

## 面向综合定位导航授时系统的天地基脉冲星时间研究

周庆勇 魏子卿 闫林丽 孙鹏飞 刘思伟 冯来平 姜坤 王奕迪 朱永兴 刘晓刚 明锋 张奋 贺珍妮

## Space/ground based pulsar timescale for comprehensive PNT system

Zhou Qing-Yong Wei Zi-Qing Yan Lin-Li Sun Peng-Fei Liu Si-Wei Feng Lai-Ping Jiang Kun  
Wang Yi-Di Zhu Yong-Xing Liu Xiao-Gang Ming Feng Zhang Fen He Zhen-Ni

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 139701 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210288

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210288>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 具有多物理特性的X射线脉冲星导航地面验证系统

Ground verification system of X-ray pulsar navigation with multi-physical properties

物理学报. 2019, 68(8): 089701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182232>

#### X射线脉冲星导航动态模拟实验系统研制与性能测试

Development and performance test of dynamic simulation system for X-ray pulsar navigation

物理学报. 2017, 66(5): 059701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.059701>

#### 基于两级压缩感知的脉冲星时延估计方法

Pulsar time delay estimation method based on two-level compressed sensing

物理学报. 2018, 67(9): 099701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172100>

#### 基于自归一化神经网络的脉冲星候选体选择

Pulsar candidate selection based on self-normalizing neural networks

物理学报. 2020, 69(6): 069701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191582>

#### 基于时间透镜系统的冲击脉冲产生与特性研究

Generation and characteristics of shock optical pulses based on a fiber-loop time-lens system

物理学报. 2019, 68(15): 154201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190246>

#### 单脉冲时间精确可控的单纵模Nd:YAG激光器

Single-axial-mode Nd:YAG laser with precisely controllable laser pulse output time

物理学报. 2019, 68(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190393>

# 面向综合定位导航授时系统的天地 基脉冲星时间研究\*

周庆勇<sup>1)2)3)</sup> 魏子卿<sup>1)2)</sup> 闫林丽<sup>4)†</sup> 孙鹏飞<sup>5)</sup> 刘思伟<sup>1)2)</sup>  
冯来平<sup>1)2)</sup> 姜坤<sup>6)</sup> 王奕迪<sup>7)</sup> 朱永兴<sup>1)2)</sup> 刘晓刚<sup>1)2)</sup>  
明锋<sup>1)2)</sup> 张奋<sup>1)2)</sup> 贺珍妮<sup>8)</sup>

1) (地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

2) (西安测绘研究所, 西安 710054)

3) (信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450052)

4) (安徽建筑大学数理学院, 合肥 230601)

5) (中科院国家授时中心, 西安 710600)

6) (北京通信与跟踪技术研究所, 北京 100090)

7) (国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073)

8) (陆军装甲兵学院基础部, 北京 100072)

(2021 年 2 月 7 日收到; 2021 年 3 月 9 日收到修改稿)

中国综合定位导航授时 (positioning navigation timing, PNT) 体系是以北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 为核心的多源信息融合系统, 高精度的毫秒脉冲星计时能够增强 BDS 时间基准的长期稳定性, 并能维持未来深空用户的时间基准. 本文提出了一种改善 BDS 时间基准长期稳定性的脉冲星时地面服务系统, 概述了该系统的初步设计与功能, 同时研究了天地基脉冲星时建立方法, 利用 3 颗毫秒脉冲星的国际脉冲星计时阵 (international pulsar timing array, IPTA) 地面射电、“中子星内部成分探测器” (neutron star interior composition explorer, NICER) 空间 X 射线计时数据以及 500 m 口径球面射电望远镜 (five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST) 模拟数据, 分析了天地基脉冲星时的稳定性. 研究表明, 基于 IPTA 数据的 PSR J0437-4715 地基脉冲星时的年稳定度为  $3.30 \times 10^{-14}$ , 10 年的稳定度为  $1.23 \times 10^{-15}$ . 脉冲星红噪声会降低脉冲星时稳定性, PSR J1939+2134 地基脉冲星时的年稳定度为  $6.51 \times 10^{-12}$ . 同时研究发现脉冲到达时间 (time of arrival, TOA) 的精度是制约地基脉冲星时稳定性的重要因素, 基于 NICER 空间 X 射线计时数据的 PSR J1824-2452A 地基脉冲星时年稳定度为  $1.36 \times 10^{-13}$ . 最后模拟分析了 FAST 将来对脉冲星时的贡献, 在不考虑红噪声的影响下, 基于 FAST 的 PSR J1939+2134 地基脉冲星时的年稳定度为  $2.55 \times 10^{-15}$ , 10 年稳定度为  $1.39 \times 10^{-16}$ , 20 年稳定度为  $5.08 \times 10^{-17}$ , 显示了 FAST 强大的脉冲星观测能力. FAST 计时观测将有力地提升中国地基脉冲星时系统建设水平, 也能增强中国综合 PNT 系统时间基准的长期稳定性.

**关键词:** 定位导航授时, 脉冲星时, 原子时, 脉冲到达时间

**PACS:** 97.60.Gb, 43.58.Hp

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210288

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2020YFB0505800)、国家自然科学基金 (批准号: 42004004, 42074006, 11903001)、安徽省高校省级自然科学基金项目 (批准号: KJ2019A0787)、安徽建筑大学校博士启动基金项目 (批准号: 2019QDZ14) 和国家自然科学基金 (批准号: 2020-SKJJ-C-043) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [yan.linli@foxmail.com](mailto:yan.linli@foxmail.com)

# 1 引言

空间位置和时间是现在万物互联时代最重要的基础性信息,其中时间是高精度测量的基础<sup>[1]</sup>. 时间是当前测量最为精密和准确的物理量,其他基本物理量单位可以通过物理关系和常数数值,转换为时间频率量来测量,因此精密时间测量将大大提高其他物理量的测量精度<sup>[2]</sup>. 精密时间测量工具之一的原子钟,能够实现时间测量从纳秒( $10^{-9}$  s)到皮秒( $10^{-12}$  s),乃至飞秒( $10^{-15}$  s)量级甚至更高精度,此外原子钟还具有便携性,其所产生的标准时间频率可搭载在无线电波或光波设备上远距离传输. 一个以原子钟为核心的国家时间频率体系对于保障国民生活、经济运行和国防安全意义重大,是国家重要的空间信息基础设施<sup>[3,4]</sup>. 中国自主发展、独立运行的北斗卫星导航系统,现可在全球范围内全天候、全天时提供高精度、高可靠的 PNT 服务<sup>[5]</sup>,定位精度可达厘米级,授时精度达 10 ns,能够满足地球表面及近地空间大部分用户的需求. 中国以 BDS 全球星座优势为依托,进而构建中国的天地一体化时空基准网,能够实现天地时间、空间基准并行发展,提供统一的导航授时服务.

BDS 具有全天候、高精度和全球覆盖等特点,作为一种先进的时空基准服务信息系统广泛地融入人类生活和工作中,然而 BDS 和所有其他全球卫星导航系统一样存在无线电信号弱、穿透力差、抗干扰差,用户群体受限等缺点,例如不能为深空、水下等场景的用户提供 PNT 服务<sup>[5,6]</sup>. 为了提供适用性更强、精度更高、稳健性更强的 PNT 服务,2010 年,美国国防部与运输部联合设计了美国国家 PNT 体系结构. 该 PNT 系统将集成现有导航资源,深度融合导航终端,优化计算理论,可为空间、空中、地面、水面、地下、水下用户提供连续、统一、可靠的 PNT 服务,瞄准 2025 年构建更加一体化的新国家 PNT 体系<sup>[7,8]</sup>. 中国杨元喜院士根据应用场景不同、导航资源配置问题提出了弹性 PNT 框架,以多源信号源冗余观测量为基础,应用函数模型进行权重调整和随机模型自适性优化,使 PNT 服务更加高效连续稳健<sup>[9]</sup>.

BDS 是中国国家 PNT 体系的基石,其核心是地面运控中心维持北斗时的原子钟组和北斗导航卫星携带的原子钟<sup>[10]</sup>,提供了 PNT 服务的时间基

准信息. 当前使用的原子钟有氢钟、铯钟和铷钟. 氢钟具有非常好的中短期频率稳定度,铯钟具有良好的频率准确度和长期频率稳定度,氢钟和铯钟常相互结合用于地面守时,而铷钟具有体积小、指标适中,工艺成熟等优点,主要用于星载和各类导航终端<sup>[3,4]</sup>. 单个原子钟一般都存在长周期噪声和频漂的问题,星载时钟则更加明显,需要地面定期校准,如北斗三号氢钟在轨自主运行年最大偏差可达 80  $\mu$ s<sup>[11]</sup>,同时由于原子钟器件易老化,工作寿命有限,所以各授时单位用于守时的原子钟组需要经常添置新的原子钟,成本耗资较大,且影响时间系统的准确性与连续性,迫切需要建立新型时间基准系统.

