

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П. Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

Фадеев Евгений Николаевич

**Распределение неоднородностей межзвездной
плазмы в направлении пульсаров по данным
наземно-космического интерферометра
«Радиоастрон»**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Астрокосмическом центре (АКЦ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН) Российской Академии наук (РАН), г. Москва.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФИАН
Попов Михаил Васильевич

Официальные оппоненты: **Байкова Аниса Талгатовна,**
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН)

Зинченко Игорь Иванович,
доктор физико-математических наук, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН)

Ведущая организация: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга)

Защита состоится 32 марта 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров — к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <https://www.lebedev.ru/> и <http://www.asc-lebedev.ru/> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан 32 марта 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Н. Н. Шахворостова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Исследование рассеяния излучения пульсаров на неоднородностях межзвездной плазмы началось вскоре после открытия самих пульсаров [1, 2], но не потеряло актуальности до сих пор. Межзвездная среда заметно искажает принимаемые на Земле сигналы радиоисточников, что приводит к значительному числу эффектов, таких как дисперсия сигнала, временное уширение сигнала, формирование диска рассеяния, мерцания и др [3–5]. Для любых современных телескопов пульсары являются точечными источниками. Поэтому, а также в силу прерывистости их излучения, пульсары оказываются идеальными зондами межзвездной среды.

Для описания эффектов рассеяния обычно предполагают, что рассеивающая среда собрана в компактные, по сравнению с расстоянием до пульсара, области — экраны. Неоднородности экранов, на которых происходит рассеяние, имеют степенное распределение по размерам с внутренним и внешним размерами порядка от 10^8 до 10^{18} м [6]. В большом числе экспериментов спектр неоднородностей оказывается близок к колмогоровскому, но нередки также отклонения от такой зависимости [7].

Обнаружение параболических дуг в спектрах пульсаров открыло новую страницу в истории исследования межзвездных мерцаний [8]. Для объяснения этого эффекта необходимо, чтобы рассеянное изображение пульсара было сильно вытянутым и обладало компактным ядром [9, 10]. Детальные исследования отдельных пульсаров с обратными арками показали, что для объяснения отдельных арок требуется уменьшать внутреннюю границу спектра турбулентности до 10^6 м, что затруднительно с физической точки зрения, поскольку такие компактные плазменные структуры должны распадаться за очень короткое время [11]. Новые модели рассеивающей среды, предложенные в последние годы, привлекают для стабилизации газовой среды межзвездное магнитное поле [11–13]. Наблюдательное подтверждение предсказаний таких теорий является актуальной научной задачей.

Диски рассеяния пульсаров слишком малы, чтобы их можно было разрешить отдельными радиотелескопами, но использование радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) позволяет подойти вплотную к решению этой проблемы и оценить размеры рассеянных изображений некоторых источ-

ников [14, 15]. Дальнейшее развитие методов РСДБ требует увеличения расстояния между телескопами, что возможно только при выносе одной или нескольких антенн в космос. Одним из таких решений стал наземно-космический интерферометр «Радиоастрон», который обеспечивает высокое разрешение до 1 миллизекунды дуги на длине волны 92 см и до 0.2 миллизекунд дуги на длине волны 18 см.

Комплексное исследование эффектов рассеяния позволяет определить распределение рассеивающего вещества на луче зрения [8, 14, 15]. «Радиоастрон» уже позволил обнаружить близкие к Солнцу (десятки парсек) экраны в направлении пульсаров В0950+08, В1919+21 и В0525+21 [16–18]. На существование близких экранов указывают также результаты наблюдений быстрой переменности квазаров [19]. Связь рассеивающих экранов, как близких, так и более далеких, с наблюдаемыми космическими объектами до сих пор не ясна и требует дальнейших исследований.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является исследование характеристик межзвездной плазмы с помощью наблюдения мерцания ярких радиопульсаров методами РСДБ с использованием наземно-космического интерферометра «Радиоастрон».

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать новое или приспособить имеющееся программное обеспечение для анализа данных, которые выдает коррелятор Астрокосмического центра ФИАН.
2. Оценить основные параметры мерцаний, такие как полоса декорреляции, время мерцаний, время рассеяния, размер диска рассеяния с помощью данных, полученных наземно-космическим интерферометром «Радиоастрон».
3. На основе полученных данных с помощью различных моделей определить распределение турбулентной плазмы в направлении на пульсар, определить меру анизотропии рассеяния.

Научная новизна

1. Впервые были проведены наземно-космические РСДБ наблюдения пульсаров В0329+54, В0823+26, В0833–45, В0834+06, В1237+25, В1641–45, В1749–28, В1929+10, В1933+16, В2016+28 с помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» с максимальным на текущий момент разрешением в диапазонах 18 и 92 см. Типичная проекция базы интерферометра составляла несколько диаметров Земли, максимальная — 18.2 диаметра Земли или 230000 км при наблюдении пульсара В0329+54.
2. Определены размеры кружков рассеяния всех перечисленных выше пульсаров, причем для В0823+26, В0834+06, В1237+25, В1641–45, В1749–28 такие измерения были сделаны впервые, для В0329+54, В1929+10 и В2016+28 в литературе приведены только верхние оценки, а измерение диска рассеяния В0833–45 ранее проводились на других частотах.
3. Впервые было показано, что рассеянное изображение пульсара В0833–45 сильно вытянуто. Определен позиционный угол большой оси изображения пульсара.
4. Во вторичных спектрах пяти пульсаров были обнаружены и измерены параболические дуги, причем у В1237+25 и В1933+16 такие измерения впервые проведены успешно.
5. Впервые было измерено расстояние до рассеивающих экранов в направлении пульсаров В1641–45, В1749–28, В1237+25, В1933+16 и В2016+28.

