

## ПОИСК ИНТЕРПУЛЬСОВ В ПОЛНОЙ ВЫБОРКЕ ПУЛЬСАРОВ НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2024 г. М. О. Торопов<sup>1</sup>, С. А. Тюльбашев<sup>2,\*</sup>, В. С. Бескин<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>LLC TEK Inform, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева, Астрокосмический центр,  
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, Пушкино, Московская обл., Россия

<sup>3</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (Национальный  
исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

\*E-mail: [serg@prao.ru](mailto:serg@prao.ru)

Поступила в редакцию 16.04.2024 г.

После доработки 20.07.2024 г.

Принята в печать 11.09.2024 г.

Проведен поиск интерпульсов в выборке 96 пульсаров, наблюдавшихся на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) в Пушчинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS). Выборка пульсаров является полной для пульсаров, имеющих отношение сигнала к шуму ( $S/N$ ) в главном импульсе (МР) больше 40. Для поиска слабых интерпульсов (ИР) использовалось сложение средних профилей на интервале до 10 лет. У 12 пульсаров обнаружены интерпульсы (12.5% от выборки), из них у семи пульсаров интерпульс располагается вблизи фазы  $180^\circ$  относительно главного импульса (вероятные ортогональные ротаторы), а у пяти — на фазах, далеких от  $180^\circ$  (вероятные соосные ротаторы). Отношения амплитуд ИР/МР находятся в пределах 0.004–0.023, медианное значение составляет 0.01. Оценки наблюдаемого количества соосных и ортогональных ротаторов, у которых  $ИР/МР \geq 0.01$ , не противоречат модели, согласно которой в ходе эволюции магнитная ось и ось вращения становятся ортогональными.

**Ключевые слова:** пульсары, интерпульсы, соосный ротатор, ортогональный ротатор

**DOI:** 10.31857/S0004629924120062 **EDN:** ICLIPB

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, радиопульсары — это быстро вращающиеся нейтронные звезды, импульсное излучение которых мы видим благодаря ненулевому углу между осью вращения и осью магнитного диполя. Если во время оборота нейтронной звезды в луч зрения попадает конус излучения, вдоль центральной оси которого располагается линия, соединяющая магнитные полюса, мы можем наблюдать вспышку радиоизлучения. Согласно каталогу ATNF<sup>1</sup> [1], типичная полуширина импульса в долях периода составляет 1–10%, что позволяет грубо оценить ширину конуса как  $3^\circ - 30^\circ$ .

Очевидно, что наблюдаемая полуширина импульса зависит не только от угла между осью вращения и осью магнитного поля, но и от угла, под которым располагается центральная линия в конусе излучения по отношению к лучу зрения. Например, если угол между осями мал (соосный ротатор), конус излучения может захватывать ось вращения, и наблюдаемый импульс может занимать весь период. Есть вероятность, что такой радиопульсар

останется незамеченным в обычных пульсарных наблюдениях, когда мы складываем много импульсов с известным периодом и потом ищем пик в среднем профиле. Другой крайний случай — когда ось вращения и ось магнитного поля ортогональны (ортогональный ротатор). В этом случае, если ось вращения ортогональна лучу зрения, мы будем наблюдать оба магнитных полюса. Пульсары, у которых на каждом обороте (периоде) пульсара наблюдаются два импульса, называются пульсарами с интерпульсами. Они могут быть как соосными, так и ортогональными ротаторами [2]. Для соосных ротаторов интерпульс может появиться, если детектируемое излучение образуется в двух локальных зонах, находящихся на разных расстояниях от полярной шапки.

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 интерпульса могут отличаться в несколько раз (см. [3, табл. 1]). Более сильный импульс называют главным импульсом (МР), более слабый импульс

<sup>1</sup> <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

называют интерпульсом (IP). Определение ортогонального ротатора на практике — это тяжелая задача. В настоящей работе мы будем придерживаться эмпирического подхода, согласно которому фазовое расстояние между МР и IP близкое к  $180^\circ$  присуще ортогональным ротаторам, а далекое от  $180^\circ$  присуще соосным ротаторам. В работе [3, табл. 1] можно увидеть, что медианное значение фазового расстояния для ортогональных ротаторов равно  $180^\circ$ . Для соосных ротаторов медианное значение фазового расстояния между МР и IP отличается от  $180^\circ$  на  $35^\circ$ . При этом нельзя исключить случаи, когда в соосном ротаторе фазовое расстояние между МР и IP будет близким к  $180^\circ$ , а в ортогональном ротаторе фазовое расстояние между МР и IP будет далеко от  $180^\circ$ .

