

УДК 523.2 : 523.164.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ МЕТОДОМ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

*А. И. Кучерявенков, О. И. Яковлев, А. Г. Павельев, В. И. Машков,
О. Е. Милехин, В. И. Русецкий*

Изложены результаты измерений ослабления радиоволн в атмосфере Венеры, полученные при бистатической радиолокации планеты. Проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета величины ослабления. Показано, что ослабление радиоволн длины $\lambda = 32$ см при двукратном распространении через толщу атмосферы и отражении от поверхности под углом скольжения, близким к 9° , равно 8 ± 1 дБ. Это ослабление обусловлено, главным образом, рефракцией радиоволн в атмосфере, величина поглощения составляет менее 1 дБ.

Специфика распространения радиоволн в атмосфере Венеры проявляется в полной мере при исследовании эффекта ослабления. Этот эффект может быть обусловлен ослаблением радиоволн вследствие рефракционного искривления лучевых линий, а также поглощением в углекислом газе и других компонентах тропосферы и рассеянием на неоднородностях атмосферы.

Экспериментальные данные о распространении радиоволн в атмосфере Венеры ранее были получены при изучении планеты методом радиолокации ее поверхности с Земли, при радиосвязи со спускаемыми аппаратами, а также при исследовании ее атмосферы методом радиопросвечивания!

В результате измерений зависимости эффективной отражающей поверхности от длины волны методом радиолокации с Земли была оценена величина поглощения радиоволн в ее атмосфере [1]. В экспериментах со спускаемыми аппаратами и при радиопросвечивании атмосферы Венеры были определены газовый состав и зависимости температуры, давления и показателя преломления от высоты [2, 3]. Отметим, что в экспериментах локации с Земли и при радиосвязи со спускаемыми аппаратами траектория распространения радиоволн составляла сравнительно небольшой угол с нормалью к поверхности Венеры. При этом влияние рефракции было мало. В методе радиопросвечивания, вследствие наличия уровня критической рефракции, не удается изучать эффекты, связанные с распространением радиоволн в нижнем наиболее плотном слое атмосферы.

Новые возможности для получения данных об ослаблении радиоволн в атмосфере Венеры появились в экспериментах бистатической радиолокации планеты, осуществленных с помощью спутников «Венера-9» и «Венера-10». В [4-6] приведены предварительные сведения о рельефе и шероховатости поверхности планеты, полученные в этих экспериментах.

Цель этой статьи состоит в анализе результатов первых измерений рефракционного ослабления радиоволн в атмосфере Венеры и в сопоставлении их с данными теоретических расчетов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент бистатической радиолокации Венеры проводился перед заходом спутника в зону радиотени планеты, а также после его выхода из этой зоны как при отвороте параболической антенны аппарата на фиксированный угол в направлении поверхности планеты, так и в режиме радиопросвечивания ее атмосферы, когда максимум диаграммы направленности антенны был ориентирован на Землю.

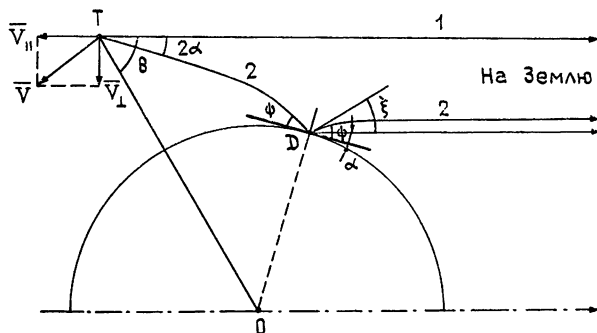


Рис. 1.

