

ОТЧЕТ МСЭ-R RA.2099

Радионаблюдения пульсаров для точного хранения времени

(Вопрос МСЭ-R 205/7)

(2007)

Сфера охвата

В настоящем Отчете проводится анализ возможности использования радионаблюдений миллисекундных пульсаров в целях их высокоточного хронометрирования для создания и ведения новых, базирующихся на пульсарах, астрономических шкал времени. Для ведения этой деятельности не требуется внесения каких-либо изменений в Регламент радиосвязи (РР).

1 Введение

Пульсары отождествляются с сильно намагниченными быстро вращающимися нейтронными звездами. Известные в настоящее время пульсары имеют массу 1,5 солнечной, диаметры порядка 20 км и периоды спигового вращения от 1,34 мс до 8 с. Очевидно, что пульсары характеризуются моментами инерции большой величины и большими запасами энергии вращения и поэтому могут рассматриваться как космические "маховики", имеющие стабильные периоды вращения, которые могут использоваться для точного хранения астрономического времени [Manchester and Taylor 1977]. В 1993 году МСЭ было признано, что пульсары могут использоваться для целей точного хранения времени, и был принят Вопрос МСЭ-R 205/7, а также Мнение МСЭ-R 99 "Шкала времени, базирующаяся на хронометрировании пульсаров" (2003 г.).

Пульсары, как источники постоянных радиоимпульсов, имеют "сроки жизни", исчисляемые миллионами и миллиардами лет. Существуют две широко известные группы пульсаров. Первую составляют обычно одиночные объекты с периодом, как правило, от 0,2 с до 8 с. Второй класс образуют пульсары, вращающиеся с очень высокой скоростью, которые часто находятся в двойных звездных системах, так называемые "миллисекундные" пульсары с периодом от 1,34 мс до 50 мс. В настоящее время известно более сотни таких систем. Считается, что миллисекундные пульсары возникают при аккреции на поверхность нейтронной звезды массы ее спутника. Таким образом, они являются рециклированными старыми пульсарами, имеющими магнитные поля порядка 10^4 Т (10^8 Г).

Пульсары в тесных двойных системах имеют периоды обращения от нескольких часов до нескольких месяцев. Их орбитальные параметры могут быть определены с помощью наблюдений для высокоточного радиохронометрирования.

Некоторые миллисекундные пульсары характеризуются нестабильностью спигового периода, составляющей всего 0,2 мкс за пять лет, то есть частичной нестабильностью 10^{-15} . Их потери за счет излучения пренебрежимо малы, и период обращения некоторых систем поэтому увеличивается всего на 10^{-21} с/с (т. е. секунды на секунду) и, как правило, линейно с течением времени (Справочник МСЭ-R по радиоастрономии, второе издание, 2003 год).

Таким образом, пульсары весьма пригодны для целей обеспечения человечества высокоточными космическими часами, что открывает возможность создания новых, базирующихся на пульсарах, астрономических шкал времени обоих типов, – как пульсарной шкалы времени (РТ), так и динамической пульсарной шкалы времени (DPT) [Ильясов Ю.П., Копейкин С.М., Родин А.Е., 1998 г.].

Исключительная стабильность вращения пульсаров позволяет применять уникальный метод повышения значения отношения сигнал-шум S/N профилей пульсаров – "метод синхронного интегрирования", при котором сигнал суммируется синхронно с периодом пульсара.

Программы точного хронометрирования пульсаров выполняются в радиообсерваториях Австралии, Германии, Нидерландов, Российской Федерации, Соединенного Королевства, Соединенных Штатов Америки, Франции и Японии.

2 Предпочтительные полосы частот для наблюдений радиопульсаров в целях высокоточного хранения времени

Наблюдения пульсаров в настоящее время осуществляется в широком диапазоне частот – от 10 МГц до 40 ГГц. Базовый достигаемый уровень шума при радиоастрономических наблюдениях определяется, в основном, в метровом диапазоне волн галактическим фоновым излучением, хотя на более высоких частотах в общем шуме доминирует шум приемника. Яркостная температура галактического фона уменьшается от нескольких тысяч кельвинов (К) на частотах вокруг 100 МГц до 1–10 К на 1 ГГц и характеризуется плотностью потока излучения:

$$S(f) \propto f^{-\alpha},$$

где спектральный индекс α составляет порядка 2,5.

С другой стороны, плотность потока пульсаров уменьшается в зависимости от частоты, в соответствии со спектральным индексом, который составляет порядка 2 (в среднем). Малошумящий предусилитель в пульсарном приемнике для приемников, работающих в диапазоне частот 1–10 ГГц, имеет, как правило, шумовую температуру 10 К. Значит, для использования пульсаров в целях высокоточного хранения времени оптимальное отношение S/N достигается при наблюдениях в диапазоне 0,4–2,0 ГГц [Pyasov *et al*, 1999].

