

引用格式:王浙宇, 韩孟纳, 童明雷. XPNV-1 和 NICER 对 Crab 脉冲星观测数据的分析比较[J]. 时间频率学报, 2023, 46(3): 178-187.

XPNV-1 和 NICER 对 Crab 脉冲星 观测数据的比较分析

王浙宇^{1,2}, 韩孟纳^{1,2}, 童明雷^{1,*}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过对比 NICER (Neutron Star Interior Composition Explorer) 和 XPNV-1 (X-ray Pulsar Navigation-1) 关于 Crab 脉冲星同一时段 (108 天) 观测数据的计时处理结果, 发现在周期跃变发生前的时段 (95 天), NICER 数据的拟合前计时残差的 RMS (root mean square) 为 5.77 μ s, 远优于 XPNV-1 数据的拟合前计时残差的 RMS 51.56 μ s, 体现了 NICER 在有效面积、探测效率、数据采集等方面的优势, 给未来我国的 X 射线脉冲星探测器研制提供了发展方向; 而在周期跃变发生后的时段 (13 天), 发现 XPNV-1 数据的拟合前计时残差的 RMS 为 55.87 μ s, 而 NICER 数据的拟合前计时残差的 RMS 为 167.27 μ s, 周期跃变对 NICER 的影响更大, 说明在处理周期跃变发生后时段的 NICER 数据时, 由于 NICER 的观测精度非常高, 需要更频繁地更新 Crab 星历。最后分别得到了两个探测器整段数据的计时残差。XPNV-1 数据的拟合前计时残差的 RMS 为 55.94 μ s, 而 NICER 数据的拟合前计时残差的 RMS 为 64.34 μ s, 这说明 NICER 数据受周期跃变影响更为明显, 进一步证明了上述结论。

关键词: Crab 脉冲星; 脉冲星计时; 脉冲周期跃变; X 射线脉冲星探测器

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-03-0178-10

Comparison and analysis of Crab pulsar observation data from XPNV-1 and NICER

WANG Zhe-yu^{1,2}, HAN Meng-na^{1,2}, TONG Ming-lei^{1,*}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By comparing the timing processing results of the observation data of Crab pulsar in the same period (108 days) from NICER and XPNV-1, it is found that in the period before glitch (95 days), the RMS=5.77 μ s of the pre-fit timing residuals of NICER data is much better than the RMS=51.56 μ s of pre-fit timing residuals of XPNV-1 data. It reflects the advantages of NICER detector in effective area, detection efficiency, data acquisition and other aspects, and provides the development direction for X-ray pulsar

detectors in China in the future; In the period after glitch (13 days), it is found that the RMS of pre-fit timing residuals of XPNV-1 data is 55.87 μs . The RMS of the pre-fit timing residuals of NICER data is 167.27 μs . glitch has a larger impact on NICER, which means that when processing NICER data in the period after glitch, due to the very high observation precision of NICER, it is necessary to update the Crab ephemeris more frequently. At last, the timing residuals of the whole data of the two detectors are obtained. The RMS of the pre-fit timing residuals of XPNV-1 data is 55.94 μs , and the RMS of the pre-fit timing residuals of NICER data is 64.34 μs , which further demonstrates the above conclusions.

Key words: Crab pulsar; pulsar timing; glitch; X-ray pulsar detector

0 引言

脉冲星是高速自转的致密天体,其磁极产生的电磁辐射束随自身旋转扫过星际空间,犹如宇宙中的灯塔。由于脉冲星的自转极其稳定,这使其成为宇宙中天然的时钟。对于多波段辐射的脉冲星,在地面和空间使用望远镜都能接收到它的信号。利用从脉冲星接收到的信息,可以计算太阳系行星质量^[1]、建立脉冲星时间尺度^[2-4]、探测低频引力波^[5],未来还可以考虑脉冲星导航^[6-7]等。

射电波段的脉冲星观测技术比较成熟,能够通过观测直接构建出脉冲星的计时模型,得到脉冲星的自转参数,而 X 射线波段由于观测精度较低,还需要依赖射电波段长期观测的结果。不过,相对于射电波段, X 射线波段的观测也有其特有的优势。一方面,射电观测结果受星际介质的色散和散射的影响较大,而 X 射线极高的频率几乎不受星际介质的影响;另一方面,射电观测在地面,会受到大气折射的影响,而由于地球大气层对 X 射线脉冲星信号的屏蔽作用,只能在太空中观测 X 射线脉冲星。X 射线脉冲星计时观测是脉冲星导航应用研究的基础。

脉冲星试验 01 星(XPNV-1)是为验证脉冲星探测器性能指标和空间环境适应性,积累在轨试验数据,由中国航天科技集团第五研究院研制,中国空间技术研究院开展空间飞行试验的我国首颗 X 射线脉冲星试验卫星,于北京时间 2016 年 11 月 10 日在酒泉卫星发射中心由长征 11 号运载火箭发射升空^[8]。Crab 脉冲星(PSR B0531+21)是 XPNV-1 的观测目标,其在 X 射线波段的流量很高,是宇宙中最明亮的信号源之一,非常适合 XPNV-1 观测,因此 XPNV-1 积累了大量 Crab 脉冲星的观测数据^[9]。本文使用了部分观测数据来进行计时分析。

