

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук «ФИАН»



На правах рукописи

Торопов Максим Олегович

**Исследование некоторых сильных пульсаров по наблюдениям на
радиотелескопе БСА ФИАН**

Специальность: 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Тюльбашев Сергей Анатольевич

Москва – 2026

Содержание

Введение	4
<i>Актуальность темы</i>	15
<i>Цель работы</i>	16
<i>Научная новизна</i>	16
<i>Структура и объем диссертации</i>	17
<i>Основные результаты, выносимые на защиту</i>	17
<i>Личный вклад диссертанта</i>	18
<i>Список публикаций диссертанта</i>	18
<i>Апробация работы</i>	19
Глава I. Обработка данных на БСАЗ	21
§ I.1. Радиотелескоп БСА ФИАН.....	21
§ I.2. Приёмная аппаратура	25
§ I.3. Методика наблюдений и обработки данных	27
§ I.4. Первичная обработка данных	35
§ I.5. Помеховая обстановка	38
§ I.6. Выводы по главе I.....	43
Глава II. Интеримпульсное излучение в полной выборке пульсаров	44
§ II.1. Эволюция угла наклона пульсара	44
§ II.2. Наблюдения пульсаров с интеримпульсами	48
§ II.3. Анализ наблюдений пульсаров с интеримпульсами	49
§ II.4. Выводы по главе II	54
Глава III. Межзвездная среда в направлении двух сильных пульсаров (J0826+2637, J0953+0755)	59
§ III.1. Краткий обзор пульсаров (J0826+2637, J0953+0755).....	59
§ III.2. Межзвездные мерцания	60
§ III.3. Межзвёздные магнитные поля	67
§ III.4. Пульсар J0826+2637.....	69
§ III.4.1 Анализ и результаты	70
§ III.4.2 Вариации амплитуд и межзвездные мерцания	74
§ III.4.3 Результаты наблюдений	77
§ III.5. Пульсар J0953+0755	79
§ III.5.1 Анализ и результаты	80
§ III.5.2 Результаты наблюдений	87

§ III.6 Выводы по главе III.....	89
Глава IV. Поиск слабых компонент в излучении пульсаров (J1543+0929, J2234+2114).....	91
§ IV.1. Формы средних профилей пульсаров	91
§ IV.2. Наблюдения пульсаров (J1543+0929, J2234+2114).....	92
§ IV.3. Результаты наблюдений и анализ	93
IV.3.1. Пульсар J1543+0929.....	95
IV.3.2. Пульсар J2234+2114.....	97
§ IV.4. Выводы по главе IV	98
Заключение.....	100
Список литературы	103
Список использованных сокращений.....	114
Список таблиц	115
Список иллюстраций.....	116
Приложение 1. Опорные радиоисточники	119
Приложение 2. Блок-схема программы обработки.....	123

Введение

Радиопульсары представляют собой намагниченные нейтронные звезды, которые испускают периодические короткие импульсы радиоизлучения с периодами от 1,4 мс до 75,5 с [1], при этом периоды большинства пульсаров лежат в диапазоне от 0,5 до 1 с. Периоды импульсов довольно стабильны, потому что равны периодам вращения массивных нейтронных звезд. Необычные свойства пульсаров привлекают пристальное внимание многих астрономов и физиков, как наблюдателей, так и теоретиков. С астрофизической точки зрения нейтронные звезды интересны как заключительный этап звездной эволюции. Являясь источниками импульсного периодического поляризованного излучения, пульсары представляют собой идеальные зонды для исследования межзвездной среды, поскольку распространены по всей Галактике. С точки зрения физики нейтронные звезды предоставляют уникальную возможность для изучения вещества в экстремальных состояниях. Для них характерны такие явления и свойства, как сверхтекучесть, сверхпроводимость, сверхсильные магнитные поля, излучение нейтрино, эффекты специальной и общей теории относительности. В недрах нейтронных звезд могут существовать экзотические формы материи (конденсаты различных элементарных частиц, кварковое вещество). На середину 2025 г. обнаружено уже более 3800 радиопульсаров [1].

После обнаружения в 1967 г. пульсаров [2] как нового класса астрономических объектов были открыты:

- 1971 г. – рентгеновские пульсары (XRP – X-ray pulsars) [3],
- 1975 г. – источники рентгеновских всплесков (XB – X-ray burst) [4],
- 1979 г. – источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR – soft gamma repeaters) [5],
- 1981 г. – аномальные рентгеновские пульсары (AXP – anomalous X-ray pulsars) [6],
- 1982 г. – миллисекундные пульсары (MSP – millisecond pulsar) [7],
- 1996 г. – слабые в рентгене одиночные нейтронные звезды (XDINS – X-ray dim isolated neutron stars) [8],
- 2003 г. – двойные пульсары (DPS – double pulsar system) [9],
- 2006 г. – вращающиеся радиотранзиенты (RRAT – rotating radio transient) [10],
- 2007 г. – быстрые радиовсплески (FRB – fast radio burst) [11].

Радиоизлучение нейтронных звезд по светимости варьируется на 10 порядков – последовательно возрастая от пульсаров до магнетаров, вращающихся радиотранзиентов и быстрых радиовсплесков, последние объекты также полезны в качестве космологических инструментов [12, с. 156].

Основными наблюдательными характеристиками пульсаров являются: период вращения пульсара, производная периода, форма (профиль) импульса, его микроструктура, средний спектр и поляризация. По продолжительности периода пульсары делятся на две отдельные популяции – нормальные и миллисекундные, период вращения которых не превышает 10 мс. Теория происхождения миллисекундных пульсаров не разработана полностью, особенно молодых пульсаров с относительно высокими магнитными полями, например, J1939+2134. Наиболее распространенная теория их образования утверждает, что такой пульсар, от рождения в результате взрыва сверхновой через замедление вращения с периода в несколько десятков миллисекунд до несколько секунд, раскручивается благодаря аккреции вещества со звезды, образующей с ним тесную двойную систему, поэтому для таких миллисекундных пульсаров в англоязычной литературе используют термин «раскрученные пульсары» (recycled pulsars). В процессе «раскручивания» большинство таких пульсаров сохраняют своих компаньонов, но некоторые их потеряли, превращаясь в одиночные миллисекундные пульсары. Для нормальных (секундных) пульсаров характерное значение производной периода $\dot{P} \sim 10^{-15}$ с, для миллисекундных, значительно более низкое значение, – $\dot{P} \sim 10^{-19}$ с.

Радиоволны, при движении от пульсара до Земли, преодолевают межзвездную среду. За исключением незначительного количества космической пыли, всё остальное вещество межзвёздной среды представляет собой ионизованный газ – плазму (преимущественно водородно-гелиевую). Распространяясь в плазме, электромагнитные волны возбуждают колебания плазменных электронов, при этом имеющиеся в плазме протоны и ионы обладают сравнительно большой массой и инерцией, и не участвуют во взаимодействии с излучением. Взаимодействие со свободными электронами приводит к замедлению радиоволн – чем больше длина волны, тем сильнее замедление. Измерив задержку импульса, приходящего на низких частотах, относительно импульса, приходящего на высоких частотах (которая может достигать нескольких минут) и, зная плотность межзвездной среды, можно определить расстояние до пульсара. Как показывают наблюдения, в среднем, в межзвездной среде Галактики содержится около 0,03 электрона на 1 см^3 . Основанные на этой величине расстояния до пульсаров составляют десятки килопарсек.

Межзвездные магнитные поля Галактики, в среднем достигающие значения $\sim 1 \text{ мкГс} = 10^{-6} \text{ Гс}$ [12, с. 370] [13, с. 148], влияют на распространение радиоизлучения пульсаров. При прохождении радиоволны через плазму, помещённую в магнитное поле, меняется её линейная поляризация – эффект, называемый вращением Фарадея. Мера дисперсии и величина фарадеевского вращения являются характеристикой среды между пульсаром и наблюдателем.

На всём протяжении электромагнитного спектра, от радио до высокоэнергичного гамма-излучения, формируемые излучением пульсаров профили импульсов являются уникальными для

каждого пульсара. Для некоторых пульсаров, например, для пульсара в Крабовидной туманности, очень схожий профиль наблюдается во всём спектре [12]. Большинство пульсаров наблюдаются в радиодиапазоне, при этом форма индивидуальных импульсов переменна, и только усреднение, выполненное синхронно с периодом вращения пульсара, по сотням или тысячам таких импульсов формирует уникальный средний профиль пульсара, форма которого остается постоянной от одной последовательности импульсов к другой. Такие интегрированные профили (средние профили) являются ключами к пониманию геометрии и физических процессов внутри магнитосферы, окружающей нейтронную звезду, несут информацию о средней энергии излучения по фазе вращения и остаются стабильными на долгом промежутке времени (хотя есть ряд исключений, например, пульсары с переключением моды [14]), информацию о размерах и энергетике излучающих плазменных сгустков в магнитосфере пульсаров, а также о наклоне оси излучения к оси вращения нейтронной звезды.

Высокоэнергичное излучение и радиоизлучение происходят из разных регионов магнитосферы и генерируются различными механизмами, имеется, однако, есть частичное совпадение обеих категорий. Радиоимпульсы демонстрируют широкий диапазон феноменов, как в своих формах, так и в вариациях на различных временных масштабах, при этом радиоизлучение различных типов пульсаров характеризуется очень высокой степенью линейной и круговой поляризации, достигающей во многих случаях 100% [12, с. 135].

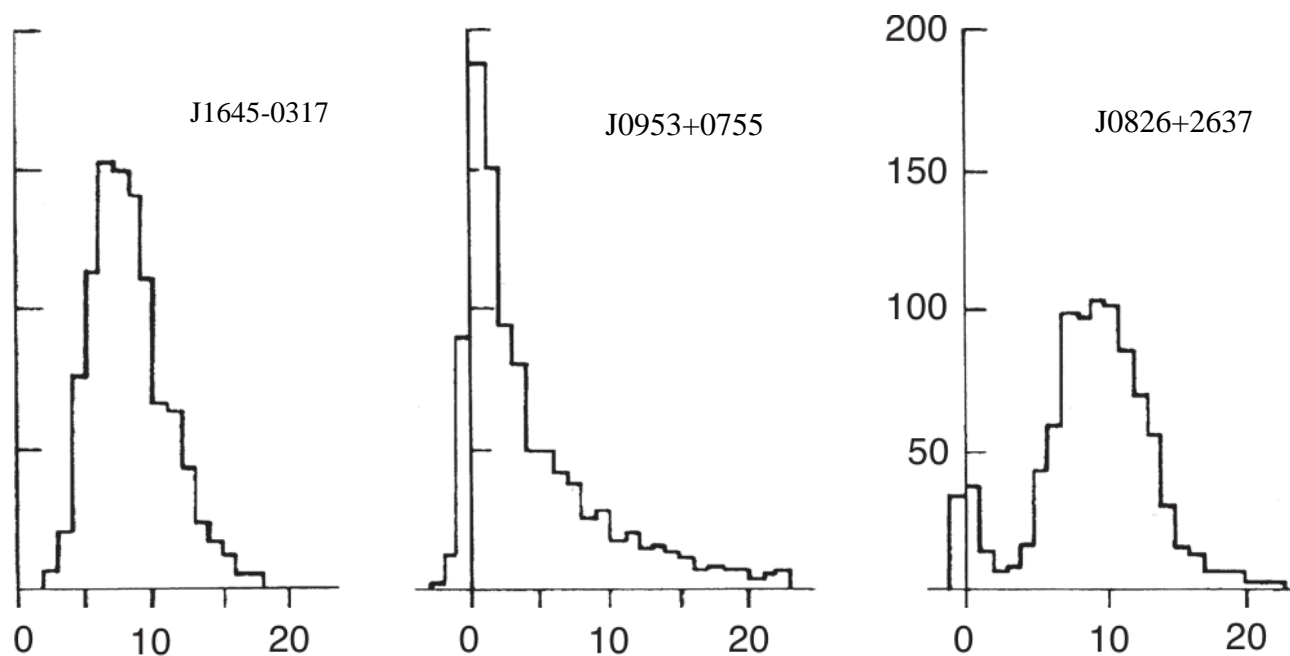


Рис. 0.1 Гистограмма распределения количества импульсов (ось y) по энергии (ось x) трёх пульсаров на частоте 408 МГц [12, с. 143]. Наличие локального максимума около нулевого значения у J0826+2637 является примером нуллинга пульсара. «Отрицательная энергия» на гистограммах является следствием статистики относительных флуктуаций, не физической энергии импульса, которая всегда неотрицательна (вследствие вычитания шума при обработке слабых импульсов).

Индивидуальные импульсы, излученные в соседних периодах, могут быть различны по форме, фазе и амплитуде. Соответственно, одной из важных энергетических характеристик пульсара является распределение его импульсов по энергиям. Многие пульсары, например, J1645-0317 демонстрируют нормальное распределение энергии индивидуальных импульсов около среднего значения с единственным максимумом, другие, как J0953+0755 – ассиметричное распределение с высокой вероятностью значений ниже среднего и длинным высокоэнергетическим «хвостом», означающий редкие яркие импульсы (рис. 0.1), в некоторых случаях возможно бинормальное или логнормальное распределения [12, с. 142].

Много важной информации о механизме излучения и о природе источника можно получить из энергетического спектра S_ν – распределения плотности потока излучаемой энергии по частотам. Нестационарный характер излучения пульсаров означает, что для описания требуется получить и исследовать мгновенные спектры источников. Мгновенные спектры могут варьироваться, как и индивидуальные импульсы. Средние спектры получают, усреднив мгновенные, для чего необходимы многократные серии наблюдений и измерений с промежутками от минут до лет. Средний спектр не может напрямую быть связан со спектром энергий индивидуальных излучающих частиц, поскольку радиоизлучение производит когерентное движение больших групп частиц [12, с. 289]. Форма среднего спектра устойчива во времени, однако, её изменения в широком временном интервале (от нескольких минут до нескольких лет) обнаружены для целого ряда пульсаров. Измерения, проведенные в диапазоне частот от 16,7 МГц до 80 ГГц [15, с. 16], показали, что для средних спектров многих пульсаров характерны: наличие участка со степенной зависимостью $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ (α – спектральный индекс, величина которого лежит в диапазоне от -0,2 до 3,8 при средней величине $\langle \alpha \rangle = 1,7 \pm 0,6$) [15, с. 19], плавное изменение величины и знака спектрального индекса в низкочастотной области (низкочастотный завал, значение частоты максимума ν_m заключено между 50 и 300 МГц, со средней величиной порядка 100 МГц), достаточно резкое увеличение наклона спектра на высоких частотах (высокочастотный излом, значения ν_c заключены в пределах 0,4 до 10 ГГц, при средней величине порядка 2 ГГц). По результатам наблюдений обнаружена обратная степенная зависимость ν_m и ν_c от периода вращения P , при этом максимум в среднем спектре пульсаров смещается в сторону длинных волн и ширина спектра ($\Delta\nu = \nu_c - \nu_m$) становится более узкой при увеличении периода вращения пульсара [15, с. 20].

Форма среднего профиля постоянна лишь на определенном промежутке времени, при этом, например, подвержена монотонному изменению вследствие движения пульсара и Земли относительно друг друга. Кроме этого изменения, ряд пульсаров обладает явлением, называемым переключение мод [12, с. 139]. Модой, в данном случае, называется стабильная фаза излучения, которая у некоторых пульсаров мгновенно сменяется другой, сохраняя принятую форму в

течении длительной последовательности импульсов на интервале от минут до месяцев, и также мгновенно возвращается к изначальной. Некоторые пульсары обладают более чем двумя модами. При изменении формы среднего профиля, поляризационные характеристики компонент почти не изменяются, что свидетельствует о том, что направление магнитного поля, соответствующее разным частям профиля, не изменяется, соответственно, изменение формы, вероятнее всего, связано с изменением относительного возбуждения различных излучающих областей в магнитосфере пульсара. Строгой периодичности относительно переключения мод не отмечается.

Регулярное излучение пульсаров подвергается сильным вариациям интенсивности в широком временном интервале от 10^{-6} до 10^7 с, при этом уменьшение излучения ниже уровня 1% от средней энергии импульса характеризует явление нуллинга [14, с. 1383], [12, с. 143], которое выражается в виде невозможности детектирования на определенном промежутке времени ни индивидуальных, ни средних импульсов пульсаров. Продолжительность нуллинга и интервалы между ними варьируется случайным образом возле величин, характеризующих пульсар. Для некоторых пульсаров «зануляются» несколько импульсов на интервале в 100 индивидуальных импульсов, у других – состояние нуллинга может длиться от минут до месяцев, занимая более половину общего времени наблюдений. Переключение между двумя состояниями очень резкое. Наблюдается такой феномен и на временном промежутке, сравнимый с периодом вращения пульсара. Нуллинг тесно связан с переключением мод, поскольку оба этих явления наблюдается в популяции «старых» секундных пульсаров и на схожих временных интервалах [12, с. 146].

Своеобразным антагонизмом нуллинга является спорадическое, вспышкоподобное повышение интенсивности индивидуальных импульсов пульсаров, так называемые гигантские импульсы (ГИ). Существующими на данный момент критериям отнесения индивидуального импульса пульсара в разряд гигантских является:

- локализация в среднем профиле на долготах главного импульса или, при наличии, интеримпульса;
- превышение плотности потока среднего профиля в 30 и более раз;
- относительная узость импульса;
- бимодальный характер распределения импульсов пульсара по энергии.

Наблюдательные программы, проведенные в разных обсерваториях на различных частотах, продемонстрировали, что подавляющее большинство пульсаров не генерирует индивидуальных импульсов более чем 30 раз превышающих соответствующий средний профиль, при этом исследования, проводимые на высоких частотах, дают оценку максимального превышения в 10 раз, для низких частот – порядка 20. Было показано, что на гистограмме распределения количества импульсов по энергии образуются две популяции – распределение индивидуальных импульсов по потоку имеет бимодальный характер. Первая популяция

соответствует низкоэнергетическим импульсам, вторая популяция – высокоэнергетический «хвост», формирующийся очень мощными ГИ. Из ~ 3900 известных пульсаров, как генераторы ГИ в литературе отмечаются 15. Из них, пульсары J0534+2200 и J1939+2134 считаются генераторами классических ГИ (импульсы этих пульсаров обладают наивысшими значениями пиковой плотности потока, невероятно малой длительностью и распределение их по энергиям имеет явный бимодальный характер). Для остальных пульсаров критерии длительности импульсов и их распределения соблюдаются, но значения превышений лежат в пределах от 100 до 1000 крат. В последнее время в литературе, посвященной данному феномену, стал фигурировать термин «импульсы аномальной интенсивности», для описания как раз таких мощных, но имеющих более низкое значение превышения по сравнению с ГИ, событий [16]. У пульсаров, входящих в двойную систему с маломассивным компаньоном, наблюдался также эффект электромагнитного линзирования на неоднородностях плазменного экрана, приводящий к увеличению яркости обычных импульсов в 20-40 крат [13].

В течение многих лет поиск радиопульсаров основывался на распознавании явного периодического сигнала на фоне шума. Обнаружение экстремальных случаев типа нуллинга позволило предположить, что некоторые пульсары не обнаруживаются, поскольку производят лишь случайные изолированные импульсы, и подтолкнуло к поиску одиночных импульсов, которые демонстрировали сходную частотную дисперсию обычных пульсаров. После длительных наблюдений были обнаружены источники, которые демонстрируют импульсы, повторяющиеся с большими интервалами, от десятков секунд до многих часов, и в конечном итоге можно было обнаружить основные периоды порядка нескольких секунд. Такие пульсары были названы вращающимися радиотранзиентами (RRAT). Они являются по сути экстремальными примерами пульсаров с нуллингами, у которых не было заметного импульса в течение многих сотен или тысяч оборотов, за которыми следовал один заметный импульс. При этом в некоторых теоретических работах [17], [18] показано, вероятно радиотранзиенты представляют собой «смесь» известных видов пульсаров [19, сс. 626-627]:

- пульсары с очень длительными нуллингами. У пульсаров с нуллингами между отдельными импульсами регулярное излучение отсутствует, и поэтому пульсары с высокой долей нуллинга не обнаруживаются стандартными способами поиска периодических сигналов. Для пульсаров с большой долей нуллингов при длительных сеансах наблюдений средний профиль накопить нельзя;

- пульсары с очень широким распределением импульсов по энергиям, и для слабых пульсаров наблюдаются сильные импульсы с «хвоста» этого распределения. Для таких объектов видны самые яркие импульсы с «хвоста» распределения, но не детектируют регулярное (периодическое) излучение из-за недостаточной чувствительности за сеанс наблюдений;

- пульсары с гигантскими импульсами. Для пульсаров с ГИ характерно степенное распределение импульсов на «хвосте» распределения. Именно степенное распределение импульсов зарегистрировано у ряда RRAT.

Стоит отметить, что исследования, направленные на обнаружение радиотранзиентов, требуют высокой чувствительности, достигаемой за счет использования телескопов с большими площадями сбора, широкой полосой пропускания регистратора и большими полями обзора в сочетании с системой регистраторов, которая может выполнять поиск с использованием широкого диапазона измерений дисперсии [12, с. 155]. При этом количество RRAT в Галактике должно быть вдвое больше количества обычных секундных пульсаров [20, с. 518], однако, доля найденных транзиентов на текущий момент меньше 10% от общего количества пульсаров [1].

Наблюдаемая форма средних профилей радиоимпульсов зависит от пути, которым конус излучения пересекается линией зрения наблюдателя при вращении пульсара. В каждом случае магнитная ось наклонена под углом к оси вращения. На рисунке 0.2, (а) луч излучается из области магнитосферы над магнитным полюсом, в то время как на рисунке (б) излучение исходит из внешнего промежутка, расположенного далеко в магнитосфере, в протяженной области, образующей кольцо или ореол. Типичный импульс, исходящий из полярного зазора, имеет однопиковый профиль (хотя и с внутренней структурой), в то время как внешний зазор генерирует двойной импульс с двумя компонентами, разделенными до половины оборота [12, с. 128].

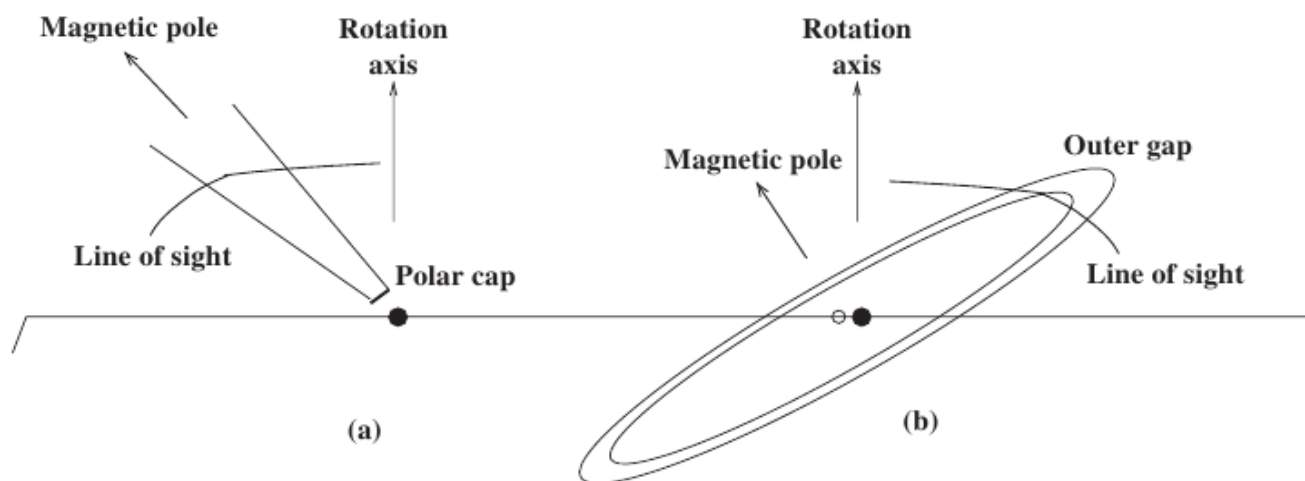


Рис. 0.2 Положение излучающих регионов – полярной шапки и внешний зазор в магнитосфере пульсара [12, с. 127].

Пучок излучения от обычного пульсара генерируется внутри конуса силовых линий над магнитным полюсом, при этом само излучение распределено внутри конуса неравномерно. Некоторые средние профили особенно симметричны, что свидетельствует о простой организации составляющих пучков внутри конуса, если это универсальное правило, то

несимметричные профили, наблюдаемые у других пульсаров, объясняются слабыми или отсутствующими компонентами.

Средний профиль импульсов пульсаров считается важным инструментом для понимания феномена пульсаров, в том числе геометрии пучков излучения пульсаров и поведения поляризации. В некотором смысле геометрия пучков излучения пульсаров позволила получить важные сведения о механизме излучения пульсаров. Многие авторы изучали структуру пучков излучения пульсаров. Сначала была предложена модель полого конуса, затем, чтобы объяснить профили тройного типа, введено понятие центрального пучкового излучения вблизи магнитной оси, далее пришли к выводу, что излучение случайным образом распределено в почти круглой области, которую можно назвать «оконной функцией».

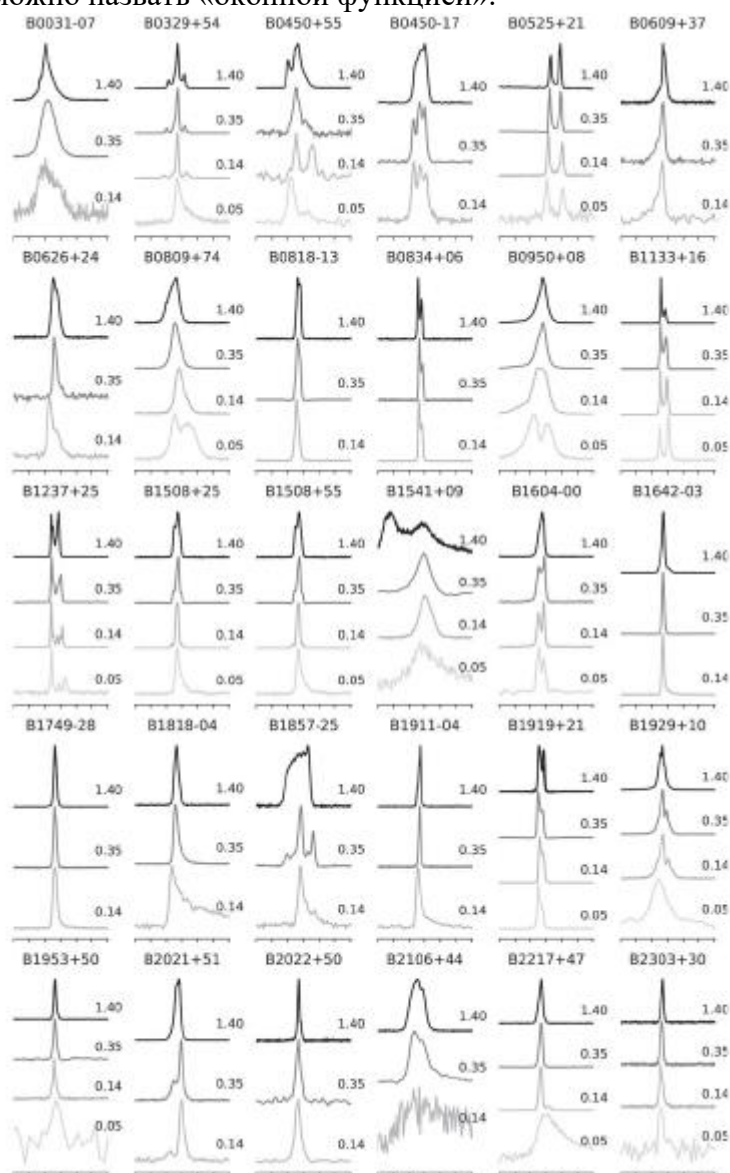


Рис. 0.3 Средние профили пульсаров на различных частотах, выраженных в ГГц [12, с. 129]. Ширина профилей составляет 120° фазы вращения, содержащие главный импульс.

Средние профили большинства обычных (не заново разогнанных миллисекундных) радиопульсаров формируются излучением, связанным с полярной шапкой. В отличие от этого,

высокоэнергетические профили обычно приписываются источникам во внешней магнитосфере. Интегрированные профили радиоимпульсов обычно охватывают около 10-20° фазы вращения, некоторые из них имеют длительность всего 1° от полного периода, другие простираются почти до 360° (рис. 0.3). Большинство интегрированных профилей состоят из нескольких компонентов, ширина каждого из которых составляет несколько градусов. Обычно таких компонентов от одного до пяти, хотя в некоторых профилях очень точными измерениями можно увидеть и больше, но менее заметных компонентов. За пределами основного радиоимпульса плотность потока обычно быстро падает ниже детектируемого уровня, что указывает на то, что излучение обычно испускается узким пучком и область излучения имеет ограниченную протяженность в пределах магнитосферы [12].

Одним из важнейших параметров, определяющих геометрию магнитосферы нейтронной звезды и протекающие в ней физические процессы, является угол γ между осью вращения и вектором магнитного момента μ пульсара. Данный параметр позволяет понять специфику излучения конкретного пульсара, при этом знания распределения углов γ для объектов с разными возрастными – сделать выводы о направлениях их изменения, поскольку помимо замедления вращения нейтронной звезды, существует и изменение самого угла γ . В настоящее время существуют теоретические модели эволюции радиопульсаров, которые предсказывают как эволюцию угла наклона магнитного момента к оси вращения как в 90°, образуя ортогональный ротатор [21], так и в 0°, образуя соосный ротатор [22]. Обе модели, при определенных условиях, объясняют расположение пульсаров на диаграмме $P - \dot{P}$, поэтому не существует общепринятого взгляда на эволюцию угла наклона γ нейтронных звезд. Дополнительной сложностью являются трудности в определении направления изменения данного угла у индивидуальных пульсаров. Следует подчеркнуть, что угол наклона (и направление его изменения) играют ключевую роль в эволюции нейтронных звезд, без которой невозможно построить последовательную теорию эволюции радиопульсаров, при этом даже спустя почти 60 лет после открытия пульсаров, проблема механизма потери энергии нейтронных звезд до сих пор остается нерешенной полностью [23, с. 179]. Например, до сих пор не до конца понятен механизм торможения пульсара, связанный с продольными токами, текущими в магнитосфере пульсара. Это оставляет актуальным проблему эволюции угла наклона γ между магнитным моментом и осью вращения нейтронной звезды.

Диаграмма период-производная периода $P - \dot{P}$ пульсаров (рис. 0.4) является аналогом диаграммы Герцшпрунга-Рессела для обычных звезд. В ней содержится огромное количество информации о популяции пульсаров и их свойств в терминах наблюдаемых P (период) и \dot{P} (производная периода). Такие параметры пульсара как характеристическое время, минимальное магнитное поле и светимость замедления (пропорциональная четвертой степени частоты и

квадрату магнитного поля) определяется его положением на $P - \dot{P}$ диаграмме. Молодые пульсары в верхней средней части диаграммы часто ассоциируются с остатками сверхновых и излучают высокоэнергичную радиацию. Потом они замедляются, эволюционируя в течение миллионов лет, сначала присоединяясь к большой популяции «медленных» пульсаров с периодом порядка 1 секунды, затем становясь слишком слабыми для излучения даже по механизму радиоэмиссии, в конце концов опускаясь ниже порога обнаружения.

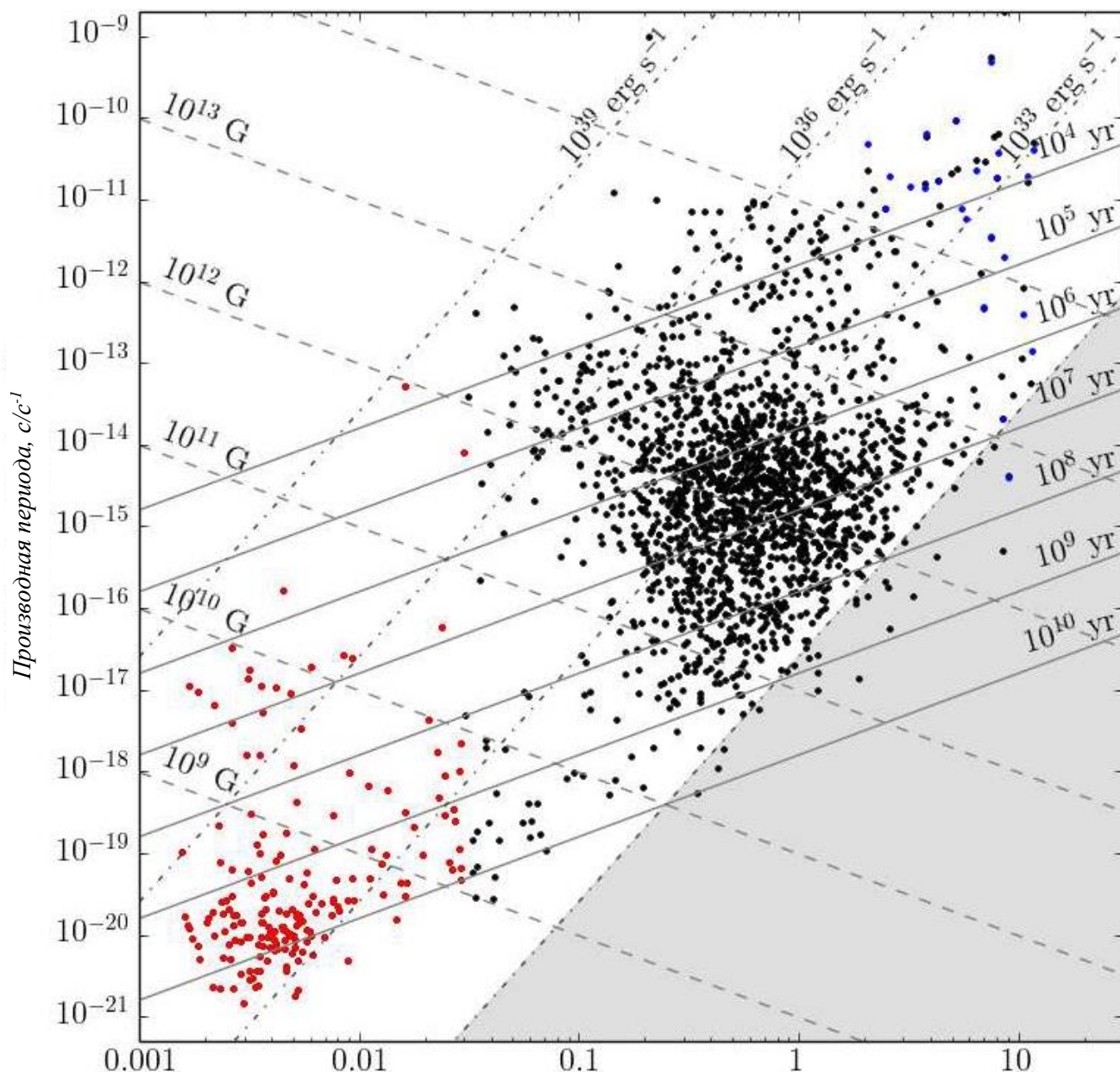


Рис. 0.4 Диаграмма период-производная периода $P - \dot{P}$ пульсаров [127, с. 24]. Ось y – производная периода пульсара (c/c^1), ось x – период пульсара (c). Различные линии соответствует постоянным значениям магнитного поля, характеристического возраста и светимости замедления пульсаров. Серым цветом выделен регион, называемый «зона смерти», в котором пульсары прекращают радиоизлучение. Голубыми точками показаны магнитары, красными – миллисекундные пульсары.

У некоторых пульсаров примечательной особенностью является наличие дополнительного импульса – интеримпульса между двумя последовательными импульсами (рис. 0.5). Пульсары, у которых на каждом обороте (периоде) пульсара наблюдаются два импульса, называются пульсарами с интеримпульсами (или интерпульсами). Они могут быть как соосными, так и ортогональными ротаторами [24]. Для соосных ротаторов интеримпульс может появиться, если детектируемое излучение образуется в двух локальных зонах, находящихся на

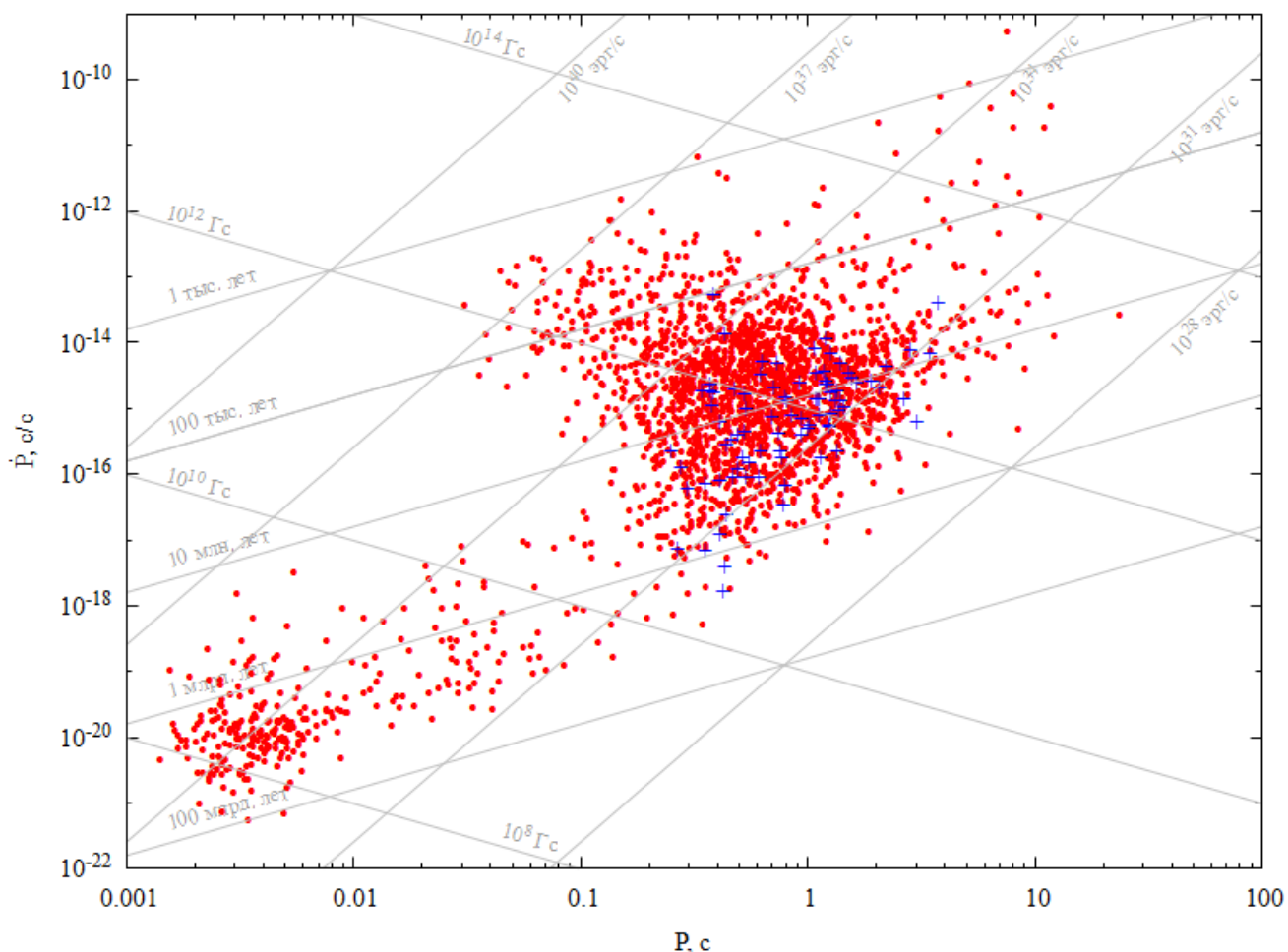


Рис. 0.5 Диаграмма период-производная периода $P - \dot{P}$, пульсары с интеримпульсами отмечены символом «+». Ось y – производная периода пульсара (c/c^{-1}), ось x – период пульсара (c). Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

разных расстояниях от полярной шапки. Для ортогонального ротатора это интерпретируется как противоположно направленный пучок излучения, исходящий из противоположного магнитного полюса и наблюдаемый. Для идеального ортогонального ротатора у наблюдаемых импульсов должны быть близкие наблюдаемые плотности потока. Однако на практике у известных ортогональных ротаторов наблюдаемые плотности потока главного импульса и интеримпульса могут отличаться в несколько раз.

Для небольшого числа пульсаров промежуточный импульс (интеримпульс) наблюдается примерно на половине цикла. Выявление пульсаров с малыми значениями угла γ и с углами порядка 90° дает возможность предсказать наличие у них межимпульсного излучения и интеримпульсов. Анализ всех результатов по определению углов γ в радиопульсарах служит одним из путей выбора адекватной модели для этих объектов и механизма их излучения, что является одной из важных задач современной астрофизики.

Актуальность темы

Необходимость наблюдений пульсаров именно в метровом диапазоне длин волн обуславливается особенностями их спектров, в частности наличием максимума, так как большинство наблюдаемых низкочастотных завалов в спектрах пульсаров начинается в районе частоты 100 МГц [25]. Кроме того, у пульсаров с крутыми спектрами максимум также в районе частоты 100 МГц и зачастую такие пульсары наблюдаются только на низких частотах [26].

Высокая чувствительность наших наблюдений связана с наблюдения пульсаров на меридианном телескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН). БСА ФИАН – это незаменимый инструмент для решения целого ряда задач в области исследования пульсаров, изучения динамических процессов в околосолнечной и межпланетной плазме, анализа структуры компактных радиоисточников в метровом диапазоне волн. Важнейшей особенностью радиотелескопа БСА является то, что он работает в режиме приема полной мощности, что позволяет снимать на нем, помимо дискретных радиоисточников, фоновое излучение нашей Галактики и протяженные, порядка градусов радиоисточники, на что обычно неспособны другие радиотелескопы. Вторая особенность – БСА изначально проектировался с возможностью формирования на нем многолучевой диаграммы – одновременной регистрации сигнала из нескольких направлений. Чувствительность радиотелескопа позволяет регистрировать отдельные импульсы, при этом в мониторинговых наблюдениях регистрируется около 300 секундных пульсаров [27]. Часть из этих пульсаров, представляющих нерегулярно наблюдаемые импульсные сигналы, обнаружена впервые на БСА ФИАН и принадлежит выборке RRAT. Накопление данных в режиме работы 24/7 на протяжении нескольких лет позволяет для каждого пульсара, попадающего в покрываемую площадку, получать несколько тысяч наблюдательных сессий. Учитывая, что в метровом диапазоне эффективная площадь радиотелескопа БСА самая высокая в мире, дополнительный рост отношения сигнала к шуму (S/N) приводит к выявлению новых деталей в средних профилях давно известных и хорошо исследованных пульсаров, повышает эффективность исследований межзвёздных мерцаний, позволяет широко использовать статистический анализ для проверки теоретических моделей.

БСА в силу высокой чувствительности позволяет решать много разных задач. В настоящей работе мы рассматриваем редко встречающиеся пульсары с уникальными свойствами или пульсары с особенностями (вращающиеся радиотранзиенты, пульсары с интеримпульсами и исследование пульсаров, обладающих индивидуальностями в среднем профиле).

Цель работы

Целью настоящей работы является выявление новых деталей средних профилей, изучение вариации интенсивности излучения, статистический анализ большой выборки пульсаров, в том числе и с интеримпульсами, на значительном количестве наблюдаемых сессий.

Основными задачами настоящей работы являются:

- а) получение методики обработки в приложении к данным БСА3;
- б) исследование отдельных пульсаров (исследование межзвездной среды);
- в) проверка гипотезы об эволюции соосных и ортогональных ротаторов;
- г) поиск новых компонент в средних профилях.

Научная новизна

В диссертации получен ряд новых результатов.

Проведена статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами, подтверждающая квазианалитическую модель магнитосферы, разработанную Бескиным, Гуревичем и Истоминым [21], – БГИ (BGI), согласно которой в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся ортогональными, в отличие от численной магнитогиродинамической модели магнитосферы [22] – МГД (MHD), по которой магнитная ось и ось вращения становятся соосными.

Для J0953+0755 впервые измерен частотный масштаб дифракционных межзвездных мерцаний интеримпульсов и показано, что формы спектра для интеримпульса и главного импульса хорошо коррелируют и имеют одинаковый частотный масштаб. Обнаружена модуляция излучения с характерным масштабом порядка 130 дней, которая, по-видимому, связана с рефракционными мерцаниями. Впервые измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом (мост излучения).

У J0826+2637 обнаружены вариации амплитуд главного импульса и интеримпульса на нескольких временных масштабах, вызванных, соответственно: рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, рефракцией радиоволн в межзвездной среде и наличием рассеивающего слоя на близком экране, находящемся на расстоянии порядка 50 пк от Земли.

Выявлены новые детали средних профилей: J1543+0929 имеет излучение на протяжении практически всего периода, J2234+2114 имеет предимпульс.

Результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей четыре главы, и заключения, а также двух приложений. В диссертации 123 страницы, включая 38 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 144 ссылки.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Проведен поиск интерпульсов в выборке из 96 пульсаров, имеющих период $P > 0,25$ с и меру дисперсии $DM < 100$ пк/см³. Интеримпульсы найдены у 12 пульсаров, у 9 из них – впервые. Проведена статистическая проверка гипотез об эволюции магнитной оси пульсаров со временем. Проведенная статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами подтверждает квазианалитическую модель магнитосферы, согласно которой в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения пульсаров становятся ортогональными, в отличие от численной магнитогидродинамической модели магнитосферы, по которой магнитная ось и ось вращения становятся соосными.

