中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 1 期: 219512
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 脉冲星测时阵探测纳赫兹引力波专题

FAST观测数据中脉冲星偏振校准对于测时噪声的影响

刘通[1,2], 潘之辰[1,2,3,4*], 钱磊[1,2,3,4]

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101
2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100048
3. 中国科学院FAST重点实验室, 北京 100101
4. 贵州大学, 贵州射电天文台, 贵阳 550025
*联系人, E-mail: panzc@bao.ac.cn

收稿日期: 2025-06-05; 接受日期: 2025-07-16; 网络出版日期: 2025-11-28
国家重点研发计划(编号: 2022YFC2205202)、国家自然科学基金(编号: 12173052, U2031119, 11773041, 11703047, 12173053)、中国科学院青年创新促进会(编号: Y2022027, 2018075)和中国科学院"西部之光"人才计划资助项目

摘要 脉冲星测时阵列(PTA)对纳赫兹引力波的探测已取得重要进展, 其中中国脉冲星测时阵获得了置信度最高的结果, 未来对于脉冲星测时的精度要求会不断提升. 本文基于FAST望远镜对球状星团脉冲星的偏振观测数据, 研究了偏振校准对脉冲星测时精度的影响. 我们选取了球状星团中M3D, M5E, M53A和NGC6760A 4颗脉冲星进行研究. 结果表明, 偏振校准可以使脉冲星获取脉冲到达时间(TOA)不确定度差值平均降低十至百纳秒量级. 其中, M3D和M5E的TOA不确定度的差值平均减少了642和89 ns, 分别是其标准差的1.7和2.2倍, 说明偏振校准对其测时精度提升较为明显. 另外, 偏振校准也会降低测时残差的均方根(RMS), 最高的M3D的测时残差RMS降低了390 ns, 同样说明偏振校准对测时精度有提升的作用. 校准前后的轮廓变化表明, TOA的精度的提升可能与脉冲宽度变窄有关, 而与尖锐程度和信噪比变化无关. 整体来看, 偏振校准能够提高TOA的测量精度和测时RMS, 是未来FAST脉冲星高精度测时的必要环节. 本研究结果为基于FAST的高精度脉冲星测时工作, 特别是在PTA探测纳赫兹引力波等方面, 提供了重要的技术支持.

关键词 脉冲星, 偏振校准, 脉冲星测时

PACS: 97.60.Gb, 95.75.Wx, 95.85.Bh

1 引言

脉冲星是自转高度稳定的中子星. 对脉冲星进行长期的测时观测, 可以得到其精确的天体测量参数, 如自转周期、周期变化率、位置等[1]. 测时结果发现, 如J0437-4715等典型毫秒脉冲星, 其自转周期变化率可低至10^{-20} s/s量级, 甚至更低[2,3]. 脉冲星测时表明其具有超过原子钟的稳定性, 使其能够成为一类新的用

引用格式: 刘通, 潘之辰, 钱磊. FAST观测数据中脉冲星偏振校准对于测时噪声的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 219512
Liu T, Pan Z C, Qian L. The impact of polarization calibration on pulsar timing noise in FAST's observations (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 219512, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0253

© 2025《中国科学》杂志社

于授时的时空基准. 而一组高度稳定的毫秒脉冲星可以组成脉冲星测时阵列(PTA), 是探测低频引力波、检验广义相对论的重要探针[4]. 目前全球主要的PTA及相关数据结果来自美国的NANOGrav[5]、欧洲的EPTA[6]、澳大利亚的PPTA[7]、印度的InPTA[8]、南非的MPTA[9]、中国的CPTA[10], 以及由多个PTA项目组成的国际脉冲星测时阵列(IPTA)[11]. 基于中国脉冲星测时阵列(CPTA)的研究发现了纳赫兹引力波的关键证据, 其置信度达到4.6σ[12]. 认证纳赫兹引力波的存在、测量其周期振幅等进一步的工作需要长期持续监测这些脉冲星, 这些工作都依赖于对观测数据中脉冲星测时噪声的抑制以及高精度校准.

脉冲星信号是高度偏振的[13]. 偏振信号的接收过程会引入测时噪声, 也有相应的方法予以校正. 如用全偏振(斯托克斯参数I, Q, U, V)模板替代总强度(斯托克斯参数I)的矩阵模板匹配方法(MTM), 可以将脉冲星测时精度提升4%–33%[14]. 通过解算I, Q, U, V残差向量的特征向量方法来捕捉脉冲星自身的随机噪声(SWIMS). 这种方法将J0437-4715的测时噪声精度提升了39%[15]. 通过MTM有效降低毫秒脉冲星的抖动噪声的方法, 降低幅度可达6.7%–39.6%[16]. 由此可见, 对脉冲星的偏振信息的处理, 对于其测时精度有至关重要的影响.