自从 1967 年发现首颗脉冲星起,科学家就意识到极其稳定的脉冲星自转频率在时间基准方面具有的应用价值<sup>[12]</sup>. 脉冲星是一类高速自转的中子星,具有当前自然界最稳定的天文时间频率. 部分毫秒脉冲星自转极其稳定,其自转周期变化率达  $10^{-19}$ — $10^{-21}$  s/s,年稳定度达  $3 \times 10^{-14}$ ,且年最大偏差仅 1  $\mu$ s. 这表明脉冲星有可能成为新的时间频率源,能提供一种独立的基于遥远自然天体并持续数百万乃至数十亿年的时间基准<sup>[13,14]</sup>. 利用脉冲星的长期稳定性可改进地面原子时的长期稳定性,同时结合本地守时钟优良的短期稳定性和脉冲星的长期可用性、稳定性,构建一个新的综合时间基准<sup>[15]</sup>.

在以 BDS 为核心的国家综合 PNT 框架中,利用脉冲星时具有高稳定性、全自主性和全宇宙性的优势,可监测和改善中国 BDS 时间基准的长期稳定性, BDS 用户将可获得更加稳定的时间基准信息. 脉冲星作为宇宙灯塔,对深空用户可提供高精度的自主导航和授时服务. 此外,空间 X 射线和地面射电频段同时观测毫秒脉冲星,可实现高精度的天地时间溯源. 以毫秒脉冲星计时为基础的新型时间服务体系可优化全球导航卫星系统时间基准,以此构建的深空导航授时系统可以实现高精度时间服务区域的增大. 当前, PNT 相关研究侧重于体系架构设计、多导航源融合及模型弹性设计等方面<sup>[5,6,9]</sup>,对脉冲星时在 PNT 系统中作用贡献研究尚少. 本文主要论述了脉冲星计时原理及改善全球卫星导航系统时间基准的工作过程,利用 IPTA, NICER 实测数据和 FAST 模拟数据进行分析,对比评估脉冲星时的稳定性.

## 2 天地基脉冲星时研究现状及基本原理

毫秒脉冲星是快速自转的“死亡”脉冲星, 它们经历过漫长的吸积加速过程, 从而周期能短至毫秒量级. 目前毫秒脉冲星已脱离吸积加速阶段, 处于一个自转非常稳定的阶段, 故其自转稳定性能与原子钟相媲美, 可建立基于脉冲星高稳定度自转频率的时间, 称为脉冲星时 (pulsar time, PT)<sup>[16,17]</sup>. 脉冲星时具有以下 3 个优势: 1) 能对地球时 (terrestrial time, TT) 提供了一个独立外部检核, 检测现有原子时间系统的长期稳定性; 2) 与原子钟的工作原理不同, 脉冲星时是建立在恒星质量物体的天体物理过程基础上, 不易干扰; 3) 原子钟工作寿命有限, 且随着器件老化, 其守时性能逐渐变差, 而脉冲星时可持续稳定地工作数百万乃至数十亿年, 且可服务于远离地球的深空用户.

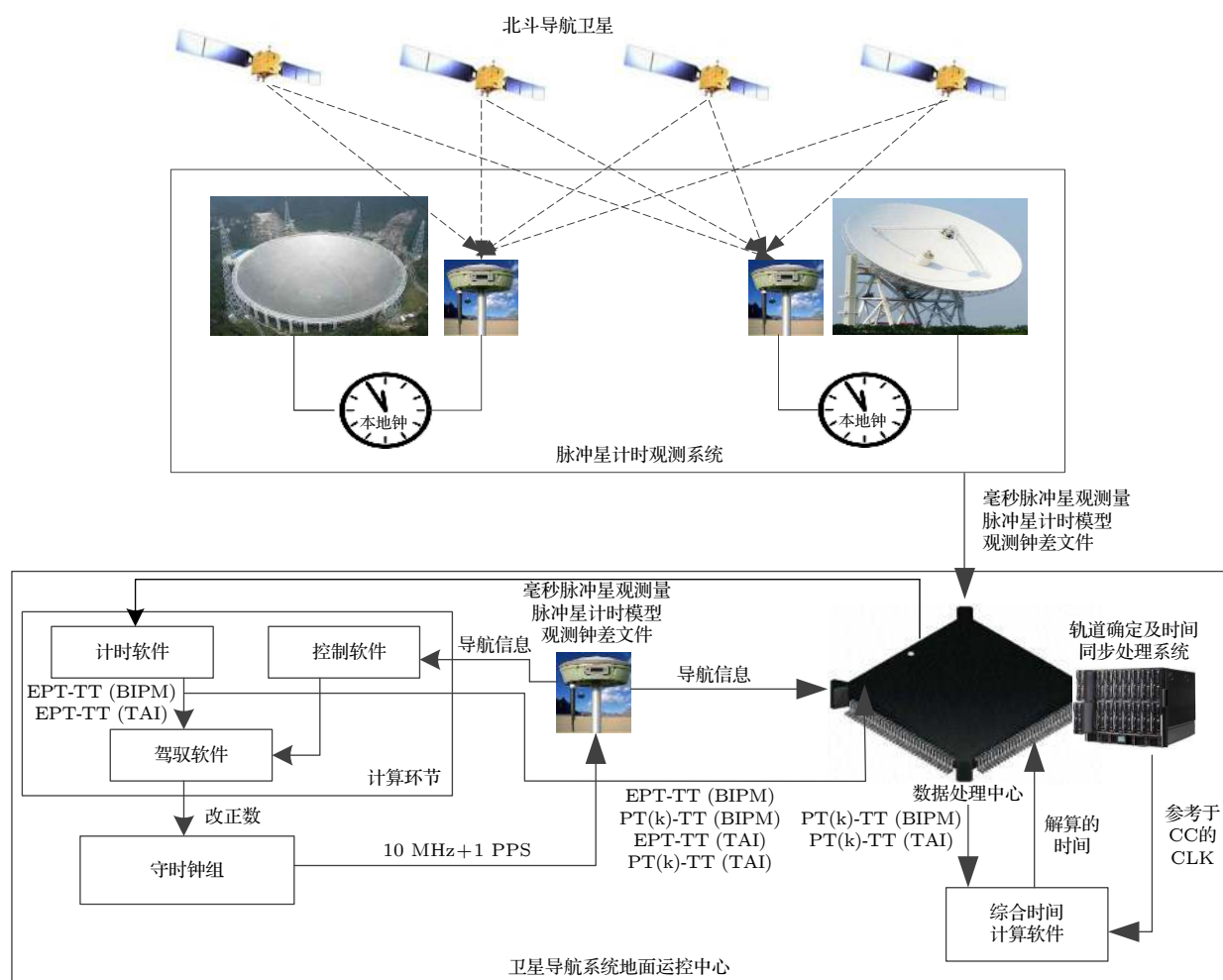
科学家们对脉冲星时开展了近四十年的研究, 相继提出了一系列脉冲星时建立及评估的理论方法. 1984 年 Ilyasov 等<sup>[12,14]</sup> 提出了脉冲星时的概念, 讨论了用脉冲星双星的轨道运动定义脉冲双星时间尺度的可行性. 之后有学者利用累积的毫秒脉冲星观测数据开展 PT 稳定性分析的研究工作, 与原子时进行了比较分析<sup>[18–20]</sup>. 同期研究了综合脉冲星时的算法<sup>[21]</sup>, 基于单颗毫秒脉冲星的自转频率定义的脉冲星时, 容易受到各种噪声的影响, 可基于多颗毫秒脉冲星实现综合脉冲星时, 从而提高脉冲星时的稳定性. 近几年, Hobbs 博士研究团队<sup>[22,23]</sup> 利用澳大利亚国家天文台帕克斯脉冲星计时阵 (parkes pulsar timing array, PPTA) 的计时数据, 不断优化钟模型和噪声模型, 先后建立两个脉冲星时 TT(PPTA11) 与 TT(IPTA16), 能探测到原子时 (TT(TAI)) 的历史不稳定性, 其中, TAI 为国际原子时间 (international atomic time) 的英文缩写, TT 是地球时的英文缩写. 中国学者紧跟脉冲星时国际发展前沿, 充分利用 IPTA 公开数据开展脉冲星时稳定性分析, 如仲崇霞等<sup>[24]</sup>、尹东山等<sup>[25]</sup> 将小波分解、Vandark 滤波等方法用于综合脉冲星时的构建. 2019 年, 李志玄等<sup>[26]</sup> 利用贝叶斯估计方法对云南天文台 PSR J0437-4715 观测数据处理, 探测到本地原子钟 80 ns 跳变, 该方法也可用于原子钟相位跳变的监测.

