

УДК 621.371.36.029.63.

ФЛУКТУАЦИИ ЧАСТОТЫ И ФАЗЫ РАДИОВОЛН В ДВУХ РАЗНЕСЕННЫХ ПУНКТАХ ПРИ ПРОСВЕЧИВАНИИ ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ И СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

*О. И. Яковлев, А. И. Ефимов, В. П. Якубов, О. М. Корсак,
А. С. Кафтонов, А. Л. Ерофеев, С. Н. Рубцов*

Изучены флуктуации частоты и фазы дециметровых радиоволн аппаратов «Венера-15, 16» в период захода их за Солнце и выхода из-за Солнца (май—июль 1984 г.). По результатам одновременной регистрации радиосигналов двух аппаратов в двух разнесенных по долготе пунктах определены времена запаздываний флуктуационных эффектов на одной трассе распространения радиоволн по сравнению с другой. Определены на этой основе скорость движения неоднородностей и ее пространственные вариации. Полученные данные сопоставлены со скоростями движения мелко-масштабных неоднородностей, найденных при анализе амплитудных флуктуаций радиоволн.

1. Использование разнесенных наблюдений расширило возможности радиоастрономических методов изучения межпланетной и около-солнечной плазмы [1]. Однако подобные исследования с использованием естественных источников излучения дают сведения лишь о мелко-масштабной части спектра неоднородностей солнечного ветра. Применение монохроматических источников излучения, устанавливаемых на космических аппаратах, позволяет исследовать фазовые и частотные вариации, которые проявляют корреляцию на значительно больших расстояниях, чем амплитудные флуктуации [2]. Поэтому анализ вариаций фаз и частот, регистрируемых в нескольких разнесенных пунктах, дает возможность изучать неоднородности существенно большие, чем в радиоастрономических экспериментах, если соответствующим образом выбрать расстояние между пунктами [2-4].

Первые эксперименты по разнесенному приему сигналов космических аппаратов в двух наземных пунктах были осуществлены в 1976 г. при помощи аппарата «Венера-10» [5] и в 1978 году при полете аппаратов «Викинг» [6]. Они позволили получить информацию о неоднородной структуре околосолнечной плазмы. Однако количество полученных данных о свойствах неоднородностей в близкой к Солнцу области остается ограниченным.

Целью настоящей статьи является анализ флуктуаций частоты и фазы радиоволн в двух разнесенных пунктах при просвечивании околосолнечной плазмы и определение на этой основе скорости солнечного ветра и структуры его неоднородностей.

2. Экспериментальные исследования флуктуаций частоты и фазы при разнесенном приеме проводились в период с мая по июнь 1984 г. с использованием космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» на длине волны $\lambda = 32$ см. Геометрия эксперимента приведена на рис. 1. Космические аппараты (A1 и A2) двигались по орбите вокруг Венеры. Земля и Венера располагались по разные стороны от Солнца, центр которого обозначен 0, так что линия радиосвязи проходила через область околосолнечной плазмы. Регистрация сигналов проводилась

в пунктах дальней космической связи (П1 и П2), разнесенных по длине на расстояние около 7 тысяч километров. Прицельное расстояние ρ — минимальное расстояние от радиотрассы до Солнца — изменялось в пределах (4—22,5) R_{\odot} , где R_{\odot} — радиус Солнца. С мая до середины июня наблюдался заход аппаратов за Солнце, а затем до середины июля — выход.

Исходные данные представляли собой усредненные за одну секунду отсчеты частоты. Временная привязка осуществлялась с помощью Службы единого времени и ошибка не превышала $5 \cdot 10^{-6}$ секунд. Длительность сеансов изменялась в пределах 15—40 минут. Всего по схеме разнесенного приема было проведено 25 сеансов, из них в трех сеансах проводилась одновременная регистрация сигналов двух аппаратов.

