

УДК 520.27

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЛАЗМЫ В НАПРАВЛЕНИИ ТРЕХ УДАЛЕННЫХ ПУЛЬСАРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ С НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ “РАДИОАСТРОН”

© 2016 г. М. В. Попов^{1*}, А. С. Андрианов^{1**}, Н. Бартель^{2***},
К. Гвинн^{3****}, Б. Ч. Джоши^{4*****}, Д. Джонси^{5*****},
Н. С. Кардашев^{1*****}, А. Г. Рудницкий^{1*****}, Т. В. Смирнова^{6,1*****},
В. А. Согласнов^{1*****}, Е. Н. Фадеев^{1*****}, В. И. Шишов^{6,1*****}

¹Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
Москва, Россия

²Университет Йорка, Департамент физики и астрофизики, Торонто, Канада

³Университет Калифорнии в Санта-Барбаре, Департамент физики, Санта-Барбара, Калифорния, США

⁴Национальный центр радиоастрофизики, Пуна, Индия

⁵Государственное объединение научных и прикладных исследований (CSIRO)
в области астрономии и космоса, Отделение астрономии и астрофизики, Канберра, Австралия

⁶Пуцинская радиоастрономическая обсерватория Астрономического центра
Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Поступила в редакцию 29.12.2015 г.; принята в печать 17.02.2016 г.

С использованием наземно-космического радиоинтерферометра “Радиоастрон” измерены угловые размеры кружка рассеяния для трех удаленных пульсаров В1641–45, В1749–28 и В1933+16. Наблюдения проводились при поддержке наземной сети радиотелескопов в составе системы апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT), двух 32-м телескопов в Торуне и в Светлом (антенна системы КВАЗАР), одной антенны сети VLBA (Санта-Крус), радиотелескопа в Аресибо, радиотелескопов Австралии (Парк, Нарабрай (АТСА), Мопра, Хобарт и Седуна), и радиотелескопа обсерватории ХартРАО в ЮАР. Диаметры кружка рассеяния на уровне половинной интенсивности (FWHM) составили 27 и 0.5 мс дуги для В1641–45 и В1749–28 на частоте 1668 МГц, 12.3 и 0.84 мс дуги для пульсара В1933+16 на частотах 316 и 1668 МГц, соответственно. Также для этих пульсаров различными методами был измерен характерный временной масштаб уширения рассеянного импульса τ_{sc} на неоднородностях межзвездной плазмы. Совместное знание размера кружка рассеяния и временного масштаба уширения импульса позволяет оценить расстояние до эффективного рассеивающего экрана d . Были получены следующие результаты. Для пульсара В1641–45: $d = 3.0$ кпк при принятом расстоянии до самого пульсара $D = 4.9$ кпк; для пульсара В1749–28: $d = 0.95$ кпк и $D = 1.3$ кпк. Наблюдения пульсара В1933+16 были проведены одновременно на двух частотах 316 и 1668 МГц. Положение экрана согласуется по измерениям на обеих частотах $d_1 = 2.6$ и $d_2 = 2.7$ кпк при принятом расстоянии до пульсара 3.7 кпк. Для этого пульсара выявлено также два экрана из анализа параболических арок во вторичном динамическом спектре на частоте 1668 МГц на расстоянии 1.3 и 3.1 кпк. Выявленные рассеивающие экраны для двух пульсаров отождествляются с реальными физическими объектами, находящимися на луче зрения к этим пульсарам: G339.1–04 (PSR В1641–45) и G0.55–0.85 (PSR В1749–28).

DOI: 10.7868/S0004629916090061

*E-mail: popov069@asc.rssi.ru

**E-mail: andrian@asc.rssi.ru

***E-mail: bartel@yorku.ca

****E-mail: cgwinn@physics.ucsb.edu

*****E-mail: bcj@ncra.tifr.res.in

*****E-mail: David.Jauncey@csiro.au

*****E-mail: nkardash@asc.rssi.ru

*****E-mail: arud@asc.rssi.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиоизлучение космических источников рассеивается на неоднородностях межзвездной плазмы. Наиболее наглядно эффекты рассеяния проявляются для компактных источников, какими являются пульсары. Именно с открытием пульсаров проявления рассеяния радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы были изучены теоретически [1–3] и экспериментально [4–6]. Основными следствиями рассеяния радиоволн с уменьшением частоты наблюдения являются следующие явления: увеличение измеренного углового размера источника θ_{sc} , увеличение длительности импульса пульсара τ_{sc} , модуляция интенсивности радиоизлучения по частоте и времени с характерными масштабами $\Delta\nu_d$ и Δt_{sc} .

Одновременные измерения перечисленных выше параметров для выбранного объекта в течение достаточного длинного интервала времени ($T > \Delta t_{sc}$) и в достаточно широкой полосе частот ($B_\nu > \Delta\nu_d$) позволяют получить информацию о структуре неоднородностей межзвездной плазмы в направлении данного объекта. Преимуществами в изучении эффектов рассеяния обладают интерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами (РСДБ), так как только в таких наблюдениях можно непосредственно измерить угол рассеяния θ_{sc} [7, 8]. Новые возможности в этом направлении обеспечивает наземно-космический интерферометр “Радиоастрон”, который позволяет реализовать высокое угловое разрешение до 1 миллисекунды (мс) дуги в метровом диапазоне длин волн (92 см) и до 0.2 мс дуги в дециметровом диапазоне (18 см). В результате уже проведенных исследований был измерен диаметр рассеяния на частоте 316 МГц для пульсара В0329+54 (4.7 мс дуги) [9] и для пульсара в Крабовидной туманности (14.0 мс дуги) [10]. Для близкого пульсара В0950+08 были определены расстояния до рассеивающих и преломляющих слоев межзвездной плазмы [11]. В данной работе будут представлены результаты измерений эффектов рассеяния для пульсаров В1641–45 и В1749–28 на длине волны 18 см, а для пульсара В1933+16 в двух диапазонах длин волн.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Параметры наблюдательных сеансов представлены в табл. 1. Были организованы достаточные длительные наблюдательные сеансы, которые

должны были на достаточном статистическом материале обеспечить уверенное определение параметров рассеяния, таких как характерное время мерцаний Δt_{sc} и полоса декорреляции $\Delta\nu_d$. Также необходимо было проследить изменение амплитуды функции видности в зависимости от величины проекции базы. По условиям соблюдения теплового режима бортовой системы передачи научной информации, непрерывная длительность научного сеанса на космическом аппарате (КА) не может превышать определенного предела (1–2 часа в зависимости от ориентации КА относительно Солнца), поэтому в столбце “Время КРТ” указаны отдельно промежутки времени, покрытые наблюдениями космического радиотелескопа (КРТ). Система оцифровки данных КРТ имеет однобитный формат, а на наземных телескопах использовалась двухбитная оцифровка.

Еще одна особенность касается диапазона 92 см, в котором полезной является только верхняя частотная субполоса (316–332 МГц) из-за характеристики входного фильтра приемной системы. В других диапазонах регистрируются верхние и нижние субполосы, каждая шириной 16 МГц, для двух круговых поляризации. В табл. 1 указывается центральная частота (т.е. частота разделения полос). КРТ способен также работать одновременно в двух диапазонах частот, при этом разные частотные каналы осуществляют прием радиоизлучения в разных поляризациях. Именно такой режим использовался в наблюдениях пульсара В1933+16. Реальные характеристики бортового радиоастрономического комплекса даны в статье [12].

Корреляция данных выполнялась на корреляторе АКЦ ФИАН с использованием окна импульса и с компенсацией размытия импульса из-за дисперсии радиоволн. Основные особенности такой методики корреляции описаны в публикации [13]. В табл. 2 приводятся основные параметры, принятые при корреляции: число каналов N_{ch} и интервал считывания выхода коррелятора δt , который должен быть кратным периоду повторения импульсов данного пульсара. Время интегрирования на каждом импульсе выбиралось равным ширине импульса по уровню 10% от максимальной интенсивности. Дополнительно выбиралось окно интегрирования такой же длительности вне главного импульса. Это окно использовалось для вычисления нормировочных коэффициентов по формулам (1) и (2) (см. раздел 3). Все необходимые характеристики пульсара, включая эфемериды прихода импульсов, были заимствованы из каталога пульсаров ATNF [14]¹.

¹ <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>

***** E-mail: tania@prao.ru
 ***** E-mail: vsoglasn@asc.rssi.ru
 ***** E-mail: fadeev@asc.rssi.ru
 ***** E-mail: shishov@prao.ru

Таблица 1. Параметры наблюдательных сеансов

Пульсар	P , с	Мера дисперсии, пк/см ³	Частота, МГц	Дата	Общее время, часы	Время КРТ, часы	Телескопы
V1641–45	0.455	478.8	1668	18.03.2014	15	1.0, 0.7, 2.0	At, Mr, Cd, Ho, Hh, Pa
V1749–28	0.562	50.37	1668	26.05.2014	6	0.7, 0.7, 1.0	At, Mr, Cd, Ho, Hh, Pa
V1933+16	0.359	158.52	1668/316	01.08.2013	1.5	1.5	Wb, Sc, Ar, Tr, Sv

Таблица 2. Основные параметры, использованные при корреляции кросс-спектров пульсаров и полученные результаты

Пульсар	N_{ch}	δt , с	ΔT , с	Δt_{sc} , с	$\Delta \nu_d$, кГц	τ_{sc} , мкс	θ_H , mas	l, b , °	D , кпк	d , кпк
V1641–45	16384	0.45	115	0.20 (0.05)	0.062 (0.002)	2600 (100)	27 (5)	339.2, –0.2	4.9	3.0
V1749–28	256	5.62	225	220 (20)	410 (100)	310 (0.040)	0.5 (0.2)	1.54, –0.96	1.3	0.95
V1933+16	2048	0.35	250	41.6 (0.5)	50.4 (1.1)	3.2 (0.1)	0.84 (0.04)	52.4, –2.1	3.7	2.7 [1.3; 3.1]
V1933+16	8192	0.35	250	–	0.25 (0.15)	600 (400)	12.3 (0.6)	52.4, –2.1	3.7	2.6

Примечание. N_{ch} — число каналов в корреляторе, δt — интервал считывания кросс-спектров, ΔT — интервал анализа кросс-спектров, Δt_{sc} — характерное время мерцаний, $\Delta \nu_d$ — ширина полосы декорреляции, τ_{sc} — временной масштаб уширения рассеянного импульса на неоднородностях межзвездной плазмы, θ_H — угловой диаметр кружка рассеяния, l, b — галактические координаты пульсара, D — расстояние до пульсара, d — расстояние до экранов. В скобках приведены погрешности величины (среднеквадратичное отклонение (СКО)). Для пульсара V1933+16 в первой строке указаны результаты, полученные на частоте 316 МГц (для d в квадратных скобках указаны оценки, полученные по параболическим дугам), во второй строке — для 1668 МГц.

