

引用格式: 赵成仕, 朱幸芝, 周祖荣. 基于实测数据的脉冲星时自主保持精度分析[J]. 时间频率学报, 2023, 46(3): 188-197.

基于实测数据的脉冲星时自主保持精度分析

赵成仕, 朱幸芝, 周祖荣

(中国科学院 国家授时中心, 西安 710600)

摘要: 脉冲星钟模型保持方法和脉冲星时自主保持精度是决定脉冲星时应用精度的关键。根据地球时 TT 发布的特点以及脉冲星自转稳定特点, 提出基于滑动累积窗口的脉冲星钟模型保持方法。首先利用 IPTA 第 2 批发布的 2 颗脉冲星观测数据开展钟模型保持精度分析, 在 13 年以上的窗口内 2 颗源的自转频率测量值相对于平均值波动幅度在 10^{-13} Hz 之内, 且随着时间窗口累积增加钟参数测量精度单调提高; 其次, 利用观测数据分析钟模型在滑动预报下的脉冲星时自主保持精度和稳定度, J0437-4715 在 13.58 年内自主保持的脉冲星时与 TT (BIPM15) 偏差的 RMS (root mean square) 为 $0.454 \mu\text{s}$, 长期 (13.58 年) 稳定度为 1.77×10^{-15} , J1713+0747 在 17.46 年内保持的脉冲星时与 TT (BIPM15) 偏差为 $2.471 \mu\text{s}$, 长期 (17.46 年) 稳定度为 6.62×10^{-17} , 相对于最佳保持脉冲星时的精度分别降低 24%和 0.16%, 但提升了短期 (<1 年) 稳定度, 长期稳定度略有恶化。

关键词: 脉冲星计时; 残差; 钟模型; 稳定度

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-03-0188-10

Analysis of pulsar time keeping accuracy using observation data

ZHAO Cheng-shi, ZHU Xing-zhi, ZHOU Zu-rong

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

Abstract: The maintenance method of pulsar clock model and the precision of pulsar time keeping are the key to the precision of pulsar timing application. According to the characteristics of the release of time reference TT and the characteristics of pulsar rotation stability, a pulsar clock model measurement based on sliding cumulative observation data span window is proposed. Firstly, the pulsar clock model maintenance accuracy analysis is carried out using the observation data of two pulsars from the 2nd data release of IPTA. The measured values of the rotation frequency of two pulsars fluctuate less than 10^{-13} Hz relative to the average value within the data span window more than 13 years, and the clock parameter measurement accuracy increases monotonously with the increase of the data span window; Secondly, the observation data are used to analyze the accuracy of pulsar time keeping under the sliding window prediction of the clock model, the deviation (RMS) of time keeping of pulsar J0437-4715 relative to TT (BIPM15) is $0.454 \mu\text{s}$ in 13.58 year, long-term (13.58 year) stability

收稿日期: 2023-03-25; 接受日期: 2023-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11973046); 科技部 SKA 专项资助项目 (2020SKA01200103); 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”资助项目 (XAB2021YN27)

is 1.77×10^{-15} , and the deviation of time keeping of pulsar J1713+0747 relative to TT (BIPM15) is $2.471 \mu\text{s}$ in 17.46 year, long-term (17.46 year) stability is 6.62×10^{-17} , accuracy decreases by 24% and 0.16% respectively when compared with the best maintained pulsar time, but the short-term (<1 year) stability was improved, and the long-term stability was slightly deteriorated.

Key words: pulsar timing; residual; clock model; stability

0 引言

脉冲星具有体积小、密度大、磁场强等特点，辐射周期性脉冲信号^[1]。1982年 D. C. Backer 等人^[2]发现了第1颗毫秒脉冲星 PSR B1937+21，观测表明毫秒脉冲星的自转非常稳定，周期变化率为 $10^{-18} \sim 10^{-20} \text{ s/s}$ 。1991年 J. H. Taylor^[3]提出毫秒脉冲星是自然界最稳定的“天然时钟”，并认为毫秒脉冲星的长期稳定性可以与原子钟相媲美。随着更多毫秒脉冲星的发现，以及射电望远镜观测能力不断提升，毫秒脉冲星计时观测精度得到迅速发展，有力推动了脉冲星在时频领域的应用，如：脉冲星时间标准建立^[4]、脉冲星导航应用等^[5]。脉冲星时应用是基于脉冲星自转频率的稳定性，脉冲星自转参数可以利用计时观测技术被精确测定^[6-7]。脉冲星自转参数、天体测量参数、双星轨道参数以及参数测量的相关参考等组成脉冲星星历表。其中，脉冲星时自转参数又被称为脉冲星钟模型参数。基于精确测定的钟模型参数，可以精准预报任意时刻脉冲到达太阳系质心 (Solar System Barycenter, SSB) 处的相位。随着计时观测数据的积累，脉冲星钟模型参数测量精度不断提高^[8]。

