

Первые результаты дисперсионного анализа межпланетных мерцаний в декаметровом диапазоне длин волн

И. С. Фалькович, А. А. Коноваленко, Н. Н. Калиниченко, М. Р. Оляк,
А. А. Гридин, И. Н. Бубнов, А. И. Браженко¹, А. Лекашо², Х. О. Рукер³

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: falk@ira.kharkov.ua, akonov@ira.kharkov.ua, kalinich@ira.kharkov.ua*

*¹Полтавская гравиметрическая обсерватория
Института геофизики им. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36029, Украина
E-mail: vrsl@mail.ru*

*²Париж-Мейдон обсерватория,
Париж, CNRS UMR 8644, Франция*

*³Институт космических исследований,
Шмиделитрассе, 6, Грац, 8042, Австрия*

Статья поступила в редакцию 13 июля 2007 г.

В статье обсуждаются возможности метода дисперсионного анализа наблюдаемых в двух пунктах (УТР-2, УРАН-2) межпланетных мерцаний. Совместный анализ частотной зависимости скорости гармоник кросс-спектра мерцаний и их энергетических спектров позволяет определить основные параметры межпланетной плазмы на луче зрения. При использовании модели слоистой среды могут быть оценены толщины слоев, их плотности, а также скорость, показатель пространственного спектра и внутренний масштаб турбулентности.

Введение

Изучение солнечного ветра – одна из важных задач низкочастотной радиоастрономии и проекта LOFAR [1]. Мощным инструментом исследования межпланетной среды является метод мерцаний космических радиостанций [2]. Эксперименты на метровых и более коротких волнах дали много новых данных о структуре и динамике межпланетной плазмы во внутренней гелиосфере [3-5]. Декаметровый диапазон использовался менее активно, хотя именно он позволяет исследовать

внешнюю гелиосферу на больших расстояниях от Солнца [6, 7]. Внешняя гелиосфера изучалась с помощью космических аппаратов, однако дальних космических миссий за прошедшие годы было немного.

Трудности проведения наблюдений в декаметровом диапазоне связаны с высоким уровнем радиовещательных помех и ионосферными искажениями принимаемого сигнала. Влияние этих негативных факторов можно значительно ослабить, применяя современные широкополосные приемники и цифровые анализаторы спектра DSP. Широкая

полоса частот регистрации (более 14 МГц) позволяет при обработке исключать помехи и отделять межпланетные мерцания от ионосферных. Признаком разделения двух типов мерцаний является разная ширина спектров мерцаний и разный интервал их частотной корреляции [8]. Эффективная полоса частот, используемая для обработки, может превышать 10 МГц. Это позволяет реализовать высокую чувствительность измерений и увеличить количество наблюдаемых источников с разными гелиоцентрическими координатами.

Первое использование метода мерцаний базировалось на анализе их энергетических спектров при наблюдениях на одном радиотелескопе. Модельные представления о структуре среды позволили оценить параметры как медленного, так и быстрого солнечного ветра. Дальнейший прогресс в этой области связан с применением методов дисперсионного и томографического анализов. Методы основаны на одновременных наблюдениях мерцаний в пространственно разнесенных точках. Томографический анализ позволяет наиболее полно реконструировать форму и динамику транзитных образований и, прежде всего, выбросов корональных масс [9]. Этот метод наименее зависим от модели среды, но требует большого числа просвечивающих радиоисточников. В декаметровом диапазоне это требование трудно выполнить из-за высокого уровня галактического фона, который ограничивает чувствительность наблюдений и соответственно количество доступных радиоисточников.

Ниже обсуждаются возможности метода дисперсионного анализа [10] синхронно наблюдаемых в двух пунктах на декаметровых волнах межпланетных мерцаний. Совместный анализ дисперсии фазовой скорости мерцаний и их энергетических спектров позволяет точнее определить основные параметры межпланетной плазмы на луче зрения. При использовании модели слоистой среды могут быть оценены толщины слоев, их плотности, а также скорость, показатель пространственного спектра и внутренний масштаб турбулентности.

