

# 基于实测数据的综合脉冲星时研究\*

陈 鼎<sup>1†</sup> 朱幸芝<sup>2,3</sup> 王 娜<sup>4</sup>

(1 中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

(2 中国科学院国家授时中心 西安 710600)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

(4 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

**摘要** 介绍了脉冲星计时在几个重要方面的应用, 给出了脉冲星时间尺度的简要定义. 基于澳大利亚 PARKES 天文台的毫秒脉冲星实测计时数据, 建立了基于 4 颗毫秒脉冲星的综合脉冲星时, 并将其稳定度  $\sigma_z$  与原子时进行比较, 最后分析了影响综合脉冲星时的几个重要因素及其对脉冲星计时精度的影响与应用.

**关键词** 天体测量学, 时间, 脉冲星: 普通

**中图分类号:** P 127; **文献标识码:** A

## 1 引言

脉冲星的发现被称为二十世纪六十年代四大天文学重大发现之一<sup>[1]</sup>. 在 1967 年 Bell 发现第 1 颗脉冲星<sup>[2]</sup> 后不久, 科学家就发现脉冲星有着极其稳定的自转周期, 目前已发现的毫秒脉冲星的长期稳定度可达到  $10^{-15}$  量级, 可与原子钟的相对稳定度相比, 并可用于监测原子钟的长期稳定度<sup>[3]</sup>.

在时间测量的发展史上, 时间标准不断变化和改进: 以地球自转为标准的世界时 UT, 以地球绕太阳公转为标准的历书时 ET, 以原子能级之间的跃迁为标准的原子时 AT 和兼顾原子时尺度均匀性并反映地球自转而由原子钟产生的协调世界时 UTC. 毫秒脉冲星具有钟的 3 种基本特性: (1) 具有长期连续的周期运动特征; (2) 具有较高的周期稳定度 ( $10^{-15}$  以上); (3) 具有计数和显示特征. Ilyasov 等<sup>[4]</sup> 确立了脉冲星时间尺度的原理, 并对脉冲星时间 (秒) 的定义做了初步讨论. 随着观测设备和技术的不断改进以及数据分析技术的不断发展, 脉冲星时间尺度的建立和应用是可能的, 也是必要的.

由单颗脉冲星定义的脉冲星时受多种噪声源的影响, 为了削弱这些噪声源对单脉冲星时的影响, 采取综合脉冲星时算法得到综合脉冲星时, 从而提高综合脉冲星时的长期稳定度. 以往关于综合脉冲星时的研究, 主要基于 1994 年 Kaspi 等<sup>[3]</sup> 公布的 Arecibo 望远镜的 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 计时数据, 数据未经严格校准, 导致计时精度不高, 且星源少 (仅两颗), 不能满足高精度综合脉冲星时的研究需求. 且因为数据点不

2011-01-27 收到原稿, 2011-04-01 收到修改稿

\* 中国科学院重要方向项目 (KJCX2-YW-T09) 和国家自然科学基金项目 (10803006) 资助

† ding@ntsc.ac.cn

足, 经过多次插值、移动平均处理后, 使得计时残差数据偏离了本征值, 而后续的算法计算综合脉冲星时就更没有必要了. 本文中采用 1996 年 Petit 等<sup>[5]</sup> 提出的综合脉冲星时间尺度的经典加权算法, 且基于著名的 PARKES 天文台观测到的 4 颗毫秒脉冲星的最新高精度计时数据, 建立了综合脉冲星时间尺度, 并和原子时时间尺度进行稳定度的比较.

## 2 脉冲星计时应用

澳大利亚 64 m 望远镜是世界上最大的射电望远镜之一, 在南半球甚至全球也是最好的脉冲星发现和观测研究设备, 目前致力于基于毫秒脉冲星计时阵探测引力波的研究, 并将此列为三大科学目标之一<sup>[6]</sup>. 毫秒脉冲双星的两个中子星很近, 有很强的引力辐射, 而引力辐射可以导致两颗中子星越来越靠近, 轨道周期越来越短. 利用广义相对论理论能把轨道周期的变化率精确地计算出来. 要检测引力波的存在, 可通过观测精确地测量出射电脉冲双星轨道周期的变化.