中子星内部成分探测器(Neutron Star Interior Composition Explorer, NICER)于 2017 年 6 月 3 日由 SpaceX 公司的猎鹰 9 号火箭发射升空^[10],安装在国际空间站(ISS)外部的可移动臂上,是专门用来研究脉冲星的 X 射线探测器。NICER 包含了 56 组探测器,目前仍在工作的有 52 组,每一组本质上都是一个小型 X 射线望远镜^[11-12]。NICER 的主要用途是研究 X 射线脉冲星的高精度计时,限制脉冲星的质量-半径关系和研究脉冲星的高能辐射机制。与 XPNV-1 相比, NICER 的各项性能有着巨大的优势,它有着更大的有效接收面积,更好的时间分辨率和能量分辨率,再加上灵敏度方面的优势,使得 NICER 能够得到更精确的观测数据。本文选择了 NICER 与 XPNV-1 相同时间跨度的数据进行了对比分析,讨论二者计时结果的差异。

1 Crab 脉冲星观测数据计时处理流程

1.1 数据选取

XPNV-1 的探测效率、有效面积等参数指标相对于 NICER 来说还有较大差距,具体参数如表 1^[9, 13]所示。

表 1 NICER 和 XPNV-1 性能参数

参数名称	NICER	XPNV-1
探测能段	0.2~12 keV	0.5~10 keV
视场角	5'	15'
时间分辨率	<300 ns	≤1.5 μs
有效面积	> 2 000 cm ² @ 1.5 keV, 600 cm ² @ 6 keV	30 cm ² @ 1 keV
能量分辨率	85 eV @ 1 keV, 137 eV @ 6 keV	≤180 eV @ 5.9 keV

尽管如此, XPNV-1 是专门用于脉冲星试验的观测卫星, 只针对 Crab 开展观测, 并且是高频次的观测。而 NICER 也对 Crab 开展了一些观测, 不过由于 NICER 的观测重心不在 Crab 上, 导致其观测频次低, 一个月可能只观测几次, 甚至不观测, 因此处理 XPNV-1 的观测数据能获得比 NICER 更多的脉冲到达时间 (TOA)。此外, 由于 XPNV-1 不如 NICER 灵敏, 并且其时间分辨率也不如 NICER, 这导致即使 XPNV-1 每次观测的曝光时间长于 NICER, 其获得的光子数也要远远少于 NICER, 光子数据在时间尺度上的密集程度也不如 NICER。因此, NICER 的观测数据更能反映出 Crab 脉冲星的细节特征。为了比较同一时段内 XPNV-1 和 NICER 的计时结果, 选择 2017 年 8 月 5 日至 2017 年 11 月 20 日的观测数据, 其中 XPNV-1 共 118 组数据, NICER 共 24 组数据。值得注意的是, 2017 年 11 月 8 日, Crab 脉冲星发生了一次明显的周期跃变现象。为了讨论此次周期跃变对 XPNV-1 和 NICER 计时处理结果的影响, 本文将数据分成周期跃变前和周期跃变后两段, 周期跃变前对应了 2017 年 8 月 5 日至 2017 年 11 月 7 日的观测数据, 这期间 XPNV-1 共 101 组数据, NICER 共 10 组数据。周期跃变后对应了 2017 年 11 月 8 日至 2017 年 11 月 20 日的观测数据, 这期间 XPNV-1 共 17 组数据, NICER 共 14 组数据。

1.2 TOA 获取

XPNV-1 的数据包括两部分, 一部分是光子事件文件, 它记录了每个光子到达探测器的时刻和光子的能量大小; 另一部分是卫星的轨道文件, 它记录了卫星的四维时空坐标。根据资料[9], 数据中的时间是以 UTC (coordinated universal time) 秒来记录的累积秒数, 其参考的零时刻为 UTC 2008 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒。NICER 数据的细节和 XPNV-1 有些许不同, 其数据的时间是以 GPS (Global Positioning System) 秒来记录的累积秒数, 对应的参考零时刻为 UTC 2014 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒。NICER 的光子事件文件记录的時刻需要额外修正, 在头文件里存有该修正量 TIMEZERO = -1.0 s, 其轨道文件记录的時刻不需要额外修正^[14]。此外, 对 NICER 行为的分析表明, 在某些条件下, 两个命名为 DET_ID = 34 和 DET_ID = 14 的 NICER 焦平面模块表现出探测器噪声的增加, 因此舍去来自这两个探测器的数据^[15]。另外, 为了降低背景粒子的影响, 采用文献[16]的筛选条件, 除去 $PI_RATIO > 1.1 + 120/PI$ 的数据。

因为 Crab 脉冲星星历的时间尺度是 TDB (barycentric dynamical time), 为一致起见, 描述光子到达时刻的时间尺度必需采用 TDB。不同时间尺度之间的转换公式^[17-19]如下:

$$t_{TAI} = UTC + \Delta_{AT} \quad (1)$$

$$t_{TT} = t_{TAI} + 32.184 \text{ s} + \delta \quad (2)$$

$$t_{TCG} - t_{TT} = \frac{L_G}{1 - L_G} (J_{TT} - T_0) \times 86\,400 \text{ s} \quad (3)$$

$$t_{\text{TCB}} - t_{\text{TCG}} = \frac{1}{c^2} \int_{t_0}^t \left[U_{\oplus} + \frac{v_{\oplus}^2}{2} + \Delta L_{\text{C}}^{(\text{PN})} + \Delta L_{\text{C}}^{(\text{A})} \right] dt. \quad (4)$$

$$t_{\text{TDB}} - t_{\text{TCB}} = -L_{\text{B}}(J_{\text{TCB}} - T_0) \times 86400 \text{ s} + B_0. \quad (5)$$