500 m口径射电望远镜(FAST)是目前世界上最大的单口径射电望远镜[17], 能够用来观测更暗弱信号和更高分辨率的结构. FAST的测试表明, 其增益达到了空前的16 K/Jy, 偏振观测的精度达到了6.6%[18]. FAST为脉冲星偏振和测时噪声研究提供了可靠的支持, 为研究脉冲星偏振轮廓带来了新机遇. 使用FAST探测低频引力波, 也对偏振校准提出了更高的要求.

球状星团脉冲星是一个特殊的脉冲星族群, 其中超过90%都是毫秒脉冲星[1)]. 这些毫秒脉冲星不仅为脉冲星测时研究提供了丰富的样本, 也为通过FAST研究脉冲星信号的偏振和辐射机制提供了机会. 在此前利用FAST共在17个球状星团中发现了超过60颗脉冲星, 如球状星团脉冲星M2A, M10A, M14A等[19]. 利用FAST的高灵敏度研究了球状星团中25颗脉冲星的偏振信号[20]. 这些成果都为脉冲星偏振和测时噪声研究提供了基础. 本文从上述工作中挑选了M3D, M5E, M53A和NGC6760A作为研究目标, 研究了偏振校准对脉冲星测时噪声的影响. 这4颗脉冲星的线偏振比例均大于30%, 是研究偏振信号接收过程中带来的测时噪声的合适观测目标.

本文在第2节介绍了数据来源和数据处理方法以及相应的结果, 第3节是结果和讨论, 第4节是总结.

2　数据来源和数据处理

2.1　目标的筛选及观测

在此前的工作中, 我们已经利用FAST对其天区内共计25颗球状星团脉冲星完成了偏振校准[20]. 为了研究偏振对测时噪声的影响, 我们在其中遴选了线偏振比例大于30%的脉冲星作为目标. 球状星团脉冲星受闪烁影响严重[21], 其流量密度快速变化. 为了获得足够的测量精度, 我们选用了其中信噪比最高的一次观测数据进行后续处理. 脉冲星J1801-0857D (NGC6517D)的线偏振比例也超过30%, 然而其信噪比不足15, 因此被舍去. 最终本文的研究目标定为J1312+1810A (M53A), J1342+2822D (M3D), J1518+0204E (M5E)和J1911+0102A (NGC6760A).

观测数据获取使用了FAST的19波束接收机, 观测仅记录中心波束数据, 观测频率范围是1–1.5 GHz, 记录4路偏振数据. 观测的原始数据经过ROACH2模块[2)]进行数字化处理, 分为4096个频率通道, PSRFITS格式为最终的数据文件格式. 数据包含AA, BB, AB和BA 4个偏振分量, 每个频率通道带宽为122 kHz, 采样时间为49.152 μs. 每次观测的前1 min开启噪声管. 噪声管开关周期为0.2 s, 噪声输出采用高功率模式(~12.5 K), 以用于偏振校准. 目标源和观测的详细信息如表1所示[20,22–24].

2.2　偏振校准

噪声二极管信号以及脉冲星信号均使用DSPSR软件包[25]进行折叠. 折叠得到的脉冲星平均脉冲轮廓由512个相位点组成, 子积分长度为10 s. 用于折叠的星历信息来源同表1参考文献. 我们使用PSRCHIVE中

1) https://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/pfreire/GCpsr.html.
2) 由Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research (CASPER) 开发, 详见http://casper.berkeley.edu/.

表 1　4个目标脉冲星的基本参数及观测信息. 线偏振比例参考见文献[13], 其余的星历信息参考见最后一列

Table 1　Basic parameters and observation information of the four target pulsars. The linear polarization fractions are referenced from ref. [13], while the remaining ephemeris information is referenced in the last column of the table

脉冲星		周期 (ms)	色散 (cm^{-3} pc)	观测日期	积分时间 (s)	信噪比	线偏振比例 (%)	星历参考
J1342+2822D	M3D	5.44	26.4	2024-09-24	11700	19.3(2)	44(6)	[20]
J1518+0204E	M5E	3.18	29.3	2022-02-16	7200	81.8(1)	45(3)	[22]
J1312+1810A	M53A	33.16	25.0	2024-10-07	12900	96.7(0)	56(1)	[23]
J1911+0102A	NGC6760A	3.62	202.7	2024-09-30	6600	88.4(1)	31(2)	[24]

的PAZI程序对噪声和脉冲星轮廓消除了射电干扰[26]. 由于FAST 19波束接收机的有效频带范围为1.05–1.45 GHz, 我们去除了1.00–1.05与1.45–1.50 GHz两个边缘频段. 我们还根据文献信息经验性地去除了FAST已知的射电干扰[27], 包括1085–1095, 1200–1215以及1260–1285 MHz等频率范围对应的数据.

