التقرير ITU-R RA.2099

عمليات رصد راديوي للنجوم النابضة لأغراض التوقيت الدقيق

(المسألة ITU-R 205/7)

(2007)

مجال التطبيق

يدرس هذا التقرير إمكانية استعمال عمليات الرصد الراديوي للنجوم النابضة لأغراض التوقيت بدقة عالية تقدر بالميلي ثانية بهدف وضع مقاييس زمنية فلكية جديدة والمحافظة عليها استناداً إلى النجوم النابضة. ولا يتطلب القيام بهذا العمل أي تغييرات في نصوص لوائح الراديو.

1 مقدمة

النجوم النابضة هي نجوم نيوترونية شديدة المغنطة تدور حول نفسها بسرعة عالية. ويفوق حجم النجوم النابضة المعروفة حالياً حجم كتلة الشمس بمقدار 1,5 مرة ويبلغ قطرها حوالي 20 km وتتراوح مدة دورانها بين 1,34 ms و8 s. ومن الواضح أن النجوم النابضة تمر بفترات عطالة ولديها قدرة تخزين طويل للطاقة الناتجة عن الدوران. وهكذا يمكن اعتبارها "عجلات عطالية" في الفضاء لها مدد دوران ثابتة بحيث يمكن استعمالها للتوقيت الفلكي الدقيق [Manchester and Taylor 1977]. وفي عام 1993 أقر الاتحاد الدولي للاتصالات بإمكانية استعمال النجوم النابضة لأغراض ضبط الوقت الدقيق ووافق على المسألة ITU-R 205/7 وعلى الرأي ITU-R 99 "قياس الزمن استناداً إلى توقيت النجم النابض" (2003).

والنجوم النابضة باعتبارها مصادر نبضات راديوية منتظمة لها "عمر" يتراوح بين ملايين ومليارات السنوات. ولها نوعان معروفان، يضم الأول منها أجسام معزولة عادة وتتراوح مدة دورانها بين 0,2 s و8 s، ويتألف النوع الثاني من نجوم نابضة سريعة جداً في دورانها وغالباً ما تدخل في نظام النجوم الثنائية المسماة النجوم النابضة "فائقة السرعة" وتتراوح مدة دورانها من 1,34 ms إلى 50 ms. ويعرف حتى وقتنا هذا أكثر من مائة نظام من أنظمة هذه النجوم. ويعتقد أن النجوم النابضة "فائقة السرعة". وتنشأ من التحام كتلة من نجم مرافق بنجم نتروني وهي بالتالي نجوم نابضة قديمة متحولة ويبلغ مجالها المغنطيسي حوالي 10^{4} T (10^{8} G).

وتتراوح الأدوار المدارية التي تضم النجوم النابضة في مجموعات نجوم ثنائية متقاربة بين ساعات قليلة وعدة شهور. وتتحدد معلماتها المدارية من خلال عمليات رصد راديوي زمني فائق الدقة.

ولا يتجاوز عدم انتظام مدة الدوران في بعض النجوم النابضة فائقة السرعة 0,2 µs كل خمس سنوات أي أنه يبلغ جزء من 10^{-15}. وخسارة إشعاعها ضئيلة للغاية إذ تتزايد مدة دوران بعض الأنظمة بمقدار ضئيل لا يتجاوز 10^{-21} s/s، وهي عادة خطية زمنياً (الدليل الصادر عن القطاع ITU-R بشأن علم الفلك الراديوي، الطبعة الثانية، 2003).

ولذا فإن النجوم النابضة كفيلة بأن تؤدي تماماً دور الميقاتية الفضائية فائقة الانتظام مما يتيح ظهور جيل جديد من قياسات الزمن الفلكية استناداً إلى النجوم النابضة وذلك بأسلوبين اثنين هما قياس الزمن استناداً إلى النجوم النابضة (PT) والقياس الدينامي للزمن استناداً إلى النجوم النابضة (DPT) – [Ilyasov, Kopeikin and Rodin 1998]

ويتيح الاستقرار الدوراني الفائق للنجوم النابضة استخدام تقنية وحيدة لزيادة نسبة الإشارة إلى الضوضاء (*S/N*) في خصائص النجم النابض وهي "أسلوب التكامل المتزامن" حيث تجمع الإشارة بالتزامن مع دورة النجم النابض.