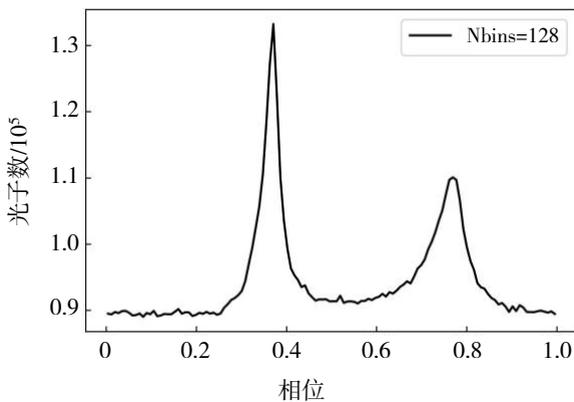
式(1)至(5)中: Δ_{AT} 为协调世界时(UTC)与国际原子时(TAI)之间的闰秒差, δ 为地球时(TT)相对于国际原子时(TAI)的微小变化, U_{\oplus} 为太阳系各大天体在地心处产生的引力势, v_{\oplus} 为地心相对于SSB的运动速度。各常数项数值如下: $L_{\text{G}} \equiv 6.969290134 \times 10^{-10}$, $L_{\text{B}} \equiv 1.550519768 \times 10^{-8}$, $T_0 = 2443144.5003725$, $B_0 \equiv -6.55 \times 10^{-5} \text{ s}$, $\Delta L_{\text{C}}^{(\text{PN})} = 1.097 \times 10^{-16}$, $\Delta L_{\text{C}}^{(\text{A})} = 5 \times 10^{-18}$, T_0 与 J_{TT} , J_{TCB} 的单位均为儒略日(JD)。

本文采用标准脉冲轮廓与观测积分脉冲轮廓互相关方法计算观测得到的脉冲到达太阳系质心时刻(TOA),为此,需要将光子到达探测器的时刻转换成到达太阳系质心(SSB)时刻。由于X射线辐射无需考虑色散效应,并且本文采用的Jodrell Bank天文台发布的Crab脉冲星星历^[20]未考虑Crab脉冲星的自行和视差,无需考虑色散、自行和视差带来的影响。

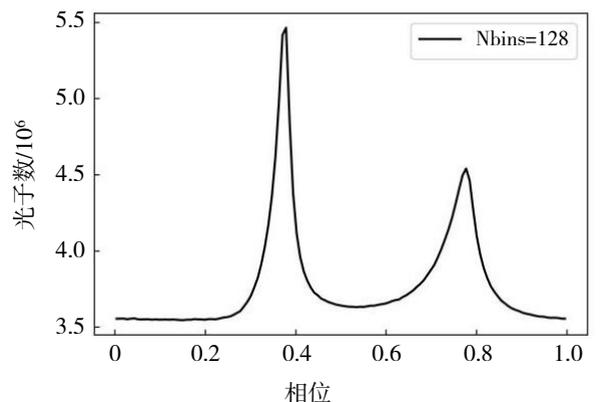
此外,卫星的位置和SSB位置并不重合。如果将脉冲星的辐射看作平面波,那么卫星到SSB的位移在脉冲星方向矢量上的投影长度就是额外的传播路径,相应的时延量就是Roemer时延,也称真空传播时延。脉冲星的辐射在传播过程中还会受到太阳系的天体产生的引力场影响,产生的时间延迟称为Shapiro延迟^[21-22]。

为了与Jodrell Bank天文台发布的Crab脉冲星星历保持一致,本文的太阳系星历表使用DE200^[23]。虽然DE200和较新版本的太阳系星历表相比,天体的位置存在数百千米的误差,并且存在明显的趋势。但根据文献[24]的研究发现,如果选用的太阳系星历表与使用的脉冲星星历当初归算时采用的历表不同,残差的弥散反而更大。因此为了保持内部自洽,本文未采用较新版本的太阳系星历表。

考虑上述各类时延修正后,得到一系列光子到达SSB时刻,基于此可以分别折叠标准脉冲轮廓和积分脉冲轮廓。折叠脉冲轮廓时要选取恰当的相位子间隔数,根据文献[25]对XPNV-1一年数据的分析,选取相位子间隔数Nbins=128和Nbins=256比较合适,并且两种选择的结果基本一致。该文献选取了相位子间隔数Nbins=256来折叠脉冲轮廓,而相比之下,本文使用的XPNV-1数据相对较少,标准脉冲轮廓的信噪比相对较低,为了避免引入更多噪声,本文选择相位子间隔数Nbins=128来折叠脉冲轮廓。图1展示了XPNV-1和NICER整段数据折叠的标准脉冲轮廓,图2展示了XPNV-1和NICER相同时段的观测数据(MJD 58 024.58~MJD 58 024.86)折叠的积分脉冲轮廓。



