

УДК 523.164.42

Н. Н. КАЛИНИЧЕНКО¹, И. С. ФАЛЬКОВИЧ¹,
А. А. КОНОВАЛЕНКО¹, А. И. БРАЖЕНКО²¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: kalinich@rian.kharkov.ua² Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36014, Украина
E-mail: brazhai@gmail.com

РАЗДЕЛЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

Сделана экспериментальная оценка влияния ионосферы Земли на статистические характеристики мерцаний компактных космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн (кросс-корреляционную функцию мерцаний на двух частотах, кросс-корреляционную функцию мерцаний на разнесенных радиотелескопах, энергетический спектр мерцаний, плотность распределения вероятностей мерцаний). Разработана новая методика выделения межпланетных мерцаний из данных наблюдений на радиотелескопах системы УРАН.

Ключевые слова: межпланетные мерцания, ионосферные мерцания, декаметровый диапазон, цифровой спектральный анализатор

1. Введение

Радиоизлучение космических источников, проходя через ионосферу Земли, испытывает ее влияние. Ионосферные эффекты усиливаются с уменьшением частоты наблюдений, приближением ее к критической частоте ионосферы Земли (5 ÷ 6 МГц). Поэтому важный для радиоастрономии декаметровый диапазон длин волн с этой точки зрения оказывается наиболее уязвимым. Одним из направлений декаметровой радиоастрономии, где учет влияния ионосферы Земли особенно важен, являются наблюдения мерцаний на неоднородностях межпланетной плазмы (ММП) космических радиоисточников. Межпланетные мерцания – это вариации интенсивности принимаемого сигнала, вызванные движением неоднородностей межпланетной плазмы на пути его распространения [1]. Исследования межпланетных мерцаний позволяют получать ценную информацию о параметрах солнечного ветра (в том числе и в областях космоса, недоступных для космических аппаратов), а также оценивать угловые размеры самих просвечивающих радиоисточников [2, 3]. Интенсивность мерцаний зависит от элонгации ε (угла между направлением на Солнце и направлением на просвечивающий радиоисточник) и длины волны λ . На больших

элонгациях мерцания слабые вследствие низкой электронной концентрации на луче зрения. С приближением последнего к Солнцу мерцания усиливаются вследствие увеличения рассеяния на неоднородностях более плотной межпланетной плазмы, достигают максимума, затем постепенно ослабевают, становясь насыщенными, и, в конце концов, практически полностью исчезают [4].

При наблюдениях мерцаний космических источников на декаметровых радиоволнах флуктуации интенсивности сигнала содержат вклад как межпланетной среды, так и ионосферы Земли. К мерцаниям на ионосферных неоднородностях (МИ) приводят флуктуации электронной плотности на высотах F области вблизи главного максимума ионосферы Земли (200 ÷ 350 км) [5, 6]. В некоторых случаях, например днем, за мерцания могут быть ответственны неоднородности E слоя ионосферы [7]. Оценка частоты среза фильтра Френеля в энергетическом спектре мерцаний на рабочих частотах 10 ÷ 30 МГц для межпланетной и ионосферной плазмы дает 0.06 ÷ 0.1 Гц и 0.02 ÷ 0.04 Гц соответственно. Таким образом, частота излома в энергетическом спектре мерцаний на неоднородностях межпланетной плазмы и ионосферы Земли при наблюдениях точечных источников отличается. Так как в декаметровом диапазоне радиоволн вследствие рассеяния на межзвездной среде минимальные угловые размеры радиоисточников

больше $1''$ (что приводит к сужению энергетического спектра мерцаний) это отличие становится не столь очевидным. Однако наблюдения подтвердили возможность спектрального разделения ММП и МИ [8]. В работе [9] получены частотные корреляционные функции для ММП и МИ в полосе рабочих частот $20 \div 30$ МГц. За прошедшие годы принципиально изменилась методика наблюдений межпланетных мерцаний на системе декаметровых радиотелескопов УРАН – в экспериментах одновременно используются два-три разнесенных радиотелескопа, а также во всех пунктах системы УРАН введены в эксплуатацию новые цифровые спектральные анализаторы DSP-z [10]. Изменение методики наблюдений, введение в эксплуатацию новой системы приема и регистрации данных требуют разработки новых методов разделения ММП и МИ, при этом наличие измерений в двух-трех пунктах, а также уникальные параметры DSP-z позволяют решить эту задачу на новом уровне. Следует отметить, что первые изображения мерцаний, полученные ранее с помощью цифрового спектрального анализатора более ранней модификации “Robin” на радиотелескопе УТР-2, также указывали на разный характер межпланетных и ионосферных мерцаний космических радиоисточников и хорошие перспективы использования этого типа устройств для исследований явления мерцаний [11].

Цель работы – экспериментальная оценка влияния ионосферы Земли на статистические характеристики мерцаний компактных космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн (кросс-корреляционную функцию мерцаний на двух частотах, кросс-корреляционную функцию мерцаний на разнесенных радиотелескопах, энергетический спектр мерцаний, плотность распределения вероятностей мерцаний), а также разработка новой методики выделения межпланетных мерцаний из данных наблюдений на радиотелескопах системы УРАН.

2. Наблюдения

В период с 21 по 28 января 2013 г. на двух радиотелескопах, УТР-2 в Радиоастрономической обсерватории имени С. Я. Брауде РИ НАН Украины (пос. Граково Харьковской обл.) [12] и УРАН-2 (Полтава) [13] (база 152 км), была проведена сессия синхронных наблюдений космических радиоисточников. Широкополосный ($8 \div 32$ МГц) Т-образный радио-

телескоп УТР-2 состоит из двух антенных решеток: “С–Ю” (направление север – юг) и “З–В” (направление запад – восток), – и имеет в настоящее время наибольшую эффективную площадь – $150\,000\text{ м}^2$. Антенная система радиотелескопа УРАН-2 выполнена в виде многоэлементной прямоугольной горизонтальной фазированной решетки с размерами 238×118 м. Полоса рабочих частот радиотелескопа УРАН-2 также находится в диапазоне $8 \div 32$ МГц.

