

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.02.087>

УДК 520.274, 52-14

PACS numbers: 95.75.Kk,
95.75.-z

В. А. ШЕПЕЛЕВ¹, О. А. ЛИТВИНЕНКО¹,
К. ГЕОРГИЕВА², Б. КИРОВ²

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мыстэцтв, 4, г. Харьков, 61002 Украина

² Институт космических исследований и технологий Болгарской АН,
ул. Акад. Г. Бончев, бл. 1, г. София, 1113, Болгария

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Предмет и цель работы: *Исследуется влияние ионосферы Земли и межпланетной плазмы на радиоастрономические, в частности интерферометрические, наблюдения на декаметровых волнах. При дифракции на слое плазмы с неоднородностями электронной концентрации наблюдаются амплитудные и фазовые флуктуации падающей электромагнитной волны. При интерферометрических наблюдениях фазовые флуктуации выходного сигнала вызывают уменьшение времени когерентности и увеличение ширины спектра отклика интерферометра, что приводит к ограничению времени когерентного накопления и снижает чувствительность инструмента. Целью работы является определение степени влияния ионосферных и межпланетных мерцаний на чувствительность интерферометрических наблюдений и оценка возможности повышения чувствительности, что необходимо при исследовании угловой структуры слабых компактных радиоисточников.*

Методы и методология: *Для определения вклада ионосферных мерцаний в увеличение ширины спектра выходного сигнала интерферометра был выбран радиоисточник с угловыми размерами, исключающими его мерцание на неоднородностях солнечного ветра, однако дающими возможность наблюдать его на интерферометре УРАН-2 с базой 153 км. Обработка большого количества наблюдательных данных позволила определить ширину спектра сигнала на выходе этого интерферометра в условиях амплитудных и фазовых мерцаний на ионосферных неоднородностях. Затем интерферометр был использован для наблюдения компактного радиоисточника, на принимаемый сигнал которого влияют как ионосфера, так и межпланетная среда. Предварительно полученные параметры ширины спектра ионосферных мерцаний позволили выделить влияние именно неоднородностей межпланетной среды на интерферометрический отклик.*

Результаты: *Определены пределы изменения времени когерентного накопления из-за влияния межпланетной плазмы. Даны рекомендации по изменению методики наблюдений для более корректного и эффективного исследования слабых компактных объектов с помощью сети интерферометров УРАН на декаметровых волнах. Обнаружено влияние крупномасштабных особенностей структуры солнечного ветра, связанных с формой силовых линий межпланетного магнитного поля и видом пространственного спектра неоднородностей, на чувствительность низкочастотных интерферометрических наблюдений. Зарегистрировано повышение турбулентности межпланетной среды за орбитой Земли длительностью до нескольких суток, сопряженное с проявлениями спорадической активности Солнца.*

Заключение: *Проведенное исследование позволяет определить пределы влияния межпланетной среды на чувствительность интерферометрических наблюдений и установить оптимальные элонгации для проведения исследований угловой структуры слабых радиоисточников. Учет влияния солнечной активности можно использовать для кратковременного прогноза при определении стратегии высокочувствительных наблюдений. Методика определения турбулентности солнечного ветра может быть применена для исследования процесса взаимодействия солнечных событий с межпланетной средой.*

Ключевые слова: *ионосфера, межпланетная среда, интерферометр, спектр мерцаний, чувствительность*

1. Введение

В Радиоастрономическом институте НАН Украины проводятся исследования космических радиоисточников в декаметровом диапазоне, т. е. на наиболее длинных волнах, применимых для наблюдений с поверхности Земли. Для исследова-

ний используются крупнейший в мире радиотелескоп УТР-2 и инструменты меньшего размера УРАН [1], которые работают по различным наблюдательным программам как независимо, так и в составе интерферометрической сети с высоким угловым разрешением.

Сигналы космических источников, принимаемые наземными радиотелескопами, проходят через межпланетную плазму и ионосферу Земли, взаимодействуя с ними тем сильнее, чем больше длина волны излучения. Это взаимодействие проявляется в поглощении, запаздывании и рефракции радиоволн, их рассеянии на неоднородностях электронной концентрации, а также во вращении плоскости поляризации волны вследствие наличия магнитного поля в плазме. Эти эффекты существенно влияют на характеристики принимаемых сигналов и должны учитываться при разработке методики наблюдений и обработки данных. Важно также, что параметры плазмы как в ионосфере, так и в межпланетной среде изменяются под воздействием различных факторов, в частности, зависят от проявлений солнечной активности. Солнце как наиболее мощный источник энергии в солнечной системе оказывает определяющее воздействие на многие процессы на Земле и в околоземном пространстве как посредством электромагнитного излучения в различных диапазонах длин волн, так и через потоки частиц солнечного ветра и корональных выбросов массы. В настоящее время широко исследуются различные аспекты этого воздействия – от влияния на живую природу до возникновения различных физических явлений в атмосфере и магнитосфере Земли, а также в межпланетной среде. Влияние Солнца и его спорадической активности, часто приводящее к достаточно быстрому изменению параметров среды распространения сигналов, необходимо учитывать и при проведении радиоастрономических исследований.

Из перечисленных выше явлений, возникающих при прохождении радиоволн через плазму, наиболее существенно на получаемые в большинстве программ наблюдательные данные влияет рассеяние радиоволн на неоднородностях электронной концентрации. Этот процесс приводит к значительному изменению параметров принимаемого сигнала, что обуславливает особенности обработки данных.

Настоящая работа посвящена анализу влияния амплитудных и фазовых флуктуаций сигнала, возникающих при рассеянии радиоволн на неоднородностях ионосферы Земли и межпланетной плазмы, на интерферометрические наблюдения в декаметровом диапазоне. Авторы интересовали ограничения, накладываемые фазовыми

флуктуациями принимаемого сигнала на допустимое время когерентного накопления выходных сигналов, которое определяет чувствительность интерферометра при наблюдении слабых радиоисточников.

2. Влияние мерцаний на интерферометрические наблюдения

Как известно, в плазме ионосферы и солнечного ветра присутствуют случайные вариации электронной концентрации Δn_e относительно ее среднего значения. При перемещении волны через такую неоднородность возникает дополнительный сдвиг фазы, пропорциональный длине волны λ и размеру неоднородности l , $\Delta\varphi = \lambda r_e \Delta n_e l$ (r_e – радиус электрона) [2], что искажает исходно плоский волновой фронт проходящей электромагнитной волны. В соответствии с современными представлениями, спектр размеров таких неоднородностей степенной с внешним и внутренним масштабами. Искажения волнового фронта при дальнейшем распространении электромагнитной волны приводят к формированию на земной поверхности интерференционной картины – фазовым и амплитудным флуктуациям поля этой волны. В режиме слабых мерцаний пространственный спектр амплитудных флуктуаций на поверхности Земли является произведением степенного спектра фазовых флуктуаций на выходе из рассеивающего слоя и пространственной фильтрующей функции, которая определяется размером первой зоны Френеля на рассеивающем слое $R_f = \sqrt{\lambda Z}$, где Z – высота рассеивающего слоя над поверхностью Земли. Этот так называемый фильтр Френеля ослабляет влияние неоднородностей с размером существенно большим R_f , что приводит к уплощению спектра флуктуаций амплитуды на больших масштабах неоднородностей.

