

АНИЗОТРОПНОЕ РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН В НАПРАВЛЕНИИ ПУЛЬСАРА B1642–03

© 2025 г. М. В. Попов

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

e-mail: popov069@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 04.09.2024 г.

После доработки 20.10.2024 г.

Принята к публикации 11.11.2024 г.

Представлен анализ наблюдений пульсара B1642–03, выполненных на наземно-космическом интерферометре Радиоастрон в ходе выполнения ключевой научной программы проекта. Наблюдения были проведены 8 сентября 2013 г. в диапазоне 92 см (316–332 МГц). Система апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT) использовалась в качестве наземного плеча интерферометра (GRT). Величина проекции базы наземно-космического интерферометра изменилась в ходе наблюдений примерно вдвое, от 10 000 км до 20 000 км, и позиционный угол проекции базы поменялся почти на 50°. Такая конфигурация позволила измерить угловой диаметр диска рассеяния в разных позиционных углах. Было получено заключение, что форма диска рассеяния может быть представлена в виде эллипса с отношением осей 2:1. Сравнение углового размера диска рассеяния и времени запаздывания рассеянных лучей указывает на возможную кольцевую структуру диска рассеяния, которая может быть обусловлена линзированием радиоволн при прохождении зоны Стремгрена от звезды ζ Oph.

Ключевые слова: пульсар B1642–03, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, межзвездное рассеяние

DOI: 10.31857/S0004629925030025, **EDN:** FZKVJA

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2011 г. Российская академия наук и Федеральное космическое агентство создали орбитальную космическую обсерваторию с 10-м радиотелескопом, которая при работе совместно с наземной сетью радиотелескопов образовала наземно-космический интерферометр Радиоастрон. Космический радиотелескоп обращался вокруг Земли по вытянутой эллиптической орбите с расстоянием в апогее 350 000 км, что позволило в 25 раз увеличить разрешающую способность наземно-космического интерферометра по сравнению с чисто наземной РСДБ сетью. За 7 лет работы было получено много новых и уникальных научных результатов [1].

Диапазон 316–332 МГц предназначался для наблюдений пульсаров. Угловые размеры области радиоизлучения пульсара, находящейся в магнитосфере нейтронной звезды, исключительно малы, и заведомо меньше угловой микросекунды. Такие размеры неразрешимы даже с наземно-космическим интерферометром. Но в результате межзвездного рассеяния изображение пульсара выглядит как “диск рассеяния” с характерным угловым размером θ_{scat} , который попадает в диапазон угловых миллисекунд (mas). Такие угловые разме-

ры эффективно измеряются наземно-космическим интерферометром Радиоастрон, который в диапазоне 316–332 МГц имеет предельное разрешение 0.5 mas.

В результате анализа особенностей рассеяния с таким высоким угловым и временным разрешением был обнаружен целый ряд эффектов и особенностей, таких как субструктура рассеивающего диска [2, 3] и анизотропное рассеяние в направлении на пульсар в созвездии Парусов (Vela) [4] и в направлении на пульсар B0834+06 [5].

Цель нашего исследования состоит в том, чтобы измерить форму диска рассеяния в направлении пульсара B1642–03 путем анализа наблюдений с наземно-космическим интерферометром Радиоастрон.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

В этой работе использованы наблюдения пульсара B1642–03, выполненные на наземно-космическом интерферометре Радиоастрон в ходе выполнения ключевой научной программы проекта. Наблюдения были проведены 8 сентября 2013 г. в диапазоне 92 см (316–332 МГц) в течение двух часов в конфигурации: космический радиотелескоп (SRT) и система апертурного син-

теза в Вестерборке (WSRT) в качестве наземного плеча интерферометра (GRT). Прием радиоизлучения осуществлялся в двух поляризационных каналах с левой (LCP) и с правой (RCP) круговыми поляризациями. Регистрация данных проводилась сканами по 570 с с 30-секундными перерывами. На космическом телескопе регистрация сигнала выполнялась с двухуровневым квантованием, а на наземном телескопе применялось четырехуровневое квантование. В течение одного часа общего наблюдательного времени было записано 9760 импульсов пульсара; период следования импульсов у этого пульсара составляет 0.3876 с. Корреляция данных проводилась на корреляторе АКЦ ФИАН [6] с применением “окна” импульса (on) и с компенсацией влияния дисперсии радиоволн. Для целей калибровки также выполнялась корреляция данных вне окна импульса такой же длительности (off). При корреляции использовалось 8192 спектральных каналов, что обеспечивает разрешение по частоте в 1.95 кГц.

На рис. 1 показано изменение проекции базы наземно-космического интерферометра за время проведения наблюдений. Используемая единица длины $M\lambda$ выражена в миллионах длин волн. Длина волны λ , на которой проводились наблюдения равна 92 см. Величина проекции базы изменилась примерно вдвое, от 10 000 км до 20 000 км, и позиционный угол проекции базы поменялся почти на 50° . Такая конфигурация открывает хорошие перспективы для анализа формы диска рассеяния.

