

文章编号: 1000-8349(2005)01-0001-09

# 毫秒脉冲星计时观测进展

杨廷高<sup>1</sup>, 仲崇霞<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 国家授时中心, 陕西 710600; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 在评述国际上毫秒脉冲星长期计时观测成果的基础上, 比较了由毫秒脉冲星自转定义的脉冲星时  $PT$  与原子时  $AT$  的长期稳定度。毫秒脉冲星 PSR B1855+09 15 yr 的长期稳定度优于原子时  $TAI - USNO$ , 而接近原子时  $TAI - PTB$ ; 其短期稳定度主要受到计时观测误差的限制。毫秒脉冲星 PSR J0437-47 1 yr 以上的稳定度明显优于上述两原子时系统。毫秒脉冲星 PSR B1937+21 和 PSR J1713+07 的长期稳定度受到低频噪声影响, 但仍能对综合脉冲星时  $PT_{ens}$  的建立与保持作出贡献。另外, 介绍和评述了国际上脉冲星计时阵的现状与发展。随着脉冲星计时阵的实施, 在脉冲星时间标准研究、原子时误差、太阳系历表误差研究和引力波探测方面将会取得重要成果; 展望了国际上平方公里望远镜 (SKA) 在毫秒脉冲星计时观测方面的发展前景。

**关键词:** 天体测量学; 脉冲星时; 综述; 长期稳定度; 毫秒脉冲星; 脉冲星计时阵

**中图分类号:** P127.1<sup>+1</sup>      **文献标识码:** A

## 1 引 言

毫秒脉冲星自转频率具有很高的长期稳定度, 被誉为自然界中最稳定的时钟<sup>[1~4]</sup>。近年来, 利用毫秒脉冲星计时观测建立脉冲星时间标准的研究工作取得了新的进展。1994 年 Kapsi 等人<sup>[5]</sup> 在分析研究 Arecibo 天文台从 1984~1993 年对 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 两颗毫秒脉冲星计时观测资料的基础上, 发表了这两颗星各自定义的脉冲星时的稳定度结果, 即 1 yr 以上的长期稳定度达到与原子钟可比的水平。2001 年, Lommen<sup>[6]</sup> 又在分析研究这两颗星从 1984~2001 年近 17 yr 计时观测的基础上, 给出了它们长期稳定度的最新结果: PSR B1855+09 15 yr 的长期稳定度优于美国海军天文台 (USNO) 保持的原子时, 接近德国技术物理研究院保持的 PTB 原子时标准, 且这一结果仍有进一步改进和提高的空间; PSR B1937+21 是一个很好的脉冲星钟, 其计时残差的周期性波动表明, 它的自转很可能受到另一天体的扰动。继续坚持对它的长期计时观测, 改进其计时分析模型是十分必要的。上世纪 90 年代发现的毫秒脉冲星 PSR J0437-47 的计时观测获得了更令人鼓舞的成果<sup>[7,8]</sup>。由它得到的脉冲星时稳定度优于 PSR B1855+09。另外, 毫秒脉冲星 PSR J1713+07 约 9 yr 的计时资料表明, 虽然其计时残差存在与 PSR B1937+21 类似的波动, 但它仍有希望成为一个脉冲星钟<sup>[9]</sup>。

收稿日期: 2004-09-20; 修回日期: 2004-12-02

目前可观测的毫秒脉冲星数目不断增多, 已知银河系毫秒脉冲星约 60 颗左右 (不包括球状星团脉冲星), 且新的毫秒脉冲星搜寻工作一直在积极进行之中<sup>[3]</sup>。近年来, 国际上脉冲星计时阵 (Pulsar Timing Array, PTA) 获得长足发展, 约有 10 余个脉冲星计时阵先后投入工作。所谓 PTA, 就是射电望远镜按照规范的操作程序对一组选定的毫秒脉冲星进行长期计时观测, 这样的每一个望远镜就是一个 PTA<sup>[10]</sup>。由长期稳定度较高的一组毫秒脉冲星的计时观测可以建立综合的脉冲星时间标准, 它的长期稳定度应更好于任何单星的计时结果<sup>[11,12]</sup>。世界上现已投入运转的 10 余个 PTA 还可以组成全球脉冲星计时阵 (Universal Pulsar Timing Array, UPTA)。利用它, 不仅能建立全世界统一的脉冲星时间标准, 而且可以在检测原子时系统误差、行星历表改进和宇宙背景引力波探测诸方面取得重要成果<sup>[13]</sup>。

