

Сравнение спектров флуктуаций угла линейно - поляризованной радиоволны из-за Фарадеевского вращения, прошедшей через корону, со спектрами флуктуаций магнитного поля в межпланетном пространстве

В.Е. Андреев

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: v.e.andreev@gmail.com

Показано, что спектры флуктуаций угла вращения линейно-поляризованной радиоволны, проходящей на прицельных расстояниях $< 13 R_s$, из-за эффекта Фарадея имеют трёхдиапазонную зависимость.

Основной характер зависимости флуктуаций FR от времени, проявившийся на спектральных частотах флуктуаций FR в полосе частот $(6 \cdot 10^{-5} - 3.7 \cdot 10^{-3})$ Гц, определяется больше флуктуациями магнитного поля вблизи Солнца, чем модуляцией флуктуаций FR неоднородностями плазмы

Частота излома спектральной кривой имеет тенденцию смещаться в сторону высоких частот по мере приближения радиотрассы к Солнцу.

It is shown that the fluctuation spectra of the angle of Faraday rotation of linearly polarized radio waves passing on the distances $< 13 R_s$ have a three-range dependence.

The main character of the dependence of the FR fluctuations in the spectral frequency range $(6 \times 10^{-5} - 3.7 \times 10^{-3})$ Hz of FR fluctuations is determined more by the fluctuations of the magnetic field near the Sun than modulation of the FR fluctuations of the interplanetary plasma.

The frequency of fracture of the spectral curve tends to shift towards high frequencies as radio line sighting distances closer to the Sun.

Спектральный анализ флуктуаций угла вращения линейно-поляризованной радиоволны ($\lambda \approx 13$ см) из-за эффекта Фарадея (флуктуации FR) во время зондирования короны Солнца с КА Helios представлены во многих работах [1-4]. Спектральный анализ проводился чаще всего в диапазоне спектральных частот (10^{-3} - 0.5) Гц. В результате, например, было получено, что спектры состоят из двух частотных полос. В первом диапазоне от 10^{-3} до 0.02 Гц спектры хорошо аппроксимируются степенной функцией с показателем α близким к $5/3$ (Колмогоровский спектр). Во втором диапазоне (0.02 – 0.5) Гц спектр близок к спектру белого шума.

Опубликованные в работе [5] спектр мощности флуктуаций межпланетного магнитного поля на 1 а.е. и спектры мощности флуктуаций магнитного поля в зависимости от расстояния до Солнца, полученные из прямых измерений аппаратами Ulysses и Helios 2 (прямые измерения параметров магнитного поля на расстоянии 0.3 а.е.), вызвали интерес и желание заново проанализировать результаты зондирования околосолнечного пространства поляризованными сигналами КА Helios 2. Для этого были взяты данные, полученные в январе 1983 г. во время захода за Солнце и выхода из-за него КА Helios 2.

Целью данной работы является выявление новых особенностей в спектрах мощности флуктуаций угла вращения линейно-поляризованных радиоволн из-за эффекта Фарадея.

Методика

В первую очередь были выбраны результаты сеансов радиозондирования с длительностью около 10^4 секунд. Фоновая зависимость изменения $\Psi(t)$, которая

возникает из-за влияния параллельной трассе распространения радиоволн компоненты глобального магнитного поля Солнца совместно с плотностью плазмы околосолнечного пространства на поляризованное радиоизлучение, удалены из данных полиномом третьей степени – $\text{Pol}_3(t)$, проведенным по всем данным сеанса, методом наименьших квадратов (МНК). Тем самым получены флуктуации $\text{FR} = (\Psi(t) - \text{Pol}_3(t))$. Массив этих данных дополнялся нулями для получения спектров мощности флуктуаций FR размером 2^{15} (что соответствует диапазону спектральных частот до $(3.05 \cdot 10^{-5} - 0.5)$ Гц; измерения были сохранены с темпом в 1 Гц), что позволяет получить интерполированное преобразование Фурье более сглаженной формы. Кроме того, дополнение нулями устраняет возможные неопределённости и повышается точность оценивания спектральных пиков [6,7]. Правильность нормировки спектров мощности флуктуаций FR проверялась сравнением дисперсии, полученной из спектра, с дисперсией, оцененной как центральный момент второго порядка.

