

ПОИСК ПУЛЬСАРОВ В ПЛОЩАДКЕ С КООРДИНАТАМИ

$$3^{\text{h}} < \alpha < 4^{\text{h}} \text{ И } +21^{\circ} < \delta < +42^{\circ}$$

© 2023 г. С. А. Тюльбашев^{1,*}, Г. Э. Тюльбашева²

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева, филиал Пушчинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича, Астрокосмический центр, Пушино, Россия

² Институт математических проблем биологии РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Пушино, Россия

*E-mail: serg@prao.ru

Поступила в редакцию 11.08.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принята к публикации 08.12.2022 г.

На антенне БСА ФИАН проведен поиск пульсаров вне плоскости Галактики в площадке размером 300 кв. град. на частоте 111 МГц, с чувствительностью в 5–10 раз лучше, чем у ранее проводимых обзоров. Поиск проводился в суммированных спектрах мощности. При накоплении, эквивалентном 100 ч непрерывных наблюдений для каждой точки площадки, обнаружено 5 известных пульсаров, имеющих отношение сигнала к шуму (СШ) от 20 до 1300 в первой гармонике спектра. Для обнаруженных пульсаров получены средние профили. Даны оценки пиковой и интегральной плотностей потока найденных пульсаров для отдельных сеансов и для суммированных за 5.5 лет спектров мощности, полученные с использованием разработанного способа, основанного на измерениях высоты гармоник в спектре мощности. Новые пульсары в площадке не обнаружены. По-видимому, при поиске пульсаров в площадке мы приблизились к нижней границе светимости секундных пульсаров. Полнота обзора находится на уровне 0.5 МЯн.

Ключевые слова: пульсар, спектр мощности, средний профиль, плотность потока

DOI: 10.31857/S0004629923020093, **EDN:** SKUCJT

1. ВВЕДЕНИЕ

На текущий момент в каталоге ATNF числится уже больше 3300 пульсаров¹ [1]. Большая часть из них – это классические радиопульсары, излучающие импульс на каждом или почти на каждом обороте нейтронной звезды. Их поиск, как правило, проводился при помощи спектров мощности, позволяющих выделять периодические сигналы.

Небесная сфера в обзорах по поиску пульсаров просматривалась неоднократно, и обнаружение новых пульсаров при очередном поиске связано с появлением новых чувствительных антенн, новых регистраторов, имеющих широкие полосы, и новых методов обработки. Например, вступление в строй 500-метрового радиотелескопа FAST в Китае и запуск программы по поиску пульсаров привели к обнаружению 201 пульсара [2]. На настоящий момент времени поиск проведен лишь по незначительной части северной полусферы, в основном в плоскости Галактики. К окончанию обзора можно ожидать обнаружение сотен новых пульсаров. Ввод в строй радиотелескопа метрово-

го диапазона длин волн LOFAR, представляющего собой разнесенную антенную решетку, работающую на широкополосных диполях, позволил провести поиск на частоте 135 МГц и обнаружить 53 новых пульсара [3]. Некогерентное накопление спектров мощности и поиск отдельных импульсов пульсаров позволили обнаружить в ежедневных мониторинговых наблюдениях радиотелескопа БСА ФИАН, работающего на частоте 111 МГц, почти 90 пульсаров ([4–6] и другие работы).

Возникает естественный вопрос о смысле поиска новых пульсаров, ведь подробно исследовано лишь незначительное число из известных пульсаров, а при поиске обнаруживаются все более и более слабые объекты, полноценное исследование которых затруднено. Если эти новые слабые пульсары такие же по своим свойствам, как уже известные пульсары, то легче изучать более сильные объекты.

Ответ в том, что поисковые работы, в первую очередь, дают возможность проводить разного рода статистические исследования по выборкам пульсаров, а также позволяют обнаруживать новые классы источников, что невозможно при ис-

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

следованиях отдельных источников. Например, в ходе поиска отдельных диспергированных импульсов пульсаров открыт новый класс пульсаров — вращающиеся радиотранзиенты (RRAT) [7]. Исследование случайно обнаруженных импульсов длительностью в одну минуту показало, что они принадлежат белому карлику или пульсару, имеющему период $P = 18$ мин [8]. Совсем недавно появилась работа по новому радиопульсару с периодом 75.88 с [9], лежащему за так называемой “линией смерти” — области на зависимости периода пульсара от производной периода ($P/\dot{P}$), где по теоретическим предположениям излучение пульсара не должно возникать.

Светимости пульсаров могут различаться на шесть порядков (см. ATNF), и до сих пор нет ясности, найдена ли в обзорах нижняя граница светимости пульсаров. Граница средней светимости постоянно смещается в область слабых плотностей потоков [2]. Это значит, что изменяется функция светимости, а она может сказать нам о принципиально наблюдаемом количестве пульсаров в Галактике. Помимо перечисленных моментов, для статистических исследований наиболее хороши полные выборки, т.е. выборки, в которых содержатся *все* пульсары до какой-то плотности потока на данной частоте, либо *все* пульсары до какой-то границы светимости. Получение таких однородных и полных выборок весьма затруднено с учетом известной сильной переменности пульсаров, как собственной, так и связанной с межзвездной средой.

В работе [6] приведены графики, показывающие ожидаемую чувствительность в обзоре по поиску пульсаров в Пушинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS). Согласно этим графикам, для пульсаров, имеющих меру дисперсии $DM < 100\text{--}200$ пс/см³, при накоплении данных за семь лет чувствительность обзора может быть на порядок выше, чем у всех проведенных в мире обзоров по поиску пульсаров. Ранее, используя четырехлетние наблюдения, полученные с низким частотно-временным разрешением, нам удалось обнаружить 42 классических секундных пульсара². В настоящей работе рассматривается площадка 300 кв. град. и обработка 5.5 лет данных, имеющих высокое частотно-временное разрешение.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Основным инструментом Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) является Большая синфазная антенна (БСА) Физического института Академии наук (ФИАН), являющаяся меридианным инструментом. На базе одного ан-

тенного поля, состоящего из 16384 диполей, на настоящий момент времени реализовано два независимых радиотелескопа [10]. Один из этих радиотелескопов используется для мониторингового круглосуточного обзора неба в 96 пространственных лучах, перекрывающих склонения $-9^\circ < \delta < +42^\circ$, выстроенных вдоль меридиана с расстоянием между лучами примерно в полградуса.

