

УДК 524.52

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ ПО ДАННЫМ РСДБ-НАБЛЮДЕНИЙ ГИГАНТСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПУЛЬСАРА В0531+21 В ПРОЕКТЕ “РАДИОАСТРОН”

© 2016 г. А. Г. Рудницкий<sup>1\*</sup>, Р. Каруппусами<sup>2\*\*</sup>, М. В. Попов<sup>1\*\*\*</sup>, В. А. Согласнов<sup>1\*\*\*\*</sup>

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

<sup>2</sup>Радиоастрономический институт Макса Планка, Бонн, Германия

Поступила в редакцию 14.05.2015 г.; принята в печать 04.09.2015 г.

Исследована структура межзвездной плазмы в направлении пульсара в Крабовидной туманности. Для этого проведено несколько РСДБ-наблюдений с космическим радиотелескопом “Радиоастрон” и системой наземных телескопов в диапазонах длин волн 18 и 92 см. Выполнено шесть наблюдательных сессий с максимальным разнесением по времени два года. В качестве сигналов, зондирующих космическую плазму, использовались гигантские импульсы (ГИ), которые позволяют измерять параметры рассеяния без усреднения. Всего детектировано более 4000 ГИ. Проанализированы интерферометрические отклики (функции видности) на наземных и наземно-космических базах. На наземных базах в функции видности в зависимости от запаздывания доминирует узкая деталь при нулевом запаздывании с шириной  $\delta\tau \approx 1/B$ , где  $B$  — ширина полосы приема. Такой вид является типичным для компактных источников непрерывного спектра. На наземно-космических базах функция видности состоит из набора деталей, накладывающихся друг на друга и распределенных в некотором интервале запаздываний, который мы отождествляли с временем рассеяния интерферирующих лучей  $\tau$ . На наземных базах амплитуда функции видности убывает с увеличением базы интерферометра, то есть кружок рассеяния частично разрешается в диапазоне 18 см и полностью разрешается в диапазоне 92 см. Оценки угла рассеяния  $\theta$  дают значения 0.5–1.3 мас и 14.0 мас на 18 и 92 см, соответственно. На основе сопоставления измеренных значений  $\theta$  и  $\tau$  получены оценки расстояния от источника до эффективного рассеивающего экрана, который оказывается в разные эпохи на расстоянии от 0.33 до 0.96 расстояния наблюдатель-пульсар, составляющего около 2 кпк. Экран оказывается ближе к Крабовидной туманности в эпохи сильного рассеяния, подтверждая, что в эти эпохи доминирует рассеяние на неоднородностях плазмы в окрестностях самой туманности.

DOI: 10.7868/S0004629916020110

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Межзвездная среда содержит свободные электроны, которые неравномерно распределены в пространстве. Масштабы таких неоднородностей лежат в широком диапазоне: от нескольких километров до сотен астрономических единиц. Мелкомасштабные неоднородности преломляют радиоволны таким образом, что они распространяются по различным путям. Многолучевая интерференция лучей от пространственно-когерентного источника образует около Земли случайную дифракционную картину с характерным частотным масштабом  $\Delta\nu = 1/2\pi\tau$ , где  $\tau$  — типичное запаздывание лучей.

Компактными источниками, обеспечивающими высокий уровень когерентности для различных путей распространения, являются пульсары. Высокие собственные движения (поперечные скорости) пульсаров приводят к тому, что интерференционная картина заметно меняется с временным масштабом  $\Delta t = \lambda/\theta V$  от минут до часов, где  $\lambda$  — длина волны,  $\theta$  — угол рассеяния лучей от источника,  $V$  — усредненная и взвешенная должным образом скорость пульсар-среда-наблюдатель.

При этом наблюдается целый ряд эффектов, которые сразу после открытия пульсаров были рассмотрены в работе Шоуера [1], а впоследствии более подробно проанализированы теоретически Риккетом [2]. Среди наблюдаемых эффектов рассеяния можно выделить мерцания (модуляция интенсивности импульсов), увеличение угловых размеров  $\theta$  с уменьшением частоты, а также уве-

\*E-mail: almax1024@gmail.com

\*\*E-mail: ramesh@mpifr-bonn.mpg.de

\*\*\*E-mail: mwpopov@gmail.com

\*\*\*\*E-mail: vsoglasn@asc.rssi.ru

личение длительности регистрируемого импульса от пульсара  $\tau$ . Изменение угловых размеров в результате рассеяния связано с распространением излучения на пути к наблюдателю по разным путям. Таким образом, компактный точечный источник излучения становится в некотором роде протяженным. Явления, вызываемые рассеянием радиоизлучения пульсаров в межзвездной среде, используются для изучения структуры мелкомасштабных флуктуаций электронной плотности, по крайней мере, на размерах от 1000 км до 10 а.е. Крупномасштабные неоднородности ионизированной составляющей межзвездной среды вызывают рефракционные эффекты, проявляющиеся в медленных изменениях плотности потока излучения и угловом смещении источника. Анализируя результаты наблюдений дифракционных и рефракционных мерцаний, а также вариаций меры дисперсии и меры вращения, авторы работ [3, 4] показали, что спектр неоднородностей в широком диапазоне пространственных масштабов является Колмогоровским с показателем  $-11/3$ .

Однако в некоторых направлениях и для ряда пульсаров были получены отклонения от Колмогоровского спектра [5–7]. Форма спектра неоднородностей была исследована в работе Шишова [8]. Пульсары являются главным источником информации о структуре неоднородностей межзвездной плазмы. Несмотря на многолетние исследования, нет полного понимания происхождения, развития и диссипации турбулентности в межзвездной среде. Нет и окончательных ответов на вопросы, какая фаза межзвездной среды главным образом отвечает за наблюдаемые мерцания, как вещество распределено по лучу зрения, каково соотношение между случайной турбулентностью и детерминированными структурами. Таким образом, изучение эффектов рассеяния по наблюдениям радиоимпульсов пульсаров остается актуальной задачей радиоастрономии. Особый интерес представляет использование гигантских радиоимпульсов (ГИ), излучаемых некоторыми пульсарами. Самым перспективным объектом такого рода является пульсар в Крабовидной туманности V0531+21.