在射电望远镜的信号处理中, 通常用缪勒矩阵$\mathbf{M}$来描述接收机对本征信号的影响(式(1))[28]. 其中$\mathbf{S}_{\rm src}$为目标源或噪声的本征信号, $\mathbf{S}_{\rm obs}$为接收机所接收到的信号. 偏振校准中, 我们首先通过已知的噪声信息来反推接收系统的缪勒矩阵$\mathbf{M}$, 然后再以此改正接收到的脉冲星信号$\mathbf{S}_{\rm obs}$来获得脉冲星本征的偏振信息, 即$\mathbf{S}_{\rm src}$.

$$\mathbf{S}_{\rm obs} = \mathbf{M}\cdot\mathbf{S}_{\rm src}. \tag{1}$$

我们使用PSRCHIVE中的PAC程序实现上述处理, 并使用RMFIT测量脉冲星的法拉第旋转量(RM), 然后使用PAM程序根据获取的RM值对偏振轮廓进行重新校准. 在偏振校准前后, 脉冲星的总功率平均脉冲轮廓会产生一定的变化. 4颗脉冲星校准前后的平均脉冲轮廓对比图以及差分强度图如图1所示.

这一过程消除了望远镜在接收脉冲星线偏振比例过程中, 不同通路增益差异带来的脉冲轮廓变化, 从而提高了测时精度. 我们通过对比校正前后的脉冲轮廓, 分析在真实FAST观测数据中这一过程抑制测时噪声的作用.

2.3　获取脉冲到达时间(TOA)和测时噪声

将每颗脉冲星偏振校准前后的平均脉冲轮廓分别作为模板, 用来从观测数据中获取TOA. 使用PSRCHIVE中的PAAS程序对平均脉冲轮廓进行手动高斯拟合, 并获得脉冲轮廓模板. 为了消除手动选择轮廓带来的影响, 对每个脉冲轮廓进行了5次拟合, 并将结果取平均值处理. 后续如无特别提及, 则测量结果都是指5次测量的平均值. 我们使用PAM和PAT程序获取TOA, 每次观测叠加成8个TOA. 我们使用TEMPO2软件获取了偏振校准前后测时残差的均方根(RMS)[28], 并用手动指定非脉冲区的方式获取了偏振校准前后的噪声RMS.

2.4　测量信噪比与脉冲宽度

偏振校准会影响脉冲轮廓的形状. 我们通过测量信噪比和脉冲宽度来定量描述偏振校准前后轮廓的变化. 首先对脉冲轮廓进行归一化处理, 然后获取了脉冲区的峰值以及非脉冲区的平均值和标准差, 用来计算信噪比. 信噪比误差ΔS/N的计算方法如式(2)[29], 其中$\sigma_{\rm off}$为非脉冲区的标准差, $N_{\rm on}$为脉冲区的采样点数.

$$\Delta{\rm S/N} \approx \frac{\sigma_{\rm off}}{\sqrt{N_{\rm on}}}. \tag{2}$$

我们分别计算了脉冲轮廓峰值10%和50%的宽度(W_{10}和W_{50}). 对M5E有多个相对独立的脉冲成分的情况, 我们分别获取了2个主要子脉冲的宽度. 脉冲宽度σ_W测量的误差主要来自轮廓采样点数和信噪比, 其计算方法如式(3)所示[29]. 其中, k为常数, 本文取2; W为脉冲宽度的测量值; S/N为信噪比测量值; $N_{\rm bin}$为脉冲轮廓采样点数, 本工作中均为512.

$$\sigma_W \approx \frac{k\cdot W}{{\rm S/N}\cdot\sqrt{N_{\rm bin}}}. \tag{3}$$

我们还计算了脉冲轮廓的有效宽度W_s, 其定义如式(4)所示[30]. 其中, $\Delta\phi$为脉冲轮廓的相位分辨率, $I(\phi_{i+1})$和$I(\phi_i)$表示相邻两个相位点的归一化后的总能量值. 这一参数的倒数表示了脉冲轮廓的尖锐程度. W_s值越低则表示轮廓尖锐程度越低.

