

引用格式:童明雷,朱幸芝,韩孟纳,等.国家授时中心脉冲星时间的建立及应用技术发展[J].时间频率学报,2026,49(1):175-186.

国家授时中心脉冲星时间的建立及应用技术发展

童明雷^{1,2,3,*}, 朱幸芝^{1,2}, 韩孟纳^{1,2}, 张哲浩^{1,2}, 周祖荣^{1,2},
胡悦^{1,2,3}, 王琳琳^{1,2,3}, 王浙宇^{1,2,3}, 肖子钰^{1,2,3}

1. 中国科学院 国家授时中心,西安 710600;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院),西安 710600;
3. 中国科学院大学,北京 100049

摘要:基于脉冲星观测建立的脉冲星时间具有一些独特的优势,在一些特殊场景或特殊时期能够应用到时间基准的保持中,可以提高国家标准时间的安全性和可靠性。主要介绍了中国科学院国家授时中心脉冲星时间的发展历程和最新进展,包括射电和 X 射线两种波段毫秒脉冲星的观测、时间尺度建立及应用方法。就目前的研究进展来看,基于射电波段观测建立的综合脉冲星时的长期稳定度比较高,可以检测国际原子时相对于地球时的长期波动,也可以通过驾驭原子钟校准其长期频率偏差,还可以与原子时融合建立长短稳皆优的融合时间尺度。基于 X 射线脉冲星观测,可以校准星载原子钟的频率偏差,提高空间守时系统的自主性,减少对地面支持系统的过度依赖,未来还可以用于深空导航。

关键词:毫秒脉冲星;脉冲星计时;脉冲星时间;脉冲星导航

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0175-12

Development of technology for the establishment and application of pulsar time at the National Time Service Center

TONG Ming-lei^{1,2,3,*}, ZHU Xing-zhi^{1,2}, HAN Meng-na^{1,2}, ZHANG Zhe-hao^{1,2},
ZHOU Zu-rong^{1,2}, HU Yue^{1,2,3}, WANG Lin-lin^{1,2,3}, WANG Zhe-yu^{1,2,3}, XIAO Zi-yu^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Pulsar time, established based on pulsar observations, possesses unique advantages and can be applied to the maintenance of time benchmarks in specific scenarios or periods. It addresses the issues of independence, security, and reliability in national standard time. This paper introduces the development and latest advancements in pulsar time of the National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, including observations of millisecond pulsars in both radio and X-ray bands, as well as methods for

收稿日期:2025-09-26;接受日期:2025-12-23;*mltong@ntsc.ac.cn

基金项目:中国科学院战略先导科技专项(A类)(XDA0350502);科技部 SKA 专项(2020SKA0120103);陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBQN-0036)

作者简介:童明雷,男,博士,研究员,主要从事脉冲星计时与导航应用研究。

establishing and applying time scales. According to current research progress, the long-term stability of composite pulsar time derived from radio band observations is relatively high. It can detect long-term fluctuations of International Atomic Time relative to Terrestrial Time, calibrate long-term frequency deviations by steering atomic clocks, and integrate with atomic time to create a composite time scale with excellent short-term and long-term stability. Based on X-ray pulsar observations, frequency deviations of spaceborne atomic clocks can be calibrated, enhancing the autonomy of space-based timekeeping systems and reducing excessive reliance on ground support systems.

Keywords: millisecond pulsars; pulsar timing; pulsar time; pulsar navigation

毫秒脉冲星是宇宙中的致密天体,自转极其稳定,脉冲星沿磁极辐射的电磁波束扫过地球时,人们可以接收到一系列近似等间隔的脉冲信号,成为宇宙中天然的频率源。基于此可以建立脉冲星时间,其长期稳定性优异,甚至优于原子时。目前已发现 4 000 多颗脉冲星,毫秒脉冲星约占 16%,广泛地分布在银河系中,因此接收脉冲星信号基本不受地域的限制。此外,毫秒脉冲星的特征年龄通常为 10 亿年左右,其寿命可视为无穷大,这些特点成为脉冲星时间应用的有利因素。脉冲星的辐射波段非常宽,从射电波段一直到伽马射线,有些毫秒脉冲星在射电波段和 X 射线波段都有比较显著的辐射,这类脉冲星可以在深空守时和导航中发挥重要的作用。利用多颗毫秒脉冲星计时观测数据可以建立综合脉冲星时,一般来讲,综合脉冲星时建立过程中会削弱部分噪声,因此相对于单颗星具有更高的稳定性。脉冲星时与原子时的联合守时有利于兼顾融合时间尺度的短期和长期稳定度,为北京时间提供更加自主、更加稳定的频率参考,提高北京时间的长期自主守时水平。

脉冲星时的建立是基于脉冲星计时观测的,脉冲星计时测量的是脉冲星的脉冲到达时间(time of arrival, TOA)。通过长期的 TOA 观测数据可以精确拟合得到某个参考时间的脉冲星计时模型参数,包括自转频率及其一阶导数、位置、自行、视差、双星轨道模型参数等。通过这些模型参数,可以预报第 n 个脉冲的 TOA,其与实际测量的 TOA 之差即为计时残差。实际观测中,计时残差受到多种因素的影响,例如测站时间系统的偏差、太阳系行星历表误差、宇宙中的引力波、星际介质色散和散射、内禀的自转计时噪声等,但这些因素也成为脉冲星计时的研究对象。脉冲星计时探测引力波已初见曙光^[1],脉冲星计时可以测量太阳系行星质量及加速度^[2],更重要的应用是建立脉冲星时间。根据国际

脉冲星计时阵(IPTA)的观测数据可以检测原子时的长期不稳定性^[3-6]。脉冲星时的研究由来已久, Petit, Rodin, Yang 等人贡献了许多建立脉冲星时的方法。Matskis 等人提出了脉冲星时稳定度的评估方法。空间的 X 射线脉冲星观测不仅可以实现自主守时^[7-8],未来还可以用于深空自主导航^[9]。

自 20 世纪 90 年代,我国科研人员就已经开始了脉冲星时的研究工作^[10-12],包括脉冲星观测数据处理、脉冲星时建立方法、脉冲星时应用技术等方面。近年来,脉冲星时间越来越受到关注,脉冲星时间的研究也取得了积极进展,相信在不久的将来,脉冲星时间可以真正应用到守时工作中,尤其是空间的自主守时系统。

1 脉冲星计时

脉冲星计时的过程实际是一个对钟的过程,即将测量 TOA 的原子钟同脉冲星钟进行对时。如果忽略所有的误差因素,那么当某一时刻原子钟同脉冲星钟对准后,可以实现长期同步,计时残差保持为零。然而现实中,这是不可能的,不仅有多种噪声的影响,例如测量设备的辐射计噪声、脉冲星自身的抖动噪声(jitter noise)和自转噪声(spin noise)、DM(dispersion measure)变化引起的红噪声、宇宙中的引力波等,还有一些模型误差,例如太阳系行星历表。另外,记录 TOA 的原子钟和原子钟溯源至标准时间的比对链路都存在误差。脉冲星计时观测主要分为地面射电波段观测和空间 X 射线观测。

1.1 脉冲星计时方法

脉冲星辐射的单脉冲序列受抖动噪声的影响通常是不稳定的,但若干的单脉冲经过周期折叠可以形成稳定的脉冲轮廓,称为平均脉冲轮廓。某一次观测数据得到平均脉冲轮廓与更长期数据获得的标准脉冲轮廓作互相关处理可以得到本次观测的 TOA。

