

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

На правах рукописи

УДК 52.43

Андрианов Андрей Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
ЛОКАЛЬНОЙ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЛАЗМЫ  
НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКИМ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ "РАДИОАСТРОН"**

Специальность 01.03.02 —  
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва— 2017

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории плазменных процессов в астрофизике ПРАО АКЦ ФИАН  
**Смирнова Татьяна Васильевна**

Официальные оппоненты: **Байкова Аниса Талгатовна**,  
доктор физико-математических наук,  
Главная астрономическая обсерватория РАН,  
Санкт-Петербург, Пулковое,  
главный научный сотрудник

**Измоленов Владислав Валерьевич**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры аэромеханики и газовой  
динамики механико-математического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова. г. Москва

Ведущая организация: Институт космических исследований РАН, г.  
Москва

Защита состоится «10» ноября 2017 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д002.023.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, 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 <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан «01» сентября 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Ю.А. Ковалев

## Общая характеристика работы

**Актуальность** Исследование эффектов рассеяния излучения при распространении через неоднородности межзвездной плазмы является исключительно важным для астрофизики, поскольку эти эффекты оказывают существенное влияние на регистрируемое излучение, как галактических, так и внегалактических источников. Такие исследования позволяют изучить структуру неоднородностей межзвездной плазмы и выявить эффекты, искажающие исходные свойства излучающих объектов. Понимание процессов рассеяния, происходящих в межзвездной плазме, является важным в поиске гравитационных волн, который проводится по анализу шума хронометрирования в наблюдениях пульсаров.

В настоящее время построены модели распределения свободных электронов в Галактике, однако они отражают только средние статистические параметры этого распределения. При исследовании конкретных источников необходимо знание распределения межзвездной плазмы и ее характеристик в данном направлении, которое может существенно отличаться от средне-статистического. Таких исследований, в настоящее время, проведено крайне мало.

Наиболее эффективно изучение распределения межзвездной плазмы можно проводить по наблюдениям мерцаний радиоизлучения пульсаров, так как они являются наиболее компактными источниками излучения. Большие преимущества в изучении эффектов рассеяния обеспечивает наземно-космический интерферометр Радиоастрон, так как он позволяет измерять непосредственно угловые размеры и структуру диска рассеяния пульсаров, что не доступно для наземной интерферометрии в большинстве случаев. Измерение углового размера диска рассеяния пульсаров является существенным для получения информации о пространственном распределении рассеивающей плазмы вдоль луча зрения.

Наблюдения быстрой переменности квазаров указывают на существование компоненты межзвездной среды, расположенной близко от наблюдателя: порядка 10 пк. Ее свойства существенно отличаются от более удаленной, диффузной компоненты. Природа этих мелкомасштабных структур и их роль в динамике Галактики является важной проблемой. Поэтому наблюдение близких пульсаров, для которых подобные структуры могут оказать существенное влияние на принимаемое излучение, является актуальной научной задачей.

**Целью** данной работы является исследование структуры межзвездной плазмы в окрестностях солнечной системы на основе анализа межзвездных мерцаний близких пульсаров методами наземно-космической РСДБ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать модули программного обеспечения (ПО), реализующие алгоритмы первичной обработки данных РСДБ наблюдений пульсаров для программного коррелятора Астрокосмического центра ФИАН.
2. Провести наблюдения, корреляционную обработку и анализ данных наземно-космического интерферометра Радиоастрон.
3. Исследовать структуру и свойства межзвездной плазмы в направлении на пульсары PSR B0950+08, PSR B1919+21 и PSR B0525+21.

**Научная новизна:**

1. Впервые были проведены наземно-космические РСДБ наблюдения пульсаров PSR B0950+08, PSR B1919+21, PSR B0525+21 с помощью наземно-космического интерферометра Радиоастрон, с наилучшим угловым разрешением когда-либо достигавшимся в метровом и дециметровом диапазонах длин волн. Максимальная проекция базы в наблюдениях пульсара PSR B0950+08 составила 220000 км, в наблюдениях пульсара PSR B1919+21 составила 60000 км, в наблюдениях пульсара PSR B0525+21: 233600 км.
2. Впервые было показано, что локальная межзвездная плазма оказывает существенное влияние на мерцания близких пульсаров и было определено расстояние до эффективных экранов, на которых происходит рассеяние их излучения. Расстояние до ближайшего экрана в направлении на пульсар PSR B1919+21 составляет всего  $0.14 \pm 0.05$  пк. Это в сотни раз дальше чем граница гелиопаузы, однако находится внутри облака Оорта, и, таким образом, находится в пределах Солнечной системы. Данные наблюдения являются первым обнаружением рассеяния излучения ионизованным газом в данной области.
3. Было показано, что в направлении пульсаров B0950+08 и B1919+21 существуют космические призмы, существенно влияющие на наблюдаемую картину мерцаний. Впервые был определен угол рефракции и расстояние до призмы в направлении пульсара PSR B1919+21.