Особенности дисперсионного анализа в декаметровом диапазоне волн

Межпланетные мерцания наблюдаются в декаметровом диапазоне при элонгациях, превышающих 80° . Это позволяет исследовать солнечный ветер внешней гелиосферы на больших удалениях от Солнца. Анализ энергетических спектров мерцаний не всегда дает возможность сделать правильный выбор модели среды на луче зрения, если имеются несколько потоков с разными параметрами. Метод дисперсионного анализа фазовой скорости мерцаний позволяет уточнить модель среды. Этот метод основан на изучении зависимости скорости гармоник кросс-спектра мерцаний от частоты при наблюдениях на двух разнесенных антеннах.

Представим функцию мерцаний $\Delta I_{1,2}(t)$ в виде разложения в интеграл Фурье:

$$\begin{aligned} \Delta I_{1,2}(t) &= \int P_{1,2}(\Omega) \exp(-i\Omega t) d\Omega, \\ P_{1,2}(\Omega) &= \frac{1}{2\pi} \int \Delta I_{1,2}(t) \exp(i\Omega t) dt = \\ &= |P_{1,2}(\Omega)| \exp[i\varphi_{1,2}(\Omega)], \end{aligned}$$

где $\Omega = 2\pi f$.

Кросс-корреляционная функция мерцаний $B(r, \tau)$ равна

$$\begin{aligned} B(r, \tau) &= \langle \Delta I_1(0, t) \Delta I_2(r, t + \tau) \rangle = \\ &= \int W(\Omega) \exp(-i\omega\tau) d\Omega, \end{aligned}$$

а ее кросс-спектр

$$W(\Omega) = |P_1(\Omega)| |P_2(\Omega)| \exp[i(\varphi_1(\Omega) - \varphi_2(\Omega))]. \quad (1)$$

Можно показать [10], что скорость гармоник $V(\Omega)$ кросс-спектра (1) равна

$$V(\Omega) = \frac{\Omega r}{\Delta\varphi(\Omega)}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi(\Omega) = \varphi_1(\Omega) - \varphi_2(\Omega)$, r – расстояние между приемными антеннами (база интерферометра). Из последнего выражения следует, что для получения дисперсионной зависимости $V(\Omega)$ необходимо знать зависимость от частоты сдвига фаз между пунктами наблюдения:

$$\Delta\varphi(\Omega) = \text{arctg} \frac{\text{Im}W(\Omega)}{\text{Re}W(\Omega)}. \quad (3)$$

В декаметровом диапазоне рассеивающий слой является существенно протяженным, а наиболее плотный слой плазмы расположен вблизи наблюдателя. В связи с этим при выполнении расчетов использовался метод Фейнмановских интегралов по траекториям, с помощью которого в работе [11] получено выражение для кросс-спектра мерцаний:

$$W(r, f) \approx \pi^2 \frac{L\omega_p^4}{c^2\omega^2} \int_0^1 \frac{d\zeta}{\zeta^{1/2}} \int_A \kappa_{\perp} d\kappa_{\perp} \times \\ \times [1 - \cos(\kappa_{\perp}^2 L\zeta/k)] \frac{\Phi_N(\kappa_{\perp}, 0)}{[\kappa_{\perp}^2 V_{\perp}^2(\zeta) - 4\pi^2 f^2]^{1/2}} \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2}(\kappa_{\perp} L\zeta\theta)^2 + i \frac{2\pi fr}{V_{\perp}(\zeta)}\right]. \quad (4)$$

Здесь $f = \frac{\Omega}{2\pi}$, $\kappa_{\perp} = \{\kappa_x, \kappa_y\}$ – пространственный волновой вектор, $\zeta = (1 - z/L)$, $V_{\perp}(\zeta) = \frac{V \sin \varepsilon}{R/R_0}$, $R = [R_0^2 + L^2 \zeta^2 - 2R_0 L \zeta \cos \varepsilon]^{1/2}$, $R_0 = 1$ а. е., ε – элонгация, L – толщина слоя, θ – угловой размер источника, ω_p – плазменная частота, $A = 2\pi f/V_{\perp}(\zeta)$. Пространственный спектр неоднородностей электронной концентрации $\Phi_N(\kappa_{\perp}, 0)$ предполагаем степенным:

$$\Phi_N(\kappa_{\perp}, 0) \propto \sigma_N^2(\zeta) \exp(-\kappa_{\perp}^2 L_0^2) L_0^{3-n} \kappa_{\perp}^{-n},$$

где $\sigma_N^2(\zeta)$ – дисперсия относительных флуктуаций электронной концентрации вдоль луча зрения, l_0 и L_0 – внутренний и внешний масштабы турбулентности, n – показатель степени спектра неоднородностей электронной концентрации.