1.1.1 射电脉冲星计时

由于射电脉冲星流量较大,在地面可观测数百颗毫秒脉冲星,因此射电脉冲星计时是脉冲星计时应用研究主要手段之一。通过地球上的射电望远镜接收来自脉冲星的射电脉冲信号,并用原子钟记录这些 TOA 观测数据,记为 t_{obs} 。利用脉冲星计时模型可以将 t_{obs} 与脉冲发射时间(t_p)联系起来^[13]。脉冲星计时模型反映了脉冲发射时间与脉冲到达时间之间的关系,其中包括脉冲信号在传播过程中经历的各种物理过程和几何效应,如坐标转换、引力场的影响、星际介质的影响、视差的影响、双星的影响以及地球的公转与自转等,其参数主要包括频率、频率的一阶导数、赤经、赤纬、自行、视差和双星轨道参数等。太阳系质心天球参考系(barycentric celestial reference system,BCRS)是一个准惯性系,其坐标原点为太阳系质心(solar system barycentre,SSB),可描述脉冲星信号的发射过程。脉冲星计时模型被表示为^[14]

$$t_p = t_{\text{obs}} - \Delta_{\odot} - \Delta_{\text{IS}} - \Delta_{\text{B}}。 \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta_{\odot}$ 将测站原子钟记录的脉冲到达时间(t_{obs})转换为同一脉冲在 SSB 处的等效到达时间,其中涉及了各种复杂效应,可表示为

$$\Delta_{\odot} = \Delta_{\text{A}} + \Delta_{\text{R}\odot} + \Delta_{\text{p}} + \Delta_{\text{D}\odot} + \Delta_{\text{E}\odot} + \Delta_{\text{S}\odot}。 \quad (2)$$

式(2)中: Δ_{A} 为大气延迟, $\Delta_{\text{R}\odot}$ 为 Roemer 延迟, Δ_{p} 为视差引起的延迟, $\Delta_{\text{D}\odot}$ 为色散延迟, $\Delta_{\text{E}\odot}$ 为 Einstein 延迟, $\Delta_{\text{S}\odot}$ 为 Shapiro 延迟。 Δ_{IS} 中包括双星质心系的坐标变换、真空传播延迟,以及脉冲信号经过星际介质时产生的额外的传播延迟。 Δ_{B} 中包括双星轨道运动引起的几何延迟、光行差延迟,以及伴星引起的 Einstein 延迟和 Shapiro 延迟。

脉冲星的自转相位可通过建立高精度模型来预报,其泰勒展开式为^[15]

$$\begin{aligned} \phi(t) = & \phi_0 + v(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{v}(t - t_0)^2 + \\ & \frac{1}{6}\ddot{v}(t - t_0)^3 + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, ϕ_0 是 t_0 时刻的脉冲星自转相位, v 、 $\dot{v}$ 、 $\ddot{v}$ 分别是 t_0 时刻脉冲星的频率、频率一阶导数和频率二阶导数。计时残差可表示为^[16]

$$R(t) = \frac{\phi(t) - N(t)}{v}。 \quad (4)$$

式(4)中, $N(t)$ 是离 $\phi(t)$ 最近的整数。在理想状态下,如果计时模型足够精确,则计时残差应呈现接

近于零的分布。然而在实际情况下,脉冲星计时过程比较复杂,需要不断地拟合脉冲星计时模型参数直至收敛,才能得到精准的脉冲星计时模型,高精度脉冲星计时模型的建立依赖地面射电望远镜的长期计时观测数据。目前,射电脉冲星计时已广泛应用于脉冲星时间尺度建立和引力波探测等领域。

1.1.2 X 射线脉冲星计时

脉冲星计时分析是脉冲星计时应用研究的基础,不同于射电波段观测的脉冲信号,X 射线探测器直接观测量为随机离散的光子信号,X 射线脉冲星数据分析流程如图 1 所示。探测器接收的 X 射线背景光子数远超过脉冲星光子数,导致脉冲星的光子信号淹没在复杂的天空背景噪声中,其辐射的周期性信号被隐藏。为降低背景辐射光子的影响,对光子数据做进一步筛选,筛选过程包括三部分,分别为光子能量区间筛选、探测器 ID 筛选以及光子流量筛选^[17]。X 射线光子到达卫星的时刻与卫星状态向量的遥测时刻并不一致,根据卫星状态的遥测数据由轨道动力学可获得光子到达探测器时刻航天器的位置和速度。

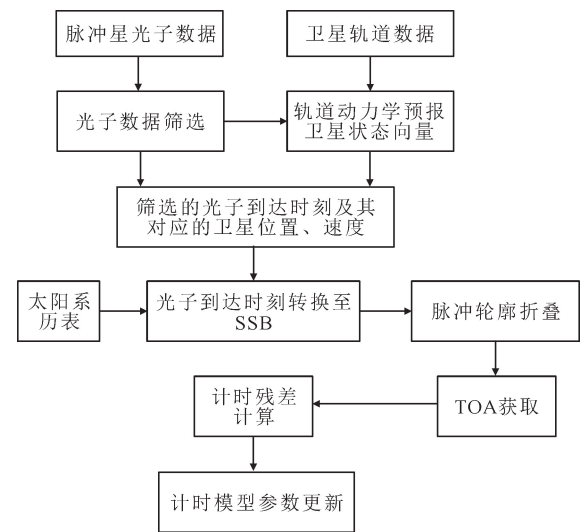


图 1 X 射线脉冲星计时分析流程

为了扣除太阳系引力场的影响以及航天器运动产生的“时钟变慢”效应,恢复脉冲星的周期性信号,将光子到达探测器的时刻转换至太阳系质心。脉冲星光子到达时刻转换中,采用美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)喷气推进实验室 JPL 的 DE 系列历表提供行星位置等信息,进行 Roemer 时延、Shapiro 时延、Einstein 时延以及双星轨道时延等改正。

脉冲轮廓反映了辐射窗口的平均辐射特征,长期观测累积的脉冲轮廓具有很好的稳定性,可作为脉冲星的标识。历元折叠法将光子到达太阳系质心时刻折叠至一个自转周期内,产生脉冲轮廓。为分析脉冲星信号,需得到高信噪比的脉冲轮廓,开展脉冲轮廓降噪方法的研究,对比了高斯(Gaussian)核平滑、Epanechnikov 核平滑以及 Tri-cube 核平滑方法对脉冲轮廓的平滑效果。在核宽度相同的条件下,高斯核回归的平滑效果优于其他两种方法,其具有灵活性高、适用性强、降噪效果好等优点。计时残差为测量 TOA 与脉冲星计时模型在 SSB 处预报的 TOA 之差,可由积分脉冲轮廓与标准脉冲轮廓经傅里叶变换后在频域互相关获得^[18]。

建立高精度的脉冲星计时模型是准确预报脉冲到达时间的前提。脉冲星具有多波段辐射特征,其辐射信号可覆盖地面和空间,通过长期累积的优质观测资料可构建高精度的脉冲星计时模型,对脉冲到达时间进行精准预报,为开展脉冲星计时应用提供必要准备。韩孟纳、童明雷等^[7]提出了基于 RANSAC(random sample consensus)抗差拟合的脉冲星自转参数更新方法,该算法对噪声数据进行过滤,通过迭代方式估计模型参数,降低脉冲星计时噪声对自转参数估计精度的影响。