(a) XPNV-1 的标准脉冲轮廓



(b) NICER 的标准脉冲轮廓

图1 标准脉冲轮廓

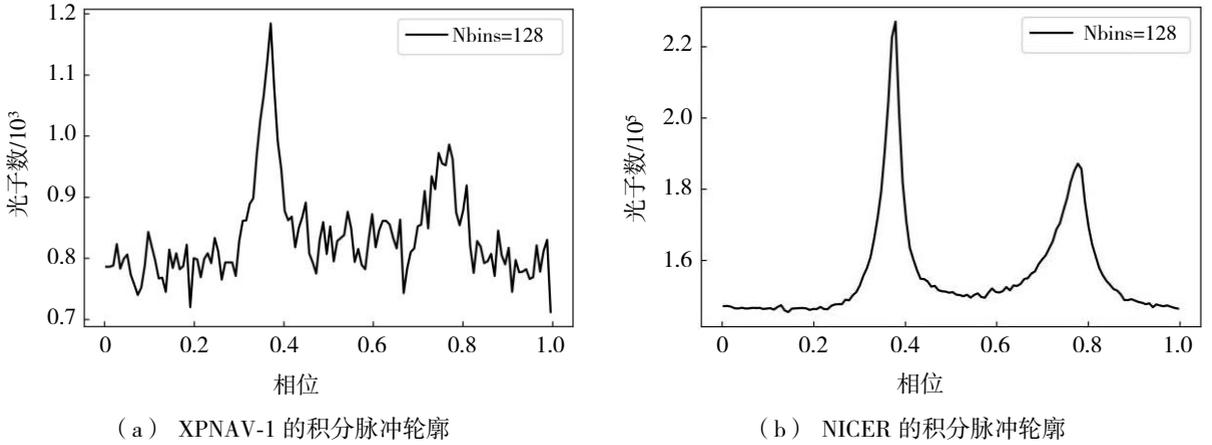


图 2 积分脉冲轮廓

轮廓折叠后, 通过 Taylor-FFT 法^[26]对二者进行互相关计算来获取一系列脉冲到达太阳系质心时刻 TOA 数据。由于数据涉及的时间段内 Crab 脉冲星的星历有多次更新, 在数据处理过程中需要及时更换星历, 涉及的 Crab 脉冲星星历数据如表 2^[20]所示, 其中周期跃变发生后更新了两次星历。

表 2 Crab 脉冲星自转参数

约化儒略日 MJD ¹⁾	t_{ref}/s ²⁾	自转频率的零阶导数 ν/Hz	自转频率的一阶导数 $\dot{\nu}/\text{s}^{-2}$	自转频率的二阶导数 $\ddot{\nu}/\text{s}^{-3}$
57 980	0.015 930	29.639 410 077 2	$-368\ 702.11 \times 10^{-15}$	$9.173\ 006\ 180\ 917\ 509 \times 10^{-21}$
58 011	0.032 808	29.638 422 607 3	$-368\ 658.13 \times 10^{-15}$	$9.171\ 123\ 484\ 933\ 526 \times 10^{-21}$
58 041	0.032 862	29.637 467 059 8	$-368\ 635.67 \times 10^{-15}$	$9.170\ 301\ 694\ 281\ 558 \times 10^{-21}$
58 061	0.008 560	29.636 830 076 7	$-368\ 616.01 \times 10^{-15}$	$9.169\ 520\ 659\ 036\ 004 \times 10^{-21}$
58 068	0.018 349	29.636 621 523 7	$-369\ 626.33 \times 10^{-15}$	$9.219\ 918\ 924\ 970\ 097 \times 10^{-21}$
58 079	0.028 910	29.636 269 134 2	$-370\ 857.08 \times 10^{-15}$	$9.281\ 530\ 894\ 684195 \times 10^{-21}$

注: 1) 脉冲星星历的参考历元 (TDB) 的整数 (约化儒略日) 部分; 2) 参考历元的秒部分, 使用 DE200 得到。

1.3 计时残差获取

在获得测量的 TOA 之后, 为了得知其精度水平, 需要将其与利用脉冲星星历参数建立的计时模型预测的 TOA 作差, 得到计时残差。计时残差的获取过程分为以下几步。首先, 将测量的 TOA 代入脉冲星相位公式:

$$\phi(t) = \phi_0 + \nu(t - t_0) + \frac{1}{2}\dot{\nu}(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\ddot{\nu}(t - t_0)^3。 \quad (6)$$

式 (6) 中: t_0 是脉冲星星历的参考历元, ϕ_0 是 t_0 时刻脉冲星的自转相位, ν , $\dot{\nu}$ 和 $\ddot{\nu}$ 是脉冲星的自转频率的零阶、一阶和二阶导数。利用该公式能够计算出测量的 TOA 时刻对应的相位, 而根据脉冲星计时模型参数预报的相位为整数, 计时残差可根据公式 (7) 计算

$$R(t) = \frac{\phi(t) - N(t)}{\nu}。 \quad (7)$$

式 (7) 中: $N(t)$ 为 $\phi(t)$ 就近取整的值。

2 XPNV-1 和 NICER 计时处理结果对比

2.1 周期跃变发生前的计时处理结果对比

为了对比两个探测器的计时结果, 得到二者的计时残差如图 3、图 4 所示。首先去除了 XPNV-1 数据中利用光子数小于 10 000 的文件得到的 13 个数据点, 因为这些光子数过少的文件无法折叠出脉冲轮廓, 然后根据 3σ 原则去除了 3 个数据点, 最后获得了 85 个 TOA, 其拟合前计时残差的 RMS (root mean square) 为 $51.56 \mu\text{s}$ 。NICER 观测数据无需去除数据点, 获得了 10 个 TOA, 拟合前计时残差的 RMS 为 $5.77 \mu\text{s}$ 。