На высоких частотах при малых элонгациях рассеивающий слой является тонким. На рис. 1 показана дисперсионная зависимость, рассчитанная с использованием выражений (2)–(4) для длины волны 0.75 м и сферически симметричного солнечного ветра со скоростью 450 км/с, элонгацией 20° и при размере источника $0.1''$. Как видно из рисунка, зависимость $V(\Omega)$ выражена слабо вследствие малой толщины эффективно рассеивающего слоя межпланетной плазмы и использованной односкоростной модели солнечного ветра.

В декаметровом диапазоне при элонгациях, больших 80° , ответственный за мерцания слой может достигать 9 а. е. Наклон дисперсионной зависимости $V(\Omega)$ определяется разбросом скоростей, параметрами турбулентности и разной шириной потоков солнечного ветра. На рис. 2 приведены дисперсионные зависимости $V(\Omega)$ для использованной выше модели солнечного ветра при длинах волн 3, 6 и 12 м (кривые 1, 2 и 3), соответствующих

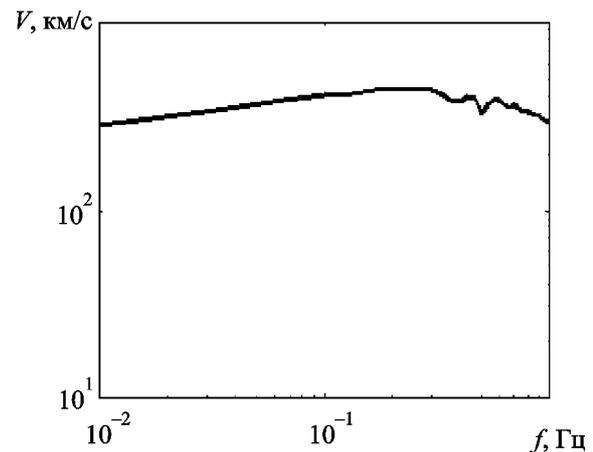


Рис. 1. Дисперсионная зависимость фазовой скорости мерцаний на длине волны 0.75 м при $\varepsilon = 20^\circ$ и $\theta = 0.1''$

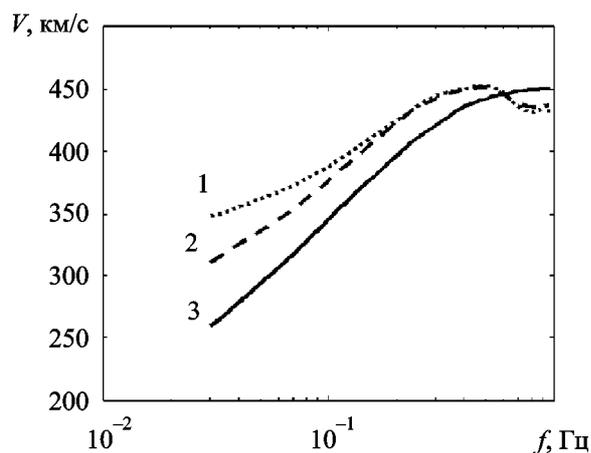


Рис. 2. Дисперсионные зависимости фазовой скорости мерцаний для разных элонгаций и длин волн: кривая 1 – $\epsilon = 45^\circ$, $\lambda = 3$ м, $\theta = 0.2''$; кривая 2 – $\epsilon = 60^\circ$, $\lambda = 6$ м, $\theta = 0.5''$; кривая 3 – $\epsilon = 90^\circ$, $\lambda = 12$ м, $\theta = 1.5''$

элонгациях $45, 60, 90^\circ$ и угловых размерах источников $0.2, 0.5, 1.5''$. По мере приближения длины волны к декаметровому диапазону увеличивается наклон и размах дисперсионных кривых. Это связано как с увеличением толщины слоя, ответственного за мерцания, так и с изменением вдоль луча зрения проекции скорости солнечного ветра $V_{\perp}(\zeta)$. Очевидно, что чем больше наклон дисперсионной кривой, тем точнее результат восстановления параметров среды при совмещении экспериментальной и теоретической зависимостей $V(\Omega)$.