2. Исследование вариации амплитуд главного импульса и интеримпульса радиопульсара J0826+2637 на длительном временном интервале позволили:

- подтвердить отмеченный в предыдущих работах временной масштаб 37 дней, вызванный рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, которая распределена в основном квази-однородно на луче зрения, и вносящий основной вклад в наблюдаемую переменность;
- впервые обнаружить временной масштаб переменности 5 дней, связанный с рефракцией радиоволн в межзвездной среде мерцаниями на структуре, пространственный масштаб которой примерно в 7 раз меньше основного масштаба, и вносящий примерно 1/3 в вариации амплитуды излучения от пульсара;
- впервые обнаружить временной масштаб переменности в один год, связанный с наличием рассеивающего слоя на близком экране, находящемся на расстоянии порядка 50 пс от Земли.

3. Измерен частотный масштаб дифракционных межзвездных мерцаний интеримпульсов радиопульсара J0953+0755 ($f_{\text{dif}} = 200 - 800$ кГц), и показано, что формы спектра для интеримпульса и главного импульса хорошо коррелируют и имеют одинаковый частотный масштаб. Впервые обнаружен рефракционный масштаб мерцаний 1-2 дня. Обнаружена модуляция излучения с характерным масштабом порядка 130 дней, которая, по-видимому, также связана с рефракционными мерцаниями. Измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом со средним значением $2,00 \pm 0,28$ % от главного импульса. Впервые измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом (мост излучения) со средним значением $1,04 \pm 0,28$ %.

4. Выявлены ранее не обнаруженные детали средних профилей радиопульсаров J1543+0929 и J2234+2114. Для радиопульсара J1543+0929 выявлено низкоуровневое излучение (межимпульсное излучение) практически на всех долготах внутри периода пульсара, что делает этот пульсар вторым (после J0953+0755), излучение которого занимает больше 90% периода. У J2234+2114 обнаружен предимпульс, отстоящий от главного импульса на расстоянии 53° , который ранее не описывался, и имеющий относительную амплитуду 0,1.

Личный вклад диссертанта

Личный вклад диссертанта во всех результатах, выносимых на защиту, является определяющим. Методика обработки данных наблюдений пульсаров разрабатывалась автором совместно с научным руководителем, все расчеты выполнялись по программам, написанным лично автором (с использованием сторонних библиотек на языках Си и C++), результаты анализировались совместно с научным руководителем.

Все публикации по теме диссертации выполнены в соавторстве, по двум статьям автор является первым соавтором.

Рисунки 0.1, 0.4, 0.5, I.4 – I.11, II.1, III.4 – III.12, IV.1 – IV.5 в диссертации получены лично автором. Рисунки 0.2, 0.3, I.1 – I.3, III.1 – III.3 в диссертации получены другими авторами, ссылки приведены.

Список публикаций диссертанта

Основные результаты диссертации изложены в 7 научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК:

1) Торопов М.О., Тюльбашев С.А., Бескин В.С. Поиск интеримпульсов в полной выборке пульсаров на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*. – 2024. – Т. 101. – №. 12. – С. 1084-

1094. (Toropov M. O., Tyul'bashev S. A., Beskin V. S. Search for interpulses in a complete sample of pulsars at a frequency of 111 MHz // *Astronomy Reports*. – 2024. – Т. 68. – №. 12. – С. 1191-1201.)

2) Смирнова Т.В., Торопов М.О., Тюльбашев С.А. Поиск слабых компонентов в радиоизлучении пульсаров // *Астрономический журнал*. – 2024. – Т. 101. – №. 12. – С. 1078-1083. (Smirnova T.V., Toropov M.O., Tyul'bashev S.A. Search for weak components in pulsar radiation // *Astronomy Reports*. – 2024. – Т. 68. – №. 12. – С. 1185-1190.)

3) Смирнова Т.В., Торопов М.О., Тюльбашев С.А. Вариации интенсивности излучения пульсара B0950+08: 9 лет мониторинга на частоте 110 МГц // *Астрономический журнал*. – 2024. – Т. 101. – №. 8. – С. 753-763. (Smirnova T.V., Toropov M.O., Tyul'bashev S.A. Variations in the Radiation Intensity of Pulsar B0950+08: Nine Years of Monitoring at 110 MHz // *Astronomy Reports*. – 2024. – Т. 68. – №. 8. – С. 828-837.)

4) Toropov M.O., Tyul'bashev S.A., Smirnova T.V., Samodurov V.A., Ovchinnikov I.L. Study of the variability and components of the pulsar B0823+26 at a frequency of 111 MHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2024. – Т. 527. – №. 1. – С. 1594-1600.

5) Самодуров В.А., Тюльбашев С.А., Торопов М.О., Долгушев А.В., Орешко В.В., Логвиненко С.В. Обнаружение двух новых RRAT на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*. – 2023. – Т. 100. – №. 6. – С. 517-523. (Samodurov V.A., Tyul'bashev S.A., Toropov M.O., Dolgushev A.V., Oreshko V.V., Logvinenko S.V. Detection of Two New RRATs at 111 MHz // *Astronomy Reports*. – 2023. – Т. 67. – №. 6. – С. 590-595.)

6) Самодуров В. А., Тюльбашев С. А., Торопов М. О., Долгушев А. В., Орешко В. В., Логвиненко С. В., Исаев Е. А. Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от $+52^\circ$ до $+56^\circ$ на частоте 111 МГц // *Труды ИПА РАН*. – 2023. – Вып. 66. – С. 37-44.

7) Самодуров В.А., Тюльбашев С.А., Торопов М.О., Логвиненко С.В. Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от $+42^\circ$ до $+52^\circ$ на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*. – 2022. – Т. 99. – №. 4. – С. 334-341. (Samodurov V.A., Tyul'bashev S.A., Toropov M.O., Logvinenko S.V. Detection Statistics of Pulse Signals at Declinations from $+42^\circ$ to $+52^\circ$ at the Frequency 111 MHz // *Astronomy Reports*. – 2022. – Т. 66. – №. 4. – С. 341-347.)

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

1) В. А. Самодуров, С. А. Тюльбашев, М. О. Торопов, А. В. Долгушев, В. В. Орешко, С. В. Логвиненко, «Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от

+52° до +56° на частоте 111 МГц» //Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2022) 19–23 сентября 2022 г.

2) Т. В. Смирнова, М. О. Торопов, С. А. Тюльбашев, В. А. Самодуров. «Исследование переменности излучения пульсара В0823+26 от секунд до нескольких лет» //Конференция Физика нейтронных звёзд 10-14 июля 2023 г., Санкт-Петербург.

3) T.V. Smirnova, M.O. Toropov, S.A. Tyul'bashev «Search for weak components in the radio emission of pulsars at a frequency of 110 MHz» //International pulsar symposium 2024, December 12-17th, 2024, Howard Johnson Qunsheng Plaza, GuiYang, China.

Работы также представлялись на семинарах ПРАО АКЦ ФИАН.

Глава I. Обработка данных на БСАЗ

§ 1.1. Радиотелескоп БСА ФИАН

Наблюдения проводились в метровом диапазоне радиоволн в Пушино на радиотелескопе



Большая синфазная антенна Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (БСА ФИАН). Антенна комплекса БСА Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН (рис. 1.1) представляет собой плоскую двумерную эквидистантную фазирuemую по одной координате решетку, состоящая из 16384 вибраторов, собранных в 256

Рис. 1.1 Радиотелескоп БСА ФИАН [37].

рядов по 64 диполя в каждом, ориентированные в направлении Восток-Запад (рис. 1.2), расположенных на площади 384×187 м (геометрическая площадь более 70000 м^2) в направлении Восток-Запад и Север-Юг соответственно. Эффективная площадь антенны с усилителями $A_0 \approx 45000 \text{ м}^2$ в направлении на зенит, а зависимость $A_{\text{эф}}$ от зенитного угла z аппроксимировалась выражением $A_{\text{эф}} = A_0 \cos z$, где $z = \varphi - \delta$ ($\varphi = 55^\circ$ – широта местности). Антенна работает в диапазоне 109-113 МГц с сектором сканирования 110° ($-20^\circ - +90^\circ$ по склонению) [28].

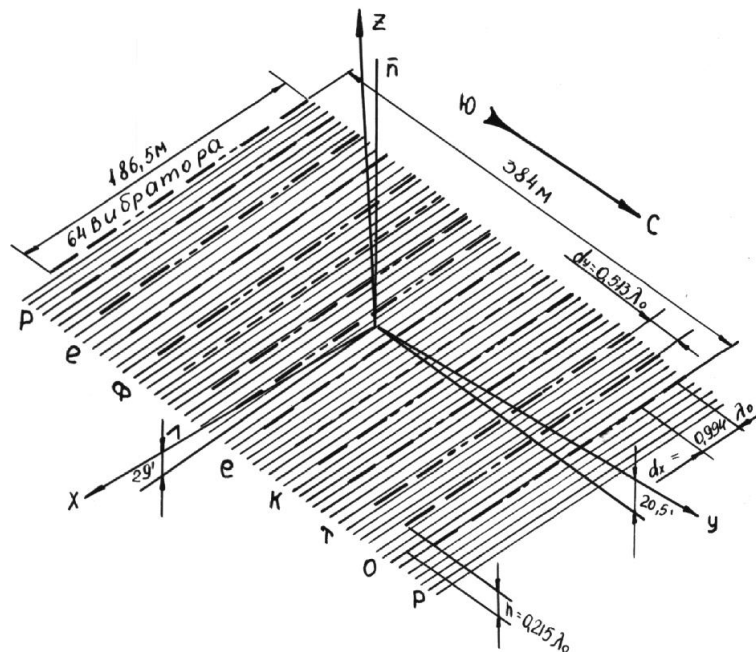


Рис. 1.2 Схема антенны БСА ФИАН [28].

Дипольное полотно установлено над проволочным рефлектором на металлических опорах. Фидерные двухпроводные линии антенны размещены под рефлектором.

На базе одного антенного поля в настоящий момент времени функционируют 2 независимых радиотелескопа. Один из них (БСА1) используется для стандартных наблюдений пульсаров. Его 512 лучей покрывают склонения в диапазоне $-15^\circ < \delta < +87^\circ$ при перекрытии лучей по уровню 0,8. Второй телескоп (БСА3) имеет 128 стационарных лучей, выстроенные в плоскости меридиана, в секторе склонений $-9^\circ < \delta < +55^\circ$ с перекрытием лучей по уровню 0,4 снабжены цифровой многоканальной системой регистрации. Система диаграммообразования БСА3 перекрывает телесный угол в 50 кв. градусов. При этом расстояние между соседними лучами равно половине ширины диаграммы БСА по склонению. В настоящей работе использованы данные, полученные на БСА3.

Регистратор представляет собой промышленный компьютер с возможностью установки комплекта (от 4 до 6) модулей для регистрации сигналов, идущих от разных лучей радиотелескопа БСА3. Антенна принимает линейно-поляризованное излучение. Каждый модуль обрабатывает и регистрирует до 8 сигналов (лучей). В итоге два регистратора записывают данные с $2 \times 48 = 96$ лучей, ещё один – 32 лучей радиотелескопа. Сигнал от каждого луча разбивается на несколько частотных диапазонов. В настоящей работе использовались данные так называемой «быстрой» моды наблюдений: с частотой 80 Гц (время опроса одной точки 12,5 мс) данные снимаются в 32-х канальном режиме (частотные диапазоны шириной 78 кГц). Кроме того, в выходной файл записывается сигнал общей полосы приема телескопа ($\nu_{RB} = 2,5$ МГц). Данные «быстрой» моды наблюдений проводимых наблюдений позволяют с высокой чувствительностью фиксировать все источники космического радиоизлучения с указанного участка неба. При пульсарных наблюдениях типичная чувствительность в единичной наблюдательной сессии оценивается в 15-20 мЯн для объектов, находящихся в плоскости Галактики и 6-8 мЯн вне её [29].

Каждый приемный канал принимает всю полосу 2,5 МГц, но в процессе работы программируемая матрица разбивает его на 512 полос (частотных каналов), и работает с 512 потоками данных. Максимальная скорость съема данных – 100 раз в секунду. Матрица «на лету» просматривает данные со всех 512 частотных каналов и, если какой-то из них имеет резкое превышение уровня над остальными (более чем на 30%), «срезает» этот пик (и, часто – еще $\pm 1-2$ канала), аппроксимируя данные соседними каналами. Это позволяет в большинстве случаев избавиться от техногенных помех (радиостанции видны обычно в одном-двух единичных каналах). После уничтожения паразитных выбросов в отдельных частотных каналах данных все эти 512 каналов собираются пакетами для записи в файлы. Обычно собираются 6 пакетов из 512

единичных каналов (т.е. каждые 128 единичных каналов объединяются в отдельную частотную полосу) и усредняются по постоянной времени 0,1 секунды.

Поскольку БСА является меридианным инструментом, любой источник на небе регистрируется лишь один раз в сутки. Одной из задач радиотелескопа БСА3, наряду с исследованиями межпланетной плазмы и переменности активных ядер галактик, является поиск пульсаров и транзиентов [20, с. 517].

Данные делятся с 3-х аппаратурных стоек по (48 + 48 + 32) лучей диаграммы и пишутся в часовые файлы (сутки наблюдений в «быстрой» моде занимают 87 Гб). В начале каждого часа

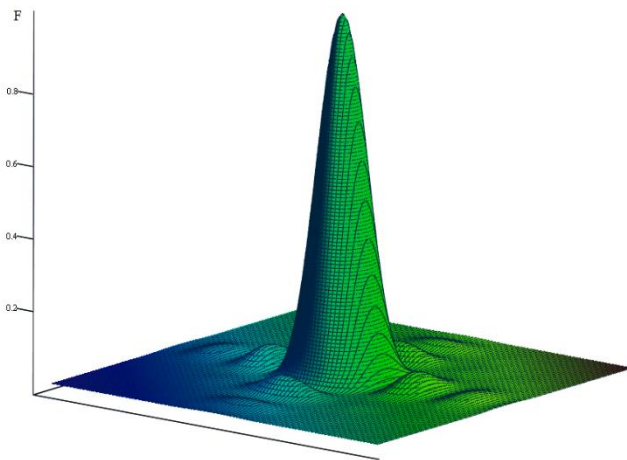


Рис. 1.3 Вид идеальной диаграммы (одного из лучей) направленности БСА в трёх измерениях [37].

аппаратура поправляет внутренние часы (на основе кварцевых генераторов) на каждой из плат цифрового приемника (одна плата снимает данные с 8 лучей диаграммы радиотелескопа) к атомному стандарту времени с точностью до 10^{-6} сек. Далее в течение часового сеанса наблюдений часы не поправляются, время контролируется кварцевым генератором с точностью хода $\sim 10^{-5}$ и поэтому в течение часового файла данных может набраться расхождение до 0,1-0,2 секунды. Диаграмма БСА имеет ширину 5-6 минут, и этот временной

отрезок является по сути временной экспозицией сигнала от конкретного источника (в том числе отдельно взятого пульсара). Таким образом, внутри экспозиции одного пульсара расхождение между крайними импульсами не превосходит 0,01-0,02 секунды. Это вполне удовлетворительно для сложения импульсов в единичный средний профиль.

Форма диаграммы единичного луча БСА аппроксимируется функцией интегрального квадратного синуса $[\sin(x)/x]^2$ (рис.1.3), размер луча примерно $0,5^\circ \times 1^\circ$, описывается функцией:

$$F(\alpha, \delta) = \left(\frac{\sin(\alpha x)}{(\alpha x)} \right)^2 \left(\frac{\sin(\beta y)}{(\beta y)} \right)^2, \quad (I.1)$$

где $\alpha x = \frac{\pi D_1}{\lambda} (\alpha - \alpha_0)$, $\beta y = \frac{\pi D_2 \cos z}{\lambda} (\delta - \delta_0)$, λ - длина волны, α и δ - экваториальные координаты, α_0 и δ_0 - экваториальные координаты, определяющие положение максимума диаграммы направленности радиотелескопа в направлении на конкретный радиоисточник, $D_1 = 186,5$ м и $D_2 = 384$ м размеры БСА ФИАН в направлениях с востока на запад и с севера на юг, z - зенитное расстояние, соответственно.

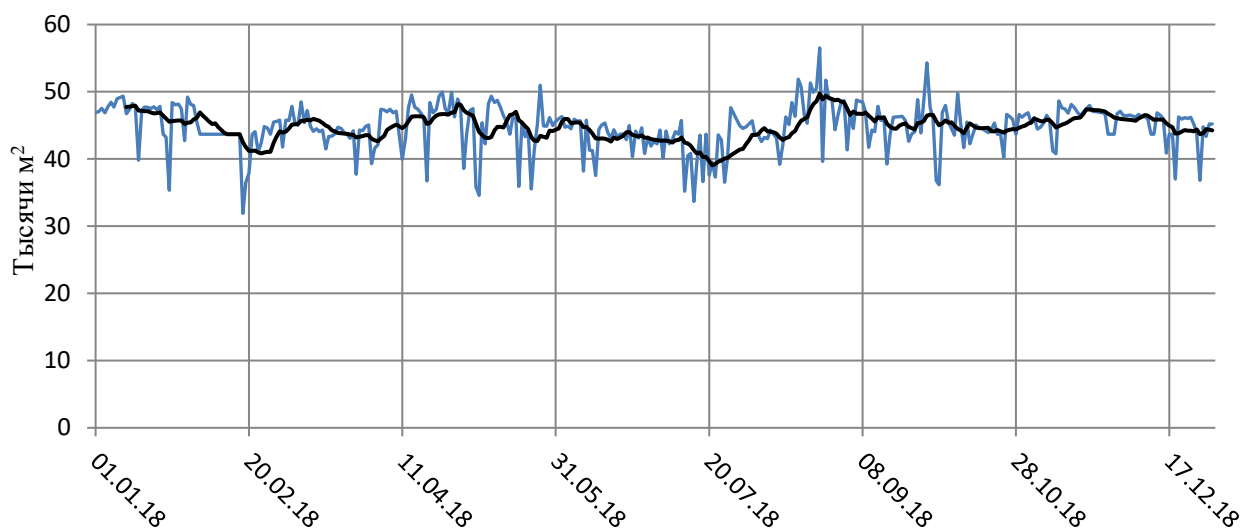


Рис. 1.4 Эффективная площадь антенны (ось у – тысячи м²) за 2018 год для калибровочного радиосточника ЗС405. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

Чувствительность антенны в зависимости от склонения меняется сложным образом. При сканировании диаграммы направленности радиотелескопа БСА ФИАН по склонению чувствительность уменьшается пропорционально косинусу зенитного расстояния. Кроме того,

Коэффициент эффективной площади антенны

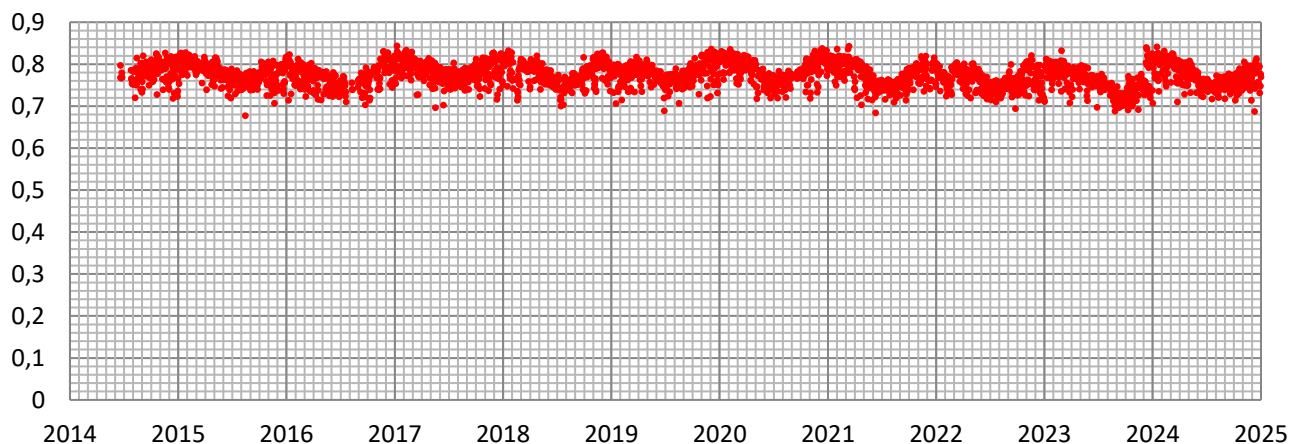


Рис. 1.5 Коэффициент эффективной площади антенны (отношение эффективной площади S_{eff} к геометрической S_g площади антенны) по калибровочным радиосточникам (ЗС405, ЗС123, ЗС144, ЗС274, ЗС348) за период 2014-2024 годы. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

на величину чувствительность влияют взаимные связи между диполями, которые изменяются при сканировании луча антенны. Эффективная площадь антенны – это величина, характеризующая способность антенны собирать падающее на нее излучение. На практике чем больше геометрическая площадь антенны, тем больше ее эффективная площадь. Регулярные измерения эффективной площади антенны позволяют отслеживать ее физическое состояние и правильность работы всех систем. Для оценки эффективной площади используются дискретные источники с известной плотностью потока, имеющие достаточно сильное излучение и угловые

размеры в единицы угловых минут с тем, чтобы они могли считаться точечными для диаграммы направленности БСА. Для ежедневного определения эффективной площади антенны в пересчете на зенит сотрудником ПРАО ФИАН Логвиненко С.В. написана программа на C#, каждые сутки проверяющая состояние антенны по 5 калибровочным радиоисточникам (3C405 - Лебедь А; 3C123; 3C144 - Телец А; 3C274 - Дева А; 3C348 - Геркулес А) и формирующая сводный файл в формате XLSX (рис. I.4).

Характерные размеры антенны (D_1 , D_2) меняются в соответствии с изменением эффективной площади антенны. Коэффициент эффективной площади антенны рассчитывается как отношение эффективной площади S_{eff} к геометрической S_g площади антенны $k_A = S_{eff}/S_g$. Изменение k_A носит сезонный характер (рис. I.5), достигая максимальных значений в начале каждого года, при этом изменяется поправка за форму диаграммы направленности $[\sin(x)/x]^2$. Чем выше эффективная площадь антенны, тем ниже шумы и выше отношение сигнал/шум. В программе обработки данных используется усреднённое по всем радиоисточникам значение эффективной площади антенны, рассчитанный на каждый день.

§ I.2. Приёмная аппаратура

При выборе параметров приёмной аппаратуры для наблюдения пульсаров необходимо учитывать некоторые особенности радиоизлучения этих объектов. Наиболее отличительное свойство пульсаров – высокая стабильность прихода импульсов. При накоплении импульсов пульсара с известным периодом чувствительность повышается примерно в \sqrt{N} , N – число накопленных импульсов. Часть импульсов отсутствует из-за флуктуаций интенсивности излучения, например, эффекта «nulling» [30]. Поэтому, если обозначим $N_{\text{ш}}$ – число периодов, когда импульс отсутствует, то можно видеть, что отношение сигнал/шум (S/N) будет увеличиваться уже, как

$$\frac{S}{N} = \left(1 - \frac{N_{\text{ш}}}{N}\right) \sqrt{N}, \quad (I.2)$$

при условии, что импульсы одной амплитуды [31, с. 126].

Зависимость от частоты групповой скорости радиоволн при распространении через межзвездную среду, содержащую свободные электроны, при наблюдениях импульсного излучения приводит к временной задержке сигнала на низких частотах относительно более высоких. Запаздывание радиоизлучения возникает из-за того, что показатель преломления плазмы для электромагнитных волн зависит от длины волны. Величина запаздывания [32, с. 86]:

$$\Delta t = \frac{e^2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}{2\pi mc} DM, \quad (I.3)$$

где e , m – заряд и масса электрона, c – скорость света, λ – длина волны, DM (пк/см³) – мера дисперсии, показывает число свободных электронов на луче зрения (от объекта до наблюдателя) в столбике сечением 1 см² [32, с. 86]:

$$DM = \int_0^L N_e dl = \overline{N_e}L, \quad (I.4)$$

где N_e – концентрация электронов на луче зрения, dl – элемент длины вдоль луча зрения, $\overline{N_e}$ – среднее значение N_e , L – расстояние до источника. Таким образом, зная величину меры дисперсии, можно определить расстояние до пульсара. ~~независимым способом~~. Частотная зависимость моментов прихода импульса и дисперсионное уширение импульса накладывают определенные условия на выбор полосы приема и постоянной времени.

Другой отличительной особенностью излучения пульсаров является высокая степень линейной и круговой поляризации ([33], [34]), которая не может быть объяснена только синхротронным и изгибным (магнитодрейфовым) излучением. Последний вид излучения связан с собственной крупномасштабной кривизной силовой линии, что особенно важно в магнитосферах пульсаров. Степень поляризации, как правило, возрастает с понижением частоты и нередко достигает 100% [35, с. 387]. Измерение поляризации излучения является превосходной возможностью определения геометрии магнитного поля излучателя.

Поскольку в межзвездной среде имеются слабые магнитные поля, то плоскость поляризации линейно поляризованной волны вращается вдоль пути распространения – это известный эффект фарадеевского вращения. Угол вращения выражается [32, с. 88]:

$$\delta\chi = RM \cdot \lambda^2$$

$$RM = \frac{e^3}{2\pi m_e^2 c^4} \int_0^l n_e B_0 \cos \alpha dl, \quad (I.5)$$

где RM – мера вращения, B – напряженность магнитного поля в Гс, а α – угол между лучом зрения и направлением магнитного поля. Фарадеевское вращение плоскости поляризации измеряется по изменению позиционного угла с частотой. Свойства линейно поляризованного излучения пульсаров на низких частотах ≤ 100 МГц исследовались в работах Сулеймановой [36]. Эту особенность излучения пульсаров также необходимо учитывать при выборе полосы приема приемной аппаратуры. Подробнее о выборе оптимальных параметров приемной аппаратуры для наблюдения пульсаров описано в [31].

Таблица 1.1. Характеристики приемно-регистрирующей системы БСАЗ [37] (чувствительность – для зенита, при минимальной температуре фона)

Параметры	БСАЗ
Число каналов (лучей) регистрации	128
Полоса частот регистрации с центральной частотой 110,25 МГц	2,5 МГц

Число частотных каналов в одном канале регистрации	32
Интервал выборки сигнала в канале	12,5 мс
Максимальная чувствительность (для всей полосы 2,5 МГц) радиотелескопа БСА, при постоянном времени 12,5мс	0,2 Ян
Чувствительность для одной спектральной полосы (78 кГц)	1,06 Ян

Учитывая, что радиоисточник проходит через диаграмму антенны ~ 6 минут, по нулям диаграммы – чувствительность единичного наблюдения (во всей полосе, при идеальных условиях) ~ 2 мЯн. Начиная с половинной мощности сигнал резко падает, поэтому реально используются, примерно 3-4 минуты, деленные на $\cos \delta$. Реальная чувствительность, однако, ограничена эффектом путаницы (порядка 0,6 Ян), но для редко расположенных источников (например, мерцающих) способность выделить источник (т.е. $S/N \sim 5$) имеет масштаб порядка 0,14 Ян. Стоит отметить, что эффекта путаницы для пульсаров нет, поскольку даже если несколько пульсаров попадает в диаграмму – они имеют разные меры дисперсии и разные периоды, поэтому их можно отличить друг от друга.

§ 1.3. Методика наблюдений и обработки данных

Исследуемый источник наблюдается не в зените, кроме того, его координаты чаще всего попадают между лучами БСА3, направления которых фиксированы на небе. Следовательно, наблюдаемая плотность потока меньше, чем должна была бы быть в случае использования, например, поворотного телескопа. Поэтому полученные оценки плотности потока нужно разделить на соответствующие коэффициенты (все они меньше или равны единице), учитывающие особенности диаграммы направленности антенны БСА. Таких поправок (коэффициентов) три, и для каждого исследуемого источника они считаются один раз и являются константами:

- 1) Поправка за высоту источника над антенной;
- 2) Поправка за край диаграммы направленности;
- 3) Поправка за попадание между лучами.

Поправка за высоту источника над антенной. Коэффициент $\cos z$, где $z = 55^\circ - \delta$ – высота пульсара над антенной.

Поправка за край диаграммы направленности, формирующей восьмерки лучей (в таблицах координат лучей эти восьмерки отражены как «модули»).

При наблюдениях на стандартных поворотных телескопах во время наблюдений телескоп направляется на фон, затем на источник + сопровождение по времени, затем снова на фон. Никаких поправок к импульсам делать не надо, так как диаграмма направленности – это

прямоугольник. При прохождении источника через диаграмму направленности БСАЗ ($T = 200/\cos \delta$ секунд ~ 3 -5 минут по уровню ширины половины сигнала, время прохождения источника через диаграмму направленности радиотелескопа оказывается тем больше, чем дальше источник отстоит от небесного экватора) меняется коэффициент отклика источника, что необходимо учитывать при расчёте. В этом случае импульсы в начале вырезанной записи пишутся по уровню ~ 0 , в середине записи $[\sin(\pi/2)/(\pi/2)]^2 = 0,405$ (половинная мощность), в центре записи по уровню 1,0, в конце записи снова по уровню ~ 0 . Для получения корректной оценки плотности потока, необходимо брать первый импульс домножать на обратный коэффициент $[\sin(x)/x]^2$, интегрировать импульс после удалений базовой линии в нем (т.е. сумма интенсивностей, соответствующих расположению импульса деленное на количество точек, которое занимает импульс в среднем профиле). Если не проводить исследование энергии отдельных импульсов, то, для получения корректной оценки плотности потока необходимо сделать поправку за коэффициент отклика источника, которая равна обратной величине между площадью прямоугольника, размер которого по половинной мощности в секундах $T = 200/\cos \delta$, деленного на площадь, помещающейся под функцией интегрального квадратного синуса $Si(x) = \left[\frac{\sin(ax)}{ax} \right]^2$:

$$G(T) = \int_0^T F(\alpha, \delta) \Big|_{\delta = const} = \int_0^T \frac{\sin^2(ax)}{(ax)^2} d(ax) = Si(2T) - \frac{\sin^2 T}{T}, \quad (I.3.1)$$

где $Si T = \int_0^T \frac{\sin x}{x} dx$ – интегральный синус.

Данная поправка используется как коэффициент, на который домножаются все полученные оценки плотности потока.

Поправка за попадание источника между лучами антенны телескопа. При нахождении радиоисточника между положениями максимумов двух соседних лучей диаграммы направленности радиотелескопа амплитуда отклика в отдельных лучах оказывается заметно меньше, чем, если бы склонение источника совпадало с положением максимума одного из лучей. Используя отношения амплитуд откликов одного и того же источника в двух соседних лучах, необходимо выполнить процедуру расчёта приведения амплитуды отклика источника к максимуму луча. Вычисляется на сколько высота профиля будет меньше согласно коэффициенту $[\sin(x)/x]^2$.

Модель диаграммы направленности единичного луча БСА при прохождении источника определяется как:

$$g_y = \frac{\sin^2(ay)}{(ay)^2}, \quad (I.4)$$

где a – переменная, включающая в себя размеры антенны. Следует отметить, что (I.4) имеет смысл на интервале $|ay| < \pi$. При $y > \frac{\pi}{a}$ функция g_y принималась равной нулю. Т.е., если источник попадает точно в луч, то поправка $g_y = [\sin(0)/0]^2 = 1$, если источник попадает точно между лучами (посередине), то поправка $g_y = [\sin(\pi/2)/(\pi/2)]^2 = 0,405$. Промежуточные положения будут в виде коэффициента $0,405 \leq g_y \leq 1$. Поскольку угловое расстояние y между максимумами двух соседних лучей равно $y = \pi/a$, то если в одном из лучей (луч 1) радиоисточник проходит через по уровню $\left(\frac{\sin(ay)}{ay}\right)^2$, то в соседнем луче (луч 2) он пройдет по уровню $\left(\frac{\sin(\pi-ay)}{\pi-ay}\right)^2$, и отношение амплитуд этих двух откликов после учета всех калибровочных коэффициентов составит $\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{ay}{\pi-ay}\right)^2$. Выражая из последнего равенства $ay = \frac{\pi}{1 + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}}$, получаем коэффициент поправки k_{12} для приведения к максимуму для 1-го луча:

$$k_{12} = \left(\frac{ay}{\sin(ay)}\right)^2 = \frac{\left(\frac{\pi}{1 + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}}\right)^2}{\sin^2\left(\frac{\pi}{1 + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}}\right)}, \quad (I.4)$$

где A_1, A_2 – амплитуды откликов в соседних лучах 1 и 2, соответственно.

Таким образом, зная отношение амплитуд откликов в двух соседних лучах можно найти, насколько отличается склонение радиоисточника от максимумов этих двух лучей и рассчитать, какова была бы амплитуда отклика, если бы его склонение совпадало с положением максимума луча. Соответствующая процедура расчета и введения необходимой поправки была выполнена для каждого дня наблюдений радиоисточников. При этом учтено деление на $\cos \delta$, поскольку, чем ближе к полюсу, тем дольше диаграмма проходит через меридиан (на полюсе – бесконечность, поскольку полюс никогда не выходит из луча диаграммы). Радиоисточники имеют различные склонения, и поскольку угловая скорость перемещения радиоисточника по небу в ходе суточного вращения Земли составляет $\frac{15'}{\text{мин}} \cos \delta$, время прохождения источника через диаграмму направленности радиотелескопа оказывается тем больше, чем дальше источник отстоит от небесного экватора. Хотя угловое расстояние от максимума записи той точки, где диаграмма направленности впервые обращается в нуль для всех источников равно $y = \frac{\pi}{a}$, временной интервал между этими двумя точками у источников со склонениями δ будет в $\sec \delta$ раз больше, чем у экваториальных объектов.

Межлучевой коэффициент k_{12} сравнивался с расчётным k_{12}^0 , найденным из табличного значения склонения радиоисточника δ , путём линейной интерполяции положения между лучами диаграммы направленности антенны:

$$k_{12}^0 = \left[\frac{ay}{\sin(ay)} \right]^2 = \left[\frac{\pi \frac{\delta_b - \delta}{\delta_b - \delta_r}}{\sin \left(\pi \frac{\delta_b - \delta}{\delta_b - \delta_r} \right)} \right]^2, \quad (I.5)$$

где δ_b, δ_r – склонение основного и вспомогательного луча, соответственно.

Источник может изменить свою координату относительно фиксированных направлений лучей диаграммы направленности из-за мерцаний в ионосфере. Проверки показывают, что ионосферные мерцания могут двигать координату (видимое положение) пульсара по склонению на 3-5'. Так как расстояние между лучами 25-30', такие маленькие сдвиги можно не учитывать, так как разница в поправках мала. Однако в отдельные дни ионосферные мерцания могут сдвигать видимое положение на угловое расстояние больше 10'. Источник будет заметно ослаблен в своем основном луче и станет заметно сильнее во вспомогательном луче. Измеряется наблюдаемая плотность потока в основном и вспомогательном лучах. Соотношение этих плотностей потока должно быть константой. Значительное изменение соотношения, скорее всего, связано с ионосферными мерцаниями на данный сеанс (день), необходимо делать поправку, вычислив на сколько в этот день сдвинулась координата, чтобы наблюдалось такое соотношение энергий в двух лучах. Первые две поправки остаются без изменений, но для поправки за попадание источника между лучами будет другое значение, вычисленное по положению источника между лучами по формуле (I.4).

Калибровка данных выполняется последовательно в два этапа:

- 1) по шумовым сигналам известной температуры – перевод из оцифрованных вольт в градусы;
- 2) по калибровочным радиоисточникам температуры – перевод из градусов в янские.

Шумовые сигналы известной температуры. Данные на выходе приемных каналов пишутся в оцифрованных вольтах, которые необходимо откалибровать и перевести в градусы при помощи калибровочных сигналов, которые подаются на антенну БСА раз в 4 часа (в начале шестой минуты часа с ошибкой старта в $\pm 2-3$ секунды) на 15 секунд. Калибровка осуществляется путем подачи двух сортов калибровочных сигналов. Первый, малый сигнал подается с подключающегося вместо антенны эквивалента с температурой окружающей среды (среднегодовая температура в Южном Подмоскowie около 278 К), второй – большой по значению – подается с генератора шума (с температурой 2400 К) по схеме:

- 1) Первые 5 секунд – малый сигнал с температурой окружающей среды,
- 2) Последующие 5 секунд – большой сигнал с температурой 2400 К,

3) Заключительные 5 секунд – малый сигнал с температурой окружающей среды.

Сигналы калибровки отображаются на всех лучах обеих установок, и, снимая их значения, исходные данные затем калибруются, приводя шкалу данных к антенным градусам (в Кельвинах). Поскольку ступеньки пишутся раз в четыре часа, при этом исследуемый источник может оказаться внутри такого интервала в произвольном месте, выполняются поправки за изменение высоты калибровочной «ступеньки» в течение 4-х часов. Предполагая, что высота ступеньки изменяется линейно между запусками шумового генератора можно интерполировать ожидаемую высоту ступеньки во временном расположении исследуемого источника. По таким «расчётным» ступенькам проводится калибровка записей частотных каналов в каждый отсчёт времени данных. Так как запись калибровочной ступеньки проходит во всех частотных каналах, можно выравнивать усиление в каждом частотном канале независимо [38]. Таким образом, после первого шага калибровки данные переведены в единицы температуры [К].

Калибровочные радиоисточники. Данные в градусах [К] переводятся в янские [Ян] калибровкой по радиоисточникам с известными (и постоянными) плотностями потоками. Масштабные коэффициенты перевода в Ян зависят от:

- склонения источника (т.е. луча диаграммы) – чем ближе к горизонту, тем меньше проекция площади антенны на телескоп. В зависимости от высоты (и, соответственно, склонения) источника изменяются также связи между дипольными элементами антенны, поэтому функция изменения эффективной площади антенны (и, соответственно, масштабного коэффициента перевода в Ян) в общем меняется более сложным образом, чем проекция площади антенны.

- погодных условий (в дождь диаграмма антенны может «разваливаться» из-за нарушения связей между элементами антенны, в снег – эффективная площадь антенны слегка падает, и т.д.).

- нарушений работы конкретного канала (луча диаграммы) приемника. Если канал начинает выходить из строя, он начинает работать неустойчиво (появляются скачки данных), и кроме этого, «подседают» чувствительность приема.

В качестве опорных радиоисточников («эталонные» радиоисточники) с известными (и постоянными) плотностями потоками [39] выбраны объекты (см. Приложение 1) из каталогов радиоисточников 3С [159 МГц] и 4С [178 МГц] (Третий и Четвертый Кембриджский каталоги радиоисточников) [40] по следующим требованиям:

- имеющие постоянную плотность потока на центральной частоте радиотелескопа не менее 20Ян;

- равномерно расположенные в рабочем диапазоне склонений БСАЗ $-8^\circ < \delta < +55^\circ$, как по прямому восхождению, так и по склонению;

- обладающие малыми угловыми размерами;
- не имеющие в окрестностях своих координат достаточно мощных радиоисточников (для исключения эффекта взаимовлияния).

Наиболее подходящими опорными источниками оказались, во многом благодаря их малым угловым размерам, радиогалактики различных типов – радиогалактики обоих классов, сейфертовские галактики обоих типов, активные ядра галактик, квазары и другие компактные радиоисточники (не идентифицированного в каталогах 3С и 4С типа). Филаменты остатков вспышек сверхновых представляют собой волокнистые, нитевидные структуры из газа и пыли, образующие видимые части остатков туманностей сверхновых, и формируются из вещества, выброшенного при взрыве звезды, и окружающего межзвёздного вещества, которое сжимается ударной волной. Поэтому остатки сверхновых, ввиду их пространственной неоднородности в радиодиапазоне (стационарные конденсации, волокна и другие радиоизлучающие образования) и значительной протяжённости, особенно с учётом относительной близости родительских туманностей, представлены значительно реже.

Зависимость плотности потока источника S_ν от частоты ν (спектр источника): $S_\nu \sim \nu^{-\alpha}$, α – спектральный индекс. Для радиогалактик и квазаров характерны самые разнообразные значения α от 0,3 до 1,7 с резким пиком у $\alpha = 1,0$ [41, с. 457], для остатков вспышек сверхновых $\alpha = 0,3-0,8$ со средним значением 0,5 [42, с. 22]. С учётом вышеизложенного в качестве среднего выбрано значение $\langle \alpha \rangle = 0,9$.

Поскольку плотность потока изменяется с частотой и первоначально плотности потока источников взяты из каталога на частоте 102,5 МГц, то необходимо сделать пересчет плотности потока на частоту наблюдений, т.е. на центральную частоту наблюдений – 110,25 МГц. Правильный подход – это построение спектра, т.е. зависимости $S(\nu)$, однако ввиду близости частот, и предполагая, что все калибровочные (эталонные) источники имеют одинаковую зависимость (одинаковую степень наклона спектра $\langle \alpha \rangle$), по формуле $S = S_0 \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{\langle \alpha \rangle}$ можно пересчитать плотность потока радиоэталонов S_0 с частоты $\nu_0 = 102,5$ МГц, использованный в [39], на текущую центральную частоту радиотелескопа БСА3 – $\nu = 110,25$ МГц.

Определение коэффициента K/Ян. На сеанс (день) наблюдений по координатам радиоэталона J2000 $[\alpha, \delta]$ определяется момент его кульминации $T_{\text{кул}}$ на широте местонахождения БСА3. Из часовой порции данных «вырезается» сигнал общей полосы приёма телескопа продолжительностью $200/\cos \delta$ секунд отцентрованный по $T_{\text{кул}}$. Производится процедура калибровки из оцифрованных вольт к единицам условной температуры – градусам. На следующем шаге «вычитается» базовая линия окружающего фонового излучения путём линейной интерполяции. Поскольку отклик идеального постоянного «единичного» источника

повторяет диаграмму направленности луча – $[\sin(ax)/(ax)]^2$, то коэффициент перевода в Ян (отношение единиц условной антенной температуры [К] к плотности потока [Ян]) определяется, как соотношение площади полученного «отклика» радиоэталона к площади идеального «единичного» источника, вычисленной по формуле (I.3.1).

Значительное влияние на качество получаемых наблюдательных данных на БСА оказывает состояние неоднородностей в электронной плотности ионосферы Земли, «быстрые» флуктуации таких неоднородностей (с характерным временным масштабом в от долей секунды до минут) и, определяющие в значительной степени возмущения ионосферы, вспышечные явления на Солнце (спорадические вспышки раз в десятки дней, временной масштаб – от секунд до часов), которые, соответственно, обусловлены во многом 11-летним циклом солнечной активности. Эффекты нерегулярной рефракции на неоднородностях электронной плотности в ионосфере для радиоисточников приводят к значительным случайным вариациям амплитуд их откликов в тех лучах, где они регистрируются. Однако, эти случайные вариации амплитуд откликов за счет ионосферной рефракции можно попытаться исправить, используя отношения амплитуд откликов одного и того же источника в двух соседних лучах (см. выше формулу I.5). Возмущение ионосферы может вызывать кажущееся увеличение наблюдаемого потока от радиоисточников в 2-3 раза по сравнению со «спокойным» состоянием ионосферы.

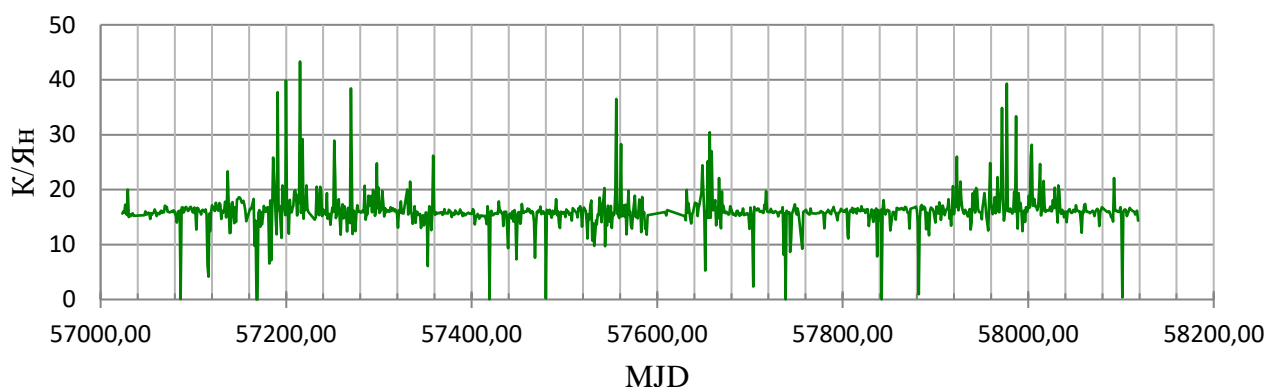


Рис. I.6 Коэффициент $K/\text{Ян}$, определённый по радиоисточнику 3C405. Ось y – коэффициент $K/\text{Ян}$, ось x – время в днях. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

На графике зависимости от времени коэффициента $K/\text{Ян}$ по радиоисточнику 3C405 (рис. I.6) выбросы обусловлены влиянием состояния ионосферы, что видно на вейвлет-диаграмме по эталонному радиоисточнику 3C98 (рис. I.7), на которой, помимо основной определяющей годичной гармонике, присутствует колебание с периодом $11/4 = 2,75$ года, вызванная 11-летним циклом солнечной активности.