Фаза максимума импульса определялась предварительным расчетом на корреляторе путем анализа автоспектра для наиболее крупного наземного радиотелескопа. На выходе коррелятора формируются комплексные кросс-спектры для всех комбинаций баз, включая автоспектры и кросс-поляризационные спектры в стандартном FITS-формате. Дальнейший анализ результатов корреляции проводился с использованием стандартного пакета чтения FITS-файлов CFITSIO [15].

3. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Принято различать три режима измерений параметров мерцаний [16]: режим моментального снимка (snapshot), при котором время анализа меньше характерного времени дифракционных мерцаний Δt_{sc} , а полоса приема меньше полосы декорреляции $\Delta \nu_d$ дифракционных искажений в спектре; режим анализа с усреднением, при котором время анализа значительно больше характерного времени мерцаний Δt_{sc} , и полоса приемника много шире полосы декорреляции

$\Delta \nu_d$; наконец, режим с усреднением по ансамблю предполагает усреднение многих реализаций, полученных в режиме с усреднением, за время, большее характерного времени рефракционных мерцаний Δt_{ref} . Время дифракционных мерцаний заключено в интервале от секунд до десятков минут, а характерное время рефракционных мерцаний лежит в районе нескольких недель и месяцев. Таким образом, в нашем анализе мы можем воспользоваться только режимом моментального снимка или режимом анализа с усреднением. Режим моментального снимка дает возможность проанализировать поведение мгновенных значений амплитуды функции видности и выявить структуру кружка рассеяния, а режим анализа с усреднением позволяет получить средние значения величины кружка рассеяния θ_H и времени рассеяния τ_{sc} , что позволяет оценить положение рассеивающего экрана на луче зрения.

Интерференционный отклик для выбранной пары телескопов, который принято также называть функцией видности, получается из набора комплексных кросс-спектров путем последователь-

ного преобразования Фурье, сначала по частоте (обратное преобразование Фурье), а затем по времени (прямое преобразование) на временном интервале ΔT . Функция видности анализируется на диаграмме “задержка-частота интерференции” $V_{AB}(\tau, f)$. Основные соотношения и преобразования для функций, используемых в посткорреляционном анализе, даны в нашей предыдущей публикации [9].

Моментальный снимок рассеянного изображения пульсара состоит из отдельных когерентных копий исходного нерассеянного изображения, распределенных в пределах кружка рассеяния. Сигналы от вторичных изображений одинаковы, но приходят в точку наблюдения с разными задержками по времени. Для случая двухэлементного интерферометра в корреляционной функции естественным образом появляются два характерных масштаба: один соответствует размеру кружка рассеяния (большие задержки), другой — расстоянию между точечными изображениями (малые задержки). Кроме того, дополнительно различные масштабы могут появиться, если на луче зрения имеется несколько локальных областей межзвездной плазмы с различными физическими параметрами.

Для точечного источника, такого как пульсар, подверженного рассеянию, модуль функции видности, определенный для достаточно большой базы интерферометра, разрешающей кружок рассеяния, представляет собой пятно увеличенной амплитуды с размерами: $\Delta f = 1/(2\pi\Delta t_{sc})$ и $\Delta\tau = 1/(2\pi\Delta\nu_d)$ на диаграмме “частота интерференции-задержка”, соответственно. Именно такой вид был продемонстрирован в результате анализа наблюдений пульсара В0329+54 на базах наземно-космического интерферометра, достигавшим 235 000 км [9]. На меньших базах интерферометра, когда оба радиотелескопа находятся в пределах одного дифракционного пятна, функция видности имеет пик в начале координат (при правильной компенсации частоты интерференции и задержки); амплитуда этого пика уменьшается с увеличением базы, что и позволяет измерить размеры кружка рассеяния [9].

Радиоизлучение пульсаров обладает особенностями, которые требуют специального подхода к нормировке амплитуды функции видности. Эти особенности состоят в сильной переменности потока радиоизлучения и модуляции интенсивности, обусловленной мерцаниями. При РСДБ-наблюдениях пульсаров обычно отключают автоматическую регулировку усиления приемного тракта во избежание ее срабатывания на сильных импульсах пульсара. В результате традиционный метод нормировки путем расчета вклада сигнала

от исследуемого источника в общую антенную температуру на основе измерения системной температуры участвующих телескопов и знания общего потока исследуемого источника для пульсаров оказывается непригодным. Импульсный характер излучения и сравнительно высокие плотности потока индивидуальных импульсов позволяют непосредственно измерить относительные приращения сигнала в окне корреляции. Тогда можно использовать простое нормировочное соотношение. Нормировочный фактор, на который следует разделить исходные ненормированные амплитуды функции видности, имеет вид:

$$R = \sqrt{(\sigma_{1\text{TOT}}^2 - \sigma_{1\text{OFF}}^2)(\sigma_{2\text{TOT}}^2 - \sigma_{2\text{OFF}}^2)}, \quad (1)$$

где индексы “1” и “2” обозначают телескопы в паре, а “ $\sigma_{1\text{TOT}}^2$ ” и “ $\sigma_{2\text{OFF}}^2$ ” получаются формально как амплитуды функции видности, полученные по автоспектрам для окна на импульсе (TOT) и для окна вне импульса (OFF) соответственно.

Ввиду низкой чувствительности космического радиотелескопа по сравнению с наземными радиотелескопами, для него разность $\sigma_{1\text{TOT}}^2 - \sigma_{2\text{OFF}}^2$ определяется с низкой точностью, и в этом случае можно использовать выражение:

$$R = \frac{\sigma_{2\text{OFF}}}{\sigma_{1\text{OFF}}} (\sigma_{1\text{TOT}}^2 - \sigma_{1\text{OFF}}^2) \sqrt{\eta}, \quad (2)$$

где $\eta = SEFD_{\text{GRT}}/SEFD_{\text{SRT}}$ — есть отношение эквивалентных системных температур наземного (GRT) и космического (SRT) радиотелескопов.

Поведение функции видности для мерцающего источника было подробно рассмотрено Гвином с соавторами в ряде публикаций [4, 5, 17]. Для мерцающих радиоисточников оказалось возможным использовать безразмерные оценки амплитуды функции видности ρ_{AB} как доли от общего потока в виде отношения измеряемых коррелятором величин. Мерой падения амплитуды функции видности с увеличением базы интерферометра может служить отношение площади под центральным пиком к площади под протяженной частью в сечении центрального пика по задержке.

$$\rho_{AB}^2 = \frac{\int_{\Delta t} V(\tau, f_0) d\tau}{\int_{T-\Delta t} V(\tau, f_0) d\tau}, \quad (3)$$

где $\Delta t = 1/B$, а $B = 16$ МГц — ширина полосы.

В этом сечении протяженная часть (“пятно”) может быть представлена функцией Лоренца $V(\tau) = Ab/\pi(\tau^2 + b^2)$, полуширина этой функции равна b , а площадь под кривой составляет величину A . Использование в качестве меры падения амплитуды функции видности упомянутого выше отношения избавляет нас от необходимости нормировки самой амплитуды $V(\tau, f_0)$.

4. ПУЛЬСАР В1641–45

Пульсар В1641–45 имеет меру дисперсии 478.8 пк/см^3 и располагается на расстоянии 4–5 кпк [18] в плоскости Галактики. Это самый далекий объект в списке пульсаров, исследованных с наземно-космическим интерферометром “Радиоастрон”. Из приведенного в каталоге ATNF значения величины времени рассеяния τ_{sc} , которое составляет на частоте 1 ГГц величину 11.2 мс, можно оценить ожидаемое значение на нашей частоте 1668 МГц (по степенному закону с четвертой степенью), и это значение оказалось близким к 1.5 мс, что соответствует оценке величины полосы декорреляции $\Delta\nu_d \approx 100 \text{ Гц}$ по соотношению $2\pi\tau_{sc}\Delta\nu_d = 1$. Таким образом, для обеспечения такого высокого частотного разрешения в полосе 16 МГц надо задать более 160 000 каналов на корреляторе АКЦ, в котором такая опция не предусмотрена. Поэтому для оценки реального значения полосы декорреляции были проведены вспомогательные вычисления на программных средствах отдела Космической радиоастрономии для ограниченного по времени (20 минут) интервала записи для радиотелескопов в Парксе и в Нарабрай (АТСА). Использовался метод когерентной компенсации дисперсии [19, 20], а число спектральных каналов составило величину 524 288, что обеспечило частотное разрешение 30.517 Гц. К сожалению, производительность компьютера недостаточна, чтобы обработать с таким количеством каналов весь наблюдательный сеанс для всех комбинаций баз.

На рис. 1 приведено сечение по частоте двумерной корреляционной функции между динамическими спектрами, полученными в Парксе и в Нарабрай (АТСА). Экспериментальные точки аппроксимировались функцией Лоренца, и полоса декорреляции оказалась равной $62 \pm 2 \text{ Гц}$ по полуширине. Кривая, проходящая через кружки, соответствует сечению, сдвинутому на один период. Наблюдаемое десятикратное уменьшение коэффициента корреляции позволяет оценить время мерцаний в 0.2 с на уровне $1/e$. В корреляторе АКЦ было задано 16 384 канала, считывание выходных данных коррелятора проводилось на каждом периоде пульсара, а величина окна интегрирования составляла 10 мс. Амплитуда функции видности измерялась на каждой последовательности из 256 импульсов, т.е. на интервале $\Delta T = 115 \text{ с}$. Таким образом, наш анализ проводился в режиме с усреднением. Для этого пульсара мы использовали прямой метод нормировки амплитуды функции видности через уравнение (1), так как рассматривались только комбинации наземных радиотелескопов с высокой чувствительностью.

Скорректированные амплитуды функции видности для различных комбинаций баз представлены на рис. 2 (а) в зависимости от величины проекции базы, которая достигает значений более 8 миллионов длин волн на базах между компактной решеткой АТСА и радиотелескопом в Седуне. Радиотелескоп в Хобарте давал состоятельные данные только в самом начале и в самом конце наблюдательной сессии, хотя формально он функционировал все время наблюдений. На рис. 2 (а) видно заметное падение амплитуды функции видности при переходе к большим проекциям базы интерферометра. Для оценки диаметра кружка рассеяния мы использовали выражение, предложенное в работе [21]:

$$V_{AB} = V_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\pi}{(2 \ln 2)^{0.5}} \frac{b\theta_H}{\lambda} \right]^{\alpha-2} \right\}, \quad (4)$$

где параметр α соответствует показателю степени спектра неоднородностей плазмы (мы приняли его равным 4), b — проекция базы, λ — длина волны, а θ_H — искомая полная ширина на уровне половинной интенсивности (FWHM), которая составила по результатам аппроксимации данных функцией, заданной уравнением (4) и показанной на рис. 2 (а) сплошной линией, величину $27 \pm 5 \text{ мс}$ дуги.

