

Том I, с. 141–145

УДК: 535.37 + 523.42

МИССИЯ ВЕНЕРА-Д: КОНЦЕПЦИЯ РАДИОСИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

А. Л. Гаврик, М. И. Бондаренко, С. Ф. Коломиец, Т. Ф. Копнина, Л. А. Луканина

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, пл. Введенского, 1
E-mail: alg248@hotmail.com*

Аннотация. В настоящей статье с принципиальных позиций обсуждается облик бортовой и наземной радиочастотных систем, которые требуются для реализации предлагаемой авторами усовершенствованной методики измерения и технологии обработки радиотехнических данных. Реализация последних возможна на базе оригинальной математической модели, позволяющей разделять вклад различных факторов в параметры регистрируемого сигнала, а также более точно оценивать границы применимости положений геометрической оптики при обработке результатов дистанционных измерений. Обсуждаемые в статье предложения могут быть с успехом реализованы в составе миссии Венера-Д, что откроет принципиальную возможность получения новых данных о газовой оболочке планеты, которая в настоящее время наименее изучена среди планет земной группы.

Ключевые слова: радиопросвечивание, ионосфера и атмосфера Венеры, распространение радиоволн

RADIO OCCULTATION ON THE VENERA-D MISSION: A CONCEPT OF RADIO FREQUENCY SUBSYSTEM AND RADIO SCIENCE TECHNIQUE

A. L. Gavrik, M. I. Bondarenko, S. F. Kolomiets, T. F. Kopnina, L. A. Lukanina

Abstract. In the present paper a basic concept of tools, measurement technique and a new mathematical model underlying data processing are briefly outlined envisioning their possible realization on the Venera-D mission. It is noted that the occultation experiments made with optimally matched parameters of RF-subsystem may pave the way to new and important findings.

Keywords: occultation, ionosphere and atmosphere of Venus, radio wave propagation

Введение

Несколько десятилетий радиозатменное зондирование развивают в качестве технологии диагностики газовых оболочек планет, комет и Солнца. Радиозатменные исследования на Венере начали в 1967 г. Однако накопленный к настоящему времени объем данных радиопросвечивания сравнительно невелик (~1500 сеансов). Например, количество радиопросвечиваний марсианской газовой оболочки превышает 6000 сеансов, а количество радиопросвечиваний околоземной оболочки составляет несколько тысяч в сутки.

С использованием имеющихся экспериментальных данных структурные характеристики ионосферы ниже 1000 км и верхняя атмосфера были тщательно исследованы и описаны в литературе [1–5]. Эти результаты охватывают широкий диапазон высот и солнечной активности. Важно сказать, что, хотя многое известно об ионосфере Венеры, наше понимание остается довольно поверхностным в большинстве аспектов. Венера, как и Земля, является очень сложным миром, и для того, чтобы сделать еще один шаг вперед к ее адекватному пониманию, в предстоящих миссиях по-прежнему следует уделять основное внимание вопросу получения новых данных, с большей вероятностью ведущих к новым знаниям, а не накоплению статистики измерений с использованием известных инструментов.

В миссии Венера-Д [6] наш интерес сосредоточен на мелкомасштабных особенностях ионосферы и атмосферы, и на процессах, которые влияют на их структуру. Наиболее привлекательными являются наименее изученные вопросы: взаимодействие между нижней ионосферой и

верхней атмосферой Венеры, а также волновые процессы как в атмосфере, так и в ионосфере. Опыт предыдущих миссий показывает, что, имея достаточный энергетический потенциал радиолиний, можно выявить свойства всех слоев ионосферы [7] и собрать данные об их изменчивости, в том числе путем сравнения радиозатменных измерений и данных, собранных с приборов, установленных на орбитальном аппарате проекта Венера-Д.

Анализ данных радиопросвечивания обычно выполняется в приближении геометрической оптики, а для разделения радиоэффектов от ионосферы и атмосферы используется метод дисперсионного интерферометра. Известные интегральные соотношения, описывающие соответствующую постановку обратной задачи, позволяют вычислить по изменениям частоты или мощности зондирующих сигналов радиальные профили концентрации электронов в ионосфере, плотности и температуры в нейтральной атмосфере. Однако вопросы о точности такого метода при определении параметров атмосферы и ионосферы все еще актуальны, а вопросы извлечения новой информации о газовой оболочке из экспериментальных данных требуют совершенствования методики измерений и анализа экспериментальных результатов.