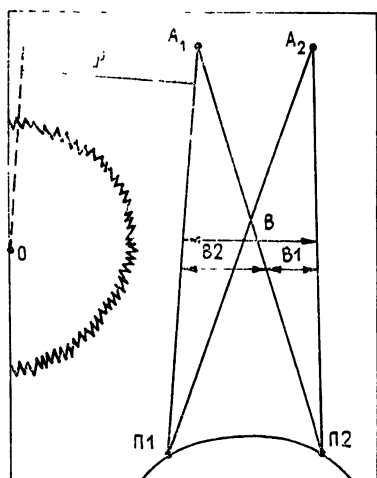


Рис. 1. Геометрия эксперимента.

Зарегистрированные временные зависимости флуктуаций частоты являлись исходными для нахождения корреляционной связи между измерениями в разнесенных пунктах П1 и П2. Предварительно с помощью метода наименьших квадратов исключался регулярный ход частоты радиосигнала, связанный с движением аппаратов и пунктов приема, который на временном отрезке в 5 минут аппроксимировался полиномом второй степени. Коэффициенты полинома находились с помощью сингулярного разложения [7].

Для построения нормированных кросс-корреляционных функций флуктуаций частоты и фазы использовалась модифицированная кратковременная корреляционная функция

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y (N-1)} \sum_{m=0}^{N-1} x(n+m)y(n+m+k), \quad (1)$$

где σ_x и σ_y — стандартные отклонения временных рядов $x(n)$ и $y(n)$. Усреднение осуществляется по всем отсчетам, включая отсчеты вне интервала от n до $n+N-1$, что позволяет с большей достоверностью определять максимумы корреляционной функции при больших задержках k [8].

Для нахождения отклонений фазы от среднего значения в момент времени t_i использовалось соотношение

$$\Delta S(t_i) = 2\pi \sum_{j=1}^i \Delta F(t_j), \quad (2)$$

где $\Delta F(t_j)$ — отсчет флуктуаций частоты в момент времени t_j .

3. Как показано в [9], флуктуации частоты и фазы радиоволн при просвечивании околосолнечной плазмы связаны с пространственно неоднородной структурой солнечного ветра. За счет неоднородности атмосферы Солнца и его вращения происходит перемешивание быстрых и медленных потоков солнечного ветра [10]. Наличие постоянной радиальной составляющей скорости солнечного ветра приводит к переносу неоднородностей. В результате возникает корреляция флуктуаций на пространственно разнесенных лучевых линиях и наблюдается временной сдвиг τ максимума кросс-корреляционной функции. На рис. 2 приведен в качестве примера вид корреляционной функции для прицельного расстояния $\rho = 18 R_{\odot}$ при усреднении отсчетов частоты за 1 се-

кунду (а), за 5 секунд (б) и корреляционная функция фазы (в). Максимум корреляционной функции фазы выражен наиболее ясно, что согласуется с результатами, полученными с помощью аппарата «Венера-10» [5]. В ряде случаев, особенно при малых гелиоцентрических расстояниях, максимумы корреляционных функций частоты и фазы не совпадают, что свидетельствует о различной скорости переноса мелко-масштабных и крупномасштабных неоднородностей.

Использование скользящего среднего равносильно применению низкочастотного фильтра [11], что позволяет выявить действие пространственного переноса неоднородностей промежуточных масштабов. Из сопоставления рис. 2 а и 2 б следует, что корреляционные связи неоднородностей с меньшими масштабами выражены слабее, что может быть связано как с меньшим характерным временем их жизни, так и большим влиянием случайной компоненты скорости по сравнению с неоднородностями более крупных масштабов.

При приближении радиотрассы к Солнцу в корреляционной картине возникает ряд соизмеримых максимумов, среди которых положение центрального максимума выделяется лишь устойчивостью его положения для различных отрезков реализации процесса. На участках захода и выхода временной сдвиг τ имеет разные знаки.