Рис. 1.7 Результаты вейвлет-анализа (вейвлет-диаграмма) для радиоэталона 3C98 за 2014-2024 годы. При анализе использовался вейвлет Морле. Ось y – период (годы), ось x – временной интервал (годы). Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

При калибровке по «радиоэталонным» источникам процедура расчёта коэффициента перевода градусов в янские (К/Ян) использует для снижения влияния ионосферы три ближайших по прямому восхождению (весовой коэффициент 0,7) и склонению (весовой коэффициент 0,3) к пульсару (α, δ) радиоисточников (α_i, δ_i) : $[0,7 \cdot |\alpha - \alpha_i| + 0,3 \cdot |\delta - \delta_i|] \xrightarrow{\min} i$.

Поправка за электронный наклон антенны к меридиану. Помимо получения коэффициентов перевода градусов в янские эталонные радиоисточники использовались для получения поправок за электронный наклон антенны БСАЗ по отношению к меридиану (рис. 1.8). Поправка определяется по максимальной корреляции отклика радиоэталона с отцентрованного по $T_{кул}$ идеальным постоянным источником (формой диаграммы единичного луча БСАЗ). Величина поправки по прямому восхождению зависит от склонения источника.

Разработанная методика обработки данных позволили исследовать не только пульсары, но и обнаружить новые вращающиеся радиотранзиенты [20].

Необходима исключительно прецизионная методика обработки (фазовый анализ) моментов приход импульсов от указанных пульсаров. Эти моменты зависят от множества причин – орбитального и вращательного движения Земли, небесных координат и собственного движения пульсара, величины гравитационного потенциала Солнечной системы в точке наблюдения и вдоль траектории распространения импульса, межпланетной и межзвёздной плазмы.

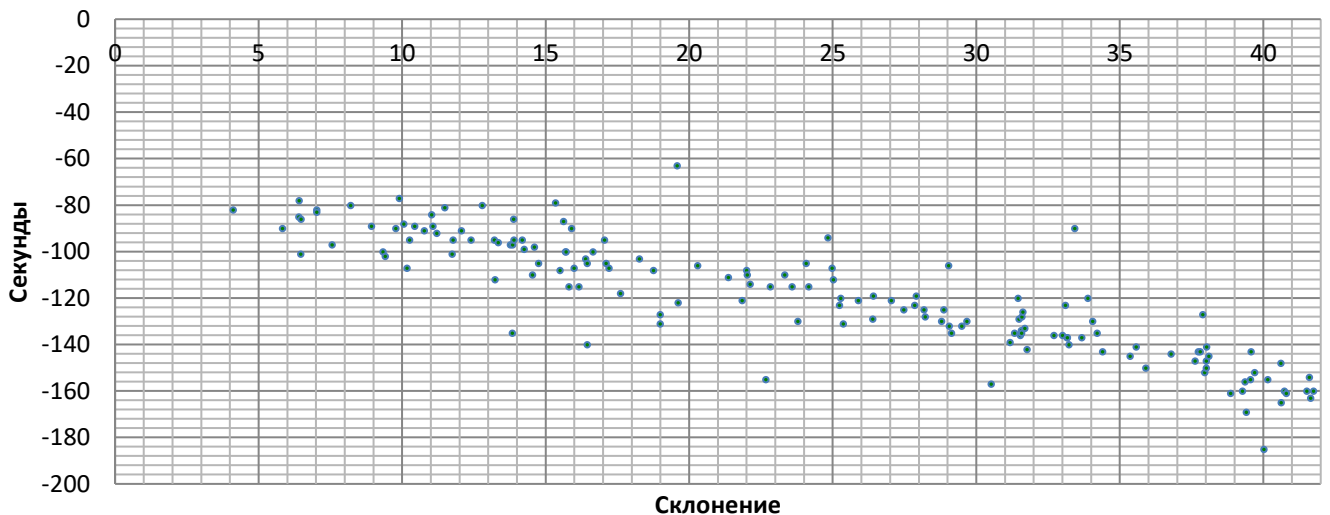


Рис. 1.8 Поправка по прямому восхождению за наклон антенны. Ось y – поправка за прямое восхождение относительно табличного значения источника (секунды), ось x – склонение лучей диаграммы направленности БСА (градусы). Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.

Определение эпохи прибытия отдельного импульса называется хронометрированием пульсаров или пульсарным таймингом. Время прихода импульса зависит от множества причин: от положения и собственного движения пульсара на небесной сфере, от орбитального и вращательного движения Земли, от гравитационного потенциала тел солнечной системы в точке наблюдения и скорости наблюдателя. Для ближайших пульсаров необходимо знать параллаксы (или расстояния), так как при движении Земли по орбите расстояния будут меняться с годичным периодом. Включение расстояния до пульсара в модель вычисления моментов прихода импульсов важно и по причине явления, называемого межзвездной дисперсией. Задержка импульсов одной последовательности относительно другой вызвана дисперсией радиосигнала – разной фазовой скоростью радиоволн разных частот в ионизированной межзвездной среде. Так как величина дисперсии зависит от расстояния до пульсара, то она должна быть известна заранее, до начала хронометрирования ([43], [44]).

§ 1.4. Первичная обработка данных

Индивидуальные импульсы радиоизлучения данного пульсара, субимпульсы, могут быть совершенно непохожими друг на друга, однако после усреднения порядка нескольких сотен таких субимпульсов формируется средний профиль, остающимся неизменным при последующих усреднениях и является оригинальным для каждого пульсара. У многих пульсаров ширина среднего профиля зависит от частоты. Так и должно быть, если предположить, что более низкие частоты излучаются выше в магнитосфере, где силовые линии поля расходятся под большим углом [35, с. 379].

Для формирования среднего профиля пульсара за сеанс обработка исходных данных проводится следующим образом:

1) По координате пульсара (α , δ) на 2000 год (J2000) из каталога пульсаров ATNF [1] определяется момент кульминации пульсара $T_{\text{кул}}$ на широте местонахождения БСАЗ на день наблюдений, и дополнительно делается поправка за наклон антенны в зависимости от значения склонения пульсара. Эта поправка связана с тем, что антенна имеет небольшой наклон в плоскости восток-запад и её диаграмма «смотрит» под небольшим углом к меридиану. Поправка для склонения пульсара определяется интерполяцией методом наименьших квадратов по данным радиоэталонных источников.

2) От момента кульминации $T_{\text{кул}}$, который определён в пункте 1, в каждую сторону откладываются временные отрезки длиной $100/\cos \delta$ секунд (по половинной мощности диаграммы направленности антенны), т.е. полная длина взятого временного промежутка составляет $200/\cos \delta$ секунд, «вырезаемого» из часовой записи, содержащей 48 лучей, каждый из которых записан в 32-х частотных каналах. Выполняется двухшаговая калибровка сигнала – использование шумовых сигналов известной температуры (перевод в градусы) и калибровочных радиоисточников (перевод в янские). Вырезанные данные с пульсаром нужно усреднить для получения среднего профиля. Здесь есть две главные процедуры – это учет меры дисперсии и сложение (сворачивание) импульсов пульсара с известным периодом, и побочные процедуры – вычеты базовой линии в каждом частотном канале и обнуление сигнала от калибровочной ступеньки, если ступенька попала в запись пульсара в исследуемый сеанс (день).

«Вычет» окружающего фонового излучения в каждом канале производится следующим образом: запись разбивается на фиксированные временные интервалы, на первом интервале определяется медианное значение, которое присваивается средней точке первого интервала, процедура повторяется для следующего интервала, линейно интерполируя прямой, соединяющей середины интервалов, и значения которой вычитаются из данных. Значение величины разбиения не превышает одной секунды, для пульсаров с частотой более одного герца оптимально использование значения в 2-4 раза менее периода пульсара. Алгоритм по таким фиксированным временным отрезкам распространяется до окончания записи. После вычитания базовой линии фонового излучения сигнал складывается с учетом известного периода в каждом частотном канале независимо. Получаются 32 дорожки, длина которых в точках равна (период пульсара в мс / частоту опроса в мс).

3) В каждом среднем профиле, найденном в каждом частотном канале, определяется среднеквадратичное значение шума (сигма шумов) $\sigma_{\text{ш}}$ и новая базовая линия (базовое значение) – постоянное значение, минимизирующее значение сигмы шумов за вычетом импульса и других проявлений активности в профиле (интеримпульсов, предимпульсов, постимпульсов и т.п.).

Базовое значение определяется как медианное значение массива из первых 55-90% упорядоченных по возрастанию значений всех точек профиля. Процент точек профиля, используемых для получения значения базовой линии, зависит от вида среднего профиля пульсара и качества дня. Реализована итерационная схема определения процента точек, путём последовательного приближения к его оптимальному значению. Полученная базовая линия вычитается из среднего профиля. Сигма шумов определяется по значениям точек определённого выше массива – возведение в квадраты, суммирование и извлечение квадратного корня.

4) После калибровки необходимо сложить все частотные каналы с учетом известной меры дисперсии пульсара для получения конечного среднего профиля. Делаются сдвиги в частотных каналах для учета меры дисперсии. Однако, в данных могут присутствовать помехи двух принципиально разных видов.

Первый вид помех – это частотные помехи, когда какой-то частотный канал или каналы в данный сеанс (день) имеют сильные добавочные шумы. Этот канал(ы) нужно удалить, чтобы он не испортил средний профиль. Найти такой канал проще всего, сравнивая сигмы шумов в каждом частотном канале. Импульс пульсара не входит в определение сигмы шумов, шумы вне импульса должны быть примерно одинаковыми во всех частотных каналах. Априори плохим каналом считается нулевой канал – самый низкочастотный канал, отличающийся низким качеством. Второй способ отсеивания работает после того, как сделана полная обработка всех данных за год (или больше). Для этого вычисляется значение $\sigma_{ш}$ за каждый сеанс (день) и в каждом канале. Если в какой-то сеанс (день) какой-то частотный канал в 5 раз больше (равен $5\sigma_{ш}$), чем обычные значения, то в данный день данный частотный канал не учитывался. Другим критерием является то, что если максимум в среднем профиле канала превышает 5 сигм максимумов средних профилей 32-х каналов, то этот канал отбрасывается.

Второй вид помех – это помехи типа выбросов (импульсные помехи). Обычно они короткие от одной до нескольких точек. Они имеют нулевую меру дисперсии и проходят сразу по всем частотным каналам. Борьба с такими помехами проводится по частотным каналам исходной записи ($200/\cos \delta$ секунд). Импульсные помехи, на данный момент времени, в исходной записи БСА3 не подавляются.

5) Исследуемый пульсар наблюдается не в зените, его координаты чаще всего попадают между лучами БСА3, направления которых фиксированы на небе. Т.е., наблюдаемая плотность потока в среднем профиле меньше, чем должна была бы быть. Поэтому полученные оценки плотности потока нужно разделить на соответствующие коэффициенты (все они меньше или равны единице), учитывающие особенности диаграммы направленности антенны БСА. Такими коэффициентами являются: поправка за высоту источника над антенной, коэффициент

эффективной площади антенны, коэффициент, учитывающий отклонение диаграммы направленности луча $[\sin(x)/x]^2$ от прямоугольной формы.

В итоговой постобработке профилей порядка 365 записей за год. Для каждого канала определяется среднемедианное значение высоты импульса среднего профиля и сигма шумов $\sigma_{ш}$ среднего профиля за все сеансы (дни) наблюдений. По всем значениям записей сигмы шумов за год определяется $\langle \sigma_{ш} \rangle$. Если в какой-то день значение сигмы шумов в половине каналов, больше $5\langle \sigma_{ш} \rangle$ определенного за все дни, то такой канал отбрасывается.

Получены таблицы, у которых количество ячеек массива отражает длину среднего профиля. Так как период не равен целому числу точек отсчета, то при его суммировании можно выбрать подход, когда суммируется с округлением длины массива до ближайшего целого числа в меньшую сторону, при этом накапливаемый хвост отбрасывается, либо суммируется с округлением длины массива до ближайшего целого числа в большую сторону, когда накапливаемый хвост округляется до следующей точки. В настоящей реализации производилось округление до ближайшего целого числа в большую сторону.

На языке C++, с использованием следующих, размещённых в сети Интернет инструментов:

- библиотеки SOFA (Standards of Fundamental Astronomy) Международного Астрономического Союза, реализованной на языке C [45];
- эфемерид EPM2017 и библиотеки для работы с эфемеридами libephaccess, реализованной на языке C, Института прикладной астрономии РАН [46];
- для Фурье-анализа библиотека FFTW [47];
- для вейвлет-анализа библиотека NFFT [48];
- для работы с файлами Excel библиотек SimpleXlsxWriter [49] и Xlnt [50], реализованные на языке C++,

разработан комплекс программ для обработки результатов наблюдений:

- формирование коэффициентов K/Ян и поправок за наклон антенны к меридиану «радиоэталонных» источников;
- автоматизированное формирование изменения потока пульсара;
- определение моментов приход импульсов от пульсаров.

§ 1.5. Помеховая обстановка

Открытие импульсных сигналов внеземной природы, которые нельзя обнаружить с помощью стандартного поиска периодического излучения, вернуло к жизни поиск диспергированных импульсных сигналов как дополнительный способ поиска при проведении

обычного поиска пульсаров. Поиск этих диспергированных сигналов сопряжен с рядом сложностей. Во-первых, для поиска и исследования отдельных импульсов нужны радиотелескопы, имеющие высокую мгновенную чувствительность, позволяющую найти одиночный импульс на приемлемом отношении сигнала к шуму (S/N). Для сравнения рассмотрим поиск обычного пульсара, имеющего период $P_0 = 1$ с. Десятиминутной записи такого пульсара достаточно для увеличения S/N почти в 25 раз. То есть, пульсар от индивидуальных импульсов которого даже следа не видно в сырой записи, может без особых проблем исследоваться на радиотелескопе со средними характеристиками. Во-вторых, при поиске новых радиотранзиентов мы «а priori» не знаем ни меру дисперсии импульса, ни ширину его профиля, что увеличивает количество переборов при поиске. При этом в сырых данных ширина шумовой дорожки может меняться из-за изменения температуры фона, меняя при этом среднеквадратичные отклонения шума. Это приводит к необходимости постоянного контроля шумов в локальных точках. В дополнение к этому на низких частотах (метровый диапазон длин волн) к уширению дорожки может привести и попадание мерцающего (компактного) источника на луч зрения одновременно с импульсным сигналом. Мерцания компактного радиоисточника на межпланетной плазме уширяют шумовую дорожку. Если в диаграмму направленности антенны одновременно попадают мерцающий источник и диспергированный импульс, условия наблюдений могут ухудшиться. Помимо этого, в записях регулярно обнаруживаются помехи, импульсы которых могут иметь признаки диспергирования. Поэтому трудно разработать систему поиска, которая однозначно будет отделять диспергированные импульсы внеземной природы от помех. Ситуация отделения реальных сигналов от помех при поиске классических пульсаров выглядит гораздо лучше. Повторяемость сигналов по звездному времени, одинаковость периодов, одинаковая мера дисперсии, схожесть средних профилей за разные дни, возможность накопления сигнала за разные дни однозначно свидетельствуют в пользу открытия нового пульсара. В ходе наблюдений на БСА ФИАН постоянно регистрируются импульсные сигналы. Специальное исследование по проверке качества данных, получаемых в ходе мониторинга, показало, что примерно пятая часть этих импульсных сигналов связана с пульсарами, а все остальные являются помехами [51, с. 334]. Статистический подход, используемый при проверке качества мониторинговых данных, позволил детектировать от нескольких до нескольких тысяч импульсов шести известных пульсаров, а также открыть 4 новых RRAT (J0941+45, J1218+47, J1929+42, J2214+45) в данных, записываемых на новом регистраторе (рис. I.9) [51, с. 339].

Чаще всего импульс наблюдается либо в одном луче, либо во всех лучах одновременно. Реальные пульсарные импульсы должны наблюдаться в одном или в двух смежных лучах. Это, конечно, не исключает помех, которые тоже могут попадать только в один луч. Импульсы, наблюдаемые во всех лучах, в подавляющем большинстве случаев являются помехами. Отдельные очень мощные импульсы пульсаров также могут наблюдаться во многих лучах, появляясь в боковых лепестках БСА ФИАН. Возможны и другие источники генерации данного вида импульсов.

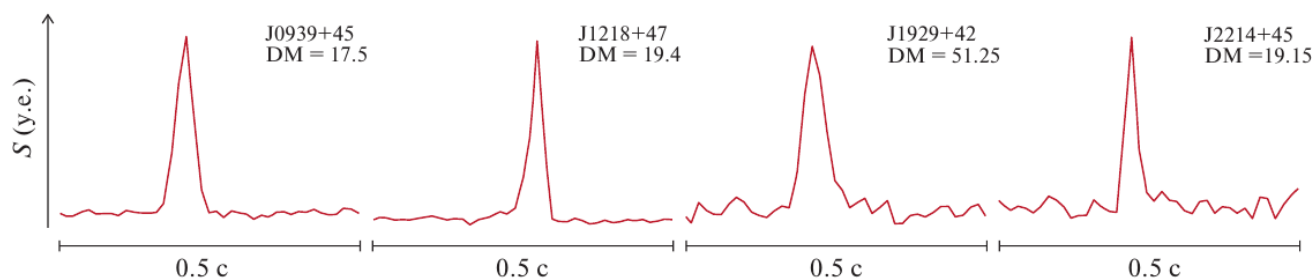


Рис. 1.9 Профили сильнейших импульсов, обнаруженных транзиентов. Ось y – плотность потока в у.е., ось x – временной интервал. Результат диссертанта из работы [51, с. 340].

На всем интервале наблюдений с 21.10.2021 по 31.08.2022 гг. (после вычета пропусков данных всего было проанализировано 7496 файлов-часов, или 312,33 звездных сут.) в 32 лучах было обнаружено 2,5 млн импульсных событий. Однако многие импульсы одновременно проявлялись в нескольких лучах. Поэтому такие проявления автоматически объединялись в одно событие. Всего в 7496 файлах-часах найдено 160504 взаимосвязанных событий (на многих лучах один и тот же импульс), то есть на один час в среднем приходится 21,4 события, или примерно событие 1 раз / 3 мин.

Распределение количества одновременных событий по разным лучам представлено на рис. 1.10. Из гистограммы видно двугорбое распределение событий, где максимумы приходятся на события, видимые лишь в одном луче, и на события, наблюдаемые во всех 32 лучах. Левый горб должен содержать все события, связанные с детектированием реальных импульсов и, возможно, часть помех. Правый горб должен содержать все помеховые случаи, плюс, возможно, отдельные самые мощные импульсы пульсаров могут наблюдаться во многих лучах, появляясь в боковых лепестках БСА ФИАН [52]. Также в результате дополнительного анализа мы уже можем заявить, что среди данных есть значимое число (до десятков процентов) событий, порожденных генерацией радиоволн при прохождении частиц космических лучей с высокими энергиями через

ионосферу и атмосферу. Причем они способны проявить себя как в одном луче, так и во многих лучах сразу.

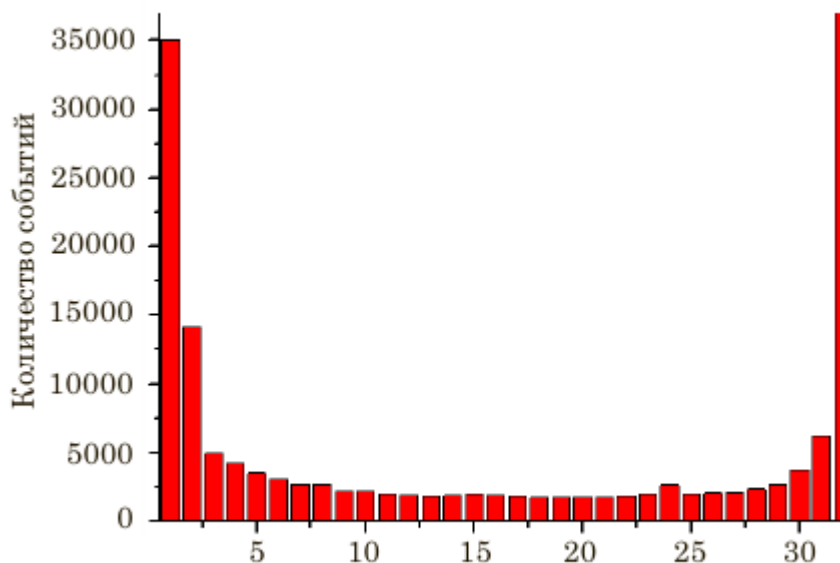


Рис. I.10 Гистограмма распределения импульсов по лучам диаграммы направленности БСА-3. Ось y – количество детектированных импульсов, ось x – номер луча. Результат диссертанта из работы [51, с. 337].

Основная часть обнаруженных импульсов связана с помехами, и для выделения импульсов пульсаров из выборки пришлось применять кластерный анализ. За почти годовой период наблюдений в шестиканальных данных с шириной канала 415 кГц и временем чтения одной точки 0,1 с детектировано больше 51 тыс. импульсов, имеющих признаки «пульсарности». Для каждого из этих событий импульс на высокой частоте приходит раньше, чем на низкой частоте, и регистрируется в одном или двух соседних лучах. Проверка этих импульсов показывает, что около половины из них принадлежат пульсарам, а остальные импульсы – это разного рода артефакты обработки.

Используя разработанные методы, мы обнаружили еще 2 RRAT (J0249+52, J0744+55) (рис. I.11) [20]. Общее количество известных RRAT невелико. В базе данных ATNF [1] и RRATalog [53] на 2022 г. числится примерно 100-150 вращающихся радиотранзиентов. При этом оценки показывают, что ожидаемое количество RRAT может быть в два раза больше, чем количество обычных пульсаров, следовательно, обнаружена ничтожная часть вращающихся радиотранзиентов, при этом почти все такие объекты открыты на нескольких радиотелескопах, имеющих высокую мгновенную чувствительность.

Появление импульсов RRAT непредсказуемо. Типичное время между двумя последовательными импульсами может быть от минут до часов, но может достигать и десятков

часов. Таким образом, для поиска радиотранзиентов, помимо антенны с высокой флуктуационной чувствительностью, нужно иметь длительные ряды наблюдений.

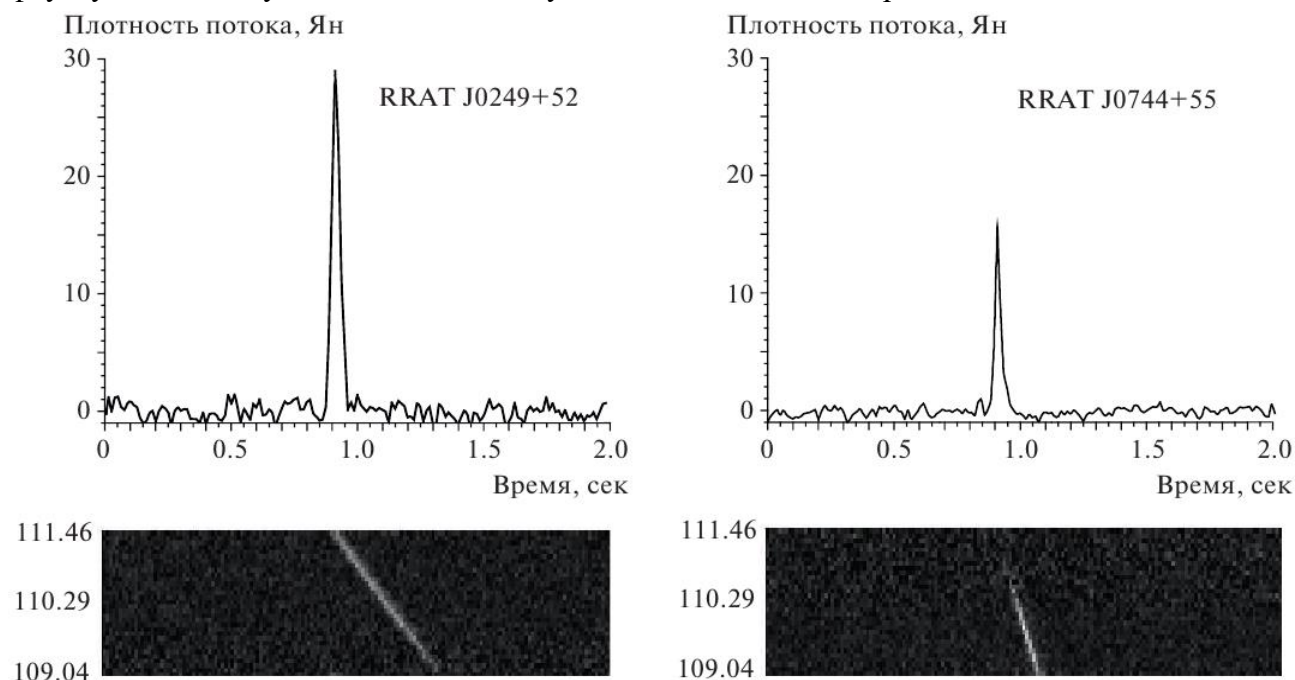


Рис. 1.11 Верхняя панель: профили сильнейших импульсов найденных транзиентов, нижняя панель: динамические спектры этих импульсов (ось y – частоты каналов в МГц, ось x – временной интервал, совпадающий с интервалом профиля). Результат диссертанта из работы [20, с. 520].

Если обычные пульсары излучают импульсы на каждом или почти на каждом обороте, и их поиск может быть проведен стандартным образом с помощью спектров мощности или с помощью периодограмм, то у RRAT между наблюдаемыми последовательными импульсами может проходить много периодов без излучения импульса. Поэтому при поиске стандартными способами такие пульсары не обнаруживаются.

У указанных двух RRAT (J0249+52, J0744+55) наблюдается один импульс за 2,5 часа наблюдений. Если предположить, что найденные RRAT имеют период порядка $P_0 = 1$ с, то их нуллинги будут равны 99,99%. То есть мы видим один импульс из 10 000. Верхние пиковые плотности потока в среднем профиле S_{peak} у J0249+52 и J0744+55 оценены нами, соответственно, в 0,3 и 0,2 Ян. В этом случае наблюдаемые плотности потоков импульсов превосходят верхние оценки пиковой плотности потока в среднем профиле в 40-100 раз и более. Такая разница пиковых плотностей в отдельном импульсе и в среднем профиле может быть присуща как пульсарам с гигантскими импульсами, так и пульсарам с длинным хвостом распределения импульсов по энергиям. Отсутствие регулярного излучения говорит в пользу нуллинговой природы найденных RRAT. Однако для однозначного выбора гипотезы о природе найденных J0249+52 и J0744+55 нужны наблюдения на более чувствительных, чем БСА ФИАН, радиотелескопах.

§ 1.6. Выводы по главе I

Обзор на БСА3 ведется круглосуточно более 10 лет, и для каждого источника, попадающего в покрываемую площадку накоплены наблюдения за очень длительный интервал времени. Становится возможным проводить долговременные исследования пульсаров с недоступной частотой наблюдательных сессии (каждый день), складывать сигналы для получения недостижимого для других радиотелескопов соотношением «сигнал-шум» (S/N) для средних профилей.

Показано, что высокая чувствительность БСА позволяет обнаруживать новые транзиенты типа RRAT.

Разработана методика обработки наблюдений как для пульсаров, так и для вращающихся радиотранзиентов. Также разработана методика борьбы с помехами, появляющимися в отдельных частотных каналах и помех в виде импульсных сигналов, применительно к наблюдениям на радиотелескопе БСА. При отработке методики поиска импульсных диспергированных сигналов найдено 6 новых RRAT.

Используя разработанные методы обработки наблюдений и высокую чувствительность БСА3:

В **Главе II** проведён поиск интеримпульсов в выборке 96 пульсаров, наблюдавшихся на радиотелескопе, Большая Синфазная Антенна (БСА) в Пушинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS). Осуществлён статистический анализ пульсаров с интеримпульсами с целью уточнения модели эволюции угла между магнитной осью и осью вращения, т.е. между магнитным моментом \vec{m} и угловой скоростью $\vec{\Omega}$.

В **Главе III** исследована межзвёздная среда в направлении двух сильных пульсаров J0826+2637 и J0953+0755.

Глава IV посвящена поиску слабых компонент в средних профилях пульсаров J1543+0929 и J2234+2114.

В **Заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В **Приложениях** приведены опорные радиоисточников с известными (и постоянными) плотностями потоками, блок схема программы обработки.

Глава II. Интеримпульсное излучение в полной выборке пульсаров

§ II.1. Эволюция угла наклона пульсара

Радиопулсары – это быстро вращающиеся нейтронные звезды, обладающие сильным магнитным полем, излучение которых мы видим благодаря углу между осью вращения и осью магнитного поля. Если при обороте нейтронной звезды вокруг оси вращения в луч зрения попадает конус излучения, вдоль центральной оси которого располагается линия, соединяющая магнитные полюса, мы можем наблюдать вспышку радиоизлучения. Согласно каталогу ATNF [1], типичная полуширина импульса в долях периода составляет 1-10%, что позволяет грубо оценить ширину конуса как 3-30°.

Очевидно, что наблюдаемая полуширина импульса зависит не только от угла наклона между осью вращения и осью магнитного поля γ , но и от импакт угла ζ , под которым располагается центральная линия в конусе излучения по отношению к лучу зрения. Например, если угол между осями мал $\gamma \sim 0^\circ$ (соосный ротатор), конус излучения может захватывать ось вращения и наблюдаемый импульс может занимать весь период. Есть вероятность, что такой радиопулсар останется незамеченным в обычных пульсарных наблюдениях, когда складывается много импульсов с известным периодом, и потом ищется пик в среднем профиле. Другой крайний случай, когда ось вращения и ось магнитного поля ортогональны $\gamma \sim 90^\circ$ (ортогональный ротатор). В этом случае, если ось вращения ортогональна лучу зрения, наблюдаются оба магнитных полюса. Пулсары, у которых на каждом обороте (периоде) пулсара наблюдаются два импульса, называются пулсарами с интеримпульсами. В настоящее время известно около 50 таких радиопулсаров, в которых наряду с более сильными главными импульсами (main pulses – MP) наблюдаются более слабые импульсы – интеримпульсы (interpulses – IP), расположенные в промежутке между главными импульсами. Эта популяция представляет особый интерес для понимания структуры магнитосферы пулсаров и механизмов их излучения. Они могут быть как соосными, так и ортогональными ротаторами [24]. Для соосных ротаторов интеримпульс может появиться, если детектируемое излучение образуется в двух локальных зонах, находящихся на разных расстояниях от полярной шапки. В рамках традиционных представлений о генерации наблюдаемого излучения в пределах довольно узкого конуса открытых силовых линий дипольного магнитного поля наличие интеримпульса могло бы свидетельствовать о том, что данный пулсар относится к ортогональным ротаторам, т.е. к источникам, у которых наблюдатель видит излучение с обоих полюсов. В этом случае расстояние между MP и IP по долготе должно составлять 180°, при этом полному периоду соответствует 360°. Однако

исследования показывают, что далеко не у всех пульсаров интеримпульс расположен ровно посередине между главными импульсами.

Более того, у ряда объектов было обнаружено межимпульсное излучение, которое трудно объяснить в рамках предположения о перпендикулярности осей. Наиболее разумное описание таких особенностей возможно, если предположить, что эти пульсары близки по структуре к соосным ротаторам, т.е. у них малы углы между осями вращения и вектором магнитного момента нейтронной звезды, который в общепринятых моделях отождествляется с осью конуса излучения.

Для идеального ортогонального ротатора у наблюдаемых импульсов должны быть близкие наблюдаемые плотности потока. Однако на практике у известных ортогональных ротаторов наблюдаемые плотности потока главного импульса и интеримпульса могут отличаться в несколько раз (см. таблицу 1 в работе [54]).

Геометрия определяет нам необходимые условия для видимости импульса, однако есть и физические условия, которые определяют, возникнет ли радиоимпульс. Согласно современным представлениям [32], нейтронная звезда будет видна как радиопульсар, если в полярных областях соблюдаются условия, необходимые для рождения вторичной электронно-позитронной плазмы. Совокупностью физических параметров, которые определяют существование радиоизлучения, являются период пульсара P , а также величина и геометрия магнитного поля.

Пульсары рождаются в результате гравитационного схлопывания сверхновых, и появляются в левом верхнем углу диаграмме период-производная периода $P - \dot{P}$. При постоянном магнитном поле постепенно со временем смещаются вправо и вниз вдоль линии постоянного B , пересекая линии постоянного динамического возраста $\tau_D = P/2\dot{P}$. Поскольку нейтронная звезда теряет энергию вращения несколькими механизмами: на генерацию пульсарного ветра (магнитодипольное излучение), который является основным, на токовые потери, потери на излучение нейтронов, движущихся внутри нейтронной звезды, потери через плазменный диск, расположенный около нейтронной звезды, потери, связанные с нагревом токами и электрическими полями в верхних слоях магнитосферы, торможение при движении нейтронной звезды через окружающую плазму, её скорость вращения постепенно уменьшается, а период P , соответственно, увеличивается. Каждому из указанных механизмов будут соответствовать своя зависимость $\dot{P}(P)$ и свои треки на диаграмме период-производная периода $P - \dot{P}$. При замедлении вращения наступают условия, когда нейтронная звезда перестает быть радиопульсаром. На диаграмме $P - \dot{P}$ такие радиопульсары приближаются к линии смерти.

Магнитодипольное излучение. В соответствии с классической электродинамикой, если вращающийся магнитный диполь имеет угол с осью вращения γ , то он является источником

электромагнитного излучения на частоте вращения. Магнитодипольное излучение $P_{rad} = \frac{2 \dot{m}_\perp^2}{3 c^3}$, где $m_\perp = m \sin\gamma$ – перпендикулярная оси вращения пульсара компонента магнитного дипольного момента. Для равномерной намагниченной сферы с радиусом R и поверхностной магнитной силы B , величина магнитного дипольного момента $m = BR^3$. Следует отметить, что указанная формула справедлива для экватора, сила магнитного поля в полярных областях пульсаров, которые более важны для поведения магнитосферы, вдвое больше [12, с. 85]. Для наклоненного магнитного диполя, вращающегося с периодом $\Omega = 2\pi/P$:

$$P_{rad} = \frac{2 \dot{m}_\perp^2}{3 c^3} = \frac{2 m_\perp^2 \Omega^4}{3 c^3} = \frac{2}{3 c^3} (BR^3 \sin\gamma)^2 \left(\frac{2\pi}{P}\right)^4, \quad (\text{II.1})$$

где P – период пульсара. Магнитодипольное излучение происходит на такой низкой частоте $\nu_{md} = P^{-1} \ll \nu_0 = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \sim 1$ кГц, которое не может распространяться через межзвездную плазму, и существует механизм переработки энергии вращения в электромагнитные волны более высоких энергий. Иницируемое магнитным диполем электрическое поле ионизует вещество и вырывает заряды с поверхности нейтронной звезды. Заряд начинает ускоряться электрическим полем вдоль магнитной силовой линии (поперечная составляющая импульса частицы в таком сильном магнитном поле отсутствует). Из-за кривизны силовой линии появляется ускорение, приводящее к излучению энергичного гамма-кванта. Фотоны, летящий под углом к силовой линии магнитного поля, в сильном поле порождают электрон-позитронную лавину в магнитосфере пульсара. Генерируемая таким образом плазма экранирует электрическое поле и заполняет пространство внутри замкнутых силовых линий магнитного поля внутри светового цилиндра, при этом часть вторичной плазмы, текущая вдоль открытых (незамкнутых) силовых линий, пересекает световой цилиндр и уходит на бесконечность. Именно в кинетическую энергию этих релятивистских частиц и уходит почти вся энергия вращения нейтронной звезды. Неустойчивости в плазменном потоке частиц внутри или вблизи светового цилиндра, движущихся вдоль открытых силовых линий с релятивистскими скоростями, рождают электромагнитные радиоволны в узконаправленном пучке. Именно это высокочастотное нетепловое радиоизлучение и наблюдается от пульсаров. Доля энергии, уносимая радиоизлучением, крайне мала (около 10^{-4} - 10^{-6} от полных потерь вращательной энергии нейтронной звезды).

Энергия торможения. Кинетическая энергия вращения объекта с моментом инерции I равна

$$E = \frac{I\Omega^2}{2} = \frac{2\pi^2 I}{P^2}. \quad (\text{II.2})$$

Момент инерции сферы радиуса R , массы M и однородной плотности $\rho = 3M/4\pi R^3$, вращающаяся вокруг оси z :

$$I = \int_{-R}^R \left(\int_0^{\sqrt{R^2-z^2}} \rho r^2 2\pi r dr \right) dz = \pi \rho \int_0^R (R^2 - z^2)^2 dz = \frac{8\pi \rho R^5}{15} = \frac{2MR^2}{5}. \quad (\text{II.3})$$

Величина энергии торможения, с которой меняется энергия вращения:

$$-\dot{E} \equiv -\frac{dE_{rot}}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} I \Omega^2 \right) = -I \Omega \dot{\Omega} = \frac{1}{6} \frac{(BR^3 \sin \gamma)^2}{c^3}, \quad (\text{II.4})$$

приблизительно эквивалентна магнитнодипольному излучению $-\dot{E} \approx P_{rad}$. Учитывая $\Omega = 2\pi/P$ и $\dot{\Omega} = 2\pi(-P^{-2}\dot{P})$, выражается в наблюдаемых переменных: $-\dot{E} = \frac{4\pi^2 I \dot{P}}{P^3}$.

$$\frac{2}{3c^3} (BR^3 \sin \gamma)^2 \left(\frac{2\pi}{P} \right)^4 \approx \frac{4\pi^2 I \dot{P}}{P^3}, \quad (\text{II.5})$$

$$\sin \gamma \approx \sqrt{\frac{3c^3 I P \dot{P}}{8\pi^2 R^6 B^2}} = \sqrt{\frac{3c^3}{8\pi^2 R^6} \frac{\sqrt{P \dot{P}}}{B}}. \quad (\text{II.6})$$

Помимо замедления вращения нейтронной звезды, существует и изменение угла γ между осью вращения и магнитной осью нейтронных звезд, как видно в том числе из приблизительного равенства (II.6). Предпринималось много попыток решить проблему эволюцию этого угла, включая статистический анализ ([55], [56], [57], [58]). Например, исследования определения напрямую (через анализ распределение углов) и косвенно (через анализ наблюдаемой ширины импульсов) показали, что статистически угол наклона γ убывает с возрастанием периода P и динамического возраста $\tau_D = P/2\dot{P}$, т.е. пульсар эволюционирует к соосному ротатору. При этом полученные результаты анализа более чем 45 лет наблюдений пульсара в Крабовидной туманности, обнаружили эволюцию пульсара в ортогональный ротатор с величиной $0,62^\circ$ за столетие [59, с. 600]. Более того, как было продемонстрировано [21], среднее значение угла наклона $\langle \gamma \rangle$, определенное для популяции наблюдаемых пульсаров, может снизиться, несмотря на то что у отдельных пульсаров он может увеличиваться.

Статистика интеримпульсных пульсаров может дать нам ключ к решению проблемы эволюции пульсаров как в сторону соосности, так и в сторону ортогональности, поскольку количество интеримпульсных пульсаров (с углами $\gamma \sim 0^\circ$ и с углами $\gamma \sim 90^\circ$) в основном зависит от эволюции угла наклона. При этом статистически должен наблюдаться либо избыток соосных ротаторов, либо избыток ортогональных ротаторов. В настоящей работе проведена статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами в выборке пульсаров, наблюдаемых в Пушинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS – Pushchino multibeam pulsar search).

§ II.2. Наблюдения пульсаров с интеримпульсами

Поскольку обзор на БСА3 ведется круглосуточно больше 10 лет, то для каждого пульсара, попадающего в покрываемую площадку накоплено больше 3000 наблюдательных сессий. Для проверки количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами, складываются средние профили за доступные дни, улучшая отношение сигнала к шуму (S/N) в импульсе, который будем располагать на расстоянии четверти от начала среднего профиля и проверять появление статистически значимых сигналов (вероятных интеримпульсов) на разных расстояниях от импульса. Для увеличения S/N можно складывать средние профили только тех пульсаров, которые видны в одном сеансе (в одной наблюдательной сессии). Поиск пульсаров на БСА3 показывает, что в мониторинговых наблюдениях регистрируется около 300 секундных пульсаров [27], однако не все эти пульсары наблюдаются регулярно с S/N достаточными, чтобы видеть их средние профили, для части из этих пульсаров профили вообще не получены [60].

Для поиска интеримпульсов нами были выбраны лишь те пульсары, у которых в наблюдательной сессии S/N главного импульса более 6. Визуально на записях легко увидеть импульсы с $S/N = 4-5$, но попытка складывать средние профили с такими S/N в автоматическом режиме привела к появлению артефактов в суммированных средних профилях. Как показано в работе [61] максимальная чувствительность при поиске пульсаров в мониторинговых данных достигается для пульсаров, имеющих $P > 0,25$ с, $DM < 100$ пк/см³, находящихся в площадке $+21^\circ < \delta < +42^\circ$. Поиск интеримпульсов проведён для пульсаров ранее обнаруженных в PUMPS и имеющих $P > 0,25$ с.

Согласно работам [54], [62] из 44 пульсаров, у которых известны IP, отношение $IP/MP \geq 0,1$ для почти 90%, а именно для 39 пульсаров из 44. Это означает, если задать критерий $S/N > 40$ для MP, в IP окажется $S/N > 4$ для 90% пульсаров, если у пульсара есть IP. При этом сигналы $S/N > 4$ определяются визуально в записях средних профилей. Поэтому, помимо условия $S/N > 6$ для импульса в отдельной сессии, мы задали также и условие $S/N > 40$ в накопленном среднем профиле. Естественно, что для сильных пульсаров могут обнаруживаться и гораздо более слабые IP. Условие $S/N > 40$ говорит о том, какую минимальную долю пульсаров, имеющих IP, можно гарантировано обнаружить. Это условие также позволяет зафиксировать полноту выборки по наблюдаемому S/N .

При обработке наблюдений делались следующие процедуры:

- нормировка исходных (сырых) данных по калибровочной ступеньке;
- сложение частотных каналов с учетом известной меры дисперсии (DM) и последующее сложение полученного ряда с учетом известного периода (P) пульсара для получения среднего профиля;

- если у МР его $S/N > 6$, профили запоминаются во временных таблицах (запоминаются также метаданные: дата и час наблюдений по UTC; номер точки в часовом файле, с которой начинается вырезание данных; номер точки максимума в профиле после сложения всех импульсов; высота импульса в единицах S/N);
- проводится оценка среднеквадратичных отклонений шума σ_n вне импульса и проводится нормировка на полученное значение (при таком подходе $\sigma_n = 1$ в каждой отобранной сессии и поэтому можно складывать средние профили за разные дни без потери S/N);
- в каждом отобранном среднем профиле производится кольцевой сдвиг до тех пор, пока главный импульс не попадет на значение около 90° на фазовом представлении профиля (при этом весь профиль разбивается на 360°);
- складываем отобранные средние профили для каждого пульсара за все годы и оставляем для анализа только те пульсары, у которых $S/N > 40$ в суммированном среднем профиле;
- ищем статистически значимые значения ($S/N > 4\sigma_n$) новых пиков (интеримпульсов) на среднем профиле (т.к. ширина IP сравнима с шириной МР, ищем не одноточечные выбросы, а структуры сравнимые по ширине с МР);
- проводим визуальную проверку найденных кандидатов.

В результате сделанной обработки получается таблицы, которые содержат средние профили пульсаров, суммированные отдельно по годам, также суммированные за все годы профили. Все это позволяет просмотреть любой из исследованных пульсаров сколь угодно подробно, включая и отдельные наблюдательные сессии.

§ II.3. Анализ наблюдений пульсаров с интеримпульсами

После обработки наблюдений осталось 96 пульсаров, имеющих $S/N > 40$ в МР после суммирования средних профилей. В таблице II.1 мы размещаем информацию по этим пульсарам. В колонках 1-3 приведены имя пульсара в аннотации J2000 (по каталогу ATNF), его P и DM. В колонках 4 и 5 приведены отношение IP/MP и расстояние между МР и IP в градусах. Для всех найденных IP значение максимума $S/N > 4$, длительность IP сравнима с длительностью МР. Точность определения фазы IP низкая, особенно для пульсаров с малыми периодами. Так как время между отсчетами составляет 12,5 мс, у пульсара с периодом 0,25 с весь средний профиль занимает 20 точек. При этом из-за особенностей сложения импульсов, когда видимый максимум МР считается точным местоположением центра импульса, ошибка определения местоположения может быть ± 1 точка от истинного значения. Положение максимума на IP, тоже может определяться с ошибкой ± 1 точка и больше. Окончательно мы даем ошибку для определения

фазы IP как $\pm 1,5$ точки и переводим эту ошибку в градусы с учетом известного периода. Отметим также, что в настоящей работе положение IP дается относительно MP и расстояние определяется так, как на рис. II.1, когда градусы отсчитываются от нуля, MP находится на фазе 90° , а последняя точка среднего профиля соответствует фазе 360° . Например, для пульсара J0953+0755 у нас отмечено положение IP на $216^\circ \pm 27^\circ$. В работе [24] говорится, что IP предшествует MP и расстояние до него составляет 152° . Так как $360^\circ - 216^\circ = 144^\circ$ – это означает, что в пределах указанных ошибок положения IP на средних профилях совпадают.

Таблица II.1 Отношение IP/MP для 96 исследованных пульсаров.

Результат диссертанта из работы [63].

