 1). В точке  $T$  находится спутник, точка  $T'$  является проекцией точки  $T$  на поверхность планеты, линией  $AA'$  обозначен горизонт Венеры. Линия  $T'D$  является сечением средней сферической поверхности планеты плоскостью Земля — спутник — центр Венеры, которая совпадает с координатной плоскостью  $xy$  декартовой системы  $xuz$ . Центр этой системы находится в центре планеты (точка 0), а ось  $x$  совпадает с лучом  $0T$ . Кривые 1 и 2 на рис. 1 обозначают траектории распространения прямой и отраженной волн. Из-за влияния рефракции траектория 2 искривлена.

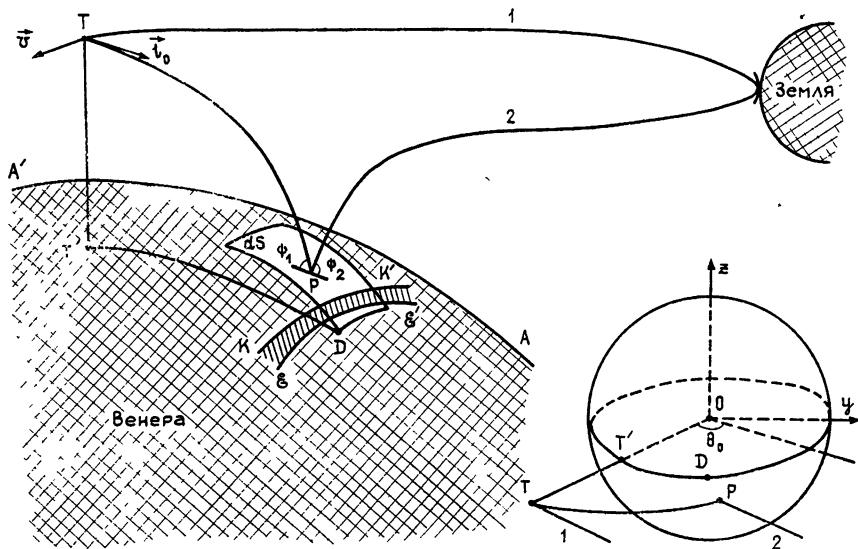


Рис. 1. Взаимное положение спутника и планеты при радиосвязи с Землей.

Вследствие эффекта Доплера, возникающего при перемещении спутника относительно планеты, радиоволны, рассеянные различными участками, в общем случае имеют разные частоты. Величина доплеровского сдвига радиоволн, отраженных от некоторого участка поверхности (рис. 1), определяется соотношением

$$F = \mathbf{v} l_0 / \lambda, \quad (1)$$

где  $l_0$  — единичный вектор, параллельный касательной к лучу  $TP$  в точке  $T$ ,  $\mathbf{v}$  — скорость перемещения спутника относительно планеты. На рис. 1 заштрихована полоса  $KK'E'E$  на поверхности планеты, для которой рассеянные волны имеют частоты в диапазоне  $F$ ,  $F + \Delta$ . Энергию  $W$  на входе приемника, соответствующую отражениям от указанной полосы, можно найти из уравнения

$$W = \frac{P_0 G}{16\pi^2 R_3^2} \int dS \sigma(P) A_{\text{пр}} R_c^{-2}, \quad (2)$$

где  $P_0$  — мощность передатчика,  $G$  — усиление передающей антенны в направлении на отражающую область,  $A_{\text{пр}}$  — площадь приемной антенны,  $R_3$ ,  $R_c$  — соответственно расстояния по прямой линии спутник — точка  $P$  и Земля — точка  $P$ ,  $dS$  — текущий элемент интегрирования

с центром в точке  $P$ , находящийся в пределах полосы интегрирования  $KK'E'E$ ,  $\sigma(P)$  — дифференциальная поверхность рассеяния.

Предположим, что поверхность представляет собой наложение крупномасштабной (гор, кратеров, холмов) и мелкомасштабной (неровности с радиусом корреляции от нескольких длин волн и более) составляющих рельефа:

$$r(\theta, \varphi) = r_k(\theta, \varphi) + r_c(\theta, \varphi), \quad (3)$$

где  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  — сферические координаты в системе, полярная ось которой совпадает с лучом  $0z$ , а азимутальный угол отсчитывается в плоскости  $xy$  от положительного направления оси  $x$ .

