

Синхронизация часов станций с использованием наблюдений пульсара в Крабовидной туманности

© С. Л. Курдубов, Д. А. Маршалов, А. Е. Мельников, И. А. Безруков, Е. В. Носов, И. С. Гаязов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Настоящая работа посвящена исследованию возможности осуществления высокоточной синхронизации удаленных часов на основе РСДБ-наблюдений гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности. На основе проведенного анализа публикаций с результатами наблюдений PSR B0531+21 теоретически показана возможность использования этих импульсов для решения задачи синхронизации.

В работе предложена методика обработки гигантских импульсов пульсара PSR B0531+21, обеспечивающая высокоточную синхронизацию часов удаленных пунктов наблюдений. Запланирован и проведен специальный сеанс наблюдений на 5 радиотелескопах РСДБ-сети «Квазар-КВО» в L-, S- и X-диапазонах частот. В соответствии с предлагаемым алгоритмом была выполнена обработка данных наблюдений. Произведено когерентное исключение влияния межзвездной среды с уточнением параметра ее дисперсии. Выполнен поиск гигантских импульсов в режиме обработки записей с отдельных радиотелескопов и последующее совместное определение разности моментов прихода импульсов на радиотелескопы методом кросс-корреляции.

Была успешно апробирована предлагаемая методика синхронизации. В результате обработки данных наблюдений были задетектированы гигантские импульсы в L- и S-диапазонах частот. Среднее число детектируемых импульсов в L-диапазоне на радиотелескопах РТ-32 составило 36 импульсов в минуту и 12 импульсов в минуту в S-диапазоне на радиотелескопах РТ-13 соответственно. По мощным импульсам получены оценки величины межзвездной дисперсии. В результате кросс-корреляции сигналов отдельных импульсов с разных радиотелескопов вычислены расхождения часов станций. Проведена оценка точности предлагаемого метода синхронизации часов.

Экспериментально показана принципиальная возможность осуществления синхронизации часов с помощью наблюдений гигантских импульсов пульсара.

Ключевые слова: пульсар, PSR B0531+21, гигантские импульсы, синхронизация часов, компенсация дисперсии.

Контакты для связи: Курдубов Сергей Леонидович (kst@iaaras.ru).

Для цитирования: Курдубов С. Л., Маршалов Д. А., Мельников А. Е., Безруков И. А., Носов Е. В., Гаязов И. С. Синхронизация часов станций с использованием наблюдений пульсара в Крабовидной туманности // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 62. С. 15–20.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.62.15-20>

Synchronization of Station Clocks by Observing the Crab Nebula Pulsar

S. L. Kurdubov, D. A. Marshalov, A. E. Melnikov, I. A. Bezrukov, E. V. Nosov, I. S. Gayazov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

This work is devoted to the study of the possibility of high-precision synchronization of remote clocks based on VLBI observations of giant pulses (GR) from a pulsar in the Crab Nebula. Based on the analysis of past observations of PSR B0531+21, the possibility of using these pulses for solving the synchronization problem is theoretically shown.

The paper proposes an algorithm for observing and processing PSR B0531+21 pulsar giant pulses, which provides high-precision synchronization of remote observation sites. A special observation session was planned and carried out on 5 radio telescopes of the “Quasar” VLBI network in the L, S and X frequency bands. Observation data processing was performed in accordance with the proposed algorithm. A coherent elimination of the influence of the interstellar medium was carried out with a refinement of its dispersion parameter. A search for giant pulses was performed in the mode of processing records from individual radio telescopes and the subsequent joint determination of the time difference of pulses arrival at radio telescopes by the cross-correlation method.

The proposed synchronization technique was successfully tested. As a result of processing the observational data, giant pulses were detected in the L and S frequency bands. The average number of detected pulses on the RT-32 radio telescopes in L band was 36 pulses per minute and 12 pulses per minute on RT-13 radio telescopes in S band, respectively. Estimates of the interstellar dispersion are obtained from powerful pulses. As a result of cross-correlation of signals of individual pulses from different radio telescopes, the discrepancies of the station clocks were calculated. The accuracy of the proposed clock synchronization method is estimated. The fundamental possibility of synchronizing clocks by observing giant pulses from a pulsar has been shown experimentally.

Keywords: pulsar, PSR B0531 + 21, giant pulses, clock synchronization, dispersion compensation.

Contacts: Sergey L. Kurdubov (ksl@iaaras.ru).