Общая продолжительность наблюдательной сессии для данного пульсара составила около 15 часов. Это обеспечило хорошее покрытие UV-плоскости, так что мы предприняли попытку получения изображения диска рассеяния традиционным для РСДБ исследований путем. Относительные чувствительности телескопов были оценены из значений приращения уровня сигнала пульсара, кривые чувствительности (SEFD) были представлены полиномиальными зависимостями от времени. В среднем они составили 50, 100, 300, 750, и 2000 Ян для радиотелескопов в Парксе, Нарабрай (АТСА), Мопре, Хобарте и Седуне соответственно. С помощью программного пакета Astro Space Locator (ASL) было получено изображение кружка рассеяния с применением классических для РСДБ методик CLEAN и самокалибровки восстановления изображения радиосточника [22]. Размер карты был выбран $50 \times 50 \text{ мс}$ дуги. На рис. 3 показано UV-покрытие (справа) и полученное изображение кружка рассеяния (слева), которое заметно превышает по размерам синтезированную диаграмму направленности интерферометра. Представление диска рассеяния двумерной Гауссианой дает на уровне половинной интенсивности значения $20.6 \times 27.5 \text{ мс}$ дуги по прямому восхождению и склонению, соответственно, что хорошо согласуется с результатом аппроксимации зависимости амплитуды функции видности от проекции базы интерферометра.

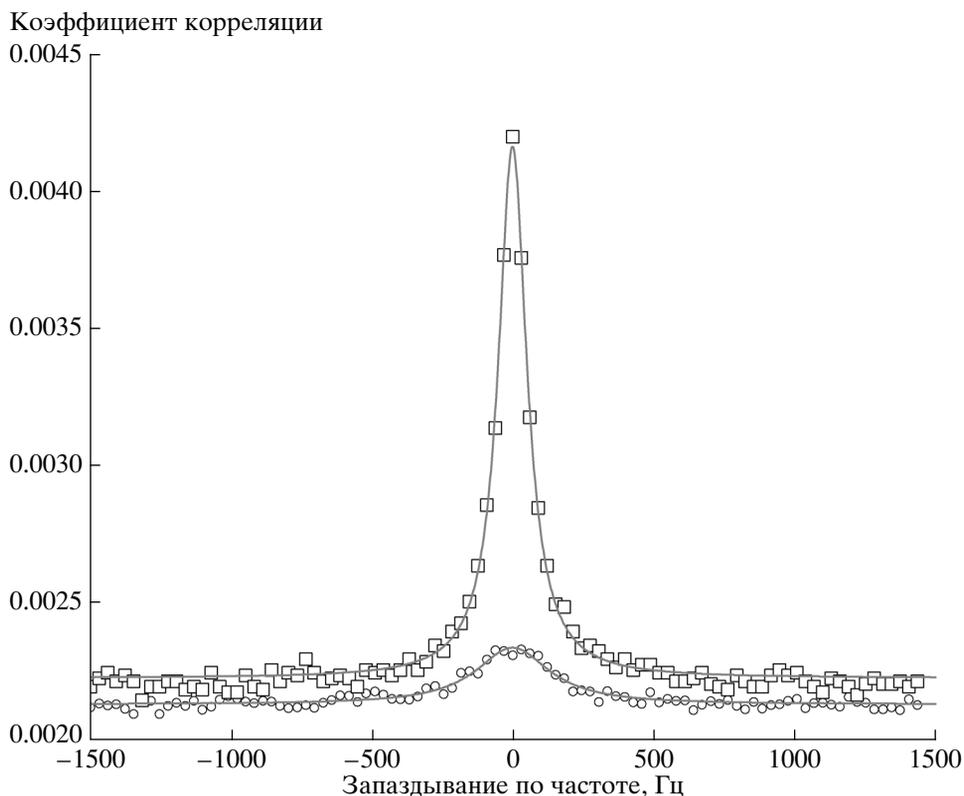


Рис. 1. Пульсар В1641–45. Сечение по частоте двумерной корреляционной функции между динамическими спектрами, построенными для телескопов в Парксе и в Нарабрай (АТСА) по 20-минутному наблюдательному интервалу. Квадраты — данные для сечения с нулевым сдвигом по времени, кружки — сечение, проходящее со сдвигом по времени на один период повторения импульсов пульсара. Измеренная полоса декорреляции составила величину 62 Гц.

У этого пульсара не было обнаружено никаких признаков “пятна” увеличенной амплитуды функции видности на диаграмме “задержка-частота интерференции” на наземно-космических базах и даже на межконтинентальной базе Австралия-ЮАР. Это и не удивительно, так как размер пятна по запаздыванию должен соответствовать характерному времени рассеяния, которое мы оценили выше величиной около 1.5 мс, в то время как размер окна коррелятора составлял величину в 1.024 мс.

Для более точного определения времени рассеяния τ_{sc} мы воспользовались анализом формы среднего профиля импульса, который был получен методом когерентной компенсации дисперсии для 20-минутной записи сигнала на радиотелескопе в Парксе. Эта работа была выполнена параллельно с построением динамического спектра с высоким спектральным разрешением, как было описано в начале настоящего параграфа. Оказалось, что самый “хвост” профиля, уже за пределом 10% интенсивности, хорошо аппроксимируется экспонентой с постоянной времени 2.6 мс. Мы приписали это значение величине τ_{sc} . Можно проверить эту оценку через соотношение $2\pi\tau_{sc}\Delta\nu_d = 1$, так как мы измерили $\Delta\nu_d$ независимо. Для параметров τ_{sc}

и $\Delta\nu_d$, приведенных в табл. 2, указанное выше соотношение дает величину 1.01, что подтверждает непротиворечивость сделанных нами оценок параметров рассеяния.

Располагая независимыми оценками величин τ_{sc} и θ_H , приведем некоторые соображения относительно распределения рассеивающей среды на луче зрения от наблюдателя до пульсара. Воспользуемся анализом и ревизией всех измерений расстояний до пульсаров, которую проделал Вербиест с соавторами [18]; они дают возможный интервал расстояний от 4.1 до 4.9 кпк. Для равномерного распределения рассеивающей плазмы Бриттон с соавторами [23] вывел соотношение $\theta_H^2 = 16 \ln 2(c\tau_{sc}/D)$, которое позволяет получить ожидаемую величину угла рассеяния θ_H для такого случая; здесь D обозначает расстояние до пульсара. Мы получаем $\theta_H = 48-52$ мс дуги, то есть почти в два раза больше измеренного нами значения. Таким образом, гипотеза о равномерном распределении рассеивающей среды на луче зрения противоречит нашим результатам.

Перейдем к модели эффективного рассеивающего экрана. В той же работе [23] дается соотно-

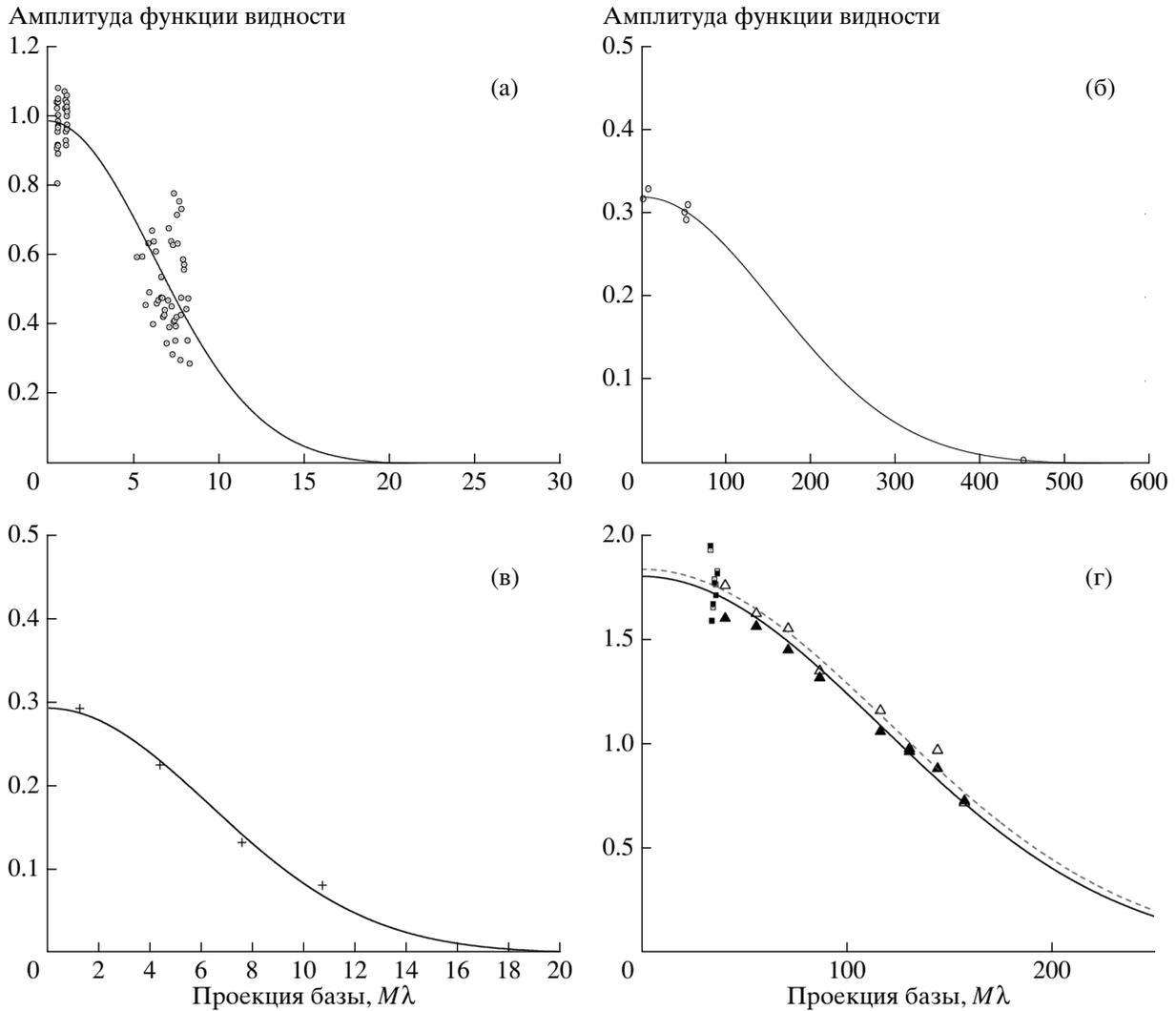


Рис. 2. Зависимость амплитуды функции видности от величины проекции базы: (а) — для пульсара В1641–45, сплошная линия соответствует диаметру кружка рассеяния в 27 мс дуги, использованы только наземные проекции базы; (б) — для пульсара В1749–28, вычисленная по соотношению (3), сплошная линия соответствует диаметру кружка рассеяния в 0.5 мс дуги; (в, г) — для пульсара В1933+16 на частотах 316 МГц (в) на базе Вестерборк–“Радиоастрон” и 1668 МГц (г) на базах Аресибо–“Радиоастрон” (треугольники) и Аресибо–Светлое (крестики). Темные треугольники и сплошные линии здесь соответствуют верхней субполосе, светлые треугольники и штриховая линия — нижней. Ось X оцифрована в миллионах длин волн.