Пульсар V0531+21 является относительно молодым объектом. Он расположен в Крабовидной туманности — остатке сверхновой SN1054 на расстоянии около 2 кпк от Солнца. Профиль импульса состоит из главного импульса и интеримпульса. ГИ детектируются на вращательных фазах главного импульса и интеримпульса. Свойства ГИ этого пульсара хорошо исследованы [9–11]. Интегральное распределение по энергиям ГИ следует степенному закону с показателем степени  $-1.7...-3.2$ , рекордные значения пиковых плотностей потока достигают миллионов янских. Отличительной особенностью данного объекта является тот факт, что

его профиль полностью формируется из гигантских импульсов [12].

ГИ от пульсара в Крабовидной туманности являются отличным инструментом для зондирования межзвездной плазмы, так как они предоставляют возможность измерять мгновенные параметры рассеяния без усреднения. Интерферометрические РСДБ-наблюдения ГИ этого пульсара были выполнены ранее на частоте 2.3 ГГц на радиотелескопах в Калязине и Алгонкине [13]. Данный пульсар наблюдался в рамках научной программы проекта “Радиоастрон” [14]. Первые результаты исследования пульсаров в этом проекте опубликованы в работе Смирновой [7]. В данной работе мы анализируем форму амплитуды интерферометрической функции видности для наземных и наземно-космических баз интерферометра для сеансов, которые проводились с 2011 по 2013 гг. Измерены угловые размеры кружка рассеяния  $\theta$ , а также время рассеяния  $\tau$ . На основе этих измерений получены оценки положения эффективного рассеивающего экрана на луче зрения.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Научная программа миссии “Радиоастрон” разделяется на несколько этапов. Первым этапом была программа по поиску интерференционных лепестков (RAFS), наблюдения в рамках которой проводились в конце 2011 — начале 2012 гг. Затем следовал этап ранней научной программы (РНП или RAES), который длился до середины 2013 года. После этого последовал этап ключевой научной программы (КНП или RAKS), который с 2013 года формируется на базе ежегодного конкурса научных заявок (Announcement of Opportunity: AO-1, AO-2, AO-3).

С 2011 по 2013 гг. было проведено шесть радиоинтерферометрических наблюдений пульсара в Крабовидной туманности совместно с космическим радиотелескопом “Радиоастрон”. Основные характеристики наблюдательных сессий представлены в табл. 1. В качестве наземного плеча в наблюдениях были задействованы радиотелескопы Европейской и Глобальной РСДБ сетей. Четыре сеанса проводились на длине волны 18 см и один сеанс на длине волны 92 см; один сеанс проведен в рамках программы первичного поиска лепестков (RAFS), три сеанса в рамках ранней научной программы миссии “Радиоастрон” (RAES) и два сеанса в рамках ключевой научной программы (RAKS). Использовалась стандартная для проекта “Радиоастрон” схема распределения частот в двух каналах круговой поляризации: на волне 18 см регистрировалась верхняя и нижняя субполоса с шириной 16 МГц, а на волне 92 см использовалась

**Таблица 1.** Список сеансов наблюдений пульсара в Крабовидной туманности, проводившихся в рамках научной программы миссии “Радиоастрон”

Сеанс	Дата	Время набл.	$B$ , (км)	$\lambda$ , (см); $\nu$ (MHz)	Наз. тел.	Налич. корр.
RAFS01	14.11.2011	23:00–00:00	46000	18 (1660)	4	Наземно-космические базы
RAES04A	02.03.2012	13:00–17:00	145000	18 (1660)	8	Только наземные базы
RAES04B	06.03.2012	14:30–17:30	128000	18 (1660)	8	Наземно-космические базы
RAES04D	23.10.2012	07:00–09:00	113000	18 (1660)	7	Наземно-космические базы
RAKS02AD	27.10.2013	06:00–09:00	150000	18 (1660)	4	Наземно-космические базы
RAKS02AE	02.11.2013	19:30–08:40	40000–57000	92 (316)	5	Только наземные базы

только верхняя субполоса. На борту космического аппарата (КА) осуществляется одноразрядная оцифровка сигнала (клиппирование), а на наземных телескопах применялась двухбитная оцифровка.

### 3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Обработка данных производилась на корреляторе АКЦ ФИАН [15]. В основе процедуры лежит режим обработки пульсаров с применением некогерентной дедисперсии. Был разработан алгоритм для поиска и корреляции гигантских импульсов. Суть алгоритма заключается в получении кросс-корреляционной функции путем обратного преобразования Фурье от комплексного кросс-спектра для каждой элементарной выборки данных (1024 точки) и в дальнейшей оценке амплитуды интерференционного отклика по заданному критерию.

Изначально при поиске гигантских импульсов использовался критерий по уровню  $8\sigma$ , где  $\sigma$  есть среднеквадратичное значение флуктуаций кросс-корреляционных функций для шумового сигнала, не содержащего импульса. Такой критерий гарантированно позволял отсеять ложные детектирования. Однако при дальнейшем анализе критерий был снижен до  $6\sigma$ , что позволило улучшить статистику в три раза, так как увеличилось количество детектирований для более слабых гигантских импульсов. В последнем случае количество ложных детектирований оказалось много меньше 1% и составило порядка 1–2 ложных импульса на 1000 успешных детектирований.

