

ПОИСК ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ У ПЯТИ ГАММА-ПУЛЬСАРОВ НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2021 г. С. А. Тюльбашев^{1, *}, М. А. Китаева¹, Г. Э. Тюльбашева²

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

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

*E-mail: serg@prao.ru

Поступила в редакцию 08.06.2021 г.

После доработки 25.06.2021 г.

Принята к публикации 25.06.2021 г.

Проведен поиск пульсарного (периодического) излучения пяти гамма-пульсаров с использованием суммированных спектров мощности и суммированных периодограмм. Гармоник, соответствующих известным периодам пульсаров, не обнаружено. Получена верхняя оценка интегральной плотности потока пульсаров J0357+3205 (<0.5 мЯн), J0554+3107 (<0.5 мЯн), J1958+2846 (<0.5 мЯн), J2021+4026 (<0.4 мЯн), J2055+2539 (<0.55 мЯн).

Ключевые слова: гамма-пульсар, радиоизлучение

DOI: 10.31857/S0004629921100418

1. ВВЕДЕНИЕ

За 74 года, прошедших с момента обнаружения первого пульсара [1], открыто почти 3000 пульсаров (<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>). Подавляющая часть этих источников обнаружена в радиодиапазоне. В 1970 г. была опубликована работа, говорящая о вероятном обнаружении пульсирующего гамма-излучения в молодом пульсаре, находящемся в Крабовидной туманности [2].

Вплоть до 2008 г. гамма-излучение обнаруживали у пульсаров, которые первоначально были найдены в других диапазонах. В 2009 г. появились первые работы с наблюдениями выборок гамма-источников на орбитальном телескопе Fermi [3]. Оказалось, что многие из ранее открытых гамма-источников являются гамма-пульсарами. У подавляющей части этих пульсаров излучение в радиодиапазоне не обнаружено. Для таких пульсаров принято использовать термин “радиоспокойные пульсары”. Предполагается, что они имеют тепловой механизм излучения, в отличие от радиопульсаров, излучение которых связано с движением электронов в сильных электрических и магнитных полях.

Для нескольких гамма-пульсаров, считавшихся радиоспокойными, обнаружено излучение в радиодиапазоне на длинах волн от сантиметров до декаметров [4–8]. В частности, в работе [8] поиск периодического излучения пульсара

J0357+3205 проводился в ежедневных наблюдениях на интервале 5 лет, и пульсар был обнаружен в отдельных сессиях всего один раз. Возможно, что светимость гамма-пульсаров в радиодиапазоне очень низка, и чувствительности современных радиотелескопов недостаточно для их регулярно обнаружения.

В настоящей работе сделана попытка обнаружить слабое периодическое радиоизлучение нескольких гамма-пульсаров в наблюдениях на радиотелескопе Большая синфазная антенна (БСА) Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Мониторинговые наблюдения на радиотелескопе идут круглосуточно уже шесть лет. В направлении каждого луча БСА накоплено примерно пять суток наблюдений. Для увеличения чувствительности наблюдений используются суммирование спектров мощности и суммирование периодограмм, а для обнаружения периодического излучения используется новое представление визуализации обработанных данных.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ

После реконструкции БСА ФИАН, закончившейся в 2012 г., ее эффективная площадь возросла в 2–3 раза и примерно равна 45 000–50 000 кв.м. в направлении на зенит. Центральная частота наблюдений 110.3 МГц, а полная полоса наблюдений – 2.5 МГц. На основе антенного поля, со-

стоящего из 16384 диполей, создано несколько независимых радиотелескопов. Один из них используется для круглосуточных мониторинговых наблюдений. У этого радиотелескопа сформировано 128 неуправляемых лучей, которые перекрывают в плоскости меридиана склонения от -9° до $+55^\circ$. До конца 2020 г. наблюдения шли в 96 пространственных лучах, перекрывающих склонения от -9° до $+42^\circ$. С начала 2021 г. в тестовом режиме добавилось еще 24 пространственных луча, и сейчас проводятся мониторинговые наблюдения для склонений до $+52^\circ$.