Первоначально поиск пульсаров проводился в данных с низким частотно-временным разрешением [11]. Эти данные записываются в 6 частотных каналах, ширина канала 415 кГц, время опроса точки 0.1 с. Объем данных составляет примерно 1 терабайт в год, и их можно обработать на бытовых компьютерах или слабых серверах. Поиск в данных с низким частотно-временным разрешением проводился для пульсаров с периодами больше 0.5 с. На $DM \approx 30\text{--}40$ пс/см³ чувствительность при поиске пульсаров по этим данным начинает резко падать из-за дисперсионного сглаживания. Усреднения временных рядов для поиска пульсаров, имеющих ширины средних профилей больше чем 100 мс, не производилось, что приводит к ухудшению чувствительности для пульсаров с широкими (> 100 мс) средними профилями.

С августа 2014 г. на БСА ФИАН проводится параллельная запись данных с высоким частотно-временным разрешением. Запись ведется в 32 частотных каналах шириной 78 кГц и временем опроса 12.5 мс на точку. Объем данных составляет около 35 терабайт в год. Данные с августа 2014 и до конца 2019 г. хранятся на дисковой полке и доступны для обработки, данные за 2020–2022 гг. хранятся на жестких дисках. Поиск в данных с высоким частотно-временным разрешением может проводиться для пульсаров с периодами $P > 0.025$ с. Для пульсаров с $P > 0.5$ с чувствительность начинает падать на $DM \approx 100$ пс/см³ [6].

Обработка данных с низким частотно-временным разрешением показала, что для части слабых пульсаров, видимых на суммированных спектрах мощности, не удастся получить их средний профиль [6, 18]. Для обработки и поиска предельно слабых пульсаров в данных с высоким частотно-временным разрешением была создана специальная методика, позволяющая извлечь основные характеристики пульсара, их P и DM без получения среднего профиля. Методика обработки данных подробно описана в работе [6]. В настоящей работе детали обработки даются в объеме, необходимом для понимания разработанной методики поиска.

В разработанной методике поиска пульсаров используются спектры мощности, полученные с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT), а для увеличения чувствительности эти спектры мощности за разные дни складываются.

² См. <https://bsa-analytics.prao.ru/pulsars/> и ссылки там же.

Таблица 1. Известные пульсары исследуемой площадки

Name	P , с	DM, pc/cm ³	Год публикации	Dist, kpc	RT	v_{obs} ; Δv ; Δv_{chan} , MHz	Δt , min	СШ
0301+35	0.568	57.4	2016 [12]	3.10	Arecibo	327; 57; 0.055	1	— ; 4.5
0302+2252	1.207	18.9	2016 [11]	1.01 (2.74)	BCA	111; 2.5; 0.415	3.5	44; 5.5
0323+3944	3.032	26.1	1978 [13]	1.19 (21.7)	GB	400; 16; 2.0	2.4	≈1300; 50.6
0342+27	0.952	58.9	2016 [12]	—	Arecibo	327; 57; 0.055	1	— ; 5.1
0349+2340	2.420	62.9	2019 [3]	3.74 (6.83)	LOFAR	135; 32; 0.012	60	20; 5.9
0355+28	0.365	48.6	2020 [14]	1.78 (4.11)	GBT	350; 100; 0.024	2	32; 5.0
0358+4155	0.226	46.3	2014 [15]	1.48 (8.78)	GBT	350; 100; 0.024	2	211; 8.8

Если высота гармоник в спектре больше заданной величины в единицах СШ, то считается, что обнаружен кандидат в пульсары. Мы получаем суммированные спектры мощности для каждого дня, для каждого луча антенны по склонению, для прямых восхождений с шагом в 1.5 временной минуты, для DM , перебираемых в диапазоне 0–1000 пс/см³, для возможных ширин импульсов от 12.5 до 400 мс. Таким образом, для каждой точки на небе получается от 1500 (режим обзора) до 10000 (режим проверки кандидата в новый пульсар) спектров мощности. Чтобы отразить содержимое суммированных спектров, мы строим карту зависимости P/DM , на которой кружками разного размера отмечаем все сигналы (высоты гармоник спектров мощности), имеющие отношение сигнал шум (СШ) больше заданного. По умолчанию на карте задается минимальное значение СШ = 4, гармоники, имеющие СШ < 4, на ней не показываются. Границу СШ можно сдвигать вверх, убирая с карты слабые периодические сигналы. Если в исследуемую точку попадает пульсар, он отражается на карте в виде отрезков, вытянутых вдоль DM . Вторая, третья и другие гармоники пульсара выглядят как более короткие отрезки. Их периоды равны $P/2$, $P/3$ и так далее. Из-за низкочастотных шумов, связанных с мерцающими на межпланетной плазме и на ионосфере радиоисточниками, базовая линия не всегда удачно вычитается из спектра мощности. В нем остаются низкочастотные шумы, поэтому поиск пульсаров по спектрам мощности удается проводить лишь до периодов 3–4 с. Для поиска пульсаров, имеющих $P > 3$ с, используются суммированные периодограммы.

