

Дифракционные эффекты в радиозатменных исследованиях атмосферы Венеры

В.Н. Губенко¹, И.А. Кириллович¹, Д.В. Губенко¹, В.Е. Андреев¹, Т.В. Губенко¹,
А.А. Павельев¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
141190, г. Фрязино, Московская область, пл. Введенского, 1
E-mail: yngubenko@gmail.com

*На основе данных об изменении нормированной интенсивности радиоволны в зависимости от глубины погружения луча в атмосферу Венеры, полученных в ходе радиозондирования атмосферы, найдены пять сеансов с характерными особенностями, которые можно отнести к наличию дифракционного процесса. Наблюдаемые особенности объясняются дифракцией Френеля радиоволны в области, начинающейся от края непрозрачной полуплоскости с учётом влияния рефракции в атмосфере. Непрозрачной полуплоскостью является район в атмосфере Венеры с изменяющимся температурным режимом на широтах 85.3°N – 87.0°N. Нижний край этого района находится на высоте от 58.23 км до 58.72 км от поверхности Венеры.
Ключевые слова: атмосфера Венеры, спираль Корню, дифракция Френеля*

Diffraction effects in radio occultation studies of the atmosphere of Venus

V.N. Gubenko¹, I.A. Kirillovich¹, D.V. Gubenko¹, V.E. Andreev¹, T.V. Gubenko¹,
A.A. Pavelyev¹

¹ Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences
(Fryazino branch)

*Based on the data on the change in the normalized intensity of the radio wave depending on the depth of the descent of the beam into the atmosphere of Venus, obtained by radio sounding of the atmosphere, five sessions were found with characteristic features that can be attributed to the presence of a diffraction process. The observed features are explained by the Fresnel diffraction of the radio wave in the region starting from the edge of the opaque half-plane, taking into account the influence of refraction in the atmosphere. An opaque half-plane is a region in the atmosphere of Venus with a changing temperature regime at latitudes 85.3°N – 87.0°N. The lower edge of this region is located at an altitude of 58.23 km to 58.72 km from the surface of Venus.
Keywords: atmosphere of Venus, Cornu spiral, Fresnel diffraction*

Введение

В период с октября 1983 по сентябрь 1984 года с помощью спутников Венера-15 и -16 были проведены сеансы радиозондирования атмосферы Венеры. Орбиты спутников были такими, что заходы за планету осуществлялись в Северном полушарии планеты, а выходы – в Южном. По результатам этих исследований опубликовано множество работ, в частности, работа [1], где определяются параметры атмосферы и ионосферы Венеры. В результате радиопросвечивания атмосферы спутниками, заходящими за планету, наблюдалось регулярное падение уровня дециметрового сигнала в интервале высот от 80 до 45 км. Такое изменение уровня сигнала обусловлено рефракцией радиоволн в изотермической полярной атмосфере. Типичное поведение изменения нормированной интенсивности радиоволны I_{norm} по мере углубления в атмосферу планеты, показано на рис. 1 панель а).

В то же время, в отдельных сеансах на экспериментальных зависимостях рефракционного ослабления интенсивности от высоты луча видно резкое падение интенсивности радиоволны и выделяется яркая особенность в интервале высот от 60 до 56 км. На этом интервале высот наблюдается чередование глубоких минимумов и резких максимумов напряженности поля. Поведение изменения нормированной интенсивности радиоволны I_{norm} по мере углубления в атмосферу планеты в сеансах с особенностью, показано на рис. 1 панель б). Обнаружено, что сильные изменения уровня сигнала происходят в районе, где наблюдаются переход от изотермической к адиабатической полярной атмосфере и резкое изменение градиента температуры [1].