## 2 脉冲星长期稳定度及与原子时的比较

### 2.1 毫秒脉冲星 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 的早期计时观测结果

在毫秒脉冲星计时观测方面, 开创性的工作是 Princeton 大学脉冲星研究组利用 Arecibo 305 m 射电望远镜的计时观测<sup>[3]</sup>。1994 年 Kapsi 等人<sup>[5]</sup>发表了 Arecibo 射电望远镜对毫秒脉冲星 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 约 10 yr 的计时观测分析结果。结果表明, 毫秒脉冲星自转频率 1 yr 以上的稳定度与原子钟可比。

一般情况下, 用 Allan 方差的平方根  $\sigma_y(\tau)$  来表征原子钟的频率稳定度<sup>[14]</sup>。但研究表明,  $\sigma_z(\tau)$  方法更适合于脉冲星自转频率稳定度的估计, 该方法也同样适用于脉冲星与原子钟频率稳定度的比较<sup>[15,16]</sup>。 $\sigma_y(\tau)$  以观测量 (原子钟钟差或脉冲星计时残差) 的二次差分为基础, 对原子钟或脉冲星的频率漂移十分敏感; 而  $\sigma_z(\tau)$  则基于观测量的三次差分, 对原子钟或脉冲星频率漂移速率的变化十分敏感。最好的原子钟在时间  $\tau$  约为 5 yr 时, 其  $\sigma_z(\tau)$  接近于  $5 \times 10^{-15}$  水平。PSR B1855+09 在  $\tau \geq 3$  yr 时的水平与最好原子钟相当; 而 PSR B1937+21 的  $\sigma_z(\tau)$  则在  $\tau \approx 2$  yr 时最小, 同样与原子钟可比。但由于计时残差中存在着由低频计时噪声引起的明显系统变化趋势, PSR B1937+21 的长期稳定度受到限制。当时认为, 这可能是它所固有的计时噪声所致。PSR B1855+09 不存在这样的计时噪声, 可能是因为其特征年龄较大, 它的特征年龄 ( $\approx 5$  Gyr) 约为 PSR B1937+21 的 20 倍<sup>[3]</sup>。

随着许多新毫秒脉冲星的发现、更多射电望远镜的投入、计时观测软硬件的改进、观测精度的不断提高, 一些新的毫秒脉冲星计时观测结果相继发表, PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 累积约 17 yr 的计时结果也已问世。新的计时资料更加证明了毫秒脉冲星自转频率比原子时具有更高的长期稳定度, 对 PSR B1937+21 的低频计时噪声也有了新的认识和解释。

### 2.2 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 的长期计时观测结果

Arecibo 射电望远镜在发表 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 约 10 yr 的计时观测结果后, 于 1994 年初至 1997 年底进行了全面更新改造, 因而暂停了原有的计时观测。1998 年 1 月改造后的 Arecibo 射电望远镜继续对上述两颗星以及其他毫秒脉冲星进行计时观测, 并采用了新研制的 ABPP (Arecibo-Berkeley Pulsar Processor) 设备——一个带宽为 112 MHz 的多通道相干消色散处理器<sup>[6,17]</sup>。从 1989~1999 年, Backer 领导的脉冲星研究组还用美国国家射电天文台 (NRAO) 42 m 射电望远镜对 PSR B1855+09、PSR B1937+21 和 PSR J1713+07

等毫秒脉冲星在 800 MHz 和 1470 MHz 进行了计时观测<sup>[18]</sup>，那些观测对 Arecibo 射电望远镜因故中断 4 yr 的计时观测的前后连接起到了关键作用<sup>[6]</sup>。

对 NRAO 42 m 和 Arecibo 两望远镜计时观测系统得到的脉冲到达时间  $TOA'$  分别进行延迟修正，有：

$$TOA = TOA' + \Delta_{\text{CLOCK}} + \Delta_{\text{DM}} + \Delta_{\text{BACKEND}}, \quad (1)$$

式中， $\Delta_{\text{CLOCK}}$  为观测参考的原子钟相对于国际原子时 TAI 的差值， $\Delta_{\text{DM}}$  为与观测频率相关的色散改正， $\Delta_{\text{BACKEND}}$  为计时观测后端处理系统的延迟量。应用 (1) 式修正后的 TOA，可以认为是与计时观测参考的原子钟、采用的观测频率和后端信号处理系统延迟无关的量。由于两望远镜的地理位置不同，必须采用它们相应的地理位置的测地坐标 ( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ) (误差小于 1 m) 和国际计量局 (BIPM) 公布的  $UT1 - UTC$ ，将测站 TOA 转换到地心 TOA。在这一转换中， $UT1$  误差对 TOA 的影响约为 0.1 ns 量级。另外，实际上，脉冲信号从望远镜前端接收系统到控制室后端处理系统之间的传输延迟难以精确测定，因此，必须利用这两个望远镜时间重叠的计时资料，在各自利用 (1) 式修正且转换到地心 TOA 后，再直接对两望远镜共同星的 TOA 进行分析比较，以便确定两者间的系统差异。最后，利用该系统差将所有观测归算到统一系统。PSR B1855+09 15.6 yr 和 PSR B1937+21 16.8 yr 的均匀 TOA 资料就是这样得到的。