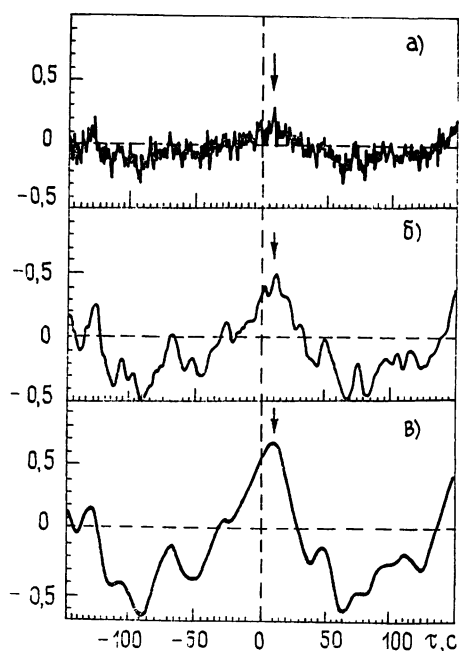


Рис. 2.

Рис. 2. Кросс-корреляционные функции флуктуаций частоты и фазы: а — частота с усреднением за 1 с; б — частота с усреднением за 5 с; в — фаза.

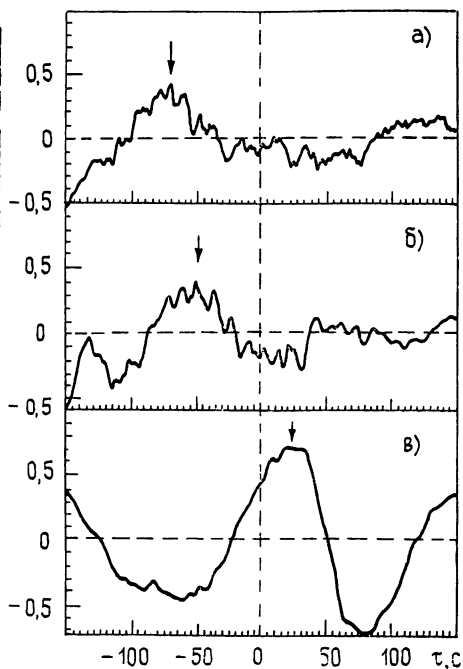


Рис. 3.

Рис. 3. Кросс-корреляционные функции флуктуаций частоты при одновременной регистрации сигналов двух аппаратов.

4. Интересным для исследования оказывается случай одновременной регистрации сигналов двух аппаратов в обоих наземных пунктах приема. Наличие нескольких базовых разностей — B_1, B_2 (рис. 1) — в области прохождения радиотрасс вблизи Солнца дает возможность проанализировать устойчивость неоднородностей при их переносе и на этой основе проверить справедливость концепции замороженной турбулентности в окосолнечном пространстве. Пример корреляции таких записей частоты для $\rho = 4 R_{\odot}$ представлен на рис. 3 (а — излучение «Венеры-15» принимается в одном пункте, «Венеры-16» — в другом; б — «Венера-16», прием в обоих пунктах; в — «Венера-15» и «Венера-16», прием в одном пункте). Соответствующие временные сдвиги $\tau_a = -67$ с,

$\tau_6 = -50$ с, $\tau_7 = 24$ с. Ожидаемая взаимосвязь $\tau_7 = \tau_6 - \tau_a$ выполняется с точностью до 7 секунд. Для прицельного расстояния $\rho = 18 R_\odot$ соотношение для временных сдвигов корреляционных функций флуктуаций частоты выполняется с точностью до 4 с при временном сдвиге 18 с. Для фазовых данных погрешность уменьшается до 4 с ($\rho = 4 R_\odot$) и 1 с ($\rho = 18 R_\odot$). Это свидетельствует о меньшей пространственно-временной устойчивости мелкомасштабных неоднородностей околосолнечной плазмы по сравнению с устойчивостью крупномасштабных неоднородностей

