

INFORME UIT-R RA.2099

Observaciones radioeléctricas de los púlsares para controlar la precisión de las señales de tiempo

(Cuestión UIT-R 205/7)

(2007)

Cometido

Este Informe examina la posibilidad de utilizar observaciones radioeléctricas de temporización de alta precisión de púlsares de milisegundos para construir y mantener nuevas escalas de tiempo astronómico basadas en los púlsares. Esta actividad no exige ningún cambio en el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR).

1 Introducción

Los púlsares son estrellas de neutrones que poseen un intenso campo magnético y tienen una velocidad de rotación muy rápida. Actualmente se conocen púlsares con masas del orden de 1,5 veces la masa solar, diámetro de unos 20 km y periodos de rotación sobre el eje desde 1,34 ms hasta 8 s. Evidentemente los púlsares presentan momentos de inercia muy elevados y grandes cantidades de energía rotacional, por consiguiente, pueden considerarse como «volantes de inercia» espaciales con periodos de rotación estables que pueden emplearse para establecer señales de tiempo astronómico de precisión [Manchester y Taylor 1977]. En 1993, la UIT reconoció la posible utilización de los púlsares para controlar la precisión de las señales de tiempo y adoptó la Cuestión UIT-R 205/7, así como el Ruego UIT-R 99 «Escala de tiempo basada en la temporización de púlsares» (2003).

Los púlsares, como fuentes de impulsos radioeléctricos regulares, tienen unos «tiempos de vida» de millones a miles de millones de años. Hay dos grupos bien conocidos de púlsares. El primero de ellos está constituido por objetos normalmente aislados que generalmente tienen periodos de rotación de 0,2 s a 8 s. Al segundo grupo corresponden los púlsares de rotación muy rápida que se encuentra a menudo en sistemas estelares binarios y son los denominados púlsares de «milisegundos» con periodos de rotación de 1,34 ms a 50 ms. Actualmente se conocen más de 100 de estos sistemas. Se cree que los púlsares de milisegundos se originan por acumulación de la masa de una estrella de neutrones con la de una compañera de la misma. Por consiguiente, se trata de púlsares antiguos reciclados que tienen campos magnéticos de unos 10^4 T (10^8 G).

Los púlsares en sistemas binarios próximos tienen periodos orbitales que oscilan desde unas pocas horas hasta varios meses, Sus parámetros orbitales pueden determinarse mediante observaciones radioeléctricas de temporización de alta precisión.

Algunos púlsares de milisegundos presentan inestabilidades en el periodo de rotación axial que pueden llegar a ser tan pequeñas como $0,2 \mu\text{s}$ a lo largo de un periodo de cinco años; es decir, una inestabilidad fraccionaria de 10^{-15} . Sus pérdidas de radiación son despreciables y, por lo tanto, el periodo de rotación de algunos sistemas aumenta una cantidad que en algunos casos puede ser tan reducida como 10^{-21} s/s (es decir, segundos por segundo), y normalmente de manera lineal en el tiempo (Manual de Radioastronomía UIT-R, 2ª Edición, 2003).

Por consiguiente, los púlsares pueden proporcionar a los seres humanos unos relojes espaciales extremadamente regulares que permiten la generación de nuevas escalas de tiempo astronómico basadas en púlsares, tales como la escala de tiempo púlsar (PT) y la escala de tiempo púlsar dinámica (DPT) – [Ilyasov, Kopeikin y Rodin, 1998].

La extrema estabilidad rotacional de los púlsares permite la aplicación de una técnica única para aumentar la relación S/N de los perfiles del púlsar; el «modo de integración síncrono», en el que la señal se suma de manera síncrona con el periodo del púlsar.

En diversos observatorios de radioastronomía de Australia, Francia, Alemania, Japón, Países Bajos, Federación de Rusia, Reino Unido y Estados Unidos de América se están llevando a cabo programas de temporización de púlsares de precisión.

2 Bandas de frecuencias preferidas para las observaciones de las señales de tiempo de alta precisión de los radiopúlsares

Las observaciones de los púlsares normalmente se realizan en una amplia gama de frecuencias que va desde 10 MHz hasta 40 GHz. El nivel de ruido básico que puede lograrse en las observaciones de radioastronomía se define fundamentalmente en la gama de longitudes de onda de metros por la radiación de fondo galáctico aunque a frecuencias más elevadas el ruido del receptor es el predominante en el ruido total. La temperatura de brillo del fondo galáctico disminuye desde varios miles de grados kelvin (K) a frecuencias de unos 100 MHz hasta 1-10 grados K a 1 GHz y se caracteriza por una densidad de flujo

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

donde el índice espectral α toma un valor aproximado de 2,5.