Геометрия эксперимента изображена на рис. 1. Передающее устройство, излучающее радиоволны длиной $\lambda = 32$ см, находится на спутнике планеты в точке T , приемное устройство на Земле. Относительное положение спутника, Земли и планеты определяется углом θ с вершины в точке T между направлениями на центр планеты — точку O и на Землю, а также расстоянием R между спутником и центром планеты. На Земле регистрируются сигналы, соответствующие двум трассам распространения радиоволн 1 и 2. По трассе 1, минуя атмосферу Венеры, распространяется прямая волна, а по трассе 2 — волна, отраженная от поверхности планеты. Отраженный радиолуч дважды проходит толщю атмосферы планеты: от спутника по направлению к точке зеркального отражения D и от поверхности планеты к Земле. Длина пути, проходимого отраженным лучом в атмосфере Венеры, зависит от величины угла скольжения ψ в точке зеркального отражения D . В эксперименте угол ψ изменялся в пределах от 16° до 8° . Длина пути радиоволн в атмосфере при этом составляла 1000—4000 км. Вследствие влияния эффекта Доплера, возникающего при движении спутника относительно планеты, частоты прямого и отраженного сигналов заметно отличались, что позволило разделить их при обработке.

В ходе сеанса бистатической локации принимаемый на Земле сигнал записывался на магнитную ленту в аналоговой форме вместе с высокостабильным опорным сигналом. Затем с помощью ЭВМ осуществлялся спектральный анализ записанного сигнала по алгоритму быстрого преобразования Фурье. Для уменьшения статистической ошибки производилось усреднение полученных спектральных реализаций за время ~ 4 с. Затем определялся коэффициент отражения η^2 как отношение мощности отраженного сигнала P_0 к мощности прямого сигнала P_n , в которое вводилась поправка на диаграмму передающей антенны:

$$\eta^2 = \frac{P_0 G_n}{P_n G_0}, \quad (1)$$

где G_n , G_0 — соответственно усиление передающей антенны в направлении на Землю и на рассеивающую область.

С помощью траекторных данных по разности частот отраженного и прямого сигналов $\Delta f(t)$ определялся угол 2α (рис. 1) с вершиной в точке T между направлением на Землю и касательной к лучу TD в точке T . Методика определения угла 2α по значениям компонент скорости V_{\parallel} , V_{\perp} и величине $\Delta f(t)$ описана в [5]. После этого определялось прицельное расстояние P для отраженного луча:

$$P = R \sin(\theta - 2\alpha), \quad (2)$$

и находился угол скольжения радиоволн ψ в точке D :

$$\psi = \arccos(P/n(a)a), \quad (3)$$

где $n(a)$ — показатель преломления атмосферы на уровне, соответствующем среднему радиусу Венеры $a = 6050$ км.

Таким образом, из измерений отношения мощности отраженного сигнала к мощности прямого сигнала была найдена зависимость коэффициента отражения от угла скольжения $\eta^2(\psi)$.

КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ ПРИ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ВЕНЕРЫ

Уменьшение потока энергии отраженных радиоволн связано с влиянием трех факторов: рефракционного ослабления X^2 , поглощения в атмосфере S и коэффициента сферической расходимости Q . Каждый из этих факторов зависит от угла скольжения радиоволн ψ в точке D и угла рефракции ξ (рис. 1). В соответствии с этим коэффициент отражения радиоволн, рассеянных поверхностью Венеры в направлении Земли, для ненаправленной передающей антенны можно представить в виде

$$\eta^2 = X^2 S Q V^2(\psi), \quad (4)$$

где $V^2(\psi)$ — коэффициент отражения от плоской границы атмосфера — вещество с диэлектрической проницаемостью ϵ , зависящий от поляризации падающей волны.

Согласно данным работы [7], величина X^2 является произведением рефракционного ослабления X_1^2 и X_2^2 на трассах от спутника до точки D и от зеркальной точки до Земли;

$$X_1^2 = \frac{R_0^2 n^2(D) \cos \psi}{[R_1 \cos \xi + (R_1 \sin \psi + nr) \sin \xi] \left[R_1 + nr \sin \psi \sqrt{R^2 - P^2} \frac{d\xi}{dP} \right]}; \quad (5)$$

$$X_2^2 = \cos \psi \left(1 + nr \sin \psi \frac{d\xi}{dP} \right)^{-1} (\cos(\psi - \xi))^{-1}; \quad (6)$$

$$R_1 = \sqrt{R^2 - P^2} - nr \sin \psi; \quad (7)$$

$$P = n(a)r \cos \psi, \quad (8)$$

где R_0 — расстояние TD по прямой линии, $n(D)$ — показатель преломления атмосферы в точке D , n — показатель преломления атмосферы на расстоянии r от точки O , P — прицельное расстояние. Производная $d\xi/dP$ в (5) и (6) берется при постоянном значении r [7].

