

Радиозатменные эксперименты в проекте ВЕНЕРА-Д

А.Л. Гаврик, Т.Ф. Копнина, Е.А. Кулешов, А.А. Смыслов

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@ire216.msk.su

Показано, что радиозатменные эксперименты, в которых бортовой приемник спутника планеты определяет и регистрирует мощность и фазу когерентных радиоволн, излучаемых наземной антенной, повысят качество и информативность данных радиопросвечивания.

It is shown that radio physical experiments in which the on-board equipment of orbital spacecrafts receives coherent radio waves transmitted from the ground-based station and measures the power and phase of these waves are needed to increase the sensitivity of radio occultation observations.

В 1965 г. во время полета космического аппарата MARINER-4 к Марсу [1] впервые осуществили исследование атмосферы и ионосферы планеты методом радиозатмений. Радиопросвечивания на трассе *спутник*→*спутник* впервые провели в 1975 г. в эксперименте APOLLO/SOYUZ-ATS-F [2]. В настоящее время ежедневно проводят сотни радиопросвечиваний околоземной оболочки на трассе *спутник*→*спутник*, общее количество просвечиваний превысило 10^6 [3]. При исследовании планет Солнечной системы аналогичные эксперименты на трассе *спутник*→*спутник* до настоящего времени не проводили, пилотный эксперимент планировали осуществить в проекте ФОБОС-ГРУНТ [4], но проект не реализован из-за неудачного старта. Проект ВЕНЕРА-Д направлен на исследование газовой оболочки и поверхности Венеры [5], один из экспериментов будет реализован методом радиозатмений с использованием орбитального аппарата (ОА) и субспутника (СС), оснащенных современной научной аппаратурой.

Радиопросвечивание газовой оболочки планеты возможно в тех случаях, когда излучающий сигналы ОА заходит за диск планеты или выходит из-за него при наблюдении с Земли или с борта СС. Во время радиозатмения приемная аппаратура регистрирует трансформированные газовой оболочкой сигналы, излучаемые с борта ОА, и после эксперимента полученную информацию передают по штатным каналам связи потребителям для дальнейшей обработки. Метод радиозатмений использует связь вызываемых средой изменений частоты и мощности радиоволн с профилем показателя преломления газовой оболочки для определения ее параметров. Метод дисперсионного интерферометра, основанный на различии фазовых скоростей распространения радиоволн разных диапазонов в диспергирующей среде, выделяет вариации фазы сигнала, обусловленные только влиянием плазмы, что увеличивает точность определения вертикального профиля концентрации электронов и параметров атмосферы [6].

В традиционных экспериментах радиопросвечивания на трассе *ОА*→*Земля* на радиосигналы оказывают влияние межпланетная плазма и ионосфера Земли. Нестационарные процессы в плазме на трассе связи являются главным мешающим фактором. Флуктуации фазы сигнала, обусловленные влиянием среды за пределами зондируемой ионосферы планеты, увеличивают погрешность определения профиля электронной концентрации $N(h)$, что приводит к искажению сведений о тонкой структуре зондируемой ионосферы. В радиозатменных экспериментах на трассе *ОА*→*СС* зондирующие ионосферу радиосигналы не искажаются флуктуациями плотности плазмы на трассе связи за пределами зондируемой среды, т.к. длина трассы связи не превышает 100 тыс.км. Благодаря этому появляется уникальная возможность изучения по результатам зондирования на трассе *ОА*→*СС* многослойных структур в нижней области дневной

ионосферы Венеры, а также слабоионизованной ионосферы в области глубокой тени. Представляется целесообразным осуществить в проекте ВЕНЕРА-Д достаточно большую серию экспериментов двухчастотного радиопросвечивания на трассе $OA \rightarrow CC$. Актуальность и техническая возможность подготовки такого эксперимента подтверждается высокой эффективностью аналогичных исследований околоземной оболочки [3] и проработкой аналогичного эксперимента в проекте ФОБОС-ГРУНТ [4].

Цель данной работы – анализ перспективы реализации эксперимента радиопросвечивания с использованием мощных наземных передатчиков когерентных сигналов и бортовых приемных комплексов.

Радиопросвечивание на трассе $OA \rightarrow$ Земля

К характерным особенностям высокоинформативных экспериментов радиопросвечивания на трассе $OA \rightarrow$ Земля относятся следующие:

- использование "мощного" бортового передатчика, излучающего два когерентных сигнала с помощью антенны большого диаметра;
- применение высокостабильного, термостатированного, стойкого к радиации бортового эталонного генератора;
- обеспечение высокой стабильности по фазе, групповой задержке и амплитуде в бортовой и наземной радиоаппаратуре;
- обеспечение оптимальной траектории OA и высокой стабильности ориентации антенны OA на Землю.