应用 TEMPO 软件和 JPL 行星历表 DE405 可将地心 TOA 转换至太阳系质心，采用合适的计时模型，即可精确测定这两颗星的天体测量参数 (位置、自行、距离) 和自转参数 (自转周期及其一阶导数等)<sup>[6]</sup>。PSR B1855+09 是颗双星，其双星轨道参数也同时由计时模型精确测定。在这些参数确定之后，得出 PSR B1855+09 15.6 yr 的计时残差的均方误差为  $\pm 2.6 \mu\text{s}$ ，且不存在任何系统趋势；对于 PSR B1937+21，基于 16.8 yr 的 TOA 资料，采用与 PSR B1855+09 相同的计时模型 (不包括双星轨道参数)，得到的计时残差呈明显系统变化趋势，其均方误差为  $\pm 9.3 \mu\text{s}$ 。在计时模型中增加自转周期二阶导数项，则解算得到的 PSR B1937+21 计时残差均方误差减小为  $\pm 1.7 \mu\text{s}$ ，但残差中仍存在小幅度的周期性波动<sup>[6]</sup>。如此分析得到的计时残差实际上就是参考的原子时 TAI 与计时模型定义的脉冲星时 (PT) 的差值，即  $TAI - PT$ <sup>[11]</sup>。

应用  $\sigma_z(\tau)$  方法得到的 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 的  $TAI - PT$  稳定度 (也可称自转频率稳定度) 分别绘于图 1 和图 2。图 1 中还绘出了用同样方法计算的美国海军天文台保持的原子时 ( $TAI - USNO$ ) 和德国技术物理研究院保持的原子时 ( $TAI - PTB$ ) 的稳定度曲线。

从图 1 可以看出，PSR B1855+09 在 10 yr 内的稳定度低于原子时，这主要是由于它计时观测误差较大所致。根据上述讨论，PSR B1855+09 计时残差均方误差为  $\pm 2.6 \mu\text{s}$ ，而原子钟比对误差一般不大于  $\pm 20 \text{ ns}$ ；随着观测时间增加，PSR B1855+09 的稳定度曲线不断下降，而原子时则呈现上升趋势。在  $\tau \geq 15 \text{ yr}$  时，PSR B1855+09 的长期稳定度明显优于原子时  $TAI - USNO$ ，接近  $TAI - PTB$ 。应该指出，美国海军天文台在世界上以较多数量的商品原子钟 (氢钟、铯钟 HP 5071 等) 守时而著名，德国技术物理研究院则是实验室基准原子钟 (Primary Clock) 守时的典型代表。另外，PSR B1855+09 的 TOA 由两望远镜资料拼接而成，Arecibo 射电望远镜每月观测 1~2 次，NRAO 42 m 射电望远镜每两个月才观测一次，并且由于口径小，计时噪声较大<sup>[18]</sup>。如能增加计时观测次数，并随着望远镜数量的增加，PSR B1855+09 的计时误差有望接近亚微秒量级 (这也是现代脉冲星计时观测追求的精度)，其短