Такое уплощение и спадающий по степенному закону характер спектра на малых масштабах неоднородностей приводят к формированию на поверхности земли дифракционной картины с характерным размером порядка масштаба первой зоны Френеля на рассеивающем слое $\sqrt{\lambda Z}/2\pi = \sqrt{Z/k}$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число [3]. Если принять расстояние до рассеивающего слоя $Z = 350$ км (область F ионосферы), то на частоте 25 МГц ($\lambda = 12$ м) характерный размер пространственных флуктуаций, вызванных

ионосферными неоднородностями, составит ≈ 800 м. При движении неоднородностей происходит дрейф дифракционной картины на поверхности земли. Пространственный спектр флуктуаций амплитуды и скорость этого движения определяют временной масштаб и спектр флуктуаций мощности сигнала, измеренной приемником радиотелескопа. Временной масштаб флуктуаций при типичных скоростях движения ионосферных неоднородностей составляет при этом $10 \div 30$ с.

Если размеры антенны существенно меньше характерного размера дифракционной картины флуктуаций, что справедливо для антенн УРАН, то радиотелескоп оказывается чувствительным только к изменениям амплитуды поля. При этом среднее по пространству или во времени значение измеренной плотности потока излучения космического источника остается постоянным и равным интенсивности неискаженной плоской волны [4]. Поэтому для определения правильного значения потока излучения при усреднении этих флуктуаций необходимо наблюдать источник достаточно длительное время, много большее характерного времени амплитудных флуктуаций. Однако если размеры антенн-решеток сравнимы с пространственным масштабом дифракционной картины мерцаний, происходит усреднение поля по апертуре антенны, при этом фазовые флуктуации поля приводят к несинфазному суммированию сигналов, принятых различными частями антенны. В [5] показано, что при наблюдениях на радиотелескопе УТР-2, размеры которого превышают масштаб первой зоны Френеля для ионосферы, это приводит к уменьшению измеренного потока, которое тем значительнее, чем больше индекс мерцаний, характеризующий турбулентность ионосферы. Следовательно, при использовании радиотелескопов таких размеров методика наблюдений и обработки должна предусматривать определение текущего индекса мерцаний и коррекцию измеренных значений плотности потока излучения радиоисточника, например с помощью поправочной зависимости, полученной экспериментально в [5].

Важно отметить, что для протяженного источника флуктуации сигнала, вызванные мерцаниями будут ослаблены, т. к. они являются суперпозицией мерцаний его частей – статистически независимых точечных источников. Критический угловой размер источника, при превышении кото-

рого флуктуации начинают ослабляться, определяется углом, под которым характерный размер флуктуаций $\sqrt{Z/k}$ наблюдается с расстояния Z (от наблюдателя до рассеивающего слоя) [2], и может быть оценен из отношения этих величин:

$$\theta_{\text{кр}} = \frac{\sqrt{Z/k}}{Z} = \frac{1}{\sqrt{kZ}}. \quad (1)$$

Для ионосферных мерцаний на неоднородностях области F критический размер источника на частоте 25 МГц, вычисленный по этой формуле, составляет приблизительно $8'$, следовательно ионосферные мерцания на декаметровых волнах наблюдаются при исследовании большинства дискретных радиоисточников.

В случае мерцаний радиоизлучения на неоднородностях межпланетной плазмы характерный масштаб дифракционной картины существенно превышает размеры антенн. При этом, однако, из-за большой скорости солнечного ветра временные масштабы флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала существенно меньше значений, характерных для ионосферных мерцаний. Следовательно, межпланетные мерцания не приводят к занижению измеренной плотности потока излучения из-за усреднения по апертуре антенны, а флуктуации сигнала эффективно усредняются последетекторным фильтром радиометра. Кроме того, в этом случае при расстоянии до рассеивающего слоя ~ 1 а. е. на частоте 25 МГц критический угловой размер источника меньше одной угловой секунды, что сравнимо со значением минимального угла рассеяния в межзвездной среде в этом диапазоне. Значительное количество внегалактических радиоисточников с плотностью потока более 30 Ян из числа наблюдавшихся с помощью сети интерферометров УРАН имеет заметно большие размеры. Следовательно, на декаметровых волнах межпланетные мерцания регистрируются при наблюдении лишь немногих наиболее компактных объектов этой выборки.

Таким образом, при определении плотности потока излучения радиоисточника с помощью отдельного радиотелескопа учет влияния мерцаний сводится к выбору достаточной длины сканов источника и коррекции пространственного усреднения поля большими антеннами-решетками.

Интерферометр, состоящий из двух антенн, разнесенных на расстояние d , позволяет определить степень когерентности поля излучения исследуемого источника на этом расстоянии – базе интерферометра. Выходной сигнал его коррелятора – ковариацию напряжений на выходе каждой из антенн, называют видностью источника. В отсутствие искажений в среде распространения – это квазисинусоидальный сигнал, спектр которого представляет собой дельта-функцию на частоте интерференции, которая определяется положением источника относительно вектора базы и скоростью вращения Земли. Мерцания радиоизлучения на неоднородностях среды приводят к изменению амплитуды видности в соответствии с амплитудными флуктуациями на выходе каждой из антенн. Поскольку интерферометр позволяет выделить разность фаз сигнала в разнесенных пунктах, комплексная видность чувствительна и к фазовым флуктуациям поля на поверхности земли, вызванным мерцаниями. Другими словами, сигнал на выходе коррелятора модулирован по амплитуде и фазе, что приводит к расширению его спектра. Как известно, пространственный спектр фазовых флуктуаций в дифракционной картине мерцаний на поверхности земли ограничен на больших масштабах только внешним масштабом неоднородностей. Хотя флуктуации фазы выходного сигнала интерферометра, вызванные влиянием неоднородностей с размерами большими, чем его база, существенно ослаблены, тем не менее интерферометр с $d > R_f$ чувствителен к более широкому диапазону размеров неоднородностей, чем одиночный радиотелескоп. По этой причине при длине базы, в несколько раз превышающей размер первой зоны Френеля, энергия флуктуаций в спектре интерференционного отклика почти полностью определяется фазовой составляющей модуляции сигнала.

В отличие от усреднения флуктуаций амплитуды, которое не приводит к изменению оценки принятого потока излучения, интегрирование фазовых флуктуаций в течение интервала времени, большего времени когерентности сигнала, занижает значения комплексной функции видности подобно тому, как описанное выше усреднение пространственных флуктуаций фазы поля по апертуре большой антенны-решетки уменьшает значения при-

нятой мощности сигнала. При этом измеренный интерферометром поток излучения компактного источника [3]

$$S = S_0 e^{(-\Phi(d)/2)}, \quad (2)$$

где S_0 – неискаженная плотность потока источника; $\Phi(d)$ – средний квадрат модуля разности фаз в точках, разнесенных на расстояние d . Следует отметить, что уменьшение потока излучения в соответствии с (2) происходит, если постоянная времени фильтра на выходе коррелятора существенно превышает время когерентности сигнала, т. е. при полном усреднении фазовых флуктуаций. Если время когерентного накопления соответствует скорости изменения фазы этого сигнала (полоса интегрирующего фильтра больше ширины спектра интерференционных колебаний, определяемой фазовыми флуктуациями), то функция видности будет измерена правильно. Однако уменьшение времени когерентного накопления приводит к уменьшению чувствительности инструмента.