随着脉冲星计时精度的提高, PT 展示了其良好的工程应用前景. 2010 年, 美国国防高级研究计划局提出了 X 射线计时计划 (X-ray Timing, XTIM), XTIM 试图将原子钟“锁定”到一颗 X 射线脉冲星上, 从而建立一个全局的脉冲星时系统<sup>[27,28]</sup>, 为美国空间用户提供自主定时和定位, 独立并补充其全球定位系统. 2012 年, McCarthy 建议国际天文学联合会时间委员会成立脉冲星时间工作组, 协调该领域的国际合作, 推动脉冲星时的应用<sup>[29]</sup>. 2018 年 12 月, 欧洲空间局宣布运行一个基于脉冲星的时钟 (PulsarChron, PulChron) 项目, 其目的是利用脉冲星监测和改善伽利略卫星导航系统时间的长期稳定性. 2019 年 1 月, Ricardo 等<sup>[15]</sup> 公布了 PulChron 项目于 2018 年 12 月—2019 年 1 月之间 55 天的运行结果, 发现基于欧洲脉冲星计时阵 18 颗毫秒脉冲星构建的综合脉冲星时, 在两个月时间内与世界协调时偏离 1—2 ns, 初步分析其月稳定度可优于  $2 \times 10^{-14}$ .

随着中国 FAST 超高灵敏度脉冲星观测能力日益显现, 以及新大口径全可动抛物面射电望远镜的立项建设, 中国脉冲星计时阵 (China pulsar timing array, CPTA) 的计时观测能力将达到世界领先水平. 通过借鉴与学习 PulChron 项目, 相信利用 CPTA 开展毫秒脉冲星计时观测, 也将有利于改善和提高中国 BDS 时间基准的长期稳定度, 支持 BDS 的中国脉冲星时地面服务系统 (China pulsar time ground service system, CPTGSS) 的结构图如图 1 所示.

与 PulChron 项目一样, CPTGSS 将由一系列软硬件系统组成, 完成毫秒脉冲星的观测及处理, 结合 BDS 地面守时钟组的信息, 生成一个综合时间基准. CPTGSS 的实现将通过以下两种方式<sup>[15]</sup>: 一是物理时间, 将利用毫秒脉冲星计时信息控制守时钟组的输出, 通过校正钟组中原子钟的频率漂移, 使得原子时与脉冲星时对齐. 二是纸面时间, 即融合处理脉冲星计时信息、卫星和测站时钟估计量得到的一种综合时间, 没有真实的频率输出, 是数学上的最优解. 为了获得更高的稳定性, 综合时间将对稳定性更好的时间尺度赋予更大的权重. 即使综合时间不能实时运行, 纸面时间的刻度可理解为对原子钟和脉冲星观测组合所能达到的最大稳定性. 综合时间的建立主要使用来自原子钟和脉冲星的所有历史信息, 因此预期其将获得比单一时间



图 1 中国脉冲星时地面服务系统的结构图 (参考 PulChron 项目系统结构)<sup>[15]</sup>Fig. 1. Structure diagram of China pulsar time ground service system (refer to the structure of PulChron project system)<sup>[15]</sup>.

更好的性能, 并可能促成未来国际单位制中秒的重新定义<sup>[15]</sup>.

CPTGSS 将由脉冲星计时观测系统、脉冲星频率生成系统和综合时间构建系统组成. 脉冲星计时观测系统将以 FAST 或新建的大型射电望远镜为主体, 主要提供望远镜时钟钟差和毫秒脉冲星计时信息 (例如: 脉冲到达时间、计时模型参数). 脉冲星频率生成系统通过控制守时原子钟组的输出实现物理时间. 综合时间构建系统负责将融合 BDS 时钟钟差和脉冲星计时信息实现纸面时间.

脉冲星计时是脉冲星时研究的基本观测手段. 脉冲星计时是利用射电望远镜或空间 X 射线卫星定期监测脉冲星辐射的规律性脉冲信号, 记录得到 TOA 的过程. TOA 是指脉冲星辐射的脉冲信号到达观测设备的时间. 脉冲星信号非常微弱, 计时观测需要将多次观测的脉冲轮廓进行叠加, 得到标准轮廓. 然后将每次观测脉冲轮廓与标准轮廓互

相关, 得到每次观测的脉冲到达时间. 计时观测通常选择测站或卫星的时钟作为时间参考, 需将其时间校正到国际标准时间系统, 如 TAI 或 TT 等标准时间系统, 以保证计时观测是以当今国际上最高精度的时间系统为参考. 为了避免地球运动学和动力学的影响, 对于近地空间脉冲星观测事件的处理分析需选定一个理想的惯性参考系统, 通常选择太阳质心天球参考系, 故测站处的 TOA 须转换至太阳系质心 (barycenter of the solar system, SSB) 处的 TOA, 时间也修正为质心坐标时 (barycentric coordinate time, TCB).

以地面射电望远镜计时观测为例, 射电望远镜接收到脉冲星信号, 经过一系列的物理、几何及相对论效应, 包括平直空间几何时延、引力时延、时间尺度效应和介质时延. 观测处脉冲到达时间  $t_{\text{obs}}$  转换至 SSB 处脉冲到达时间  $t_{\text{SSB}}$  需扣除上述效应的影响, 其数学模型如下<sup>[28,30,31]</sup>:

$$\begin{aligned}
t_{\text{SSB}} = t_{\text{obs}} &+ \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}}{c} - \frac{1}{2cR_0}[(\mathbf{r})^2 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{r})^2] \\
&- \frac{1}{c}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})\Delta t + \frac{1}{cR_0}[(\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}) - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{r})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})]\Delta t \\
&+ \Delta t_c + \frac{2}{c^3} \sum_{k=S,E,\dots} \mu_k \ln(r_k + \mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_k) \\
&- \frac{4\mu_S^2}{c^5 r_S \tan \psi \sin \psi} - \frac{D}{f^2} - \Delta_B \quad (1)
\end{aligned}$$

式中,  $\mathbf{n}$  为脉冲星在太阳系质心坐标系的单位矢量,  $\mathbf{r}$  为射电望远镜相对于质心位置,  $c$  为光速,  $\mathbf{v}$  为脉冲星相对于 SSB 的速度矢量,  $\Delta t = t - t_0$  为观测时刻  $t$  与参考历元  $t_0$  的差值,  $R_0$  为参考历元脉冲星距离,  $\Delta t_c$  为望远镜时钟修正至 TCB 尺度的改正数, 包括原子钟钟差和各种爱因斯坦时延 (如 TAI, TT, TCB 之间的转换),  $\mu_k$  为太阳系第  $k$  个天体的引力常数,  $\mathbf{r}_k$  为太阳系第  $k$  个天体相对于射电望远镜的位置矢量, 而  $r_k$  为其模.  $\psi$  为太阳和脉冲星相对于射电望远镜的张角,  $D$  为脉冲星的色散量,  $f$  为太阳系质心处的脉冲星观测频率.  $\Delta_B$  为双星系统内脉冲信号传播时延, 主要包括到脉冲星框架的坐标转换, 双星轨道运动造成的真空传播延迟、信号穿过伴星的引力场引起的传播延迟及时间坐标的相对论改正 [28,30]. (1) 式等号右边第 2—5 项分别为几何真空时延、视差、脉冲星的径向速度引起的时延、一阶 Roemer 延迟; 之后第 7—9 项分别是太阳系各种引力时延、太阳二阶引力时延和色散时延. 对于空间 X 射线数据处理, 由于 X 射线是一种波长短、能量大的电磁波, 其色散时延可忽略不计.

通过对  $t_{\text{SSB}}$  进行分析, 可建立脉冲星计时模型, 得到脉冲星在质心处平直空间的自转规律, 该自转规律可用泰勒多项式表示:

$$\phi(t) = \phi_0 + v(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{v}(t - t_0)^2 + \dots \quad (2)$$

式中,  $\phi(t)$  为  $t$  时刻的脉冲相位,  $\phi_0$  是初始历元  $t_0$  时的脉冲相位,  $v, \dot{v}$  分别为脉冲星自转频率及一阶导数. 上式也称脉冲星钟模型, 可精确地预报脉冲到达时间 [32].

第  $i$  次观测的计时残差  $R_i$  的计算如下:

$$R_i = (\varphi_i - \phi_i)/v \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中  $\phi_i$  为第  $i$  次观测得到的脉冲相位,  $\varphi_i$  是以基于钟模型预报的脉冲相位. 如果计时残差为 0, 则表

示脉冲星钟模型与观测非常匹配.