В качестве просвечивающих источников были выбраны мощные радиоисточники 3С144, 3С196 и 3С274 (элонгация для всех радиоисточников в период наблюдений $\epsilon > 110^\circ$). Наблюдения 3С144 в декаметровом диапазоне радиоволн методами мерцаний [14] и интерферометрии [15, 16] показали наличие в его структуре компактной детали с угловым размером $\theta < 5''$ и потоком излучения порядка 1000 Ян на частотах 20 и 25 МГц. Радиоисточник 3С196 отождествляется с квазаром и также содержит компактную деталь. Согласно данным интерферометрии [17] параметры компактной детали радиоисточника 3С196 следующие: угловой размер $\theta = 2.4'' \pm 0.13''$ (на частоте 20 МГц) и $\theta = 2.2'' \pm 0.05''$ (на частоте 25 МГц), поток порядка $(100 \pm 10)\text{ Ян}$ на частотах 20 и 25 МГц. Метод мерцаний дает угловой размер $\theta = 2.0'' \pm 1.5''$ и поток $(130 \pm 25)\text{ Ян}$ на частоте 25 МГц [14]. На рабочих частотах $f < 100$ МГц радиоисточник 3С274 (Дева А) имеет поток излучения порядка 5000 Ян и состоит из двух компонентов. Первый компонент – ядро с угловым размером $\theta \approx 1'$, второй – гало с угловым размером $\theta \approx 16'$, причем структура и угловой размер компонентов в указанном диапазоне частот во много раз превышают угол рассеяния на луче зрения и слабо зависят от частоты [18, 19].

Представляет интерес оценка углового размера первой зоны Френеля θ_F для межпланетной среды и ионосферы Земли в интересующем диапазоне рабочих частот. Зона Френеля определяет, будет или нет мерцать радиоисточник на неоднородностях указанных сред,

$$\theta_F = \frac{2\pi}{\sqrt{kz}},$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны наблюдений; z – расстояние до рассеивающего слоя. Для $z = 1$ а. е. (межпланетная среда) и $\lambda = 12$ м выражение (1) дает $\theta_F \approx 5''$, а для $z = 350$ км

(ионосфера) – $\theta_F \approx 50'$. Другими словами, источники с угловым размером $\theta < 5''$ мерцают на неоднородностях межпланетной среды и ионосферы, а с угловым размером $5'' < \theta < 50'$ – только на неоднородностях ионосферы, при $\theta > 50'$ не мерцают ни на одной из рассматриваемых сред. Таким образом, наблюдения группы радиостанций ЗС144, ЗС196 и ЗС274 очень удобны для оценки влияния ионосферы Земли, поскольку радиостанция ЗС274 обнаруживает исключительно ионосферные мерцания, а ЗС144 и ЗС196 – оба типа мерцаний (ММП и МИ).

Радиостанции наблюдались в интервале часовых углов $\pm 1^h$ вблизи верхней кульминации сканамы по 4 мин. Данные в обоих пунктах регистрировались цифровыми спектральными анализаторами DSP-z. Этот широкополосный ($\Delta f = 32$ МГц) цифровой спектральный анализатор имеет большой динамический диапазон (более 70 дБ) и позволяет путем преобразования Фурье принимаемого сигнала получить до 8192 отдельных частотных каналов с разрешением 4 кГц. На входы DSP-z подавалась сумма и разность сигналов антенн “С-Ю” (4 секции) и “З-В” при измерениях на УТР-2 и сумма и разность сигналов одной поляризации от двух половинок антенны при измерениях на УРАН-2. Запись данных производилась в режиме полной мощности со следующими параметрами анализа: полоса частот – 20.63 ÷ 28.88 МГц, постоянная усреднения индивидуальных спектров $t_{yc} = 20$ мс. Режим полной мощности – это один из возможных режимов работы DSP-z, при котором входные сигналы (в нашем случае сигналы суммы и разности) $x_{\pm}(\tau)$ преобразуются в двумерные спектрограммы $u_{\pm}(t, f)$ или динамические спектры посредством преобразования Фурье [10]:

$$u_{\pm}(t, f) = |X_{\pm}(t, f)|^2, \quad (1)$$

$$X_{\pm}(t, f) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} x_{\pm}(\tau) g(\tau-t) e^{-i2\pi f \tau} d\tau,$$

где $g(t-\tau)$ – окно, а T – длительность окна, скользящего вдоль оси времени, t – положение его центра.

$$T = N_w \Delta t_s,$$

где N_w – размер окна, $\Delta t_s = 1/f_s$, f_s – частота дискретизации данных.

В нашем случае $N_w = 2^{14} = 16384$, $f_s = 66$ МГц и мы имеем 2048 частотных каналов, отстоящих на $\Delta f = f_s/N_w \approx 4$ кГц друг от друга.

3. Методика обработки данных

Обработка данных состояла в следующем. На первом этапе из мощности суммы и мощности разности сигналов антенн, получавшихся в DSPz, рассчитывался сигнал $u = u_+ - u_-$, соответствующий перемноженной диаграмме направленности радиотелескопов УТР-2 и УРАН-2. Затем в записях, полученных в двух пунктах, вблизи моментов прохождения источника через максимум диаграммы направленности радиотелескопа выбирались синхронные временные реализации длительностью $T_p = 120$ с и проводилось усреднение данных по частотным каналам. Для данных, полученных на радиотелескопе УТР-2, усреднение обычно проводилось по 68 частотным каналам согласно формуле

$$U_j(t, f_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1+n(j-1)}^{jn} u(t, f_k),$$

$$f_j = (f_{jn} - f_{1+n(j-1)})/2,$$

где $n = 68$, $j = 1 \div 30$.