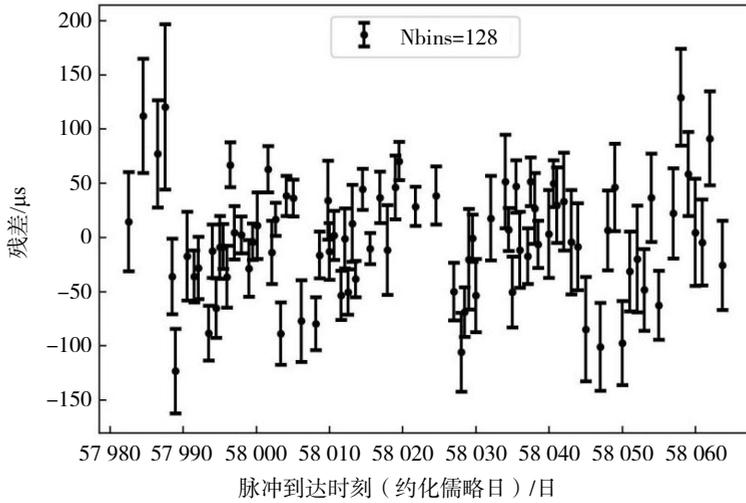


图 3 周期跃变发生前 XPNV-1 观测数据获得的 TOA 的残差 (相位子间隔数 Nbins 为 128)

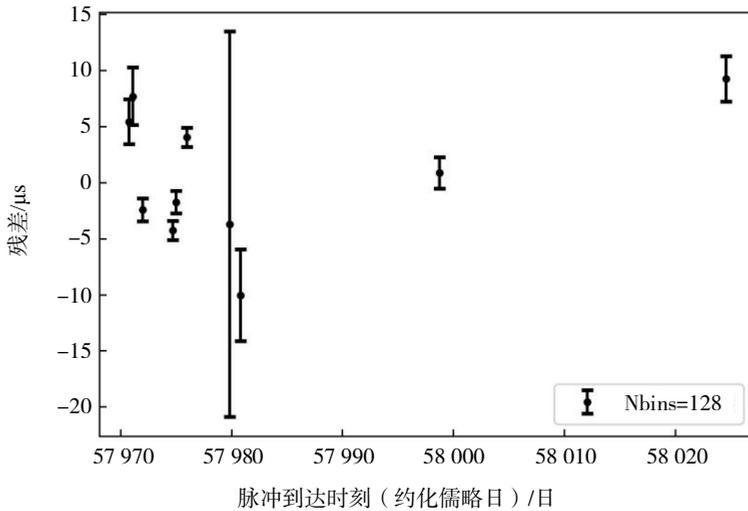


图 4 周期跃变发生前 NICER 观测数据获得的 TOA 的残差 (相位子间隔数 Nbins 为 128)

对比图 3 和图 4 可以看出, 同时期的 NICER 数据得到的计时残差及其不确定度要远远优于 XPNV-1 数据。这是可以预见的, 因为 TOA 的测量精度和 X 射线探测器性能密切相关, 可以用一些参数来衡量 TOA 的测量精度^[27]:

$$\sigma_{\text{TOA}}^2 = \Gamma_p^2 \frac{P}{ATs} + \Gamma_b^2 \frac{Pb}{ATs^2} \quad (8)$$

式 (8) 中: P 为脉冲星自转周期, A 为探测器有效面积, T 为总观测时长, s 为脉冲星辐射流量, b 为背景 X 射线光子到达速率, 参数 Γ_p^2 和 Γ_b^2 分别表示探测器接收的 X 射线光子的固有噪声和背景噪声影响下的脉冲轮廓对 TOA 测量精度的影响。式 (8) 反映出 TOA 的测量精度与 X 射线探测器的有效面积

有关,有效面积越大,TOA 的测量精度越高。为满足高精度的计时观测要求,在 X 射线探测器的几何面积有限的情况下,需要努力提高探测器的 X 射线光子探测效率。另外,由于探测器运行范围广,背景噪声极为复杂,为保证其能够适应强辐射环境,并有效抑制空间本底噪声,要求探测器具有较快时间响应及较强的空间本底抑制能力。NICER 在各方面都优于 XPNV-1,因此在计时处理上能获得更出色的结果。

2.2 周期跃变发生后的计时处理结果对比

为了讨论计时结果是否受到周期跃变的影响,这里选择不去除误差过大的数据点以观察计时残差的趋势。将 XPNV-1 数据去除利用光子数小于 10 000 的文件得到的 2 个数据点后,获得了 15 个 TOA,其计时残差如图 5 所示,拟合前计时残差的 RMS 为 $55.87 \mu\text{s}$ 。NICER 数据的计时残差如图 6 所示,其拟合前计时残差的 RMS 为 $167.27 \mu\text{s}$ 。