5. В пользу последнего говорит также зависимость максимума корреляции K_{\max} от прицельного расстояния ρ (рис. 4; здесь и на рис. 5, 6 R_0 — радиус Солнца). Как показано ранее [12], по мере приближения луча к Солнцу растет интенсивность неоднородностей плазмы и, как следствие, увеличивается дисперсия флуктуаций частоты и фазы. При высокой скорости переноса неоднородностей это приводит к усилению роли корреляционной составляющей спектра флуктуаций, что вызывает рост максимума корреляционной функции. При дальнейшем приближении к Солнцу возрастает мелкомасштабная часть неоднородностей. Их пространственный масштаб мал, следовательно, уменьшается и мера корреляционной связи флуктуаций. Одновременно растет случайная составляющая скорости движения неоднородностей, что приводит к увеличению разброса максимума корреляции для различных отрезков реализации частотных данных. Пределы вариации K_{\max} отмечены на рис. 4 вертикальными черточками.

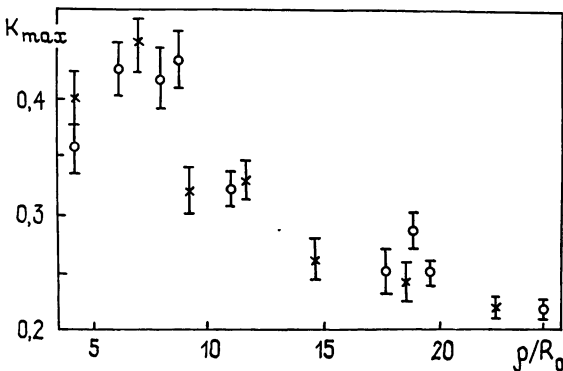


Рис. 4 Зависимость максимума кросс-корреляционной функции от прицельного расстояния (крестики — фаза захода аппаратов за Солнце; кружки — выход).

6. Временной сдвиг τ центрального максимума корреляционной функции может быть соотнесен (в рамках гипотезы замороженной турбулентности) с радиальной скоростью солнечного ветра

$$v = B/\tau, \quad (3)$$

где B — расстояние между лучевыми линиями в месте их наибольшего приближения к Солнцу. Определенная таким образом скорость солнечного ветра изменяется от 20 км/с до 400 км/с на расстояниях $R = (4 \div 22) R_\odot$, что согласуется с данными, полученными аналогично ранее с помощью аппарата «Венера-10» [5].

7. Сопоставим наши данные частотных измерений скорости солнечного ветра с результатами, полученными по временным спектрам флуктуаций амплитуды радиоволн [13]. Флуктуации амплитуды радиоволн дециметрового и сантиметрового диапазонов регистрировались в тех же сеансах, что и флуктуации частоты во время эксперимента радиопросвечивания. По временным спектрам флуктуаций амплитуды

в [13] находились значения характерной частоты F_{\odot} перегиба спектральной плотности и определялась скорость v солнечного ветра. Зависимость v от гелиоцентрического расстояния R/R_{\odot} , полученная во время приближения радиолуча к Солнцу, представлена на рис. 5, а v , найденная при удалении радиолуча от Солнца, — на рис. 6. Значения скорости, найденной по флуктуациям амплитуды, показаны кружками. Значения v , определенные по разнесенным наблюдениям флуктуаций частоты, показаны квадратиками. Из рисунка следует, что в области приближения радиолуча к Солнцу наблюдается совпадение v , определенной по амплитудным и частотным данным при $R > 8 R_{\odot}$. В области удаления радиолуча от Солнца такое согласие наблюдается при $R > 10 R_{\odot}$. При $R < 10 R_{\odot}$ скорость, найденная по частотным данным разнесенного приема, ниже, чем v из амплитудных измерений. Наиболее резкое увеличение скорости солнечного ветра с возрастанием R в обеих областях околосолнечного пространства происходит в диапазоне $R = (10 \div 25) R_{\odot}$, как это следует из данных, полученных обоими методами. Штриховыми линиями, построенными по методу наименьших квадратов, показано среднее регулярное изменение скорости солнечного ветра в зависимости от гелиоцентрического расстояния.

