

## Влияние радиометрического шума на точность хронометрирования пульсаров

Н. Ю. Сергеева<sup>1,a</sup>, М. С. Пширков<sup>1,2,3,b</sup>, Ю. П. Илясов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).  
Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13.

<sup>2</sup> Пушчинская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра Физического института имени П. Н. Лебедева. Россия, 142290, Московская обл., г. Пушино, ПРАО АКЦ ФИАН.

<sup>3</sup> Институт ядерных исследований РАН. Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, д. 7а.  
E-mail: <sup>a</sup> nadezhda.korotkova@gmail.com, <sup>b</sup> pshirkov@prao.ru

Статья поступила 04.09.2012, подписана в печать 14.11.2012.

Исследуется проблема влияния характеристик радиотелескопов на прецизионное хронометрирование пульсаров. Показано, что существует четкая зависимость между качеством многолетних временных рядов пульсарных наблюдений, инструментальной погрешностью наблюдений и спектральной плотностью потока излучения пульсара. Наличие этой корреляции приводит к тому, что для исследования собственных шумов большинства пульсаров и шумов, связанных с распространением сигнала в межзвездной среде от пульсара к Солнечной системе, современным радиотелескопам все еще не хватает чувствительности. Сделана оценка, что радиотелескоп следующего поколения SKA (Square Kilometer Array) будет обладать настолько низкой инструментальной погрешностью, что можно ожидать, что она больше не будет определять качество временных рядов.

*Ключевые слова:* пульсары, хронометрирование, прецизионная астрометрия.

УДК: 520.272, 524.354.4, 521.91. PACS: 95.10.Jk, 97.60.Gb, 95.55.Jz.

### Введение

Пульсары регулярно испускают радиопульсы в течение длительных интервалов времени — до миллиардов лет. Стабильность вращения секундных пульсаров превосходит стабильность вращения Земли на несколько порядков, в связи с этим первые предложения рассматривать пульсары в качестве опорных часов были в 1984 г. [1].

Через несколько лет после открытия в 1982 г. первого миллисекундного пульсара было показано [2], что стабильность вращения таких объектов сравнима со стабильностью атомных стандартов частоты на временных интервалах более 1 года. Это позволяет рассматривать пульсары как уникальные космические часы с огромной продолжительностью жизни, удаленные от Солнечной системы и не подверженные влиянию эффектов, единых для всех наблюдателей на Земле.

Благодаря этим свойствам пульсаров возможно введение новой астрономической групповой шкалы времени, основанной на наблюдениях группы (ансамбля) миллисекундных пульсаров, аналогично Международной атомной шкале времени TAI, введенной в 1971 г., которая формируется по показаниям около 200 атомных стандартов частоты, расположенных в лабораториях всего мира.

В настоящее время показано, что с помощью такой шкалы возможно будет контролировать стабильность атомной шкалы на длительных интервалах — от года и более [3]. Кроме того, повышение точности хронометрирования пульсаров до 1–10 нс на годовом интервале важно и для вопросов фундаментальной физики: так, например, это позволит обнаружить гравитационные волны и оценить плотность

гравитационно-волнового фона в области сверхнизких частот ( $10^{-12}$  Гц  $< f_{gw} < 10^{-7}$  Гц) [4–7].

### 1. Инструменты

Программы по хронометрированию пульсаров ведутся во всех крупных радиоастрономических обсерваториях мира. Сформированы так называемые сети реперных пульсаров (Pulsar Timing Arrays) в Европе, Австралии, США, России, в которые входят более 30 миллисекундных пульсаров, наблюдающихся регулярно.

Австралийский ансамбль обсерватории Парк (Parkes Pulsar Timing Array, PPTA) включает 20 пульсаров. Наблюдения европейского ансамбля (European Pulsar Timing Array, EPTA), в который входят 24 пульсара, ведутся в пяти обсерваториях: Джодрел-Бэнк (Великобритания), Вестерборк (Нидерланды), Нансе (Франция), Эффельсберг (Германия) и Сардиния (Италия); американский ансамбль (NANOGrav — The North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves) состоит из 21 пульсара и наблюдается в обсерваториях Аресибо (Пуэрто-Рико) и Грин-Бэнк (США) [7].

В Калязине (Россия) мониторинг 8 пульсаров ведется с 1995 г. на частоте 600 МГц [8].

Основные характеристики радиотелескопов, использующихся в этих обсерваториях, приведены в табл. 1.

