

Мерцания космического радиоисточника 4C21.53 в декаметровом диапазоне волн на элонгациях $43^\circ - 138^\circ$

Н. Н. Калиниченко

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

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2011 г.

На основе анализа данных наблюдений мерцаний космического радиоисточника 4C21.53 в декаметровом диапазоне волн сделана оценка статистических характеристик межпланетных мерцаний в режимах сильного и слабого рассеяния (индекса мерцаний, энергетического спектра, кросс-корреляционной функции, функции распределения плотности вероятности мерцаний). Полученные результаты могут быть использованы для тестирования моделей мерцаний, которые используются для интерпретации данных наблюдений. Показана высокая эффективность широкополосного цифрового спектрального анализатора DSP-z при наблюдениях межпланетных мерцаний на декаметровых радиоволнах.

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

1. Введение

Мерцания – это вариации интенсивности принимаемого сигнала, вызванные движением неоднородностей плазмы на пути его распространения [1]. В случае наблюдения космических радиоисточников рассеивающими средами являются межзвездная и межпланетная плазма, а также ионосфера Земли. Исследования мерцаний на неоднородностях межпланетной плазмы позволяют получать информацию о параметрах солнечного ветра (в том числе в областях, 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 из-за низкой электронной концентрации на луче зрения. С приближением к Солнцу мерцания усиливаются вследствие увеличения рассеяния на неоднородностях более плотной межпланетной плазмы, достигают

максимума, затем постепенно ослабевают и, в конце концов, практически полностью исчезают. Элонгация ϵ_{\max} , на которой наблюдаются максимальные флуктуации интенсивности принимаемого сигнала, увеличивается с длиной волны (от единиц градусов на сантиметровых волнах [4] до $\approx 100^\circ$ на декаметровых [5]). Основной массив наблюдательных данных относится к элонгациям $\epsilon \gg \epsilon_{\max}$, когда реализуется режим слабого рассеяния, а данные могут быть интерпретированы с помощью давно и хорошо развитых методов [2, 3, 6]. Теория сильного рассеяния, реализующегося на элонгациях $\epsilon \leq \epsilon_{\max}$, более сложна и хуже развита, что усложняет интерпретацию данных наблюдений. На высоких частотах интервал элонгаций $\epsilon \leq \epsilon_{\max}$ достаточно мал. Этого нельзя сказать о декаметровом диапазоне радиоволн, где он значительно больше. Важно отметить, что малое количество экспериментальных данных по межпланетным мерцаниям радиоисточников на декаметровых радиоволнах на элонгациях $\epsilon \leq \epsilon_{\max}$ обусловлено также высоким уровнем помех в дневное время. Дело

в том, что используемые для наблюдений мерцаний в декаметровом диапазоне просвечивающие радиоисточники с малыми угловыми размерами (квазары и пульсары) имеют потоки излучения порядка 100 Ян и меньше (лишь компактный источник в Крабовидной туманности имеет поток около 1000 Ян на частоте 25 МГц [7]). Несложные расчеты по методике, представленной в работе [8], показывают, что для получения энергетических спектров мерцаний этих радиоисточников в динамическом диапазоне не менее двух порядков (что необходимо для надежного восстановления параметров солнечного ветра или оценки размеров радиоисточника) даже в случае наблюдений на таком большом радиотелескопе, как УТР-2, необходимо иметь приемное устройство с полосой пропускания Δf порядка 1 МГц. Аналоговое устройство с такой полосой несложно изготовить [9, 10], но оно не позволяет получать надежные данные в дневных условиях, когда эфир сильно насыщен помеховыми сигналами искусственного происхождения. В этой связи большие перспективы обещает применение новых цифровых приемников с высоким динамическим диапазоном, таких как цифровой спектральный анализатор DSP-z [11]. Этот широкополосный ($\Delta f = 32$ МГц) цифровой спектральный анализатор имеет большой динамический диапазон (более 70 дБ/мкВ) и позволяет путем преобразования Фурье принимаемого сигнала получить до 8192 отдельных частотных каналов с разрешением 4 кГц. Последнее дает возможность при обработке эффективно исключать отдельные каналы, пораженные помехами, а все оставшиеся использовать для повышения чувствительности наблюдений. Цифровые спектральные анализаторы DSP-z хорошо зарекомендовали себя при наблюдениях на декаметровых волнах радиоизлучения Солнца, планет и пульсаров [12].