В итоге получены спектры в диапазоне спектральных частот $(6 \cdot 10^{-5} - 0.2)$ Гц (потенциальный диапазон сужен из-за краевых эффектов как на низких, так и на высоких частотах).

Следующим шагом стало оценивание границ полос частот, где аппроксимирующая функция меняет показатель. Для этого использованы разностные операторы, описанные в работе [8]. Для этого пусть $\Delta\Psi_n = \Psi_{n+1} - \Psi_n$, а повторные применения этого оператора обозначены так: $\Delta^k\Psi_n$, где k – количество повторов, n – номер значения Ψ в массиве данных.

После каждого применения данного оператора, результат его действия подвергается Фурье преобразованию. Тем самым получается картина, например, такая, что изображена на рисунке 1.

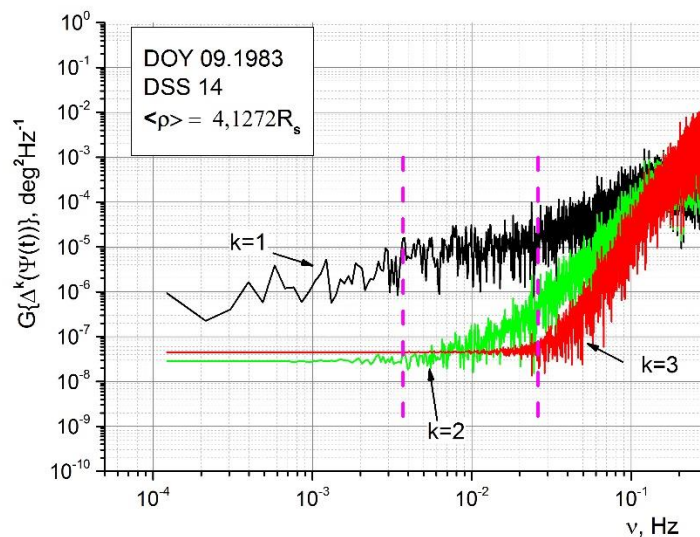


Рис.1. Спектры мощности $G\{\Delta^k\Psi(t)\}$ для сеанса 9 января 1983 при $k=1, 2, 3$. (Наземный приёмный пункт Goldstone – DSS14).

Вертикальными пунктирными линиями показаны границы полос спектральных частот, где происходит смена показателя аппроксимирующей функции частотной зависимости мощности флуктуаций FR .

После оценки границ полос определяется показатель аппроксимирующей функции на этих полосах спектральных частот. Полагается, что на каждой полосе аппроксимирующая функция будет иметь степенную зависимость (в логарифмическом

масштабе по осям). В этом случае по частотным зависимостям спектра мощности флуктуаций FR на каждой полосе частот оценивается линейная функция регрессии методом МНК - $Y_v(\nu)$. Затем определяется доверительный интервал для полученной функции регрессии, по методике, изложенной в [9].

Результаты

Сначала посмотрим на спектры, полученные для разных приёмных пунктов, когда трасса радиосвязи пролегла далеко от Солнца. Они представлены на рисунке 2. Видно, что спектры флуктуаций FR похожи на спектр белого шума. Средняя мощность, полученная по трём спектрам, на рисунке показана штрих пунктирной линией (равна $\sim 7 \cdot 10^{-5}$ град²/Гц), $\langle \rho \rangle$ – среднее прицельное расстояние от Солнца до трассы радиосвязи за сеанс (в радиусах солнца – R_s). Скорость приближения радиотрассы к Солнцу из-за геометрии полёта КА Helios была достаточно большая (больше 30 км/с).