### **Научная и практическая значимость.**

Результаты диссертации могут быть использованы для развития теоретических моделей турбулентной межзвездной плазмы и создания новых моделей распределения электронной плотности в нашей Галактике, что обуславливает астрофизическую значимость работы. Определение характеристик локальной межзвездной среды очень важно при исследовании компактных внегалактических источников и пульсаров, для понимания процессов рассеяния и преломления в межзвездной плазме. Практическая ценность работы заключается в разработанном программном обеспечении (ПО) для обработки и анализа данных наземно-космического интерферометра, которое будет использоваться в дальнейших исследованиях. Обнаруженные эффекты рассеяния и преломления могут препятствовать осуществлению передачи сигналов между галактическими объектами в дециметровом диапазоне длин волн, что необходимо учитывать в выборе диапазона для космической связи.

### **Методы исследования.**

Результаты работы были получены на основе наблюдений, выполненных при помощи наземно-космического интерферометра Радиоастрон. Для первичной корреляционной обработки данных использовался программный коррелятор Астрокосмического Центра ФИАН, который зарекомендовал себя как современный, эффективный и универсальный инструмент для обработки РСДБ данных.

При последующем анализе и интерпретации результатов наблюдений использовались статистические методы анализа данных, анализ корреляционных и структурных функций с использованием результатов теории распространения излучения через неоднородности межзвездной плазмы.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработаны и в течение более 5 лет успешно используются в текущей работе с интерферометром модули программного обеспечения для обработки наблюдений пульсаров, в настоящий момент являющиеся частью коррелятора АКЦ - основного коррелятора проекта Радиоастрон.
2. В результате наблюдений на частоте 324 МГц на наземно-космическом интерферометре Радиоастрон впервые показано, что локальная межзвездная плазма оказывает существенное влияние на мерцания близких пульсаров (PSR B0950+08 и PSR B1919+21). Определено расстояние до эффективных экранов, на которых происходит рассеяние излучения. В направлении пульсара PSR B0950+08 рассеяние происходит на двух выделенных слоях плазмы (экранах), расстояние до которых составляет 4.4 - 16.4 пк и 26 - 170 пк соответственно. В направлении пульсара PSR

B1919+21 рассеяние излучения происходит на экранах, расстояние до которых составляет  $0.14 \pm 0.05$  пк и 440 пк. В результате наблюдений на частоте 1668 МГц в направлении пульсара PSR B0525+21 показано, что рассеяние излучения происходит на слое плазмы, находящемся на близком к пульсару расстоянии  $0.1Z$ , где  $Z = 1.6$  кпк - расстояние от наблюдателя до пульсара.

3. Определены показатели спектра неоднородностей в направлении на пульсары PSR B0950+08, PSR B1919+21 и PSR B0525+21. Показано, что спектр флуктуаций электронной плотности в направлении на пульсар PSR B0950+08 является степенным с показателем степени  $3.00 \pm 0.08$ . Спектр флуктуаций плотности в направлении на пульсар PSR B1919+21 является степенным с показателем степени  $3.73 \pm 0.05$ , а в направлении на пульсар PSR B0525+21 показатель спектра равен  $3.74 \pm 0.06$ .
4. Показано, что в направлении пульсаров PSR B0950+08 и PSR B1919+21 существуют космические призмы, существенно влияющие на наблюдаемую картину мерцаний. Впервые определены углы рефракции этих космических призм. В направлении на пульсар PSR B0950+08 угол преломления призмы составляет  $1.1 - 1.4$  миллисекунд дуги, при этом направление рефракции практически перпендикулярно вектору скорости наблюдателя. В направлении на пульсар PSR B1919+21 угол преломления призмы равен  $110 \pm 30$  миллисекунд дуги, а расстояние до призмы составляет менее 2 пк.
5. Измерены углы рассеяния в направлении пульсаров PSR B0525+21 и PSR B1919+21. Угол рассеяния в направлении пульсара PSR B0525+21 составил  $\theta_{scat} = 0.028 \pm 0.002$  миллисекунд дуги на частоте 1668 МГц. Угол рассеяния в направлении пульсара PSR B1919+21 составляет  $\theta_{scat} = 0.7 \pm 0.2$  миллисекунд дуги на частоте 327 МГц.

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые.

**Высокая достоверность** полученных результатов обеспечивается надежностью методик, реализованных в программном обеспечении, которое использовалось при обработке данных, а также техническим состоянием инструментов, на которых проводились наблюдения. Достоверность представленных результатов подтверждается апробацией на российских и зарубежных международных конференциях, где присутствовали специалисты в данной области, а также публикациями в рецензируемых журналах.

**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. 10th EVN Symposium and Users Meeting, г. Манчестер, Великобритания, 2010
2. 11th EVN Symposium and Users Meeting, г. Бордо, Франция, 2012
3. Всероссийская радиоастрономическая конференция "Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии"(ВРК 2011), Санкт-Петербург, 2011
4. Всероссийская астрономическая конференция "Многоликая вселенная"(ВАК 2013), Санкт-Петербург, 2013
5. XII Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования г. Москва, 2015.
6. 40th COSPAR Scientific Assembly, г. Москва, 2014
7. 12th EVN Symposium and Users Meeting, г. Кальяри, Италия, 2014.
8. The 3rd International VLBI Workshop, г. Гронинген, Нидерланды, 2014
9. Physics of Neutron Stars, г. Санкт-Петербург, 2014
10. 13th EVN Symposium and Users Meeting, г. Санкт-Петербург, 2016.
11. XXVI International Conference of Astronomical Data Analysis Software & Systems
12. Physics of Neutron Stars, г. Санкт-Петербург, 2017
13. Ежегодные научные отчетные сессии Астрокосмического Центра ФИАН (2011, 2014, 2015).