Цель настоящей работы – оценка статистических характеристик мерцаний радиоисточника на декаметровых волнах в режимах сильного и слабого рассеяния (индекса мерцаний, энергетического спектра, кросс-корреляционной функции и функции распределения плотности вероятности мерцаний), которые в последующем могут быть использованы для тестирования моделей мерцаний, используемых для интерпретации данных наблюдений, а также апробация цифрового спектрального анализатора DSP-z для исследований межпланетных мерцаний.

2. Наблюдения

Наблюдения межпланетных мерцаний проводились на радиотелескопе УТР-2 [13] в период с сентября 2010 г. по июнь 2011 г. ежемесячно сессиями по 7 дней, что обеспечило широкий диапазон элонгаций $43^\circ \div 138^\circ$. Широкополосный ($8 \div 32$ МГц) Т-образный радиотелескоп 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 м².

В качестве просвечивающего источника был выбран радиоисточник 4C21.53 в созвездии Лисички. На радиоволнах источник 4C21.53 имеет сложную структуру [14], которая включает хорошо мерцающую компактную деталь, ассоциируемую с миллисекундным пульсаром PSR 1937+214 [15]. Наличие у радиоисточника генетически связанного остатка сверхновой остается открытым вопросом [16–18]. По данным наблюдений межпланетных мерцаний на частотах 20 и 25 МГц [19] плотность потока радиоизлучения источника составляет (250 ± 50) и (160 ± 25) Ян, угловые размеры компактной детали – $2_{-1.2}^{+0.7}$ и $1.5_{-1.0}^{+0.5}$ угловой секунды, доля мерцающей компоненты в полном потоке источника – 0.85 ± 0.15 и $0.93_{-0.2}^{+0.07}$ соответственно. Радиоинтерферометрические наблюдения [20] радиоисточника 4C21.53 в декаметровом диапазоне радиоволн показали, что поток излучения компактной детали составляет не менее 70 % полного потока источника и ее размеры порядка 3 угловых секунд на частоте 25 МГц. Преимущество 4C21.53 перед другими хорошо мерцающими радиоисточниками, например 3C144, 3C196 и 3C254 состоит в том, что он достигает малых элонгаций в зимнее время, когда влияние помех в декаметровом диапазоне минимально.

Радиоисточник 4C21.53 наблюдался в интервале часовых углов $\pm 1^h$ вблизи верхней кульминации сканами по 4^m . На входы цифрового спектрального анализатора DSP-z подавалась сумма и разность сигналов антенн “С–Ю” и “З–В”. Запись данных производилась в режиме полной мощности со следующими параметрами анализа: полоса частот $20.63 \div 28.88$ МГц, постоянная усреднения индивидуальных спектров $t_{av} = 20$ мс. Режим полной мощности – один из возможных режимов работы DSP-z, при

котором входной сигнал $x(\tau)$ преобразуется в двумерную spectrogramму $u(t, f)$ или динамический спектр посредством преобразования Фурье [12]:

$$u(t, f) = |X(t, f)|^2, \tag{1}$$

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

Здесь $g(t-\tau)$ – окно, 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 величину $\Delta f = f_s/N_w \approx 4$ кГц друг от друга.

Полоса частот 20.63 ÷ 28.88 МГц была выбрана с точки зрения меньшего влияния помех в верхней части диапазона рабочих частот радиотелескопа УТР-2.

На рис. 1 показан пример динамического спектра мерцаний $u(t, f)$ радиоисточника 4C21.53 на элонгации $\epsilon = 43^\circ$ с частотным разрешением 4 кГц (по наблюдениям 30 января 2011 года). Вертикальные светлые полосы – мерцания на неоднородностях электронной концентрации межпланетной плазмы.