3. Зависимость чувствительности интерферометров УРАН от мерцаний

Как известно, чувствительность интерферометра характеризуется минимальным обнаружимым потоком излучения точечного источника S_{\min} , значение которого определяется выражением [2]

$$S_{\min} = \frac{\alpha k_b T_{\text{sys}}}{\sqrt{A_1 A_2 \Delta \nu T}}, \quad (3)$$

где k_b – постоянная Больцмана; T_{sys} – температура системы; A_1 и A_2 – эффективные площади антенн; $\Delta \nu$ – полоса пропускания приемников; T – время накопления; α – коэффициент, зависящий от порога обнаружения, схемы коррелятора, особенностей квантования и других факторов.

На декаметровых волнах T_{sys} определяется температурой галактического фона, которая в правильно спроектированной системе существенно превышает шумы аппаратуры. В то же время антенные системы сети декаметровых радиотелескопов имеют большие размеры, которые не могут быть существенно увеличены. Следовательно, увеличить чувствительность возможно лишь за счет расширения полосы

частот принимаемых сигналов и увеличения времени накопления (сужения полосы выходного фильтра ΔF), т. е. увеличения радиометрического выигрыша $\Delta\nu T = \Delta\nu/\Delta F$. Полоса частот в интерферометрических наблюдениях на УРАН ограничена рядом факторов, таких как частотная зависимость характеристик исследуемого источника, геометрия база–источник, дисперсионные свойства среды распространения сигналов. Эти факторы ограничивают максимальную применимую полосу частот значением ≈ 1.5 МГц, которое превышает полосу пропускания приемников 250 кГц, используемую в настоящее время в интерферометрах УРАН. Допустимая ширина полосы выходного фильтра ΔF ограничивается шириной спектра сигнала на выходе коррелятора, т. е. определяется временем когерентности. Для иллюстрации диапазона изменения этой величины на рис. 1 показаны спектры функции видности, полученные при наблюдении одного и того же источника в различных условиях. Спектральную линию интерференционных колебаний на рис. 1, *a* немного уширяют слабые ионосферные мерцания. Полоса сигнала здесь – несколько сотых долей герца, что позволяет когерентно накапливать сигнал в течение нескольких десятков секунд. Отметим, что при полном отсутствии мерцаний ширина спектра и время накопления определяются длительностью скана, изменяющейся в наших наблюдениях в пределах от 3 до 7 мин. Заметные боковые полосы шириной 0.5 Гц в спектре на рис. 1, *б* вызваны межпланетными мерцаниями. Наконец, фазовая модуляция сигнала, вызванная сильными мерцаниями на межпланетной плазме, привела к исчезновению на рис. 1, *в* узкой линии интерференционного отклика с полным переходом ее энергии в боковые полосы спектра. Для корректного усреднения сигнала постоянная времени должна быть ограничена в этом случае значениями в пределах 1 ÷ 2 с.

Отметим, что при значительном превышении сигналом уровня шума, их отношение может быть дополнительно улучшено с помощью некогерентного накопления, т. е. усреднением реализаций модуля функции видности, полученных при когерентном накоплении. При этом чувствительность определяется выражением [2]

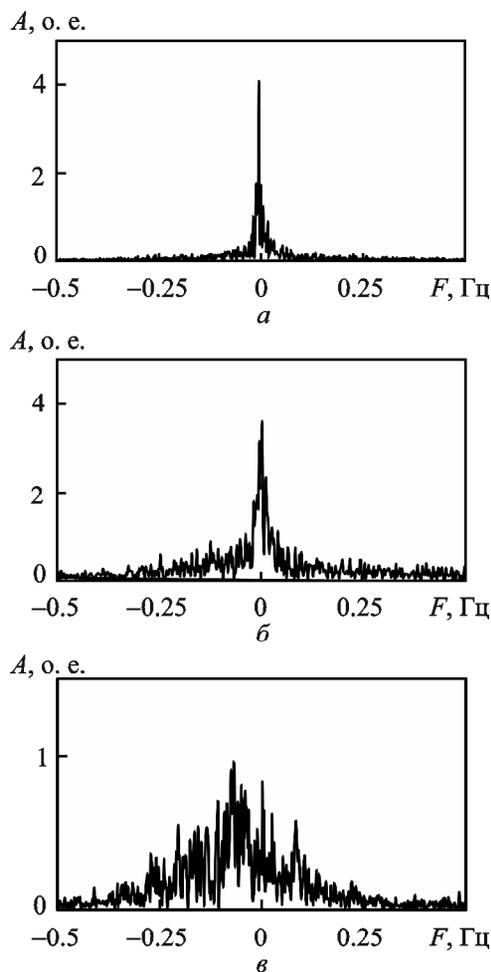


Рис. 1. Спектры выходного сигнала интерферометра при разной турбулентности среды распространения сигналов: *a* – слабые ионосферные мерцания, *б* – межпланетные мерцания, *в* – сильные межпланетные мерцания

$$S_{\min} = \frac{\alpha k_b T_{\text{sys}}}{\sqrt{A_1 A_2 N \Delta\nu T_c}},$$

где T_c – время когерентного накопления, N – количество усредняемых реализаций. При этом полное время накопления (T в формуле (3)) равно $T = NT_c$.

При исследованиях угловой структуры внегалактических радиоисточников, угловые размеры которых часто превышали критический размер (1), чувствительность интерферометров УРАН определялась полосой приемников 250 кГц и временем когерентного накопления, ограниченного фазовыми флуктуациями из-за ионосферных мерцаний, которые в худшем случае уменьшали это время до 10 с. В этом случае, например, чувствитель-

ность интерферометра УРАН-2 была ≈ 1 Ян при наблюдениях на “горячих” участках неба, где температура галактического фона максимальна, и улучшалась на “холодных” участках, а также при малом уровне мерцаний вплоть до 0.1 Ян. К тому же при малых временах усреднения чувствительность могла быть несколько увеличена некогерентным накоплением в пределах скана и усреднением часовых зависимостей функции видности, полученных за несколько дней наблюдений. Это позволило исследовать выборку из более чем 100 источников с потоками более $20 \div 30$ Ян.