Физически запись наблюдений идет на два регистратора, к каждому из которых подключено 48 лучей БСА. Для нашей работы мы выбрали данные с регистратора, записывающего склонения $+21^\circ < \delta < +42^\circ$. На этих склонениях наблюдается минимум помех, и достигается наилучшая чувствительность. Обработка проводилась на бытовом компьютере, поэтому скорость обработки низкая. Для теста новой поисковой программы,

работающей с данными, записанными с высоким частотно-временным разрешением, была выбрана средняя по всем своим характеристикам площадка с координатами по прямому восхождению $3^h < \alpha < 4^h$. Размер этой площадки равен 1/48 от общего размера площадки обзора. Обработка наблюдений за 5.5 лет продолжалась 1.5 мес.

В площадке обзора на начало августа 2022 г. ATNF показал 199 пульсаров, имеющих $P > 25$ мс и $DM < 200$ пс/см³. Наблюдаемые максимумы количества известных пульсаров попадают на области $5^h < \alpha < 6^h$ (9 пульсаров) и $19^h < \alpha < 21^h$ (79 пульсаров), соответствующие направлениям на антицентр и центр Галактики. В четырех из 24 площадок в каталоге находится всего по одному пульсару. Медианное количество пульсаров на один час по прямому восхождению равно шести. В выбранной нами площадке в каталоге ATNF находится шесть известных секундных радиопульсаров. Помимо этого, на сайте <http://www.naic.edu/~deneva/drift-search/> [12] был обнаружен источник J0342+27, не попавший на сайт ATNF. Таким образом, на текущий момент в исследуемой площадке находится семь известных пульсаров.

3. ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗВЕСТНЫХ ПУЛЬСАРОВ

Поисковая программа, использующая суммирование спектров мощности за весь наблюдательный период, обнаружила пять из семи известных пульсаров. Информация по ним приведена в табл. 1. Колонки таблицы: “name” — имя пульсара в аннотации J2000; “ P ” — период; “ DM ” — мера дисперсии, “год публикации” — год публикации статьи с обнаруженным пульсаром и ссылка на статью; “Dist” — расстояние до пульсара; “RT” — название радиотелескопа; “ v_{obs} ; Δv ; Δv_{chan} ” — характеристики пульсара в обзорах: центральная частота наблюдений, полная полоса приема, ширина частотного канала; “ Δt ” — время накопления в одном сеансе наблюдений по данным обзора; “СШ” — оценка в единицах СШ

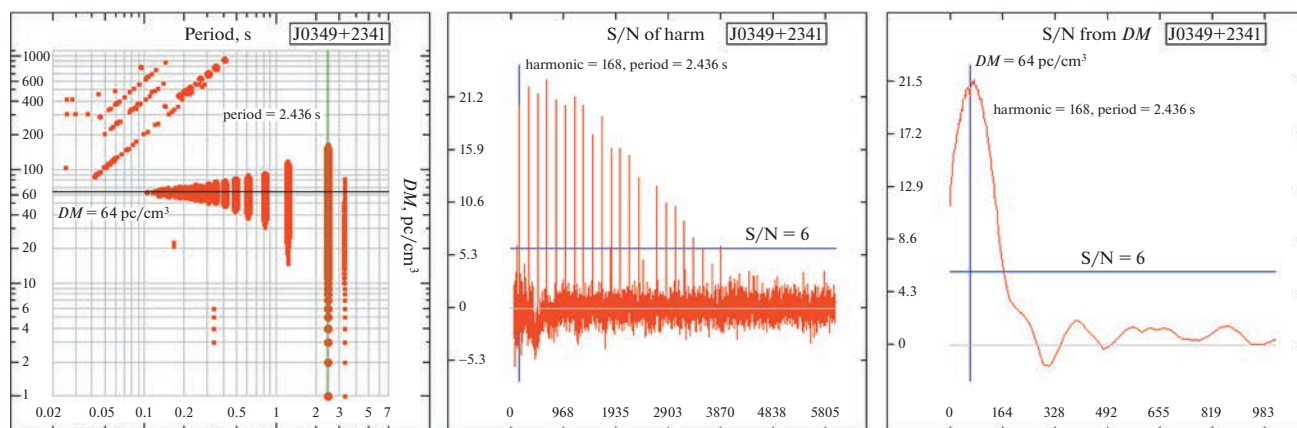


Рис. 1. Пульсар J0349+2341. Левая часть рисунка: FFT-карта P/DM . Кругами показаны гармоники суммарных спектров мощности с $S/N \geq 6$. По горизонтали — период гармоники в секундах, по вертикали — DM в pc/cm^3 . Средняя часть рисунка: суммарный за 1800 дней спектр мощности, полученный для предполагаемой $DM = 64 \text{ pc}/\text{cm}^3$. По горизонтали — номер точки в спектре мощности, по вертикали — СШ. Правая часть рисунка: зависимость СШ первой гармоники суммарного спектра мощности от меры дисперсии. По горизонтали — DM в pc/cm^3 , по вертикали — СШ.

высоты первой гармоники в суммированных спектрах мощности и в лучшей наблюдательной сессии по данным БСА.

Для пульсаров J0301+35 и J0342+27 не удалось обнаружить статей, в которых говорилось бы об их первом обнаружении. Эти пульсары есть лишь на сайте, где представлен обзор АО327³. Для этих пульсаров в таблице приведена ссылка на статью с описанием обзора. Для пульсара J0349+2340 — это первое независимое подтверждение после его обнаружения. В колонке “Dist” указано расстояние до пульсара по каталогу ATNF, а в скобках приведена оценка расстояния до пульсара, полученная по значению СШ, накопленному в суммарных спектрах мощности в наблюдениях на БСА ФИАН, в предположении, что наблюдаемая высота гармоники уменьшается пропорционально квадрату расстояния до пульсара. В колонке “RT” приведены названия телескопов: GBT — Грин-Бенк полноповоротный 100-метровый телескоп; БСА — меридианная антенная решетка 200×400 м с полной апертурой; GB — Грин-Бенк меридианный 90-метровый телескоп; LOFAR — распределенная антенная решетка с синтезированной диаграммой; Arecibo — меридианный 300-метровый телескоп.