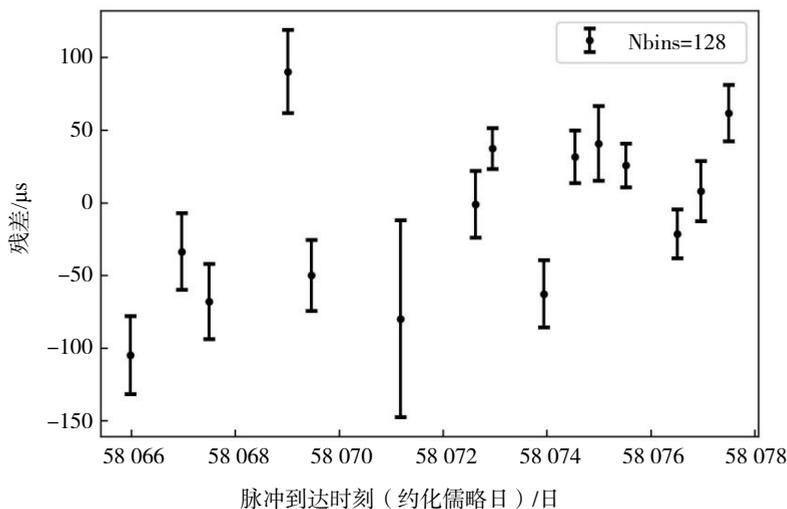


图 5 周期跃变发生后 XPNV-1 观测数据获得的 TOA 的残差 (相位子间隔数 Nbins 为 128)

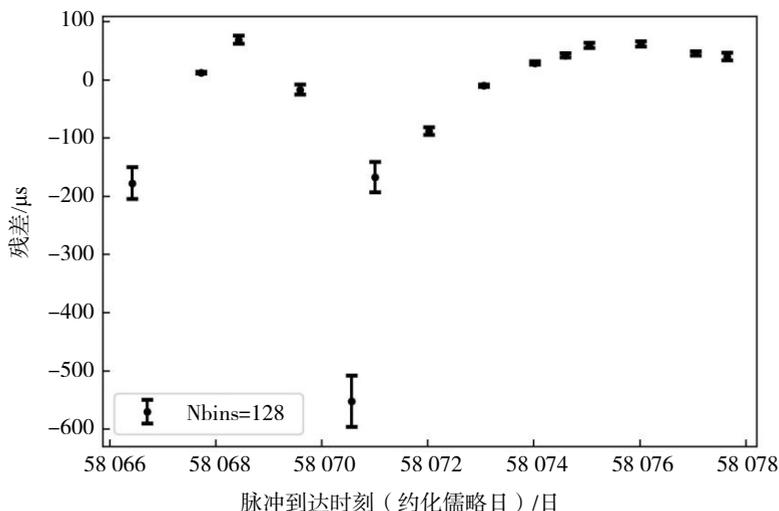


图 6 周期跃变发生后 NICER 观测数据获得的 TOA 的残差 (相位子间隔数 Nbins 为 128)

图 5 和图 6 所示残差是用相同的 Jodrell Bank 发布的 Crab 脉冲星自转参数计算得到的,受周期跃变影响,二者弥散度较大,图 6 中 NICER 结果 RMS 更大,但图 6 比图 5 更能清楚地表现出周期跃变后计时残差的系统性变化趋势。图 6 中的系统性变化趋势明显由两段组成,这是因为周期跃变后更新了两次星历,第一次更新 (适用时段 MJD 58065~MJD 58070) 和第二次更新 (适用时段 MJD 58071~MJD 58077)

恰好分别对应两段系统性变化趋势。上述结果说明 NICER 比 XPNV-1 观测数据精度更高, 也说明预报脉冲 TOA 采用的自转参数不能反映 Crab 自转频率及其变化的真实状况。由表 2 可见, 正常情况下, Jodrell Bank 提供 Crab 自转参数的时间间隔是 20 至 30 天, 而在周期跃变事件前后, 提供自转参数的时间间隔改为 7 至 10 天。如果要完全消除图 6 中计时残差的变化趋势, 需要更频繁地(如每天)更新 Crab 脉冲星在周期跃变后时间段的自转参数。实际上, 脉冲星导航应用对脉冲星星历更新频次的要求取决于脉冲星的自转频率稳定度: 对于自转频率稳定度较高的毫秒脉冲星, 其星历可 1 年甚至更长时间更新 1 次, 而对于自转不稳定的脉冲星, 如 Crab, 必需更频繁地更新其星历参数, 特别是自转参数。

2.3 整段数据的计时处理结果对比

为了更全面地反映周期跃变对计时结果的影响, 将两段数据整合, 讨论整段数据的计时结果。首先, 依然采用周期跃变发生前时段的 Crab 脉冲星星历, 但不再更换周期跃变发生后时段的 Crab 脉冲星星历, 得到的 XPNV-1 和 NICER 的计时残差如图 7 所示。

