

RAPPORT UIT-R RA.2099

Mesure précise du temps par observation radio des pulsars

(Question UIT-R 205/7)

(2007)

Champ d'application

Le présent Rapport traite de la possibilité de dater avec une précision extrême les impulsions radio reçues des pulsars millisecondes pour établir et corriger de nouvelles échelles de temps astronomique. Aucune modification du Règlement des radiocommunications (RR) n'est nécessaire pour mener cette activité.

1 Introduction

On appelle pulsars certaines étoiles à neutrons qui tournent très rapidement sur elles-mêmes et qui émettent un fort rayonnement électromagnétique. Les pulsars actuellement connus ont une masse d'environ 1,5 fois la masse du soleil, un diamètre d'environ 20 km et des périodes de rotation sur leur axe comprises entre 1,34 ms et 8 ms. De toute évidence, ces corps célestes ont un important moment d'inertie et emmagasinent une très importante énergie de rotation, de sorte que l'on peut les comparer à des «volants d'inertie» spatiaux présentant une période de rotation stable, caractéristique que l'on peut exploiter dans un système de mesure très précise du temps astronomique [Manchester et Taylor, 1977]. En 1993, l'UIT a reconnu l'intérêt de l'utilisation potentielle des pulsars dans la mesure précise du temps et adopté la Question UIT-R 205/7 ainsi que le Vœu UIT-R 99 «Echelle de temps établie sur la base de la période des pulsars» (2003).

Les pulsars, sources radio pulsantes extrêmement stables, ont des «durées de vie» qui se comptent en millions ou en milliards d'années. On distingue deux grandes catégories de pulsars, tout d'abord les objets normalement isolés, dont la période est généralement comprise entre 0,2 et 8 s, et les pulsars à rotation très rapide, qui constituent souvent des systèmes stellaires doubles et que l'on appelle «pulsars millisecondes», et dont la période est comprise entre 1,34 ms et 50 ms. A l'heure actuelle, on dénombre plus d'une centaine de ces systèmes. On pense que les pulsars millisecondes sont nés de la chute de matière arrachée à une étoile compagne: il s'agit donc d'anciens pulsars «réallumés» dont le champ magnétique se chiffre à environ 10^4 T (10^8 G).

Les pulsars doubles présentent des périodes orbitales comprises entre quelques heures et plusieurs mois. Leurs paramètres orbitaux peuvent être déterminés par la datation ultra-précise de leurs impulsions radio.

Certains pulsars millisecondes présentent une instabilité de période de rotation ne dépassant pas $0,2 \mu\text{s}$ sur cinq ans, soit 10^{-15} . Leur perte de rayonnement est négligeable, de sorte que l'accélération de leur rotation atteint parfois à peine 10^{-21} s par seconde, selon une loi généralement linéaire (Manuel de radioastronomie de l'UIT-R, 2ème édition de 2003).

Ainsi, les pulsars nous permettent de disposer d'horloges astronomiques parfaitement stables et d'établir de nouvelles échelles de temps astronomique, plus précisément une échelle PT (Pulsar Time-scale) et une échelle DPT (Dynamic Pulsar Time-scale) – [Ilyasov, Kopeikin et Rodin, 1998].

L'extrême stabilité de rotation des pulsars offre la possibilité d'appliquer une technique unique pour relever le rapport signal/bruit des profils de rayonnement: nous voulons parler du «mode d'intégration synchrone» (sommation des signaux synchronisée sur la période).

Des programmes de datation précise des impulsions radio des pulsars sont actuellement menés dans divers radio-observatoires (Allemagne, Australie, Etats-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France, Japon, Pays-Bas et Royaume-Uni).

2 Bandes de fréquences préférées pour la datation ultra-précise des impulsions radio des pulsars

Des campagnes d'observation de pulsars sont actuellement menées dans un large domaine de fréquences, de 10 MHz à 40 GHz. Le niveau de bruit de base pouvant être obtenu dans les observations de radioastronomie est défini essentiellement dans la gamme des ondes métriques par le rayonnement galactique de fond, mais, à des fréquences plus élevées, le bruit du récepteur est dominant. La température de brillance du fond galactique, qui est de plusieurs milliers de degrés kelvin (° K) aux fréquences voisines de 100 MHz, tombe à 1-10 K à 1 GHz, et se caractérise par une puissance surfacique de forme:

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

dans laquelle l'indice spectral α est d'environ 2,5.