Выбор конкретного числа усредняемых частотных каналов ($n = 68$) был сделан на основе анализа данных наблюдений за 2010–2013 гг. С одной стороны, он обеспечил хорошее отношение сигнал/шум при оценке корреляции между частотными каналами, а с другой – достаточное частотное разрешение для селекции каналов, пораженных помехами. При обработке данных наблюдений на радиотелескопе УРАН-2 для получения чувствительности измерений, близкой к той, что достигается при анализе данных наблюдений на УТР-2, применялось усреднение по большему числу каналов ($n = 340$). Таким образом, при дальнейшей обработке анализировались 30 частотных каналов с полосой 0.272 МГц каждый для УТР-2 и 6 частотных каналов с полосой 1.36 МГц каждый для УРАН-2, перекрывающих всю полосу 20.63 ÷ 28.88 МГц.

Дальнейшая обработка данных состояла в оценке для каждого пункта наблюдений статистических характеристик принимаемого сигнала. Кросс-корреляционная функция мерцаний на разнесенных

радиотелескопах, энергетический спектр мерцаний, плотность распределения вероятностей мерцаний и индекс мерцаний оценивались вблизи середины частотного диапазона 20.63 ÷ 28.88 МГц, а кросс-корреляционная функция мерцаний на двух частотах определялась по двум каналам на краях диапазона 20.63 ÷ 28.88 МГц, разнесенным минимум на 4 МГц.

Энергетический спектр мерцаний $P(\nu)$ оценивался с помощью процедуры, аналогичной той, что использовалась для получения динамических спектров (1). При этом аргументом функции является не рабочая частота, а частота мерцаний ν , определяемая постоянной усреднения индивидуальных спектров t_{yc} ($\nu_{max} = 1/t_{yc} = 50$ Гц).

Индекс мерцаний рассчитывался по формуле

$$m = \frac{\sigma_m}{\overline{I(t)}} = \frac{\sqrt{\sigma_{(m+ш)}^2 - \sigma_{ш}^2}}{\overline{I(t)}},$$

где $\overline{I(t)}$ – средняя интенсивность источника, включающая вклад как мерцающего, так и немерцающего (протяженного) компонентов; σ_m^2 , $\sigma_{ш}^2$, $\sigma_{(m+ш)}^2$ – дисперсии процессов мерцаний, шума и их суммы. Дисперсии $\sigma_{(m+ш)}^2$ и $\sigma_{ш}^2$ определялись из энергетических спектров мерцаний путем интегрирования соответствующих частей спектра:

$$\sigma_{m+ш}^2 = \int_{1/t_p}^{1/t_{yc}} P_{(m+ш)}(\nu) d\nu, \quad \sigma_{ш}^2 = \int_{1/t_p}^{1/t_{yc}} P_{ш}(\nu) d\nu,$$

где ν – частота мерцаний, $P_{m+ш}$ – энергетический спектр мерцаний, $P_{ш}$ – область энергетического спектра мерцаний $P_{m+ш}$, обусловленная шумом. Кросс-корреляционные функции мерцаний на двух частотах и двух радиотелескопах, $R_f(\tau)$ и $R_s(\tau)$, оценивались согласно выражению $R(\tau) = \int_{-T_p}^{T_p} I_1(t)I_2(t+\tau)dt$. При этом для первой функции величины I_1 и I_2 – это интенсивности принимаемого сигнала в частотных каналах на краю частотного диапазона 20.63 ÷ 28.88 МГц, а во втором случае I_1 и I_2 – это интенсивности сигнала мерцаний, определенные из динамических спектров, построенных в двух пунктах наблюдений. Плотность распределения вероятностей мерцаний W определялась стандартным образом как вероятность флуктуаций $(I - \overline{I})/\sigma$.

4. Результаты и обсуждение

Проанализируем статистические характеристики мерцаний для трех важных случаев: слабое влияние ионосферы, слабые и сильные ионосферные мерцания.

4.1. Слабое влияние ионосферы Земли

На рис. 1 показан пример динамических спектров межпланетных мерцаний $u(t, f)$ радиоисточника

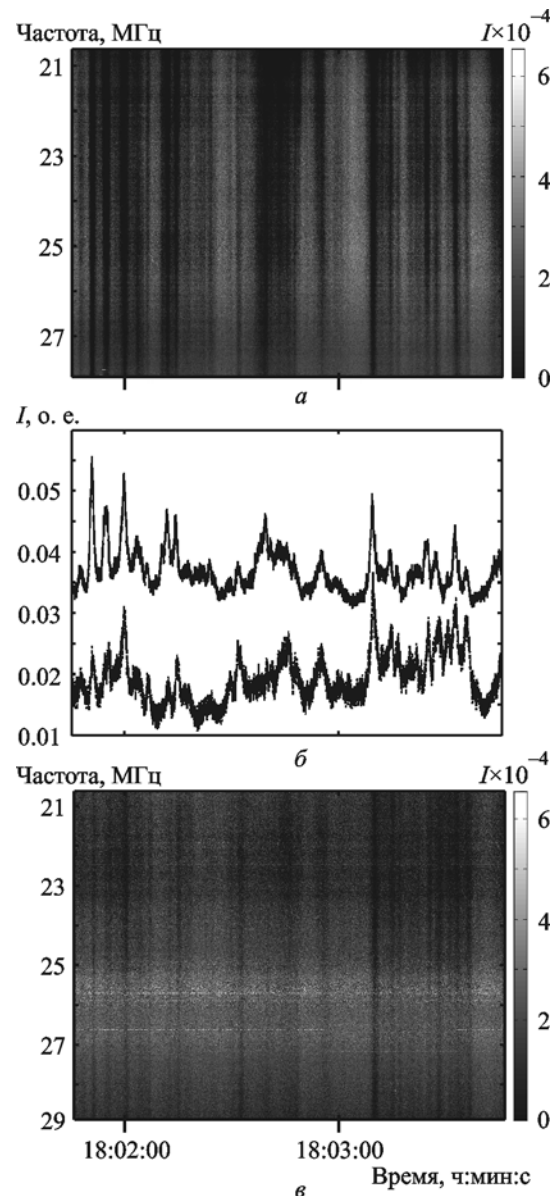


Рис. 1. Динамические спектры ММП в случае слабого влияния ионосферы Земли, полученные 26 января 2013 г. при наблюдении радиоисточника 3С144 на радиотелескопах УТР-2 (а) и УРАН-2 (б), а также сечение этих динамических спектров на частоте 24 МГц (верхняя запись – данные УТР-2, нижняя – данные УРАН-2) (б)