脉冲星时是一种相对的时间概念, 主要通过脉冲星时与参考原子时的钟差测量而实现. 无论地面射电还是空间 X 射线观测脉冲星, 计时观测得到的脉冲到达时间都是以原子时为参考. 首先通过测站原子钟标定脉冲 TOA, 然后通过时间比对链路将脉冲到达时间溯源到国际原子时. 计时残差是太阳系质心处脉冲到达时间预报值和观测值之差. 预报值是基于钟模型, 代表了脉冲星时 (PT), 而通过射电观测得到脉冲到达时间是以原子时 (AT) 为参考的, 故计时残差包含有脉冲星时与参考原子时之间的钟差. 如果脉冲星计时处理中, 各种效应得到完全修正, 那么计时残差即为 AT-PT. 当前, 国际计量局 (the international bureau of weights and measures, BIPM) 提供了 TAI 的两种实现方式: 准实时 TT(TAI) 和事后时 TT(BIPM), 本文选择 TT(BIPM2015) 作为天地基脉冲星时研究的参考时间基准. 脉冲星时稳定性分析采用  $\delta_z$  估计算法, 其原理详见参考文献 [33].

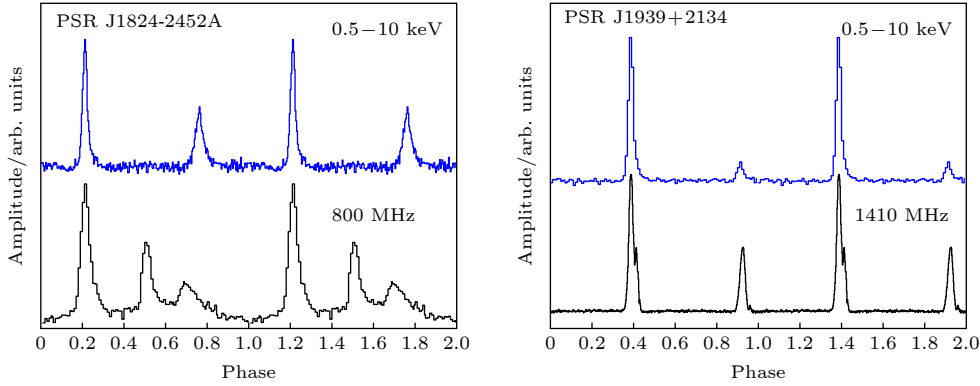
### 3 天地基脉冲星时稳定性分析

脉冲星是一种具有超高密度、超强电磁场和超强引力场等极端物理条件的自然天体, 其表面的一些特殊区域能够产生脉冲辐射束, 一般在射电、X 射线等多个频段辐射电磁信号. 利用毫秒脉冲星地面射电观测数据可建立地基脉冲星时, 空间 X 射线观测数据可建立天基脉冲星时, 本文选择两颗在 X 射线和射电波段辐射较强的毫秒脉冲星 PSR J1939+2134 和 PSR J1824-2452A 分析, 有利于天地基脉冲星时的比较. IPTA 和 NICER 都对这两颗脉冲星进行了密集的观测, 并公开发布了其观测数据. PSR J1939+2134 和 PSR J1824-2452A 的基本信息见表 1, NAME 为脉冲星名称,  $P_0$  为脉冲星周期, DIST 为脉冲星距离,  $f_{1400}$  为脉冲星在观测频率 1.4 GHz 的射电流量密度, FLUX 为脉冲星在 2—10 keV 能段的流量密度,  $W_{50}$  为射电脉冲轮廓的半高宽. 两颗脉冲星在不同频段脉冲轮廓见图 2, 其中 0.5—10 keV 为 X 射线频段, 来自于 SEXTANT 项目的数据处理; 800 MHz 和 1.41 GHz 为射电观测频段, 来自参考文献 [34] 的采点. 两个脉冲星的脉冲轮廓存在多个窄峰, 窄峰

表 1 两颗毫秒脉冲星的基本信息

Table 1. Basic information of two millisecond pulsars.

NAME	$P_0/\text{ms}$	DIST/kpc	$f_{1400}/\text{mJy}$	FLUX/( $\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$W_{50}/\text{ms}$
J1939+2134	1.55780656108493	3.5	15.2	$1.8 \times 10^{-12}$	0.0382
J1824-2452A	3.0543155922712	5.5	2.0	$1.5 \times 10^{-13}$	0.972

图 2 两颗毫秒脉冲星的射电及 X 射线脉冲轮廓<sup>[34]</sup>Fig. 2. Radio and X-ray pulse profiles of two millisecond pulsars<sup>[34]</sup>.

处辐射流量比较大. 对于同一个脉冲星, 在不同能段上观测到的脉冲轮廓不一样, 射电的轮廓较窄, 而高能 X 射线的轮廓较宽, 一般认为是由于辐射区域位置不同导致, 同时也导致射电脉冲轮廓的峰值位置与高能的峰值并不重合<sup>[35]</sup>.

### 3.1 基于 IPTA 计时数据的地基脉冲星时稳定度分析

IPTA 由 3 个计时阵 (PPTA、美国的北美纳米赫兹天文台项目和欧洲脉冲星计时阵) 组成, 每个计时阵通常每隔 2—3 周对一组毫秒脉冲星进行一轮观测, 每颗毫秒脉冲星观测时间约 1 h. 地面脉冲星射电观测数据处理主要包括两部分, 首先进行数据提取、积分、消色散、历元折叠和脉冲平均处理, 获得观测脉冲轮廓, 然后将观测轮廓和标准轮廓互相关得到脉冲到达时间. 其次将脉冲到达时间和钟模型预测的到达时间进行比较, 获得计时残差, 并拟合更新脉冲星参数. 2019 年 IPTA 发布了第二批共 65 颗脉冲星的观测数据<sup>[36]</sup>, 其中 PSR J1824-2452A 的数据周期长度约 6 年, PSR J1939+2134 则近 30 年. 重新对这些数据进行处理分析, 在不考虑红噪声影响的情况下, 时间基准参考于 TT(BIPM2015), 行星历表采用 DE436, 得到两颗脉冲星的地基脉冲星时见图 3, 脉冲星时的表现形式是 PT(ii)-TT(BIPM2015), 也称计时残差, ii 代

表脉冲星名称. 图 3 中上图为 PT(PSR J1824-2452A)-TT(BIPM2015), 其均方根误差 (root mean squared error, RMS) 为  $2.39 \mu\text{s}$ , 下图为 PT(PSR J1939+2134)-TT(BIPM2015), 其 RMS 为  $68.37 \mu\text{s}$ , 可见其存在明显的长期计时噪声, 也称红噪声. 使用  $\delta_z$  方法估计基于 IPTA 毫秒脉冲星计时数据建立的脉冲星时稳定性, 见图 4.

由图 4 可知, 基于 IPTA 数据构建的地基脉冲星时稳定度随着时间而缓慢提高. 需要说明的是, 当时间尺度大于数据观测周期的一半时, 稳定性估计时会优先使用最新的观测数据. 计算得到, PSR J1824-2452 A 地基脉冲星时的年稳定度为  $2.32 \times 10^{-13}$ , 5 年稳定度为  $1.10 \times 10^{-13}$ , 而 PSR J1939+2134 地基脉冲星时的年稳定度为  $6.51 \times 10^{-12}$ , 5 年稳定度为  $2.42 \times 10^{-12}$ , 10 年稳定度为  $2.05 \times 10^{-12}$ , 随着时间增加稳定性增强. 统计发现, PSR J1939+2134 的平均 TOA 精度为 331 ns, 而 PSR J1824-2452A 为 997 ns, 由于 PSR J1939+2134 存在准周期的红噪声, 故其脉冲星时稳定度受到明显的制约.

### 3.2 基于 NICER 项目观测数据的天基脉冲星时稳定度分析

NICER 是由美国国家航空航天局在国际空间站上实施的天体物理学航天任务, 致力于解决中子星内部四种基本力相互作用机理. NICER 的观测

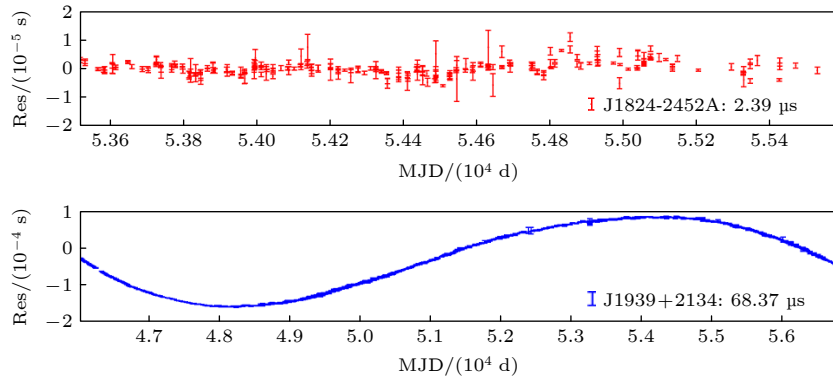


图 3 基于 IPTA 毫秒脉冲星计时数据的地基脉冲星时

Fig. 3. Ground-based pulsar time based on IPTA millisecond pulsar timing data.