Теоретическая и практическая значимость

- Измерения, проведенные на сверхбольших базах, дают возможность строить более детальные модели межзвездного рассеяния радиоизлучения далеких источников на малых пространственных масштабах.
- Изучение вторичных спектров позволяет исследовать межзвездную среду с угловым разрешением, превосходящим разрешение отдельных телескопов. Таким образом фактически была реализована идея межзвездного интерферометра.

- Определение положений рассеивающих экранов проливает свет на структуру распределения неоднородностей электронной плотности на луче зрения в частности и на условия в межзвездной среде в целом.
- Определение размеров и формы кружков рассеяния важно для описания мелкомасштабной организации ионизированной межзвездной среды.
- Результаты диссертации могут быть использованы для улучшения теории рассеяния радиоизлучения межзвездной плазмой.

Методы исследования

Работа выполнена на основе наблюдательных данных, полученных при помощи наземно-космического интерферометра «Радиоастрон». Первичная корреляционная обработка данных проводилась с помощью программного коррелятора Астрокосмического центра ФИАН. Для последующего посткорреляционного анализа использовались методы частотной и нелинейной фильтрации, анализ изображений на основе обобщенного преобразования Хафа, линейной и нелинейной аппроксимации экспериментальных данных, анализ автокорреляционных и структурных функций.

Основные положения, выносимые на защиту

1. С помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» впервые надежно измерены угловые размеры дисков рассеяния для 9 пульсаров. Измеренные значения лежат в интервале от 0.78 до 12.3 миллисекунд дуги на частоте 324 МГц и от 0.5 до 27 миллисекунд дуги на частоте 1.664 ГГц. Такие величины недоступны для измерения на наземных РСДБ системах.
2. Сравнение измеренных угловых размеров дисков рассеяния с временем запаздывания рассеянных лучей показало, что модель однородной рассеивающей среды не согласуется с наблюдательными данными ни для одного из исследованных пульсаров. Следовательно, рассеяние происходит на сравнительно компактных слоях турбулентной плазмы в Галактике.
3. В модели тонкого рассеивающего экрана определены расстояния до этих компактных слоев плазмы в направлении каждого пульсара. В ряде случаев положения таких выделенных слоев турбулентной плазмы совпадает с

известными физическими структурами в Галактике: это области спиральных рукавов — местный спиральный рукав для пульсара В0823+26, рукав Центавра-Щита для пульсара В1641—45 и рукав Киля-Стрельца для пульсара В1749—28. Для последних двух объектов возможна связь с конкретными рассеивающими туманностями — это зоны НП G339.1-04 и RCW 142 соответственно. В случае пульсара В0833—45 (пульсар в созвездии Парусов, Vela) положение рассеивающего экрана оказалось близким к положению оболочки остатка сверхновой. Такие совпадения подтверждают применимость модели тонкого рассеивающего экрана для интерпретации экспериментальных данных.

4. Обнаружено анизотропное рассеяние радиоизлучения пульсара в созвездии Парусов (Vela pulsar). Непосредственно измерен диск рассеяния, который имеет форму эллипса с отношением осей 2:1. Такое анизотропное рассеяние может быть объяснено особенностями турбулентных слоев в остатке вспышки сверхновой.
5. Во вторичных динамических спектрах нескольких пульсаров (В0823+26, В0834+26, В1237+25, В1929+10 и В1933+16) с помощью разработанной специальной методики выделены специфические структуры, называемые параболическими арками. Для объектов В1237+25 и В1933+16 такие структуры выявлены впервые. Само существование параболических арок указывает на анизотропное рассеяние в компактных плазменных слоях в соответствии с существующей теорией.
6. Были определены расстояния до рассеивающих экранов несколькими методами, в том числе для пульсаров В0823+26, В0834+26, В1237+25, В1929+10 и В1933+16 с использованием полученной нами кривизны параболических арок и известному собственному движению пульсаров.
7. Сравнение результатов определения расстояний до рассеивающих экранов несколькими способами показывает удовлетворительные совпадения для пульсаров В0329+54, В1749—28, В1929+10 и обнаруживает значительные расхождения для пульсаров В0823+26, В0834+26, В1933+16 и В2016+28. Наличие таких расхождений свидетельствует о том, что модель тонкого экрана не всегда адекватно описывает явления рассеяния.
8. Рассмотрен теоретически случай рассеяния на тонком экране в комбина-

ции с вкладом от однородно распределенной среды. Показано что положение экрана в такой комбинации не может быть установлено однозначно.