Количество лучей, обслуживаемых одним регистратором, связано с его возможностями по оцифровке потока данных на входе. Один регистратор используется для 48 лучей, и общий входной поток данных составляет примерно 12 гигабит в секунду. Формируемая регистратором частота опроса и количество частотных каналов связаны с физическими возможностями оперативной памяти используемого промышленного компьютера и скоростью записи информации на жесткий диск. В мониторинговых наблюдениях используется режим, когда полоса разбита на 32 частотных канала с шириной 78 кГц, а запись ведется с частотой опроса 12.5 мс. Даже для наблюдений секундных пульсаров этот режим не оптимален. В метровом диапазоне длин волн для большей части известных пульсарных задач предпочтительно иметь частотные каналы шириной 5–20 кГц и частоту опроса 1–3 мсек. Однако в используемом неоптимальном режиме за год в 96 лучах записывается 35 терабайт данных. В оптимальном режиме нужно было бы записывать до 6 петабайт в год, что превосходит возможности обсерватории по хранению данных.

Более подробно о реконструкции меридианного радиотелескопа БСА ФИАН и об идущих на нем мониторинговых научных программах можно посмотреть в работах [9, 10]. Дополнительные детали о регистраторе можно найти в работах [10, 11].

Как известно, чувствительность наблюдений на радиотелескопе определяется температурой системы, эффективной площадью антенны, приемной полосой, частотой опроса и временем наблюдений. Для БСА ФИАН время наблюдений в одном сеансе определяется временем прохождения исследуемого источника через меридиан и составляет на экваторе примерно 3.5 мин по половинной мощности. Согласно работе [10] средняя чувствительность в зените для наблюдений секундных пульсаров вне плоскости Галактики составляет 6–8 мЯн, а в плоскости Галактики 15–20 мЯн. Наилучшая и наихудшая чувствительность может отличаться от этих значений примерно в 1.5 раза из-за того, что координаты источников не совпадают с координатами лучей, и поэтому в луче наблюдается не полный поток, а лишь

его часть. Есть и другие поправки, учитывающие особенности антенной решетки БСА ФИАН.

Увеличить чувствительность можно за счет увеличения времени наблюдений. Например, если период и производная периода пульсара известны с высокой точностью, то можно суммировать импульсы пульсара, наблюдаемые в разные дни, месяцы и годы. К сожалению, хотя регистраторы на мониторинговых наблюдениях запускаются по атомному стандарту частоты, после запуска время отсчитывается кварцевым генератором, который на интервале времени один час дает возможную ошибку по времени ± 25 мс. Попытки реализовать сложение импульсов пульсаров в фазе на больших интервалах времени остаются пока безуспешными.

В работах [12, 13] по поиску секундных пульсаров на БСА ФИАН предложено увеличить чувствительность наблюдений за счет некогерентного сложения спектров мощности. В спектре мощности теряется информация о фазе импульса, но месторасположение гармоник в спектре для данного пульсара одно и то же, независимо от дня наблюдений. Если подходить строго, то, конечно же, период пульсара изменяется со временем, но так как точность периода, определяемого по спектру мощности в 3.5-минутной записи, не лучше единицы в третьем знаке после запятой, то мы не почувствуем изменений периода пульсара на интервалах сотни лет. Гармоники пульсаров всегда будут попадать на одни и те же номера точек в спектре мощности. Получая спектры мощности за разные дни наблюдений и складывая их, можно увеличить отношение сигнала к шуму (СШ) гармоник, наблюдаемых в спектре. Чувствительность должна расти как корень квадратный из количества сложенных спектров, если исходный шум был белым, а антенное усиление оставалось неизменным на всем интервале наблюдений. Однако день ото дня чувствительность может немного меняться из-за разного физического состояния антенны и погодных условий. Заметим также, что не все помехи можно удалить при обработке. По этим причинам реальная чувствительность растет в меньшей степени, чем ожидается. Для вычисления оценки роста реальной чувствительности в суммированных спектрах мощности мы получаем независимые оценки величины исходных шумов и увеличения чувствительности для каждого направления на небе (дтали в работе [13]).

Как известно, поиск пульсаров можно проводить и с помощью периодограмм. Согласно работам [14–16] чувствительность при поиске с помощью периодограмм может быть выше, чем при поиске с помощью спектров мощности. В программе обработки мониторинговых данных БСА

ФИАН реализованы оба метода поиска периодического излучения.

Существуют общие стандарты поиска новых пульсаров. В поисковых программах сначала строятся спектры мощности или периодограммы, при переборе возможных мер дисперсии (DM) ищутся гармоники, уровень СШ которых больше заданного значения. По разным критериям отсеиваются ложные источники, а оставшиеся кандидаты просматриваются визуально. Для визуального просмотра создаются картинки, на которых показывается получаемый средний профиль, динамический спектр, зависимость пиковой плотности потока в единицах СШ от DM . Для источников, которые прошли визуальную проверку, проводятся дополнительные наблюдения, и, по возможности, уточняются их период и производная периода.