3. Обработка данных и ее результаты

Обработка данных состояла в следующем. На первом этапе из суммы и разности сигналов антенн “С–Ю” и “З–В” получался сигнал, соответствующий карандашной диаграмме направленности радиотелескопа УТР-2. Затем выбирались временные реализации длительностью $T_p = 30$ с вблизи моментов прохождения источника через максимум диаграммы направленности радиотелескопа и проводилось усреднение данных по 68 частотным каналам согласно формуле:

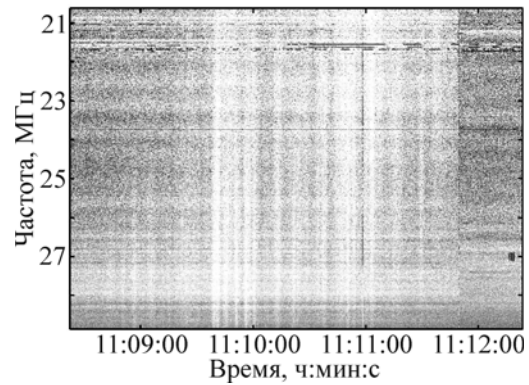


Рис. 1. Пример динамического спектра мерцаний радиоисточника 4C21.53 на элонгации $\epsilon = 43^\circ$ с частотным разрешением 4 кГц в период прохождения источника через максимум диаграммы направленности радиотелескопа УТР-2

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

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

где $n = 68$, $j = 1, 2, \dots, 30$.

Выбор конкретного числа усредняемых частотных каналов ($n = 68$) был сделан на основе предварительного анализа данных, полученных в сентябре 2010 г. – июне 2011 г. С одной стороны, он обеспечил хорошее отношение сигнал/шум при оценке кросскорреляции между частотными каналами, а с другой стороны – достаточное частотное разрешение для селекции каналов, пораженных помехами. В других условиях наблюдений число усредняемых каналов может быть изменено в сторону уменьшения или увеличения. Таким образом, при дальнейшей обработке анализировались 30 частотных каналов, перекрывающих всю полосу 20.63 ÷ 28.88 МГц, каждый из которых имел ширину полосы 272 кГц.

Далее оценивались коэффициенты корреляции между каналом $f = 24.84$ МГц ($j = 16$) в середине полосы 20.63 ÷ 28.88 МГц и всеми остальными частотными каналами по формуле:

$$R_j = \frac{\overline{U_l(t)U_j(t)}}{\sigma_{\text{IPS}l}\sigma_{\text{IPS}j}} = \frac{\overline{U_l(t)U_j(t)}}{\sqrt{(\sigma_{(\text{IPS}+n)l}^2 - \sigma_{nl}^2)(\sigma_{(\text{IPS}+n)j}^2 - \sigma_{nj}^2)}},$$

где $l=16$; $j=1, 2, \dots, 30$; $U_l(t)$ и $U_j(t)$ – флуктуации интенсивности сигнала на частотах $f=24.84$ МГц и f_j (черта сверху означает усреднение по времени); σ_{IPSt} , σ_n^2 , $\sigma_{(\text{IPSt+n})l}^2$ – дисперсии процессов межпланетных мерцаний, шума и их суммы на частоте $f=24.84$ МГц соответственно; $\sigma_{\text{IPSt}j}^2$, σ_{nj}^2 , $\sigma_{(\text{IPSt+n})j}^2$ – аналогичные параметры на частоте f_j . Здесь и дальше дисперсии $\sigma_{(\text{IPSt+n})}^2$ и σ_n^2 определялись из соответствующих энергетических спектров путем их интегрирования по частоте:

$$\sigma_{(\text{IPSt+n})}^2 = \int_{1/T_p}^{1/t_{av}} P_{\text{IPSt+n}}(\nu) d\nu,$$

$$\sigma_n^2 = \int_{1/T_p}^{1/t_{av}} P_n(\nu) d\nu,$$

где ν – флуктуационная частота; $P_{\text{IPSt+n}}$, P_n – энергетические спектры мерцаний и шума соответственно.

