

Статистика обнаружений импульсных сигналов в площадке со склонениями от $+52^\circ$ до $+56^\circ$ на частоте 111 МГц

© В. А. Самодуров^{1,2}, С. А. Тюльбашев², М. О. Торопов³, А. В. Долгушев⁴,
В. В. Орешко², С. В. Логвиненко², Е. А. Исаев²

¹НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

²ПРАО АКЦ ФИАН, г. Пушино, Россия

³ООО ТЭК Информ, г. Москва, Россия

⁴ООО «Яндекс», г. Москва, Россия

Реферат

Поставлена задача по поиску и статистическому анализу импульсных сигналов во время мониторинговой программы обзора неба на радиотелескопе БСА ФИАН. Основная цель работы — поиск пульсаров и других транзиентов в данных радиотелескопа для новой площадки обзора в полосе склонений $+52^\circ < \delta < +56^\circ$.

Отработана методика потоковой обработки получаемых данных. Результаты круглосуточного обзора на многолучевой диаграмме БСА ФИАН были последовательно разделены на отрезки по 10 сек. На каждом временном отрезке для каждого интервала наблюдаемых частот определялись основные характерные параметры данных: среднее медианное значение на выделенном отрезке выбранного интервала частот для определенного луча диаграммы, значения максимума и минимума, а также их расположения на временном отрезке, среднеквадратичное отклонение и некоторые другие параметры. Найденные для каждого отрезка параметры данных привязывались к прямому восхождению и записывались в специальные файлы сжатых данных. После чего проводился их статистический анализ в привязке ко времени наблюдения и небесным координатам. Статистическая обработка данных за несколько месяцев (312 суток), записанных в шести частотных каналах с общей полосой 2.5 МГц показала, что в среднем в каждом из 32 подключенных стационарных лучей наблюдается около 10 импульсов в час. Многие из этих событий взаимосвязаны (проявляют себя сразу в нескольких лучах БСА), и после объединения на один час в среднем обнаруживается 21.4 объединенных события, или примерно одно событие в 3 мин. Всего найдено более 160 тыс. взаимосвязанных событий.

При выделении событий, происходящих только в 1–2 соседних лучах радиотелескопа (таковых найдено более 40 тыс.), найдено, что около 55 % из них порождены пульсарами (показывают признаки дисперсионных задержек, зависящих от частоты регистрации). Для указанной полосы склонений $+52^\circ < \delta < +56^\circ$ рассчитана статистика всех импульсных явлений, имеющих признаки дисперсионных задержек, произведен ее анализ. В рамках проведенной работы найдены импульсы от 4 уже известных пульсаров и определены 4 кандидата в новые пульсары.

Ключевые слова: методика обработки, вращающийся транзиент (RRAT), пульсар, длинноволновое радиоизлучение.

Контакты для связи: Самодуров Владимир Алексеевич (samod@mail.ru).

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

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.66.37-44>

Statistics of Detections of Impulse Signals in the Sky Area with Declinations from $+52^\circ$ to $+56^\circ$ at a Frequency of 111 MHz

V. A. Samodurov^{1,2}, S. A. Tulbashev², M. O. Toropov³, A. V. Dolgushev⁴, V. V. Oreshko²,
S. V. Logvinenko², E. A. Isaev²

¹National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

²Pushchino Radio Astronomy Observatory ASC LPI, Pushchino, Russia

³ООО ТЕК Информ, Moscow, Russia

⁴Yandex Company, Moscow, Russia

Abstract

The task was set to search for and statistically analyze pulse signals during the sky survey monitoring program at the BSA radio telescope of the Lebedev Physical Institute. The main goal of this work is to search for pulsars and other transients in the observational data of this radio telescope for the new site of our survey in the declination band $+52^\circ < \delta < +56^\circ$.

A technique for stream processing of the obtained observational data has been developed. The daily survey data on the multibeam diagram of the BSA of the Lebedev Physical Institute were sequentially divided into segments of 10 sec-

onds. In each time interval for each ray of the BSA, for each interval of observed frequencies, the main characteristic parameters of the data were determined: the average median value of the data in the selected interval of the selected frequency interval for a given ray of the diagram, the value of the maximum and minimum of the data and their location in this time segment, root mean square deviation and some other parameters. The data parameters found for each segment were tied to right ascension and recorded in special compressed data files. After that, their statistical analysis was carried out in relation to the observation time and celestial coordinates. Statistical processing of several months of observational data (312 days) recorded in six frequency channels with a total bandwidth of 2.5 MHz showed that, on average, about 10 pulses per hour are observed in each of the 32 connected stationary beams. Many of these events are interconnected (manifesting themselves in several beams of the BSA), and, after combining, an average of 21.4 combined events are detected per hour, or approximately one event every 3 minutes. In total, more than 160 thousand interconnected events were found.

When identifying events that occur only in 1–2 neighboring radio telescope beams (more than 40 thousand of these were found), it was found that about 55 % of them were generated by pulsars (showing signs of dispersion delays depending on the registration frequency). For the indicated declination band $+52^\circ < \delta < +56^\circ$ the statistics of all impulse phenomena that have signs of dispersion delays were calculated and analyzed. As part of the work carried out, pulses from 4 already known pulsars were found and 4 candidates for new pulsars were identified.