$$W_s = \frac{\Delta\phi}{\sum_i [I(\phi_{i+1}) - I(\phi_i)]^2}. \tag{4}$$

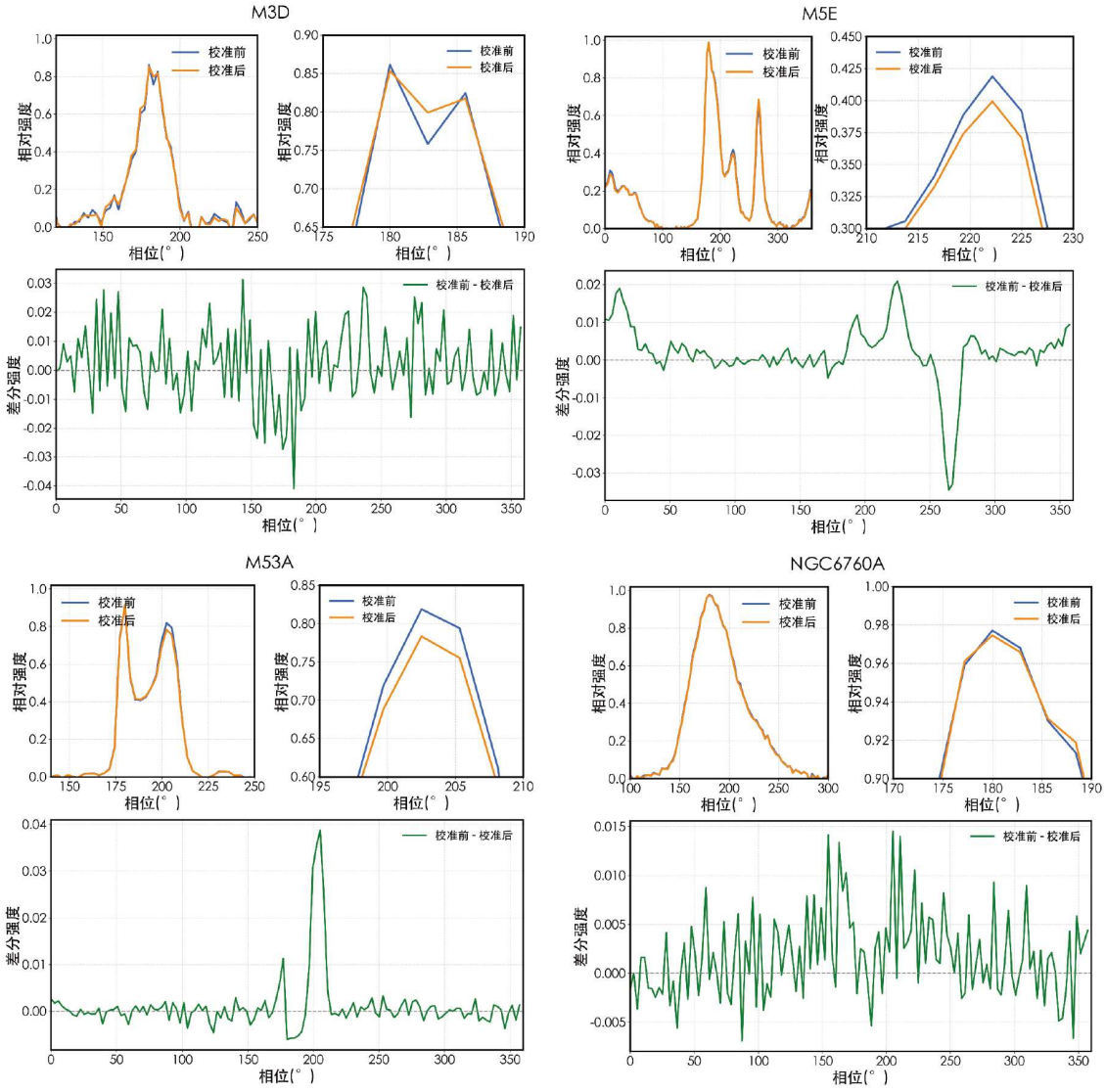


图 1　本文中4颗目标脉冲星在偏振校准前后的轮廓对比. 每个子图的左上为脉冲星校准前后的总轮廓, 右上为放大的局部轮廓. 其中蓝色、橘色线条分别表示偏振校准前和后的轮廓. 图中去掉了部分无脉冲的区域. 每个子图的下半部分为校准前的轮廓强度减去校准后的轮廓强度. 因为校准前后的轮廓都已归一化, 相减仅示意轮廓变化, 不表示流量上的定量差别

Figure 1　Comparison of pulse profiles before and after polarization calibration for the four target pulsars in this study. In each panel, the top-left subplot shows the total pulse profile before and after calibration, and the top-right subplot presents a zoomed-in view of the main pulse region. Blue and orange lines represent the profiles before and after polarization calibration, respectively. Some off-pulse regions have been omitted. The bottom subplot shows the difference between the uncalibrated and calibrated profile intensity (uncalibrated minus calibrated). Since both profiles have been normalized, the subtraction only indicates the shape differences and does not reflect quantitative differences in flux.

3　结果和讨论

我们获得了M3D, M5E, M53A和NGC6760A在偏振校准前和后的TOA以及TOA不确定度, 如表2所示. 图2给出了偏振校准前后TOA不确定度的对比情况. 可以看到, M3D, M5E以及NGC6760A的每一个TOA不确定度都在偏振校准后有所降低. M53A的个别TOA不确定度在偏振校准后比校准前有所增大, 但TOA不确定度差值的平均值在校准之后仍有所降低.