Имя	P	DM	S/N(MP)	S/N(IP)	IP/MP	r(°)
J0014+4746	1,2406	30,4	193	<2,0	<0,01	-
J0034-0721	0,9429	10,9	1114	<0,5	<0,0005	-
J0039+35	0,5367	53,0	193	<1,0	<0,005	-
J0048+3412	1,2170	39,9	879	<3,0	<0,003	-
J0051+0423	0,3547	13,9	439	<4,5	<0,01	-
J0137+1654	0,4147	26,0	135	<2,5	<0,019	-
J0304+1932	1,3875	15,6	593	<0,5	<0,0008	-
J0317+13	1,9743	12,9	77	<1,0	<0,013	-
J0323+3944	3,0320	26,1	718	<3,0	<0,004	-
J0332+5434	0,7145	26,7	2176	4,0	<0,002	-
J0335+4555	0,2692	47,1	119	<2,0	<0,017	-
J0454+4529	1,3891	20,8	112	<0,5	<0,005	-
J0459-0210	1,1330	21,0	221	<1,0	<0,005	-
J0525+1115	0,3544	79,4	53	<1,0	<0,019	-
J0528+2200	3,7455	50,8	1116	<1,0	<0,0009	-
J0540+3207	0,5242	61,9	275	<3,0	<0,011	-
J0546+2441	2,8438	73,8	98	<1,0	<0,010	-
J0611+30	1,4120	45,2	528	<1,0	<0,002	-
J0612+3721	0,2979	27,1	176	<0,8	<0,005	-
J0612+37216	0,4438	39,2	281	<3,3	<0,012	-
J0613+3731	0,6191	18,9	592	11,5	0,019	155±11
J0623+0340	0,6137	54,0	53	<1,0	<0,019	-
J0629+2415	0,4766	84,1	527	<1,0	<0,002	-
J0659+1414	0,3849	13,9	83	<1,5	<0,018	-
J0811+37	1,2483	16,9	199	<1,5	<0,008	-
J0815+4611	0,4342	11,2	195	<3,0	<0,015	-
J0826+2637	0,5306	19,4	2785	41,6	0,015	180±13
J0837+0610	1,2737	12,8	2175	<0,5	<0,0003	-
J0922+0638	0,4306	27,2	3974	<2,0	<0,0005	-
J0935+33	0,9615	18,3	122	<1,0	<0,008	-
J0943+2253	0,5329	27,2	370	<2,0	<0,006	-
J0944+4106	2,2294	21,4	210	<1,5	<0,007	-
J0946+0951	1,0977	15,3	1307	<4,5	<0,003	-
J0953+0755	0,2530	2,96	164	3,6	0,022	216±27
J1115+5030	1,6564	9,18	1124	<4,5	<0,004	-
J1136+1551	1,1879	4,84	1978	<2,0	<0,001	-

Таблица II.1 Отношение IP/MP для 96 исследованных пульсаров.

Результат диссертанта из работы [63].

Имя	P	DM	S/N(MP)	S/N(IP)	IP/MP	r(°)
J1238+2152	1,1185	17,9	599	<3,0	<0,005	-
J1239+2453	1,3824	9,25	3411	<3,5	<0,001	-
J1246+2253	0,4738	17,7	150	<2,0	<0,013	-
J1313+0931	0,8489	12,0	300	<2,5	<0,008	-
J1404+1159	2,6504	18,4	228	<1,5	<0,007	-
J1509+5531	0,7396	19,6	1641	<2,5	<0,002	-
J1532+2745	1,1248	14,6	485	<1,5	<0,003	-
J1538+2345	3,4493	14,9	67	<1,0	<0,015	-
J1543+0929	0,7484	34,9	258	<0,5	<0,002	-
J1549+2113	1,2624	24,0	80	<1,0	<0,013	-
J1614+0737	1,2068	21,3	524	<2,0	<0,004	-
J1627+1419	0,4908	32,1	557	<2,0	<0,004	-
J1635+2418	0,4905	24,2	1082	<1,5	<0,002	-
J1638+4005	0,7677	33,4	97	<1,5	<0,015	-
J1645+1012	0,4108	36,1	553	<1,5	<0,003	-
J1645-0317	0,3876	35,7	692	<4,0	<0,006	-
J1649+2533	1,0152	34,4	167	<1,5	<0,009	-
J1740+1311	0,8030	48,6	835	<1,0	<0,001	-
J1741+2758	1,3607	29,1	1102	<3,0	<0,003	-
J1752+2359	0,4090	36,1	145	<1,5	<0,010	-
J1758+3030	0,9472	35,0	1502	<5,0	<0,003	-
J1813+4013	0,9310	41,5	1252	<3,0	<0,003	-
J1821+4147	1,2618	40,6	327	<4,0	<0,012	-
J1823+0550	0,7529	66,7	500	4,2	0,008	140±9
J1838+1650	1,9019	32,9	216	<2,0	<0,010	-
J1841+0912	0,3813	49,1	397	<1,5	<0,004	-
J1844+1454	0,3754	41,4	1343	<1,0	<0,0008	-
J1849+2559	0,5192	75,0	48	<3,0	<0,063	-
J1851+1259	1,2053	70,6	325	<3,0	<0,009	-
J1907+4002	1,2357	30,9	694	<2,0	<0,003	-
J1912+2525	0,6219	37,8	606	<2,5	<0,004	-
J1920+2650	0,7855	27,7	1072	<4,0	<0,004	-
J1921+2153	1,3373	12,4	4203	<0,5	<0,0001	-
J1922+2110	1,0779	217,0	47	<0,5	<0,011	-
J1929+1844	1,2204	112,0	86	<2,0	<0,023	-
J1946+1805	0,4406	16,1	288	3,3	0,011	195±16
J1952+1410	0,2750	31,5	537	3,3	0,006	188±25
J1954+2923	0,4266	7,9	192	<1,0	<0,005	-
J2007+0910	0,4587	48,7	110	<2,0	<0,018	-
J2017+2043	0,5371	60,4	40	<3,5	<0,087	-
J2018+2839	0,5579	14,1	3683	14,8	0,004	224±12
J2022+2854	0,3434	24,6	1248	<1,0	<0,0008	-
J2037+1942	2,0743	36,8	101	<1,0	<0,010	-
J2046+1540	1,1382	39,8	362	<2,0	<0,006	-
J2055+2209	0,8151	36,3	680	<3,0	<0,005	-
J2113+2754	1,2028	25,1	2199	14,5	0,007	247±6

Таблица II.1 Отношение IP/MP для 96 исследованных пульсаров.
Результат диссертанта из работы [63].

Имя	P	DM	S/N(MP)	S/N(IP)	IP/MP	$\alpha(^{\circ})$
J2116+1414	0,4401	56,2	167	<1,0	<0,006	-
J2124+1407	0,6940	30,2	120	<2,0	<0,017	-
J2139+2242	1,0835	44,1	424	<4,0	<0,009	-
J2157+4017	1,5252	71,1	500	<1,0	<0,002	-
J2208+4056	0,6369	11,8	1126	16	0,014	198±11
J2209+22	1,7769	46,3	83	<2,0	<0,024	-
J2212+2933	1,0045	74,5	122	<1,0	<0,008	-
J2215+1538	0,3741	29,2	240	5,5	0,023	120±18
J2227+3038	0,8424	19,9	564	<3,0	<0,005	-
J2234+2114	1,3587	35,0	647	<3,5	<0,005	-
J2253+1516	0,7922	29,2	226	<3,0	<0,013	-
J2305+3100	1,5758	49,5	840	8,4	0,010	189±5
J2306+31	0,3416	46,1	149	<1,0	<0,007	-
J2317+2149	1,4446	20,8	1778	7,3	0,004	279±5

Всего из 96 пульсаров, находящихся в таблице II.1, IP обнаружены у 12 пульсаров. На рис. II.1 приведены суммированные средние профили этих пульсаров. Фаза IP для 7 из 12 пульсаров с учетом приведенных ошибок отличается от 180° не больше, чем на 15° . Это значит, что пульсары J0613+3731, J0826+2637, J0953+0755, J1946+1805, J1952+1510, J2208+4056, J2305+3100 могут быть ортогональными ротаторами. Для выяснения того, являются ли они в действительности ортогональными или соосными ротаторами, необходимо проведение поляризационных наблюдений. К сожалению, на радиотелескопе БСА3 можно наблюдать лишь одну линейную поляризацию, и мы не можем провести такие наблюдения. Из 12 найденных пульсаров с IP у трех пульсаров (J0826+2637, J0953+0755, J1946+1805) IP ранее обнаружены другими наблюдателями. Согласно работе [54] J0826+2637 является ортогональным ротатором, а J0953+0755 и J1946+1805 являются соосными ротаторами. Фаза IP для 5 из 12 пульсаров далека от 180° . То есть пульсары J1823+0550, J2018+2839, J2113+2754, J2215+1538, J2317+2149 должны быть соосными ротаторами. Долю ортогональных и соосных ротаторов в части пульсаров, имеющих IP, определить нельзя, но учитывая, что J0953+0755 и J1946+1805 являются соосными ротаторами, доля соосных ротаторов в общей выборке из 12 пульсаров с найденными IP превышает 58%. Как указано выше, мы должны обнаружить не менее 90% всех пульсаров с IP, имеющих плотность потока на максимуме IP не менее 10% от пиковой плотности MP. Нам, однако, не удалось обнаружить ни одного пульсара со столь высоким значением IP/MP. Найденные значения IP/MP лежат между 0,4% (J2018+2839; J2317+2149) и 2,3% (J2215+1538), медианное значение 1,0-1,1%. При этом для оставшейся части выборки из 84 пульсаров, без найденных IP, медианная верхняя оценка отношения IP к MP равна 0,7%, максимальная оценка 8,7% (J2017+2043), минимальная оценка 0,01% (J1921+2153).

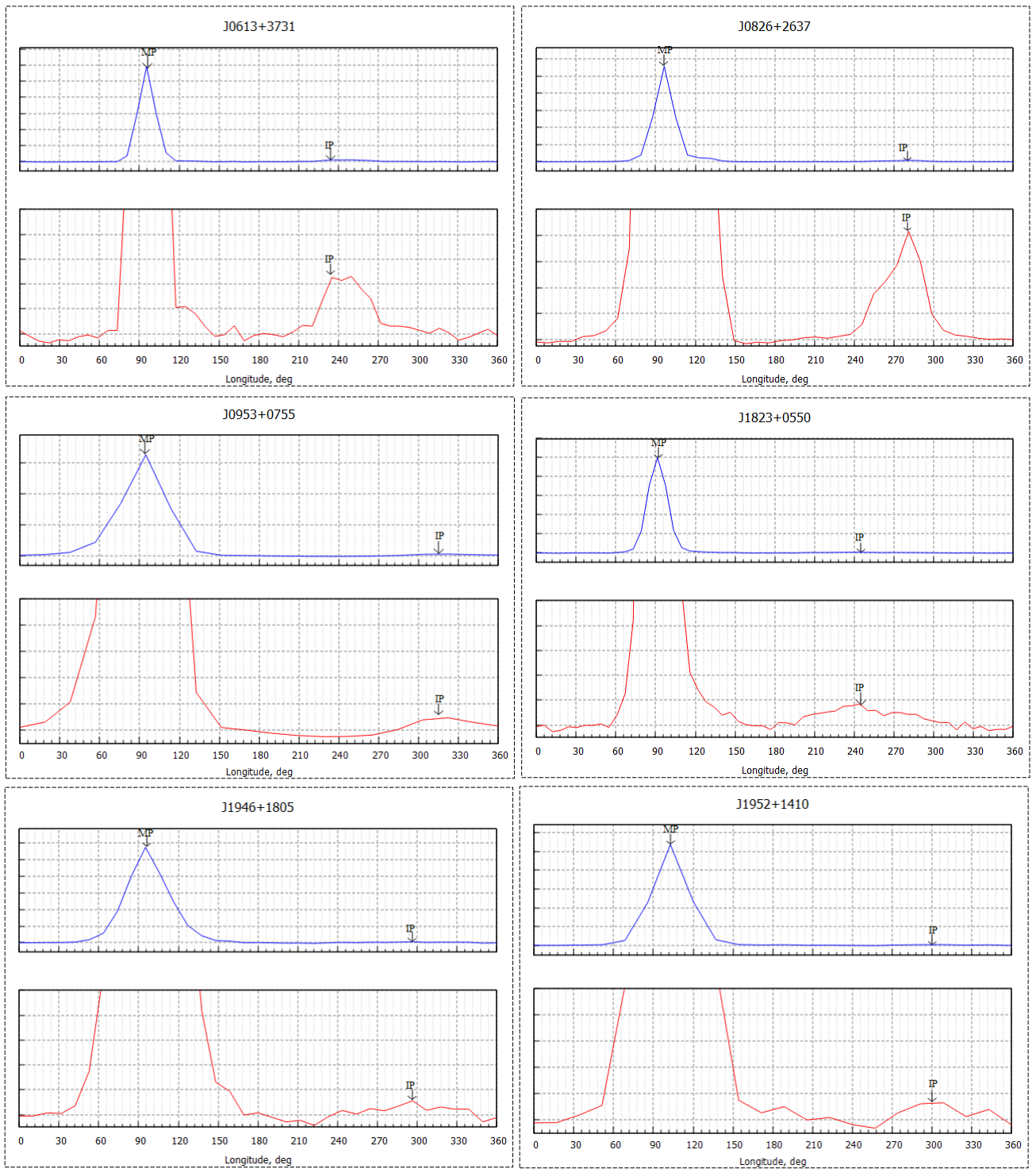


Рис. II.1 12 парных картинок, на каждой из которых в верхней части показан суммированный средний профиль пульсара. Результат диссертанта из работы [63]. На нижней части убрана вершина MP в профиле так, чтобы был виден IP. Стрелками на рисунках отмечены положение MP и IP.

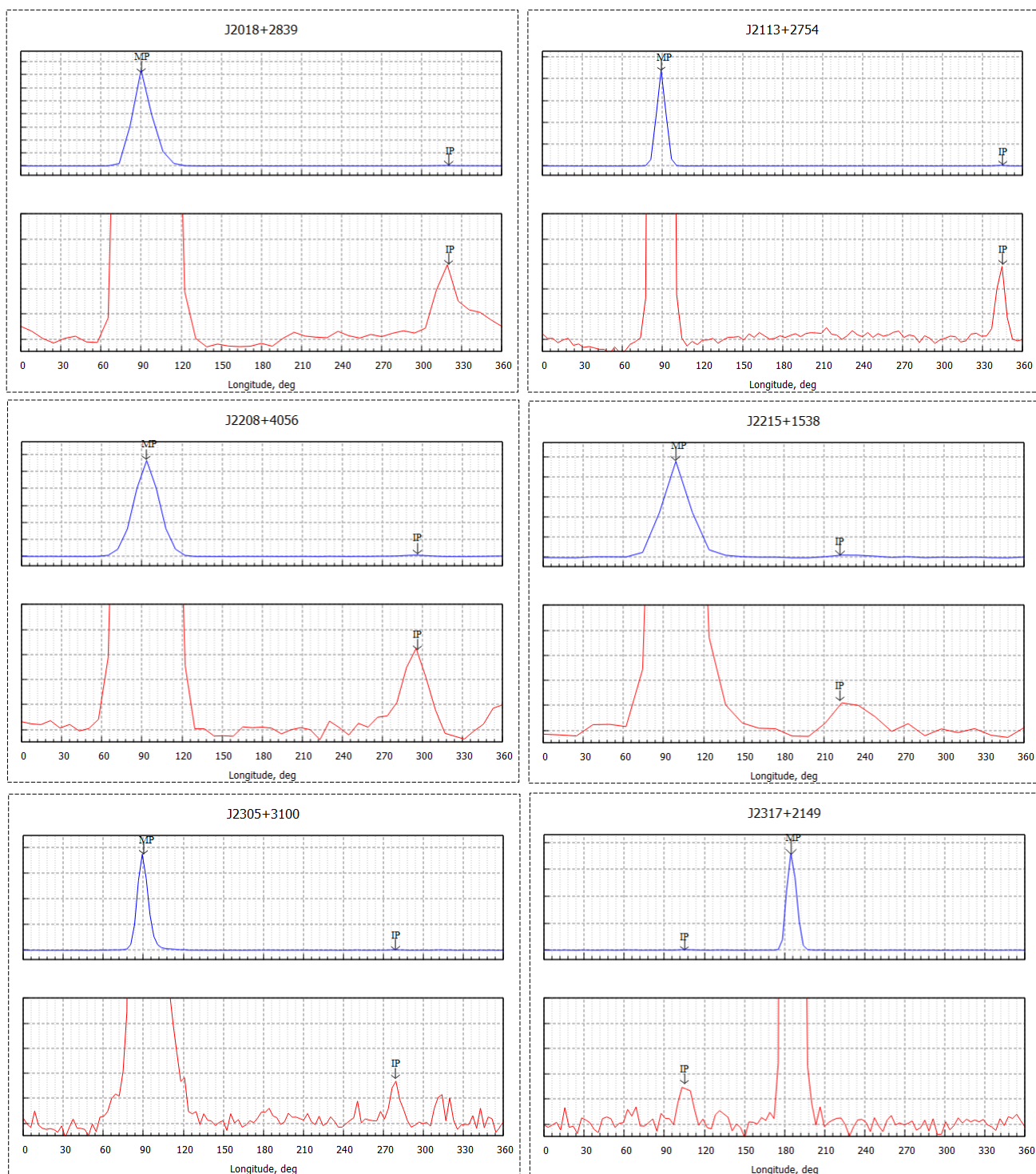


Рис.П.1 (продолжение) 12 парных картинок, на каждой из которых в верхней части показан суммированный средний профиль пульсара. Результат диссертанта из работы [63]. На нижней части убрана вершина MP в профиле так, чтобы был виден IP. Стрелками на рисунках отмечены положение MP и IP.

§ П.4. Выводы по главе П

Селекционный эффект, который драматически уменьшает чувствительность БСА и влияет на общее обнаруживаемое количество пульсаров с интеримпульсами — это межзвездное рассеяние. Помимо этого эффекта на чувствительность влияют также дисперсионное

сглаживание в частотных каналах, время опроса точки, высота источника в момент прохождения центрального меридиана, промышленные и другие помехи.

В метровом диапазоне длин волн эффект межзвездного рассеяния помимо ухудшения чувствительности наблюдений приводит к невозможности наблюдений пульсаров с маленькими периодами, т.к. характерное время рассеяния может быть больше, чем период. Согласно работе [61], где проверялась практическая чувствительность БСАЗ при поиске пульсаров оказалось, что наилучшая чувствительность достигается для пульсаров, у которых $+21^\circ < \delta < +42^\circ$, $0,25 \text{ с} < P < 3 \text{ с}$, $DM < 100 \text{ пк/см}^3$.

На склонениях $\delta < +21^\circ$, в записях больше промышленных помех, т.к. низкие склонения соответствуют источникам близким к горизонту и помехи приходят на радиотелескоп из крупных промышленных центров, располагающихся в городах Москва и Тула. Эффективная площадь радиотелескопа уменьшается как косинус высоты источника. Чувствительность на периодах $P < 0,25 \text{ с}$ падает, т.к. на таких периодах длительность импульса сравнима с временем опроса точки, при этом уже на $DM > 25 \text{ пк/см}^3$ в 78-ми килогерцовом частотном канале уширение импульса из-за дисперсионного сглаживания сравнимо с временем опроса точки. Рассеяние для секундных пульсаров по наблюдениям на 102 МГц ([64], [65]) становится существенным на $DM > 70-80 \text{ пк/см}^3$. На $DM > 250 \text{ пк/см}^3$ нет ни одного пульсара, видимого на БСА [27]. Следовательно, по разным причинам мы не видим множество пульсаров, которые при прочих равных условиях видны на высоких частотах. Однако, у нас нет никаких оснований предполагать, что доля (процент) пульсаров с IP может быть разной для пульсаров с разными DM. Разная высота над горизонтом при прохождении пульсара через меридиан и/или любые виды помех, могут приводить к уменьшению общего количества наблюдаемых пульсаров, но действие этих факторов одинаковое на пульсары без или с интеримпульсами.

По нашему мнению, единственный селекционный эффект, действующий по-разному на пульсары без и с интеримпульсами, связан с наблюдениями пульсаров с малыми периодами: IP может находиться на разных фазовых расстояниях по отношению к MP; рассеяние на любой мере дисперсии может отличаться на 1-1,5 порядка величины от среднего (ожидаемого) значения [64]; MP может быть в 100 и более раз сильнее, чем IP. Указанные факторы могут привести к уменьшению доли наблюдаемых пульсаров с IP по сравнению с условиями, когда они не действуют. Этот селекционный эффект будет особенно сильным для пульсаров с периодами $P < 0,25 \text{ с}$ и $DM > 100 \text{ пк/см}^3$. В § II.2. «Наблюдения пульсаров с интеримпульсами» сказано, что поиск пульсаров с IP проводился для пульсаров с $P > 0,25 \text{ с}$. Пульсаров с $DM > 100 \text{ пк/см}^3$ в выборке всего 2 из 96 и поэтому действие эффекта рассеяния, которое может привести к потере пульсаров с IP, не должно быть значительным.

Прежде чем сравнивать наши результаты с результатами других работ, как наблюдательных ([55], [66], [67]), так и теоретических ([68], [69]), отметим еще два момента, которые могут повлиять на обсуждаемую статистику интеримпульсных пульсаров. Во-первых, практически все наблюдаемые нами интеримпульсные пульсары в Таблице II.1 имеют отношение интенсивностей $IP/MP < 0,02$, тогда как по крайней мере половина всех интеримпульсных пульсаров из других каталогов имеют отношение $IP/MP > 0,1$. Этот момент пока не имеет своего объяснения. Поиск пульсаров с IP проводился в площадке $-9^\circ < \delta < +55^\circ$ и она покрывает почти половину всего неба. В работе [69] можно увидеть 12 пульсаров, имеющих отношение $IP/MP > 0,1$, попадающих в исследованную площадку, и при этом отсутствующих в Таблице II.1. Из них 11 пульсаров (J0627+0706, J1842+0358, J1843-0702, J1849+0409, J1851+0418, J1852-0118, J1903+0925, J1913+0832, J1915+1410, J2032+4127, J2047+5029) в обзоре PUMPS [27] не обнаружены. У 10 из этих 11 пульсаров $DM > 100$ пк/см³. Как мы уже отмечали чувствительность обзора на больших мерах дисперсии низкая. Причем половина из этих 10 пульсаров помимо высокой DM имеет еще и период $P < 0,25$ с. Один пульсар (J1849+0409) имеет $P = 0,7611$ с, $DM = 63,9$ пк/см³ и должен детектироваться в PUMPS [60]. Однако при достигнутой чувствительности обзора 0,1-0,2 мЯн для интегральной плотности потока, гармоника пульсара J1849+0409 в усредненных спектрах мощности не найдены. Наконец один пульсар J0535+2200 (пульсар в Крабе) нами обнаружен как по отдельным импульсам, так и в усредненных спектрах мощности. Однако его период всего 33 мс, то есть меньше 3 точек по 12,5 мс и поэтому обнаружить его IP в наших наблюдениях невозможно. Также стоит отметить, что из 44 пульсаров с интеримпульсами в работе [62] только три пульсара (J0826+2637, J0953+0755, J1946+1805) присутствуют в Таблице II.1, при этом у них IP/MP варьируется в диапазоне 0,005 до 0,012 и меньше в 1,5-2 раза, чем в настоящей работе, что обусловлено, вероятно, отличной частотой наблюдения. Тем не менее вопрос о том, почему почти у всех интеримпульсных пульсаров, имеющих $IP/MP > 0,1$ и попавших в исследованную площадку наблюдаются большие DM и вопрос, почему не найдены пульсары с $DM < 100$ пк/см³ с $IP/MP > 0,1$, ответов не имеют.

Таблица II.2 Пульсары с $IP/MP > 0,01$

Имя	P	DM	S/N(MP)	S/N(IP)	IP/MP	r(°)
J0613+3731	0,6191	18,9	592	11,5	0,019	155±11
J0826+2637	0,5306	19,4	2785	41,6	0,015	180±13
J0953+0755	0,2530	2,96	164	3,6	0,022	216±27
J1946+1805	0,4406	16,1	288	3,3	0,011	195±16
J2208+4056	0,6369	11,8	1126	16	0,014	198±11
J2215+1538	0,3741	29,2	240	5,5	0,023	120±18
J2305+3100	1,5758	49,5	840	8,4	0,010	189±5

Во-вторых, все обсуждаемые в работах ([68], [69]) статистические распределения касаются пульсаров с отношением интенсивностей $IP/MP > 0,01$. Поэтому ниже при сравнении количества интеримпульсных пульсаров мы ограничимся лишь семью пульсарами из Таблицы II.1, имеющими те же параметры. Эти пульсары обладают отношением $(S/N)_{MP}$ в диапазоне от 164 до 2785 и $(S/N)_{IP}$ в диапазоне от 3,3 до 41,6 (таблица II.2), что позволяет уверенно выделить интеримпульс в среднем профиле. Из них четыре пульсара (J0613+3731, J0826+2637, J2208+4056, J2305+3100) можно отнести к ортогональным интеримпульсным пульсарам (угловое расстояние между MP и IP близко к 180°), и три пульсара (J0953+0755, J1946+1805, J2215+1538) можно отнести к соосным ротаторам.

Таблица II.3 Наблюдаемое количество ортогональных интеримпульсных пульсаров для трех интервалов периодов P. Результат диссертанта из работы [63].

P(c)	N_{all}	N_{IP}	N (%)	[68] (%)	FAST (%)	MeerKAT (%)
0,03 - 0,5	26	1-2	1,0 - 2,1	2,2 - 3,6	2,0	2,4
0,5 - 1	28	0-1	0 - 1,0	0,7 - 1,0	0,4	0,5
>1	42	1	1,0	$\leq 0,2$	0,3	0,2

В Таблице II.3 приведены полученные значения количества ортогональных интеримпульсных пульсаров для трех интервалов периодов P, а также значения общего количества пульсаров и пульсаров с интеримпульсами (колонки 2 и 3). В колонке 4 приведено относительное количество интеримпульсных пульсаров, взятых из работы [68], а в колонках 5 и 6 из обзоров FAST [66] и MeerKAT [67]. Неопределенность связана с тем, что пульсар PSR J0826+2637 имеет период $P = 0,53$ с, т.е. находится на самой границе двух интервалов. В целом, как мы видим, имеется хорошее согласие наших результатов с результатами других авторов. Напомним, что в работе [68] были проведены расчеты, оценивающие ожидаемое относительное количество наблюдаемых ортогональных интеримпульсных пульсаров для двух моделей торможения нейтронных звезд. При этом первая, т.н. MHD-модель (см., например, [22], [70]), в которой угол между магнитной осью и осью вращения стремится к 0° , предсказывает количество ортогональных интеримпульсных пульсаров в интервале $0,033 \text{ с} < P < 0,5 \text{ с}$ на уровне 0,2-1,5%, а вторая, БГИ-модель [21], в которой угол между магнитной осью и осью вращения стремится к 90° – на уровне 2,5-5,5%. Таким образом, можно сделать вывод, что наши результаты (как и последние результаты обсерваторий FAST и MeerKAT) говорят скорее в пользу модели БГИ (BGI), чем в пользу общепризнанной модели МГД (MHD) (Рудермана – Сазерленда). Что же касается соосных интеримпульсных пульсаров, то, как показано в работе [69], и модель MHD, и модель БГИ предсказывают приблизительно их одинаковое относительное количество на уровне 1-2%, что в целом согласуется и с нашими результатами (3 пульсара с $IP/MP > 0,01$ из 96).

Главными полученными результатами являются:

- для 96 пульсаров, наблюдаемых в мониторинговом обзоре PUMPS, сложением средних профилей удалось получить минимальные S/N в главном импульсе больше 40. Для получения средних профилей использовались наблюдательные сессии, в которых S/N главного импульса был больше 6. Эти сессии выбирались из ежедневных наблюдений, продолжающихся на временных интервалах от сотен до тысяч дней;

- найдено 12 пульсаров с интеримпульсами. Для 9 (*J0613+3731*, *J1823+0550*, *J1952+1510*, *J2018+2839*, *J2113+2754*, *J2208+4056*, *J2215+1538*, *J2305+3100*, *J2317+2149*) из 12 пульсаров интеримпульсы найдены впервые. 7 пульсаров имеют IP располагающиеся на фазовых расстояниях близких к 180° относительно MP. Для 5 пульсаров расстояния далеки от 180° и они, по-видимому, являются соосными ротаторами;

- для пульсаров имеющих отношение $IP/MP > 0,01$ результаты не противоречат модели из работы [68], предполагающей эволюцию пульсаров в ортогональные ротаторы.

Выполненное исследование показало, что оценки наблюдаемого количества соосных и ортогональных ротаторов, у которых отношение амплитуд интеримпульса и главного импульса превышает значение 0,01, не противоречат модели, согласно которой в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся ортогональными. Проведена статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами, и сравнение результатов с моделью БГИ, согласно которой в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся ортогональными, и магнитогидродинамической моделью, по которой магнитная ось и ось вращения становятся соосными.

Глава III. Межзвездная среда в направлении двух сильных пульсаров (J0826+2637, J0953+0755)

§ III.1. Краткий обзор пульсаров (J0826+2637, J0953+0755)

Пульсар J0826+2637 – это уникальный пульсар, обладающий целым рядом редких свойств: наличие интеримпульса и посткурсора [71], периодическое рентгеновское излучение [72], нуллинг [73], переключение мод [74], смещение субимпульса. Даже по отдельности в разные выборки включено небольшое количество пульсаров, имеющих перечисленные выше свойства. Так выборка пульсаров с нуллингами насчитывает чуть больше 100 пульсаров [75] из 3300 радиопульсаров (на 2023 г.), находящихся в каталоге ATNF [1]. Периодическое рентгеновское излучение ожидается или обнаружено примерно у 300 пульсаров (см. ATNF). При этом далеко не у всех пульсаров, имеющих периодическое рентгеновское излучение, имеется и периодическое радиоизлучение, как у J0826+2637. Интеримпульсы наблюдаются менее, чем у 50 пульсаров ([54], [62]). То есть вероятность того, что в одном пульсаре будут наблюдаться все перечисленные выше свойства невысока.

Конечно, нельзя исключить, что со временем будет увеличиваться выборка пульсаров с нуллингами, с интеримпульсами, с периодическим излучением в рентгене и другими интересными особенностями, но на настоящий момент времени совокупность особенностей делает пульсар J0826+2637 уникальным и интересным для тщательного исследования. Наблюдаемая интегральная плотность потока этого пульсара, согласно [76] достигает одного янского в метровом диапазоне длин волн, что делает этот пульсар одним из самых сильных пульсаров в северном полушарии и, таким образом, легким для наблюдений и исследований объектом. Изучение пульсаров, подобных J0826+2637, позволяет глубже понять взаимосвязь между различными явлениями излучения и то, что они могут рассказать нам о магнитосфере пульсаров.

За последние 10 лет вышел ряд работ по исследованию индивидуальных импульсов пульсара ([74], [77], [78], [79], [80]). Долговременные (153 дня) наблюдения J0826+2637 на частоте 1400 МГц [77] показали, что существуют короткие (минуты) и длинные (часы) нуллинги. Быстрая смена между состояниями «радиоизлучение включено» или «нуллинг включен» происходит за один оборот пульсара. Изменений в скорости вращения, когда пульсар находится в активной или пассивной стадии излучения, не найдено. В наблюдениях на LOFAR [74] была открыта «спокойная» Q-мода пульсара J0826+2637. Нуллинг наблюдался как в Q-моде, так и в «яркой» В-моде, но длительность нуллинга в Q-моде была в 40 раз больше, чем в В-моде. В среднем значения сигнала к шуму (S/N) в двух модах отличаются на 2 порядка [74]. Ранее Q-моду

считали нуллином, так как из-за слабости излучения в этой моде отличить Q-моду от нуллинга не получалось. Как и в работе [74], наблюдения [79] на частоте 320 МГц показали, что нуллинг в В-моду короткий и составляет несколько процентов от общей длительности моды, а в Q-моду достигает 90 процентов [79]. Было обнаружено также существование слабого интеримпульса (IP) и посткурсор (PC) при отсутствии главного импульса (MP) в В-моду. Одновременные наблюдения на радиотелескопах LOFAR, Westerbork, Lovell, Effelsberg на частотах от 135 МГц до 2,7 ГГц показали, что переход между Q-модой и В-модой происходит синхронно за один период пульсара.

Наблюдения в рентгеновском и в радиодиапазоне показали, что переключения В и Q мод происходит синхронно [78] для пульсара J0826+2637 в отличие от пульсара J0946+0951, у которого наблюдается антикорреляция с рентгеновским излучением при переключении мод. Поляриметрические наблюдения [80] пульсара J0826+2637 подтверждают, что пульсар является ортогональным ротатором.

Пульсар J0953+0755 один из самых близких по расстоянию и мощных по излучению в метровом диапазоне пульсаров. Он имеет низкоуровневое излучение практически весь период ([81], [82], [83]). По-видимому, это связано с тем, что угол между магнитной осью и осью вращения мал (случай соосного ротатора) и наблюдатель видит область излучения в течение всего периода. Кроме главного импульса (MP) пульсар имеет интеримпульс (IP), предимпульс и мост излучения (M) между MP и IP. Для пульсара характерна высокая степень поляризации: $67 \pm 6\%$ на частоте 39 МГц [84], а позиционный угол плавно меняется на 180° от MP к IP [85], расположенному на расстоянии 152° от MP. В ряде работ указывается на высокую переменность интенсивности индивидуальных импульсов и наличии гигантских импульсов для этого пульсара ([86], [87], [88], [89]). Хотя накоплено много наблюдательных данных для пульсара в широком диапазоне частот, однако остается много вопросов о геометрии его магнитосферы, локализации области радиоизлучения и механизме излучения.

Содержанием настоящей главы является исследование, с использованием данных, получаемых в мониторинговой программе, начавшейся в 2014 году:

- пульсара J0826+2637, как на долговременных (дни, недели, месяцы), так и на коротковременных (не больше нескольких минут) интервалах наблюдений;
- поведение основных компонент импульсного излучения пульсара J0953+0755, так и влияние неоднородностей межзвездной плазмы на прохождение его излучения к наблюдателю.

§ III.2. Межзвездные мерцания

В спиральных галактиках, к которым относится и Млечный Путь, большая часть межзвездных пыли и газа расположено в галактической плоскости. Хотя часть пыли и газа лежит

выше или ниже галактического диска, около 80% лежит внутри области в несколько сотен парсеков от галактической плоскости. Межзвездная среда в различных регионах Галактики имеет разную температуру и плотность, определяя эволюцию Галактики в этом регионе.

Различные фазы межзвёздной среды:

– *Корональный газ* (горячая ионизированная среда) содержит по большей части газ, нагретый до высоких ($\sim 10^{5.5}$ К) температур «шоковыми» ударными волнами плотности от взрыва сверхновых. Это газ имеет очень низкую ($\sim 0,001 \text{ см}^{-3}$) плотность, но занимает около половины объёма Галактического диска;

– *Тёплая нейтральная среда* представляет собой нейтральный водород при температуре $\sim 10^{3.7}$ К и плотности $\sim 0,6 \text{ см}^{-3}$. Эта среда является ответственной за большую часть излучения на волне 21 см, которое наблюдается отовсюду в нашей Галактике;

– *Холодная нейтральная среда* содержит атомарный газ при температуре $\sim 10^2$ К и плотности $\sim 30 \text{ см}^{-3}$. Этот газ заполняет порядка 1% общего объёма Галактики;

– *Молекулярный водород* является доминирующей частью ($\sim 0,9$) массы гигантских молекулярных комплексов, главного ингредиента формирования звёзд в Галактике. Плотность в таких облаках может достигать значения $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Радиоизлучение от различных источников взаимодействует с межзвёздной средой, что находит своё отражение в получаемом сигнале. Прохождение излучения от пульсаров через неоднородности межзвездной плазмы, вызванной флуктуациями плотности электронов, приводит к целому ряду наблюдаемых эффектов: угловому уширению источника, временному уширению импульсов, модуляции интенсивности излучения по частоте и времени (мерцания). Изучение этих эффектов позволяет исследовать пространственную структуру неоднородностей межзвездной плазмы.

Структура ионизированной межзвездной среды вдоль луча зрения по направлению к пульсару обычно предполагается турбулентной с широким диапазоном масштабных размеров. Например, если путь радиолуча пролегает через индивидуальные дискретные облака плазмы, они могут значительно влиять на дифракционную картину. Полная теория должна учитывать процесс распространения волнового фронта через турбулентное пространство между источником и наблюдателем, включая эффект широкого диапазона размеров неоднородностей среды. Сложность такой теории состоит в учёте расстояния до пульсара, поскольку эффект близких и далёких неоднородностей может сильно отличаться. Тем не менее, простейшая модель, в

предположении однородной, анизотропной и когерентной плазмы, широко используется для анализа мерцаний пульсаров.

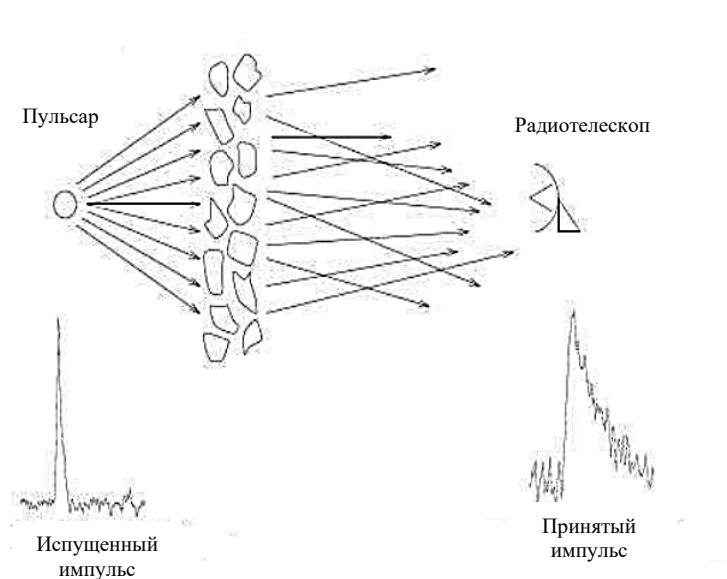


Рис. III.1 Рассеивание радиоволн при наблюдениях пульсаров [127, с. 6].

Наиболее простейшей является модель случайного распределения нерегулярностей электронной плотности в холодной плазме, ограниченные тонким экраном, перпендикулярным лучу зрения. Когда радиоволны проходят через межзвёздную среду, они отклоняются благодаря флуктуациям электронной плотности в ионизованной плазме. Поэтому волны, достигающие Земли рассеиваются, что видно в наблюдаемых данных. Радиоволна распространяется через холодную плазму с флуктуациями плотности электронов Δn_e , как показано на рис. III.1.

Фазовый сдвиг в волне, проходящую через единичную неоднородность:

$$\delta\phi = \Delta k \cdot a, \quad (\text{III.1})$$

где a – размер неоднородности и Δk – изменение амплитуды волнового вектора \vec{k} .

Для однородной, анизотропной и когерентной плазмы показатель преломления (рефракционный индекс) равен [32, с. 85]:

$$\mu = \sqrt{1 - \left(\frac{\nu_p}{\nu}\right)^2}, \quad (\text{III.2})$$

где ν – наблюдаемая частота и ν_p – плазменная частота,

$$\nu_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\pi m_e}} \approx 8,5 \text{ кГц} \left(\frac{n_e}{\text{см}^3}\right)^{1/2}, \quad (\text{III.3})$$

где n_e , m_e и e – плотность (количество свободных электронов в единице объёма), масса и заряд электрона, соответственно. В плазме могут существовать колебания электронов – плазменные колебания только с вполне определённой частотой, зависящая от количества свободных

электронов в единице объёма. Они представляют собой попеременные уплотнения и разрежения электронного газа [90, с. 51]. Для типичного значения межзвёздной среды $n_e \sim 0,03 \text{ см}^3$, $f_p = 1,5 \text{ кГц}$ [12, с. 35].

Для распространения электромагнитной волны в электронной плазме необходимо, чтобы $f > f_p$, следовательно $\mu < 1$ и групповая скорость распространения волны $v_g = c\mu < c$. Поскольку средний показатель преломления μ близок к единице, при рабочей частоте радиотелескопа $f \gg f_p$, выражение $(1 - \mu)$, характеризующее отклонение рефракционного индекса от единицы, можно разложить в ряд Маклорена [12, с. 323]:

$$1 - \mu \approx 1 - \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v_p}{v} \right)^2 \right] = \frac{e^2 n_e}{2\pi m_e v^2}. \quad (\text{III.4})$$

Например, для частоты радиоизлучения 100 МГц отклонение коэффициента преломления от единицы равно $(1 - \mu) = 2,4 \cdot 10^{-10}$. С учётом волнового числа $k = 2\pi\mu\lambda = 2\pi\mu v/c$, уравнений (III.1) и (III.4) вариации $\delta\mu$ на пути размера флуктуации электронной плотности величиной a изменяет фазу волны на величину:

$$\delta\phi = \Delta k a = \frac{2\pi v}{c} \delta\mu a = \frac{2\pi v}{c} \delta \left(\sqrt{1 - \left(\frac{v_p}{v} \right)^2} \right) a \approx - \frac{e^2 a \Delta n_e}{m_e c v}, \quad (\text{III.5})$$

где Δn_e – флуктуации электронной плотности в плазме, отрицательное значение $\delta\phi$ означает замедление v_g .

Радиоволна на пути длиной d между пульсаром и наблюдателем проходит через d/a таких случайно распределённых флуктуаций, и, таким образом, изменения фазы, сконцентрированные в тонком экране, должны быть [32, с. 91]:

$$\Delta\Phi \approx \sqrt{\frac{d}{a}} |\delta\phi| = \frac{e^2}{m_e c} \frac{\sqrt{ad} \Delta n_e}{v}. \quad (\text{III.6})$$

Суммарный эффект такого изменения фазы волнового фронта заключается в рассеивании радиоволны на угол, при условии $\mu \approx 1$ [12, с. 324]:

$$\theta_{scat} \approx \frac{\Delta\Phi/k}{a} \approx \frac{\Delta\Phi c}{2\pi a v} = \frac{e^2}{2\pi m_e} \frac{\Delta n_e \sqrt{d}}{\sqrt{a} v^2}. \quad (\text{III.7})$$

Непосредственно позади экрана присутствуют только фазовые вариации волнового фронта. При возрастании расстояния от экрана появляются амплитудные вариации благодаря интерференции между лучами различных частей искажённого волнового фронта. Различия в фазе в отдельных лучах, достигающих наблюдателя от разных частей экрана, зависят от их

геометрического пути и различных значений $\Delta\Phi$ вдоль их пути. Результирующая сумма лучей будет различна для наблюдателей на различных расстояниях A . Следовательно, если дистанция от экрана до наблюдателя равна L и $L\theta_{scat} > A$, то лучи пересекаются, и возникает интерференционная картина (рис. III.2). При этом будут наблюдаться случайные вариации амплитуды, когда источник, или экран, или наблюдатель (или все трое) движутся перпендикулярно линии наблюдения.

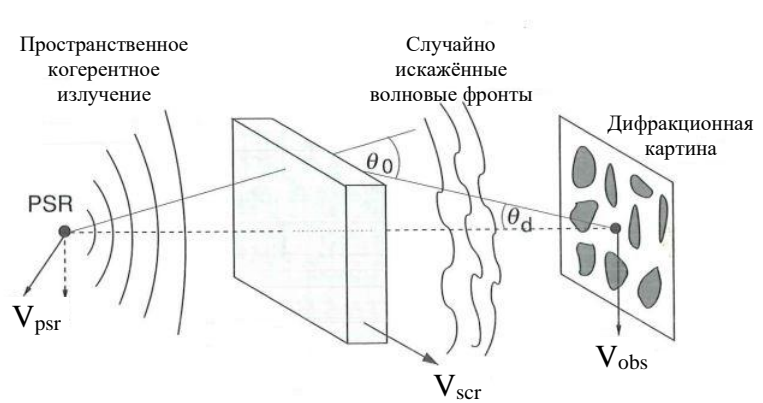


Рис. III.2 Рассеяние и искажение когерентного излучения на тонком экране неоднородностей различных размеров [32, с. 90]. Случайно искажённые волновые фронты, отклонённые на угол θ_0 , формируют дифракционную картину.

Траектория лучей различается $\approx (1/2)\theta_{scat}^2 L$, что справедливо на многих длинах волн. Поэтому, интерференция между лучами будет зависеть от длины волны, при этом амплитуда будет меняться в зависимости от разности волн $\Delta\lambda$, где:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{2\lambda}{\theta_{scat}^2 L}. \quad (III.8)$$

Поскольку при распространении излучения радиоволны рассеиваются в угловой спектр с шириной θ_{scat} , то на некотором расстоянии r от рассеивающего слоя взаимная интерференция различных компонент углового спектра приводит к амплитудной модуляции излучения. Различают дифракционные мерцания на масштабах $s_{dif} = \lambda/\theta_{scat}$ ($s_{dif} \sim 10^7$ см на $\lambda = 1$ м) и рефракционные мерцания, которые реализуются на существенно больших пространственных масштабах: $s_{ref} = \theta_{ref} \cdot r$ ($s_{ref} \sim 10^{12}$ см). Характерные временные масштабы дифракционных мерцаний (огибание области, размеры которой сравнимы с длиной волны), $t_{dif} = s_{dif}/V_{ef}$, на частоте 110,25 МГц – это секунды и минуты, а рефракционных мерцаний (преломление) – $T_{ref} = s_{ref}/V_{ef}$ – это месяцы и годы. Здесь V_{ef} – это скорость движения дифракционной картины относительно наблюдателя. Если рассеяние происходит на некотором выделенном слое (экране), то эта скорость складывается из трех компонент:

$$V_{ef} = V_{psr} \frac{r}{R - r} + V_{obs} - V_{scr} \frac{R}{R - r} \quad (III.9)$$

где V_{psr} , V_{obs} и V_{scr} – скорости пульсара, Земли и экрана соответственно, R – расстояние от наблюдателя до пульсара, r – расстояние от наблюдателя до экрана.