Keywords: processing technique, rotating radio transient (RRAT), pulsar, longwave radio emission.

Contacts: Vladimir A. Samodurov (samod@mail.ru).

For citation: Samodurov V. A., Tulbashev S. A., Toropov M. O., Dolgushev A. V., Oreshko V. V., Logvinenko S. V., Isaev E. A. Statistics of detections of impulse signals in the sky area with declinations from $+52^\circ$ to $+56^\circ$ at a frequency of 111 MHz // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 66. P. 37–44.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.66.37-44>

Введение

Как известно, изначально пульсары были открыты как источники импульсного диспергированного излучения ([Hewish et al., 1968](#)). Наблюдаемые импульсы располагались на одинаковых временных интервалах (периодах) друг от друга. Если период известен с достаточной точностью, импульсы можно было сложить и таким образом улучшить отношение сигнала к шуму (СШ). Очевидная логика говорит нам, что для обнаружения слабых пульсаров нужно складывать много периодов, то есть при прочих равных условиях увеличивать общее время наблюдений. Помимо этого из-за дисперсии сигнала в межзвездной среде наблюдения нужно проводить во многих частотных каналах, а из-за короткой длительности импульса пульсара — использовать типичное время опроса от сотен микросекунд до миллисекунд. Выполнение этих условий приводило к накоплению больших объемов сырых данных, которые нужно было обрабатывать с использованием слабых на тот момент возможностей вычислительной техники.

Практически сразу же после открытия пульсаров было предложено проводить их поиск, используя быстрые алгоритмы, позволяющие обнаруживать периодические сигналы. Поиск в частотной области можно было проводить при помощи быстрого преобразования Фурье, а поиск во временной области — при помощи периодограмм ([Staelin, 1969](#); [Burns, Clark, 1969](#)). Очевидные шаги для ускорения обработки наблюдений привели к тому, что на десятки лет способ поиска пульсаров по их отдельным импульсам был оставлен в стороне.

В ранней истории пульсарной астрономии исследование отдельных импульсов представляло мало интереса. Форма отдельных импульсов и их

интенсивность меняется в широких пределах. Более устойчивой структурой являются средние профили, в которых суммируются сотни и тысячи импульсов. Форма средних профилей отражает геометрические особенности строения магнитосферы пульсаров. Тем не менее, исследование импульсов у отдельных наиболее сильных пульсаров показало существование микроструктуры импульсов, дрейфа субимпульсов, гигантских импульсов, нуллингов и переключение мод (см. [Lorimer, Kraimer, 2004](#) и ссылки в нем).

В 2003 г. появилась работа [Cordes, McLaughlin, 2003](#), в которой рассматривался оптимальный поиск импульсных сигналов с учетом их рассеяния и мерцаний на межзвездной среде. В 2006 г. были открыты вращающиеся транзиенты (RRAT), то есть пульсары, у которых между детектированными импульсами может проходить от десятков секунд до часов ([McLaughlin et al., 2006](#)). Между последовательными импульсами периодическое излучение зачастую не обнаруживается. В 2007 г. были открыты быстрые радиовспышки (FRB), которые представляют собой импульсные сигналы, приходящие из-за пределов Млечного Пути ([Lorimer et al., 2007](#)).

Открытие импульсных сигналов внеземной природы, которые нельзя обнаружить с помощью стандартного поиска периодического излучения, вернуло к жизни поиск диспергированных импульсных сигналов, как дополнительный способ обнаружения пульсаров. Этот процесс сопряжен с рядом сложностей. Во-первых, для поиска и исследования отдельных импульсов нужны радиотелескопы, имеющие высокую мгновенную чувствительность, позволяющую найти одиночный импульс на приемлемом отношении СШ. Для сравнения рассмотрим поиск обычного пульсара,

имеющего период $P_0 = 1$ с. Десятиминутной записи такого пульсара достаточно для увеличения СШ почти в 25 раз. То есть пульсар, от индивидуальных импульсов которого в сырой записи не видно даже следа, может без особых проблем исследоваться на радиотелескопе со средними характеристиками. Во-вторых, при поиске новых транзиентов мы ‘a priori’ не знаем ни меру дисперсии импульса, ни ширину его профиля, что увеличивает количество переборов при поиске. При этом в сырых данных ширина шумовой дорожки может меняться из-за изменения температуры фона, оказывая влияние на СКО шума. Это приводит к необходимости постоянного контроля шумов в локальных точках. На низких частотах (метровый диапазон длин волн) к уширению дорожки может привести и попадание мерцающего источника на луч зрения одновременно с импульсным сигналом. Помимо этого, в записях регулярно обнаруживаются помехи, импульсы которых могут иметь признаки диспергирования. Поэтому трудно разработать систему поиска, которая однозначно будет отделять диспергированные импульсы внеземной природы от помех. Ситуация отделения реальных сигналов от помех при поиске классических пульсаров выглядит гораздо лучше. Повторяемость сигналов по звездному времени, идентичность извлекаемых периодов, одинаковая мера дисперсии, схожесть средних профилей и возможность накопления сигнала за разные дни однозначно свидетельствуют в пользу открытия нового пульсара.