шение и для такого случая:

$$\theta_H^2 = 8 \ln 2c\tau_{sc} \left(\frac{D-d}{Dd} \right), \quad (5)$$

где D — расстояние до пульсара, а d — расстояние от наблюдателя до эффективного экрана.

Наша оценка d составляет 2.7 кпк при расстоянии до пульсара в 4.1 кпк (нижняя граница), и 3.0 кпк при расстоянии до пульсара 4.9 кпк (верхняя граница). В направлении пульсара В1641–45 располагаются две области ионизованного водорода H II: G339.1–0.2 и G339.1–0.4 (обозначения

соответствуют галактическим координатам). В работе [24] даны оценки расстояний до этих областей, полученные по лучевым скоростям радиорекомбинационных линий, а именно, они относят область G339.1–0.2 на расстояние в 6.7 кпк, а область G339.1–0.4 на расстояние 3.3 кпк, то есть первая из них находится дальше, чем пульсар, а вторая — ближе, и ее положение согласуется в пределах 10% с нашей оценкой расстояния до эффективного рассеивающего экрана. Таким образом, было уточнено и расстояние до пульсара, которое должно быть ближе к 4.9 кпк.

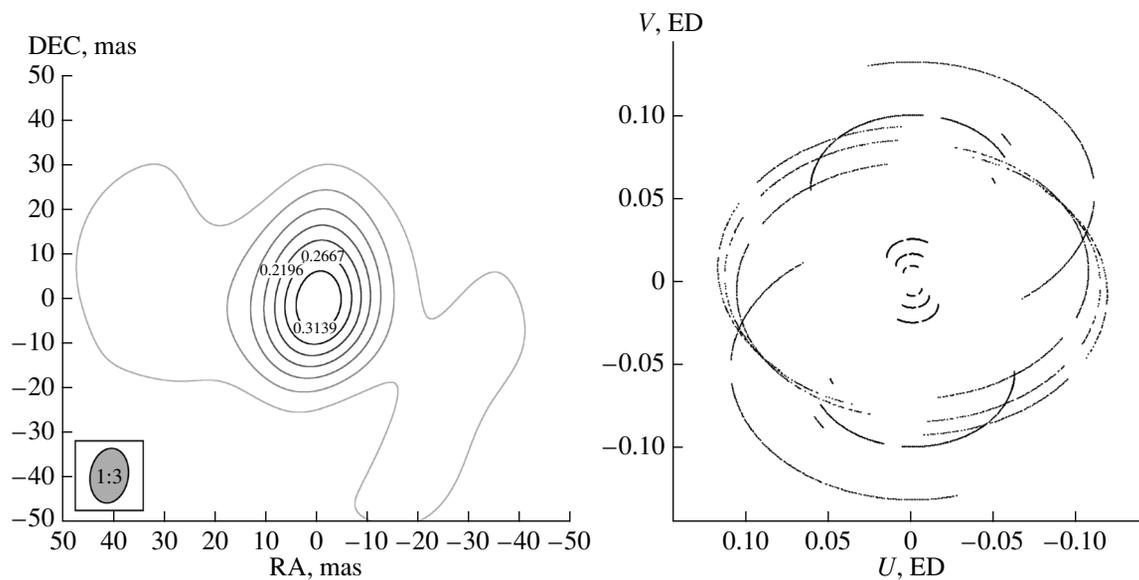


Рис. 3. Изображение круга рассеяния, полученное по данным наземной сети радиотелескопов для пульсара В1641–45. Справа — покрытие UV -плоскости (координаты U и V выражены в диаметрах Земли), слева — синтезированное изображение (координаты RA и DEC выражены в мс дуги), в левом нижнем углу изображен относительный размер синтезированного луча в масштабе 1 к 3.

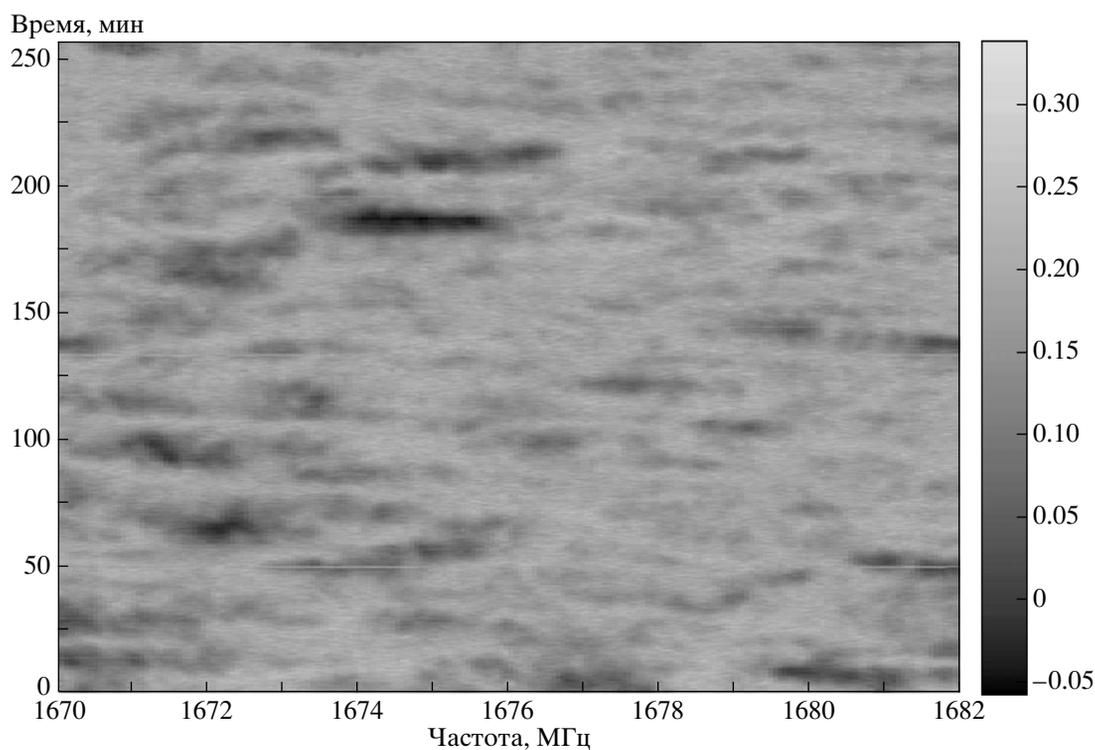


Рис. 4. Динамический спектр пульсара В1749–28, построенный за 4-часовой интервал наблюдений с Паркским радиотелескопом. Разрешение по частоте 62.5 кГц, шаг по времени 22.5 с. Измеренная ширина полосы декорреляции 410 кГц, характерное время мерцаний 220 с.

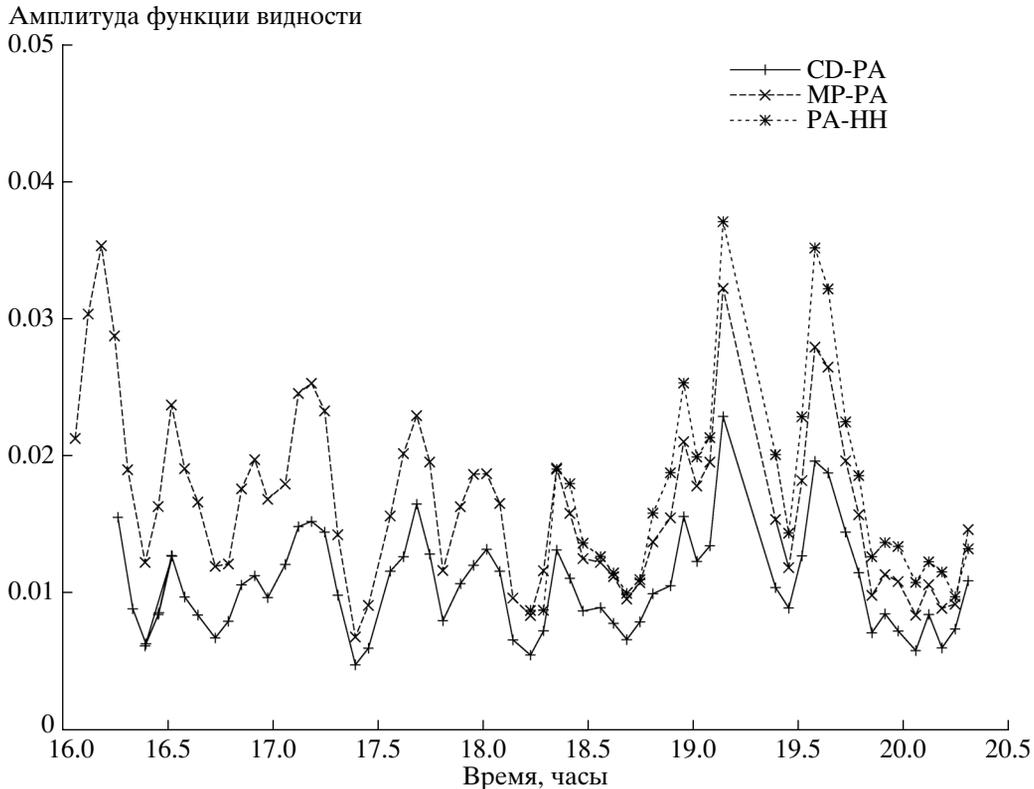


Рис. 5. Наблюдения пульсара В1749–28 26 мая 2014 г. Мерцания амплитуды функции видности для трех комбинаций наземных радиотелескопов: Седуна-Паркс (CD-PA), Мопра-Паркс (MP-PA) и Паркс-Хартбишоек (PA-НН). Шкала по амплитуде приведена без коррекции (необработанные данные в единицах коррелятора).