В настоящее время на интерферометрах УРАН проводятся наблюдения выборки компактных радиоисточников галактической природы (миллисекундных пульсаров) и ряда далеких компактных радиогалактик. Эти объекты ранее на декаметровых волнах не исследовались и, как обнаружено, обладают существенно меньшей плотностью потока излучения – приблизительно несколько янских. Ввиду компактности источники могут мерцать на межпланетной плазме, что вызывает расширение спектра функции видности и уменьшает амплитуды его спектральных составляющих (см. рис. 1, в). При этом допустимое время когерентного накопления может уменьшаться до единиц секунд, что снижает радиометрический выигрыш и соотношение сигнал/шум на выходе коррелятора. К сожалению, при малом отношении сигнала/шум дальнейшее некогерентное накопление сигналов гораздо менее эффективно, поскольку определяется выражением [2]

$$S_{\min} = \frac{\alpha k_b T_{\text{sys}}}{\sqrt[4]{N} \sqrt{A_1 A_2 \Delta \nu T_c}}.$$

Часть радиотелескопов сети УРАН оборудована широкополосными цифровыми приемниками с большим динамическим диапазоном, позволяющими одновременно регистрировать всю полосу частот, принимаемую антеннами УТР-2 и УРАН, от 8 до 33 МГц. Однако ввиду ограничения на максимальные применимые полосы для интерферометрических наблюдений на декаметровых волнах чувствительность радиотелескопов с использованием этих приемников может возрасти лишь в $2 \div 2.5$ раза. Следовательно, единственно возможным способом повышения радиометрического выигрыша остается увеличение

времени когерентного накопления. Для определения возможности и условий его увеличения по описанной ниже методике были обработаны полученные ранее данные наблюдений радиоисточников на интерферометре с базой 153 км, состоящем из антенны Север–Юг радиотелескопа УТР-2 и антенны УРАН-2. Выбор этого инструмента определялся его базой и площадью составляющих его антенн, которые обеспечили разрешающую способность и высокую чувствительность, необходимые в данном исследовании.

4. Наблюдения

Наблюдения на интерферометрах УРАН проводятся с помощью аппаратурно-программного комплекса, описанного в [6], одновременно на частотах 20 и 25 МГц с регистрируемой полосой 250 кГц. Согласно используемой методике обработки зарегистрированных данных в программном корреляторе производится коррекция расчетной задержки сигналов, приходящих к антеннам интерферометра, которая вызвана движением источника относительно вектора базы. Однако в сигналах может присутствовать дополнительная сдвигка, которая определяется разницей задержек в антенно-аппаратурном комплексе каждого радиотелескопа и точностью привязки местных шкал времени. Для ее компенсации перед началом обработки выполняется поиск оптимальной задержки. Для его ускорения оказалось удобным включать в каждый сеанс наблюдений регистрацию сигнала от достаточно мощного и компактного радиоисточника, который заведомо дает интерференционные колебания на каждом интерферометре с высоким отношением сигнал/шум в условиях любых искажений, в том числе вызванных влиянием среды распространения сигналов. В качестве такого объекта, как правило, используется компактный компонент радиоисточника 3С144 (Крабовидная туманность) с угловым размером 1.5" и плотностью потока излучения ≈ 1000 Ян на частоте 25 МГц.

Этот компонент, благодаря компактному размеру, удобно использовать для определения параметров мерцаний на неоднородностях межпланетной среды. Регулярные наблюдения 3С144, проводившиеся в каждом сеансе наших интерферометрических исследований, дают возможность определить влияние межпланетной плазмы

на качество получаемых данных в зависимости от условий наблюдений. Конечно, компактная деталь мерцает также на неоднородностях ионосферы, и эти флуктуации сигнала необходимо отделить от межпланетных мерцаний. В структуре ЗС144, кроме компактного компонента, есть протяженная деталь с размером в несколько угловых минут и потоком излучения ≈ 2000 Ян, мерцания которой на ионосферных неоднородностях вносят существенный вклад во флуктуации сигнала на отдельном радиотелескопе. Однако, поскольку это образование не мерцает на межпланетной плазме и разрешается интерферометром, оно не вносит вклад в корреляционный продукт.

В [7] приведены спектры флуктуаций амплитуды сигнала на декаметровых волнах, вызванные мерцаниями на неоднородностях межпланетной среды и ионосферы. В этой работе показано, что при малых индексах мерцаний ширина спектра, определенная по частоте среза фильтра Френеля, составляет несколько сотых долей герца для ионосферных мерцаний и несколько десятых в случае межпланетных мерцаний. Эта особенность позволяет разделить мерцания сигнала, вызванные разными средами, с помощью метода частотной фильтрации, предложенного еще в [8].

Чтобы определить параметры фильтра, можно использовать данные наблюдений другого радиоисточника, размеры которого превышают предел, определенный выражением (1) для межпланетной среды, т. е. более $10''$. В то же время этот радиоисточник не должен полностью разрешаться интерферометром. Таким требованиям удовлетворяет радиогалактика ЗС123, угловая структура которой на декаметровых волнах известна по исследованиям на интерферометрах УРАН. Она состоит из нескольких компонентов с различными размерами и заметно разрешается интерферометром УРАН-2. Однако благодаря большой плотности потока, 1000 Ян, сигнал от радиогалактики на выходе интерферометра существенно превышает шумы и может быть использован для определения ширины спектра ионосферных мерцаний. С другой стороны, по данным, полученным в наблюдениях на интерферометрах УРАН-3 и УРАН-4 с большими длинами баз, этот источник не имеет компактных деталей с заметной плотностью потока, которые могли бы мерцать на межпланетной плазме.

5. Методика и результаты обработки наблюдений

Были обработаны более 20 сеансов наблюдений ЗС123, состоящих из $10 \div 15$ отдельных сканов. В каждом скане для временной зависимости корреляционного отклика на оптимальной задержке с помощью преобразования Фурье был получен спектр сигнала. В него методом наименьших квадратов вписывалась кривая гауссовой формы, ширина которой на уровне половинной амплитуды считалась шириной спектра интерференционных колебаний. Одновременно определялись также индексы амплитудных мерцаний, вычисленные по результатам измерения плотности потока излучения в одном из пунктов интерферометра – на радиотелескопе УТР-2. Анализируемые данные не отбирались в зависимости от времени наблюдения или направления прихода сигналов, следовательно характеризуют весь набор условий, реализующихся в наблюдениях. Полученная зависимость ширины спектра от индекса мерцаний на частоте 25 МГц показана на рис. 2.

Гистограмма на рис. 3 показывает, что 95 % всех полученных спектров имеют ширину менее 0.1 Гц. Приняв в качестве предельного значения ширины спектра ионосферных мерцаний 0.1 Гц, можно определить вклад в спектр интерференционного отклика мерцаний на неоднородностях межпланетной среды более компактного источника.