Суммирование спектров мощности для всех сигналов производилось в среднем за 1800 дней (сеансов по 3.5 мин). С учетом времени прохождения источника через меридиан общее время накопления сигнала в каждой точке равно примерно ста часам.

Отдельно отметим источники J0301+35 и J0355+28, имеющие, по-видимому, опечатки пе-

риодов в ATNF. На сайте обзора Аресибо³ для пульсара J0301+35 указан период 0.568 с, а в ATNF для пульсара с тем же именем и дисперсией — период 0.146 с. Аналогичная ситуация с пульсаром J0355+28 — на сайте, аккумулирующем пульсары⁴, обнаруженные в GBT, приведен период 0.365 с, а на сайте ATNF — 0.094 с.

В качестве примера приведем рисунки, сгенерированные программой поиска для пульсара J0349+2340. Этот пульсар, самый слабый из найденных нами пульсаров в исследуемой площадке. На рис. 1 на карте и на суммарном спектре мощности видны 22 гармоники.

В поиске с помощью суммирования спектров мощности пульсары J0301+35 и J0342+27 не обнаружены. Оба эти пульсара не были обнаружены и в обзоре LOFAR [3], имеющем чувствительность 2–3 мЯн [6] при пересчете на 111 МГц. Если пульсары всплывающие, или имеют сильную переменность, или у них большая нуллиновая часть, то суммирование спектров мощности за все дни не будет оптимальным способом для их поиска. Мы провели поиск излучения этих пульсаров в спектрах мощности, посчитанных за отдельные дни, предполагая, что за 5.5 лет наблюдений могут быть дни, когда эти пульсары были достаточно сильными, чтобы их было видно в отдельных сессиях.

Для пульсаров J0301+35 и J0342+27 нашлись 3–5 “подозрительных” дня из почти 2000 проверенных. Получены профили с импульсами ($S/N = 4.5$ –5), у которых период и мера дисперсии близки к каталожным. Однако, если импульсы реальные, они должны обнаруживаться в средних

³ <http://www.naic.edu/~deneva/drift-search/>

⁴ <http://astro.phys.wvu.edu/GBNCC/>

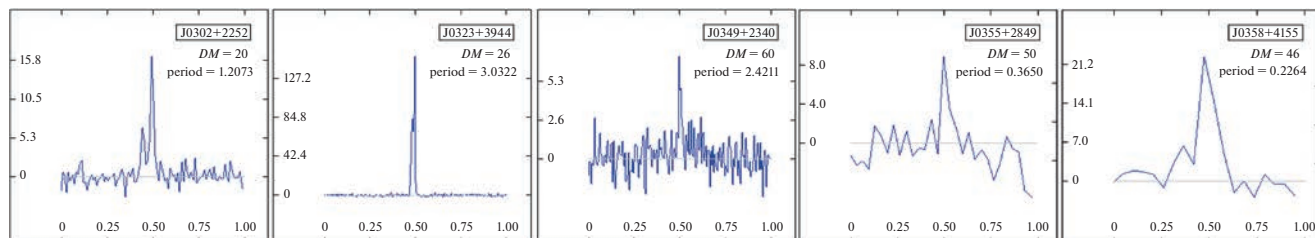


Рис. 2. Средние профили пульсаров из табл. 1, сгенерированные программой поиска пульсаров. По вертикали — СШ импульса, по горизонтали — фаза. Максимум в профиле (фаза импульса) после сложения импульсов может приходиться на любую точку профиля, но на рисунках максимумы сдвинуты к фазе 0.5.

профилях на близких периодах и мерах дисперсии. В дополнение к этому, длительность импульса не может быть меньше величины дисперсионного сглаживания в частотном канале на известной DM пульсаров. Найденные нами импульсы обнаруживаются лишь на одном периоде и мере дисперсии, поэтому мы считаем, что обнаруженные сигналы не принадлежат пульсарам J0301+35 и J0342+27. Ниже мы приводим верхние оценки плотности потока для этих пульсаров, исходя из высоты пиковых сигналов, оцененных по “подозрительным” дням.

На рис. 2 показаны средние профили обнаруженных нами пульсаров из табл. 1 для дней с наиболее характерными, с нашей точки зрения, профилями.

В полученных средних профилях программа оценивает высоту импульса в единицах СШ. Используя значение СШ, можно получить оценку пиковой плотности потока (S_p) в предположении, что мы знаем величину среднеквадратичных отклонений шумовой дорожки (σ_n — флуктуационная чувствительность, соответствующая СШ = 1) в направлении пульсара в единицах плотности потока.

Согласно изофотам в работе [16], полученным на частоте 178 МГц, близкой к центральной частоте наблюдений БСА, разница фоновых температур на всей исследованной площадке не превышает 10%, поэтому шумов фонов будут практически одинаковыми по всей площадке. По формуле радиометрического выигрыша можно оценить σ_n по всей площадке, и, зная СШ импульса, получить S_p импульса в янских. Для получения интегральной плотности потока S_i нужно просуммировать точки среднего профиля с учетом известного значения S_p .

Пиковая плотность потока, получаемая в единицах СШ и видимая на рис. 2, — это величина, оцениваемая из данных по среднему профилю. Однако в наблюдениях на антенной решетке мы наблюдаем лишь часть излученной энергии. Для получения оценки реальной плотности потока

необходимо сделать поправки, учитывающие особенности антенны: зенитное расстояние источника; несовпадение координат луча БСА и пульсара; поправка, за огибающую сформированных восьмерок лучей БСА. Наглядно все эти поправки представлены на рис. 1 в работе [10], где видно, что реальные плотности потока могут быть в разы больше наблюдаемых потоков.