3. АМПЛИТУДА ФУНКЦИИ ВИДНОСТИ

Фундаментальной величиной в интерферометрических измерениях является функция видности (visibility) $\tilde{V}_{ab}(\nu, t) = \tilde{E}_a(\nu, t)\tilde{E}_b^*(\nu, t)$, которая является произведением электрических полей (voltage), зарегистрированных на радиотелескопах “a” и “b”.

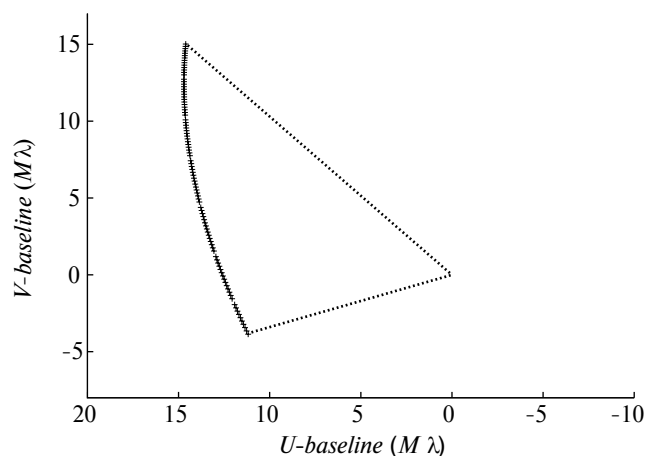


Рис. 1. Изменение проекции базы наземно-космического интерферометра за время проведения наблюдений. Используемая единица длины $M\lambda$ выражена в миллионах длин волн

Именно эту величину выдает коррелятор, при этом он осуществляет усреднение комплексных значений $\tilde{V}_{ab}(\nu, t)$ за время длительности окна импульса пульсара в случае пульсарных наблюдений, и шаг по времени выдачи данных коррелятором Δt равен периоду повторения импульсов пульсара p . Шаг по частоте $\Delta\nu$ определяется выбранным числом каналов N_{ch} . Функцию $\tilde{V}_{ab}(\nu, t)$ в большинстве случаев называют кросс-спектром. Обратное преобразование Фурье от кросс-спектра $\tilde{V}_{ab}(\nu, t)$ дает функцию видности в зависимости от задержки сигнала τ между телескопами $\tilde{V}_{ab}(\tau, t)$; по сути дела это есть кросс-корреляционная функция поля, зарегистрированного на этих телескопах. Именно эта величина анализируется при построении радиоизображения исследуемых объектов. Для корректного определения амплитуды функции видности используется преобразование Фурье по времени от набора функций вида $\tilde{V}_{ab}(\tau, t)$ на интервале времени T_{int} , которое дает функцию видности $\tilde{V}_{ab}(\tau, f)$ в координатах “запаздывание” τ и “частота интерференции” f , которая в идеальном случае имеет максимальную амплитуду при $\tau = 0$ и $f = 0$. Такое представление функции видности позволяет найти максимальное значение амплитуды и при неточном знании поправок часов и параметров орбиты космического аппарата, когда этот максимум оказывается смещенным и обнаруживается на значениях $\tau = \tau_1$ и $f = f_1$. Смещение может быть обусловлено и влиянием рассеяния радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы или в земной ионосфере.

Коррелятор АКЦ ФИАН [6] при обработке пульсаров вычисляет (интегрирует) кросс-спектры $\tilde{V}_{ab}(\nu, t)$ в “окне” излучения импульсов пульсара и выдает результат с шагом по времени, равном периоду следования импульсов $p = 0.3876$ с. Длительность окна интегрирования в нашем случае составляла 9 мс.

Динамический спектр пульсара В1642–03 подробно анализировался в работе Бартеля с соавторами [7]; они определили значение полосы декорреляции $\Delta\nu = 930$ кГц и характерное время мерцаний $\Delta t_{scint} = 40$ с. Для определения амплитуды функции видности в нашем эксперименте были построены двумерные диаграммы “частота интерференции-запаздывание”, представляющие поведение модуля функции $\tilde{V}_{ab}(\tau, f)$. Такие диаграммы были построены для каждой сотни последовательных импульсов, так что время интегрирования $T_{int} = 100p = 38.76$ с, что сравнимо с характерным временем мерцаний. На этих диаграммах шаг по задержке τ соответствует времени сэмпирования $\delta\tau = 31.25$ нс, а шаг по частоте интерференции $\delta f = 1/T_{int} = 25.8$ мГц. Всего получилось 79 выборок сигнала для этого анализа.