Геометрия определяет необходимые условия для видимости импульса, однако, есть и физические условия, которые определяют, возникнет ли радиоимпульс. Согласно современным представлениям [4], 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.

Поскольку нейтронная звезда теряет энергию вращения на генерацию пульсарного ветра, ее скорость вращения постепенно уменьшается, а период  $P$  соответственно увеличивается. При замедлении вращения наступают условия, когда нейтронная звезда перестает быть радиопульсаром.

Помимо замедления вращения нейтронной звезды, существует и эволюция угла между осью вращения и магнитной осью. То есть нет пульсаров, у которых этот угол остается неизменным после их рождения. При этом, согласно работам [5, 7, 6, 8], в ходе эволюции оси становятся сонаправленными, а согласно работам [9, 10] оси становятся ортогональными. То есть, чисто статистически мы должны наблюдать либо избыток соосных ротаторов, либо избыток ортогональных ротаторов.

В настоящей работе проведена статистическая проверка количества наблюдаемых пульсаров с интерпульсами в выборке пульсаров, наблюдаемых в Пушинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS; Pushchino multibeam pulsar search).

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

В августе 2014 г. начались мониторинговые наблюдения на многолучевом радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА3) Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН). Этот ра-

диотелескоп появился в ходе капитальной реконструкции радиотелескопа БСА, когда на основе одного антенного поля была заложена техническая возможность создания четырех независимых радиотелескопов. Радиотелескоп БСА1 используется для обычных однолучевых наблюдений пульсаров наклонениях от  $-16^\circ$  до  $+87^\circ$ . У БСА3 нет возможности переключения лучей, и первоначально предполагалось, что радиотелескоп будет работать по программе Космическая Погода [11]. Его 128 стационарных лучей выстроены в плоскости меридиана и покрывают наклонения от  $-9^\circ$  до  $+55^\circ$  с перекрытием лучей по уровню 0.4. Размер луча примерно  $0.5^\circ \times 1^\circ$ , время прохождения через меридиан по половинной мощности (наблюдательная сессия) около 3.5 минут. Так как БСА является меридианным инструментом, любой источник на небе регистрируется лишь один раз в сутки. Одна из задач радиотелескопа БСА3 — это поиск пульсаров и транзиентов [12]. Наблюдения на БСА3 проводятся в полосе 2.5 МГц, разделенной на 32 частотных канала шириной 78 кГц. Время опроса точки фиксировано и составляет 12.5 мс.

БСА3 строился для проекта Космическая Погода<sup>1</sup> и в нем не была заложена возможность контроля времени записи каждой точки данных по атомному стандарту частоты. Наблюдения проводятся часовыми порциями. Начало каждого часа (запуск наблюдений) контролируется специальным GPS приемником, а время внутри часа отсчитывается кварцевым генератором. Возможные ошибки времени к концу часового интервала могут быть  $\pm 25$  мс. Однако, до настоящего момента все попытки сделать тайминг, учитывающий предполагаемую точность кварцевого генератора, были безуспешными.

Каждые 4 часа на 15 с производится отключение дипольных линий БСА, и в кабельные тракты, идущие от окончания дипольных линий и до входа в регистраторы, подается калибровочный сигнал (калибровочная ступенька) известной температуры от генератора шума. Форма подаваемого сигнала OFF-ON-OFF, где OFF соответствует отключению дипольных линий на 5 с. В это время регистратор записывает сигнал, соответствующий температуре окружающей среды. Сигнал ON появляется при подключении на входе усилителей генератора шума. Он также длится 5 с. Калибровочные ступеньки отражают текущее усиление в трактах радиотелескопа, и позволяют выравнивать данные, получаемые в разное время в разных частотных каналах [13].

<sup>1</sup> <https://sw.prao.ru/>

Обзор ведется круглосуточно больше 9 лет, и для каждого пульсара, попадающего в покрываемую площадку, накоплено больше 3000 наблюдательных сессий. Для проверки количества наблюдаемых пульсаров с IP, мы будем складывать средние профили за доступные дни, улучшая отношение сигнала к шуму ( $S/N$ ) в МР, который будем располагать на расстоянии четверти от начала среднего профиля, и проверять появление статистически значимых сигналов (вероятных IP) на разных расстояниях от МР.