期稳定度肯定会大大提高，而长期稳定度也将得到进一步改善。

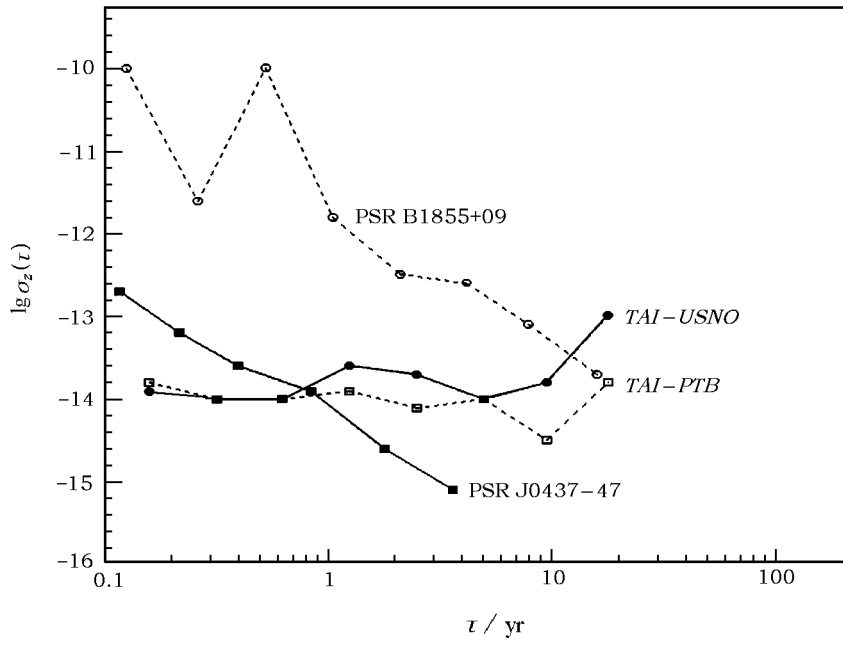


图 1 毫秒脉冲星与原子时频率稳定度的比较

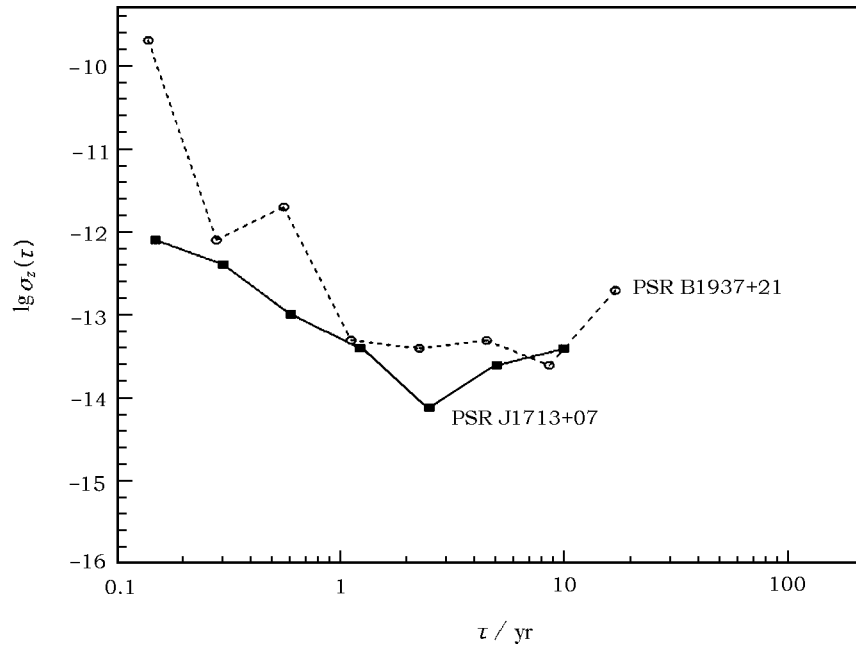


图 2 毫秒脉冲星 PSR B1937+21 与 PSR J1713+07 的频率稳定度

从图 2 可以看出, PSR B1937+21 的稳定度在约 1 yr 后接近  $10^{-14}$  水平, 而 10 yr 后曲线呈现上升趋势, 这是由其计时残差中的系统波动引起的。有的研究者认为, PSR B1937+21 是颗双星, 其系统波动是伴星扰动的结果<sup>[19]</sup>。也有人认为, 可能有一颗行星绕其作轨道运动, 行星轨道周期在 17 yr 以上<sup>[6,11]</sup>。无论采用双星模型还是行星轨道运动模型拟合这一 TOA 资料, 均能使其残差的均方误差明显减小。当然, 要得到正确结论, 仍需进一步积累 TOA 资料, 以便最终改进和完善它的计时模型<sup>[20]</sup>。

### 2.3 PSR J1713+07 的稳定度

PSR J1713+07 是颗自转周期为 4.57 ms 的脉冲双星, 其双星轨道运动周期为 67.8 d。该星是颗辐射较强的毫秒脉冲星, 在 1510 MHz 和 2695 MHz 的流量密度分别为  $(8\pm 2)$  mJy 和  $(2.9\pm 0.9)$  mJy<sup>[9,21]</sup>。应用 Arecibo 射电望远镜从 1992~2002 年 (其中 1994 年初至 1997 年底中断观测期间用 NRAO 42 m 射电望远镜的计时观测) 约 10 yr 的 TOA 资料, 在确定了天体测量参数、自转参数和相关双星轨道参数后, 得到了 PSR J1713+07 以国际原子时 TAI 为参考的计时残差<sup>[6,9]</sup>, 也采用  $\sigma_z(\tau)$  方法评估了该星的自转频率稳定度 (如图 2)。由图 2 可见, PSR J1713+07 在  $\tau \approx 2$  yr 时的稳定度好于  $10^{-14}$ ; 但之后, 曲线又呈现上升趋势。这可能来源于其自身自转的内在不均匀性, 也可能是受未探明的空间环境 (如可能存在的行星) 的影响。目前, 除 Arecibo 射电望远镜外, 还有一些其他射电望远镜正在继续或加强对 PSR J1713+07 的计时观测, 以便进一步对其 TOA 的系统误差进行深入研究。即便图 2 所示的稳定度曲线确实是其固有特征, 它在  $\tau \approx 2$  yr 时的稳定度亦与原子钟可比, 对于综合脉冲星时的建立与保持仍能作出贡献。