脉冲星也可作为探测银河系大范围磁场分布和特性的探针. 银河系内脉冲星的法拉第旋率是整个信号路径上磁场和电子密度的乘积的积分, 即  $RM = 0.81 \int n_e B dl$ , 脉冲星的色散量是路径上电子密度的积分, 即  $DM = \int n_e dl$ . 因此将脉冲星的法拉第旋率 RM 和脉冲星的色散量 DM 这两个可以测量的物理量结合, 可以消除电子密度的影响, 直接测量脉冲星与观测者之间磁场的平均场强和方向. 通过测量银河系各处的大量脉冲星, 就可以反解出银河系磁场结构, 这是唯一的测量银河系大范围磁场的办法. 利用脉冲星的法拉第旋率和色散数据不仅可以得到星际磁场的强度, 还可以测磁场方向. 经过十多年长期不懈努力, 获得了国际上最大样本脉冲星的法拉第旋率数据, 得到了银河系盘和银河系晕的大尺度磁场结构, 加上过去在银河系中心发现的垂直磁场, 构建了银河系总体磁场结构<sup>[7]</sup>.

一般公认为: “只要由振荡器、计数器和显示器等组成的钟系统不变, 那么这个钟就可以成为时间尺度产生器”<sup>[8]</sup>. 脉冲星钟系统可以作为时间尺度产生器是由于它符合公认的钟的原理和特征, 即高精度的频率间隔; 重复周期的均匀性好; 能连续、可靠地运行; 特征年龄长. 借助原子时或其他辅助设备可以计数和显示时间, 且具备数学科学特征, 即脉冲星自转频率、到达时间及与原子时关系等, 均可用数学公式精确地表示. 计时误差要素的改进还将不断进行, 如原子时参考基准、脉冲星计时模型的精确化、天文坐标精细的测量、相对论效应的精确测量改正、空间介质对电波传播造成的时延和消色散等的精确修正及测量系统、技术手段的改进等都有较大余地, 这将使得脉冲星时间尺度应用具备可行性<sup>[9]</sup>.

## 3 脉冲星时间尺度

图 1 为脉冲星计时残差观测系统示意图<sup>[10]</sup>, 包括 TOA 测量的基本步骤: 脉冲星自转同时发射射电脉冲束, 射电脉冲束穿过星际介质到达射电望远镜, 由射电望远镜接收到一系列脉冲信号, 然后经过一个高灵敏度的接收机对接收到的脉冲信号进行放大处理, 对其消色散和周期折叠处理后得到一个主脉冲轮廓. 选取脉冲轮廓上的尖峰作为基准点,

脉冲基准点的到达时间即 TOA, TOA 的测量是以测站的原子钟为参考的, 所参考的原子钟必须保证定期与国立原子时实验室提供的时间戳信号进行比对. 脉冲星计时观测要求对选定的毫秒脉冲星在固定的观测频率上, 获得一系列 TOA 值, 观测时间间隔一般在几周之内, 且能够连续多年进行监测.