На рис. 2 показаны примеры сечения диаграммы “частота интерференции-запаздывание” по запаздыванию (слева) и по частоте интерференции

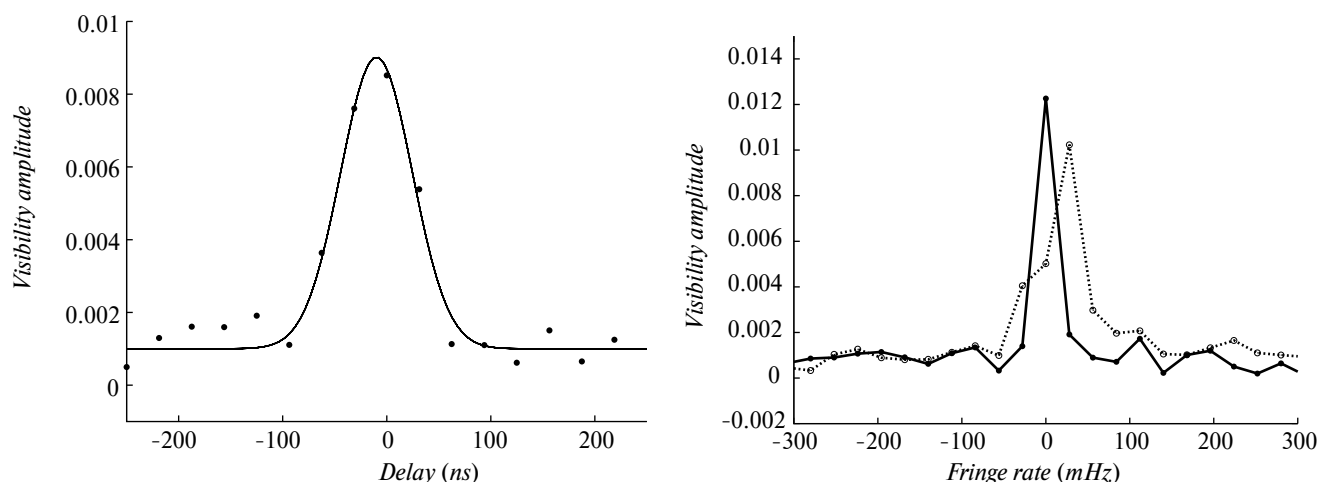


Рис. 2. Сечения диаграммы “частота интерференции-запаздывание” по запаздыванию (слева) и по частоте интерференции (справа) для сигнала, принятого в канале с левой круговой поляризацией (LCP). Шкала времени задержки (слева) оцифрована в наносекундах, а шкала остаточной частоты интерференции (справа) оцифрована в миллигерцах. По оси ординат отложена амплитуда функции видности без нормировки

(справа) для сигнала в канале с левой круговой поляризацией (LCP). Для сечения по запаздыванию точками представлены вычисленные величины, а сплошная линия показывает аппроксимацию этих величин функцией Гаусса на интервале ± 5 отсчетов от положения максимума. Амплитуда этой аппроксимирующей функции и принималась для последующего анализа. Таким образом, осуществлялась поправка за дробную часть отсчета, так как максимум функции не попадал на целочисленные значения по запаздыванию. Следует отметить, что это смещение не превышало одного отсчета за все время наблюдательного сеанса.

Более сложная ситуация реализуется в сечении по частоте интерференции. Для этого сечения на рис. 2 даются два примера для двух выборок сигнала по 100 импульсов каждая: одна выборка, показанная сплошной линией, проходящей через точки, демонстрирует сечение в виде дельта-функции (назовем такое сечение нормальным); другая выборка, показанная на рисунке пунктирной линией, проходящей через кружки, дает расширенное сечение с уменьшенной амплитудой и сдвинутым на один шаг максимумом (назовем такое сечение искаженным). По нашему мнению эти искажения вызваны влиянием ионосферы. Подобные ионосферные эффекты, обнаруженные наземно-космическим интерферометром Радиоастрон, обсуждались в работе Попова с соавторами [8]. Эти ионосферные эффекты имеют широкополосный характер и не влияют на форму функции видности по задержке, но приводят к расширению функции по частоте интерференции с соответствующим уменьшением амплитуды.

Для коррекции амплитуды функции видности за эти искажения вычислялась полуширина функции в сечении по частоте интерференции $W_{1/2}$ путем аппроксимации функцией Гаусса на интер-

вале ± 5 отсчетов от положения максимума для каждой выборки по времени. Полученные значения $W_{1/2}(t)$ демонстрируют значительные вариации со временем. На рис. 3 приведена автокорреляционная функция (АКФ) от временных вариаций полуширины сечения по частоте интерференции $W_{1/2}(t)$. Из рисунка видно, что амплитуда колебаний АКФ составляет около 0.2 и имеет квазипериодический характер с характерным временем около 3 мин. Так как автокорреляция является квадратичной функцией, то амплитуда самих вариаций полуширины достигает уровня 0.45 от своего среднего значения.