Связь между ξ и P может быть записана с помощью выражения

$$\xi(P) = -P \int_r^{\infty} \frac{n'_r dr}{n \sqrt{n^2 r^2 - P^2}}. \quad (9)$$

Для функции $Q(\psi)$ согласно [8] имеем

$$Q = \frac{r^2}{R_0^2} \sin \psi [A(\psi) B(\psi)]^{-1}; \quad (10)$$

$$A(\psi) = \cos \psi \left[\operatorname{tg}(\psi - \xi) + \frac{R_1 \sin(\psi - \xi) + nr \cos \xi}{R_1 \cos(\psi - \xi) + nr \sin \xi} \right]; \quad (11)$$

$$B(\psi) = \left[1 + nr \sin \psi \frac{d\xi}{dP} \right]^{-1} + \frac{R_1 + nr \sin \psi}{R_1 + (R_1 + nr \sin \psi) nr \sin \psi \frac{d\xi}{dP}}. \quad (12)$$

Величина поглощения радиоволн в атмосфере Венеры $S(\psi)$ зависит от коэффициента поглощения $\kappa(\lambda)$:

$$S = \exp \left[-2 \int_r^{\infty} \frac{\kappa(r) nr dr}{\sqrt{n^2 r^2 - P^2}} \right]. \quad (13)$$

Функция $\kappa(r, \lambda)$ по данным работы [9] может быть представлена формулой

$$\kappa = 1,6 \cdot 10^{-7} d^2 (273/T)^5 \lambda^{-2}, \quad (14)$$

где d — давление, выраженное в атмосферах, T — температура в градусах Кельвина, λ — длина радиоволн в сантиметрах.

По формулам (4)–(12) были проведены расчеты коэффициента отражения в зависимости от угла скольжения при разных значениях высоты спутника. При расчетах предполагалось, что диэлектрическая проницаемость планеты $\epsilon = 5,1$, а поляризация передающей и приемной антенн является круговой, т. е.

$$V^2(\psi) = \frac{1}{4} (r_{\Gamma} + r_{\text{в}})^2, \quad (15)$$

где r_{Γ} , $r_{\text{в}}$ — коэффициенты отражения от плоской границы раздела соответственно при вертикальной и горизонтальной поляризациях.

Результаты расчета величины $\eta^2(\psi)$ представлены на рис. 2. По горизонтальной оси на этом рисунке отложены значения угла скольжения, выраженные в градусах, по вертикальной оси — величина коэффициента отражения $\eta^2(\psi)$. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 построены для высоты орбиты спутника над поверхностью планеты, равной 600, 1150, 1700, 2800, 5000 км. Кривые 6, 7, 8, 9, 10 построены для тех же значений высоты, но без учета влияния атмосферы. Из рис. 2 видно, что при углах скольжения, меньших 10° – 12° , и одинаковых значениях высоты спутника величина коэффициента отражения, найденная с учетом влияния атмосферы, существенно меньше аналогичной величины, полученной без учета атмосферы планеты. Это отличие объясняется влиянием ослабления радиоволн в атмосфере, которое возрастает по мере уменьшения угла скольжения и достигает максимального значения при $\psi \approx 7^\circ, 6$.

На рис. 3 приведена зависимость поглощения S радиоволн длиной $\lambda = 32$ см от угла скольжения. Из этого рисунка следует, что поглощение в атмосфере мало влияет на ослабление потока энергии радиоволн.

Минимальное значение $S(\psi)$ равно 0,82 при $\psi = 7^{\circ},6$ и, таким образом, ослабление, связанное с поглощением, составляет не более 1—2 дБ.