9. Определены характерные масштабы дифракционных мерцаний по времени и частоте для всех исследованных пульсаров. Оказалось, что для пульсара В0834+06 измеренные значения полосы декорреляции изменяются в 50 раз между 2012 и 2014 годом. Такие кардинальные изменения налагают серьёзные ограничения на параметры и свойства пространственной структуры турбулентных слоёв плазмы на луче зрения к этому пульсару.
10. Определены показатели степени спектра пространственных неоднородностей в направлении на пульсары В0823+26, В0833–45, В0834+06, В1237+25, В1929+10, В1933+16 и В2016+28 на основе анализа структурных функций. Полученные значения заключены в интервале от 2.83 до 3.75.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных в настоящей работе, обеспечивается использованием данных наземно-космического интерферометра «Радиоастрон», обладающего достаточным пространственными и временным разрешением для выполнения поставленных задач.

Результаты измерений, проведенных в разное время, хорошо согласуются между собой, а также соответствуют данным, известным из литературы. Расстояния до рассеивающих экранов для восьми из десяти пульсаров определены несколькими методами.

Достоверность представленных результатов подтверждается апробацией на российских и зарубежных конференциях, а также их публикацией в ведущих научных изданиях по исследуемой тематике.

Апробация работы

Все результаты и положения, которые выносятся на защиту, апробированы в публикациях и обсуждениях на конференциях. Результаты были представлены и обсуждались на следующих конференциях:

1. International Conference All-wave Astronomy. Shklovsky-100, г. Москва, 2016.

2. Всероссийская астрономическая конференция – 2017 «Астрономия: познание без границ» (ВАК 2017), Ялта, 2017
3. 42nd COSPAR Scientific Assembly, Pasadena, USA, 2018
4. Всероссийская астрономическая конференция – 2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований» (ВАК 2021), Москва, 2021

Публикации по теме диссертации

Все результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах и сборниках трудов научных конференций. Всего опубликовано 6 научных работ [A1-A5, B1], включая тезисы докладов научных конференций [B1]. Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, суммированы в 5 статьях [A1-A5], которые изданы в рецензируемых журналах, входящих в международные базы цитирования Web of science и Scopus и удовлетворяющие требованиям Высшей аттестационной комиссии (ВАК) при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

A1 Попов М.В., Андрианов А.С., Бартель Н., Гвинн К., Джоши Б.Ч., Джонси Д., Кардашев Н.С., Рудницкий А.Г., Смирнова Т.В., Согласнов В.А., Фадеев Е.Н., Шишов В.И. Распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении трех удаленных пульсаров по результатам наблюдений с наземно-космическим интерферометром «Радиоастрон» // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, №9. — С. 788–794.

A2 Popov M.V., Andrianov A., Fadeev E., Kardashev N., Kovalev Y.Y., Rudnitskiy A., Soglasnov V.A., Bartel N., Gwinn C.R., Johnson M.D., Joshi B.C., Karuppusamy R., Kramer M., Anton Zensus J., Shishov V., Smirnova T. PSR B0329+54: Substructure in the scatter-broadened image discovered with RadioAstron on baselines up to 330 000 km // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — V. 465, I.1. — pp. 978–985.

A3 Fadeev E.N., Andrianov A.S., Burgin M.S., Popov M.V., Rudnitskiy A.G., Zuga V.A., Shishov V.I., Smirnova T.V. Revealing compact structures of interstellar plasma in the Galaxy with RadioAstron // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — V. 480, I.3. — pp. 4199–4210.

A4 Fadeev E.N. Uncertainty in measurements of the distances of scattering screens in pulsar observations // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2018. —

V. 18, I.8. — pp. 103-106.

A5 Попов М.В., Андрианов А.С., Бургин М.С., Зуга В.А., Рудницкий А.Г., Смирнова Т.В., Согласнов В.А., Фадеев Е.Н. Анизотропное рассеяние радиоизлучения пульсара В0833–45 в остатке сверхновой в созвездии Парусов // *Астрономический журнал*. — 2019. — Т. 96, №.5. — С. 393–406.

Тезисы докладов научных конференций:

B1 Фадеев Е.Н., Андрианов А.С., Зуга В.А., Попов М.В., Рудницкий А.Г., Смирнова Т.В., Согласнов В.А., Шишов В.И. Зондирование космической плазмы радиопульсами пульсаров в проекте «Радиоастрон» // *Известия крымской астрофизической обсерватории*. — 2018. — Т. 114, №1. — С. 151–156.

Личный вклад

Автор диссертационной работы совместно с научным руководителем и соавторами активно участвовал в анализе данных, интерпретации и обсуждении результатов, формулировке выводов работы. Во всех основных результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным или равным вкладу соавторов. Автор лично или при участии коллег провел следующие работы:

1. Диссертант самостоятельно выполнил посткорреляционную обработку пульсаров В1933+16 и В0834+06 (эксперимент 08.12.2014). Все программы для обработки были написаны автором. Процедура обработки и ее результаты были опубликованы в работах [A1, A3].
2. Диссертантом создана программа для определения кривизны и смещения вершины параболических дуг во вторичном спектре. Автор самостоятельно построил вторичные спектры всех пульсаров, исключая В0834+06 (эксперимент 08.04.2015), получил их числовые характеристики и вычислил расстояния до рассеивающих экранов [A1, A3].
3. Диссертантом были получены оценки расстояния до экранов в направлении пульсаров В0823+26 и В0833–45 методом определения задержки динамических спектров. [A3, A5]
4. Диссертант является единственным автором публикации А4, где уточнено положение рассеивающих экранов в зависимости от моделей распределения межзвездной среды.