**Публикации.** Все результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах и тезисах российских и зарубежных международных конференций. Всего опубликовано 8 научных работ [А1-А5,Б1-Б3], включая тезисы докладов научных конференций [Б1-Б3]. Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, суммированы в 5 статьях [А1-А5], которые изданы в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК (Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки РФ).

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

**A1** Smirnova T. V., Shishov V. I., Popov M. V., Gwinn C. R., Anderson J. M., Andrianov A. S., Bartel N., Deller A., Johnson M. D., Joshi B. C., Kardashev N. S., Karuppusamy R., Kovalev Y. Y., Kramer M., Soglasnov V. A., Zensus J. A., Zhuravlev V. I. RADIOASTRON STUDIES OF THE NEARBY, TURBULENT INTERSTELLAR PLASMA WITH THE LONGEST SPACE-GROUND INTERFEROMETER BASELINE // *Astrophysical Journal* - 2014 - V. 786, P. 115

**A2** Андрианов А.С., Гурин И.А., Жаров В.Е., Костенко В.И., Лихачев С.Ф., Шацкая М.В. Корреляционная обработка данных наземно-космического интерферометра "РАДИОАСТРОН" // *Вестник "НПО имени С.А. Лавочкина"*. - 2014. - Т. 24, № 3. - С. 55.

**A3** Кардашев Н. С., Алакоз А. В., Андрианов А. С., Артюхов М. И., Баан В., Бабышкин В. Е., Бартель Н., Баяндина О. С., Вальтц И. Е., Войцук П. А., Воробьев А. З., Гвинн К., Гомез Х. Л., Джиованнини Г., Джонси Д., Джонсон М., Имаи Х., Ковалев Ю. Ю., Куртц С. Е., Лисаков М. М., Лобанов А. П., Молодцов В. А., Новиков Б. С., Погодин А. В., Попов М. В., Привезенцев А. С., Рудницкий А. Г., Рудницкий Г. М., Саволайнен Т., Смирнова Т. В., Соболев А. М., Согласнов В. А., Соколовский К. В., Филиппова Е. Н., Чурикова М. Е., Ширшаков А. Е., Шишов В. И., Эдвардс Ф. "РАДИОАСТРОН": Итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полета // *Вестник "НПО имени С.А. Лавочкина"*. - 2016. - Т. 33, № 3. - С. 4 - 24.

**A4** Shishov, V. I., Smirnova, T. V., Gwinn, C. R., Andrianov, A. S., Popov, M. V., Rudnitskiy, A. G., Soglasnov, V. A. Interstellar scintillations of PSR B1919+21: space-ground interferometry // 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* - 2017 - v. 468 p. 3709-3717

**A5** Андрианов А. С., Смирнова Т. В., Шишов В. И., Гвинн К., Попов М. В. Распределение межзвездной плазмы в направлении пульсара PSR B0525+21: наземно-космическая интерферометрия // *Астрономический журнал*. - 2017. - Т. 94, № 6. - С. 516-523

Тезисы докладов научных конференций:

**B1** Andrianov A., Kostenko V., Guirin I, Chibisov A., Likhachev S. Data Compatibility for Radioastron Mission // Труды конференции 10th European VLBI Network Symposium, Proceedings of Science - 2010

**B2** Andrianov A. Radioastron pulsar early science program: Current status and results // Труды конференции 11th European VLBI Network Symposium, Proceedings of Science - 2012

**БЗ** *Andrianov A., Smirnova T.V., Shishov V.I., Popov M.V., Kardashev N.S., Soglasnov V.I.* Study of scattering material with RadioAstron-VLBI observations // Труды конференции 12th European VLBI Network Symposium, Proceedings of Science - 2014

### **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. Автором самостоятельно были составлены заявки на выделение наблюдательного времени в проекте Радиоастрон, а также на крупнейших наземных телескопах (Аресибо, Грин Бэнк, Вестерборк). Эти заявки были одобрены международным программным комитетом на конкурсной основе.
2. В рамках выполнения диссертационной работы, автор самостоятельно разработал модуль программного коррелятора АКЦ, осуществляющий выбор окна излучения пульсара (гейтинг) и дедисперсию данных. Процедура корреляционной обработки наблюдений пульсаров опубликована в работах [A2].
3. Автором разработан модуль коррелятора АКЦ, обеспечивающий чтение различных форматов входных данных. Автором выполнено тестирование коррелятора АКЦ и модели задержки ORBITA2012, произведено сравнение результатов коррелятора АКЦ и коррелятора DiFX. Описание коррелятора АКЦ и процедура корреляционной обработки данных в проекте Радиоастрон опубликованы в работах [B1, A2].
4. Автором разработаны программы для построения среднего профиля пульсара на основе прокоррелированных РСДБ данных, программы для компенсации помех и коррекции формы полосы приемника. Процедура обработки опубликована в работах [A1, A4, A5].
5. Автором лично была выполнена вся корреляционная обработка данных наземно-космических РСДБ наблюдений всех рассматриваемых в работе пульсаров, а также часть посткорреляционной обработки, в том числе компенсация помех и коррекция формы полосы приемника. Автор принимал равное участие с соавторами в дальнейшей посткорреляционной

обработке данных наземно-космических РСДБ наблюдений. Процедура обработки и ее результаты были опубликованы в работах [А1 - А5].