Если полагать, что при ионосферных искажениях площадь под кривой, описывающей сечение амплитуды функции видности по частоте интерференции, сохраняется, то есть $S_0 = A_0 W_0 = S_1 = A_1 W_1$, где A_0 и W_0 — это амплитуда и полуширина функции для “нормального” сечения (сплошная линия на рис. 2), а A_1 и W_1 — амплитуда и полуширина функции для “искаженного” сечения (пунктирная линия на рис. 2). Тогда скорректированная амплитуда функции видности получится из соотношения $A_{\text{кор}} = A_i (W_i / W_0)$. Уже из простого примера, приведенного на рис. 2 в правой части, видно, что такая коррекция дает неправильный результат, а именно, полуширина “искаженного” сечения по крайней мере вдвое больше полуширины “нормального” сечения, в то время как амплитуда “искаженного” сечения меньше амплитуды “нормального” сечения всего в 1.2 раза. В результате более тщательного сравнения случаев “нормального” и “искаженного” сечения было получено соотношение $A_{\text{кор}} = A_i \sqrt{(W_i / W_0)}$. Именно это соотношение использовалось для коррекции вычисленных амплитуд функции видности; при этом за величину A_i принималось значение, исправленное за дробную часть отсчета, как это было описано выше.

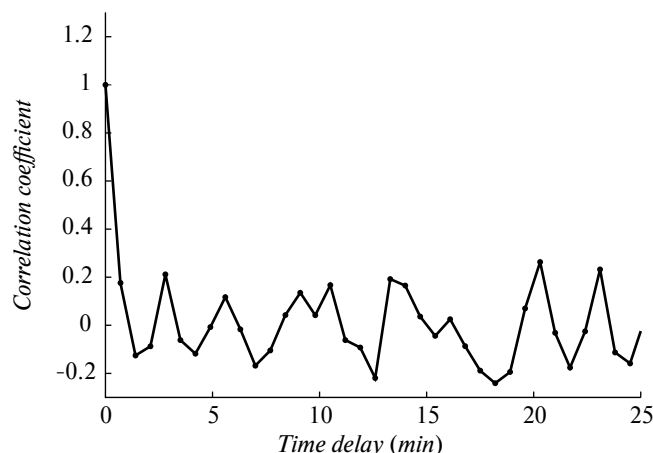


Рис. 3. АКФ вариаций ширины функции видности в сечении по частоте интерференции (поляризационный канал LCP). Вдоль оси абсцисс указано время запаздывания в минутах, а по оси ординат указан коэффициент корреляции

Далее была проведена нормировка значений амплитуды функции видности так, чтобы эти величины были выражены в долях принятого потока радиоизлучения. Такая нормировка учитывает чувствительности участвующих радиотелескопов и собственную значительную переменность плотности потока радиоизлучения пульсара. Методика нормировки для наблюдений пульсаров с помощью наземно-космического интерферометра была представлена в работе Попова с соавторами [9]. Коэффициент нормировки вычислялся по следующей формуле, взятой из указанной публикации:

$$R^{-1} = \left(\frac{\sigma_{\text{SRT}}}{\sigma_{\text{GRT}}} \right)_{\text{off}} (\sigma_{\text{on}}^2 - \sigma_{\text{off}}^2) \sqrt{\eta}. \quad (1)$$

Индекс SRT относится к космическому телескопу, а индекс GRT — к наземному. Отношение среднеквадратичных флуктуаций $\left(\frac{\sigma_{\text{SRT}}}{\sigma_{\text{GRT}}} \right)$ вычислялось для сигнала вне окна импульса (off). Это отноше-

ние не менялось за время наблюдений и составляло величину 0.465. Разность дисперсии сигнала в окне и вне окна импульса вычислялась для наземного радиотелескопа WSRT; именно эта величина и определяет нормировку. Использовалось среднее значение для каждой выборки из ста импульсов. В среднем эта разность была около значения 0.5. Коэффициент $\eta = \frac{\text{SEFD}_{\text{SRT}}}{\text{SEFD}_{\text{GRT}}}$ равен отношению температур системы, выраженной в Янских (system equivalent flux density), для космического и наземного радиотелескопов. Это отношение было определено в уже цитированной работе Попова с соавторами [9] по наблюдениям яркого пульсара B0329+54. Они приводят значение $\eta = 0.0063$, полученное с учетом потери чувствительности космическим радиотелескопом из-за двухуровневого квантования сигнала. С учетом всех этих коэффициентов оказалось, что “сырые” значения амплитуды функции видности надо увеличить примерно в 50 раз.

Такая нормировка проводилась отдельно для двух поляризационных каналов. Затем полученные значения были усреднены. Эти усредненные по двум каналам значения и использовались в дальнейшем анализе.