5. ПУЛЬСАР В1749–28

Для этого пульсара можно выбрать оптимальные значения для спектрального и временного разрешения выходных данных коррелятора; оказалось даже возможным усреднять кросс-спектры на корреляторе за 10 периодов пульсара. Для построения динамического спектра, приведенного на рис. 4, было выполнено дополнительное усреднение по четырем последовательным спектрам, так что временное разрешение составило 22.5 с. Из динамического спектра можно определить характерные значения для полосы декорреляции, $\Delta\nu_d$, и для времени мерцаний, Δt_{sc} . Мы определили эти значения путем анализа центральных сечений двумерной корреляционной функции между динамическими спектрами, полученными в каналах с левой и правой круговой поляризацией. Сечение по частоте не удалось хорошо представить ни функцией Лоренца, ни функцией Гаусса. Две функции Гаусса дали отличное соответствие измеренным точкам. Тогда $\Delta\nu_{1d} = 18$ кГц и $\Delta\nu_{2d} = 610$ кГц, причем амплитуда (вклад) второй составляющей вдвое превышает вклад от первой составляющей.

Мы приняли для дальнейшего анализа за полуширину полосы декорреляции значение 410 кГц,

соответствующее совместному действию аппроксимирующих функций. Сечение по времени хорошо представляется функцией Гаусса с полушириной по уровню $1/e$, равном 220 ± 20 с. Амплитуда функции видности определялась на интервале в 225 с, что соответствует набору из 40 кросс-спектров коррелятора.

Таким образом, реализовался фактически режим моментального снимка, так как время анализа примерно равно характерному времени мерцаний $\Delta T \approx \Delta t_{sc}$. Соответственно, амплитуда функции видности демонстрирует сильные вариации со временем с глубиной модуляции, близкой к единице (рис. 5). В таком режиме коррекция амплитуды функции видности в соответствии с выражением (1) не устраняет полностью наблюдаемые мерцания, и сохраняется заметный разброс скорректированных значений от 0.8 до 1.2.

Мы обратились тогда к анализу структуры функции видности в зависимости от запаздывания, чтобы получить отношение между компактной и протяженной составляющей, как это было описано в разделе 3. На рис. 6 (а, б) показаны примеры сечения интерференционного отклика на диаграмме “задержка-частота интерференции” для

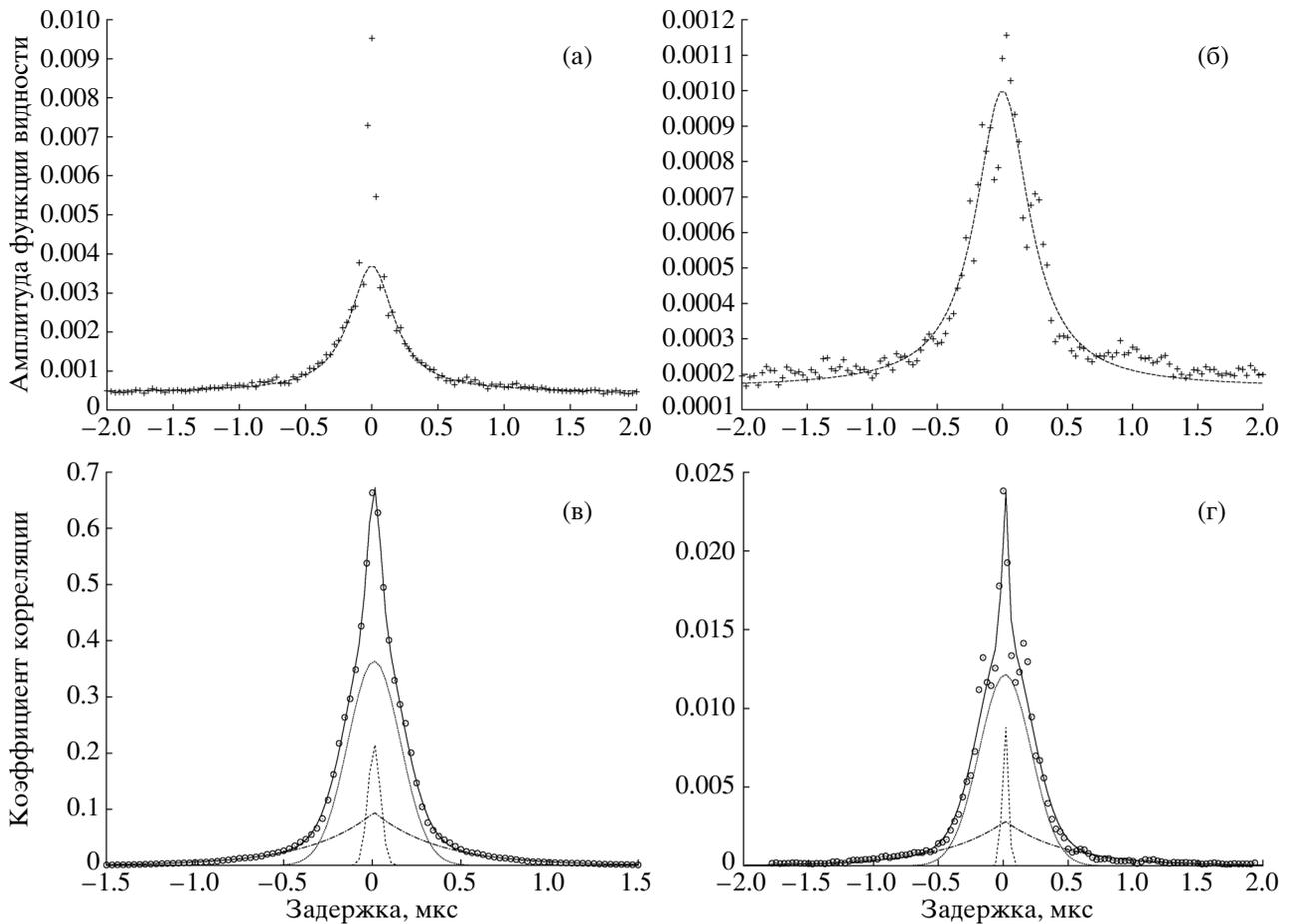


Рис. 6. Пульсар В1749–28. (а, б) — сечение по запаздыванию интерференционного отклика на диаграмме задержка–частота интерференции для наземной базы Седуна–Паркс (наблюдается центральный пик) (а), и для наземно-космической базы “Радиоастрон”–Паркс (центральный пик отсутствует) (б). Интерференционный отклик рассчитывался по интервалу 225 с, затем было усреднено 5 диаграмм за период одного наблюдательного скана (20 мин). Амплитуда не скорректирована за отношение сигнал-шум (SNR). Штриховые линии — аппроксимация данных функцией Лоренца. (в, г) — Сечение по запаздыванию двумерной корреляционной функции между интерференционными откликами, полученными для каналов приемника с левой и правой поляризацией для базы в 9000 км Паркс–Хартбишоеком (г), и для базы в 120 000 км “Радиоастрон”–Паркс (в). Сплошной линией показана аппроксимация суммой трех составляющих функций, представленных отдельно пунктирной, штриховой и штрих-пунктирной линиями.

двух комбинаций базы интерферометра: Седуна–Паркс (а) и “Радиоастрон”–Паркс (б); штриховой линией обозначены функции Лоренца, достаточно хорошо представляющие наблюдательные данные. На наземной базе, кроме протяженной составляющей, присутствует компактная деталь, длительность которой определяется шириной спектра. На наземно-космической базе такая компактная деталь отсутствует, что свидетельствует о том, что кружок рассеяния был разрешен на этой базе.

Мерой амплитуды функции видности может служить отношение площади под компактной составляющей к площади под протяженной составляющей (см. (3)). Для исключения краевых эффектов формы полосы приемника мы использовали только центральный участок спектра 12 МГц

из 16-ти; таким образом временное разрешение по запаздыванию составило 0.04167 мкс, вместо оригинального значения 0.03125 мкс. Форма компактной компоненты должна соответствовать функции: $\text{sinc}(\pi\Delta\nu\tau) = \sin(\pi\Delta\nu\tau)/(\pi\Delta\nu\tau)$, где $\Delta\nu$ — ширина полосы анализа (12 МГц). Эта функция равна нулю при значении $\tau = 2 \times 0.04167 = 0.0833$ мкс. Для наших целей удобно представить участок функции sinc параболической кривой вида: $y(x) = a(1 - kx^2)$ с коэффициентом $k = 145$, обеспечивающим обращение y в нуль при $x = 0.0833$ мкс. Такое приближение дает для площади под центральным пиком соотношение $S = (4/3)adt$, где a — амплитуда центрального пика, а dt — его полуширина ($dt = 0.0833$ мкс).

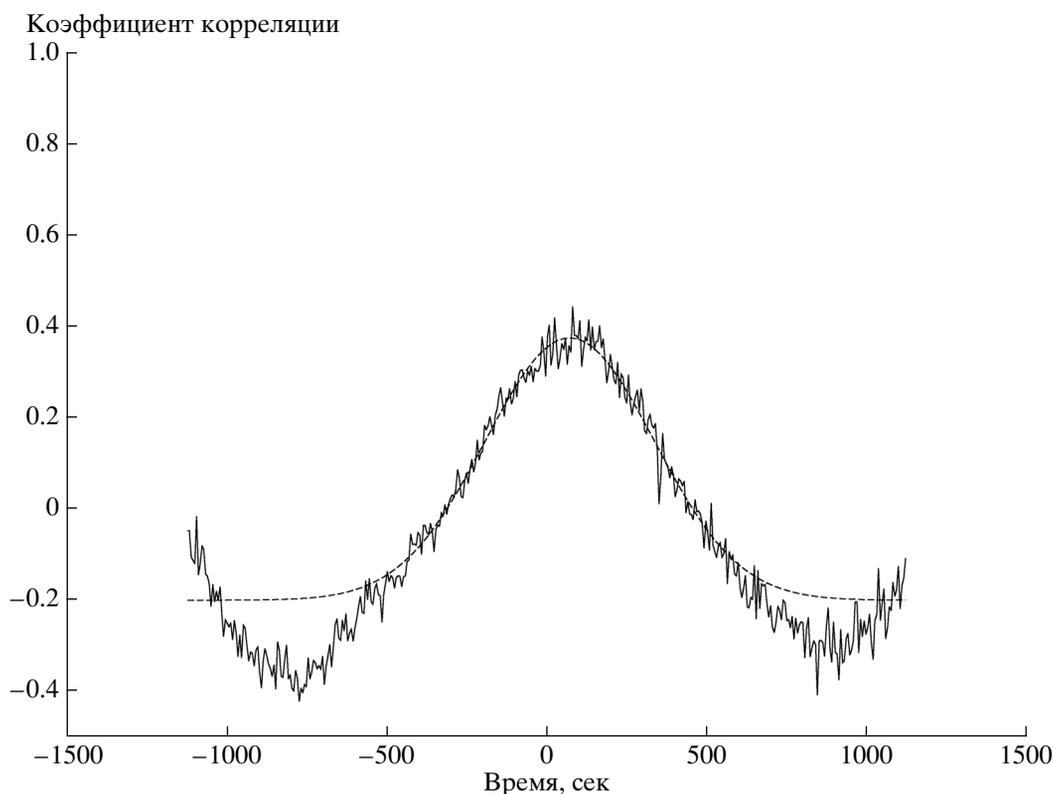


Рис. 7. Пульсар В1749–28. Пример кросс-корреляционной функции между кривыми мерцания при комбинации телескопов АТ-НН для избранного мерцательного пятна. Сдвиг максимума составляет 70 с, что соответствует скорости дрейфа дифракционной картины 130 км/с.

