

引用格式: 王啸威, 闫振, 沈志强, 等. 毫秒脉冲星观测反演台站原子钟行为研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(3): 217-226.

# 毫秒脉冲星观测反演台站原子钟行为研究

王啸威<sup>1,2</sup>, 闫振<sup>1,2,3,4,\*</sup>, 沈志强<sup>1,2,3</sup>, 王玲玲<sup>1,3</sup>,

吴亚军<sup>1,2,3</sup>, 赵融冰<sup>1,2,3</sup>, 黄志鹏<sup>1,2,5</sup>, 王睿<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049;

3. 上海市引力波探测前沿科学研究基地, 上海 200240;

4. 中国科学院 射电天文重点实验室, 南京 210008;

5. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210)

**摘要:** 氢原子钟作为高精度时间和频率系统的核心部件, 在射电天文观测、高精度时间计量、空间导航等领域获得广泛应用。尽管氢原子钟具有极高的短期稳定性, 但是其长期稳定度会受到各种环境因素的影响。毫秒脉冲星因其超乎寻常的长期稳定自转频率特性被誉为“挂在天上的钟”, 在时间保持、深空导航等方面具有重要的潜在应用价值。本文基于上海天马望远镜毫秒脉冲星计时观测资料对有关问题进行了研究, 成功反演出台站氢原子钟的历史行为, 包括时钟跳跃、换钟等。通过分段拟合其计时残差中偏离白噪声的长期趋势成功获得氢原子钟速。综合考虑上述历史行为后获得了基于该毫秒脉冲星的时钟改正文件, 将其用于天马望远镜其他多颗毫秒脉冲星计时分析并取得了非常理想的效果。

**关键词:** 毫秒脉冲星; PSR J1713+0747; 脉冲星计时; 氢原子钟; 钟差改正

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-03-0217-10

## Retrieval of the hydrogen maser's behavior at local station using observations of millisecond pulsars

WANG Xiao-wei<sup>1,2</sup>, YAN Zhen<sup>1,2,3,4,\*</sup>, SHEN Zhi-qiang<sup>1,2,3</sup>, WANG Ling-ling<sup>1,3</sup>,

WU Ya-jun<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Rong-bing<sup>1,2,3</sup>, HUANG Zhi-peng<sup>1,2,5</sup>, WANG Rui<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shanghai Frontier Science Center of Gravitational Wave Detection, Shanghai 200240, China;

4. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

5. School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** As the core component of a high-precision time and frequency system, the hydrogen maser clock has been widely used in radio astronomy observation, high-precision time measurement, space navigation and other fields. Although the hydrogen maser clock is extremely stable in the short term, its long-term stability could be

收稿日期: 2023-02-25; 接受日期: 2023-05-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFA1603104); 上海市自然科学基金资助项目(20ZR1467600)

affected by various environmental factors. The millisecond pulsar (MSP) is known as the “clock on the sky” because of its extraordinary long-term stable rotation frequency characteristics and its important potential application value in time maintenance, deep space navigation and other fields. Deep studies in these fields were done based on the timing observation data on MSPs with the Shanghai Tianma Radio Telescope (TMRT), and the historical behavior of the hydrogen atomic clock at the station, including clock jumping and changing, were successfully retrieved. The hydrogen maser clock speed is successfully obtained by fitting the long-term trend of deviation from white noise in timing residuals. Considering the above historical behavior, we obtained the clock-correction file based on pulsar timing. We applied this file to the timing analysis of other MSPs in the TMRT and achieved very good results.

**Key words:** millisecond pulsar; PSR J1713+0747; pulsar timing; hydrogen maser clock; clock correction

## 0 引言

氢原子钟利用基态氢原子的超精细能级跃迁,输出短期稳定度极高的频率信号(天稳定度可达 $10^{-15}$ ),因而在导航、空间探测、守时授时和天文观测等领域有着广泛的应用。不过,在实际应用中氢原子钟的性能会受到各种环境因素的影响,如温度、湿度、振动和磁场等。其中温度变化的影响尤为显著,因为它会显著影响氢原子钟谐振腔输出频率的准确度和稳定度<sup>[1]</sup>。因此,氢原子钟的长期稳定性相对较低,从而也会影响整个时频系统的长期可靠性。如果能够找到一种长期稳定的信号源,并通过一定技术手段实现对氢原子钟的校准,那将对提高其长期稳定性大有裨益。

毫秒脉冲星是宇宙空间中一类经过“吸积再加速”的特殊年老脉冲星<sup>[2]</sup>,其自转周期比普通脉冲星更短(约为1.4~30 ms),周期变化率也比普通脉冲星小约5个数量级(仅有 $10^{-19}$ ~ $10^{-21}$  s s<sup>-1</sup>)。和普通脉冲星相比,毫秒脉冲星的计时特性稳定得多,因为它们极少像普通脉冲星一样时常表现出一些自转不稳定性行为,主要包括周期跃变(glitch)和计时噪声(timing noise)。所谓周期跃变是一种脉冲星自转突然加快的现象<sup>[3]</sup>,而计时噪声表现为脉冲星自转参数发生连续的、长时标的“随机游走”。在目前已知所有的毫秒脉冲星中,只有PSR J1824-2452A<sup>[4]</sup>和PSR J0613-0200<sup>[5]</sup>观测到发生过周期跃变。正是由于毫秒脉冲星的自转周期极其稳定,对其长期周期测量的准确度可优于 $10^{-15}$ 水平<sup>[6]</sup>,因而它可以被视为宇宙空间中的一种天然的具有长期稳定性的信号源,被誉为“挂在天上的钟”。