На рис. 4 (слева) показано изменение со временем нормированной и усредненной по двум каналам амплитуды функции видности. Наблюдается значительный разброс индивидуальных значений. Такой разброс обусловлен нашей методикой измерения амплитуды функции видности на временном интервале $T_{\text{int}} = 100p = 38.76$ с, сравнимым с характерным временем мерцаний $\Delta t_{\text{scint}} = 40$ с. Такой режим измерений называется режимом мгновенного снимка (snapshot). В таком режиме проявляются мерцания функции видности. Сплошной линией на рис. 4 показана аппроксимация данных параболой. Среднеквадратичное отклонение измерений

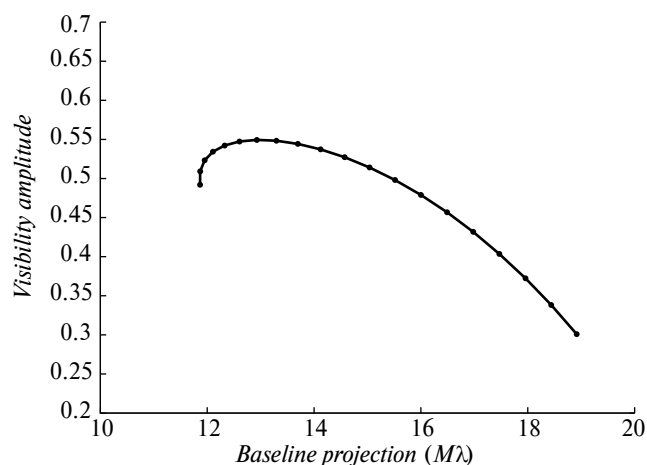
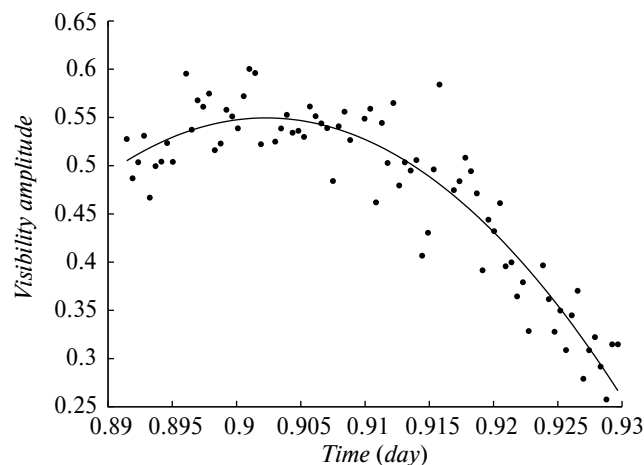


Рис. 4. Аппроксимация поведения амплитуды функции видности от времени (слева) и зависимость усредненной амплитуды функции видности от величины проекции базы наземно-космического интерферометра (справа). Время наблюдений указано в долях суток, а проекция базы дана в миллионах длин волн

относительно аппроксимирующей кривой составило величину 0.03. Усредненные значения использованы для анализа поведения амплитуды функции видности в зависимости от величины проекции базы наземно-космического интерферометра. Такая зависимость представлена на рис. 4 (справа).

4. ПАРАМЕТРЫ ДИСКА РАССЕЯНИЯ

Гвин с соавторами [10] показали, что для диска рассеяния амплитуда функции видности на базе, образованной телескопами “a” и “b”, зависит от величины проекции базы интерферометра как

$$V_{ab}(\vec{b}) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\sqrt{2 \ln 2}} \frac{\theta_H b}{\lambda} \right)^{n-2} \right], \quad (2)$$

где V_{ab} — амплитуда функции видности, b — проекция базы, λ — длина волны наблюдения, θ_H — полная ширина диска рассеянного изображения пульсара на половине максимума. Показатель степени спектра неоднородности плазмы n был определен для нашего пульсара в работе Бартеля с соавторами [7] и оказался равным 3.97 ± 0.05 . В последующих расчетах мы приняли $n = 4$.

Зависимость усредненной амплитуды функции видности от величины проекции базы наземно-космического интерферометра, показанная на рис. 4, имеет немонотонный характер. Такое поведение указывает на то, что форма диска рассеяния отличается от круга. На аппроксимирующей кривой было выбрано 40 равноотстоящих по времени точек ($\delta t = 86.4$ с), для каждой из которых известны амплитуда функции видности, величина проекции базы и позиционный угол вектора базы. Для каждой точки был вычислен угловой размер диска рассеяния в направлении позиционного угла проекции базы по формуле

$$\theta_H = \frac{0.528}{B} \sqrt{\ln(1/V_{ab})}. \quad (3)$$

Это выражение получено из (2) путем обращения относительно θ_H и после подстановки численных коэффициентов. Здесь $B = b/\lambda$ — величина проекции базы, выраженная в длинах волн, и угол θ_H получается в радианах.