Полученные таким образом относительные амплитуды функции видности приведены на рис. 2 (б) в зависимости от величины проекции базы, усредненные для 20-минутных сканов. Полуширина протяженной детали, аппроксимированной функцией Лоренца, заключена в интервале 270–350 нс.

Субструктура кружка рассеяния выявляется путем анализа сечений двумерной кросс-корреляционной функции между интерференционными откликами (пятнами на диаграмме “задержка-частота интерференции”), полученными для каналов приемника с левой и правой круговой поляризацией. Примеры таких сечений по запаздыванию показаны на рис. 6 (в, г) для базы Паркс-Хартбишоек (г) и для базы “Радиоастрон”-Паркс (в). В структуре пятна были выявлены три составляющих: компактная Гауссова деталь с полушириной $1/\Delta\nu$, более протяженная Гауссова деталь с характерной полушириной 270–320 нс (соответствует ширине Лоренцовой детали в самом пятне) и экспоненциальная составляющая с падением амплитуды в e раз на интервале 500–600 нс. Амплитуды компактной и средней Гауссо-

вых составляющей примерно равны, а амплитуда экспоненциального компонента в 2–3 раза меньше.

Поведение амплитуды функции видности с изменением проекции базы, показано на рис. 2 (б). Некоторое уменьшение амплитуды на самых длинных наземных базах и полное отсутствие центрального пика в функции видности на наземно-космических базах позволяют в принципе измерить диаметр кружка рассеяния (θ_H) путем использования соотношения (4), как это было сделано для пульсара В1641–45. Сплошная линия на рис. 2 (б) показывает полученное решение, соответствующее величине $\theta_H = 0.5 \pm 0.2$ мс дуги при $\alpha = 4$. Полученное значение для угла рассеяния определено с невысокой точностью, около 30%, так как не было измерений на промежуточных проекциях базы в районе 20 000 км. Соответственно, получена приблизительная оценка расстояния от наблюдателя до экрана, а именно, допустимое положение экрана оказывается в интервале от 0.6 до 0.8 от полного расстояния между наблюдателем и пульсаром при расстоянии до пульсара 1.3 кпк.

Наблюдаемые сильные мерцания интенсивности радиоизлучения пульсара, проявившиеся в вариациях амплитуды функции видности (рис. 5),

позволяют нам измерить наблюдаемую скорость дрейфа дифракционной картины. Для этого мы сопоставили кривые мерцаний интенсивности, полученные по автоспектрам для комбинации наиболее удаленных радиотелескопов АТ-НН (АТСА и Хартбишоек) — РА-НН (Паркс и Хартбишоек). Пример кросс-корреляционной функции (ККФ) между кривыми мерцания для комбинации телескопов АТ-НН, полученные в канале с левой круговой поляризацией, в верхней боковой полосе, приведен на рис. 7 (для избранного мерцательного пятна, такие пятна хорошо видны в динамическом спектре на рис. 4). Положение максимума ККФ определялось вписыванием гауссиан для участка ККФ вблизи ее вершины. Наблюдается заметный сдвиг максимума ККФ между телескопами Австралии (АТСА, Паркс) и Южной Африки (Хартбишоек). Для различных комбинаций телескопов, поляризационных каналов, субполос и мерцательных пятен были получены значения для запаздывания картины мерцаний, заключенные в интервале от 60 до 90 с. Это соответствует интервалу для скорости дрейфа дифракционной картины V_{obs} от 110 до 160 км/с. Собственное движение пульсара В1749–28 было измерено Фомалонтом с соавторами [25], которое при принятом нами расстоянии в 1.3 кпк до пульсара соответствует скорости $V_T = 40 \pm 30$ км/с.

Чтобы получить наблюдаемую скорость дрейфа дифракционной картины в модели тонкого рассеивающего экрана, необходимо поместить этот экран достаточно близко к пульсару:

$$V_{\text{obs}} = V_T \frac{d}{D - d}, \quad (6)$$

где d — расстояние от наблюдателя до рассеивающего экрана.

Для средних значений скорости V_T и V_{obs} получается значение $d/D = 0.78$, что находится в удовлетворительном соответствии с определением расстояния от наблюдателя до экрана, оцененном выше по соотношению (5) между величиной угла рассеяния и временем рассеяния. Расстояние до пульсара В1729–28 известно с большой неопределенностью [18], $d \sim 0.1\text{--}1.3$ кпк. Соответственно изменяется и оценка расстояния до рассеивающего экрана. На наш взгляд, предпочтительным является далекое положение пульсара (≈ 1.3 кпк), когда он попадает в спиральный рукав Киля-Стрельца, и на луче зрения до наблюдателя оказываются некоторые объекты, перспективные для отождествления их как причины физической реализации рассеивающего экрана. Такими объектами могут служить область ионизованного водорода Н II RCW 142 (G0.55–0.85) или ОН/IR область [26, 27]. Существование такого объекта

сопровождается наличием протяженной оболочки, которая может служить и рассеивающим экраном. Если принять среднее значение отношения d/D из определений по формулам (5) и (6) равным 0.73 ± 0.1 , то расстояние до рассеивающего экрана составит 0.95 кпк для $D = 1.3$ кпк.

6. ПУЛЬСАР В1933+16

Пульсар В1933+16 одновременно наблюдался в двух частотных диапазонах в течение полутора часов 1 августа 2013 г. В связи с особенностями работы КРТ (см. раздел 2) на частоте 316 МГц наблюдения проводились в правой круговой поляризации только в верхней субполосе, а на частоте 1668 МГц в левой круговой поляризации в обеих субполосах. На 92 см наблюдения происходили совместно с системой апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT) и 25-м антенной американской решетки телескопов VLBA (Санта-Крус), а на 18 см работала 300-метровая антенна в Аресибо и два 32-метровых телескопа в Торуни и в Светлом. Из-за неверных настроек усиления приемной системы на антенне в Санта-Крус не удалось получить состоятельных данных. В данных, полученных из Торуни, наблюдались частые скачкообразные изменения дисперсии сигнала, что также не позволило использовать их для обработки.

Условия эксперимента были подобраны таким образом, что наземно-космические базы прогрессивно увеличивались со временем от 1150 до 23000 км на частоте 316 МГц (от 1.2 до 25 миллионных длин волн, Мл) и от 6400 до 28000 км на частоте 1668 МГц (от 41 до 160 Мл). В обоих диапазонах амплитуда функции видности оставалась примерно постоянной при усреднении любого числа кросс-спектров в пределах одного скана длительностью 9.5 минут. Поэтому эта амплитуда определялась на интервале всего скана. В связи с недостаточной чувствительностью космического телескопа калибровка всех амплитуд проводилась с помощью выражения (2). На базе Вестерборк-“Радиоастрон” (316 МГц) амплитуда функции видности плавно уменьшается от минимальных баз вплоть до 11 Мл. На рис. 2 (в) показана зависимость амплитуд функции видности от величины проекции базы в диапазоне 316 МГц, а на рис. 2 (г) — в диапазоне 1668 МГц. Непрерывными линиями представлен результат аппроксимации с помощью формулы (4). На больших базах центральный пик отсутствует. На базе Аресибо-“Радиоастрон” (1668 МГц) в обеих субполосах наблюдается падение амплитуды функции видности вплоть до самых больших баз. С этими данными хорошо согласуются амплитуды, полученные на более короткой базе Аресибо-Светлое.

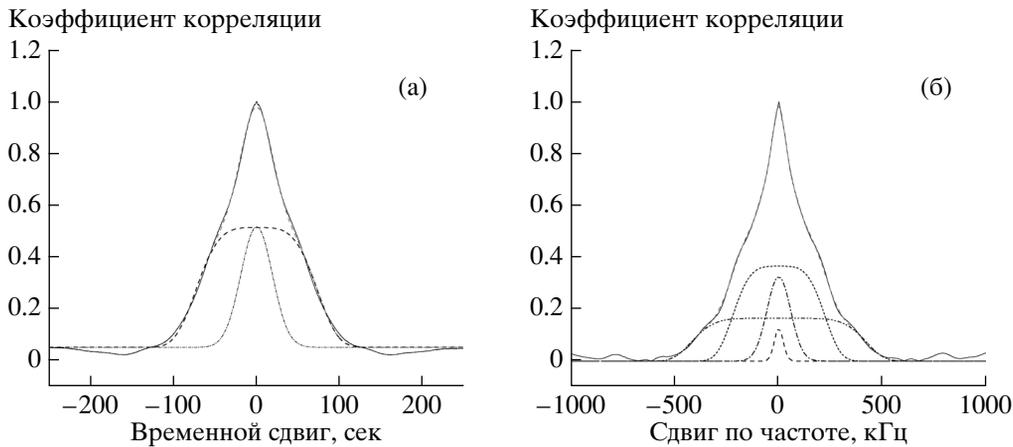


Рис. 8. Пульсар B1933+16. Сечение двумерной кросс-корреляционной функции между динамическими спектрами в разных поляризациях на частоте 1668 МГц, полученными на телескопе в Аресибо, по времени (а) и по частоте (б). Сплошной линией показаны сложные аппроксимирующие функции, прерывистыми — их компоненты.

Амплитуды, полученные на базе “Радиоастрон”-Светлое, отличаются высокой дисперсией и меньшим средним значением, связанной с малой чувствительностью обоих телескопов. В дальнейшем анализе эта база не учитывалась. Так как для этого пульсара получилось хорошее распределение точек по увеличивающимся проекциям базы, то мы в своей аппроксимации оставили показатель α свободным параметром. При аппроксимации формулой (4) со свободным параметром α мы получили для среднего из трех реализаций, приведенных на рис. 2 (в, г), значение $\alpha = 3.7 \pm 0.4$. Однако в окончательной аппроксимации мы использовали $\alpha = 4$ всюду в этой статье. Диаметр кружка рассеяния на 316 МГц получился равным $\theta_H = 12.3 \pm 0.6$ мс дуги, что хорошо согласуется с ранними измерениями (15.2 ± 1.3 мс дуги [4]), а на 1668 МГц — $\theta_H = 0.84 \pm 0.04$ мс дуги.

В работе [28] на частоте 1670 МГц измерены значения $\Delta\nu = 110$ кГц и $\Delta t_{sc} = 45$ с. Из приведенных антенн только у Аресибо достаточно чувствительности для анализа картины мерцаний в динамических спектрах. Поэтому определение значений $\Delta\nu_d$ и Δt_{sc} проводились только по динамическим автоспектрам, полученным на этом радиотелескопе. Форма сечений кросс-корреляционной функции между динамическими спектрами, полученными в каналах левой и правой круговых поляризаций, как по частоте, так и по времени имеет сложную многокомпонентную структуру.