Совместный анализ спектра мерцаний и дисперсионной зависимости позволяет существенно уточнить модель солнечного ветра. На рис. 3, 4 приведены результаты расчета этих функций для длины волны 12 м и базы 153 км. Кривые 1 соответствуют сферически-симметричному солнечному ветру, кривые 2 – двухпоточковой модели с разными скоростями. Видно, что спектры мерцаний почти совпадают, а дисперсионные зависимости заметно отличаются.

Приведенные примеры расчетов, таким образом, показывают, что метод дисперсионного анализа позволяет определить параметры потоков солнечного ветра с разными скоростями во внешней гелиосфере.

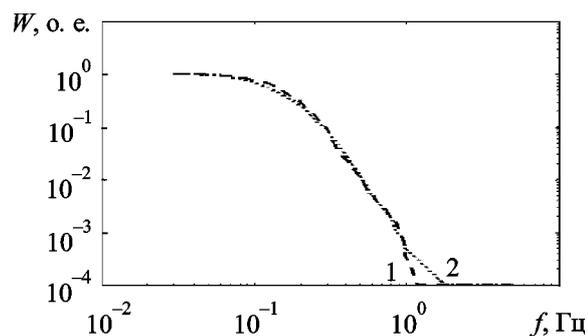


Рис. 3. Энергетические спектры мерцаний для сферически симметричного солнечного ветра при $\epsilon = 90^\circ$, $V = 500$ км/с (кривая 1) и для двухскоростной модели при $V_1 = 350$ км/с, $V_2 = 500$ км/с (кривая 2)

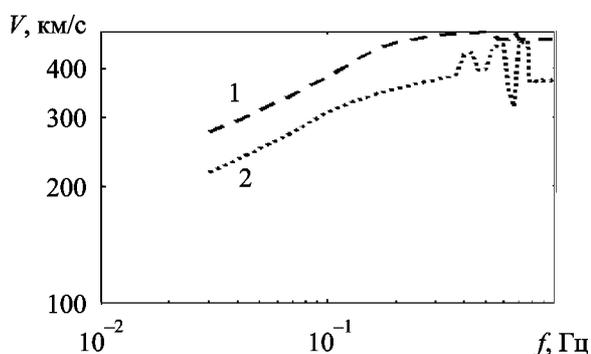


Рис. 4. Дисперсионные зависимости фазовой скорости мерцаний для сферически симметричного солнечного ветра (кривая 1) и для двухпоточковой модели (кривая 2) при тех же значениях параметров, что и на рис. 3

Результаты экспериментов с использованием интерферометра УРАН-2

Интерферометр УРАН-2 НАН Украины с базой 153 км состоит из антенных решеток УТР-2 (пос. Граково Харьковской обл.) и УРАН-2 (с. Степановка Полтавской обл.), работающих в диапазоне частот $9 \div 32$ МГц [12, 13]. Эффективные площади антенн 150 000 и 28 000 м², ширина лучей 0.5 и 3.5° на частоте 25 МГц. В экспериментах были исполь-

зованы широкополосный (общая полоса анализа 3 МГц) трехканальный радиометрический приемник [8] в обсерватории УТР-2 и сверхширокополосный (общая полоса анализа 12 МГц) шестнадцатиканальный корреляционный радиометр [14] в обсерватории УРАН-2. Несмотря на меньшую эффективную площадь антенны УРАН-2, флуктуационная чувствительность двух радиотелескопов в наших экспериментах оказалась соизмеримой за счет применения более широкополосного радиометра в пункте УРАН-2. На рис. 5 показан образец синхронной регистрации межпланетных мерцаний радиосточника 3С196, имеющего плотность потока около 300 Ян. Постоянная времени регистрации – 0.1 с.