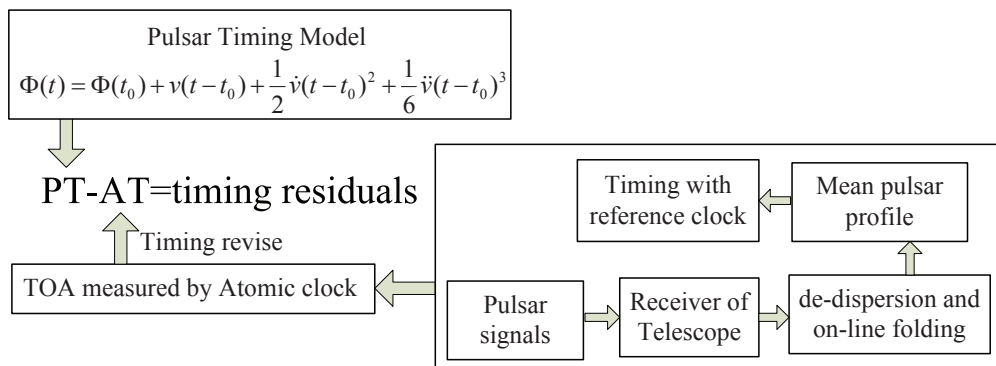


图 1 脉冲星计时观测示意图

Fig. 1 Sketch of pulsar timing observation

在脉冲星固有参考架中, 毫秒脉冲星自转相位可以用级数展开来表示:  $\Phi(t) = \Phi(t_0) + \nu(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{\nu}(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\ddot{\nu}(t - t_0)^3$ , 式中  $\Phi(t)$  为历元  $t$  累计的总脉冲相位;  $\Phi(t_0)$  为初始历元  $t_0$  的相位;  $\nu$ 、 $\dot{\nu}$  和  $\ddot{\nu}$  分别为脉冲信号频率及其一阶、二阶导数. 对多数毫秒脉冲星而言, 我们主要关心  $\dot{\nu}$  和  $\ddot{\nu}$ , 高阶项影响几乎可以忽略. 这种连接脉冲星累计相位与实时  $t$  的物理过程, 给出了在脉冲星固有参考架中得到脉冲星时标的有效理论模型. 在此定义当脉冲星累积相位连续取整所对应的时刻, 记为脉冲星时 PT, 则计时观测的基本量计时残差为预测的 TOA 即 PT 与观测得到的 TOA 之差<sup>[11]</sup>.

对计时观测得到的残差进行最小二乘拟合, 得到脉冲星的自转周期及其变化率、脉冲星的位置、自行、距离等参数. 拟合得到脉冲星基本参数的同时也确定了 PT 的分析模型, 可以预报以后的脉冲到达时刻, 即由毫秒脉冲星的观测定义了一个时间尺度<sup>[11]</sup>. 单颗脉冲星时间尺度受多种随机噪声源的影响, 由多颗脉冲星组合得到的综合脉冲星时可以消除随机误差, 得到精度和稳定度更高的时间尺度.

## 4 综合脉冲星时

### 4.1 观测数据简介

PARKES 测量的 TOA 以观测站的原子钟提供的时间为准, 由氢钟提供的 1pps 信号通过与 GPS 时间进行比对, 可实时更正钟差<sup>[12]</sup>. 由 BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) 公布的 circular T 给出了任何实时系统与 UTC 的钟差, 由 UTC 通过润秒可得到 TAI, 经 BIPM 事后处理得到的 TT 系统每年都重新修订, 它综合了 TAI 的长期稳定性和频率基准的准确度, 并力图消除频率漂移和季节性变化, 是目前最适合脉

冲星时研究的时间参考系统, 故最终都以原子时标准 TT(BIPM)2005 为参考.

为将观测站测量到的 TOA 时间转换到脉冲星固有坐标系, 则必须考虑如下时间修正项:

$$\Delta t = \Delta_c + \Delta_A + \Delta_{E_\odot} + \Delta_{R_\odot} + \Delta_{S_\odot} - D/f^2, \quad (1)$$

$\Delta_c$  为测站的钟差修正,  $\Delta_A$  为地球大气层及其自转所引起的光行差延迟,  $\Delta_{E_\odot}$  是由太阳系中地球和其它天体运动引起的时间膨胀和引力红移产生的爱因斯坦延迟,  $\Delta_{R_\odot}$  为脉冲信号到达观测站和太阳系质心的时间延迟,  $\Delta_{S_\odot}$  为 Shapiro 延迟, 是太阳附近的时空弯曲对信号传播产生的影响,  $D$  为色散常量,  $D/f^2$  即频率为  $f$  时所对应的色散量, Tempo2 中所涉及的每次观测的色散值均通过多频观测最终确定, 且由 CPSR2 消色散系统利用相位相干法实时消除色散. 以上几项的具体计算步骤可参见 Hobbs 等<sup>[12]</sup>.