Энергетический спектр $P_{\text{IPSt+n}}(\nu)$ оценивался с помощью процедуры, аналогичной той, что использовалась для получения динамических спектров (1):

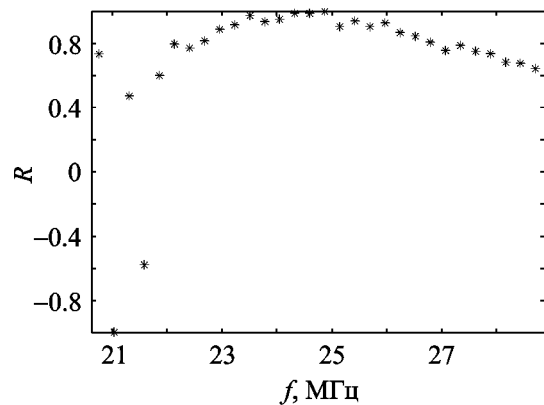
$$P_{\text{IPSt+n}}(\nu) = |F(\nu)|^2 / T_p,$$

где $F(\nu)$ – преобразование Фурье процесса мерцаний $U(t)$, T_p – длительность исследуемой реализации.

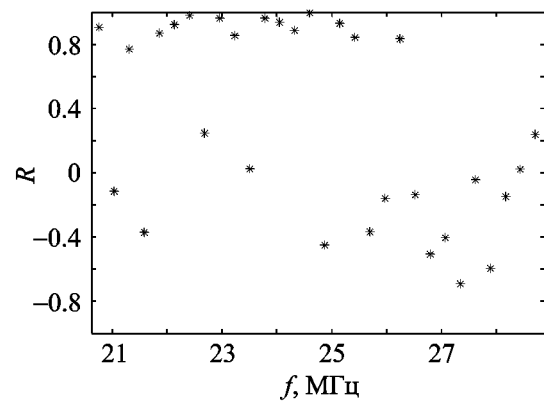
При этом аргументом является не рабочая, а флуктуационная частота ν , определяемая постоянной усреднения индивидуальных спектров t_{av} ($\nu_{\text{max}} = 1/t_{av} = 50$ Гц). Спектральная плотность шума P_n считалась постоянной в полосе анализа и равной высоте высокочастотного “хвоста” спектра $P_{\text{IPSt+n}}(\nu)$.

Выбор канала $f=24.84$ МГц был сделан исходя из предварительного анализа обсуждаемых данных и результатов работы [21], где на основе длительных наблюдений показано, что диапазон частот 24.8÷25.0 МГц является оптимальным с точки зрения низкой вероятности возникновения помеховых сигналов на частотах 20÷30 МГц. Если помеховый сигнал

в канале $f=24.84$ МГц все же присутствовал, что случалось редко, то использовался соседний канал $f=24.57$ МГц ($j=15$). На рис. 2 а, б в качестве примера показан коэффициент кросс-корреляции R , рассчитанный согласно описанной выше процедуре, для двух реализаций процесса мерцаний в условиях слабой и сильной насыщенности диапазона 20.63÷28.88 МГц помеховыми сигналами. Коэффициент кросс-корреляции плавно уменьшается к краям диапазона, что отражает наличие декорреляции вследствие эффектов распространения в межпланетной плазме. Пораженные помехами каналы обнаруживают себя по аномально низким значениям коэффициента кросс-корреляции, выпадающим из общей зависимости. Такие каналы устанавливались и исключались из дальнейшей обработки. Оставшиеся частотные



а)



б)

Рис. 2. Коэффициент корреляции между каналами в условиях слабой (а) и сильной (б) насыщенности полосы помеховыми сигналами

каналы использовались для оценки индекса мерцаний, энергетического спектра, кросс-корреляционной функции и функции распределения плотности вероятности мерцаний.

Индекс мерцаний, энергетический спектр и функция распределения плотности вероятности мерцаний оценивались по шести свободным от помех частотным каналам вблизи середины частотного диапазона $20.63 \div 28.88$ МГц, для чего сигналы этих каналов усреднялись:

$$I(t) = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 U_j.$$

Кросс-корреляционная функция определялась по двум полосам на краях диапазона $20.63 \div 28.88$ МГц, разнесенным минимум на 15 частотных каналов (4.1 МГц). Каждая полоса получалась усреднением трех частотных каналов:

$$I_{1,2}(t) = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 U_j.$$

Индекс мерцаний рассчитывался по формуле:

$$m = \frac{\sigma_{IPS}}{I(t)} = \frac{\sqrt{\sigma_{(IPS+n)}^2 - \sigma_n^2}}{I(t)},$$

где $\overline{I(t)}$ – средняя интенсивность источника, включающая вклад как мерцающей, так и немерцающей (протяженной) компонент. Кросс-корреляционная функция оценивалась согласно выражению $R(\tau) = \int_{-T_p}^{T_p} I_1(t)I_2(t+\tau)dt$, а функция распределения плотности вероятности мерцаний W – стандартным образом как вероятность флуктуаций $(I - \overline{I})/\sigma$. Полученные статистические характеристики мерцаний усреднялись за всю сессию наблюдений (7 дней) для ослабления влияния нестационарности параметров солнечного ветра.