在定量分析方面, 我们分别计算了这4颗脉冲星在偏振校准前后, TOA不确定度差值的平均值以及标准差. TOA不确定度差值最明显的是M3D, 平均降低了

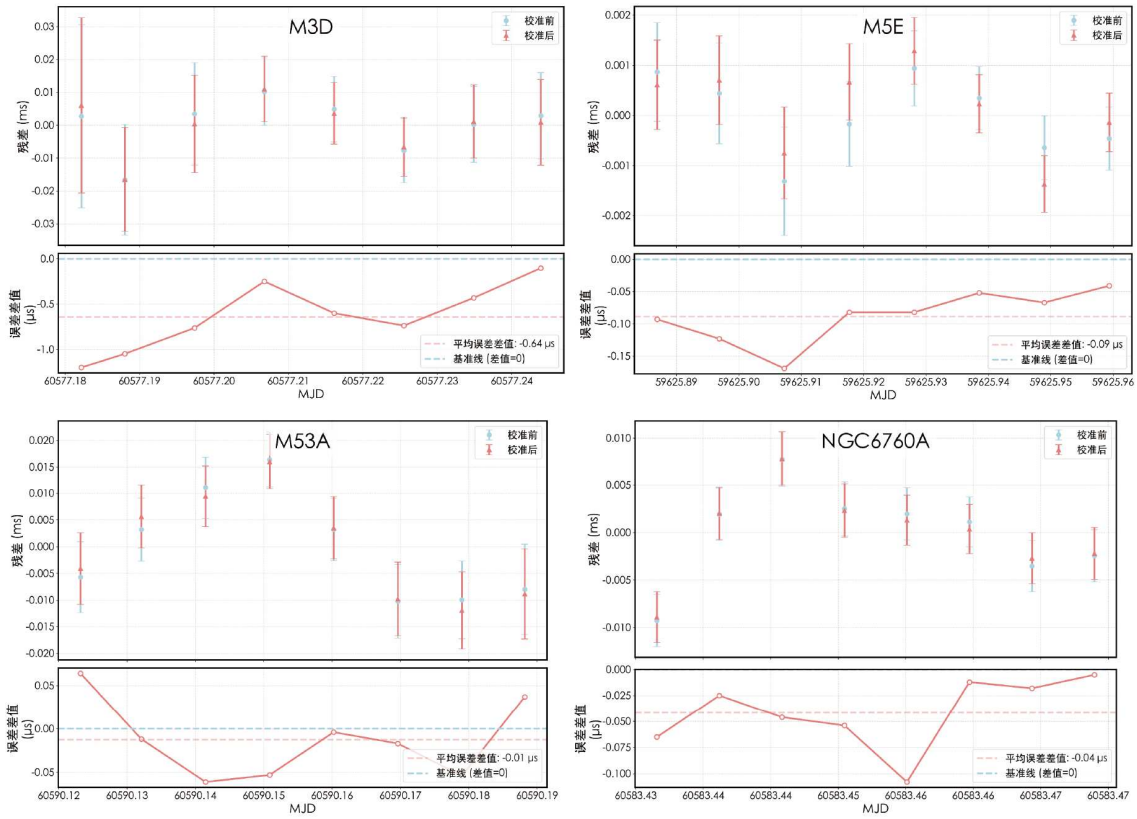


图 2　偏振校准前后，TOA不确定度的对比图. 所有蓝色的点表示偏振校准前的数据点，而橘色的点和线表示偏振校准后的. 每个子图的上半部分为TOA残差图，误差棒即TOA的不确定度. 可以看到，偏振校准并不显著影响TOA残差在星历表附近的分布. 每个子图的下半部分为偏振校准之后减去之前的TOA不确定度的差值示意图. TOA不确定度差值距离基准线越远表示精度提升越明显. 红色虚线为TOA不确定度差值的平均值. 从图可知, 4颗脉冲星的TOA不确定度的平均值均有不同程度的降低. 脉冲星M3D和NGC6760A的星历表不够准确, 为了表现TOA不确定度的变化, 我们拟合了F0, 除此以外, 表征的测时结果根据星历表直接得出

Figure 2　Comparison of TOA uncertainties before and after polarization calibration. All blue points represent data before calibration, while orange points and lines represent data after calibration. The upper part of each subplot shows the TOA residuals, with error bars indicating TOA uncertainties. Polarization calibration does not significantly affect the distribution of TOA residuals relative to the ephemerides. The lower part of each subplot illustrates the difference in TOA uncertainties after subtracting the pre-calibration values. The further the difference is from the baseline, the more significant the improvement in timing precision. The red dashed line indicates the mean difference in TOA uncertainties. As shown, the average TOA uncertainty decreases to varying degrees for all four pulsars. For M3D and NGC6760A, the ephemerides were not sufficiently accurate, so we fitted F0 to highlight changes in TOA uncertainties. Except for this adjustment, the presented timing results are derived directly from the provided ephemerides.

642 ns，是其标准差的1.7倍，说明测时精度显著提升. M5E的TOA不确定度平均降低了89 ns，是其标准差的2.2倍，同样变化显著. NGC6760A的TOA不确定度差值的平均值为42 ns, 是其标准差的1.2倍. 尽管这4颗脉冲星中, M53A的线偏振比例达到了56%, 它的TOA不确定度降低得最不明显，平均仅为10 ns且显著小于其标准差. 由此我们认为, 偏振校准对M53A的测时精度没有影响.