В настоящей работе в рамках организованного обзора PUMPS (Пушинский многолучевой поиск пульсаров (Tyulbashev et al., 2016; Tyulbashev et al., 2018; Tyulbashev et al., 2021)) исследованы виды сигналов короткой длительности, обнаруживаемые в сырых данных. Мы рассматриваем статистику обнаружений импульсных источников излучения в новой площадке, включенной в мониторинговую программу по поиску пульсаров и отождествление этих источников с помехами и реальными сигналами, имеющими внеземное происхождение.

Наблюдения

Наблюдения проводились на меридианном телескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН). Центральная частота приема — 110.25 МГц, используемая полоса частот — 2.5 МГц, эффективная площадь антенны — около 40 тыс. м². После капитальной реконструкции антенны появилась принципиальная возможность на базе одного антенного поля сделать четыре независимых радиотелескопа (Shishov et al., 2016; Tyulbashev et al., 2016). В настоящей работе рассматривается радиотелескоп БСА3, на котором проводятся мониторинговые наблюдения. Особенность антенны

БСА3 заключается в том, что у нее сделана неподвижная система лучей. Всего реализовано 128 лучей, перекрывающих склонения от -8° до $+56^\circ$. В период 2013–2014 гг. к регистраторам были подключены 96 лучей с полосой наблюдения по склонениям -8° до $+42^\circ$. В конце 2020 г. был создан новый регистратор, к которому в тестовом режиме подключены еще 24 луча, которые регистрировали дополнительную полосу склонений $+42^\circ < \delta < +52^\circ$. Результаты ее анализа были опубликованы (Самодуров и др., 2022). Наконец, с 20 октября 2021 г. были запущены в эксплуатацию последние 8 регистраторов 128-лучевой диаграммы БСА3 в полосе склонений $+52^\circ < \delta < +56^\circ$. В данной работе приводятся алгоритмы обработки и первые результаты анализа данной полосы склонений.

На выходе дипольных линий БСА ФИАН располагаются усилители первого этажа. На вход этих усилителей можно подать сигнал известной температуры (калибровочный сигнал; калибровочная ступенька), отключая при этом сами линии диполей. Этот сигнал проходит все антенные тракты и все усилители, располагающиеся по дороге. Калибровочный сигнал записывается в форме OFF-ON-OFF (калибровочная ступенька), где режим OFF означает отсутствие калибровочного сигнала при отключении всех промежуточных усилителей и антенны (дипольных линий). В этом случае прописывается шум в антенных трактах (кабелях), соответствующий температуре окружающей среды. Режим ON — это включение калибровочного сигнала при отключенных дипольных линиях. Так как запись проходит в нескольких частотных каналах, есть возможность выравнивать усиление в каждом частотном канале независимо (подробнее в работе Tyulbashev et al., 2019).

Режим работы нового регистратора такой же, как и у регистраторов, используемых для работы в 96 лучах (Tyulbashev et al., 2016). Вначале производится оцифровка полной полосы наблюдений. В регистраторе входной поток данных преобразуется в данные с низким (0.1 с; 6 частотных каналов) и высоким (12.5 мс; 32 частотных канала) частотно-временным разрешением, после чего данные в обоих форматах одновременно записываются на жесткие диски. Ранее данные с низким частотно-временным разрешением использовались в проекте «Космическая Погода» (Shishov et al., 2016), а также при поиске пульсаров (Tyulbashev et al., 2016). Для этих же целей будут использоваться и данные с нового регистратора. Так как запись данных в обоих форматах идет одновременно, то можно оценить качество наблюдений в целом, обрабатывая лишь данные с низким частотно-временным разрешением. Объем этих данных примерно в 35 раз меньше, чем у данных с высоким частотно-временным разрешением.

Так как БСА является меридианным инструментом, исследуемый источник можно наблюдать лишь во время его прохождения через меридиан. Время прохождения составляет ~ 3.5 мин на склонении $\delta = 0^\circ$ по ширине луча диаграммы на уровне половинной мощности (HPBW). Форма диаграммы направленности подчиняется зависимости $[\sin(x)/x]^2$, и поэтому при оценке плотности потока необходимо делать поправки, учитывающие особенности антенной решетки.

Перед обработкой наблюдений усиление в частотных каналах выравнивается с помощью калибровочной ступеньки. Затем качество данных и помеховая обстановка оценивается на десятисекундных временных отрезках стандартными статистическими методами. Для каждого временного отрезка оцениваются минимальные и максимальные значения интенсивности в условных единицах до и после удаления импульсных помех, медианное значение интенсивности на исследуемом отрезке, среднеквадратичные отклонения. Запоминаются дата и час наблюдений по московскому времени, а также начало исследуемого десятисекундного отрезка по звездному времени. Проводимое сравнение СКО день ото дня и от одного отрезка к другому в течение дня позволяют контролировать уровень помех как в определенный день, так и на любом выбранном интервале времени.