Как было сказано выше, тайминг по мониторинговым данным пока не получается сделать, и поэтому 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<sup>1</sup>, однако не все эти пульсары наблюдаются регулярно с  $S/N$  достаточными, чтобы видеть их средние профили, а для части из этих пульсаров профили вообще не получены [14]. Для поиска интерпульсов мы выбрали лишь те пульсары, у которых в наблюдательной сессии отношение  $S/N$  для главного импульса было больше 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 [15] максимальная чувствительность при поиске пульсаров в мониторинговых данных достигается для пульсаров, имеющих  $P > 0.25$  с,  $DM < 100$  пк/см<sup>3</sup>, находящихся в площадке  $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ . Поиск интерпульсов мы провели для пульсаров, ранее обнаруженных в PUMPS и имеющих  $P > 0.25$  с.

Согласно работам [3, 16] из 44 пульсаров, у которых известны IP, отношение IP/МР  $\geq 0.1$  для почти 90%, а именно для 39 пульсаров из 44. Это означает, если задать критерий  $S/N > 40$  для МР, 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 выполнялись следующие процедуры.

- нормировка 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. Сохраняются 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 ( $\sigma_n$ ) 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  $90^\circ$  на фазовом представлении профиля;
- 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 (интерпульсов) 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 мы получаем таблицы, которые содержат средние профили пульсаров, суммированные отдельно по годам. Мы также имеем суммированные за все годы профили. Все это позволяет просмотреть любой из исследованных пульсаров сколь угодно подробно, включая и отдельные наблюдательные сессии.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

После обработки наблюдений осталось 96 пульсаров, имеющих  $S/N > 40$  в МР после суммирования средних профилей. В табл. 1 приведена информация по этим пульсарам. В столбцах 1–3 даны имя пульсара в соглашении J2000 (по каталогу ATNF), его период и мера дисперсии, в столбцах 4 и 5 – отношение IP/МР и расстояние между МР и IP в гра-

<sup>1</sup> <https://bsa-analytics.prao.ru/pulsars/>

Таблица 1. Отношение IP/MP для 96 исследованных пульсаров

Имя	$P$ , с	$DM$ , пк/см <sup>3</sup>	IP/MP	$r^\circ$
J0014+4746	1.2406	30.4	<0.01	—
J0034–0721	0.9429	10.9	<0.0005	—
J0039+35	0.5367	53	<0.005	—
J0048+3412	1.217	39.9	<0.003	—
J0051+0423	0.3547	13.9	<0.01	—
J0137+1654	0.4147	26	<0.019	—
J0304+1932	1.3875	15.6	<0.0008	—
J0317+13	1.9743	12.9	<0.013	—
J0323+3944	3.032	26.1	<0.004	—
J0332+5434	0.7145	26.7	<0.002	—
J0335+4555	0.2692	47.1	<0.017	—
J0454+4529	1.3891	20.8	<0.005	—
J0459–0210	1.133	21	<0.005	—
J0525+1115	0.3544	79.4	<0.019	—
J0528+2200	3.7455	50.8	<0.0009	—
J0540+3207	0.5242	61.9	<0.011	—
J0546+2441	2.8438	73.8	<0.010	—
J0611+30	1.412	45.2	<0.002	—
J0612+3721	0.2979	27.1	<0.005	—
J0612+37215	0.4438	39.2	<0.012	—
J0613+3731	0.6191	18.9	0.019	155 ± 11
J0623+0340	0.6137	54	<0.019	—
J0629+2415	0.4766	84.1	<0.002	—
J0659+1414	0.3849	13.9	<0.018	—
J0811+37	1.2483	16.9	<0.008	—
J0815+4611	0.4342	11.2	<0.015	—
J0826+2637	0.5306	19.4	0.015	180 ± 13
J0837+0610	1.2737	12.8	<0.0003	—
J0922+0638	0.4306	27.2	<0.0005	—
J0935+33	0.9615	18.3	<0.008	—
J0943+2253	0.5329	27.2	<0.006	—
J0944+4106	2.2294	21.4	<0.007	—
J0946+0951	1.0977	15.3	<0.003	—
J0953+0755	0.253	2.96	0.022	216 ± 27
J1115+5030	1.6564	9.18	<0.004	—
J1136+1551	1.1879	4.84	<0.001	—
J1238+2152	1.1185	17.9	<0.005	—
J1239+2453	1.3824	9.25	<0.001	—
J1246+2253	0.4738	17.7	<0.013	—
J1313+0931	0.8489	12	<0.008	—