M3D，M5E和NGC6760A在偏振校准后的测时RMS也有所降低，其中M3D最为明显，达到390 ns. M53A的测时RMS没有变化. 4颗脉冲星测时RMS的整体变化趋势与TOA不确定度的变化趋势相符. 此外, 只有M3D在偏振校准后的噪声RMS有轻微的降低，其余3颗脉冲星的都没有变化. 这说明偏振校准对我们目标脉冲星的基线影响几乎可以忽略.

偏振校准前后的脉冲宽度W_{10}，W_{50}，有效宽度W_s以及信噪比如表3所示. 可以看到，M3D，M5E和NGC6760A在偏振校准后的脉冲宽度都有所降低，而仅前两者的信噪比几乎不变. 由此，我们推断TOA不确定度的降低可能和脉冲宽度变窄有一定的相关性. M53A的脉冲宽度W_{50}校准后有所增加，且M53A的

表 2　脉冲星在偏振校准前后的TOA和TOA不确定度比较. 第五列是第三列和第四列的差; 第六列是第五列的均值; 第七列是第五列的标准差. 第八列和第九列分别为偏振校准前后的测时残差和噪声RMS

Table 2　Comparison of TOAs and TOA uncertainties before and after polarization calibration for the pulsars. The fifth column shows the difference between the third and fourth columns; the sixth column is the mean of the fifth column; the seventh column is the standard deviation of the fifth column. The eighth and ninth columns show the RMS of timing residuals and noise before and after polarization calibration, respectively

脉冲星	TOA MJD	校准前的TOA不确定度 (μs)	校准后的TOA不确定度 (μs)	TOA不确定度的差值 (μs)	TOA不确定度差值的平均值 (μs)	TOA不确定度差值的标准差 (μs)	测时RMS (μs)	噪声RMS (μs)
M3D	60577.18218	27.863	26.663	1.200	0.642	0.377	51.97 (校准前) 51.58 (校准后)	0.044 (校准前) 0.043 (校准后)
	60577.18802	16.835	15.786	1.049				
	60577.19740	15.569	14.806	0.763				
	60577.20677	10.207	9.958	0.249				
	60577.21615	9.969	9.369	0.600				
	60577.22552	9.762	9.024	0.738				
	60577.23490	11.571	11.140	0.431				
	60577.24392	13.146	13.044	0.102				
M5E	59625.88692	0.984	0.891	0.093	0.089	0.041	0.96 (校准前) 0.92 (校准后)	0.006 (校准前) 0.006 (校准后)
	59625.89687	1.007	0.884	0.123				
	59625.90729	1.082	0.913	0.169				
	59625.91771	0.842	0.760	0.082				
	59625.92812	0.748	0.666	0.082				
	59625.93854	0.632	0.580	0.052				
	59625.94896	0.634	0.567	0.067				
	59625.95937	0.625	0.584	0.041				
M53A	60590.12321	6.649	6.731	−0.082	0.010	0.049	9.85 (校准前) 9.85 (校准后)	0.009 (校准前) 0.009 (校准后)
	60590.13212	5.895	5.883	0.012				
	60590.14149	5.787	5.726	0.061				
	60590.15087	5.201	5.148	0.053				
	60590.16024	5.832	5.828	0.004				
	60590.16962	6.922	6.906	0.016				
	60590.17899	7.302	7.248	0.054				
	60590.18819	8.442	8.479	−0.037				
NGC6760A	60583.43657	2.741	2.676	0.065	0.042	0.034	85.32 (校准前) 85.20 (校准后)	0.011 (校准前) 0.011 (校准后)
	60583.44120	2.766	2.741	0.025				
	60583.44583	2.882	2.836	0.046				
	60583.45046	2.848	2.794	0.054				
	60583.45509	2.745	2.637	0.108				
	60583.45972	2.614	2.602	0.012				
	60583.46435	2.712	2.694	0.018				
	60583.46898	2.738	2.733	0.005				

TOA不确定度和测时RMS在校准前后相差甚微. 我们推断一方面这是由于M53A有较长的自转周期(33 ms), 另一方面也说明在偏振校准前后, 信噪比的变化并不是影响测时噪声的主要因素. 此外, M3D, NGC6760A和M53A的W_s在偏振校准后有所增加, 而M5E的有所降低, 这与TOA不确定度或测时RMS的变化趋势并不相符. 因此我们认为, TOA不确定度的降低, 可能是由更复杂的脉冲轮廓变化机制所导致的.