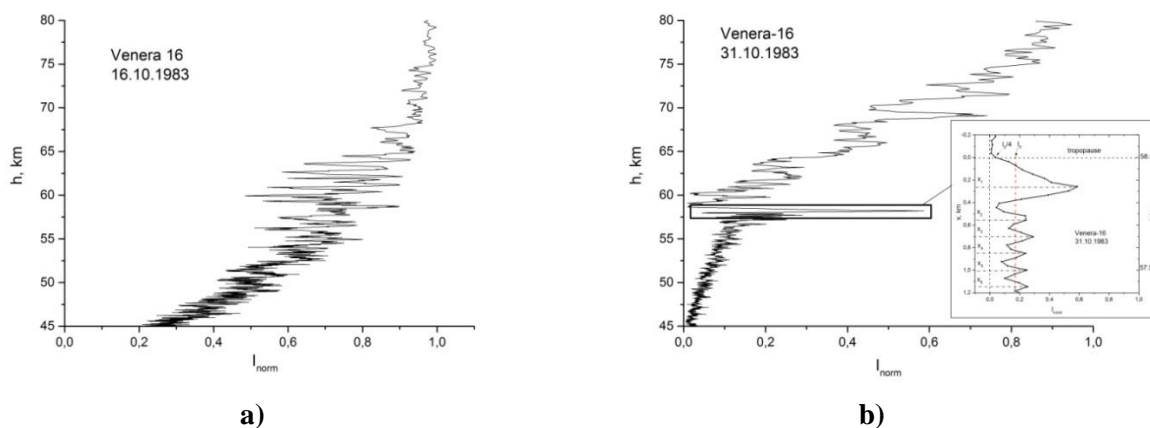


Рис. 1. Примеры ослабления нормированной интенсивности радиоволны I_{norm} в зависимости от высоты во время захода спутника за планету обусловленные рефракцией. На панели а) показано типичное поведение во многих сеансах, на панели б) – поведение с яркой особенностью, которая наблюдалась в нескольких сеансах. На вставке панели б) показан фрагмент выделенной части в увеличении.

Экспериментальные данные

Выше было отмечено, что при радиозондировании атмосферы Венеры на высотах от 60 до 56 км на некоторых профилях интенсивности прохождения радиоволны над поверхностью планеты наблюдались сильные изменения уровня сигнала. Эта особенность проявлялась в следующем: интенсивность радиоволны падала почти до нулевых уровней на высоте около 59 км, затем, по мере опускания луча она резко увеличивалась с переходом на затухающее волнообразное поведение на одном уровне на высоте около 57 км. При дальнейшем опускании луча в атмосферу планеты интенсивность радиоволны падала характерным образом свойственным рефракции. Описанное поведение интенсивности на указанном интервале высот в пяти сеансах приведены на рис. 2.

На левых вертикальных осях панелей а) ...е) на рис. 2 отмечены положения максимумов кривых I_{max} – $x_1...x_6$. Отсчёт этих величин ведётся от положения уровня $I_0/4$ (на рисунке показан горизонтальной штриховой линией). На правых вертикальных осях указаны интервалы высот от поверхности планеты. Вертикальными штриховыми линиями отмечены: нулевой уровень I_{norm} и средний уровень I_0 , где происходит волнообразное поведение I_{norm} . На горизонтальных осях отложены значения нормированной интенсивности I_{norm} . В сеансах, приведённых на рис. 2, радиозондирование проводилось на широтах $85.3^\circ\text{N} - 87.0^\circ\text{N}$. Известно, что высота района в атмосфере Венеры с изменяющимся температурным режимом, включая положение тропопаузы, сильно меняется: от 55 км на экваторе до 62 км у 75°N , а ближе к полюсу снова понижается до 57 км от поверхности [2].

Поведение интенсивности радиоволны с длиной волны 32 см при радиозондировании атмосферы Венеры, показанное на рис. 2, позволяет предположить, что в этих сеансах сложились условия схожие с условиями формирования дифракционной картины при падении света на край непрозрачной полуплоскости.