Таблица 1. Продолжение

Имя	$P$ , с	$DM$ , пк/см <sup>3</sup>	IP/MP	$r^\circ$
J1404+1159	2.6504	18.4	<0.007	—
J1509+5531	0.7396	19.6	<0.002	—
J1532+2745	1.1248	14.6	<0.003	—
J1538+2345	3.4493	14.9	<0.015	—
J1543+0929	0.7484	34.9	<0.002	—
J1549+2113	1.2624	24	<0.013	—
J1614+0737	1.2068	21.3	<0.004	—
J1627+1419	0.4908	32.1	<0.004	—
J1635+2418	0.4905	24.2	<0.002	—
J1638+4005	0.7677	33.4	<0.015	—
J1645+1012	0.4108	36.1	<0.003	—
J1645–0317	0.3876	35.7	<0.006	—
J1649+2533	1.0152	34.4	<0.009	—
J1740+1311	0.803	48.6	<0.001	—
J1741+2758	1.3607	29.1	<0.003	—
J1752+2359	0.409	36.1	<0.010	—
J1758+3030	0.9472	35	<0.003	—
J1813+4013	0.931	41.5	<0.003	—
J1821+4147	1.2618	40.6	<0.012	—
J1823+0550	0.7529	66.7	0.008	$140 \pm 9$
J1838+1650	1.9019	32.9	<0.010	—
J1841+0912	0.3813	49.1	<0.004	—
J1844+1454	0.3754	41.4	<0.0008	—
J1849+2559	0.5192	75	<0.063	—
J1851+1259	1.2053	70.6	<0.009	—
J1907+4002	1.2357	30.9	<0.003	—
J1912+2525	0.6219	37.8	<0.004	—
J1920+2650	0.7855	27.7	<0.004	—
J1921+2153	1.3373	12.4	<0.0001	—
J1922+2110	1.0779	217	<0.011	—
J1929+1844	1.2204	112	<0.023	—
J1946+1805	0.4406	16.1	0.011	$195 \pm 16$
J1952+1410	0,275	31.5	0.006	$188 \pm 25$
J1954+2923	0.4266	7.9	<0.005	—
J2007+0910	0.4587	48.7	<0.018	—
J2017+2043	0.5371	60.4	<0.087	—
J2018+2839	0.5579	14.1	0.004	$224 \pm 12$
J2022+2854	0.3434	24.6	<0.0008	—
J2037+1942	2.0743	36.8	<0.010	—
J2046+1540	1.1382	39.8	<0.006	—