在测量太阳系质心与地球的相对坐标时, 太阳系天体历表的选择对最终残差的计算有很大影响, 为将天体历表所带来的误差降至最低, PARKES 所有观测均参考了最新星历模型 — JPL 的 DE405<sup>[12]</sup>.

以下综合脉冲星时的计算均是基于 Tempo2、以修正后的 TOA 测量数据为输入拟合后得到的残差数据, 选用的参与综合脉冲星时计算的 4 颗星 J1744-1134、J2145-0750、J1024-0719、J1045-4509 的计时观测资料均使用 PARKES 台的 PPTA (PARKES Pulsar Time Array) 于 2009 年前的观测数据, 已被 PARKES 台列入常规观测计划, 与 Verbiest 等<sup>[13]</sup> 公布的脉冲星计时资料一致. 具体处理过程见 Verbiest 等<sup>[13]</sup>.

#### 4.2 脉冲星的选择

脉冲星是自然界中可与量子频标相媲美的一种天然频率源, 是无须维护的天然时钟, 是最有希望和地面原子时系统进行比对的频率标准.

普通脉冲星一般都是较年轻的脉冲星, 辐射流量强, 但观测设备接收到的脉冲轮廓较宽, 而且不规则. 毫秒脉冲星年龄则相对较老, 辐射流量较弱, 但通过观测设备接收到的脉冲轮廓很陡, 且很规则, 另外, 毫秒脉冲星比普通脉冲星的周期变化率小得多, 自转更加稳定, 所以用于计时观测和守时的脉冲星一般为毫秒脉冲星. 为利于长期观测, 我们应选用辐射强、噪声小且没有自转突变的毫秒脉冲星参与综合.

#### 4.3 经典加权算法

类似于综合原子时时间尺度, 最早由 Petit 等<sup>[11]</sup> 提出的综合脉冲星时定义为多个 (3 颗以上) 脉冲星计时残差序列的加权平均:

$$AT - PT = \sum_i \omega_i (AT - PT_i), \quad (2)$$

$AT$  为原子时测量的 TOA 序列,  $PT_i$  为计时模型得到的单脉冲星时,  $i$  为脉冲星个数,  $\omega_i$  为计算所采用的权重. 权重的选取应该以每颗脉冲星定义的脉冲星时  $PT$  的长期稳定度为依据; 此处取为某同一长时间跨度下的稳定度的平方倒数. 建立综合脉冲星时的目的是削弱各独立噪声源的影响, 得到一种更加稳定的脉冲星时间尺度.

表 1 是所选择的脉冲星的基本特性参数, 图 2 是各单脉冲星时与加权平均综合脉冲星时的比较 (EPT 为 ensemble PARKES time). 由图可见, 综合脉冲星时残差范围小得

多, 波动也更平滑.

表 1 参与综合脉冲星时计算的脉冲星和基本计时参数

Table 1 The pulsars and essential timing parameters involved in the computing of the ensemble pulsar time

Pulsar name	MJD range	$\nu$ (Hz)	$\dot{\nu}$ (Hz)	RMS( $\mu$ s)	DM( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{pc}$ )
J1744-1134	49729.1 ~ 54546.9	245.426119	-5.38188	0.617	3.1830
J2145-0750	49517.8 ~ 54547.1	62.2958878	-1.15588	1.88	8.9977
J1024-0719	50117.5 ~ 54544.6	193.715683	-6.95	3.80	6.486
J1045-4509	49405.5 ~ 54544.5	133.793149	-3.1613	6.70	58.137