Одна из главных причин ограничения точности радиозатменных данных – инструментальные погрешности, зависящие от технических характеристик используемых радиосистем и, в первую очередь, от энергетического потенциала радиолинии [7]. Для достижения максимальной чувствительности метода двухчастотного радиопросвечивания к малым вариациям плотности среды необходимо обеспечить высокое отношение сигнал/шум на входе приемных устройств. Величина энергетического потенциала радиолинии влияет на величину погрешностей измерений, обусловленных инструментальными флуктуациями мощности, фазы и частоты принятых радиосигналов, и ограничивает чувствительность и разрешающую способность метода радиопросвечивания. 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. Достоинством эксперимента радиопросвечивания на трассе $OA \rightarrow$ Земля считают отсутствие необходимости передачи на Землю большого объема информации с борта спутника, недостатком такого эксперимента является необходимость обеспечения высокой мощности излучения с помощью антенны большого диаметра. При реализации эксперимента приходится учитывать, что диаметр антенны ограничен весогабаритными требованиями, а мощность излучения ограничена энергообеспечением OA .

Определение характеристик ионосферы и атмосферы планеты проводят путем измерения вариаций мощности и фазы когерентных радиосигналов, распространяющихся сквозь газовую оболочку в процессе сближения радиолинии с планетой [6]. Из-за сильной рефракции радиолучей в атмосфере Венеры сигналы можно наблюдать несколько минут после захода OA за диск планеты, однако, из-за критической рефракции недоступными для радиозатменных измерений являются высоты от 0 до 32.8 км относительно среднего радиуса 6052 км. При радиозатменном зондировании глубоких слоев атмосферы (ниже 40 км) рефракционное ослабление уровня сигнала составляет ~25 дБ, а интегральное поглощение радиоволн X-диапазона может достигать 15 дБ. Поэтому

при проведении измерений параметров радиоволн в эксперименте ВЕНЕРА-Д мощность зондирующих когерентных сигналов должна быть достаточной для того, чтобы обеспечить высокое отношение сигнал/шум и надежные измерения поглощения радиоволн при ослаблении уровня сигнала на ~ 40 дБ. В планируемом эксперименте максимальная мощность бортового передатчика не превысит 50 Вт, диаметр бортовой антенны не превысит ~ 2 метров, температура шумов наземного приемника составит $\sim 40^\circ$. Антенны диаметром больше 1 метра использовали в проектах PIONEER VENUS [8] и VENUS EXPRESS [9], а в проектах ВЕНЕРА-15,-16 [6] и MAGELLAN [10] диаметры бортовых антенн превышали 2 метра, что и обеспечило высокий потенциал радиолинии.

Радиопросвечивание на трассе Земля→ОА

Направив наземную излучающую антенну на планету, мы формируем радиополе диаметром 500 тысяч км и обеспечиваем возможность приема сигналов всеми ОА и СС на орбите планеты. В таких сеансах радиопросвечивания наземный приёмо-передающий комплекс будет обеспечивать излучение в режиме несущих (без модуляции) когерентных радиосигналов в направлении исследуемой планеты. Антенна ОА (или нескольких ОА), направленная на Землю, будет принимать эти когерентные сигналы, и они будут обрабатываться бортовым приемником, осуществляющим измерения мощностей и фаз принятых сигналов, а также спектров эхо-сигналов при бистатической радиолокации. Энергетический потенциал радиолинии при излучении с наземного пункта увеличится в десятки раз благодаря увеличению мощности излучения до десятков киловатт, что позволит измерять мощности, фазы и частоты радиосигналов на коротких интервалах времени (~ 0.01 с) при малом уровне инструментального шума. Результаты измерений бортового приемника можно сохранять в запоминающем устройстве и передавать на Землю по штатному каналу связи после окончания эксперимента.

Анализ методики проведения экспериментов радиопросвечивания на трассе *Земля→ОА* позволяет сформулировать следующие преимущества этой методики по сравнению с радиозатмениями на трассе связи *ОА→Земля* [7]:

1. Значительно уменьшается энергопотребление и вес бортовой аппаратуры, предназначенной для проведения радиофизических исследований. Вес бортового приемника не превышает 1 кг, а его энергопотребление не превышает 2 Вт.

2. Появляется возможность излучения высокостабильных сигналов с высокой степенью когерентности благодаря использованию квантового наземного генератора опорных сигналов, что существенно увеличит точность результатов радиофизических исследований.

3. Появляется возможность излучения наземной антенной сигналов высокой мощности (~ 20 кВт и более), что обеспечит очень высокое отношение сигнал/шум на входе бортового приемника (в ~ 10 и более раз выше, чем в эксперименте *ОА→Земля*), а это увеличит и точность, и пространственно-временное разрешение результатов радиофизических исследований.

4. При высоком потенциале радиолинии может быть исследована самая нижняя часть ионосферы Венеры, обнаруженная недавно. Ее влияние во многих экспериментах было незаметно из-за мешающего влияния инструментальных шумов.

5. Высокое пространственно-временное разрешение результатов радиопросвечивания обеспечит идентификацию стратифицированных периодических возмущений в системе *атмосфера-ионосфера*, т.е. откроет возможность изучения источников волновых процессов в газовых оболочках планет.

6. При высокой мощности сигналов вблизи ОА отсутствует необходимость использования бортовых приемных антенн большого диаметра, что существенно уменьшит вес и габариты бортового оборудования.