В простейшем случае нормального распределения рассеивания, вызванного экраном, распределение интенсивности [32, с. 91]:

$$I(\theta)d\theta \propto \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_d^2}\right) 2\pi\theta d\theta. \quad (\text{III.10})$$

Поскольку рассеянная волна имеет больший путь по сравнению с прямым путём от источника к наблюдателю, то с учётом малости углов, можно показать, что между ними задержка:

$$\Delta t(\theta) = \frac{\theta^2 d}{c} \quad (\text{III.11})$$

Подстановкой III.10 в III.9 получаем:

$$I(t) \approx \exp\left(-\frac{c\Delta t}{\theta_d^2 d}\right) = e^{-\Delta t/\tau_s}, \quad (\text{III.12})$$

где τ_s – характерное время рассеяния:

$$\tau_s = \frac{\theta_d^2 d}{c} = \frac{e^4}{4\pi^2 m_e^2} \frac{\Delta n_e^2}{a} d^2 \nu^{-4}. \quad (\text{III.13})$$

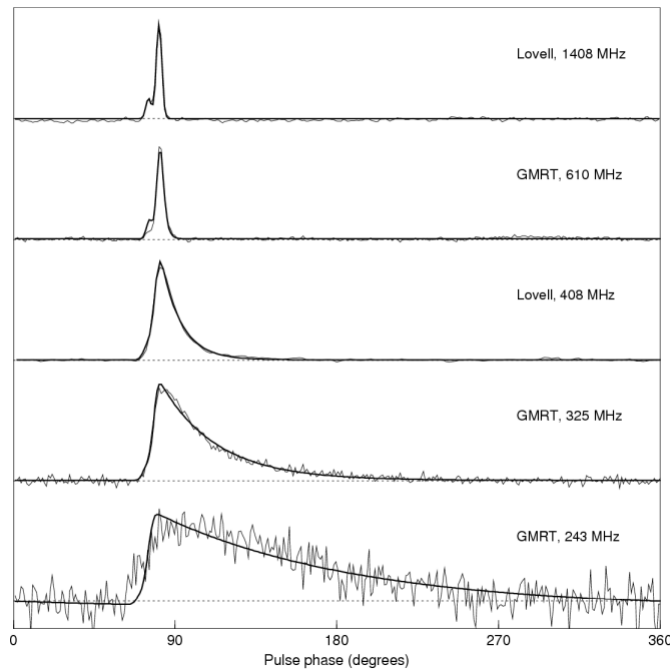


Рис. III.3 Эффект рассеивания профиля пульсара J1833-0338 в зависимости от частоты наблюдений [32, с. 24].

Следовательно, узкий импульс будет иметь экспоненциальный хвост рассеяния с протяжённостью, зависящей от частоты наблюдений. Сложные формы импульсов могут являться свёрткой истинного импульса и функции рассеивания. Из формулы (III.13) видно, что с увеличением расстояния до пульсара и уменьшением частоты наблюдения ($\tau_s \propto d^2 \nu^{-4}$) происходит рост времени релаксации импульса, происходит «замыливание» импульса (рис. III.3), что делает невозможным обнаружение пульсара в метровом и декаметровом диапазонах.

Ионизированная межзвёздная среда является более сложной, с большими дискретными облаками и анизотропной структурой, чем модель простого экрана. Хотя причины и развитие флуктуаций электронной плотности ещё полностью не выяснены, разумно ожидать, что они ведут себя аналогично другим видам турбулентности, в которых энергия нагнетается в крупномасштабных неоднородностях и рассеивается в более мелких. В таком допущении, что поступление энергии происходит только в крупных пространственных масштабах и потери энергии только в малых, тогда спектр неоднородностей подчиняется Колмогоровскому степенному закону. Если определить спектр $P_{n_e}(q)$ в терминах трёхмерного волнового числа $q = 1/a$, связанного с размером флуктуаций, то в упрощённом форме его можно представить как [12, с. 328]:

$$P_{n_e}(q) = C_{n_e}^2(z) q^{-\alpha}, \quad (\text{III.14})$$

где $C_{n_e}^2(z)$ – величина среднего значения квадрата флуктуации в точке z вдоль линии пульсар – наблюдатель, $\alpha = 11/3$ для Колмогоровской турбулентности. Интеграл

$$DM = \int_0^d C_{n_e}^2(z) dz \quad (\text{III.15})$$

характеризует измеренную плотность флуктуации свободных электронов плазмы на линии пульсар – наблюдатель, и известный как мера дисперсии [12, с. 35].

Для степенного спектра (III.14) время рассеяния $\tau_s \propto \nu^{-\beta}$, где $\beta = 2\alpha/(\alpha - 2)$. Для Колмогоровского спектра флуктуаций $\beta = 4,4$, что близко к значению равным 4 показателя степени у частоты в модели тонкого экрана III.11.

Большое число экспериментальных фактов интерпретировано в рамках однородной изотропной Колмогоровской турбулентности ([91], [92]) на неоднородностях $10^8 \text{ м} < a = 1/q < 10^{18} \text{ м}$. Однако было показано, что в некоторых направлениях показатель степени спектра неоднородностей, α , существенно отличается от Колмогоровского. В частности, $\alpha = 3$ в

направлении на пульсар J0953+0755 ([93], [94]). По наблюдениям на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон» было также показано [93], что в направлении J0953+0755 существует два рассеивающих слоя на расстояниях 4,4-16,4 пк и 26-170 пк. В работе [94] для этого пульсара были получены характерные масштабы мерцаний на четырех частотах 41, 62, 88 и 110 МГц.

§ III.3. Межзвёздные магнитные поля

Напряжённость межзвёздного магнитного поля экстремально мала от 1 до 10 мкГс. В противоположность, магнитные поля у большинства пульсаров порядка 10^{12} Гс, 10^{15} Гс у магнетаров и 10^8 Гс у старых миллисекундных пульсаров [12, с. 349]. Наблюдаемая связь между ними проста: сильнейшие магнитные поля пульсаров ответственны за линейную поляризацию радиоизлучения, в то время как величину вращения Фарадея плоскости поляризации радиоизлучения в межзвёздной среде определяет интегральное значение межзвёздного магнитного поля вдоль направления на пульсар.

Частотная зависимость задержки сигнала в межзвёздной среде также может быть выражена в терминах вращения фазы волны. В сравнении с наблюдениями на бесконечной частоте (т.е. без дисперсии), фаза импульса на частоте наблюдений ν имеет отставание по фазе $\Delta\Psi = -kd$, где волновое число $k = 2\pi\mu\lambda = 2\pi\nu/c$. Для холодной, намагниченной плазмы справедливо [32, с. 87]:

$$k(\nu) = \frac{2\pi}{c}\nu\mu = \frac{2\pi}{c}\nu\sqrt{1 - \frac{\nu_p^2}{\nu^2} \mp \frac{\nu_p^2\nu_B}{\nu^3}} \quad (\text{III.16})$$

и галактическое магнитное поле $B_{\parallel} = B \cos \theta$ параллельное направлению на пульсар, вводящее циклотронную частоту ν_B :

$$\nu_B = \frac{eB_{\parallel}}{2\pi m_e c} \approx 3 \text{ МГц} \left(\frac{B_{\parallel}}{\text{Гс}} \right) \quad (\text{III.17})$$

При характерном для Галактики $B_{\parallel} \sim 1$ мкГс получаем для межзвёздной среды $\nu_B \sim 3$ Гц. Последний член подкоренного выражения в (III.15) отражает различную скорость распространения лево- и правосторонней круговой поляризации волны в намагниченной среде. Линейно поляризованную волну можно представить в виде суперпозиции двух волн, поляризованных по правому и левому кругу. Минимальная разница в скорости распространения и формирует вращения Фарадея – разница в фазах между лево- и правосторонней круговой поляризации волны:

$$\Delta\Psi_F = \int_0^d (k_R - k_L) dl, \quad (\text{III.18})$$

где k_R и k_L – волновое число для право- и левосторонней круговой поляризации, соответственно. Учитывая, что $\nu \gg \nu_p$ и $\nu \gg \nu_B$ получаем [32, с. 88]:

$$\Delta\Psi_F = \frac{e^3}{\pi m_e^2 c^2 \nu^2} \int_0^d n_e B_{\parallel} dl, \quad (\text{III.19})$$

Поскольку поляризационный позиционный угол имеет периодичность π , а не 2π , то:

$$\Delta\Psi_{PPA} = \Delta\Psi_F/2 \equiv \lambda^2 \cdot RM = RM \cdot c^2/\nu^2 \text{ [рад]}, \quad (\text{III.20})$$

где $\lambda = c/\nu$ – длина волны частоты наблюдений, RM – мера вращения [32, с. 88]:

$$RM = \frac{e^3}{2\pi m_e^2 c^4} \int_0^d n_e B_{\parallel} dl, \quad (\text{III.21})$$

Вращение Фарадея измеряется как вариации угла поляризации на радиочастоте. На низких радиочастотах, где вращение велико, удобнее измерить небольшое изменение $\Delta\psi$ между соседними частотами ν и $\nu + \Delta\nu$. Для малых приращений величин в формуле (III.20), принимая приближённо $c = 3 \cdot 10^8$ км/с и выражая частоту наблюдений ν в сотнях (10^2) МГц [12, с. 353]:

$$\left[\frac{\Delta\psi}{\text{рад}} \right] = -\frac{18RM}{100} \Delta\nu \left[\frac{\nu}{100 \text{ МГц}} \right]^{-3}. \quad (\text{III.22})$$

Из (III.22), учитывая, что вращение плоскости поляризации имеет периодичность π , можно, на частоте наблюдения ν , рассчитать полосу частот $\nu_F \equiv \Delta\nu$, на которой происходит полный оборот ($\Delta\psi = \pi$):

$$\left[\frac{\nu_F}{\text{МГц}} \right] = \frac{100\pi}{18} \left[\frac{\nu}{100 \text{ МГц}} \right]^3 \left[\frac{RM}{\text{рад м}^{-2}} \right]^{-1}. \quad (\text{III.23})$$

Антенна радиотелескопа БСА3 принимает линейно-поляризованное излучение, поэтому необходимо оценить влияние поляризации на изменение амплитуды среднего профиля от сеанса к сеансу. Мера вращения для J0826+2637 составляет $RM = 5,9$ рад/м². В работе [74] получено значение степени линейной поляризации $P_L = 15 \pm 5\%$ для среднего профиля на частоте 143 МГц. Период одного оборота вращения Фарадея плоскости поляризации на частоте $\nu = 110,25$ МГц составляет полосу частот шириной $\nu_F = 3,94$ МГц, превышающая полосу приемника $\nu_{RB} = 2,5$ МГц, и при степени поляризации порядка 15%, поляризация мало сказывается на вариациях амплитуды среднего профиля пульсара от сеанса к сеансу. Вклад ионосферы в меру вращения не превышает 10% и им можно пренебречь.

§ III.4. Пульсар J0826+2637

Ежедневные наблюдения пульсара J0826+2637 в режиме мониторинга идут с августа 2014 года. В настоящей работе мы использовали наблюдения с августа 2014 по декабрь 2019 года (MJD = 56890 - 58847). Согласно данным каталога ATNF, период пульсара $P = 0,5306$ с, мера дисперсии $DM = 19,4$ пк/см³. Дисперсионное размазывание в полосе одного канала составляет 9,4 мс, то есть меньше времени опроса точки. Средний профиль пульсара занимает 42 точки на период пульсара. Время опроса сравнимо с шириной среднего профиля на уровне $\frac{1}{2}$ от максимума ($W_{0,5} = 9$ мс на нашей частоте) и поэтому любые детали, касающиеся особенностей отдельных импульсов, пропадают, однако РС и IP в средних за сеанс профилях можно видеть и анализировать. Дифракционные мерцания не сказываются на вариациях амплитуды импульсов, поскольку частотный масштаб мерцаний, $\nu_{dif} = (1-1,4)$ кГц на близкой частоте 103 МГц [95] существенно меньше полосы приемника.

Обработка наблюдений состояла из ряда последовательных шагов: вырезался кусок записи с пульсаром; проводилась калибровка с использованием калибровочной ступеньки; оценивался уровень шумов и, если он был высоким, данные не обрабатывались; вычиталась базовая линия, выравнивалось усиление в каналах, проводилась компенсация дисперсии, велась запись всех импульсов на диск и затем определялся средний профиль их сложением с заданным периодом. В полученном среднем профиле проводился кольцевой сдвиг таким образом, чтобы МР находился на расстоянии $\frac{1}{4}$ фазы периода от начала среднего профиля, в этом случае IP находится на расстоянии $\frac{3}{4}$ фазы периода; вычислялся S/N для МР, РС и IP. По сильным источникам, наблюдающимся в двух соседних лучах, контролировалось состояние ионосферы и

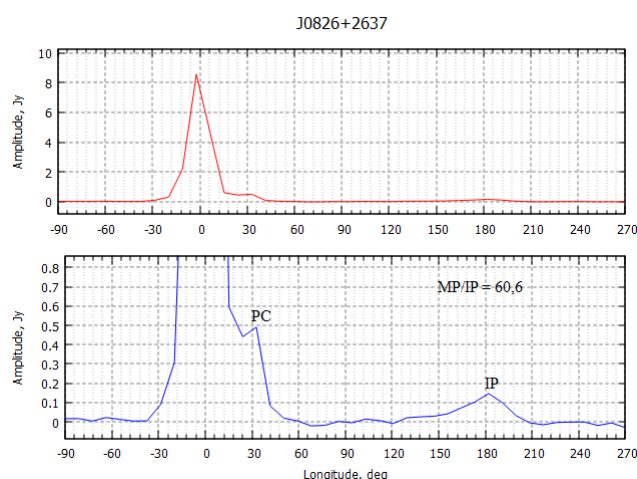


Рис. III.4 На верхней панели показан средний профиль J0826+2637, MJD = 57765. На нижней панели изображен тот же профиль, увеличенный по амплитуде в 16 раз. Результат диссертанта из работы [105]. Отмечены посткурсор и интеримпульс. На оси x – долгота в градусах, на оси y – амплитуда в янских.

если смещение координат по склонению большое, то обработанные записи не использовались для анализа.

В результате обработки всех сеансов наблюдений создавались файлы, в которых размещались массивы индивидуальных импульсов за каждый сеанс наблюдений, а также значения базовой линии и среднеквадратичных отклонений (σ_n), определенные для каждого импульса вне долгот МР и IP. Средний профиль, получаемый сложением всех индивидуальных импульсов, записывался в тот же файл. Формировались рисунки среднего профиля по всем частотным каналам и суммарного профиля, позволяющие оценивать качество наблюдений. По результатам обработки всех доступных дней, не отягощенных помехами и ионосферой, создавались дополнительные таблицы, содержащие полученные по средним профилям амплитуды МР, РС и IP, значение σ_n за каждый день, определенное по точкам вне импульса и интеримпульса среднего профиля.

В качестве примера на рис. III.4 приведен типичный средний профиль пульсара J0826+2637 после обработки наблюдений по схеме, приведенной выше. На профиле виден МР, РС и IP. Нулевая долгота соответствует положению центра МР. Амплитуды МР, РС и IP определены, как значения максимумов в соответствующих им узких заданных диапазонах долгот среднего профиля. Выбранные диапазоны долгот от -30° до $+23^\circ$ для МР, от $+21^\circ$ до $+38^\circ$ для РС и от $+149^\circ$ до $+191^\circ$ для IP. Ширина МР по уровню $\frac{1}{2}$ амплитуды равна: $W_{0,5} = 19$ мс, IP – 56 мс. Отношение их ширин $r = 3$, что соответствует измерениям [79] на частоте 320 МГц: $r = 3,3$. Естественно, что полученные ширины импульсов существенно больше их реальных ширин из-за размазывания в полосе приемника и большого времени считывания одной точки, однако для нас это не имеет значения. Не оптимальный режим наблюдений ухудшает S/N, но на соотношения амплитуд МР к РС и IP это не сказывается.

§ III.4.1 Анализ и результаты

На рис. III.5 показано изменение амплитуды МР в условных единицах от сеанса к сеансу за все время наблюдений (верхняя часть рисунка) и σ_n (нижняя часть рисунка). Поскольку наши данные прокалиброваны, то σ_n от сеанса к сеансу меняется незначительно. Представленное на рис. III.5 σ_n – это среднее значение, полученное по всем 422 индивидуальным импульсам в каждом сеансе наблюдений. Среднее значение σ_n на всем интервале наблюдений: $\langle \sigma_n \rangle = 0,48 \pm 0,08$. Основная часть амплитуд МР имеет значения $A_{MP} > 60$ и имеет значительные вариации со временем. Это довольно резкая граница, внутри которой находится 82% всех данных. Другая выделенная часть имеет верхнюю границу $A_{MP} < 10$ и сюда попадают сеансы, в которые реализуется спокойная «Q» мода и нуллинги. Малая часть данных ($10 < A_{MP} < 60$, см. рис. III.5) в промежуточной области соответствует, по-видимому, случаям, когда реализуются обе моды.

Сеансы с $A_{MP} > 60$ соответствуют вспыхивающей «В» моде. Для «Q»-моды будем считать, что $10 > A_{MP} > 3\langle\sigma_n\rangle$ (1,44 в а.е.). Тогда число сеансов в «Q»-моды, N_Q , равно 218 из 1692, т.е. 12,9%. Отношение средних значений амплитуд в «В» и «Q»-модах $\langle A_V \rangle / \langle A_Q \rangle$ составляет 60 раз. Будем считать, что дни, когда A_{MP} меньше $3\langle\sigma_n\rangle$ соответствуют нуллингу. Доля времени (отношение числа сеансов с $A_{MP} < 3\langle\sigma_n\rangle$ к общему числу сеансов), удовлетворяющая этому условию, N_{nul} , составляет 4%, а для амплитуд меньше $4\langle\sigma_n\rangle$ – 5,5%. Соотношения между амплитудами импульсов в «В» и «Q»-модах, а также N_{nul} приведены в Табл. III.1. В работе [96] по наблюдениям на частотах 430 и 1400 МГц было показано, что нуллинги у этого пульсара занимают $6,4 \pm 0,8\%$ от всей записи. Конечно, определение числа нуллингов зависит от чувствительности антенны и определения верхней границы для амплитуды по шумам.

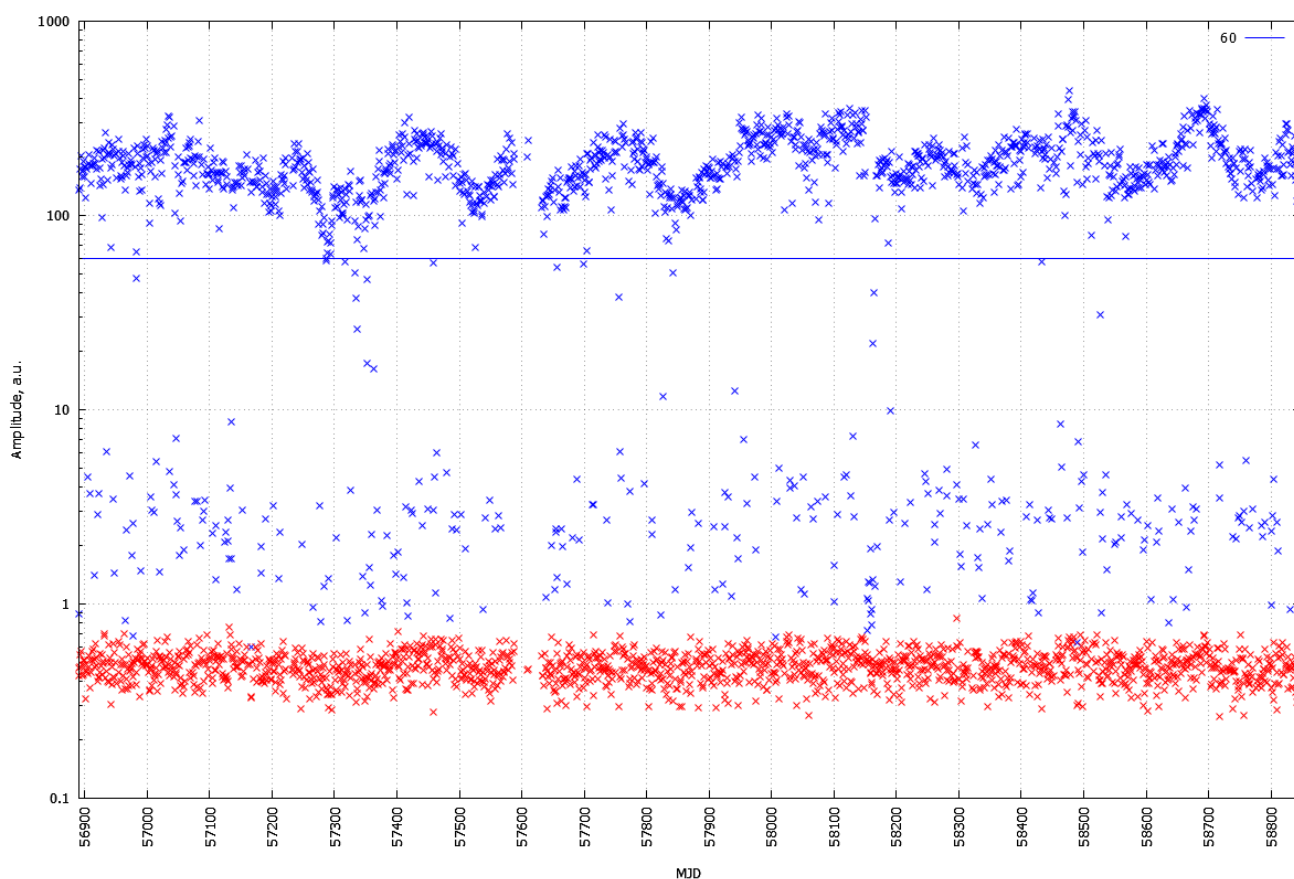


Рис. III.5 Вариации амплитуды (а.е.) главного импульса со временем (21.08.2014 – 30.12.2019). Результат диссертанта из работы [144]. Ось y – амплитуда в логарифмическом масштабе, ось x – время в модифицированных юлианских днях (MJD). В нижней части рисунка показано изменение сигмы шумов за время наблюдений. Прямая линия соответствует уровню $A_{MP} = 60$.

На рис. III.6 показана зависимость между амплитудами MP и IP. Для этого рисунка использованы формальные значения максимальных амплитуд на долготах MP и IP для средних профилей, для которых на долготе MP амплитуда больше $\langle\sigma_n\rangle = 0,48$. Здесь также видно разделение точек на 2 группы. Первая группа – это облако точек в нижней левой части рисунка.

Оно связано с «Q»-модой ($A_{MP} < 10$) и, соответственно, мы видим главный импульс, но не видим интеримпульса на уровне выше $3\sigma_n$. Вторая группа точек располагается в верхней части рис. III.6 и для $A_{MP} > 60$ такая зависимость есть, что более наглядно видно на рис. III.7, где показаны вариации амплитуд MP, PC и IP со временем. Здесь отобраны для анализа только средние профили, для которых амплитуды удовлетворяют условию $A_{MP} > 60$.

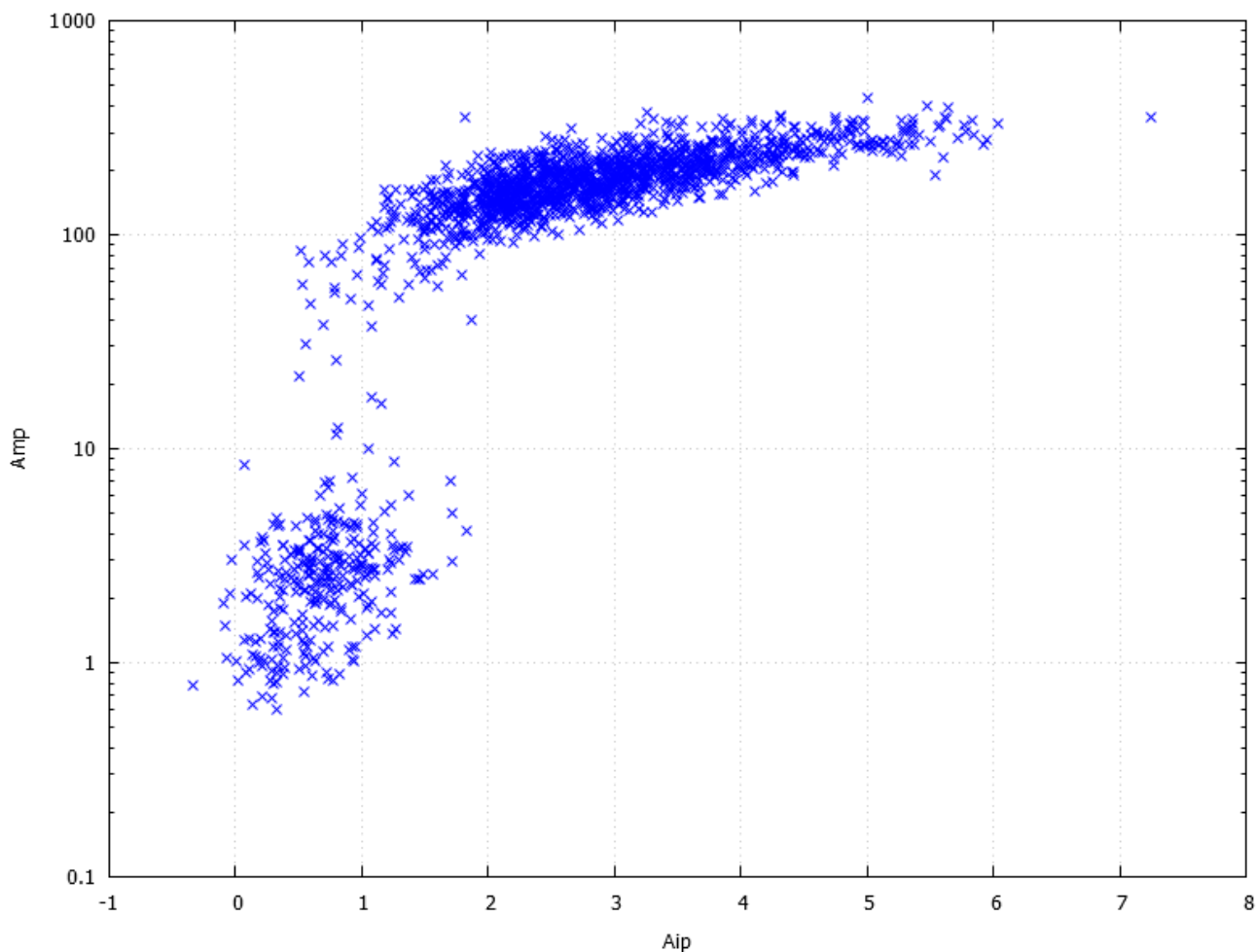


Рис. III.6 Зависимость между амплитудами MP и IP в относительных единицах (a.u.). Результат диссертанта из работы [144].

Очевидно, что вариации всех трех компонент коррелированы. Коррелированные вариации амплитуды обусловлены прохождением излучения от пульсара через неоднородности межзвездной плазмы и не связаны с собственной переменностью пульсара. Это рефракционные мерцания на крупных неоднородностях плазмы, которые будут рассмотрены позже.

Таблица III.1. Колонки: 1 – отношение числа сеансов в «Q»-моды к общему числу сеансов, 2 – отношение числа сеансов с амплитудами меньше $3(\sigma_n)$ к общему числу сеансов, 3 – отношение средних амплитуд импульсов в «B» и «Q» модах, 4-5 – соотношения между амплитудами MP, PC и IP. Результат диссертанта из работы [144].

$N_Q, \%$	$N_{nul}, \%$	$\langle A_B \rangle / \langle A_Q \rangle$	$\langle A_{MP} \rangle / \langle A_{PC} \rangle$	$\langle A_{MP} \rangle / \langle A_{IP} \rangle$
12.9	4	60	28.4	65

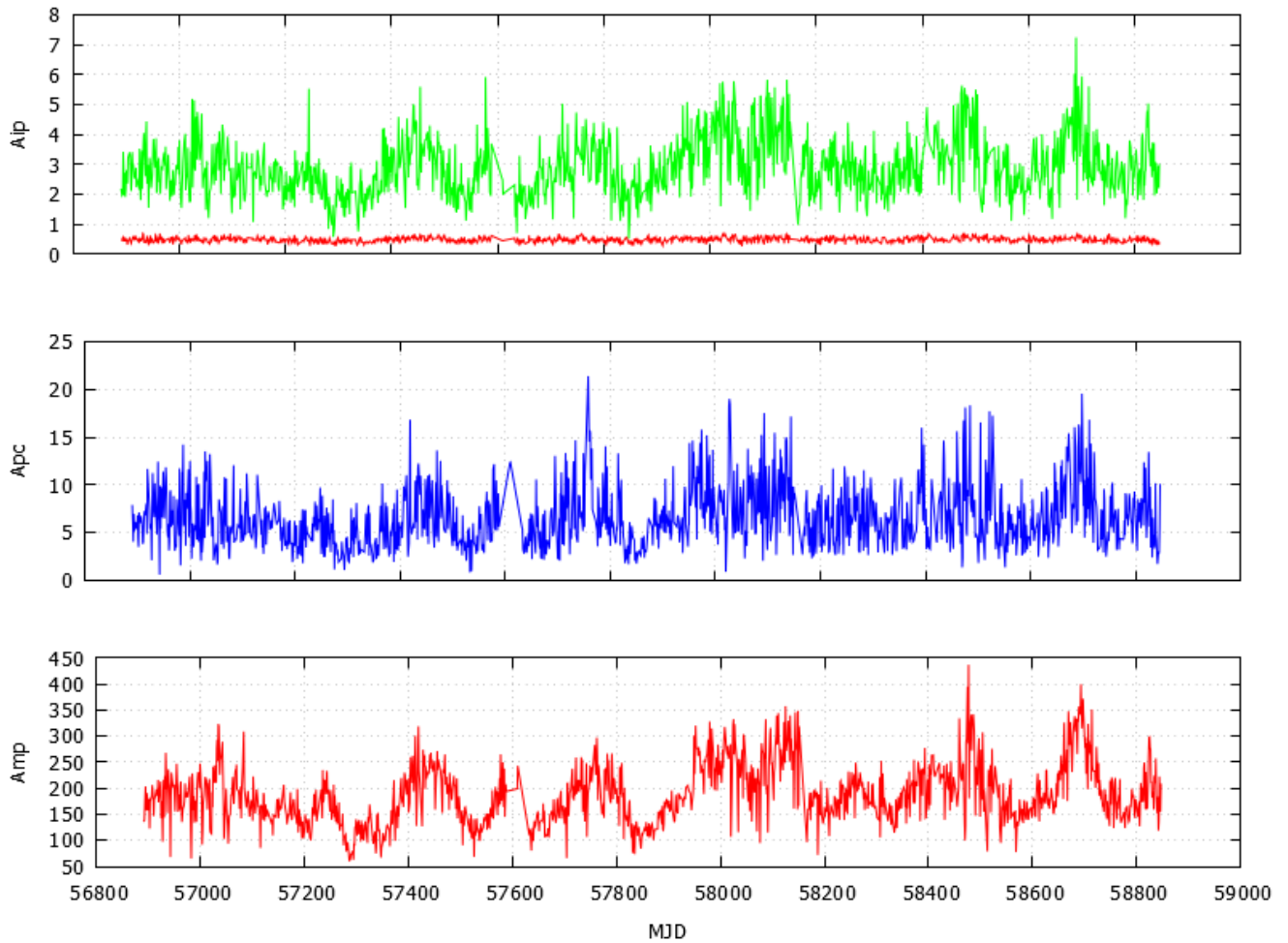


Рис. III.7 Вариации амплитуд MP, PC и IP со временем в относительных единицах (а.е.). Результат диссертанта из работы [144]. Здесь выбраны только сеансы, в которых $A_{MP} > 60$ («B»-мода). На верхней части рисунка показано также изменение $\langle \sigma_n \rangle$ со временем.

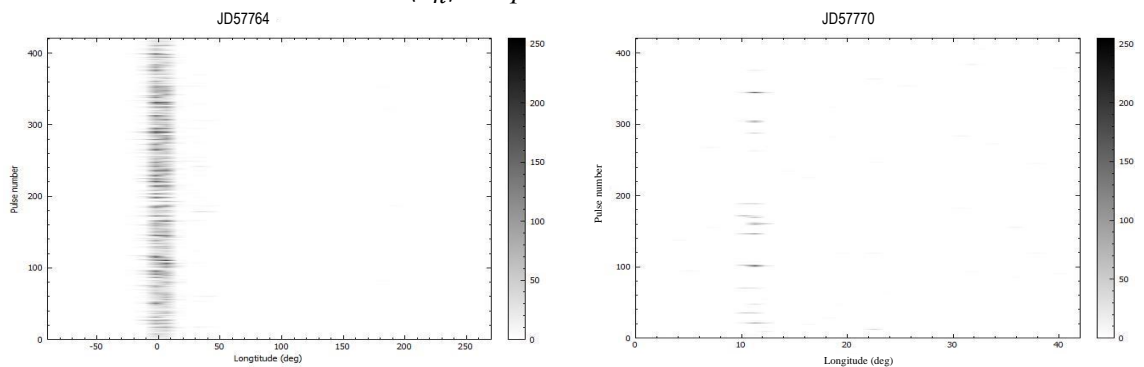


Рис. III.8 Левая панель – это излучение PSR J0826+37 в «B»-моду (сеанс JD 57764). Правая панель демонстрирует излучение пульсара в «Q»-моду (сеанс JD 57770). Результат диссертанта из работы [144]. Нуллинг для этого сеанса наблюдений занимает 96% времени. На оси у отложен номер импульса, на оси x – долгота в градусах. Цветовая гамма соответствует диапазону амплитуд индивидуальных импульсов от $4\sigma_n$ (белый цвет) до максимального значения (черный цвет) за этот сеанс.

Средние значения отношения амплитуд компонент среднего профиля, полученные по этим данным, составляют: $\langle A_{MP}/A_{IP} \rangle = 66 \pm 15$, $\langle A_{MP}/A_{PC} \rangle = 33,4 \pm 15$ и хорошо согласуются с приведенными в Табл. III.1 отношениями средних величин.

На рис. III.8 показаны характерные вариации интенсивности излучения в «В» и «Q»-модах для двух сеансов. Количество импульсов с отсутствием излучения в «В»-моду ($A < 3\langle\sigma_n\rangle$, нуллинг) обычно меньше 10%, а в «Q»-моду нуллинг преобладает. Так в сеансе MJD 57770 длительность нуллинга составляет 96% времени.

§ III.4.2 Вариации амплитуд и межзвездные мерцания

Расстояние до пульсара $R = 360$ пк, тангенциальная скорость пульсара 190 ± 50 км/с [97]. На метровых волнах реализуются оба режима мерцаний. Время дифракционных мерцаний на частоте 103 МГц для J0826+2637 составляет: $t_{\text{dif}} = 35$ сек [95] и эти вариации сглаживаются как полосой приемника, так и усреднением импульсов при получении среднего профиля. Частотный масштаб дифракционных мерцаний, как отмечалось в разделе III.3, существенно меньше ширины частотного канала (78 кГц). Соответственно дифракционные мерцания будут сглажены полосой приемника и не будут сказываться на вариациях амплитуды среднего профиля. Если рассеивающий слой находится очень близко к Земле ($r \ll R$), то скорость V_{ef} определяется скоростью движения Земли, а если рассеяние происходит близко к пульсару, то она определяется скоростью пульсара. Скорость экрана порядка 10 км/с, а скорость Земли около 30 км/с. Случай протяженной среды соответствует $r = R$ и $V_{\text{ef}} = V_{\text{psr}}$.

Как видно из рис. III.7, временной масштаб вариаций – это десятки дней. Поэтому справедливо утверждать, что это рефракционные мерцания. Для оценки временного масштаба амплитудных вариаций обычно применяется структурная функция (SF). Она определяется следующим образом:

$$SF_k = \frac{1}{\langle A \rangle^2 N_k} \sum_{i=1}^{M-i} g_i g_{i+k} (A_i - A_{i+k})^2 \quad (\text{III.24})$$

где $\langle A \rangle$ – среднее значение амплитуды, M – длина массива, k – временной сдвиг в днях, $k = 1, 2, \dots, 0,8M$, $g_i = 1$, когда есть значение в данный день i и равно 0 в противном случае, $N_k = \sum_{i=1}^M g_i g_{i+k}$ – количество точек при данном сдвиге k . Структурная функция, определенная по всем данным, для которых $A_{\text{MP}} > 60$, показана на рис. III.9. Временной масштаб обычно определяется по временному сдвигу, на котором она падает в 2 раза. Видно, что на больших сдвигах SF выходит на насыщение (постоянный средний уровень). Этот уровень связан с индексом модуляции: он равен $2m^2$. Индекс модуляции, определяется как:

$$m = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(A_i - \langle A \rangle)^2}{N - 1}} \frac{1}{\langle A \rangle} \quad (\text{III.25})$$

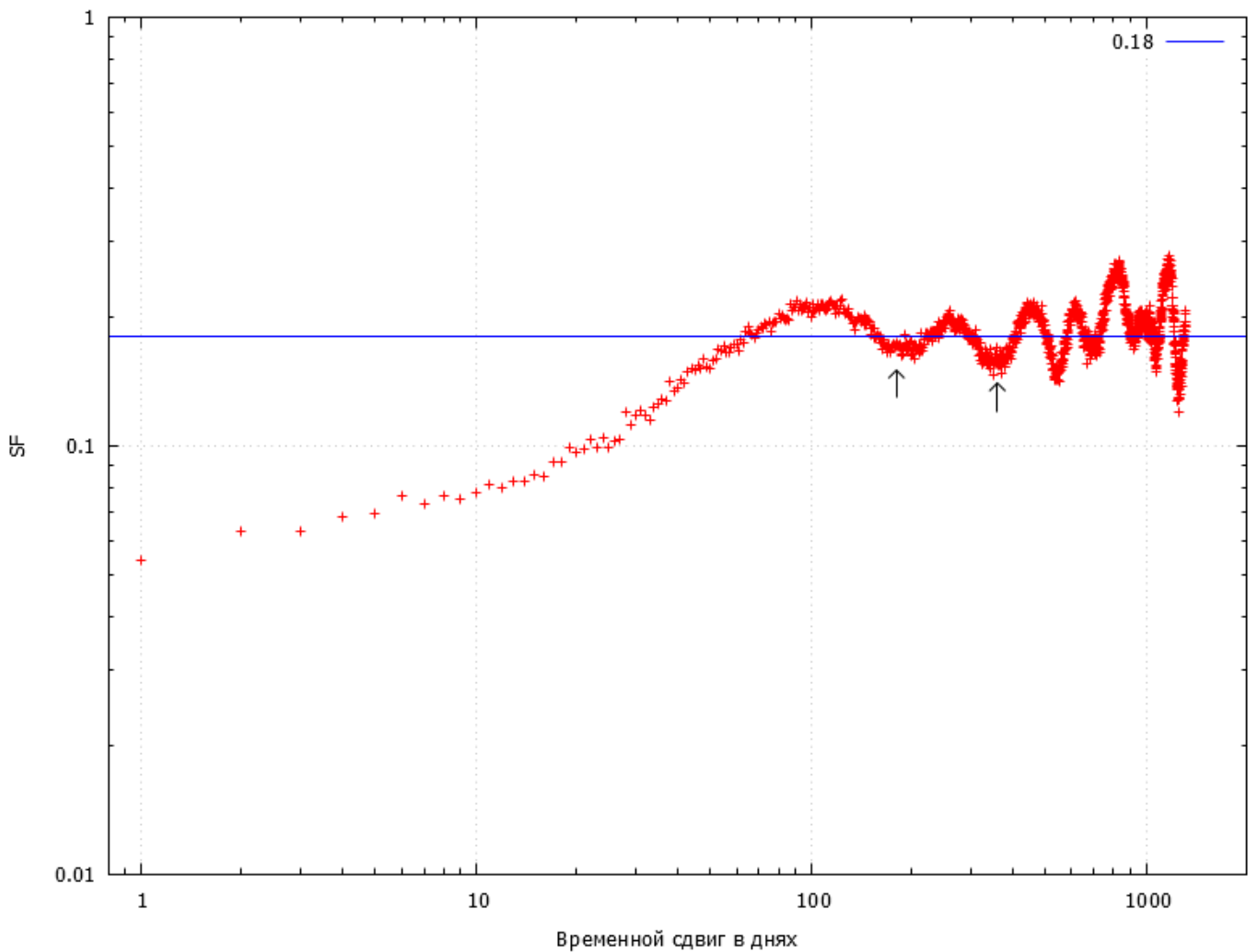


Рис. III.9 Структурная функция модуляции амплитуд J0826+37 показана в двойном логарифмическом масштабе. Результат диссертанта из работы [144]. Ось x – временной сдвиг в днях, ось y – значение структурной функции. Прямая линия на больших смещениях показывает уровень $2m^2$. Стрелки указывают на сдвиги в 180 и 360 дней.

Среднее значение амплитуды МР, определенное по всему интервалу наблюдений: $\langle A_{MP} \rangle = 188 \pm 57$. Здесь ошибка соответствует среднеквадратичному отклонению и определяется в основном сильной модуляцией, связанной с рефракционными мерцаниями. Индекс модуляции, определенный по вариациям амплитуды главного импульса в среднем профиле по всем дням (для сеансов с $A_{MP} > 60$), равен $m = 0,3 \pm 0,06$. Здесь ошибка определена по среднеквадратичному отклонению по 5 независимым интервалам по 300 дней. SF имеет излом и 2 линейных участка, которые соответствует двум временным масштабам. Более короткий масштаб в несколько дней имеет существенно меньшую амплитуду. Поскольку индекс модуляции имеет большую ошибку, то определение сдвига, при котором SF падает в 2 раза, также будет иметь большую ошибку. Ниже мы определим T_{ref} по корреляционной функции. На SF в области больших временных сдвигов видны локальные минимумы, соответствующие сдвигам в 180 и 360 дней. Они

обусловлены квазипериодической модуляцией амплитуды излучения с такими характерными периодами.

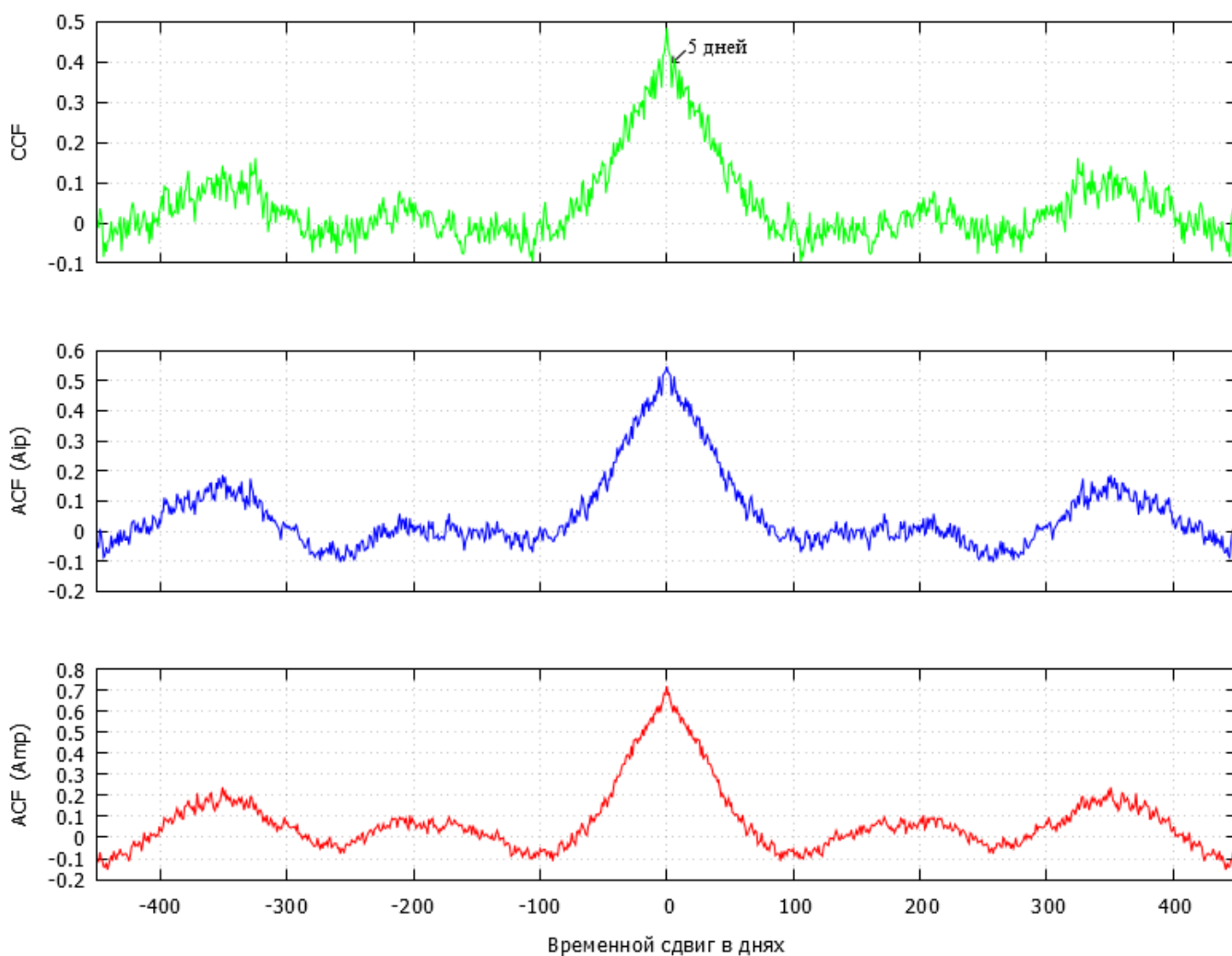


Рис. III.10 Нормированные ACF от вариаций амплитуды МР (нижняя панель) и IP (средняя панель). Результат диссертанта из работы [144]. На верхней панели CCF между амплитудами МР и IP.