Таким образом, для записей, в которых после обработки виден средний профиль, можно оценить S_p и S_i , если известна флуктуационная чувствительность. Эти наилучшие записи отбирались по спектрам мощности за отдельные дни, где наблюдались гармоники, имеющие наибольший СШ. Если привязать высоту гармоники за данную дату к известной плотности потока, определенной для этой даты, можно оценить плотности потоков за любые даты, измеряя высоту гармоники в спектре мощности в единицах СШ и предполагая, что флуктуационная чувствительность меняется незначительно день ото дня. То есть, можно пересчитать плотность потока, измеряя высоту гармоники в суммированном спектре мощности. Конечно, эти грубые оценки будут относиться к пульсарам, у которых переменность собственная (внутренняя) или внешняя (из-за межзвездной среды) не вносит существенного вклада в рост гармоники при сложении спектров за разные даты. Для таких пульсаров высота гармоники в суммарном спектре мощности должна расти как корень квадратный из количества сложенных сессий.

Как показано в работе [18], для части наблюдательных сессий качество шумовой дорожки настолько низкое, что эти дни удаляются из обработки. Для оставшихся сессий шумовая дорожка день ото дня может меняться, что связано с погодными условиями, физическим состоянием антенны и другими причинами. Эти факторы могут ухудшать конечное отношение СШ в суммированном спектре мощности на 20–30%.

Таким образом, система оценок плотностей потока в настоящей работе завязана на оценку флуктуационной чувствительности БСА ФИАН в

исследуемой площадке. Наша оценка $\sigma_n = 0.34$ Ян получена в предположении времени опроса точки 12.5 мс, полосы приема 2.5 МГц, эффективной площади антенны в направлении на зенит 45000 кв. м., температуры системы 1000 К и одной принимаемой поляризации.

Окончательно оценка пиковой плотности потока в среднем профиле оценивается в единицах СШ, с учетом количества сложенных импульсов и с учетом поправок за особенности антенны. Интегральная плотность потока в одиночной сессии оценивается суммированием всех точек среднего профиля после вычитания базовой линии. Предполагается, что высота первой гармоники спектра мощности в сеансе наблюдений однозначно отражает высоту среднего профиля в этом же сеансе. Предполагается, что СШ первой гармоники в суммированном спектре мощности с учетом всех потерь, описанных выше, связана с СШ гармоники в одиночной сессии.

Пульсары — это объекты с переменной плотностью потока. Существуют дни, когда наблюдаемая плотность потока пульсара может быть вы-

ше средней. Средние профили на рис. 2 построены именно по таким “лучшим” дням, выбранным из 2000 наблюдательных сессий. Поэтому извлекаемые оценки плотности потока для отдельных сессий должны быть завышенными по сравнению со средними потоками S_p и S_i .

Для суммированных спектров мощности и спектров мощности в отдельных сессиях была оценена высота первой гармоники в единицах СШ (колонка 9 в табл. 1). После суммирования СШ возрастает в сравнении с одной сессией. По нашим оценкам СШ гармоник в суммированных спектрах мощности за 5.5 лет вырос в 36 раз (подробности в работе [18]). Типичный (средний) СШ в спектре мощности в одной наблюдательной сессии для слабейшего из подтвержденных пульсаров (J0349+2340), должен быть $20/36 = 0.56$. Таким же образом можно сделать оценки для всех пульсаров. Мы можем связать величину СШ в суммированном спектре с величиной СШ в одиночной наблюдательной сессии. Ниже мы выразили оценки пиковой (S_p) и интегральной (S_i) плотностей потока в условных формулах:

$$\begin{aligned} S_{p_одна_сессия} &= \sigma_n \times [\text{СШ}_{\text{пиковый_из_среднего_профиля_в_одной_сессии}} / N^{1/2}] \times k, \\ S_{i_одна_сессия} &= \sigma_n \times [\text{СШ}_{\text{интегральный_из_среднего_профиля_в_одной_сессии}} / N^{1/2}] \times k, \\ S_{p_сумма_всех_сессий} &= S_{p_одна_сессия} \times [(\text{СШ}_{\text{перв. гарм. суммы спектров}} / 36) / \text{СШ}_{\text{перв. гарм. одна сессия}}], \\ S_{i_сумма_всех_сессий} &= S_{i_одна_сессия} \times [(\text{СШ}_{\text{перв. гарм. суммы спектров}} / 36) / \text{СШ}_{\text{перв. гарм. одна сессия}}], \end{aligned}$$

где N — это число периодов в одной сессии для данного пульсара, а k — это его антенные поправки.

В табл. 2 даны оценки плотности потока пульсаров. В первой колонке приведено название пульсара. В колонках 2 и 3 показаны пиковые плотности потока для наблюдений в одной сессии (S_{p1}) и при усреднении за весь срок (S_{p1_av}). В колонках 4 и 5 показаны интегральные плотности потока для наблюдений в одной сессии (S_{i1}) и при усреднении (S_{i1_av}). В колонках 6 и 7 приведены оценка плотности потока из работ других ав-

торов (S_{i2}), ссылка на оригинальную работу и частота (ν в МГц), на которой была получена оценка. В колонке 8 дана ожидаемая интегральная плотность потока (S_{i3}) на частоте 111 МГц, пересчитанная из S_{i2} в предположении, что спектральный индекс равен 1.7. Интегральные плотности потоков до пересчета брались из двух работ, где приведены наблюдения пульсаров на LOFAR. Для пульсаров J0301+35 и J0342+27 верхние оценки пиковой (S_{p1_av}) и интегральной (S_{i1} , S_{i1_av}) плотностей потока даны в предположении, что

Таблица 2. Интегральные и пиковые плотности потока известных пульсаров

Name	S_{p1}	S_{p1_av}	S_{i1}	S_{i1_av}	S_{i2}	ν	S_{i3}
0301+35	<96	<2.7	<2	<0.06	—	—	—
0302+2252	1636	122	54	4.0	20 [17]	129	26
0323+3944	10584	2517	168	40	109.6 [3]	135	153
0342+27	<150	<4.2	<8	<0.24	—	—	—
0349+2340	500	10.0	27	0.5	3 [17]	129	3.9
0355+28	250	25	15	1.5	4.5 [3]	135	6.3
0358+4155	1400	930	152	101	21.9 [3]	135	31

ширина профиля импульса на частоте 111 МГц такая же, как и на профилях в работе с обнаружением этих пульсаров [12].

