

Радиопросвечивание в миссии Венера-Д: концепция радиосистемы и методов для получения новых сведений об атмосфере и ионосфере Венеры

А.Л. Гаврик¹, С.Ф. Коломиец¹, Ю.А. Гаврик¹, Т.Ф. Копнина¹, Я.А. Илюшин²

¹ Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 141190, г. Фрязино, Московская обл., пл. Б.А. Введенского, д.1, e-mail: alg248@hotmail.com

² МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992 ГСП-2 Москва Ленгоры МГУ физический факультет.

В настоящей статье кратко изложена базовая концепция инструментов, методика измерения и новая математическая модель, лежащая в основе обработки данных, предусматривающая их возможную реализацию в миссии Венера-Д. Отмечается, что эксперименты радиопросвечивания, выполненные с оптимально подобранными параметрами радиочастотной подсистемы, могут проложить путь к новым и важным выводам.

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 radio-frequency subsystem may pave the way to new and important findings.

Введение

Достоинством экспериментов радиопросвечивания является возможность получения долговременных однородных измерений параметров атмосферы и ионосферы планеты на высотах, которые малодоступны для исследования другими методами. В научную программу исследований миссии Венера-Д [1] включен радиофизический эксперимент, в котором для изучения явлений в газовой оболочке анализируют возмущения радиоволн на линии связи между космическим аппаратом (КА) и Землей. Основным оборудованием для проведения эксперимента является бортовая система радиосвязи и наземная система слежения, управления и связи с КА в дальнем космосе. Радиофизические эксперименты миссии Венера-Д – это радиозатмения, когда радиоволны распространяются сквозь изучаемую среду (планетную атмосферу или околосолнечную плазму), и траекторные исследования, основанные на анализе возмущений орбиты КА.

Первый эксперимент по распространению радиоволн сквозь изучаемую околопланетную среду был проведен в 1964 г. во время пролета КА Mariner-4 около Марса. В дальнейшем эксперименты в космосе по распространению радиосигналов и траекторному слежению проводили с использованием бортовых передатчиков почти во всех межпланетных полетах по космическим программам США, СССР, Европы и Японии. Важным исключением из этого правила был эксперимент, выполненный с помощью КА Mariner-5 при исследованиях Венеры, когда передаваемые с Земли сигналы в диапазоне декаметровых и метровых волн обрабатывали бортовыми приемными устройствами КА с целью изучения ионосферы и атмосферы планеты.

Важно отметить, что, хотя многое известно о газовой оболочке Венеры, наше понимание в большинстве случаев остается довольно неглубоким. Венера, как и Земля, является очень сложным миром, и для того, чтобы сделать шаг вперед к ее адекватному пониманию, в будущих миссиях необходимо сосредоточиться на новых знаниях. В миссии Венера-Д наш интерес сосредоточен на разномасштабных особенностях ионосферы и атмосферы, а также на тонких процессах, которые могут влиять на структуру газовой оболочки. Взаимодействие между нижней ионосферой и верхней атмосферой Венеры, а также волновые процессы, как в атмосфере, так и в ионосфере -

как наименее изученные вопросы - являются наиболее привлекательной областью наших исследований, которые предполагают широкую кооперацию и совместный анализ всех данных, собранных с приборов, установленных на орбитальном аппарате.

Опыт предыдущих миссий к Венере [2-7] учит, что, имея достаточный энергетический потенциал радиолиний, можно выявить характер самых низких ионосферных слоев и собрать достоверные данные об их изменчивости. Идея о том, что необходимо увеличить информационный потенциал радиозатмений, чтобы наблюдать новые особенности и глубже проникать в динамику системы атмосфера-ионосфера, лежит на поверхности [7]. Оптимальная радиотехническая модель формирования сигналов, будучи заложена в основу эксперимента, позволит нам получить более надежные данные о всей газовой оболочке, особенно в ночной ионосфере и вблизи нижней границы дневной ионосферы, с помощью новых методов обработки данных [8].