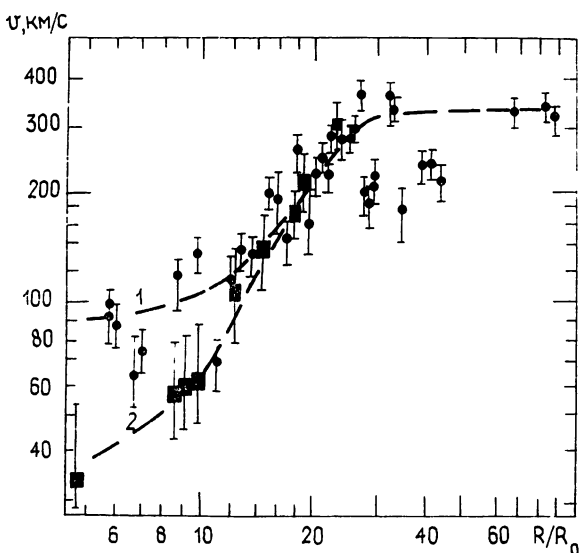


Рис. 5. Зависимость скорости солнечного ветра от гелиоцентрического расстояния на участке приближения радиотрассы к Солнцу (кружки — по амплитудным данным; квадраты — по частотным измерениям).

Известно, что амплитудные данные характеризуют движение мелкомасштабных неоднородностей плазмы, а частотные данные относятся к крупномасштабным флуктуациям плотности плазмы. Скорость крупномасштабных неоднородностей близка к средней скорости движения потоков масс. По сравнению с крупномасштабными образованиями мелкомасштабные неоднородности сильнее подвержены влиянию случайных перемещений среды, поэтому их результирующая скорость может быть завышенной.

8. Проведенные исследования флуктуаций частоты и фазы радиоволн при просвечивании околосолнечной плазмы в схеме разнесенного приема с помощью аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» позволили установить, что на пространственно-разнесенных лучевых линиях наблюдается корреляция флуктуаций частоты и фазы с временным сдвигом максимума кросс-корреляционной функции. Этот сдвиг имеет разные знаки на участках захода и выхода и возрастает по абсолютной

величине с уменьшением прицельного расстояния. Максимум корреляционной функции растет с уменьшением прицельного расстояния до (6—8) R_{\odot} .

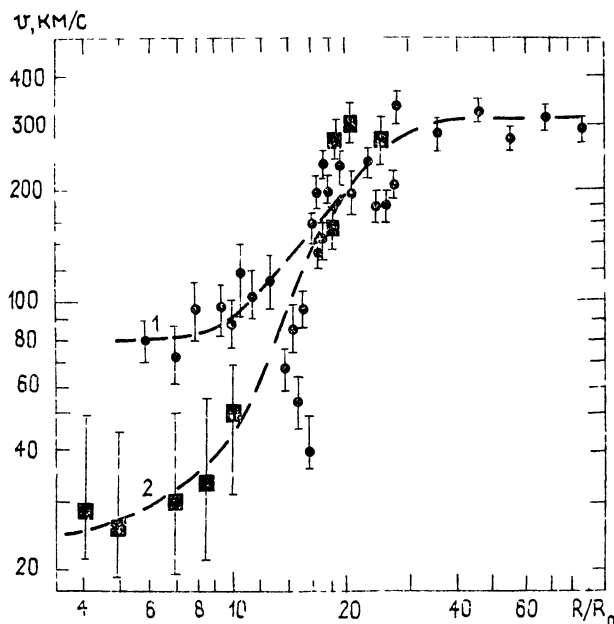


Рис. 6. Зависимость скорости солнечного ветра от гелиоцентрического расстояния на участке удаления радиотрассы от Солнца (кружки — по амплитудным данным; квадраты — по частотным измерениям).