3C144, полученных на двух радиотелескопах, УТР-2 (рис. 1, а) и УРАН-2 (рис. 1, в), в условиях слабого влияния ионосферы в обоих пунктах. На рис. 1, б приведены сечения динамических спектров на частоте 24 МГц (верхняя запись – данные УТР-2, нижняя – данные УРАН-2). Вертикальные темные полосы – мерцания на неоднородностях электронной концентрации межпланетной плазмы. На всех рисунках (рис. 1, а–в) видна высокая корреляция мерцаний в полосе наблюдений. Статистические характеристики мерцаний для случая слабого влияния ионосферы представлены на рис. 2. Энергетические спектры (рис. 2, а), кросс-корреляционные функции мерцаний на двух частотах (рис. 2, б), плотности распределения вероятностей мерцаний (рис. 2, в), и индексы мерцаний ($m_{\text{УТР-2}} = 0.16$, $m_{\text{УРАН-2}} = 0.15$), определенные в двух пунктах, хорошо совпадают. Частота перегиба и частота обрезания (точка спектра, где дисперсии процесса мерцаний и шума становятся равными, $\sigma_m^2 = \sigma_{\text{ш}}^2$) энергетических

спектров составляют $0.1 \div 0.3$ Гц и $1 \div 2$ Гц соответственно. Наблюдаются узкие, меньше 4 с по нулевому уровню, с большим значением в максимуме, $R_{\text{max}} > 0.7$, кросс-корреляционные функции мерцаний на двух частотах и на двух радиотелескопах (рис. 2, б, в). У кросс-корреляционной функции мерцаний на двух частотах отсутствует смещение максимума относительно $\tau = 0$, а у кросс-корреляционной функции мерцаний на двух радиотелескопах имеется смещение порядка 0.4 с, что соответствует скорости переноса неоднородностей солнечного ветра вдоль базы УТР-2 – УРАН-2 порядка 380 км/с. Плотности распределения вероятностей мерцаний гладкие и близки для обоих радиотелескопов (рис. 2, в).

4.2. Слабые ионосферные мерцания ($m < 0.3$)

В сущности говоря, рассмотренный выше случай слабого влияния ионосферы есть идеальным для радиоастрономических наблюдений вообще и на-

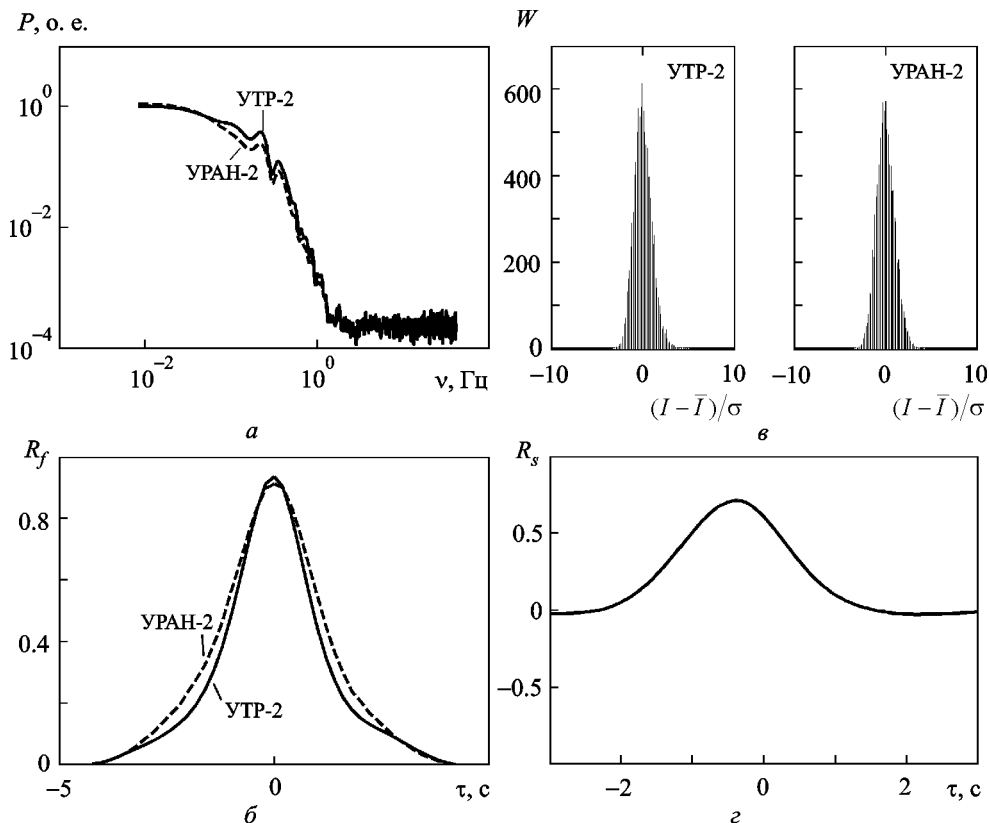


Рис. 2. Статистические характеристики ММП, полученные при наблюдении радиоисточника 3C144 на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 в условиях слабого влияния ионосферы Земли: а – спектры, б – кросс-корреляционные функции мерцаний на двух частотах, в – плотности распределения вероятностей мерцаний, г – кросс-корреляционная функция мерцаний на двух радиотелескопах

блюдений межпланетных мерцаний в частности. Однако анализ данных представленной сессии наблюдений показал, что более 60 % наблюдательного времени в записях присутствовали ионосферные мерцания с разным индексом. Проана-

лизируем слабые ионосферные мерцания радиоисточника 3C274 с индексом $m < 0.3$ (рис. 3) и сравним их статистические характеристики с характеристиками слабых межпланетных мерцаний радиоисточника 3C144 (рис. 4).