按 X 射线脉冲星数据处理流程对 NICER (Neutron Star Internal Composition Explorer)探测器时长 5 年的 PSR B1937+21 观测数据进行计时分析,获得该星约 5 年数据对应的脉冲轮廓及计时残差展示在图 2 与图 3 中,脉冲轮廓波形稳定且具有明显的双峰结构,计时残差的 RMS(root mean square)约为 $4.76 \mu\text{s}$ 。

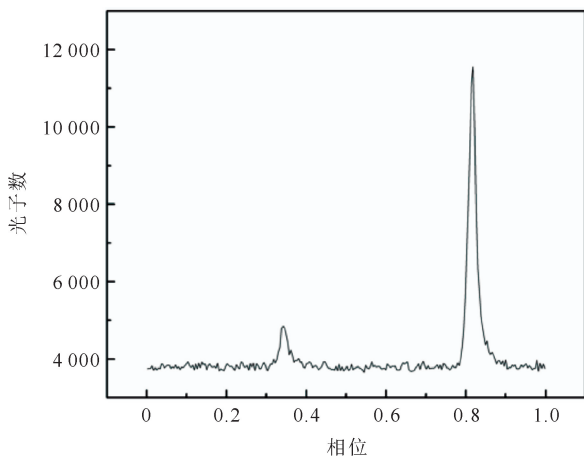


图 2 PSR B1937+21 的脉冲轮廓

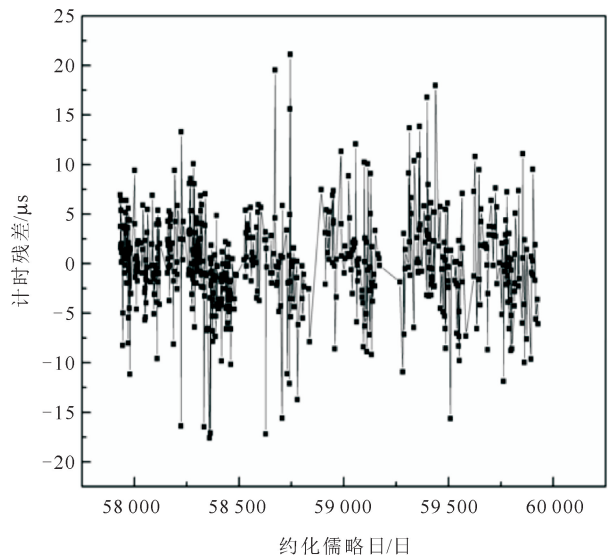


图 3 PSR B1937+21 的计时残差

1.2 脉冲星计时观测

脉冲星时间的建立是基于高精度脉冲星计时观测的,主要包括射电波段和 X 射线波段。下面我们主要介绍一些我国脉冲星计时观测的发展状况。

1.2.1 射电脉冲星计时观测

国内外已有大量的射电望远镜进行了射电脉冲星计时观测。国际上有 IPTA,已经公开发布了两次数据,超过 60 颗毫秒脉冲星。自 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)运行以后,中国也建立了脉冲星计时阵(CPTA),现阶段进行的脉冲星计时观测主要使用的 FAST,并已经获得了 57 颗毫秒脉冲星的计时精度。得益于 FAST 的高灵敏度,其中 35 颗毫秒脉冲星的计时精度达到了约 100 ns,而计时精度达到 200 ns 的毫秒脉冲星数量超过 50 颗,相对于国际上最好的观测精度 CPTA 的精度提高了数十倍^[19]。

2014 年,国家授时中心依托位于秦岭山区的洛南 40 m 射电望远镜建立了脉冲星计时观测系统。自 2016 年开始对包括 J0437-4715、J1713+0747、J1939+2134 在内的 7 颗毫秒脉冲星进行常规化高密度计时观测,平均每周观测不少于 3 次,其中 PSR J0437-4715 的计时精度达到 400 ns 左右,如图 4 所示。目前 J0437-4715 的观测数据已累积超过 8 年,J1713+0747 的观测数据超过 5 年。同时,对 X 射线流量显著的 Crab 脉冲星在射电波段也开展了高密度观测,以期及时更新其星历参数,为脉冲星导航应用提供支撑服务。

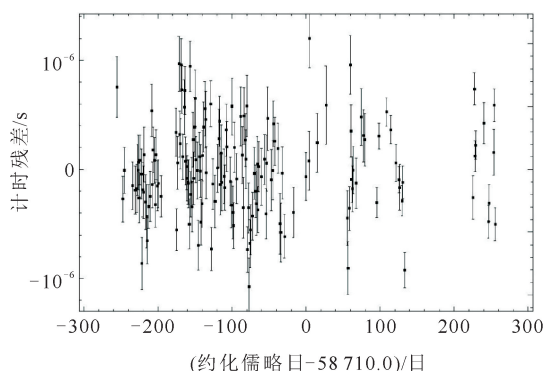


图 4 PSR J0437-4715 的计时残差

1.2.2 X 射线脉冲星计时观测

我国的 X 射线探测技术起步较晚,直到 2016 年后,随着天极望远镜(POLAR)、脉冲星试验 01 星(X-ray Pulsar Navigation-1, XPNAV-1)和慧眼卫星(Insight-Hard X-ray Modulation Telescope, Insight-HXMT)的陆续升空^[20-22],填补了我国 X 射线脉冲星计时观测的空白。这些卫星只能看到蟹状星云脉冲星(Crab)等明亮的脉冲星,无法观测到较为暗弱的毫秒脉冲星。2024 年 1 月 9 日,天关卫星(Einstein Probe, EP)^[23]成功发射,并于同年 7 月开展常规的科学运行。天关卫星上配置了后随 X 射线望远镜(follow-up X-ray telescope, FXT),它具有较大的有效面积,良好的角分辨率,以及具备计时、成像和光谱观测能力。FXT 的优异性能能够实现 X 射线毫秒脉冲星的计时观测,是我国 X 射线脉冲星观测的一大飞跃。

2 脉冲星时间建立

脉冲星计时残差实际上反映了参考原子时与脉冲星时的钟差。理想的时间尺度只有数学上的意义,现实中的物理时间都伴随着各种噪声。因此评估一个时间尺度的性能实际是对噪声水平的评估,只有尽量降低各种噪声的影响,才能获得更好的时间尺度。国家授时中心科研团队在脉冲星时构建、脉冲星时与原子时融合方面做出了较为显著的工作。

2.1 综合脉冲星时构建

脉冲星计时受到各类噪声的影响,总体可分为白噪声和红噪声。白噪声主要影响 TOA 的测量精度,进而影响脉冲星时的短期稳定性;而红噪声主要由内禀自转计时噪声和 DM 变化引起,影响的是综合脉冲星时的长期稳定性。由于脉冲星时的短

期稳定度无法同原子时相比,因此长期稳定度成为脉冲星时最重要的指标。无论是红噪声还是白噪声,一般来说不同脉冲星之间是互相独立的,因此通过多颗脉冲星的综合可以相互抑制部分噪声,得到稳定性更高的综合脉冲星时(Ensemble Pulsar Timescale, EPT)。因此,通常来讲综合脉冲星时比单颗星建立的脉冲星时具有更高的长期稳定性。另一方面,多颗脉冲星综合建立的脉冲星时更加可靠,可以有效避免单颗星的观测出现异常,提高脉冲星时的鲁棒性。因此综合脉冲星时的建立是提高时间系统性能和稳定的有效手段。另外,高性能脉冲星时的建立是脉冲星时应用的基础,因此如何建立高质量的综合脉冲星时是脉冲星时最重要的研究内容之一。