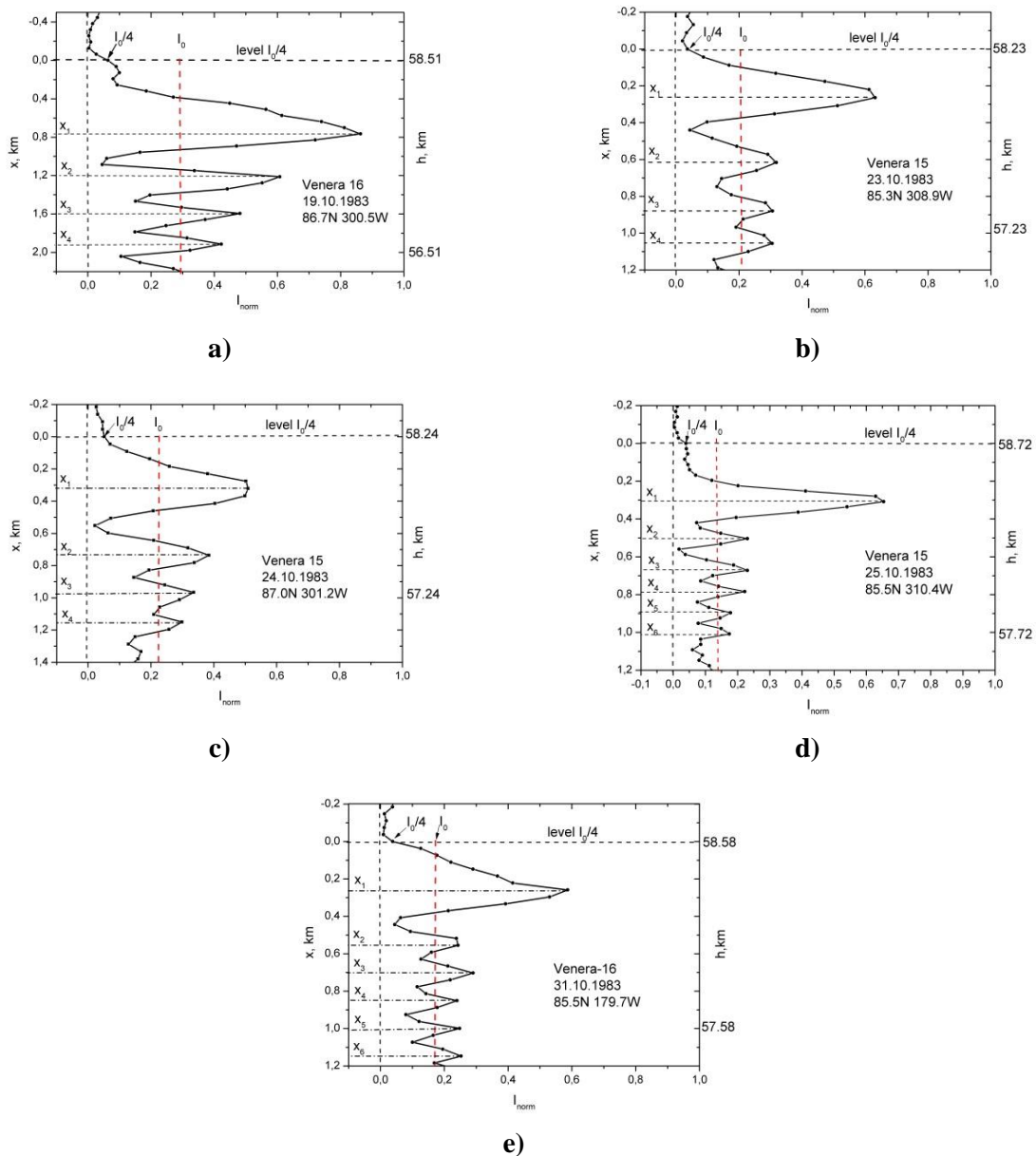


Рис. 2. Экспериментальные данные интенсивности радиоволны $\lambda \approx 32$ см, полученные при радиозондировании атмосферы Венеры спутниками Венера-15, -16 в октябре 1983 года. На рисунках указаны широты и долготы районов просвечивания.

Дифракция Френеля радиоволн от края полуплоскости

Наличие района с изменяющимся температурным режимом на пути опускания радиоволны вглубь атмосферы Венеры заметно ускоряет ослабление интенсивности радиоволны, прошедшей сквозь неё, на фоне обычного рефракционного ослабления (рис. 1). В этом случае указанный район атмосферы может оказаться непрозрачной полуплоскостью, совпадающей с волновой поверхностью. В силу взаимности расположения источника и приёмника радиоволн мы можем расположить экран сзади полуплоскости на уровне источника. Формально применим принцип Гюйгенса-Френеля для такого объекта.

Пусть непрозрачное препятствие закрывает полупространство. Разобьём открытую область на равные по площади зоны. Зоны будут представлять собой узкие (ширина полосы много меньше расстояния до источника) длинные полосы, параллельные краю, причем ширина всех полосок одна и та же. Для нахождения поля в точке наблюдения построим векторную диаграмму, на которой будет суммироваться вклад от каждой зоны. Излучение от всех вторичных источников какой-либо зоны придут в точку наблюдения в разной фазе независимо от ширины зоны. Векторы, характеризующие вклад каждой зоны, будут иметь одинаковую длину. Однако разность фаз для соседних зон уже будет отличаться. Для первых зон, расположенных в центральной части, она будет близкой к нулю, возрастая по мере удаления от центра. В результате векторная диаграмма будет иметь вид спирали, называемой спиралью Корню (рис. 3).