Отношение S/N возрастает в зависимости от ширины полосы пропускания приемника: повышение наблюдаемой чувствительности для полосы пропускания Δf пропорционально $\sqrt{\Delta f}$. Общеизвестно, что импульсы пульсаров рассеиваются по мере распространения в межзвездной среде так, что величина результирующей задержки времени прихода импульсов уменьшается как квадрат частоты. С этой точки зрения предпочтительными являются более высокие частоты. Величина результирующей задержки зависит от электронной плотности вдоль линии луча зрения к пульсару и характеризуется "мерой дисперсности" (DM). Воздействия дисперсии могут быть удалены из сигнала с помощью методов на основе многоканальных приемников с гребенкой фильтров во временной области или когерентной дедисперсией в частотной области.

Многолучевое рассеяние в межзвездной среде вызывает расширение импульсов радиоизлучения от пульсаров, которое уменьшается примерно как биквадрат частоты. Это также служит аргументом за использование, при возможности, более высоких частот при хронометрировании пульсаров.

Мера дисперсности обычно не полностью стабильна, следовательно точное хронометрирование пульсаров на примерно микросекундном уровне требует наблюдений, предпочтительно выполняемых одновременно, в *по крайней мере* двух полосах частот, отстоящих одна от другой на октаву, для замера изменений меры дисперсности.

Предпочтительными полосами частот для наблюдений пульсаров, выполняемых в целях их высокоточного хронометрирования, для *точного хранения времени* являются полоса частот радиоастрономической службы (РАС) 1400–1427 МГц в сочетании либо с полосой радиоастрономической службы 608–614 МГц, либо 406,1–410 МГц, и/или в немногих случаях полоса частот 2690–2700 МГц.

3 Пороговые уровни помех

Пульсары – это, в целом, слабые источники радиоизлучений. Очевидно, необходимо достигать значительного отношения S/N , с тем чтобы обеспечивать точное измерение времени прихода (ТОВА) импульсов пульсара. Следовательно, наблюдения пульсаров для их высокоточного хронометрирования нуждаются в защите от вредных помех. Пороговые уровни помех, вредных для высокоточного хронометрирования пульсаров, соответствуют приведенным в таблице 2 Рекомендации МСЭ-R RA.769 для непрерывных наблюдений с одним зеркалом.

4 Возможность совместного использования частот с другими службами

Наблюдения пульсаров для их высокоточного хронометрирования, предназначенные для ведения базирующейся на пульсарах шкалы времени, могут, как правило, выполняться с использованием полос частот, распределенных РАС. Радиоастрономия не использует полосы частот 1400–1427 МГц и 2690–2700 МГц совместно с какой бы то ни было активной службой. В полосе 406,1–410 МГц совместное использование частот возможно с ФИКСИРОВАННОЙ и ПОДВИЖНОЙ, за исключением воздушной подвижной, службами, а в полосе 608–614 МГц совместное использование частот возможно с Наземной радиовещательной службой (Район 1), Подвижной спутниковой, за исключением воздушной подвижной спутниковой, службой (Район 2) и ФИКСИРОВАННОЙ, ПОДВИЖНОЙ, Радионавигационной и Радиовещательной службами (Район 3), поскольку станции РАС располагаются на удаленных площадках, а линии передачи подвижной спутниковой службы имеют направление Земля-космос.

5 Наиболее пригодные пульсары для использования в высокоточном хранении времени

Для целей высокоточного хранения времени наиболее пригодными пульсарами являются пульсары, имеющие наивысшие плотности потока радиомощности и наиболее стабильные периоды, а также доступные для наблюдения как с северного так и с южного полушарий. Постоянно обнаруживаются новые пульсары и некоторые из них находятся в системах, которые могут использоваться для точного хранения времени: постоянные обследования пульсаров позволяют составить любой список динамики предпочтительных пульсаров. Имеющаяся на текущий момент совокупность пульсаров, удовлетворяющих указанным ограничениям, представлена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Пульсар	Прямое восхождение 2000	Склонение 2000	Период пульсара (мс)	$P_{dot} 10^{-15}$ (с/с)	P_b (дни)	DM (пс см ⁻³)	S_{400} mJy	S_{600} mJy	S_{1400} mJy	S_{3000} mJy	α
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
B1855+09	18:57:36,393	09:43:17,323	5,36210045	1,78 10^{-5}	12,32	13,309	31	(16,3)	4,3	1,5	-1,6
B1937+21	19:39:38,558	21:34:59,137	1,55780647	1,05 10^{-4}	-----	71,040	240	(100)	16	4,0	-2,17
J1640+2224	16:40:16,742	22:24:08,941	3,16331582	2,8 10^{-6}	175,4	18,426	37	(16)	3	0,7	-2,1
J1713+0750	17:13:49,530	07:47:37,526	4,57013652	8,53 10^{-6}	67,82	15,989	36	(16)	3	0,8	-2,0
J0437-4715	04:37:15,786	-47:15:08,462	05,7574518	5,73 10^{-5}	5,741	2,6469	550	300	142	(61,4)	-1,1
J0613-0200	06:13:43,973	-02:00:47,097	3,06184404	9,572 10^{-6}	1,198	38,779	21	7,3	1,4	(0,45)	-1,5
J1024-0719	10:24:38,700	-07:19:18,915	5,16220455	1,8529 10^{-5}	-----	6,491	4,6	4,2	0,66	(0,18)	-1,7
J1744-1134	17:44:29,391	-11:34:54,575	4,07454588	8,9405 10^{-6}	-----	3,1388	18	16	3	(0,76)	-1,8
J1909-3744	19:09:47,438	-37:44:14,318	2,94710802	1,4026 10^{-5}	1,5334	10,3939	-----	-----	-----	-----	-----