5. Диссертант принимал активное участие в получении результатов, их обобщении, интерпретации и подготовке текста публикаций [A1–A5].

Объем, структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 133 страницы, включая 32 рисунка и 6 таблиц. Список литературы на 15 страницах содержит 137 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении представлено общее описание диссертации, обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы, а также приведен список опубликованных работ и докладов на научных конференциях.

Первая глава диссертации посвящена описанию наблюдательных явлений, возникающих при взаимодействии радиоизлучения с межзвездной средой, вводятся физические величины, которые будут использованы в дальнейшем изложении, приводится обзор научной литературы по данной тематике.

Радиопульсары излучают в широком частотном диапазоне. Распространяясь в межзвездной среде, излучение с разной частотой движется с различной скоростью, что приводит к дисперсии сигнала. Мера дисперсии характеризует полное число электронов на луче зрения в столбце единичной площади и может служить для оценки расстояний пульсаров.

При распространении через неоднородную среду формируется дифракционная картина с характерным размером ρ_{dif} в плоскости наблюдателя. Движение дифракционной картины через антенну приводит к изменению мощности принимаемого излучения, которое обычно называют мерцанием источника. Характерное время, за которое дифракционное пятно проходит через антенну, называют временем мерцаний или временем декорреляции t_{dif} . Усиление сигнала происходит в ограниченной полосе частот Δf_{dif} , именуемой полосой декорреляции.

В результате рассеяния излучение приходит на антенну не только напря-

мую от пульсара, а из конуса раствором $2\theta_S$, соответствующему падению интенсивности излучения в e раз. Рассеянное излучение достигает наблюдателя с задержкой τ_{sc} . В модели тонкого рассеивающего экрана, расположенного на расстоянии D_S от наблюдателя, время рассеяния связано с $2\theta_S$ выражением $\tau_{sc} = D_S \theta_S^2 / (2cs)$, где c — скорость света, а $s = (D - D_S)/D$, D — расстояние до пульсара.

Обычно предполагают, что размер неоднородностей в рассеивающем экране имеет степенной характер. Экспериментально показано, что показатель степени неоднородностей в межзвездной среде близок к колмогоровскому $\beta = 11/3$, хотя в ряде случаев и отклоняется от него. Если ввести величину $\gamma = 2\beta/(\beta - 2)$, то можно зависимость основных параметров мерцаний от частоты записать в простой форме:

$$\theta_S \sim f^{-\frac{\gamma}{2}}, \quad (1a)$$

$$\tau_{sc} \sim f^{-\gamma}, \quad (1b)$$

$$\Delta f_{dif} \sim f^\gamma, \quad (1c)$$

$$t_{dif} \sim f^{\frac{\gamma-2}{2}}. \quad (1d)$$

Динамическим спектром называется зависимость мощности излучения пульсара от частоты f и времени t , $I(f, t)$. Квадрат модуля фурье-образа динамического спектра, $A(\tau, \nu) = |\mathfrak{F}(I(f, t))|^2$, называется вторичным спектром. Здесь τ — задержка сигнала, а ν — частота интерференции. У многих пульсаров, например V0823+26, во вторичных спектрах найдены параболические дуги, возникающие, как принято считать, вследствие рассеяние на тонком экране. Теоретические исследования показывают, что для существования таких дуг необходимо, чтобы рассеянное изображение пульсара было сильно вытянуто. Часто говорят, что рассеяние в таких случаях одномерное. У отдельных пульсаров (V0834+06, V1133+16) наблюдаются также небольшие обратные дужки. Модельные изображения «дисков» рассеяния таких пульсаров представляют собой россыпь ярких точек, вытянутых в одну линию и окруженных тусклым гало [20, 21]. Эти данные подтолкнули к разработке новых теорий рассеяния в межзвездной среде.

Во **второй главе** рассмотрены основные параметры наземно-космического интерферометра «Радиоастрон», описаны основные элементы корреляционной и посткорреляционной обработки. В конце главы приводится список наблюдательных сеансов.

Миссия «Радиоастрон» функционировала с момента запуска космического радиотелескопа (КРТ) «Спектр-Р» 18 июля 2011 года вплоть до 10 января 2019 г, когда с космическим аппаратом была потеряна связь. Орбита КРТ эллиптическая с периодом около 9 суток. Под воздействием возмущений от Луны и Солнца она достаточно сильно эволюционирует со временем: эксцентриситет меняется от 0.6 до 0.96, высота перигея изменяется от 7000 км до 81.5 тыс. км, а наклонение орбиты — в пределах от 1° до 85° . КРТ оснащен параболическим зеркалом диаметром 10 м и приемной аппаратурой, способной регистрировать сигнал на частотах 324 МГц (полоса Р), 1664 МГц (полоса L), 4.832 ГГц (полоса С) и 22.232 ГГц (полоса К). Прием сигнала осуществлялся в двух субполосах шириной по 16 МГц в двух круговых поляризациях.