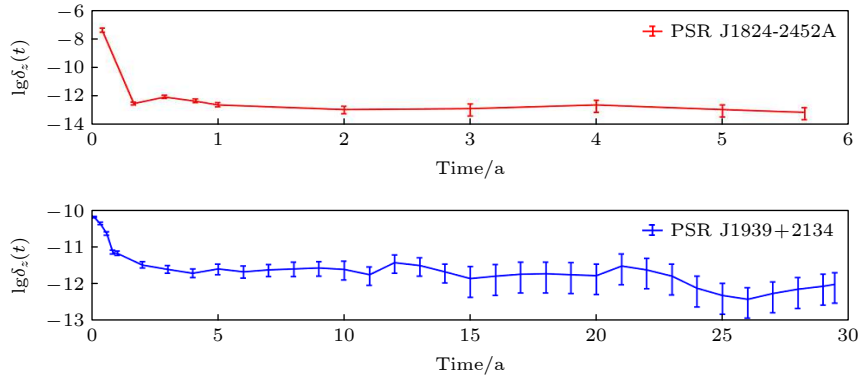


图 4 IPTA 脉冲星计时数据构建的地基脉冲星时的稳定性

Fig. 4. Stability of ground-based pulsar time constructed by IPTA pulsar timing data.

设备性能较之前探测器有数量级的提高,也为 X 射线脉冲星导航技术、天基脉冲星时及 X 射线通信空间验证提供了机会 [37]. 通过下载 NICER 于 MJD 57933.0—58588.0 期间原始观测数据 [38], 数据分析过程与其他空间 X 射线卫星事例型光子事件数据相同, 包括以下几个步骤: 1) 提取数据; 2) 生成好的时间文件; 3) 筛选目标光子; 4) 质心修正; 5) 脉冲轮廓折叠及 TOA 计算; 6) 计时分析. 分析发现, PSR J1824-2452A 的脉冲 TOA 单次观测精度为  $9.16 \mu\text{s}$ , 而 PSR J1939+2134 为  $15.57 \mu\text{s}$ . 对系列 TOA 进行计时分析, 由于数据周期短, 仅拟合一阶脉冲星自转参数, 同样可得到每个脉冲星的计时残差, 也是天基脉冲星时的表征, 见图 5. 图 5 中上图为 PT(PSR J1824-2452A)-TT(BIPM2015), 其 RMS 为  $22.09 \mu\text{s}$ , 下图为 PT(PSR J1939+2134)-TT(BIPM2015), 其 RMS 为  $18.16 \mu\text{s}$ .

同理可得基于 NICER 观测数据建立的天基脉冲星时稳定性, 见图 6. 由图 6 可知, 基于 NICER 数据构建的天基脉冲星时稳定性在较短时间内基

本稳定, PSR J1824-2452A 和 J1939+2134 的天基脉冲星时的年稳定度分别是  $1.36 \times 10^{-13}$  和  $2.02 \times 10^{-12}$ . NICER 于 2017 年 9 月发射安装于国际空间站, 最新观测数据发布遵循国际科学数据保护约定, 在本论文研究期间只能下载两颗脉冲星约一年半时间的观测数据, 故当前结果无法体现出天基脉冲星时长期稳定性. NICER 的 X 射线探测器的有效面积约  $1800 \text{ cm}^2 @ 1.5 \text{ keV}$ , 然而两颗毫秒脉冲星在  $0.5\text{--}10 \text{ keV}$  的脉冲光子流量密度都在  $10^{-5} \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$  量级. 经测算, NICER 接收到 PSR J1824-2452A 和 PSR J1939+2134 的脉冲光子数分别为  $0.055 \text{ ph/s}$  和  $0.021 \text{ ph/s}$ , 每次观测需要累积 ks 量级才能得到观测脉冲轮廓. 尽管 NICER 的 X 射线探测器具有较强的空间背景噪声抑制能力, 但是探测器接收到两颗毫秒脉冲星的背景噪声强度分别为  $0.90 \text{ ph/s}$  和  $0.49 \text{ ph/s}$  [39], 从而制约得到高精度的脉冲 TOA. 可见, 天基脉冲星时稳定性的进一步提高, 需要大面积高灵敏度探测器、长的观测时间及较好的空间背景噪声抑制能力.



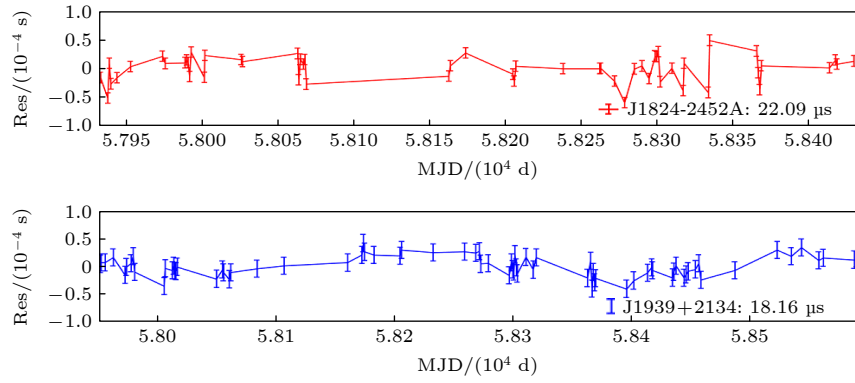


图 5 基于 NICER 毫秒脉冲星计时数据的天基脉冲星时

Fig. 5. Space-based pulsar time based on NICER millisecond pulsar timing data.

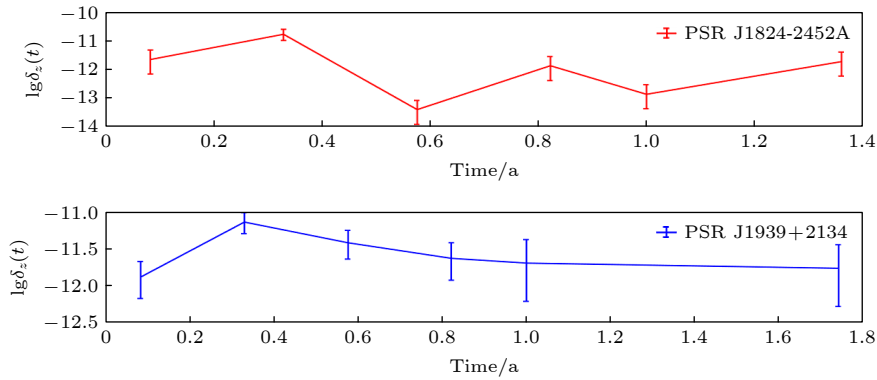


图 6 NICER 计时数据构建的天基脉冲星时的稳定度

Fig. 6. Stability of space-based pulsar time constructed by NICER timing data.

### 3.3 基于 FAST 模拟数据的脉冲星时稳定度分析

高精度计时观测是脉冲星时建立的基础. 当前中国 FAST 是世界最大的单口径射电望远镜 [40], 综合性能是已坍塌的阿雷西博望远镜的至少 3 倍, 在未来的 10—20 年内处于国际领先地位, FAST 极大提高了脉冲星观测灵敏度. 由于 FAST 观测天区有限, 以及 PSR J1939+2134 较强的红噪声, FAST 没有对这两颗毫秒脉冲星进行观测, 且 FAST 暂无公开发布其毫秒脉冲星计时结果. 为了与 IPTA 和 NICER 计算结果比较, 本文采用 Tempo2 软件模拟生成两颗脉冲星 30 年观测数据, 其中计时模型参数来自 IPTA, 模拟方法参考文献 [41], 脉冲 TOA 精度的估计参考文献 [28,42], 用于脉冲星观测的 19 波束接收机的参数源于 FAST 官方网站. TOA 观测精度估计同时考虑了相位噪声的影响, 由此得到 FAST 对 PSR J1824-2452A 和 J1939+2134 观测 1800 s 的脉冲到达时间精度为  $1.532 \mu\text{s}$  和  $37.9 \text{ ns}$ . 在 PSR J1939+2134 数据模拟中, 考虑

了有无红噪声两种情况. 与 2 节处理 IPTA 数据一样, 得到基于 FAST 30 年模拟数据的地基脉冲星时, 见图 7. 3 个地基脉冲星时分别是 PSR J1824-2452A、不考虑红噪声效应的 PSR J1939+2134 和考虑红噪声的 PSR J1939+2134 的脉冲星时间基准, 其 RMS 分别为  $1.56 \mu\text{s}$ ,  $39.49 \text{ ns}$  和  $89.33 \mu\text{s}$ , 可见红噪声对脉冲星时的影响特别明显. 同理可得 3 个脉冲星时的稳定性, 见图 8.