Спираль Корню задается в параметрическом виде (используется параметр - v) с помощью интегралов Френеля:

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi}{2} \tau^2\right) d\tau, \quad S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi}{2} \tau^2\right) d\tau \quad (1)$$

С помощью спирали можно рассчитывать распределение поля в некоторой точке наблюдения на экране. Если препятствие отсутствует, то “работают” все зоны на обеих ветвях спирали. В этом случае поле в точке наблюдения соответствует вектору **AB** (рис. 3). Если же препятствие закрывает ровно половину пространства, то открытой является половина спирали (“работают” зоны на положительной ветви спирали). Поэтому суммарный вклад будет соответствовать вектору **OB**. Длина этого вектора в два раза меньше длины вектора **AB**, поэтому и поле будет в два раза меньше. Интенсивность же будет в четыре раза меньше, чем в случае отсутствия препятствия. В нашем случае такая интенсивность соответствует уровню $I_0/4$ (рис. 2). Таким образом, высота, где I_{norm} достигла этого уровня, является высотой края геометрической тени.

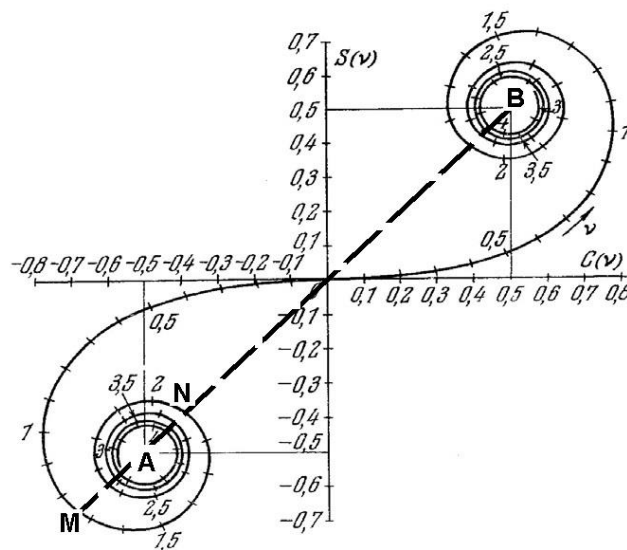


Рис. 3. Спираль Корню [3]. По длине штриховой линии можно оценить амплитуду радиоволны в первой точке, находящейся от края геометрической тени.

Спираль Корню позволяет, в приближении геометрической оптики, найти амплитуду радиоволны для точек, находящихся на любом расстоянии x от края геометрической тени, которую в оптике оценивают, как уровень $I_0/4$. Например, если точка наблюдения будет, в нашем случае, ниже и ниже геометрической тени, то будут открываться всё возрастающее число зон. Тогда начало результирующего вектора будет скользить по левому завитку спирали к полюсу **A** (см. рис. 3). В результате

амплитуда пройдет через ряд максимумов (первый из них равен длине отрезка **МВ**, показанной на рис. 3 штриховой линией) и минимумов (первый из них равен длине отрезка **NB**, показанной на рис. 3 той же штриховой линией).

Параметр v в интегралах Френеля связан с расстоянием x от точки проекции края непрозрачной полуплоскости на экран до разных точек яркости на экране, отстоящего на расстоянии b от полуплоскости [4]. С учётом рефракции радиоволны [1] получаем:

$$v = x \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot b \cdot I_0}}, \quad (2)$$

где I_0 – средний уровень интенсивности радиоволны, после опускания луча ниже геометрической тени (рис 2), $b \approx 3500$ км – расстояние от источника радиоволны до лимба, $\lambda = 3.2 \cdot 10^{-4}$ км – длина радиоволны.