多年来,天文学家利用大型射电望远镜对毫秒脉冲星长期稳定性进行了一系列研究。D. N. Matsakis 等人<sup>[7]</sup>利用从Allan方差中推广得到的统计量 $\sigma_z$ 来衡量毫秒脉冲星PSR J1939+2134和PSR J1857+0943的频率稳定度,发现这两颗毫秒脉冲星的长期频率稳定度都可以与原子钟媲美。J. P. W. Verbiest 等人<sup>[8]</sup>进一步利用Parkes射电望远镜对近20颗毫秒脉冲星进行长期观测,发现有6颗毫秒脉冲星可以获得优于 $10^{-14}$ 的长期频率稳定度,其中PSR J0437-4715观测5年就可以达到 $10^{-15}$ 的长期频率稳定度。因此,利用对毫秒脉冲星的长期计时观测有望建立与原子时相媲美的“脉冲星时”,而对多颗毫秒脉冲星的计时观测则可以进一步建立“综合脉冲星时”<sup>[9]</sup>。

脉冲星计时观测是完成上述工作的基础。所谓脉冲星计时观测又称脉冲到达时间(time of arrival,简称TOA)测量,是指精确测量脉冲星信号到达观测天线的时间。台站时间由氢原子钟、全球定位系统(Global Positioning System,简称GPS)接收机、比对计数器等组成的时频系统维持。利用观测得到的脉冲星积分轮廓与其标准轮廓进行互相关精确获得到达天线时间,然后再考虑行星历表改正、相对论效应等将其转化为太阳系质心处的实际的TOA,进而与脉冲星计时模型给出预报的TOA进行对比并得到计时残差,通过最小二乘法对计时残差进行多次拟合迭代可以得到更精确的脉冲星计时模型参数和拟合后

的计时残差,进而可以借此研究脉冲星基本性质和内部结构等。如果对一批计时精度较高的毫秒脉冲星进行长期计时观测,就可以组成脉冲星计时阵(Pulsar Timing Array,简称PTA)用以探测低频引力波。目前已有国内外研究人员尝试利用脉冲星计时数据建立“综合脉冲星时”、检测国际原子时中可能存在的系统误差以及台站时钟的不稳定性等<sup>[10-12]</sup>。

本文将介绍利用上海天马射电望远镜(下面简称天马望远镜)毫秒脉冲星长期计时观测数据对台站原子钟历史行为反演以及修正方面的研究进展。基于毫秒脉冲星观测数据成功获得台站氢原子钟的钟差数据并反演出其历史行为,然后通过拟合其计时残差的长期变化趋势在一定程度上改正了钟差,从而提高了天马望远镜毫秒脉冲星计时观测的计时精度。

## 1 毫秒脉冲星计时观测

利用上海天马射电望远镜开展了毫秒脉冲星的长期计时观测,并且按照脉冲星计时观测的标准流程对脉冲信号进行在线消色散和周期折叠并与标准脉冲轮廓互相关得到脉冲到达时间,最后利用TEMPO2软件包<sup>[13]</sup>对脉冲到达时间进行分析得到计时残差。

### 1.1 观测简介

上海天马射电望远镜是一台口径为65 m的全可动大型射电望远镜。因位于上海市松江区的天马山附近,考虑到台站射电干扰情况和毫秒脉冲星辐射特点,天马望远镜在S和C波段对毫秒脉冲星开展长期计时观测。S和C波段的中心频率分别为2 250和4 820 MHz,有效带宽分别为100和800 MHz。利用DIBAS数字终端<sup>[14]</sup>将其总带宽分别划分为1 MHz和2 MHz的子通道,采用非相干消色散在线折叠模式对观测数据进行在线的消色散和周期折叠处理,然后输出子积分时间为30 s的8-bit量化的PSRFITS格式文件并记录到磁盘阵列。由于天马望远镜是一台既服务于月球探测、火星探测等国家重大工程项目又用于天文观测研究的多功能综合望远镜,因而受到望远镜观测时间限制,在2022年6月以前对每颗毫秒脉冲星的单次观测时长约为5~30 min(视脉冲星的流量密度大小而定)。在2022年6月完成一个阶段的有关国家重大探测工程观测任务以后,为了提高观测所得的TOA的精度,几颗有望取得更高计时精度的毫秒脉冲星的单次观测时长增加至2~3 h,观测间隔也进一步缩短(约为1~2周每次)。表1的1~7列分别展示了每颗毫秒脉冲星的名称、自转周期、1.4 GHz处的平均流量密度、观测波段、观测起止时间、时间跨度以及TOA的个数。

表1 7颗毫秒脉冲星及计时观测的基本参数

脉冲星名	自转周期/ ms	流量密度 <sup>1)</sup> / mJy	波段	起止时间 MJD <sup>2)</sup> /日	跨度/ 年	TOA 个数	TOA 误差中位数/ μs
J1012+5307	5.26	3.2	S	58 582—59 792	3.3	81	17.172
J1022+1001	16.45	4.9	S	58 005—59 955	5.3	113	6.193
J1643-1224	4.62	4.7	S	58 597—59 359	2.1	39	8.390
J1713+0747	4.57	9.1	S	57 950—59 953	5.5	194	1.312
J1744-1134	4.08	3.2	S	58 719—59 953	3.4	11	2.006
J1909-3744	2.95	2.5	C	59 748—59 955	0.6	17	0.194
J1939+2134	1.56	15.3	S	57 950—59 955	5.5	137	1.155