综合脉冲星时建立方法的研究由来已久。早在 21 世纪初,中国科学院国家授时中心杨廷高、柯熙政、倪广仁、潘炼德、李孝辉等人^[24-27]便开始了有关综合脉冲星时的研究。随着观测数据的不断累积,一些学者开始提出更加复杂的方法。

Rodin 等人^[28-30]以时域维纳滤波器为基础,提出了维纳滤波法,并通过模拟数据及实测数据(PSR B1855+09 与 B1937+21)验证了该方法在提取信号中的有效性。之后, Rodin 与 Fedorova^[31]于 2018 年基于频域维纳滤波器又提出了频域维纳滤波法。基于此,仲崇霞、杨廷高^[32]使用小波包分解,对计时残差的不同频率赋予不同权重,得到了比加权平均法更加光滑的综合脉冲星时。小波分析(Wavelet Analysis)是一种与傅里叶分析不同,且能够建立时间频率的相关关系的时频分析方法。仲崇霞、杨廷高^[33]在小波域中使用维纳滤波,对信号进行了再重构。韩孟纳、童明雷^[34]使用维纳滤波建立综合脉冲星时,再经小波去噪,实现了有效的噪声抑制效果。

以维纳滤波法为基础,一些学者还提出了相关或改进的方法。杨廷高、童明雷、高玉平根据功率谱的幂律模型,提出了一种改进维纳滤波法^[35],使用 IPTA 第二批数据中 10 颗脉冲星,证实其能有效抑制高强度噪声对脉冲星时的影响。张哲浩、童明雷、杨廷高^[36]基于频域维纳滤波法与随机过程中的自/互功率谱关系,提出了一种改进维纳滤波法,使用 IPTA 第二批数据中 7 颗脉冲星,成功检测到了国际原子时 TAI 与本地原子时 TA(NTSC)(NTSC 是国家授时中心的英文简称)的长期波动(见图 5)。

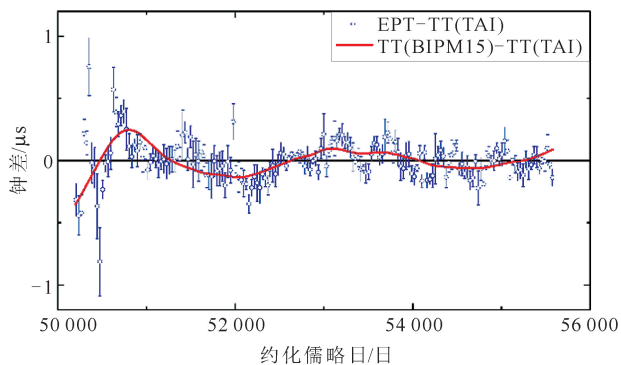


图 5 改进维纳滤波法建立的综合脉冲星时

国际上也提出了一些其他的方法建立综合脉冲星时,例如基于广义最小二乘的频率分析法^[3,37]和贝叶斯法^[4]。贝叶斯法通过对计时残差中的噪声及参考钟误差进行建模并计算模型参数的后验概率,进而得到参考钟误差的基本形式。这种方法优点是估计精度高,但在模型参数较多的情形下运算量巨大,相对需耗费更多时间。

传统的综合脉冲星时建立方法中,低频噪声水平较高的数据往往权重较低,对脉冲星时建立的贡献不大。高峰、童明雷、高玉平^[38]基于协整理论解决非平稳序列的建模原理,提出了一种建立综合脉冲星时的方法,通过抵消具有协整关系的计时残差中的噪声,提高了强噪声星在脉冲星时建立中的参与度。

脉冲星时由于 TOA 测量精度的原因,准确度不如原子时好。杨廷高等^[39]基于 Vondrak & Cepek 平滑,提出了一种结合原子时频率信息建立综合脉冲星时的方法。该方法给出的综合脉冲星时频率在小尺度上与原子时一致,在大尺度上保留脉冲星时的趋势。

从根本讲,综合脉冲星时水平受脉冲星计时观测噪声水平的制约。早期的脉冲星观测数据相对较少,TOA 测量噪声较高,加之缺乏多频段观测与色散消除,使用这些数据建立的综合脉冲星时中存在着除了参考钟误差外的明显噪声。如今,随着脉冲星观测能力的提高,TOA 的测量精度已能够达到几十纳秒^[40]。未来,综合脉冲星时将进一步反映出脉冲星时的真实水平,有望在与原子时联合中发挥作用。

2.2 脉冲星时与原子时融合方法

脉冲星时与原子时在时频特性上具有显著的互补性:原子时基于原子能级跃迁频率,具备优异

的短期稳定性(数日至数月),而脉冲星时依据毫秒脉冲星自转的极端稳定性,表现出卓越的长期稳定性(数年甚至数十年)。将两者进行融合,构建联合时标(如 Atomic Pulsar Time, APT),不仅能够综合利用二者的天然稳定度优势,形成全时段高性能的时间基准,更是提高国家或区域时间系统的自主性、可靠性,尤其是摆脱对外部时间溯源依赖的关键技术途径。目前,主要的融合方法包括基于平滑处理的滤波方法(如 Vondrak-Cepek 滤波)、基于动态系统估计的 Kalman 滤波方法、以及具有多分辨率分析优势的小波分析方法等。新兴的研究也开始探索机器学习等数据驱动方法在时标融合中的应用潜力。本节将对这些方法的原理、进展与特点进行系统综述,并展望其未来发展方向。

在脉冲星时与原子时融合方法的研究进程中,滤波技术是最早被探索的路径之一。Wiener 滤波被应用于构建综合脉冲星时^[41],通过对多个脉冲星计时残差进行最优加权,有效抑制单个脉冲星的噪声,从而提升整体时标的稳定性;然而,该方法高度依赖准确的噪声模型假设,在处理非平稳信号时存在局限性。小波分析因其在非平稳信号处理和多尺度分析方面的优势,早在 21 世纪初,李孝辉、柯熙政等人^[42]便得出采用小波分解算法计算的脉冲星时间尺度稳定度有显著提高。近年来被引入脉冲星时与原子时的融合中,朱幸芝等^[43]首次系统性地提出基于小波分析的 APT 建立方法。该方法的核心在于:①多尺度分解:利用 DbN 小波基函数对 EPT 和原子时(TA(NTSC))进行三层分解,得到不同频段的小波系数;②方差加权:根据各尺度下的小波方差计算权重,短期稳定性高的频段赋予原子时更高权重,长期稳定性高的频段赋予脉冲星时更高权重;③系数合成与重构:对加权后的小波系数进行重构,得到融合后的 APT 时标。

通过小波分析法对我国本地原子时 TA(NTSC)与 IPTA2 公开数据建立的 EPT 进行融合,实验结果如图 6,表明该方法能有效保留原子时的短期稳定性($\sigma_z(0.4 \text{ a}) = 5.6 \times 10^{-15}$)和脉冲星时的长期稳定性($\sigma_z(13.1 \text{ a}) \approx 1.3 \times 10^{-16}$),且其与 TT(BIPM)的钟差 RMS 显著低于 TA(NTSC)。