For citation: Kurdubov S. L., Marshalov D. A., Melnikov A. E., Bezrukov I. A., Nosov E. V., Gayazov I. S. Synchronization of station clocks by observing the Crab Nebula pulsar // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 62. P. 15–20. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.62.15-20>

Введение

В настоящее время системы и комплексы средств фундаментального и прикладного обеспечения используют высокоточные часы для формирования и распределения шкал времени. При этом используемые часы, как правило, значительно удалены друг от друга и периодически нуждаются в синхронизации. Существует несколько способов независимой синхронизации удаленных часов. Наиболее широко распространённым способом высокоточной синхронизации в настоящее время является использование ГНСС. Например, для передачи единиц времени, частоты и национальной шкалы времени UTC (SU) от Государственного первичного эталона РФ используется система ГЛОНАСС (ГОСТ Р 8.930-2016). Применяются также методы двухпутевой синхронизации с вариациями использования среды передачи данных — через спутниковый канал ([Kirchner, 1991](#)), по оптическим линиям связи ([Wang et al., 2020](#)), сетевой инфраструктуре ([Wlostowski T. et al., 2011](#)), по радиочастотным кабелям ([Prochazka et al., 2012](#)).

Однако, существуют также методы синхронизации, использующие радиосигналы квазаров ([Царук и др., 2019](#)) и пульсаров ([Жаров и др., 2019](#)). Первый базируется на методе РСДБ, в основе второго — регулярный когерентный прием сигналов от нейтронных звезд — т. н. «пульсарный тайминг». Известны и ограничения рассматриваемых методов. Для реализации РСДБ-метода необходимы предварительная синхронизация часов станций, передача больших объемов данных и наличие высокопроизводительного вычислительного центра. Пульсарный тайминг может быть реализован только на ограниченном числе крупных радиотелескопов, оснащенных специализированным оборудованием.

Альтернативная технология синхронизации часов, лишенная указанных недостатков, может быть реализована по наблюдениям гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности. Мощности сигналов гигантских импульсов достаточно для уверенной их регистрации на небольших радиотелескопах. Далее в работе рассмотрены особенности реализации данной технологии и представлены экспериментальные результаты.

Гигантские Импульсы пульсара B0531+21

Пульсар в Крабовидной туманности был открыт на 90-метровом телескопе Грин Бэнк в диапазоне частот 110–115 МГц в 1968 г. и является

одним из первых известных пульсаров ([Staelin, Reifenstein, 1968](#)). Этот пульсар излучает в радиодиапазоне регулярные импульсы, периодичность которых составляет около 33 мс. Кроме того, в сигнале B0531+21 наблюдаются нерегулярные «гигантские импульсы». Гигантские импульсы (ГИ), регистрируемые на разных частотах, совпадают по времени с несколькими фазами основного периода пульсара ([Hankins et al., 2015](#)). Эти импульсы связаны с периодом пульсара, но возникают не в каждый период, а с пропуском случайного числа периодов. Яркость отдельных ГИ может достигать единиц МЯн, а длительность составляет от единиц до десятков мкс ([Majid et al., 2011](#)). В 1999–2007 г. ГИ были зарегистрированы в широком диапазоне частот с помощью наблюдений на крупнейших радиотелескопах. Наблюдения ([Hankins, Rickett, 2003](#)) на частоте 5.5 ГГц были одними из первых, которые благодаря широкой полосе 0.5 ГГц и высокому временному разрешению в 0.25 мкс, позволили обнаружить последовательность ГИ в Крабовидной туманности. Анализ проведенных наблюдений из обзора в ([Majid et al., 2011](#)) показывает, что мощности сигналов гигантских импульсов достаточно для уверенной регистрации на небольших радиотелескопах, для которых эквивалентная плотность потока системы (SEFD) составляет порядка 1000 Ян.

Дисперсия в межзвездной среде

Короткие ГИ пульсара при распространении в межзвездной среде претерпевают искажения. При прохождении через плазму низкие частоты задерживаются сильнее, а высокие — меньше, тем самым возникает так называемая дисперсия сигнала. В пульсарной астрономии ([Roberts et al., 2005](#)) дисперсия сигнала в межзвездной среде характеризуется мерой дисперсии DM (dispersion measure), которая зависит от расстояния до объекта и плотности электронов вдоль луча зрения. Для известных пульсаров средние значения DM представлены в каталогах ([Lyne et al., 1993](#)). Длительные наблюдения пульсаров показывают заметную переменность величины DM . Доступная информация в каталогах обновляется с задержкой до нескольких месяцев, таким образом, при проведении оперативных наблюдений необходимо уточнять величину DM на момент наблюдений.