Такая схема обработки наблюдений будет адекватно работающей, если наблюдаются источники, плотность потока которых такова, что они видны в одном сеансе наблюдений. Как показано в работе [13], при поиске очень слабых пульсаров возникают ситуации, когда в суммированных спектрах мощности наблюдаются гармоники с $СШ > 7$, в том числе и для пульсаров, обнаруженных в наблюдениях на других телескопах, но нет ни одной сессии, когда мы можем получить средний профиль пульсара.

Для поиска пульсаров, у которых не обнаруживается излучение в отдельных сеансах, создана новая программа обработки и визуализации обработанных данных. В качестве входных параметров используются прямое восхождение и склонение пульсаров по каталогу на 2000 г. Программа пересчитывает координаты на данный день и оценивает качество шумовой дорожки в месте расположения пульсара. Если качество шумовой дорожки низкое, то данный день не участвует в дальнейшей работе. Если качество наблюдений хорошее, то вырезается кусок записи длиной 16 384 точки (примерно 204.8 с) и строятся спектры мощности при переборе мер дисперсии от 0 до 1000 пс/см³. Производится также дополнительный перебор, учитывающий, что ширина импульса пульсара может быть больше, чем одна точка исходных (сырых) данных. Для этого производится сложение по 2, 4 и так далее точкам в сырых данных, и вновь строятся спектры мощности. Всего таких переборов шесть, и они позволяют получить максимальное соотношение СШ в спектре мощности при предполагаемой ширине импульса от 12.5 мс до 800 мс. Для каждой проверяемой меры дисперсии и для каждого перебора, учитывающего ширину импульса, соответствующие спектры мощности складываются за все дни наблюдений. В каждом суммированном спектре мощности определяется СШ каждой точки и со-

здаются таблицы, в которых запоминаются значения амплитуд гармоник с $СШ > 4$. Эти таблицы используются для визуализации при поиске новых пульсаров.

В центральном окне программы визуализации (рис. 1) можно увидеть карту, где месторасположение кружка по оси абсцисс отражает период пульсара (P), а по оси ординат наблюдаемую меру дисперсии. Размер кружка отражает СШ гармоники в суммированном спектре мощности. Очевидно, что максимальный СШ в гармонике будет наблюдаться у спектра мощности, который считался после сложения частотных каналов с мерой дисперсии пульсара и при усреднении исходных данных, которые соответствуют ширине среднего профиля пульсара. Однако сильный пульсар будет виден и на мерах дисперсии, близких к истинной, и на усреднениях, не совпадающих с шириной импульса пульсара. Поэтому на карте P/DM пульсар должен наблюдаться в виде вертикальных полосок, сужающихся к краям и ограниченных по высоте. Максимальный размер кружка на этой полоске должен быть на истинной мере дисперсии пульсара. Полоски меньшего размера могут появляться на кратных гармониках, соответствующих половине периода, трети периода и так далее.

Карта, сформированная программой визуализации данных, является интерактивной. При щелчке мышью на интересующем кружке можно просмотреть спектр мощности, соответствующий выбранному кружку, построить для выбранной гармоники зависимость СШ от DM . Таким образом, программа позволяет увидеть пульсар на карте P/DM , оценить его меру дисперсии, СШ гармоники и ожидаемую ширину импульса. Некоторые дополнительные детали, касающиеся программы обработки и визуализации, можно посмотреть в работе по поиску слабых пульсаров в мониторинговом обзоре на БСА ФИАН [17]. Аналоги поисковой программы и визуализации обработанных данных сделаны и для поиска с помощью периодограмм. Подпрограмма построения периодограмм взята из работы [16] (<https://github.com/v-morello/riptide>).