### 2. Принципы пульсарного тайминга

Во время вращения пульсара заряженные частицы ускоряются вдоль линий магнитосферы нейтронной звезды, испуская при этом электромагнитное излучение. Поскольку звезда вращается, на Земле это излучение принимается в виде периодических радиопульсов

Таблица 1

Параметры радиотелескопов, ведущих регулярное наблюдение пульсаров

Радиотелескоп	Основная частота, ГГц	Полоса частот, МГц	Диаметр, м	Эффективная площадь, м <sup>2</sup>	Шумовая температура, К
Калязин	0.6	6.4	64	1 830	80
Паркс	1.4	256	64	1 930	25
Аресибо	1.4	100	305	36 510	30
Грин-Бэнк	1.4	650	100	5 500	20
Эффельсберг	1.4	100	100	4 240	24
Джодрелл-Бэнк	1.4	100	100	4 320	30
Нансе	1.0–3.5	128	94	3 330	35
Сардиния	1.4	100 и 500	64	1 930	25
Вестерборк	1.1–1.8	160	96	3 910	29

с частотой, равной частоте вращения звезды. Тайминг, или хронометрирование, включает в себя точное определение момента прихода импульса (МПИ) пульсара в данную точку на Земле с последующей редуцией в барицентр Солнечной системы. Топоцентрические МПИ обычно имеют привязку к локальному стандарту времени.

Одновременно с наблюдаемыми рассчитываются ожидаемые МПИ в соответствии с принятой моделью тайминга (периода пульсара и его производных, координат, меры дисперсии и т. д.). Разницу между предвычисленным и наблюдаемым моментом прихода импульса называют его остаточным отклонением (ОУ МПИ).

В идеальном случае при корректно выбранной модели для тайминга ОУ МПИ должны иметь среднее значение, равное нулю, и гауссово распределение. Присутствие в рядах каких-либо трендов говорит о существовании процессов, неучтенных в принятой модели.

Основной характеристикой временных рядов ОУ МПИ является среднеквадратичное отклонение (СКО) ряда, которое, как правило, рассчитывается и публикуется для нескольких последних лет наблюдений. Групповая шкала пульсарного времени формируется по ОУ МПИ группы пульсаров. ОУ МПИ групповой шкалы рассчитываются из ОУ МПИ одиночных пульсаров при помощи специального алгоритма усреднения.

### 3. Погрешности измерений

Для успешного тайминга необходима высокая точность определения МПИ, которая в основном определяется отношением сигнал/шум в импульсе. Большой вклад в СКО временных рядов ОУ МПИ вносят погрешности измерения МПИ пульсара  $\sigma_{\text{ТОА}}$ . В отличие от СКО, характеризующего длинный временной ряд,  $\sigma_{\text{ТОА}}$  — характеристика одиночного измерения, зависящая как от свойств самого пульсара (спектральной плотности потока и периода), так и от параметров радиотелескопа, на котором проводятся измерения [9, 10]. Справедлива [11] следующая оценка погрешности определения МПИ:

$$\sigma_{\text{ТОА}} = \frac{T_{\text{sys}} W}{S_{\text{psr}} G \sqrt{\Delta\nu t_{\text{int}}}} \sqrt{\frac{W}{P}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{sys}}$  — шумовая температура антенны в Кельвинах,  $W$  — ширина импульса в миллисекундах,  $P$  — период пульсара в миллисекундах,  $S_{\text{psr}}$  — спектральная плот-

ность потока пульсара на данной частоте в янских,  $G$  — коэффициент усиления,  $\Delta\nu$  — ширина полосы частот,  $t_{\text{int}}$  — время накопления сигнала.

Таким образом, наилучшие результаты дают наблюдения короткопериодических пульсаров с узким профилем ( $W \ll P$ ) и большой плотностью потока при использовании телескопов больших размеров, широкополосных систем регистрации и малозумящих приемников.

Мы провели анализ зависимости опубликованных СКО рядов ОУ МПИ и вычисленной погрешности измерения МПИ для данных, полученных на следующих телескопах: Паркс (Австралия), Калязин (Россия), Эффельсберг (Германия), Нансе (Франция), Вестерборк (Нидерланды), Грин-Бэнк (США) [8, 12–15]. Погрешность измерения МПИ, обусловленная шумами приемной аппаратуры, рассчитывалась по формуле (1), где были использованы стандартные характеристики пульсарных наблюдений:  $W$  считалась равной ширине импульса на 10% максимальной амплитуды [16],  $t_{\text{int}}$  принималось равным 3600 с,  $G = A_{\text{eff}}/k$ , где  $A_{\text{eff}}$  — эффективная площадь антенны,  $k$  — постоянная Больцмана.