Излученный пульсаром ГИ малой длительности оказывается растянут во времени при приеме и не может быть детектирован амплитудным

детектором. Поэтому на этапе предварительной обработки еще до детектирования ГИ применяют методы когерентной и некогерентной компенсации дисперсии ([Hankins et al., 1975](#)). В дальнейшем мы остановимся более подробно на реализации когерентной компенсации дисперсии при обработке наших данных.

Методика синхронизации с помощью ГИ

Суть предлагаемого метода синхронизации удаленных часов базируется на уникальных характеристиках гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности. Форма сигнала и порядок появления ГИ представляет собой неповторяющуюся уникальную последовательность. Мощности сигналов ГИ достаточно для их регистрации на небольших радиотелескопах. Последующая корреляционная обработка записей сигналов одиночных импульсов с различных радиотелескопов позволяет достичь точности измерения задержки прихода ГИ сравнимой с точностью задержек при РСДБ-наблюдениях квазаров.

Предполагается, что одна из станций является частью РСДБ-сети с хорошо известными координатами радиотелескопа (с см точностью) и ведется опорная шкала времени. При этом для синхронизируемого пункта также требуется знание координат радиотелескопа и наличие оборудования, обеспечивающего прием, регистрацию и передачу записанных данных.

Предлагаемая методика может быть представлена следующей последовательностью действий:

1. Проведение наблюдения пульсара PSR B0531+21 с помощью широкополосных РСДБ-средств регистрации (большая ширина полосы позволяет детектировать более слабые импульсы);
2. Проведение когерентной компенсации дисперсии по табличному значению DM ;
3. Грубый поиск ярких импульсов в сигнале после учета дисперсии;
4. Подбор оптимального значения меры дисперсии по наиболее ярким найденным импульсам;
5. Переобработка данных с найденным для каждого сеанса наблюдений точным значением меры дисперсии, детектирование всех импульсов;
6. По найденным моментам прихода ГИ на различные радиотелескопы осуществляется предварительная синхронизация по сопоставлению последовательностей зарегистрированных импульсов;
7. Точная синхронизация осуществляется путём кросс-корреляции сигналов отдельных ГИ, записанных на различных телескопах и сопоставленных в п. 6.

Экспериментальные наблюдения на комплексе «Квазар-КВО»

Для апробации предлагаемой методики были проведены наблюдения пульсара PSR B0531+21 с использованием радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 сети «Квазар-КВО» в L-, S- и X-диапазонах частот. В полчасовом сеансе 3 марта 2021 RUP090 участвовали радиотелескопы РТ-32 («Светлое» и «Бадарь») и РТ-13 («Светлое», «Бадарь», «Зеленчукская»). Для регистрации сигналов на РТ-32 в L-диапазоне использовались штатные средства РСДБ-наблюдений СПС P1002M ([Гренков и др., 2010](#)) и Mark 5b+ ([Whitney, 2007](#)). Регистрировались сигналы в 16 частотных каналах, формирующих непрерывную полосу 128 МГц с центральной частотой 1653.5 МГц, в левой и правой круговых поляризациях. На РТ-13 регистрация велась в двух частотных каналах шириной по 512 МГц в S- и X-диапазонах, с центральными частотами 2406.3 и 8847.6 МГц с помощью широкополосных систем ШСПС ([Маршалов и др., 2017](#)) (обсерватории «Бадарь» и «Зеленчукская») и МСПС ([Nosov et al., 2021](#)) (обсерватория «Светлое»). Для записи данных использовалась разработанная в ИПА РАН высокоскоростная система буферизации и передачи данных ([Безруков и др., 2018](#)).

Обработка наблюдений выполнялась на вычислительном кластере ИПА РАН с помощью специально созданного пакета программ на языке Python.

Обработка наблюдений

В соответствии с предлагаемой методикой на первом этапе выполнялась когерентная компенсация дисперсии в межзвездной среде. Когерентная компенсация выполняется в спектральной области, путём домножения спектра сигнала на фазовый множитель следующего вида $-ipk10^{15}DMv^2/[v_0^2(v_0 + v)]$, где v — частота сигнала, v_0 — центральная частота, $k = 4148808$, DM — мера дисперсии межзвездной среды. Для наблюдений на РТ-32 предварительно производился синтез полосы частот в 128 МГц путём объединения данных из 8-частотных каналов в каждой поляризации отдельно.