وتوضع برامج توقيت دقيق استناداً إلى النجوم النابضة في المراصد الراديوية في أستراليا وفرنسا وألمانيا واليابان وهولندا والاتحاد الروسي والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية.

2 نطاقات التردد المفضلة لعمليات الرصد الراديوية للتوقيت فائق الدقة استناداً إلى النجوم النابضة

تجري عمليات رصد النجوم النابضة عموماً في مدى واسع من الترددات يمتد من 10 MHz إلى 40 GHz. وتتحدد أولاً سوية الضوضاء الأساسية الناجمة عن عمليات الرصد الفلكية الراديوية في قياس مدى طول الموجة من خلال إشعاع خلفية المجرّة بحيث تسود الضوضاء الكلية عند أعلى ترددات ضوضاء المستقبل. وتتناقص حرارة لمعان خلفية المجرة عدة آلاف كلفن (K) في الترددات حول 100 MHz لتصل إلى 1 - 10 k في التردد 1 GHz وتتميز بكثافة تدفق قدرها:

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

حيث يبلغ الدليل الطيفي α حوالي 2,5.

ومن جهة أخرى تتناقص كثافة تدفق النجوم النبضية بتناقص التردد تبعاً لدليل طيفي قدره 2 تقريباً (قيمة متوسطة). وتبلغ حرارة الضوضاء عادة في مكبر سابق للضوضاء المنخفضة في مستقبل إشعاع نجم نابض 10 k في مستقبلات مدى الترددات 1-10 GHz. لذا فإن أفضل نسبة *S/N* تحققت عند الرصد في المدى 0,4-2,2 GHz [Ilyasov وآخرون، 1999] من أجل استعمال النجوم النابضة للتوقيت فائق الدقة.

وتتزايد النسبة *S/N* بتزايد عرض نطاق المستقبل: ويتناسب كسب رصد الحساسية في عرض النطاق Δf طرداً مع $\sqrt{\Delta f}$. ويعرف أن نبضات النجم النابض تتشتت عند انتشارها عبر وسيط ما بين النجوم، بحيث أن مدة وقت الانتشار الناتج عند وصول النبضة تتناقص تبعاً لمربع التردد. ومن هذا المنطلق، تفضل الترددات الأعلى. ويتوقف مقدار التأخر الناتج على كثافة الإلكترون على طول خط البصر مع النجم النابض، ويتميز بما يسمى "قياس التشتت" (DM). ويمكن إزالة آثار التشتت من الإشارة باستعمال تقنيات تستند إلى مستقبلات جهة المراشيح متعددة القنوات في مجال الزمن أو الحد المتسق من التشتت في مجال التردد.

ويسبب الانتشار متعدد المسارات في الوسيط بين النجوم توسيع نبضات الإرسال الراديوي الصادر عن النجوم النابضة الذي يتناقص تقريباً بمعدل ربع قدرة التردد. وهذه حجة إضافية لصالح استعمال ترددات أعلى في التوقيت استناداً إلى النجم النابض عند الإمكان.

وقياس الانتشار عادة غير مستقر بالكامل بحيث يتطلب التوقيت استناداً إلى النجم النابض بدقة تقارب الميكروثانية عمليات رصد يفضل أن تتم في نفس الوقت وفي نطاقي تردد على الأقل بمباعدة ثمانية من أجل قياس التغييرات في قياس التشتت.

ونطاقات التردد المفضلة لعمليات رصد التوقيت عالي الدقة للنجوم النابضة لأغراض *التسجيل الدقيق للوقت* هي نطاق خدمة الفلك الراديوي (RAS) 400 1-427 1 MHz مع النطاق 608-614 MHz أو 406,1-410 MHz التابعين للفلك الراديوي و/أو النطاق 690 2-700 2 MHz في حالات قليلة.