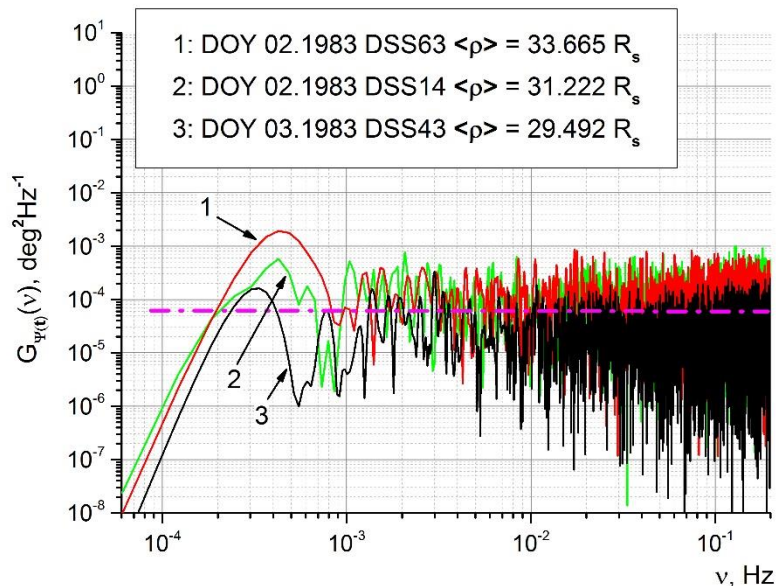


Рис. 2. Спектры мощности флуктуаций FR вдали от Солнца. (DSS14 – Goldstone, DSS43 – Canberra, DSS63 – Madrid). Здесь и далее $\langle \rho \rangle$ – средние за сеанс прицельные расстояния от Солнца до трассы радиосвязи (R_s – радиус Солнца) приведены на рисунке.

На рисунках 3 – 5 кроме спектральных зависимостей показаны и аппроксимирующие их линейные функции сплошными прямыми линиями (зелёные линии) - $\sim \nu^{-a_1}$ или $\sim \nu^{-a_2}$ - на каждой выбранной полосе спектральных частот. Пунктирными линиями (красного цвета) отмечены доверительные интервалы, которые с заданной надёжностью (доверительной вероятностью) $\gamma = 0.9$ накрывают аппроксимирующую прямую:

$$Y_v - t_{\gamma,k} \cdot s_Y \leq M_v(Y) \leq Y_v + t_{\gamma,k} \cdot s_Y,$$

где $M_v(Y)$ – условное математическое ожидание,

s_Y^2 – дисперсия на полосе проведения аппроксимирующей прямой,

значение $t_{\gamma,k}$ – критерия Стьюдента выбирается из статистической таблицы для заданной вероятности γ в [9].

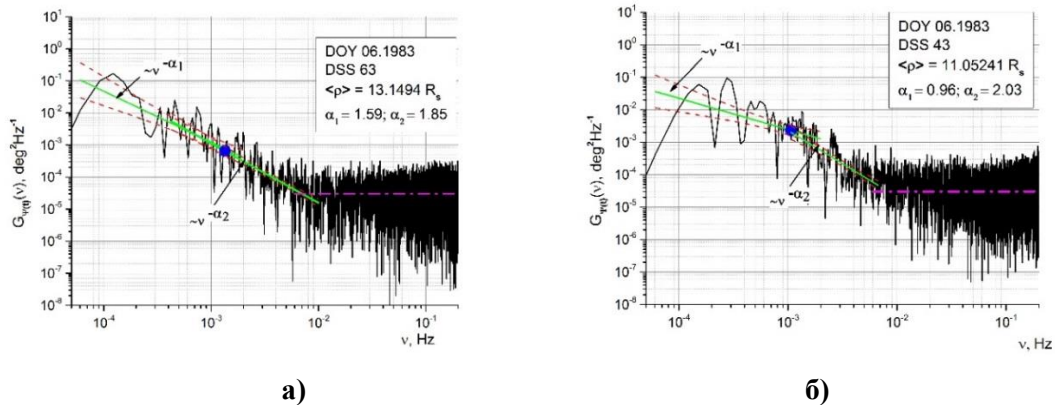


Рис. 3. Спектры мощности флуктуаций FR на средних прицельных расстояниях:
 а) $\langle \rho \rangle \sim 13.14 R_s$, б) $\langle \rho \rangle \sim 11.05 R_s$.