Дополнительный анализ на ложные срабатывания проводился путем проверки вращательной фазы продетектированных импульсов. Известно, что гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности детектируются только на вращательных фазах главного импульса и интеримпульса. Таким образом, отбрасывались ложные детектирования, значения вращательных фаз которых не соответствовали вышеуказанным.

При корреляции использовались следующие параметры: количество спектральных каналов — 1024, время интегрирования — 0.033 с. Количество спектральных каналов выбиралось с учетом того, что в виду неточности знания орбиты космического аппарата величина остаточной задержки может достигать значений 10 и более микросекунд, 1024 канала, которые соответствуют диапазону задержек от  $-32$  до  $32$  микросекунд, гарантированно покрывают диапазон возможных остаточных задержек и тем самым исключают отсутствие детектирования на наземно-космических базах из-за неточностей орбиты космического аппарата.

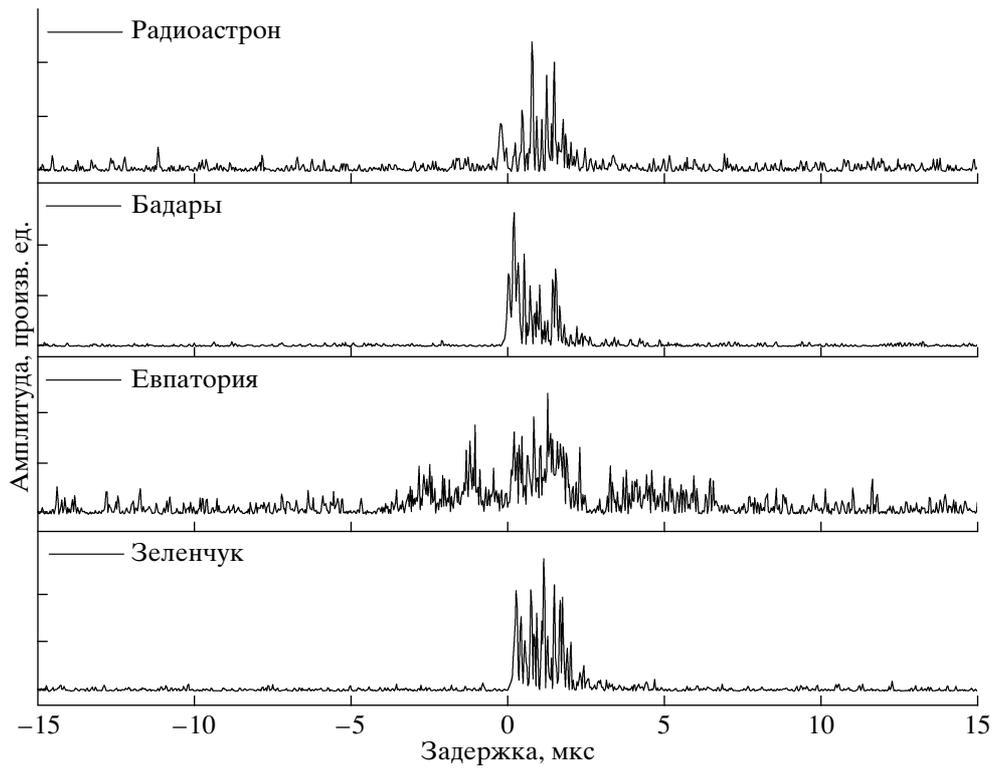
Для корреляционной функции шумового сигнала значение среднеквадратичной флуктуации  $\sigma$  должно составлять величину, равную  $1/\sqrt{n}$ , где  $n$  — число отсчетов анализируемого сигнала. В нашем случае  $n = 1024$  (количество спектральных каналов), и  $\sigma$  должна составлять 0.03, а предел обнаружения события в  $6\sigma = 0.18$ .

Время интегрирования выбиралось примерно равным периоду пульсара для удобства работы алгоритма поиска гигантских импульсов, который включает в себя режим некогерентной дедисперсии. В режиме некогерентной дедисперсии выбранный интервал времени  $\delta t_{\text{sol}} = 0.033$  с разбивается на  $N$  интервалов, каждый из которых соответствует своей вращательной фазе в периоде пульсара. Таким образом, искомое временное разрешение при поиске гигантских импульсов было равно  $\delta t = \delta t_{\text{sol}}/N = 0.00011$  с, где число интервалов  $N = 300$ .

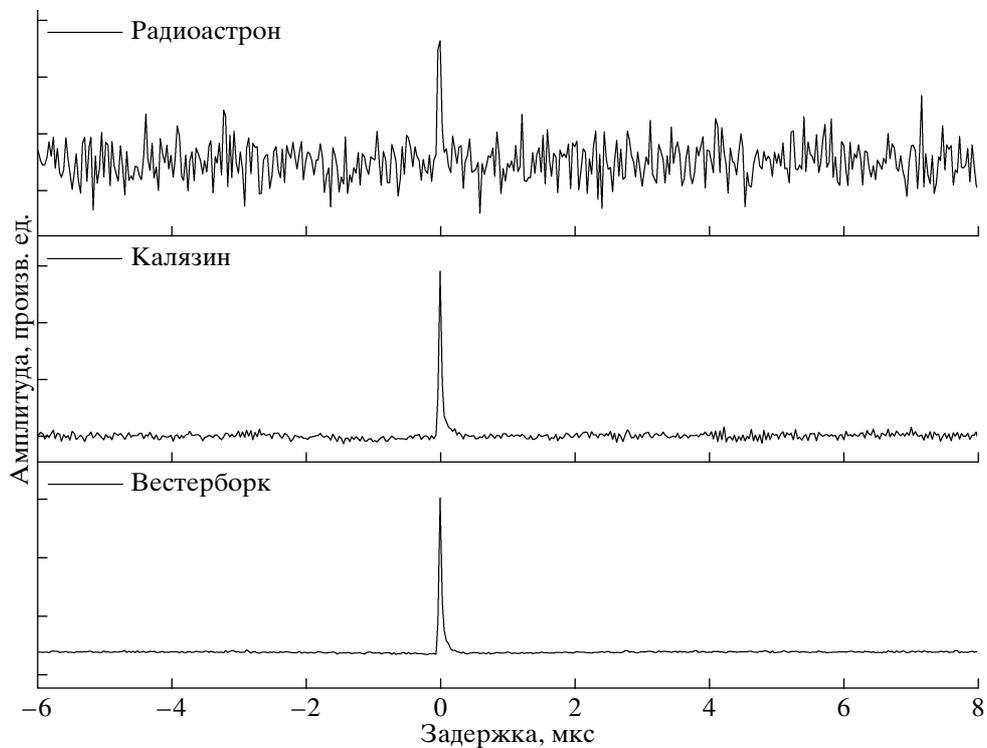
Для корреляции использовались эфемериды пульсара из каталога ATNF [16]<sup>1</sup>, а также эфемериды каталога обсерватории Jodrell Bank [17]<sup>2</sup>. Для определения долготы ГИ пульсара использовался программный пакет TEMPO2 [18].