На рис. 1 дается пример визуализации при обработке наблюдений известного пульсара J1638+4005 на интервале 3 года для суммированного спектра мощности и на интервале 5.5 лет для суммированных периодограмм. Пульсар J1638+4005, имеющий $P = 0.76772$ с и $DM = 33.4$ пс/см³ [18], был обнаружен в наблюдениях на БСА ФИАН [12] в суммированных спектрах мощности и отмечен в оригинальной работе как слабый пульсар. Приведенный в статье средний профиль пульсара, полученный в одной наблюдательной сессии длительностью 3.5 мин, показывает $СШ = 6$. В работе [18] даны оценки

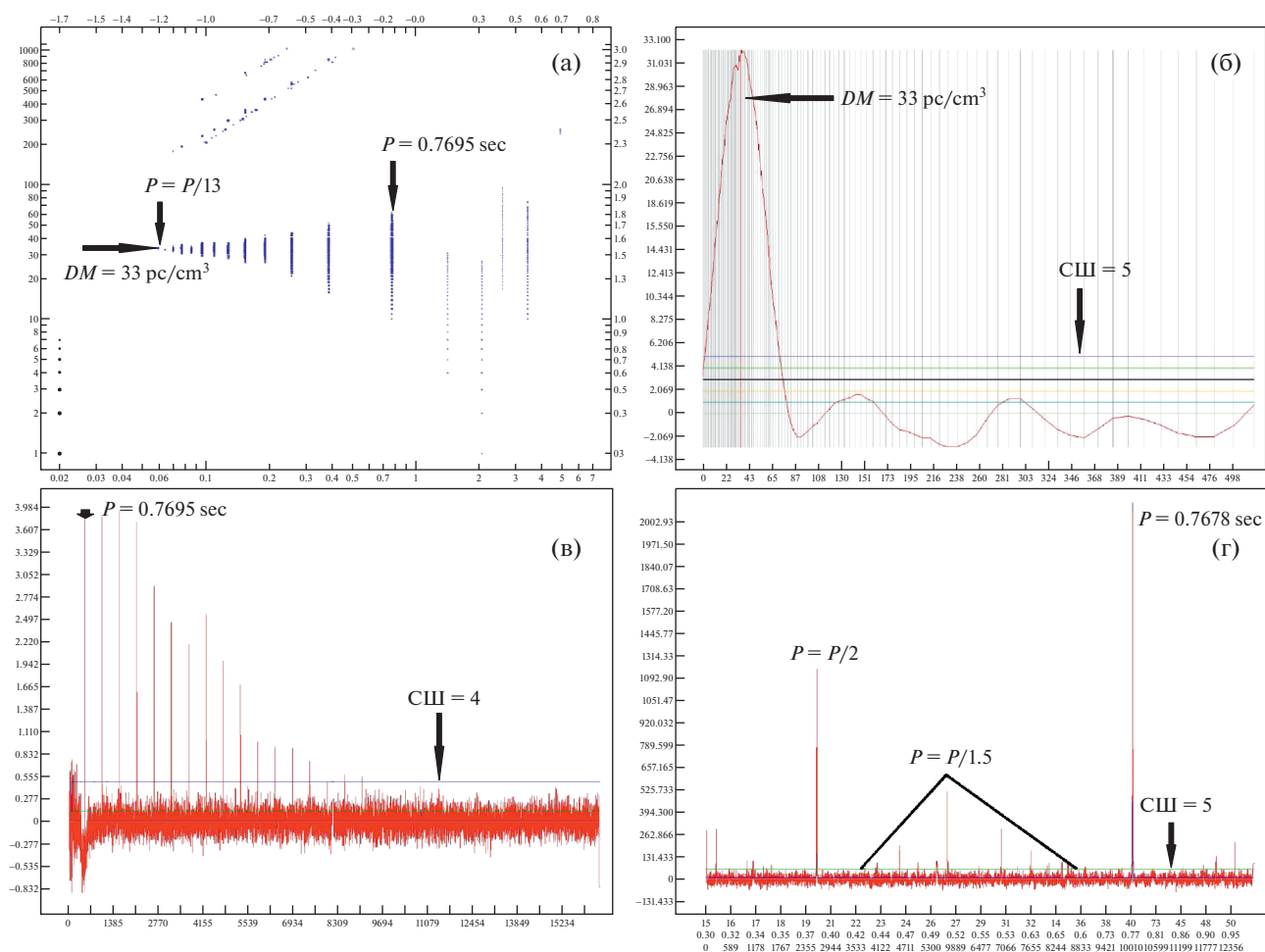


Рис. 1. (а) — фрагмент основного рабочего окна. По оси ОХ время (период) в секундах, по оси ОУ мера дисперсии в pc/cm^3 . Верхняя горизонтальная и правая вертикальная шкалы отражают значения осей ОХ и ОУ в логарифмическом формате. (б) — фрагмент рабочего окна, отражающий зависимость высоты первой гармоники в суммированном спектре мощности в единицах СШ (ось ОУ) от DM (ось ОХ). (в) — спектр мощности, суммированный на интервале 3г. в предположении, что $DM = 33 \text{ pc/cm}^3$. На оси ОХ показаны номера точек в спектре мощности. По оси ОУ отмечена мощность сигнала в условных единицах. (г) — периодограмма, суммированная на интервале 5 лет. По оси ОУ мощность сигнала в условных единицах. По оси ОХ три разные оцифровки. Верхняя показывает параметр “foldbins” [16], средняя оцифровка показывает периоды, нижняя — номера точек в периодограмме. Представленная периодограмма посчитана для $DM = 34 \text{ pc/cm}^3$. Горизонтальные линии на рис. 1б–г отмечают разные уровни СШ, что позволяет ориентироваться при просмотре данных.

интегральной плотности потока этого пульсара по наблюдениям на LOFAR и на 76-метровом телескопе Джодрел-Бенк: 128 МГц ($S = 3.1 \text{ мЯн}$), 167 МГц ($S = 1.7 \text{ мЯн}$), 334 МГц ($S = 0.34 \text{ мЯн}$), 1532 МГц ($S < 0.06 \text{ мЯн}$). Исходя из приведенной в работе оценки спектрального индекса ($\alpha = 2.3$, $S \sim \nu^{-\alpha}$), можно оценить ожидаемую интегральную плотность потока этого пульсара на центральной частоте антенны БСА ФИАН ($S_{110.3 \text{ МГц}} = 5.7 \text{ мЯн}$). Плотность потока 5.7 мЯн очень близка к предельной чувствительности БСА в одной сессии наблюдений [10].

На рис. 1 видно, что у пульсара J1638+4005 наблюдается 13 гармоник с $\text{СШ} \geq 6$. Все сигналы с $\text{СШ} \geq 10$ представлены кружками одинакового размера, и поэтому ширина вертикальных отрезков меняется незначительно. Крайняя правая полоска соответствует периоду 0.7695 с (ось ОХ), и центр полоски соответствует $DM = 33\text{--}34 \text{ pc/cm}^3$ (ось ОУ). В зависимости $\text{СШ}/DM$ для первой наблюдаемой гармоники максимум приходится на $DM = 33\text{--}34 \text{ pc/cm}^3$. Период пульсара, определенный по точке 532 в спектре мощности, равен 0.7695 с. Он не совпадает с каталожным значением периода 0.7677 с. Разница периодов связана с