Обработка данных

Запись данных наблюдений в файлы производилась 1 раз/час. Часовые файлы данных калибровались и разделялись на 10-секундные отрезки для численного анализа.

По каждому лучу и по каждой частоте брались данные за 10 сек. Для тяжелого формата данных радиотелескопа БСА (12.5 мс или 80 раз/сек; 32 частотных канала) это ~ 800 float (вещественных 4-байтных значений на 10 сек съема данных на каждый из 32 частотных каналов). Далее для каждого из 32 частотных каналов производилась сортировка:

- эти 800 точек сортируются алгоритмом «поиск k -ой порядковой статистики»;

- по ним считаются следующие метрики: значение минимума, значение максимума, индекс максимума (до сортировки), среднее, медиана, дисперсия, дисперсия за исключением 30 % максимальных значений и 2 % минимальных.

Наиболее ценной для дальнейшей обработки является метка индекса максимума данных внутри обрабатываемого отрезка на частотной полосе. Именно она позволяет привязать максимумы внутри 10-секундных отрезков ко времени для каждой частоты, что и позволяет при обработке определять из данных дисперсионное запаздывание сигнала вдоль частот.

В каждом частотном канале проводился независимый поиск импульсных сигналов с отношением $\text{СШ} > 5$ ($\text{СШ} = A/\sigma_{\text{noise}}$, где A — это амплитуда сигнала после вычитания базовой линии (фоновое сигнала), а σ_{noise} — СКО на 10-секундном интервале). Если на исследуемом отрезке для найденного импульса отношение СШ было больше 5 хотя бы в трех частотных каналах из шести, то данный отрезок исследовался отдельно.

Похожая методика, но с другими интервалами (5 сек) и с использованием механизмов баз данных для наших наблюдений в 2012–2013 гг. (статистика для 83086 импульсов) для склонений от $+3^\circ$ до $+42^\circ$, уже применялась ранее ([Samodurov et al. 2017](#)), оказавшись очень эффективной (в частности, в указанной работе были впервые приведены данные для двух новых на тот момент RRAT пульсаров).

Для каждого найденного в частотном канале импульсного сигнала записывалось время, когда наблюдался его максимум. Если максимум импульса на более низкой частоте наблюдался позже, чем на более высокой, это говорит о возможной дисперсии сигнала, вызванной межзвездной средой. Такие кандидаты проверялись дополнительно. Записывалась также информация об импульсах, имеющих противоположное («антипульсарное») поведение, то есть импульс на низкой частоте приходил раньше, чем на более высокой.

В текстовые логи запоминаемых импульсов на каждом из 10-секундных отрезков данных вносилась информация о номере луча, юлианской дате (MJD), времени (UT), звездном времени, наблюдаемом отношении СШ в частотных каналах, метке кандидата в пульсар или ожидаемой помехе, найденной мере дисперсии (DM), также записывалась информация о том, в скольких лучах наблюдался импульс, списки номеров лучей с похожими импульсами.

Далее производился потоковый анализ логов импульсов. Например, информация о том, в каком количестве лучей одновременно наблюдался импульс, позволяет отличать помехи от реального (как выяснилось) излучения с «небесных полей» большого размера. Так как такие помехи/сигналы ненаправленные, то они записываются во многих или даже во всех 32 исследуемых лучах. Выявляются также артефакты обработки. Например, поскольку внутри 10-секундного отрезка данных вполне может появиться не единичный импульс, а несколько (при съеме данных в районе яркого пульсара; во время сильной грозы; при генерации сильных помех и т.п. явлений). И в результате, например, на более низких частотах отсечка на данных может появиться ранее, порождая явления с «отрицательными» дисперсионными задержками. Действительно, если внутри автоматически анализируемых 10-секундных отрезков все

же могло произойти более одного импульсного события (например, два последовательных импульса яркого пульсара), то могли возникать артефактные ситуации, когда на одной частоте время импульса бралось с одного такого события внутри 10 секунд, а на второй — с другого. В частности, это приводит к ложно обнаруживаемым событиям с аномально высокими либо, напротив, с отрицательными дисперсионными задержками (до $DM = \pm 1900$). Поэтому все подобные случаи с аномальными значениями дисперсий удалялись из анализа.

Результаты и их обсуждение

Тестовые наблюдения в новой стойке приемников на всех 32 лучах были начаты в сентябре 2022 г. Период тестирования аппаратуры в целом закончился 20.10.2021 г. В данной работе представлены результаты анализа данных в период с 21.10.2021 по 31.08.2022 гг. Вначале мы представим общие результаты для всех 32 лучей, затем сосредоточимся только на данных с последних 10 лучей БСА, в диапазоне склонений $+52^\circ < \delta < +56^\circ$.