Por otro lado, la densidad de flujo de los púlsares disminuye con la frecuencia, siguiendo un índice espectral de aproximadamente 2 (como media). Un preamplificador de bajo nivel de ruido en un receptor de púlsar normalmente presenta una temperatura de ruido de 10 grados K para los receptores en la gama de frecuencias 1-10 GHz. Por consiguiente, al utilizar púlsares para las señales de tiempo de alta precisión, el valor óptimo de la relación S/N se logra realizando las observaciones en la gama 0,4-2,0 GHz [Ilyasov y otros, 1999].

La relación S/N aumenta con la anchura de banda del receptor: la ganancia en la sensibilidad observada para una anchura de banda Δf es proporcional a $\sqrt{\Delta f}$. Es bien sabido que los impulsos de un púlsar se dispersan a medida que se propagan a través del medio interestelar de manera que la magnitud del retardo resultante en el tiempo de llegada del impulso disminuye con el cuadrado de la frecuencia. Desde este punto de vista, es preferible utilizar frecuencias más elevadas. La magnitud del retardo resultante depende de la densidad de electrones a lo largo de la línea de visibilidad del púlsar y se caracteriza por la «medida de la dispersión» (MD). Los efectos de la dispersión pueden eliminarse de la señal utilizando técnicas basadas en receptores con bancos de filtros multicanal en el dominio del tiempo o desdispersión coherente en el dominio de la frecuencia.

La dispersión multitrayecto en el medio interestelar provoca un ensanchamiento de los impulsos de la emisión radioeléctrica procedente de los púlsares, que disminuye aproximadamente como la cuarta potencia de la frecuencia. Esto también es un argumento para utilizar frecuencias más elevadas en la temporización de púlsares, cuando sea posible.

Por regla general, la medida de la dispersión no es completamente estable, por consiguiente, una temporización precisa de los púlsares a nivel de microsegundos requiere observaciones, realizadas preferentemente de manera simultánea, en *al menos* dos bandas de frecuencias separadas por una octava, para medir los cambios en la medida de la dispersión.

Las bandas de frecuencias preferidas para las observaciones de temporización de alta precisión de los púlsares para *señales de tiempo de precisión* son la banda del servicio de radioastronomía (SRA) 1 400-1 427 MHz, conjuntamente con cualquiera de las bandas 608-614 MHz o 406,1-410 MHz de radioastronomía y/o en unos pocos casos, la banda 2 690-2 700 MHz.

3 Niveles umbral de interferencia

Los púlsares son generalmente fuentes radioeléctricas débiles. Evidentemente es necesario lograr un valor de la relación S/N significativo para obtener una medición precisa del instante de llegada (TOA, *time of arrival*) de los impulsos de un púlsar. Por consiguiente, es preciso proteger las observaciones de señales de tiempo de púlsares de alta precisión contra la interferencia perjudicial. Los niveles umbral para la interferencia perjudicial causada a la temporización de los púlsares de alta precisión son los que figuran en el Cuadro 2 de la Recomendación UIT-R RA.769 para observaciones del continuum con parábola única.

4 Viabilidad de la compartición de frecuencias con otros servicios

Las observaciones de temporización de alta precisión de los púlsares destinados a mantener una escala de tiempos basada en púlsares pueden realizarse normalmente utilizando las bandas de frecuencias atribuidos al SRA. La radioastronomía no comparte las bandas 1 400-1 427 MHz y 2 690-2 700 MHz con ningún servicio activo. En la banda 406,1-410 MHz es posible la compartición con los servicios FIJO y MÓVIL, salvo móvil aeronáutico, y en la banda 608-614 MHz es posible la compartición con el servicio de radiodifusión terrenal (Región 1), el servicio móvil por satélite, salvo móvil aeronáutico, (Región 2) y los servicios FIJO, MÓVIL, de radionavegación y de radiodeterminación (Región 3) pues las estaciones del SRA están ubicadas en emplazamientos distantes y los enlaces del servicio móvil por satélite son en sentido Tierra-espacio.

