

Диагностика слоистых структур в ионосфере Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания

А.Л. Гаврик, Ю.А. 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

Представлен метод диагностики многослойных структур в ионосфере Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания. Приведены экспериментальные данные о колебаниях электронной концентрации вблизи нижней границы дневной ионосферы Венеры.

A method for diagnostic of multilayered structures in the ionosphere of Venus according to the two-frequency radio sounding is presented. Experimental data on the oscillations of the electron density near the lower boundary of the daytime Venusian's ionosphere is given.

Радиопросвечивание ионосферы планеты осуществляется в тех случаях, когда излучающий сигналы космический аппарат (КА) заходит за диск планеты или выходит из-за него, а наземный пункт регистрирует измененные плазмой сигналы. Накопленный к настоящему времени объем экспериментальных данных радиопросвечивания Венеры сравнительно невелик (~900 сеансов), например, при исследовании Марса количество радиопросвечиваний превысило 6000, а для исследования околоземной оболочки ежедневно проводятся сотни радиопросвечиваний, и общее количество сеансов превысило 2 млн. Совершенствование методики анализа данных радиопросвечивания является актуальной задачей, т.к. предоставляет возможность извлечения новой информации из данных радиозатменных экспериментов завершающихся миссий.

Цель работы – показать на примере результатов радиопросвечивания ионосферы Венеры сигналами КА ВЕНЕРА-15,-16 высокую эффективность использования адиабатического инварианта при интерпретации данных радиозатменных экспериментов.

Методика радиопросвечивания

При радиозатмениях КА ВЕНЕРА-15,-16 когерентные радиоволны (длины волн $\lambda=32$ и 8 см) излучались бортовым передатчиком и принимались наземным комплексом [1-3]. Приемник регистрировал колебания радиополя $u_0(t)$, первоначально заданные вещественной функцией $\text{re}[u_0(t)]$, которые можно представить в комплексной форме, используя понятие аналитического сигнала, при этом амплитуда поля вводится как $|u_0(t)|$, а фаза как $\text{arg}[u_0(t)]$. При обработке колебаний радиополя из фазы гетеродинированием исключается компонента $\omega_0 t$, где t – время, ω_0 – частота излучаемой монохроматической радиоволны (в экспериментах в ω_0 вводится также поправка на доплеровское смещение из-за взаимного движения источника и приемника). Амплитуда колебаний определяется относительно уровня шума приемника. На выходе приемника формируются квадратурные компоненты сигнала $u(t)=A(t)\exp\{i\varphi(t)\}$, где $A(t)=|u(t)|$ и $\varphi(t)=\text{arg}[u(t)]$ это усредненные на интервале времени τ медленные вариации амплитуды и фазы радиополя, обусловленные распространением радиоволн в пространственно неоднородной среде. По квадратурным компонентам $u(t)$ определяются искомые функции мощности $P(t)=|u(t)|^2$ и фазы $\varphi(t)=\text{arg}[u(t)]$ зондирующего сигнала [1,4].

Девияция мощности $P(t)$ обусловлена деформацией лучевых трубок при рефракции, т.к. поглощение и рассеяние радиоволн в ионосфере Венеры не выявлено. Рефракционное изменение $X(t)=P(t)/P_0$ нормируется к уровню мощности P_0 , которая регистрировалась в отсутствии исследуемой ионосферы. Изменение фазы $\varphi(t)$ обусловлено де-

формацией поверхности волнового фронта радиополя из-за пространственных вариаций показателя преломления околопланетной среды $n(h)$, сквозь которую распространяются радиоволны (h – высота над поверхностью планеты). Квадратурные компоненты сигнала $u(t)$ позволяют определить лишь приращения фазы за время τ , эти приращения необходимо суммировать для нахождения функции $\varphi(t)$, что может приводить к накоплению погрешности при случайных сбоях аппаратуры. В экспериментах радиопросвечивания целесообразно использовать другую характеристику сигнала – мгновенную частоту $f(t) = (2\pi)^{-1} \cdot d\varphi(t)/dt$, которую получают делением приращения фазы за время τ на значение τ , т.к. при решении обратной задачи именно функция $f(t)$ связана интегральным соотношением с высотным профилем электронной концентрации $N(h)$ [1-5].