Опыт всех предыдущих миссий к Венере, позволяет нам выбрать оптимальные условия радиозатменных экспериментов. Обсуждаемая в докладе усовершенствованная модель обработки данных, применимая к результатам высокопотенциальных измерений, будучи заложена в основу эксперимента, позволит получить надежные данные о ночной ионосфере и нижней части дневной ионосферы. В результате, радиопросвечивание вместе с оборудованием, установленным на орбитальном аппарате, можно рассматривать как один из самых недорогих и надежных способов получения новых и важных сведений в новой и важной миссии на Венеру.

Задачи радиопросвечивания в миссии Венера-Д

Радиофизические исследования в миссии Венера-Д могут проводиться с когерентным двухчастотным излучением в полосах X (3.6 см) и S (13.7 см) при высоком потенциале радиолиний. Они делятся на три категории экспериментов и наблюдений. Во-первых, изучение планетарной атмосферы и ионосферы. Эти измерения могут выполняться как с прямым (подразумевая, что передатчики находятся на борту), так и с обратным (передатчики на Земле) просвечиванием. Во-вторых, исследования так называемых свойств «бистатистического рассеяния» или, другими словами, рассеяния на трассах распространения с космического аппарата через поверхность планеты на приемную станцию на Земле или в проивоположном направлении. В-третьих, исследование свойств солнечного ветра и короны Солнца с использованием прямого радиопросвечивания с малыми периодами дискретизации сигнала, включая синхронное получение сигнала двумя наземными станциями (интерферометрический прием). Таким образом, будут возможны следующие исследования:

1. Получение данных об электронной концентрации в интервале высот от ~ 70 км до ~ 1000 км и получение данных о температуре, плотности и давлении в атмосфере в интервале высот от ~ 40 км до ~ 100 км как функции высоты, широты, местного времени и сезона.
2. Изучение динамики многослойных структур в атмосфере и ионосфере Венеры, их связи с волновыми процессами, солнечной активностью и потоком солнечного ветра.
3. Выявление связей между процессами в ионосфере, термосфере и нижней атмосфере на дневной и ночной стороне Венеры.
4. Изучение рассеивающих свойств поверхности Венеры, диэлектрической проницаемости и плотности грунта, выявление областей с аномальными коэффициентами рассеяния.
5. Изучение динамики мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей межпланетной и околосолнечной плазмы.
6. Исследование особенностей распространения радиоволн в космических средах.

Радиочастотное оборудование и методики измерений

Опыт предыдущих миссий показывает, что динамический диапазон используемых радиолиний должен составлять не менее 45 дБ и быть сбалансированным. Последнее не менее важно для

надежной интерпретации и требует обеспечения потенциала обеих линий достаточно высокого, чтобы помешать шуму одной из них доминировать в конечных результатах.

Радиотехнические измерения в миссии Венера-Д предполагают использование наземных антенн диаметром 70 и 64 м, и приемников с водородными мазерами и фазовой автоподстройкой частоты, собранными по схеме, которая подразумевает параллельную реализацию в диапазонах X и S как узкополосной, так и широкополосной регистрации. Последнее позволяет ожидать надежную и интерпретируемую регистрацию сигнала когда его мощность будет довольно низкой для нормальной работы подсистемы фазового слежения.

Чтобы выполнить все исследования, перечисленные выше, на борту должен быть передатчик в X-диапазоне 30 Вт и не менее чем 40 Вт передатчик в S-диапазоне. Ожидается, что оба они будут хорошо стабилизированы и эффективно экранированы, чтобы обеспечить требуемую стабильность в диапазоне интервалов времени от 0,05 до 600 с, которые равны типичным периодам дискретизации сигнала в различных радиозатменных экспериментах. Учитывая, что краткосрочные отклонения частоты могут быть непосредственно проецированы на тонкую структуру планетарной среды, необходимо использовать гетеродины на борту со значением стабильности частоты на уровне 10^{-12} в диапазоне интервалов времени до 10 с.