3 سويات عتبة التداخل

تشكل النجوم النابضة عموماً مصادر راديوية ضعيفة. ومن الضروري تحقيق نسبة *S/N* عالية من أجل الحصول على قياسات دقيقة لوقت وصول (TOA) نبضة من النجم النابض. ولذا ينبغي حماية عمليات الرصد هذه من التداخل الضار. ويعطي الجدول 2 من التوصية ITU-R RA.769 الخاص بعمليات الرصد المستمرة بعاكس واحد السويات العتبة للتداخل من الضرر للتوقيت فائق الدقة استناداً إلى النجم النابض.

4 دراسة جدوى تقاسم التردد مع خدمات أخرى

إن عمليات رصد التوقيت عالي الدقة للنجوم النابضة المخصصة للمحافظة على قياس الزمن استناداً إلى نجم نابض تتم عادة باستعمال نطاقات التردد الموزعة لخدمة الفلك الراديوي. ولا يتقاسم الفلك الراديوي النطاقين 400 1-427 1 MHz

و690 2-700 2 MHz مع أي خدمة نشيطة. والتقاسم ممكن في النطاق 410-406,1 MHz مع الخدمتين **الثابتة والمتنقلة** باستثناء المتنقلة للطيران والتقاسم ممكن في النطاق 614-608 MHz مع خدمة الإذاعة للأرض (الإقليم 1) والخدمة المتنقلة الساتلية باستثناء الساتلية المتنقلة للطيران (الإقليم 2) والخدمتين **الثابتة والمتنقلة** وخدمة الملاحة الراديوية والإذاعة (الإقليم 3) نظراً لأن محطات الخدمة RAS واقعة في أماكن بعيدة ووصلات الخدمة المتنقلة الساتلية بالاتجاه أرض–جو.

5 أكثر النجوم النابضة ملاءمة لتسجيل الوقت عالي الدقة

أكثر النجوم النابضة ملاءمة لأغراض تسجيل الوقت عالي الدقة هي النجوم ذات الكثافة الأعلى لتدفق القدرة الراديوية ومدة الدورة الأكثر استقراراً والتي يمكن مراقبتها من نصفي الكرة الشمالي والجنوبي على حد سواء. ويستمر اكتشاف نجوم نابضة جديدة بعضها يشكل جزءاً من أنظمة يمكن استعمالها لتحسين دقة ضبط الوقت: والاستقصاءات الجارية للنجوم النابضة تجعل أي قائمة للنجوم النابضة المفضلة قائمة دينامية. وترد مجموعة النجوم النابضة التي تفي بهذه الشروط حالياً في الجدول 1.

الجدول 1

PSR	الطالع المستقيم 2000	الميل الزاوي 2000	مدة دورة النجم النابض (ms)	Pdot 10^{-15} (s/s)	P_b (أيام)	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
09+ B1855	18:57: 36,393	09:43: 17,323	5,36210 045	1,78 5–10	12,32	13,309	31	(16,3)	4,3	1,5	1,6–
21+ B1937	19:39: 38,558	21:34: 59,137	1,55780 647	1,05 4–10	-----	71,040	240	(100)	16	4,0	2,17–
2224+ J1640	16:40: 16,742	22:24: 08,941	3,16331 582	2,8 6–10	175,4	18,426	37	(16)	3	0,7	2,1–
0750+ J1713	17:13: 49,530	07:47: 37,526	4,57013 652	8,53 6–10	67,82	15,989	36	(16)	3	0,8	2,0–
4715-J0437	04:37: 15,786	47:15–: 08,462	05,7574 518	5,73 5–10	5,741	2,6469	550	300	142	(61,4)	1,1–
0200-J0613	06:13: 43,973	02:00–: 47,097	3,06184 404	9,572 6–10	1,198	38,779	21	7,3	1,4	(0,45)	1,5–
J1024-0719	10:24: 38,700	07:19–: 18,915	5,16220 455	1,8529 5–10	-----	6,491	4,6	4,2	0,66	(0,18)	1,7–
J1744-1134	17:44: 29,391	11:34–: 54,575	4,07454 588	8,9405 6–10	-----	3,1388	18	16	3	(0,76)	1,8–
3744-J1909	19:09: 47,438	37:44–: 14,318	2,94710 802	1,4026 5–10	1,5334	10,3939	-----	-----	-----	-----	-----