脉冲星自转参数的精确测量是脉冲星时应用的先决条件，但不等同于脉冲星计时观测结果就直接可应用于时间保持中。传统计时观测是以地球上最精准的时间基准地球时 TT，通常以 BIPM 实现的地球时 TT (BIPM) 为参考测量脉冲星钟参数，其过程相当于以 TT (BIPM) 为参考建立脉冲星时的过程。传统计时观测结果可用于评估该脉冲星作为时钟的品质 (精度、稳定度等指标)，为筛选基于脉冲星守时、导航等应用的优质脉冲星候选体提供依据，并为脉冲星时应用提供精准的星历表参数，其直接决定脉冲星应用的精度。脉冲星时的应用是基于脉冲星钟模型预报脉冲到达时间 (time of arrival, TOA) 与探测器测量 TOA 相比较开展研究的。高精度脉冲星钟模型的测量依赖地面射电望远镜长期计时观测资料，国际上已建立多个脉冲星计时观测阵，所谓脉冲星计时阵是指选择一组自转稳定度高的毫秒脉冲星利用1台或多台射电望远镜按照制定计划进行长期的常规化观测。目前全世界已有脉冲星计时阵包括：澳大利亚 Parkes 脉冲星计时阵 (Parkes Pulsar Timing Array, PPTA)^[9]，北美脉冲星计时阵 (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves, NANOGrav)^[10]，欧洲脉冲星计时阵 (European Pulsar Timing Array, EPTA)^[11]，印度脉冲星计时阵 (Indian Pulsar Timing Array, InPTA)^[12]，该四个计时阵通过国际合作组成国际脉冲星计时阵 (International Pulsar Timing Array, IPTA)^[13]。InPTA 于 2022 年加入 IPTA 组织，目前 IPTA 发布的两批数据中都不包括 InPTA 数据。另外，还有南非脉冲星计时阵 (MeerKAT Pulsar Timing Array, MPTA)^[14]，MPTA 已于 2022 年底发布了第1版计时阵数据，包括 88 颗毫秒脉冲星观测数据。中国正在以 FAST 射电望远镜为主对 60 多颗毫秒脉冲星开展长期计时观测，建立中国脉冲星计时阵 (Chinese Pulsar Timing Array, CPTA)，未来将加入 IPTA 组织中，将为 IPTA 提供高精度的脉冲星观测数据。

目前脉冲星钟模型的建立与更新是服务于脉冲星基础科学研究，数据处理滞后，导致钟模型发布滞后，影响脉冲星时在时频领域应用。如 IPTA 于 2019 年发布第2版脉冲星计时阵数据 DR2^[15]，观测数据截止日期为 2015 年底，发布时已滞后 4 年。DR2 发布时间与第1版数据 DR1 发布时间相差 3 年^[16]，观测数据至今已 8 年未更新，若基于 IPTA 发布星历表开展脉冲星时应用，至少需要利用钟模型预报 8 年

时长的 TOA。钟模型更新不及时,导致钟模型预报时间长,影响脉冲星时应用精度。需要开展脉冲星钟保持方法研究,以及分析基于该保持方法下的脉冲星时自主保持精度和稳定度,本文将利用 IPTA 发布的 DR2 计时观测数据开展相关研究。

1 脉冲星时保持方法

脉冲星时建立与维持是利用脉冲星守时的基础,利用单颗脉冲星计时观测可建立脉冲星时,获得脉冲星时 (Pulsar Time, PT) 与地球时 TT 之差,即钟差 PT-TT,它是评估脉冲星时精度、稳定度以及建立综合脉冲星时等的基础资料,其中,本文中脉冲星时的精度表示脉冲星时相对于地球时的标准偏差。脉冲星辐射的脉冲信号到达 SSB 处的相位可被精确预报,根据脉冲星钟模型参数值,可预报任意时刻脉冲到达 SSB 处的相位,公式如下:

$$\phi_{\text{预报}} = \phi_0 + (t - t_0) \cdot \nu + \frac{1}{2} \cdot (t - t_0) \cdot \dot{\nu} + \frac{1}{6} \cdot (t - t_0)^2 \cdot \ddot{\nu} + \dots \quad (1)$$

式(1)中, $\phi_{\text{预报}}$ 为 t 时刻预报的脉冲到达 SSB 处相位, ϕ_0 是钟模型参考时间 t_0 时刻脉冲相位,称为初始相位, ν 、 $\dot{\nu}$ 、 $\ddot{\nu}$ 是 t_0 时刻测量的脉冲星自转频率、自转频率一阶导数、自转频率二阶导数,如果脉冲星处于双星系统中,还应包含双星系统时延对脉冲信号相位的影响。基础天文计时研究只关注脉冲相位的相对稳定性,对计时残差 PT-TT 数据处理时直接扣除平均值,不拟合获得初始相位值 ϕ_0 。但脉冲星时应用时需要预报绝对相位值,即钟模型参数值应包括 ϕ_0 值。

脉冲星计时是以本地参考原子钟记录脉冲峰值到达天线时间 t_{obs} ,需要通过 TOA 转换模型将观测记录 t_{obs} 转换为同一脉冲峰值到达 SSB 处时间 t_{SSB} ,目前 TOA 理论转换模型精度已优于 $1 \text{ ns}^{[17-18]}$,可满足时频应用需求。若将脉冲峰值点标记为脉冲相位零点,即 t_{SSB} 时刻测量的脉冲相位值为 0,根据钟模型理论上可预报 t_{SSB} 时刻脉冲到达 SSB 处相位,从而获得测量相位与理论预报相位之差 $\Delta\phi(t_{\text{SSB}})$,根据脉冲相位和自转周期 P 可获得时间差,公式如下:

$$\text{PT} - \text{TT} = (\phi(t_{\text{SSB}})_{\text{预报}} - \phi(t_{\text{SSB}})_{\text{测量}}) \times P = \phi(t_{\text{SSB}})_{\text{预报}} \times P \quad (2)$$