Результаты

Из формулы (2) при известных значениях v , найденных с помощью спирали Корню, получаем оценки расстояний $x_1 \dots x_4$ на экране от проекции края геометрической тени на экран для первых четырёх яркостных пиков. При этом учтено влияние рефракции на зоны Френеля. Значения v , взятые из спирали Корню, равны, соответственно, $v_1 = -1.22$, $v_2 = -2.34$, $v_3 = -3.08$, $v_4 = -3.69$ [4, 5]. Из экспериментальных данных (рис. 2) также получены оценки расстояний x от края геометрической тени для первых четырёх яркостных пиков. Полученные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Оценки расстояний x . Полученные из экспериментальных данных оценки обозначены буквой Э. Из данных спирали Корню (v) – буквой Т.

№	a) 19.10.1983		b) 23.10.1983		c) 24.10.1983		d) 25.10.1983		e) 31.10.1983	
	Э, km	Т, km	Э, km	Т, km	Э, km	Т, km	Э, km	Т, km	Э, km	Т, km
x_1	0.76	0.49	0.26	0.41	0.32	0.42	0.31	0.33	0.26	0.38
x_2	1.20	0.95	0.62	0.79	0.74	0.81	0.51	0.63	0.52	0.73
x_3	1.57	1.25	0.88	1.04	0.97	1.07	0.67	0.84	0.71	0.96
x_4	1.89	1.50	1.06	1.25	1.15	1.28	0.78	1.01	0.85	1.14

Из таблицы 1 видно, что расположения пиков I_{norm} и расположения пиков, найденных с помощью спирали Корню, находятся в хорошем согласии. Это означает, что при определённой геометрии радиозондирования атмосферы Венеры наличие района с изменяющимся температурным режимом на пути опускания радиоволны вглубь атмосферы позволяет наблюдать дифракцию Френеля радиоволн. По экспериментальным данным можно оценить высоту расположения указанного района атмосферы Венеры. Нижний край его находится на высоте от 58.23 км до 58.72 км (рис. 2) от поверхности Венеры.

Известно, что соотношения ширин ярких полос пропорциональны площади зон для дифракционной картины на краю полуплоскости составляют: 1 : 0.41 : 0.32 : 0.27 [4, 5]. По экспериментальным данным найдены следующие соотношения (оценки ширины полос получены по уровню I_0): а) 1 : 0.44 : 0.33 : 0.22; б) 1 : 0.58 : 0.14 : 0.27; в) 1 : 0.54 : 0.43 : 0.27; д) 1 : 0.60 : 0.40 : 0.25; е) 1 : 0.20 : 0.26 : 0.12. Соотношения ширин ярких полос, полученные из экспериментальных данных, хорошо согласуются с таковыми в дифракционной картине, полученной в работе [4].

Следует заметить, что величина первого максимума более чем в три раза превышает значение I_0 (рис. 2). Из спирали Корню следует, что она должна быть около $1.4 \cdot I_0$. Такая разница в величине первого максимума, вероятно, возникает из-за того, что

указанный район атмосферы не является идеальной непрозрачной полуплоскостью. Здесь могут возникать дополнительные интерференционные эффекты из-за присутствия в атмосфере различного рода неоднородностей.

Заключение

В работе проанализированы пять радиозатменных сеансов Венера-15 и -16. Профили нормированной интенсивности сигнала в этих сеансах содержат характерные особенности, которые можно отнести к наличию дифракционного процесса. С помощью спирали Корню показано, что наблюдаемые особенности обусловлены дифракцией Френеля радиоволны в зоне, стартующей от края непрозрачной полуплоскости с учётом влияния рефракции в атмосфере. Непрозрачной полуплоскостью является район в атмосфере Венеры с изменяющимся температурным режимом на широтах 85.3°N – 87.0°N . Нижний край этого района находится на высоте от 58.23 км до 58.72 км от поверхности Венеры.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. V.N. Gubenko, V.E. Andreev and A.G. Pavelyev. Detection of layering in the upper cloud layer of Venus northern polar atmosphere observed from radio occultation data. J. Geophys. Res., 113, E03001, doi: 10.1029/2007JE002940
2. Л.В. Ксанфомалити. Планета Венера. Москва. Наука, 1985. 376 с.
3. В.А. Зверев, Т.В. Точилина. Специальные разделы прикладной математики для оптотехников. Учебное пособие. СПб. СПбГУ ИТМО, 2005. 235 с.
4. И.В. Савельев. Курс общей физики. Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. Т.Ш. Москва, 1970. 537 с.
5. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Оптика. Т.IV. Москва, 1980. 752 с.