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

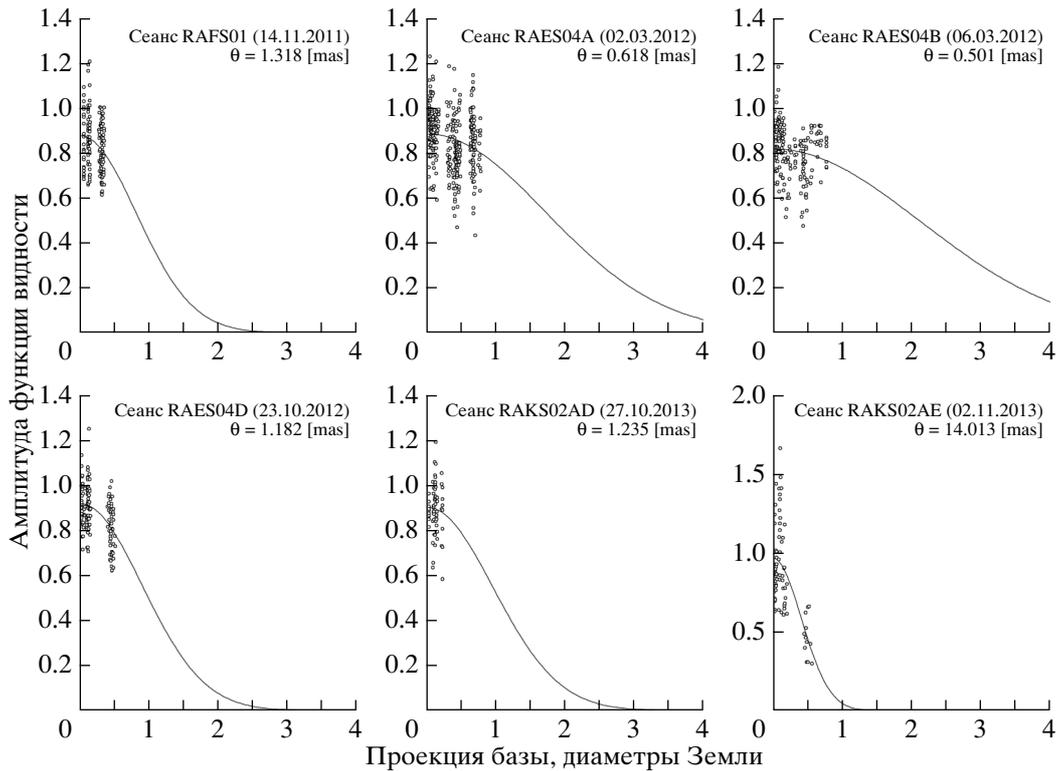
<sup>2</sup> <http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/crab.html>



**Рис. 1.** Профиль самого сильного гигантского импульса, зарегистрированного в сеансе от 14.11.2011 (RAFS01) на длине волны  $\lambda = 18$  см, для космического телескопа “Радиоастрон” и наземных телескопов в Бадарах, Евпатории и Зеленчукской. На радиотелескопе в Евпатории на профиль ГИ накладывается сильная радиопомеха.



**Рис. 2.** Профиль одного из самых сильных гигантских импульсов, зарегистрированных в сеансе от 02.11.2013 (RAKS02AE) на длине волны  $\lambda = 92$  см, для космического телескопа “Радиоастрон” и наземных телескопов в Калязине и Вестерборке.



**Рис. 3.** Зависимость максимальной амплитуды функции видности от проекции базы для всех ГИ и для всех комбинаций баз. Проекция базы указана в диаметрах Земли. Сеансы 14.11.2011, 02.03.2012, 06.03.2012, 23.10.2012, 27.10.2013, 02.11.2013 (слева направо, сверху вниз).

Поскольку коррелированная амплитуда для различных гигантских импульсов зависит от их интенсивности, для получения корректной зависимости амплитуды функции видности от проекции базы необходима нормировка коррелированной амплитуды:

$$A_{norm} = \frac{A_{corr}}{R}, \quad (1)$$

где  $R$  — нормировочный коэффициент,  $A_{corr}$  — исходное ненормированное значение коррелированной амплитуды.

В общем случае:

$$R = \sqrt{(\sigma_{1tot}^2 - \sigma_{1off}^2)(\sigma_{2tot}^2 - \sigma_{2off}^2)}, \quad (2)$$

где индексы “1” и “2” соответствуют двум наземным телескопам, а “ $\sigma_{tot}^2$ ” и “ $\sigma_{off}^2$ ” формально определяются как амплитуды функции видности, полученные по автоспектрам для окна на импульсе “tot” и для окна вне импульса “off”, соответственно.