式(2)中, P 为 t_0 时刻的脉冲星自转周期,脉冲星计时数据处理是基于 PT-TT 钟差数据,拟合脉冲星星历表,实现钟模型参数更新。高精度脉冲星钟模型测量需要参考地球上最精准的地球时 TT, TT (TAI) 是地球时的一种实现,它与 TAI 相差 32.184 s ,即 $\text{TT (TAI)} = \text{TAI} + 32.184 \text{ s}$ 。国际权度局 (BIPM) 每年年初在 TAI 基础上,利用所有可用的基准频标数据资料,采用事后处理方式获得另一种地球时的实现 TT (BIPM),进一步消除国际原子时系统的误差并改进了频率准确度,它比 TT (TAI) 更适合于作为参考时间测量脉冲星钟参数。TT (BIPM) 每年发布一次,因此脉冲星钟模型最佳更新频率为 1 次/年,则基于钟模型预报的脉冲星时至少需要自主保持 1 年。多长时间跨度数据测量保持的脉冲星钟模型,最适合于脉冲星时自主保持,需要开展相关研究分析。

脉冲星特点自转长期稳定,观测数据跨度长有助于精确测量钟模型参数。为有效利用脉冲星计时观测数据,以及根据 TT (BIPM) 发布特点,本文提出基于数据时间窗口累积增加实现脉冲星钟模型的更新维持,方案如图 1 所示。钟模型保持、脉冲星时自主保持方法具体流程如下:

① 时间窗口内最佳钟模型拟合

根据脉冲星数据采样率、TOA 观测精度等确定数据时间窗口累积策略,主要包括:初始时间窗口大小,窗口累积步长。利用初始时间窗口内(如 5 年)的脉冲星计时观测数据,以最新 TT (BIPM) 为参考时间,利用脉冲星计时数据处理技术,获得时间窗口内的最佳脉冲星钟模型。

② 脉冲星时预报保持

基于时间窗口内的最佳脉冲星钟模型，利用相位预报模型（公式 1），预报获得时间窗口之后 1 年内任意时刻脉冲相位，实现脉冲星时在 1 年内的自主保持。

③ 更新脉冲星钟模型、实现脉冲星时滑动自主保持

下一年度 TT (BIPM) 更新后，时间窗口累积增加 1 年，更新时间窗口内计时观测数据，以新发布 TT (BIPM) 为时间参考计时拟合更新钟模型。重复步骤②实现脉冲星时以 1 年步长的滑动自主保持。

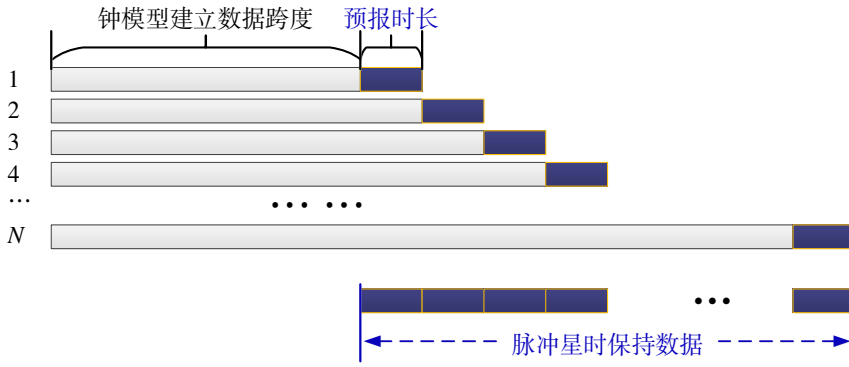


图 1 基于累积窗口的脉冲星时滑动自主保持方法示意图

2 利用实测数据分析脉冲星时保持精度

本节将利用 IPTA 数据在时间窗口累积增加下研究脉冲星钟模型保持精度，以及分析基于钟模型预报的脉冲星时自主保持精度和稳定度。IPTA 目标是利用全球大型射电望远镜对 100 多颗脉冲星的计时观测数据来探测低频引力波、检测太阳系行星历表误差、建立脉冲星时间尺度。2019 年公布第 2 批数据 DR2 中包括 TCB 和 TDB 两种坐标时参考下的星历表文件。DR2 中多颗脉冲星数据的 TOA 时间跨度大于 15 年，且 TOA 测量精度高，非常适合用于开展脉冲星时保持方法相关研究。本文从 DR2 数据中筛选了计时精度高、数据时间跨度长的 2 颗源数据开展相关研究，2 颗源的计时相关信息见表 1，主要包括：源名、自转频率、自转频率一阶导数、参数值参考历元、数据时间跨度、计时残差。其中，J0437-4715 计时残差中存在明显红噪声，J1713+0747 表现为白噪声，这有利于研究不同计时噪声特性对脉冲星钟模型及脉冲星时自主保持精度的影响。

表 1 2 颗脉冲星计时相关参数信息

源名	自转频率/Hz	自转频率一阶导数/s ⁻²	参考历元 MJD/日	数据跨度 /a	残差 RMS /μs
J0437-4715	173.687 945 737 518 390(12)	-1.728 373 87(9) × 10 ⁻¹⁵	55 000	18.58	0.431
J1713+0747	218.811 840 417 157 981(5)	-4.083 864 3(6) × 10 ⁻¹⁶	55 000	22.46	2.460