На всем интервале наблюдений с 21.10.2021 по 31.08.2022 гг. (после вычета пропусков данных всего было проанализировано 7496 файлов-часов, или 312.33 звездных сут.) в 32 лучах было обнаружено 2.5 млн импульсных событий. Однако многие импульсы одновременно проявлялись в нескольких лучах. Поэтому такие проявления автоматически объединялись в одно событие. Всего в 7496 файлах-часах найдено 160504 взаимосвязанных события (на многих лучах один и тот же импульс), то есть на один час в среднем приходится 21.4 события, или примерно событие 1 раз / 3 мин.

Число импульсов на одном отдельно взятом луче за указанный период колеблется от 65 до 87 тыс., в зависимости от номера луча, что составляет примерно 10 событий / час.

В предыдущей работе по анализу 24 лучей с той же приемной стойки (Самодуров и др., 2022) во временном интервале с 16.12.2020 по 15.04.2021 гг. регистрировалось в среднем около 4 событий / час на одном отдельно взятом луче. Учитывая, что на качестве данных сказывается множество факторов, в том числе сезонность, можно считать, что результаты примерно тождественны.

Распределение количества одновременных событий по разным лучам представлено на рис. 1. Из гистограммы видно двугорбое распределение событий, где максимумы приходятся на события, видимые лишь в одном луче, и на события, наблюдаемые во всех 32 лучах. Левый горб должен содержать все события, связанные с детектированием реальных импульсов и, возможно, часть помех. Правый горб должен содержать все помеховые случаи, плюс, возможно, отдельные самые мощные импульсы пульсаров могут наблюдаться

во многих лучах, появляясь в боковых лепестках БСА ФИАН (Tyulbashev et al., 2021ARep). Также в результате дополнительного анализа мы уже можем заявить, что среди данных есть значимое число (до десятков процентов) событий, порожденных генерацией радиоволн при прохождении частиц космических лучей с высокими энергиями через ионосферу и атмосферу (более подробно — в отдельной статье). Причем они способны проявить себя как в одном луче, так и во многих лучах сразу.

Вначале мы представим общие результаты для 32 лучей нулевой стойки аппаратуры с самых северных 32 лучей БСА в диапазоне склонений $+42^\circ < \delta < +56^\circ$. Проанализирован интервал наблюдений с 21.10.2021 по 31.08.2022 гг. (всего, после вычета пропусков данных, было проанализировано 7496 файлов-часов, или 312.33 звездных сут.), при этом в 32 лучах было обнаружено 2.5 млн импульсных событий. Но многие импульсы проявлялись одновременно в нескольких лучах. Поэтому такие проявления автоматически объединялись в единое событие. Всего в 7496 файлах-часах найдено 160504 таких взаимосвязанных события (когда на многих лучах БСА проявляется один и тот же импульс), то есть на 1 час в среднем приходится 21.4 события, или примерно событие 1 раз / 3 мин.

Еще раз отметим, что значительная часть импульсов видна не в одном, а во многих лучах сразу: они зачастую оказываются техногенными помехами. К тому же, в логах присутствуют артефакты обработки: например, для случаев, когда реально происходило несколько импульсов внутри обрабатываемого 10-секундного отрезка. Поэтому произведем фильтрацию данных, отбросив все

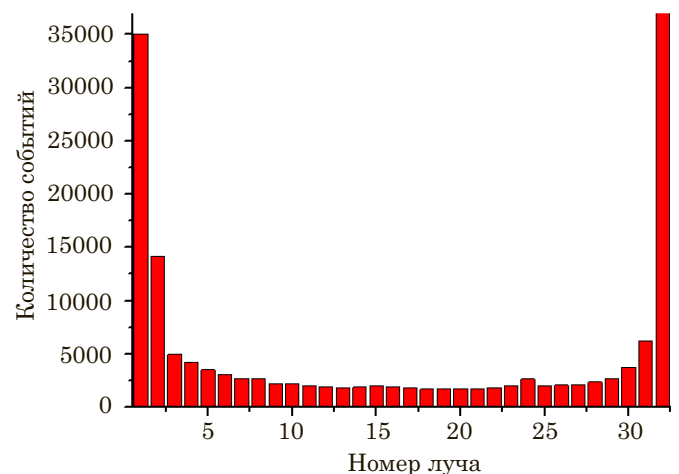


Рис. 1. Гистограмма распределения импульсов: по вертикали — количество детектированных импульсов, по горизонтали — количество лучей, в которых детектирован импульс

сомнительные случаи с «отрицательными» дисперсиями, а также дисперсиями более $DM = 200$ пс/см³ (как показывает практика, они также в подавляющем большинстве порождаются несколькими соседними импульсами от пульсара внутри 10-секундного отрезка), и — самое главное — выведем за рамки анализа все события, которые происходят более чем в 2 лучах радиотелескопа. Указанные параметры фильтрации, конечно, удаляют из анализа часть реальных данных (например, последовательности импульсов внутри 10 сек для очень ярких пульсаров; проявления каскадных ливней космических частиц во многих лучах радиотелескопа и т. п.), но зато значительно облегчают последующий анализ данных и поиск статистики для наиболее интересных явлений на небе.