Для этого воспользуемся следующим алгоритмом. В спектре сигнала, полученного интерферометром УРАН-2 от компактного компонента радиоисточника ЗС144, с помощью гауссового фильтра с полосой 0.1 Гц выделим низкочастот-

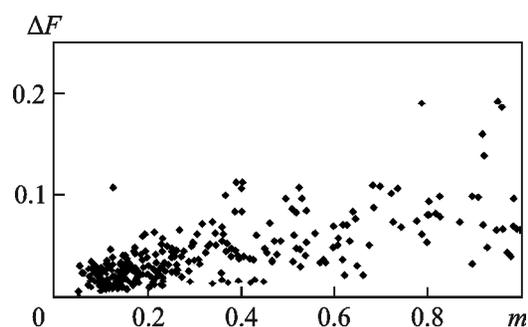


Рис. 2. Зависимость ширины спектра интерферометрических колебаний ΔF , определенной на интерферометре УРАН-2, от индекса ионосферных мерцаний m

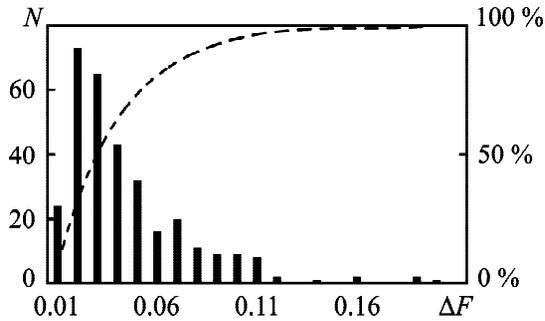


Рис. 3. Гистограмма распределения ширины спектра ионосферных мерцаний

ные компоненты сигнала и определим их суммарную энергию. Из того же полного сигнала с помощью фильтра с шириной полосы 0.4 Гц гарантированно выделим все составляющие спектра сигнала и частично подавим шумы вне полосы сигнала. Разность энергии спектральных компонентов в полосах 0.4 и 0.1 Гц отнесенная к полной энергии в полосе 0.4 Гц показывает относительную мощность межпланетных мерцаний (ОММ) – часть энергии в спектре, появившуюся благодаря межпланетным мерцаниям. Зависимость ОММ от элонгации радиоисточника ЗС144, т. е. от углового расстояния между лучом зрения в направлении ЗС144 и Солнцем, полученная в результате обработки данных наблюдений ЗС144 в течение шести лет, представлена на рис. 4. На этом графике отметим следующие особенности. Энергия мерцаний минимальна на элонгациях больших 100° , где ниже плотность плазмы на луче зрения и меньше проекция скорости солнечного ветра. Последнее определяет также меньшую ширину спектра мерцаний. По мере приближения луча зрения к Солнцу растут значения

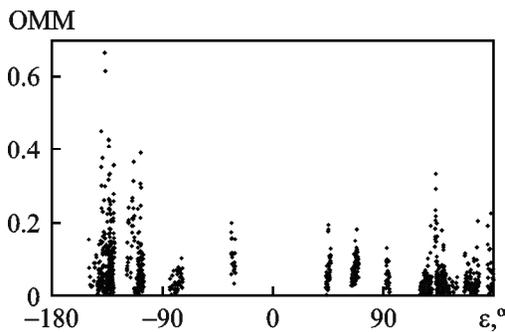


Рис. 4. Зависимость относительной мощности межпланетных мерцаний от элонгации радиоисточника ЗС144 ε

плотности среды и проекции скорости солнечного ветра. При этом увеличивается ширина спектра мерцаний и энергия, переходящая в высокочастотную часть спектра функции видности. Однако в левой части графика эта закономерность нарушается, здесь ОММ значительно увеличивается на элонгациях вблизи -130° . Подобный эффект наблюдался ранее с помощью интерферометра УРАН-1 [9]. Он связан с тем, что неоднородности солнечного ветра вытянуты вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля. Это поле заморожено в межпланетную плазму и имеет спиральную структуру из-за одновременного вращения Солнца и радиального движения солнечного ветра. На указанных элонгациях луч зрения в направлении на источник проходит вдоль силовой линии и длинной оси неоднородностей, что существенно уменьшает их поперечный размер, определяющий ширину спектра мерцаний.

Высокие значения ОММ определяют необходимость применения низкочастотного фильтра с максимальной шириной полосы, т. е. требуют времени когерентного накопления порядка $1 \div 2$ с. Однако значительное количество точек, особенно в правой части графика, имеют значения близкие к нулю, т. е. доля энергии сигнала в высокочастотной части спектра низкая. Это означает, что основная часть энергии содержится в спектральных составляющих в пределах 0.1 Гц, т. е. без особых потерь измеренной видности время когерентного накопления может быть увеличено до 10 с, что гарантированно охватывает все условия ионосферных мерцаний. Очевидно, что в случае малых индексов ионосферных мерцаний, которые в соответствии с гистограммой на рис. 3 наблюдаются в 40 % случаев, время накопления можно увеличить до 30 с и более. К сожалению, при наблюдении слабых источников невозможно контролировать состояние ионосферы по данным самих наблюдений. Однако можно чередовать их с наблюдениями более мощных протяженных источников с одновременным измерением индекса ионосферных мерцаний. Точно так же необходимо чередовать сканы компактных источников с малым и большим потоком излучения для контроля состояния межпланетной среды. Такая методика в сочетании с выбором оптимальных для наблюдений элонгаций позволит увеличить вре-

мя когерентного накопления для большей части наблюдений почти в 10 раз, а вместе с расширением полосы принимаемых частот до $1 \div 1.5$ МГц повысит чувствительность приблизительно на порядок.

6. Влияние солнечной активности

Зависимость, приведенная на рис. 4, показывает, что ОММ может существенно изменяться на одной элонгации. Можно предположить, что это происходит благодаря различным явлениям в межпланетной среде. Случаи увеличения индекса мерцаний, сопровождающие рост плотности протонов в солнечном ветре, наблюдались еще в 1978 г. на частоте 34 МГц [10]. На метровых волнах также фиксировалось увеличение индексов мерцаний, связанное с выбросом корональной массы [11]. В декаметровом диапазоне повышенные индексы межпланетных мерцаний компактных радиостанций наблюдались после регистрации спутниками на орбите Земли ударной волны, порожденной корональным выбросом массы с прешествовавшей ему мощной солнечной вспышкой [12]. Выявление такой связи в наших данных также было бы полезным для кратковременного прогноза при планировании высокочувствительных наблюдений.

В то же время отмечается, что спорадическая активность на Солнце далеко не всегда приводит к корональным выбросам массы, а последние, будучи обнаруженными вблизи Солнца, часто не наблюдаются в межпланетной среде [13]. Известно также, что повышенная турбулентность в межпланетной плазме может быть связана с корональными дырами и высокоскоростными струями солнечного ветра. В настоящее время возмущения в межпланетной среде регистрируются космическими лабораториями, в том числе и на орбите Земли. Спутники GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), ACE (Advanced Composition Explorer), SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) регистрируют параметры околоземной среды и позволяют судить о распространении корональных выбросов массы в межпланетной плазме. Подобные события отобраны и классифицированы, например, в работе [14], в которой предпринята также попытка установить корреляцию между возмущениями в межпланетной плазме на орбите Земли и проявлениями спо-

радической солнечной активности. Их обработка показывает, что не всегда изменению параметров околоземной плазмы соответствуют яркие солнечные события.

Для проверки связи изменений параметров околоземной плазмы с измеряемыми нами параметрами спектров интерференционных колебаний, а следовательно с изменением турбулентности в солнечном ветре, мы отобрали несколько событий из [14], которые были классифицированы авторами как “околоземные корональные выбросы массы”. Отбирались те события, которые соседствовали или совпадали по времени с проводившимися нами наблюдениями на интерферометрах УРАН. Так, например, 24.10.2011 г. спутник ACE обнаружил резкий скачок плотности и температуры околоземной плазмы, а также изменение скорости солнечного ветра с 350 до 500 км/с, произошедшее около 18:00 UT. Момент этого события отмечен стрелкой на рис. 5, на котором приведена зависимость от времени ОММ, вычисленной по описанной выше методике по данным наблюдений на УРАН-2.