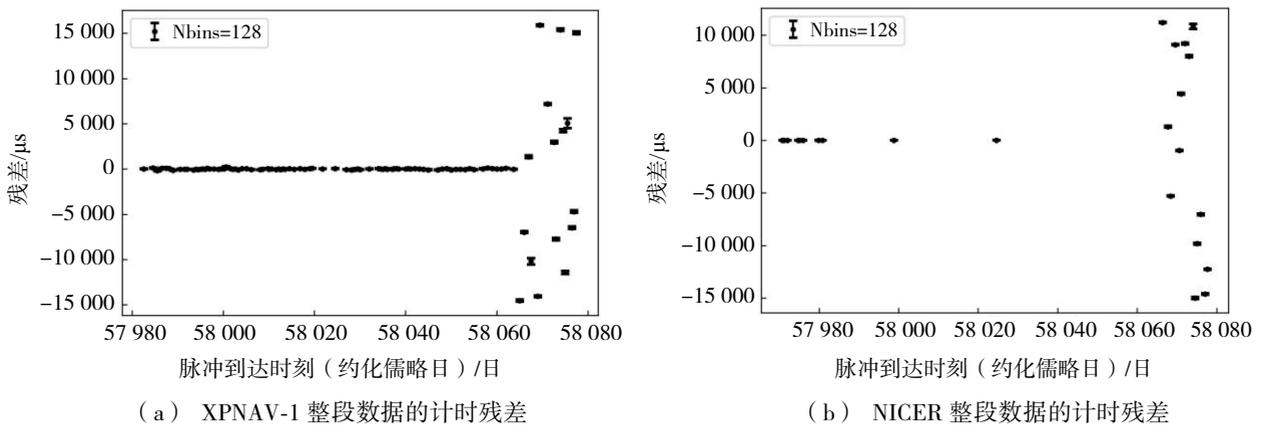


图 7 计时残差

根据图 7(a)和图 7(b)可以清晰地看到如果周期跃变发生后的时期不更换星历, XPNV-1 和 NICER 的计时残差会出现很大的弥散, 说明周期跃变对计时结果存在较大影响。之后更换周期跃变发生后时段的 Crab 脉冲星星历, 对两个探测器的整段数据进行计时处理。将 XPNV-1 的整段数据去除利用光子数小于 10 000 的文件得到的 15 个数据点, 再根据 3σ 原则去除了 3 个数据点, 获得了 100 个 TOA, 计时残差如图 8 所示, 其拟合前计时残差的 RMS 为 $55.94 \mu\text{s}$ 。NICER 的整段数据根据 3σ 原则去除了 1 个数据点, 获得了 23 个 TOA, 计时残差如图 9 所示, RMS 为 $64.34 \mu\text{s}$ 。

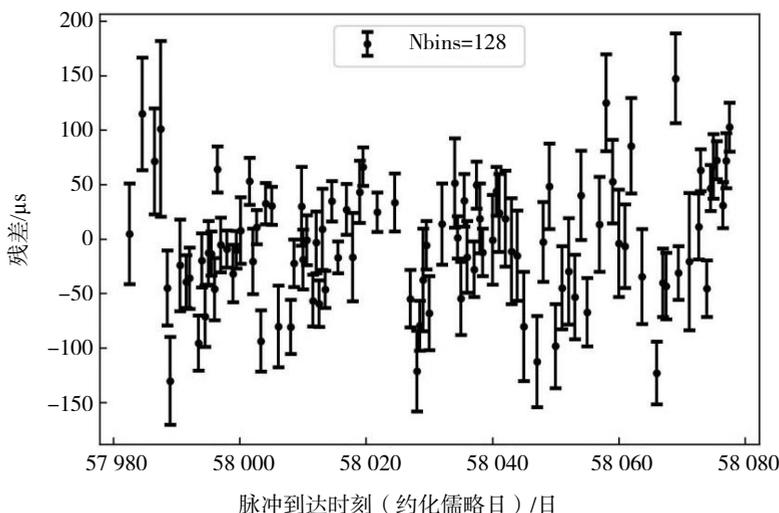


图 8 XPNV-1 整段观测数据获得的 TOA 的残差(相位子间隔数 Nbins 为 128)

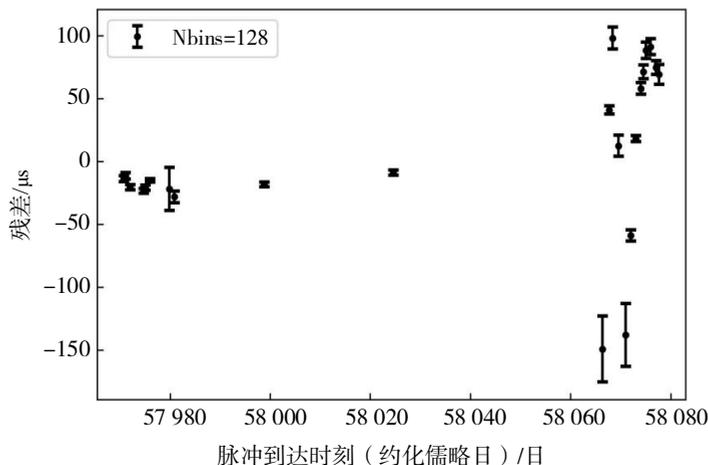


图 9 NICER 整段观测数据获得的 TOA 的残差 (相位子间隔数 Nbins 为 128)

从图 8 可以看到 XPNAV-1 的计时残差没有明显的趋势, 说明以 XPNAV-1 的观测精度, 使用 Jodrell Bank 的 Crab 星历表处理其观测数据后, 跃变对残差的影响不明显。而图 9 中可以看到 NICER 的计时残差能够反映出周期跃变效应, 特别是周期跃变后计时残差明显受到周期跃变效应影响, 受周期跃变影响其总计时残差 RMS 也较大。