В результате, проанализировав 2505715 строк (единичных импульсов в конкретном одном из 32 лучей, хотя бы в 3 частотах из 6 с отношением $S/N \geq 5.0$), после указанной фильтрации мы оставляем для дальнейшего анализа 51716 единичных событий (все то же, но не более чем в 2 лучах и с правдоподобными параметрами импульса).

Некоторые из них проявляют себя одновременно в 2 соседних лучах радиотелескопа, поэтому объединенных событий оказывается 40078 (что составляет 25 % от указанного выше общего числа в количестве 160504 объединенных событий), из них 22045 (55 %) с выраженной дисперсионной задержкой (то есть пульсарные). Отметим также, что проявили себя лишь в 1 луче радиотелескопа 28 467 импульсов, причем с выраженной дисперсионной задержкой из них (то есть, по сути, импульсы от пульсаров): 16 199 или 56.9 % данной разновидности импульсов. Как видим, при ужесточении параметров фильтрации (единичный импульс лишь в одном из 32 лучей, хотя бы в 3 частотах из 6 с отношением $S/N \geq 5.0$) — уже большинство выделяемых импульсов принадлежит именно пульсарам.

Далее в данной работе мы займемся анализом именно импульсов с дисперсионными запаздываниями, то есть пульсарного характера.

Итак, для всех 32 лучей радиотелескопа нами были выделены 22045 событий, которые происхо-

дили не более чем в 2 лучах и имели признаки дисперсионного запаздывания. Часть таких событий происходила сразу в 2 лучах, и общее число найденных пульсароподобных импульсов (хотя бы в одном луче) составляло 27890. Все данные импульсы были выделены в отдельный текстовый файл для более детального анализа.

Далее мы оставили для анализа лишь данные, приходящие с верхних 8–9 лучей с полосы склонений $+52^\circ < \delta < +56^\circ$, поскольку нижние 24 луча мы уже проанализировали ранее (Самодуров и др., 2022). И у нас остались для анализа 19343 единичных импульсов хотя бы в одном луче, или 14018 объединенных импульсных событий (напомним, что часть импульсов проявляют себя сразу в 2 лучах БСА).

Готовый текстовый файл из 19343 строк с описаниями единичных импульсов был проанализирован программой, позволяющей проверять скопления (кластеризацию) импульсов по разным наборам признаков. При работе программы кластеризации использовались следующие признаки: координата по прямому восхождению, координата по склонению, число зарегистрированных импульсов за все время наблюдений, средняя мера дисперсии в кластере. Размер каждого кластера на избранном луче был две минуты по звездному времени (прямому восхождению).

Всего программа обработки выделила 45 кластеров из 6480 возможных, приходящихся на исследуемую площадку. В выделенных 45 есть хотя бы одно «пульсарное» событие. Каждый из кластеров проверялся по каталогу ATNF (<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>, Manchester et al., 2005). Кластеры последовательно отождествлялись с уже известными пульсарами (каждый пульсар обычно проявляет себя сразу в нескольких рядом расположенных кластерах), и, после нахождения общей статистики для каждого из них, они удалялись из дальнейшего анализа. В предыдущей работе (Самодуров и др., 2022) мы уже нашли, что 68 % от первоначально автоматически выделенных импульсов, отмеченных как кандидаты в импульсы пульсарной природы, оказывались ими,

Таблица 1

Статистика обнаружений импульсов известных пульсаров в полосе $+52^\circ < \delta < +56^\circ$

Имя пульсара	P_0 , с	DM , пс/см ³	N_1 , импульсов	$\langle N \rangle$, среднее число импульсов на одно наблюдение (~3–4 мин)
V0329+54	0.7145	26.76	13169	42.16
J0343+5312	1.9445	67.3	1	0.003
V1508+55	0.7397	19.62	5038	16.13
J2022+5154	0.5291	22.55	456	1.46

Примечание. Пульсары V0329+54, V1508+55 наблюдается также и в боковых лепестках диаграммы направленности БСА ФИАН, чистка логов импульсов от них произведена отдельно

Характеристики найденных RRAT
(J0244+55 и J1458+55 проверены только по 6-канальным данным)

Имя пульсара	DM, пс/см ³	N ₁ /N ₂ , импульсов / сеансов наблюдений
J0244+55	25 ± 8	4 / 1
J0249+53	27.5±1	13/11
J0744+55	10.5±1	4 / 4
J1458+55	23 ± 8	1 / 1

остальные 32 % — артефакты, порождаемые особенностями обработки. В этой работе мы не искали статистику сомнительных отождествлений для уже известных пульсаров, полагая, что она та же. На каждом шаге мы просто удаляли очередной массив данных для очередного известного пульсара.