Сечение по времени удалось хорошо аппроксимировать с помощью суммы функции Гаусса и функции типа $\exp(-x^4)$ (рис. 8 (а)). Полная ширина по уровню 0.5 от максимума для узкой гауссовой компоненты равна 41.6 ± 0.5 с, а для более широкой подложки 134 ± 2 с. Сечение по частоте для

аппроксимации требует 3, а в ряде случаев даже 4 функции, каждая из которых описывает свой масштаб частот (см. рис. 8 (б)). Для аппроксимации использовалась сумма двух функций Гаусса и $\exp(-x^4)$. В результате были получены следующие параметры: 50.4 ± 1.1 кГц, 144 ± 3 кГц, 444 ± 2 кГц. Можно предположить, что более компактные детали соответствуют искомому времени мерцания и полосе декорреляции, а протяженная является результатом их наложения. В таком случае искомое время рассеяния составит $\tau_{sc} = 3.2 \pm 0.1$ мкс.

Расстояние до пульсара известно не очень хорошо. В работе [18] указаны допустимые значения расстояния в интервале 2.9–5.0 кпк. Если бы плазма была распределена однородно, то определенный по формуле $\theta_H^2 = 16 \ln 2 (c\tau_{sc}/D)$ угол рассеяния составлял бы около 2 мс дуги для среднего расстояния 3.7 кпк, что вдвое больше измеренного значения. В модели тонкого рассеивающего экрана расстояние до этого экрана равно 2.7 ± 0.1 кпк или $0.7D$, при принятом расстоянии до пульсара 3.7 кпк.

На рис. 9 показан вторичный спектр на частоте 1668 МГц, полученный посредством двумерного преобразования Фурье от динамического спектра. Кроме большого центрального пятна, можно заметить отдельные структуры, которые выстраиваются вдоль параболических дуг с вершиной в центре вторичного спектра. Такие дуги были впервые обнаружены и исследованы в работах [6, 29, 30]. По форме парабол можно независимо от предыдущих оценок определить положение одного или нескольких (по числу дуг) рассеивающих экранов, как это было предложено в работе [30]. Зависимость между задержкой f_ν и частотой интерференции f_t

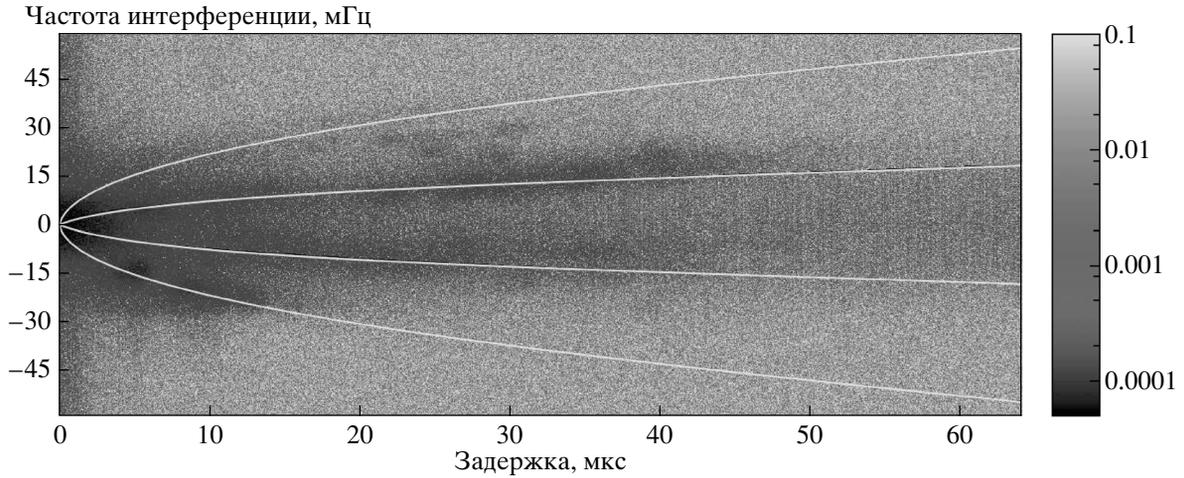


Рис. 9. Пульсар В1933+16. Вторичный спектр динамического автоспектра, полученного на телескопе Аресибо на частоте 1668 МГц. Линиями показана аппроксимация параболических дуг в спектре. Внутренняя парабола соответствует экрану, расположенному от наблюдателя на расстоянии 3.1 кпк, а внешняя — на расстоянии 1.3 кпк.

задается в виде $f_\nu = af_t^2$, а коэффициент пропорциональности a равен

$$a = \frac{Ds(1-s)}{2c} \left(\frac{\lambda}{V_\perp} \right)^2, \quad (7)$$

где s — расстояние от пульсара до экрана, выраженное в единицах D , s также можно выразить как $s = 1 - d/D$, λ — длина волны, на которой ведутся наблюдения, а $V_\perp = (1-s)V_{p\perp} + sV_{obs\perp} - V_{screen\perp}$, где $V_{p\perp}$, $V_{obs\perp}$ и $V_{screen\perp}$ — тангенциальные скорости соответственно пульсара, наблюдателя и экрана.

Собственное движение пульсара равно 13 мс дуги в год [31], что дает скорость на расстоянии 3.7 кпк, равную 220 км/с. Мы предполагали, что скорость Земли и экрана значительно меньше скорости пульсара. Для двух указанных на рисунке дуг мы определили параметр d . Для внутренней дуги он оказался равен $0.84D$, а для внешней — $0.35D$, что дает расстояния от наблюдателя до экранов 3.1 и 1.3 кпк.

Как и для пульсара В1641–45, мы выполнили анализ автоспектров на частоте 316 МГц для радиотелескопа в Вестерборке с высоким разрешением путем обработки данных методом додетекторной компенсации дисперсии с частотным разрешением 50 Гц ($N_{ch} = 320\,000$). Были построены кросс-корреляционные функции для средних спектров, полученных в каналах с левой и правой круговой поляризацией, для сигналов в окне импульса пульсара и вне этого окна. Несмотря на заметную неразрешенную деталь при нулевом сдвиге по частоте, удалось выделить и структуру, которая присутствует только на спектрах в окне импульса

и отсутствует на спектрах вне импульса. Аппроксимация этой детали экспоненциальной функцией $C(d\nu) = a + b \cdot \exp(-c|d\nu|)$ дала $C = 0.0026 \pm 0.0013$, что соответствует значению 250 ± 150 Гц для полуширины полосы декорреляции. Это, в свою очередь, дает для времени рассеяния τ_{sc} значение 0.6 ± 0.4 мс. Тогда расстояние от наблюдателя до рассеивающего экрана, определенное по соотношению (5), составит 0.7 от полного расстояния до пульсара или 2.6 кпк. Учитывая неопределенность оценки τ_{sc} , экран может находиться на расстоянии от 1.7 до 3 кпк для принятого расстояния 3.7 кпк. Поскольку у нас имеются независимые измерения τ_{sc} на двух частотах, мы можем еще раз оценить значение показателя степени α , и мы получим $\alpha = (3.8 - 5.2)$, что находится в хорошем соответствии с предыдущей оценкой, полученной по углам рассеяния.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием наземно-космического интерферометра “Радиоастрон” и ряда наземных интерферометров мы исследовали распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении трех удаленных пульсаров В1641–45, В1749–28 и В1933+16, расположенных вблизи плоскости Млечного пути, радиоизлучение которых подвергается сильному рассеянию. По поведению нормированной амплитуды функции видности в зависимости от величины проекции базы этих интерферометров были измерены углы рассеяния для всех трех пульсаров. Также был измерен временной масштаб уширения рассеянного импульса на неоднородностях межзвездной плазмы

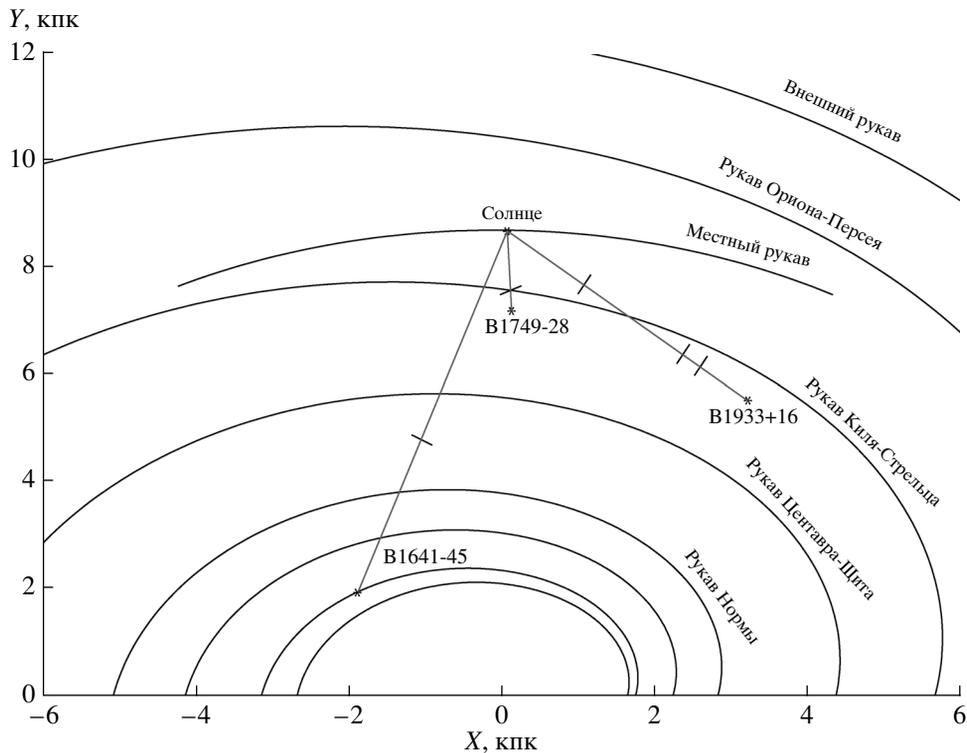


Рис. 10. Расположение пульсаров относительно спиральных рукавов Галактики. Звездочками отмечены положение Солнца и пульсаров В1641–45, В1933+16 и В1749–28. Сплошными черными линиями обозначены спиральные рукава Галактики. Штрихи на луче зрения указывают положения рассеивающих экранов, полученных на основе выполненных оценок.

по зависимости амплитуды функции видности $V(\tau)$ от величины запаздывания, или по форме хвостовой части среднего профиля импульса. Сравнение угла рассеяния и временного масштаба уширения рассеянного импульса в модели тонкого экрана позволило локализовать положение такого экрана на луче зрения от наблюдателя до пульсара.

