

Украинская Советская Социалистическая Республика

УДК 523.164

СПЕКТР ТУРБУЛЕНТНОСТИ И СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ЭЛОНГАЦИЯХ 90—150 ГРАДУСОВ\*

В. П. Бовкун, И. Н. Жук



Приводятся результаты исследований энергетических спектров мерцаний на неоднородностях межпланетной плазмы и ионосферы в декаметровом диапазоне радиоволн. Показана возможность их разделения. Спектры мерцаний радиоисточников на частотах 12,6—25 МГц имеют степенной вид со спектральным индексом  $3,1 \pm 0,6$  для межпланетных мерцаний и  $3,4 \pm 0,5$  для ионосферных мерцаний. При наблюдениях межпланетных мерцаний менее 2 часов не обнаружено значительного дрейфа частоты среза фильтра Френеля. Разброс мгновенных спектров в основном обусловлен случайными флуктуациями. Наблюдаются значительные дрейфы частоты среза фильтра Френеля в сеансах измерений, отличающихся больше чем на сутки. С помощью модели фазового экрана получена оценка эффективной скорости солнечного ветра  $300 \pm 80$  км/с на элонгациях 90—150°, что хорошо согласуется с литературными данными.

Форма спектра турбулентности и значения скорости солнечного ветра на различных удалениях от Солнца весьма важны для изучения физических процессов, происходящих в межпланетной плазме (МПП). С этими характеристиками солнечной короны тесно связан энергетический спектр мерцаний радиоволн космических источников на неоднородностях МПП, анализ которых в настоящее время дает наиболее богатую информацию о среде [1]. На элонгациях 90—150° мерцания источников достигают максимума на декаметровых волнах [2], что позволяет использовать их для исследования МПП на больших удалениях от Солнца. Однако при наземных наблюдениях сигналы космических источников проходят через неоднородную ионосферу, что приводит к флуктуациям их интенсивности. В декаметровом диапазоне вклад мерцаний на неоднородностях ионосферы (МИ) в энергетический спектр сигнала может быть более значительным, чем на высоких частотах. Поэтому, прежде чем переходить к анализу энергетических спектров мерцаний на неоднородностях МПП, необходимо рассмотреть возможность их выделения при наличии ионосферных флуктуаций.

Как известно [1,3], в режиме слабых мерцаний энергетический спектр интенсивности сигнала  $P(f)$  связан с трехмерным пространственным спектром турбулентности  $\Phi(q)$ , угловым спектром источника  $J(2D/q)$  и характеристиками антенны радиотелескопа  $F_A(q)$  соотношением

$$P(f) = 4A(\lambda^2/v) \int dz \int \Phi(q) F_F(D) F_A^2(q) J^2(2D/q) dq_{\perp} \Big|_{q_{\parallel} = 2\pi f/v} \quad (1)$$

Здесь  $A = 2\pi r_e^2$ , где  $r_e = 2,82 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона,  $\lambda$  — длина волны наблюдения,  $v$  — скорость солнечного ветра,

\* Доложено на XIII Всесоюзной конференции по радиоастрономическим исследованиям солнечной системы 22 апреля 1981 г. в Киеве.

$z$  — расстояние до неоднородностей,  $q$  — двумерная пространственная частота, а  $q_{\perp}$  и  $q_{\parallel}$  — компоненты вектора  $q$  (первая из них нормальная, а вторая — параллельная скорости солнечного ветра),  $D$  — волновой параметр, показывающий, во сколько раз площадь первой зоны Френеля больше площади неоднородностей данного размера:

$$D = 0,5q^2/q_F^2. \quad (2)$$

Степенной спектр турбулентности  $\Phi(q)$  имеет две характерные пространственные частоты —  $q_0$  и  $q_m$  [4], определяемые соответственно ее внешним  $l_0$  и внутренним  $l_m$  масштабами, и может быть представлен [5-7] в виде

$$\Phi(q) \propto [1 + (q^2/q_0^2)^{\rho/2}]^{-1} \exp(-q^2/q_m^2), \quad (3)$$

где  $\rho$  — спектральный индекс спектра турбулентности.