Для наземно-космических баз использовалось иное соотношение нормировки. Дело в том, что для космического телескопа, чувствительность которого существенно ниже наземных станций, величина приращения сигнала относительно шума  $\sigma_{tot}^2 - \sigma_{off}^2$

может быть очень мала или отрицательна и поэтому применялось соотношение

$$R = (\sigma_{2tot}^2 - \sigma_{2off}^2) \frac{\sigma_{1off}}{\sigma_{2off}} \sqrt{\frac{SEFD_2}{SEFD_1}}, \quad (3)$$

где индекс “1” соответствует космическому радиотелескопу, а индекс “2” соответствует наземному телескопу. В этом выражении используется известное соотношение между эффективными шумовыми температурами телескопов (System Equivalent Flux Density, SEFD) [19].

#### 4. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАССЕЯНИЯ

Кросс-корреляционные функции (ККФ), полученные после обратного преобразования Фурье, представляют собой зависимости амплитуды функции видности от времени запаздывания (задержки). Ниже мы будем использовать термин амплитуды функции видности в данном контексте.

На рис. 1 и рис. 2 представлены профили отдельных гигантских импульсов для длин волн 18 и 92 см, соответственно. Корреляция на наземно-космических базах была обнаружена для четырех сеансов на длине волны  $\lambda=18$  см. На длине волны  $\lambda=92$  см интерференционный отклик с космическим радиотелескопом обнаружено не было

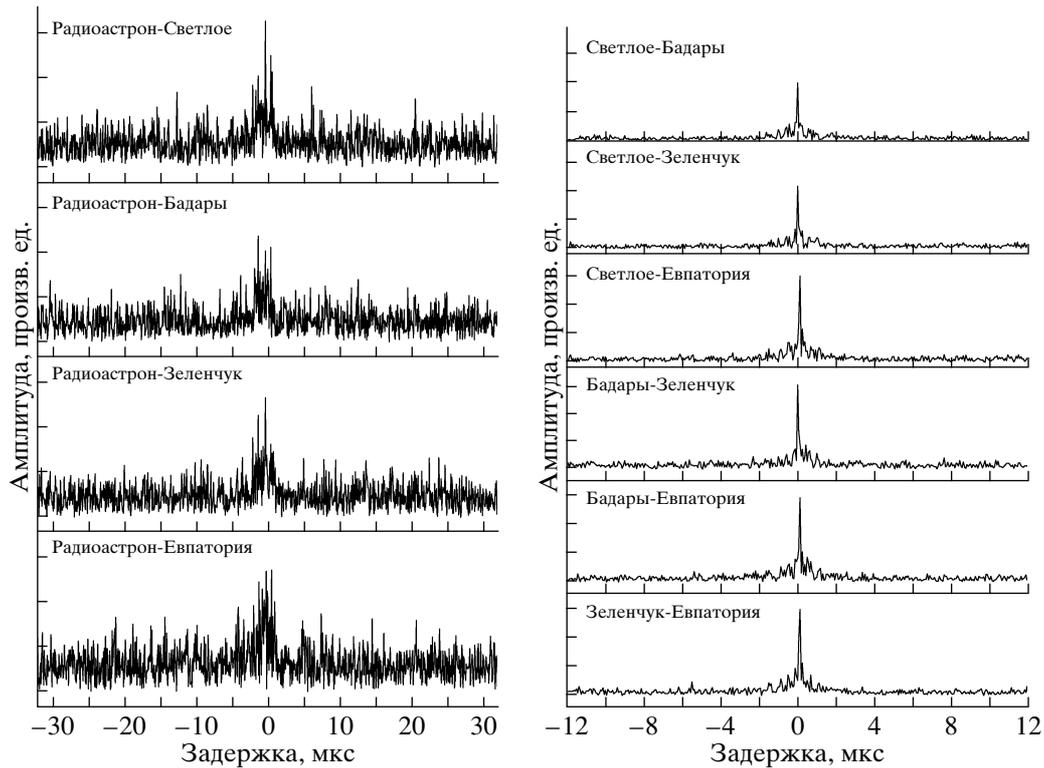


Рис. 4. Форма кросскорреляционной функции для гигантского импульса 23 : 21 : 03.74, сеанс RAFS01 (14.11.2011),  $\lambda = 18$  см, слева — наземно-космические базы, справа — наземные базы.

несмотря на наличие ГИ на космическом радиотелескопе в режиме одиночной антенны. Оценки параметров рассеяния радиоизлучения от пульсара в Крабовидной туманности производились в рамках модели одиночного тонкого экрана [20].

Угловые размеры кружка рассеяния можно определить из зависимости амплитуды функции видности от проекции базы. В предположении модели однородного рассеивающего диска эту зависимость можно аппроксимировать Гауссовым распределением [21]

$$V(B) = V_0 \cdot e \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{\sqrt{2 \ln 2}} \frac{\theta B}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где  $\theta$  — угловой размер кружка рассеяния в угловых секундах дуги (полная ширина по уровню 0.5),  $B$  — проекция базы в см,  $\lambda$  — длина волны, на которой проводились наблюдения, в см.

Угловые размеры кружка рассеяния  $\theta$  определялись путем аппроксимации вышеуказанным выражением распределения амплитуды функции видности в зависимости от проекции базы. Ошибки угловых размеров определялись, как формальные ошибки, получаемые методом наименьших квадратов (МНК) при аппроксимации распределения выражением (4). На рис. 3 изображены зависимости максимального значения амплитуды функции

видности от проекции базы. Указаны зависимости для всех ГИ всех комбинаций баз, для каждого из анализируемых сеансов. Сплошными линиями показаны аппроксимации этих зависимостей выражением (4).