Важным параметром при таком преобразовании является ширина временного окна. Его ширина выбиралась таким образом, чтобы в него помещалась удвоенная ширина импульса после прохождения межзвездной среды. Для полос частот выбранных диапазонов и значения меры дисперсии пульсара оценка наблюдаемой ширины мгновенного импульса в соответствии с ([Van Straten, Bailes, 2011](#)) составляет: 32 мс для — L-, 16 мс — для S-, и 1.5 мс — для X-диапазонов частот соответственно. С учетом этого временные окна были выбраны следующим образом: 65 мс —

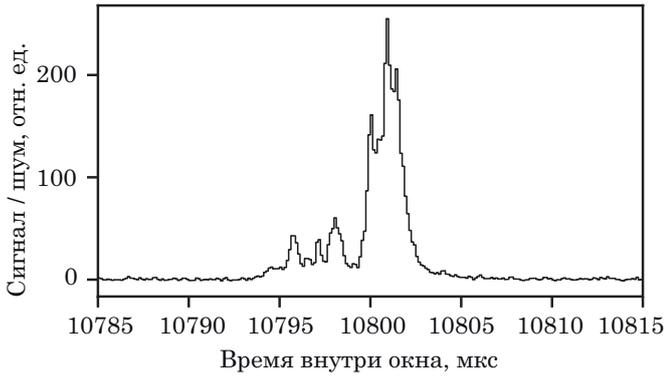


Рис. 1. Гигантский импульс пульсара после компенсации дисперсии межзвездной среды и суммирования частотных каналов в S-диапазоне частот с временным разрешением 0.125 мкс на станции «Бадарь» РТ-13

для синтезированной полосы 128 МГц L-диапазона, и 33 мс — для 512 МГц полосы S-диапазона частот.

Для сигналов S- и L-диапазонов частот быстрое преобразование Фурье и умножение на фазовый множитель выполнялось с 2^{23} отсчетами данных, которые соответствуют выбранным выше временным окнам. Затем по полученным спектрам сигналов с уже скомпенсированной межзвездной дисперсией строились спектрограммы с шагом по времени 16 мкс или 2^{12} отсчетов, что примерно соответствует ширине импульса. Далее производилось перенормирование амплитуд сигнала в частотных каналах полученной спектрограммы для учета частотной характеристики канала и минимизации влияния помех. На первом этапе на выбранном интервале рассчитывался средний профиль спектра (искомая частотная характеристика), который использовался для денормировки каждого частотного канала. На втором этапе, после денормировки для каждого канала вычислялась дисперсия сигнала, которая затем использовалась как весовой коэффициент. В результате частотные каналы, в которых присутствуют помехи и имеют наибольшую дисперсию, получают минимальный вес (Roberts, 2005). После этого выполнялось суммирование частотных каналов и получение временного ряда, содержащего гигантские импульсы, с выбранным временным разрешением. Пример ГИ в полученном временном ряду представлен на рис. 1.

В качестве критерия для обнаружения гигантских импульсов использовалось одновременное выполнение двух условий: наличие импульса в левой и правой круговых поляризациях на каждом радиотелескопе (совпадение локальных максимумов) и превышение сигналом порога в 6-сигм. Для всех обнаруженных ГИ, удовлетворяющих этому критерию, в файле сохраняются моменты прихода импульса с указанием времени от начала скана, отношение сигнал / шум, длительность.

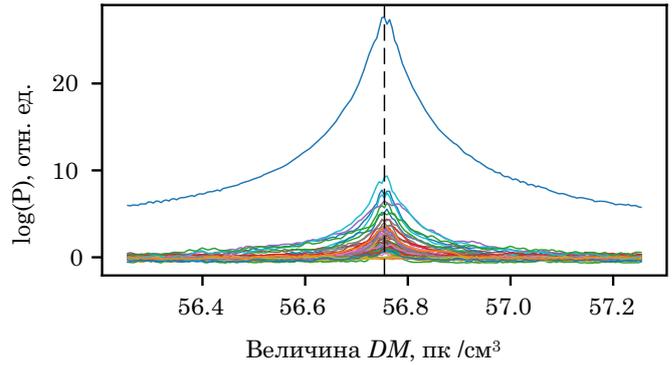


Рис. 2. Зависимость мощности гигантских импульсов пульсара от величины меры дисперсии межзвездной среды в L-диапазоне частот для обсерватории «Бадарь»