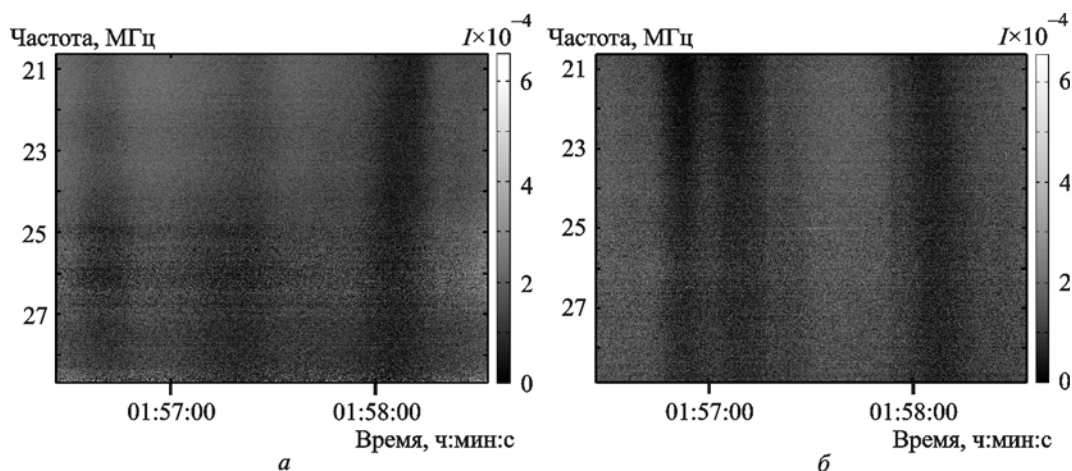


Рис. 3. Пример динамических спектров слабых МИ, полученных при наблюдении 28 января 2013 г. радиоисточника 3C274 одновременно на радиотелескопах УТР-2 (а) и УРАН-2 (б)

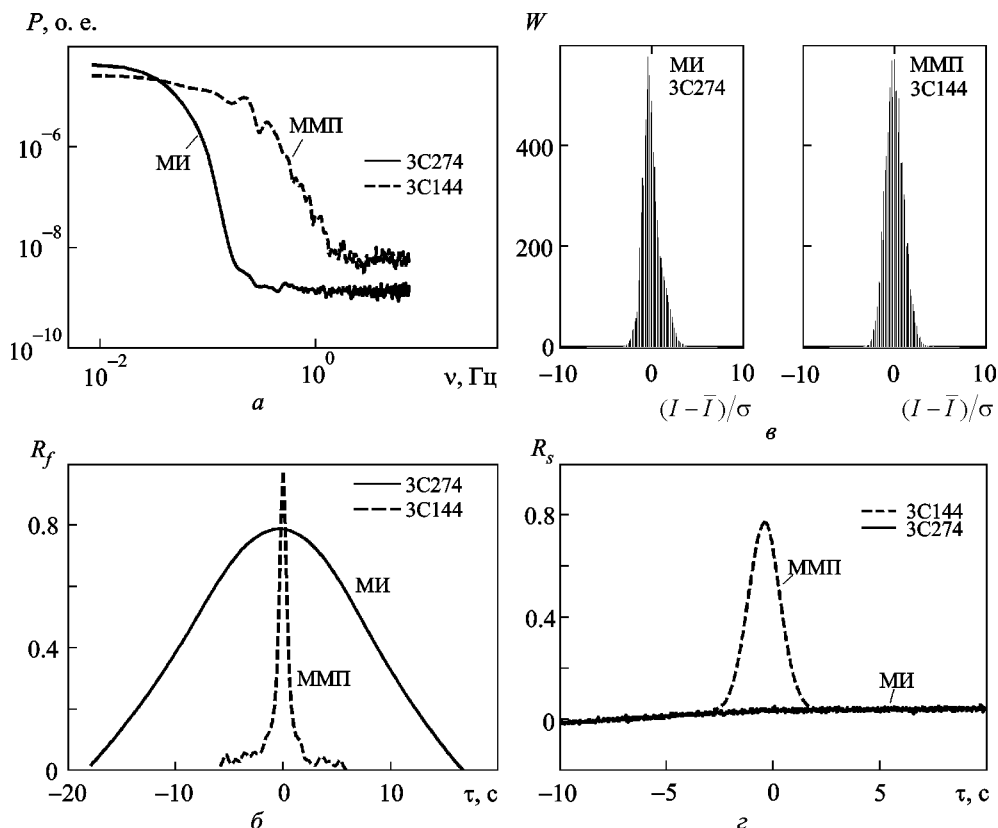


Рис. 4. Статистические характеристики слабых МИ (радиоисточник 3C274) и слабых ММП (радиоисточник 3C144), наблюдавшихся 28 января 2013 г.: а – спектры, б – кросс-корреляционные функции мерцаний на двух частотах, в – плотности распределения вероятностей мерцаний, г – кросс-корреляционные функции мерцаний на двух радиотелескопах

Видно, что слабые мерцания некоррелированы на двух разнесенных радиотелескопах УТР-2 (рис. 3, *а*) и УРАН-2 (рис. 3, *б*). Тщательный анализ обнаруживает в них наличие частотной декорреляции в полосе $20.63 \div 28.88$ МГц. В частности, такая декорреляция хорошо видна на динамическом спектре УТР-2 вблизи 01:58:00 (рис. 3, *а*). Следует также отметить быструю перестройку картины ионосферных мерцаний от момента появления до почти полного их исчезновения ($8 \div 12$ мин). Такой характер поведения слабых мерцаний радиоисточника 3С274 является одним из доказательств их ионосферной природы, поскольку характерные времена перестройки межпланетных мерцаний намного больше (часы, сутки).