На рис. 3 показана зависимость индекса мерцаний m радиоисточника 4C21.53 от элонгации ϵ . Индекс мерцаний монотонно растет от значения 0.12 на элонгации 138° , достигает максимума 0.29 на элонгации 95° и уменьшается до 0.14 на элонгации 43° . Отличие индекса мерцаний от единицы в максимуме зависимости объясняется как конечным размером компактной детали, так и значительным вкладом протяженной компоненты в общий поток радиоизлучения. При этом, как будет видно ниже, компактная деталь сильно мерцает на не-

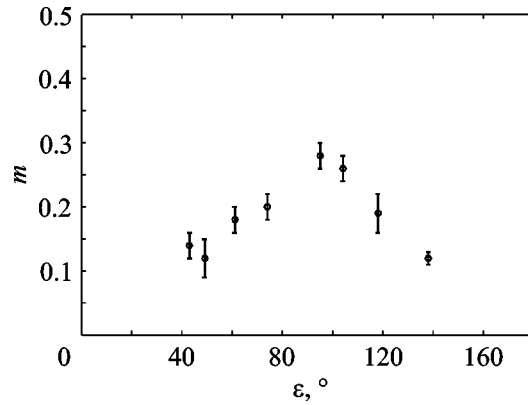


Рис. 3. Зависимость индекса мерцаний радиоисточника 4C21.53 от элонгации

днородностях солнечного ветра, поскольку энергетический спектр мерцаний имеет большой динамический диапазон. Сравним статистические характеристики мерцаний на элонгациях 43° (насыщенные мерцания), 95° (сильные мерцания) и 138° (слабые мерцания). Важно отметить, что параметры солнечного ветра при наблюдениях в соответствующие периоды были достаточно стабильны и близки. Так, по данным космического аппарата “Wind” с 24 по 31 января 2011 г. ($\epsilon = 43^\circ$) скорость солнечного ветра изменялась в пределах $300 \div 350$ км/с, концентрация протонов составляла 10 частиц на кубический сантиметр, а с 18 по 22 октября 2011 г. ($\epsilon = 95^\circ$) значения этих величин составляли $350 \div 400$ км/с и 7–8 частиц на кубический сантиметр соответственно. И лишь в конце сессии, с 23 октября 2010 г., скорость начала медленно расти, а плотность уменьшаться. В период с 25 по 31 июля 2011 г. ($\epsilon = 138^\circ$) скорость солнечного ветра изменялась в пределах $300 \div 500$ км/с, а концентрация протонов – 1–3 частицы на кубический сантиметр. Отсутствовали потоки, связанные с корональными выбросами на Солнце. Таким образом, можно предположить, что отличия в статистических характеристиках мерцаний в указанные периоды в основном связаны с разными режимами рассеяния, имеющими место в этих случаях.

Энергетические спектры мерцаний, полученные для элонгаций 43° (штриховые линии) и 95° (сплошные линии), представлены на рис. 4. Тонкими линиями показаны индивидуальные спектры для каждого дня наблюдений сессии,

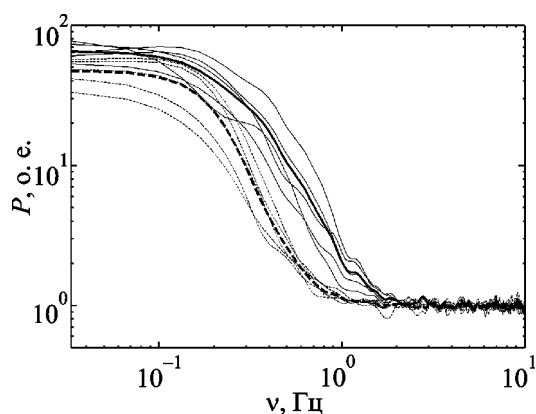


Рис. 4. Энергетические спектры мерцаний радиоисточника 4C21.53 на элонгации 43° (штриховые линии) и элонгации 95° (сплошные линии). Тонкие линии – спектры, усредненные за один день наблюдений; жирные линии – спектры, усредненные за всю сессию наблюдений