小波分析方法的优势在于:①适用于非平稳信号;②具备多分辨率分析能力;③可灵活调整不同频段的权重,避免传统均匀加权法的局限性。

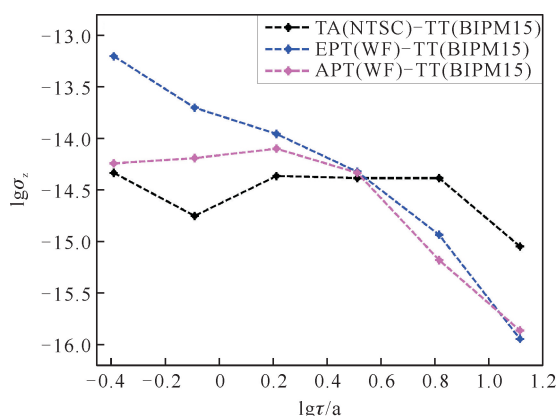


图 6 原子时 TA(NTSC)与 IPTA2 公开数据建立的 EPT 及融合时间 APT 的稳定度^[43]

除了上述方法外,还有研究尝试使用机器学习方法(如神经网络、支持向量机等)进行时间序列预测与融合,但目前仍处于初步探索阶段。

未来随着 FAST 等大型射电望远镜观测数据的积累,脉冲星定时精度将进一步提升,红噪声特性得到更好抑制,有望进一步提高 APT 的中短期稳定性。此外,多源数据融合、实时处理技术以及国际联合时标建立将是未来的重要研究方向。

3 脉冲星时应用

建立脉冲星时的最终目的是面向应用,目前原子时得到了广泛的应用,而脉冲星时距离实际应用还有许多理论方法需要完善、许多关键技术有待突破。中国科学院国家授时中心以国家重大战略需求为导向,近年来在脉冲星时间应用方面开展了大量的研究工作,包括理论方法研究和试验系统搭建。目标是将脉冲星时间应用于具体守时工作中,解决北京时间的自主可控、空间的自主守时、星地时间比对以及超远距离时间传递等问题。

相对于原子钟的比对精度,脉冲星计时测量精度约低两个量级,这就导致短期稳定度无法同原子时相比,如何发挥其长期稳定度优势成为脉冲星时应用的关键因素。脉冲星距离地球很远,信号传到地球受到传播路径多种因素的影响,这些因素形成复杂的红噪声,影响着脉冲星时的长期稳定性。而空间 X 射线脉冲星的流量通常较低,毫秒脉冲星难以观测到,目前只能观测到几颗,这也成为脉冲星时空间应用的制约因素。目前来讲,在一些极端条件下,例如在单台原子钟守时的情况下可利用脉冲星时守时来提高自主性,而大多数情况下脉冲星时与原子时联合守时是脉冲星时应用的主要方向。

3.1 脉冲星时与原子时联合守时

脉冲星时与原子时的联合守时不仅仅是两种不同数据的融合,而是两种手段更广泛意义上的相互补充。在现有以原子时为主要守时手段的情况下,脉冲星时的加入能够改善哪些方面的性能需要仔细分析,也是长期需要研究的课题。

3.1.1 利用脉冲星时提高原子时准确度

由于毫秒脉冲星的自转频率变化率很小,因此短时间内脉冲星的自转频率非常稳定,构成一种频率基准,而这种频率基准可以替代 TAI 去驾驭原子钟,提高其准确度。与原子钟相比,脉冲星是自然天体,具有寿命长、可靠性高、服务范围广,以及不受环境和人为因素影响等优势。如果能密集地进行脉冲星计时观测,则可以实现比 TAI 实时性更强的频率驾驭,以此可以提供更高精度的实时性时间服务。脉冲星时作为独立于 UTC 的时间保持体系,能够解决非常时期 UTC 中断时我国标准时间持续高性能保持的问题,对我国国防安全和社会稳定具有重要的战略意义。

脉冲星计时实际上是参考原子钟和脉冲星钟时间比对的过程,因此计时残差实际上代表了参考原子钟和脉冲星钟的钟差。对一些红噪声不明显的毫秒脉冲星来说,以 TT(BIPM)作为参考原子时的拟合后计时残差往往呈现出均值接近零的白噪声特征。噪声的均方根通常在微秒或百纳秒量级,主要是由脉冲星 TOA 的测量噪声引起的。如果让一台原子钟去记录新的 TOA 观测数据,且时间跨度不是很长,例如 1 年,那么这 1 年的拟合前计时残差依然呈现均值为零的白噪声特征。由于原子钟相对于 TT(BIPM)有频率偏差,那么拟合前计时残差会有相同的频率偏差。因此可以利用脉冲星稳定的自转频率来驾驭原子钟频率,提高其准确性。

3.1.2 脉冲星时驾驭原子钟实验系统

脉冲星时与原子时联合守时工作的任务关键是要搭建起脉冲星时驾驭原子钟实验系统,目的是对驾驭理论算法和精度进行评估的验证,以保证脉冲星时应用前能够达到准确及稳定的预期。此实验的本质就是利用脉冲星时具备长期较高的频率稳定性和原子时具有短期很高的频率稳定度的特性,从而使脉冲星时驾驭原子钟实验系统输出兼具短稳和长稳的频率信号。

2018 年,欧洲脉冲星计时阵(EPTA)开展并建

立了“PulChron”脉冲星物理钟系统^[15]。此系统对 18 颗毫秒脉冲星进行精确的计时观测,并通过 GNSS(Global Navigation Satellite System)共视比对链路将脉冲星计时观测平台的参考钟和所需驾驭的原子钟建立关联进行驾驭实验,从而验证脉冲星时驾驭原子钟的可行性。该系统通过高精度测量脉冲星到达时间,建立并维持一个稳定的脉冲星时(PT),并与本地原子时(如 UTC(OP))进行持续比对。通过监测 PT 与原子时之间的钟差变化,该系统能够检测出原子时标的长期频率漂移,并生成校准信号来“驾驭”原子钟的输出频率,从而抑制其长期漂移。PulChron 项目验证了将脉冲星时作为“天然频率标准”用于实际守时系统的可行性,为未来建设不依赖于国际时间比对、兼具高短期和长期稳定性的自主时间系统提供了重要的工程实践和技术路径。

中国科学院国家授时中心于 2020 年开始搭建脉冲星时驾驭原子钟实验系统,至今已建成两套,分别为洛南站本地的脉冲星驾驭实验系统和西安临潼区国家授时中心本部远程脉冲星驾驭实验系统,两套驾驭系统的毫秒脉冲星计时数据均来源于洛南 40 m 射电望远镜脉冲星计时观测系统。

其中脉冲星计时观测系统和本地脉冲星驾驭实验系统的实物图展示于图 7,本地驾驭系统通过本地网络直连,每天定时自动处理毫秒脉冲星计时数据,根据设定的驾驭频次和天数,运用不同的计算算法获得驾驭量,输出至相位微跃计从而实现原子钟的频率驾驭。远程脉冲星驾驭实验系统的实物图展示于图 8,相对于本地脉冲星驾驭实验系统,远程驾驭实验系统利用 GNSS 共视比对链路,将脉冲星计时观测的铯钟与需要驾驭的原子钟进行关联,从而实现远程驾驭。