Вычисления корреляционных коэффициентов показывают, что СКО заметно зависит от погрешности измерения МПИ  $\sigma_{\text{ТОА}}$  и существует определенная зависимость между СКО и плотностью потока пульсара. Результаты представлены на рис. 1.

Расчеты коэффициентов корреляции  $\text{corr}_2$  между СКО и спектральной плотностью потока показали, что чем больше принимаемый поток излучения, тем лучше определяются МПИ — тем меньше СКО. Кроме того, зависимость наблюдается между СКО ОУ и погрешностью МПИ  $\sigma_{\text{ТОА}}$  практически для всех ансамблей (коэффициент корреляции  $\text{corr}_1$ ). Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Это означает, что большинство погрешностей, вносимые в ОУ МПИ факторами, отличными от шумов приемника (в том числе гравитационно-волновым фоном), вносят значительно меньший вклад, чем инструментальные погрешности, и таким образом их обнаружение может быть затруднено из-за недостаточной чувствительности современных радиотелескопов.

Следует заметить, что на рис. 1 для пульсаров с малым потоком  $\sigma_{\text{ТОА}} > \text{СКО}$ . По-видимому, в этом случае сказываются эффекты усреднения ошибок для большого числа наблюдений. Радиометрическая часть

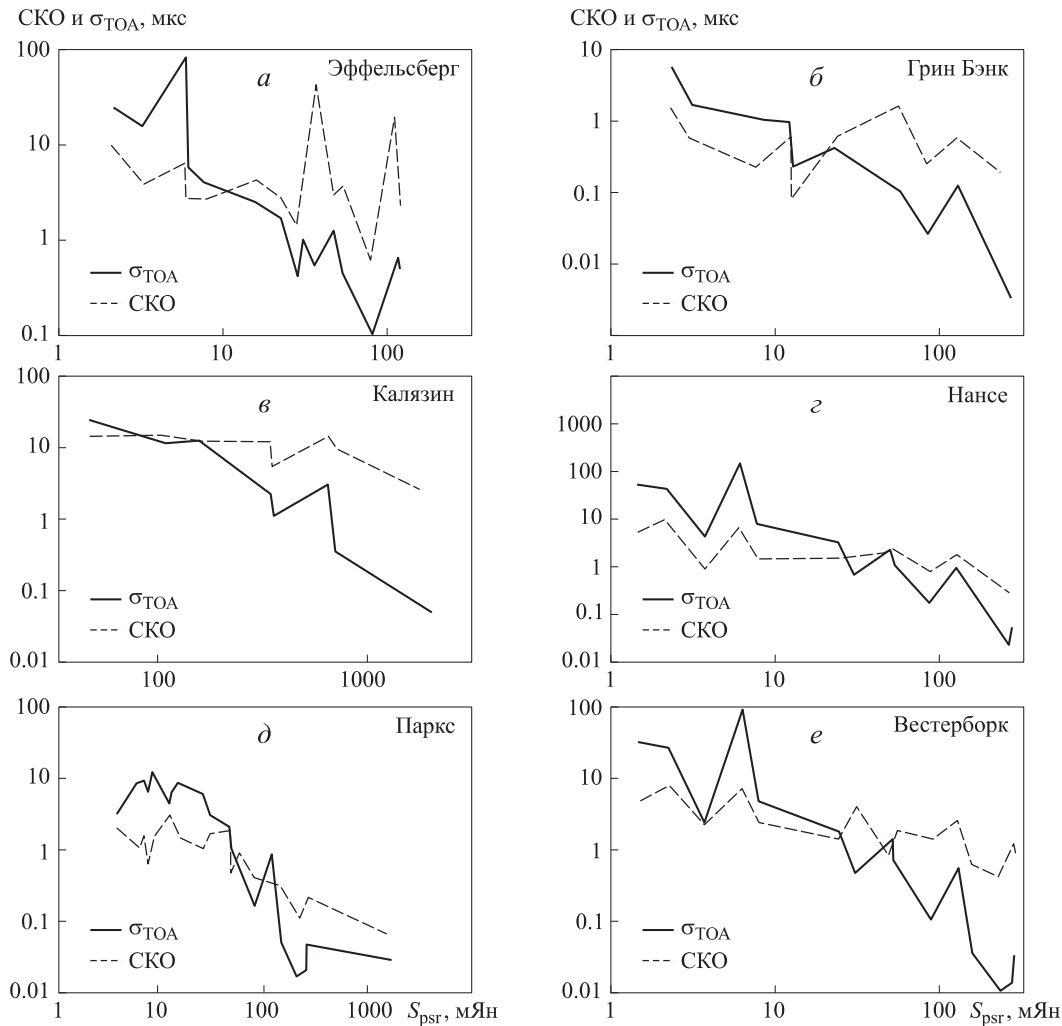


Рис. 1. Кривые зависимости погрешности измерения МПИ (сплошная линия) и СКО рядов остаточных уклонений МПИ  $\sigma_{\text{ТОА}}$  (пунктир) от спектральной плотности потока пульсарного излучения. Наблюдения в Калязине велись на частоте 600 МГц, в остальных обсерваториях — на 1440 МГц