низким частотным разрешением в спектре мощности. Мы оцениваем точность периода, определяемую по спектру мощности как 0.001 с. При работе с программой визуализации можно выбрать любую точку на спектре мощности и посмотреть, какому периоду соответствует эта точка, а также СШ этой точки. Если сложить высоты всех гармоник, видимых в спектре мощности, то СШ такой суммированной гармоники будет равен примерно 70. Таким образом, пульсар, обнаруживаемый в отдельных сессиях на пределе чувствительности радиотелескопа БСА ФИАН, виден как сильный объект в суммированном спектре мощности. Очевидно также, что если бы данный пульсар имел чуть меньшую плотность потока, то он бы не обнаруживался в отдельных сессиях наблюдений на БСА, но был бы легко обнаружен поисковой программой, даже если бы он был слабее в 10 раз, и его ожидаемая интегральная плотность потока была бы примерно 0.5 мЯн.

Согласно отмеченным выше работам [14–16], периодограммы позволяют обнаруживать более слабые пульсары, чем пульсары, обнаруживаемые по спектрам мощности. Это особенно заметно для пульсаров, у которых импульсы очень узкие по отношению к периоду пульсара. Выигрыш при использовании периодограмм есть также при поиске пульсаров с большими периодами. Известно, что в спектрах мощности наблюдается низкочастотный шум, который сложно вычистить. Пример такого плохо вычтенного шума в начале записи виден на рис. 1в. Периодограмма на рис. 1г получена по суммированию 5 лет наблюдений (примерно 1800 наблюдательных сессий по 3.5 мин каждая). Максимумы, отмеченные стрелками на периодограмме, соответствуют периоду пульсара $P = 0.7678$ с и кратным периодам. Треугольником показаны характерные структуры, появляющиеся для сильных пульсаров при использовании периодограмм. Пик, отмеченный на рисунке, имеет СШ = 183. Исходя из того, что пульсар J1638+4005 обнаруживался ранее на СШ = 6 [12], а его ожидаемая интегральная плотность потока 5.7 мЯн (см. выше в этом параграфе), можем пересчитать минимально обнаружимый сигнал в суммированной периодограмме и дать экспериментальную оценку интегральной плотности потока предельно слабых пульсаров $S = 5.7/(183/6) = 0.19$ мЯн. Эта оценка близка к теоретической оценке плотности потока предельно слабых для обнаружения пульсаров, наблюдаемых в зените точно по центру луча, $S = 5/(1800)^{1/2} = 0.12$ мЯн. С учетом типичной потери чувствительности в 1.5–2 раза от теоретических значений из-за погодных условий, отсутствия наблюдений из-за регламентных работ на антенне, поправок за особенности антенной решетки, имеющей фиксированное направление