Цель данной работы – анализ перспективы реализации эксперимента радиопросвечивания. Задача подготовки радиофизических исследований по программе Венера-Д состоит в том, чтобы оптимизировать систему связи для обеспечения радиоэкспериментов. Предполагается улучшить параметры радиотехнической системы и усовершенствовать методы наблюдений по сравнению с предыдущими миссиями, в результате чего возрастет точность и информативность экспериментальных данных. Как следствие, ряд фундаментальных сведений о Венере будет получен с хорошей точностью и будет показано, что существуют новые, потенциально важные методы, основанные на достижимой в настоящее время точности измерений.

Объекты радиофизических исследований

Радиофизические исследования в миссии Венера-Д надо проводить когерентно связанными синусоидальными сигналами в диапазонах X (3,6 см) и S (13,7 см) на высокопотенциальных радиолиниях. Именно в этих диапазонах работает широкая сеть наземных приемных пунктов [3-6]. Эксперименты делятся на три категории. Во-первых, изучение атмосферы ионосферы планеты. Во-вторых, исследование свойств «бистатического рассеяния» или, другими словами, рассеяния электромагнитных волн на пути распространения сигналов между КА и наземной антенной через планетарную поверхность. В-третьих, измерение параметров солнечного ветра и короны. Научные исследования будут проведены по следующим направлениям:

1. Получение данных о распределении 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 двухпозиционного рассеяния.

5. Изучение динамики мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей межпланетной и околосолнечной плазмы.

Радиочастотные системы и методы измерения

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

Последнее не менее важно для надежной интерпретации радиоданных. Потенциал всех линий должен быть высоким и мощность излучения в S-диапазоне должна превышать мощность излучения в X-диапазоне, чтобы шумы одного из сигналов не доминировали над конечным результатом. В противном случае интерпретация данных, основанная на эффективном двухчастотном методе, может оказаться хуже, чем интерпретация, использующая только одну частоту с большим динамическим диапазоном.

Наземные системы

Радиотехнические измерения в миссии Венера-Д предполагают использование наземных антенн диаметром 70 и 64 м и приемников с водородными стандартами частоты. Российские пункты космической связи должны быть модернизированы по схеме, подразумевающей регистрацию сигналов X- и S-диапазона как в широкой полосе частот, так и в узкой полосе частот с помощью приемника с фазовой автоподстройкой. Последний является инструментом точного измерения параметров сигналов в реальном времени, в то время как регистрация в широкой полосе позволит нам надежно зарегистрировать даже слабые сигналы, несмотря на их высокую динамику во время зондирования нижних слоев атмосферы, когда мощности сигналов будут слишком низкими для нормальной работы подсистемы с фазовой автоподстройкой. Следует также отметить, что в случае появления каустик [9,10] широкополосная регистрация является единственной возможностью для правильной интерпретации результатов.

Космические системы

Для выполнения всех исследований, перечисленных выше, на борту КА должен быть передатчик X-диапазона с мощностью излучения не менее 30 Вт и передатчик S-диапазона с мощностью не менее 40 Вт. Ожидается, что оба они будут хорошо стабилизированы, хорошо экранированы, термически стабилизированы и радиационно-защищены, чтобы обеспечить требуемую стабильность на интервалах времени от 0,1 с до 600 с, которые соответствуют типичным периодам дискретизации параметров сигнала и интервалу времени выполнения радиопросвечивания. Учитывая, что краткосрочные отклонения частоты могут быть непосредственно проецированы на тонкую структуру планетарной среды, гетеродины на борту должны обеспечить стабильность частот на уровне $(1...3) \cdot 10^{-13}$ на интервалах времени до 10 секунд.