Дифференциальная поверхность рассеяния  $\sigma(\theta, \varphi)$  зависит от положения элемента  $dS$  на крупномасштабном рельефе и в соответствии с решением, полученным в работах [6–8], может быть записана в виде

$$\sigma(\theta, \varphi) = \frac{4\pi(n_1 e_r)(1+p^2+q^2) W(p, q) V^2(\psi_1, \psi_2) X_1^2(\psi_1) X_2^2(\psi_2) \Phi(\psi_1, \psi_2)}{(\sin \psi_1 + \sin \psi_2)^2 \cos^{-2}(x/2)}; \quad (4)$$

$$\cos x_0 = l_1 l_2, \quad (5)$$

$\psi_1, \psi_2$  — углы скольжения падающей и отраженной радиоволн в точке  $P$ ,  $V^2(\psi_1, \psi_2)$  — коэффициент отражения, зависящий от поляризации передающей и приемной антенн,  $\Phi(\psi_1, \psi_2)$  — функция освещенности, описывающая эффект взаимных затенений случайных неровностей,  $X_1^2(\psi_1)$ ,  $X_2^2(\psi_2)$  — рефракционное ослабление радиоволн, распространяющихся по трассам  $TP$  и  $PZ$ ,  $l_1, l_2$  — единичные векторы, направленные вдоль касательных к лучевым траекториям падающей и отраженной волн в точке  $P$ ,  $n_1$  — нормаль к крупномасштабной составляющей рельефа,  $e_r$  — единичный вектор, параллельный направлению центра планеты — точки  $P$ ,  $W(p, q)$  — плотность распределения наклонов мелкомасштабной составляющей рельефа,  $p, q$  — соответственно случайные наклоны поверхности вдоль широтного и меридионального направлений.

Обобщая результаты работы [7, 8] на случай наличия рефракции, можно показать, что аргументы функции  $W(p, q)$  можно найти из соотношений

$$p = - \frac{\left( \frac{\cos \psi_2 \sin \varphi}{\sin \mu_2} - \frac{\cos \psi_1 \sin(\theta_0 - \varphi)}{\sin \mu_1} \right)}{(\sin \psi_1 + \sin \psi_2) - r'_{\varphi k}/a}; \quad (6)$$

$$q = - \cos \theta \frac{\left( \frac{\cos \psi_2 \cos \varphi}{\sin \mu_2} + \frac{\cos \psi_1 \cos(\theta_0 - \varphi)}{\sin \mu_1} \right)}{(\sin \psi_1 + \sin \psi_2) - r'_{\theta k}/a}, \quad (7)$$

где  $\theta_0$  — угол с вершиной в центре между направлениями на спутник и Землю,  $\mu_1, \mu_2$  — соответственно углы с вершиной в центре планеты между направлением на точку  $P$  и направлениями на Землю и спутник.

Конкретный вид функции  $W(p, q)$  зависит от свойств случайных неровностей. С данными локации планет с Земли хорошо согласуется распределение [7]:

$$W(p, q) = \frac{C}{2\pi} [1 + C(p^2 + q^2)]^{-3/2}, \quad C = \frac{\lambda l}{4\pi(\Delta h^2)}, \quad (8)$$

где  $\Delta h^2$ ,  $l$  — дисперсия высот и радиус корреляции случайных неровностей.

## 2. ДОПЛЕРОВСКИЙ СПЕКТР ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА

Для получения ожидаемого (среднего) распределения энергии отраженного сигнала по доплеровским частотам перейдем в (2) от интегрирования по поверхности к интегрированию по  $\theta, \varphi$ . Затем, сделав замену переменной  $\varphi$  на  $F$ , получим

$$W(F) = W_0 \Delta \int \frac{d\theta \sigma(\theta, \varphi(\theta, F))}{(n_1 e_r) \left| \frac{\partial F}{\sigma \varphi} \right|}, \quad W_0 = \frac{P_0 G A_{\text{пр}}}{16\pi^2 R_3^2 R_c^2}, \quad (9)$$

где  $\Delta$  — величина разрешения приемной аппаратуры. Выражение (9) представляет форму доплеровского спектра в общем случае. Для случая бистатической радиолокации планет это соотношение можно упростить, используя условие  $C \gg 1$ , которое практически всегда выполняется. При этом соотношение (9) принимает различный вид в зависимости от формы крупномасштабного рельефа и влияния рефракции.

Если крупномасштабный рельеф отсутствует, т. е.  $r'_{\varphi k} = 0$ ,  $r'_{\theta k} = 0$ , а изменение рефракционного ослабления в пределах существенной зоны незначительно, то спектр описывается простым соотношением

$$S(F) = \frac{W}{W_0 \Delta} = \frac{2\sigma_n}{\pi} [1 + 4(F - F_0)^2 / (\Delta F)^2]^{-1}, \quad (10)$$

где  $\sigma_n$  — интегральная поверхность рассеяния, соответствующая гладкой сфере [6],  $\Delta F$  — ширина доплеровского спектра по уровню половины мощности,  $F_0$  — значение частоты, соответствующей максимальной спектральной плотности.