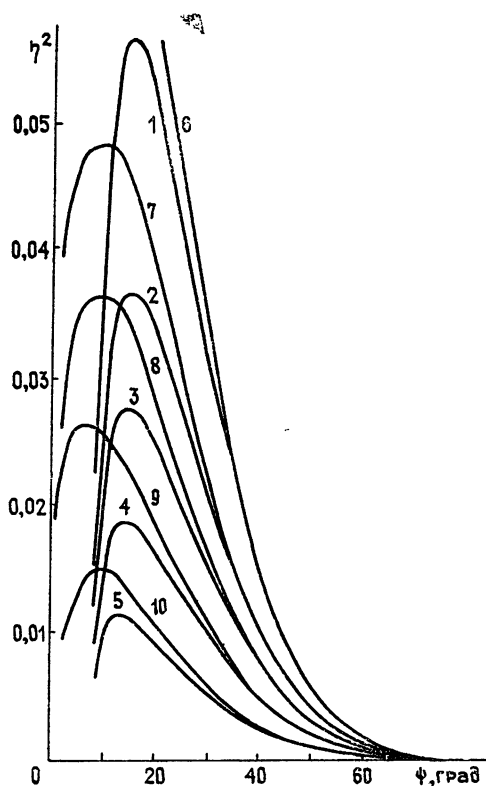


Рис. 2.

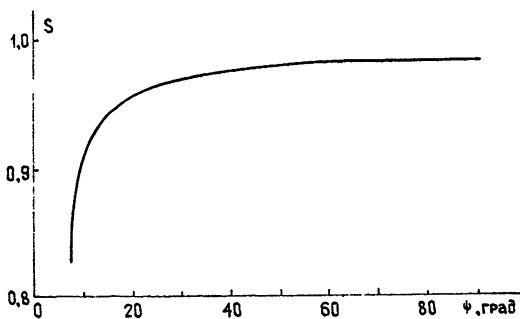


Рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента отражения радиоволн от угла скольжения, полученные в четырех сеансах бистатической радиолокации Венеры. По горизонтальной оси отложены значения угла скольжения ψ в градусах, по вертикальной — величина коэффициента отражения η^2 в децибелах. Точками изображены экспериментальные значения коэффициента отражения, усредненные в интервале углов

скольжения $0^{\circ},5$. Треугольники соответствуют сеансу просвечивания атмосферы Венеры, остальные данные — сеансам с отворотом антенны. Из рисунка видно, что с уменьшением угла скольжения коэффициент отражения плавно уменьшается и достигает значений порядка -22 дБ. Данные по разным сеансам хорошо согласуются друг с другом, различие не превышает 3 дБ.

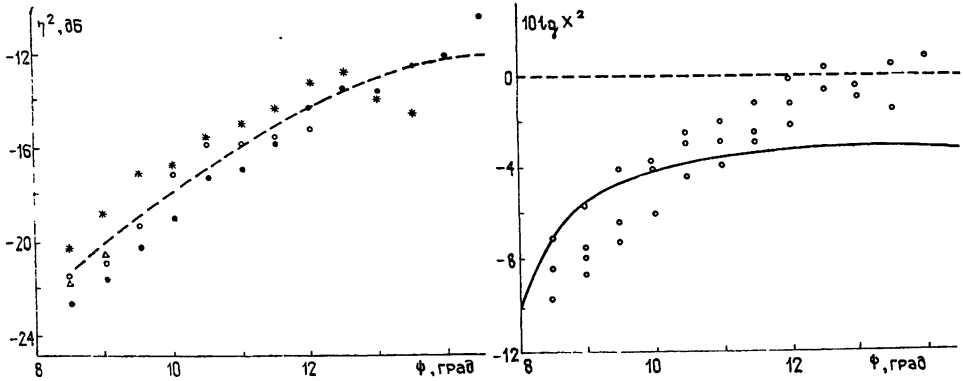


Рис. 4.

Рис. 5.

На рис. 5 даны экспериментальные значения ослабления радиоволн в атмосфере Венеры в зависимости от угла скольжения ψ (точки) и теоретическая зависимость ослабления от угла ψ (сплошная линия). По вертикальной оси на рис. 5 отложена величина $10 \lg X^2$. Экспериментальные значения определялись по формуле $X^2 = \eta^2 / \eta_T^2$, где η_T — коэффициент отражения, вычисленный для высоты спутника $H = 1700$ км. Теоретические значения ослабления рассчитывались для круговой орбиты с той же высотой над поверхностью планеты. На горизонтальной оси нанесены значения угла скольжения ψ в градусах. Как видно из этого рисунка, ослабление радиоволн в атмосфере Венеры изменяется в пределах от 0 дБ при $\psi = 14^{\circ} \div 15^{\circ}$ до $7-10$ дБ при $\psi = 8^{\circ},5$. Как следует из ожидаемой зависимости поглощения в атмосфере $S(\psi)$ это ослабление связано, в основном, с эффектом рефракции в атмосфере Венеры. Увеличение отраженной мощности по сравнению с ожидаемым уровнем связано, по-видимому, с недостаточно точным учетом диаграммы передающей антенны спутника.