Для слабых мерцаний точечных источников спектральные индексы энергетического спектра мерцаний  $\gamma$  и спектра турбулентности  $\rho$  связаны равенством [8]

$$\gamma = \rho - 1, \quad (4)$$

а временные и пространственные частоты — соотношением

$$f = \mathbf{v}q/2\pi = vq_{\parallel}/2\pi = v/L_{\parallel}, \quad (5)$$

где  $L_{\parallel} = 2\pi l_{\parallel}$  — размер неоднородностей вдоль направления их движения. Множитель

$$F_F(D) = \sin^2 D \quad (6)$$

часто называют фильтром Френеля, частота среза которого  $q_F = (k/z)^{1/2}$ , где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число.

Частотная характеристика фильтра Френеля (6) имеет для тонкого слоя осциллирующий вид. В декаметровом диапазоне для ионосферы и МПП толщина неоднородного слоя увеличивается, осцилляции сглаживаются и характеристику можно представить в виде [9]

$$F_F \simeq D^2/(1 + 2D^2). \quad (7)$$

Множитель  $F_A(q)$  учитывает свойства антенны радиотелескопа как фильтра пространственных частот. Для антенных решеток с равномерным распределением тока вдоль решетки его можно записать в виде [3]

$$F_A(q) = \left[ \frac{\sin(0,5q_x d_x)}{0,5q_x d_x} \frac{\sin(0,5q_y d_y)}{0,5q_y d_y} \right]^2, \quad (8)$$

где  $q_{x,y}$  и  $d_{x,y}$  — проекции вектора  $q$  и максимального размера антенны  $d$  на выделенные ортогональные направления  $x$  и  $y$ . Такими выделенными направлениями выбираются либо направление вытянутости неоднородностей, либо направление их движения. Для антенн с размерами, меньшими размеров неоднородностей,  $F_A(q) \simeq 1$ . В декаметровом диапазоне этот случай реализуется для межпланетной плазмы, минимальные размеры неоднородностей которой в несколько раз превышают максимальные размеры существующих радиотелескопов. В случае ионосферы быстрые флуктуации поля в раскрыве антенны, обусловленные мелкомасштабными неоднородностями, усредняются антенной радиотелескопа и не приводят к флуктуациям интенсивности принимаемого сигнала.

Влияние углового размера источника на энергетический спектр мерцаний учитывает множитель

$$J(2D/q) = (2\pi)^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} I(\theta) \exp(2jkD\theta/q) d^2\theta, \quad (9)$$

который описывает пространственный спектр источника с двумерным распределением радиояркостки  $I(\theta)$ . Для точечных источников этот множитель равен 1 и не сказывается на форме спектра мерцаний. Слабо влияют на форму энергетического спектра мерцаний источники с размерами, значительно меньшими углового размера первой зоны Френеля. Источники с угловыми размерами, значительно большими первой зоны Френеля, не мерцают. На частотах ниже 25 МГц угловой размер первой зоны Френеля больше 4" для МПП и 50' для ионосферы [3]. Поэтому, чтобы исследовать в декаметровом диапазоне мерцания на неоднородностях МПП, необходимо выбирать для наблюдений источники с угловыми размерами  $\theta_0 < 4''$ , а для исследования МИ — источники с  $4'' \ll \theta_0 \ll 50'$  или точечные источники, расположенные в магнитосфере Земли [10].

Для оценки вклада МИ нами использовались результаты наблюдений сигналов геостационарных спутников [11–13] и проводились специальные наблюдения в декаметровом диапазоне волн [3, 14]. Из исследований сигналов спутников [11–13] следует, что индекс мерцаний для ионосферы максимален ночью и минимален днем. В полярных и экваториальных областях он возрастает по сравнению со средними широтами. Ширина спектра зависит от времени суток и длины волны. В полдень наблюдаются минимальные индексы мерцаний и максимальные квазипериоды [11]. Для ночных мерцаний характерны широкополосные спектры. При этом для экваториальной ионосферы на частоте 40 МГц [13] наблюдается излом в спектре с переходом к степенному виду в интервале 0,001–0,01 Гц для узких и не превышает 0,03 Гц для широких спектров. В среднем частота излома спектра МИ в диапазоне от 4 ГГц [12] до 40 МГц [13] изменяется от  $\sim 0,1$  до  $\sim 0,01$  Гц, т. е. уменьшается обратно пропорционально размерам первой зоны Френеля для ионосферы.