Для определения характерных временных масштабов вариаций амплитуды мы использовали также корреляционный анализ. На рис. III.10 показаны нормированные ACF от вариаций амплитуд МР и IP, а также CCF между амплитудами МР и IP. Для ACF значение при нулевом сдвиге удалено. На всех трех панелях рис. III.10 видны характерные полугодовые и годовые временные масштабы вариаций амплитуды импульсов, а также узкая деталь малой амплитуды. Если вариации с разными временными масштабами независимы, то можно оценить их относительный вклад. Сумма квадратов их амплитуд при нулевом сдвиге по времени равна значению CCF. Мы определили соотношение амплитуд вариаций в 2,7 раза, а сами масштабы: короткий около 5 дней и длинный $T_{ref} = 37 \pm 5$ дней. Короткий масштаб был определен по излому корреляционной функции, показанному стрелкой на рис. III.10. Длинный масштаб был определен по падению CCF 2 раза от уровня излома, видимого на масштабе 5 дней. Относительную ошибку в T_{ref} мы определили, как пропорциональную $\sqrt{T_{ref}/T}$, где T – общий интервал наблюдений.

Отметим, что при сглаживании вариаций амплитуд МР по 5 точкам (рис. III.7) индекс модуляции становится $m = 0,25$ и определенное значение по структурной функции: $T_{ref} = 40$ дней, что совпадает со значением по ССФ.

§ III.4.3 Результаты наблюдений

Наше исследование пульсара J0826+2637 показало, что у него наблюдаются «В», «Q»-моды и нуллинг. В Табл. III.2 показаны доли времени, которые занимают эти моды и нуллинг в наблюдениях на БСА на частоте 111 МГц, на LOFAR на частоте 143 МГц [74], на GMRT на частоте 320 МГц [79]. Общая доля нуллинга и сеансов наблюдений, когда проходил переход от «В»-моды к «Q»-моду составил 4,1%, что вместе с долей «В» и «Q»-мод доводит значение общего количества сеансов до 100%.

Таблица III.2 Доли времени в «В/Q»-модах и доли нуллинга в этих модах. Результат диссертанта из работы [144].

	БСА	LOFAR	GMRT
«В»-мода	83%	63-90%	>77%
«Q»-мода	12,9%	10-37%	<23%
нуллинг («В»)	<10%	≥1,8%	3,4-4,4%
нуллинг («Q»)	>90%	≥80%	>91%

Как видно из Табл. III.2 в целом доли времени, занимаемые «В» и «Q»-модой, а также доли нуллинга в этих модах, сопоставимы на всех трех частотах. Заметно расходятся отношения пиковых плотностей потока в «В» и «Q»-модах на близких частотах 111 МГц и 143 МГц. В наших наблюдениях это отношение 60 раз, в наблюдениях LOFAR – 100 раз. Однако это соотношение является условным и деление на «В» и «Q»-моды зависит от принятого нами ограничения по амплитуде (меньше 10) для случаев «Q»-моды. Если мы понизим этот уровень, то соответственно соотношение амплитуд и доля времени нахождения в «В»-моду будут больше. Средние значения относительной амплитуды интеримпульса и посткурсоры у нас получились: $1,5 \pm 0,3\%$ и $3 \pm 1,3\%$. На 143 МГц соответствующие значения для IP $0,9 \pm 0,05\%$ и $3,76 \pm 0,05\%$ для РС.

Рефракционные и дифракционные мерцания пульсара J0826+2637 наблюдались на частоте 1,7 ГГц [98]. На интервале наблюдений с 2003 по 2006 годы было проведено 70 сессий с длительностью сеансов от 6 до 12 часов. Было показано, что временные масштабы дифракционных мерцаний составляют 19,3 минуты и рефракционных мерцаний – 144 минуты. Время рефракционных мерцаний зависит от частоты наблюдения, как: $T_{ref} \sim f^{\alpha/(\alpha-2)}$, где α – показатель пространственного спектра неоднородностей межзвездной плазмы. В области между внутренним и внешним масштабами: $s_{inn} < s < s_{out}$, спектр описывается степенным законом [99]: $P_{3n}(\rho) = C_n^2 \rho^{-\alpha}$, где C_n^2 – мера турбулентности вдоль луча зрения и $\rho = 2\pi/s$, при этом для

Колмогоровского спектра $\alpha = 11/3$. Анализ 2D корреляционных функций динамического спектра J0826+2637 дает значение $\alpha = 3,66$ [100], что близко к Колмогоровскому значению 3,67. Мы будем использовать $\alpha = 3,67$, тогда $T_{ref} \sim f^{2,2}$. Пересчет 144 мин на частоте 1700 МГц на нашу частоту 111 МГц дает 40,5 дней, что совпадает с полученным нами значением.

В работе [101] из наблюдений на наземно-космическом интерферометре на частоте 324 МГц был определен угол рассеяния в направлении J0826+2637: $\theta_{scat} = 0,77 \pm 0,08$ mas. Полагая $\theta_{scat} \sim f^{2,2}$ получим на нашей частоте $\theta_{scat} = 8,13$ mas. С другой стороны, θ_{scat} можно оценить из соотношения $\theta_{scat} = \sqrt{c/\pi R f_{dif}}$ (из [102]). На нашей частоте $f_{dif} = 2$ кГц и соответственно $\theta_{scat} = 9,7$ mas. Характерный масштаб рефракционных мерцаний $T_{ref} = r\theta_{scat}/V_{ef}$. Используя полученное значение $T_{ref} = 37$ дней и $\theta_{scat} = 9,7$ mas, определим отношение: $r/V_{ef} = T_{ref}/\theta_{scat} = 6,7 \cdot 10^{13}$ см. Для случая протяженной рассеивающей среды считая, что скорость пульсара существенно превышает V_{obs} и V_{scr} , для $r = R = 360$ пк, $V_{ef} = V_{psr} = 190$ км/с получим: $r/V_{ef} = 5,7 \cdot 10^{13}$, что хорошо совпадает с полученным выше отношением. Следовательно, можно сделать вывод, что протяженная среда вносит существенный вклад в рассеяние. В работе [101] было оценено расстояние до рассеивающего экрана по анализу вторичного спектра, как $r = 240$ пк. Дуги во вторичном спектре сильно размытые, что может служить свидетельством того, что тонкий экран вносит не основной вклад в рассеяние.

Временной масштаб в 5 дней, обнаруженный нами в структурной и корреляционных функциях, имеет малый вклад (примерно 1/3) в вариации амплитуды излучения от пульсара и возможно связан с рефракционными мерцаниями на структуре, пространственный масштаб которой примерно в 7 раз меньше основного масштаба. Структуры (неоднородности плазмы), вызывающие мерцания на масштабе пять дней, могут объясняться дополнительным тонким экраном на луче зрения. Вклад этих мерцаний в наблюдаемую общую картину переменности мал. Для однозначной интерпретации нужны наблюдения на других частотах.

Полугодовой и годовой временные масштабы, наблюдаемые в SF, ACF и CCF, свидетельствуют об их вероятной связи с движением Земли по орбите. Возможно, в направлении на пульсар на близком расстоянии от Земли находится рассеивающий слой и по мере того, как луч зрения пересекает разные точки орбиты, изменяется V_{ef} в соответствии с уравнением III.8. Чтобы было заметное влияние этого эффекта, необходимо чтобы вклад от скорости пульсара в V_{ef} : $rV_{psr}/(R - r)$ был сравним со скоростью Земли V_{obs} . Соответственно, расстояние до такого слоя должно быть порядка 50 пк. Тогда вклад от скорости пульсара будет 30 км/с. Годовые вариации амплитуды в направлении J0826+2637 ранее другими авторами не отмечались.

§ III.5. Пульсар J0953+0755

Пульсар J0953+0755 попадает в площадку обзора БСА3 и ежедневно наблюдается на протяжении 9 лет. Центральная частота наблюдений 110,25 МГц, полоса приема 2,5 МГц. На антенне проводятся наблюдения в разных режимах и на разных приемниках. В настоящей работе был использован 32-канальный приемник с шириной канала 78 кГц. Время опроса точки 12,5 мс. Для калибровки сигнала в частотных каналах использовалась калибровочная ступенька с известной температурой, которая записывалась 6 раз в день. Ежедневные записи пульсара проводились с 21.08.2014 по 31.12.2022 (MJD 56890-59944), всего 3054 дня.

Данные регистрировались во всех частотных каналах на диск часовыми порциями. Из соответствующей часовой записи выбиралась часть, соответствующая времени прохождения пульсара через диаграмму антенны по уровню половинной мощности. Для пульсара J0953+0755 это время составляет 3,2 мин (798 импульсов). Первичная обработка включала несколько этапов: калибровка сигнала по калибровочной ступеньке таким образом, чтобы усиление во всех каналах было одинаковым; вычитание базовой линии; компенсация дисперсии; запись всех импульсов во всех частотных каналах на диск. После этого проводился анализ средних профилей, полученных за каждый день, и отбраковывались сеансы, в которых качество среднего профиля было низким.

Средний профиль для каждого сеанса получался после компенсации дисперсии сложением всех записей с заданным периодом. В среднем профиле проводился циклический сдвиг таким образом, чтобы МР был в первой четверти периода. Фаза МР во всех сеансах была одной и той же, поэтому можно было складывать их, чтобы получить средний профиль за все сеансы данного года. На рис. III.11 представлен один из таких профилей, накопленный по 112 сеансам за 2014 год. Для большей наглядности он приведен с двойным периодом. Здесь хорошо видны компоненты этого профиля: МР, IP и мост. Излучение имеет место практически весь период.

Пульсар наблюдался в двух смежных лучах, поэтому можно было следить за состоянием ионосферы и если смещение координаты по склонению было большим, то эти сеансы не использовались для анализа. При наличии сильных помех такие записи также исключались из анализа. Кроме того, часть дней была использована для технических работ на антенне. Всего по перечисленным выше причинам было исключено 9,7% из общего числа сеансов. Поскольку излучение пульсара занимает почти весь период, для каждого сеанса на долготе минимального значения амплитуды среднего профиля формировался временной ряд амплитуд (положительные и отрицательные отклонения от среднего уровня) и затем по ним находилось значение сигмы шумов (σ_n). Для каждого сеанса записывались значения σ_n , амплитуды МР, IP и моста для

среднего профиля в отдельную таблицу за все дни наблюдений. Долгота, на которой определялась амплитуда моста, на рис. III.11 отмечена стрелкой.

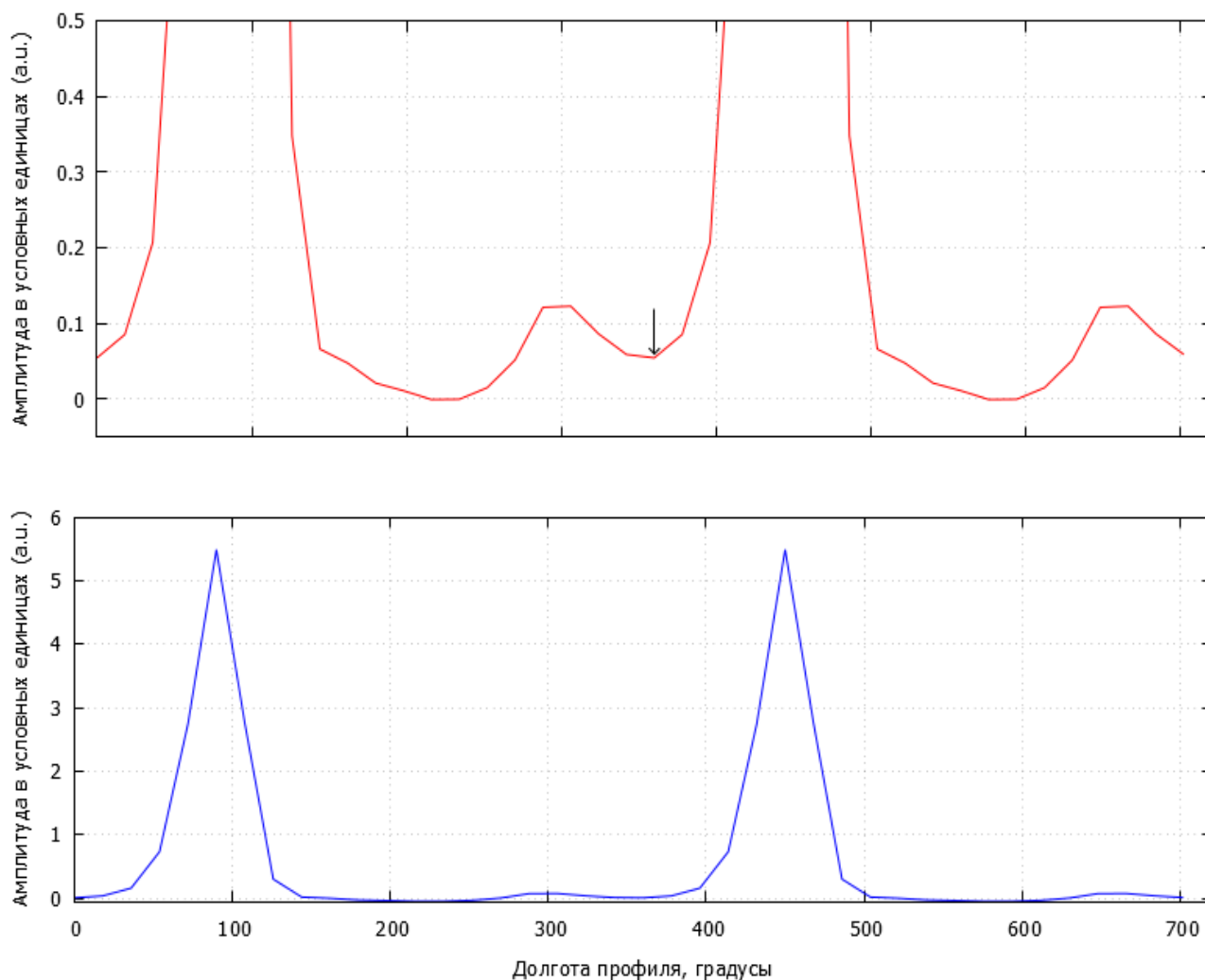


Рис. III.11 Средний профиль J0953+0755, накопленный за 2014 год (112 сеансов). Результат диссертанта из работы [105]. Стрелкой отмечена долгота, на которой измерялась амплитуда моста (M). Вверху показан этот профиль в увеличенном масштабе, чтобы лучше было видно межимпульсное излучение.

Период пульсара $P = 0,253$ с, мера дисперсии $DM = 2,97$ пк/см³, мера вращения $RM = 1,35$ рад/м² согласно каталогу ATNF [1]. Дисперсионное размазывание в полосе одного канала меньше дискрета. В среднем профиле пульсара мы имеем 20 точек с разрешением 12,5 мс. Ширина среднего профиля на уровне половины амплитуды на частоте 110,25 МГц составляет 15 мс, расстояние между компонентами 6,2 мс [87], поэтому детали индивидуальных импульсов (компоненты и предимпульс) не разрешаются в наших наблюдениях. В настоящей работе мы будем анализировать только три компонента: MP , IP и мост.

§ III.5.1 Анализ и результаты

Пульсар J0953+0755 – один из наиболее мощных и близких пульсаров. Расстояние до него $R = 262 \pm 5$ пк, поперечная лучу зрения скорость $V_{\text{перп}} = 36,6 \pm 0,7$ км/с [103]. На рис. III.12

показаны вариации амплитуды МР для среднего за сеанс профиля (3,2 мин) за первые 1000 дней наблюдений. Видно, что амплитуда сильно меняется день ото дня. По формуле (III.25) индекс модуляции $m = 1$.

Сильные вариации обусловлены эффектами распространения излучения в неоднородной межзвездной плазме. Эти эффекты включают: Фарадеевское вращение плоскости поляризации, дифракционные и рефракционные мерцания. Характерные временной и частотные масштабы мерцаний на частоте 112 МГц: $t_{\text{dif}} > 200$ с и $f_{\text{dif}} = 220$ кГц [94]. Поскольку временной масштаб мерцаний больше времени одного сеанса, а частотный масштаб меньше полосы приемника (2,5 МГц), то основной вклад в вариации амплитуды среднего за сеанс профиля определяется временным масштабом мерцаний.

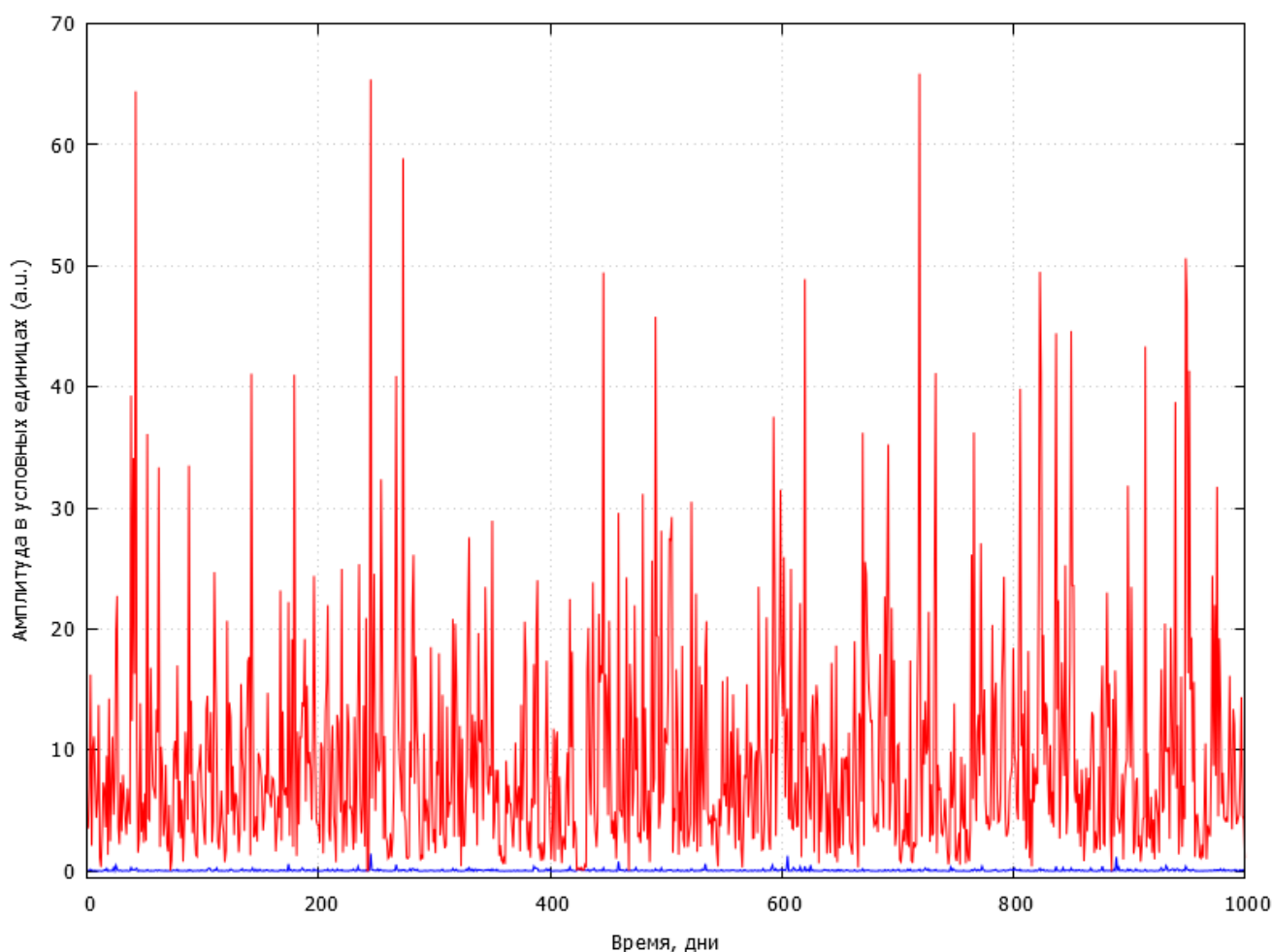


Рис. III.12 Зависимость амплитуды МР для среднего за сеанс профиля от времени. Результат диссертанта из работы [105]. Внизу на уровне нуля показана σ_n от времени. Первый день соответствует 21.08.2014 (MJD 56890).

Пульсар имеет сильную линейную поляризацию, $P_L = 70-80\%$ на частоте 111 МГц [104], и поэтому поляризация также может оказывать влияние на вариации амплитуды сигнала. По формуле (III.23) получаем $f_F = 17,3$ МГц на частоте 110,25 МГц, что существенно больше полосы приемника. Вращение плоскости поляризации в полосе приемника приводит к относительному

изменению амплитуды компонент профиля день ото дня. Поскольку позиционный угол между МР и IP изменяется примерно на 180° [85], отношение амплитуд МР и IP не будет меняться от сеанса к сеансу, а отношение интенсивностей излучения в МР и моста – будет меняться из-за разности позиционных углов на этих долготах.

А. Вариации амплитуд компонент среднего профиля

Вариации амплитуды $A(t)$ для МР, определяемой по средним за сеанс профилям, показаны за первые 1050 дней на рис. III.12. Как видно из этого рисунка, амплитуда существенно меняется день ото дня (более чем в 500 раз). Это связано как с поляризацией, так и с дифракционными и рефракционными мерцаниями при распространении излучения через неоднородности межзвездной плазмы. Среднее значение сигмы шума $\sigma_n = 0,32$ в относительных единицах. Самые большие амплитуды имеют отношение сигнала к шуму $S/N = 750$.

Чтобы получить средние по годам амплитуды МР, IP и моста, а также их соотношения, мы усреднили все профили за каждый год. Значения средних амплитуд МР, IP, моста (A_{MP} , A_{IP} , A_M) и их соотношения по годам приведены в Табл. III.3. При таком усреднении все эффекты распространения излучения в межзвездной плазме и поляризация уже не оказывают влияния. Усреднение соответствует накоплению порядка 16 часов (300 сеансов). Средние значения амплитуды компонент профиля в Ян приведены в конце таблицы. Относительная амплитуда интеримпульса $2,0 \pm 0,28\%$, однако в отдельных сеансах (при накоплении 3,2 мин) может достигать до 5%. Внутри одного сеанса наблюдений могут наблюдаться импульсы, в которых амплитуда интеримпульса может превышать амплитуду на долготе МР. Такой пример показан на рис. III.13.

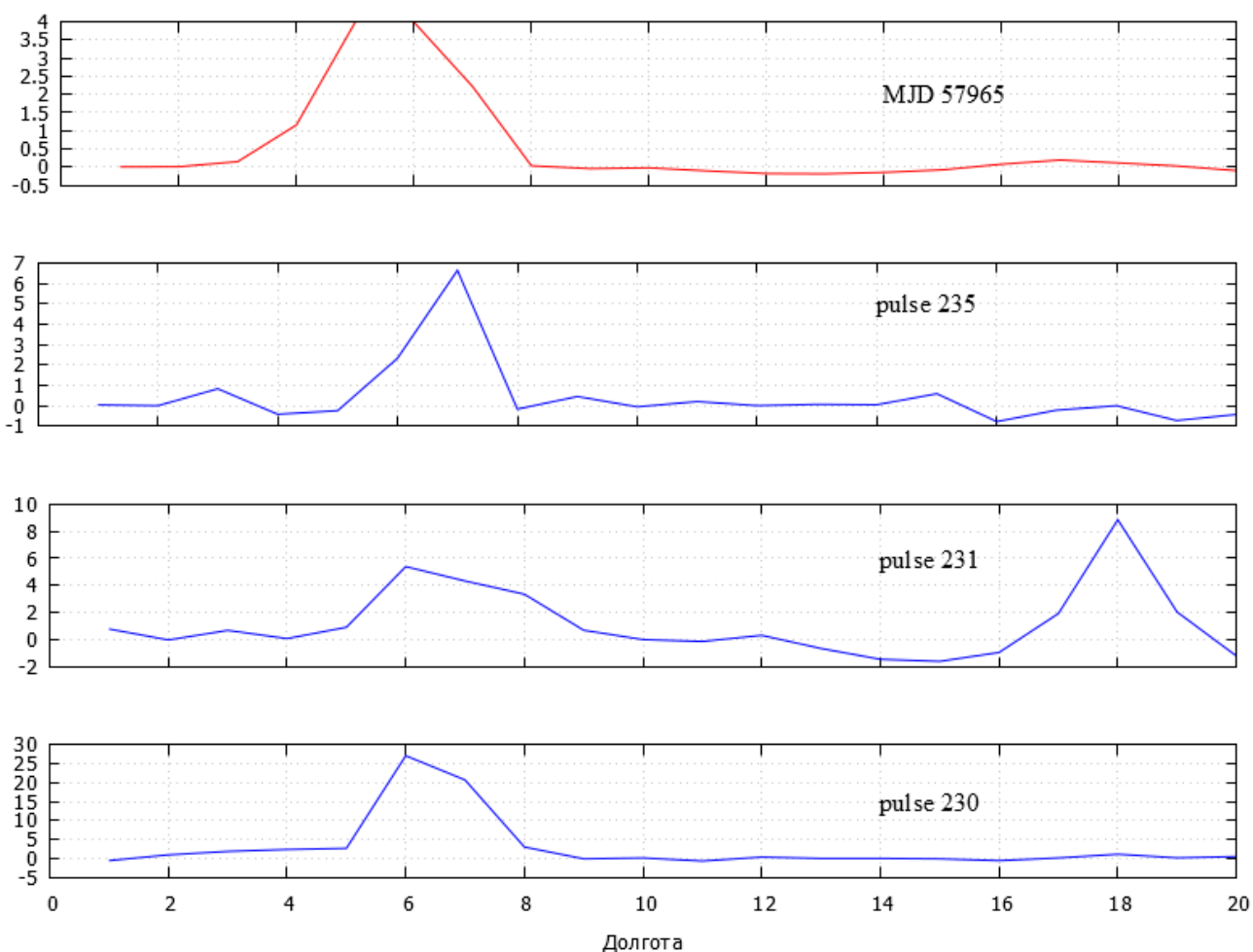


Рис. III.13 Три индивидуальных импульса (снизу - вверх) и средний за этот сеанс профиль. Макушка среднего профиля срезана (его амплитуда равна 10), чтобы лучше был виден IP. Ось y - амплитуда в относительных единицах, ось x - долгота в точках. Результат диссертанта из работы [105].

Таблица III.3: Отношения амплитуд компонент профиля J0953+0755 и их пиковые плотности потока по годам. Результат диссертанта из работы [105].

год	$A_{IP}/A_{MP}, \%$	$A_M/A_{MP}, \%$	$A_{MP}, \text{ян}$	$A_M, \text{ян}$	$A_{IP}, \text{ян}$
2014	2,2	1,01	25,77	0,26	0,57
2015	2,15	1,31	24,27	0,31	0,49
2016	1,93	1,37	25,95	0,25	0,50
2017	1,9	0,78	24,38	0,19	0,46
2018	2,3	1,15	22,56	0,26	0,43
2019	2,16	1,15	24,56	0,29	0,54
2020	2,14	1,14	21,20	0,24	0,45
2021	1,8	0,98	24,38	0,22	0,44
2022	1,4	0,47	20,49	0,10	0,29
среднее	$2,0 \pm 0,28$	$1,04 \pm 0,28$	$23,7 \pm 1,9$	$0,24 \pm 0,06$	$0,46 \pm 0,08$

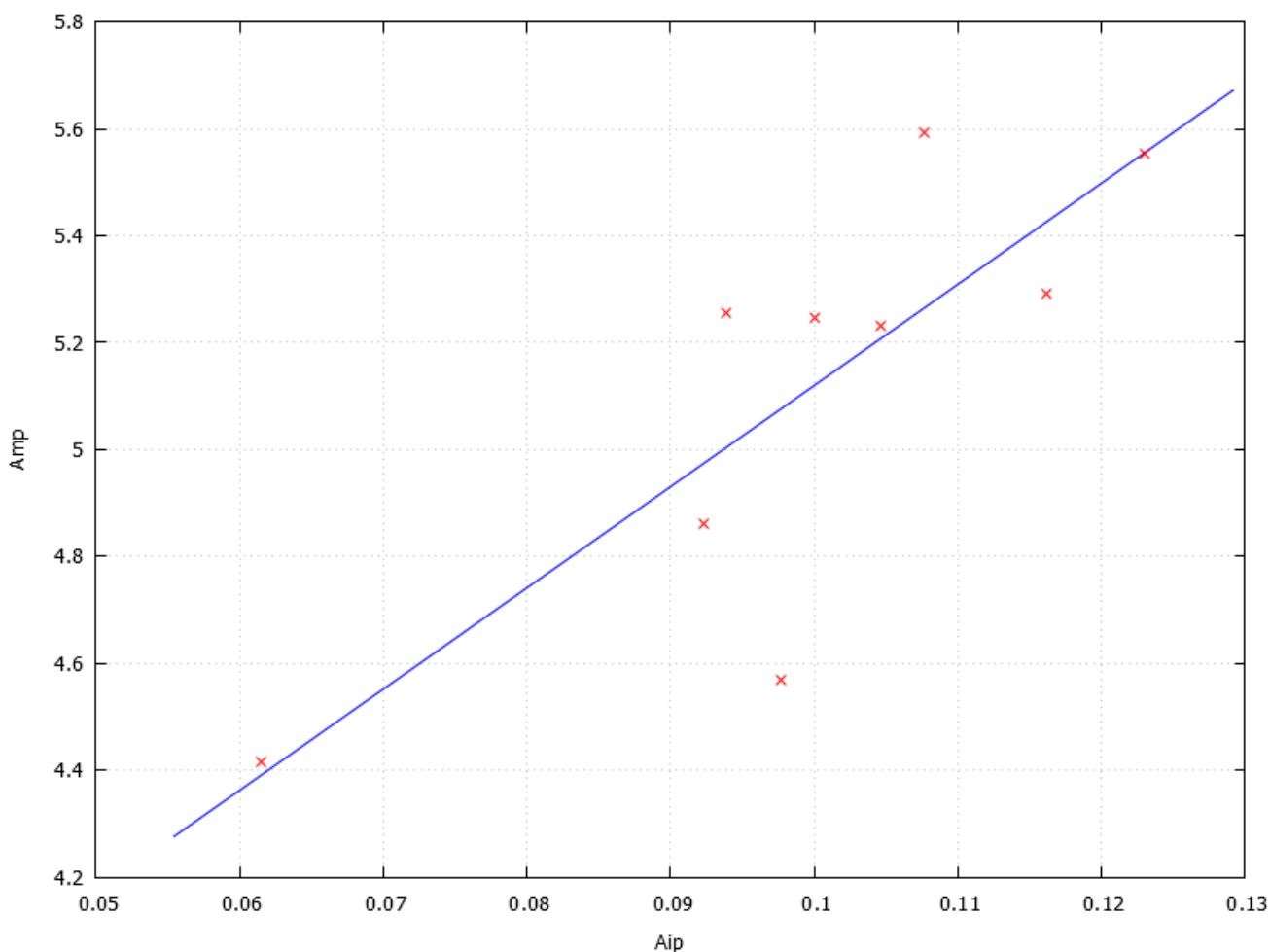


Рис. III.14 Зависимость между амплитудами МР и IP по 9 годам наблюдений. Амплитуды даны в относительных единицах. Прямая соответствует подгонке методом наименьших квадратов. Результат диссертанта из работы [105].

Здесь приведены 3 индивидуальных импульса и средний профиль за один из сеансов. В импульсе с номером 231 амплитуда интеримпульса превышает амплитуду МР в 1,64 раза. На рис. III.14 показаны зависимости между средними значениями амплитуд компонент профиля по 9 годам наблюдений. Как видно из этого рисунка, есть корреляция между амплитудами МР и IP при усреднении по годам. Коэффициент корреляции по всем точкам $R = 0,75$, если убрать значение за 2022 (точка в нижнем левом углу), то $R = 0,64$. Для остальных компонент корреляции нет.

В. Корреляционный анализ

Чтобы посмотреть, коррелируют ли вариации амплитуды МР и IP, полученные по средним профилям за сеанс наблюдения (3,2 мин), мы вычислили кросскорреляционную функцию (CCF) между ними на всем интервале наблюдений. Поскольку у нас неравномерные (с пропусками плохих сеансов) ряды, то мы определяли CCF, как:

$$CCF_k = \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2 N_k} \sum_{i=1}^{M-k} g_i g_{i+k} [(A_{1i} - \langle A_1 \rangle)(A_{2i} - \langle A_2 \rangle)] \quad (\text{III.26})$$

где $\langle A_1 \rangle$ и $\langle A_2 \rangle$ – средние значения амплитуд МР и IP, σ_1 и σ_2 – среднеквадратичные отклонения, M – длина массива, k – временной сдвиг в днях, $k = 0, 1, 2, \dots, 0,8M$; $g_i = 1$, когда есть значение в данный день i и равно 0 в противном случае. $N_k = \sum_{i=1}^M g_i g_{i+k}$ – количество точек при данном сдвиге k . Автокорреляционная функция (ACF) вычисляется таким же образом при замене A_2 на A_1 . Вычисление начинается с $k = 1$, чтобы исключить влияние шумов при нулевом сдвиге для ACF. Для CCF мы не считали функцию для отрицательных сдвигов, а просто отразили зеркально функцию на отрицательные сдвиги.

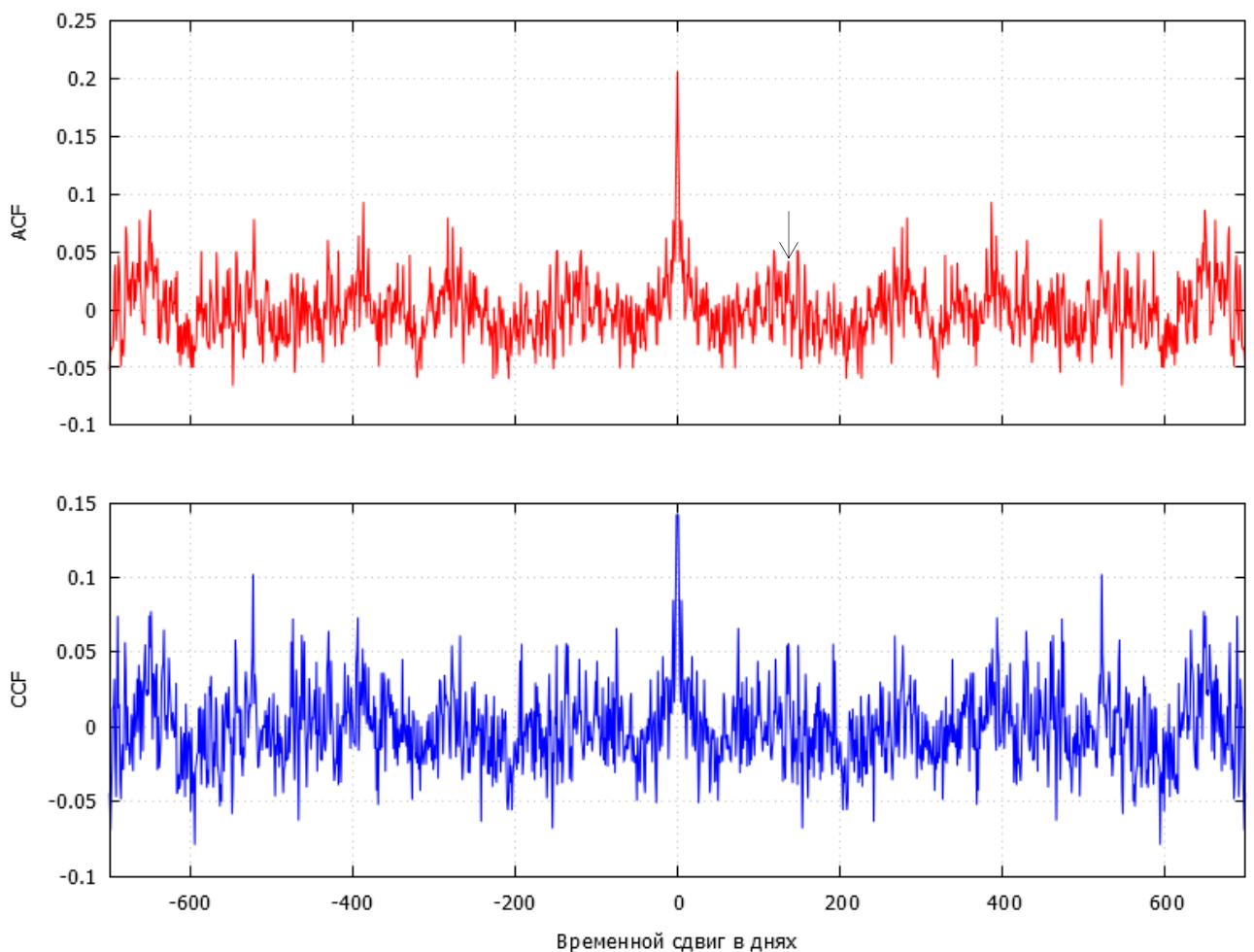


Рис. III.15 Кросскорреляционная функция между амплитудами средних за сеанс профилей МР и IP (нижняя панель), при нулевом сдвиге значение CCF (0,63 для $k = 0$) заменено на значение при $k = 1$; автокорреляционная функция от вариаций амплитуд МР (верхняя панель). Стрелкой отмечен сдвиг в 130 дней. Результат диссертанта из работы [105].

На рис. III.15 показаны CCF между амплитудами МР и IP, а также автокорреляционная функция от вариаций амплитуды МР. $CCF_{(k=0)}$ равна 0,63. На рисунке это значение не показано, чтобы лучше видеть меньшие значения CCF. Очевидно, что существует высокая корреляция

амплитуд МР и IP для одних и тех же сеансов. Шумы на долготах МР и IP не коррелированы при нулевом сдвиге.

Эти коррелированные вариации МР и IP обусловлены рефракцией на одной и той же среде и не являются собственными вариациями излучения пульсара. При сдвиге на 1 день $CCF_{(k=1)}$ равна 0,14, а $ACF_{(k=1)} = 0,21$. Даже при сдвиге в 2 дня наблюдается значимая корреляция: $CCF_{(k=2)}$ равна 0,09, а $ACF_{(k=2)}$ равна 0,11. Если определить характерное время декорреляции при сдвиге, на котором ACF падает в 2 раза, то это $T_{ref} = 2$ дня. Кроме этого масштаба в 1-2 дня существует, по-видимому, медленная модуляция с масштабом порядка 130 дней, отмеченная стрелкой на рис. III.15. Корреляция этих вариаций обусловлена рефракцией на более крупных масштабах.

С. Влияние межзвездной плазмы

Расстояние до пульсара J0953+0755 равно 360 пк, тангенциальная скорость пульсара 190 ± 50 км/с [94]. На метровых волнах реализуются оба режима мерцаний как дифракционные, так и рефракционные.

Расстояние до пульсара R равно 262 ± 5 пк, поперечная лучу зрения скорость $V_{psr} = 36,6 \pm 0,7$ км/с [103]. Скорость Земли порядка 30 км/с, V_{scr} около 10 км/с и ей можно пренебречь. На частоте 110,25 МГц мы имеем насыщенные мерцания, индекс модуляции вариаций интенсивности от сеанса к сеансу на долготе МР по нашим наблюдениям равен 0,985.

Дифракционные мерцания вызывают модуляцию интенсивности сигнала как по времени, так и по частоте. Временной масштаб модуляции по времени $t_{dif} > 200$ с [94] и мы его измерить не можем. В работе [106] было получено значение $t_{dif} = 28,8$ мин на частоте 154 МГц. Принимая частотную зависимость $t_{diff} \sim f^2 / (n - 2)$ и значение показателя спектра неоднородностей $n = 3$ [94], получим в пересчете на частоту 110,25 МГц значение $t_{dif} = 14,7$ мин, т.е. существенно больше времени нашего сеанса.

Для определения частотного масштаба мерцаний на долготах максимумов МР и IP, мы анализировали накопленные за сеанс так называемые спектры (зависимости амплитуды от частоты) в 32-х каналах. Поскольку временной масштаб дифракционных мерцаний существенно больше времени одного сеанса, то мерцания по времени не скажутся на спектре. Такие спектры для трех сеансов наблюдений приведены на рис. III.16. Видно, что спектры хорошо коррелируют, как по форме, так и по масштабу для МР и IP. Характерный частотный масштаб мерцаний f_{dif} определяется обычно по сдвигу, при котором происходит падение амплитуды корреляционной функции в 2 раза. Частотный масштаб сильно меняется от сеанса к сеансу в широких пределах: так для MJD 56933 $f_{dif} = 230$ кГц, а для MJD 58880 $f_{dif} = 800$ кГц. Частотные масштабы одинаковы для МР и IP.

§ III.5.2 Результаты наблюдений

На сильные вариации интенсивности излучения J0953+0755 в широком диапазоне временных масштабов указывалось во многих работах ([87], [88], [89], [102], [106]). Мы наблюдаем сильные вариации амплитуды МР от сеанса к сеансу ($t > 3,2$ мин), индекс модуляции равен $m = 1$. В работе [106] с наблюдениями на частоте 154 МГц указали на сильную переменность плотности потока с индексом модуляции $m = 1,3$. Как мы показали, при усреднении за большой промежуток времени, вариации амплитуд компонент пульсара от года к году становятся небольшими, около 8% (Табл. III.3). Наблюдается существенная корреляция между усредненными за временной интервал 3,2 мин вариациями амплитуды МР и IP и от года к году. В работе [81] анализируя поведение интенсивности излучения от импульса к импульсу (на временном интервале в 200 импульсов) на частоте 430 МГц обнаружили корреляцию между энергиями IP и МР с коэффициентом 0,13-0,33 для разных выборок. Мы не обнаружили такую корреляцию при анализе амплитуд импульсов внутри одного сеанса.

Частотный дифракционный масштаб J0953+0755 в наших наблюдениях сильно меняется от сеанса к сеансу ($t_{\text{dif}} > 3,2$ мин). На большие вариации дифракционных параметров близких пульсаров указывалось в работе [102] по долговременным наблюдениям на 327 МГц. J0953+0755 не входил в этот список, однако вариации f_{dif} в 4-5 раз – обычное явление. Наблюдения близкого пульсара ($R = 270$ пк) J1136+1551 на частоте 110,25 МГц показали также сильные вариации дифракционных параметров [107]. В работе [106] на частоте 154 МГц измерили $f_{\text{dif}} = 4,1$ МГц для J0953+0755. Используя зависимость $f_{\text{dif}} \sim f^{-4,4}$ для Колмогоровского спектра, получим $f_{\text{dif}} = 930$ кГц, близкое к нашему значению. Измерение f_{dif} в работе [94] на частоте 112 МГц также хорошо согласуется с нашими данными. Мы впервые измерили частотный дифракционный масштаб на долготе интеримпульса и показали, что форма спектра и масштаб по частоте одинаковы для МР и IP. Этот факт также может служить доводом в пользу излучения МР и IP с одного полюса и, следовательно, малого угла между магнитным полем и осью вращения.