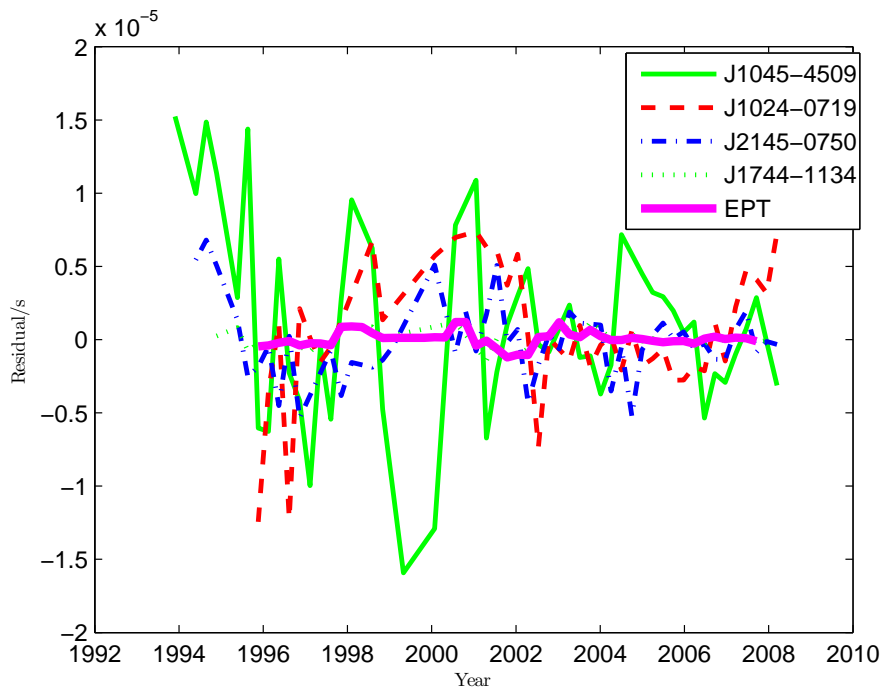


图 2 单脉冲星时间尺度和综合脉冲星时间尺度比较

Fig. 2 Comparison between the single pulsar time scale and ensemble pulsar time scale

#### 4.4 稳定度比较

Matsakis 等<sup>[14]</sup> 直接利用脉冲星时间残差测量数据序列来拟合一个 3 阶多项式函数, 提出一种改进的  $\sigma_z$  方差统计算法. 将时间残差测量序列分成  $m$  个子序列 ( $m = 1, 2, 4, 8, \dots$ ), 利用每一个子序列的残差测量数据进行最小二乘拟合, 使

$$R^2 = \sum_{i=1}^{N_m} \left[ \frac{\chi(t_i) - X(t_i)}{\sigma_i} \right]^2 = \min, \quad (3)$$

式中  $R^2$  为待拟合的量;  $X(t_i) = c_0 + c_1(t_i - t_0) + c_2(t_i - t_0)^2 + c_3(t_i - t_0)^3$ ;  $\chi(t_i)$  为时间测量残差;  $\sigma_i$  为时间测量的不确定度;  $t_i$  为观测时间;  $t_0$  为任意选取的偏差时间;  $N_m$

为子序列测量次数, 则无穷维数的  $\sigma_z$  方差估计为

$$\sigma_z(\tau) = \frac{\tau^2}{2\sqrt{5}} \langle c_3^2 \rangle^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $\tau$  为子序列连续采样时间.  $\langle \rangle$  表示对所有子序列的  $c_3$  进行加权平均, 权重设为各自误差的平方.

图 3 为上述 4 颗脉冲星的稳定度和经加权平均后的综合脉冲星时的稳定度比较, 为方便与原子时稳定度进行比对, 图中附上了国家授时中心原子钟组的稳定度 (TT-NTSC). 由图可见, 单颗脉冲星的短期稳定度不够好, 且随着观测时间增长, 稳定度曲线变化较平缓. 综合脉冲星时的稳定度几乎处处比单颗脉冲星时要好, 短期稳定度也有较大提高, 在 5.7 yr 左右已与原子时稳定度持平, 且与原子时稳定度曲线的上升趋势相反, 长期稳定度保持稳定增长.