Первичная обработка наблюдений пульсаров производилась на программном «FX» корреляторе АКЦ ФИАН. Для компенсации дисперсии сигналов в корреляторе реализован алгоритм постдетекторной компенсации дисперсии. Для повышения отношения сигнал-шум выполнялась процедура гейтинга, при которой для корреляции выбирались только моменты записи, в которых происходило излучение пульсара. Кроме окна на импульсе (ON) выбиралось два окна такой же ширины вне импульса (OFF), отстоящие примерно на 120° по долготе импульса так, чтобы не попадать на возможный интеримпульс.

Результат работы коррелятора выдается в формате FITSID и UVX. Вся дальнейшая обработка проводилась диссертантом с использованием только FITSIDI-файлов. Данные из них извлекались с помощью библиотеки cfitsio. Программы обработки написаны диссертантом самостоятельно на языках C, Python3, PHP.

В работе представлены результаты обработки 10 пульсаров, наблюдавшихся в рамках проекта «Радиоастрон». За исключением В1641–45 и В1933+16 все пульсары относительно близкие с расстоянием менее 1 кпк. В основном они наблюдаются в направлении Млечного Пути, что типично для пульсаров, но В0823+26 и В0834+06 имеют галактическую долготу около 30° , а В1237+25 расположен почти в направлении на северный галактический полюс. Пульсары В1749–28 и В2016+28 выделяются достаточно небольшими для пульсаров тангенциальными скоростями.

Всего было проведено 17 сеансов наблюдений. Все сеансы, исключая единственное наблюдение В1933+16, проводились на одной выбранной частоте: 6 пульсаров в полосе Р и 3 пульсара в полосе L. Типичная продолжительность сеанса составляла полтора часа, но отдельные наблюдения могли продолжаться свыше 10 часов. Типичная величина проекции наземно-космической базы со-

ставляла 5-10 диаметров Земли. Максимальное значение 16.4 диаметра Земли было реализовано при наблюдении пульсара В2016+28.

Третья глава посвящена определению параметров рассеяния, описываются используемые методы и приводятся полученные результаты.

Для измерения полосы декорреляции и времени мерцания используют динамические спектры. Для определения искомого значения вычисляется автокорреляционная функция (АКФ) динамического спектра. За полосу декорреляции принимается полуширина центральной части сечения АКФ по частоте на половине максимума, а полуширина центральной части АКФ по времени при падении значения АКФ в e раз равна времени мерцания.

Полученные значения полосы декорреляции заключены в диапазоне от 4 до 620 кГц в полосе Р и от 6 до 410 кГц в полосе L. Экстремально узкие полосы декорреляции В1641–45 (полоса L) и В1933+16 (полоса Р) указанным методом измерить не удалось. Для них определялось время рассеяния τ_{sc} по скорости падения интенсивности в хвосте среднего профиля, с помощью которого вычислялось искомое значение: $\Delta f_{dif} \approx (2\pi\tau_{sc})^{-1}$. Измеренное время мерцаний оказалось в диапазонах от 12 до 310 с и от 0.2 до 220 с в полосах Р и L соответственно. Для пульсара В2016+28 время мерцаний оказалось сравнимым или больше времени наблюдений (55 минут).

Фазовую структурную функцию $D_s(\Delta t)$ можно получить из автокорреляционной функции динамического спектра как [27]

$$D_s(\Delta t) = \frac{B_I(0) - B_I(\Delta t)}{\langle I \rangle^2} \text{ при } \Delta t \leq t_{dif}, \quad (2)$$

где $\langle I \rangle$ — средняя интенсивность за сеанс наблюдений. Для получения структурной функции в частотной области использовался подобный метод:

$$D_s(\Delta f) = \frac{B_I(0) - B_I(\Delta f)}{\langle I \rangle^2} \text{ при } \Delta f \leq \Delta f_{dif}. \quad (3)$$

Структурные функции имеют степенной характер при $\Delta t \leq t_{dif}$ и $\Delta f \leq \Delta f_{dif}$ соответственно, поэтому в двойном логарифмическом масштабе представляют собой прямую линию. При дифракционных мерцаниях показатели степени временной и частотной структурных функций связаны с показателем степени спектра пространственных неоднородности плазмы β как $(\beta - 2)$ и $(\beta - 2)/2$ соответственно, тогда как при рефракционных мерцаниях они оба равны $(\beta - 2)$ [27]. Таким образом, измерение наклона структурной функции позволяет определить

показатель степени спектра пространственных неоднородности плазмы и характер мерцаний. Полученные значения β заключены в интервале от 2.83 до 3.75.

