

ITU-R RA.2099号报告

为精确计时对脉冲星进行的无线电观测

(ITU-R 第205/7号课题)

(2007年)

范围

本报告的研究项目是，利用毫秒脉冲星高精度计时无线电观测构建和保持新的基于脉冲星的天文时标。从事这项工作无须修改《无线电规则》(RR)。

1 引言

脉冲星被认为是具有强大磁力且高速旋转的中子星。目前已知的脉冲星的质量约为太阳质量的1.5倍，直径约20公里，自转动周期从1.34毫秒至8秒。脉冲星显然具有巨大的惯性矩和转动能量储备，因此可以被看作太空“飞轮”，其稳定旋转周期可用于精确天文计时[1977年，Manchester 和 Taylor]。1993年，国际电联确认了脉冲星精确计时的潜在用途，并通过了ITU-R第205/7号课题和题为“基于脉冲星计时的时标”的ITU-R第99号意见(2003年)。

作为规律性无线电脉冲源的脉冲星，其“寿命”可达上亿年甚至几十亿年。目前有两组著名的脉冲星，第一组通常是独立个体，旋转周期为0.2秒到8秒。第二类是高速旋转的脉冲星，通常处于双恒星系，即所谓“毫秒”脉冲星，其旋转周期为1.34毫秒至50毫秒。目前已知的这类星系已超过100个。据认为，毫秒脉冲星是伴星的质量依附于中子星之后形成的，并因此成为磁场约达 10^4 T (10^8 G)反加速老脉冲星。

密近双星系的脉冲星的轨道周期从几个小时至几个月不等。可通过高精度无线电计时观测确定其轨道参数。

某些毫秒脉冲星的旋转周期的不稳定性在五年当中仅为 $0.2 \mu\text{s}$ ，即微小的 10^{-15} 的不稳定性。其辐射损耗可以忽略不计，因此某些系统的旋转周期仅增加 10^{-21} s/s (即1秒的XX分之一)，并通常与时间呈线性比(2003年第二版ITU-R《射电天文手册》)。

此外，脉冲星非常适于向人类提供高度恒定的太空钟，能够生成新的基于脉冲星的天文时标，既有脉冲星时标(PT)，也有动态脉冲星时标(DPT) – [1988年，Ilyasov、Kopeikin 和 Rodin Thus]。

脉冲星极高的旋转稳定性使人们能够采用独特技术增加脉冲星特性的信噪比 – 即“同步综合模式”，并在其中同时求出信号和脉冲星周期之和。

澳大利亚、法国、德国、日本、荷兰、俄罗斯、英国以及美国的无线电观测站，正在实施脉冲星精确计时计划。

2 对无线电脉冲星进行高精度计时观测的首选频段

目前用于脉冲星观测的频率十分广泛，从10 MHz直至40 GHz。射电天文观测大致能够达到的噪声水平，主要是通过银河背景辐射在米波长范围内确定的，不过在较高频率上，接收机噪声在总噪声中占主导地位。银河背景的亮度温度从大约100 MHz 频率的数千kelvins (K)下降至1 GHz 的1-10 K，并显示通量密度为

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

其中的频谱指数 α 约为2.5。

另外，脉冲星的通量密度根据约为2（平均值）的频谱指数随频率下降。对于1-10 GHz 频段的接收机而言，脉冲星接收机前置放大器的噪声温度为10 K。因此在利用脉冲星进行高精度计时的时候，可通过观察0.4-2.0 GHz 范围内的情况获得最佳信噪比。[1999年，Ilyasov 等]。

信噪比随接收机带宽的增加而提高： Δf 带宽的观察灵敏度增益与 $\sqrt{\Delta f}$ 成正比。众所周知，脉冲星的脉冲是通过星际介质色散传播的，致使由此产生的脉冲到达时间的延迟程度随频率平方下降。根据这一观点，较高频率更为可取。由此产生的延迟程度取决于朝向脉冲星的视线内的电子密度，并具有“分散量数”（DM）特性。可利用时间域的多信道滤波器组接收机或频率域的相干消色散技术，消除信号中的色散效应。

星际介质的多径散射会拓宽脉冲星发出的无线电脉冲，但会下降为大约频率的四次方。这也是尽可能在脉冲星计时中使用较高频率的论据。

分散量数通常并不完全稳定，因此，大约毫秒级的脉冲星精确计时需要最好同时在至少两个间隔一个倍频程的频率上进行观测，以测量分散量数的变化。

1 400-1 427 MHz射频业务（RAS）频段，是旨在精确计时的较理想的脉冲星高精度计时观测频段，还可以结合608-614 MHz频段或 406.1-410 MHz射电天文频段，和/或在某些情况下，2 690 至 2 700 MHz频段。