图 7 洛南 40 m 射电望远镜机房的脉冲星计时观测系统和脉冲星驾驭实验系统



图 8 临潼本部远程脉冲星驾驭实验系统

中国科学院国家授时中心未来计划搭建多套脉冲星时驾驭实验系统,用于对脉冲星时和原子时联合守时工作进行验证支撑,其中包括使用多颗不同的毫秒脉冲星和综合脉冲星时进行原子钟驾驭,使用不同驾驭策略和驾驭算法提升原子钟驾驭后的稳定性等。

3.2 利用脉冲星空间自主守时

星载原子钟是导航卫星最重要的载荷之一,其性能指标直接影响航天器的导航、定位及授时精度,目前,为提供高精度的时间服务,卫星上搭载的原子钟需要地面测控系统的频繁干预,该方法不仅增加了地面控制系统的工作负担,同时存在信号传输精度受传输距离影响而降低的问题。基于毫秒脉冲星构建的脉冲星时具有长期稳定性高、不受人造干扰、安全可靠等特点。在深空将脉冲星时用于校准星载原子钟的频率,可以减少航天器对地面控制系统的依赖,提高本地时间的准确性与自主可控性。

对于既有射电辐射又有 X 射线辐射的毫秒脉冲星,其是建立脉冲星空间自主守时系统的重要候选源,脉冲星守时的关键在于如何利用脉冲星辐射的周期性信号,实现原子钟钟差的准确估计。脉冲星自转高度稳定且寿命长,可视为一种天然频率源,可持续为空间及地面用户提供时间服务。联合脉冲星在射电和 X 射线波段的计时资料,获得脉冲星计时模型参数信息可精确预报脉冲到达时间,在空间建立脉冲星时。将脉冲星时与原子时直接比对,可定期监测星载原子钟的频率变化,提高深空

时间基准的长期自主保持能力。脉冲星空间守时系统中的地面服务系统生成脉冲星计时模型参数初始值,用于 X 射线脉冲星计时分析与计时模型参数更新。脉冲星时驾驭系统实时监测星载原子钟运行,长期校准星载原子钟的频率。原子钟频率驾驭的目标是提升信号经频率驾驭后的准确度,同时相位没有过大的波动。

X 射线脉冲星光子达到时间转换如图 9 所示^[44],在各种时延效应的影响下,航天器测量的脉冲到达时间通过时延模型转换获得脉冲到达 SSB 的时间 t_{SSB} ,即

$$t_{\text{SSB}} = t_{\text{obs}} + \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_{\text{SC}}}{c} \quad (5)$$

式(5)中, t_{obs} 为脉冲到达时间, $\mathbf{n}$ 为脉冲星的方向矢量, $\mathbf{r}_{\text{SC}}$ 为航天器在太阳系质心参考系中的位置矢量, c 为光速。

星载原子钟存在钟差时,钟面时间可以表示为

$$t_{\text{clk}} = t_{\text{obs}} - \delta t \quad (6)$$

式(6)中, t_{clk} 为星载钟没有钟差时的读数, δt 为星载钟的钟差。将脉冲星光子信号转换至太阳系质心,获得计时残差为

$$\Delta t = t_{\text{SSB}} - t_b \quad (7)$$

式(7)中, t_b 为脉冲星信号到达 SSB 的真实时间。若光子信号转换模型准确且脉冲星计时模型参数、航天器的位置等信息精确已知,则计时残差可近似为星载原子钟的钟差信号,即 $\Delta t \approx \delta t$,因此,脉冲星信号的实际到达时间与计时模型预报时间的差值可以得到星载原子钟钟差修正的观测信息。

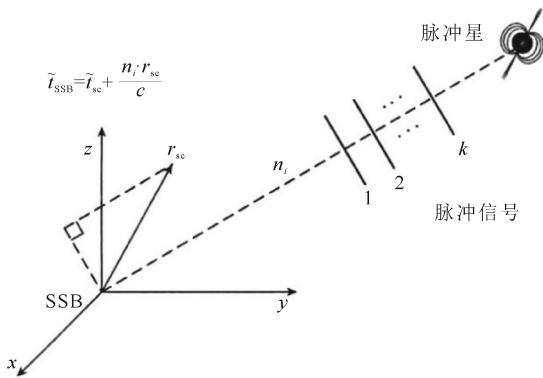
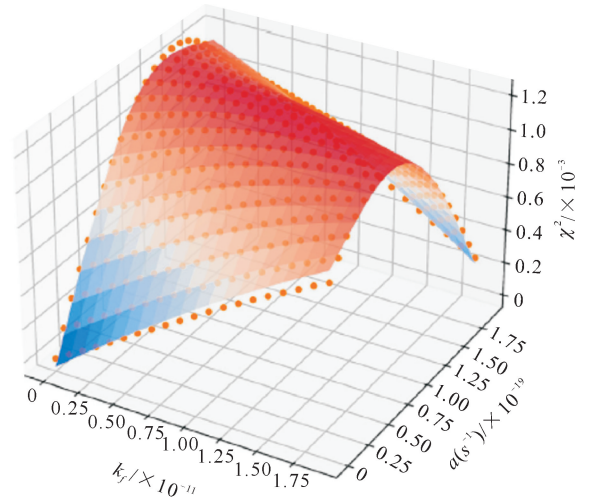


图 9 X 射线脉冲星时间转换模型原理图

(摘自郑伟等^[44], 2015 年)

中国科学院国家授时中心童明雷研究团队近两年来深入开展了基于 X 射线脉冲星的空间守时工作。韩孟纳、童明雷等^[45]通过仿真星载原子钟存

在频率偏差时的观测光子数据研究了参考钟的频率偏差对 TOA 的影响,结果表明钟的频率偏差会使积分脉冲轮廓与标准脉冲轮廓间的相位偏差随时间演化。王浙宇、童明雷等人^[46]提出 SFP (significance fall of pulse-profile) 方法,研究基于低轨 X 射线脉冲星探测器的氢钟自主校准方法,并将该方法与 SEP (significance enhancement of pulse-profile)、计时残差拟和方法进行比较,基于脉冲轮廓显著性的 SFP 方法可以在更短的时间内校准原子钟获得更高的准确度。基于 SFP 方法的星载原子钟频率偏差与频率漂移搜寻结果展示在图 10 中。



注: χ^2 为卡方值

图 10 基于 SFP 方法的星载原子钟频率偏差 k_f 与频率漂移 a 搜寻(王浙宇等^[46], 2025 年)

脉冲星时可以作为监测星载原子钟频率准确度的独立时间尺度,是开展深空星载原子钟频率驾驭的重要途径。在利用脉冲星时驾驭星载原子钟频率时,一方面需要根据原子钟上一驾驭周期的频率及其变化预报当前周期的频率偏差值,并将频率补偿量输入至频率调整设备,减小原子钟的频偏。另一方面,为使原子钟信号相对于标准时间信号的相位偏差在一定时间减小到零,需要在频率调整设备中输入额外的频率补偿量。经脉冲星时驾驭后的原子钟信号准确度将提高,空间时间基准的可靠性与自主可控性将得到有效维持。

4 脉冲星导航

脉冲星时间和脉冲星导航是脉冲星计时的两个不同方面的应用,但二者关系十分密切。一般情况下深空导航中要把航天器位置和系统时间偏差同时解算,但如果航天器时间系统保持良好,则有