Обратное и прямое радиопросвечивание с интерферометрическим приемом

Все три категории экспериментов и наблюдений можно выполнять как прямым (с передатчиками на борту), так и обратным (с передатчиками на Земле) методом на участке орбиты КА, на котором радиотрасса перемещается по исследуемой среде. Одна из главных причин ограничения точности радиозатменных данных – инструментальные погрешности, зависящие от технических характеристик используемых радиосистем и, в первую очередь, от энергетического потенциала радиолинии [11]. Чем больше энергия сигнала по сравнению с энергией шума, тем точнее можно измерить параметры радиосигналов и, следовательно, можно получить более точные характеристики просвечиваемой среды. Увеличить энергетический потенциал радиолинии можно увеличением мощности излучения, увеличением площади излучающей и приемной антенн, уменьшением температуры шума приемника сигналов, однако при реализации эксперимента приходится учитывать, что диаметр бортовой антенны ограничен весогабаритными требованиями, а мощность излучения ограничена энергообеспечением КА. В методе обратного просвечивания энергетический потенциал радиолинии можно увеличить в десятки раз благодаря увеличению мощности излучения с наземной антенны до десятков киловатт, что позволит измерять на борту мощность, фазу и частоту радиосигналов на коротких интервалах времени (~ 0.1 с) при малом уровне инструментального шума.

В периоды сближения радиотрассы с Солнцем планируется проводить радиозондирование солнечной короны, которое можно осуществлять на любом участке орбиты КА. Для изучения динамики мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей межпланетной и околосолнечной плазмы прямым методом просвечивания целесообразно обеспечить синхронный прием сигналов на двух наземных станциях (интерферометрический прием) поскольку это может дать нам новые и более точные сведения о размере плазменных неоднородностей и их скорости. Интерферометрический прием позволит применить разработанный новый метод для выявления неоднородностей и оценки скорости их перемещения. В рамках предлагаемой модели обратных инверсных доплеровских измерений удастся получить вполне адекватное представление многоволновых доплеровских спектров движения сплошной неоднородной среды, каковой являются исследуемые потоки плазмы. [12].

Перспективная технология обработки и анализа данных

Используя данные миссий Venera-15 и 16 и специально разработанные методы обработки данных, наконец, было экспериментально подтверждено, что в области применения геометрической оптики изменение плотности потока энергии сигналов при рефракции в среде со сферической симметрией, непосредственно пропорциональны значению градиента угла отклонения волнового вектора. Это означает, что флуктуации мощности сигнала в экспериментах по зондированию атмосферы и ионосферы должны быть непосредственно коррелированы со скоростью изменения частоты сигнала, поскольку газовую оболочку Венеры можно рассматривать как сферически-симметричную из-за воздействия поля тяжести [11]. В то же время стохастические флуктуации мощности (шума) и частоты не коррелированы, следовательно случайные флуктуации мощности будут отличаться от данных, рассчитанных по частоте сигнала. Это новый способ интерпретации данных, который, как ожидается, позволит нам глубже проникнуть в ионосферу и более надежно исследовать процессы взаимодействия атмосферы и ионосферы, включая распространение колебаний плотности из атмосферы в нижнюю ионосферу [11].

Эффект, лежащий в основе такого исследования, может быть обнаружен в сферически слоистой среде в отсутствие дифракции и поглощения электромагнитных волн, если слои достаточно плотные и уровень аппаратного шума низкий. Вот почему данные миссий Venera-15 и 16, в которых передатчик излучал сигнал высокой мощности в диапазоне 32 см, т.е. на более низкой частоте, чем в большинстве других миссий, были крайне необходимы для доказательства концепции новой технологии обработки данных. Наиболее интригующий результат, полученный с помощью этих данных, заключается в том, что исследование тонких структур ионосферы Венеры на чрезвычайно малых высотах около 80-120 км над уровнем поверхности планеты, где концентрация электронов все еще чрезвычайно мала, стала возможной [7,11]. Идея такого метода исходит из сравнения двух диаграмм со значениями мощности сигнала (ось X) вдоль высот (ось Y), в то время как один из них представляет собой экспериментально наблюдаемые изменения мощности сигнала (W_0) в атмосфере и ионосфере, а другой означает «предсказание» того же параметра (W_1), вычисленного на основе измерений скорости изменения частоты сигнала df/dt , используя линейную связь $W_1 = \text{const} * df/dt$. Следует подчеркнуть, что такой прогноз W_1 применим не только к ионосфере, но и к атмосфере. Двухчастотная методика позволяет выделить доплеровское смещение частоты сигнала, обусловленное только рефракцией в ионизированной среде, поэтому разница между W_0 и W_1 позволила эффективно исследовать область нижней границы ионосферы.