Наиболее интересным измеряемым параметром при анализе параболических дуг во вторичных спектрах является кривизна параболы. Для определения коэффициентов парабол мы воспользовались преобразованием Хафа, которое широко применяется при распознавании простых образов [28]. Использование этого преобразования для исследования параболических дуг описано в работе [29]. Диссертантом этот метод был модернизирован. Во-первых, в [29] параболические ветви были видны на небольшом участке, на котором их интенсивность менялась мало. В наших экспериментах яркость вдоль ветви параболы может меняться в разы от центра спектра к его периферии, вследствие чего внешние части практически не влияют на решение. Для решения этой проблемы перед аппроксимацией производилась бинаризация вторичного спектра по некоторому пороговому уровню. Во-вторых, для большинства полученных нами вторичных спектров отсутствие зеркальной симметрии заметно невооруженным глазом, зато присутствует симметрия относительно центра. Мы предположили, что дуга параболы всегда проходит через начало координат, но ее вершина может быть смещена из него на расстояние $\Delta\nu$ по частоте. Поэтому для аппроксимации мы использовали зависимость $\tau = a\nu^2 - 2a\nu\Delta\nu$. Такая процедура не применялась для пульсара В1933+16 смещение вершины не определялось, поскольку алгоритм не дает хороших результатов при наличие только одной ветви параболы. Напротив, во вторичном спектре В0834+06 удалось выделить около десятка отдельных арклетов, для которых определены параметры параболы. Значение a в данном случае получено как среднее взвешенное значение для каждого арклета. Вершины отдельных арклетов выстраиваются вдоль параболы той же кривизны a с вершиной в начале координат.

По мере увеличения базы интерферометра уменьшается ширина синтезированной диаграммы направленности, а значит, диск рассеяния может быть разрешен. Именно с этим явлением связано падение амплитуды функции видности по мере увеличения базы. Теоретическая зависимость, описывающая связь этих величин может быть записана как [30]

$$V = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\sqrt{2 \ln 2}} \frac{\theta_H b}{\lambda} \right)^{\beta-2} \right] \quad (4)$$

где θ_H — полная ширина диска рассеяния на половине максимума, λ — длина волны, b — проекция базы. Очевидно, что эта функция описывает видность

только на малых и средних базах. На больших базах, где диск рассеяния разрешен полностью, на первый план выходит микроструктура диска рассеяния, которая остается постоянной при увеличении базы. Измеряя величину видности пульсара на различных базах, можно аппроксимировать зависимость $V(b)$ выражением 4 и получить величину θ_H .

Трудность этого метода состоит в необходимости хорошей калибровки данных, полученных на разных телескопах, что не всегда удается выполнить достаточно аккуратно. Кроме того, при планировании эксперимента необходимо обеспечить как малые базы, так и промежуточные, при которых диск рассеяния разрешается частично. Последнее выполнить достаточно сложно, поскольку изначально размер кружка рассеяния неизвестен.

Для минимизации указанных проблем мы воспользовались методикой, разработанной в работе [17]. Пусть $J_f(b, \Delta f)$ — корреляционная функция видности по частоте. В режиме сильных мерцаний ее можно представить в виде

$$J_f(b, \Delta f) = |B_u(\Delta f)|^2 + |B_u(b)|^2, \quad (5)$$

где $B_u(\Delta f)$ — ковариационная функция флуктуаций потока, не зависящая от величины базы, а $B_u(\mathbf{b})$ — пространственная ковариационная функция, которая, в свою очередь, не зависит от частоты. При нулевом частотном сдвиге $|B_u(\Delta f)|^2 = 1$, а при $\Delta f > \Delta f_{dif}$ сигналы становятся независимыми и $|B_u(\Delta f)|^2 = 0$. Отсюда получаем соотношение:

$$\frac{J_f(\mathbf{b}, \Delta f > \Delta f_{dif})}{J_f(\mathbf{b}, \Delta f = 0)} = \frac{|B_u(\mathbf{b})|^2}{1 + |B_u(\mathbf{b})|^2}. \quad (6)$$

Здесь в левой части измеряемые величины, а в правой — вычисляемая. Функцию пространственной когерентности можно представить в виде

$$B_u(\mathbf{b}) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{|\mathbf{b}|}{\rho_{dif}} \right)^{\beta-2} \right]. \quad (7)$$

Диаметр диска рассеяния тогда можно вычислить как

$$\theta_H = \frac{\sqrt{2 \ln 2} \lambda}{\pi \rho_{dif}}. \quad (8)$$

До наблюдений с «Радиоастроном» измерения размеров дисков рассеяния были выполнены лишь для немногих отдельных пульсаров. Вынос одного из плеч интерферометра в космос позволил разрешить диск рассеяния у большинства исследуемых нами пульсаров. Измеренные значения лежат в интервале от

0.78 до 12.3 мсек дуги на частоте 324 МГц и от 0.5 до 27 мсек дуги на частоте 1.664 ГГц. Диск рассеяния пульсара В1237+25 оказался столь мал, что не был разрешен на проекции базы около 120 000 км.

При исследовании пульсара В0833—45 было обнаружено, что размер диска рассеяния изменяется в зависимости от позиционного угла базы. При этом в наблюдениях в разные дни размер диска при одинаковых позиционных углах остается постоянным. Нашим измерениям соответствует эллиптический диск рассеяния с отношением осей $\approx 2 : 1$ и позиционным углом большой оси $50 \pm 20^\circ$.