В сферически-симметричной ионосфере (не поглощающей радиоволны) рефракционное изменение мощности $X(t)$ и частоты $f(t)$ зондирующей радиоволны, обусловленные влиянием крупномасштабных стратифицированных слоев плазмы, в лучевом приближении связаны с углом $\xi(t)$ следующими известными соотношениями [4,6]:

$$\xi(p) = -\frac{pe^2}{\pi m f_0^2} \int_p^{h_i} \frac{dN(r)}{dr} \frac{dr}{\sqrt{r^2 - p^2}}, \quad (1)$$

$$p(t) = R_0 + h_r(t) + L \cdot \xi(t), \quad (2)$$

$$f(t) = \lambda^{-1} \cdot V \xi(t), \quad (3)$$

$$X(t) = 1 + [L \cdot V^{-1}] \cdot d\xi(t)/dt, \quad (4)$$

$$X_f(t) = 1 + [\lambda \cdot L \cdot V^{-2}] \cdot df(t)/dt, \quad (5)$$

где R_0 – радиус планеты,

L – расстояние от КА до перицентра линии прямой видимости КА,

$V = dh/dt$ – вертикальная компонента скорости захода или выхода КА, f_0 и λ – частота и длина волны излучения,

$p(t)$ – прицельный параметр радиолуча,

$h_r(t)$ – прицельный параметр прямой линии передатчик-приемник,

$N(h)$ – высотный профиль электронной концентрации,

h_i – верхняя граница ионосферы,

e, m – заряд и масса электрона,

$X_f(t)$ – рефракционное изменение мощности сигнала, определяемое из функции $f(t)$.

Погрешность формул (1)-(5) при решении задачи зондирования сферически-симметричной среды не превышает искажений, возникающих из-за шума в данных радиозатменных экспериментов, если выполняются условия $\lambda < 35$ см, $L < 10^4$ км, $|\xi(t)| < 10^{-3}$, $|n(h) - 1| < 10^{-4}$ [4,6]. В этом случае решение обратной задачи радиопросвечивания в лучевом приближении с использованием преобразования Абеля для соотношения (1) позволяет определить $N(h)$ [6]. Однако вблизи нижней границы ионосферы использование преобразования Абеля приводит к недостоверной информации об электронной концентрации [6], следовательно, необходим новый метод для оценки концентрации электронов в нижней ионосфере Венеры.

Соотношение (5) запишем в виде:

$$P(t) - P_0 = (P_0 \cdot \lambda \cdot L \cdot V^{-2}) \cdot df(t)/dt. \quad (6)$$

Измерения осуществляются в процессе движения КА по орбите, поэтому в заданной точке пространства принимается сигнал с ограниченной энергией, поступившей в приемник за время τ . Энергия пакета длительностью τ является основной величиной,

определяющей реакцию приемника на сигнал. Интегрируя (6), приходим к следующему соотношению:

$$\Delta W(t) = K \cdot \Delta f_{\text{ap}}(t), \quad (7)$$

где $K = (P_0 \cdot \tau \cdot \lambda \cdot L \cdot V^2) = \text{const}$, $\Delta f_{\text{ap}}(t) = f(t+\tau) - f(t)$, $\Delta W(t) = \int_t^{t+\tau} [P(t) - P_0] dt$.

Равенство (7) справедливо, если за время τ изменения функций $P(t)$ и $f(t)$ не нарушают лучевого приближения. Соотношение (7) показывает, что вариации энергии регистрируемого сигнала, обусловленные сжатием или расширением попавших в апертуру антенны лучевых пучков, взаимосвязаны со смещением частоты регистрируемого сигнала, обусловленным деформацией фазового фронта поля. Представленные аналитические соотношения (1)-(7) при всей их простоте и кажущейся очевидности больше 40 лет оставались незамеченными при интерпретации радиозатменных данных.

Соотношение (7) установило линейную связь между изменениями энергии и частоты при просвечивании сферически-симметричной газовой оболочки планеты гармоническим сигналом, коэффициент K зависит от зондирующей системы. Комбинации динамических переменных зондирующей системы, которые остаются постоянными при медленном изменении ее параметров являются адиабатическими инвариантами [7]:

$$\Delta W(t)/\Delta f_{\text{ap}}(t) = \text{const}. \quad (8)$$

Для непоглощающей среды сохранение адиабатического инварианта при распространении радиоволны означает, по сути, квантово-механическое условие сохранения числа квантов в перемещающемся вместе с волной элементе объема волнового пакета, что хорошо согласуется с геометрическим приближением решения уравнений Максвелла [8]. Полученные результаты справедливы, если распространение энергии в лучевых трубках независимое и между трубками нет обмена энергией. Сближение КА с окрестностью каустики может нарушить лучевое приближение и тогда придется обращаться к дифракционным уравнениям, описывающим все детали волновой структуры.