При малых гелиоцентрических расстояниях возникает ряд соизмеримых максимумов, среди которых положение центрального выделяется лишь устойчивостью его положения в течение длительности всего сеанса, при этом максимумы корреляционных функций частоты и фазы не совпадают, что свидетельствует о более сильном влиянии случайной компоненты скорости движения потоков на мелкомасштабные неоднородности.

Эксперименты с одновременной регистрацией сигналов двух аппаратов в обоих пунктах позволили показать хорошую степень соответствия модели замороженной турбулентности для околосолнечной плазмы в области расстояний $R = 20 R_{\odot}$ и удовлетворительную в области $R = 5 R_{\odot}$. Для крупномасштабных неоднородностей околосолнечной плазмы степень соответствия выше.

Полученные по результатам корреляционной обработки значения скорости солнечного ветра составляют от 20 км/с до 400 км/с на расстояниях $R = (4 \div 22) R_{\odot}$, что согласуется с данными экспериментов с помощью аппарата «Венера-10». Из сопоставления с данными о скорости солнечного ветра, определенными по временным спектрам флуктуаций амплитуды, следует, что значения v совпадают для $R > (8 \div 10) R_{\odot}$, а при меньших расстояниях скорость, найденная по частотным данным разнесенного приема, ниже, чем из амплитудных измерений. Отличие скоростей, найденных различными методами, может быть объяснено в области $R < 8 R_{\odot}$ нарушением гипотезы «вмороженности» неоднородностей. Поэтому результаты частотных измерений (квадраты на рис. 5 и 6) дают более достоверные сведения о скорости перемещения неоднородностей в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

2. Woo R. // Nature. 1977. V. 266. P. 514.
3. Ефимов А. И., Яковлев О. И., Разманов В. М., Штрыков В. К. // Письма в Астрон. журн. 1977. Т. 3. № 7. С. 323.
4. Яковлев О. И. Распространение радиоволн в космосе. — М.: Наука, 1985.
5. Ефимов А. И., Яковлев О. И., Штрыков В. К. и др. // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26. № 2. С. 311.
6. Armstrong J. W., Woo R., Estabrook F. B. // Astrophys. J. 1979. V. 230. № 2. P. 570.
7. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. — М.: Мир, 1980. С. 210.
8. Рабинер Л. Р., Шафер Р. В. Цифровая обработка речевых сигналов. — М.: Радио и связь, 1981. С. 139.
9. Арманд Н. А., Ефимов А. И. // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29. № 9. С. 1649.
10. Gosling J. T. Magnetospheric Phenom. Astrophys. Workshop, Los Alamos, 1984, № 4; 1986, P. 124.
11. Кендэл М. Временные ряды. — М.: Финансы и статистика. 1981. — 199 с.
12. Колосов М. А., Яковлев О. И., Ефимов А. И. и др. // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23. № 9. С. 1829.
13. Яковлев О. И., Ефимов А. И., Рубцов С. Н. // Космические исследования. 1987. Т. 25. № 2. С. 251.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР,
Сибирский физико-технический институт
при Томском университете

Поступила в редакцию
18 августа 1987 г.

FREQUENCY AND PHASE FLUCTUATIONS OF THE RADIO WAVES IN TWO SEPARATED RECEIVERS DURING OCCULTATION PLASMA NEAR THE SUN AND THE SOLAR WIND SPEED

*O. I. Yakovlev, A. I. Efimov, V. P. Yakubov, O. M. Korsak,
A. S. Kaftonov, A. L. Erofeev, S. N. Rubtsov*

Frequency and phase fluctuation of decimeter radio waves of Venera 15, 16 are investigated (May—June 1984). The delay time of fluctuation effects on different ray paths are determined by simultaneous registration of two spacecrafts signals at two earth stations. The speed of irregularities and their space variations are obtained from this data. Experimental data are compared with the speed of small-scale irregularities obtained from amplitude fluctuations.