Результаты вычисления угловых размеров диска рассеяния θ_H в зависимости от позиционного угла представлены точками на рис. 5. Сплошная линия на этом рисунке показывает результат аппроксимации измерений функцией эллипса. Были получены следующие параметры такого эллипса: большая ось 10.8 ± 0.5 mas, малая ось 5.8 ± 0.4 mas, и позиционный угол большой оси $-27.5^\circ \pm 1.0^\circ$; отношение осей эллипса составляет примерно 2:1.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Деллер с соавторами [11] определили параллакс и собственное движение пульсара B1642–03: он находится на расстоянии 4 кпк от Солнца

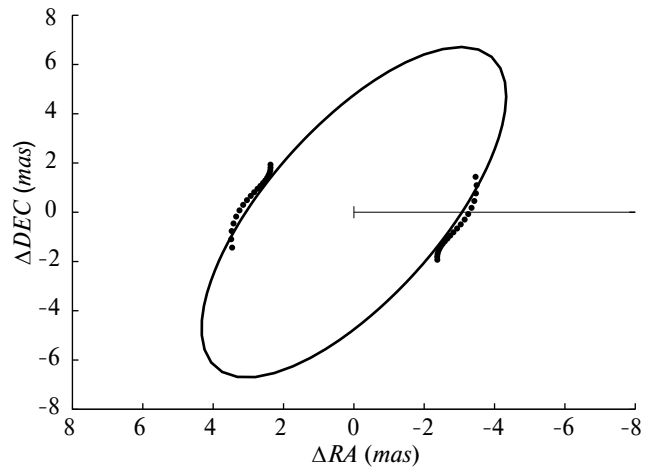


Рис. 5. Аппроксимация измеренных значений размеров диска рассеяния для различных проекций базы интерферометра в форме эллипса. Ось абсцисс соответствует прямому восхождению, а ось ординат — склонению. Масштаб рисунка выражен в угловых миллисекундах дуги (mas)

и движется с тангенциальной скоростью около 400 км/с. Галактические координаты пульсара равны: $l = 14^\circ$ и $b = 26^\circ$, а мера дисперсии составляет $DM = 35.8$ пк/см³. Примерно на угловом расстоянии в 8° от направления на пульсар на расстоянии в 140 пк оказалась звезда гигант ζ Orh спектрального класса O9.5, создающая обширную зону ионизованного водорода H II с радиусом Стремгrena около 50 пк [12], охватывающая на небе область диаметром почти в 50° . Таким образом, луч зрения от наблюдателя к пульсару в полной мере пересекает зону Стремгrena ζ Orh. Сама звезда ζ Orh относится к классу убегающих звезд (runaway star) [13, 14]; она движется с большой скоростью относительно окружающей среды и образует на базе своей истекающей атмосферы эмиссионную туманность Sh2-27 в результате действия ударной волны. Эта туманность имеет неправильную форму с угловыми размерами около 10° [15]. Луч зрения от наблюдателя к пульсару проходит вблизи границы этой туманности.

Пынзарь в специальном исследовании [16] рассмотрел возможное влияние туманности Sh2-27 на эффекты рассеяния радиоизлучения пульсара B1642–03, и сделал заключение, что эта туманность вносит относительно небольшой вклад в меру дисперсии пульсара и в величину угла рассеяния. Тем не менее, мы считаем, что именно анизотропное рассеяние на неоднородностях плазмы в отрогах туманности Sh2-27 обуславливает эллиптическую форму диска рассеяния.

Попов с соавторами [4] представили анализ РСДБ наблюдений пульсара B0833–45. По поведению амплитуды функции видности на различных ориентациях проекции базы было сделано заключение об эллиптичности диска рассеяния с от-

ношением осей 2:1. Пульсар В0833–45 находится в остатке сверхновой в созвездии Парус (Vela); авторы работы [4] предположили, что анизотропное рассеяние происходит на оболочке остатка сверхновой, так как положение рассеивающего экрана, определенное из сравнения угла рассеяния θ_H и времени рассеяния τ_{sc} , удовлетворительно согласовывалось с положением границы оболочки остатка сверхновой. В обсуждаемой работе [4] приведено соотношение между θ_H и τ_{sc} , по которому можно оценить расстояние до рассеивающего экрана в модели тонкого экрана. Мы перепишем здесь это соотношение в измененном виде:

$$\frac{D}{d} = \frac{\theta_H^2 D}{8 \ln 2 c \tau_{sc}} + 1, \quad (4)$$

где D — расстояние до пульсара, d — расстояние от наблюдателя до экрана, и c — скорость света.