Таким образом, мы показали, что адиабатический инвариант как некоторый эвристический принцип выявляет существование связей между явлениями, взаимосвязь между которыми неочевидна. Установленный адиабатический инвариант радиозатменного эксперимента определяет причинно-следственную связь корреляционного анализа двух разных компонент сигнала (рефракционных изменений мощности и частоты) при зондировании системы *атмосфера-ионосфера*, что открывает перспективы получения новой, более точной, информации в радиозатменных экспериментах.

Результаты радиозатменного эксперимента

Использование адиабатического инварианта предоставляет возможность обнаружения волновых явлений в системе *атмосфера-ионосфера*. Действительно, периодические вариации плотности стратифицированной атмосферы и ионосферы влияют на радиальный профиль $n(h)$ и, следовательно, будут наблюдаться колебания параметров сигнала в процессе зондирования. На рис. 1 (кривая 5) наблюдается периодическое чередование максимумов и минимумов мощности сигнала $X(h)$ и в атмосфере ниже 85 км, и в ионосфере выше 85 км. Для выделения влияния ионосферы на вариации $X(h)$ можно использовать метод дисперсионного интерферометра [1], который позволяет определить по интерференции двух когерентных сигналов изменение частоты радиоволны $f(t)$, обусловленное только влиянием плазмы. По этой частоте $f(t)$ из соотношения (5) получим

прогнозируемое рефракционное изменение $X_f(h)$ в ионизованной среде (кривая 4), корреляция $X_f(h)$ с $X(h)$ однозначно укажет на наличие ионизованных слоев.

Корреляция $X_f(h)$ с $X(h)$ появляется выше 85 км (кривые 4,5), амплитуда вариаций $X_f(h)$ и $X(h)$ совпадает, что свидетельствует о влиянии плазмы. Различие между функциями $X_f(h)$ и $X(h)$ уменьшается с ростом высоты h , т.к. уменьшается рефракционное ослабление сигнала в нейтральной атмосфере, влияющее на величину $X(h)$. Амплитуда колебаний $X_f(h)$ увеличилась в ~ 3 раза при перемещении радиолуча от нижней границы ионосферы (85 км) вверх на ~ 30 км. Периодические вариации $X_f(h)$ с вертикальным масштабом 5...6 км и закономерное увеличение амплитуды колебаний $X_f(h)$ при уменьшении на три порядка плотности атмосферы могут быть признаком вертикального волнового возмущения в ионосфере. Регистрация такого события – заметный шаг в исследовании эффекта осцилляций электронной концентрации в ионосферах планет.

Обнаружение ионизованных слоев стимулировало построение модели распределения электронной концентрации в нижней ионосфере Венеры. При решении прямой задачи радиопросвечивания предполагалась сферическая симметрия ионосферы, нижняя граница ионосферы 80 км, высота ионопаузы 350 км. Если задать модель среды табличной функцией, то разрывы производных показателя преломления среды могут привести к ложным эффектам и, следовательно, к большим ошибкам определения $N(h)$. Специфических вычислительных сложностей не возникает, когда распределение параметров плазмы задано аналитической функцией. Поэтому в качестве вертикального профиля концентрации электронов $N^*(h)$ использовали аналитическую аппроксимацию профиля $N(h)$, полученного по вариациям частоты сигнала $\lambda=32$ см в эксперименте радиопросвечивания 25.10.1983 г. (кривая 1) [9]. Профиль $N^*(h)$ задавался суммой бесконечно дифференцируемых функций, позволяющих сформировать слоистую структуру ионосферы Венеры, параметры которой адекватны экспериментальным данным:

$$N^*(h) = \sum_{i=1}^{10} N_i \cdot \exp\left(\frac{1}{2}\left(1 - \frac{h-h_i}{H_i} - e^{-\frac{h-h_i}{H_i}}\right)\right) \quad (9)$$

Использование аналитической дифференцируемой функции $N^*(h)$ при моделировании радиопросвечивания уменьшает влияние случайных флуктуаций градиента электронной концентрации на точность определения параметров зондирующего сигнала. Сравнение рефракционного ослабления мощности $X_m(h)$ (кривая 3), вычисленного в лучевом приближении для профиля $N^*(h)$ (кривая 2), с экспериментальной функцией $X_f(h)$ (кривая 4), полученной из соотношения (5) на основе данных о частоте сигнала $f(h)$ КА ВЕНЕРА-15, позволяет подобрать параметры N_j , h_j , H_j , при которых $X_m(h)$ (кривая 3) согласуется с $X_f(h)$ (кривая 4) в нижней ионосфере (80...120 км).