В сферически симметричной не поглощающей среде для флуктуаций частоты $\Delta f(t)$ и мощности $X(t)$ отнесенных к углу $\xi(t)$ справедливы следующие приближенные соотношения:

$$\Delta f(t) = \xi(t)f_0 \frac{V_{\perp}}{A}, X(t) = \left[1 - L \frac{d}{dp} \xi(t) \right]^{-1}$$

где: L – расстояние от передатчика до планетарного лимба, V_{\perp} – вертикальная составляющая скорости космического аппарата в геоцентрической системе координат, c – скорость света, f_0 – частота излучения. Производную от первого соотношения можно записать как:

$$\frac{d}{dt} \Delta f(t) = f_0 \frac{V_{\perp}}{A} \frac{d}{dt} \xi(t).$$

Скорость погружения луча в среду прямо пропорциональна рефракционному ослаблению:

$$\frac{d}{dt} (h(t) + \xi(t)L) = V_{\perp} X(t),$$

где: $h(t)$ – расстояние от центра планеты до радиолуча. Комбинация соотношений дает:

$$X(t) = 1 - \frac{AL}{f_0 V_{\perp}^2} \frac{d}{dt} \Delta f(t)$$

Используя данные миссий Венера-15, 16 удалось сформировать экспериментальную основу, вышеприведенным теоретическим соотношениям и показать, что в области применения геометрической оптики в среде со сферической симметрией изменение плотности потока энергии сигналов прямо пропорционально значению градиента угла отклонения волнового вектора. Это означает, что флуктуации мощности сигнала в экспериментах по радиопросвечиванию атмосферы и ионосферы должны быть непосредственно коррелированы со скоростью изменения частоты [8]. В то же время истинно стохастические флуктуации (шум) мощности и частоты не коррелированы. Сравнение двух параметров сигналов, представленное на рис. 1, открывает двери новым технологиям обработки данных, которые позволят глубже проникнуть в ионосферу и исследовать процессы взаимодействия атмосферы и ионосферы, в том числе распространение волновых процессов из атмосферы в ионосферу [8].

Эффект, лежащий в основе такого исследования, может быть обнаружен в сферически сложной среде, если слои достаточно плотные и уровень аппаратного шума низкий, а дифракция и поглощение электромагнитных волн отсутствуют. Вот почему данные миссий Венера-15, 16, которые работали с более высокой мощностью и на более низких частотах, чем большинство других миссий, были критически необходимы для проверки концепции новой технологии обработки

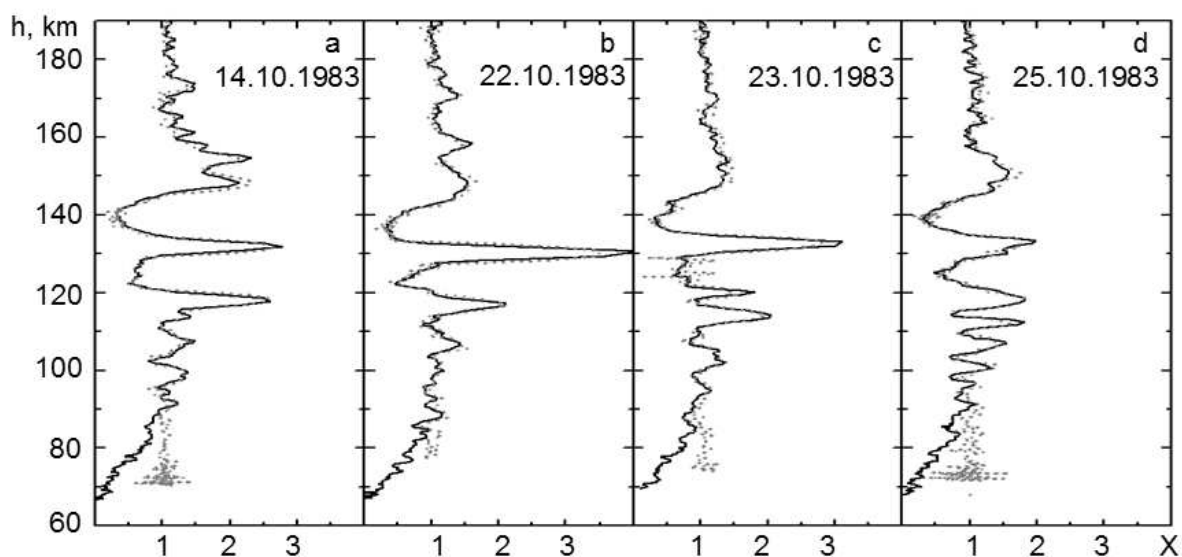


Рис. 1. Сравнение рефракционного изменения мощности $X_0(h)$ сигнала с длиной волны 32 см (сплошная кривая) с вычисленным из частоты рефракционным изменением $X_1(h)$ (серые точки) в четырех сеансах. По оси ординат – высота радиолуча над поверхностью Венеры.