7. При использовании антенны малого диаметра ширина диаграммы ее направленности большая, поэтому отсутствует необходимость очень точной ориентации антенны, что экономит энергетический ресурс ОА.

8. Прием на борту сигналов высокой мощности при использовании антенны малого диаметра с широкой диаграммой направленности обеспечит радиопросвечивание атмосферы вплоть до уровня критической рефракции во всех экспериментах без коррекции ориентации бортовой антенны.

9. Широкая диаграмма направленности бортовой антенны позволит в каждом сеансе радиопросвечивания проводить бистатическую радиолокацию поверхности планеты (до настоящего времени проведено менее 30 таких экспериментов). Высокая мощность отраженного поверхностью сигнала является важным звеном для детального изучения структуры поверхности.

10. Проведение регулярной бистатической радиолокации предоставит уникальную возможность изучения атмосферы вблизи поверхности Венеры. Сведения о приповерхностной атмосфере Венеры до настоящего времени очень ограничены.

11. Излучение с Земли можно одновременно принимать несколькими спутниками, находящимися на орбите планеты, если они будут оборудованы соответствующими приемниками. Такая возможность обеспечит контрольные измерения вариаций параметров плазмы на трассе связи для их учета в эксперименте радиопросвечивания, что особенно важно при исследовании ночной ионосферы.

12. При определенных орбитах нескольких ОА или СС появится возможность радиопросвечивания одних и тех же или разных областей околопланетного пространства почти одновременно, что предоставит уникальную возможность анализа пространственно-временной структуры атмосферы и ионосферы.

13. Наличие на орбите планеты нескольких ОА и СС, оборудованных одинаковыми приемниками когерентных сигналов, позволит вести регулярный мониторинг ионосферы и атмосферы планеты, т.е. предоставит важные сведения для сравнительной планетологии.

14. Многоотрассовые измерения с помощью нескольких ОА вдали от газовой оболочки планеты предоставят возможность детально исследовать динамику межпланетной и околосолнечной плазмы.

15. Высокое отношение сигнал/шум в радиофизических экспериментах является важным условием для изучения вопросов распространения радиоволн через слоистые структуры, в частности, появится возможность получить экспериментальную оценку размеров области ионосферы и атмосферы, которая вносит главный вклад в вариации параметров радиоволн.

Заключение

Есть две возможности обеспечения высокого энергетического потенциала радиолинии в радиозатменных экспериментах. Одна из них предполагает установку на борту ОА антенны большого диаметра (больше 1 м) и передатчика с высокой мощностью излучения двух когерентных сигналов (больше 20 Вт). Вторая возможность – модернизация приема-передающего комплекса наземной и бортовой аппаратуры, которая позволит излучать когерентные сигналы с наземной антенны и принимать их штатными средствами на борту ОА. Для решения задач радиофизических исследований в проекте ВЕНЕРА-Д необходимо увеличить энергетический потенциал радиолинии до 50...60 дБГц, чтобы обеспечить высокую точность измерений частоты и ее производ-

ной, а также мощности когерентных сигналов, с разрешением по времени 0.01с. Только при высоком энергетическом потенциале радиолинии станет возможным получение высококачественной информации об атмосфере и ионосфере Венеры, а также о волновых процессах в системе *атмосфера-ионосфера*. Таким образом, применение радиолинии *Земля → ОА* позволит решить в проекте ВЕНЕРА-Д основные научные задачи радиозатменного эксперимента:

1. Получение данных о распределении электронной концентрации в интервале высот от ~80 км до ~1000 км как функции высоты, широты, местного времени и сезона.
2. Получение данных о температуре, плотности и давлении в атмосфере в интервале высот от ~35 км до ~100 км как функции высоты, широты, местного времени и сезона.
3. Изучение динамики многослойных структур в атмосфере и ионосфере Венеры, их связи с волновыми процессами, солнечной активностью и потоком солнечного ветра.
4. Выявление связей между процессами в ионосфере, термосфере и нижней атмосфере на дневной и ночной стороне Венеры.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ПРАН № 22 "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы".

Литература

1. Kliore A. et al. // Science. 1965. V. 149. № 3689. P. 1243-1250.
2. Rangaswamy S. // Geophys. Res. Letters. 1976. V. 3. N. 8. P. 483.
3. О.И. Яковлев, А.Г. Павельев, С.С. Матюгов. Спутниковый мониторинг Земли: радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М. Либроком. 2010. 208 с.
4. Y.Q.Sun et al. / The first Moscow Solar system symposium 1MS3. 2010. P. PS-41.
5. L.V. Zasova et al. Venus investigations after Venus Express: mission Venera-D / 11th Meeting of the Venus Exploration Analysis Group. Washington. November 19–21, 2013. 5.
6. Арманд Н.А. и др. // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 542-548.
7. Гаврик А.Л. и др. // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 3-3.
8. Brace L.H., Kliore A.J. // Space Science Reviews. 1991. V. 55. Jan.-Feb. P. 81-163.
9. Pätzold M. et al. // Nature. 2007. V. 450. P. 657-660.
10. Jenkins, J.M. et al. // Icarus. 1994. V. 110. P. 79-94.