利用 DR2 发布的 2 颗脉冲星数据中 TOA 文件和星历表 par 文件，采用脉冲星计时数据处理软件 TEMPO2 对 2 颗源进行计时分析，因发布 par 文件已是最佳星历表，数据处理时不做任何星历表参数值拟合，其中，星历表参考时间采用 TT (BIPM15)、坐标时采用 TCB、太阳系行星历表采用 DE436。图 2 给出 2 颗脉冲星的计时残差，即 PT-TT (BIPM15)，TT (BIPM15) 是 2016 年 1 月公布的，数据截止到 2015 年年底，本文后续计时数据处理参考时间均采用 TT (BIPM15)。图 2 给出 J0437-4715 构建脉冲星时在 18.58 年内相对于 TT 偏差的 RMS (root mean square) 为 0.431 μs，且存在明显低频红噪声，J1713+0747 构建脉冲星时在 22.46 年内相对于 TT 偏差的 RMS 为 2.460 μs，计时残差表现为白噪声。图 2 显示 PT-TT (BIPM) 钟差也是观测数据跨度内最佳钟模型预报的 PT-TT (BIPM) 之差，该钟差将作

为后文中脉冲星时自主保持精度评估的参考。

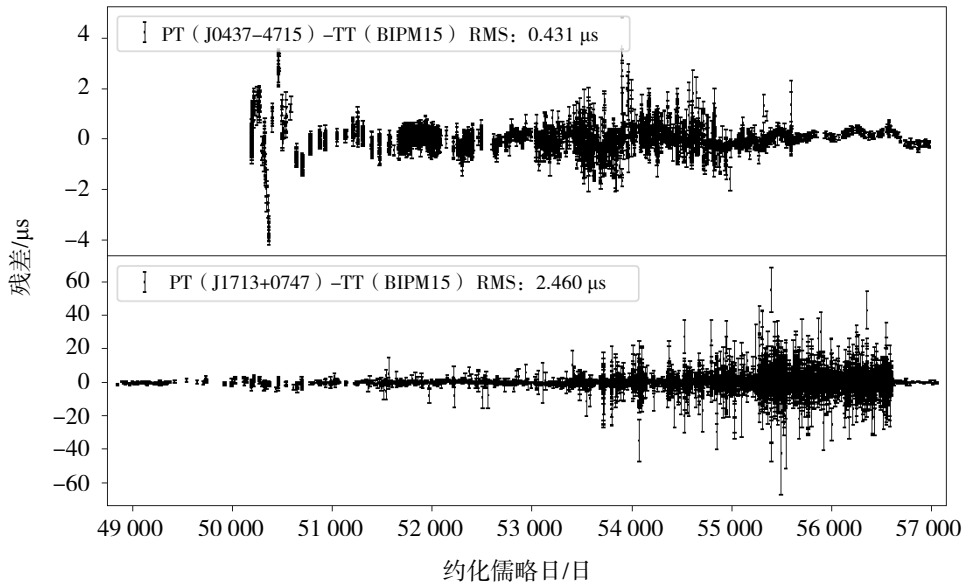


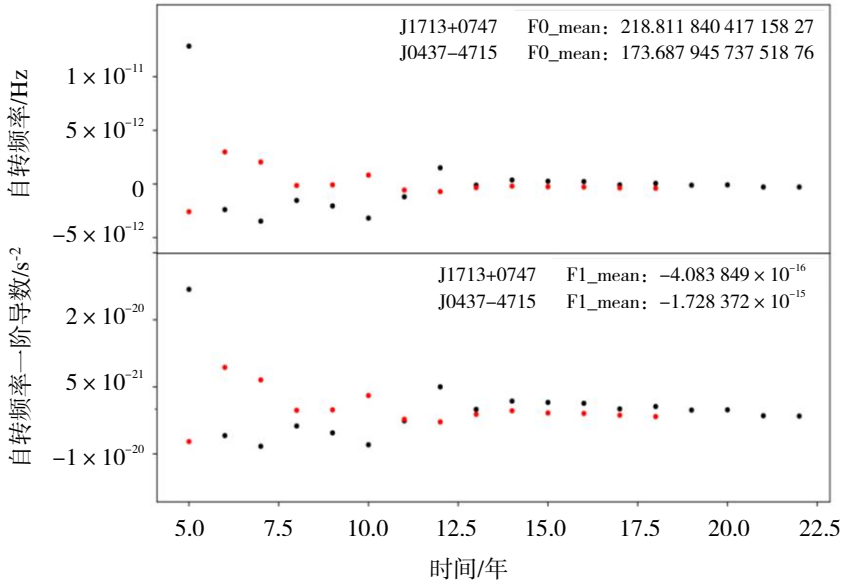
图2 脉冲星时与地球时 TT (BIMP15) 的偏差

2.1 脉冲星钟模型保持精度分析

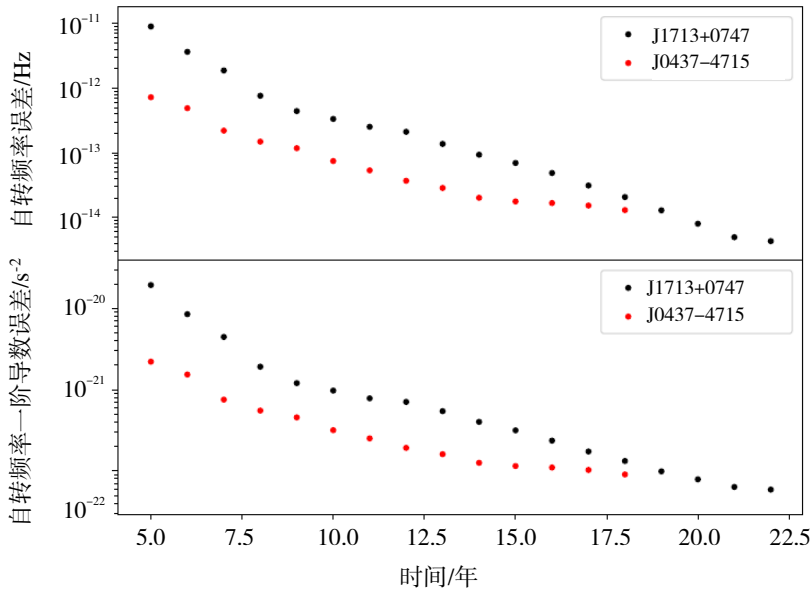
利用 DR2 数据中 J0437-4715 和 J1713+0747 开展时间窗口累积滑动下脉冲星钟模型保持方法, 根据前面给出的脉冲星钟模型保持方案, 窗口起始点为每颗星 TOA 数据起始时刻, 初始时间窗口设置为 5 年, 时间窗口累积滑动步长为 1 年。利用 TEMPO2 软件对每次更新时间窗口内的 TOA 数据进行计时拟合, 更新脉冲星历表参数值, 其中, 初始星历表采用 IPTA 第 2 批发布的 TCB 参考下星历表参数值, 本文主要为了研究脉冲星钟模型精度, 计时处理时只拟合自转参数 (自转频率、自转频率一阶导数、参考历元初始相位) 和位置参数 (赤经、赤纬、视差), 拟合参数参考历元统一采用约化儒略日 (MJD) 55 000, 便于比较不同时间窗口下钟模型精度。

