

УДК 524.354.4

ОБНАРУЖЕНИЕ ДВУХ НОВЫХ RRAT НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

С. В. Логвиненко, С. А. Тюльбашев, В. М. Малофеев

В наблюдениях 2020 года, проведенных на радиотелескопе БСА ФИАН, обнаружены два новых вращающихся транзиента. Меры дисперсии найденных транзиентов $DM = 21$ и 35 нс/см³, полуширины импульсов $W_e = 18$ и 35 мс для $J1549 + 09$ и $J2047 + 13$, соответственно. Получена верхняя оценка периода RRAT $J2047 + 13$ $P = 2.925$ с. Исследование показывает существование вращающихся транзиентов, импульсы которых появляются реже, чем один импульс за 10 часов наблюдений.

Ключевые слова: вращающиеся радиотранзиенты (RRAT), пульсары, анализ данных.

Введение. Вращающиеся радиотранзиенты (RRAT) были открыты в 2006 году как спорадически появляющиеся диспергированные импульсы, частота появления которых изменялась от нескольких минут до нескольких часов [1]. Мера дисперсии времени прихода обнаруживаемых импульсов или расстояние до объектов говорили об их галактической природе, а периоды и производные периодов, которые удалось оценить для многих RRAT, соответствовали обычным секундным пульсарам. Таким образом, очень вероятно, что RRAT – это особый вид пульсаров. Общее количество обнаруженных RRAT не велико. В дециметровом диапазоне обнаружено около 90 RRAT (см. каталог ATNF (<https://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>)). В метровом диапазоне обнаружено примерно 30 RRAT в наблюдениях на Большой синфазной антенне Физического института им. П. Н. Лебедева (БСА ФИАН) [2, 3].

Природа RRAT все еще не ясна. В работе [4] предполагается, что RRAT являются обычными пульсарами с сильными импульсами. Если это так, то после удаления из записи обнаруженных сильных диспергированных импульсов должно проявиться слабое периодическое излучение. В работе [5] говорится, что RRAT являются пульсарами с экстремальными нуллингми. Явление нуллингма заключается в том, что время от вре-

ФИАН, Пуштинская радиоастрономическая обсерватория (ПРАО ФИАН); 142290 Россия, Московская обл., г. Пушкино; e-mail: serg@prao.ru.

мени у пульсаров наблюдается пропуск импульса [6]. Для некоторых пульсаров нуллинг может иметь сложный характер. Например, у пульсара J0810+37, открытого в обзоре на БСА ФИАН [7], доля пропадающих импульсов меняется от 38% до 74% регулярно на протяжении года наблюдений [8]. То есть для пульсара J0810+37 количество наблюдаемых импульсов может быть меньше, чем количество пропущенных импульсов. Считается, что чем больше характеристический возраст пульсара, тем больше величина нуллинга [9]. Если подтвердится гипотеза об экстремальных нуллингах [5], то RRAT – это старые пульсары. Есть и более экзотические гипотезы. Например, предполагается, что импульс RRAT наблюдается при столкновении нейтронной звезды с падающим на нее веществом в виде астероидов, или из-за взаимодействия магнитосферы пульсара с веществом аккреционного диска, располагающегося вокруг звезды [10, 11]. Возможно, что для разных транзиентов верны разные гипотезы.

В ПРАО ФИАН уже несколько лет продолжают мониторинговые наблюдения, которые могут быть использованы для поиска пульсаров и вращающихся транзиентов. В настоящей работе рассмотрен поиск транзиентов при помощи новой программы обработки.

Наблюдения и результаты. Ежедневные наблюдения в режиме мониторинга проводятся на радиотелескопе БСА ФИАН в 32-канальном режиме с шириной канала 78 кГц и частотой опроса 12.5 мс. Большая эффективная площадь радиотелескопа, составляющая примерно 45000 кв.м., обеспечивает высокую флуктуационную чувствительность, что и позволяет проводить поиск RRAT. Детали о радиотелескопе и программах наблюдений можно посмотреть в работе [12].