3 结语

本文选取了 NICER 和 XPNAV-1 同一时段的数据 (2017 年 8 月 5 日至 2017 年 11 月 20 日), 以周期跃变发生的时间 (2017 年 11 月 8 日) 为分界, 将数据分成了周期跃变发生前和发生后两段, 并对分段前和分段后的数据进行了计时分析。对于周期跃变发生前的时段, NICER 数据获得的拟合前计时残差的 RMS 为 $5.77 \mu\text{s}$, XPNAV-1 数据获得的拟合前计时残差的 RMS 为 $51.56 \mu\text{s}$ 。结果的差异反映了 XPNAV-1 的性能与 NICER 比存在较大不足, 这给了我国未来的 X 射线脉冲星探测器几个发展方向。其一, 增大探测器的有效面积, X 射线接收器要面阵大、效率高。其二, 增加探测器的探测效率, 探测器件要满足高效率、低噪声, 电子器件构成的系统也要高效、低噪。其三, 提高空间辐射本底的抑制效率, 减少背景 X 射线光子和高能粒子的干扰。对于周期跃变发生后的时段, XPNAV-1 数据获得的计时残差不存在明显的趋势, 而 NICER 数据获得的计时残差存在明显的趋势, 说明 NICER 的观测精度更高, 记录的周期跃变信息更精确, 而 Jodrell Bank 发布的 Crab 脉冲星星历更新频次较低, 导致没能完全消除周期跃变的影响。对于整个时段, 本文讨论了如果不更新周期跃变发生后时段的星历, 周期跃变对两个探测器的计时残差的影响。两个探测器的计时残差在周期跃变发生后都出现了很大的弥散, 说明了周期跃变对计时残差的影响十分明显。之后更换了周期跃变发生后时段的 Crab 脉冲星星历, 发现 XPNAV-1 的计时残差没有明显的趋势, 其拟合前计时残差的 RMS 为 $55.94 \mu\text{s}$, 而 NICER 的计时残差仍然受到周期跃变的影响, 其拟合前计时残差的 RMS 为 $64.34 \mu\text{s}$ 。结果表明, 高精度的观测能够更精确地观测周期跃变, 而要消除高精度观测数据的周期跃变成分, 需要更高频次地更新脉冲星星历, 特别是更新自转参数。

参考文献:

- [1] CHAMPION D J, HOBBS G B, MANCHESTER R N, et al. Measuring the mass of solar system planets using pulsar timing[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2010, 720(2): 201-205.
- [2] 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): 2780-2787.

- [3] PETIT G, TAVELLA P. Pulsars and time scales[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, 308(1): 290-298.
- [4] 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.
- [5] 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): 4013.
- [6] SHEIKH S I. The use of variable celestial X-ray sources for spacecraft navigation[D]. Maryland: University of Maryland, 2005.
- [7] BECKER W, BERNHARDT M G, JESSNER A. Autonomous spacecraft navigation with pulsars[J]. *Acta Futura*, 2013(7): 11-28.
- [8] GUO Q. LM-11 successfully launched XPNV-1[J]. *Aerospace China*, 2016, 17(4): 61.
- [9] 北斗网. 脉冲星试验 01 星在轨试验数据[EB/OL]. (2017-05-09)[2023-03-03]. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/201710/t20171010_824.html.
- [10] GENDREAU K, ARZOUMANIAN Z. Searching for a pulse[J]. *Nature Astronomy*, 2017.
- [11] GENDREAU K C, ARZOUMANIAN Z, ADKINS P W, et al. The Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER): design and development[J]. *Space Telescopes and Instrumentation*, 2016(9905.1H): 1-16.
- [12] PRIGOZHIN G, GENDREAU K, DOTY J P, et al. NICER instrument detector subsystem: description and performance[J]. *Space Telescopes and Instrumentation*, 2016(9905.1L): 1-12.
- [13] Astrophysics Science Division at NASA/GSFC. NICER mission overview[EB/OL]. (2020-08-24)[2023-03-01]. https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/nicer_about.html
- [14] Astrophysics Science Division at NASA/GSFC. Definition of TIME in NICER data files[EB/OL]. (2021-08-12)[2023-03-01]. https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/analysis_threads/time/
- [15] Astrophysics Science Division at NASA/GSFC. NICER analysis tips & caveats[EB/OL]. (2023-02-22)[2023-03-01]. https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/data_analysis/nicer_analysis_tips.html
- [16] DENEVA J S, RAY P S, LOMMEN A, et al. High-precision X-ray timing of three millisecond pulsars with NICER: stability estimates and comparison with radio[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019(874): 160-172.
- [17] International Astronomical Union. IAU 2006 Resolution B3[EB/OL]. (2020-03-12)[2023-03-01]. http://www.iau.org/static/resolutions/IAU2006_Resol3.pdf.
- [18] International Astronomical Union. IAU 2006 Resolution B1[EB/OL]. (2020-03-12)[2023-03-01]. https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2006_French.pdf.
- [19] FUKUSHIMA T. Time ephemeris and general relativistic scale factor[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, 5(261): 89-94.
- [20] LYNE A G, PRITCHARD R S, GRAHAM-SMITH F. Jodrell Bank Crab Pulsar Monthly Ephemeris[EB/OL]. (2020-03-21)[2023-03-01]. <http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/crab.html>.
- [21] 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.
- [22] SHAPIRO I I. Fourth test of general relativity[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(26): 789-791.
- [23] Jet Propulsion Laboratory. Planetary Ephemeris DE200[EB/OL]. (2020-02-15)[2023-03-01]. https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/.
- [24] 朱鸿旭, 童明雷, 杨廷高, 等. XPNV-1 卫星先期发布数据的计时分析[J]. *宇航学报*, 2019, 40(12): 1492-1500.
- [25] HAN M N, TONG M L, LI L S, et al. Steer the frequency of spaceborne clocks based on XPNV-1 observations[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(6): 226-278.
- [26] TAYLOR J H. Pulsar timing and relativistic gravity[J]. *Classical and Quantum Gravity: An International Journal of Gravity Geometry of Field Theories Supergravity Cosmology*, 1993, 10(S): 167-174.
- [27] 帅平, 李明, 陈绍龙, 等. X 射线脉冲星导航系统原理与方法[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 431-434.