在我们的工作中, 脉冲星信号是否经过偏振校准是唯一被改变的因素, 而其余处理均保持一致. 因此, 我们认为, 偏振校准前后的TOA不确定度和测时RMS即表明偏振校准带来的脉冲星测时噪声抑制情况. 偏

表 3　目标脉冲星在偏振校准前后的脉冲宽度W_{10}, W_{50}, 有效宽度W_s和信噪比. 其中M5E有2个主要的子峰, 我们对2个子峰分别测量了脉冲宽度

Table 3　Pulse widths (W_{10}, W_{50}), effective width W_s, and signal-to-noise ratios of the target pulsars before and after polarization calibration. For M5E, which has two main components, the pulse widths of both components were measured separately

脉冲星	脉冲宽度W_{10} (°)		脉冲宽度W_{50} (°)		有效宽度W_s (°)		信噪比	
	校准前	校准后	校准前	校准后	校准前	校准后	校准前	校准后
M3D	58.14(11)	53.23(10)	21.76(4)	22.21(4)	4.04	4.15	19.3(2)	19.0(2)
M5E-1	67.50(2)	67.50(2)	27.83(1)	27.70(1)	6.41	6.21	81.8(1)	81.8(1)
M5E-2	32.97(1)	31.99(1)	13.22(0)	13.08(0)				
M53A	41.47(11)	41.46(11)	26.66(1)	27.64(1)	3.60	3.74	96.7(0)	98.9(0)
NGC6760A	110.31(3)	110.02(3)	53.09(2)	51.89(2)	21.23	21.24	88.4(1)	83.6(1)

振校准对于4颗脉冲星的TOA不确定度总体提升在十至数百纳秒量级, 对测时RMS降低最高可达390 ns. 这一结果表明偏振校准对PTA的高精度测时有重要影响. 而且, PTA脉冲星信号远强于本文中用于测试的4颗脉冲星信号, 其轮廓变化对测时噪声更加敏感, 要求的测时精度更高. 因此, 对于测时噪声仅数百纳秒的PTA脉冲星, 偏振校准流程在脉冲星测时、搜索纳赫兹引力波等工作中是必要的.

另外, 本文仅仅讨论了在单次观测中, 偏振校准对于改正脉冲轮廓在信号接收过程中带来的精度提高, 并未涉及在维持脉冲轮廓稳定性方面多次观测开展的分析. FAST是高灵敏度的射电望远镜, 根据本文的工作, 我们也会继续研究多次观测数据的校准结果并分析对于测时噪声的抑制情况.

4　总结

本文选取了M3D, M5E, M53A和NGC6760A 4个流量密度高且线偏振比例高的毫秒脉冲星, 利用FAST的高灵敏度研究了偏振校准对其测时噪声的影响. 具体结论如下.

(1) 4颗毫秒脉冲星在偏振校准前后, TOA不确定度差值的平均值均有所降低, 幅度在10–642 ns不等. 其中M3D和M5E的TOA不确定度的平均降低幅度是TOA不确定度差值的标准差的1.7–2倍, 说明偏振校准对其测时精度提升显著.

(2) 偏振校准降低了脉冲星的测时残差的RMS, 其中最为明显的M3D降低了390 ns. 这从另一方面说明了偏振校准能够有效提升测时精度.

(3) 4颗脉冲星在偏振校准前后, 脉冲宽度、有效宽度和信噪比均有所变化. 我们定性地推断, 测时精度的提高与脉冲宽度变窄有一定相关性, 而与轮廓的尖锐程度和信噪比的变化暂无相关性. 其测时精度的提高可能是由于更复杂的轮廓变化机制导致的.

(4) 本文中对脉冲星测时精度提升在十至数百纳秒量级, 这对于PTA脉冲星的高精度观测影响巨大. 另外, PTA脉冲星的流量密度远高于本文中的脉冲星, 可以推断其轮廓变化对于偏振校准更加敏感. 因此, 我们建议将偏振校准应用于FAST的高精度测时的数据处理中. 而对于新发现的, 尤其是暗弱的脉冲星, 偏振校准的影响并不显著.

本文基于FAST的观测数据处理结果表明, 偏振校准能够有效降低脉冲星测时噪声在数十至数百纳秒量级, 是对脉冲星展开高精度计时观测的必要环节. 本研究为PTA脉冲星探测纳赫兹引力波等提供了重要的技术参考.

致谢　本工作使用了中国国家重大科技基础设施——500 m口径球面射电望远镜(FAST)的观测数据, 该望远镜由中国科学院国家天文台运行

参考文献

1　Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system. Astrophys J, 1975, 195: L51