Для исследования МИ в декаметровом диапазоне радиоволн в качестве просвечивающего источника была выбрана радиогалактика Девы-А. Она состоит из гало размером 12' × 16' и компактных компонент, вклад которых в полный поток источника с понижением частоты уменьшается [15–17], и на частотах ниже 111 МГц они не наблюдаются. По данным интерферометрии с большими базами в этой радиогалактике не обнаружены компактные детали с потоками больше 0,8 Ян на частоте 111 МГц [18] и 85 Ян на частоте 25 МГц [19]. Их вклад в спектр ионосферных мерцаний не превышает 1,5%. С целью уменьшения искажений спектра МИ, вносимых радиотелескопом, в феврале 1980 года проводились наблюдения на отдельных секциях УТР-2. Измерения проводились одновременно на пяти секциях радиотелескопа на трех частотах 16,7; 20 и 25 МГц для часовых углов от –140 до +140 минут с постоянной времени выходного устройства 5 с. Энергетический спектр определялся по автокорреляционным функциям интенсивности, найденным для реализаций длительностью 17 минут и состоящих из 512 точек для 256 значений сдвигов во времени. Для повышения отношения сигнал/шум использовались усредненные автокорреляционные функции трех-пяти секций антенны север—юг. Спектры мерцаний, найденные по усредненным автокорреляционным функциям и без усреднения, отличались только уровнем шума.

Так как энергетические спектры достаточно крутые, то для получения их с малыми искажениями на автокорреляционную функцию интенсивности накладывалось трехчленное окно Блэкмана—Харриса [20]. Для дискретного преобразования Фурье это окно задается выражением

$$K(n) = 0,42323 - 0,49755 \cos(2\pi n/N) + 0,07922 \cos(4\pi n/N), \quad (10)$$

где  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ ;  $N$  — суммарное количество точек автокорреляционной функции для положительных и отрицательных сдвигов во времени.

Типичный спектр МИ, полученный из наблюдений 16 февраля 1980 г. на частоте 16,7 МГц для часового угла 140 минут, приведен на рис. 1 (кривая 1). Частота среза фильтра Френеля для этого спектра равна 0,01 Гц, а спектральный индекс  $3,1 \pm 0,3$ . Иногда наблюдаются узкополосные спектры с сильно выраженной анизотропией неоднородностей. На рис. 1 (кривая 2) приведен пример такого спектра, полученный по измерениям 16 февраля 1980 года на частоте 20 МГц для часового угла 60 минут. Видно, что спектральная плотность на частотах выше 0,02 Гц (отмечено штриховой линией) уменьшается на один-два порядка. Отсюда следует, что в декаметровом диапазоне при наблюдении мерцаний компактных источников энергетический спектр мерцаний на неоднородностях МПП на частотах выше 0,02—0,03 Гц почти не искажается ионосферой. Если амплитуда составляющих спектра МИ и межпланетных мерцаний на частотах ниже частоты среза фильтра Френеля одинакова, то суммарный вклад всех составляющих спектра МИ в энергетический спектр мерцаний не превышает 10%. Как уже отмечалось, при наблюдениях космических источников телескопами с размерами антенн порядка размера зоны Френеля для ионосферы происходит значительное ослабление быстрых флуктуаций на ее неоднородностях. Мощность мерцаний на мелкомасштабных неоднородностях уменьшается за счет усреднения по апертуре антенны, а большие неоднородности приводят лишь к медленному изменению масштаба записи. В этом случае глубина замираний сигналов, вызванных ионосферой, за время прохождения источником диаграммы направленности значительно меньше, чем для межпланетных мерцаний компактных источников на элонгациях 90—150°.