6. Диссертант принимал активное участие в получении результатов, их обсуждении, интерпретации и подготовке текста публикаций [А2 - А5].
7. Все результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на российских и зарубежных международных конференциях автором лично. Презентации докладов и тезисы [Б1 - Б3] были подготовлены автором самостоятельно, с учетом замечаний научного руководителя и соавторов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 134 страницы с 37 рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит 86 наименования на 7 страницах.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** диссертации приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, рассмотрены основные результаты исследований межзвездных мерцаний радиоисточников и технические характеристики интерферометра Радиоастрон, на котором проводились наблюдения. Рассмотрены принципы работы интерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ).

Флуктуации электронной плотности межзвездной плазмы рассеивают радиоизлучение как галактических, так и внегалактических источников. В результате наблюдается сильная переменность интенсивности их радиоизлучения. Знание характеристик и природы межзвездной плазмы необходимо, как для исследования самих источников излучения, так и для понимания процессов распространения сигнала в неоднородной плазме.

Пульсары являются идеальными зондами для исследования межзвездной среды. Малый угловой размер и импульсный характер излучения делает их подходящими объектами для наблюдения эффектов рассеяния, приводящих к наблюдаемой сильной переменности интенсивности излучения, как во временной, так и частотной области - мерцаниям. С увеличением длины вол-

ны эффекты рассеяния на неоднородностях межзвездной плазмы существенно возрастают, поэтому исследование ее характеристик наиболее эффективно проводить на низких частотах.

Аналитическая теория сильных мерцаний была разработана В.И.Шишовым [1–3]. Им было показано, что в режиме сильных мерцаний могут иметь место два режима мерцаний: дифракционный и рефракционный. Также наблюдения показали, что в целом, спектр неоднородностей в направлении на пульсары близок к Колмогоровскому, однако в направлении на некоторые пульсары, особенно близкие, степенной спектр неоднородностей отличается от Колмогоровского. При этом распределение рассеивающей плазмы на луче зрения требует дополнительного исследования.

Наблюдения на одиночном телескопе позволяют определить многие характеристики рассеивающей среды, однако для более детального изучения субструктуры рассеяния и определения геометрического местоположения рассеивающих структур необходимо высокое угловое разрешение, которое может обеспечить метод интерферометрии со сверхдлинной базой.

Работающий в настоящее время наземно-космический интерферометр Радиоастрон [4] предназначен для РСДБ исследования галактических и внегалактических радиоисточников. Космическое плечо интерферометра представлено 10-метровым радиотелескопом Спектр-Р, находящимся на эллиптической орбите вокруг Земли.

Космический радиотелескоп находится на сильно эволюционирующей орбите, параметры которой были выбраны таким образом, чтобы максимизировать ее эволюцию за счет гравитационного воздействия Луны и Солнца. Высота перигея орбиты изменяется с 400 до 65000 км, а высота апогея с 265000 до 360000 км. Эксцентриситет орбиты находится в диапазоне от 0.59 до 0.96. Начальное наклонение орбиты составляло 51 градус. Период обращения радиотелескопа на орбите составляет около 9 суток.

Основной частью космического радиотелескопа является 10-м раскладываемое параболическое зеркало. Космический радиотелескоп оснащен приемниками четырех частотных диапазонов: 0.327 ГГц (P-band), 1.665 ГГц (L-band), 4.830 (C-band), 18.392 - 25.112 ГГц (K-band) Приемники каждого частотного диапазона имеют независимые каналы для приема левой (LCP) и правой (RCP) круговой поляризации. Данные регистрируются в двух полосах шириной 16 МГц, применяется однобитное сэмплирование. Оцифрованный поток данных передается с КРТ на наземные станции слежения в Пуццино и Green Bank в виде серии кадров, каждый длиной в 20000 байт, из которых 30 байт приходится на информацию по телеметрии и 19970 байт на научные данные.

Типичные времена сеансов в проекте Радиоастрон лежат в диапазоне от 40 минут до суток. Данные записываются независимыми интервалами времени - сканами. Типичная длительность скана составляет от 5 до 20 минут. Наземно-космический интерферометр Радиоастрон, дает уникальную возможность исследования субструктуры рассеяния с наилучшим угловым разрешением, доступным в метровом и дециметровом диапазоне длин волн.

**Вторая глава** посвящена описанию методики обработки данных, полученных с наземно-космического интерферометра и разработке программного обеспечения, необходимого для реализации этой методики. В этой главе рассмотрена специфика обработки пульсарных данных с помощью коррелятора АКЦ ФИАН: реализация гейтинга и дедисперсии, получение среднего профиля пульсара, исправление данных за полосу приемника, удаление помех.