Видно, что слабые ионосферные мерцания, в отличие от слабых межпланетных мерцаний, имеют более узкий энергетический спектр с частотой перегиба $0.02 \div 0.04$ Гц (рис. 4, *а*), широкую, десятки секунд по нулевому уровню, кросс-корреляционную функцию мерцаний на двух частотах (рис. 4, *б*), характеризуются несимметричной плотностью распределения вероятностей со смещенным максимумом (рис. 4, *в*) и некоррелированы на базе УТР-2 – УРАН-2 (рис. 4, *г*).

4.3. Сильные ионосферные мерцания ($m > 0.3$)

Рассмотрим случай, когда слабые межпланетные мерцания наблюдаются на одном из радиотелескопов (УТР-2) на фоне сильных ионосферных мерцаний с индексом $m > 0.3$ (рис. 5, *а*), а на другом радиотелескопе (УРАН-2) – только слабые межпланетные мерцания (рис. 5, *в*). Сравнение рис. 5, *а–в* показывает, что в этом случае высокочастотные межпланетные мерцания на динамическом спектре оказываются промодулированными низкочастотными колебаниями, имеющими ионосферную природу. Видно также, что статистические характеристики мерцаний, полученные на радиотелескопе УТР-2 (энергетический спектр (рис. 6, *а*), кросс-корреляционная функция мерцаний на двух частотах (рис. 6, *б*), плотность распределения вероятностей (рис. 6, *в*), кросс-корреляционная функция мерцаний на двух радиотелескопах (рис. 6, *г*) и индекс мерцаний) представляют собой сумму соответствующих характеристик каждой из сред (например, узкой кросс-корреляционной функции для межпланетных мерцаний и широкой со смещением для ионосферных (рис. 6, *б*), узкого ионосферного и широкого межпланетного энергетического спектров (рис. 6, *а*)

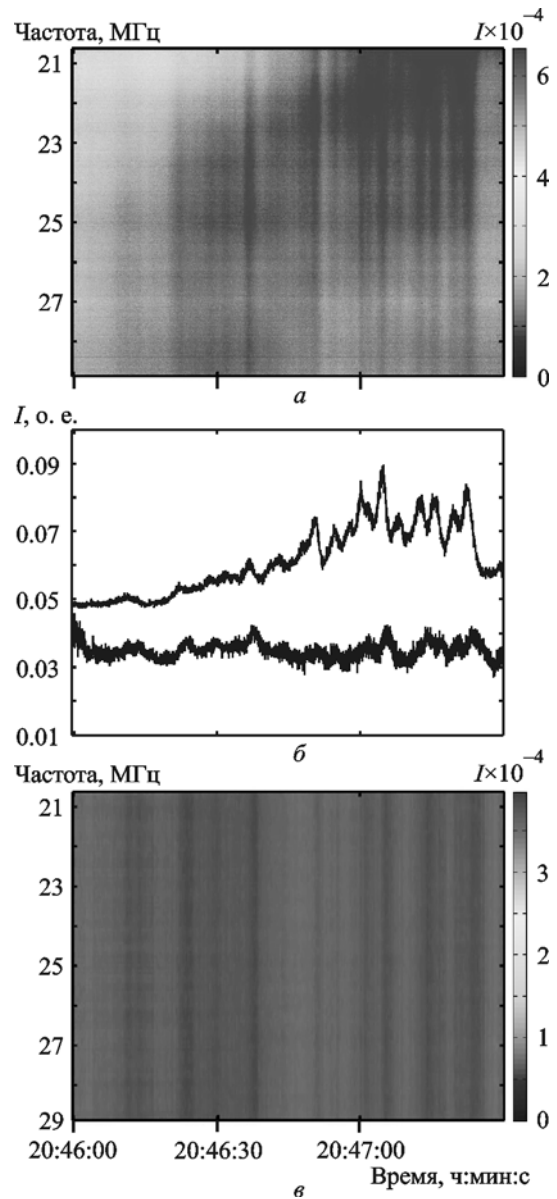


Рис. 5. Динамический спектр слабых ММП на фоне сильных МИ, полученный при наблюдениях радиоисточника 3С196 на радиотелескопе УТР-2, (*а*), динамический спектр слабых ММП, полученный при наблюдениях радиоисточника 3С196 на радиотелескопе УРАН-2 в случае слабого влияния ионосферы, (*в*), а также сечение этих динамических спектров на частоте 24 МГц (верхняя запись – данные УТР-2, нижняя – данные УРАН-2) (*б*)

и т. д.). Вклад каждой из сред определяется степенью ее влияния. В случае подавляющего вклада одной из сред мы фактически имеем только ее характеристики, а в случае более или менее равного вклада – сумму характеристик. Важно подчеркнуть, что в последнем случае в сумме характеристик вклад каждой среды остается заметным, кросс-корреля-