Par ailleurs, la puissance surfacique des pulsars est inversement proportionnelle à la fréquence, avec un indice spectral d'environ 2 (en moyenne). Dans un récepteur de signaux pulsars, l'étage de préamplification à faible bruit présente une caractéristique de bruit typique de 10 K, dans le cas des récepteurs fonctionnant dans la gamme de fréquences 1-10 GHz. Donc, si l'on veut utiliser les pulsars pour des mesures précises du temps, le rapport S/N optimal est obtenu lorsque l'on fait les observations dans le domaine 0,4-2,0 GHz [Ilyasov *et autres*, 1999].

Le rapport signal/bruit augmente parallèlement à la largeur de bande du récepteur: le gain de sensibilité d'observation dans une largeur de bande Δf est proportionnel à $\sqrt{\Delta f}$. On sait bien que les impulsions radio d'un pulsar se dispersent lorsqu'elles se propagent dans le milieu interstellaire, et cette dispersion se traduit par un retard inversement proportionnel au carré de la fréquence radio. En conséquence, il est préférable d'utiliser de hautes fréquences. Le retard de propagation résultant dépend du contenu électronique intégré le long de la ligne de visée (mesure de dispersion, DM (*dispersion measure*)). Il est possible d'effectuer une dédispersion du signal en utilisant des techniques faisant intervenir des récepteurs à banc de filtres multicanaux dans le domaine temporel ou une dédispersion cohérente dans le domaine fréquentiel.

Le phénomène de diffusion multitrajet dans le milieu interstellaire a pour effet d'élargir les impulsions radio émises par les pulsars, dont la loi de décroissance est voisine de la quatrième puissance de la fréquence. Cette constatation est un autre argument en faveur de l'utilisation de fréquences élevées, lorsque cela est possible.

La mesure de dispersion n'est généralement pas totalement stable, de sorte que pour faire des datations précises (à l'échelle de la microseconde), il convient de réaliser les observations, de préférence simultanément, dans *au moins* deux bandes de fréquences séparées par une octave, afin de mesurer les variations de la mesure de dispersion.

Les bandes de fréquences préférées pour la datation extrêmement précise des impulsions radio émises par les pulsars pour les applications de *mesure précise du temps* sont la bande 1 400-1 427 MHz du service de radioastronomie (SRA), en association avec soit la bande 608-614 MHz soit la bande 406,1-410 MHz attribuées à la radioastronomie et/ou, dans un petit nombre de cas, la bande 2 690-2 700 MHz.

3 Niveaux seuil de brouillage

Les pulsars sont généralement des sources radio faibles. Manifestement, il faut obtenir un rapport signal/bruit suffisant pour obtenir une datation précise des impulsions. En conséquence, les observations de datation doivent être protégées de tout brouillage préjudiciable. Les valeurs seuil à partir desquelles les brouillages sont considérés comme préjudiciables à la datation de haute précision sont les valeurs données au Tableau 2 de la Recommandation UIT-R RA.569 dans le cas d'observations continuum avec une parabole unique.

4 Autres possibilités de partage de fréquences avec d'autres services

Les observations de datation ultra-précise des impulsions radio des pulsars réalisées aux fins de l'établissement d'une échelle de temps peuvent généralement être menées dans les bandes de fréquences attribuées au SRA. Le service de radioastronomie ne partage les bandes 1 400-1 427 MHz et 2 690-2 700 MHz avec aucun service actif. Dans la bande 406,1-410 MHz le partage est possible avec le service FIXE et le service MOBILE à l'exception des services mobiles aéronautiques et, dans la bande 608-614 MHz, le partage est possible avec le service de radiodiffusion de Terre (Région 1), le service mobile par satellite à l'exception du service aéronautique mobile par satellite (Région 2) et les services FIXE, MOBILE, de radionavigation et de radiodiffusion (Région 3) du fait que les stations du service de radioastronomie sont installées sur des sites éloignés et que les liaisons du service mobile par satellite sont de type Terre vers espace.