Величина  $\Delta F$  зависит от шероховатости поверхности  $C$ , угла скольжения радиоволн  $\psi$  в точке зеркального отражения от гладкой сферы  $D$  и скорости движения  $v_d$  точки  $D$ :

$$\Delta F = 4v_d n_d \sin \psi / \lambda \sqrt{C}, \quad (11)$$

где  $\lambda$  — длина радиоволн, излучаемых спутником,  $n_d$  — показатель преломления атмосферы в точке  $D$ . Скорость движения  $v_d$  зависит от условий рефракции в атмосфере и скорости орбитального движения спутника  $\mathbf{v}$ . Компоненты скорости спутника в избранной системе координат  $xyz$  связаны со скоростью  $\mathbf{v}_d$  уравнениями

$$v_d = (v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2)^{1/2},$$

$$v_{\parallel} = \frac{r [rn_d v_1 \sin \psi + v_2 (R + n_d r \sin \psi)]}{r_c [2(R + n_d r \sin \psi) - n_d r \sin \psi (1 - d\xi/d\psi)]}, \quad (12)$$

$$v_{\perp} = \frac{r_d v_3 \cos(\psi - \xi)}{r_c \sin \theta_0}, \quad R = (r^2 - n_d^2 r^2 \cos^2 \psi)^{1/2} - n_d r \sin \psi,$$

где  $v_1, v_2, v_3$  — проекции скорости спутника  $\mathbf{v}$  на оси  $x, y, z$ ,  $v_{\parallel}$ ,  $v_{\perp}$  — проекции скорости  $\mathbf{v}_d$  на плоскость  $xy$  и на ось  $z$ ,  $r_c, r_d$  — соответственно расстояния  $T0, D0$ ,  $\xi$  — угол рефракции радиоволн, соответствующий точке  $D$  (рис. 1).

В соответствии с (10) форма спектра является симметричной, максимум спектральной плотности  $W(F)$  соответствует точке зеркального отражения  $D$ . Выражение (10) хорошо описывает форму спектра при больших значениях угла скольжения. Однако при меньших значениях угла скольжения в спектре появляется асимметрия, связанная с влиянием рефракционного ослабления, и соотношение (10) удовлетворитель-

но согласуется с экспериментальными данными только вблизи максимума спектральной плотности  $W(F)$ . В этом случае спектр описывается значительно более сложным выражением:

$$S(F) = \frac{V\bar{C} X_1^2(\psi_1) X_2^2(\psi_2) V^2((\psi_1 + \psi_2)/2) \cos \beta}{\cos^4 \left( \frac{\psi_2 - \psi_1}{2} \right) |F'_\varphi| \left[ 1 + C \cos^2 \beta \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\psi_2 - \psi_1}{2} \right) \right]} ; \quad (13)$$

$$\cos \beta = |p'_\varphi F'_\theta| / [F'_\theta{}^2 p'_\varphi{}^2 + \rho^2 F'_\varphi{}^2] ,$$

$$\rho = [\cos \psi_2 \operatorname{ctg} \varphi + \cos \psi_1 \operatorname{ctg} (\theta_0 - \varphi)] / (\sin \psi_1 + \sin \psi_2) ,$$

$$p'_\varphi = 0,5 \left[ \left( 1 - \frac{d\xi_1}{d\psi_1} \right)^{-1} - \right. \\ \left. - \left( 1 - \frac{d\xi_2}{d\psi_2} - \frac{n_d r \sin \psi_2}{(r_c^2 - n_d^2 r^2 \cos^2 \psi_2)^{1/2}} \right)^{-1} \right] / \cos^2 \left( \frac{\psi_2 - \psi_1}{2} \right) ,$$

$$F'_\theta = \frac{n_d(r) r \cos \psi_2}{\lambda r_c \sin \varphi} v_3 ;$$

$$F'_\varphi = \frac{n_d(r) r \sin \psi_2 [n_d r \cos \psi_2 v_1 + v_2 (R_2 + n_d(r) r \sin \psi_2)]}{\lambda r_c R_2 [1 - d\xi_2/d\psi_2 (1 + n_d r \sin \psi_2/R_2)]} ; \quad (15)$$

$$\varphi = \pi/2 - \psi_2 - \xi_2(\psi_2) - \arcsin(n_d(r) r \cos \psi_2/R_2) ,$$

$$R_2 = (r_c^2 - n_d^2 r^2 \cos^2 \psi_2)^{1/2} - n_d r \sin \psi_2 , \quad (16)$$

где  $X_1^2(\psi_1)$ ,  $X_2^2(\psi_2)$  — рефракционное ослабление [6] радиоволн при распространении по лучевым траекториям  $TP$ ,  $PZ$  (рис. 1),  $V^2 \left( \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} \right)$  — коэффициент отражения радиоволн, зависящий от поляризационных характеристик передающей и приемной антенн и свойств вещества грунта планеты.