由图 8 可知, 在不考虑红噪声的影响下, PSR J1824-2452 A 和 PSR J1939+2134 脉冲星时稳定度随着时间而提高, 而当时间超过 15 年, 稳定度趋于稳定, 这与模拟中脉冲星计时观测精度固定有关. 基于 FAST 的 PSR J1824-2452A 地基脉冲星时的年稳定度为  $1.02 \times 10^{-13}$ , 10 年稳定度为  $5.00 \times 10^{-15}$ , 20 年稳定度为  $2.27 \times 10^{-15}$ , 而 PSR J1939+2134 地基脉冲星时的年稳定度为  $2.55 \times 10^{-15}$ , 10 年稳定度为  $1.39 \times 10^{-16}$ , 20 年稳定度为  $5.08 \times 10^{-17}$ . 可见, 高精度脉冲到达时间测量是提高脉冲星时稳定性的最有效途径, 而 FAST 强大

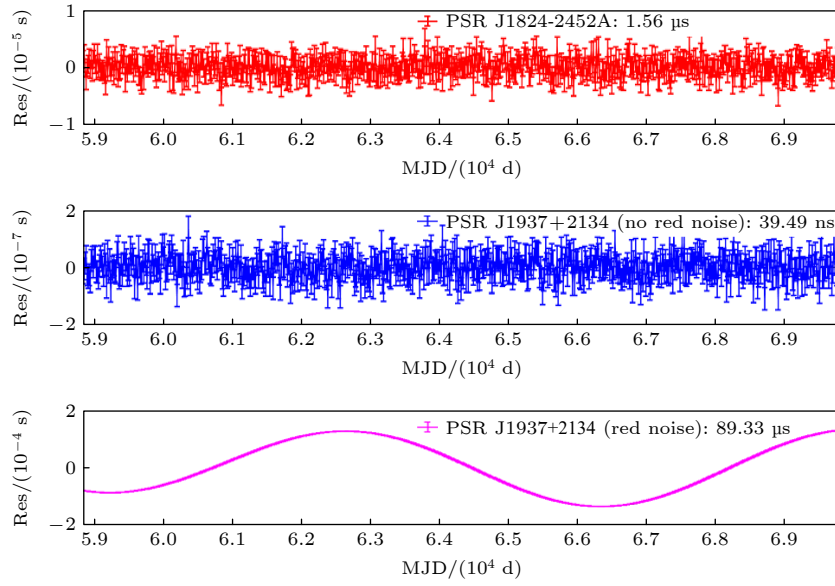


图 7 基于 FAST 模拟计时数据的地基脉冲星时

Fig. 7. Ground-based pulsar time based on FAST simulation timing data.

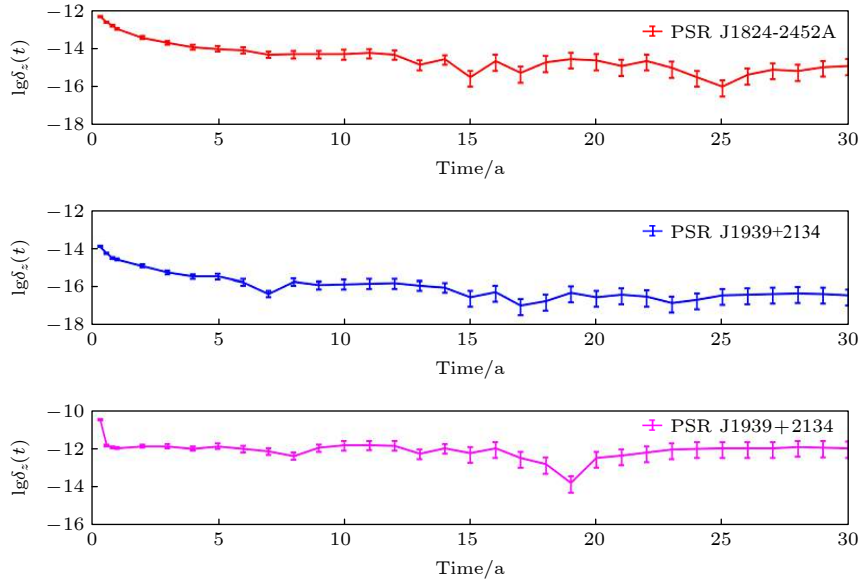


图 8 FAST 模拟数据构建的地基脉冲星时的稳定度

Fig. 8. Stability of ground-based pulsar constructed by FAST simulation timing data.

的脉冲星计时观测能力, 为将来建立我国高精度脉冲星时系统提供了可能. 本文同时分析红噪声对 PSR J1939+2134 地基脉冲星时的影响, 考虑红噪声的 PSR J1939+2134 地基脉冲星时的年稳定度为  $1.14 \times 10^{-12}$ , 10 年稳定度为  $1.66 \times 10^{-12}$ , 20 年稳定度为  $3.36 \times 10^{-13}$ . 对比发现, 红噪声会大幅度降低脉冲星时的稳定度, 较强的红噪声会掩盖高精度脉冲 TOA 测量的贡献, 但脉冲星时稳定度也将随时间尺度增加趋于平缓.

## 4 结论与讨论

综合 PNT 体系是未来中国信息基础设施的重要组成部分, 能够为各类用户提供统一高精度时空基准服务. BDS 作为国家 PNT 体系的核心, 提供满足最大共性需求的服务, 并对其他用户导航授时系统提供时空基准传递服务. 本文设计了支持 BDS 的 CPTGSS 架构和基本功能, 研究了天地基脉冲星时建立方法, 利用 IPTA 地面射电和 NICER

空间 X 射线毫秒脉冲星计时数据以及 FAST 模拟数据分析了天地基脉冲星时的稳定性, 主要结论如下:

1) CPTGSS 由脉冲星计时观测系统、脉冲星频率生成系统和综合时间构建系统组成, 其主要功能是利用毫秒脉冲星计时信息校正原子钟的频率漂移, 并生成一个综合时间.

2) 基于 IPTA 数据的 PSR J1824-2452A 地基脉冲星时的年稳定度为  $2.32 \times 10^{-13}$ , 5 年稳定度为  $1.10 \times 10^{-13}$ , PSR J1939+2134 地基脉冲星时受到其红噪声的影响, 其年稳定度为  $6.51 \times 10^{-12}$ , 5 年稳定度为  $2.42 \times 10^{-12}$ , 10 年稳定度为  $2.05 \times 10^{-12}$ .

3) 脉冲 TOA 精度是制约天基脉冲星时稳定性的重要因素, 受制于当前 NICER 探测器对毫秒脉冲星的观测精度, PSR J1824-2452A 和 J1939+2134 的空基脉冲星时的年稳定度分别为  $1.36 \times 10^{-13}$  和  $2.02 \times 10^{-12}$ .

4) 利用中国 FAST 的模拟数据, 证实了 FAST 能够进一步提高观测精度, 更有利于地基脉冲星时稳定性的提高. 在不考虑红噪声的影响下, 基于 FAST 的 PSR J1824-2452A 地基脉冲星时的年稳定度为  $1.02 \times 10^{-13}$ , 10 年稳定度为  $5.00 \times 10^{-15}$ , 20 年稳定度为  $2.27 \times 10^{-15}$ , 而 PSR J1939+2134 地基脉冲星时的年稳定度为  $2.55 \times 10^{-15}$ , 10 年稳定度为  $1.39 \times 10^{-16}$ , 20 年稳定度为  $5.08 \times 10^{-17}$ .

通过分析, 高精度脉冲到达时间的测量是提高脉冲星时稳定性的关键环节, 特别对于天基脉冲星时稳定性的提高尤为关键, 然而长期的红噪声降低脉冲星时短期及长期稳定度, 且会掩盖高精度脉冲 TOA 测量的贡献. 当前红噪声的物理机制尚不确定, 认为其规律是一种随机行为, 而这些长期不

确定性带来的残差是很大的, 有些可达数百微秒, 下一步需深入研究脉冲星红噪声的削弱方法. 同时, 建立天基与地基脉冲星时, 可以分别选择不同的毫秒脉冲星. 地面射电观测精度高, 观测丰富, 可供选择的毫秒脉冲星的数量较多, 尽量选择没有明显红噪声的毫秒脉冲星. 对于建立天基脉冲星时, 当前可供观测的 X 射线毫秒脉冲星数量有限, 目前只能重分布利用现有可用的毫秒脉冲星.