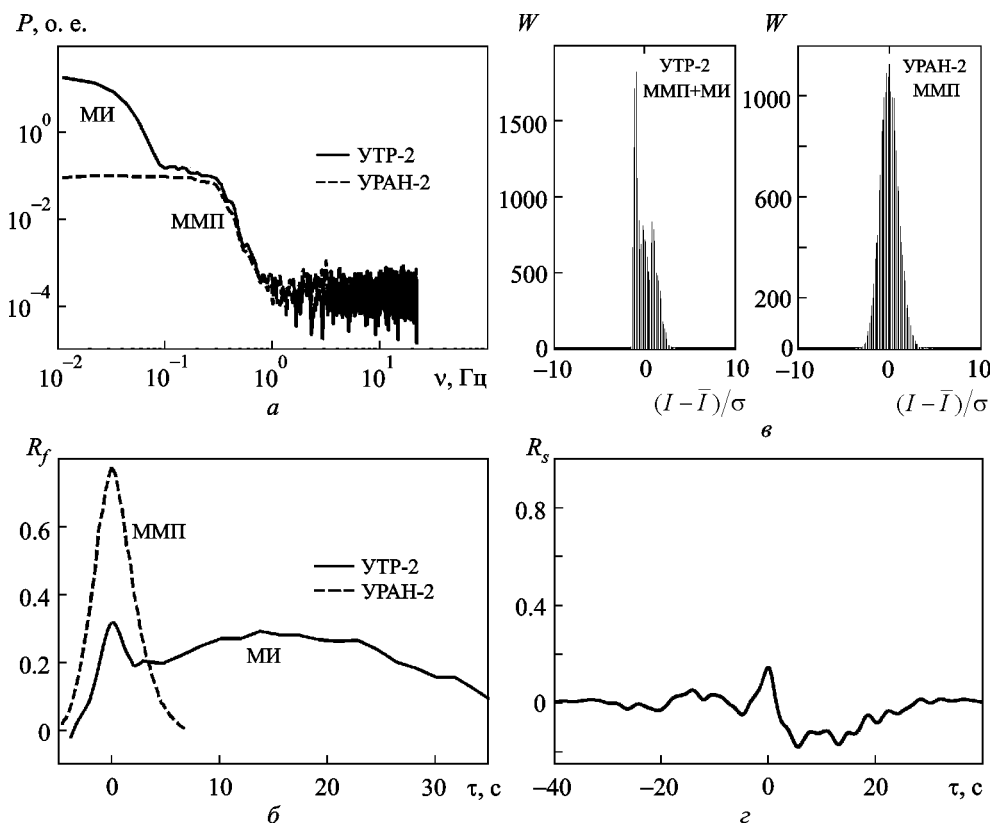


Рис. 6. Статистические характеристики слабых ММП на фоне сильных МИ, полученные на радиотелескопе УТР-2, а также слабых ММП при слабом влиянии ионосферы, полученные на радиотелескопе УРАН-2, при наблюдениях радиоисточника 3С196: *а* – спектры, *б* – кросс-корреляционные функции мерцаний на двух частотах, *в* – плотности распределения вероятностей мерцаний, *г* – кросс-корреляционная функция мерцаний на двух радиотелескопах

ционные функции мерцаний на двух частотах и энергетические спектры межпланетных и ионосферных мерцаний разделяются. Это значит, что при правильном выборе методики обработки данных ионосферная и межпланетная плазма, вероятно, даже могут изучаться одновременно.

Здесь нужно отметить, что рассмотренный выше случай наличия ионосферных мерцаний на одном радиотелескопе и отсутствия на другом является достаточно редким, но важным и удобным с методической точки зрения. Анализ данных показывает, что чаще имеет место наличие ионосферных мерцаний в обоих пунктах, разнесенных на расстояние 152 км. То есть, если ионосферные мерцания наблюдаются на одном радиотелескопе (например, УТР-2), с большой долей вероятности можно предсказать их наличие и на другом радиотелескопе (УРАН-2). Другими словами, характерные масштабы распределения ионосферных неоднородностей часто превосходят 152 км, хотя и не всегда. Кроме

того, у сильных ионосферных мерцаний часто наблюдалась картина быстрой перестройки, упомянутая выше для слабых ионосферных мерцаний.

5. Выводы

Суммируя все сказанное выше, можно сделать следующие выводы.

1. При слабом влиянии ионосферы Земли имеет место хорошее согласие между статистическими характеристиками мерцаний, определяемыми на разнесенных радиотелескопах.
2. Радиусы частотной и пространственной корреляций межпланетных мерцаний на декаметровых радиоволнах превышают 8 МГц и 150 км соответственно.
3. Статистические характеристики как сильных, так и слабых ионосферных мерцаний (кросс-корреляционные функции мерцаний на двух частотах, кросс-корреляционные функции мерцаний на двух разнесенных радиотелескопах, энергетические спектры мерцаний, плотности распреде-

ления вероятностей мерцаний) отличаются от таковых для слабых межпланетных мерцаний.

4. Размер искажений характеристик межпланетных мерцаний определяется степенью влияния ионосферы. Практически, в той или иной пропорции, наблюдается сумма двух характеристик, каждая из которых описывает вклад одной из сред.

5. При обработке данных мерцаний использование обсуждаемых характеристик позволяет количественно описать степень влияния ионосферы. Реализации с существенным вкладом ионосферы обнаруживаются при наличии подъема в спектре мерцаний (на частотах мерцаний $\nu < 0.04$ Гц), широкой (десятки секунд по нулевому уровню) кросс-корреляционной функции мерцаний на двух частотах, низкой ($R_{\max} < 0.7$) пространственной корреляции мерцаний, негауссовской плотности распределения вероятностей мерцаний.

Такие реализации должны быть исключены из усреднения при решении обратной задачи восстановления параметров межпланетной плазмы.