Средний уровень мощности шума на всех рисунках, как и на рисунке 2, отмечен штрих-пунктирной горизонтальной линией. Сплошным синим кружочком отмечена точка смены показателя степени аппроксимирующих прямых.

Спектры, показанные на рисунках 2 – 4 получены для данных, когда КА Helios 2 заходил за Солнце, а спектры на рисунке 5 – для данных, когда КА Helios 2 выходил из-за Солнца.

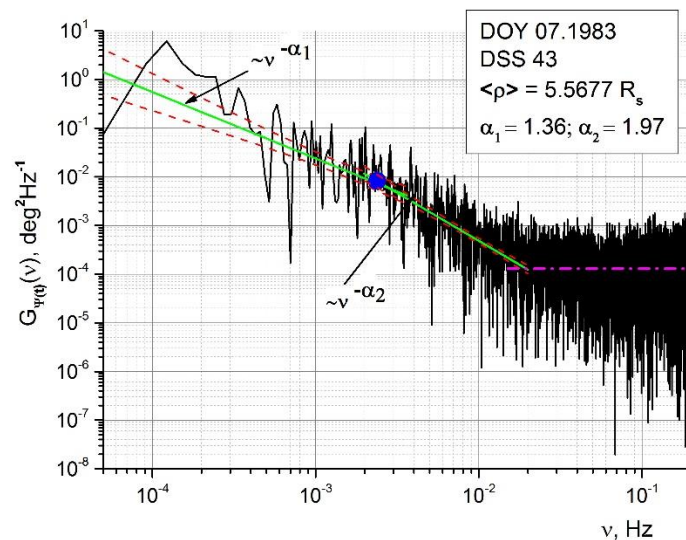


Рис. 4. Спектр мощности флуктуаций FR на среднем прицельном расстоянии $\langle \rho \rangle \sim 5.57 R_s$,

Приведённые на рисунке 5 спектры мощности флуктуаций FR на среднем прицельном расстоянии $\langle \rho \rangle \sim -4.12 R_s$, получены по данным одновременных измерений флуктуаций FR на двух пунктах (DSS14 и DSS43)

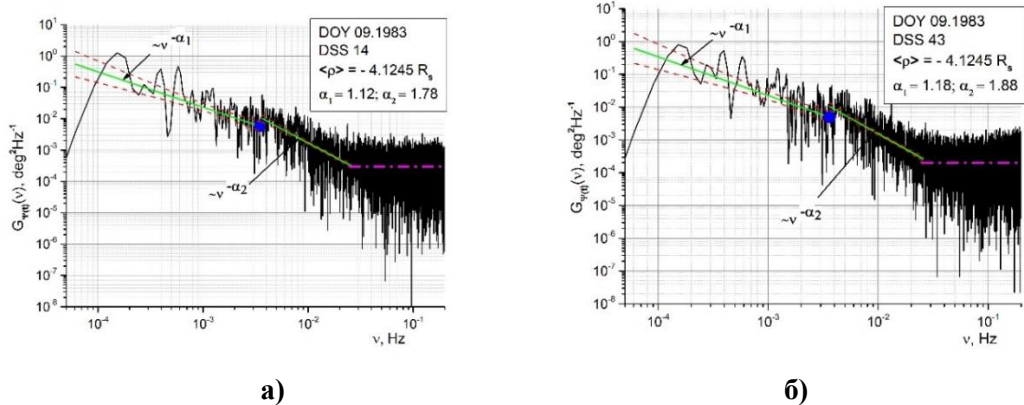


Рис. 5. Спектры мощности флуктуаций FR на среднем прицельном расстоянии $\langle \rho \rangle \sim -4 R_s$, полученные по данным одновременных измерений флуктуаций FR на двух пунктах а) DSS14 и б) DSS43. Радиотрасса удаляется от Солнца.