Таблица 1. Окончание

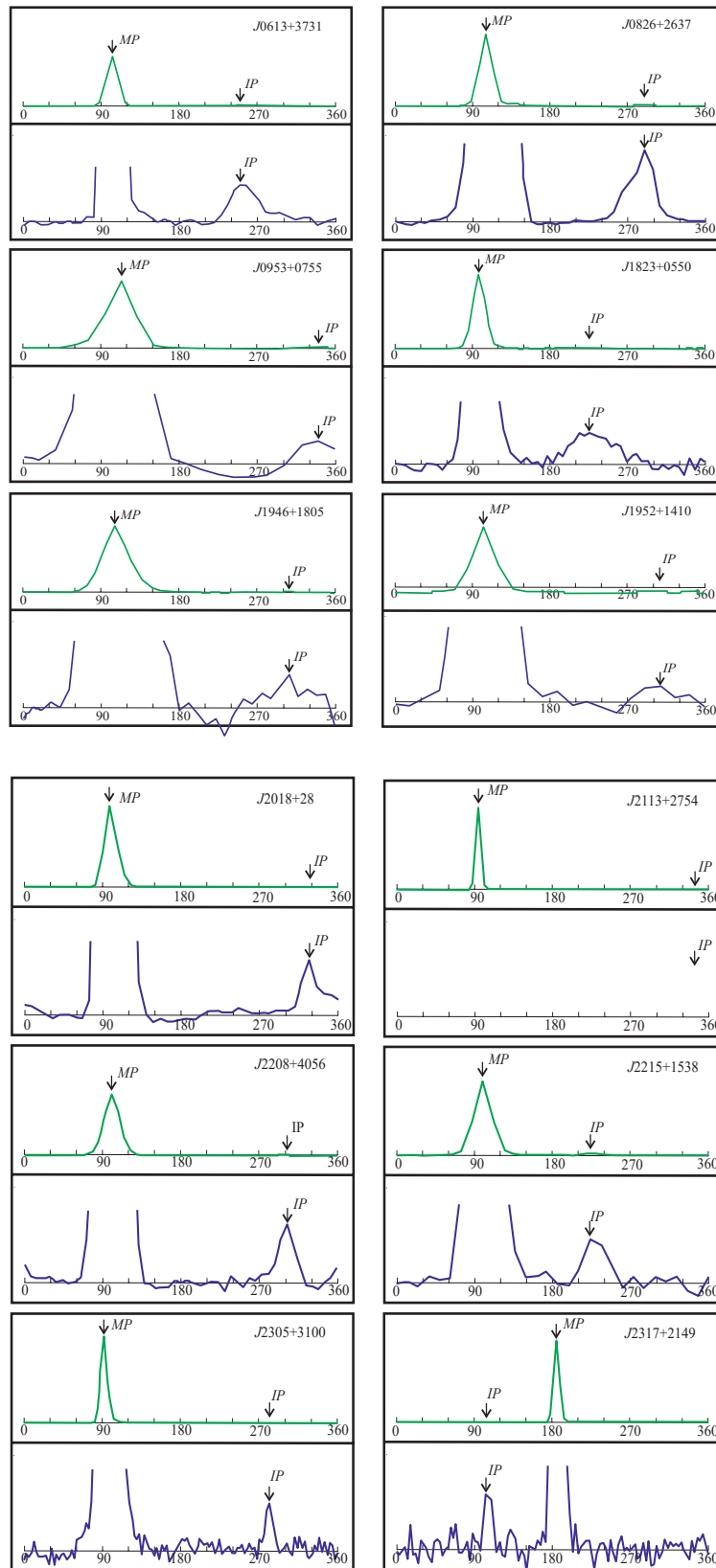
Имя	$P$ , с	$DM$ , пк/см <sup>3</sup>	IP/MP	$r^\circ$
J2055+2209	0.8151	36.3	<0.005	—
J2113+2754	1.2028	25.1	0.007	$247 \pm 6$
J2116+1414	0.4401	56.2	<0.006	—
J2124+1407	0.694	30.2	<0.017	—
J2139+2242	1.0835	44.1	<0.009	—
J2157+4017	1.5252	71.1	<0.002	—
J2208+4056	0.6369	11.8	0.014	$198 \pm 11$
J2209+22	1.7769	46.3	<0.024	—
J2212+2933	1.0045	74.5	<0.008	—
J2215+1538	0.3741	29.2	0.023	$120 \pm 18$
J2227+3038	0.8424	19.9	<0.005	—
J2234+2114	1.3587	35	<0.005	—
J2253+1516	0.7922	29.2	<0.013	—
J2305+3100	1.5758	49.5	0.01	$189 \pm 5$
J2306+31	0.3416	46.1	<0.007	—
J2317+2149	1.4446	20.8	0.004	$279 \pm 5$

дусах. Для всех найденных IP значение максимума  $S/N > 4$ , длительность IP сравнима с длительностью MP. 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 MP считается точным местоположением центра импульса, ошибка определения местоположения может быть  $\pm 1$  точка от истинного значения. Положение максимума на IP тоже может определяться с ошибкой  $\pm 1$  точка и больше (см. рис. 1). 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. 1, когда градусы отсчитываются от нуля, MP находится на фазе  $90^\circ$ , а последняя точка среднего профиля соответствует фазе  $360^\circ$ . Например, для пульсара J0953+0755 у нас отмечено положение IP на  $216^\circ \pm 27^\circ$ . В работе [2] говорится, что IP предшествует MP и расстояние до него составляет  $152^\circ$ . Так как  $360^\circ - 216^\circ = 144^\circ$ , это означает, что в пределах указанных ошибок положения IP на средних профилях совпадают.