Как видно из рис. 4, форма амплитуды функции видности сильно изменяется при переходе от наземных баз к наземно-космическим. На наземных базах (рис. 4, справа) амплитуда функции видности имеет две детали: центральную компактную и широкую, но менее интенсивную, в то время как на наземно-космических базах (рис. 4, слева) наблюдается существенно иная форма функции видности с множеством деталей. Форма амплитуды функции видности для наземно-космических баз отражает величину  $\tau$ , на которую произошло рассеяние.

Таким образом, время рассеяния можно оценить с помощью прямых измерений на наземно-космических базах путем экспоненциальной аппроксимации усредненной функции видности, которая соответствует расширенной форме импульса [22, 23]. Это было сделано для тех случаев, когда был обнаружен интерференционный отклик на наземно-космических базах. Ошибка времени рассеяния определялась как формальная ошибка, получаемая при аппроксимации усредненной функ-

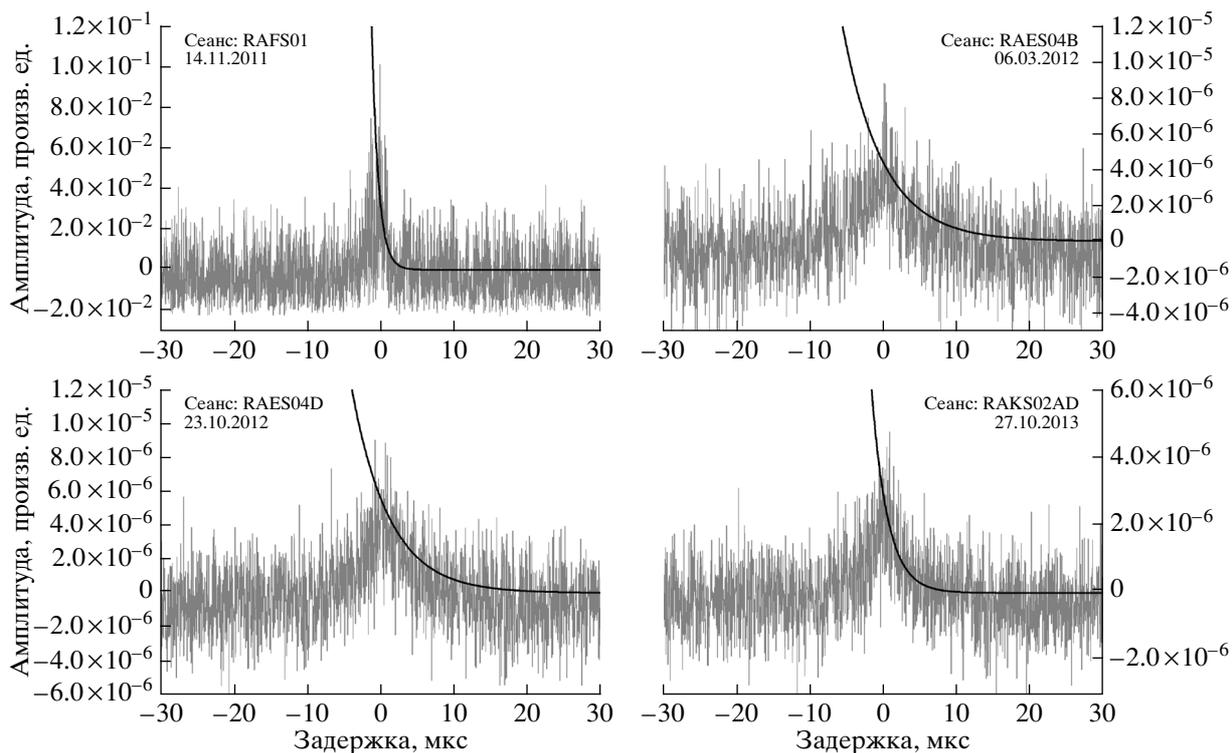


Рис. 5. Усредненные амплитуды функции видности для наземно-космических баз в конфигурации “Радиоастрон” — “Лучший наземный телескоп”. Сеансы 14.11.2011, 06.03.2012, 23.10.2012, 27.10.2013 (слева направо, сверху вниз). Сплошными линиями показаны экспоненциальные функции аппроксимации, использованные для оценки времени рассеяния.

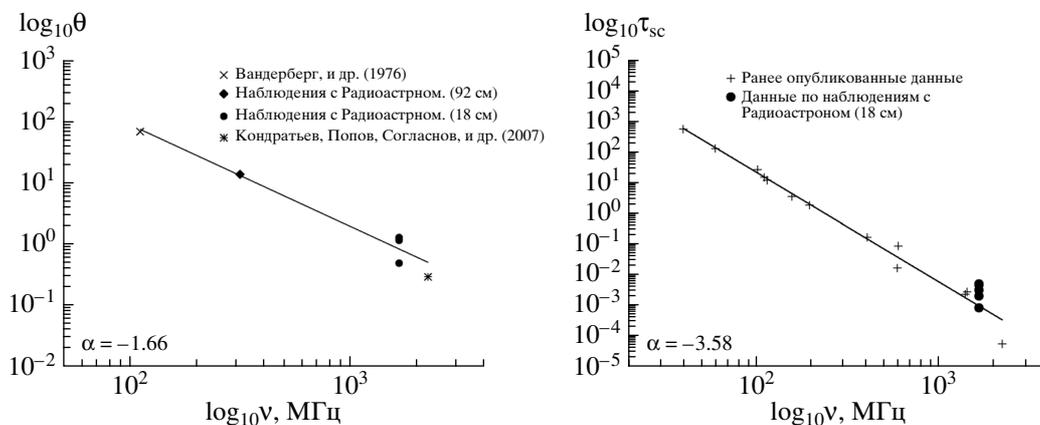


Рис. 6. Зависимость углового размера кружка рассеяния от частоты (слева) и зависимость времени рассеяния от частоты (справа) в логарифмическом масштабе. Прямые линии соответствуют степенной зависимости с показателем  $\alpha = -1.66$  для зависимости углового размера кружка рассеяния от частоты и  $\alpha = -3.58$  для зависимости времени рассеяния от частоты.