Зависимость  $S(F)$  от доплеровской частоты  $F$  входит в правую часть (13) неявно. От значения  $F$  зависят углы скольжения  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ , углы рефракции  $\xi_1(\psi_1)$ ,  $\xi_2(\psi_2)$  и угол  $\varphi$ . Связь между  $F$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  дается уравнениями

$$\alpha = \operatorname{arctg} [\lambda \delta F (v_{\perp 1} + \sqrt{v_{\perp 1}^2 + 2v_{\parallel 1} \lambda \delta F - \lambda^2 (\delta F)^2})^{-1}] ; \quad (17)$$

$$\psi_2 = \arccos \left[ \frac{r_c \sin (\theta_0 + 2\alpha)}{n_d(r) r} \right] , \quad \psi_1 - \xi_1(\psi_1) = 2\alpha - \psi_2 + \xi_2(\psi_2) , \quad \delta F = F - F_n , \quad (18)$$

где  $F_n$  — доплеровская частота, соответствующая прямому сигналу,  $v_{\perp 1}$ ,  $v_{\parallel 1}$  — соответственно компонента скорости спутника, перпендикулярная и параллельная направлению на Землю; обе компоненты параллельны плоскости  $TD0$ .

По известным параметрам траектории спутника  $v_{\perp 1}$ ,  $v_{\parallel 1}$ ,  $\theta_0$ ,  $r_c$ ,  $F_n$  и данному значению доплеровской частоты  $F$  с помощью (17) и первого из уравнений (18) можно найти  $\alpha$  и  $\psi_2$ . Затем, используя известную зависимость угла рефракции в атмосфере Венеры от угла скольжения, можно решить трансцендентное уравнение (18) относительно угла  $\psi_1$ . Полученные значения углов  $\psi_2$ ,  $\psi_1$  и  $\varphi$  необходимо подставить в (13) — (15) для определения текущего значения спектральной плотности  $S(F)$ .

Допустим, что на поверхности имеются двумерные крупномасштабные образования, причем линии, где высота рельефа принимает постоянные значения, перпендикулярны плоскости  $xy$ . Это значит, что  $r'_{\varphi k} \neq 0$ ,  $r'_{\theta k} = 0$ . Осуществляя в этом случае интегрирование в (2), в предположении  $C \gg 1$  получим

$$S(F) = \frac{2\sigma_n}{\pi\Delta F} \left/ \left[ 1 + \frac{4}{(\Delta F)^2} \left( \frac{p_k n_d v_d \|}{\lambda} \sin \psi + F - F_0 \right)^2 \right] \right., \quad (19)$$

где  $p_k = r'_{\varphi k}/r$  — наклон крупномасштабной составляющей рельефа в сечении плоскостью  $xy$ .

Из (19) следует, что форма спектра в значительной степени определяется функцией  $p_k$ . В зависимости от ее вида в спектре  $S(F)$  может быть один или несколько максимумов. Существенные изменения функции  $p_k$  могут привести к сильной изрезанности спектральной плотности  $S(F)$ . Из уравнения (19) видно также, что в рассматриваемом случае существует возможность определить форму крупномасштабного рельефа в исследуемой области путем измерения спектральной плотности  $S(F)$ . Однако в общем случае значению  $S(F)$  соответствуют два значения  $p_k$ , т. е. имеется неоднозначность в решении обратной задачи. В диапазоне малых углов скольжения в формулу (19) должны быть внесены изменения, связанные с необходимостью учета эффекта вытягивания существенной зоны в плоскости  $xy$ . При этом вместо формулы (19) необходимо использовать соотношение (13), в знаменателе которого выражение в квадратных скобках будет иметь вид

$$1 + C \cos^2 \beta \left( p_k + \operatorname{tg} \frac{\Psi_2 - \Psi_1}{2} \right)^2. \quad (20)$$

Остальные формулы (14)–(16) остаются без изменений. Таким образом, в случае двумерного рельефа существует возможность восстановления его формы путем измерения спектральной плотности  $S(F)$  при условии, что известен параметр шероховатости  $C$ .