注: 1) 此处为1.4 GHz的平均流量密度,数据来自Australia Telescope National Facility(ATNF)脉冲星数据库(1.67版),

<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>;

2) MJD为约化儒略日。

## 1.2 脉冲到达时间测量

观测数据的处理主要采用被广泛使用的 PSRCRIVE 等软件包<sup>[15]</sup>。数据处理的过程分为以下 3 步：① 使用 CLFD 软件包<sup>[16]</sup>对观测数据进行自动的射频干扰 (radio frequency interference, 简称 RFI) 消除, 并通过 PSRCRIVE 软件包中的 pazi 命令进行交互式检查并手动消除残余的 RFI; ② 把每次观测数据沿频率轴和时间轴的方向进行折叠, 从而得到一系列的高信噪比积分轮廓; ③ 将这些积分轮廓与一个事先准备好的标准模版进行互相关从而得到每次观测的 TOA。而标准模版的生成与 TOA 的获得过程如下:

① 选取多次积分轮廓信噪比较高的观测, 利用 psradd 命令将积分轮廓进行叠加; ② 用 paas 命令拟合叠加得到的积分轮廓生成标准模版; ③ 利用 pat 命令使用 Fourier Domain Monte-Carlo (FDM) 算法将每次观测得到的积分轮廓与标准轮廓进行互相关得到 TOA 及其误差。表 1 的第 8 列展示了每颗毫秒脉冲星计时观测得到的 TOA 误差的中位数。

## 1.3 计时分析

本文的脉冲星计时分析使用了 TEMPO2 软件包。除了之前已获得的 TOA 数据外, 脉冲星计时分析还需要有一个初始星表, 其中包括脉冲星的自转、位置、自行、视差、色散量和双星轨道 (若脉冲星处于双星系统中) 等脉冲星计时模型参数。PSR J1012+5307 的初始星表选用北美纳赫兹引力波天文台脉冲星计时阵发布的 12.5 年的计时观测得到的结果<sup>[17]</sup>, 其余 6 颗脉冲星 (PSR J1022+1001、J1643-1224、J1713+0747、J1744-1134、J1909-3744 和 J1939+2134) 的初始星表则选择澳大利亚 Parkes 脉冲星计时阵 (Parkes Pulsar Timing Array, 简称 PPTA) 发布的第二批数据中的结果<sup>[18]</sup>。此外, 计时分析中的太阳系行星历表选用 DE436。理论上脉冲到达太阳系质心处的时间可以用如下公式表示<sup>[19]</sup>:

$$T = t_{\text{obs}} + \Delta_{\text{C}} - D/f^2 + \Delta_{\text{RO}} + \Delta_{\text{EO}} + \Delta_{\text{SO}} + \Delta_{\text{R}} + \Delta_{\text{E}} + \Delta_{\text{S}}。 \quad (1)$$

式 (1) 中,  $t_{\text{obs}}$  为脉冲到达射电望远镜的时间,  $\Delta_{\text{C}}$  为台站原子钟相对参考时钟的修正,  $D/f^2$  为色散延迟,  $\Delta_{\text{RO}}$ ,  $\Delta_{\text{EO}}$  和  $\Delta_{\text{SO}}$  分别为太阳系中的 Roemer 延迟修正、Einstein 修正和 Shapiro 延迟修正, 而等号右面最后 3 项则是脉冲星处在双星系统中时需要考虑的 Roemer 延迟修正、Einstein 修正和 Shapiro 延迟修正。通过比较理论预报的 TOA 和实际测量得到的 TOA 就可以得到脉冲星的计时残差。

在不进行任何参数拟合的情况下, 通过 TEMPO2 计时分析得到的每颗毫秒脉冲星的计时残差如图 1 所示。图中 S 和 C 波段的观测数据分别用黑色十字和灰色空心三角表示, 每幅图的左下角标注了脉冲星名和以均方根  $\sigma_{\text{rms}}$  表示的计时精度。从图 1 中可以明显看出计时残差的变化趋势在不同源、不同观测波段间都有很强的相关性。由于毫秒脉冲星普遍拥有非常低的计时噪声, 因此在给定足够准确的脉冲星计时模型的情况下, 得到的计时残差应该是一种白噪声。脉冲星计时模型的主要误差包括脉冲星自转不稳定性、脉冲信号传播路径中的色散延迟误差、太阳系行星历表误差、引力波和观测站原子钟的误差<sup>[20]</sup>, 而这些误差中只有测站原子钟的误差会在观测不同方向的脉冲星时引入单极性的误差。同时, 天马望远镜的毫秒脉冲星计时观测中并未对提供时间参考的本地氢原子钟的钟差进行改正, 因此图 1 中计时残差的变化趋势可以认为是本地氢原子钟的钟差。