Поскольку наблюдения ведутся одновременно в 96 пространственных лучах на склонениях от -7° до $+42^\circ$, для постоянной записи данных используется специально разработанный и изготовленный в ПРАО регистратор. Конструктивно он состоит из промышленного компьютера (ПК), в который устанавливается необходимое количество базовых модулей (см. рис. 1). При установке 6 базовых модулей, обрабатывается одновременно 48 сигналов или лучей радиотелескопа. Расширение числа одновременно регистрируемых сигналов можно производить с помощью установки дополнительных ПК, оснащенных необходимым количеством модулей цифрового приемника (до 8 модулей).

Сигнал с каждого луча оцифровывается с частотой 230 МГц (прямая оцифровка сигнала) с помощью цифрового видеоконвертора с рабочей полосой 109–111.5 МГц, и переносится в область низких частот. Далее производится спектральный анализ сигнала с накоплением до заданного временного интервала считывания.

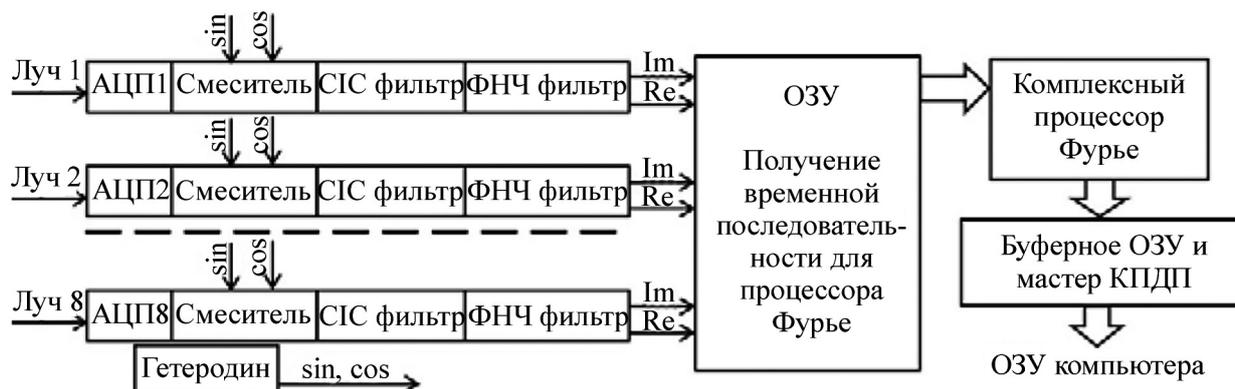


Рис. 1: Базовый модуль регистратора: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; СІС фильтр – Cascaded Integrator-Comb (CIC) Filter; КППД – канал прямого доступа в память; ФНЧ – фильтр низких частот; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство.

Модуль выполнен в стандарте РСІ, обмен данными производится по шине universal РСІ, позволяющей установку модуля в компьютеры, оснащенные шиной РСІ как стандарта +5В, так и стандарта +3.3В. Частота обмена данными по шине РСІ составляет 33 МГц, разрядность 32 бита, что соответствует требованиям по скорости обмена данными для данной задачи.

Для оцифровки сигнала используется 12-разрядный, 2-канальный АЦП фирмы Texas Instruments ADS62P29 с максимальной частотой оцифровки 250 МГц. Для уменьшения влияния помех и уменьшения межканального взаимного проникновения сигналов используется отдельная система стабилизации и фильтрации питающих напряжений. Кроме того, в топологии печатной платы предусмотрены средства, позволяющие уменьшить влияние помех, проникающих в сигнал по общим шинам. Передача данных от АЦП к ПЛИС (Программируемая Логическая Интегральная Схема) производится по дифференциальным линиям по стандарту LVDS с двойной скоростью передачи данных. Для уменьшения количества компонентов на печатной плате со стороны ПЛИС используются встроенные в ПЛИС средства согласования линий передачи данных.