На рис. 6, 7 приведены два примера восстановления параметров солнечного ветра на луче зрения, полученные с интервалом в 10 дней в октябре 2006 г. В первом примере наблюдался источник 3С144, расположенный в плоскости эклиптики. Во втором – источник 3С196, имеющий гелиошироту около 30°. В первом примере среда на луче зрения в плоскости эклиптики хорошо описывается моделью медленного сферически симметричного солнечного ветра. В случае более высокоширотного источника используется трехслойная модель с высокими скоростями. Это хорошо согласуется с общепринятыми представле-

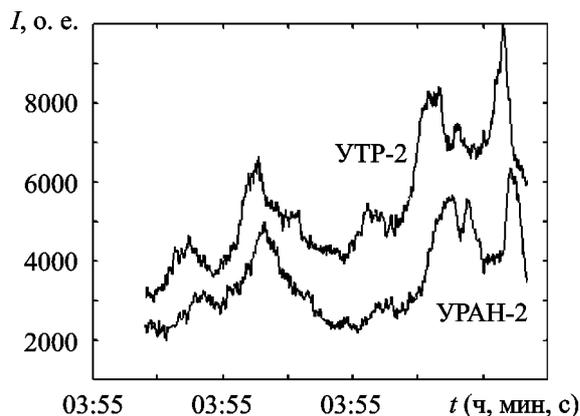


Рис. 5. Образец синхронной регистрации межпланетных мерцаний

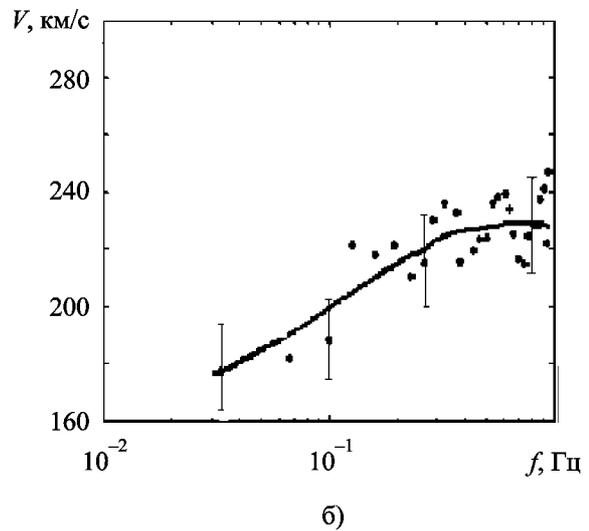
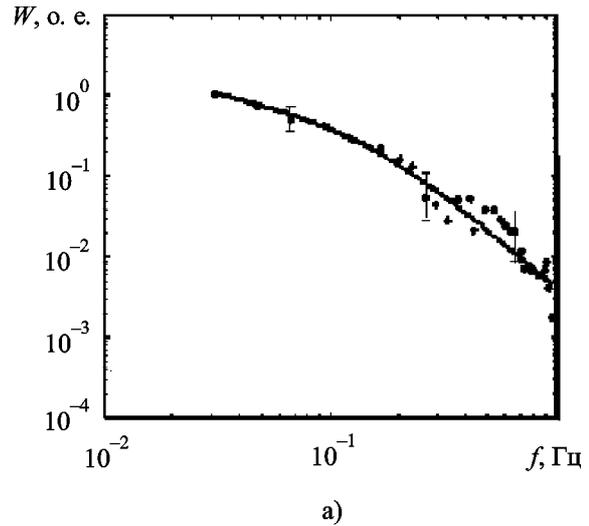


Рис. 6. Спектры мерцаний (а) и дисперсионные зависимости (б) для радиосточника 3С144, полученные в октябре 2006 г. (точками обозначены экспериментальные кривые, сплошными линиями – результат расчета). Восстановленные с их помощью параметры солнечного ветра: $n = 3.0$, $V = 230$ км/с (модель сферически симметричного солнечного ветра)

ниями о соотношении скоростей в области солнечного экватора и в высоких гелиоширотах в годы минимума солнечной активности [8]. Рис. 8 схематически иллюстрирует картину солнечного ветра на луче зрения на источник 3С196.