### 2.4 PSR J0437-47 的稳定度

PSR J0437-47 是颗自转周期为 5.75 ms 的脉冲双星, 其双星轨道周期约为 5.741 d, 是至今发现的辐射最强、距离最近 ( $162 \text{ pc} < d < 205 \text{ pc}$ ) 的毫秒脉冲星<sup>[7]</sup>。自被发现后, Parkes 天文台 64 m 射电望远镜很快就把它纳入长期计时观测对象。Parkes 天文台计时观测是采用自制的快速脉冲星计时仪 (Fast Pulsar Timing Machine, FPTM), 以及改进了的数据采集和处理软件<sup>[22]</sup>。在利用该星将近 4 yr 计时观测的 TOA, 精确测定了它的天体测量参数、自转参数和双星轨道参数后得知, 这些参数的测定精度足以与观测时间更长的 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 相比。PSR J0437-47 计时残差的均方误差为  $\pm 0.5 \mu\text{s}$ , 用  $\sigma_z(\tau)$  分析得到的稳定度曲线绘于图 1<sup>[7,8]</sup>。由图 1 可见, 该星在  $\tau > 1$  yr 的稳定度明显好于 TAI-USNO 和 TAI-PTB 两原子时系统, 也好于 PSR B1855+09, 这表明该星固有的自转频率非常稳定。PSR J0437-47 较高的计时精度除了内在因素外, 还受它辐射强、观测信噪比高; 距离近, 星际介质对信号传播延迟修正, 特别是色散延迟修正的误差相对较小的影响。这也是该星计时残差稳定度较高的原因之一。

### 2.5 讨 论

以上初步分析了至今已公开发表的 4 颗毫秒脉冲星的计时观测结果。另有 10 余颗毫秒脉冲星也已于 2000 年前后陆续列为长期计时观测的对象。新的计时观测结果不仅数量增加, 且精度也有提高。根据现已发表的结果, PSR J0437-47 由于频率稳定度高, 在守时方面具有明显优势。PSR B1855+09 虽然短期稳定度不如原子时, 但其长期稳定度比原子时有优势, 并且有望得到进一步改进。一般说来, 毫秒脉冲星在长期稳定度方面比原子时有优势, 因此采用

毫秒脉冲星与原子钟结合守时, 有利于两者优势互补, 对原子时长期稳定度的改进特别有意义<sup>[23,24]</sup>。PSR B1937+21 和 PSR J1713+07 计时残差中有明显系统趋势, 更长期观测可能会改进其计时模型<sup>[6]</sup>。采用合适的长期稳定度算法, 利用一组毫秒脉冲星建立的综合脉冲星时  $PT_{\text{ens}}$ , 可以压缩或消除单星守时的误差, 提高长期稳定度<sup>[11]</sup>。可以预言, 利用现已获得的毫秒脉冲星计时残差构建  $PT_{\text{ens}}$  的研究将会取得更有意义的成果。

### 3 脉冲星计时阵 (PTA)

上世纪 90 年代初, Foster 和 Backer<sup>[10]</sup> 提出 PTA 概念。PTA 要求所选定的一组毫秒脉冲星具有较高的长期稳定度, 并且最好能均匀分布于天空。在保持观测目标数量相对稳定、空间分布尽可能理想的前提下, 新发现的更理想的毫秒脉冲星可以补充到观测纲要中去, 自转频率稳定度不理想者可以删除。计时观测最好能同时在两个频率上进行, 以便消除色散量 (DM) 变化对 TOA 的影响<sup>[25]</sup>。

#### 3.1 科学目标

利用毫秒脉冲星具有较高长期稳定度的优势, 通过 PTA 的长期运作, 可实现下述主要目标<sup>[13]</sup>:

- (1) 建立综合脉冲星时间标准, 检测原子时误差;
- (2) 改进太阳系行星历表;
- (3) 探测宇宙随机背景引力波 (GWB)。

毫秒脉冲星参数的测定是以原子时为参考的 (一般选用 TAI 或 TT (BIPM)), 原子时误差对脉冲星参数拟合与计时残差构成影响, 但该效应是单极性的, 也就是说它对任何脉冲星的影响是相同的。由任何观测站计时观测得到的 TOA 转换到太阳系质心时必须应用行星历表, 行星历表误差的影响具有二极性。对位于地球上相反方向的两颗脉冲星来说, 历表误差对计时残差的影响正好符号相反。GWB 对计时观测的影响具有四极性。以在天球成正交分布的 4 颗脉冲星为例, 对于位于地球上角距为  $90^\circ$  的两颗脉冲星, GWB 对两者计时观测的影响是符号相反; 而对于角距为  $180^\circ$  的两颗脉冲星, GWB 对两者的影响则是符号相同。GWB 对单颗脉冲星的影响取决于地球与该脉冲星连线方向与 GWB 传播方向之间的夹角, 并与 GWB 的幅度成正比<sup>[8]</sup>。因此, 在用合适的计时模型确定每颗脉冲星的参数后, 剩余的计时残差中仍包含有原子时、行星历表误差和 GWB 信息。进一步分离这些信息, 至少要观测 5 颗均匀分布于天球的毫秒脉冲星<sup>[8,10]</sup>。实际上, 现已投入运行的 PTA 大多都同时观测 10 颗以上的毫秒脉冲星, 目的是利用计时阵多年的观测在精确测定每颗脉冲星基本参数 (又称独立参数) 的同时, 也能解算出原子时、行星历表误差和 GWB 功率谱密度 (这些又被称为全球参数, Globe Parameter)。应该指出, 毫秒脉冲星自转频率具有很高的长期稳定度是全球参数检测的基础; 反之, 全球参数的检测更有利于脉冲星时间标准研究。PTA 是脉冲星时间标准研究由单星向多星发展的标志, 它为综合脉冲星时的建立和保持奠定了基础。

#### 3.2 PTA 现状及发展

PTA 始于上世纪 90 年代, 至今世界上已有十余个 PTA 投入工作。Princeton 大学脉冲星研究组与 Backer 领导的 Berkley 大学研究组利用 Arecibo 射电望远镜的计时观测, 在已取

得 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 长期 TOA 资料基础上, 继续坚持约 10 颗毫秒脉冲星的监测 [6]。与此同时, Backer 研究组用 NRAO 42 m 射电望远镜长期坚持 6 颗毫秒脉冲星的计时观测 [18], 并从 1996 年开始用 NRAO 100 m 射电望远镜进行 12 颗毫秒脉冲星的 TOA 观测 [26]。澳大利亚 Parkes 天文台 64 m 射电望远镜已建立起 32 颗毫秒脉冲星的计时观测, 并计划第一期的观测时间至少在 5 yr 以上 [8]。法国 Nancay 射电望远镜选定自转周期导数  $\dot{p} < 2 \times 10^{-20}$  s/s 的 20 颗毫秒脉冲星作为计时观测对象 [27], 并且已发表了部分初步观测结果 [28,29]。德国 Effelsberg 100 m 望远镜长期坚持 10 颗毫秒脉冲星的监测 [30]。俄罗斯的 Kalyazin 64 m 射电望远镜已取得 8 颗毫秒脉冲星约 5 yr 的观测成果 [31], 并与日本通信研究所 (CRL) 合作继续实施其 PTA 计划。该计划的观测对象绝大部分为密近脉冲双星, 目的是试图研究以脉冲双星轨道运动为基础的脉冲双星时间 (BPT), 理论上 BPT 比 PT 具有更高的长期稳定度 [32~34]。另外, 英国 Jodrel Banck 射电天文台、荷兰的射电干涉阵也都建立了自己的 PTA 项目, 并积极参与国际合作。日本 CRL 34 m 天线的计时观测也已取得满意结果 [35]。我国乌鲁木齐南山站 25 m 射电望远镜很快将开展毫秒脉冲星的计时观测, 国家天文台密云观测站的 50 m 射电望远镜也将致力于毫秒脉冲星的计时观测。

在 PTA 迅速发展的基础上, 有人提出了 UPTA 概念 [6], 要求世界上已经建立的每个 PTA 应尽量观测与其他 PTA 相同的公共毫秒脉冲星, 利用公共星 TOA 的分析比较, 将所有的 PTA 组合成统一的 UPTA, 通过密切的国际合作, 实现预定的 PTA 科学目标。