Период этих наблюдений источника 3C144 соответствует элонгации $\approx 150^\circ$. Каждая точка на графике является результатом обработки одного семиминутного скана. Очевидно, что после момента скачкообразного изменения параметров плазмы увеличение турбулентности межпланетной среды за орбитой Земли продолжалось в течение трех суток. Отметим, что данное событие сопровождалось также изменением геомагнитного индекса с задержкой на 1.5 сут. Интересно, что, по данным спутника GOES, более чем за двое суток до изменения параметров плазмы в 10:25 UT

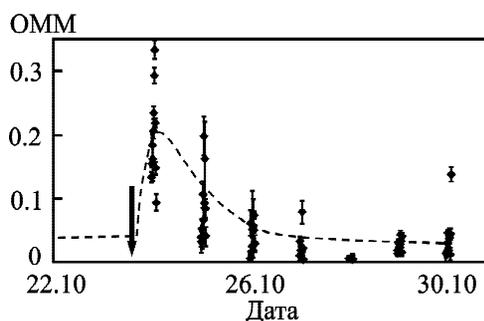


Рис. 5. Зависимость ОММ от времени, построенная по данным наблюдений на интерферометре УРАН-2 в октябре 2011 г. после регистрации межпланетного коронального выброса массы на орбите Земли

22.10.2011 г. произошло существенное увеличение рентгеновского излучения и потока протонов от Солнца, что свидетельствует о мощной спорадической активности последнего. В каталоге [15] (The SOHO LASCO CME catalog)¹ этому времени соответствует корональный выброс типа гало с массой $1.2 \cdot 10^{16}$ г и энергией $6.2 \cdot 10^{30}$ эрг, направленный в сторону Земли. Скорость этого выброса, согласно данным каталога, была более 1000 км/с, и он мог бы достичь Земли за столь короткое время даже с учетом уменьшения скорости при взаимодействии с более медленным солнечным ветром. На рис. 6 показан снимок, сделанный коронографом C3 SOHO через несколько часов после начала этого коронального выброса массы.

Другое событие в околоземной плазме, определенное авторами [14] как “околоземный корональный выброс массы”, произошло непосредственно в момент проведения наблюдений на интерферометрах УРАН 19.02.2010 г. В этом случае изменения параметров околоземной плазмы были гораздо менее сильными и быстрыми, скорость солнечного ветра, например, изменилась с 400 до 450 км/с. Не было зафиксировано изменения геомагнитного индекса, отсутствовало увеличение протонного потока, и были отмечены лишь небольшие колебания интенсивности рентгеновского излучения в предыдущие несколько дней. Не было зарегистрировано также значительного околосолнечного коронального выброса массы. В то же время увеличение турбулентности среды, обнаруженное нами по изменению ОММ, было более значительным, чем в предыдущем случае. График изменения ОММ приведен на рис. 7, где стрелкой отмечен момент “околоземного коронального выброса массы”.

Следует заметить, что направление луча зрения в этих наблюдениях соответствует зоне повышенной турбулентности на элонгациях $\approx -130^\circ$, что отразилось и на уровне ОММ до прихода возмущения – здесь он гораздо выше, чем в предыдущем случае. Тем не менее повышение уровня турбулентности в межпланетной среде после прихода возмущения хорошо различимо.

¹ This CME catalog is generated and maintained at the CDAW Data Center by NASA and The Catholic University of America in cooperation with the Naval Research Laboratory. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.

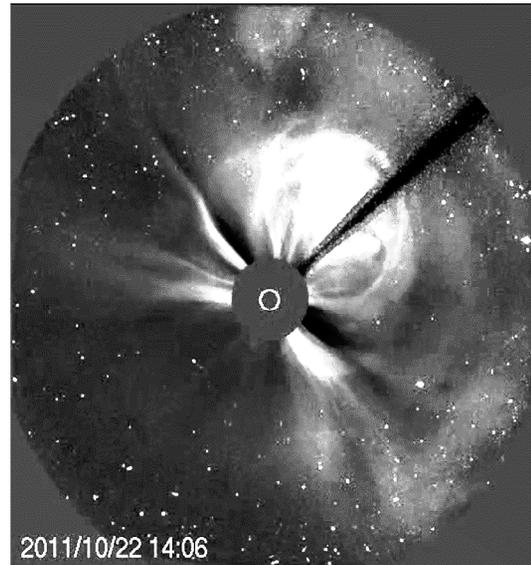


Рис. 6. Корональный выброс массы, зарегистрированный коронографом C3 SOHO 22.10.2011 г.

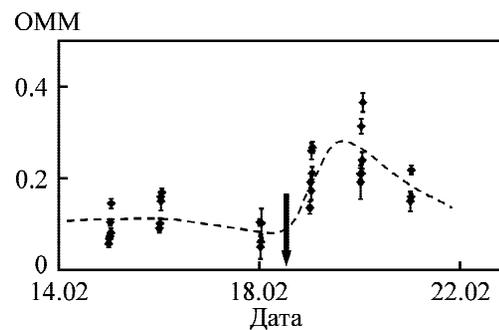


Рис. 7. Зависимость ОММ от времени, построенная по данным наблюдений на интерферометре УРАН-2 в феврале 2010 г.

7. Выводы

1. Для определения влияния межпланетных мерцаний на чувствительность интерферометрических наблюдений в декаметровом диапазоне волн проведена обработка данных, полученных в наблюдениях на интерферометрах УРАН двух радиоисточников: протяженной радиогалактики 3С123 и компактного компонента в Крабовидной туманности 3С144.

2. Показано, что ширина спектра сигнала на выходе интерферометра УРАН-2 при наблюдениях 3С123, определяемая ионосферными мерцаниями, в 95 % случаев ограничена значением 0.1 Гц. Это позволяет использовать частотную фильтрацию для отделения ионосферных мерцаний от межпланетных, спектр которых имеет, как правило, большую ширину.

3. Для массива данных шестилетних наблюдений 3C144 с помощью предложенного варианта частотного разделения ионосферных и межпланетных мерцаний определена относительная часть энергии в спектре функции видности интерферометра, обусловленная только межпланетными мерцаниями.

4. Обнаружено, что уровень межпланетных мерцаний существенно изменяется в зависимости от условий наблюдений. При этом допустимое время когерентного накопления, определяющее чувствительность интерферометра при наблюдении слабых компактных радиоисточников, может увеличиваться от нескольких секунд при большом уровне турбулентности межпланетной среды до десятков секунд в зависимости от уровня ионосферных мерцаний. Для выбора оптимального времени когерентного накопления необходимо контролировать состояние ионосферы и межпланетной среды. С этой целью нужно одновременно с исследуемыми радиоисточниками наблюдать протяженные объекты и мощные компактные источники.

5. Показано, что для достижения наибольшей чувствительности необходимо проводить наблюдения на элонгациях больших 100° и избегать “области” -130° , где наблюдается повышенный уровень мерцаний.