Характерное время рассеяния τ_{sc} было определено путем аппроксимации сечений по запаздыванию функциями Гаусса (см. раздел 3); пример такой аппроксимации приведен на рис. 2. Было получено среднее значение $\tau_{sc} = 40 \pm 2$ нс. Сравнение полученных нами значений $\langle \theta_H \rangle \approx 8.5$ mas и времени рассеяния $\tau_{sc} = 40$ нс с использованием выражения (4) дает отношение $D/d \approx 3000$. Получается, что в модели тонкого рассеивающего экрана этот экран находится на расстоянии 1.5–2.5 пк от наблюдателя. Такой результат представляется нам неправдоподобным и указывает лишь на то, что модель тонкого экрана в нашем случае *не работает*. Действительно, луч зрения от наблюдателя до пульсара пересекает зону Стремгrena звезды ζ Oph с повышенной электронной плотностью. Такая зона действует как рассеивающая линза и увеличивает угол рассеяния. Эффекты линзирования радиоизлучения пульсаров на неоднородностях межзвездной плазмы рассматривались во многих публикациях [17–19]. Эти рефракционные эффекты приводят к появлению множественных изображений диска рассеяния и/или к деформации диска рассеяния. В частности, для правильной линзы, находящейся прямо на луче зрения, диск рассеяния может принимать квазиколецевую структуру, для которой запаздывания между рассеянными лучами оказываются малыми даже для большого диаметра диска рассеяния.

Гвинн с соавторами [20] провели РСДБ наблюдения нескольких пульсаров на частоте 327 МГц на наземной сети радиотелескопов с межконтинентальными базами. Среди объектов исследования оказался и наш пульсар В1642–03. Для него был измерен диаметр диска рассеяния $\theta_H = 6.7 \pm 1.1$ mas. Это определение хорошо согласуется с нашими измерениями. Однако, приведенное в работе [20] значение для полосы декорреляции $\Delta\nu$ составляет всего 15 кГц, по сравнению с принятым нами значением $\Delta\nu = 930$ кГц [7]. Соответственно, время рассея-

ния τ_{sc} в работе [20] принято равным 4 мкс (в сто раз больше нашего значения).

Как указывалось выше, динамический спектр пульсара В1642–03 был подробно исследован для этого же наблюдательного сеанса в работе [7]. В этой работе было отмечено, что кроме мерцательной структуры с полосой декорреляции в 930 кГц, в спектре присутствует еще и странная узкая дельта с характерной полосой менее 10 кГц. В настоящей работе мы исследовали эту узкополосную структуру более тщательно с использованием более высокого частотного разрешения с числом каналов $N_{ch} = 8192$ (по сравнению с $N_{ch} = 512$ в работе [7]). На рис. 6 показаны сечения по частоте двумерных автокорреляционных функций (АКФ) от динамических авто-спектров на радиотелескопе в Вестерборке для нескольких наблюдательных сканов. На некоторых сканах в АКФ отчетливо проявляются похожие квазипериодические структуры, что указывает на их искусственное происхождение. Характерная частотная ширина этих структур составляет около 10 кГц. Такие проявления могут быть обусловлены резонансными стоячими волнами в системе облучения или в системе синтеза диаграммы многоэлементного радиотелескопа WSRT.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ поведения амплитуды функции видности в зависимости от величины проекции базы наземно-космического интерферометра указывает на то, что диск рассеяния радиоизлучения от пульсара В1642–03 отличается от круглой формы и может быть представлен в виде эллипса с угловыми размерами осей 10.8×5.8 mas; позиционный угол большой оси эллипса составляет -27.5° .

Сравнение полученных нами значений угла рассеяния $\langle \theta_H \rangle \approx 8.5$ mas и времени рассеяния

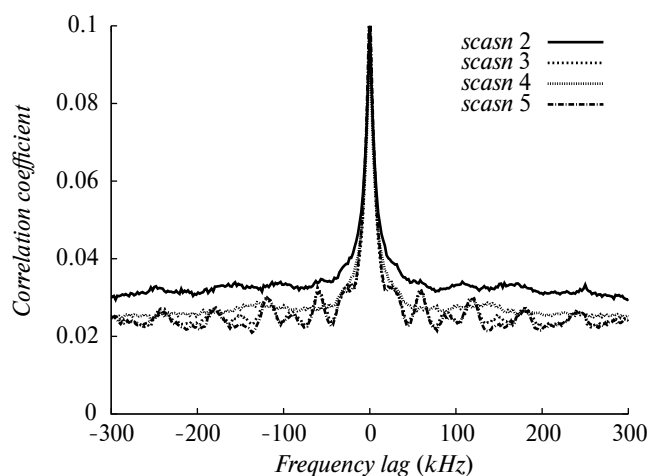


Рис. 6. Сечения по частоте двумерных автокорреляционных функций от динамических спектров для нескольких сканов. Сдвиг по частоте указан в килогерцах. Присутствие повторяющихся квазипериодических структур указывает на их аппаратное происхождение

$\tau_{sc} = 40$ нс свидетельствует о том, что диск рассеяния может иметь неоднородную структуру с концентрацией к краям диска. Такая структура может дать малые относительные запаздывания лучей при значительном общем угле рассеяния, измеренном интерферометром. Например, при гипотетической чисто кольцевой форме диска рассеяния запаздывание всех рассеянных лучей было бы одинаковым $\tau_{sc} \approx 0$ (без учета толщины кольца), в то время как размер диска рассеяния, измеренный интерферометром, может оказаться большим.