图 3 给出 J0437-4715 (红色) 和 J1713+0747 (黑色) 在不同时间窗口下保持的脉冲星钟参数值及误差, 横坐标为时间窗口大小, 图 3 (a) 为拟合钟模型参数值减去参数值平均值随窗口的变化, 其中上图为脉冲星自转频率值, 下图为自转频率一阶导数值, 图 3 (b) 上图为对应钟模型参数值的拟合误差随时间窗口的变化。DR2 发布的 J0437-4715 和 J1713+0757 数据时间跨度分别为 18.58 年和 22.46 年, 根据时间窗口累积设置规则及数据跨度, 获得的时间窗口个数分别为 14 和 18, 即图中对应的数据点数。从图 3 (a) 得知, 两颗脉冲星的自转频率值的变化幅度维持在 10^{-11} Hz 之内, 自转频率一阶导数值的变化幅度维持在 10^{-20} s $^{-2}$ 之内, 每颗源的钟模型参数值的变化趋势一致。且随着时间窗口增大钟模型参数值不断收敛, 时间窗口累积到 13 年以上自转参数测量值很稳定, 自转频率变化幅度维持在 10^{-13} Hz 之内, 说明 13 年跨度计时数据构建的钟模型参数值已足够精确。J0437-4715 计时精度虽然很高, 但时间窗口小于 10 年以下保持的钟模型参数值波动较大, 这与 J0437-4715 早期计时数据存在明显红噪声 (图 2 得知), 以及时间窗口较小时参数值拟合误差大有关。J1713+0747 钟模型参数值随时间窗口增加快速收敛, 窗口累积增加第 1 年, 钟模型测量值的稳定性就有明显提升, 这与其计时噪声为白噪声, 以及前 5 年数据采样点稀疏有关。图 3 (b) 为钟模型参数值测量误差, 从图中得知目前这两颗源钟模型参数值测量精度随时间窗口增加单调提高, 还未趋于平缓, 说明未来随着观测数据积累, 钟模型测量精度将进一步提升。从图 3 得知在 15 年时间窗口以下, J0437-4715 钟模型测量误差明显小于 J1713+0747, 这主要与 2 颗源的 TOA 测量精度有关。但是随着时间窗口不断增加, 钟模型测量精度趋

于接近，与 J0473-5715 计时残差存在红噪声，而 J1713+0747 主要为白噪声有关。J0437-4715 钟模型测量精度随时间窗口增加已趋于平缓，未来需要依靠提高 TOA 观测精度以及优化数据处理技术，提升该源钟模型测量精度。