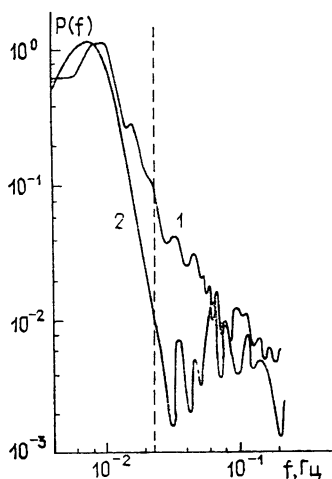


Рис. 1.

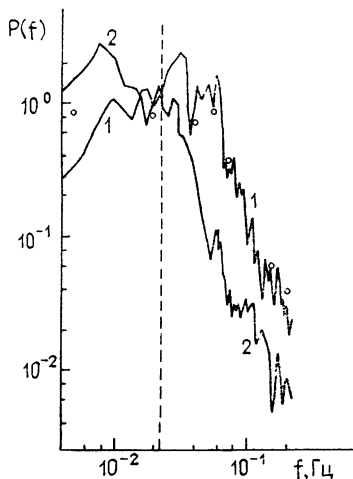


Рис 2.

Таким образом, в декаметровом диапазоне волн с помощью больших телескопов можно получать почти неискаженные спектры межпланетных мерцаний.

Наблюдения мерцаний на неоднородностях МПП проводились на частотах 12,6; 16,7; 20 и 25 МГц с конца 1976 г. по февраль 1980 г.

Спектры мерцаний источников малых угловых размеров (около  $2''$ ) на элонгациях  $90\text{--}150^\circ$  на всех частотах наблюдений подобны и имеют степенной вид со средним спектральным индексом  $3,1 \pm 0,6$ . С учетом угловых размеров источников, они хорошо описываются моделью фазового экрана при степенном спектре турбулентности с показателем степени около  $3,5$ , что находится в согласии с данными [1], полученными для меньших элонгаций.

На рис. 2 приведены образцы энергетических спектров мерцаний на частоте  $25\text{ МГц}$ , полученные из 20-минутных наблюдений Крабовидной туманности, проведенных при низких гелиоширотах 25 февраля 1977 г. (кривая 1) и 16 февраля 1980 г. (кривая 2). Для обеих кривых спектральные индексы равны  $3,4 \pm 0,3$ . На этом же рисунке кружками нанесены спектральные плотности мерцаний, полученные по синхронным с частотой  $25\text{ МГц}$  наблюдениям Крабовидной туманности на частоте  $12,6\text{ МГц}$  25 февраля 1977 г. Видно, что форма спектра на обеих частотах подобна и сохраняется во времени. Однако, как и для более высоких частот, от опыта к опыту наблюдается дрейф частоты среза фильтра Френеля, что может быть обусловлено изменением эффективного значения проекции скорости солнечного ветра, ортогональной лучу зрения.

Если дрейф частоты среза фильтра Френеля происходит за отрезки времени меньше длины реализации, используемой для определения энергетического спектра, то это может приводить к уменьшению крутизны спектра на высоких частотах вблизи частоты среза фильтра Френеля. К более пологим энергетическим спектрам мерцаний может также

приводить дисперсия скоростей на луче зрения [21–23]. Анализ измерений энергетических спектров мерцаний компактных источников на неоднородностях МПП на частотах  $20$  и  $25\text{ МГц}$  показал, что при длительности наблюдений менее 2 часов дрейф частоты среза фильтра Френеля незначительный. Так, в пяти последовательных сеансах измерений источника ЗС 144 длительностью 20 минут, проведенных в 1977 г. на радиотелескопе УТР-2, видимый дрейф при сравнении мгновенных спектров обычно не превышал  $\pm 35\%$ . Это иллюстрируется рис. 3, на котором приведен средний за 100 минут наблюдений 25 февраля 1977 г. энергетический спектр мерцаний источника ЗС 144 на частоте  $25\text{ МГц}$  (сплошная линия) и границы среднеквадратичного отклонения спектральной плотности в отдельных сеансах наблюдений (штриховая линия). Штрихпунктирной линией обозначен уровень шума. Из сопоставления энергетических спектров, полученных в отдельном сеансе наблюдений (рис. 2, кривая 1), и в результате усреднения пяти последовательных сеансов (рис. 3) следует, что форма обоих спектров подобна, но усредненный спектр менее изрезан. Для него не наблюдается уменьшения крутизны спектра вблизи частоты среза фильтра Френеля, появление которого можно ожидать при наличии дрейфа частоты. По-видимому, разброс спектральных плотностей от сеанса к сеансу измерений и изрезанность