Четвертая глава освещает методы определения расстояния до рассеивающих экранов, проводится сравнение результатов, полученных разными методами.

Для отдельных моделей распределения рассеивающей среды на луче зрения можно ввести простые соотношения между наблюдательными параметрами [15]. Если рассеивающая среда распределена равномерно между источником и наблюдателем, то $\theta_H^2 = 16 \ln 2c\tau_{sc}/D = \theta_{H,u}^2$. Ни для одного из исследуемых нами пульсаров такое соотношение не выполнялось.

Другой важный частный случай — одиночный рассеивающий тонкий экран. Его относительное расстояние от пульсара s , можно записать в виде

$$s = \left(1 + \frac{\theta_{H,u}^2}{\theta_H} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Отметим, что при $\theta_H = \theta_{H,u}$ положение экрана получается равным $s = 2/3$. Это означает, что в такой ситуации мы не можем различать модель с экраном и модель однородно распределенной среды, не используя дополнительную информацию.

Для всех пульсаров, у которых удалось определить θ_H и τ_{sc} , мы сделали оценку расстояния до экрана с помощью формулы 9. Однако, как показано в [A4], применение более сложных моделей может заметно изменить итоговое положение экрана. Например, добавление в модель к тонкому экрану равномерно распределенной среды сдвигает решение в сторону пульсара и добавляет второе решение вблизи самого пульсара. С другой стороны, наличие вложенных друг в друга параболических дуг с разной кривизной свидетельствуют в пользу рассеяния на двух экранах, расположенных на разных расстояниях.

Определять расстояние до рассеивающих экранов можно на основе изме-

рения кривизны a параболических дуг во вторичных спектрах [8–10]:

$$s = \left[\frac{2290 \cdot \lambda^2}{a\mu^2 D} + 1 \right]^{-1}, \quad (10)$$

где длина волны λ выражена в метрах, собственное движение μ — в мсек дуги в год, расстояние до пульсара D — в килопарсеках, а кривизна параболы a — в с^3 .

Если динамический спектр удастся получить двумя антеннами, расположенными достаточно далеко друг от друга, чтобы был замечен сдвиг картины мерцаний во времени, то возникает возможность получить оценку расстояния до рассеивающего экрана независимым способом. Запаздывание зависит от двух величин: скорости движения дифракционной картины в uv -плоскости V_{ISS} и взаимного положения вектора скорости и вектора базы \mathbf{b} , а точнее, проекции вектора базы на uv -плоскость \mathbf{b}_{uv} . Благодаря суточному вращению Земли величина и направление проекции базы изменяется со временем, что приводит к изменению времени задержки динамических спектров между двумя станциями. Отсюда, зная задержку и положение базы в разные моменты времени, можно определить скорость дифракционной картины, которая связана с тангенциальными скоростями пульсара, $\mathbf{V}_{p\perp}$, экрана, $\mathbf{V}_{s\perp}$, и наблюдателя, $\mathbf{V}_{o\perp}$ соотношением

$$\mathbf{V}_{ISS} = \mathbf{V}_{o\perp} + \frac{1}{s}\mathbf{V}_{s\perp} - \frac{1-s}{s}\mathbf{V}_{p\perp}. \quad (11)$$

Скорость пульсара обычно составляет сотни км/с, скорость наблюдателя не превосходит орбитальной скорости Земли (30 км/с). Оценка скорости экрана достаточно сложна, но по-видимому, в среднем не превосходит нескольких десятков км/с. Поэтому обычно всеми скоростями, кроме скорости пульсара, пренебрегают.

Скорость дифракционной картины можно оценить зная ρ_{dif} , определяемое по формуле 7, а также время мерцаний t_{dif} : $\mathbf{V}_{ISS} = \rho_{dif}/t_{dif}$.

Определенные такими методами расстояния до экранов показали, что экран может находиться как вблизи пульсара, так и вблизи наблюдателя, а также занимать промежуточные положения. Для трех пульсаров значения, полученные различными методами, оказались совпадающими в пределах ошибки, тогда как для пяти пульсаров были получены противоречивые оценки расстояния экранов. Причиной расхождений может быть неприменимость простой модели тонкого фазового экрана для реальных источников рассеивания. Кроме того, для пульсаров с небольшой тангенциальной скоростью пренебрежение

движением экрана также уменьшает точность полученного результата неопределенным образом.

В Заключении приведены основные результаты работы, выносимые на защиту.

Литература

- [1] P. A. G. Scheuer. Amplitude Variations in Pulsed Radio Sources. *Nature*, 218:920–922, June 1968.
- [2] B. J. Rickett. Interstellar scattering and scintillation of radio waves. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 15:479–504, 1977.
- [3] Дж. Тейлор Р. Манчестер. *Пульсары*. Мир, 1980.
- [4] D. R. Lorimer and M Kramer. *Handbook of pulsar astronomy*. Cambridge university press, 2005.
- [5] A. R. Thompson, J. M. Moran, and G. W. Swenson Jr. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. Springer, Cham, 2017.
- [6] J. W. Armstrong, B. J. Rickett, and S. R. Spangler. Electron Density Power Spectrum in the Local Interstellar Medium. *ApJ*, 443:209, April 1995.
- [7] Y. Gupta. Pulsars and Interstellar Scintillations. In M. Kramer, N. Wex, and R. Wielebinski, editors, *IAU Colloq. 177: Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond*, volume 202 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 539, January 2000.
- [8] 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. Faint Scattering Around Pulsars: Probing the Interstellar Medium on Solar System Size Scales. *ApJ*, 549(1):L97–L100, March 2001.
- [9] M. A. Walker, D. B. Melrose, D. R. Stinebring, and C. M. Zhang. Interpretation of parabolic arcs in pulsar secondary spectra. *MNRAS*, 354(1):43–54, October 2004.