а жирными – результат их усреднения. На флуктуационных частотах меньше 0.1 Гц спектры выходят на плоский участок. Отсутствует подъем спектра, которого следует ожидать в случае существенного влияния ионосферы Земли. Это согласуется с результатами работы [22], где на основе анализа экспериментальных спектров показано, что в декаметровом диапазоне при наблюдениях на крупных радиотелескопах, таких, как УТР-2, энергетический спектр межпланетных мерцаний на частотах выше $0.02 \div 0.03$ Гц почти не искажается ионосферой, поскольку на этих частотах спектральная плотность ионосферных мерцаний меньше на $1.5 \div 2$ порядка (мелкомасштабные неоднородности ионосферы усредняются радиотелескопом). Последнее означает, что в декаметровом диапазоне волн межпланетные мерцания можно надежно выделить на фоне ионосферных. На частотах $0.2 \div 1$ Гц спектры степенные со спектральными индексами порядка $-2.7 \div -2.8$. На частотах больше 2 Гц спектры выходят на участок с постоянной спектральной плотностью, соответствующий спектру шума P_n . Оценка энергетического спектра мерцаний для элонгации 138° также дала значение спектрального индекса в указанном интервале.

На рис. 5 показаны кросс-корреляционные функции мерцаний: точки – элонгация 138° ,

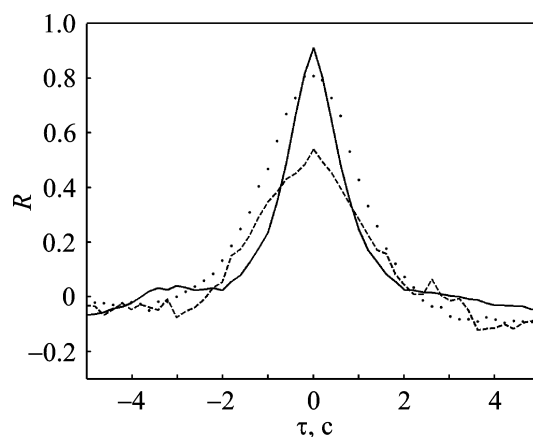


Рис. 5. Кросс-корреляционные функции мерцаний: точки – элонгация 138° , сплошная линия – 95° , штриховая – 43°

сплошная линия – 95° , штриховая – 43° . Видна высокая кросс-частотная корреляция мерцаний на элонгациях 138° и 95° (значение кросс-корреляционной функции в максимуме больше 0.8). На элонгациях $\epsilon < \epsilon_m$ корреляция мерцаний уменьшается, хотя и остается достаточно высокой ($R \approx 0.6$ на элонгации $\epsilon = 43^\circ$).

Функции распределения плотности вероятности мерцаний оказались разными для рассматриваемых случаев (см. рис. 6 а, б). Разница состоит в наличии или отсутствии асимметричности рассматриваемой функции. Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что наблюдаемые флуктуации интенсивности на элонгациях 43° и 95° соответствуют распределению Райса, а на элонгации 138° распределены по нормальному закону.

Уменьшение частотной корреляции и изменение распределения плотности вероятности флуктуаций интенсивности при переходе от слабых к сильным мерцаниям согласуются с данными наблюдений на более высоких частотах (195, 430, 611 МГц) [23].