PSR J0437-4715 是距地球最近的一颗毫秒脉冲星, 具有 X 射线辐射和射电辐射, 且计时噪声较弱, 适用于脉冲星导航和授时. 由于 PSR J0437-4715 属于脉冲星双星系统, 本文在处理分析 NICER 的 PSR J0437-4715 观测数据时, 双星时延建模修正遇到难题. 为了对比分析, 选择了计时噪声明显的脉冲单星 PSR J1939+2134. 脉冲星时的建立应该选择没有明显红噪声的毫秒脉冲星, 如 CPTA 无法监测处于南半球的 PSR J1939+2134<sup>[43]</sup>, 红噪声的存在不仅增加了脉冲星时计算的复杂性, 而且对于脉冲星时的长期频率稳定度贡献甚微. 本文同理分析了 18.5 年 IPTA 对 PSR J0437-4715 的观测数据, 得到其地基脉冲星稳定度见图 9.

由图 9 可知, PSR J0437-4715 脉冲星时的年稳定度分别为  $3.30 \times 10^{-14}$ , 十年的稳定度为  $1.23 \times 10^{-15}$ , 基于实测数据的地基脉冲星时具有较好的长期稳定性. 如果 FAST 对一批类似 PSR J0437-4715 的毫秒脉冲星观测, 可预见其能提升地基脉冲星时稳定度, 并在改善中国综合 PNT 系统时间基准长期稳定性中发挥重要作用.

感谢北京大学李柯伽教授的交流和指导, 同时感谢各位审稿人和编辑的审阅及校正.

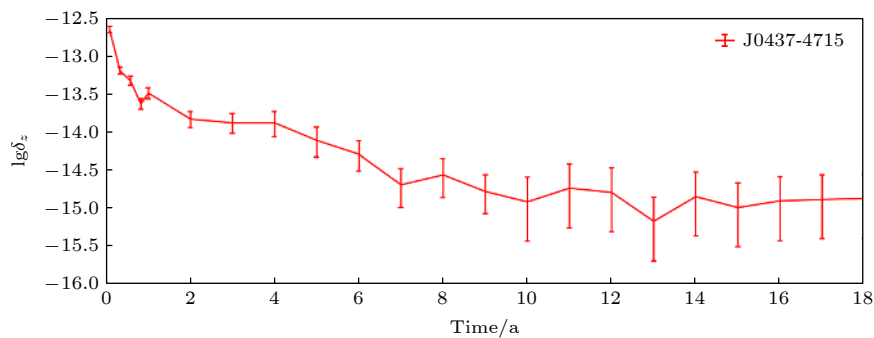


图 9 基于 IPTA 计时数据的 PSR J0437-4715 地基脉冲星时的稳定性

Fig. 9. Stability of PSR J0437-4715 ground-based pulsar based on IPTA timing data.

## 参考文献

- [1] Soffel M, Langhans R 2013 *Space-Time Reference Systems* (Berlin: Springer) pp49–55
- [2] Major F G 2007 *The Quantum Beat-Principles and Applications of Atomic Clocks* (2nd Ed.) (NewYork: Springer) pp1–10
- [3] Zhai Z Z, Zhang W Q, Yong C, Yang P H 2008 *Basic Principle of Atomic Clock and Time Frequency Measurement Technology* (Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press) pp23–30 (in Chinese) [翟造成, 张为群, 蔡勇, 杨佩红 2008 原子钟基本原理与时频测量技术 (上海: 上海科学技术文献出版社) 第23—30页]
- [4] Huang B Y 2006 *New Generation Atomic Clock* (Wuhan: Wuhan University Press) p67(in Chinese) [黄秉英 2006 新一代原子钟 (武汉: 武汉大学出版社) 第67页]
- [5] Xie J, Liu Q J, Bian L 2017 *Space Electronic Technology* **5** 1 (in Chinese) [谢军, 刘庆军, 边朗 2017 空间电子技术 **5** 1]
- [6] Yang Y X 2016 *Acta Geodaetica et Cartographica Sin.* **45** 505 (in Chinese) [杨元喜 2016 测绘学报 **45** 505]
- [7] National positioning, navigation, and timing architecture implementation plan, United States. National Security Space Office <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/18293> [2021-3-8]
- [8] National positioning navigation and timing architecture, National Security Space Office. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/34816> [2021-3-8]
- [9] Yang Y X 2018 *Acta Geodaetica et Cartographica Sin.* **47** 893 (in Chinese) [杨元喜 2018 测绘学报 **47** 893]
- [10] Ran C Q 2014 *Satellite Applications* **8** 13 (in Chinese) [冉承其 2014 卫星应用 **8** 13]
- [11] Zheng J J 2020. *Pulsar Navigation Technology Academic Forum*, Guangzhou, China, December 5, 2020, p1020
- [12] Il'in V G, Ilyasov Y P, Kuz'min A D, Pushkin S B 1984 *Meas. Tech.* **62** 52
- [13] Petit G, Tavella P 1996 *A&A.* **308** 290
- [14] Ilyasov Y P, Kopeikin S M, Rodin A 1998 *Astron. Lett.* **24** 228
- [15] Ricardo P, Esteban G, Pedro R, Michael K, Benjamin S, Setnam S, Kathryn B, John D, Stefano B 2019 *Proceedings of the 2019 Precise Time and Time Interval Meeting, ION PTTI* 2019, Reston, USA January 28–31, 2019 p191
- [16] Allan D W 1987 41 st *Annual Frequency Control Symposium of IEEE* Philadelphia, USA 23–29 May, 1987 p751
- [17] Taylor J H 1991 *Proceedings of the IEEE* **79** 1054
- [18] Kaspi V M, Taylor J H, Ryba M F 1994 *APJ* **1428** 713
- [19] Lommen A N 2001 *Ph. D. Dissertation* (Berkeley: University of California Berkeley)
- [20] Vivekanand M 2020 *APJ* **890** 143
- [21] Rodin A E, Fedorova V A A 2018 *Astron. Rep.* **95** 401
- [22] Hobbs G, Coles W, Manchester R N, Keith M J, Shannon R M, Chen D, Bailes M, Bhat N D R, Burke-Spolaor S, Champion D, Chaudhary A, Hotan A, Khoo J, Kocz J, Levin Y, Osłowski S, Preisig B, Ravi V, Reynolds J E, Sarkissian J, Straten W V, Verbiest J P W, Yardley D, You X P 2012 *MNRAS* **427** 2780
- [23] Hobbs G, Guo Li, Manchester R N, Coles W, Lee K J, Manchester R N, Reardon D J, Matsakis D, Tong M L, Arzoumanian Z, Bailes M, Bassa C G, Bhat N D R, Brazier A, Burke-Spolaor S, Champion D J, Chatterjee S, Cognard I, Dai S, Desvignes G, Dolch T, Ferdman R D, Graikou E, Guillemot L, Janssen G H, Keith M J, Kerr M, Kramer M, Lam M T, Liu K, Lyne A, Lazio T J W, Lynch R, McKee J W, McLaughlin M A, Mingarelli C M F, Nice D J, Osłowski S, Pennucci T T, Perera B B P, Perrodin D, Possenti A, Russell C J, Sanidas S, Sesana A, Shaifullah G, Shannon R M, Simon J, Spiewak R, Stairs I H, Stappers B W, Swiggum J K, Taylor S R, Theureau G, Tiburzi C, Vallisneri M, Vecchio A, Wang J B, Zhang S B, Zhang L, Zhu W W, Zhu X J 2020 *MNRAS* **491** 5951
- [24] Zhong C X 2007 *Ph.D. Dissertation*(Xi'an: National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences)(in Chinese) [仲崇霞. 2007 博士学位论文(西安: 中科院国家授时中心)]
- [25] Yin D S, Gao Y P, Zhao S H 2016 *Acta Astronom. Sin.* **3** 326 (in Chinese) [尹东山, 高玉平, 赵书红 2016 天文学报 **3** 326]
- [26] Li Z X, Lee K J, Ricardo N C, Yong H X, Long G H, Min W Jian C W 2020 *Sci. China Phys. Mech.* **63** 1
- [27] Space navigation using X-ray pulsar observations, Hanson J E. [http://scpnt.stanford.edu/pnt/PNT11/2011\\_presentation\\_files/03\\_Hanson-PNT2011.pdf](http://scpnt.stanford.edu/pnt/PNT11/2011_presentation_files/03_Hanson-PNT2011.pdf). [2012-12-23]
- [28] Zhou Q Y. 2020 *Ph.D. Dissertation*(Zhengzhou: PLA University of information engineering) (in Chinese) [周庆勇. 2020 博士学位论文(郑州: 信息工程大学)]
- [29] Of Future IAU recommendations and organization, McCarthy D [Dhttps://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012jsrs.conf..263M/abstract](https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012jsrs.conf..263M/abstract)[2020-03-03]
- [30] Tong M L, Yang T G, Zhao C S, Gao Y P 2017 *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.* **47** 099503 (in Chinese) [童明雷, 杨廷高, 赵成仕, 高玉平 2017 中国科学: 物理学力学天文学 **47** 099503]
- [31] Zhou Q Y, Ji J F, Ren H F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 139701 (in Chinese) [周庆勇, 姬剑锋, 任红飞 2013 物理学报 **62** 139701]
- [32] Edwards R T, Hobbs G B, Manchester R N 2006 *MNRAS* **372** 1549
- [33] Matsakis D N, Taylor J H, Eubanks T M 1997 *A&A* **326** 924
- [34] Autonomous spacecraft Navigation with Pulsars, Becker W, Bernhardt M G, Jessner A <https://arxiv.org/pdf/1305.4842.pdf>. [2015-08-10]
- [35] Gotthelf E V, Bogdanov S 2017 *APJ* **845** 159
- [36] Perera B B P, DeCesar M E, Demorest P B, Kerr M, Lentati L, Nice D J, Osłowski S, Ransom S M, Keith M J, Arzoumanian Z, Bailes M, Baker P T, Bassa C G, Bhat N D R, Brazier A, Burgay M, Burke-Spolaor S, Caballero R N, Champion D J, Chatterjee S, Chen S, Cognard I, Cordes J M, Crowter K, Dai S, Desvignes G, Dolch T, Ferdman R D, Ferrara E C, Fonseca E, Goldstein J M, Graikou E, Guillemot L, Hazboun J S, Hobbs G, Hu H, Islo K, Janssen G H, Karuppusamy R, Kramer M, Lam M T, Lee K J, Liu K, Luo J, Lyne A G, Manchester R N, McKee J W, McLaughlin M A, Mingarelli C M F, Parthasarathy A P, Pennucci T T, Perrodin D, Possenti A, Reardon D J, Russell C J, Sanidas S A, Sesana A, Shaifullah G, Shannon R M, Siemens X, Simon J, Spiewak R, Stairs I H, Stappers B W, Swiggum J K, Taylor S R, Theureau G, Tiburzi C, Vallisneri M, Vecchio A, Wang J B, Zhang S B, Zhang L, Zhu W W, Zhu X J 2019 *MNRAS* **490** 4666
- [37] Dominick M R, Zaynab G, Lauren L, Elizabeth S, Andrea L, Alice H, Christo V, Renee L, Paul S R, Matthew k, Zaven A, Slavko B, Julia D, Sebastien G, Natalia L, Craig B M, Scott R, Teruaki E, Kent S W, Keith C G 2020 *APJ* **892** 150
- [38] NASA GSFC Science and Exploration, NASA <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl> [2021-3-8]
- [39] Deneva J S, Ray P S, Lommen A, Ransom S M, Bogdanov S, Kerr M, Wood K S, Arzoumanian Z, Black K, Doty J, Gendreau K C, Guillot S, Harding A, Lewandowska N, Malacaria C, Markwardt C B, Price S, Winternitz L, Wolff M T, Guillemot L, Cognard I, Baker P T, Blumer H, Brook P R, Cromartie H T, Demorest P B, DeCesar M E, Dolch T, Ellis J A, Ferdman R D, Ferrara E C, Fonseca E, Garver-