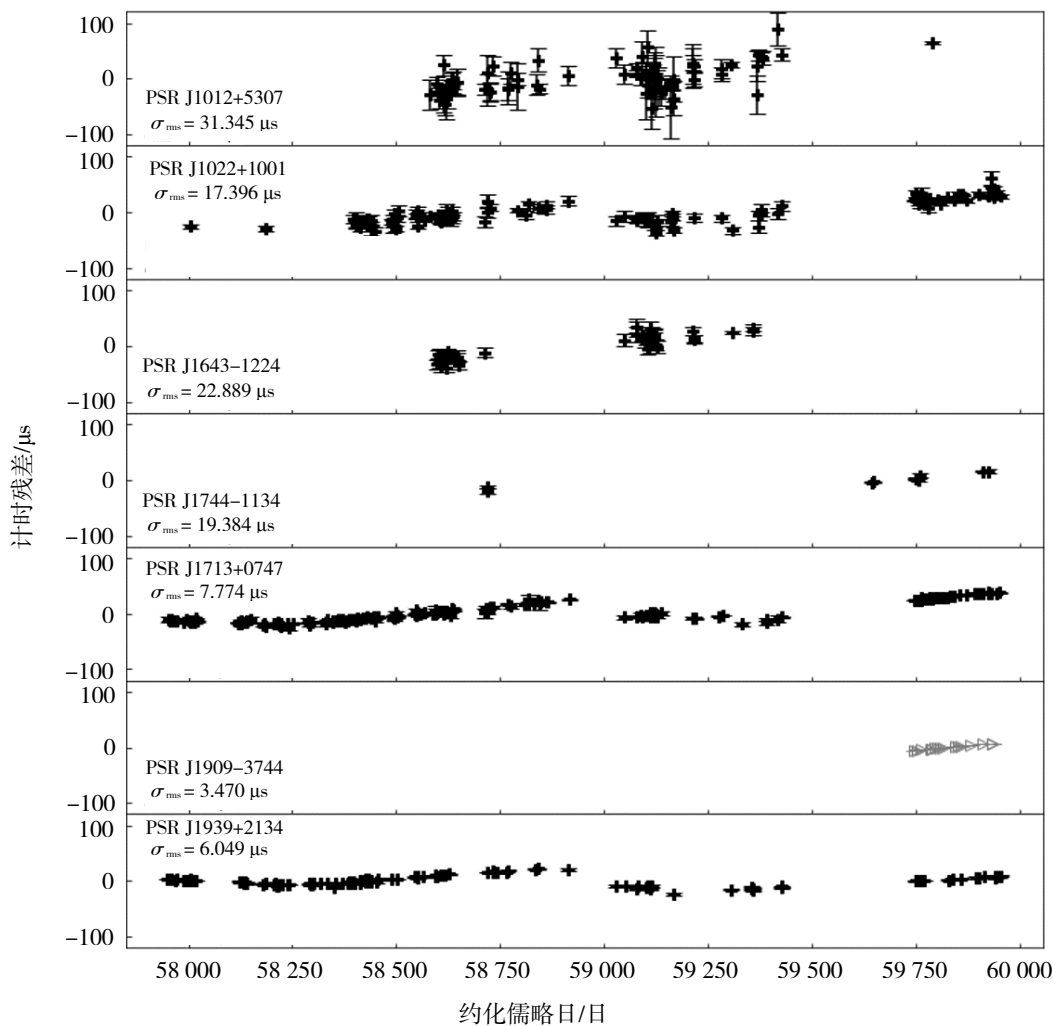


图 1 7 颗毫秒脉冲星的计时残差

## 2 利用毫秒脉冲星计时观测进行钟差改正

在脉冲星计时模型足够准确的情况下,对一颗时间噪声很小的毫秒脉冲星进行计时观测和分析得到的计时残差应该是理想的白噪声。因此可以利用毫秒脉冲星的到达时间观测对计时残差中存在的原子钟钟差项的长期变化趋势进行拟合,从而达到改正钟差的效果。

### 2.1 参考毫秒脉冲星选取

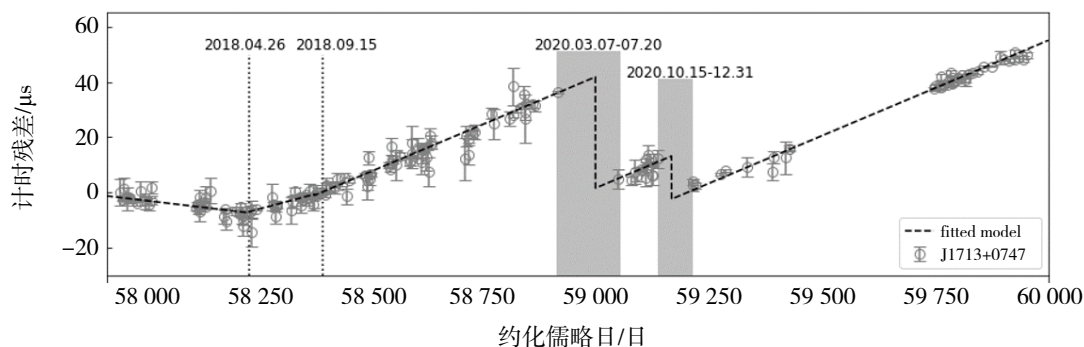
利用单颗毫秒脉冲星的计时观测数据进行观测站原子钟误差的改正时,选取的毫秒脉冲星需要满足以下条件:①有足够的观测精度(TOA的误差小);②计时噪声小,即自转稳定性高;③覆盖足够长的观测时间且观测相对频繁。因此,在表1所列出的7颗毫秒脉冲星中选取PSR J1713+0747作为参考毫秒脉冲星。