Таблица 2  
**Линейные коэффициенты корреляции между СКО ОУ и погрешностью МПИ ( $\text{corr}_1$ ), СКО ОУ и спектральной плотностью потока ( $\text{corr}_2$ ) для некоторых телескопов, ведущих наблюдения за ансамблями пульсаров**

Радиотелескоп	$\text{corr}_1$	$\text{corr}_2$
Калязин	0.84	-0.79
Паркс	0.87	-0.55
Грин-Бэнк	0.43	-0.10
Эффельсберг	0.23	-0.03
Нансе	0.89	-0.60
Вестерборк	0.82	-0.37

Более низкое значение коэффициента  $\text{corr}_2$  соответствует телескопам со значительной эффективной площадью и меньшей системной шумовой температурой (см. табл. 1).

ошибки МПИ  $\sigma_{\text{ТОА}}$  дает ошибку одного наблюдения, а само значение МПИ рассчитывается сразу по совокупности импульсов, усредненных в условный импульс, который приведен в некоторую реперную точку во времени (обычно совпадающую с началом наблюдений). С другой стороны, роль играют особенности процесса обработки сырых данных с помощью пульсарного программного пакета TEMPO2 [17]. Он включает в себя

процедуру подбора оптимальных параметров пульсара для устранения трендов в рядах остаточных уклонений, причем результат этой процедуры в некоторой степени зависит от последовательности обработки, способа разбиения ряда на отрезки с характерными трендами. При подобном «выравнивании» рядов может происходить искусственное занижение СКО ряда.

Мы считаем, однако, что вопрос о соотношении между  $\sigma_{\text{ТОА}}$  и СКО требует отдельного исследования.

В настоящее время существует проект радиотелескопа эффективной площадью в  $1 \text{ км}^2$  (SKA — Square Kilometer Array), который планируется построить в южном полушарии (в Австралии и ЮАР) и вводить в эксплуатацию с 2016 года. С помощью SKA планируется обнаружение новых пульсаров и работы по пульсарному таймингу. Расчет показывает, что при заявленных параметрах  $A_{\text{eff}} = 10^6 \text{ м}^2$ ,  $\Delta\nu = 500 \text{ МГц}$ ,  $T_{\text{sys}} = 30 \text{ К}$  [18] оценка погрешности МПИ, которые могут быть получены с помощью этого инструмента, приблизительно на 3 порядка меньше современных (рис. 2). Это значит, что инструментальные погрешности рассмотренной природы не будут больше доминировать. На первый план выйдут погрешности, вызванные распространением радиосигнала в межзвездной среде, фазовым дрожани-

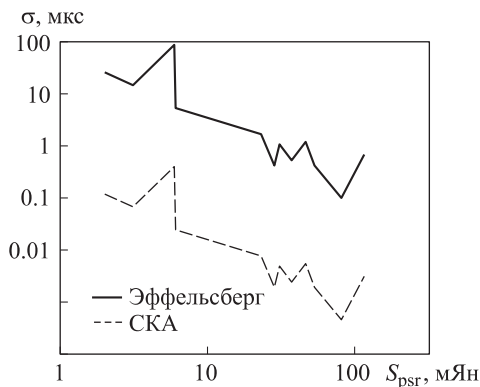


Рис. 2. Кривые зависимости погрешности измерения МПИ  $\sigma_{\text{ТОА}}$  (сплошная линия) от спектральной плотности потока пульсарного излучения для строящегося телескопа SKA на примере пульсаров, наблюдающихся в обсерватории Эффельсберг, Германия. Картина не будет качественно отличаться, если взять любой другой ансамбль

ем сигнала, систематическими ошибками калибровки усиления в приемных устройствах и поляризации [9], а также новыми физическими эффектами, в том числе и влиянием гравитационных волн.