Верхние оценки плотности потока пульсаров J0301+35 и J0342+27 — это консервативные оценки, полученные из пиков, наблюдаемых в шумах средних профилей этих пульсаров. Реальные плотности потока, по-видимому, в 1.5 и более раз меньше, если эти пульсары действительно имеют излучение на частоте 111 МГц.

Оценки плотностей потока в табл. 2 показывают, что для всех пульсаров интегральные плотности потока, оцененные по дням с наблюдаемыми максимальными СШ в среднем профиле и спектре мощности, превышают ожидаемые значения интегральной плотности потока по наблюдениям LOFAR. Оценки средней интегральной плотности потока могут служить нижней оценкой интегральной плотности потока. Для всех пульсаров, за исключением J0358+4155, нижние оценки интегральной плотности потока от 4 до 8 раз меньше, чем ожидаемые плотности потока, полученные по оценке LOFAR. Для J0358+4155 оценки интегральной плотности потока в разы выше ожидаемых оценок. То есть, предложенным методом оценки плотности потока можно пользоваться, если нет другого надежного способа получить оценку потока.

4. КАНДИДАТЫ В НОВЫЕ ПУЛЬСАРЫ И ИХ ПРОВЕРКА

В работах [4], 2020 был выработан набор критериев, которым должен удовлетворять новый пульсар, найденный при суммировании спектров мощности: высота гармоники в спектре мощности СШ $> 6-7$; в спектре наблюдаются хотя бы две гармоники; есть несколько независимых индивидуальных записей, по которым строится средний профиль; пульсар обнаруживается в одном или в двух соседних лучах антенны; высота импульса в среднем профиле имеет ясно выраженную зависимость от проверяемой DM .

В работе [6] было показано, что для самых слабых пульсаров зачастую нет ни одной записи, по которой можно получить средний профиль пульсара. При этом сами пульсары, известные по наблюдениям на других телескопах, в суммированных спектрах мощности определяются надежно.

Мы провели поиск пульсаров в выбранной нами площадке: $3^h < \alpha < 4^h$ и $+21^\circ < \delta < +42^\circ$. Кандидатов, имеющих две гармоники в спектре мощности или высоту первой гармоники СШ ≥ 7 не обнаружено. Обнаружены два кандидата в пульсары, имеющие одну гармонику в спектре мощности $6 < \text{СШ} < 7$. Периоды этих кандидатов $1.6 \text{ с} < P < 2.5 \text{ с}$ близки к области, где наблюдаются низкочастотные шумы в спектрах мощности

($P > 3-4 \text{ с}$, [6]). Подтверждаются и другие признаки пульсара: обнаружение кандидата лишь в одном луче БСА ФИАН и ясно выраженная зависимость высоты первой гармоники от проверяемой DM .

Период наблюдаемой гармоники на карте P/DM близок к области, где регулярно наблюдаются помехи, вызванные плохим вычитанием базовой линии, и это призывает к дополнительной проверке кандидатов. Вообще говоря, проблема удаления низкочастотного шума из спектров мощности — это общая проблема, возникающая при поиске пульсаров, независимо от характеристик проводимого обзора, центральной частоты поиска, числа частотных каналов, времени опроса точки сырых данных и др. (см., например, параграф 6.1.3.3. в справочнике по пульсарной астрономии [19]). Появление низкочастотных шумов связано с тем, что принимаемый шум имеет низкочастотные составляющие, которые связаны с фоном Галактики и помехами, которые не удается убрать полностью. Для радиотелескопа БСА ФИАН проблема появления низкочастотного шума в спектрах мощности усугубляется тем, что телескоп имеет высокую флуктуационную чувствительность и низкое угловое разрешение, равное примерно $0.5^\circ \times 1^\circ$. Поэтому в записях, помимо всего прочего, наблюдаются одновременно эффекты путаницы протяженных (имеющих угловые размеры $\theta > 1''$) и компактных (мерцающих) радиоисточников (с угловыми размерами $\theta < 1''$). Помимо этого, свой вклад в уровень низкочастотных шумов вносят ионосферные мерцания, имеющие характерные временные масштабы от нескольких до нескольких десятков секунд [20]. Вычитание фона Галактики из сырых данных с учетом двух эффектов путаницы и разного рода помех приводит к появлению низкочастотного шума, лежащего, в основном, на частотах, соответствующих периодам больше, чем $3-4 \text{ с}$ [6].

Найденные нами кандидаты имеют периоды меньше, чем 3 с , но у них наблюдается лишь одна гармоника, а в месте расположения второй гармоники в суммированных спектрах мощности нет сигналов, имеющих СШ > 3 . Одна гармоника в спектре мощности может наблюдаться у соосных ротаторов, либо у пульсаров, имеющих настолько большую меру дисперсии, что импульсы пульсара размазываются на весь период из-за дисперсионного сглаживания в частотных каналах или из-за рассеяния импульсов. Предварительная оценка меры дисперсии кандидатов (у одного $DM \sim 80 \text{ пс/см}^3$, а у второго $DM \sim 30 \text{ пс/см}^3$) показывает, что дисперсионное сглаживание и рассеяние незначительно уширяют импульсы.