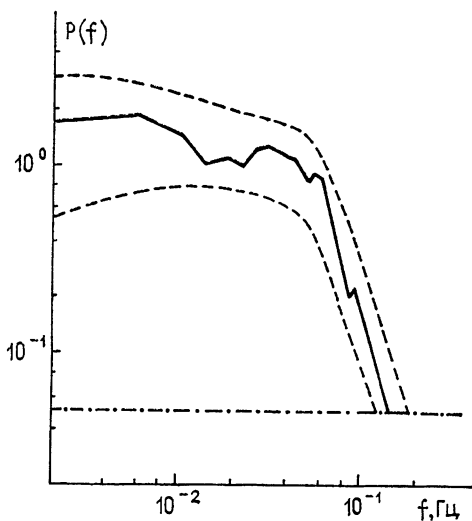


Рис. 3.

спектров в значительной мере обусловлены случайными флуктуациями, которые уменьшаются при усреднении спектров. Поэтому оценка величины дрейфа частоты среза фильтра Френеля по разбросу мгновенных спектров мерцаний оказывается завышенной, и истинный дрейф частоты среза фильтра Френеля за время около 2 часов меньше полученной оценки  $\pm 35\%$ .

Измеряя ширину энергетического спектра мерцаний для источников с известными угловыми размерами, можно из модельных расчетов оценить эффективную скорость солнечного ветра.

Оценка скорости солнечного ветра получена нами в приближении фазового экрана для гауссовой формы распределения яркости по компактному источнику Крабовидной туманности. Видимый угловой размер источника на частоте  $25 \text{ МГц}$  определен из интерферометрических наблюдений на частоте  $26,3 \text{ МГц}$  [<sup>24</sup>] в предположении, что он увеличивается пропорционально квадрату длины волны и принят равным  $1,44 \begin{matrix} +0,24 \\ -0,14 \end{matrix}$  угловых секунд. Расстояние до фазового экрана определе-

но по известной скорости солнечного ветра на луче зрения на источник ЗС 144. Для 25 февраля 1977 г. по данным интерферометрических наблюдений в Сан-Диего на частоте  $74 \text{ МГц}$  [<sup>25</sup>] скорость равна  $263 \pm 30 \text{ км/с}$ . При этом расстояние до фазового экрана оказалось близким к 1 а. е. Используя эти данные и энергетические спектры мерцаний, мы оценили скорости солнечного ветра на элонгациях  $90\text{—}150^\circ$ . Оказалось, что среднее значение проекции скорости солнечного ветра на этих элонгациях равно  $(300 \pm 80) \text{ км/с}$ . Такая величина проекции скорости, ортогональной лучу зрения, не противоречит литературным данным [<sup>25</sup>].

Таким образом, в декаметровом диапазоне волн можно методом мерцаний определять энергетические спектры мерцаний компактных источников на неоднородностях МПП, которые позволяют судить о форме спектра турбулентности околосолнечной плазмы и, используя модель фазового экрана, получать оценку эффективной скорости солнечного ветра. На больших элонгациях в энергетическом спектре мерцаний не наблюдается значительного дрейфа частоты среза фильтра Френеля при сеансах измерений меньше 2 часов, что допускает усреднение нескольких мгновенных спектров для уменьшения случайных флуктуаций. Так как в декаметровом диапазоне интенсивные мерцания наблюдаются в широкой области элонгаций от  $50$  до  $150^\circ$ , то, исследуя компактные источники с известными угловыми размерами, можно одновременно контролировать состояние короны на различных расстояниях от Солнца при различных гелиоширотах.

Хорошее согласие значений скорости солнечного ветра, полученных из наблюдений на декаметровых волнах, с литературными данными позволяет использовать метод мерцаний для исследования угловых размеров компактных источников в этом диапазоне, где методы интерферометрии с большими базами развиты недостаточно.