### Заключение

Показано, что СКО остаточных уклонений моментов прихода импульсов коррелирует с погрешностью определения моментов прихода импульса и уменьшается с увеличением принимаемой спектральной плотности потока излучения. Такая зависимость свидетельствует об определяющей роли шумов аппаратуры в наблюдаемых остаточных уклонениях. Современные пульсарные ансамбли позволяют уменьшить инструментальный вклад (его радиометрическую часть) до 60 нс [12], тем самым увеличивая вероятность обнаружения эффектов, связанных непосредственно с физикой пульсара, а также с распространением сигнала от пульсара к Земле, например влиянием гравитационных волн и т. д. Бу-

дущий радиотелескоп SKA должен увеличить число известных пульсаров почти в 10 раз и уменьшить радиометрическую часть ошибки на несколько порядков. Это позволит приблизиться к решению существующих задач, связанных с пониманием внутренних пульсарных процессов и обнаружением гравитационных волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 14.740.11.0085), РФФИ (грант 12-02-31776мол\_а) и гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук (МК-2138.2013.2).

### Список литературы

1. Ильин В.Г., Илясов Ю.П., Кузьмин А.Д. и др. // Доклады АН СССР. 1984. **275**, № 4. С. 835.
2. Rawley L.A., Taylor J.H., Davis M.M., Allan D.W. // Science. 1987. **238**. P. 761.
3. Guinot B., Petit G. // Astron. Astrophysics. 1991. **248**, N 1. P. 292.
4. Sazhin M.V. // Soviet Astronomy. 1978. **22**. P. 36.
5. Jenet F.A., Hobbs G.B., Lee K.J., Manchester R.N. // Astrophys. J. 2005. **625**. P. 123.
6. Pshirkov M.S. // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2009. **398**. P. 1932.
7. Hobbs G., Archibald A., Arzoumanian Z. et al. // Class. Quant. Grav. 2010. **27**. 084013.
8. Ilyasov Yu.P. // Chin. J. Astron. Astrophys. 2006. **6**, N 2. P. 148.
9. Cordes J.M., Kramer M., Lazio T.J.W. et al. // New Astronomy Review. 2004. **48**. P. 1413.
10. Hobbs G. et al. // MNRAS. 2004. **353**.
11. Lorimer D. et al. // Living Rev. Relativity. 2008. **11**, N 8.
12. Manchester R. N. // E-print arXiv: 1004.3602. 2010.
13. Lazaridis K. // E-print arXiv: 1002.0737. 2010.
14. Theureau G. // International Pulsar Timing Array Meeting. Arecibo, Puerto Rico, August 1–2. 2008.
15. Ransom S. // NS/LSC meeting MIT. LIGO/pulsar workshop. Nov. 2, 2006.
16. Manchester R.N., Hobbs G.B., Teoh A., Hobbs M. // Astron. J. 2005. P. 129.
17. Edwards R.T., Hobbs G.B., Manchester R.N. // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2006. **372**. P. 1549.
18. Smits R. et al. // E-print arXiv: 0811.0211. 2008.

### Radiometer noise limitations on pulsar timing precision

N. Yu. Sergeeva<sup>1,a</sup>, M. S. Pshirkov<sup>1,2,3,b</sup>, Yu. P. Ilyasov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> P. K. Sternberg Astronomical Institute, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

<sup>2</sup> Pushchino Radio Astronomy Observatory, Pushchino, Moscow Region 142290, Russia.

<sup>3</sup> Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia.

E-mail: <sup>a</sup> nadezhda.korotkova@gmail.com, <sup>b</sup> pshirkov@prao.ru.

The problem of radio telescopes' properties impact on precise pulsar timing is studied. We have found certain correlation between the accuracy of long-term pulsar data sets, instrumental errors of time-of-arrival precision and pulsar flux density. This correlation shows that today most radio telescopes still lack sensitivity for investigating timing noise intrinsic to pulsar — noise that is not determined by signal propagation effects or receiving radio pulses on the Earth. By estimation, a next-generation telescope SKA (Square Kilometer Array) is going to have such low instrumental errors that they can be expected to no longer dominate the quality of pulsar timing data.

**Keywords:** pulsars, pulsar timing, precision astrometry.

PACS: 95.10.Jk, 97.60.Gb, 95.55.Jz.

Received 4 September 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2013).

### Сведения об авторах

1. Сергеева Надежда Юрьевна — вед. инженер; тел.: (495) 939-37-64, e-mail: nadezhda.korotkova@gmail.com.

2. Пширков Максим Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-37-64, e-mail: pshirkov@prao.ru.

3. Илясов Юрий Петрович — докт. техн. наук, профессор.