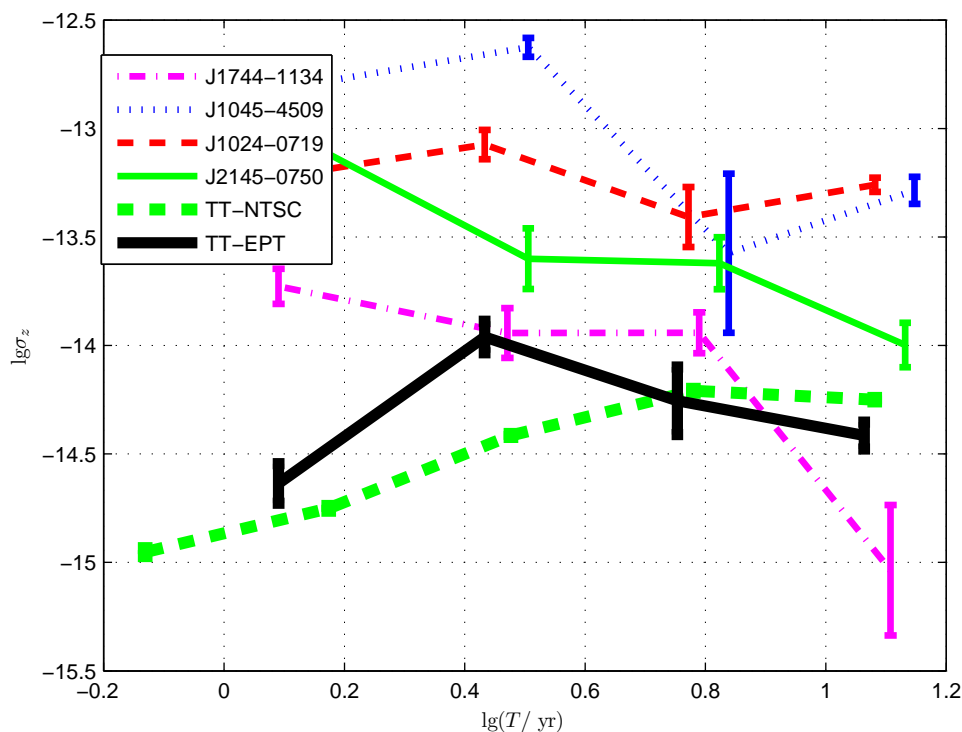


图 3 单脉冲星时、综合脉冲星时和原子时稳定度比较

Fig. 3 Comparison of the stabilities of the single pulsar time, ensemble pulsar time and atomic time

#### 4.5 改进综合脉冲星时的因素分析

为得到更好的综合脉冲星时结果, 除了要求参加综合的脉冲星时应具有尽量高的长期稳定度, 还应考虑以下几个要素:

- (1) 算法的优化. 应首要考虑到权重的科学设计, 故计时误差也应作为权重的依据之

一, 归一化的误差权重为:

$$\sigma_{\text{normalized}} = \sigma_{\text{original}} \times \frac{\sqrt{\sum_i 1/err_i^2}}{L}, \quad (5)$$

其中  $L$  为数据时间跨度,  $err_i^2$  为每次观测对应的误差项平方,  $\sigma_{\text{original}}$  为系统原始误差, 实际运算时可设为 1, 这就要求计时观测具有尽量高的信噪比<sup>[15]</sup>;

(2) 要有相当数量的脉冲星参加综合. 同等观测条件下,  $N$  颗脉冲星参与综合, 最终误差将降为原来的  $\frac{1}{\sqrt{N}}$ ;

(3) 计时数据跨度要足够长. 这就要求对目标星进行长期不间断的观测, 一方面可以平滑掉白噪声的影响, 突出长期稳定度好的优势, 另一方面, 目标星的持续观测时间应尽量长, 使其长期稳定度达到参考原子时间尺度的平均稳定度, 则可将参考原子时的频率漂移影响降低至最大限度<sup>[11]</sup>.