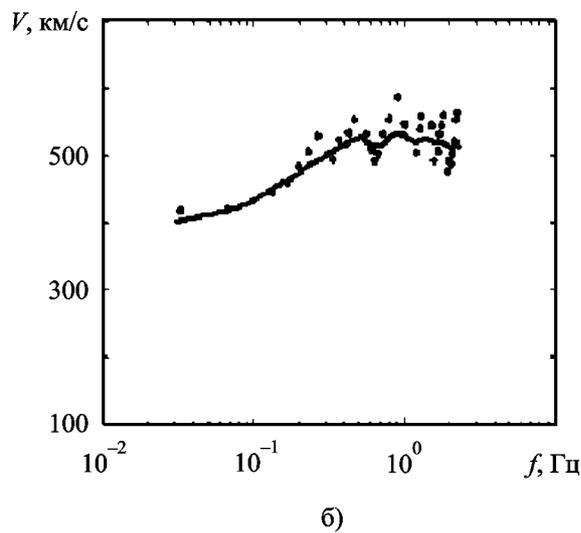
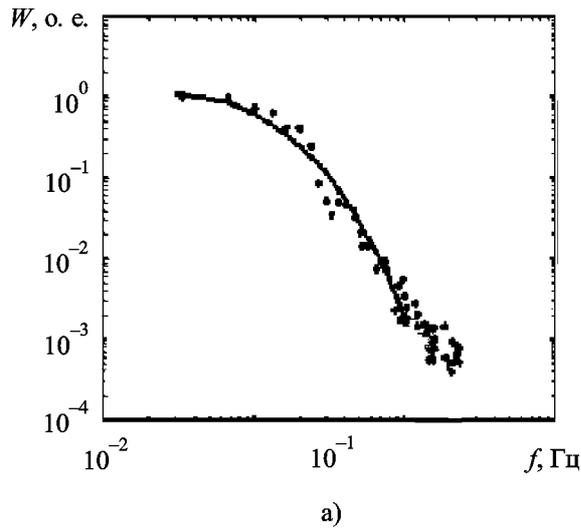


Рис. 7. Спектры мерцаний (а) и дисперсионные зависимости (б) для радиоисточника 3С196, полученные в октябре 2006 г. (точками обозначены экспериментальные кривые, сплошными линиями – результат расчета). Восстановленные с их помощью параметры солнечного ветра: первый поток – $n_1 = 3.8$, $V_1 = 550$ км/с, $l_0 = 300$ км, $L_0 = 1$ а. е.; второй поток – $n_2 = 3.7$, $V_2 = 730$ км/с, $l_0 = 100$ км, $L_0 = 2$ а. е.; третий поток – $n_3 = 3.9$, $V_3 = 500$ км/с

Заключение

Как показано выше, метод дисперсионного анализа в декаметровом диапазоне волн позволяет восстановить параметры как высокоскоростных потоков, так и медленного сол-

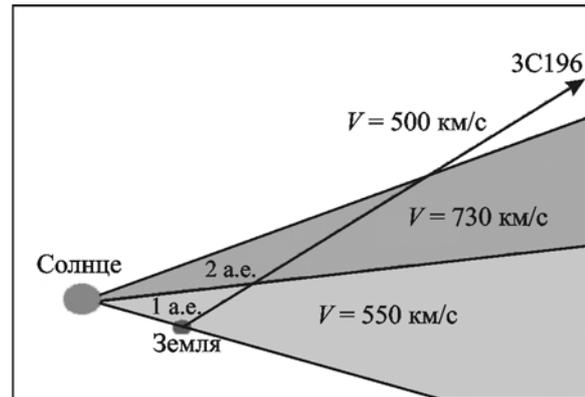


Рис. 8. Солнечный ветер на луче зрения на источник 3С196

нечного ветра. Проведенные расчеты и эксперименты доказали, что этот метод может успешно использоваться для двух-трехскоростной модели внешней гелиосферы на луче зрения. В настоящее время наибольшую эффективную площадь $150\,000\text{ м}^2$ имеет радиотелескоп УТР-2 в Украине. Он дает возможность уверенно наблюдать около десяти мерцающих источников в течение одной ночи, что, к сожалению, не позволяет получить высокое пространственное разрешение при картографировании. Реализация проекта гигантского низкочастотного телескопа нового поколения с эффективной площадью 1 млн м^2 [15], осуществляемого в Радиоастрономическом институте НАН Украины, даст возможность увеличить количество наблюдаемых источников как минимум на порядок и существенно улучшит пространственное разрешение получаемых карт внешней гелиосферы.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований НАН Украины “Разработка теории, методов и информационных технологий комплексного изучения солнечно-земных связей как основы прогнозирования «космической погоды»”, а также гранта INTAS 03-5727.