(a) 拟合钟模型参数值减去参数值平均值随时间窗口的变化



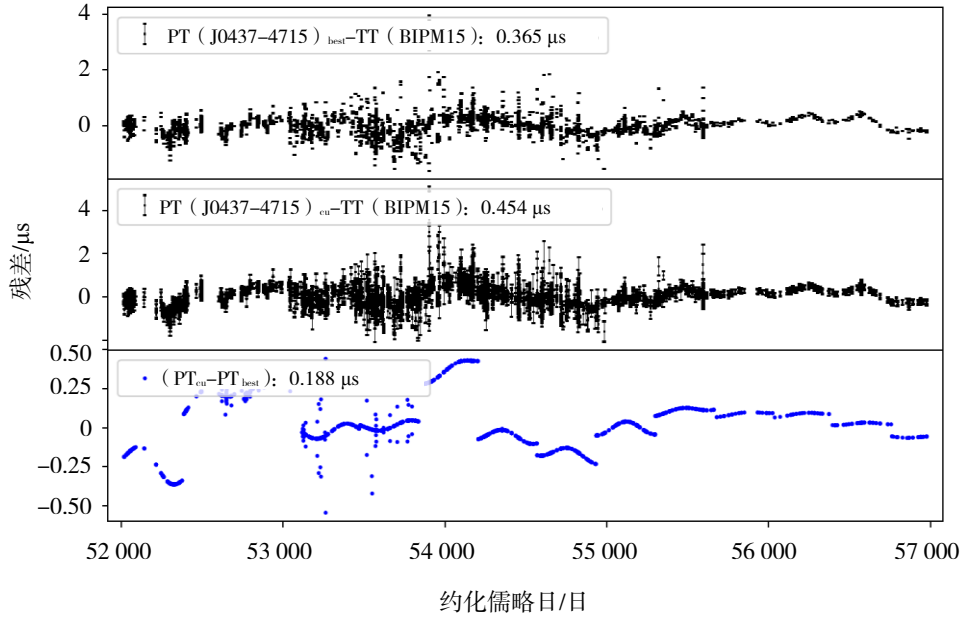
(b) 钟模型参数值的拟合误差随时间窗口的变化

图 3 时间窗口累积滑动下脉冲星钟模型的测量精度

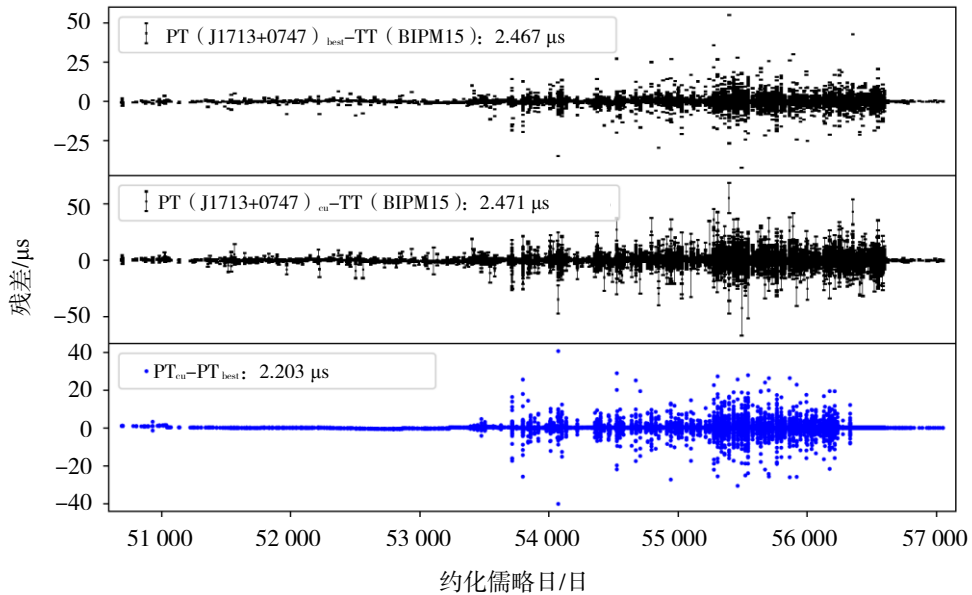
2.2 脉冲星时自主保持精度分析

本节利用时间窗口累积增加下保持的脉冲星钟模型，按图 1 方案研究脉冲星时的滑动自主保持精度。脉冲星时自主保持的窗口滑动步长与钟模型保持窗口滑动步长一致（1 年），利用实测数据获得滑动自主保持脉冲星时与 TT（BIPM15）偏差，以及与最佳保持脉冲星时与 TT（BIPM15）偏差（数据来自于图 2），评估脉冲星时自主保持精度。图 4 为 J0437-4715（图 4（a））和 J1713+0747（图 4（b））

滑动自主保持下的脉冲星时相对于 TT (BIPM15) 精度。据前面图 3 得知 J0437-4715 钟模型保持更新了 14 年 (14 次), 则可实现 14 年内脉冲星时滑动自主保持, 根据 DR2 中 J0437-4715 数据总时间跨度为 18.58 年, 因初始窗口为 5 年, 可用 13.58 年观测数据分析脉冲星时自主保持精度。



(a) J0437-4715 滑动自主保持下的脉冲星时相对于 TT (BIPM15) 精度



(b) J1713+0747 滑动自主保持下的脉冲星时相对于 TT (BIPM15) 精度

图 4 基于累积窗口下的脉冲星时自主保持精度

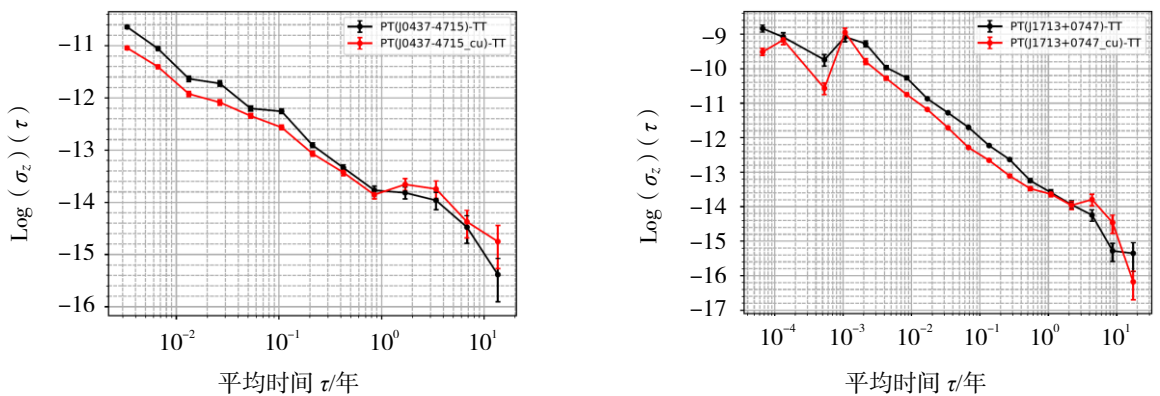
图 4 (a) 为 J0437-4715 累积窗口下建立的钟模型在 13.58 年内滑动自主保持的脉冲星时精度, 上图为基于 DR2 发布的最佳钟模型在该时间跨度内预报的脉冲星时与 TT (BIPM15) 的偏差, 即最佳脉冲星钟模型下保持的 $PT-TT$ (BIPM15), RMS 为 $0.365 \mu s$; 中图为累积时间窗口下保持的钟模型滑动预报的脉冲星时相对于 TT (BIPM15) 偏差, 其 RMS 为 $0.454 \mu s$; 下图为累积窗口策略下保持脉冲星时与最