Всего из 96 пульсаров, находящихся в табл. 1, IP обнаружены у 12 пульсаров. На рис. 1 приведены

суммированные средние профили этих пульсаров. Фаза IP для 7 из 12 пульсаров с учетом приведенных ошибок отличается от  $180^\circ$  не больше, чем на  $15^\circ$ . 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 БСА 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 [3] J0826+2637 является ортогональным ротатором, а J0953+0755 и J1946+1805 являются соосными ротаторами. Фаза IP для 5 из 12 пульсаров далека от  $180^\circ$ . 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%.

В разделе 2 «Наблюдения и обработка» говорилось, что мы должны обнаружить не менее 90%



**Рис. 1.** Приведены 12 парных картинок, на каждой из которых в верхней части показан суммированный средний профиль пульсара (название пульсара указано в верхнем правом углу), а на нижней части убрана вершина МР в профиле так, чтобы был виден ИР. Стрелками на рисунках отмечены положение МР и ИР.

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 – 0.01% (J1921+2153).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Селекционный эффект, который драматически уменьшает чувствительность БСА и влияет на общее обнаруживаемое количество пульсаров с IP, 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, индустриальные 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 [15], где проверялась практическая чувствительность БСА<sup>3</sup> 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 индустриальных 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, а уже на  $DM > 25 \text{ пк/см}^3$  в частотном канале 78 кГц уширение импульса из-за дисперсионного сглаживания сравнимо с временем опроса точки.

Помимо указанных факторов, эффект рассеяния, пропорциональный четвертой степени частоты наблюдений, сглаживает импульсы и, тем самым, понижает чувствительность наблюдений. Наблюдения показывают, что эффект рассеяния для секундных пульсаров по наблюдениям на частоте 102 МГц [17, 18] становится существенным на  $DM > 70\text{--}80 \text{ пк/см}^3$ . На  $DM > 250 \text{ пк/см}^3$  нет ни

одного пульсара, видимого на БСА<sup>1</sup>. 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 интерпульсами.

По нашему мнению, единственный селекционный эффект, действующий по-разному на пульсары с интерпульсами и без них, связан с наблюдениями пульсаров с малыми периодами. Как видно из наблюдений интерпульсов, IP может находиться на разных фазовых расстояниях по отношению к MP. Учитывая, что рассеяние на любой мере дисперсии может отличаться на 1–1.5 порядка величины от среднего (ожидаемого) значения [17], оно может «поглотить» интерпульс и это поглощение будет эффективным, особенно для соосных ротаторов, когда интерпульс находится недалеко от главного импульса. MP может быть в 100 и более раз сильнее, чем IP, следовательно, чем слабее интерпульс, тем больше вероятность его исчезновения из-за рассеяния. 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 разделе 2 «Наблюдения и обработка» 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 [19, 20, 21], так и теоретических [23, 22], отметим еще два момента, которые могут повлиять на обсуждаемую статистику интеримпульсных пульсаров.

Во-первых, практически все наблюдаемые нами интеримпульсные пульсары в табл. 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  $-9^\circ < \delta < +55^\circ$ , она по-

<sup>1</sup> <https://bsa-analytics.prao.ru/pulsars/>



**Таблица 2.** Наблюдаемое количество ортогональных интеримпульсных пульсаров для трех интервалов периодов  $P$ 

$P$ , с	$N_{\text{all}}$	$N_{\text{IP}}$	$N$ , %	[22], %	FAST, %	MeerKAT, %
0.03–0.5	26	1–2	1.0–2.1	2.2–3.6	2.0	2.4
0.5–1.0	28	0–1	0.0–1.0	0.7–1.1	0.4	0.5
> 1	42	1	1.0	$\geq 0.2$	0.3	0.2

**Примечание.** Приведены значения общего количества пульсаров  $N_{\text{all}}$  и пульсаров с интерпульсами  $N_{\text{IP}}$ . В столбце 5 приведено относительное количество интеримпульсных пульсаров, взятых из работы [22], а в столбцах 6 и 7 — из обзоров FAST [20] и MeerKAT [21].