Корреляционная обработка данных является первой и при этом наиболее ресурсоемкой операцией при обработке РСДБ данных. Для корреляции данных проекта Радиоастрон был разработан программный коррелятор, коррелятор АКЦ, при помощи которого в настоящее время обрабатывается около 95% данных проекта (все наблюдения пульсаров обрабатываются на корреляторе АКЦ). Коррелятор АКЦ использует высокоточную модель задержки ORBITA 2012, разработанную для целей наземно-космической РСДБ. Было проведено сравнение коррелятора АКЦ с программным коррелятором DiFX и показано, что результаты работы обоих корреляторов хорошо согласуются друг с другом. Был разработан и внедрен алгоритм корреляции наземно-космических данных, учитывающий неточности определения орбиты КРТ. Также в коррелятор АКЦ были внедрены специфические режимы, необходимые для корреляции пульсарных данных - гейтинг и дедисперсия. При этом для вычисления времени прихода импульса и фазы импульса, соответствующей определенному моменту времени, коррелятор АКЦ использует полиномы фазы импульса, вычисленные с помощью программного пакета TEMPO2 [5,6]. Для программного пакета посткорреляционного анализа Astro Space Locator (ASL) были разработаны и внедрены утилиты, позволяющие получать средний профиль пульсара, проводить калибровку формы полосы приемника и удаление узкополосных помех.

В **третьей главе** представлены результаты наблюдений и анализа данных для пульсаров PSR B0950+08, PSR B1919+21 и PSR B0525+21 на наземно-космическом интерферометре Радиоастрон. Параметры этих пульсаров указаны в Табл 1.

Корреляционная обработка данных проводилась на корреляторе АКЦ с применением выбора окна излучения пульсара (гейтинга) и некогерентной

Таблица 1: Параметры пульсаров PSR B0950+08, PSR B1919+21, PSR B0525+21. P - период, DM - мера дисперсии, Z расстояние до пульсара, l, b - галактические координаты. Пояснительный материал. Таблица подготовлена диссертантом на основе опубликованных данных [7, 8].

	P	DM	Z	l	b
PSR B0950+08	0.25 сек	2.97	0.26 кпк	228.91	43.7
PSR B1919+21	1.34 сек	12.44	1.0 кпк	55.78	3.5
PSR B0525+21	3.75 сек	50.9	1.6 кпк	183.86	-6.9

дедисперсии. Число частотных каналов при корреляционной обработке выбиралось таким образом, чтобы разрешение по частоте было существенно меньше ожидаемой полосы декорреляции на данной частоте. Время суммирования в корреляторе выбиралось кратным периоду пульсара, а ширина окон интегрирования сигнала и шума определялась шириной среднего профиля по уровню 10 % от максимума профиля. Принятые параметры обработки отображены в Табл 2. В результате работы коррелятора были получены комплексные кросс-спектры для каждой пары телескопов, а также авто-спектры для каждой антенны.

Таблица 2: Параметры корреляционной обработки пульсаров PSR B0950+08, PSR B1919+21, PSR B0525+21. Таблица подготовлена диссертантом на основе данных из работ [A1, A2, A4, A5, B3].

	частота наблюдения	число каналов	время интегрирования	время суммирования (в периодах пульсара)	проекция базы
PSR B0950+08	324 - 340 МГц	128	15 мс	1.0 сек (4 периода)	220000 км
PSR B1919+21	324 - 340 МГц	512	40 мс	5.36 сек (4 периода)	60000 км
PSR B0525+21	1652 - 1684 МГц	1024	37.45 мс	3.75 сек (1 период)	233600 км

Дальнейший анализ основывался на анализе зависящих от частоты  $f$  и времени  $t$  кросс-спектров  $I(f,t)$  (динамических спектров пульсара), а также получаемых из динамического спектра ковариационных функций, зависящих от частотного  $\Delta f$  и временного  $\Delta t$  сдвига между спектрами, задаваемых

общеизвестными выражениями:

$$CCF(\Delta f) = \langle I(f,t)I^*(f,t + \Delta f) \rangle_{f,t} \quad (1)$$

$$CCF(\Delta t) = \langle I(f,t)I^*(f,t + \Delta t) \rangle_{f,t} \quad (2)$$

В работе выполнялся анализ получаемых из динамического спектра пульсара структурных функций, зависящих от частоты, времени и пространственного смещения луча зрения в плоскости наблюдателя, задаваемых общеизвестными выражениями:

$$D_{\Delta I}(\Delta f) = \langle (\Delta I(f + \Delta f) - \Delta I(f))^2 \rangle_s \quad (3)$$

$$D_{\Delta I}(\Delta t) = \langle (\Delta I(t + \Delta t) - \Delta I(t))^2 \rangle_s \quad (4)$$

$$D_{\Delta I}(\Delta \vec{\rho}) = \langle (\Delta I(\vec{\rho} + \Delta \vec{\rho}) - \Delta I(\vec{\rho}))^2 \rangle_s \quad (5)$$

Здесь  $\Delta I$  флуктуации интенсивности динамического спектра,  $\vec{\rho}$  пространственная координата,  $\Delta \vec{\rho}$  пространственный сдвиг,  $f$  и  $\Delta f$  частота и частотный сдвиг,  $t$  и  $\Delta t$  время и временной сдвиг.  $\langle \rangle_s$  соответствует усреднению по различным реализациям.