Авторы признательны С. Я. Брауде за постоянный интерес к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В. И., Чашей И. В., Шишов В. И., Шишова Т. Д.— Геомagnetизм и астрономия, 1979, 19, № 3, с. 401.
2. Жук И. Н.— Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 8, с. 893.
3. Вонкоп V. P., Зхоуск I. N.— Astrophys. Space Sci., 1981, 79, p. 121.
4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля.— М.: Наука, 1978.
5. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере.— М.: Наука, 1967.
6. Neugebauer M.— J. Geophys. Res., 1975, 80, p. 998.
7. Rufenach C. L.— Radio Sci., 1975, 10, p. 155.

8. Cronyn W. M.—*Asotrophys. J.*, 1970, **161**, p. 755.
9. Booker H. G., Miller D. C.—*J. Atm. Terr. Phys.*, 1980, **42**, p. 189.
10. Getmantsev G. G., Eroukhimov L. M.—*Ann. ISQY*, 1967, **5**, paper 13, p. 229.
11. Aarons J., Whitney H. E., Allen R. S.—*Proc. IEEE*, 1971, **59**, p. 159.
12. Crane R. K.—*Proc. IEEE*, 1977, **65**, p. 180.
13. Moorthy K. K., Reddy C. R., Murthy B. V. K.—*J. Atm. Terr. Phys.*, 1979, **41**, p. 123.
14. Бовкун В. П., Жук И. Н.—*ДАН УССР, серия А*, 1981, № 6, с. 72.
15. Cameron H. C.—*Proc. Astr. Soc. Austr.*, 1969, **1**, p. 229.
16. Graham I.—*Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 1970, **149**, № 4, p. 319.
17. Соболева Н. С., Берлин А. Б., Гольнев В. Я., Тимофеева Г. М.—*Астрон журн*, 1977, **54**, № 5, с. 945.
18. Clark T. A., Erickson W. C.—*Proc. IEEE*, 1973, **61**, p. 1230.
19. Бобейко А. Л., Бовкун В. П., Брауде С. Я., Мень А. В., Сергиенко Ю. Ю. Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по галактической и внегалактической радиоастрономии.—*М.: ИКИ АН СССР*, 1979, с. 56.
20. Harris E. J.—*IEEE*, 1978, **66**, p. 51.
21. Блумс Д. Ф., Лотова Н. А.—*Геомagnetизм и аэрономия*, 1981, **21**, № 2, с. 209.
22. Лотова Н. А., Чашей И. В.—*Геомagnetизм и аэрономия*, 1978, **18**, № 5, с. 809.
23. Лотова Н. А., Коулс В. А.—*Геомagnetизм и аэрономия*, 1979, **19**, № 5, с. 788.
24. Mutel R. L., Broderick J. J., Carr T. D., Lynch M., Desh M., Warneck W. W., Klemperer W. K.—*Astrophys. J.*, 1974, **193**, p. 279.
25. *Solar Geophysical Data*, 1977, № 391, part I, p. 24.

Институт радиофизики и электроники  
АН УССР

Поступила в редакцию  
30 июня 1981 г.

## TURBULENCE SPECTRUM AND THE VELOCITY OF THE SOLAR WIND AT ELONGATIONS OF 90—150°

*V. P. Borkoon, I. N. Zhouck*

Investigation results are presented for energetic spectra of scintillations caused by inhomogeneities of the interplanetary plasma and the ionosphere in the decimeter wave range. A possibility of their separation is shown. Scintillation spectra of radio sources at 12.6—25 MHz are of a power form with the spectral index  $3.1 \pm 0.6$  for interplanetary scintillations and  $3.4 \pm 0.5$  for ionospheric ones. When observing interplanetary scintillations for less than 2 hours a marked frequency drift of the Fresnel filter cut off have not been detected. A spread of instantaneous spectra is due, mainly, to random fluctuations. Considerable frequency drifts of the Fresnel filter cut off are observed during measurement seances differed by more than a day. By a model of phase screen an estimation has been obtained for the effective velocity of the solar wind of  $300 \pm 80$  km/s at elongations of 90—150° that is in good agreement with the data given elsewhere.