лучей на небе, и других причин [13] полученные оценки хорошо согласуются. Таким образом, программа поиска периодических сигналов с помощью суммированных спектров мощности и суммированных периодограмм может с высокой степенью надежности обнаруживать пульсары, у которых нельзя построить средний профиль по наблюдениям в одной сессии на БСА ФИАН.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поиск регулярного излучения проводился для пяти гамма-пульсаров, попавших в мониторинговую площадку. Пульсары J0357+3205, J0554+3107, J1958+2846, J2021+4026, J2055+2539 были обнаружены в наблюдениях на спутнике Ферми [3, 20, 21]. Радиоизлучение детектировано только у пульсара J0357+3205 в наблюдениях FAST/Arecibo [7] и на БСА ФИАН [8]. Наблюдения FAST/Arecibo опубликованы в презентации, представленной на конференции, и подробности обнаружения периодического сигнала практически отсутствуют. В поиске радиоизлучения на БСА ФИАН пульсар был обнаружен один раз за 1700 наблюдательных сессий на СШ > 7. Плотность потока в наблюдениях FAST/Arecibo на частоте 1250 МГц составляет 0.04 мЯн, а на частоте 110.3 МГц — 14 мЯн. Поиск периодического излучения в мониторинговых данных БСА ФИАН проводился в суммированных спектрах мощности и в суммированных периодограммах в наблюдениях на интервале 5.5 лет. Сгущений точек, т.е. точек, расположенных вдоль линии на известных периодах пульсаров и относящихся к близким мерам дисперсии, не обнаружено ни для одного пульсара. На поисковых картах, в отличие от представленной на рис. 1а, показаны сигналы с СШ > 4. Поэтому, даже если бы у исследуемых гамма-пульсаров наблюдались гармоники с СШ = 4–5, то при обнаружении периодического сигнала на каких-то мерах дисперсии должны были бы наблюдаться небольшие вертикальные отрезки. Отсутствие гармоник, соответствующих периодам пульсаров, дает возможность получить верхнюю оценку плотности потока при предположении, что у пульсара в радиодиапазоне есть постоянное, пусть и очень слабое, излучение. Обработка показывает, что ни для одного из пяти исследуемых пульсаров нет никаких признаков периодических сигналов с СШ > 4.

Так как нам известны точные координаты пульсаров, то можно рассчитать их расположение по отношению к неподвижным лучам БСА и сделать поправки, позволяющие получить верхние оценки плотности потока с учетом особенностей антенной решетки.

Рассмотрим обработку наблюдений на примере пульсара J0357+3205. В гамма-диапазоне основной компонент по половинной мощности за-

нимает четверть периода [3], т.е. около 100 мс. В радиодиапазоне на частоте 1250 МГц профиль двухкомпонентный [7]. Исходя из профиля на рисунке один из компонентов широкий, и его полуширина (W_e) примерно равна 90 мс. Второй компонент узкий, имеет сравнимую высоту, и его полуширина примерно равна 35 мс. Расстояние между компонентами равно 165 мс. Ожидаемое расстояние до пульсара, 270–900 пс [19]. По наблюдениям FAST $DM = 47$ пс/см³. В наблюдениях на БСА виден лишь один узкий компонент с $DM = 46$ –48 пс/см³, имеющий СШ = 10 [8]. В среднем профиле в гамма-диапазоне узкий компонент, видимый в радиодиапазоне, тоже угадывается, но его высота существенно меньше, чем у широкого компонента.