### 3.3 平方公里望远镜

等效接收面积达  $1 \text{ km}^2$  的射电观测阵列 (Square Kilometer Array, SKA) 是 15 个国家参与的国际合作项目。Taylor [36] 首先提出了 SKA 的脉冲星搜寻和毫秒脉冲星计时观测计划。据理论估计, 辐射流量密度  $L > 0.3 \text{ mJy}$  的脉冲星数量为  $(3.5 \pm 1.5) \times 10^5$ , 假设其中 20% 的脉冲星的射电辐射束能扫过地球, 则在地球上能探测到约 70000 颗脉冲星。至今, 已经探测到的脉冲星约为 1500 颗, 且大部分为较亮脉冲星, 其中  $0.3 \text{ mJy} < L < 3 \text{ mJy}$  的脉冲星仅占已发现数量的 4% 左右。

SKA 搜寻脉冲星的工作方式有两种: 一是联阵方式 (Tied Array Mode)。采用该方式对富含脉冲星天区 (如 SMC/LMC 天区) 进行定向搜寻, 则能在一个月发现 1000 颗左右脉冲星; 二是多天线单元的信号非相干累加方式。利用该方式在半年内可以探测全天 80% 的区域。在 70 cm 波段上, SKA 的灵敏度为 Parkes 64 m 射电望远镜的 20 倍。因而, SKA 有望发现上万颗新的脉冲星和至少几百颗新的毫秒脉冲星, 其中不乏长期稳定度高、对天文学研究具有重要意义毫秒脉冲星和脉冲双星, 甚至可能探测到亚毫秒脉冲星 [37]。

SKA 具有空前高的灵敏度, 能对几百颗毫秒脉冲星进行计时观测, 并能得到好于亚微秒量级精度的计时残差。由这样几百颗毫秒脉冲星构成的计时阵, 能以前所未有的精度建立综合脉冲星时间标准, 并在原子时误差、太阳系行星历表误差研究和引力波探测方面取得突破性成果。

## 4 结 论

计时观测表明, 毫秒脉冲星的长期稳定度与原子钟可比, 有的毫秒脉冲星, 如 PSR J0437-47

1 yr 以上的稳定度明显优于  $TAI - USNO$  和  $TAI - PTB$  原子时系统。PSR B1855+09 在  $\tau \geq 15$  yr 的长期稳定度优于  $TAI - USNO$ ，但其短期稳定度不高，这主要因为其 TOA 的测量误差大，且观测次数少，Arecibo 射电望远镜每月观测 1~2 次，而 NRAO 42 m 射电望远镜每 2~3 月才观测一次。随着计时观测望远镜的增加，有的射电望远镜已由“兼职”改为“专职”，再加上相干消色散新技术的应用和 TOA 分析处理软、硬件的改进，部分较亮毫秒脉冲星有望得到亚微秒精度的计时残差，而多数毫秒脉冲星也可获得约  $\pm 1 \mu\text{s}$  的精度。因此，毫秒脉冲星的稳定度将会得到进一步改进。

至于脉冲星时的应用，第一步可能是毫秒脉冲星与原子钟结合守时，这能利用脉冲星时长期稳定度的优势来改进原子时系统的长期稳定度。PTA 的迅速发展和规范运作为综合脉冲星时的建立与保持创造了条件。在近 5 年内，有望利用国际上 PTA 的计时观测资料，建立由 10 颗左右毫秒脉冲星组成的综合脉冲星时，它的稳定度高于任何单星所得的脉冲星时的稳定度。与此同时，由 PTA 观测解算毫秒脉冲星独立参数和全球参数的 SUPERTEMPO 软件包的问世，将使原子时误差、行星历表误差和引力波探测研究取得重要成果。UPTA 的发展和未来 SKA 的实施也将更有利于该领域研究取得突破性进展。