5 Les pulsars les plus appropriés pour les mesures du temps de haute précision

Pour les mesures du temps de haute précision, les pulsars les plus appropriés sont ceux qui rayonnent les niveaux de puissance surfacique les plus élevés et les périodes les plus stables, et que l'on peut observer à la fois dans l'hémisphère Nord et dans l'hémisphère Sud. De nouveaux pulsars sont constamment découverts, certains faisant partie de systèmes très intéressants à utiliser pour les mesures du temps de haute précision: la recherche de nouveaux pulsars entraîne un renouvellement constant de la liste des pulsars préférés. Actuellement, l'ensemble des pulsars qui répondent aux conditions que nous venons d'exposer permet d'établir le Tableau 1 ci-après.

TABLEAU 1

PSR	Ascension droite 2000	Déclinaison 2000	Période (ms)	Pdot 10^{-15} (s/s)	P_b (jours)	DM (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	5,36210 045	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	1,55780 647	1,05 10^{-4}	-----	71,040	240	(100)	16	4,0	-2,17
J1640+2224	16:40:16,742	22:24:08,941	3,16331 582	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	4,57013 652	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	05,7574 518	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	3,06184 404	9,572 10^{-6}	1,198	38,779	21	7,3	1,4	(0,45)	-1,5

TABLEAU 1 (*fin*)

PSR	Ascension droite 2000	Déclinaison 2000	Période (ms)	Pdot 10^{-15} (s/s)	P_b (jours)	DM (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
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	-----	-----	-----	-----	-----

Colonne 1 Dénomination du pulsar (dénomination avec B: époque 1950 (1950.0), dénomination avec J: époque (2000.0))

Colonnes 2, 3 Coordonnées (ascension droite, déclinaison)

Colonne 5 Dérivée de la période (seconde/seconde)

Colonne 6 Période de système binaire (jours)

Colonne 7 Mesure de dispersion (pc cm⁻³), avec pc = parsec = 3,087 10^{13} km

Colonnes 8, 9, 10, 11 Densité spectrale moyenne de puissance surfacique (10^{-29} W/m² · Hz) à respectivement 400, 600, 1 400 et 3 000 MHz. Les valeurs entre parenthèses sont calculées avec l'indice spectral α , la puissance surfacique étant de forme:

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

Colonne 12 Indice spectral α

NOTE 1 – Les retards de dispersion différentiels sur une largeur de bande (BW) donnée sont calculés pour toute fréquence f à partir de la mesure de dispersion DM au moyen de l'expression:

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

ainsi, pour une largeur de bande de 1 MHz et une mesure de dispersion DM de 10, le retard de dispersion différentiel entre les deux bords d'une bande de 1 MHz à 1,4 GHz est de 30,25 μs .

6 Conclusions

Le présent rapport répond à la Question UIT-R 205/7, formulé pour l'étude de l'utilisation des observations de datation extrêmement précise des impulsions radio émises par les pulsars millisecondes aux fins de l'élaboration et de l'actualisation des nouvelles échelles de temps astronomiques PT et DPT.

- Les bandes de fréquences préférées pour les observations ultra-précises des pulsars dans des applications de *mesure précise du temps* sont les bandes du service de radioastronomie 1 400-1 427 MHz et soit 406,1-410 MHz ou 608-614 MHz et/ou la bande 2 690-2 700 MHz.
- Les niveaux seuils de brouillage préjudiciable occasionné aux observations ultra-précises des pulsars sont les niveaux indiqués au Tableau 2 de la Recommandation UIT-R RA.769 pour des observations continuum avec une parabole unique.

- Les bandes du SRA mentionnées ci-dessus, qui sont les bandes préférées, n'appellent aucune modification des attributions de fréquences ou des modalités de partage avec les services actifs qui partagent ces bandes avec le SRA.
- On cherche à établir une nouvelle échelle de temps stable à long terme en utilisant les pulsars les plus appropriés comme horloges de référence; il s'agit de dater avec précision les impulsions radio des pulsars B1855+09, B1937+21, J1640+2224, J1713+0750, J0437-4715, J0613-0200, J1024-0719, J1744-1134 et J1907-3744. De nouveaux pulsars sont constamment découverts, certains dans des systèmes très intéressants pour les mesures du temps de haute précision: les recherches actuelles de nouveaux pulsars entraînent un renouvellement constant de la liste des pulsars préférés. La liste des objets (candidats) est certainement appelée à s'allonger avec le temps.

Références bibliographiques

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

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

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

UIT, Manuel de radioastronomie, 2ème édition de 2003.