Типичные стратифицированные периодические вариации W_0 и W_1 представлены на рис. 1. Они обусловлены вариациями среднего показателя преломления, а 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 W_0 и W_1 выше 180 км носят чисто стохастический характер, что указывает на то, что этот интервал высот не содержит обнаруживаемых слоев с устойчивыми вариациями показателя преломления. Как следует из рис. 1, атмосферное ослабление мощности при рефракции быстро нарастает с уменьшением уровня 80 км, но колебания показателя преломления есть и ниже этого уровня, а детектируемые ионизированные слои отсутствуют. Таким образом, данные Венера-15 и 16 показывают, что слои постоянно существуют не только в нижней ионосфере Земли, но и в дневной ионосфере Венеры. Более глубокое исследование природы таких возмущений будет возможно в миссии Венера-Д путем сравнения данных различных экспериментов. Предлагаемый подход позволит нам изучить тонкую структуру взаимодействия атмосферы и ионосферы с использованием изменений мощности и частоты двух когерентных сигналов. В результате могут быть получены новые знания о распространении возмущений плотности из атмосферы в ионосферу, включая распространение волновых возмущений атмосферы.

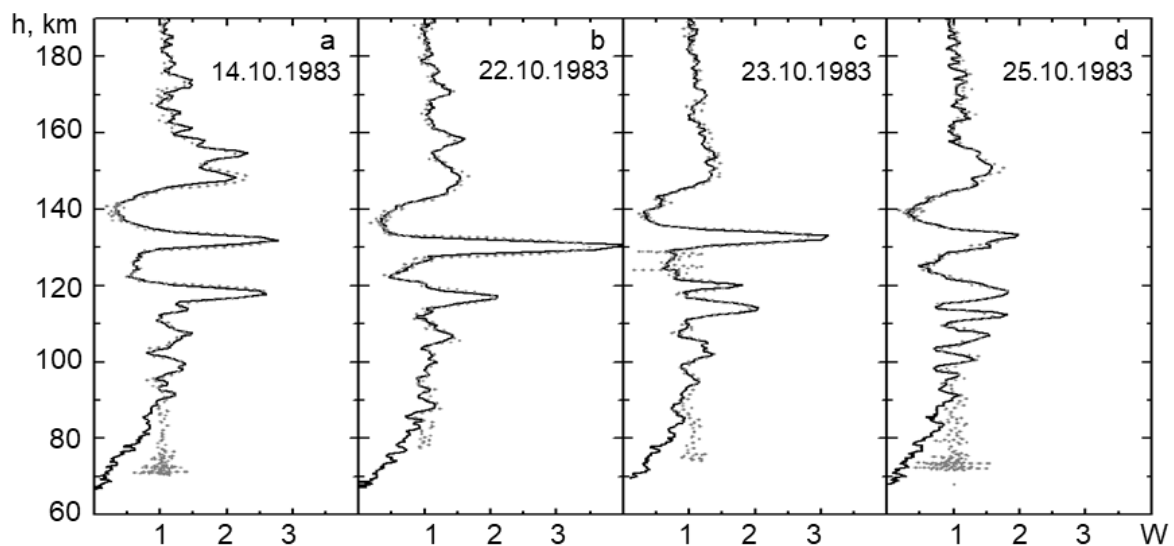


Рис. 1. Сравнение профилей $W_0(h)$ - экспериментально наблюдаемые изменения мощности сигнала на длине волны 32 см из-за преломления в атмосфере и ионосфере (сплошная линия, произвольные единицы) с $W_1(h)$ - «предсказание» $W_0(h)$, рассчитанное на основе частоты сигнала только для ионосферы (точки). h - высота над уровнем поверхности. Данные получены в 4 сеансах (а, b, с, d) миссии Венера-15.