PSR J1713+0747是一颗自转周期约为4.57 ms的毫秒脉冲星,由Arecibo望远镜巡天发现<sup>[21]</sup>。PSR J1713+0747处在一个轨道周期约68 d的双星系统中,其伴星是一颗质量约为0.28 M<sub>☉</sub>的白矮星<sup>[22]</sup>。PSR J1713+0747作为目前计时最为精确的毫秒脉冲星之一,国际上的脉冲星计时阵列都对其有长期的计时观测<sup>[23-25]</sup>。天马望远镜在S波段对PSR J1713+0747进行了长期的计时观测,总的时间跨度为5.5年。PSR J1713+0747的流量较强(在1.4 GHz的平均流量密度约为9.1 mJy),对其观测可以获得比较高的信噪比,

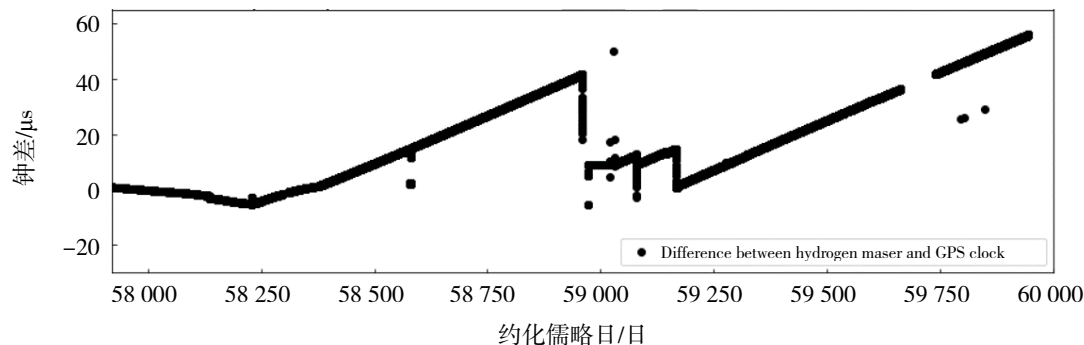
观测得到的 TOA 的误差中位数为  $1.312 \mu\text{s}$ 。在进行计时分析过程中发现 PSR J1713+0747 在约化儒略日 (Modified Julian Date, 简称 MJD) 59 320—59 321 (2020 年 4 月 16 日至 17 日) 间发生了一次轮廓变化事件, 随后其平均脉冲轮廓在几个月内逐渐恢复到变化前的状态<sup>[26-27]</sup>。PSR J1713+0747 平均脉冲轮廓的变化也使得观测到的 TOA 存在一个跳变和逐渐恢复的过程。参考 J. Singha 等人拟合此次轮廓变化对 TOA 的影响时采用的跳变加指数恢复的模型<sup>[28]</sup>, 利用 Enterprise 软件包对轮廓变化引起的 TOA 变化进行拟合, 得到在 S 波段上 TOA 的跳变为  $17.5 \mu\text{s}$ , 恢复时标约 219 d。本文中展示的 PSR J1713+0747 的计时残差均为修正了轮廓变化事件后的计时残差。

## 2.2 钟差模型拟合与分析

图 2 中带误差棒的数据点为 PSR J1713+0747 的计时残差 (已改正轮廓变化带来的影响)。利用上述方法成功反演出天马望远镜时频系统氢原子钟的历史行为, 这些行为在如图 2 所示的计时残差图上表现为跳变、转折等。天马望远镜毫秒脉冲星计时观测中的时间参考由一台氢原子钟作为主钟。图 2 发生在 2018 年 4 月份的 J1713+0747 计时残差的转折对应一次换钟事件, 2018 年 4 月 26 日 (MJD 58 234) 天马时频系统主钟由国产 SOHM-4 型 88 号钟更换为国产 SOHM-4 型 118 号钟 (本编号为上海天文台氢原子钟的生产编号); 2018 年 9 月份的该源计时残差转折对应另外一次换钟事件, 2018 年 9 月 15 日 (MJD 58 379) 后时频系统主钟由国产 SOHM-4 型 118 号钟更换为俄罗斯产 VCH-1003M 型氢原子钟。



(a) 利用 PSR 1713+0747 计时残差拟合得到的钟差模型图



(b) 原始钟差数据图

注: 图 2 (a) 黑色虚线和灰色区域分别代表换钟的时间节点和跳变发生的时间区间

图 2 利用 PSR 1713+0747 计时残差拟合得到的钟差模型以及原始钟差数据图

采用加权的最小二乘法对 PSR J1713+0747 的计时残差进行分段线性拟合, 权重为 TOA 误差的倒数, 分段点取两次换钟的时间节点。此外在第 2 次换钟后还加入两个跳变, 跳变的时间点取相邻两次观测时间的中点。拟合所得的钟差模型表示为图 2 (a) 的黑色虚线。拟合得到的每一段的斜率可以表示不同时