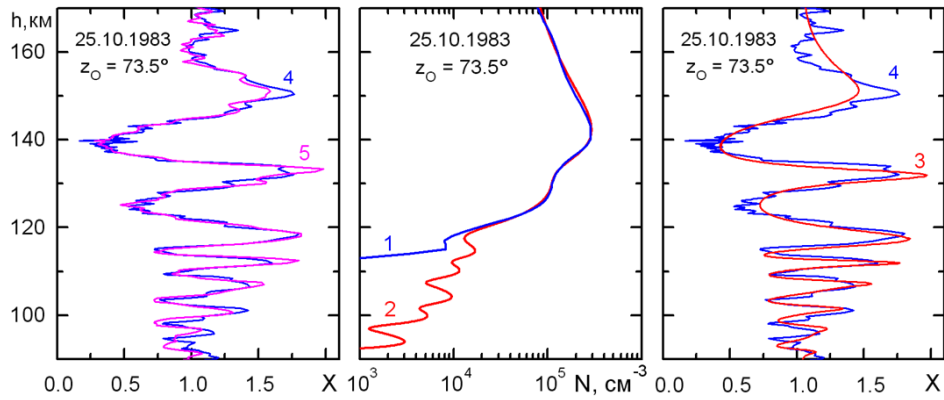


Рис. 1. Профиль $N(h)$ (кривая 1), полученный из преобразования Абеля и профиль $N^*(h)$ (кривая 2), соответствующий экспериментальным данным: кривая 3 – результаты расчетов $X_m(h)$ в лучевом приближении по профилю $N^*(h)$, кривая 4 - экспериментальная функция $X_f(h)$, рассчитанная на основе соотношения (5), кривая 5 - экспериментальная функция $X(h)$ рефракционного изменения мощности сигнала $\lambda=32$ см эксперименте радиопросвечивания ионосферы Венеры 25.10.1983 г.

Представленное на рис. 1 (кривая 2) распределение электронной концентрации в нижней части ионосферы невозможно найти традиционной методикой решения обратной задачи радиопросвечивания [1-5]. Нижняя граница профиля $N(h)$ (кривая 1), полученного с использованием преобразования Абеля и соотношений (1-4), находится на высоте 112 км, в то время как профиль $N^*(h)$ (кривая 2) демонстрирует наличие нижних ионизированных слоев. Указанием на существование таких слоев является корреляция (~ 0.9) между функциями $X(h)$ (кривая 5) и $X_f(h)$ (кривая 4), а также корреляция (~ 0.8) между результатами расчетов функции $X_m(h)$ в лучевом приближении (кривая 3) и экспериментальной функцией $X_f(h)$ (кривая 4) [6].

Заключение

Показано, что высокое соотношение между исследуемыми радиофизическими эффектами и инструментальными шумами в радиозатменных экспериментах с КА ВЕНЕРА-15,-16, а также разработанные методы и критерии для выделения влияния плазмы на фоне влияния атмосферы и шума, позволили изучить периодические колебания электронной концентрации вблизи нижней границы ионосферы Венеры. В основу метода диагностики слоистых структур положены принцип адиабатической инвариантности и свойство дисперсии радиоволн; критерием обнаружения слоев является наличие линейной связи между изменениями энергии и частоты зондирующего сигнала; отсутствие интегральных преобразований обеспечивает высокую чувствительность метода к малым вариациям показателя преломления ионосферы. По данным экспериментов радиопросвечивания газовой оболочки Венеры сигналами космических аппаратов обнаружены вблизи нижней границы дневной ионосферы периодические возмущения плотности среды, уровень которых превышает случайные вариации. Периодические колебания электронной концентрации с характерным масштабом 5 км по вертикали наблюдались в интервале высот 90...115 км на освещенной стороне Венеры.

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

Литература

1. Савич Н.А., Андреев В.Е. и др. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 11. С. 2113.
2. Савич Н.А., Андреев В.Е. и др. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 3. С. 433-439.
3. Савич Н.А., Андреев В.Е. и др. // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 3. С. 448-454.
4. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А. и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 277-284.
5. Яковлев О.И. Распространение радиоволн в космосе. М.: Наука.1985.
6. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф. // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 1-18.
7. А.С. Бакай, Ю.Т. Степановский. Адиабатические инварианты.Киев: Наукова думка. 1981.
8. Ю.А Кравцов, Ю.И. Орлов. Геометрическая оптика неоднородных сред. М: Наука. 1980.
9. A. L. Gavriketal. // NASAPlanetaryData System, 2010. <http://ppi.pds.nasa.gov/>