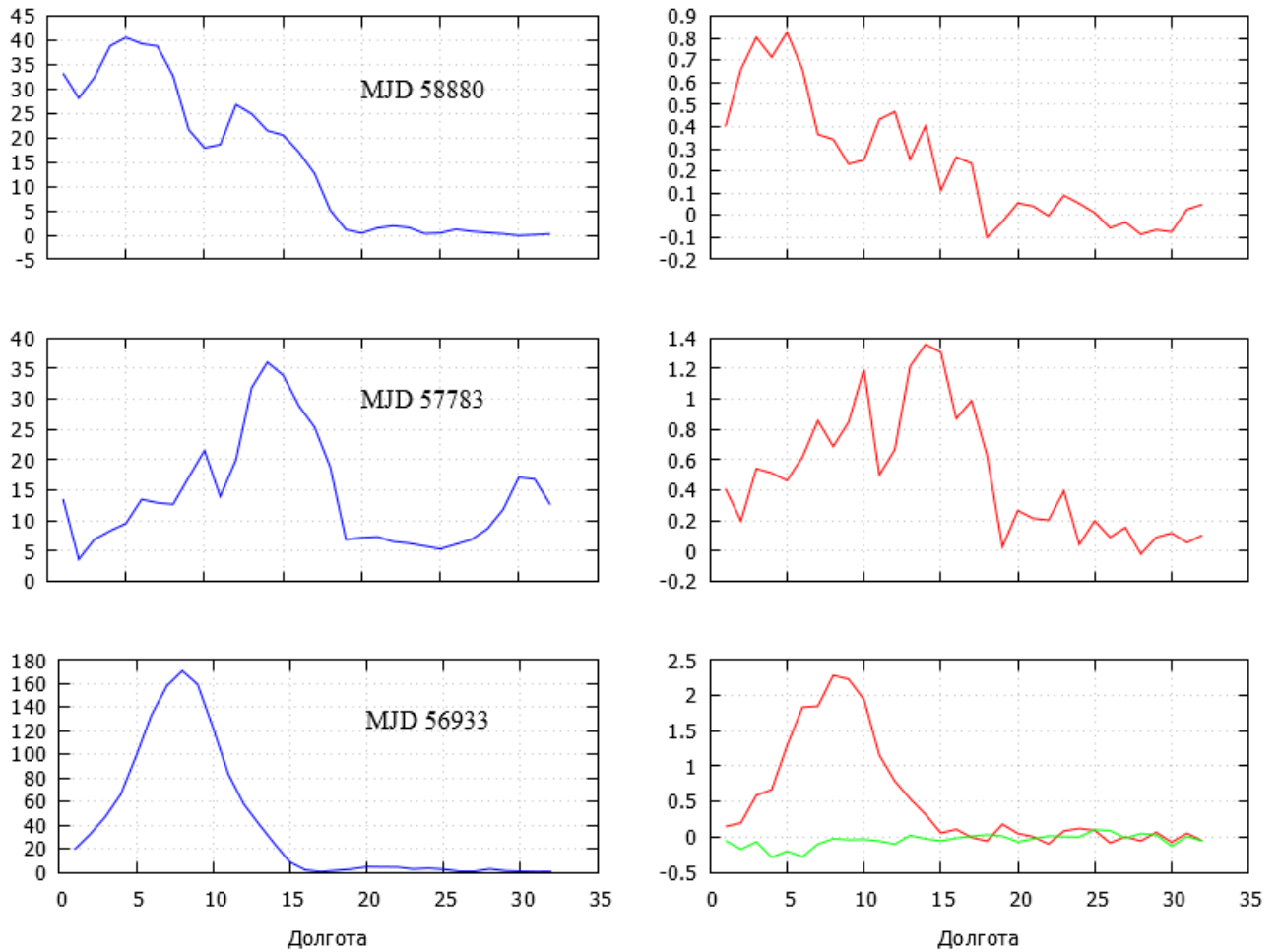


Рис. III.16 Средние спектры за 3 сеанса наблюдений на долготах: МР (слева) и IP (справа). Амплитуды даны в относительных единицах. Для MJD = 56933 на спектре интеримпульса дополнительно приведен спектр шума. Результат диссертанта из работы [105].

Высокая корреляция между амплитудами МР и IP от сеанса к сеансу при нулевом сдвиге по времени обусловлена тремя причинами: мерцаниями, поляризацией и ионосферой. Разделить их сложно. Временной масштаб вариаций в 1-2 дня обусловлен в основном рефракционными мерцаниями, поскольку как поляризация, так и дифракционные мерцания не коррелируют ото дня ко дню. В работе [108] наблюдали рефракционные мерцания близких пульсаров на частоте 75 МГц, в том числе и J0953+0755.

Авторы дают для него $T_{ref} = 3,2 \pm 1,4$ дня. Принимая зависимость $T_{ref} \sim f^{-2,2}$ и экстраполируя на частоту 110,25 МГц, получим $T_{ref} = 1,4$ дня или в пределах ошибок от 0,8 до 2 дней, что близко к полученному нами значению 1-2 дня. Для модели рассеяния на протяженной среде и Колмогоровского спектра неоднородностей без внутреннего масштаба используем для времени рефракции и индекса модуляции m_{ref} [109]:

$$T_{ref} = \frac{0,5}{V_{ef}} \sqrt{\frac{cR}{\pi f_{dif}}} \quad (III.27)$$

$$m_{ref} = 1,21 \left(\frac{f_{dif}}{2f} \right)^{0,17} \quad (III.28)$$

Здесь $V = V_{ef}$ и для $r = R/2$ и $V_{ef} = V_{psr} + V_{obs}$. Принимая среднее значение для $V_{ef} = 40$ км/с (V_{obs} существенно меняется со временем), $f_{dif} = 230$ кГц и 800 кГц, получим $T_{ref} = 4,7$ дня и $2,5$ дня, соответственно. Поскольку частотный дифракционный масштаб сильно меняется со временем, и мы не знаем его среднего значения на всем временном интервале наших наблюдений, то можно сказать, что предсказываемое моделью T_{ref} , хорошо согласуется с полученным нами значением $T_{ref} = 1-2$ дня. Ожидаемое значение $m_{ref} = 0,42$ и $0,52$ для $f_{dif} = 230$ кГц и 800 кГц, соответственно. Наш индекс модуляции $m = 1$ существенно больше предсказываемого моделью. Возможно, это связано с наличием еще одного рефракционного масштаба в 130 дней, который мы также связываем с рефракционными мерцаниями на крупных масштабах неоднородностей. Сам масштаб можно определить на сдвиге, равном $1/4$ расстояния между минимумами CCF (df) в центральной части на рис. III.15. Он порядка 30 дней и пространственный масштаб диска рассеяния: $s = T_{ref} \times V_{ef} = 10^{13}$ см.

§ III.6 Выводы по главе III

Ежедневные наблюдения на БСА ФИАН на длительном интервале времени позволили подтвердить существование Q-моды у пульсара J0826+2637 на частоте 110,25 МГц. Как и в наблюдениях других авторов ([74], [79]) мы отмечаем, что у пульсара наблюдаются «В» и «Q»-моды, а также нуллины в обеих модах. Длительность нуллинов в «Q»-моде во много раз больше, чем в «В»-моде.

Анализ вариаций пиковой амплитуды среднего импульса на длительном временном интервале: с августа 2014 по декабрь 2019 года, позволил обнаружить 3 временных масштаба, связанных с прохождением излучения через неоднородности межзвездной плазмы.

В результате анализа 9-ти летних ежедневных наблюдений J0953+0755 получены следующие результаты:

- Определены средние и относительные значения амплитуд компонент среднего профиля на частоте 110,25 МГц при усреднении профилей по годам: $A_{MP} = 23,7 \pm 1,9$ Ян, $A_{IP} = 0,46 \pm 0,08$ Ян, $A_M = 0,24 \pm 0,06$ Ян, $A_{IP}/A_{MP} = 2,0 \pm 0,28\%$, $A_M / A_{MP} = 1,04 \pm 0,28\%$; амплитуда IP может превышать амплитуду MP в отдельных импульсах, но это довольно редкое событие;
- Наблюдаются сильные вариации амплитуды среднего профиля от сеанса к сеансу на масштабах больше 3,2 мин. Среднее значение амплитуды этих вариаций, $A = 25$ Ян, индекс модуляции равен 1. Пиковые амплитуды достигают 240 Ян, при этом $S/N = 750$;

– Обнаружена высокая корреляция (коэффициент корреляции равен 0,63) между вариациями амплитуды МР и IP как при усреднении профилей за 3,2 мин, так и при усреднении по годам. Эта корреляция обусловлена рефракционными мерцаниями. Корреляции вариаций амплитуды МР и IP по отдельным импульсам внутри сеанса наблюдений не обнаружено;

– Впервые измерен частотный масштаб дифракционных мерцаний IP и показано, что форма спектра и масштаб одинаковы для МР и IP. Наблюдаются сильные вариации f_{dif} от сеанса к сеансу ($t > 3,2$ мин): 200 - 800 кГц;

– Определен масштаб рефракционных мерцаний $T_{\text{ref}} = 1-2$ дня, обнаружены вариации амплитуды сигнала с периодом порядка 130 дней. Короткий масштаб согласуется с предсказанием для модели протяженной рассеивающей среды с Колмогоровским спектром неоднородностей. Второй масштаб, по-видимому, связан с рефракционными мерцаниями на крупных неоднородностях порядка 10^{13} см.

Для J0953+0755 показана высокая переменность излучения не только от импульса к импульсу, но и на масштабах больше 3 мин. Определен рефракционный масштаб мерцаний 1-2 дня. Обнаружена модуляция излучения с характерным масштабом порядка 130 дней, которая, по-видимому, также связана с рефракционными мерцаниями. Структурный и корреляционный анализ вариаций амплитуд МР, IP и РС по J0826+2637 на длительном временном интервале позволили обнаружить характерные временные масштабы 5 дней, 37 дней и один год. Анализ временных вариаций показывает, что временной масштаб 37 дней хорошо объясняется рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, которая распределена в основном квази-однородно на луче зрения. Эти мерцания вносят основной вклад в наблюдаемую переменность. Временной масштаб переменности 5 дней ранее не был известен. Пятидневные мерцания не имеют однозначной интерпретации, но связаны, по-видимому, с рефракцией радиоволн в межзвездной среде. Временной масштаб переменности в один год, также ранее не обнаруживался. Мы связываем его появление с наличием рассеивающего слоя на близком экране, находящемся на расстоянии порядка 50 пк от Земли.

Глава IV. Поиск слабых компонент в излучении пульсаров

(J1543+0929, J2234+2114)

§ IV.1. Формы средних профилей пульсаров

Большинство пульсаров имеет радиоизлучение в узком конусе и типичная ширина средних профилей, полученных накоплением нескольких сотен или даже тысяч импульсов, составляет 5-10% от периода пульсара. Хотя индивидуальные импульсы имеют разные формы, средний профиль для данного пульсара обычно очень стабилен на данной частоте ([110], [111]). Однако существуют пульсары с переключением мод (J0946+0951, J1239+2453 и другие), когда форма профиля дискретным образом меняется [112]. Наблюдаемая форма импульса существенно зависит от размера и структуры излучающей области, а также от угла между направлением на наблюдателя и центром конуса излучения.

На низких радиочастотах наблюдений, где излучение сосредоточено на больших высотах от поверхности нейтронной звезды, конус открытых силовых линий широкий и излучение может наблюдаться в значительной области долгот профиля, даже если угол между осью вращения и магнитной осью не является малым. Излучение вне главного импульса, распределённого в широкой области долгот среднего профиля, является межимпульсным (интеримпульсным), образующееся от ряда более слабых источников, распределённых в широкой области долгот магнитосферы пульсара. Протяжённый компонент на низких частотах может наблюдаться почти весь период, при этом его интенсивность растёт с уменьшением частоты, и энергия может сравняться с энергией главного импульса или даже превысить её. Для обнаружения возможного интеримпульсного излучения малой интенсивности, неравномерного распределённого по долготе профиля, необходимы наблюдения с высоким отношением S/N и знание окружающего фонового излучения (поведения шумовой дорожки вне импульса пульсара) [113].

Наблюдаемые формы средних профилей могут быть, как однокомпонентными (например, для J1935+1616), так и многокомпонентными (J1239+2453 имеет 5 компонент). В очень редких случаях пульсары показывают излучение в течение всего периода. Так пульсар J0828-3417 имеет излучение в области 250° (69% периода) на метровых волнах и в течение не менее 70% времени его излучение не видно (нуллинги) ([114], [115]). Для пульсара J0953+0755 излучение детектируется также практически весь период ([81], [83], [116]). Это предполагает, что угол между магнитной осью и осью вращения мал (соосный ротор) и направление на наблюдателя находится все время внутри области излучения. У ряда пульсаров наблюдаются импульсы на расстоянии примерно 180° от главного импульса (MP – main pulse). Эти импульсы называют интеримпульсами, и они обычно имеют существенно меньшую амплитуду по сравнению с MP.

Пульсары с интеримпульсами могут быть как соосными, так и ортогональными ротаторами. В случае ортогонального ротатора наблюдатель может видеть излучение с обоих магнитных полюсов. Для того, чтобы различить случай соосного или ортогонального ротаторов могут быть использованы поляризационные измерения [117].

Целью настоящей главы является поиск слабых компонент в радиоизлучении пульсаров вне главного импульса по выборке пульсаров, наблюдаемых в Пушчинском многолучевом поиске (PUMPS) [60].

§ IV.2. Наблюдения пульсаров (J1543+0929, J2234+2114)

Мониторинговые наблюдения проводятся на Большой Синфазной Антенне (БСАЗ) Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) по программе поиска пульсаров и транзиентов начиная с августа 2014 года. Мы использовали эти данные в настоящей работе.

Время прохождения через меридиан по половинной мощности (сеанс наблюдений) составляет около 3,5 мин [51, с. 336]. В настоящей работе был использован 32-канальный приемник с шириной канала в 78 кГц. Время опроса точки 12,5 мс. Для калибровки сигнала в частотных каналах использовалась калибровочная ступенька с известной температурой (сигнал от генератора шума), которая записывалась 6 раз в день. По калибровочным ступенькам при дальнейшей обработке выравнивалось усиление сигнала в разных сеансах и во всех частотных каналах [38]. За 10 лет круглосуточного мониторинга для каждого пульсара накоплено более 3000 наблюдательных сессий.

Данные записывались на диск часовыми порциями во всех частотных каналах. Из часовой записи выбиралась часть, соответствующая времени прохождения данного пульсара через диаграмму антенны по уровню половинной мощности. Первичная обработка данных включала: калибровку сигнала по калибровочной ступеньке таким образом, чтобы усиление во всех каналах было одинаковым, вычитание базовой линии, компенсация меры дисперсии (DM), запись всех импульсов во всех каналах на диск. Подробно обработка данных описана в пункте I.4 настоящей работы.

Средний профиль для каждого сеанса получался после компенсации DM сложением всех записей импульсов с заданным периодом P . Если отношение сигнала к шуму (S/N) в главном импульсе было меньше 8, сессия отбрасывалась. Для оставшихся сессий в каждом среднем профиле проводился циклический сдвиг таким образом, чтобы главный импульс был в первой четверти периода. Таким образом, фаза MP во всех сеансах была одной и той же, поэтому можно было складывать средние профили за каждый сеанс, чтобы получить средний профиль за все отобранные сеансы данного года. Делалась оценка среднеквадратичного шума вне импульса (σ_n). Кроме того, формировались файлы с записями импульсов каждого сеанса и среднего профиля за

данный сеанс. Затем профили всех сеансов за каждый год суммировались, и мы получали средние профили по годам, а также суммарный средний профиль за все годы. Для анализа данных использовалась выборка из 96 пульсаров, для которых отношение S/N в главном импульсе среднего профиля при накоплении за 10 лет (2014-2023) было больше 40. В табл. 1 работы [63] приведены названия этих пульсаров, период и мера дисперсии.

§ IV.3. Результаты наблюдений и анализ

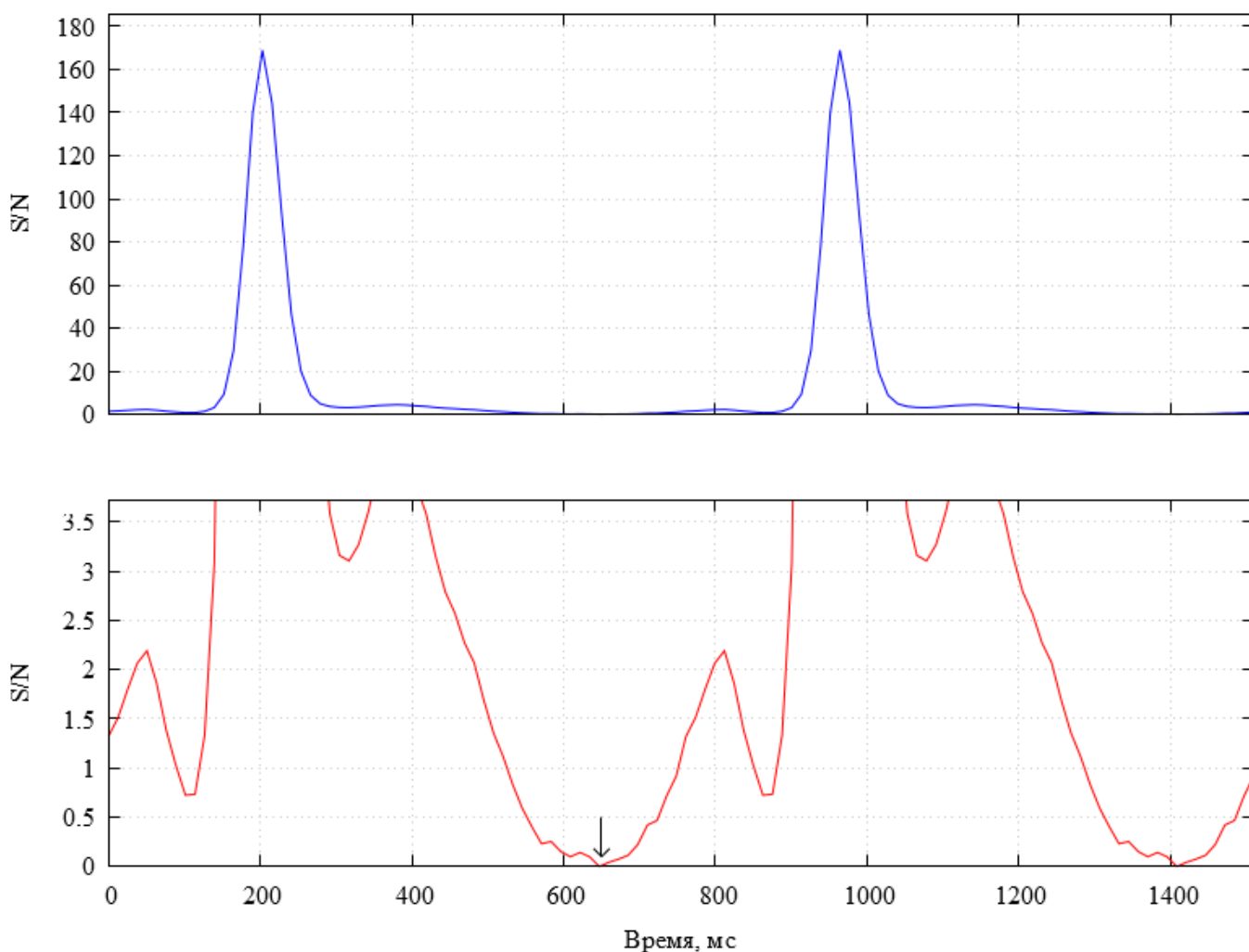


Рис. IV.1 Накопленный за 10 лет средний профиль (2883 сеанса) пульсара J1543+0929 приведены с двойным периодом. Результат диссертанта из работы [118]. Внизу - оригинальный профиль, вверху - тот же профиль с амплитудой, увеличенной в 50 раз. На верхней части рисунка хорошо виден прекурсор и посткурсор. Стрелка показывает минимум излучения, занимающий несколько точек в профиле. Ось x - время в мс, ось y - амплитуда профиля в отношении сигнал/шум.

Как уже написано в главе II, анализ профилей 96 пульсаров, полученных за 10 лет наблюдений, позволил обнаружить 12 пульсаров с интеримпульсами, причем у 9 пульсаров интеримпульсы обнаружены впервые, у 82 пульсаров новых деталей (особенностей) в суммированных средних профилях не найдено, при этом у двух пульсаров (J1543+0929 и

J2234+2114) были обнаружены необычные детали в профилях, и мы анализируем их в данной главе.

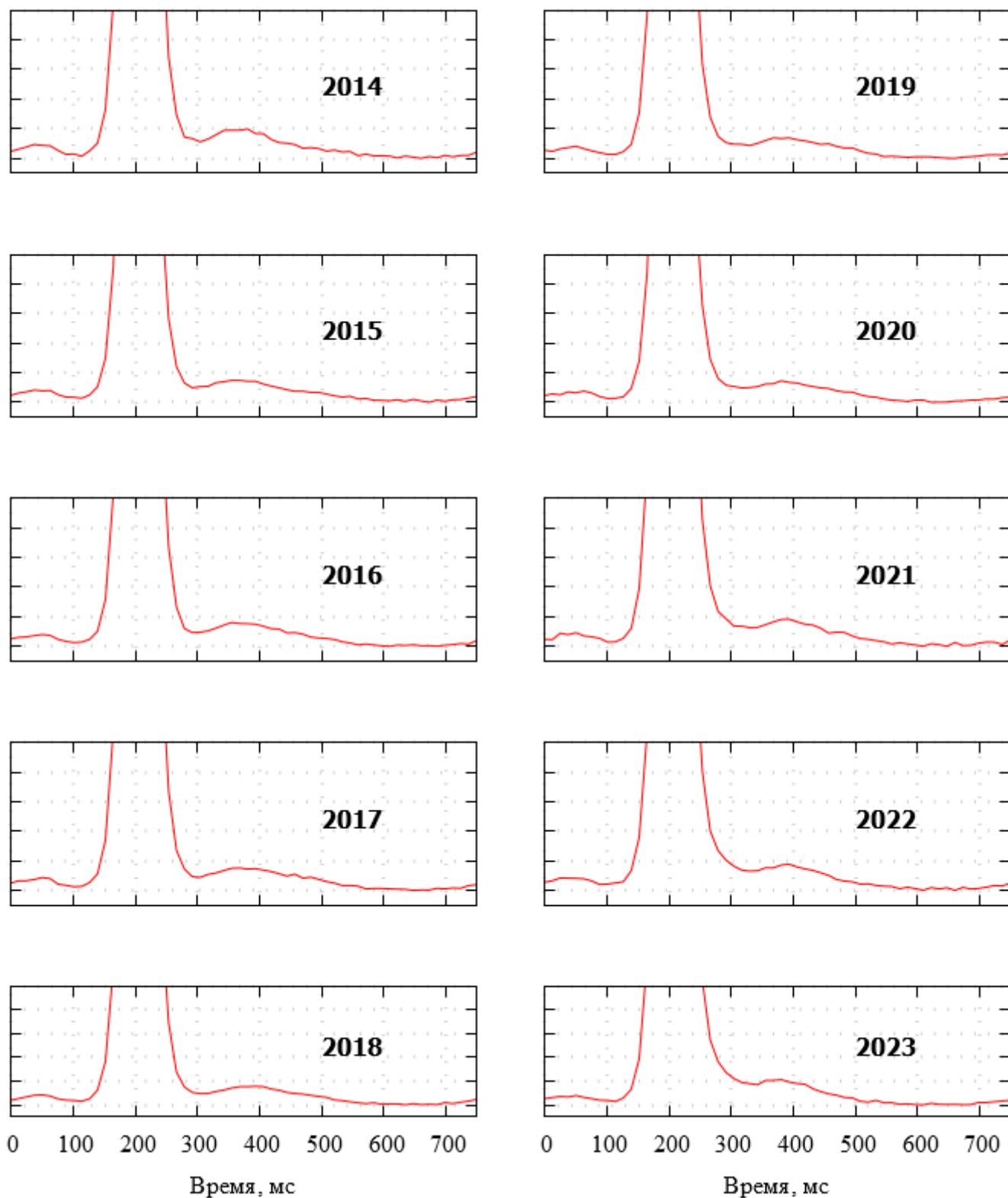


Рис. IV.2 Накопленные за каждый год (2014-2023) средние профили J1543+0929. Результат диссертанта из работы [118].

Было обнаружено, что J1543+0929 имеет излучение практически весь период. Профиль является трехкомпонентным. Относительные амплитуды боковых слабых компонент составляют 0,013 и 0,025. Для J2234+2114 был обнаружен предимпульс, отстоящий от МР на 53°.

У пульсара J1543+0929 обнаружено излучение практически в течение всего периода. На рис. IV.1 показан суммарный средний профиль J1543+0929 за все годы наблюдения с двойным периодом. Видно, что лишь в небольшой части среднего профиля (меньше 10% от полного периода) излучение отсутствует. Минимум, отмеченный на рисунке стрелкой, находится на расстоянии 115° (638 мс) от главного импульса.

Полученная картина наблюдаемого почти во всем периоде излучения J1543+0929 не случайная. На рис. IV.2 приведены средние профили за каждый из 2014-2023 годы. Все накопленные за год профили являются стабильными и имеют одну и ту же область минимальной амплитуды длительностью, примерно, в 70 мс. Имеются у этого пульсара также 2 боковые компоненты: предимпульс (прекурсор) и послеимпульс (посткурсор).

Таблица IV.1: Отношения амплитуд компонент средних профилей J1543+0929 и J2234+2114. Результат диссертанта из работы [118].

PSR	P, мс	DM, пк/см ³	N	t ₁ , мс	t ₂ , мс	A ₁	A ₂
J1543+0929	0,748	34,976	2883	-150 (-72°)	+175 (+84°)	0,013	0,026
J2234+2114	1,359	35,08	3101	-200 (-53°)	—	—	0,11

В Табл. IV.1 приведены параметры исследованных пульсаров (J1543+0929 и J2234+2114): период P, мера дисперсии DM, число сеансов, участвовавших в накоплении за 10 лет наблюдений N, расстояние компонент перед (знак "-") и после (знак "+") главного импульса от максимума МР в мс (в скобках даны эти расстояния в градусах), t₁ и t₂ соответственно, а также их относительные амплитуды A₁ и A₂. Точность определения расстояния компонент от МР в миллисекундах и в градусах, соответствует, примерно, одной точке среднего профиля (±12,5 мс) или ±6°.

Как видно из колонки 4, указывающей на количество сессий, по которым были получены средние профили, рост S/N в главном импульсе при сложении всех профилей будет, примерно, в 55 раз больше по сравнению с одной сессией. Учитывая, что в метровом диапазоне эффективная площадь радиотелескопа БСА самая высокая в мире в своем диапазоне длин волн, дополнительный рост S/N при сложении профилей за год приводит к выявлению новых деталей в средних профилях давно известных и хорошо исследованных пульсаров.

IV.3.1. Пульсар J1543+0929

Ранее средние профили J1543+0929 были получены разными авторами в широком диапазоне частот: от 65 МГц до 4750 МГц и приведены в базе данных пульсарных профилей

[119]. Для сравнения приведем профили на частоте 139 МГц [76] и на частоте 327 МГц [117], взятые из этой базы данных. Они показаны на рис. IV.3. На частоте 139 МГц $t_1 = -140$ мс ($-67,4^\circ$), $t_2 = +155$ мс ($+74,6^\circ$), $A_1 = 0,02$, $A_2 = 0,025$ [76]. На этой частоте расстояния от МР: t_1 и t_2 совпадают с полученным нами с точностью до ошибок измерений, если учесть, что разрешение у нас 12,5 мс и дисперсионное размазывание в полосе канала 17,5 мс. Соотношение амплитуд компонент примерно одинаковое. На частоте 327 МГц относительные амплитуды возрастают и $A_2 : A_1 = 2,3$, а расстояния от МР уменьшаются: $t_1 = -111$ мс ($-53,4^\circ$), $t_2 = +134$ мс ($+64,5^\circ$) [117]. На рис. IV.3 мы не делали совмещение по фазе МР, а привели оригинальные записи из базы данных. Для нас представляли интерес только расстояния компонент от МР и их относительные амплитуды. Увеличение расстояния между МР и боковыми компонентами с понижением частоты обычно связывается с тем, что излучение на более низких частотах идет с более высоких уровней от поверхности нейтронной звезды, что соответствует расширению конуса магнитных силовых линий [118] и, следовательно, увеличению расстояния между компонентами.

На низких частотах профиль J1543+0929 является 3-х компонентным и соответствует модели «core-core» классификации Рэнкин [119], в которой рассматривается конусообразная

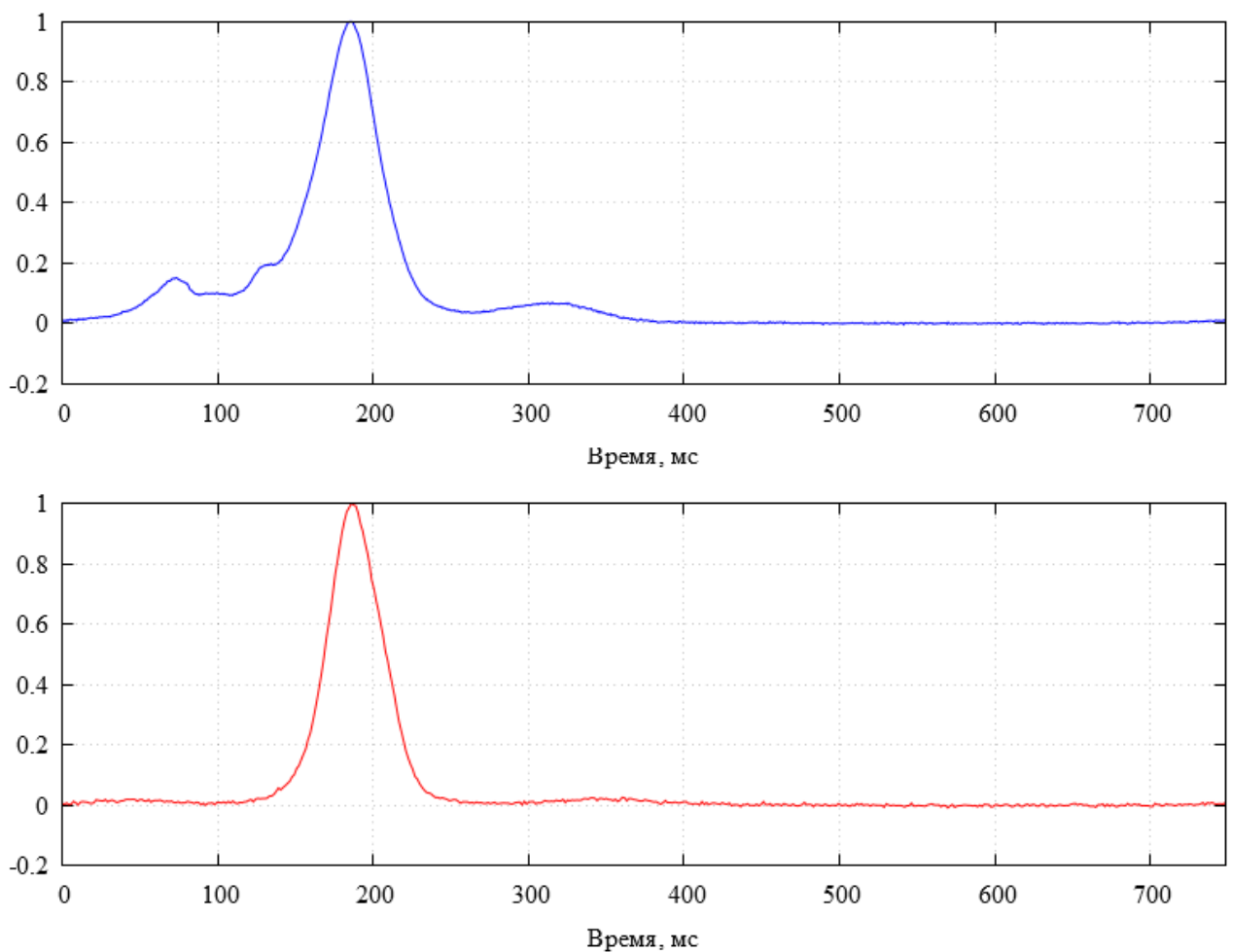


Рис. IV.3 Нормированные средние профили J1543+0929 на частотах 139 МГц (вверху) и 327 МГц (внизу), взятые из базы данных профилей пульсаров [119]. Результат диссертанта из работы [118].

структура излучающей области, в центре которой расположена центральная область («core»). В работе [117] исследовались поляризационные свойства 46 пульсаров. В этот список входил и пульсар J1543+0929. Анализ ширин компонент профиля и поведение угла поляризации с долготой позволило в настоящей работе оценить угол между магнитной осью и осью вращения γ и импакт угол ζ , под которым линия на наблюдателя сечет конус излучения. Для J1543+0929 угол $\gamma = 60^\circ$ и $\zeta = -2,20^\circ$. Угол ζ мал, и это означает практически центральное сечение конуса излучения, наблюдатель видит все три компонента профиля. Так как угол между магнитной осью и осью вращения мал, наблюдатель может видеть излучение практически весь период. Однако это излучение для J1543+0929 впервые удалось обнаружить лишь в настоящей работе.

Открытие межимпульсного излучения связано в первую очередь с очень высоким S/N в накопленном за многие годы среднем профиле. Уровень обнаруженного сигнала межимпульсного излучения в несколько раз ниже, чем уровень сигнала в прекурсоре и составляет доли процента от сигнала МР. Такой же эффект наблюдается и для пульсара J0953+0755, что отмечалось в IV.1.

IV.3.2. Пульсар J2234+2114

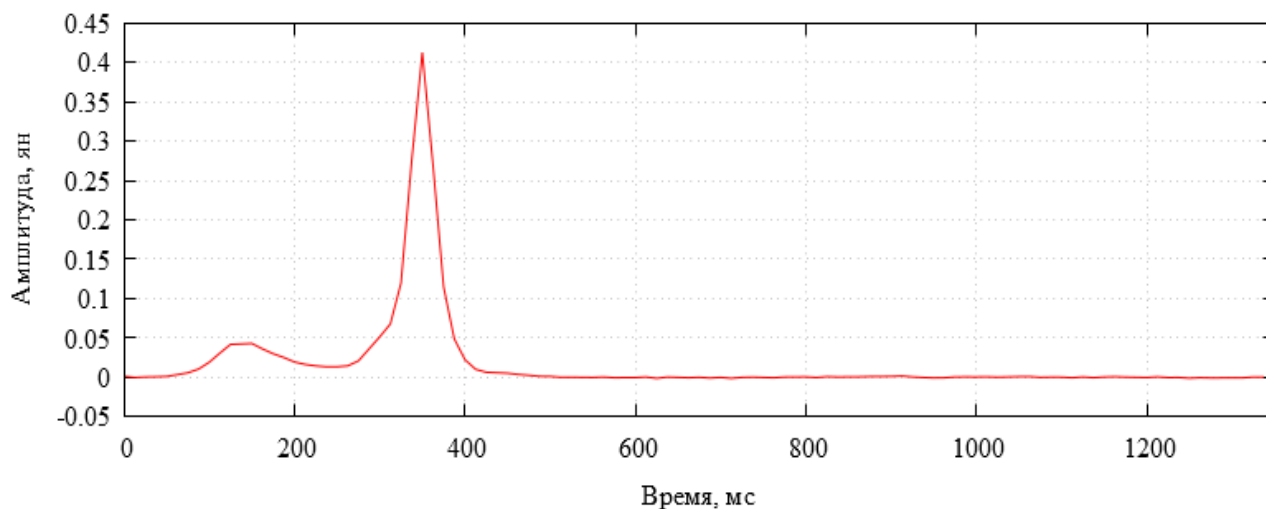


Рис. IV.4 Накопленный за 10 лет (2014-2023, 2990 сеансов) средний профиль J2234+2114. Результат диссертанта из работы [118].

Суммарный средний профиль за 10 лет наблюдений для пульсара J2234+2114 показан на рис. IV.4. У него имеется предимпульс, находящийся на расстоянии -200 мс (-53°) от МР и относительную амплитуду 0,1. Имеются только 3 профиля для этого пульсара в базе данных [119]: на частотах 148,9 МГц [76], 345 МГц [120] и 430 МГц [121]. На частоте 148,9 МГц профиль однокомпонентный с низким отношением S/N, при этом на 345 МГц и 430 МГц (рис. IV.5) профили, по-видимому, 3-х компонентные с компонентами, переходящими одна в другую без четкого разделения. Расстояние между крайней левой компонентой и максимумом профиля определить затруднительно, однако отношение ее амплитуды к амплитуде максимума профиля

совпадает со значением на 110,25 МГц. Возможно, эта компонента соответствует нашему предимпульсу.

§ IV.4. Выводы по главе IV

В результате анализа суммарных за 10 лет средних профилей пульсаров J1543+0929 и J2234+2114 удалось обнаружить особенности, которые ранее в литературе не отмечались.

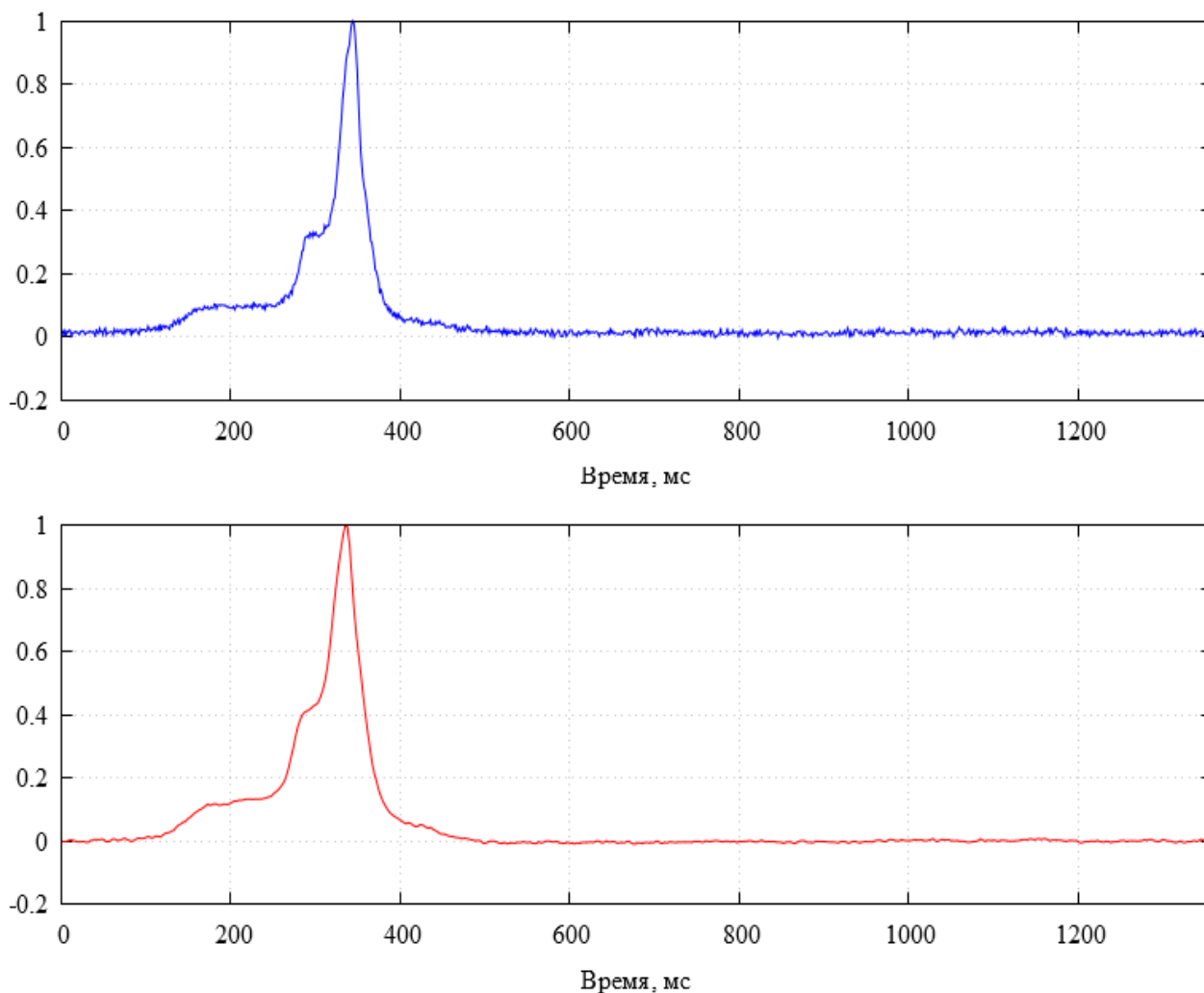


Рис. IV.5 Нормированные средние профили J2234+2114 на частотах 345 МГц (вверху) и 430 МГц (внизу), взятые из базы данных профилей пульсаров [119]. Результат диссертанта из работы [118].

Пульсар J1543+0929 имеет низкоуровневое излучение (межимпульсное излучение) практически на всех долготах внутри периода пульсара. По-видимому, это всего лишь второй (после J0953+0755) пульсар, излучение которого занимает больше 90% периода. Вероятнее всего, это излучение связано с тем, что пульсар является соосным. Его угол между осью вращения и магнитной осью мал и поэтому наблюдатель может видеть область излучения в течение всего периода.

У J2234+2114 обнаружен предимпульс, отстоящий от главного импульса на расстоянии 53° , который ранее не описывался, и имеющий относительную амплитуду 0,1. На частотах 345 МГц и 430 МГц профиль имеет более сложный вид, по-видимому, с тремя компонентами.

В заключении Главы IV отметим полученные результаты. Проведен поиск слабых компонент вне главного импульса (MP) в излучении пульсаров на частоте 110,25 МГц, наблюдавшихся на телескопе БСА ФИАН в Пушинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS). Выборка включала 96 пульсаров, для которых отношение сигнала к шуму (S/N) в главном импульсе среднего профиля при накоплении за 10 лет было больше 40. Было обнаружено, что J1543+0929 имеет излучение практически весь период, при этом профиль является трехкомпонентным. Для J2234+2114 был обнаружен предимпульс, отстоящий от MP на 53° .

Заключение

Настоящая диссертационная работа посвящена отдельным результатам ежедневных мониторинговых наблюдений пульсаров на многолучевом радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА3) Физического института им. П.Н.Лебедева (ФИАН) в Пушинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS).

Разработана методика обработки наблюдений, позволяющая корректно складывать сигналы от пульсаров за разные дни, не прибегая к таймингу. Разработана методика отсеивания импульсных помех, которая позволяет проводить поиск импульсных диспергированных сигналов.

При поиске импульсных сигналов удалось обнаружить 6 новых вращающихся радиотранзиентов.

Проведен поиск интеримпульсов в выборке 96 сильнейших пульсаров. Выборка пульсаров является полной для пульсаров, имеющих отношение сигнала к шуму в главном импульсе больше 40 на частоте 110,25 МГц. Для поиска слабых интеримпульсов использовалось сложение средних профилей на интервале 10 лет. У 12 пульсаров обнаружены интеримпульсы (12,5% от выборки), из них у 7 пульсаров интеримпульс располагается вблизи фазы 180° относительно главного импульса, а у 5 на фазах, далеких от 180° . Найденное количество пульсаров с интеримпульсами в 2,5 раза больше, чем ожидалось найти в выборке. Проведена статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интеримпульсами, подтверждающая модель, согласно которой в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся ортогональными, а не общепризнанную модель, по которой магнитная ось и ось вращения становятся соосными.

Проведен анализ вариаций интенсивности излучения пульсара J0953+0755 с 2014 по 2022 г. Показана высокая переменность излучения не только от импульса к импульсу, но и на масштабах больше 3 мин. Средняя относительная амплитуда интеримпульса (IP) составляет $2,00 \pm 0,28$ % от главного импульса. В индивидуальных импульсах амплитуда интеримпульса может превышать амплитуду главного импульса (MP), однако это редкое событие. Излучение наблюдается практически во всем периоде пульсара. Впервые измерена относительная амплитуда излучения между главным импульсом и интеримпульсом (мост излучения). При усреднении порядка 10 часов она меняется от 0,8% до 1,31% со средним значением $1,04 \pm 0,28$ %. Обнаружена высокая корреляция между вариациями амплитуды MP и IP как при усреднении профилей за 3,2 мин, так и при усреднении по годам. Эта корреляция обусловлена рефракционными межзвездными мерцаниями. Впервые измерен частотный масштаб дифракционных межзвездных мерцаний IP и показано, что формы спектра для IP и MP хорошо коррелируют и имеют одинаковый частотный масштаб. Наблюдаются сильные вариации

частотного масштаба мерцаний f_{diff} от сеанса к сеансу ($t > 3,2$ мин) на масштабах 200-800 кГц. Определен рефракционный масштаб мерцаний 1-2 дня. Обнаружена модуляция излучения с характерным масштабом порядка 130 дней, которая, по-видимому, также связана с рефракционными мерцаниями.

Проведены исследования пульсара J0826+2637 с 2014 по 2020 г. На интервале 5,5 лет в ежедневных сеансах длительностью порядка 3,7 мин оценивались амплитуды главного импульса (MP), посткурсор (PC) и интеримпульса (IP). Показано, что отношение средних амплитуд MP в яркой («В») и спокойной («Q») модах равно 60. Для «В»-моды среднее отношение амплитуд MP к IP равно 65, а для MP к PC – 28. Число сеансов с нуллигом составляет 4% от общего числа сеансов. Структурный и корреляционный анализ вариаций амплитуд MP, IP и PC на длительном временном интервале позволили обнаружить характерные временные масштабы 5 дней, 37 дней и один год. Анализ временных вариаций показывает, что временной масштаб 37 дней хорошо объясняется рефракцией на неоднородностях межзвездной плазмы, которая распределена в основном квази-однородно на луче зрения. Эти мерцания вносят основной вклад в наблюдаемую переменность. Временной масштаб переменности 5 дней ранее не был обнаружен. Пятидневные мерцания не имеют однозначной интерпретации, но связаны, по-видимому, с рефракцией радиоволн в межзвездной среде. Временной масштаб переменности в один год, также ранее не был обнаружен. Мы связываем его появление с наличием рассеивающего слоя на близком экране, находящемся на расстоянии порядка 50 пк от Земли.

Проведен поиск слабых компонент вне главного импульса (MP) в излучении пульсаров на частоте 110,25 МГц. Выборка включала 96 пульсаров, для которых отношение сигнала к шуму (S/N) в главном импульсе среднего профиля при накоплении за 10 лет было больше 40. Было обнаружено, что J1543+0929 имеет излучение практически весь период. Профиль является трехкомпонентным. Относительные амплитуды боковых слабых компонент составляют 0,013 и 0,025. Для J2234+2114 был обнаружен предимпульс, отстоящий от MP на 53° .