Обсуждение

На рисунке 6 приведены спектры плотности мощности флуктуаций магнитного поля, взятые из работы [5]. На левой панели имеются спектры, полученные Helios 2 между 0.3 и 1 а.е во время первой миссии к Солнцу в 1976 году и Ulysses между 1.4 и 4.8 а.е. во время эллиптической фазы. Наблюдения Ulysses на 4.8 а.е. относятся к концу 1991 года, а наблюдения, сделанные на 1.4 а.е. относятся к концу августа 2007 года. На правой панели показаны спектры в медленном ветре, у которых спектральный индекс не показывает никакой радиальную зависимость. Излом спектральной кривой, ясно присутствующий в быстром ветре и маркированный голубой точкой, смещается к более низкой частоте по мере того как гелиоцентрическое расстояние увеличивается.

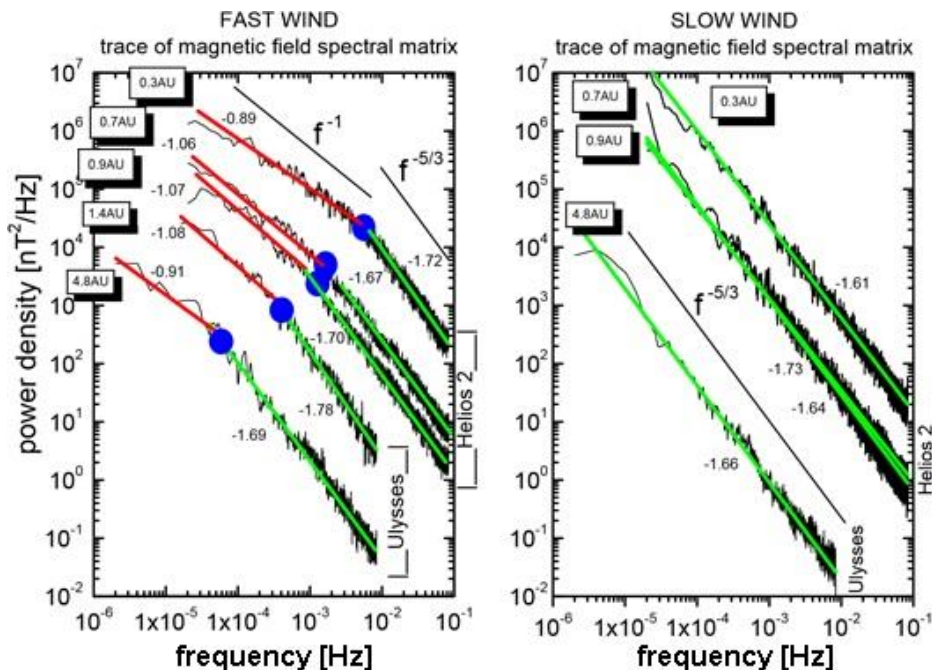


Рис. 6. Спектры флуктуаций магнитного поля в межпланетном пространстве, полученные КА Helios 2 и Ulysses. Левая панель – измерения проведенные при наличии быстрого солнечного ветра, на правой панели – измерения в период медленного солнечного ветра. Рисунок взят из работы [5].

К сожалению, прямых измерений флуктуаций магнитного поля ближе 0.3 а.е. (около $64.5 R_s$) не существует. В нашем случае радиоволны зондировали пространство на более близких к Солнцу прицельных расстояниях.