(4) 应参考原子时标准 TT(BIPM)20\*\*. TAI 系统是由世界各国重点实验室加权后得到的近实时系统, 经 BIPM 事后处理得到的 TT 系统每年都重新修订, 它综合了 TAI 的长期稳定度和频率基准的准确度, 并力图消除频率漂移和季节性变化, 是目前最适合脉冲星时研究的时间参考系统<sup>[16]</sup>.

## 5 计时精度和引力波探测精度的提高

在一组毫秒脉冲星计时阵列的计时观测中, 因为引力波的影响是四极矩的, 如果在残差中扣除综合脉冲星时的影响, 将可提高个体脉冲星的计时观测精度以及引力波探测精度, 图 4~5 为 PPTA 成员星 J1909-3744 在扣除综合脉冲星时前后的计时残差变化, 其精度大约提高了 16%.

## 6 结论

由单颗毫秒脉冲星定义的脉冲星时由于受多种噪声源的影响, 其长期和短期稳定度都不够好, 而将多颗毫秒脉冲星定义的脉冲星时进行综合计算后得到的综合脉冲星时在一定程度上削弱了随机噪声源的影响, 使得综合脉冲星时的长期稳定度得到提高, 并在长时标上超过原子时. 参与计算综合脉冲星时的脉冲星应主要选择计时精度较高的毫秒脉冲星, 且计时观测跨度应尽可能长, 观测时间保持连续.

随着国际上越来越多脉冲星计时阵列工作的开展, 如 PARKES 已将 20 余颗毫秒脉冲星的计时观测列入常规工作, 新的计时观测结果将陆续发表, 这使得脉冲星时的建立和应用成为可能. 脉冲星时标建立在很稳定的脉冲重复周期的基础上, 且处于太阳系之外, 因此消除了地球运动的影响, 且天然存在, 无需人力维护<sup>[17]</sup>. 利用毫秒脉冲星时长期稳定度好的特性验证原子时过去存在的跃变, 并检测原子时误差. 建立和保持综合脉冲星时间尺度不但可以提供一种独立的、具有更高长期稳定度的时间尺度参与国际时间频率体系, 同时在毫秒脉冲星计时阵列观测残差中扣除综合脉冲星时, 可提高搜寻引力波的精度等, 具有重要的应用和研究价值.

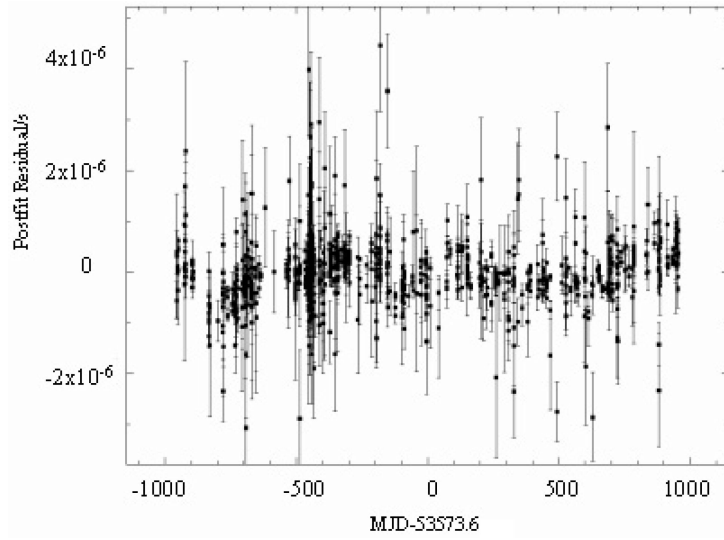


图 4 毫秒脉冲星 J1909-3744 的计时残差 ( $0.238 \mu\text{s}$ )

Fig. 4 The timing residuals of PSR J1909-3744 ( $0.238 \mu\text{s}$ )