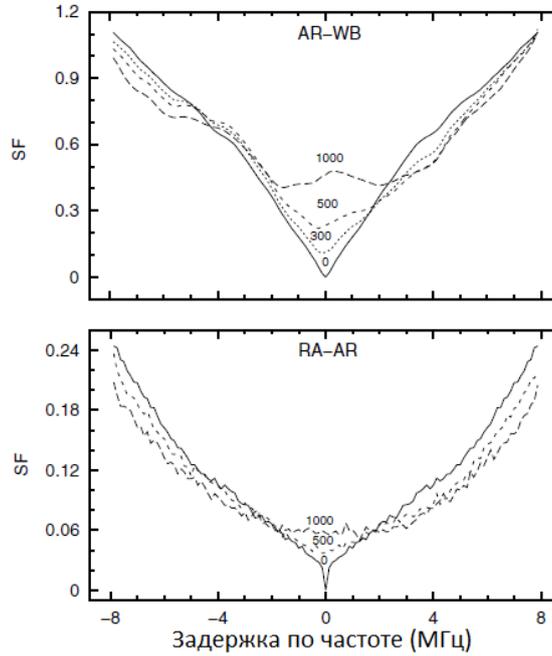


Рис. 1: Средние структурные функции для различных временных сдвигов  $\Delta t$  для базы Аресибо-Вестерборк (верхний график) и Радиоастрон-Аресибо(нижний график). Числа на графиках соответствуют  $\Delta t$  в секундах. Узкая деталь при  $\Delta f = 0, \Delta t = 0$  обусловлена шумом. Совместный результат диссертанта и соавторов из работы [A1].

Пульсар PSR B0950+08 показывает высокий уровень собственной переменности излучения, которая является широкополосной, а также вариации интенсивности, связанные с мерцаниями на неоднородностях межзвездной

плазмы. Определенный в работе индекс мерцаний,  $m \approx 0.35$ , указывает на то, что в направлении данного пульсара реализуется режим слабых мерцаний. Анализ временной ковариационной функции позволил определить характерное время мерцаний, которое составило  $t_{dif} \approx 600$  с.

Качественная разница формы структурных функций на длинной космической (Радиоастрон-Аресибо) и короткой наземной (Аресибо-Вестерборк) базах, показанная на Рис 1, указывает на наличие двух характерных масштабов, соответствующих двум рассеивающим слоям плазмы в направлении луча зрения на пульсар PSR B0950+08. Для космического интерферометра узкополосная частотная структура отсутствует, остается только широкополосная. Для интерпретации экспериментальных данных применялась модель, в которой описаны два рассеивающих экрана и призма, находящиеся на луче зрения. Анализ структурных функций совместно с полученными данными об индексе мерцаний и характерных частотном и временном масштабах мерцаний позволил определить расстояния до рассеивающих экранов, которые составили 4.4 – 16.4 пк и 26 – 170 пк. Ближний слой плазмы оказывает основное влияние на временную структуру мерцаний, в то время как на частотную структуру мерцаний оказывают существенное влияние оба слоя. Проекция скорости линии наблюдатель-пульсар для двух слоев плазмы, дальнего и ближнего, на направление преломления космической призмы составляют соответственно 20 км/сек и -8 км/сек. С учетом поправок на скорости Земли и пульсара, данные значения скоростей находятся в хорошем соответствии с типичными значениями скоростей межзвездных облаков.

Расстояние до дальнего экрана свидетельствует о том, что он может находиться на внешней границе локального пузыря, которая в направлении на пульсар B0950+08 находится примерно на этом же расстоянии. [9, 10]. Расстояние до ближнего экрана указывает на то, что он может находиться на ионизованной поверхности ближайшего молекулярного облака. Подобный близкий экран наблюдался в направлении пульсара ранее [11].

Из анализа функции когерентности на наземной и наземно-космической базах был получен показатель спектра флуктуаций плотности для обоих рассеивающих слоев. Было показано, что спектр флуктуаций плотности является степенным с показателем степени  $n = 3.00 \pm 0.08$ . Данное значение отличается от значения для Колмогоровского спектра  $n = 11/3$ . Необходимо отметить, что Колмогоровский спектр довольно хорошо описывает более удаленную рассеивающую среду. Однако, результаты наблюдений говорят о том, что близкая среда, возможно, имеет более плоский спектр.

Из анализа асимметрии структурной функции, были получены доказательства существования преломляющего клина плазмы, или "космической

призмы". Рефракция приводит к угловому смещению источника и в комбинации с рассеивающим излучением экраном к смещению дифракционной картины мерцаний. Кроме того рефракция сказывается на характерном частотном масштабе мерцаний, приводя к более узкой полосе частот  $\Delta\nu/\nu_0 < 1$ . Обычно  $m < 1$  является характеристикой слабых мерцаний, для которых  $\Delta\nu/\nu_0 > 1$ , в то время как  $\Delta\nu/\nu_0 < 1$  характеризует сильные мерцания. Однако, если характерная величина угла преломления космической призмы  $\theta_0$  больше характерной величины угла рассеяния,  $\theta_0 \gg \Theta_{scat}$ , то частотная структура мерцаний формируется частотной зависимостью смещения луча из-за рефракции. Также для пульсара B0950+08 был оценен угол преломления призмы  $\theta_0 = (1.1 - 1.4)$  миллисекунд дуги и определено направление преломления, которое оказалось практически перпендикулярным скорости наблюдателя.