6. Предложенная методика обработки позволила уверенно обнаружить повышение турбулентности среды при резких изменениях параметров солнечного ветра, измеряемых на орбите Земли и связанных, предположительно, с проявлениями спорадической солнечной активности. Этим можно объяснить значительный разброс измеренных значений относительной мощности межпланетных мерцаний. Зависимость турбулентности межпланетной среды от спорадической солнечной активности позволит в будущем использовать информацию орбитальных лабораторий для краткосрочного прогноза благоприятных условий для высокочувствительных наблюдений. С другой стороны, предложенную методику можно применять для исследования проявлений спорадической солнечной активности в межпланетной плазме за орбитой Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
2. Томпсон А. Р., Моран Д. М., Свенсон Д. У. *Интерферометрия и синтез в радиоастрономии*. Москва: Физматлит, 2003. 624 с.
3. Гочелашвили К. С., Шишов В. И. *Волны в случайно-неоднородных средах. Т. 1*. Москва: ВИНТИ АН СССР, 1981. 144 с.
4. Гундзе Е., Чжаохань Л. Мерцания радиоволн в ионосфере. *ТНЭР*. 1982. Т. 70, № 4. С. 5–45.
5. Рашковский С. Л., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Ващишин Р. В. Измерение плотности потока излучения радиоисточников в интерферометрической сети УРАН. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013, Т. 18, № 4. С. 291–300.
6. Рашковский С. Л., Белов А. С., Иванов А. С., Лозинский А. Б., Шепелев В. А. Новый аппаратно-программный комплекс УРАН. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2012. Т. 17, № 3. С. 207–217.
7. Калиниченко Н. Н., Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Браженко А. И. Разделение межпланетных и ионосферных мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18, № 3. С. 210–219.
8. Бовкун В. П., Жук И. Н. Спектры мерцаний на неоднородностях ионосферы и межпланетной плазмы и возможность их разделения в декаметровом диапазоне радиоволн. *Доклады АН УССР. Сер. А*. 1981. № 6. С. 69–71.
9. Брауде С. Я., Галанин В. В., Инютин Г. А., Мень А. В., Мори Х., Рашковский С. Л., Синицын В. Г., Шарыкин Н. К. Турбулентная структура солнечного ветра по наблюдениям в декаметровом диапазоне радиоволн. *Астрономический журнал*. 1995. Т. 72, № 5. С. 761–766.
10. Erskine F. T., Cronyn W. M., Shawhan S. D., Roelof E. C., and Gotwols B. L. Interplanetary scintillation at large elongation angles: Response to solar wind density structure. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 1978. Vol. 83, Is. A9. P. 4153–4164. DOI: 10.1029/JA083iA09p04153
11. Глянец А. В., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Наблюдения выбросов корональной массы методом межпланетных мерцаний вблизи максимума 24-го цикла солнечной активности. *Астрономический журнал*. 2015. Т. 92, № 1. С. 46–52. DOI: 10.7868/S0004629915010053
12. Калиниченко Н. Н., Коноваленко А. А., Браженко А. И., Соловьев В. В. Корональный выброс массы 15 февраля 2011 г. в межпланетном пространстве и его наблюдения методом мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18, № 4. С. 301–308.

13. Кузнецов В. Д. Корональные выбросы массы. *Плазменная гелиогеофизика. Т. 2.* Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. Москва: Физматлит, 2008. С. 81–98.

14. Richardson, I. and Cane, H. *Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections Since January 1996.* 2019. URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> (дата обращения 15.04.2020).

15. The SOHO LASCO CME catalog. *CDAW data center.* URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 15.04.2020).

REFERENCES

1. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZAR-
KA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-
KIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANI-
SLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DO-
ROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YE-
RIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNICHEN-
KO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A.,
KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KHRIS-
TENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A.,
BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNI-
CHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOST-
NA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M.,
KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEV-
CHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A.,
VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAV-
TSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRA-
ZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHO-
VYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUC-
KER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECA-
CHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M.,
TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C.
and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network
in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42,
is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x

2. THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWEN-
SON JR., G. W., 2017. *Interferometry and Synthesis in
Radio Astronomy.* Cham, Switzerland: Springer. DOI:
10.1007/978-3-319-44431-4

3. GOCHELASHVILI, K. S. and SHISHOV, V. I., 1981.
Waves in randomly inhomogeneous media. Moscow, Rus-
sia: VINITI Publ. (in Russian).

4. KUNG CHIE, E. and CHAO-HAN, L., 1982. Radio wave
scintillations in the ionosphere. *Proc. IEEE.* vol. 70, is. 4,
pp. 324–360. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313

5. RASHKOVSKIY, S. L., SHEPELEV, V. A., INUTIN, G. A.
and VASHCHISHIN, R. V., 2013. Measurements of Radio
Source Flux Density with the Interferometer Network
URAN. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 4,
pp. 291–300. (in Russian).

6. RASHKOVSKIY, S. L., BELOV, A. S., IVANOV, A. S.,
LOZINSKIY, A. B. and SHEPELEV, V. A., 2012.
The URAN's New Facilities and Software. *Radio Phys.
Radio Astron.* vol. 17, no. 3, pp. 207–217. (in Russian).

7. KALINICHENKO, N. N., FALCOVICH, I. S., KONO-
VALENKO, A. A. and BRAZHENKO, A. I., 2013. Sepa-
ration of Interplanetary and Ionospheric Scintillations
of Cosmic Sources at Decameter Wavelengths. *Radio
Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 3, pp. 210–219. (in Russian).

8. BOVKUN, V. P. and ZHUK, I. N., 1981. Spectra of scin-
tillations due to ionospheric and interplanetary plasma
inhomogeneities and a possibility of their separation in the
decametric wave range. *Doklady AN USSR. Ser. A.* no. 6,
pp. 69–71. (in Russian).

9. BRAUDE, S. YA., GALANIN, V. V., INYUTIN, G. A.,
MEN', A. V., MORI, KH., RASHKOVSKII, S. L., SINI-
TSYN, V. G. and SHARYKIN, N. K., 1995. The turbulent
structure of the solar wind from observations in the deca-
meter radio wavelength range. *Astron. Rep.* vol. 39, is. 5,
pp. 678–683.

10. ERSKINE, F. T., CRONYN, W. M., SHAWHAN, S. D.,
ROELOF, E. C. and GOTWOLS, B. L., 1978. Interplane-
tary scintillation at large elongation angles: Response
to solar wind density structure. *J. Geophys. Res. Space
Phys.* vol. 83, is. A9, pp. 4153–4164. DOI: 10.1029/
JA083iA09p04153

11. GLYANTSEV, A. V., TYUL'BASHEV, S. A., CHASHEI, I. V.
and SHISHOV, V. I., 2015. Interplanetary-scintillation
observations of coronal mass ejections near the maximum
of the 24th solar-activity cycle. *Astron. Rep.* vol. 59, no. 1,
pp. 40–45. DOI: 10.1134/S1063772915010047

12. KALINICHENKO, N. N., KONOVALENKO, A. A.,
BRAZHENKO, A. I. and SOLOV'EV, V. V., 2013. 2011
February 15 CME in the Interplanetary Medium by Ob-
servations of Radio Source Scintillations at the Decameter
Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 4,
pp. 301–308. (in Russian).