Ожидаемое увеличение чувствительности в суммированных спектрах мощности и в суммированных периодограммах пропорционально корню квадратному из числа наблюдательных сессий. За 5.5 лет пульсар должен наблюдаться почти 2000 раз. Однако, как уже упоминалось в предыдущем параграфе, часть наблюдений пропадает из-за сильных помех, есть дни, когда не было наблюдений из-за технических работ на антенне. В оставшиеся дни шумовой фоновый сигнал может изменяться из-за погодных условий. Для получения оценки реального роста СШ в зависимости от количества наблюдательных сессий каждый день оценивалась дисперсия шума на интервале времени, соответствующем прохождению пульсара через меридиан. Все дисперсии шумов выстраивались в порядке их возрастания и нормировались на минимальную дисперсию. Таким образом, минимальная дисперсия оказывалась равной единице, а общая дисперсия равна корню квадратному из суммы квадратов отдельных дисперсий [13]. Изменение отношения СШ зависит от того, сколько складывалось индивидуальных спектров мощности и какие у них были нормированные дисперсии шумов. Для складывания индивидуальных спектров мощности было использовано 1334 сессии. Теоретическое значение роста СШ должно быть $1334^{1/2} = 36.5$ раза, реальный рост СШ из эксперимента равен 32.1 раза.

Никаких выдающихся деталей в месте расположения гармоники J0357+3205 не наблюдается. Отсутствие сигнала в суммированном спектре мощности позволяет дать нам верхнюю оценку интегральной плотности потока пульсара. Так как БСА ФИАН является антенной решеткой с фиксированными по склонениям лучами, сформированными при помощи матрицы Батлера, для оценки плотности потока нужно делать ряд поправок, учитывающих особенности антенны. Эти поправки связаны с тем, что координата пульсара не совпадает с расположением лучей, пульсар наблюдается не в зените, и поэтому эффективная

площадь антенны меньше, чем 45000 кв.м., каждая матрица Батлера формирует по 8 лучей, и у них есть общая огибающая. Для пульсара J0357+3205 эти три поправки дают коэффициент 0.3. То есть для данного пульсара на антенне БСА наблюдается лишь треть от приходящей с неба энергии. Предполагая, что минимальная дисперсия шума определяет “идеальные” наблюдения и исходя из оценки чувствительности 5 мЯн при наблюдениях пульсаров, находящихся вне галактической плоскости, в направлении на зенит [10], можем дать верхнюю оценку плотности потока пульсара: $S_{110.3 \text{ МГц}} < 5/(32.1 \times 0.3) < 0.5$ мЯн. Полученная оценка говорит, что интегральная плотность потока на многолетнем интервале наблюдений меньше 0.5 мЯн, но не может гарантировать, что в течение этого наблюдательного интервала не было периодов короткой вспышечной активности.

Для оставшихся четырех пульсаров был сделан такой же анализ, как и для J0357+3205. Для всех пульсаров также не обнаружено гармоник на известных периодах. Расстояния до пульсаров оценивались разными авторами косвенным образом. Обычно авторы оригинальных работ исходили из предположения, что пульсары молодые и должны находиться недалеко от остатков сверхновых, породивших эти пульсары. Оценочные расстояния до оставшихся гамма-пульсаров: 3.5 кпс (J0554+3107; [21], 9.2 кпс (J1958+2846; [22], 2 кпс (J2021+4026; [23], 0.6 кпс (J2055+2539; [24]. В отличие от пульсара J0357+3205, пульсары J0554+3107, J1958+2846, J2021+4026 и J2055+2539 лежат в плоскости Галактики на галактических широтах, не превышающих 10°. Поэтому при получении верхней оценки плотности потока предполагалось, что в направлении на зенит минимально обнаружимая интегральная плотность потока в однократной сессии наблюдений у этих четырех пульсаров не 5, а 10 мЯн [10].

Сделав для оставшихся пульсаров такую же работу, как и для J0358+3205, мы получили верхние оценки интегральной плотности потока для всех источников выборки. Результаты помещены в табл. 1. В первой колонке этой таблицы — имя пульсара в нотации J2000, во второй — его период, в третьей — ожидаемый выигрыш СШ в накопленных спектрах мощности и периодограммах, в четвертой — перемноженные поправки, учитывающие потерю сигнала. В пятой колонке приведена верхняя оценка интегральной плотности потока пульсара на частоте 110.3 МГц в предположении, что уширение импульса внутри частотного канала из-за меры дисперсии незначительно.