Данные от 8 АЦП одного модуля передаются по дифференциальным линиям связи. Кроме того, на модуле реализован интерфейс РСІ и предусмотрены средства межмодульного обмена данными. Эти особенности продиктовали необходимость использования ПЛИС с большим количеством контактов ввода/вывода и с возможностью реализации обработки сигналов с частотой 230 МГц. Поэтому в модуле используется ПЛИС

EP3SL780C3 фирмы Altera – младшая модель ПЛИС из семейства Stratix III со скоростной градацией 3. Эта микросхема оснащена 50000 эквивалентными логическими элементами и имеет 480 пользовательских элементов ввода/вывода. Ресурсы ПЛИС позволяют реализовать на одной микросхеме 8 независимых видеоконверторов, фильтрацию высокочастотных и низкочастотных сигналов, спектральный анализ и обработку 8 независимых потоков данных. Применение последовательно включенных СИС фильтров и НЧ фильтров позволяют подавить цифровыми методами ненужный сигнал и помехи, расположенные вне рабочей полосы радиотелескопа не менее чем на 80 дБ. Такое подавление, в совокупности с применением аналоговых фильтров приемной системы телескопа, позволяют реализовать необходимую чувствительность радиотелескопа.

Драйвера, необходимые для организации управления модулями средствами операционной системы, были разработаны с использованием пакета фирмы Microsoft Driver Development Kit (DDK). Разработанные драйвера позволяют организовать одновременную работу до 8 модулей на одном ПК, включая режим прямого доступа в память.

Ранее при обработке полугодовых мониторинговых данных июль-декабрь 2015 года были обнаружены 33 вращающихся транзиента [2, 3]. В этих наблюдениях в ходе обработки перебирались значения мер дисперсии (DM) до 100 пс/см^3 . Как известно, мера дисперсии отражает суммарную плотность электронов по лучу зрения. Чем больше суммарная плотность электронов, тем больше мера дисперсии при одном и том же расстоянии до исследуемого объекта. Если при тестировании очередной меры дисперсии появлялись импульсы, имеющие отношение сигнала к шуму (С/Ш) больше 7, в каталог записывались координаты обнаруженного объекта и данные, позволяющие сгенерировать картинку со средним профилем и динамическим спектром транзиента. В частности, сильные импульсы могут быть обнаружены с разным С/Ш в целом наборе разных мер дисперсии. Помимо этого, некоторые индустриальные помехи при формальном сложении частотных каналов могут показывать меры дисперсии, типичные для пульсаров. При обработке половины года мониторинговых наблюдений обнаружилось около одного миллиона объектов, формально удовлетворяющих критериям нового RRAT. Оказалось, что большая часть обнаруженных транзиентов – это импульсы известных пульсаров. Для сильного пульсара за каждый сеанс наблюдений может обнаруживаться больше тысячи импульсов. Тем не менее, даже после исключения известных пульсаров визуальная проверка кандидатов заняла много времени.

Разработана новая программа обработки наблюдений для поиска RRAT. В этой программе при проверке мер дисперсии за данный день и для данного направления

остается лишь один кандидат, показывающий наибольшее отношение $S/\text{Ш}$. Известные пульсары и RRAT, сильные мерцающие радиоисточники, калибровочные сигналы, записываемые 6 раз в сутки, показывают известные и ложные транзиенты. Такие объекты включаются в ручном или автоматическом режиме в специально созданные каталоги. Это позволяет исключать их из конечных каталогов с кандидатами в транзиенты, что в десятки раз уменьшило количество проверяемых кандидатов.