В трехмерном случае связь между формой спектра отраженного сигнала и формой рельефа является наиболее сложной. Ниже рассмотрим случай трехмерного крупномасштабного рельефа, когда  $r'_{\theta k} \neq 0$ ,  $r'_{\varphi k} \neq 0$ . Если наклон рельефа в пределах полосы  $EE'KK'$  (рис. 1) остается постоянным, т. е.  $r'_{\theta k} = \text{const}$ ,  $r'_{\varphi k} = \text{const}$ , то спектр  $S(F)$  описывается простым соотношением

$$S(F) = \frac{2\sigma_n}{\pi\Delta F} \left[ 1 + C \left( q_k \sin \beta_s - p_k \cos \beta - \frac{2(F - F_0)}{\Delta F c^{1/2}} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (21)$$

где  $\beta$  — угол между касательной к линии постоянной доплеровской частоты и нормалью к линии  $TD$ . Угол  $\beta$  может быть выражен через компоненты скорости  $v_d$  зеркальной точки  $D$ :

$$\sin \beta = v_{d\perp}/v. \quad (22)$$

В этом случае связь между формой спектра и крупномасштабным рельефом сохраняет такой же вид, как и в двумерном случае. В остальных случаях зависимость формы спектра от вида рельефа является более сложной. В частности, могут возникать ситуации, когда спектральная плотность отраженного сигнала близка к нулю вследствие неблагоприятной ориентации крупномасштабного рельефа (например, склон, высота которого убывает в направлении, перпендикулярном линии  $TD$ ).

Однако и в этом общем случае форма спектра остается характеристической, очень чувствительной к наличию крупномасштабных образований в пределах существенной зоны.

### 3. АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение численных результатов с экспериментальными данными позволяет определить степень достоверности полученных выше теоретических выводов. На рис. 2, 3 приведены образцы экспериментальных спектров, полученных в результате обработки данных бистатической радиолокации Венеры, проведенной в 1975 году с помощью спутников «Венера-9» и «Венера-10». По вертикальной оси на рис. 2, 3 отложены значения спектральной плотности  $S(F)$ , нормированные к максимальной величине  $S(F)$ , по горизонтальной оси — разность доплеровских частот сигналов прямой и отраженной радиоволн, выраженная в килогерцах. Ломаными линиями на рис. 2, 3 обозначены экспериментальные спектры, гладкие кривые построены с использованием соотношений (13)–(16) по известным данным о траектории спутника. При расчетах использовалась зависимость показателя преломления от высоты, найденная с помощью модели атмосферы [9]. Величина параметра шероховатости  $C$  при расчетах принималась равной 2000. Нулевое значение спектральной плотности на рис. 2, 3 соответствует среднему уровню тепловых шумов приемника. Вариации относительно этого уровня, наблюдающиеся в крыльях экспериментальных спектров, связаны с флюктуациями шумов приемника. На рис. 2 приведен спектр, полученный при локации первого района, на рис. 3 показан характерный спектр, наблюдавшийся при локации второго района.

Спектр на рис. 2 является симметричным вблизи максимума. При этом максимум спектральной плотности отраженного сигнала практически совпадает с положением максимума теоретической кривой, рассчитанной при  $C = 2000$ . Форма спектра вблизи максимума на рис. 2 также согласуется с теоретической кривой. Это указывает на хорошее соответствие отражательных свойств поверхности теоретическим предпосылкам, принятым при модельных расчетах. В этом районе крупномасштабный рельеф практически отсутствует, т. е.  $r_{\varphi k} = 0$ ,  $r_{\theta k} = 0$ , и имеется слабо выраженная мелкомасштабная шероховатость поверхности. Среднеквадратичное значение случайных наклонов неровностей  $\tau$  в этом районе, соответствующее значению параметра  $C = 2000$ , равно  $1^{\circ},2$ . Таким образом, отражающая область в исследованном районе представляет собой равнину, более гладкую, чем поверхность лунных морей.

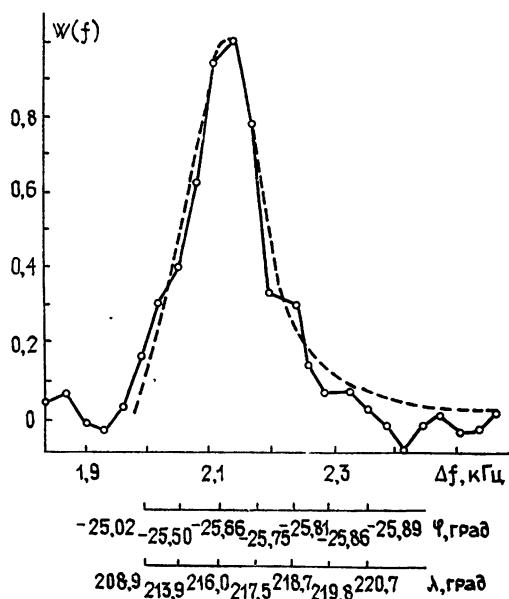


Рис. 2 Сравнение экспериментального спектра отраженного сигнала с теоретическим, полученным для модели изотропной рассеивающей поверхности.