При бистатической радиолокации Венеры ее атмосфера оказывает сильное влияние на энергетические характеристики радиоволны. Поток энергии радиоволны, распространяющейся в атмосфере Венеры, заметно уменьшается. Это уменьшение вызвано рефракционным ослаблением и возможным поглощением в газах и водяном паре атмосферы планеты.

Из проведенных измерений следует, что ослабление радиоволн в атмосфере Венеры на длине $\lambda = 32$ см составляет около 8 дБ при угле скольжения $\psi \approx 9^{\circ}$. Это ослабление объясняется, главным образом, влиянием рефракции в атмосфере. Величина поглощения в этом случае составляет не более 1 дБ.

Первые измерения ослабления радиоволн, проведенные при бистатической радиолокации, подтвердили перспективность применения этого метода для исследования атмосфер и поверхностей планет и показали хорошую точность современной теории распространения радиоволн в плотной атмосфере Венеры для дециметрового диапазона волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. V. Evans and R. P. Ingalls, *J. Atm. Sci.*, **25**, 4, 555 (1968).
2. О. И. Яковлев, А. И. Ефимов, Т. С. Тимофеева, Г. Д. Яковлева, Е. В. Чуб, В. Ф. Тихонов, В. К. Штрыков, *Космические исследования*, **14**, № 5, 722 (1974).
3. L. Fjeldbo, A. Kliore and V. Eshleman, *Astron J.*, **76**, 2, 123 (1971).
4. А. Г. Павельев, М. А. Колосов, О. И. Яковлев, А. И. Кучерявенков, С. С. Матюгов, В. И. Каевецер, И. Э. Калашников, *ДАН СССР*, **230**, № 5, 1059 (1976).
5. М. А. Колосов, О. И. Яковлев, А. Г. Павельев, В. И. Каевецер, И. Э. Калашников, Ф. И. Козлов, А. И. Кучерявенков, С. С. Матюгов, Е. П. Молотов, В. И. Рогальский, *Радиотехника и электроника*, **21**, № 9, 1808 (1976).
6. А. И. Кучерявенков, О. И. Яковлев, А. Г. Павельев, С. А. Азарх, С. С. Матюгов, В. И. Каевецер, В. И. Рогальский, В. С. Поляков, И. Э. Калашников, *Космические исследования*, **14**, № 5, 693 (1976).
7. А. Г. Павельев, А. И. Кучерявенков, *Радиотехника и электроника*, **23**, № 7, 1345 (1978).
8. А. Г. Павельев, А. И. Кучерявенков, *Радиотехника и электроника*, **23**, № 8, 1569 (1978).
9. Но, I. A. Kaufman and P. Thadeus, *J. Geophys. Res.*, **71**, № 21, 5091 (1966).

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
22 мая 1978 г.,
после доработки
15 декабря 1978 г.

INVESTIGATION OF RADIO WAVE ATTENUATION IN THE VENUS
ATMOSPHERE BY THE METHOD OF BISTATIC RADAR

*A. I. Kucheryavenkov, O. I. Yakovlev, A. G. Pavelyev, V. I. Mashkov,
O. E. Milekhin, V. I. Rusetskij*

Results of measurements of radiowave attenuation in the Venus atmosphere obtained by the method of bistatic radiolocation are presented. A comparison of the experimental data with the results of calculation of the attenuation value is carried out. It is shown that the attenuation of radio waves at the length $\lambda = 32$ cm at the double propagation path through atmosphere at the sliding angle 9° is equal to 8 ± 1 dB. This attenuation is mainly due to the radio wave refraction in atmosphere. The calculated absorption value is less than 1 dB.