佳保持脉冲星的偏差, RMS 为 $0.188 \mu\text{s}$ 。J0437-4715 自主保持脉冲星时相对于最佳脉冲星时的精度降低 24%, 从下图得知, 随着时间推移, 其与最佳脉冲星时的偏差不断缩小, 即脉冲星时的保持精度不断提高。这与钟模型测量精度随时间窗口累积增加而提高有关。图 4 (b) 为 J1713+0747 在 17.46 年内脉冲星时滑动自主保持精度, 其数据处理方法与 J0437-4715 相同, 上图为最佳保持脉冲星时相对于 TT (BIPM15) 偏差, RMS 为 $2.467 \mu\text{s}$, 中图为 J1713+0747 脉冲星时自主保持精度相对于 TT (BIPM15) 偏差, RMS 为 $2.471 \mu\text{s}$ 。下图为自主保持的脉冲星时与最佳脉冲星时偏差, RMS 为 $2.203 \mu\text{s}$ 。从图 4 得知, J1713+0747 自主保持脉冲星时与最佳脉冲星时的精度相比没有明显降低, RMS 增加 0.16%。且二者之差没有明显波动, 主要为白噪声, 与 J0437-4715 保持的脉冲星时特征不同。这与两颗源本身的计时噪声特性有关。对于计时噪声为白噪声的脉冲星, 短期数据建立的钟模型可提供稳定的脉冲星时保持能力。

2.3 自主保持脉冲星时稳定度分析

原子钟一般利用 Allan 方差评估其稳定度, 由于原子钟频率漂移量很小, 该方法估计原子钟稳定度是合理的。脉冲星钟模型除了包括脉冲星自转频率, 还包括脉冲星自转频率变化率, 在评估其稳定度时必须将自转频率变化率考虑在内。根据脉冲星钟模型特点, D. N. Matsakis 等人^[19]提出了与计时残差三次差分相关的估计方法 σ_z 评估脉冲星时稳定度, 与一般统计方法相比 σ_z 对低频红噪声更灵敏。张哲浩等^[20]分析了不同观测时间长度建立的钟模型预报同一年的脉冲星时稳定度, 发现时间长度大于 3 年时预报 1 年的脉冲星时稳定度变化甚微。下面本文分析滑动累计窗口建模预报的脉冲星时稳定度。

根据前面计算获得的 2 颗源自自主保持脉冲星时以及最佳保持脉冲星时数据, 利用 σ_z 方法计算评估脉冲星时自主保持稳定度。图 5 (a) 为 J0437-4715 脉冲星时保持稳定度曲线, 图 5 (b) 为 J1713+0747 脉冲星时保持稳定度曲线, 包括滑动自主保持脉冲星时相对于 TT (BIPM15) 的稳定度 (红色)、最佳保持脉冲星时相对于 TT (BIPM15) 的稳定度 (黑色)。



(a) J0437-4715 脉冲星时保持稳定度曲线

(b) J1713+0747 脉冲星时保持稳定度曲线

图 5 滑动自主维持的脉冲星时和最佳脉冲星时相对于 TT (BIPM15) 的稳定度曲线

图 5 (a) 为 J0437-4715 在 13.5 年时间尺度上的稳定度曲线, 图中给出的短期 (1.2 d) 稳定度为: 1.07×10^{-11} (最佳)、 9.02×10^{-12} (滑动); 长期 (13.5 年) 稳定度为: 4.12×10^{-16} (最佳)、 1.77×10^{-15} (滑动)。从图 5 (a) 得知, 滑动自主保持脉冲星时提升了短期稳定度, 长期稳定度略有恶化, 在 1 年附近二者的稳定度曲线交叉, 1 年稳定度约 1.6×10^{-14} , 稳定度曲线交叉可能与脉冲星钟模型保持策略有关。最佳脉冲星时是利用 DR2 发布钟模型建立的, 该钟模型是基于全部计时观测数据测量的, 脉冲星计时噪声会体现在残差 PT-TT (BIPM15) 中。时间窗口累积下保持的脉冲星钟模型是利用短时间跨度

数据测量的,在计时拟合钟模型参数时,会将部分计时噪声特征拟合到钟模型参数中,反而有利于提升脉冲星时短期预报精度,因此滑动自主保持脉冲星时的 1 年以下短期稳定度有所提升,与脉冲星自主保持的时间窗口有关(1 年)。图 5(b)为 J1713+0747 在 13.5 年时间尺度上的稳定度曲线,图中给出的短期(35 min)稳定度为: 1.49×10^{-9} (最佳)、 3.07×10^{-10} (滑动);长期(17.4 年)稳定度为: 4.43×10^{-16} (最佳)、 6.62×10^{-17} (滑动),二者 1 年的稳定度约 2.5×10^{-14} 。从图 5 得知 J1713+0747 滑动保持和最佳保持的脉冲星时稳定度曲线走势与 J0437-4715 大致相似,但 J1713+0747 短期稳定度有两个点交叉,这可能因为该源计时数据高频次采样点(<1 d)较少,影响短期稳定度计算。J1713+0747 稳定度曲线最后一个值滑动保持优于最佳保持,这可能与 σ_z 计算方法有关,最后一个点计算值误差大。在相同的时间尺度下, J0437-4715 保持的脉冲星时稳定度略优于 J1713+0747。但在更长时间尺度上,可能因 J0437-4715 存在红噪声将影响其长时间尺度上(20 年以上)的稳定度。