Примечания к таблице 1:

Столбец 1	Наименование пульсара (буква В в наименовании означает эпоху В(1950.0), буква J – эпоху J(2000.0))
Столбцы 2, 3	Координаты пульсара (Прямое восхождение, Склонение)
Столбец 5	Производная периода пульсара (с/с)
Столбец 6	Период двойной системы (дни)
Столбец 7	Мера дисперсности (пс см^{-3}), где пс = парсек = $3,087 \cdot 10^{13}$ км.
Столбцы 8, 9, 10, 11	Средняя спектральная плотность потока мощности ($10^{-29} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}$) на частотах 400, 600, 1400 и 3000 МГц, соответственно. Значения в скобках рассчитываются с помощью спектрального индекса:

$$S(f) \propto f^{-\alpha}$$

Столбец 12 Спектральный индекс α

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Дифференциальная задержка вследствие дисперсии по ширине полосы пропускания (BW) рассчитывается на любой частоте f с помощью DM по формуле:

$$t_s \approx 8,3 DM \left(\frac{BW}{\text{МГц}} \right) \left(\frac{f}{\text{ГГц}} \right)^{-3} \text{ мкс},$$

значит для BW, равной 1 МГц, и DM, равной 10, дифференциальная задержка вследствие дисперсии между двумя границами полосы 1 МГц на частоте 1,4 ГГц составляет 30,25 мкс.

6 Выводы

В настоящем Отчете даны ответы на Вопрос МСЭ-R 205/7, который был поставлен, с тем чтобы исследовать возможность использования наблюдений миллисекундных пульсаров для их высокоточного хронометрирования в целях построения и ведения новых астрономических шкал времени, базирующихся на пульсарах, – РТ и ДРТ.

- Предпочтительными полосами частот для наблюдений радиопулсаров для их высокоточного хронометрирования в целях *точного хранения времени* являются полосы частот РАС 1400–1427 МГц, а также либо полоса 406,1–410 МГц, либо 608–614 МГц и/или полоса частот от 2690 до 2700 МГц.
- Пороговые уровни помех, вредных для высокоточного хронометрирования пульсаров, соответствуют приведенным в таблице 2 Рекомендации МСЭ-R RA.769 для непрерывных наблюдений с одним зеркалом.
- Упомянутые выше, предпочтительные, полосы частот РАС не обуславливают каких-либо изменений в распределении частот или в договоренностях по совместному использованию частот с какой-либо активной службой, которая использует эти полосы частот совместно с РАС.
- Конечная цель создания новой долговременной стабильной шкалы времени путем использования наиболее пригодных пульсаров в качестве опорных часов достигается путем ведения предназначенных для точного хронометрирования наблюдений следующих пульсаров: В1855+09, В1937+21, J1640+2224, J1713+0750, J0437-4715, J0613-0200, J1024-0719, J1744-1134 и J1907-3744. Постоянно обнаруживаются новые пульсары и некоторые из них находятся в системах, которые могут использоваться для точного хранения времени: постоянные обследования пульсаров позволяют составить любой список динамики предпочтительных пульсаров. Такой список несомненно будет пополняться с течением времени.

Справочные документы

ИЛЬЯСОВ Ю.П., КОПЕЙКИН С.М., РОДИН А.Е. Астрономическая шкала времени, основанная на орбитальном движении пульсара в двойной системе // Письма в астрономический журнал. – 1998 г. – № 24. – с. 275.

ILYASOV, KUZMIN, SHABANOVA and SHYTOV [1999] Pulsar time-scale, Lebedev Proc., Vol. 199.

MANCHESTER and TAYLOR [1977] Pulsars, Freeman, San Francisco, CA.

Справочник МСЭ по радиоастрономии, второе издание, 2003 год.