Пульсаров соосных ротаторов мало. Например, если в каталоге ATNF вывести в таблицу период и полуширину среднего профиля, то на

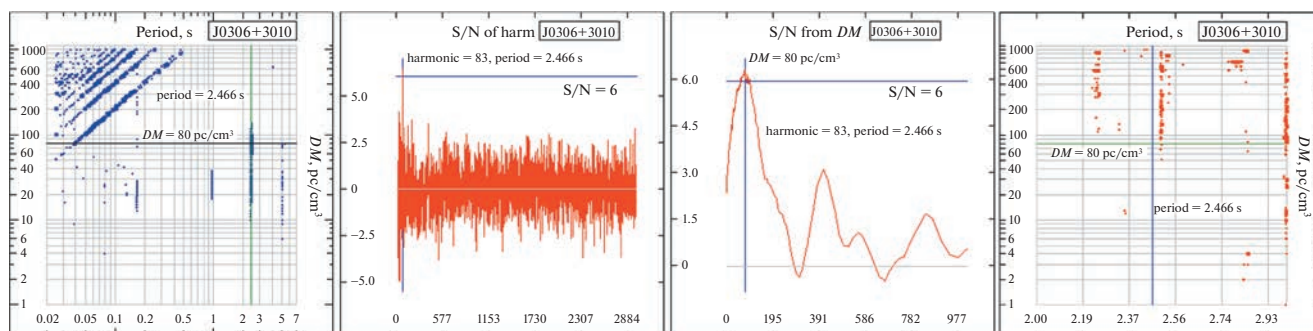


Рис. 3. Кандидат в пульсары J0306+3010 ($DM = 80$ пс/см³, $P = 2.466$ с). Первые три рисунка: FFT-карта P/DM , суммарный спектр мощности для $DM = 80$ пс/см³, и зависимость СШ (S/N) от DM для $P = 2.466$ с. На карте показаны гармоники с $S/N \geq 4$, остальное — аналогично рис. 1. Крайний правый рисунок — это FFA-карта P/DM (карта суммированных периодограмм). Пересечение вертикальной (период) и горизонтальной (мера дисперсии) линий показывает место на карте, где мы ожидали появление найденного на FFT-карте кандидата в пульсар. Все рисунки сгенерированы программой обработки.

выходе можно получить рисунок, который показывает, что типичная полуширина импульса составляет несколько процентов от периода, тогда как для коаксиальных ротаторов это соотношение должно быть близко к 50%. Из примерно 1500 пульсаров с измеренной полушириной импульса, возможных соосных ротаторов порядка десяти. Поэтому нет оснований предполагать, что найденные нами кандидаты являются соосными ротаторами. Нужны дополнительные доказательства, подтверждающие, что найдены новые пульсары.

Появление гармоники может быть вызвано низкочастотными шумами, присущими спектрам мощности, полученным с помощью FFT. Однако поиск можно проводить и с помощью периодограмм (Fast Folding Algorithm — FFA), шумы у которых в области больших периодов низки, а чувствительность выше, чем при поиске с помощью FFT [21]. Мы провели поиск для кандидатов с помощью периодограмм, но подтвердить, что кандидаты являются пульсарами, не удалось. Для иллюстрации приводим рис. 3, показывающий найденного нами кандидата в пульсары на FFT-картах и отсутствие этого кандидата в FFA картах.

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [6] отмечено, что 14% известных пульсаров (13 из 95), имеющих $DM < 100$ пс/см³, не обнаружены в наблюдениях на БСА ФИАН в ходе поиска. В параграфе “Обнаружение известных пульсаров” было показано, что два из семи известных пульсаров не были обнаружены (28%), несмотря на высокую чувствительность, которая реализуется при суммировании спектров мощности (см. табл. 2). Подобное “не обнаружение” из-

вестных пульсаров отмечается и в других обзорах [22, 23]. Специального рассмотрения причин, почему при проведении поисковых работ могут быть не видны известные пульсары, авторами оригинальных работ не делается. Наиболее вероятными причинами не обнаружения может быть завал в спектре или особенности излучения.

Граница чувствительности обзора АО327 [12] согласно рис. 4 работы [6] примерно равна 2.5 мЯн, что соответствует СШ = 6 на частоте 111 МГц. Учитывая, что обзор АО327 был сделан на частоте 327 МГц и предполагая, что пульсар не обнаружен из-за завала спектра, начавшегося на частоте 327 МГц, спектральный индекс должен быть равен 3 ($S \sim \nu^{-\alpha}$). Так как пульсары J0301+35 и J0342+27 обнаружены в обзоре [12] на СШ $\sim 10-20$, их спектральный индекс в области завала спектра должен быть даже больше 3.

Поиск проводился при помощи суммированных спектров мощности. Если в метровом диапазоне наблюдается большое количество нулингов или есть длительные периоды выключения излучения пульсара, накопление сигнала будет неэффективным [19]. Похожая ситуация может сложиться в случае сильной переменности излучения пульсаров.

Всего в площадке обнаружено пять известных пульсаров. Эти пульсары находятся на расстояниях от 1 до 3.7 кпс и имеют меры дисперсии от 18.9 до 62.9 пс/см³. Как показано в колонке 5 табл. 1, найденные пульсары могут быть обнаружены с расстояний, которые в 2–3 раза и более превышают расстояния, на которых они реально находятся. Дадим оценки максимально возможных мер дисперсии (до края гало) в направлении этих пульсаров согласно модели YMW2016 [24]: J0302+2252 (50 пс/см³), J0323+3944 (118 пс/см³),

J0349+2340 (77 пс/см³), J0355+28 (97 пс/см³), J0358+4155 (175 пс/см³). Для гипотетических пульсаров, находящихся в направлении J0323+3944 и J0358+4155, чувствительности наблюдений достаточно для их обнаружения до края гало с учетом возрастающей меры дисперсии. Если возможные новые пульсары имеют такое же распределение на небе и такие же свойства (меры дисперсии, периоды), как у известных пульсаров в исследованной площадке, то в проведенном обзоре мы должны были бы открыть на каждый известный пульсар по 10–20 новых (объем растет как куб расстояния, поэтому увеличение расстояния, на котором виден пульсар, в 2 раза приводит к увеличению объема в $2^3 = 8$ раз).