В табл. 1 отражена статистика обнаружения импульсов пульсаров (после вычета остановок аппаратуры для плановой профилактики и остановок из-за сбоев аппаратуры — 7496 файлов-часов, или 312.33 звездных суток). В первой колонке дано имя пульсара, в колонках 2 и 3 приведены P0 и DM из ATNF, в колонках 4 и 5 общее количество зарегистрированных импульсов (N₁ — без чистки их числа от случайных артефактных событий, по-

рожденных особенностями обработки — таковых около 1/3 от общего числа) и сколько импульсов в одно наблюдение в среднем было зарегистрировано — $\langle N \rangle$. Это число для ярких пульсаров сильно занижено, поскольку выше мы исключили события с несколькими импульсами внутри 10-секундных отрезков, оставив на них лишь единичные события). Если пульсар наблюдался в 2 лучах, производилось простое суммирование чисел событий.

Помимо известных пульсаров в записях были обнаружены импульсы, принадлежащие 4 вращающимся транзиентам (RRAT). В табл. 2 приведена информация по найденным RRAT. В первой колонке приведено имя транзиента. Во второй — его

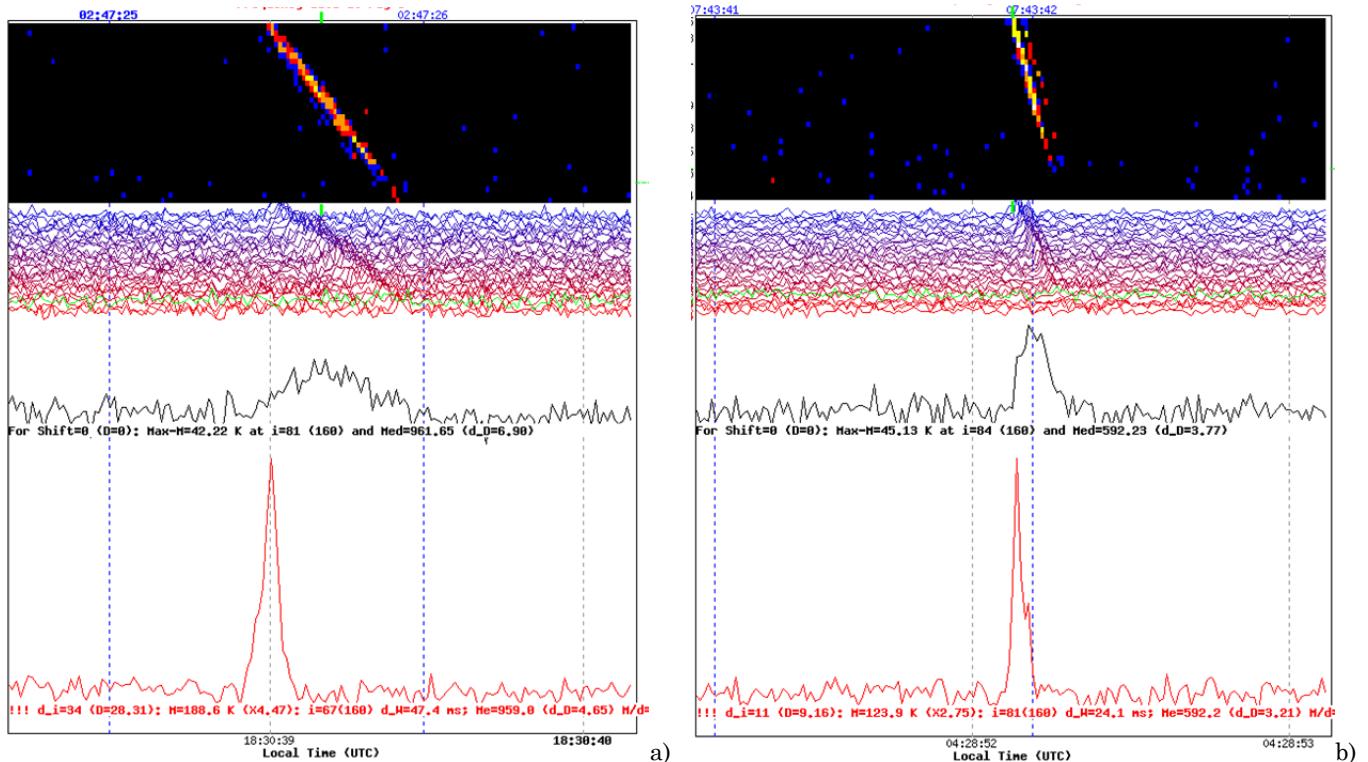


Рис. 2. На левой и правой частях рисунка представлены динамические спектры и результаты подбора дисперсионной задержки для кандидатов в пульсары J0249+53 (UT = 2022-02-16 14:30:39.2) и J0744+55 (UT = 2021-12-02 00:23:52.1) в 32 полосах. Сверху вниз: динамический спектр на отрезке в 2 сек на частотах 109.0–111.5 МГц (верхний из 32 каналов соответствует частоте 111.461 МГц, нижний — 109.039 МГц с шагом 78 КГц), набор графиков в 32 полосах, их сумма, лучший результат перебора дисперсий.

прямое восхождение, которое определялось как среднее прямых восхождений всех импульсов, а ошибка определялась как стандартное СКО. В колонках 2–5 приведены оценки периода, мера дисперсии, число найденных импульсов, среднее число импульсов в одном наблюдении.