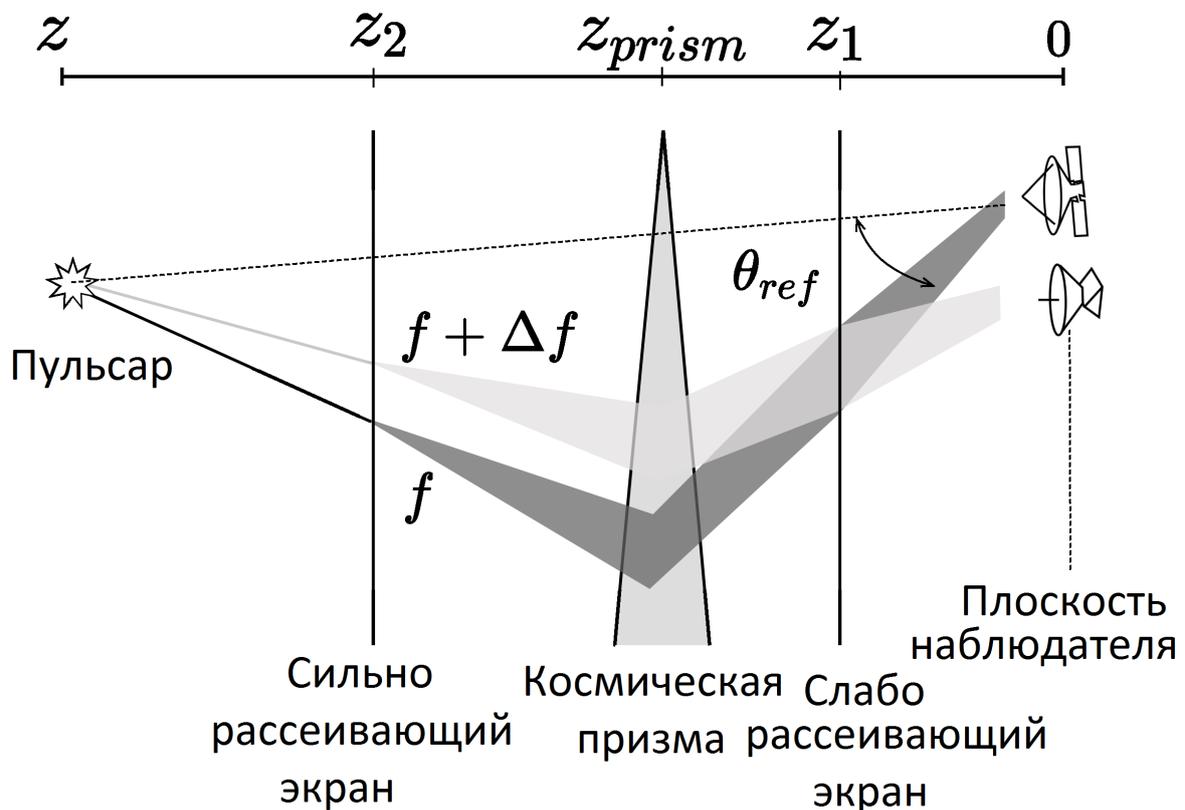


Рис. 2: Схематическое изображение геометрической модели распространения излучения.

Излучение на более низкой частоте  $f$  (темная линия) рассеивается на сильно-рассеивающем экране 1 в некий диапазон углов (темный конус на рисунке), затем преломляется космической призмой и еще раз рассеивается на слабо-рассеивающем экране 2 перед тем, как достигнуть наблюдателя. Более светлая линия и конус соответствуют более высокой частоте  $f + \Delta f$ . Совместный результат диссертанта и соавторов из работы [A4].

Пространственная структура межзвездной плазмы в направлении на пульсар PSR1919+21 также, как и для пульсара PSR B0950+08 хорошо согласуется с двумя рассеивающими экранами, однако в направлении пульсара PSR1919+21 реализуется режим сильных мерцаний, с индексом модуляции  $m$  близким к 1. В динамическом спектре пульсара PSR B1919+21 существуют два частотных масштаба, соответствующие двум разнесенным в пространстве слоям турбулентной плазмы, и дрейф дифракционной картины мерцаний, обусловленный рефракцией. При этом, в отличие от пульсара PSR B0950+08, наибольший вклад в мерцания пульсара PSR B1919+21 дают дифракционные мерцания на дальнем от наблюдателя экране. В режиме сильных мерцаний ковариационную функцию, зависящую от частоты и от базы интерферометра можно представить в виде суммы двух функций - пространственной ковариационной функции и частотной ковариационной функции, не зависящей от базы [12]:

$$\begin{aligned} J_1(\vec{b}, \Delta f) &= |\langle I(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{\Delta}\rho, f, t) I^*(\vec{\rho}, \vec{\rho} + \vec{\Delta}\rho, f + \Delta f, t) \rangle| \\ &= |B_u(\Delta f)|^2 + |B_u(\vec{\Delta}\rho)|^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Из отношения значений ковариационной функции при нулевом частотном сдвиге и частотном сдвиге, превышающим частотный масштаб дифракционных мерцаний можно определить значение пространственной ковариационной функции при нулевом частотном сдвиге и затем определить пространственный масштаб дифракционных мерцаний и расстояния до рассеивающих экранов.