После предварительной обработки осуществляется поиск точного значения меры дисперсии для каждой записи данных. Для выбранных наиболее ярких импульсов, найденных в пределах скана, производится оптимизация параметра меры дисперсии DM по критерию максимизации мощности импульсов. Используется перебор DM с грубой (вначале) и мелкой сеткой вблизи максимума. Пример зависимости мощности детектируемых импульсов от величины DM показан на рис. 2. Предварительное значение дисперсии, взятое на 15 марта 2021 г. из (Lyne, 1993), было 56.7637 пк/см³, найденное оптимальное значение DM составило 56.754394 пк/см³.

При проведении регулярных наблюдений величина DM может уточняться каждый раз, при регистрации ярких импульсов, что позволит вести непрерывную шкалу DM и тем самым осуществлять мониторинг состояния межзвездной среды вдоль луча зрения.

После уточнения величины меры дисперсии поиск импульсов выполняется заново, поскольку слабые импульсы могли быть пропущены из-за неточного значения DM , и обновляются файлы найденных импульсов. Для последующей высокоточной синхронизации методом кросс-корреляции сохраняются временные реализации сигнала с исходным временным разрешением после когерентной компенсации дисперсии вблизи моментов прихода ГИ. При этом объем сохраняемых данных для каждой станции составляет порядка 100 Кбайт на импульс для интервалов времени в 30 мкс.

В результате за время наблюдений в 20 мин было задетектировано 717 импульсов в L-диапазоне на РТ-32 и 250 импульсов в S-диапазоне на РТ-13.

Синхронизация часов станций

Используя полученные временные ряды моментов прихода ГИ, можно осуществить грубую (с точностью порядка ширины импульса ~ 10 мкс) синхронизацию часов удаленных станций. На

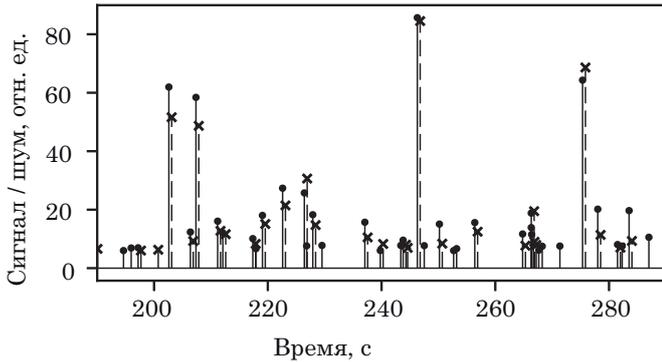


Рис. 3. Распределение зарегистрированных ГИ по времени прихода с 190 по 300 сек записи RUP090 на радиотелескопы РТ-32 обсерваторий «Бадарь» и «Светлое». Для наилучшего восприятия в данные из обсерватории «Бадарь» внесена задержка в 500 мс

рис. 3 показаны последовательности ГИ, зарегистрированных на радиотелескопах РТ-32 обсерваторий «Светлое» и «Бадарь» в L-диапазоне частот. Так как наблюдения проводились с помощью синхронизированного РСДБ-оборудования, полученные последовательности импульсов совпадают с указанной точностью. Для наглядности ряд данных из обсерватории «Бадарь» был сдвинут на 0.5 с.

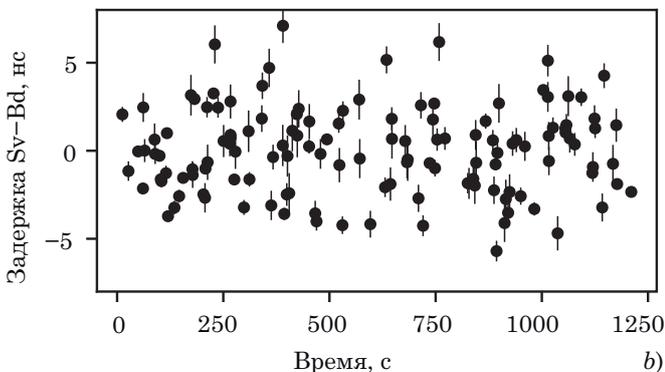
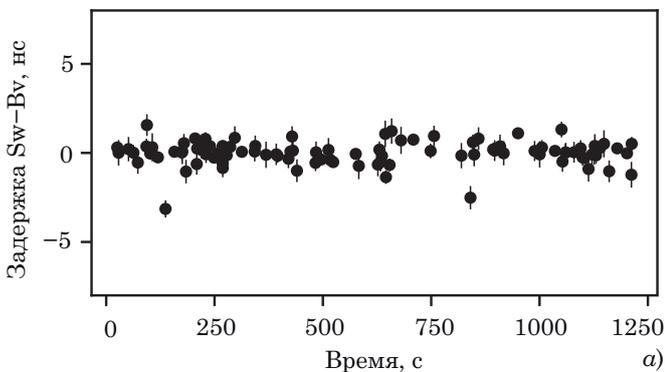