5 Púlsares más adecuados para utilización en señales de tiempo de alta precisión

A efectos de establecer señales de tiempo de alta precisión, los púlsares más adecuados son los que presentan las mayores densidades de flujo de potencia radioeléctrica y los periodos más estables, y que pueden observarse tanto desde el Hemisferio Norte como desde el Hemisferio Sur. Constantemente se están descubriendo nuevos púlsares y algunos de ellos se encuentran en sistemas que pueden utilizarse para mejorar la precisión de las señales de tiempo: mediante encuestas sobre púlsares se ha elaborado una lista de los púlsares dinámicos preferidos. El conjunto de púlsares que cumplen actualmente estas condiciones figura en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Púlsar	Ascensión recta 2000	Declina- ción 2000	Periodo del púlsar (ms)	Pdot 10^{-15} (s/s)	P_b (días)	MD (pc cm^{-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	-----	-----	-----	-----	-----

Columna 1 Nombre del púlsar (el nombre B se refiere a la época B(1950.0) y el nombre J a la época J(2000.0))

Columnas 2, 3 Coordenadas del púlsar (ascensión recta, declinación)

Columna 5 Derivada del periodo del púlsar (s/s)

Columna 6 Periodo del sistema binario (días)

Columna 7 Medida de la dispersión (pc cm^{-3}), donde $\text{pc} = \text{parsec} = 3,087 \cdot 10^{13} \text{ km}$.

Columnas 8, 9, 10, 11 Densidad de flujo de potencia espectral media ($10^{-29} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$) a 400, 600, 1 400 y 3 000 MHz, respectivamente. Los valores entre paréntesis se calculan mediante el índice espectral α , donde la densidad de flujo:

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

Columna 12 Índice espectral α

NOTA 1 – El retardo dispersivo diferencial a lo largo de una anchura de banda (BW) se calcula para cualquier frecuencia f a partir de la MD mediante la siguiente fórmula:

$$t_s \approx 8,3 MD \left(\frac{BW}{\text{MHz}} \right) \left(\frac{f}{\text{GHz}} \right)^{-3} \mu\text{s}$$

de manera que para una BW de 1 MHz y una MD de 10, el retardo dispersivo diferencial entre los dos bordes de una banda de 1 MHz a 1,4 GHz es 30,25 μs .

6 Conclusiones

Este Informe responde a la Cuestión UIT-R 205/7 que se formuló para explorar la utilización de las observaciones de temporización de alta precisión de los púlsares de milisegundos para la construcción y mantenimiento de nuevas escalas de tiempo astronómico basadas en púlsares, PT y DPT.

- Las bandas de frecuencias preferidas para las observaciones de temporización de alta precisión de los radiopúlsares a efectos de establecer *señales de tiempo de precisión* son las bandas del SRA 1 400-1 427 MHz y cualquiera de las bandas 406,1-410 MHz o 608-614 MHz, y/o la banda 2 690-2 700 MHz.

- Los niveles umbral de interferencia perjudicial para la temporización de púlsares de alta precisión son los que figuran en el Cuadro 2 de la Recomendación UIT-R RA.769 para observaciones del continuum con una sola parábola.
- Las bandas del SRA preferidas antes mencionadas no exigen ninguna modificación en las atribuciones de frecuencias o en las disposiciones de compartición con ninguno de los servicios activos que comparten las bandas con el SRA.
- El objetivo final de proporcionar una nueva escala de tiempo estable y a largo plazo utilizando los púlsares más adecuados como relojes de referencia se logra realizando observaciones de temporización de precisión de los púlsares B1855+09, B1937+21, J1640+2224, J1713+0750, J0437-4715, J0613-0200, J1024-0719, J1744-1134 y J1907-3744. Constantemente se están descubriendo nuevos púlsares y algunos de ellos se encuentran en sistemas que pueden utilizarse para mejorar la precisión de las señales de tiempo: mediante encuestas sobre púlsares se ha elaborado una lista de los púlsares dinámicos preferidos. Esta lista indudablemente aumentará con el paso del tiempo.

Referencias Bibliográficas

ILYASOV, KOPEIKIN and RODIN [1998] Astronomy Letters, Vol. 24, p. 275.

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

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

Manual de Radioastronomía UIT-R, 2ª Edición, 2003.