На рис. 3 ширина спектра примерно такая же, как и на рис. 2. Это указывает на то, что мелкомасштабная шероховатость поверхности в этом районе примерно такая же, как и в первом. Вместе с тем экспериментальный спектр на рис. 3 имеет большую изрезанность и хуже согласуется с теоретической кривой. Кроме того, на краях спектра имеются отдельные выбросы. Эти особенности связаны с влиянием крупномасштабных форм рельефа.

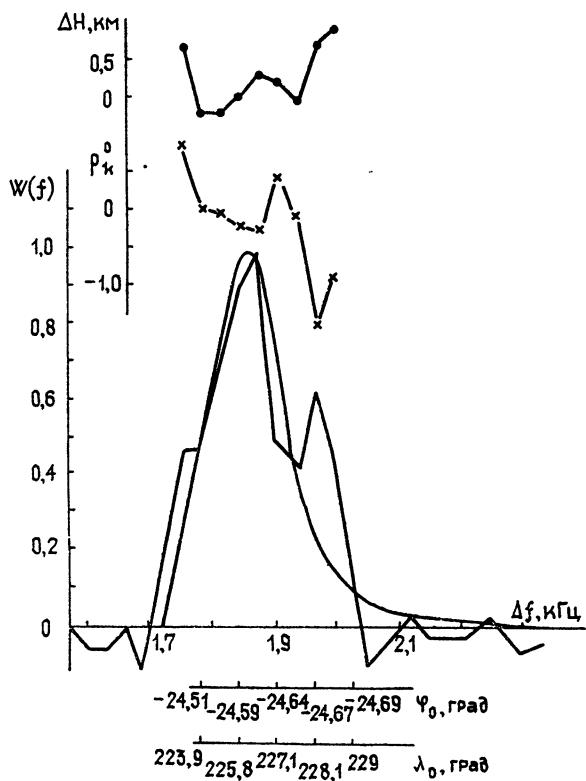


Рис. 3 Определение параметров крупномасштабного рельефа поверхности Венеры в одном из районов путем сопоставления экспериментального спектра с теоретическим.

Используя методику, описанную в [3], с помощью траекторных данных каждому значению  $f$  можно сопоставить определенный участок на поверхности планеты. Найденные с помощью этой методики значения широты  $\phi_0$  и долготы  $\lambda_0$  в венероцентрической системе координат отложены по двум другим горизонтальным осям на рис. 3.

На экспериментальном спектре имеется особенность, показанная стрелкой на рис. 3. Измеренная мощность в максимуме этой особенности в 3 раза выше величины, предсказываемой теоретической кривой, рассчитанной в предположении, что крупномасштабный рельеф отсутствует. Представляется наиболее вероятным, что сильное возрастание мощности в пределах этого участка спектра вызвано благоприятной ориентацией крупномасштабного рельефа поверхности. Величина наклона рельефа может быть оценена путем сравнения с теоретической кривой с помощью соотношения (21). В описываемом эксперименте спутник двигался параллельно направлению на Землю, т. е. линии одинаковых значений доплеровских частот были практически перпендикулярны направлению на Землю. В этом случае в (21) можно положить

$\beta = 0$ . Тогда из (21) можно найти величину крупномасштабного наклона рельефа  $r_k$ . Результаты определения величины  $r_k$  по экспериментальной кривой  $W(f)$  показаны на рисунке крестиками. Соответствующие значения  $r_k$ , выраженные в градусах, отсчитываются по дополнительной вертикальной оси на рис. 3. Как видно из рис. 3, величина  $r_k$  изменяется в пределах от  $-1^{\circ}5$  до  $+0^{\circ}8$ . Вблизи максимума экспериментальной кривой величина  $r_k$  принимает небольшие по модулю отрицательные значения в пределах от  $-0^{\circ}1$  до  $-0^{\circ}4$ . Наибольший по модулю отрицательный наклон поверхности, равный  $-1^{\circ}5$ , соответствует указанной выше особенности в спектре. Используя найденную функцию  $r_k$ , можно определить путем интегрирования соответствующие изменения высоты крупномасштабного рельефа  $\Delta H$ . Результаты интегрирования показаны на рис. 3 (темные кружки). Отсчет величины  $\Delta H$  осуществляется с помощью дополнительной вертикальной шкалы на рис. 3. За нуль этой шкалы принята высота точки зеркального отражения  $D$ . Из приведенных на рис. 3 данных следует, что местность в исследованной области постепенно повышается при движении вдоль параллели  $-24^{\circ}6$  в направлении увеличения долготы. Наиболее крутой подъем происходит в районе, которому соответствует выброс в экспериментальном спектре. Здесь средняя высота местности увеличивается примерно на 1 км на горизонтальном расстоянии около 100 км.