крывает почти половину всего неба. В работе [23] можно увидеть 12 пульсаров, имеющих отношение  $\text{IP}/\text{MP} > 0.1$ , попадающих в исследованную площадку, и при этом отсутствующих в табл. 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<sup>1</sup> не обнаружены. У 10 из этих 11 пульсаров  $DM > 100$  пк/см<sup>3</sup>. Как мы уже отмечали, чувствительность обзора на больших мерах дисперсии низкая. 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/см<sup>3</sup>, и должен детектироваться в PUMPS [14]. 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, поэтому обнаружить его IP в наших наблюдениях невозможно. Тем не менее, вопрос о том, почему почти у всех интеримпульсных пульсаров, имеющих  $\text{IP}/\text{MP} > 0.1$  и попавших в исследованную площадку, наблюдаются большие  $DM$ , и вопрос, почему не найдены пульсары с  $DM < 100$  пк/см<sup>3</sup> с  $\text{IP}/\text{MP} > 0.1$ , ответов не имеют.

Отметим, что здесь удивительно не само преобладание интеримпульсных пульсаров с низкими отношениями  $\text{IP}/\text{MP}$ , а относительно малое количество пульсаров с  $\text{IP}/\text{MP} \sim 1$ . Действительно, низкие отношения  $\text{IP}/\text{MP}$  легко могут быть объяснены, если предположить значительное отличие угла между магнитным моментом и осью вращения от 90°. В этом случае луч зрения будет пересекать диаграмму направленности от одного из магнитных полюсов вдали от магнитной оси. Отношение

же  $\text{IP}/\text{MP} = 1$  должно выполняться лишь для углов наклона, близких к 90°.

Во-вторых, все обсуждаемые в работах [23, 22] статистические распределения касаются пульсаров с отношением интенсивностей  $\text{IP}/\text{MP} > 0.01$ . Поэтому далее при сравнении количества интеримпульсных пульсаров мы ограничимся лишь семью пульсарами из табл. 1, имеющими те же параметры. 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°), а три пульсара (J0953+0755, J1946+1805, J2215+1538) можно отнести к соосным ротаторам.

В табл. 2 приведены полученные значения количества ортогональных интеримпульсных пульсаров для трех интервалов периодов  $P$ , а также значения общего количества пульсаров и пульсаров с интерпульсами (столбцы 2 и 3). В столбце 5 приведено относительное количество интеримпульсных пульсаров, взятых из работы [22], а в столбцах 6 и 7 — из обзоров FAST [20] и MeerKAT [21]. 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 [22] были проведены расчеты, оценивающие ожидаемое относительное количество наблюдаемых ортогональных интеримпульсных пульсаров для двух моделей торможения нейтронных звезд. В первой, так называемой MHD-модели (см., напр., [24, 8]), в которой угол между магнитной осью и осью вращения стремится к 0°, предсказывается количество ортогональных интеримпульсных пульсаров в интервале  $0.033 < P < 0.5$  с на уровне 0.2–1.5%. Во второй, BGI-модели [9], в которой угол между магнитной осью и осью вращения стремится к 90°, относительное количество IP предсказывается на уровне 2.5–5.5%. Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что наши результаты (как и последние результаты обсерваторий FAST и MeerKAT) говорят скорее в пользу

<sup>1</sup> <https://bsa-analytics.prao.ru/pulsars/known/>

модели BGI, чем в пользу общепризнанной модели MHD. Что же касается соосных интеримпульсных пульсаров, то, как показано в работе [23], и модель MHD, и модель BGI 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).

В заключение отметим главные результаты, полученные в настоящей работе:

- 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 IP: семь пульсаров имеют IP, располагающиеся на фазовых расстояниях близких к  $180^\circ$  относительно MP; для пяти пульсаров расстояния далеки от  $180^\circ$  и они, по-видимому, являются соосными ротаторами;