- Daniels N, Gentile P A, Jones M L, Lam M T, Lorimer D R, Lynch R S, McLaughlin M A, Ng C, Nice D J, Pennucci T T, Spiewak R, Stairs I H, Stovall K, Swiggum J K, Vigeland S J, Zhu W W 2019 *APJ* **874** 160
- [40] Nan R D, Wang Q M, Zhu L C, Zhu W B, Jin C J, Gan H Q 2006 *CJAA* **6** 304
- [41] Yonemaru N, Kuroyanagi S, Hobbs G, Takahashi, Zhu X J, Coles W A, Dai S, Howard E, Manchester R, Reardon D, Russell C, Shannon R M, Thyagarajan N, Spiewak R, Wang J B 2020 *MNRAS* **501** 701
- [42] Zhou Q Y, Liu S W, Hao X L, Ji J F, He Z N, Zhang C H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 079701 (in Chinese) [周庆勇, 刘思伟, 郝晓龙, 姬剑锋, 贺珍妮, 张彩红 2016 物理学报 **65** 079701]
- [43] Li K J 2010 *CPTA Pulsar Navigation Technology Academic Forum* Guangzhou, China, December 5, 2020, pp1–27

## Space/ground based pulsar timescale for comprehensive PNT system<sup>\*</sup>

Zhou Qing-Yong<sup>1)2)3)</sup> Wei Zi-Qing<sup>1)2)</sup> Yan Lin-Li<sup>4)†</sup> Sun Peng-Fei<sup>5)</sup>  
 Liu Si-Wei<sup>1)2)</sup> Feng Lai-Ping<sup>1)2)</sup> Jiang Kun<sup>6)</sup> Wang Yi-Di<sup>7)</sup>  
 Zhu Yong-Xing<sup>1)2)</sup> Liu Xiao-Gang<sup>1)2)</sup> Ming Feng<sup>1)2)</sup>  
 Zhang Fen<sup>1)2)</sup> He Zhen-Ni<sup>8)</sup>

1) (State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China)

2) (Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)

3) (School of Geospatial Information, University of Information Engineering, Zhengzhou 450052, China)

4) (School of Mathematics and Physics, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

5) (National Time Service Center, CAS, Xi'an 710600, China)

6) (Beijing Institute of Communication and Tracking Technology, Beijing 100090, China)

7) (College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

8) (Department of Foundation, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

( Received 7 February 2021; revised manuscript received 9 March 2021 )

### Abstract

The comprehensive positioning navigation timing (PNT) system in China is a multi-source information fusion system with BeiDou navigation satellite system (BDS) as a core. The high-precision millisecond pulsar timing can enhance the long-term stability of the BDS time benchmark and maintain a space-time benchmark for future deep-space users. In this paper, a ground-based pulsar time service system is proposed for detecting and improving the time benchmark of BDS. The preliminary designs and functions of the system are outlined. At the same time, the method of establishing space and ground-based pulsar time is studied. The ground radio timing data from the international pulsar timing array (IPTA), the X-ray timing data from the neutron star interior composition explorer (NICER) in space, and the simulation data from the 500-meter spherical radio telescope (five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST) for three millisecond pulsars are used to analyze the stability of ground/space-based pulsar time. The research results are as follows. The annual stability of the PSR J0437-4715 ground-based pulsar time based on IPTA data is  $3.30 \times 10^{-14}$ , and the 10-year

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2020YFB0505800), the National Science Foundation of China (Grant Nos. 42004004, 42074006, 11903001), the Key Research Foundation of Education Ministry of Anhui Province (Grant No. KJ2019A0787), the Doctor Foundation of Anhui Jianzhu University 2019 (Grant No. 2019QDZ14), and National Social Science Foundation of China (Grant No. 2020-SKJJ-C-043).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [yan.linli@foxmail.com](mailto:yan.linli@foxmail.com)

stability is  $1.23 \times 10^{-15}$ , respectively. The existence of pulsar red noise can reduce the time stability of the pulsar. The annual stability of the PSR J1939+2134 ground-based pulsar time is  $6.51 \times 10^{-12}$ . We find that the accuracy of the pulse time of Arrival(TOA) is an important factor that restricts the stability of space-based pulsar time. Based on NICER space X-ray timing data, the stability of the pulsar time for PSR J1824-2452A is  $1.36 \times 10^{-13}$  in one year. Finally, the simulation analysis of the FAST's data without considering the influence of red noise is completed, and we find that the PSR J1939+2134 ground-based pulsar time based on the FAST has an annual stability of  $2.55 \times 10^{-15}$ , a 10-year stability of  $1.39 \times 10^{-16}$ , and a 20-year stability of  $5.08 \times 10^{-17}$ . It demonstrates that the powerful pulsar observation capability of FAST will help to improve the accuracy of ground-based pulsar time and enhance the long-term stability of the comprehensive PNT system time benchmark in China.

**Keywords:** positioning navigation timing, pulsar time, atomic time, pulse TOA

**PACS:** 97.60.Gb, 43.58.Hp

**DOI:** [10.7498/aps.70.20210288](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210288)