Проведенный с помощью рис. 3 анализ указывает на большую чувствительность доплеровских спектров к изменениям высоты рельефа Венеры. Большое влияние рельефа на доплеровский спектр связано с пониженной шероховатостью (на расстояниях порядка нескольких десятков — нескольких сотен метров) исследованных районов планеты.

#### 4. ОЦЕНКА ОЖИДАЕМОГО ПОТЕНЦИАЛА БИСТАТИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА В СХЕМЕ С РЕТРАНСЛЯЦИЕЙ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА

Эффективность решения обратной задачи — определения свойств рельефа планеты по характеристикам отраженного сигнала — естественно зависит от отношения мощности отраженного сигнала к мощности шумов на входе приемника в полосе, занимаемой отраженным сигналом. Это соотношение зависит от используемой схемы бистатической радиолокации. В первых опытах бистатической радиолокации Венера использовались бортовые передатчики аппаратов «Венера-9» и «Венера-10», а отраженные радиоволны принимались на Земле. В этой схеме возможности бистатической радиолокации использовались неполностью ввиду ограниченной мощности бортовых передатчиков. Более эффективен вариант бистатической радиолокации, в котором для облучения поверхности радиоволнами применяются мощные наземные передатчики и антенны, а отраженные от планеты сигналы ретранслируются с использованием бортовых радиосредств. В этом варианте потенциал бистатического радиолокатора может возрасти в 100 и более раз. Это подтверждают данные расчетов, результаты которых приведены на рис. 4. По вертикальной оси на рис. 4 отложены значения соотношения сигнал/шум  $N$ , выраженные в децибелах, по горизонтальной оси — длина радиоволн  $\lambda$  в метрах. При вычислении соотношения сигнал/шум предполагалось, что излучение наземного передатчика является монохроматическим, а полоса отраженного сигнала находилась по формуле (11) для случая круговой орбиты с высотой 1500 км. Расстояние Земля — Венера принималось равным 100 млн. км. При расчетах предполагалось, что температура шумов бортового приемника не зависит от частоты и равна 600 К, а интенсивность космического радиошума пропорциональна квадрату длины волны:  $W_{\text{ш}} = c_1 \lambda^2$ ,  $c_1 = 150^{\circ}/m^2$ . Усиление бортовой антенны в направлении на исследуемую область на Венере также считалось не зависящим от  $\lambda$  и принималось равным 50.

Кривым 1, 2, 3 на рис. 4 соответствуют следующие значения мощности передатчика  $P$  и площади наземной антенны  $A$ :  $P = 400 \text{ кВт}$ ,  $A = 7000 \text{ м}^2$  (кривая 1),  $P = 100 \text{ кВт}$ ,  $A = 3000 \text{ м}^2$  (кривая 2),  $P = 100 \text{ кВт}$ ,  $A = 500 \text{ м}^2$  (кривая 3). Значения параметров  $P$  и  $A$ , соответствующие кривой 1, относятся к антенной системе в Аресибо, кривые 2 и 3 характеризуют соотношение сигнал/шум при использовании

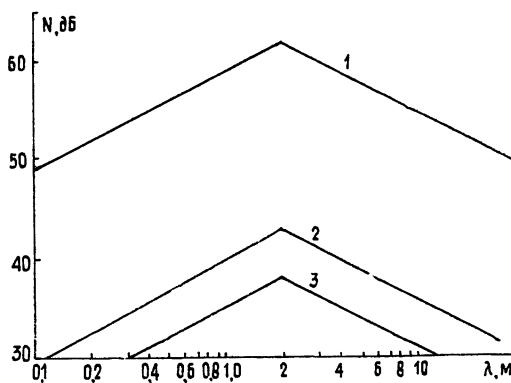


Рис. 4 Соотношение сигнал/шум в зависимости от длины волны при излучении с Земли и ретрансляции отраженного сигнала.

обычных наземных передатчиков и антенн, предназначенных для целей радиолокационных астрономических исследований. Максимум величины  $N$  на рис. 4, соответствующий длине волны  $\lambda = 2 \text{ м}$ , определяется принятым при расчетах условием постоянства коэффициента усиления бортовой приемной антенны. Это условие легче выполняется в метровом диапазоне. Если отказаться от этого условия и принять, что постоянная эффективная площадь бортовой антенны (последнее справедливо в дециметровом и сантиметровом диапазонах), то оптимальный для исследования поверхности Венеры диапазон смещается в сторону сантиметровых волн и определяется поглощением в атмосфере планеты.