4. Выводы

Проведенные исследования подтвердили принципиальную возможность эффективных наблюдений межпланетных мерцаний радиоисточников в декаметровом диапазоне волн с использованием цифровых спектральных ана-

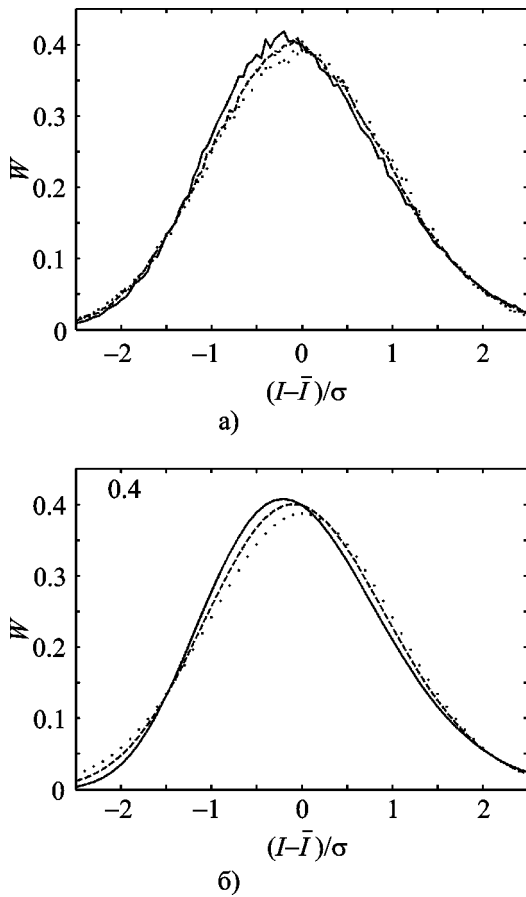


Рис. 6. Функции распределения плотности вероятности мерцаний: а) – данные наблюдений, б) – аппроксимирующие функции. Штриховые линии ($\epsilon = 43^\circ$) – распределение Райса, сплошные линии ($\epsilon = 95^\circ$) – распределение Райса, точки ($\epsilon = 138^\circ$) – нормальное распределение

лизаторов DSP-z, в том числе на элонгациях $\epsilon < \epsilon_m$ (для декаметровых радиоволн ϵ_m лежит в пределах $90^\circ \div 100^\circ$).

Установлено, что на элонгациях $\epsilon \geq \epsilon_m$ имеет место высокая частотная корреляция межпланетных мерцаний (коэффициент корреляции $R > 0.8$). На элонгациях $\epsilon < \epsilon_m$ корреляция мерцаний уменьшается, хотя и остается достаточно высокой, по крайней мере до значения $\epsilon = 43^\circ$ ($R \approx 0.6$ при разности частот 4.1 МГц). Оценки показали, что энергетические спектры мерцаний, полученные на элонгациях 43° , 95° и 138° , будучи усредненными на длительном временном интервале (7 дней), имеют близкие спектральные индексы порядка -2.8 . На малых и больших элонгациях имеют место раз-

ные функции распределения плотности вероятности мерцаний – нормальное распределение на элонгациях $\epsilon > \epsilon_m$ и распределение Райса на элонгациях $\epsilon \leq \epsilon_m$. Измерена зависимость индекса мерцаний от элонгации для радиосточника 4C21.53. Полученные результаты важны для тестирования корректности моделей мерцаний, используемых для интерпретации данных наблюдений, поскольку явление мерцаний проявляет себя очень по-разному в разных предельных случаях.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке целевой программы фундаментальных исследований НАН Украины “Исследование солнечно-земных связей и их влияния на функционирование геосистем (ГЕОКОСМОС)”.

Автор выражает благодарность И. С. Фальковичу, В. А. Шепелеву и А. А. Коноваленко за полезные замечания.

Литература

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, No. 4. – P. 411-425.
4. Cohen M. H. High-Resolution Observations of Radio Sources // Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 1969. – Vol. 7. – P. 619-664.
5. Жук И. Н. Исследование угловой структуры космических источников методом мерцаний // Известия вузов. Радиофизика. – 1980. – Т. 23, №8. – С. 893-918.
6. Coles W. A. and Kaufman J. J. Angular size of the Crab Pulsar at 74 MHz // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1977. – Vol. 181. – P. 57-59.
7. Bobeiko 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, No. 1. – P. 211-220.
8. Kalinichenko N. N. A search for compact radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique // Astrophys. Space Sci. – 2009. – Vol. 319, No. 2-4. – P. 131-138.
9. Фалькович И. С., Калиниченко Н. Н., Гридин А. А., Бубнов И. Н. О возможности широкополосных