Отсутствие гармоник в усредненных спектрах мощности и на периодограммах может быть связано с несколькими причинами. Во-первых, уровень интегральной плотности потока может быть

Таблица 1. Верхние оценки интегральной плотности потока гамма-пульсаров

Имя	P (с)	Рост СШ	Поправки	S_{int} (мЯн)
J0357+3205	0.44410	32.1	0.30	<0.5
J0554+3107	0.46496	27.5	0.70	<0.5
J1958+2846	0.29040	25.6	0.80	<0.5
J2021+4026	0.26532	34.3	0.70	<0.4
J2055+2539	0.31956	30.4	0.60	<0.55

ниже, чем полученная верхняя оценка. Во-вторых, при получении верхней оценки плотности потока учитывались факторы, связанные с особенностями наблюдений на дифракционной решетке, имеющей фиксированное расположение лучей на небе, а далее чувствительность оценивалась по стандартной формуле радиометрического выигрыша. Если есть какие-то дополнительные неучтенные факторы, понижающие чувствительность при поиске новых пульсаров, то верхняя оценка плотности потока может возрасти. В-третьих, полученные оценки плотности потока потока делались в предположении, что мера дисперсии не вносит дополнительного уширения импульса внутри частотного канала. Исходя из ширины частотного канала легко посчитать, что внутриканальное уширение импульса на $DM = 100$ пс/см³ вдвое ухудшает оценки, приведенные нами в табл. 1. В-четвертых, предполагалось, что длительность импульса <0.1 от периода. Если ширина импульса в радиодиапазоне будет равна половине периода, то верхние оценки плотности потока в табл. 1 изменятся в два раза и составят примерно 1 мЯн для всех пяти пульсаров. В-пятых, если излучение гамма-пульсаров носит в радиодиапазоне вспыхивающий характер, или они имеют сильную переменность, связанную с другими причинами, то может сложиться ситуация, когда интегральная плотность потока, определенная на полном интервале наблюдений, меньше 0.5 мЯн, а на отдельных интервалах времени пульсар все же виден.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, and R. A. Collins, *Nature* **217**, 709 (1968).
2. J. Vasseur, J. Paul, B. Parlier, et al., *Nature* **226**, 534 (1970).
3. A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Science* **325**, 840 (2009).
4. V. M. Malofeev, O. I. Malov, D. A. Teplykh, S. A. Tyul'bashev, and G. E. Tyul'basheva, *Astronomy Reports* **49**, 242 (2005).
5. F. Camilo, P. S. Ray, and S. M. Ransom, *Astrophys. J.* **705**, 1 (2009).
6. Y. Maan and H. A. Aswathappa, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **445**, 3221 (2014).
7. P. Wang, D. Li, W. Zhu, et al., presentation at conference FPS7 (2018).
8. S. A. Tyul'bashev and M. A. Kitaeva, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **46**, 21 (2019).
9. V. I. Shishov, I. V. Chashei, V. V. Oreshko, et al., *Astronomy Reports* **60**, 1067 (2016).
10. S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. V. Oreshko, and S. V. Logvinenko, *Astronomy Reports* **60**, 220 (2016).
11. S. V. Logvinenko, S. A. Tyul'bashev, and V. M. Malofeev, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **47**, 390 (2020).
12. S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, and M. A. Kitaeva et al., *Astronomy Reports* **61**, 848 (2017).
13. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, and G. E. Tyul'basheva, *Astronomy Reports* **64**, 526 (2020).
14. A. D. Cameron, E. D. Barr, D. J. Champion, M. Kramer, and W. W. Zhu, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **468**, 1994 (2017).
15. E. Parent, V. M. Kaspi, S. M. Ransom, et al., *Astrophys. J.* **861**, 44 (2018).
16. V. Morello, E. D. Barr, B. W. Stappers, E. F. Keane, and A. G. Lyne, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **497**, 4654 (2020).
17. S. A. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva, and G. E. Tyul'basheva, submitted (2021).
18. C. M. Tan, C. G. Bassa, S. Cooper, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **492**, 5878 (2020).
19. A. Kirichenko, A. Danilenko, Y. Shibanov, et al., *Astron. and Astrophys.* **564**, A81 (2014).
20. P. M. Saz Parkinson, M. Dormody, M. Ziegler, et al., *Astrophys. J.* **725**, 571 (2010).
21. H. J. Pletsch, L. Guillemot, B. Allen, et al., *Astrophys. J. Lett.* **779**, L11 (2013).
22. J. Aleksić, L. A. Antonelli, P. Antoranz, et al., *Astrophys. J.* **725**, 1629 (2010).
23. C. Y. Hui, K. A. Seo, L. C. C. Lin, et al., *Astrophys. J.* **799**, 76 (2015).
24. R. P. Mignani, V. Testa, N. Rea, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **478**, 332 (2018).