Таким образом, вариант бистатической радиолокации с использованием ретрансляции отраженного сигнала является весьма перспективным с точки зрения исследования особенностей строения рельефа и физических свойств грунта Венеры.

Приведенные в данной статье теоретические и экспериментальные результаты позволили проанализировать влияние крупномасштабного рельефа и рефракции в атмосфере на форму доплеровского спектра отраженного от Венеры сигнала. Выявленная из измерений ширины спектров пониженная шероховатость поверхности позволяет интерпретировать особенности в доплеровских спектрах как следствие изменения ориентации крупномасштабного рельефа. Полученные в статье выражения позволяют оценить величину изменения наклона рельефа путем сопоставления с ожидаемым распределением энергии по спектру. Из измерений наклона затем можно определить величину изменений относительной высоты рельефа в пределах исследуемой области. Наилучшие условия для выявления информации о свойствах рельефа планеты обеспечиваются в схеме бистатической радиолокации с ретрансляцией отраженного сигнала.

С другой стороны, полученные результаты позволяют определить ожидаемую форму спектра, его ширину и другие параметры при расчетах линий космической радиосвязи, проходящих вблизи поверхности Венеры. При этом можно также учесть и влияние крупномасштабного рельефа.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Каевицер В. И., Матюгов С. С., Павельев А. Г., Петров Г. М., Рогальский В. И., Яковлев О. И.—Радиотехника и электроника, 1974, 19, № 5, с. 936
- 2 Павельев А. Г., Яковлев О. И., Матюгов С. С., Кучерявенков А. И., Каевицер В. И.—Изв. вузов—Радиофизика, 1975, 18, № 6, с. 816.
- 3 Павельев А. Г., Колесов М. А., Яковлев О. И., Кучерявенков А. И., Молотов Е. П., Милехин О. Е.—Радиотехника и электроника, 1978, 23, № 10, с. 2017.
- 4 Яковлев О. И. Распространение радиоволн в солнечной системе.—М.: Сов. радио, 1974.
- 5 Павельев А. Г.—Радиотехника и электроника, 1969, 14, № 11, с. 1924
- 6 Павельев А. Г., Кучерявенков А. И.—Радиотехника и электроника, 1978, 23, № 8, с. 1569.
- 7 Павельев А. Г., Каевицер В. И., Кучерявенков А. И.—Космические исследования, 1978, 16, с. 5.
- 8 Павельев А. Г., Просин А. В., Шляхов Н. С.—В сб: Моделирование многоугловых радиоканалов для анализа и синтеза систем передачи информации.—М: Наука, 1978.
- 9 Маров М. Я., Кузьмин А. Д. Физика планеты Венера.—М: Наука, 1974.

Институт радиотехники и электроники  
АН СССР

Поступила в редакцию  
30 октября 1979 г.

## ANALYSIS OF DOPPLER SPECTRUM FORMS OF RADIOWAVES REFLECTED FROM THE VENUS SURFACE

*A. G. Pavelyev, O. I. Yakovlev, A. I. Kucheryavenkov, A. E. Milekhin, R. V. Bakit'ko,  
V. I. Rogal'skij, E. G. Degtyarenko*

Results of the theoretical and experimental analysis are presented of the effect of refraction and large-scale peculiarities of the Venus relief on the form of Doppler spectra of radio waves reflected from its surface. The effect of refraction results in asymmetry of spectra and large-scale peculiarities of the relief cause irregular energy distribution over Doppler frequencies. Comparison of theoretical results with experimental data testifies to a good accuracy of the theory developed as well as to the possibility of definition of the relief form of a reflecting region by spectral measurements. The best for the planet relief study is a scheme of the bistatic radiolocation with the use of the retranslation of the reflected signal by the Venus satellite.

## ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ КНИГАХ

**Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары /Пер. с англ под ред. А. Д. Кузьмина—  
М: Мир, 1980.—296 с.—3 р.**

В монографии, написанной двумя ведущими исследователями импульсных источников космического радиоизлучения (пульсаров), основное вниманиеделено результатам наблюдений пульсаров, их интерпретации и использованию наблюдений пульсаров для исследования межзвездной среды. Две главы посвящены критическому анализу теоретической модели пульсаров —нейтронных звезд и разбору механизмов импульсного излучения.

Книга рассчитана на астрономов, физиков, радиофизиков — научных сотрудников, аспирантов, студентов старших курсов. Насыщенность практическим материалом делает ее особенно интересной для астрофизиков и радиоастрономов.