Полученные результаты сравним с картиной спиральной структуры Галактики, представленной на рис. 10 по данным работы [32]. При этом использовалась модель с четырьмя спиральными рукавами. Оказалось, что выявленные эффективные рассеивающие экраны располагаются вблизи спиральных ветвей Галактики, где наиболее вероятно появление заметных неоднородностей электронной плотности межзвездной плазмы. Принятые нами расстояния до пульсаров приведены в предпоследнем столбце табл. 2, а полученные положения эффективных экранов — в последнем столбце табл. 2 и отмечены на рис. 10 штрихами. Следует отметить, что ни для одного пульсара не подходит модель равномерного распределения рассеивающей плазмы на луче зрения. Выявленные рассеивающие экраны отождествляются с реальными объектами, находящимися на луче зрения к этим пульсарам G339.1–04 (PSR B1641–45) и G0.55–0.85 (PSR B1749–28).

Для пульсара В1933+16 также были сделаны оценки расстояния для экрана на двух частотах по соотношению (5), и они дали близкие значения для принятого расстояния $D = 3.7$ кпк до пульсара 3 и 2.6 кпк на частотах 1668 МГц и 316 МГц соответственно. Кроме того, по кривизне параболических дуг на частоте 1668 МГц было выявлено два экрана на расстояниях 1.3 и 3.1 кпк, второй из них можно считать согласующимся с определениями по углам рассеяния. Можно заключить, что выполненные в данной работе исследования структуры межзвездной плазмы путем анализа РСДБ-наблюдений пульсаров, проведенных с наземно-космическим интерферометром “Радио-астрон”, выявили конкретные слои, ответственные за основной вклад в рассеяние радиоволн, и эти слои находятся вблизи спиральных рукавов Галактики.

Проект “РадиоАстрон” осуществляется Астрономическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и Научно-производственным объединением им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах.

Представленные результаты частично основаны на наблюдениях, выполненных на радиотелескопах ИПА РАН (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук).

Представленные исследования частично основаны на результатах наблюдений Европейской РСДБ-сети (European VLBI Network), а также на результатах наблюдений: радиотелескопа Аресибо, телескопов Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США) и телескопов Национального австралийского комплекса (ATNF, Австралия и Университет Тасмании).

Данная работа поддержана грантом РФФИ 13-02-00460, программой президиума РАН “Переходные и взрывные процессы в астрофизике”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. G. Scheuer, *Nature*, **218**, 920 (1968).
2. B. J. Rickett, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **15**, 479 (1977).
3. B. J. Rickett, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **28**, 561 (1990).
4. C. R. Gwinn, N. Bartel, J. M. Cordes, *Astrophys. J.* **410**, 673 (1993).
5. C. R. Gwinn, M. C. Britton, J. E. Reynolds, D. L. Jauncey, E. A. King, P. M. McCulloch, J. E. J. Lovell, and R. A. Preston, *Astrophys. J.* **505**, 928 (1998).
6. D. R. Stinebring, M. A. McLaughlin, J. M. Cordes, K. M. Becker, J. E. Espinoza Goodman, M. A. Kramer, J. L. Sheckard, and C. T. Smith, *Astrophys. J.* **549**, 97 (2001).
7. K. M. Desai, C. R. Gwinn, J. Reynolds, E. A. King, D. Jauncey, C. Flanagan, G. Nicolson, R. A. Preston, and D. L. Jones, *Astrophys. J.* **393**, L75 (1992).
8. N. Bartel, M. I. Ratner, I. I. Shapiro, R. J. Cappallo, A. E. E. Rodgers, and A. R. Whitney, *Astron. J.* **90**, 2532 (1985).
9. M. V. Popov, A. S. Andrianov, N. Bartel, C. R. Gwinn, M. D. Johnson, B. C. Joshi, N. S. Kardashev, R. Karuppusamy, Y. Y. Kovalev, M. Kramer, A. G. Rudnitskii, E. R. Safutdinov, V. I. Shishov, T. V. Smirnova, V. A. Soglasnov, J. A. Zensus, and V. I. Zhuravlev, *Astrophys. J.* **822**, 96 (2016).
10. А. Г. Рудницкий, Р. Каруппусами, М. В. Попов, В. А. Сogласнов, *Астрон. журн.* **93**, 167 (2016).
11. T. V. Smirnova, V. I. Shishov, M. V. Popov, C. R. Gwinn, J. M. Anderson, A. S. Andrianov, N. Bartel, A. Deller, M. D. Johnson, B. C. Joshi, N. S. Kardashev, R. Karuppusamy, Y. Y. Kovalev, M. Kramer, V. A. Soglasnov, J. A. Zensus, and V. I. Zhuravlev, *Astrophys. J.* **786**, 115 (2014).
12. N. S. Kardashev, V. V. Khartov, V. V. Abramov, V. Yu. Avdeev, A. V. Alakoz, Yu. A. Aleksandrov, S. Ananthakrishnan, V. V. Andreyanov, A. S. Andrianov, N. M. Antonov, M. I. Artyukhov, M. Yu. Arkhipov, W. Baan, N. G. Babakin, V. E. Babyshkin, N. Bartel', K. G. Belousov, A. A. Belyaev, J. J. Berulis, B. F. Burke, A. V. Biryukov, A. E. Bubnov, M. S. Burgin, G. Busca, A. A. Bykadorov, V. S. Bychkova, V. I. Vasil'kov, K. J. Wellington, I. S. Vinogradov, R. Wietfeldt, P. A. Voitsik, A. S. Gvamichava, I. A. Girin, L. I. Gurvits, R. D. Dagkesamanskii, L. D'Addario, G. Giovannini, D. L. Jauncey, P. E. Dewdney, A. A. D'yakov, V. E. Zharov, V. I. Zhuravlev, G. S. Zaslavskii, M. V. Zakhvatkin, A. N. Zinov'ev, Yu. Ilinen, A. V. Ipatov, B. Z. Kanevskii, I. A. Knorin, J. L. Casse, K. I. Kellermann, Yu. A. Kovalev, Yu. Yu. Kovalev, A. V. Kovalenko, B. L. Kogan, R. V. Komaev, A. A. Konovalenko, G. D. Kopelyanskii, Yu. A. Korneev, V. I. Kostenko, A. N. Kotik, B. B. Kreisman, A. Yu. Kukulshkin, V. F. Kulishenko, D. N. Cooper, A. M. Kut'kin, W. H. Cannon, M. G. Larionov, M. M. Lisakov, L. N. Litvinenko, S. F. Likhachev, L. N. Likhacheva, A. P. Lobanov, S. V. Logvinenko, G. Langston, K. McCracken, S. Yu. Medvedev, M. V. Melekhin, A. V. Menderov, D. W. Murphy, T. A. Miziakina, Yu. V. Mozgovoi, N. Ya. Nikolaev, B. S. Novikov, I. D. Novikov, V. V. Oreshko, Yu. K. Pavlenko, I. N. Pashchenko, Yu. N. Ponomarev, M. V. Popov, A. Pravin-Kumar, R. A. Preston, V. N. Pyshnov, I. A. Rakhimov, V. M. Rozhkov, J. D. Romney, P. Rocha, V. A. Rudakov, A. Raisanen, S. V. Sazanov, B. A. Sakharov, S. K. Semenov, V. A. Serebrennikov, R. T. Schilizzi, D. P. Skulachev, V. I. Slysh, A. I. Smirnov, J. G. Smith, V. A. Soglasnov, K. V. Sokolovskii, L. H. Sondaar, V. A. Stepan'yants, M. S. Turygin, S. Yu. Turygin, A. G. Tuchin, S. Urpo, S. D. Fedorchuk, A. M. Finkel'shtein, E. B. Fomalont, I. Fejes, A. N. Fomina, Yu. B. Khapin, G. S. Tsarevskii, J. A. Zensus, A. A. Chuprikov, M. V. Shatskaya, N. Ya. Shapirovskaya, A. I. Sheikhet, A. E. Shirshakov, A. Schmidt, L. A. Shnyreva, V. V. Shpilevskii, R. D. Ekers, and V. E. Yakimov, *Astron. Rep.* **57**, 153 (2013).
13. А. С. Андрианов, И. А. Гирин, В. Е. Жаров, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, М. В. Шацкая, *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина* **24**, № 3, 55 (2014).
14. R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, *Astrophys. J.* **129**, 1993 (2005).
15. W. Pence, *ASP Conf. Ser.* **172**, 487 (1999).
16. J. Goodman and R. Narayan, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **238**, 963 (1989).
17. C. R. Gwinn, *Astrophys. J.* **554**, 1197 (2001).
18. J. P. W. Verbiest, J. M. Weisberg, A. A. Chael, K. J. Lee, and D. R. Lorimer, *Astrophys. J.* **755**, 39 (2012).
19. T. H. Hankins, *Astrophys. J.* **169**, 487 (1971).

20. T. H. Hankins and B. J. Rickett, *Methods in computational physics*, **14**, 55 (1975).
21. C. R. Gwinn, N. Bartel, J. M. Cordes, A. Wolszczan, and R. L. Mutel, *Astrophys. J.* **334**, L13 (1988).
22. С. Ф. Лихачев, *Синтез и анализ изображений методами наземной и космической радиоинтерферометрии*, диссерт. уч. ст. д.ф.-м.н. <http://fizmathim.com/sintez-i-analiz-izobrazheniy-metodami-nazemnoy-i-kosmicheskoy-radiointerferometrii#ixzz46MTrNGCb> (2007).
23. M. C. Britton, C. R. Gwinn, and M. J. Ojeda, *Astrophys. J.* **501**, L101 (1998).
24. J. M. Weisberg, S. Johnston, B. Koribalski, and S. Stanimirovic, *Science* **309**, 106 (2005).
25. E. B. Fomalont, W. M. Goss, R. W. Manchester, and A. G. Lyne, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **286**, 81 (1997).
26. F. F. Gardner and J. B. Whiteoak, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **171**, 29 (1975).
27. J. R. D. Lepine, R. Ortiz, and N. Epchtein, *Astron. and Astrophys* **299**, 453 (1995).
28. J. A. Roberts and J. G. Ables, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **201**, 1119 (1982).
29. A. S. Hill, D. R. Stinebring, and H. A. Webber, *Astrophys. J.* **599**, 457 (2003).
30. J. M. Cordes, B. J. Rickett, D. R. Stinebring, and W. A. Coles, *Astrophys. J.* **637**, 346 (2006).
31. G. Hobbs, D. R. Lorimer, A. G. Lyne, and M. Kramer, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **360**, 974 (2005).
32. L. G. Hou and J. L. Han, *Astron. and Astrophys.* **569**, id. A125 (2014).