13. KUZNETSOV, V. D., 2008. Coronal mass ejections. In:
L. M. ZELENY and I. S. VESELOVSKY, eds. *Plasma He-
liogeophysics. Vol. 2.* Moscow, Russia: Fizmatlit Publ.,
pp. 81–98. (in Russian).

14. RICHARDSON, I. and CANE, H., 2019. *Near-Earth
Interplanetary Coronal Mass Ejections Since January
1996* [online]. [viewed 15 April 2020]. Available from:
[http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/
icmetable2.htm](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm)

15. CDAW DATA CENTER, 2020. *The SOHO LASCO CME
catalog* [online]. [viewed 15 April 2020]. Available from:
https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

V. O. Shepelev¹, O. O. Litvinenko¹, K. Georgieva²,
and B. Kirov²

¹ Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

² Space Research and Technology Institute,
Bulgarian Academy of Sciences,
bl. 1, Acad. G. Bonchev St., Sofia, 1113, Bulgaria

INFLUENCE OF THE SOLAR WIND ON INTERFEROMETRIC OBSERVATIONS AT THE DECAMETER WAVELENGTHS

Purpose: The effect of the Earth's ionosphere and interplane-
tary plasma on the radio astronomy observations, in particular,
interferometric ones, at decameter waves has been investigated.
The amplitude and phase fluctuations of an incident electromag-
netic wave field are observed upon diffraction by a plasma layer
with inhomogeneities of electron density. In interferometric ob-
servations, the phase fluctuations of an output signal cause

a decrease in coherence time and an increase in the interferometer response spectrum width that limits the time of coherent averaging and reduces the instrument sensitivity. The purpose of the study is to assess the degree of ionospheric and interplanetary scintillations influence on the sensitivity of interferometric observations and to determine the possibility of sensitivity increasing that is needed in observations of angular structure of weak compact radio sources.

Design/methodology/approach: To determine the contribution of ionospheric scintillations to the broadening of an interferometer output signal spectrum, the radio source with such an angular size, which prevents its scintillations on the solar wind inhomogeneities, but makes it possible to observe the source using the URAN-2 interferometer with the baseline of 153 km, was used. Processing a large amount of observational data made it possible to determine the signal spectrum width at the output of the interferometer under the condition of amplitude and phase scintillations on ionospheric inhomogeneities. Then, the interferometer was used to observe a compact radio source, whose signal fluctuations are affected by both the ionosphere and the interplanetary medium. The preliminary obtained spectral widths of the ionosphere scintillations made it possible to single out the effect of just interplanetary inhomogeneities on the interferometer response.

Findings: The constraints on the time of coherent averaging imposed by the influence of interplanetary plasma have been determined. Some suggestions as for changing the method of observation with the URAN interferometers at decameter wavelengths are made for more correct and efficient study of weak compact objects. The influence of large-scale features of the solar wind structure, related to the form of lines of force of the interplanetary magnetic field and to the form of spatial spectrum of inhomogeneities on the sensitivity of low-frequency interferometric observations was found. An increase in turbulence of the interplanetary medium beyond the Earth's orbit lasting up to several days, conjugate with manifestations of the sporadic solar activity, was also detected.

Conclusions: The study allows to determine the interplanetary medium influence on the limitation of sensitivity in the interferometric observations and find optimal elongations for studying the angular structure of weak radio sources. An account of solar activity events can be used for a short-term forecast when determining the strategy of highly sensitive observations. The proposed method for detecting the solar wind turbulence can be used in studying the process of interaction of the solar events with the interplanetary medium.

Key words: ionosphere, interplanetary medium, interferometer, scintillation spectrum, sensitivity

В. О. Шепелев¹, О. О. Литвиненко¹, К. Георгиева², Б. Кіров²

¹Радиоастрономічний інститут НАН України, вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Інститут космічних досліджень і технологій Болгарської АН, вул. Акад. Г. Бончев, бл. 1, м. Софія, 1113, Болгарія

ВПЛИВ СОНЯЧНОГО ВІТРУ НА ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ В ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Предмет і мета роботи: Досліджується вплив іоносфери Землі і міжпланетної плазми на радіоастрономічні, зокрема

інтерферометричні, спостереження на декаметрових хвилях. При дифракції на шарі плазми з неоднорідностями електронної концентрації спостерігаються амплітудні і фазові флуктуації поля падаючої електромагнітної хвилі. При інтерферометричних спостереженнях фазові флуктуації вихідного сигналу викликають зменшення часу когерентності і збільшення ширини спектра відгуку інтерферометра, що призводить до обмеження часу когерентного накопичення і знижує чутливість інструменту. Метою роботи є визначення ступеню впливу іоносферних і міжпланетних мерехтін на чутливість інтерферометричних спостережень і оцінка можливості підвищення чутливості, що необхідно при дослідженні кутової структури слабких компактних радіоджерел.

Методи і методологія: Для визначення вкладу іоносферних мерехтін у збільшення ширини спектра вихідного сигналу інтерферометра обрано радіоджерело з кутовими розмірами, які виключають його мерехтіння на неоднорідностях сонячного вітру, проте дають можливість спостерігати його на інтерферометрі URAN-2 з базою 153 км. Обробка великої кількості спостережних даних дозволила визначити ширину спектра сигналу на виході цього інтерферометра за умов амплітудних і фазових мерехтін на іоносферних неоднорідностях. Потім інтерферометр було використано для спостереження компактного радіоджерела, на отриманий сигнал якого впливають як іоносфера, так і міжпланетне середовище. Попередньо отримані параметри ширини спектра іоносферних мерехтін дозволили виділити вплив саме неоднорідностей міжпланетного середовища на інтерферометричний відгук.

Результати: Визначено межі зміни часу когерентного накопичення через вплив міжпланетної плазми. Надано рекомендації щодо змінення методики спостережень для коректнішого та ефективнішого дослідження слабких компактних об'єктів за допомогою мережі інтерферометрів URAN на декаметрових хвилях. Виявлено вплив великомасштабних особливостей структури сонячного вітру, пов'язаних з формою силових ліній міжпланетного магнітного поля і видом просторового спектра неоднорідностей, на чутливість низькочастотних інтерферометричних спостережень. Зареєстровано підвищення турбулентності міжпланетного середовища за орбітою Землі тривалістю у декілька діб, пов'язане з проявами спорадичної активності Сонця.

Висновок: Виконане дослідження дозволяє визначити межі впливу міжпланетного середовища на чутливість інтерферометричних спостережень і встановити оптимальні елонгації для виконання досліджень кутової структури слабких радіоджерел. Врахування впливу сонячної активності можна використовувати для короткочасного прогнозу при визначенні стратегії високочутливих спостережень. Методика визначення турбулентності сонячного вітру може бути застосована для дослідження процесу взаємодії сонячних подій з міжпланетним середовищем.

Ключові слова: іоносфера, міжпланетне середовище, інтерферометр, спектр мерехтін, чутливість

Статья поступила в редакцию 12.03.2020