Рис. 4. Полученные временные задержки прихода импульса на телескопы обсерваторий «Светлое» и «Бадарь» РТ-13 в S-диапазоне (a) и РТ-32 в L-диапазоне (b) в результате корреляционной обработки за все время сеанса наблюдений

Можно отметить, что последовательность моментов прихода импульсов и их интенсивности носит нерегулярный характер на интервалах времени порядка минут, что позволяет исключить возможную неоднозначность во время предварительной синхронизации.

Для точной синхронизации используются сохраненные сигналы импульсов с исходным временным разрешением после учета дисперсии. Поиск точной временной задержки прихода импульса на разные станции осуществляется методом кросс-корреляции. При этом учитывается геометрическое расстояние между станциями и модель вращения Земли.

Для всех обнаруженных импульсов была осуществлена корреляционная обработка. В L-диапазоне частот из общего числа 717 задетектированных ГИ для 294 импульсов были получены точные значения задержек по положению максимума кросскорреляционной функции. Медианная ошибка определения задержки составила 0.58 нс, максимальная ошибка — 1.2 нс, минимальная ошибка — 20 пс. В S-диапазоне частот из общего числа 250 найденных импульсов были получены точные значения задержек для 99 импульсов, при этом медианная, максимальная и минимальная ошибки определения задержки составили 0.24 нс, 0.39 нс и 25 пс соответственно.

Величины полученных поправок к геометрической модели разностей прихода сигнала на два радиотелескопа обсерваторий «Светлое» и «Бадарь» после учета линейного хода приведены на рис. 4. СКО измеренных задержек составило 0.68 нс и 2.4 нс в S- и L-диапазонах соответственно. Можно заметить, что величина СКО полученных задержек в несколько раз превосходит величину ошибок отдельных задержек, что может быть объяснено переменным влиянием ионосферы.

Заключение

В работе представлена методика синхронизации часов удалённых станций по наблюдениям ГИ пульсара в Крабовидной туманности. Предлагаемая методика позволяет осуществлять как грубую синхронизацию по последовательностям принятых импульсов, так и высокоточную, по кросс-корреляции сигналов отдельных импульсов.

Методика была успешно апробирована на реальных наблюдениях с использованием радиотелескопов РТ-32 и РТ-13 обсерваторий «Бадарь», «Светлое» и «Зеленчукская» в L-, S- и X-диапазонах частот. В первых двух диапазонах были успешно задетектированы гигантские импульсы. Среднее число детектируемых импульсов в L-диапазоне на радиотелескопах РТ-32 составило 36 и 12 импульсов в минуту в S-диапазоне для радиотелескопов РТ-13. По мощным импульсам получена оценка величины межзвездной дисперсии

в $56.754394 \text{ пк/см}^3$ на момент наблюдений. Для 294 и 99 импульсов получены кросскорреляционные отклики и вычислены точные значения задержек между шкалами времени станций РТ-32 и РТ-13 соответственно. Ошибки задержек для наиболее ярких импульсов составляют порядка нескольких десятков пс. Можно особо отметить, что в отличие от классического способа синхронизации по РСДБ-наблюдениям, для реализации предлагаемого метода достаточно передавать на коррелятор небольшой объем наблюдательных данных, который не превышает сотни килобайт на импульс.

Таким образом, экспериментально показана принципиальная возможность осуществления синхронизации часов с помощью наблюдений ГИ пульсара.

Целесообразно провести серию регулярных наблюдений ГИ для дальнейшего изучения аспектов предлагаемой методики, таких как задержка в среде распространения, сдвиги шкал между частотными диапазонами и др. Регистрация последовательностей ГИ является независимой шкалой времени и может быть использована для калибровки различных инструментальных задержек в радиотелескопах.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам обсерваторий «Светлое», «Бадарь» и «Зеленчукская» за участие в проведении сеанса наблюдений.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квazar-КВО» и ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрономии и космической геодезии».