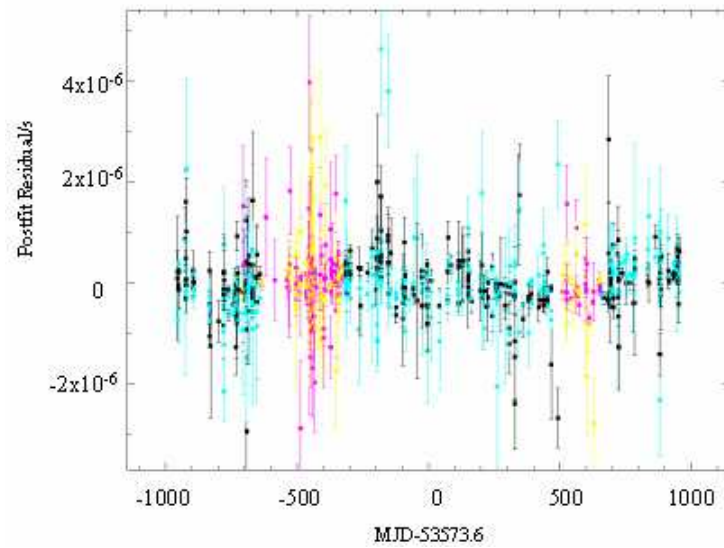


图 5 毫秒脉冲星 J1909-3744 扣除综合脉冲星时后的计时残差 ( $0.198 \mu\text{s}$ )

Fig. 5 The timing residuals of PSR J1909-3744 after deducting the ensemble pulsar time ( $0.198 \mu\text{s}$ )

致谢 感谢澳大利亚天文台 George Hobbs 提供的毫秒脉冲星计时数据和处理软件指导.

### 参 考 文 献

- [1] 文天. 脉冲星. 北京: 科学出版社, 1978: 8-10
- [2] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. *Natur*, 1968, 217: 709
- [3] Kaspi V M, Taylor J H, Ryba M F. *ApJ*, 1994, 428: 713
- [4] Ilyasov Yu P, Kopeikin S M, Rodin A E. *AstL*, 1998, 24: 228
- [5] Petit G, Tavella P. *A&A*, 1996, 308: 290
- [6] Hobbs G B, Bailes M, Bhat N D R, et al. *PASA*, 2009, 26: 103
- [7] 韩金林. 自然杂志, 2007, 29: 96
- [8] 漆贯荣. 时间科学基础. 北京: 高等教育出版社, 2006: 55-60
- [9] 倪广仁, 柯熙政, 杨廷高, 等. 云南天文台台刊, 2003: 47
- [10] Cordes J M, Wolszczan A, Dewey R J, et al. *ApJ*, 1990, 349: 245
- [11] Petit G, Thomas C, Tavella P. The 24th Annual Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting, 1993: 73
- [12] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N, et al. *MNRAS*, 2006, 369: 655
- [13] Verbiest J P W, Bailes M, Coles W A, et al. *MNRAS*, 2009, 400: 951
- [14] Matsakis D N, Taylor J H, Marshall Eubanks T. *A&A*, 1997, 326: 924
- [15] Lommen A N. Precision Multi-Telescope Timing of Millisecond Pulsars: New Limits on the Gravitational Wave Background and Other Results from the Pulsar Timing Array. Berkeley: University of California, 2001: 52-60
- [16] 杨廷高, 潘炼德, 倪广仁, 等. 天文学进展, 2002, 20: 167
- [17] Ivin V G, 张延林. 国外计量, 1987: 57

## A Research on the Ensemble Pulsar Time Based on Observational Data

CHEN Ding<sup>1</sup> ZHU Xing-zhi<sup>2,3</sup> WANG Na<sup>4</sup>

(1 *Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

(2 *National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600*)

(3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

(4 *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011*)

**ABSTRACT** Several significant applications of pulsar timing have been introduced. The brief definition of pulsar time scale is proposed. The ensemble pulsar time integrated by four millisecond pulsars has been produced based on the observational data observed by Parkes Observatory in Australia. Its stability is compared with atomic time. Four factors influencing the ensemble pulsar time and its effects on timing precision are discussed.

**Key words** astrometry, time, pulsars: general