间段内使用的氢原子钟的钟速，分别为 $-2.25 \times 10^{-13} \text{ s s}^{-1}$  (MJD 57 950—58 234)、 $5.05 \times 10^{-13} \text{ s s}^{-1}$  (MJD 58 235—58 379) 和  $7.99 \times 10^{-13} \text{ s s}^{-1}$  (MJD 58 380—59 953)。2020 年 3 月至 12 月底这一段时间内观测数据较为稀疏，这是因为在这一段时间内集中开展了天线维保和“天问一号”火星探测观测任务。但是，在这一段时间发现了两次脉冲星计时残差跳变事件，拟合得到的跳变幅度分别为  $40.3 \mu\text{s}$  和  $15.5 \mu\text{s}$ 。通过查阅维保记录发现第 1 次跳变是由于 2020 年 4 月 19 日至 5 月 15 日 (MJD 58958—58984) 期间维修钟房空调断电时氢原子钟发生断电重启。在 2020 年 10 月中旬至 12 月下旬这段时间内，由于空调故障钟房温度出现较大波动，引起氢原子钟跳变，其正对应图 2 (a) 中拟合得到的第 2 次跳变。此外，通过查阅相关日志还得到了台站氢原子钟原始的钟差数据 (台站氢原子钟和 GPS 钟的差值) 并以黑色圆点表示在图 2 (b) 中。通过对比，可以看出拟合得到的钟差模型很好地反演了氢原子钟钟差的实际走势。同时，实测的钟差数据存在一些由于测量误差 (或错误) 导致的异常数据点，而通过脉冲星计时得到的计时残差数据点异常点极少。

### 2.3 钟差改正后计时分析

利用拟合所得的钟差模型按时间顺序生成一系列钟差数据并保存为一个钟差改正文件后，再使用 TEMPO2 软件包进行计时分析，就可以利用这个钟差改正文件来获得经过钟差改正的计时残差。图 3 展示了 7 颗毫秒脉冲星经过钟差改正后的计时残差情况。