3 干扰的门限电平

脉冲星通常是弱无线电源。它显然需要达到相当高的信噪比，才能对脉冲星脉冲的到达时间（TOA）做出精确测量。因此，必须保护脉冲星高精度计时观测免受有害干扰。就单天线连续谱观测而言，ITU-R RA.769 建议书表 2 列出了不利于高精度脉冲星计时的干扰门限电平。

4 与其它业务共用频率的可行性

通常可以利用划分给RAS的频段，进行旨在保持基于脉冲星时标的脉冲星高精度计时观测。射电天文业务不与任何其它有源业务共用1 400-1 427 MHz和2 690-2 700 MHz频段。但可与除航空移动业务以外的固定和移动业务共用406.1-410 MHz频段，可与地面广播业务（1区）、除卫星航空移动业务以外的卫星移动业务（2区）以及固定、移动、无线电导航和广播业务（3区）共用608-614 MHz频段，因为RAS台站地处偏远，而且卫星移动业务链路是地对空方向的。

5 最适用于高精度计时的脉冲星

为进行高精度计时，最适合的脉冲星应具有最高的功率通量密度和最稳定的周期，而且在南北半球均可观测到。新脉冲星不断被发现，其中一些处于可用于精确计时的星系：持续的脉冲星调查使所有首选的脉冲星名单不断变化。表1综合列出了目前满足这些限制条件的脉冲星。

表 1

| 脉冲星 | 赤经 2000 | 偏角 2000 | 脉冲星 周期 (ms) | Pdot 10^{-15} (s/s) | P_b (days) | 分散 量数 (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 |
| J1024-0719 | 10:24: 38.700 | -07:19: 18.915 | 5.16220 455 | 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 | 4.07454 588 | 8.9405 10^{-6} | ----- | 3.1388 | 18 | 16 | 3 | (0.76) | -1.8 |
| J1909-3744 | 19:09: 47.438 | -37:44: 14.318 | 2.94710 802 | 1.4026 10^{-5} | 1.5334 | 10.3939 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |

对表1的说明:

列 1 脉冲星名称 (B名称指B(1950.0)时期, J名称指J(2000.0)时期)

列 2, 3 脉冲星坐标 (赤经、偏角)

列 5 脉冲星周期变化率(s/s)

列 6 双恒星系周期 (天)

列 7 分散量数 (pc cm^{-3}), 其中 $\text{pc} = \text{parsec} = 3.087 \cdot 10^{13} \text{ km}$ 。

列 8, 9, 10, 11 为分别处于 400、600、1 400 和 3 000 MHz 频段的平均频谱功率通量密度 ($10^{-29} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$)。括号中数值是通过频谱指数 α 计算得出的, 其中的通量密度为:

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

列 12 频谱指数 α

注 1 – 整个带宽 (BW) 微分色散延迟可在任意频率 f 上从以下算式的DM算出:

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

因此当带宽为 1 MHz 和分散量数为 10 时, 1.4 GHz 的 1 MHz 频段的两个边缘的微分色散延迟为 30.25 μs 。

6 结论

本报告为ITU-R 205/7课题提供了答案, 制定该课题的目的在于探讨利用毫秒脉冲星高精度计时观测建立和保持新的基于脉冲星的天文时标PT和DPT。

- 无线电脉冲星高精度计时观测为精确计时而选用的RAS频段有1 400-1 427 MHz、406.1-410 MHz或608-614MHz和/或 2 690 至 2 700 MHz频段。
- 就单天线连续谱观测而言, ITU-R RA.769建议书表2列出了不利于高精度脉冲星定时的干扰门限电平。
- 上述选用的RAS频段无须改变任何频率划分, 也无须改变与共用RAS频段的任何有源业务的共用方案。
- 通过对B1855+09、B1937+21、J1640+2224、J1713+0750、J0437-4715、J0613-0200、J1024-0719、J1744-1134和J1907-3744脉冲星进行精确计时观测, 可以最终实现利用最适合的脉冲星作为基准时钟提供长期稳定的新时标的目的。新脉冲星正在不断被发现, 其中一些处于可用于精确计时的星系: 持续的脉冲星调查使所有首选的脉冲星名单不断变化。这一目标清单无疑会随时间的推移得到充实。

参考文献

ILYASOV, KOPEIKIN 和 RODIN [1998年] 天文信函, 第24卷, 第275页。

ILYASOV、KUZMIN、SHABANOVA 和 SHYTOV [1999年] 脉冲星时标, Lebedev Proc., 第199卷。

MANCHESTER 和 TAYLOR [1977年] 脉冲星, 自由人出版集团, 加利福尼亚, 旧金山。

国际电联《射电天文手册》第2版, 2003年。