Пушинский многолучевой поиск пульсаров (PUMPS) включает в себя три отдельных подзадачи поиска [60]: секундных пульсаров при чувствительности лучше 1 мЯн, быстрых радиовсплесков (FRB), вращающихся радиотранзиентов (RRAT). Помимо указанных выше задач, обзор PUMPS далеко не исчерпан и класс задач, которые можно решить на системе мониторинга БСА3, необычайно широк, причем это не только фундаментальные научные задачи, но и прикладные – при этом предлагаемый проект позволяет непрерывно отслеживать небесные радиоисточники на большей части небосвода на временных масштабах от миллисекунд до лет. Краткий список основных из них:

- 1) Мониторинг состояния ионосферы;
- 2) Мониторинг вспышечных явлений на Солнце;

- 3) Радиомониторинг транзиентных (вспышечных) явлений в Солнечной системе;
- 4) Мониторинг транзиентных явлений в нашей Галактике;
- 5) Мониторинг потоков как галактических, так и внегалактических радиоисточников;
- 6) Слежение и уточнение вековых вариаций потоков радиоисточников;
- 7) Внегалактические транзиентные явления;
- 8) **Поиск пульсаров – Пушинский многолучевой поиск пульсаров (PUMPS);**
- 9) Другие задачи.

Список литературы

1. Manchester, R.N., Hobbs, G.B., Teoh, A. et al. The Australia telescope national facility pulsar catalogue // *The Astronomical Journal*, Vol. 129, No. 4, 2005. P. 1993. (*The ATNF Pulsar Catalogue*. – URL: <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>. – Доступ: 17.01.2026.)
2. Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F., & Collins, R. A. Observation of a rapidly pulsating radio source // *Nature*, Vol. 217, 1968. P. 709.
3. Giacconi R. et al. Discovery of periodic X-ray pulsations in Centaurus X-3 from UHURU // *Astrophysical Journal*, Vol. 167, No. 67, 1971.
4. Grindlay, J., Gursky, H., Schnopper, H., Parsignault, D. R., Heise, J., Brinkman, A. C., and Shriver, J. Discovery of intense X-ray bursts from the globular cluster NGC 6624 // *Astrophysical Journal*, Vol. 205, 1976. pp. 127-130.
5. Mazets E. P. et al. Observations of a flaring X-ray pulsar in Dorado // *Nature*, Vol. 282, No. 5739, 1979. pp. 587-589.
6. Fahlman G. G., Gregory P. C. An X-ray pulsar in SNR G109. 1–1.0 // *Nature*, Vol. 293, No. 5829, 1981. pp. 202-204.
7. Backer, D. C., Kulkarni, S. R., Heiles, C., Davis, M. M., and Goss, W. M. A millisecond pulsar // *Nature*, Vol. 300, 1982. pp. 615-618.
8. Walter F. M., Wolk S. J., Neuhäuser R. Discovery of a nearby isolated neutron star // *Nature*, Vol. 379, No. 6562, 1996. pp. 233-235.
9. Lyne, A. G., Burgay, M., Kramer, M., and 9 others. A double-pulsar system: A rare laboratory for relativistic gravity and plasma physics // *Science*, Vol. 303, 2004. pp. 1153–1157.
10. McLaughlin M. A. et al. Transient radio bursts from rotating neutron stars // *Nature*, Vol. 439, No. 7078, 2006. pp. 817-820.
11. Lorimer D. R. et al. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin // *Science*, Vol. 318, No. 5851, 2007. pp. 777-780.
12. Lyne A. G., Graham-Smith F., Stappers B. *Pulsar Astronomy*. 5th ed. Cambridge University Press, 2022.
13. Main R. et al. Pulsar emission amplified and resolved by plasma lensing in an eclipsing binary // *Nature*, Vol. 557, No. 7706, 2018. pp. 522-525.
14. Wang N., Manchester R. N., Johnston S. Pulsar nulling and mode changing // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 377, No. 3, 2007. pp. 1383-1392.

15. Малов И. Ф. Радиопульсары. Москва: Наука, 2004. 192 с.
16. Особенности излучения пульсаров. Гигантские импульсы. Часть 1. [Электронный ресурс] URL: https://vk.com/wall-50270701_670 (дата обращения: 19.12.2025).
17. Zhou D. J. et al. The FAST Galactic Plane Pulsar Snapshot Survey. II. Discovery of 76 Galactic Rotating Radio Transients and the Enigma of RRATs // *Research in Astronomy and Astrophysics*, Vol. 23, No. 10, 2023. pp. 104-174.
18. Tyul'bashev S. A. et al. Investigation of the properties of four rotating radio transients at 111 MHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 508, No. 2, 2021. pp. 2815-2822.
19. Тюльбашев С. А. и др. Поиск вращающихся радиотранзиентов в Пуццинском многолучевом обзоре // *Письма в астрономический журнал*, Т. 49, № 10, 2023. С. 626-632.
20. Самодуров В.А., Тюльбашев С.А., Торопов М.О., Долгушев А. В., Орешко В. В., Логвиненко С.В. Обнаружение двух новых RRAT на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*, Т. 100, № 6, 2023. С. 517-523. (*Samodurov V. A., Tyul'bashev S. A., Toropov M. O., Dolgushev A. V., Oreshko V. V. & Logvinenko S. V. Detection of Two New RRATs at 111 MHz // Astronomy Reports. – 2023. – Т. 67. – №. 6. – С. 590-595.*)
21. Beskin, V. S., Gurevich, A. V., Istomin, Y. N. *Physics of the pulsar magnetosphere*. Cambridge university press, 1993.
22. Philippov A., Tchekhovskoy A., Li J. G. Time evolution of pulsar obliquity angle from 3D simulations of magnetospheres // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 441, No. 3, 2014. pp. 1879-1887.
23. Бескин В. С., Истомин Я. Н., Филиппов А. А. Радиопульсары — поиски истины // *Успехи физических наук*, Т. 183, № 2, 2013. С. 179-194. (*Beskin V. S., Istomin Y. N., Philippov A. A. Radio pulsars: the search for truth // Physics-Uspekhi. – 2013. – Т. 56. – №. 2. – С. 164-179.*)
24. Gil J. PSR 0950+08: A model for interpulse emission // *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 127, No. 2, Nov. 1983. pp. 267-270.
25. Малофеев В.М., Малов И.Ф. Средние спектры пульсаров и их интерпретация // *Астрономический журнал*, Т. 57, № 1, 1980. С. 90-106.
26. Malofeev V. M., Malov O. I. Detection of Geminga as a radio pulsar // *Nature*, Vol. 389, No. 6652, 1997. pp. 697-699.
27. BSA-Analytics [Электронный ресурс] URL: <https://bsa-analytics.prao.ru/pulsars/> (дата обращения: 19.12.2025).

28. Кутузов С. М. и др. Перестройка радиотелескопа БСА ФИАН в диапазоне 109-113 МГц // Труды ФИАН, Т. 229, 2000. С. 1-16.
29. Tyul'bashev S. A. et al. Detection of new pulsars at 111 MHz // *Astronomy Reports*, Vol. 60, 2016. pp. 220-232.
30. Ritchings R. T. Pulsar single pulse intensity measurements and pulse nulling // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 176, No. 2, 1976. pp. 249-263.
31. Малофеев В.М. Методика измерения энергии радиоизлучения пульсаров // Труды ФИАН, Т. 199, 1989. С. 125-146.
32. Lorimer D. L., Kramer M. *Handbook of Pulsar Astronomy*. Cambridge University Press, 2005.
33. Lyne A. G., Smith F. G., Graham D. A. Characteristics of the radio pulses from the pulsars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 153, No. 3, 1971. pp. 337-382.
34. Cole T. W., Hesse H. K., Page C. G. Long term variations of pulsar intensities // *Nature*, Vol. 225, No. 5234, 1970. pp. 712-713.
35. Burke B. F., Graham-Smith F., Wilkinson P.N. *An introduction to Radio Astronomy*. 4th ed. Cambridge University Press, 2019.
36. Suleimanova S. A., Pugachev V. D. Polarization of individual pulses of radio pulsars at the low frequencies 40, 60, and 103 MHz // *Astronomy Reports*, Vol. 46, 2002. pp. 309-326.
37. Пушинская Радиоастрономическая Обсерватория [Электронный ресурс] URL: <https://www.prao.ru/> (дата обращения: 17.01.2026).
38. Тюльбашев С. А. и др. Поиск долговременной переменности в нескольких источниках с плоскими спектрами по наблюдениям на 111 МГц // *Астрономический журнал*, Т. 96, № 11, 2019. С. 927-938. (*Tyul'bashev S. A. et al. Search for Dispersed Pulses at Declinations from +56° to +87° // Astronomy Reports. – 2021. – Т. 65. – №. 12. – С. 1246-1253.*)
39. Самодуров В.А. Пушинский обзор на 102,5 МГц: обработка данных и составление каталога радиоисточников // *Препр. ФИАН*, № 11, 2000. С. 55.
40. *Third Cambridge Catalogue of Radio Sources & Fourth Cambridge Survey* [Электронный ресурс] URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR-4> (дата обращения: 17.01.2026).
41. Мартынов Д.Я. *Курс общей астрофизики*. 4-е изд-е изд. Москва: Наука, 1988.
42. Dubner G., Giacani E. Radio emission from supernova remnants // *The Astronomy and Astrophysics Review*, Vol. 23, No. 1, 2015. P. 3.
43. Дорошенко О.В., Копейкин С.М. Хронометрирование пульсаров – принципы, алгоритмы и программы обработки наблюдений // *Препр. ФИАН*, № 71, 1990. С. 77.

44. Liu X. Pulsar Timing with the Next Generation of Radio Telescopes. University of Manchester, 2020.
45. Standards of Fundamental Astronomy [Электронный ресурс] URL: <https://www.iausofa.org> (дата обращения: 17.01.2026).
46. Эфемериды ЕРМ ИПА РАН [Электронный ресурс] URL: <https://www.iaaras.ru/dept/ephemeris/erm> (дата обращения: 17.01.2026).
47. FFTW 3 [Электронный ресурс] URL: <https://www.fftw.org/> (дата обращения: 17.01.2026).
48. Nonequispaced fast Fourier transform [Электронный ресурс] URL: <https://www-user.tu-chemnitz.de/~potts/nfft/> (дата обращения: 17.01.2026).
49. SimpleXlsxWriter [Электронный ресурс] URL: <https://www.sourceforge.net/projects/simplexlsx> (дата обращения: 17.01.2026).
50. XLNT [Электронный ресурс] URL: <https://www.github.com/TFussell/xlnt> (дата обращения: 17.01.2026).
51. Самодуров В.А., Тюльбашев С.А., Торопов М.О., Логвиненко С.В. Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от $+42^\circ$ до $+52^\circ$ на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*, Т. 99, № 4, 2022. С. 334-341. (*Samodurov V.A., Tyul'bashev S.A., Toropov M.O., Logvinenko S.V. Detection Statistics of Pulse Signals at Declinations from $+42^\circ$ to $+52^\circ$ at the Frequency 111 MHz // Astronomy Reports. – 2022. – Т. 66. – №. 4. – С. 341-347.*)
52. Тюльбашев С. А. и др. Поиск диспергированных импульсов на склонениях от $+56^\circ$ до $+87^\circ$ // *Астрономический журнал*, Т. 98, № 12, 2021. С. 1010-1018.
53. RRATalog [Электронный ресурс] URL: <http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/> (дата обращения: 17.01.2026).
54. Maciesiak K., Gil J., Ribeiro V. A. R. M. On the pulse-width statistics in radio pulsars—I. Importance of the interpulse emission // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 414, No. 2, 2011. pp. 1314-1328.
55. Weltevrede P., Johnston S. The population of pulsars with interpulses and the implications for beam evolution // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 387, No. 4, 2008. pp. 1755-1760.
56. Rankin J. M. Toward an empirical theory of pulsar emission. IV-Geometry of the core emission region // *Astrophysical Journal*, Vol. 352, 1990. pp. 247-257.

57. Tauris T. M., Manchester R. On the Evolution of Pulsar Beams // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 298, No. 3, 1998. pp. 625-636.
58. Young M.D.T. et al. Pulsar magnetic alignment and the pulsewidth-age relation // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 402, No. 2, 2010. pp. 1317-1329.
59. Lyne A. et al. Evolution of the magnetic field structure of the Crab pulsar // Science, Vol. 342, No. 6158, 2013. pp. 598-601.
60. Tyul'bashev S. A., Kitaeva M. A., Tyul'basheva G. E. Pushchino multibeam pulsar search – I. Targeted search of weak pulsars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 517, No. 1, 2022. pp. 1112-1125.
61. Tyul'bashev S. A., Tyul'basheva G. E., Kitaeva M. A. et al. Pushchino multibeam pulsar search – IV. Detection of new pulsars at declinations $-9^\circ >$
62. Malov I. F., Nikitina E. B. The magnetospheric structure of radio pulsars with interpulses // Astronomy Reports, Vol. 57, 2013. pp. 833-843.
63. Торопов М.О., Тюльбашев С.А., Бескин В.С. Поиск интеримпульсов в полной выборке пульсаров на частоте 111 МГц // Астрономический журнал, Т. 101, № 12, 2024. С. 1084-1094. (*Toropov M. O., Tyul'bashev S. A., Beskin V. S. Search for interpulses in a complete sample of pulsars at a frequency of 111 MHz // Astronomy Reports. – 2024. – Т. 68. – №. 12. – С. 1191-1201.*)
64. Kuz'min A. D., Losovskii B. Y., Lapaev K. A. Measurements of the scattering of pulsar radio emission // Astronomy reports, Vol. 51, 2007. pp. 615-623.
65. Shishov V. I. et al. Distribution of the relative plasma turbulence level in the galaxy // Astronomy Reports, Vol. 52, 2008. P. 623.
66. Wang P. F. et al. FAST pulsar database. I. Polarization profiles of 682 pulsars // Research in Astronomy and Astrophysics, Vol. 23, No. 10, 2023.
67. Posselt B., Karastergiou A., Johnston S. et al. The Thousand Pulsar Array program on MeerKAT – IX. The time-averaged properties of the observed pulsar population // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 520, No. 3, 2023. pp. 4582-4600.
68. Novoselov E. M., Beskin V. S., Galishnikova A. K. et al. Orthogonal pulsars as a key test for pulsar evolution // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 494, No. 3, 2020. pp. 3899-3911.
69. Arzamasskiy L. I., Beskin V. S., Pirov K. K. Statistics of interpulse radio pulsars: the key to solving the alignment/counter-alignment problem // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 466, No. 2, 2017. pp. 2325-2336.

70. Spitkovsky A. Time-dependent force-free pulsar magnetospheres: axisymmetric and oblique rotators // *The Astrophysical Journal*, Vol. 648, No. 1, 2006. P. 51.
71. Backer D. C., Boriakoff V., Manchester R. N. Wide integrated pulse profiles of pulsars // *Nature Physical Science*, Vol. 243, No. 127, 1973. pp. 77-78.
72. Becker W. et al. Revealing the X-Ray emission processes of old rotation-powered pulsars: XMM-newton observations of PSR B0950+08, PSR B0823+26, and PSR J2043+2740 // *The Astrophysical Journal*, Vol. 615, No. 2, 2004. P. 908.
73. Hesse K. H., Wielebinski R. Pulse intensity histograms of pulsars // *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 31, 1974. P. 409.
74. Sobey C., Young N.J., Hessels J.W.T. et al. LOFAR discovery of a quiet emission mode in PSR B0823+26 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 451, No. 3, 2015. pp. 2493-2506.
75. Gajjar V. On the absence of pulses from pulsars // arXiv preprint arXiv:1706.05407. 2017.
76. Bilous A. V. et al. A LOFAR census of non-recycled pulsars: average profiles, dispersion measures, flux densities, and spectra // *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 591, 2016. P. 134.
77. Young N.J., Stappers B.W., Weltevrede P. et al. On the pulse intensity modulation of PSR B0823+26 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 427, No. 1, 2012. pp. 114-126.
78. Hermsen W., Kuiper L., Basu R. et al. Discovery of synchronous X-ray and radio moding of PSR B0823+26 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 480, No. 3, 2018. pp. 3655-3670.
79. Basu R., Mitra D. Radio emission features in different modes of PSR J0826+2637 (B0823+26) // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 487, No. 4, 2019. pp. 4536-4549.
80. Rankin J. M., Olszanski T. E. E., Wright G. A. E. Arecibo investigations of pulsar B0823+26. I. plasma source changes configure its bright and quiet modes // *The Astrophysical Journal*, Vol. 890, No. 2, 2020. P. 151.
81. Hankins T. H., Cordes J. M. Interpulse emission from pulsar 0950+08 - How many poles // *Astrophysical Journal*, Vol. 249, 1981. pp. 241-253.
82. Perry T., Lyne A. G. Unpulsed radio emission from pulsars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 212, No. 2, 1985. pp. 489-496.
83. Smirnova T. V., Shabanova T. V. Between Pulse Radio Emission of Pulsars // *Soviet Astronomy*, Vol. 32, 1988. P. 61.

84. Suleimanova S. A., Volodin Y. V., Malofeev V. M. Linear Polarization of the Average Pulses of Pulsars PSR0950+08 and PSR1133+16 at 39MHZ // Soviet Astronomy, Vol. 27, No. 3, 1983. P. 322.
85. Backer D. C., Rankin J. M. Statistical summaries of polarized pulsar radiation // Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 42, 1980. pp. 143-173.
86. Smirnova T.V. Phase and intensity distributions of individual pulses of PSR B0950+08 // Astronomy Reports, Vol. 50, 2006. pp. 915-925.
87. Smirnova T.V. Giant pulses from the pulsar PSR B0950+08 // Astronomy Reports, Vol. 56, 2012. pp. 430-440.
88. Singal A. K., Vats H. O. Giant-pulse Emission from PSR B0950+08 // The Astronomical Journal, Vol. 144, No. 5, 2012. P. 155.
89. Kuiack M., Wijers R., Rowlinson A. et al. Long-term study of extreme giant pulses from PSR B0950+08 with AARTFAAC // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 497, No. 1, 2020. pp. 846-854.
90. Каплан С. А. Элементарная радиоастрономия. Москва: Наука, 1966. 275 с.
91. Armstrong J. W., Rickett B. J., Spangler S. R. Electron density power spectrum in the local interstellar medium // Astrophysical Journal, Vol. 443, No. 1, 1995. pp. 209-221.
92. Shishov V. I., Smirnova T. V. The outer turbulence scale in the interstellar plasma // Astronomy reports, Vol. 46, 2002. pp. 731-739.
93. Smirnova T. V. et al. RadioAstron studies of the nearby, turbulent interstellar plasma with the longest space-ground interferometer baseline // The Astrophysical Journal, Vol. 786, No. 2, 2014. P. 115.
94. Smirnova T. V., Shishov V. I. The turbulence spectrum of the interstellar plasma toward the pulsars PSR B0809+74 and B0950+08 // Astronomy reports, Vol. 52, 2008. pp. 736-748.
95. Smirnova T. V. Spatial separation of the emission regions of pulsars from an analysis of interstellar scintillations // Soviet Astronomy Letters, Vol. 18, No. 11, 1992. pp. 959-974.
96. Rankin J. M., Rathnasree N. Polarization-mode separation and the emission geometry of pulsar 0823+26: A new pattern of pulsar emission? // Journal of Astrophysics and Astronomy, Vol. 16, 1995. pp. 327-355.
97. Gwinn C. R. et al. Measurement of pulsar parallaxes by VLBI // Astronomical Journal, Vol. 91, Feb. 1986. pp. 338-342.

98. Daszuta M., Lewandowski W., Kijak J. Scintillation observations of PSR B0823+26 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 436, No. 3, 2013. pp. 2492-2499.
99. Rickett B. J. Radio propagation through the turbulent interstellar plasma // Annual review of astronomy and astrophysics, Vol. 28, 1990. pp. 561-605.
100. Popov M. V., Smirnova T. V. The Spectrum Power of Interstellar Plasma Inhomogeneities in the Direction of Eleven Radio Pulsars // Astronomy Reports, Vol. 65, No. 11, 2021. pp. 1129-1135.
101. Fadeev et al. Revealing compact structures of interstellar plasma in the Galaxy with RadioAstron // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 480, No. 3, 2018. pp. 4199-4210.
102. Bhat N. D. R., Rao A. P., Gupta Y. Long-term scintillation studies of pulsars. I. Observations and basic results // The Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 121, No. 2, 1999. P. 483.
103. Brisken W. F. et al. Very long baseline array measurement of nine pulsars parallaxes // The Astrophysical Journal, Vol. 571, No. 2, 2002. P. 906.
104. Shabanova T. V., Shitov Y. P. Properties of the linearly polarized radiation from PSR B0950+08 // Astronomy & Astrophysics, Vol. 418, No. 1, 2004. pp. 203-211.
105. Smirnova T.V., Toropov M.O., Tyul'bashev S.A. Variations in the Radiation Intensity of Pulsar B0950+08: Nine Years of Monitoring at 110 MHz // Astronomy Reports, Vol. 68, No. 8, 2024. pp. 828-837.
106. Bell M.E. et al. Time-domain and spectral properties of pulsars at 154 MHz // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 461, No. 1, 2016. pp. 908-921.
107. Фадеев Е. Н. и др. Измерение параметров рассеяния радиоизлучения в направлении пульсаров В0809+74, В0919+06 и В1133+16 с помощью наземно-космического интерферометра РАДИОАСТРОН // Астрономический журнал, Т. 101, № 11, 2024. С. 986-1002.
108. Gupta Y., Rickett B. J., Coles W. A. Refractive interstellar scintillation of pulsar intensities at 74 MHz // Astrophysical Journal, Vol. 403, No. 1, 1993. pp. 183-201.
109. Rickett B. J., Coles W. A., Bourgois G. Slow scintillation in the interstellar medium // Astronomy and Astrophysics, Vol. 134, No. 2, May 1984. pp. 390-395.
110. Helfand D. J., Manchester R. N., Taylor J. H. Observations of pulsar radio emission. III-Stability of integrated profiles // Astrophysical Journal, Vol. 198, No. 1, 1975. pp. 661-670.
111. Rathnasree N., Rankin J. M. On the approach to stability of pulsar average profiles // Astrophysical Journal, Vol. 452, 1995. pp. 814-818.

112. Taylor J. H., Manchester R. N., Huguenin G. R. Observations of pulsar radio emission. I-Total-intensity measurements of individual pulses // *Astrophysical Journal*, Vol. 195, No. 1, 1975. pp. 513-528.
113. Смирнова Т. В., Шабанова Т. В. Межимпульсное радиоизлучение пульсаров // *Труды ФИАН*, Т. 199, 1989. С. 68-82.
114. Biggs J. D. et al. A study of PSR 0826+34 – a remarkable pulsar // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 215, No. 2, 1985. pp. 281-294.
115. Durdin J.M. et al. An unusual pulsar – PSR 0826+34 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 186, 1979. pp. 39-41.
116. Смирнова Т.В., Торопов М.О., Тюльбашев С.А. Вариации интенсивности излучения пульсара В0950+08: 9 лет мониторинга на частоте 110 МГц // *Астрономический журнал*, Т. 101, № 8, 2024. С. 753-763.
117. Olszanski T.E.E. et al. Arecibo 4.5/1.4/0.33-GHz polarimetric single-pulse emission survey // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 489, No. 2, 2019. pp. 1543-1555.
118. Rankin J. M. Toward an Empirical Theory of Pulsar Emission-Part II-on the Spectral Behavior of Component Width // *Astrophysical Journal*, Vol. 274, No. 1, 1983. P. 359.
119. Rankin J. M. Toward an empirical theory of pulsar emission. VI-The geometry of the conal emission region // *Astrophysical Journal*, Vol. 405, 1993. pp. 285-297.
120. Wahl H. et al. Radio pulsar emission-beam geometry at low frequency: LOFAR High-Band Survey sources studied using Arecibo at 1.4 GHz and 327 MHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 520, No. 1, 2023. pp. 314-321.
121. Camilo F., Nice D. J. Timing parameters of 29 pulsars // *Astrophysical Journal*, Vol. 445, No. 2, 1995. pp. 756-761.
122. Tananbaum H. et al. Discovery of a periodic pulsating binary X-ray source in Hercules from UHURU // *Astrophysical Journal*, Vol. 174, No. L143, 1972.
123. Бочкарев Н. Г. Магнитные поля в космосе. Москва: Наука, 1985. 208 с.
124. Малов О. И., Малофеев В. М. Профили средних импульсов радиопульсаров на 102 и 111 МГц // *Астрономический журнал*, Т. 87, № 3, 2010. С. 238-256.
125. Condon J.J., Ransom S.M. *Essential Radio Astronomy*. Princeton University Press, 2016.
126. Шапиро С., Тюколски С. Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды, ч. II. Москва: Мир, 1986.
127. Rajwade K. *Radio Transients and their Environments*. West Virginia University, 2017.

128. Самодуров В. А., Тюльбашев С. А., Торопов М. О., Долгушев А. В., Орешко В. В., Логвиненко С. В., Исаев Е. А. Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от $+52^\circ$ до $+56^\circ$ на частоте 111 МГц // Труды ИПА РАН, No. 66, 2023. pp. 37-44.
129. Lorimer D. R. & Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge University Press, 2012.
130. Davis L., Goldstein M. Magnetic-dipole alignment in pulsars // Astrophysical Journal Letters, Vol. 159, 1970. pp. 81-86.
131. Manchester R. N., Lyne A. G. Pulsar Interpulses – two poles or one? // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 181, No. 4, 1977. pp. 761-767.
132. Goldreich P. Neutron star crusts and alignment of magnetic axes in pulsars // Astrophysical Journal, Vol. 160, 1970. P. 11.
133. Lyne A. G., Jordan C. A., Graham-Smith F. et al. 45 years of rotation of the Crab pulsar // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 446, No. 1, 2015. pp. 857-864.
134. Shishov V. I. et al. Monitoring of the turbulent solar wind with the upgraded Large Phased Array of the Lebedev Institute of Physics: First results // Astronomy Reports, Vol. 60, 2016. pp. 1067-1082.
135. Tyul'bashev S. A. et al. Search for Long-term Variability of Several Flat-Spectrum Sources at 111 MHz // Astronomy Reports, Vol. 63, 2019. pp. 920-931.
136. Смирнова Т.В., Торопов М.О., Тюльбашев С.А. Поиск слабых компонентов в радиоизлучении пульсаров // Астрономический журнал, Т. 101, № 12, 2024. С. 1078-1083. (*Smirnova T.V., Toropov M.O., Tyul'bashev S.A. Search for weak components in pulsar radiation //Astronomy Reports. – 2024. – Т. 68. – №. 12. – С. 1185-1190.*)
137. The EPN Database of Pulsar Profiles [Электронный ресурс] URL: <https://psrweb.jb.man.ac.uk/epndb> (дата обращения: 17.01.2026).
138. Malofeev V. M., Malov O. I., Shchegoleva N. V. Flux densities of 235 pulsars at 102.5 MHz // Astronomy Reports, Vol. 44, 2000. pp. 436-445.
139. Tyul'bashev S.A., Tyul'bashev V.S., Malofeev V.M. et al. Detection of Five New RRATs at 111 MHz // Astronomy Reports, Vol. 62, 2018. pp. 63-71.
140. Shishov V.I., Chashei I.V., Oreshko V.V. et al. Monitoring of the turbulent solar wind with the upgraded Large Phased Array of the Lebedev Institute of Physics: First results // Astronomy Reports, Vol. 60, 2016. pp. 1067-1082.

141. Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Tyul'bashev V.S. et al. Detection of Five New Pulsars with the BSA LPI Radio Telescope // *Astronomy Reports*, Vol. 64, 2020. pp. 526-532.
142. Everett J. E., Weisberg J. M. Emission beam geometry of selected pulsars derived from average pulse polarization data // *The Astrophysical Journal*, Vol. 553, No. 1, 2001. P. 341.
143. Everett J. E., Weisberg J. M. Emission beam geometry of selected pulsars derived from average pulse polarization data // *The Astrophysical Journal*, Vol. 553, No. 1, 2001. P. 341.
144. Toropov M.O., Tyul'bashev S.A., Smirnova T.V., Samodurov V.A., Ovchinnikov I.L. Study of the variability and components of the pulsar B0823+26 at a frequency of 111 MHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 527, No. 1, 2024. pp. 1594-1600.

Список использованных сокращений

БСА – Большая Синфазная Антенна (радиотелескоп в Пушинской Радиоастрономической Обсерватории);

ФИАН – Физический институт им. Лебедева Российской Академии Наук;

ГИ – гигантский импульс;

RRAT (rotating radio transient) – вращающиеся радиотранзиенты;

S/N – отношение сигнала к шуму;

MP (main pulse) – главный импульс [в среднем профиле пульсара];

IP (interpulse) – интеримпульс [в среднем профиле пульсара];

PC (postcursor) – посткурсор [в среднем профиле пульсара];

LOFAR (LOw Frequency ARray – «низкочастотная [антенная] решётка») – радиотелескоп с антенной сетью, расположенной в основном в Нидерландах и предназначенный для астрономических наблюдений на низких радиочастотах – 10-240 МГц;

FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope) – на 2026 г. самый большой в мире радиотелескоп с заполненной апертурой, расположенный на юге Китая;

GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) – радиотелескоп в Индии, работающий в метровом диапазоне волн;

MeerKAT (Meerkat Karoo Array Telescope) – радиотелескоп в Южно-Африканской Республике;

PUMPS (Pushchino multibeam pulsar search) – Пушинский многолучевой поиск пульсаров;

МГД – магнитогидродинамическая модель [магнитосферы пульсара];

БГИ – модель магнитосферы пульсара, разработанная Бескиным В.С., Гуревичем А.В. и Истоминым Ю.Н.;

UTC (Coordinated Universal Time) – всемирное координированное время;

MJD (Modified Julian Date) – модифицированная юлианская дата;

SF, ACF, CCF – структурная функция, автокорреляционная функция и кросскорреляционная функция;

a.u. (arbitrary unit) – относительная единица измерения.

Список таблиц

Таблица I.1. Характеристики приемно-регистрирующей системы БСА3 [37]	26
Таблица II.1 Отношение IP/MP для 96 исследованных пульсаров. Результат диссертанта из работы [63].	50
Таблица II.2 Пульсары с $IP/MP > 0,01$	56
Таблица II.3 Наблюдаемое количество ортогональных интеримпульсных пульсаров для трех . 57 интервалов периодов P. Результат диссертанта из работы [63].	57
Таблица III.1. Колонки: 1 – отношение числа сеансов в «Q»-моде к общему числу сеансов, 2 – отношение числа сеансов с амплитудами меньше 3σ к общему числу сеансов, 3 – отношение средних амплитуд импульсов в «B» и «Q» модах, 4-5 – соотношения между амплитудами MP, PC и IP. Результат диссертанта из работы [144].	72
Таблица III.2 Доли времени в «B/Q»-модах и доли нуллингa в этих модах. Результат диссертанта из работы [144].	77
Таблица III.3: Отношения амплитуд компонент профиля J0953+0755 и их пиковые плотности потока по годам. Результат диссертанта из работы [105].	83
Таблица IV.1: Отношения амплитуд компонент средних профилей J1543+0929 и J2234+2114. Результат диссертанта из работы [118].	95

Список иллюстраций

Рис. 0.1 Гистограмма распределения количества импульсов (ось y) по энергии (ось x) трёх пульсаров на частоте 408 МГц.....	6
Рис. 0.2 Положение излучающих регионов – полярной шапки и внешний зазор в магнитосфере пульсара [12, с. 127].	10
Рис. 0.3 Средние профили пульсаров на различных частотах, выраженных в ГГц [12, с. 129]. Ширина профилей составляет 120° фазы вращения, содержащие главный импульс.....	11
Рис. 0.4 Диаграмма период-производная периода $P - \dot{P}$ пульсаров	13
Рис. 0.5 Диаграмма период-производная периода $P - \dot{P}$, пульсары с интеримпульсами отмечены символом «+». Ось y – производная периода пульсара (c/c^{-1}), ось x – период пульсара (с). Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.....	14
Рис. I.1 Радиотелескоп БСА ФИАН	21
Рис. I.2 Схема антенны БСА ФИАН [28].	21
Рис. I.3 Вид идеальной диаграммы (одного из лучей) направленности БСА в трёх измерениях	23
Рис. I.4 Эффективная площадь антенны (ось y – тысячи m^2) за 2018 год для калибровочного радиоисточника 3C405. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.	24
Рис. I.5 Коэффициент эффективной площади антенны (отношение эффективной площади S_{eff} к геометрической S_g площади антенны) по калибровочным радиоисточникам (3C405, 3C123, 3C144, 3C274, 3C348) за период 2014-2024 годы. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.....	24
Рис. I.6 Коэффициент $K/\text{Ян}$, определённый по радиоисточнику 3C405. Ось y – коэффициент $K/\text{Ян}$, ось x – время в днях. Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.	33
Рис. I.7 Результаты вейвлет-анализа (вейвлет-диаграмма) для радиоэталона 3C98 за 2014-2024 годы. При анализе использовался вейвлет Морле. Ось y – период (годы), ось x – временной интервал (годы). Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.	34
Рис. I.8 Поправка по прямому восхождению за наклон антенны. Ось y – поправка за прямое восхождение относительно табличного значения источника (секунды), ось x – склонение лучей диаграммы направленности БСА (градусы). Неопубликованный иллюстративный материал, рисунок получен диссертантом.	35
Рис. I.9 Профили сильнейших импульсов, обнаруженных транзиентов. Ось y – плотность потока в $u.e.$, ось x – временной интервал. Результат диссертанта из работы [51, с. 340].	40

Рис. I.10 Гистограмма распределения импульсов по лучам диаграммы направленности БСА-3. Ось у – количество детектированных импульсов, ось х – номер луча. Результат диссертанта из работы [51, с. 337].	41
Рис. I.11 Верхняя панель: профили сильнейших импульсов найденных транзиентов, нижняя панель: динамические спектры этих импульсов (ось у – частоты каналов в МГц, ось х – временной интервал, совпадающий с интервалом профиля). Результат диссертанта из работы [20, с. 520].	42
Рис. II.1 12 парных картинок, на каждой из которых в верхней части показан суммированный средний профиль пульсара. Результат диссертанта из работы	53
Рис. II.1 (продолжение) 12 парных картинок, на каждой из которых в верхней части показан суммированный средний профиль пульсара. Результат диссертанта из работы	54
Рис. III.1 Рассеивание радиоволн при наблюдениях пульсаров [127, с. 6].	62
Рис. III.2 Рассеяние и искажение когерентного излучения на тонком экране неоднородностей различных размеров	64
Рис. III.3 Эффект рассеивания профиля пульсара J1833-0338 в зависимости от частоты наблюдений [32, с. 24].	65
Рис. III.4 На верхней панели показан средний профиль J0826+2637, MJD = 57765. На нижней панели изображен тот же профиль, увеличенный по амплитуде в 16 раз. Результат диссертанта из работы	69
Рис. III.5 Вариации амплитуды (а.у.) главного импульса со временем (21.08.2014 – 30.12.2019). Результат диссертанта из работы	71
Рис. III.6 Зависимость между амплитудами MP и IP в относительных единицах (а.у.). Результат диссертанта из работы [144].	72
Рис. III.7 Вариации амплитуд MP, PC и IP со временем в относительных единицах (а.у.). Результат диссертанта из работы	73
Рис. III.8 Левая панель – это излучение PSR J0826+37 в «В»-режиме (сеанс JD 57764). Правая панель демонстрирует излучение пульсара в «Q»-режиме (сеанс JD 57770). Результат диссертанта из работы	73
Рис. III.9 Структурная функция модуляции амплитуд J0826+37 показана в двойном логарифмическом масштабе. Результат диссертанта из работы	75
Рис. III.10 Нормированные ACF от вариаций амплитуды MP (нижняя панель) и IP (средняя панель). Результат диссертанта из работы	76
Рис. III.11 Средний профиль J0953+0755, накопленный за 2014 год (112 сеансов). Результат диссертанта из работы	80

Рис. III.12 Зависимость амплитуды МР для среднего за сеанс профиля от времени. Результат диссертанта из работы	81
Рис. III.13 Три индивидуальных импульса (снизу - вверх) и средний за этот сеанс профиль. Макушка среднего профиля срезана (его амплитуда равна 10), чтобы лучше был виден IP. Ось y - амплитуда в относительных единицах, ось x - долгота в точках. Результат диссертанта из работы [105].	83
Рис. III.14 Зависимость между амплитудами МР и IP по 9 годам наблюдений. Амплитуды даны в относительных единицах. Прямая соответствует подгонке методом наименьших квадратов. Результат диссертанта из работы [105].	84
Рис. III.15 Кросскорреляционная функция между амплитудами средних за сеанс профилей МР и IP (нижняя панель), при нулевом сдвиге значение CCF (0,63 для $k = 0$) заменено на значение при $k = 1$; автокорреляционная функция от вариаций амплитуд МР (верхняя панель). Стрелкой отмечен сдвиг в 130 дней. Результат диссертанта из работы [105].	85
Рис. III.16 Средние спектры за 3 сеанса наблюдений на долготах: МР (слева) и IP (справа). Амплитуды даны в относительных единицах. Для MJD = 56933 на спектре интеримпульса дополнительно приведен спектр шума. Результат диссертанта из работы [105].	88
Рис. IV.1 Накопленный за 10 лет средний профиль (2883 сеанса) пульсара J1543+0929 приведены с двойным периодом. Результат диссертанта из работы	93
Рис. IV.2 Накопленные за каждый год (2014-2023) средние профили J1543+0929. Результат диссертанта из работы [118].	94
Рис. IV.3 Нормированные средние профили J1543+0929 на частотах 139 МГц (вверху) и 327 МГц (внизу), взятые из базы данных профилей пульсаров [119]. Результат диссертанта из работы [118].	96
Рис. IV.4 Накопленный за 10 лет (2014-2023, 2990 сеансов) средний профиль J2234+2114. Результат диссертанта из работы [118].	97
Рис. IV.5 Нормированные средние профили J2234+2114 на частотах 345 МГц (вверху) и 430 МГц (внизу), взятые из базы данных профилей пульсаров [119]. Результат диссертанта из работы [118].	98

Приложение 1. Опорные радиисточники

Источник	Прямое восхождение, α (J2000)	Склонение, δ (J2000)	$S_{102,5}$ (Ян)	Тип
3C274	12:30:49.424	+12:23:28.044	1634,2	галактика в паре галактик ($z = 0,0042$)
3C144	05:34:31.94	+22:00:52.2	1645,1	Остаток сверхновой
3C405	19:59:28.357	+40:44:02.097	14000,0	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,056$)
3C123	04:37:04.375	+29:40:13.82	320,0	Активное ядро галактики ($z = 0,218$)
3C348	16:51:08.15	+04:59:33.32	550,0	Яркая галактика в кластере ($z = 0,1549$)
3C134	05:04:42.0	+38:06:02	183,5	Радиогалактика
3C353	17:20:28.147	-00:58:47.12	364,0	Активное ядро галактики ($z = 0,03$)
3C111	04:18:22.7	+38:00:40	136,5	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,0485$)
3C409	20:14:27.6	+23:34:53	126,7	Радиисточник
3C98	03:58:54.44	+10:26:02.82	73,0	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,030933$)
3C33	01:08:52.87	+13:20:14.26	70,5	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,05$)
3C298	14:19:08.18	+06:28:34.8	66,0	Квazar ($z = 1,437$)
3C227	09:47:45.143	+07:25:20,596	65,6	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,08583$)
3C433	21:23:44.852	+25:04:27.23	96,9	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,101757$)
3C438	21:55:52.324	+38:00:28.51	98,5	Сейфертовская галактика ($z = 0,290501$)
3C452	22:45:50	+39:41:30	112,8	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,081086$)
3C465	23:38:29.4	+27:01:52	74,4	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,03035$)
3C243	10:26:31.96	+06:27:33.02	32,6	Квazar ($z = 1,71$)
3C254	11:14:38.72	+40:37:20.33	58,1	Квazar ($z = 0,73593$)
3C442	22:14:45.007	+13:50:47.66	47,5	Активное ядро галактики ($z = 0,02617$)
3C157	06:18:02.7	+22:39:36	428,3	Остаток сверхновой
3C13	00:34:14.50	+39:24:16.0	26,1	Квazar ($z = 1,351$)
3C47	01:36:24.42	+20:57:27.52	55,6	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,425$)

Источник	Прямое восхождение, α (J2000)	Склонение, δ (J2000)	$S_{102,5}$ (Ян)	Тип
3C18	00:40:50,5	+10:03:27	25,3	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,188$)
3C48	01:37:41.30	+33:09:35.07	87,8	Квazar ($z = 0,369$)
3C109	04:13:40,34	+11:12:14.78	36,1	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,306$)
3C138	05:21:09.89	+16:38:22.06	31,2	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,759$)
3C435	21:29:06.10	+07:32:58.0	25,5	Радиогалактика ($z = 0,471$)
3C424	20:48:12.1	+07:01:17	28,6	Квazar ($z = 0,1256$)
3C368	18:05:06.30	+11:01:32.0	22,8	Радиогалактика ($z = 1,132$)
3C382	18:35:03.39	+32:41:46.86	38,6	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,058$)
3C338	16:28:38.24	+39:33:04.23	89,8	Квazar ($z = 0,03$)
3C321	15:31:43.473	+24:04:18.93	33,2	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,096$)
3C317	15:16:44.49	+07:01:17.83	101,2	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,03447$)
3C299	14:21:05.696	+41:44:49.260	25,8	Радиогалактика ($z = 0,367$)
3C288	13:38:49.6	+38:51:11	30,4	Радиогалактика ($z = 0,246$)
3C265	11:45:29.0	+31:33:50	44,6	Радиогалактика ($z = 0,8105$)
3C264	11:45:05.00903	+19:36:22.7414	54,0	Квazar ($z = 0,0216$)
3C245	10:42:44.605	+12:03:31.264	23,6	Квazar ($z = 1,02955$)
3C217	09:08:51	+37:48:18	38,8	Радиоисточник
3C192	08:05:35.005	+24:09:50,334	33,8	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,05968$)
3C191	08:04:47.966	+10:15:23.744	27,8	Квazar ($z = 1,94889$)
3C186	07:44:17.472	+37:53:17.249	34,0	Квazar ($z = 1,06692$)
3C175	07:13:02.3	+11:46:15	38,6	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,768$)
3C241	10:21:54.59	+21:59:31.2	23,5	Радиогалактика ($z = 1,617$)
3C161	06:27:10,1	-05:53:06	79,3	Квazar
3C89	03:34:13.6	-01:13:30	23,6	Радиогалактика ($z = 0,13981$)
3C230	09:51:58.4	-00:02:43	23,6	Радиогалактика ($z = 1,487$)
3C135	05:14:07.0	+00:54:55	20,5	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,1274$)
3C287.1	13:32:54.1	+01:59:25	19,3	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,21582$)

Источник	Прямое восхождение, α (J2000)	Склонение, δ (J2000)	$S_{102,5}$ (Ян)	Тип
3C389	18:46:26.3	-03:00:44	96,5	Переменная звезда типа Омикрон Кита
3C147	05:42:35.6	+49:51:24	74,2	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,55$)
3C289	13:45:26.5	+49:45:48	25,0	Квazar ($z = 0,9670$)
3C380	18:29:32.3	+48:44:24	135,6	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,69166326$)
3C349	16:59:29.7	+47:02:54	32,7	Радиогалактика ($z = 0,205$)
3C239	10:11:45.4	+46:28:11	36,2	Радиогалактика ($z = 1,7900$)
3C219	09:21:08.1	+45:38:56	83,1	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,17456$)
3C36	01:17:59.3	+45:34:59	19,3	Радиогалактика ($z = 1,301$)
3C337	16:28:53.1	+44:17:41	30,9	Квazar ($z = 0,6300$)
3C470	23:58:34.9	+44:03:42	22,3	Радиогалактика ($z = 1,653$)
3C268.4	12:09:14.5	+43:38:31	24,9	Сейфертовская галактика I типа ($z = 1,39913$)
3C66	02:23:18.9	+43:01:42	70,8	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,02106$)
3C103	04:08:03.7	+43:00:33	56,1	Радиогалактика ($z = 0,331$)
3C277	12:51:42.8	+50:33:18	13,1	Радиогалактика ($z = 0,414$)
3C402	19:41:43.3	+50:36:32	20,8	Радиогалактика низкой поверхностной яркости ($z = 0,025361$)
3C91	03:37:43.1	+50:46:49	18,9	Остаток сверхновой
3C137	05:19:32.1	+50:54:52	17,0	Радиоисточник
3C356	17:24:20.3	+50:57:28	24,7	Квazar ($z = 1,0790$)
3C22	00:50:56.5	+51:13:55	24,6	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,936501$)
3C303	14:43:02.1	+52:00:07	27,9	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,14121$)
3C20	00:43:08.6	+52:04:49	60,6	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,174$)
3C130	04:52:48.8	+52:05:10	42,0	Радиогалактика ($z = 0,109002$)
3C295	14:11:21.0	+52:09:26	155,7	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,46169$)

Источник	Прямое восхождение, α (J2000)	Склонение, δ (J2000)	$S_{102,5}$ (Ян)	Тип
3C52	01:48:28.9	+53:34:19	16,5	Радиогалактика ($z = 0,285$)
3C415.2	20:32:48.1	+53:42:23	26,7	Радиогалактика
3C319	15:24:06.3	+54:26:46	31,5	Радиогалактика ($z = 0,192$)
3C171	06:55:14.3	+54:10:15	29,3	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,238198$)
3C196	08:13:36.2	+48:12:49	115,4	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,87$)
3C153	06:09:32.6	+48:04:27	25,0	Сейфертовская галактика II типа ($z = 0,276952$)
3C381	18:33:46.0	+47:26:00	31,5	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,160705$)
3C280	12:56:57.8	+47:20:00	46,7	Сейфертовская галактика I типа ($z = 0,9960$)

Приложение 2. Блок-схема программы обработки