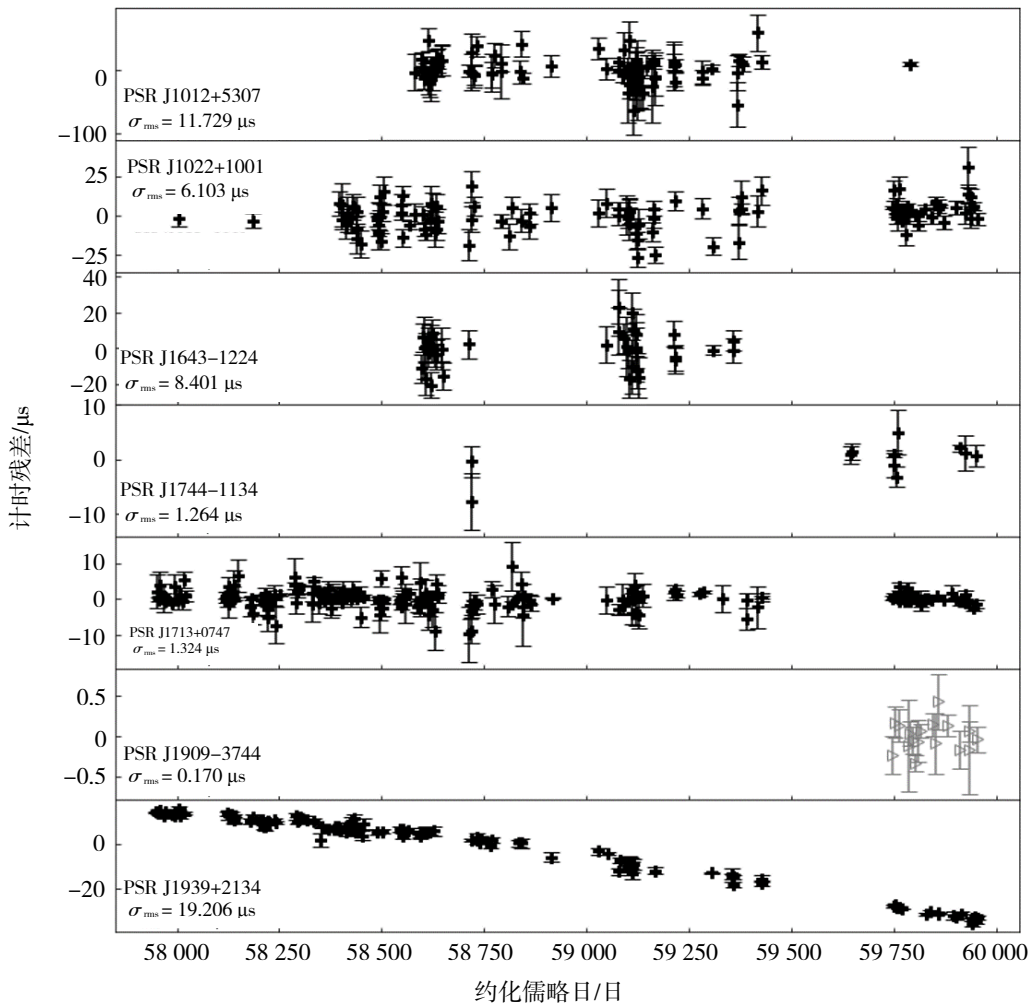


图 3 7 颗毫秒脉冲星钟差改正后的计时残差

从图 3 可以看出图 1 中所表现出的不同源之间的具有相关性的计时残差变化趋势已经消失。除 PSR J1939+2134 外,其余 6 颗毫秒脉冲星的计时残差相比钟差改正前均有明显改善,从而证明了钟差改正的有效性。其中,计时精度最高的 PSR J1909-3744 通过 C 波段 0.6 年的观测可以获得 170 ns 的计时精度。PSR J1939+2134 的计时残差在经过钟差改正后依然明显偏离了白噪声,但是先前研究已经证明该脉冲星的计时残差中存在明显的红噪声。进一步结合天马望远镜 S 波段以及 PPTA 在波长 10 cm 频段获得的 PSR J1939+2134 的 TOA 数据(PPTA 的数据只取 2015 年后)进行计时分析,得到的计时残差如图 4 所示。可以看出虽然天马的观测得到的 TOA 误差相对较大,但在与 PPTA 观测重合的时间段内两者的计时残差变化趋势符合较好。因此,图 3 中 PSR J1939+2134 计时残差显示出的红噪声可以认为是其本身的某种自转不稳定性导致的。

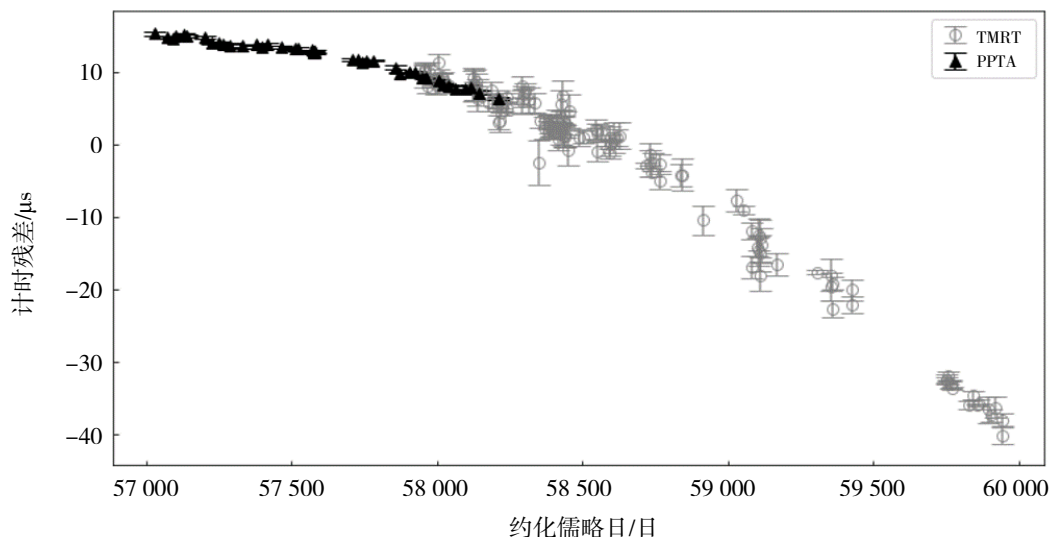


图 4 PPTA 及天马望远镜钟差改正后数据的 PSR J1939+2134 的计时残差

### 3 结论及展望

总之,氢原子钟的长期不稳定性会导致用其作为时间参考时在脉冲星计时模型中引入额外的钟差误差。而毫秒脉冲星极高的自转稳定性使其可以达到很高的计时精度,因此利用对毫秒脉冲星的长期计时观测就可以反推出计时观测中使用的氢原子钟的钟差。本文的研究表明:① 对于单颗计时精度高的毫秒脉冲星,在给定足够精确的脉冲星计时模型初始参数时,可以通过计时残差来显示观测中作为时间参考的氢原子钟的钟差的短期跳变及长期变化趋势,从而通过拟合达到改正钟差的效果;② 利用对 PSR J1713+0747 的计时观测进行钟差改正后,天马望远镜的毫秒脉冲星计时精度得到有效提高,其中 PSR J1909-3744 在 C 波段 0.6 年的计时精度可以达到 170 ns。

我国有一定规模的脉冲星观测始于 20 世纪 90 年代的乌鲁木齐天文观测站(现为新疆天文台) 25 m 射电望远镜脉冲星观测系统的建立<sup>[29]</sup>。和国际发达国家相比,可谓起步较晚。随着国家经济实力的提高,国内先后建起了密云 50 m<sup>[30]</sup>、昆明 40 m<sup>[31]</sup>、上海 65 m、吴平 40 m<sup>[32]</sup>、贵州 500 m 口径球面射电望远镜<sup>[33]</sup> 等大型射电望远镜。另外,奇台 110 m、景东 120 m、修水 120 m 等百米级别望远镜也已经批准立项或正在顺利推进。这些望远镜建设将极大提升我国脉冲星的观测研究能力。各望远镜扬长避短,有机组成中国脉冲星计时阵列,这将不仅会使得国内在脉冲星物理、纳赫兹引力波探测等基础领域占领国际制高点,而且还将在脉冲星时间标准建立与维持、深空自主导航等应用领域开辟广阔前景。