Заключение

Данные, собранные в период интенсивного исследования Венеры, позволили нам не только изучить структуру ее ионосферы и атмосферы, но и сформировать и испытать новые подходы к обработке сигналов и интерпретации результатов экспериментов. Учитывая тот факт, что до запуска ракеты-носителя еще более чем пять лет, можно успеть модернизировать наземные радиосистемы и бортовые комплексы. Миссия Венера-Д предоставляет уникальную возможность использовать все позитивные технические решения предыдущих миссий и избежать тех, которые были не очень эффективными. Кроме того, обсуждение использования L-диапазона - которое выходит за рамки этой работы - выглядит вполне целесообразным и практичным во

время предлагаемой модернизации радиосистем, поскольку этот диапазон давно освоен и хорошо изучен в советских космических исследованиях, он обладает большой чувствительностью к ионизированной среде, превышающей в несколько раз чувствительность предлагаемого в эксперименте S-диапазона.

Принимая во внимание достижения в области радиоэлектронных компонентов и техники, все идеи, обсуждаемые в этой статье, касаются устройств малого размера, работающих вместе с другими приборами, установленными на орбитальном аппарате Венера-Д. В то же время оптимизированные и сбалансированные радиочастотные системы позволяют более эффективно использовать новые подходы к обработке сигналов и интерпретации данных экспериментов, что, без сомнения, является самым коротким и эффективным способом получения принципиально новых сведений об атмосфере и ионосфере планеты.

Работа выполнена при частичной поддержке программы № 2.7П Президиума РАН.

Литература

1. Senske D., Zasova L. et al. Venera-D: Expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. / Venera-D Final Report. 2017. https://solarsystem.nasa.gov/docs/Venera-D_Final_Report_170213.pdf
2. Арманд Н.А. и др. Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 542-548.
3. Brace L.H., Kliore A.J. The structure of the Venus ionosphere. // Space Sci. Reviews. 1991. V. 55, P. 81-163.
4. Hinson D.P. Jenkins J.M. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus. // Icarus. 1995. V. 114 (2). P. 310–327.
5. Tellmann S., Häusler B., Hinson D.P. et al. 2012. Small-scale temperature fluctuations seen by the VeRa Radio Science Experiment on Venus Express. Icarus. 221, 471–480.
6. Imamura T., Ando H., Tellmann S. et al. Initial performance of the radio occultation experiment in the Venus orbiter mission Akatsuki. // Earth, Planets and Space. 2017. 69:137.
7. Gavrik A.L., Pavelyev A.G., Gavrik Yu.A. 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. 2009. V. 49. № 8. P. 1223-1225.
8. А.Л. Гаврик, Ю.А. Гаврик, Т.Ф. Копнина, Е.А. Кулешов. Осцилляции вблизи нижней границы ионосферы Венеры по радиозатменным данным спутников "Венера-15",-16" // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 10. С. 1013-1024.
9. Лукин Д.С. и др. Рефракция радиоволн и напряженность поля в атмосфере Венеры // Космические исследования №6, 1969
10. Крюковский А.С. и др. Волновые катастрофы - фокусировки в дифракции и распространении электромагнитных волн // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 10. С. 1155-1192.
11. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф. О возможности увеличения чувствительности метода радиопросвечивания // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 3. <http://jre.cplire.ru/jre/may11/3/text.pdf>
12. С.Ф. Коломиец, Л.А. Луканина. Применение обратных инверсных доплеровских методов на интерферометрах со сверхбольшой базой. / В 87 VII Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. –Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. (CD-ROM). С. 49-62.