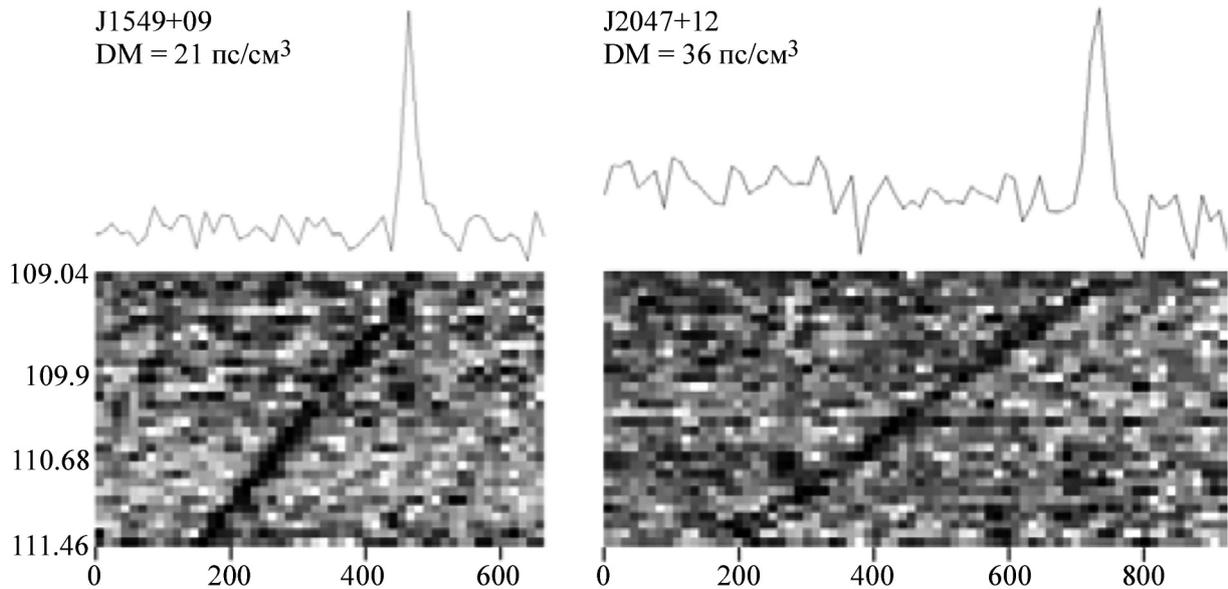


Рис. 2: По горизонтальной оси отложено время в миллисекундах. По вертикальной оси – частота наблюдений в МГц. Темная линия внутри динамического спектра – это сигнал от обнаруженного транзиента. Интенсивность излучения внутри динамического спектра показана оттенками серого цвета. Чем темнее цвет, тем сильнее регистрируемый сигнал. Над спектрами показаны профили импульсов, представляющие собой интегральную сумму импульса во всех частотных каналах, сложенных с учётом зависимости задержки сигнала в межзвездной среде от частоты наблюдений. Степень наклона линии отражает величину меры дисперсии. Чем больше наклон, тем больше мера дисперсии.

После обработки нескольких дней за февраль 2020 г. на склонениях $-7^\circ < \delta < 21^\circ$ обнаружено 2 новых вращающихся транзиента с $S/\text{Ш} > 7$ (J1549+09: $\alpha_{2000} = 15^{\text{h}}50^{\text{m}}47^{\text{s}} \pm 90^{\text{s}}$; $\delta_{2000} = 9^\circ 43' \pm 15'$; $DM = 21 \pm 1.5$ пс/см³; $W_e = 18$ мс; J2047+12: $\alpha_{2000} = 20^{\text{h}}47^{\text{m}}45^{\text{s}} \pm 90^{\text{s}}$; $\delta_{2000} = 12^\circ 59' \pm 15'$; $DM = 36 \pm 2$ пс/см³; $W_e = 35$ мс). При новой обработке имеющихся архивных данных RRAT J1549+09 был обнаружен 4 раза

на интервале 4 года, а J2047+12 – 7 раз. Динамические спектры и профили импульсов RRAT приведены на рис. 2. Для транзиента J2047+12 в один из дней обнаружено два импульса на расстоянии 2.925с. Действительный период пульсара может быть в кратное число раз меньше.