## 参考文献:

- [1] PARKER T E. Environmental factors and hydrogen maser frequency stability[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1999, 46(3): 745-751.
- [2] ALPAR M A, CHENG A F, RUDERMAN M A, et al. A new class of radio pulsars[J]. *Nature*, 1982(300): 728-730.
- [3] ESPINOZA C M, LYNE A G, STAPPERS B W, et al. A study of 315 glitches in the rotation of 102 pulsars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 414(2): 1679-1704.
- [4] COGNARD I, BACKER D C. A microglitch in the millisecond pulsar PSR B1821-24 in M28[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, 612(2): 125-127.
- [5] MCKEE J W, JANSSEN G H, STAPPERS B W, et al. A glitch in the millisecond pulsar J0613-0200[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 461(3): 2809-2817.
- [6] VERBIEST J P W, BAILES M, VAN STRATEN W, et al. Precision timing of PSR J0437-4715: an accurate pulsar distance, a high pulsar mass, and a limit on the variation of Newton's gravitational constant[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 627(1): 675-680.
- [7] MATSAKIS D N, TAYLOR J H, EUBANKS T M. A statistic for describing pulsar and clock stabilities[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1997(326): 924-928.
- [8] VERBIEST J P W, BAILES M, COLES W A, et al. Timing stability of millisecond pulsars and prospects for gravitational-wave detection[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 400(2): 951-968.
- [9] 杨廷高, 仲崇霞. 脉冲星时稳定度及可能应用[J]. *时间频率学报*, 2004, 27(2): 129-137.
- [10] HOBBS G, COLES W, MANCHESTER R N, et al. Development of a pulsar-based time scale[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 427(4): 2780-2787.
- [11] HOBBS G, GOU L, CABALLERO R N, et al. A pulsar-based time-scale from the international pulsar timing array[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 491(4): 5951-5965.
- [12] 李志玄. 利用 PSR J0437-4715 研究引力常数变化率和台站时钟跳变[D]. 云南: 中国科学院大学(中国科学院云南天文台), 2019.
- [13] HOBBS G, EDWARDS R T, MANCHESTER R N. TEMPO2, a new pulsar-timing package-I. an overview[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, 369(2): 655-672.
- [14] YAN Z, SHEN Z Q, WU Y J, et al. Pulsar research with the newly built Shanghai Tian Ma Radio Telescope[J]. *URSI Radio Science Bulletin*, 2018, 2018(366): 10-18.
- [15] HOTAN A, VAN STRATEN W, MANCHESTER R. Psrchive and psrfits: an open approach to radio pulsar data storage and analysis[J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2004, 21(3): 302-309.
- [16] MORELLO V, BARR E D, COOPER S, et al. The high time resolution universe survey-XIV. Discovery of 23 pulsars through GPU-accelerated reprocessing[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 483(3): 3673-3685.
- [17] ALAM M F, ARZOUMANIAN Z, BAKER P T, et al. The NANOGrav 12.5 yr data set: wideband timing of 47 millisecond pulsars[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, 252(4): 54.
- [18] REARDON D J, SHANNON R M, CAMERON A D, et al. The Parkes Pulsar Timing Array second data release: timing analysis[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 507(2): 2137-2153.
- [19] NORBERT W. A timing formula for main-sequence star binary pulsars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1998, 298(1): 66-77.
- [20] EDWARDS R T, HOBBS G, MANCHESTER R N. TEMPO2, a new pulsar timing package-II. The timing model and precision estimates[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, 372(4): 1549-1574.
- [21] FOSTER R S, WOLSZCZAN A, CAMILO F. A new binary millisecond pulsar[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 1993(410): 91.

- [22] SPLAVER E M, NICE D J, STAIRS I H, et al. Masses, parallax, and relativistic timing of the PSR J1713+0747 binary system[J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, 620(1): 405-415.
- [23] DESVIGNES G, CABALLERO R N, LENTATI L, et al. High-precision timing of 42 millisecond pulsars with the European Pulsar Timing Array[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458(3): 3341-3380.
- [24] MCLAUGHLIN M A. The North American Nanohertz Observatory for gravitational waves[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, 30(22): 224008.
- [25] HOBBS G. The Parkes pulsar timing array[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, 30(22): 224007.
- [26] XU H, HUANG Y X, BURGAY M, et al. A sustained pulse shape change in PSR J1713+0747 possibly associated with timing and DM events[J]. *The Astronomer's Telegram*, 2021, 14642: 1.
- [27] MEYERS B, CHIME/PULSAR COLLABORATION. Confirmation of a change in the emission properties of PSR J1713+0747[J]. *The Astronomer's Telegram*, 2021, 14652: 1.
- [28] SINGHA J, SURNIS M P, JOSHI B C, et al. Evidence for profile changes in PSR J1713+0747 using the uGMRT[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 507(1): 57-61.
- [29] 王娜, 张晋, 艾力·玉, 等. 乌鲁木齐天文站的脉冲星脉冲到达时间观测[C]// 1999 年全国时间频率学术报告会, 青岛: 1999 年全国时间频率学术报告委员会.
- [30] JIN C, CAO Y, CHEN H, et al. The Miyun 50 m Pulsar Radio Telescope[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement*, 2006, 6(S2): 319-323.
- [31] HAO L F, WANG M, YANG J. VLBI observations with the Kunming 40-meter radio telescope[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, 10(8): 805-814.
- [32] LUO J T, GAO Y P, YANG T G, et al. Pulsar timing observations with Haoping radio telescope[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(7): 111.
- [33] NAN R D. Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST)[J]. *Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2006, 49(2): 129-148.