助于提高位置的测量精度和解算效率。因此,建立高精度脉冲星时离不开 X 射线探测器位置的确定。

脉冲星导航主要应用于深空,可对深空探测提供重要的技术支撑。深空探测,即对地球引力场之外的太阳系进行的探测,近年来已成为一个重要议题。X 射线脉冲星导航技术是一种新型航天器自主导航技术,其导航精度在太阳系内不受深空探测器位置的影响,并且不依赖地面测控系统,在深空探测的巡航段、接近段和环绕段等多个飞行阶段均可使用,是兼具实时性和适用性的高精度自主导航技术。

20 世纪 80 年代人们又提出了 X 射线脉冲星导航的概念,2003 年,Sheikh^[47] 广泛调研了前人提出的 X 射线导航技术,建立了基于 X 射线脉冲星的导航数据库和 X 射线脉冲星自主导航守时的数学模型,通过仿真试验初步论证了基于 X 射线脉冲星的航天器自主导航的可行性。2011 年,美国启动了空间站 X 射线计时与导航技术试验(the station explorer for X-ray timing and navigation technology, SEXTANT)项目^[48]。SEXTANT 利用中子星内部组成探测器 NICER 首次展示基于 X 射线脉冲星的实时星载导航 XNAV 技术。通过观测 PSR J0218-4232、PSR J0030-0451、PSR B1821-24 和 PSR J0437-4715 共 4 颗导航脉冲星,SEXTANT 在国际上首次实现了脉冲星导航的飞行试验,取得了优于 10 km 的导航精度^[49]。我国的 X 射线脉冲星导航研究起步较晚。2019 年,黄良伟等^[50] 利用 85 天 XPNV-1 观测 Crab 脉冲星的数据,开展了脉冲星导航的地面试验。同年,郑世界等^[51] 利用 Insight-HXMT 的 Crab 脉冲星观测数据,获得了导航精度优于 10 km 的地面解算结果。

脉冲星导航原理如图 11 所示^[52]。脉冲到达时间是脉冲星导航的基本测量量。如果航天器在脉冲星参考架内静止或匀速径向运动时,可以直接通过历元折叠和极大似然估计的方法求解 TOA。然而,由于在轨航天器的运动导致视向方向和径向速度在观测时段内会发生明显变化,引起的多普勒效应导致观测到的脉冲星信号出现畸变。

X 射线脉冲星导航技术已逐渐步入工程应用阶段,脉冲星深空导航将是理想的应用场景。为了满足实际应用的需求,导航算法需要适应不同深空环境并保持稳定可靠,脉冲星数据处理需要更加高效以保证导航的实时性,同时减轻星载计算的压力。

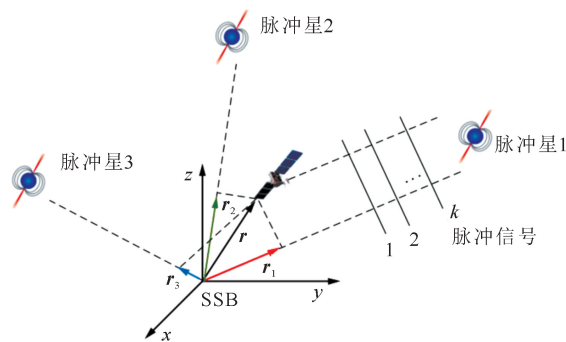


图 11 脉冲星导航原理示意图^[52]

5 结语

脉冲星计时研究已历经几十年的发展,观测设备测量精度日益提高,脉冲星计时观测数据也越积累越多。同时,脉冲星时间建立及应用的方法和算法的研究也呈现出多样化。这些都为脉冲星时参与到具体的守时工作中提供了重要的理论基础。在地面,基于射电观测建立的脉冲星时有望解决国家标准时间的自主性和安全性的问题,提高长期守时性能。在空间,有望构建基于脉冲星的、摆脱地面依赖的自主守时系统,实现深空自主守时,甚至将地面的标准时间通过脉冲星传递至深空。

尽管近年来脉冲星时的研究发展迅速,但目前脉冲星时应用尚处于理论研究和实验阶段,有很多关键技术还有待突破。对于地面射电观测,高精度脉冲星时建立需要遴选一批稳定的毫秒脉冲星进行长期有规律、高密度的计时观测,高密度观测是为了提高时间尺度的实时性,这与引力波探测不同。脉冲星计时探测引力波要求多颗空间分布广泛的毫秒脉冲星,每颗星每两周观测一次即可,而脉冲星时间建立对于脉冲星个数要求较低,可以只观测计时精度高、长期稳定性好的毫秒脉冲星,但观测频次要高,这样才能实时性地驾驭原子钟,满足多场景重大任务需求。相对于其他射电源,毫秒脉冲星的信号很弱,需大型射电望远镜观测才能获得足够的信噪比。而大型射电望远镜的科学目标通常很多,脉冲星时建立对计时观测计划又要求很高,难以专门针对脉冲星时间建立设定观测计划。因此,要建立高精度的脉冲星时需建设专门用于脉冲星时应用的大型射电望远镜。

对于空间 X 射线观测,毫秒脉冲星的 X 射线波段流量更低,能观测到的毫秒脉冲星数目也比射电波段少得多,这对高灵敏度的 X 射线探测器提出了

更高的要求。低信噪比促使每次观测持续时间较长,实时性较差,这对空间脉冲星自主守时和导航技术的发展提出了严峻的挑战。未来需进一步提高 X 射线探测器的灵敏度,减小 X 射线光子到达时间的测量误差。另一方面,在有限的脉冲星数目和低信噪比测量的情况下,如何设计更加有效、更加智能的算法实现脉冲星空间守时和深空自主导航技术是值得研究的重要方向。

中国科学院国家授时中心将针对具体的应用场景进一步研究和探索脉冲星时应用的方法和技术,深入挖掘脉冲星时的优势,为我国的标准时间的性能提升、空间时间基准维持、深空探测等领域提供重要的技术支撑。

参考文献:

- [1] GABRIELLA A, AKASH A, ALAM M A, et al. The NANOGrav 15 yr data set: evidence for a gravitational-wave background[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, 951(1): 8.
- [2] GUO Y J, CABALLERO R N, CHAMPION D J, et al. The effect of the solar system ephemeris on the search for the nano-Hz gravitational wave background[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 532(3): 2943-2954.
- [3] 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.
- [4] HOBBS G, GUO 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.
- [5] YANG T G, TONG M L, GAO Y P. Wiener filtration algorithm of an ensemble pulsar timescale based on a power-law model of pulsar power spectrum[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2022, 22(10): 105012.
- [6] ZHANG Z H, TONG M L, YANG T G. An improved Wiener filtration method for constructing the ensemble pulsar timescale[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, 962: 2.
- [7] 韩孟纳, 童明雷, 石永强, 等. 一种 X 射线脉冲星自转参数估计新方法[J]. *航空学报*, 2025, 46(3): 104-115.
- [8] 童明雷, 韩孟纳, 杨廷高, 等. 利用 Crab 脉冲星 X 射线观测校准星载原子钟频率[J]. *航空学报*, 2023, 44(3): 206-216.
- [9] 韩孟纳, 童明雷, 朱鸿旭, 等. X 射线脉冲星 TOA 数量对计时精度和导航的影响分析[J]. *时间频率学报*, 2021, 44(1): 66-76.
- [10] 仲崇霞, 杨廷高. 四种综合脉冲星时算法比较[J]. *天文学报*, 2009, 50(4): 425-437.
- [11] 仲崇霞. 综合脉冲星时算法及脉冲星时应用[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2007.
- [12] 杨廷高, 仲崇霞. 毫秒脉冲星计时观测进展[J]. *天文学进展*, 2005(1): 1-9.
- [13] 童明雷, 杨廷高, 赵成仕, 等. 脉冲星计时模型参数的测量精度分析与估计[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(9): 103-112.
- [14] EDWARDS R T, HOBBS G B, 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.
- [15] PÍRIZ R, GARBIN E, ROLDÁN P, et al. PulChron: A Pulsar Time Scale Demonstration for PNT systems [C]//*Proceedings of the 50th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Reston: IEEE*, 2019: 191-205.
- [16] DAVIS M M, TAYLOR J H, WEISBERG J M, et al. High-precision timing observations of the millisecond pulsar PSR1937 + 21 [J]. *Nature*, 1985, 315(6020): 547-550.
- [17] DENEVA J S, RAY P S, LOMMEN A, et al. Large high-precision X-Ray timing of three millisecond pulsars with NICER: stability estimates and comparison with radio [J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 874(2): 160-172.
- [18] TAYLOR J H. Pulsar timing and relativistic gravity [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1992, 341(1660): 117-134.
- [19] 胥恒, 李柯伽. 中国脉冲星计时阵[J]. *物理*, 2024, 53(8): 512-517.
- [20] 郑世界, 葛明玉, 韩大炜, 等. 基于天宫二号 POLAR 的脉冲星导航实验[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(9): 099505.
- [21] ZHANG X Y, SHUAI P, HUANG L W, et al. Mission overview and initial observation results of the X-ray pulsar navigation-I satellite[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 2017(1): 1-7.
- [22] ZHANG S, ZHANG S N, LU F J, et al. The Insight-HXMT mission and its recent progresses [C]//*SPIE Optical Engineering + Applications*, Bellingham: SPIE, 2017, 10699: 106991.
- [23] YUAN W, ZHANG C, CHEN Y, et al. The Einstein Probe Mission[M]. Singapore: Springer Nature, 2022: 1.
- [24] PAN L D. Possible application of millisecond pulsar to

- time metrology[J]. Publications of the Shaanxi Astronomy Observatory, 2001, 24(1): 1-8.
- [25] YANG T G, PAN L D, NI G R, et al. Research progress on metrological uses of high precision millisecond pulsar timing data[J]. Progress in Astronomy, 2002, 20(2): 167-174.
- [26] NI G R, KE X Z, YANG T G, et al. Viewpoints in China on millisecond pulsar timing[J]. Publications of the Yunnan Observatory, 2003(3): 47-55.
- [27] YANG T G. Characteristics of pulsar time scale and timing of multi-pulsar[J]. Journal of Time and Frequency, 2003, 26(1): 25-30.
- [28] RODIN A E. Algorithm of ensemble pulsar time[J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2006, 6(S2): 157-161.
- [29] RODIN A E. Optimal filters for the construction of the ensemble pulsar time[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, 387(4): 1583-1588.
- [30] RODIN A E, CHEN D. Optimal filtration and a pulsar time scale[J]. Astronomy Reports, 2011, 55(7): 622-628.
- [31] RODIN A E, FEDOROVA V A. A pulsar time scale based on parkes observations in 1995—2010[J]. Astronomy Reports, 2018, 62(6): 378-382.
- [32] 仲崇霞, 杨廷高. 综合脉冲星时的小波分析算法[J]. 天文学报, 2007, 48(2): 228-238.
- [33] 仲崇霞, 杨廷高. 小波域中的维纳滤波在综合脉冲星时算法中的应用[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 6157-6163.
- [34] 韩孟纳, 童明雷. 基于脉冲星观测的原子时波动检测研究[J]. 物理学报, 2023, 72(7): 079701.
- [35] YANG T G, TONG M L, GAO Y P. Wiener filtration algorithm of an ensemble pulsar timescale based on a power-law model of pulsar power spectrum[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22(10): 105012.
- [36] ZHANG Z H, TONG M L, YANG T G. An improved Wiener filtration method for constructing the ensemble pulsar timescale[J]. The Astrophysical Journal, 2024, 962: 2.
- [37] HOBBS G, COLES W, MANCHESTER R N, et al. Developing a pulsar-based timescale [C]//Journées Systemes De réfÉrence Spatio-temporels, Paris: Observatoire de Paris, 2010, 2011: 237-242.
- [38] GAO F, TONG M L, GAO Y P, et al. The application of cointegration theory in ensemble pulsar timescale algorithm[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(7): 100.
- [39] YANG T G, TONG M L, LI B, et al. A combined smoothing method of ensemble pulsar timescale and application for pulsar atomic clock combined timescale [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2025, 25(2): 025009.
- [40] 任红飞, 姬剑锋, 刘思伟, 等. 基于 FAST 射电观测建立综合脉冲星时的性能分析[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集, 成都: 中国卫星导航年会组委会, 2020: 120-125.
- [41] PETIT G, TAVELLA P, THOMAS C. How can millisecond pulsars improve the long term stability of atomic time scales[R]. ESA: Frequency and Time Forum, 1992, 340: 57-60.
- [42] 李孝辉, 柯熙政, 焦李成, 等. 用小波分解算法计算脉冲星时间尺度[J]. 信号处理, 2002(1): 72-74.
- [43] ZHU X Z, ZHANG Z H, ZHAO C S, et al. Research on establishing a joint time-scale of pulsar time and atomic time based on a wavelet analysis method[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2024, 529(2): 1082-1090.
- [44] 郑伟, 王奕迪, 汤国建, 等. X 射线脉冲星导航理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 83-85.
- [45] HAN M N, TONG M L, LI L S, et al. Frequency steering of spaceborne clocks based on XPNV-1 observations[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(6): 266-278.
- [46] WANG Z Y, TONG M L, LI L S, et al. Autonomous correction of hydrogen maser clocks with a small X-ray pulsar detector in low earth orbit[J]. Advances in Space Research, 2025, 76(11): 1593-1610.
- [47] SHEIKH S I. The use of variable celestial X-ray sources for spacecraft navigation[D]. City of College Park: University of Maryland, 2005.
- [48] WINTERNITZ L M B, HASSOUNEH M A, MITCHELL J W, et al. X-ray pulsar navigation algorithms and testbed for Sextant[C]//IEEE Aerospace Conference, Big Sky: IEEE, 2015: 1-14.
- [49] MITCHELL J W, WINTERNITZ L B, HASSOUNEH M A, et al. Sextant X-ray pulsar navigation demonstration: Initial on-orbit results [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Kissimmee: AIAA, 2018: 1229-1240.
- [50] HUANG L W, SHUAI P, ZHANG X Y, et al. Pulsar based navigation results: Data processing of the X-ray pulsar navigation-I telescope[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2019, 5(1): 18-20.
- [51] ZHENG S, ZHANG S, LU F, et al. In-orbit demonstration of X-ray pulsar navigation with the insight-HXMT satellite[J]. Astrophysical Journal Supplement Series, 2019, 244(1): 1-18.
- [52] 郑伟, 王禹淞, 姜坤, 等. X 射线脉冲星导航方法研究综述[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 527451.