Автор выражает благодарность И. Н. Жуку и В. А. Шепелеву за полезные замечания и обсуждения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке “Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012–2016 гг.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hewish A., Scott P. F., and Wills D. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources // *Nature*. – 1964. – Vol. 203, Is. 4951. – P. 1214–1217.
2. Readhead A. C. S. Interplanetary scintillations of radio sources at metre wavelengths // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1971. – Vol. 155. – P. 185–197.
3. Coles W. A. Interplanetary scintillations // *Space Sci. Rev.* – 1978. – Vol. 21. – P. 411–425.
4. Калиниченко Н. Н. Мерцания космического радиосточника 4C21.53 в декаметровом диапазоне волн на элонгациях 43° – 138° // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2011. – Т. 16, № 4. – С. 386–393.
5. Crane R. K. Ionospheric scintillations // *Proc. IEEE*. – 1977. – Vol. 65, No. 2. – P. 180–199.
6. Bovkoon V. P. and Zhouck I. N. Scintillations of cosmic radio sources in the decametre waveband // *Astrophys. Space Sci.* – 1981. – Vol. 79, No. 1. – P. 165–180.
7. Ерухимов Л. М. Исследование неоднородностей электронной плотности в ионосфере радиоастрономическими методами и с помощью искусственных спутников Земли (обзор) // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1962. – Т. 5, № 5. – С. 839–865.
8. Бовкун В. П., Жук И. Н. Спектры мерцаний на неоднородностях ионосферы и межпланетной плазмы и возможность их разделения в декаметровом диапазоне радиоволн // *ДАН УССР*. – 1981. – Сер. А, № 6. – С. 69–71.
9. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н., Бубнов И. Н., Лекашо А., Рукер Х. О. Частотная декорреляция ионосферных мерцаний радиосточника Кассиопея А в диапазоне 20–30 МГц // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2005. – Т. 10, № 2. – С. 113–119.
10. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R. V., Vinogradov V. V., and Denis L. A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 510. – A16, doi: 10.1051/0004-6361/20091335.
11. Lecacheux A., Konovalenko A. A., and Rucker H. O. Using large radio telescopes at decametre wavelengths // *Planet. Space Sci.* – 2004. – Vol. 52, Is. 15. – P. 1357–1374.
12. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // *Антенны*. – Москва: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 3–14.
13. Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В., Булацен В. Г., Браженко А. И., Ващишин Р. В. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УРАН-2 // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 345–356.
14. Бовкун В. П., Жук И. Н. Мерцания космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн на неоднородностях межпланетной плазмы и ионосферы // *Космическая наука и техника*. – 1992. – № 7. – С. 80–91.
15. Bobeiuko A. L., Bovkoon V. P., Braude S. Ya., Megn A. V., and Sergienko Yu. Yu. Measurements of radio emission from the compact source in the Crab nebula with the URAN-1 interferometer at 16.7, 20 and 25 MHz // *Astrophys. Space Sci.* – 1979. – Vol. 66, Is. 1. – P. 211–221.
16. Бобейко А. Л., Бовкун В. П., Брауде С. Я. Измерение плотности потока компактного источника Крабовидной туманности интерферометром УРАН-1 на частотах 16,7; 20 и 25 МГц // *ДАН СССР*. – 1979. – Т. 259. – С. 811–813.
17. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Христенко А. Д., Браженко А. И., Булацен В. Г. Угловая структура радиоизлучения квазара 3C196 в декаметровом диапазоне радиоволн // *Письма в Астрон. ж.* – 1996. – Т. 22, № 6. – С. 428–433.
18. Kassim N. E., Perley R. A., Erikson W. C., and Dwarkanath K. S. Subarcminute resolution imaging of radio sources at 74 MHz with the Very Large Array // *Astron. J.* – 1993. – Vol. 106, No. 6. – P. 2218–2228.
19. De Gasperin F., Orrú E., Murgia M., Merloni A., Falcke H., Beck R., Beswick R., Birzan L., Bonafede A., Brüggem M., Brunetti G., Chyży K., Conway J., Croston J. H., Enßlin T., Ferrari C., Heald G., Heidenreich S., Jackson N., Macario G., McKean J., Miley G., Morganti R., Offringa A., Pizzo R., Rafferty D., Röttgering H., Shulevski A., Steinmetz M., Tasse C., van der Tol S., van Driel W., van Weeren R. J., van Zwieten J. E., Alexov A., Anderson J., Asgekar A., Avruch M., Bell M., Bell M. R., Bentum M., Bernardi G., Best P., Breiting F., Broderick J. W., Butcher A., Ciardi B., Dettmar R. J., Eisloffel J., Frieswijk W., Gankema H., Garrett M., Gerbers M., Griess-

meier J. M., Gunst A. W., Hassall T. E., Hessels J., Hoefl M., Horneffer A., Karastergiou A., Köhler J., Koopman Y., Kuniyoshi M., Kuper G., Maat P., Mann G., Mevius M., Mulcahy D. D., Munk H., Nijboer R., Noordam J., Paas H., Pandey M., Pandey V. N., Polatidis A., Reich W., Schoenmakers A. P., Sluman J., Smirnov O., Sobey C., Stappers B., Swinbank J., Tagger M., Tang Y., van Bemmel I., van Cappellen W., van Duin A. P., van Haarlem M., van Leeuwen J., Vermeulen R., Vocks C., White S., Wise M., Wucknitz O., and Zarka P. M87 at metre wavelengths: the LOFAR picture // *Astron. Astrophys.* – 2012. – Vol. 547. – A56, doi:10.1051/0004-6361/201220209.

М. М. Калініченко¹, I. С. Фалькович¹,
О. О. Коноваленко¹, А. І. Браженко²

¹ Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

² Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту
геофізики ім. С. І. Суботіна НАН України
вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36014, Україна

РОЗДІЛЕННЯ МІЖПЛАНЕТНОГО ТА ІОНОСФЕРНОГО МЕРЕХТІННЯ КОСМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ В ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ РАДІОХВИЛЬ

Виконано експериментальну оцінку впливу іоносфери Землі на статистичні характеристики мерехтіння компактних космічних джерел в декаметровому діапазоні радіохвиль (крос-кореляційну функцію мерехтіння на двох частотах, крос-кореляційну функцію мерехтіння на рознесених

радіотелескопах, енергетичний спектр мерехтіння, щільність розподілу вірогідності мерехтіння). Також розроблено нову методику виділення міжпланетного мерехтіння з даних спостережень на радіотелескопах системи УРАН.

N. N. Kalinichenko¹, I. S. Falkovich¹, A. A. Konovalenko¹,
and A. I. Brazhenko²

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

² Poltava Gravimetric Observatory, S. Subotin Institute
of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine,
27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36029, Ukraine

SEPARATION OF INTERPLANETARY AND IONOSPHERIC SCINTILLATIONS OF COSMIC SOURCES AT DECAMETER WAVELENGTHS

The influence of Earth's ionosphere on statistic characteristics of compact space sources scintillations (cross-correlation function of scintillations at two frequencies, cross-correlation function of scintillations at two radio telescopes, power spectrum of scintillations, probability density function of scintillations) has been experimentally estimated at decameter wavelength. A new method for selection of interplanetary scintillations from experimental data obtained with the URAN system radio telescopes has been developed.

Стаття постуила в редакцію 26.06.2013