ции видности методом МНК

$$A = C + A_0 \cdot e^{-x/\tau}, \quad (5)$$

где  $\tau$  — искомое время рассеяния в микросекундах.

На рис. 5 изображены средние амплитуды функции видности для четырех сеансов, где был протектирован интерференционный отклик на

наземно-космических базах. Для этих сеансов были оценены значения времени рассеяния изложенным выше методом. Такие искажения амплитуды функции видности возникают при увеличении проекции базы, в том случае, когда она становится больше радиуса дифракционного пятна.

Радиус дифракционного пятна  $R_{diff}$  зависит от

Таблица 2. Измеренные параметры рассеяния

Сеанс	$\tau_{SC}$ , (мкс)	$\theta$ , (mas)	$\Delta\nu$ , (kHz)	$R_{diff}$ , (км)	$\alpha$	Кол-во. ГИ
RAFS01	$0.9 \pm 0.1$	$1.3 \pm 0.2$	$116.3 \pm 24.5$	$10361 \pm 1700$	$0.36 \pm 0.08$	98
RAES04A	$5.8 \pm 0.3$	$0.6 \pm 0.1$	$55.2 \pm 5.9$	$21817 \pm 2900$	$0.94 \pm 0.02$	1202
RAES04B	$5.5 \pm 0.7$	$0.5 \pm 0.1$	$41.2 \pm 7.9$	$26949 \pm 7700$	$0.96 \pm 0.03$	1034
RAES04D	$5.1 \pm 0.5$	$1.2 \pm 0.1$	$40.7 \pm 4.6$	$11413 \pm 900$	$0.79 \pm 0.03$	929
RAKS02AD	$2.2 \pm 0.3$	$1.2 \pm 0.1$	$78.1 \pm 7.9$	$12113 \pm 1200$	$0.61 \pm 0.06$	453
RAKS02AE	—	$14.0 \pm 1.4$	—	$5140 \pm 500$	—	579

угловых размеров кружка рассеяния и длины волны, на которой проводилось наблюдение, и связан с этими параметрами соотношением [24]

$$R_{diff} = \sqrt{2 \ln 2} \frac{\lambda}{\theta \pi}. \quad (6)$$

Как видно из табл. 1, максимальная проекция наземно-космических баз в сеансах превышает вычисленные размеры дифракционных пятен.

Характер мерцаний зависит от частоты, на которой производятся наблюдения. Эта зависимость характеризуется изменением полосы декорреляции  $\Delta\nu$  с частотой.

Определение полосы декорреляции выполнялось путем анализа кросс-корреляционной функции от средних автоспектров для двух выбранных наземных станций. Значение полосы декорреляции оценивалось путем экспоненциальной аппроксимации полученной кросс-корреляционной функции

$$A = C + A_0 \cdot e^{-x/\Delta\nu}. \quad (7)$$

В приближении модели одиночного тонкого рассеивающего экрана угловой размер кружка рассеяния связан с временем рассеяния и расстоянием до экрана следующим соотношением [25]:

$$\theta^2 = \frac{8c\tau \ln 2(1 - \alpha)}{\alpha L}, \quad (8)$$

где  $L = 2$  кпк — расстояние до пульсара в Крабовидной туманности,  $\alpha = D/L$  — расстояние от наблюдателя до рассеивающего экрана относительно расстояния до пульсара  $L$ ,  $\tau$  — время рассеяния,  $c$  — скорость света.

Зная угловые размеры кружка рассеяния  $\theta$  и время рассеяния  $\tau$ , можно определить относительное расстояние до рассеивающего экрана  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{8c\tau \ln 2}{\theta^2 L + 8c\tau \ln 2}. \quad (9)$$

Выполненные оценки угловых размеров кружка рассеяния и времени рассеяния находятся в хорошем согласовании с ранее опубликованными

результатами (рис. 6). Подтверждается степенная зависимость с показателем степени  $\alpha = -1.66$  для зависимости углового размера кружка рассеяния от частоты и  $\alpha = -3.58$  для зависимости времени рассеяния от частоты.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для радиоинтерферометрических наблюдений гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности получены интерференционные отклики на наземно-космических базах вплоть до 150 000 км в наблюдениях совместно с космическим радиотелескопом “Радиоастрон”.

Обнаружена трансформация формы функции видности гигантских импульсов при переходе от наземных к наземно-космическим базам, превышающая радиус дифракционного пятна (рис. 4). Форма амплитуды функции видности для наземных баз имеет доминирующую узкую деталь, в то время как для наземно-космических баз эта деталь отсутствует и форма ККФ достаточно широкая, состоит из множества пиков.

В табл. 2 представлены все параметры, для которых были выполнены оценки. Угловые размеры кружка рассеяния оценивались в предположении однородного рассеивающего диска (точки для наземно-космических баз не учитывались) и для каждого сеанса наблюдений. На рис. 3 изображены полученные зависимости амплитуды функции видности от проекции базы, где линиями изображена аппроксимация с использованием соотношения (4).

Несмотря на предполагаемое отсутствие корреляции при больших проекциях базы (>40 000 км), когда кружок рассеяния разрешается, коррелированная амплитуда функции видности имеет значительную величину, отличную от нуля. Более того, амплитуда функции видности остается практически постоянной с дальнейшим увеличением проекции базы до 150 000 км. Вышеизложенный факт, а также наблюдаемое изменение формы амплитуды функции видности при таких проекциях базы, могут

свидетельствовать, что на наземно-космических базах разрешаются неоднородности, присутствующие в кружке рассеяния. Данный эффект также наблюдается и для пульсара V0329+54 [24].