Кандидаты в новые RRAT пульсары (часть из них, или даже все, после дополнительной проверки могут покинуть список) приведены в табл. 2.

Все сомнительные случаи были проверены визуально и отброшены из массива анализируемых импульсов. На рис. 2*a*, *b* представлены примеры импульсов двух новых кандидатов в пульсары (представлены скрины авторской рабочей программы чтения и обработки данных — версия, написанная на Perl).

Заключение

Программа контроля наблюдений по данным, записанным с низким частотно-временным разрешением, показала высокую эффективность, позволяя оперативно реагировать на изменение как внешних условий наблюдений, так и внутренних причин, отвечающих за ухудшение наблюдений. Относительно небольшое количество регистрируемых импульсов, имеющих помеховую природу, на один час наблюдений показывает, что в целом качество наблюдений высокое.

За почти годовой период наблюдений в шестиканальных данных с шириной канала 415 кГц и временем чтения одной точки 0.1 с детектировано больше 51 тыс. импульсов, имеющих признаки «пульсарности». Для каждого из этих событий импульс на высокой частоте приходит раньше, чем на низкой частоте, и регистрируется в одном или двух соседних лучах.

В слепом поиске обнаружено 4 известных пульсара, у которых наблюдается от 1 до 13169 импульсов в данных с низким частотно-временным разрешением за 7496 наблюдательных часов (более 312 суток). Помимо известных пульсаров обнаружено 4 кандидата в новые RRAT.

Благодарности

Авторы благодарят антенную группу ПРАО АКЦ ФИАН за обеспечение многолетних кругло-суточных наблюдений на БСА ФИАН.

Литература

Самодуров В. А., Тюльбашев С. А., Торопов М. О., Логвиненко С. В. «Статистика обнаружений импульс-

ных сигналов в площадке со склонениями от +42° до +52° на частоте 111 МГц» // *Астрономический журнал*. 2022. Т. 99. № 4. С. 334–341.

Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. H. et al. // *Nature*. 1968. Vol. 217. 709.

Staelin D. H. // 1969, *IEEE Proceedings*, 57, 724. doi:10.1109/PROC.1969.7051

Burns W. R., Clark B. G. // 1969, *AAP*, 2, 280

Lorimer D. R., Kramer M. // 2004, *Handbook of pulsar astronomy*, by D.R. Lorimer and M. Kramer. Cambridge observing handbooks for research astronomers, Vol. 4. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004

Cordes J. M., McLaughlin M. A. // 2003, *APJ*, 596, 1142. doi:10.1086/378231

McLaughlin M. A., Lyne A. G., Lorimer D. R., et al. // 2006, *Nat*, 439, 817. doi:10.1038/nature04440

Lorimer D. R., Bailes M., McLaughlin M. A. et al. // 2007, *Science*, 318, 777. doi:10.1126/science.1147532

Tyul'bashev S. A., Tyul'bashev V. S., Oreshko V. V. et al. // 2016, *Astronomy Reports*, 60, 220. doi:10.1134/S1063772916020128

Tyul'bashev S. A., Tyul'bashev V. S., Malofeev V. M. et al. // 2018, *Astronomy Reports*, 62, 63. doi:10.1134/S1063772918010079

Tyul'bashev S. A., Kitaeva M. A., Tyul'basheva G. E. "Pushchino multibeam pulsar search: I. Targeted search of weak pulsars", *MNRAS*, 2021, submitted

Shishov V. I., Chashei I. V., Oreshko V. V. et al. // 2016, *Astronomy Reports*, 60, 1067. doi:10.1134/S1063772916110068

Samodurov V. A., Pozanenko A. S., Rodin A. E., Churakov D. D., Dumskij D. V., Isaev E., Kazantsev A. N., Logvinenko S. V., Oreshko V. V., Toropov M. O., Volobueva M. I. "Observations of Transient Phenomena in BSA Radio Survey at 110 MHz", in: *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. XVIII International Conference, DAMDID/RCDL 2016, Ershovo, Moscow, Russia, October 11 -14, 2016, Revised Selected Papers* / Ed. by L. Kalinichenko, S. Kuznetsov, Y. Manolopoulos. Cham : Springer, 2017, P. 130-141, doi: 10.1007/978-3-319-57135-5_10

Tyul'bashev S. A., Golysheva P. Y., Tyul'bashev V. S. et al. // 2019, *Astronomy Reports*, 63, 920. doi:10.1134/S1063772919100068

Tyul'bashev S. A., Kitaeva M. A., Logvinenko S. V., Tyul'basheva G. E. // 2021, *Astronomy Reports*, 65, in press

Tyul'bashev S. A., Tyul'bashev V. S., Kitaeva M. A. et al. // 2017, *Astronomy Reports*, 61, 848. doi:10.1134/S1063772917100109

Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh, A., et al. // 2005, *AJ*, 129, 1993. doi:10.1086/428488

Losovsky B. Y., Dumsky D. V. // *Astronomy Reports*. 2014. Vol. 58, 537. doi:10.1134/S1063772914080034.

Good D. C., Andersen B. C., Chawla P. et al. // 2020, arXiv:2012.02320