Литература

1. Butcher H. R. LOFAR: First of a new generation of radio telescopes // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5489. – P. 537-544.
2. Виткевич В. В., Власов В. И. Характеристики межпланетных электронных неоднородностей по наблюдениям 1967-1969 гг. // *Астрономический журнал*. – 1972. – Т. 49, вып. 3. – С. 595-606.
3. Власов В. И. Межпланетные ударные волны по наблюдениям мерцаний радиоисточников // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1981. – Т. 21, №5. – С. 927-929.
4. Власов В. И., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Вариации параметров межпланетных мерцаний и типы возмущений в межпланетной среде // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1983. – Т. 23, №6. – С. 888-893.
5. Блумс Д. Ф., Лотова Н. А. Анализ временных спектров мерцаний с учетом распределения скоростей солнечного ветра // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1981. – Т. 21, №2. – С. 209-213.
6. Бовкун В. П., Жук И. Н. Мерцания космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн на неоднородностях межпланетной плазмы и ионосферы // *Космическая наука и техника*. – 1992. – Вып. 7. – С. 80-91.
7. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н. и др. Вариации параметров струйной структуры солнечного ветра на расстояниях более 1 а. е. в 2003-2004 гг. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2006. – Т. 11, №1. – С. 31-41.
8. Фалькович И. С., Калиниченко Н. Н., Гридин А. А., Бубнов И. Н. О возможности широкополосных наблюдений межпланетных мерцаний на декаметровых волнах // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2004. – Т. 9, №2. – С. 121-129.
9. Jackson V. V., Hick P. L. Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations I. Combined Nagoya and Cambridge data // *Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103, No. A6. – P. 12,049-12,067.
10. Лотова Н. А., Чашей И. В. Распределение скоростей в межпланетной среде по наблюдениям мерцаний // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1978. – Т. 18, №5. – С. 809-817.
11. Оляк М. Р. Об особенностях применения метода дисперсионного анализа при исследовании солнечного ветра. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2005. – Т. 10, №4. – С. 385-391.
12. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // В сб.: "Антенны". Под ред. А. А. Пистолькорса. – М.: Связь, 1978, вып. 26. – С. 3-15.
13. Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В. и др. Радиотелескоп декаметрового диапазона длин волн УРАН-2 // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8, №4. – С. 345-356.
14. Фалькович И. С., Гридин А. А., Калиниченко Н. Н., Бубнов И. Н. Шестнадцатиполосный корреляционный радиометр для наблюдения межпланетных мерцаний // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2005. – Т. 10, №4. – С. 392-397.
15. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N. et al. Thrity-element active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope // *Experimental Astronomy*. – 2005. – Vol. 16. – P. 149-164.

Перші результати дисперсійного аналізу міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні довжин хвиль

І. С. Фалькович, О. О. Коноваленко, М. М. Калініченко, М. Р. Оляк, А. О. Гридін, І. М. Бубнов, А. І. Браженко, А. Лекашо, Г. О. Рукер

В статті обговорюються можливості методу дисперсійного аналізу зареєстрованих у двох пунктах (УТР-2, УРАН-2) міжпланетних мерехтінь. Спільний аналіз частотної залежності швидкості гармонік крос-спектру мерехтінь та їх енергетичних спектрів дозволяє знайти основні параметри міжпланетної плазми на промені зору. Використовуючи модель шаруватого середовища можна оцінити товщини шарів, їх густину, а також швидкість, показник просторового спектру та внутрішній масштаб турбулентності.

First Results of the Dispersion Analysis of the Interplanetary Scintillations at Decameter Wavelengths

I. S. Falkovich, A. A. Konovalenko, N. N. Kalinichenko, M. R. Olyak, A. A. Gridin, I. N. Bubnov, A. I. Brazhenko, A. Lecacheux, and H. O. Rucker

The potentialities of the dispersion analysis in investigating the interplanetary scintillations registered in the two points (UTR-2 and URAN-2) are discussed. The joint analysis of the frequency dependence of the velocity of their cross-spectrum harmonics and their power spectra allows to determine the main parameters of the interplanetary plasma along the line of sight. If the multi-layer model of the medium is used, the thicknesses of the layers, their densities, velocities, as well as indices of the spatial spectrum and the inner scales of the turbulence can be obtained.