Полученные распределения функции видности от проекции базы согласуются с теорией Гудмана и Нараяна [26].

Ранее проводившиеся исследования уже показывали наличие двухкомпонентного рассеяния — рассеяния в области, близкой к Крабовидной туманности, и постоянной составляющей, обусловленной межзвездной плазмой [27–29]. В частности, в работе Р. Каруппусами было показано, что в течение шести часов наблюдений присутствовала вариация рассеяния для пульсара в Крабовидной туманности, а также, что доминирующая область рассеяния находилась в окрестностях туманности [30].

В нашем случае для каждого сеанса расстояние до рассеивающего экрана имеет различное значение. В случае первого сеанса (RAFS01) расстояние до экрана соответствует случаю примерно равномерного распределенного рассеивающего вещества на луче зрения  $d = D/3$  [31]. В других случаях видно, что рассеяние доминировало в областях, близких к Крабовидной туманности. Изменение параметра  $\alpha$  от сеанса к сеансу говорит о необходимости использования модели нескольких рассеивающих экранов в дальнейшем анализе полученных данных.

Авторы выражают благодарность Смирновой Татьяне Васильевне из Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО АКЦ ФИАН) за ценные указания и замечания по данной работе. Авторы выражают благодарность Карлу Гвину и Майклу Джонсону за их вклад в подготовку научных заявок и за полезные обсуждения результатов.

Проект “Радиоастрон” осуществляется Астрокосмическим 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 радиотелескопа РТ-70 Евпатория (Украина), проведенных Радиоастрономическим институтом Национальной академии наук Украины по контракту с Государственным космическим агентством Украины и

Национальным центром управления и испытаний космических средств при технической поддержке Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Представленные исследования частично основаны на результатах наблюдений Европейской РСДБ сети (European VLBI Network, EVN).

Данная работа поддержана грантом РФФИ 13-02-00460.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. G. Scheuer, *Nature* **218**, 920 (1968).
2. B. J. Rickett, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **15**, 479 (1977).
3. J. W. Armstrong, B. J. Rickett, and S. R. Spangler, *Astrophys. J.* **443**, 209 (1995).
4. В. И. Шишов, Т. В. Смирнова, *Астрон. журн.* **79**, 810 (2002.)
5. V. I. Shishov, T. V. Smirnova, W. Sieber, V. M. Malofeev, V. A. Potapov, D. Stinebring, M. Kramer, A. Jessner, and R. Wielebinski, *Astron. Astrophys.* **404**, 557 (2003).
6. T. V. Smirnova, C. R. Gwinn, and V. I. Shishov, *Astron. Astrophys.* **453**, 601 (2006).
7. 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).
8. В. И. Шишов, *Астрон. журн.* **70**, 752 (1993).
9. T. H. Hankins, J. S. Kern, J. C. Weatherall, and J. A. Eilek, *Nature* **422**, 141 (2003).
10. М. В. Попов, В. А. Сogласнов, В. И. Кондратьев, А. В. Билоус, С. В. Сазанков, А. И. Смирнов, Б. З. Каневский, В. В. Орешко, Ю. П. Ильясов, *Астрон. журн.* **52**, 999 (2008)
11. A. Jessner, M. V. Popov, V. I. Kondratiev, Y. Y. Kovalev, D. Graham, A. Zensus, V. A. Soglasnov, A. V. Bilous, and O. A. Moshkina, *Astron. Astrophys.* **524**, A60 (2010).
12. М. В. Попов, В. А. Сogласнов, В. И. Кондратьев, С. В. Костюк, Ю. П. Ильясов, В. В. Орешко, *Астрон. журн.* **83**, 62 (2006).
13. V. I. Kondratiev, M. V. Popov, V. A. Soglasnov, Y. Y. Kovalev, N. Bartel, W. Cannon, and A. Y. Novikov, *Astron. Astrophys. Trans.* **26**, 585 (2007).
14. Н. С. Кардашев, В. В. Хартов, В. В. Абрамов, В. Ю. Авдеев и др., *Астрон. журн.* **90**, 179 (2013).
15. А. С. Андрианов, И. А. Гирин, В. Е. Жаров, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, М. В. Шацкая, *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина* **3**, 55 (2014).
16. R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, *Astrophys. J.* **129**, 1993 (2005).
17. A. G. Lyne, R. S. Pritchard, and F. Graham-Smith, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **265**, 1003 (1993).
18. G. B. Hobbs, R. T. Edwards, and R. N. Manchester, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **369**, 655 (2006).

19. J. M. Wrobel and R. C. Walker, ASP Conference Series **180**, 171 (1999).
20. 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).
21. C. R. Gwinn, N. Bartel, and J. M. Cordes, *Astrophys. J.* **410**, 673 (1993).
22. В. И. Шишов, *Астрон. журн.* **50**, 941 (1973).
23. I. P. Williamson, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **166**, 499 (1974).
24. 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.*, в печати.
25. M. C. Britton, C. R. Gwinn, and M. J. Ojeda, *Astrophys. J.* **501**, L101 (1998).
26. J. Goodman and R. Narayan, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **238**, 963 (1989).
27. C. C. Counselman, III and J. M. Rankin, *Astrophys. J.* **166**, 513 (1971).
28. J. M. Rankin and C. C. Counselman, III, *Astrophys. J.* **181**, 875 (1973).
29. A. G. Lyne and D. J. Thorne, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **172**, 97 (1975).
30. R. Karuppusamy, B. W. Stappers, and W. van Straten, *Astron. Astrophys.* **515**, A36 (2010).
31. 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).