### 参考文献:

- [1] Backer D C. In: Edward P, van den H eds. *Timing Neutron Stars*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989: 3
- [2] Taylor J H. In: Edward P, van den H eds. *Timing Neutron Stars*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989: 17
- [3] Lorimer D R. <http://www.livingreviews.org>, 2001
- [4] Hill C M. *Galilean Electrodyn.*, 1995, 6(1): 3
- [5] Kaspi V M, Taylor J H, Ryba M F. *ApJ*, 1994, 428: 713
- [6] Lommen A N. PhD Thesis, Berkeley: University of California, 2001
- [7] Sandhu J S. PhD Thesis, California: California Institute of Technology, 2001
- [8] Hobbs G. <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar>, 2004
- [9] Splaver E M. PhD Thesis, Princeton: Princeton University, 2004
- [10] Foster R S, Backer D C. *ApJ*, 1990, 361: 300
- [11] Petit G, Tavella P. *A&A*, 1996, 308: 290
- [12] Petit G, Thomas C. *Proc. 24th PTTI meeting*, 1992: 73
- [13] Workshop on Millisecond Pulsar Timing Array and International Cooperation, Associated with IAU symposium No. 218, Sydney, 2003
- [14] Allan D. *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1987, 34: 647
- [15] Matsakis D N, Taylor J H, Eubanks T M. *A&A*, 1997, 326: 924
- [16] Taylor J H. *Proc. IEEE*, 1991, 79: 1054
- [17] Backer D C, Dexter M R, Zepka A *et al.* *PASP*, 1997, 109: 61
- [18] Backer D C, Hama S, van Hook S. *ApJ*, 1993, 404: 636
- [19] 龚碧平. 中国天文学会 2003 年学术年会 (摘要), 北京: 中国科学院国家天文台, 2003: 70
- [20] Backer D C. *ASP Conf. Ser.*, 2004, TBD
- [21] Camilo F, Foster R S, Wolszczan A. *ApJ*, 1994, 437: 139
- [22] Britton M C, van Straten W, Bailes M *et al.* *ASP Conf. Ser.*, 2000, 202: 73
- [23] Matsakis D N, Foster R S. <http://www.maia.usno.navy.mil/jcz/public>, 1997
- [24] Petit G. <http://www.bipm.fr/cc/cctf/allowed/15>, 1997



- [25] Backer D C, Foster R S, Sallmen S. *Nature*, 1993, 365: 817
- [26] Backer D C. In: van Paradijs J, van den Heuvel E P J, Erik K eds. *Compact Stars in Binaries*, IAU Symp. 165, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996: 197
- [27] Cognard I, Lestrade J F, Backer D C *et al.* *ASP Conf. Ser.*, 2000, 202: 55
- [28] Cognard I, Lestrade J F, Maitia V. In: Tran Thanh van ed. *Gravitational Waves and Experimental Gravity*, Les Arcs: World Publishers, 1999: 319
- [29] Cognard I, Lestrade J F. *A&A*, 1997, 323: 211
- [30] Lange Ch, Wex N, Kramer M *et al.* *ASP Conf. Ser.*, 2000, 202: 61
- [31] Doroshenko O V, Hyasov Y P, Oreshko V V. *ASP Conf. Ser.*, 2000, 202: 57
- [32] Rodin A E, Kopeikin S M, Yu Ilyasov. <http://www.prao.psn.ru/english/publikacii>, 2001
- [33] Kopeikin S M. *MNRAS*, 1997, 288: 129
- [34] Kopeikin S M. *MNRAS*, 1999, 305: 513
- [35] Hanado Y, Shibuya Y, Hosokawa M. *PASJ*, 2002, 54: 305
- [36] Taylor R. SKA Science Workshop, held in Calgary, Canada in July, 1998
- [37] Phinney E S, Kulkarni S R. *ARA&A*, 1994, 32: 591

## Progress on Millisecond Pulsar Timing Observations

YANG Ting-gao<sup>1</sup>, ZHONG Chong-xia<sup>1,2</sup>

(1. *National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Shaanxi 710600, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** Long term timing stability for some millisecond pulsars is reviewed and analyzed. Comparison between PSR B1855+09 timing results from Arecibo and some atomic time scales exhibits that the long term stability of the pulsar  $\sigma_z(\tau)$  at  $\tau \geq 15$  yr is better than that of atomic time scale  $TAI-USNO$  and approaches  $TAI-PTB$ . Short term timing behavior for this pulsar is mainly affected by its larger timing error. When more regular timing observations are made and more radio telescopes contribute to timing observations of this pulsar the timing stability of PSR B1855+09 may be further improved. Millisecond pulsar PSR J0437-47 is a perfect celestial clock, its timing stability is obviously better than PSR B1855+09 and some atomic time scales. Long term stabilities of PSR B1937+21 and PSR J1713+07 seem limited by low frequency timing noise. However they may contribute to make an ensemble pulsar time scale. Millisecond pulsar timing array (PTA) has been developed and operated over the world. Uniform distribution on the sky of target millisecond pulsars is needed and some common millisecond pulsars for timing of PTAs are also important to connection of PTAs. Information on errors of atomic time scale and ephemeris may be derived and gravitational wave may be detected from PTAs. In the future, powerful Square Kilometer Array (SKA) will make contribution to both new pulsar search and high precision timing observations for millisecond pulsars.

**Key words:** astrometry; pulsar time scale; review; timing stability; millisecond pulsar; pulsar timing array (PTA)