Согласно работе [6] чувствительность при обработке данных обзора, записанных в 32-канальном режиме при ежедневных наблюдениях в течение 5.5 лет, может достигать 0.1 мЯн для интегральной плотности потока. С учетом особенностей диаграммы направленности и расстояния между лучами БСА полнота обзора для секундных пульсаров в работе [6] оценивается как 0.5 мЯн. В проведенном поиске новые пульсары не обнаружены, и это означает, что в исследованной площадке они исчерпаны до уровня по крайней мере 0.5 мЯн на частоте 111 МГц.

Как уже упоминалось во Введении, максимум распределения функции светимости смещается в область все более низких светимостей при увеличении чувствительности поиска [2]. Исследованная нами площадка мала, чтобы делать строгие статистические выводы, но отсутствие обнаружений новых пульсаров говорит, по-видимому, что мы приблизились к нижней границе светимости секундных пульсаров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен поиск пульсаров с периодами от 0.025 с и мерами дисперсии до 1000 пс/см³ по данным, имеющим высокое частотно-временное разрешение. Достигнутая чувствительность в обзоре была в 5–10 раз выше, чем у всех проводимых ранее обзоров. Предельно слабые пульсары в обзоре могут обнаруживаться до плотностей потока 0.1 мЯн, а полнота обзора гарантируется на уровне 0.5 мЯн на частоте 111 МГц. Обзор проводился в направлении, близком к направлению на антицентр, в площадке $3^h < \alpha < 4^h$ и $+21^\circ < \delta < +42^\circ$. Новые пульсары не обнаружены, что говорит об их исчерпании в объеме, который в 10–20 раз превышает ранее покрываемые объемы в Галактике.

Были обнаружены пять известных секундных пульсаров, находящихся в исследованной площадке. Для пульсара J0349+2340 — это первое не-

зависимое подтверждение. Три из пяти пульсаров ранее на БСА не детектировались. Получены средние профили пульсаров.

Даны оценки пиковой и интегральной плотностей потоков детектированных пульсаров. Они получены с помощью специально разработанного способа, использующего оценку высоты гармоник в суммированном спектре мощности и в спектрах мощности, извлекаемых в отдельных сессиях.

Два известных пульсара не были обнаружены в ходе поиска. Вероятнее всего это пульсары с нуллинами или с длительными выключениями излучения (intermittent pulsars).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs*, *Astron. J.* **129**, 1993 (2005).
2. *J. L. Han, Chen Wang, P. F. Wang, et al.*, *Research in Astronomy and Astrophysics* **21**, 107 (2021).
3. *S. Sanidas, S. Cooper, C. G. Bassa, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **626**, A104 (2019).
4. *S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, et al.*, *Astronomy Reports* **61**, 848 (2017).
5. *S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, and V. M. Malofeev*, *Astron. and Astrophys.* **618**, A70 (2018b).
6. *S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, and G. E. Tyul'basheva*, arXiv:2203.15540 (2022).
7. *M. A. McLaughlin, A. G. Lyne, D. R. Lorimer, et al.*, *Nature* **439**, 817 (2006).
8. *N. Hurley-Walker, X. Zhang, A. Bahramian, et al.*, *Nature* **601**, 526 (2022).
9. *M. Caleb, I. Heywood, K. Rajwade, et al.*, *Nature Astronomy* **6**, 828 (2022).
10. *V. I. Shishov, I. V. Chashei, V. V. Oreshko, et al.*, *Astronomy Reports* **60**, 1067 (2016).
11. *S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. V. Oreshko, and S. V. Logvinenko*, *Astronomy Reports* **60**, 220 (2016).
12. *J. S. Deneva, K. Stovall, M. A. McLaughlin, et al.*, *Astrophys. J.* **821**, 10 (2016).
13. *M. Damashek, J. H. Taylor, and R. A. Hulse*, *Astrophys. J.* **225**, L31 (1978).
14. *A. E. McEwen, R. Spiewak, J. K. Swiggum, et al.*, *Astrophys. J.* **892**(2), 76 (2020).
15. *K. Stovall, R. S. Lynch, S. M. Ransom, et al.*, *Astrophys. J.* **791**, 67 (2014).
16. *A. J. Turtle and J. E. Baldwin*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **124**, 459 (1962).

17. *D. Michilli, C. Bassa, S. Cooper, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **491**(1), 725 (2020).
18. *S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, V. S. Tyul'bashev, et al.*, Astronomy Reports, **64**, 526 (2020).
19. *D. R. Lorimer and M. Kramer*, *Handbook of Pulsar Astronomy* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012).
20. *I. V. Chashei, S. A. Tyul'bashev, V. I. Shishov, et al.*, Space Weather **14**, 682 (2016).
21. *V. Morello, E. D. Barr, B. W. Stappers, E. F. Keane, and A. G. Lyne*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **497**, 4654 (2020).
22. *R. N. Manchester, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **279**, 1235 (1996).
23. *J. S. Deneva, K. Stovall, M. A. McLaughlin, S. D. Bates, P. C. C. Freire, J. G. Martinez, F. Jenet, and M. Bagchi*, Astrophys. J. **775**, 51 (2013).
24. *J. M. Yao, R. N. Manchester, and N. Wang*, Astrophys. J. **835**, 29 (2017).