По нашему мнению, особенности рассеяния радиоизлучения от пульсара B1642–03 вызваны влиянием туманности Sh2-27 и зоны H II звезды спектрального класса O9.5 ζ Oph, находящихся близко к направлению на пульсар.

Двухэлементный интерферометр не позволяет исследовать сложную структуру диска рассеяния. Обнаруженные интересные особенности структуры диска рассеяния можно исследовать более тщательно с помощью глобальной РСДБ сети радиотелескопов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.С. Кардашев, А.В. Алакоз, А.С. Андрианов, М.И. Артюхов, и др., Вестн. НПО Лавочкина **3**(33), 4 (2016).
2. C.R. Gwinn, M.V. Popov, N. Bartel, A.S. Andrianov, et al., *Astrophys. J.* **822**(2), id. 96 (2016).
3. M.V. Popov, N. Bartel, C.R. Gwinn, M.D. Johnson, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **465**(1), 978 (2017).
4. М.В. Попов, А.С. Андрианов, М.С. Бургин, В.А. Зуга, А.Г. Рудницкий, Т.В. Смирнова, В.А. Согласнов, Е.Н. Фадеев. *Астрон. журн.* **96**(5), 393 (2019).
5. T.V. Smirnova, V.I. Shishov, A.S. Andrianov, M.S. Burgin, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **496**(4), 5149 (2020).
6. S.F. Likhachev, V.I. Kostenko, I.A. Girin, A.S. Andrianov, A.G. Rudnitskiy, and V.E. Zharov, *J. Astron. Instrument.* **6**(3), id. 1750004-131 (2017).
7. N. Bartel, M.S. Burgin, E.N. Fadeev, M.V. Popov, N. Ronaghikhameneh, T.V. Smirnova, and V.A. Soglasnov, *Astrophys. J.* **941**(2), id. 112 (2022).
8. M.V. Popov, N. Bartel, M.S. Burgin, T.V. Smirnova, and V.A. Soglasnov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **506**(3), 4101 (2021).
9. M.V. Popov, N. Bartel, C.R. Gwinn, M.D. Johnson, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **465**(1), 978 (2017).
10. C.R. Gwinn, J.M. Cordes, N. Bartel, A. Wolsczcan, and R.L. Mutel, *Astrophys. J.* **334**, L13 (1988).
11. A.T. Deller, W.M. Goss, W.F. Briskin, S. Chatterjee, et al., *Astrophys. J.* **875**(2), id. 100 (2019).
12. A.J.R. Prentice and D. Ter Haar, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **146**, 423 (1969).
13. M. Renzo and Y. Götzberg, *Astrophys. J.* **923**(2), id. 277 (2021).
14. A. Blaauw, in *Massive Stars: Their Lives in the Interstellar Medium*, edited by J.P. Cassinelli and E.B. Churchwell, *ASP Conf. Ser.* **35**, 207 (1993).
15. A.J.M. Thomson, T.L. Landecker, J.M. Dickey, N.M. McClure-Griffiths, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **487**(4), 4751 (2019).
16. A.V. Pynzar', *Astron. Rep.* **62**(2), 123 (2018).
17. A.W. Clegg, A.L. Fey, and T.J.W. Lazio, *Astrophys. J.* **496**(1), 253 (1998).
18. Ue-Li Pen and Y. Levin, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **442**(4), 3338 (2014).
19. Siqi Liu, Ue-Li Pen, J.P. Macquart, W. Briskin, and A. Deller, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **458**(2), 1289 (2016).
20. C.R. Gwinn, N. Bartel, and J.M. Cordes, *Astrophys. J.* **410**, 673 (1993).

ANISOTROPIC SCATTERING OF THE RADIO EMISSION IN THE DIRECTION TO THE PULSAR B1642–03

© 2025 M. V. Popov

*Astrospace Center of P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: popov069@asc.rssi.ru*

Observations of the pulsar B1642–03 were carried out with the ground-space interferometer Radioastron during the implementation of the key scientific program of the project. The observations were conducted on September 8, 2013 at frequencies 316–332 MHz. The Westerbork Synthesis RT (WSRT) was used as a ground arm of the interferometer. The baseline projections of the interferometer changed during the observations approximately from 10 000 km to 20 000 km, and the positional angle of the baseline changed almost for 50°. This configuration made it possible to estimate the angular diameter of the scattering disk in different positional angles. It was found that shape of the scattering disk can be presented in the form of an ellipse with an axial ratio of 2:1. Comparison of the angular size of the scattering disk and the delay time of scattered rays indicates a possible irregular structure of the scattering disk, which may be due to lensing of radio waves when passing through the Stromgren zone near the star ζ Oph.

Keywords: pulsar B1642–03, very long baseline interferometry, interstellar scattering