ملاحظات تتعلق بالجدول 1:

العمود 1 اسم النجم النابض (يحيل اسم – B إلى فترة B(1950,0) واسم – J إلى فترة J(2000,0))

العمودان 2 و3 إحداثيات النجم النابض (الطالع المستقيم والميل)

العمود 5 مشتقة من دورة النجم النابض (s/s)

العمود 6 دورة النظام الثنائي (بالأيام)

العمود 7 قياس التشتت ($pc\ cm^{-3}$) حيث (parsec = pc = $3.087\ 10^{13}$ km)

الأعمدة 8 و9 و10 و11 متوسط كثافة تدفق القدرة الطيفية (10^{-29} $W/m^2 \cdot Hz$) عند الترددات 400 و600 و1 400 و3 000 MHz. وتحسب القيم داخل الأقواس من خلال الدليل الطيفي α حيث كثافة التدفق هي:

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

العمود 12 الدليل الطيفي α

الملاحظة 1 – تحسب مدة التشتت التفاضلي في عرض نطاق (BW) عند أي تردد f لقياس التشتت DM باستعمال المعادلة:

$$t_s \approx 8.3\, DM \left(\frac{BW}{\text{MHz}}\right)\left(\frac{f}{\text{GHz}}\right)^{-3} \mu s$$

بحيث تكون مدة التشتت التفاضلي بين طرفي نطاق عرضه 1 MHz عند التردد 1,4 GHz 30,25 µs بافتراض DM = 10.

6 استنتاجات

يجيب هذا التقرير على المسألة ITU-R 205/7 التي صيغت لتقصي استعمال عمليات رصد التوقيت عالي الدقة للنجوم النابضة بالملي ثانية وذلك بهدف وضع قياسات زمنية جديدة PT وDPT فلكية استناداً إلى النجوم النابضة والحفاظ عليها.

- نطاقات التردد المفضلة لعمليات الرصد للتوقيت عالي الدقة للموجات الراديوية الصادرة عن النجوم النابضة التي تستخدم في ضبط الوقت الدقيق هي النطاقات الموزعة على الخدمة RAS في المدى 400 1-427 1 MHz وإما 410-406,1 MHz أو 614-608 MHz و/أو 690 2-700 2 MHz.
- سويات عتبة التداخل الضار في التوقيت عالي الدقة استناداً للنجم النابض هي السويات الواردة في الجدول 2 من التوصية ITU-R RA.769 الخاصة بعمليات الرصد المستمرة بعاكس واحد.
- لا تستدعي نطاقات الخدمة RAS المفضلة المذكورة أعلاه أي تغيير في توزيعات التردد أو في ترتيبات التقاسم مع أي من الخدمات النشيطة التي تتقاسم النطاقات مع الخدمة RAS.
- الهدف من وضع قياس زمني جديد ومستقر وطويل الأمد باستعمال النجوم النابضة الملائمة كميقاتية مرجعية هو جعل عمليات رصد توقيت دقة النجوم النابضة B1855+09 وB1937+21 وJ1640+2224 وJ1713+0750 وJ0437-4715 وJ0613-0200 وJ1024-0719 وJ1744-1134 وJ1907-3744 ويستمر اكتشاف نجوم نابضة، وتشكل بعض هذه النجوم جزءاً من أنظمة يمكن استخدامها في تحسين ضبط دقة الوقت. والاستقصاءات الجارية للنجوم النابضة تجعل أي قائمة بالنجوم النابضة المفضلة دينامية. وستزداد قائمة النجوم هذه دون شك مع الوقت.

المراجع

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

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

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

ITU Handbook on Radio Astronomy, 2nd edition, 2003.

_____