Известно (см., например, [10]), корональные магнитные поля оказывают наибольшее влияние на распространение поляризованного радиоизлучения на близких к Солнцу прицельных расстояниях (при малых углах элонгации). Так как флуктуации FR являются результатом интеграла вдоль трассы распространения радиоволн от произведения флуктуаций электронной плотности плазмы на флуктуации компоненты магнитного поля, параллельной радиотрассе, то в результате Фурье преобразования получается свёртка спектров флуктуаций плазмы и флуктуаций магнитного поля. Получение модельных спектров не является предметом данной работы.

Анализ данных флуктуаций угла линейно поляризованной радиоволны (длина волны ~ 13 см) из-за фарадеевского вращения показал, что спектр мощности флуктуаций FR для $\rho \leq 12 R_s$ имеет три частотные полосы: причём, в полосе частот ($6 \cdot 10^{-5} - 3.7 \cdot 10^{-3}$) Гц спектр можно аппроксимировать степенной функцией с показателем α_1 близкой к 1; в полосе частот ($3.7 \cdot 10^{-3} - 2.6 \cdot 10^{-2}$) Гц спектр также близок к степенной функции с показателем α_2 близкой к 2; а в полосе частот ($2.6 \cdot 10^{-2} - 0.2$) Гц спектр имеет показатель близкий к $\alpha_3 \approx 0$ (спектры двух последних частотных полос практически совпадают со спектрами в ранее проведенных работах по тем же данным). Результаты сведены в таблицу.

Таблица

$\langle \rho \rangle, R_s$	α_1	α_2	$\nu_{\text{граничная}}, \text{Гц}$	уровень шума, $\text{град}^2/\text{Гц}$
>30	0	0	-	$\sim 7.8 \cdot 10^{-5}$
13.15	1.59	1.85	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$\sim 3 \cdot 10^{-5}$
11.05	0.96	2.03	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$\sim 3 \cdot 10^{-5}$
5.56	1.36	1.97	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$
-4.12	1.12	1.78	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
-4.12	1.18	1.88	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$

Из таблицы следует, что частота излома спектральной кривой $\nu_{\text{граничная}}$ имеет тенденцию смещаться в сторону высоких частот по мере приближения радиотрассы к Солнцу. Эта тенденция совпадает с тенденцией, полученной в работе [5] для спектров флуктуаций магнитного поля (см. рис. 6), что явно указывает на заметное влияние флуктуаций магнитного поля на флуктуации FR, которые могут появиться, например, из-за появления быстрых потоков, таких как корональные выбросы массы.

Заключение

Показано, что спектры флуктуаций угла вращения линейно поляризованной радиоволны, проходящей на прицельных расстояниях $< 13 R_s$, из-за эффекта Фарадея имеют трёхдиапазонную зависимость.

Основной характер зависимости флуктуаций FR от времени, проявившийся на спектральных частотах флуктуаций FR в полосе частот ($6 \cdot 10^{-5} - 3.7 \cdot 10^{-3}$) Гц, определяется больше флуктуациями магнитного поля вблизи Солнца, чем модуляцией флуктуаций FR неоднородностями плазмы

Частота излома спектральной кривой имеет тенденцию смещаться в сторону высоких частот по мере приближения радиотрассы к Солнцу.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Фундаментальных исследований президиума РАН "Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике"

Литература

1. Andreev V.E. et al. // Solar. Phys. 1997. V. **176**. P. 387.
2. Bird M.K. // Astrnom. & Astrophys. Transac. 2007. V. **26**. V.6. P. 441.
3. Efimov A.I. et al. // Solar. Phys. 2015. V. **290**. P. 3.
4. Ефимов А.И. и др. // Письма в АЖ. 2000. Т.26. №8. С.630-640
5. Bruno R., Carbone V. // Living Rev. Solar Phys. 2013. V.10. 2. 208 P.
6. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ. «Мир». Москва. 1990. С. 584
7. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. «Мир». Москва. 1982. С. 390
8. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. Изд. «Недра». Москва. 1987. С. 221
9. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. Юнити. Москва. 2002. С.544
10. Смирнова Т.В., Чашей И.В., Шишов В.И. // АЖ. 2009. Т.86. №3. С.283-294