- для пульсаров, имеющих отношение  $IP/MP > 0.01$ , результаты не противоречат модели из работы [22], предполагающей эволюцию пульсаров в ортогональные ротаторы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22–12–00236<sup>1</sup>.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим Л. Б. Потапову за помощь при оформлении статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R.N. Manchester, G.B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs*, *Astron. J.* 129(4), 1993 (2005).
2. *J. Gil*, *Astron. and Astrophys.* 127, 267 (1983).
3. *K. Maciesiak, J. Gil, and V.A.R.M. Ribeiro*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 414(2), 1314 (2011).
4. *D.R. Lorimer and M. Kramer*, *Handbook of Pulsar Astronomy* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012).
5. *L. Davis and M. Goldstein*, *Astrophys. J. Letters* 159, L81 (1970).
6. *R.N. Manchester and A.G. Lyne*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 181, 761 (1977).
7. *P. Goldreich*, *Astrophys. J. Letters* 160, L11 (1970).
8. *A. Philippov, A. Tchekhovskoy, and J.G. Li*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 441(3), 1879 (2014).
9. *V.S. Beskin, A.V. Gurevich, and Y.N. Istomin*, *Physics of the Pulsar Magnetosphere* (Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1993).
10. *A.G. Lyne, C.A. Jordan, F. Graham-Smith, C.M. Espinoza, B.W. Stappers, and P. Weltevrede*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 446(1), 857 (2015).
11. *V.I. Shishov, I.V. Chashei, V.V. Oreshko, S.V. Logvinenko, et al.*, *Astron. Rep.* 60(12), 1067 (2016).
12. *S.A. Tyul'bashev, V.S. Tyul'bashev, V.V. Oreshko, and S.V. Logvinenko*, *Astron. Rep.* 60(2), 220 (2016).
13. *S.A. Tyul'bashev, P.Y. Golysheva, V.S. Tyul'bashev, and I.A. Subaev*, *Astron. Rep.* 63(11), 920 (2019).
14. *S.A. Tyul'bashev, M.A. Kitaeva, and G.E. Tyul'basheva*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 517(1), 1112 (2022).
15. *S.A. Tyul'bashev, G.E. Tyul'basheva, M.A. Kitaeva, I.L. Ovchinnikov, V.V. Oreshko, and S.V. Logvinenko*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 528(2), 2220 (2024).
16. *I.F. Malov and E.B. Nikitina*, *Astron. Rep.* 57(11), 833 (2013).
17. *A.D. Kuz'min, B.Ya. Losovskii, and K.A. Lapaev*, *Astron. Rep.* 51(8), 615 (2007).
18. *A.V. Pynzar' and V.I. Shishov*, *Astron. Rep.* 52(8), 623 (2008).
19. *P. Weltevrede and S. Johnston*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 387(4), 1755 (2008).
20. *P.F. Wang, J.L. Han, J. Xu, C. Wang, et al.*, *Res. Astron. and Astrophys.* 3(10), id. 104002 (2023).
21. *B. Posselt, A. Karastergiou, S. Johnston, A. Parthasarathy, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 520(3), 4582 (2023).
22. *E.M. Novoselov, V.S. Beskin, A.K. Galishnikova, M.M. Rashkovetskyi, and A.V. Biryukov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 494(3), 3899 (2020).
23. *L.I. Arzamasskiy, V.S. Beskin, and K.K. Pirov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 466(2), 2325 (2017).
24. *A. Spitkovsky*, *Astrophys. J. Letters* 648(1), L51 (2006).

<sup>1</sup> <https://rscf.ru/project/22-12-00236/>

## SEARCH FOR INTERPULSES IN A COMPLETE SAMPLE OF PULSARS AT A FREQUENCY OF 111 MHz

M. O. Toropov<sup>1</sup>, S. A. Tyul'bashev<sup>2,\*</sup>, V. S. Beskin<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*LLC TEK Inform, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute, Astro-Space Center, Pushchino  
radio astronomy observatory, Pushchino, Russia*

<sup>3</sup>*Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Dolgoprudnyi, Russia*

*\*E-mail: serg@prao.ru*

An interpulse search was carried out in a sample of 96 pulsars observed on the Large Phased Array (LPA) radio telescope in the Pushchino Multibeam Pulsar Search (PUMPS). The pulsar sample is complete for pulsars having a signal-to-noise ratio ( $S/N$ ) in the main pulse (MP) greater than 40. To search for weak interpulses (IP), the addition of average profiles over an interval of up to 10 years was used. Interpulses were detected in 12 pulsars (12.5% of the sample), of which 7 pulsars have an interpulse located near the  $180^\circ$  phase relative to the main pulse (probable orthogonal rotators), and 5 have phases far from  $180^\circ$  (probable coaxial rotators). The amplitude ratios of IP/MP are in the range of 0.004–0.023, the median value is 0.01. Estimates of the observed number of coaxial and orthogonal rotators with  $IP/MP \geq 0.01$  do not contradict the model according to which, during evolution, the magnetic axis and the axis of rotation become orthogonal.

**Keywords:** pulsar, interpulse, coaxial (alignment) rotator, orthogonal (counter-alignment) rotator