данных. Самый интригующий результат, полученный с использованием этих данных, заключается в том, что исследованы слои венерианской ионосферы на чрезвычайно малых высотах около 80-120 км над поверхностью планеты, где концентрация электронов чрезвычайно мала [8]. Идея такой методики заключается в сравнении двух диаграмм со значениями мощности сигнала (ось x) вдоль высот (ось y), в то время как одна из них представляет собой экспериментально наблюдаемые вариации и флуктуации мощности сигнала (X_0), а другая означает «предсказание» того же параметра, рассчитанного на основе частоты сигнала, с использованием обсуждаемых соотношений между колебаниями частоты и мощности (X_1), используя линейную связь между X_1 и скоростью изменения частоты сигнала.

Типичные стратифицированные периодические вариации X_0 и X_1 показаны на рис. 1. Все они зависят от среднего показателя преломления, и часть из них предположительно является результатом волнообразных взаимодействий между атмосферой и ионосферой Венеры. Можно видеть хорошее соответствие между диаграммами в диапазоне высот от 90 до 180 км. Флуктуации выше 180 км имеют чистый стохастический характер, который указывает на то, что этот интервал высот не содержит обнаруживаемых слоев с устойчивыми отклонениями среднего показателя преломления. Как следует из рис. 1 ниже 80 км ослабление мощности в атмосфере быстро увеличивается, а плазменные слои отсутствуют.

Заключение

Таким образом, данные Венера-15 и 16 показывают, что слои постоянно существуют не только в нижней ионосфере Земли (в области D), но и в дневной ионосфере Венеры. Более глубокое исследование природы таких возмущений будет возможно в миссии Венера-Д путем сопоставления данных различных экспериментов. Предлагаемый подход позволит нам изучить тонкую структуру взаимодействия атмосферы и ионосферы с использованием вариаций мощности и частоты двух когерентных сигналов. Оптимизация радиочастотных подсистем на основе обобщения опыта предыдущих миссий позволит эффективно применить новые подходы для получения принципиально новых данных об атмосфере и ионосфере планеты, состоянии и динамике плазмы в солнечной системе. В результате могут быть получены новые знания о распространении возмущений из атмосферы в ионосферу, в том числе о распространении волновых возмущений, природа которых до настоящего времени не исследована.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гос. задания и частично поддержана Программой РАН № 28.

Список литературы

1. Armand N. A., Gulyaev Yu. V., Gavrik A. L. et al. 2010. Results of solar wind and planetary ionosphere research using radiophysical methods. *Physics-Uspexhi*, 53(5):517-523.
2. Brace L. H., Kliore A. J. 1991. The structure of the Venus ionosphere. *Space Sci. Reviews*. 55:81-163.
3. Hinson D. P., Jenkins J. M. 1995. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus. *Icarus*. 114(2):310-327.
4. Imamura T., Ando H., Tellmann S. et al. 2017. Initial performance of the radio occultation experiment in the Venus orbiter mission Akatsuki. *Earth, Planets and Space*. 69:137.
5. Grand J. -C., Bougher S. W., Lopez-Valverde M. A. et al. 2017. Aeronomy of the Venus Upper Atmosphere. *Space Sci. Rev.*, 212(3-4):1617-1683.
6. Glaze L. S., Wilson C. F., Zasova L. V. et al. 2018. Future of Venus Research and Exploration. *Space Sci. Rev.* 214(8):89.
7. Gavrik A. L., Pavelyev A. G., Gavrik Yu. A. 2009. Detection of ionospheric layers in the Daytime Ionosphere of Venus at Altitudes of 80-120 km from VENERA-15 and -16 Two-Frequency Radio-Occultation Results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 49(8):1223-1225.
8. Gavrik A. L. et al. 2013. Oscillations Detected near the Lower Boundary of the Venus Ionosphere from the Radio Occultation Measurements of the Venera-15 and Venera-16 Satellites. *J. of Communications Technology and Electronics*. 58(10):985-995.