Литература

Безруков И. А., Сальников А. И., Яковлев В. А., Вылегжанин А. В. Исследование производительности дисковой подсистемы системы буферизации и передачи данных // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 4. С. 5–10. doi: 10.1134/S0032816218040183.

ГОСТ Р 8.930-2016 Передача единиц времени, частоты и национальной шкалы времени UTC(SU) от Государственного первичного эталона Российской Федерации с использованием систем ГЛОНАСС.

Гренков С. А., Носов Е. В., Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. Цифровая радиоинтерферометрическая система преобразования сигналов // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 5. С. 60–66.

Жаров В. Е., Орешко В. В., Потапов В. А. и др. Пульсарная шкала времени // Астрономический журнал. 2019. Т. 96. № 2. С. 120–143.

Маршалов Д. А., Носов Е. В., Гренков С. А. и др. Технический облик многофункциональной системы преобразования сигналов для радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 43. С. 95–103.

Царук А. А., Иванов Д. В., Жуков Е. Т., Карпичев А. С. Сравнение шкал времени и частот с помощью радиоинтерферометра нового поколения // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 50. С. 79–86.

Hankins T. H., Kern J. S., Weatherall J. C., Eilek J. A. Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar // Nature. 2003. Vol. 422, no. 6928. P. 141–143. doi: 10.1038/nature01477.

Hankins T. H., Rickett B. J. Pulsar signal processing // Methods in computational physics: advances in research and applications, Radio Astronomy. 1975. Vol. 14, P. 55–129.

Hankins T. H., Jones G., Eilek J. A. The Crab pulsar at centimeter wavelengths. I. Ensemble Characteristics // The Astrophysical Journal. 2015. Vol. 802, no. 2. doi: 10.1088/0004-637X/802/2/130.

Kirchner D. Two-way time transfer via communication satellites, in Proceedings of the IEEE. 1991. Vol. 79, no. 7. P. 983–990. doi: 10.1109/5.84975.

Lyne A. G., Pritchard R. S., Graham S. F. 23 years of Crab pulsar rotational history // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1993. Vol. 265. P. 1003–1012. doi: 10.1093/mnras/265.4.1003.

Majid W. A., Naudet C. J., Lowe S. T., Kuiper T. B. H. Statistical studies of giant pulse emission from the Crab pulsar // The Astrophysical Journal. 2011. Vol. 741, no. 1. doi: 10.1088/0004-637X/741/1/53.

Mikami R., Asano K., Tanaka S. J., et al. Wide-band spectra of giant radio pulses from the Crab pulsar // The Astrophysical Journal. 2016. Vol. 832, no. 2. doi: 10.3847/0004-637X/832/2/212.

Nosov E., Marshalov D., Fedotov L., Sheynman Y. Multifunctional digital backend for Quasar VLBI network // Journal of Instrumentation. 2021. Vol. 16, no. 5. doi: 10.1088/1748-0221/16/05/P05003.

Prochazka I., Kodet J., Panek P. Note: electronic circuit for two-way time transfer via a single coaxial cable with picosecond accuracy and precision. The Review of scientific instruments. 2012. doi: 10.1063/1.4766335.

Roberts N., Lorimer D. R., Kramer M., et al. Handbook of pulsar astronomy // Cambridge University Press Cambridge. 2005. 301 p.

Staelin D. H., Reifenstein E. C. Pulsating radio sources near the Crab Nebula // Science. 1968. Vol. 162, no. 3861. P. 1481–1483. doi: 10.1126/science.162.3861.1481.

Van Straten W., Bailes M. DSPSR: Digital signal processing software for pulsar astronomy // Publications of the Astronomical Society of Australia. 2011. Vol. 28, no. 1. P. 1–14. doi: 10.1071/AS10021.

Wang J., Yue C., Xi Y. Fiber-optic joint time and frequency transfer with the same wavelength // Opt. Lett. 2019. No. 02045. P. 208–211.

Whitney A. R. The Mark 5 VLBI data system // Proceedings of the 18th European VLBI for geodesy and astrometry work meeting. 2007. no. 79. P. 33.

Wlostowski T., Serrano J., Sanchez P. A., et al. Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network. Warsaw University of Technology, 2011. 98 p.