Обсуждение результатов и заключение. Галактические координаты RRATJ1550+09 ($l = 19^{\circ}19'$; $b = 44^{\circ}21'$) и RRATJ2047+12 ($l = 58^{\circ}58'$; $b = -18^{\circ}36'$), говорят о том, что оба найденных транзиента находятся далеко за пределами плоскости Галактики. Оценки расстояний по модели NE2001 [13], исходящие из мер дисперсии найденных объектов и распределения электронов в Галактике, показывают $R = 0.95$ кпс (J1550+09) и $R = 2.2$ кпс (J2047+12). Эти расстояния типичны для пульсаров.

Согласно работам по поиску вращающихся транзиентов, время между спорадически появляющимися импульсами может быть в промежутке от минут до часов [1, 14]. При поиске RRAT на полугодовом интервале [3] эквивалентное время наблюдений каждой точки на небе на склонениях от -7° до $+42^{\circ}$ составило примерно 10 часов. Поэтому ожидалось, что в исследованной площадке все сильные ($C/Ш > 7$) RRAT, доступные для БСА ФИАН, уже обнаружены. После детектирования новых RRAT, были перепроверены результаты раннего поиска транзиентов, проведенного на полугодовых данных. Подтверждено, что оба транзиента отсутствуют в данных ранней обработки. Среднее время наблюдения до появления импульса от J1550+09 оказалось 20 часов, а для J2047+12 – 11 часов. Таким образом, в метровом диапазоне существуют RRAT, у которых одна вспышка приходится на 10 и более часов. Длинные ряды наблюдений и применение описанных выше программ позволяют выявлять такие редко вспыхивающие вращающиеся радиотранзиенты.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. McLaughlin, A. Lyne, D. Lorimer, et al., Nature **439**, 817 (2006). DOI: 10.1038/nature04440.
- [2] С. А. Тюльбашев, В. С. Тюльбашев, В. М. Малофеев и др., Астрон. Журн. **95**, 68 (2018). DOI: 10.1134/S1063772918010079.
- [3] S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. M. Malofeev, A & A **618**, A70 (2018a). DOI: 10.1051/0004-6361/201833102.

- [4] P. Weltevrede, B. W. Stappers, J. M. Rankin, G. A. E. Wright, *ApJ* **645**, L149 (2006). DOI: 10.1086/506346.
- [5] B. Zhang, J. Gil, J. Dyks, *MNRAS* **374**, 1103 (2007). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11226.x.
- [6] D. Backer, *Nature* **228**, 42 (1970). DOI: 10.1038/228042a0.
- [7] V. Gajjar, PhD thesis, 2014. <https://arxiv.org/abs/1706.05407>.
- [8] С. А. Тюльбашев, В. С. Тюльбашев, М. А. Китаева и др., *Астрон. Журн.* **94**, 837 (2017). DOI: 10.1134/S1063772917100109.
- [9] Д. А. Теплых, В. М. Малофеев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **46**(12), 18 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619120030.
- [10] X.-D. Li, *ApJ* **646**, L139 (2006). DOI: 10.1086/506962.
- [11] Q. Luo, D. Melrose, *MNRAS* **378**, 1481 (2007). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2007.11889.x.
- [12] С. А. Тюльбашев, В. С. Тюльбашев, В. В. Орешко, С. В. Логвиненко, *Астрон. Журн.* **93**, 177 (2016). DOI: 10.1134/S1063772916020128.
- [13] J. Cordes, T. Lazio, NE2001. II. Using radio propagation data to construct a model for the Galactic distribution of free electrons, *ArXiv e-prints*, 2002 [arXiv:astro-ph/0301598].
- [14] S. Burke-Spolaor, M. Bailes, *MNRAS* **402**, 855 (2010). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15965.x.

Поступила в редакцию 14 июля 2020 г.

После доработки 22 октября 2020 г.

Принята к публикации 23 октября 2020 г.