3 结论

脉冲星钟模型测量精度决定脉冲星时自主保持精度,从而影响脉冲星时应用精度。之前关于脉冲星时研究主要是利用最优钟模型获得脉冲星时数据开展相关研究,即钟模型测量和脉冲星时建立采用相同时间跨度内数据。但脉冲星时应用是基于历史钟模型通过预报脉冲星时,以提供实时应用服务的,目前脉冲星钟模型更新严重滞后。根据钟模型测量参考时间 TT(BIPM)发布方式,以及脉冲星钟特点(长期稳定),本文提出基于时间窗口累积的脉冲星钟模型保持方法,钟模型更新频次与 TT(BIPM)更新同步(1 年)。利用 DR2 中 J0437-4715 和 J1713+0747 数据研究了时间窗口累积下脉冲星钟模型保持精度,以及基于钟模型的脉冲星时滑动自主保持能力。在数据时间窗口为 5~20 年之间,2 颗脉冲星自转频率值变化幅度维持在 10^{-11} Hz 之内,自转频率一阶导数值变化幅度维持在 10^{-20} s⁻² 之内,且自转频率与自转频率一阶导数值变化趋势一致。随着时间窗口增大钟模型参数值趋于稳定,时间窗口累积到 13 年以上,脉冲星钟模型参数值已足够精确,自转参数值变化幅度维持在 10^{-13} Hz 之内。钟模型参数值测量误差随时间窗口累积增加而单调减小,尤其 J1713+0747 计时噪声主要为白噪声,22 年数据测量自转频率值误差为 4.29×10^{-15} Hz,未来可通过增加数据时间窗口提升钟模型测量精度。

基于保持的钟模型利用实测数据分析了滑动自主保持脉冲星时与 TT(BIPM15)的偏差,评估了脉冲星时自主保持精度。J0437-4715 在 13.58 年内自主保持脉冲星时相对于 TT(BIPM15)偏差为(RMS) 0.454 μ s,与最佳保持脉冲星时偏差为(RMS) 0.188 μ s,相对于最佳脉冲星时精度降低 24%,随着时间窗口增大,与最佳脉冲星时偏差不断缩小,这与钟模型测量精度随时间窗口增加而提高有关。J1713+0747 在 17.46 年内自主保持脉冲星时与 TT(BIPM15)偏差为(RMS) 2.471 μ s,与最佳脉冲星时精度接近,且二者之差没有明显波动,这与该源计时噪声主要为白噪声有关。最后,利用 σ_z 评估了自主保持脉冲星时的稳定度,滑动自主保持脉冲星时相对于最佳脉冲星时,2 颗源的短期稳定度都有所提升,长期稳定度都略有恶化,稳定度曲线在 1 年附近二者交叉,这可能与脉冲星时自主保持时间窗口滑动步长有关。

参考文献:

- [1] LYNE A G, SMITH F G. Pulsar Astronomy[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 1-3.
- [2] BACKER D C, KULKARNI S R, HELLES C, et al. A millisecond pulsar[J]. Nature, 1982, 300(5893): 615-618.
- [3] TAYLOR J H. Millisecond pulsars: nature's most stable clocks[J]. IEEE, 1991, 79(7): 1054-1062.
- [4] 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.
- [5] 赵成仕, 陈鼎, 蔡宏兵, 等. X 射线脉冲星导航可用目标源研究[J]. 天文学进展, 2011, 29(3): 334-342.
- [6] BACKER D C, HELLINGS R W. Pulsar timing and general relativity[J]. *Annual Rev Astron Astrophys*, 1986, 24(1): 537-575.
- [7] NEWTON L M, MANCHESTER R N, COOKE D T. Pulsar parameters from timing observations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1981, 194(4): 841-850.
- [8] 赵成仕, 童明雷, 高玉平, 等. 脉冲星钟模型精度分析[J]. 天文学报, 2017, 58(3): 61-69.
- [9] 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.
- [10] ALAM M D F, ARZOUMANIAN Z, BAKER P T, et al. The NANOGrav 12.5 yr data set: observations and narrowband timing of 47 millisecond pulsars[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, 252(1): 48.
- [11] 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
- [12] TARAFDAR P, NOBLESON K, RANA P, et al. The Indian Pulsar Timing Array: first data release[J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2022(39): 1-23.
- [13] HOBBS G, ARCHIBALD A, ARZOUMANIAN Z, et al. The International Pulsar Timing Array project: using pulsars as a gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084013-10.
- [14] SIMON J, KARASTERGIOU A, KEITH M J, et al. The thousand-pulsar-array programme on MeerKAT-I. Science objectives and first results[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 493(3): 3608-3615.
- [15] VERBIEST J P W, LENTATI L, HOBBS G, et al. The International Pulsar Timing Array: first data release[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458(2): 1267-1288.
- [16] PERERA B B P, DECESAR M E, DEMOREST P B, et al. The International Pulsar Timing Array: second data release[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 490(4): 4666-4687.
- [17] HOBBS G B, EDWARDS R T, MANCHESTER R N. TEMPO2, a new pulsar timing package. I: overview[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006(369): 655-672.
- [18] 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: 1549-1574.
- [19] MATSAKIS D N, TAYLOR J H, MARSHALL E T. A statistic for describing pulsar and clock stabilities[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1997(326): 924-928.
- [20] ZHANG Z H, TONG M L, ZHAO C H, et al. The influence of the observational strategies of pulsar timing on the properties of pulsar clocks[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020(20): 205.