- наблюдений межпланетных мерцаний на декаметровых волнах // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т.9, №2. – С. 121-129.
10. Фалькович И. С., Гридин А. А., Калиниченко Н. Н., Бубнов И. Н. Шестнадцатиполосный корреляционный радиометр для наблюдения межпланетных мерцаний // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, №4. – С. 392-397.
11. Kozhin R. V., Vynogradov V. V., and Vavriv D. M. Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrometer for radio astronomy applications // MSMW'07 Symposium proc. – Kharkiv (Ukraine). – 2007. – P. 736-738.
12. 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, No. A16 – P. 1-13.
13. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – М.: Связь, 1978. – Вып. 26. – С. 3-14.
14. Erickson W. C. What is 4C21.53? // Astrophys. J. – 1983. – Vol. 264, No. 1. – P. 13-17.
15. Backer D. C., Kulkarni S. R., Heiles C., Davis M. M., and Gross W. M. A millisecond pulsar // Nature. – 1982. – Vol. 300, Is. 5894. – P. 615-618.
16. Purvis A. 4C21.53: a possible supernova remnant in Vulpecula // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1983. – Vol. 202. – P. 605-614.
17. Sieber W. and Seiradakis J. H. Radio sources in the neighbourhood of the millisecond pulsar PSR 1937+214 // Astron. Astrophys. – 1984. – Vol. 130, No. 2. – P. 257-268.
18. Caswell J. L. and Landecker T. L. Radio sources near the millisecond pulsar PSR 1937+214 // Astron. J. – 1985. – Vol. 90, No. 3. – P. 488-482.
19. Бовкун В. П., Жук И. Н. Тонкая структура радиосточника 4C21.53 на декаметровых волнах // Астрономический журнал. – 1984. – Т. 61, №6. – С. 1108-1112.
20. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Вацшин Р. В., Браженко А. И., Булацен В. Г. Радиointерферометрические наблюдения космического радиосточника 4C21.53 с пульсаром PSR 1937 + 214 в декаметровом диапазоне радиоволн // Астрономический журнал. – 2002. – Т. 79, №2. – С. 127-136.
21. Коноваленко А. А., Соколов К. П., Степкин С. В. Определение оптимальных частот наблюдений на радиотелескопе УТР-2 в режиме радиообзора небесной сферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, №2. – С. 188-198.
22. Bovkoon V. P. and Zhouck I. N. Scintillations of cosmic radio sources in the decameter waveband.

- I. Spectra of scintillations due to ionospheric and interplanetary plasma fluctuations and the possibility of their separation // Astrophys. Space Sci. – 1981. – Vol. 79, No. 1. – P. 165-180.
23. Cohen M. H., Gundermann E. J., Hardebeck H. E., and Sharp L. E. Interplanetary scintillations. II. Observations // Astrophys. J. – 1967. – Vol. 147, No. 2. – P. 449-465.

Мерехтіння космічного радіоджерела 4C21.53 в декаметровому діапазоні хвиль на елонгаціях $43^\circ - 138^\circ$

М. М. Калініченко

На основі аналізу даних спостережень мерехтіння космічного радіоджерела 4C21.53 в декаметровому діапазоні хвиль виконано оцінку статистичних характеристик міжпланетного мерехтіння в режимах сильного та слабого розсіювання (індексу мерехтіння, енергетичного спектру, крос-кореляційної функції і функції розподілу густини вірогідності мерехтіння). Отримані результати можуть бути використані для тестування моделей мерехтіння, які використовуються для інтерпретації даних спостережень. Показано високу ефективність ширококосмугового цифрового спектрального аналізатора DSP-z у спостереженнях міжпланетного мерехтіння на декаметрових радіохвилях.

Scintillations of Radio Source 4C21.53 at Decameter Wavelengths and Elongations $43^\circ - 138^\circ$

N. N. Kalinichenko

The statistical quantities of interplanetary scintillations at decameter wavelengths (scintillation index, power spectrum, cross-correlation function, probability density function) for the strong and weak scattering cases are estimated by analyzing the observations of 4C21.53 radio source scintillations. The obtained results can be used to test the models applied for analyzing IPS data at decameter wavelengths. The high efficiency of the DSP-z wide-band digital spectrum analyzer for IPS observations at decameter wavelengths is shown.