- [10] James M. Cordes, Barney J. Rickett, Daniel R. Stinebring, and William A. Coles. Theory of Parabolic Arcs in Interstellar Scintillation Spectra. *ApJ*, 637(1):346–365, January 2006.
- [11] Ue-Li Pen and Yuri Levin. Pulsar scintillations from corrugated reconnection sheets in the interstellar medium. *MNRAS*, 442(4):3338–3346, August 2014.
- [12] S. Liu, U.-L. Pen, J.-P. Macquart, W. Brisken, and A. Deller. Pulsar lensing geometry. *MNRAS*, 458:1289–1299, May 2016.
- [13] Carl R. Gwinn. Noodle model for scintillation arcs. *MNRAS*, 486(2):2809–2826, June 2019.
- [14] C. R. Gwinn, N. Bartel, and J. M. Cordes. Angular broadening of pulsars and the distribution of interstellar plasma fluctuations. *ApJ*, 410:673–685, June 1993.
- [15] M. C. Britton, C. R. Gwinn, and M. J. Ojeda. Angular Broadening of Nearby Pulsars. *ApJ*, 501:L101–L104, July 1998.
- [16] 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. RadioAstron Studies of the Nearby, Turbulent Interstellar Plasma with the Longest Space-Ground Interferometer Baseline. *ApJ*, 786:115, May 2014.
- [17] V. I. Shishov, T. V. Smirnova, C. R. Gwinn, A. S. Andrianov, M. V. Popov, A. G. Rudnitskiy, and V. A. Soglasnov. Interstellar scintillations of PSR B1919+21: space-ground interferometry. *MNRAS*, 468:3709–3717, July 2017.
- [18] A. S. Andrianov, T. V. Smirnova, V. I. Shishov, C. Gwinn, and M. V. Popov. Distribution of interstellar plasma in the direction of PSR B0525+21 from data obtained on a ground-space interferometer. *Astronomy Reports*, 61:513–520, June 2017.
- [19] Jeffrey L. Linsky, Barney J. Rickett, and Seth Redfield. The Origin of Radio Scintillation in the Local Interstellar Medium. *ApJ*, 675(1):413–419, March 2008.
- [20] Frank S. Trang and Barney J. Rickett. Modeling of Interstellar Scintillation Arcs from Pulsar B1133+16. *ApJ*, 661(2):1064–1072, June 2007.

- [21] W. F. Brisken, J. P. Macquart, J. J. Gao, B. J. Rickett, W. A. Coles, A. T. Deller, S. J. Tingay, and C. J. West. 100 μas Resolution VLBI Imaging of Anisotropic Interstellar Scattering Toward Pulsar B0834+06. *ApJ*, 708(1):232–243, January 2010.
- [22] J. P. W. Verbiest, J. M. Weisberg, A. A. Chael, K. J. Lee, and D. R. Lorimer. On Pulsar Distance Measurements and Their Uncertainties. *ApJ*, 755(1):39, August 2012.
- [23] W. F. Brisken, J. M. Benson, W. M. Goss, and S. E. Thorsett. Very Long Baseline Array Measurement of Nine Pulsar Parallaxes. *ApJ*, 571:906–917, June 2002.
- [24] C. R. Gwinn, J. H. Taylor, J. M. Weisberg, and L. A. Rawley. Measurement of pulsar parallaxes by VLBI. *AJ*, 91:338–342, February 1986.
- [25] I. Sushch, B. Hnatyk, and A. Neronov. Modeling of the Vela complex including the Vela supernova remnant, the binary system γ^2 Velorum, and the Gum nebula. *A&A*, 525:A154, January 2011.
- [26] R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs. The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue. *AJ*, 129(4):1993–2006, April 2005.
- [27] V. I. Shishov, T. V. Smirnova, W. Sieber, V. M. Malofeev, V. A. Potapov, D. Stinebring, M. Kramer, A. Jessner, and R. Wielebinski. Measurements of the interstellar turbulent plasma spectrum of PSR B0329+54 using multi-frequency observations of interstellar scintillation. *A&A*, 404:557–567, June 2003.
- [28] D.H. Ballard. Generalizing the hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*, 13(2):111–122, 1981.
- [29] N. D. R. Bhat, S. M. Ord, S. E. Tremblay, S. J. McSweeney, and S. J. Tingay. Scintillation Arcs in Low-frequency Observations of the Timing-array Millisecond Pulsar PSR J0437-4715. *ApJ*, 818:86, February 2016.
- [30] 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. Interstellar Optics. *ApJ*, 505(2):928–940, October 1998.