Выполненные наблюдения показали наличие двух рассеивающих слоев плазмы в направлении на пульсар PSR1919+21: один из экранов расположен на расстоянии около 440 пк от наблюдателя и определяет дифракционные мерцания пульсара; другой экран расположен значительно ближе к наблюдателю, на расстоянии около  $0.14 \pm 0.05$  пк и он ответственен за слабые мерцания пульсара. Размер зоны Френеля, соответствующий этим мерцаниям, составляет около  $2.5 \times 10^9$  см. Также, за ближним экраном расположена космическая призма, которая приводит к дрейфу дифракционной картины в динамическом спектре с градиентом  $df/dt = 1.5$  МГц/1000 сек. Был определен угол преломления призмы, который составил  $\theta_{ref,0} = 110 \pm 30$  миллисекунд дуги, и получен верхний предел на расстояние до призмы  $z_{prism} \leq 2$  рс. Анализ пространственной корреляционной функции на наземно-космической базе (Радиоастрон-Грин Бэнк) позволил определить угол рассеяния в плоскости наблюдателя:  $\theta_{scat} = 0.7 \pm 0.2$  миллисекунд дуги. Также при помощи анализа частотной и временной структурной функции был определен показатель

спектра неоднородности плотности межзвездной плазмы  $n = 3.73 \pm 0.05$ . Схематически модель среды в направлении пульсара PSR B1919+21 изображена на Рис 2.

В направлении пульсара PSR B0525+21 также реализуется режим дифракционных сильных мерцаний. Поэтому при анализе данных использовался тот же подход, что и при анализе данных пульсара PSR B1919+21. По ковариационным функциям на наземной и наземно-космической базе определены характерные частотный и временной масштабы мерцаний, а из отношения ковариационных функций на наземно-космической базе при большом и нулевом частотном сдвигах определен характерный пространственный масштаб мерцаний. Из анализа соотношения пространственного масштаба мерцаний и масштаба, определяемого произведением временного масштаба мерцаний на скорость движения пульсара было показано, что распределение межзвездной плазмы на луче зрения в направлении на пульсар является неоднородным и из модели тонкого экрана было определено расстояние до рассеивающего экрана. Показано, что спектр неоднородностей межзвездной плазмы является степенным с показателем спектра  $n = 3.74 \pm 0.06$ . Был измерен угол рассеяния в направлении PSR B0525+21:  $\theta_{scat} = 0.028 \pm 0.002$  миллисекунд дуги и показано, что рассеяние происходит на слое плазмы, находящемся на расстоянии близком к пульсару:  $0.1Z$ , где  $Z = 1.6$  кпк - расстояние от наблюдателя до пульсара.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, которые выносятся на защиту диссертации.

## Список литературы

1. Шишов В.И. К теории распространения волн в случайно-неоднородных средах. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. — 1968. — Vol. 11. — Pp. 866–875.
2. Шишов В.И. Сильные флуктуации плоской волны, распространяющейся в случайно преломляющей среде. // *ЖЭТФ*. — 1971. — Vol. 61. — Pp. 1399–1409.
3. Гочелашвили К.С., Шишов В.И. Насыщенные флуктуации лазерного излучения в турбулентной среде. // *ЖЭТФ*. — 1974. — Vol. 66. — Pp. 1237–1247.
4. Kardashev N.S., Khartov V.V., Abramov V.V. et al. RadioAstron - A telescope with a size of 300 000 km: Main parameters and first observational results // *ARep*. — 2013. — Vol. 57. — P. 153.
5. Hobbs G., Edwards R., Manchester R. TEMPO2, a new pulsar timing package. I: Overview. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* — 2006. — Vol. 369. — Pp. 655–672.
6. Edwards R. T., Hobbs G. B., Manchester R. N. Tempo2, a new pulsar timing package. The timing model and precision estimates. // *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* — 2006. — Vol. 372. — Pp. 1549–1574.
7. Brisken W.E., Benson J.M., Goss W.M. and Thorsett S.E. Pulsar Rotation Measures and the Large-Scale Structure of the Galactic Magnetic Field // *Astrophysical Journal Letters*. — 2002. — Vol. 573. — P. L111.
8. Cordes J.M., Lazio T.J.W. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations // *Astro-ph 0207156*. — 2002.
9. Snowden S. L., Cox D. P., McCammon D., Sanders W. T. A model for the distribution of material generating the soft X-ray background // *Astrophysical Journal*. — 1990. — Vol. 354. — Pp. 211–219.
10. Lallement R., Welsh B. Y., Vergely J. L. et al. 3D mapping of the dense interstellar gas around the Local Bubble // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — Vol. 411. — Pp. 447–464.
11. Linsky J.L., Rickett B.J., Readfield S. The Origin of Radio Scintillation in the Local Interstellar Medium // *Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 675. — Pp. 413–419.

12. *Prokhorov A.M., Bunkin F.V., Gochelashvili K.S., Shishov V.I.* Laser irradiance propagation in turbulent media // *Proc. IEEE.* — 1975. — Vol. 63. — P. 790.