2 Johnston S, Lorimer D R, Harrison P A, et al. Discovery of a very bright, nearby binary millisecond Pulsar. Nature, 1993, 361: 613–615
3 Reardon D J, Bailes M, Shannon R M, et al. The neutron star mass, distance, and inclination from precision timing of the brilliant millisecond pulsar J0437-4715. Astrophys J Lett, 2024, 971: L18
4 Detweiler S. Pulsar timing measurements and the search for gravitational waves. Astrophys J, 1979, 234: 1100
5 Agazie G, Alam M F, Anumarlapudi A, et al. The NANOGrav 15 yr data set: Observations and timing of 68 millisecond pulsars. Astrophys J Lett, 2023, 951: L9
6 Antoniadis J, Babak S, Bak Nielsen A S, et al. The second data release from the European Pulsar Timing Array. I. The dataset and timing analysis. Astron Astrophys, 2023, 678: A48
7 Zic A, Reardon D J, Kapur A, et al. The Parkes Pulsar Timing Array third data release. Publ Astron Soc Aust, 2023, 40: e049
8 Tarafdar P, Nobleson K, Rana P, et al. The Indian Pulsar Timing Array: First data release. Publ Astron Soc Aust, 2022, 39: e053
9 Miles M T, Shannon R M, Bailes M, et al. The MeerKAT Pulsar Timing Array: First data release. Mon Not R Astron Soc, 2022, 519: 3976–3991
10 Xu J, Jiang J, Xu H, et al. The Chinese Pulsar Timing Array data release. I. Polarimetry for 56 millisecond pulsars. Astron Astrophys, 2025, 695: A173
11 Perera B B P, DeCesar M E, Demorest P B, et al. The International Pulsar Timing Array: Second data release. Mon Not R Astron Soc, 2019, 490: 4666–4687
12 Xu H, Chen S, Guo Y, et al. Searching for the nano-Hertz stochastic gravitational wave background with the Chinese Pulsar Timing Array data release I. Res Astron Astrophys, 2023, 23: 075024
13 Lyne A G, Smith F G. Linear polarization in pulsating radio sources. Nature, 1968, 218: 124–126
14 van Straten W. Radio astronomical polarimetry and high-precision pulsar timing. Astrophys J, 2006, 642: 1004–1011
15 Osłowski S, van Straten W, Demorest P, et al. Improving the precision of pulsar timing through polarization statistics. Mon Not R Astron Soc, 2013, 430: 416–424
16 Wang S Q, Wang N, Wang J B, et al. Pulse jitter and single-pulse variability in millisecond pulsars. Astrophys J, 2024, 964: 6
17 Nan R, Li D I, Jin C, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project. Int J Mod Phys D, 2011, 20: 989–1024
18 Jiang P, Tang N Y, Hou L G, et al. The fundamental performance of FAST with 19-beam receiver at L band. Res Astron Astrophys, 2020, 20: 064
19 Pan Z, Qian L, Ma X, et al. FAST globular cluster pulsar survey: Twenty-four pulsars discovered in 15 globular clusters. Astrophys J Lett, 2021, 915: L28
20 Liu T, Wang L, Pan Z. Polarization profiles of globular cluster pulsars from FAST. I. 25 profiles from previously known pulsars. Res Astron Astrophys, 2025, 25: 065021
21 Li B, Zhang L, Yao J, et al. Timing and scintillation studies of pulsars in globular cluster M3 (NGC 5272) with FAST. Astrophys J, 2024, 972: 43
22 Zhang L, Freire P C C, Ridolfi A, et al. Discovery and timing of millisecond pulsars in the globular cluster M5 with FAST and Arecibo. Astrophys J Suppl Ser, 2023, 269: 56
23 Lian Y, Pan Z, Zhang H, et al. Discovery and timing analysis of new pulsars in globular cluster NGC 5024: New observations from FAST. Astrophys J Lett, 2023, 951: L37
24 Freire P C C, Hessels J W T, Nice D J, et al. The millisecond pulsars in NGC 6760. Astrophys J, 2005, 621: 959–965
25 Straten W, Bailes M. DSPSR: Digital signal processing software for pulsar astronomy. Publ Astron Soc Aust, 2011, 28: 1–14
26 Hotan A W, van Straten W, Manchester R N. PSRCHIVE and PSRFITS: An open approach to radio pulsar data storage and analysis. Publ Astron Soc Aust, 2004, 21: 302–309
27 Zhang H Y, Wu M C, Yue Y L, et al. RFI measurements and mitigation for FAST. Res Astron Astrophys, 2020, 20: 075
28 Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. TEMPO2, a new pulsar-timing package-I. An overview. Mon Not R Astron Soc, 2006, 369: 655–672
29 Lorimer D R, Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
30 Dai S, Hobbs G, Manchester R N, et al. A study of multifrequency polarization pulse profiles of millisecond pulsars. Mon Not R Astron Soc, 2015, 449: 3223–3262

The impact of polarization calibration on pulsar timing noise in FAST's observations

LIU Tong[1,2], PAN ZhiChen[1,2,3,4*] & QIAN Lei[1,2,3,4]

[1] *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[2] *School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100048, China*
[3] *Key Laboratory of FAST, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[4] *Guizhou Radio Astronomy Observatory, Guizhou University, Guiyang 550025, China*
**Corresponding author (email: panzc@bao.ac.cn)*

Pulsar timing arrays (PTAs) have made significant progress in the detection of nano-Hertz gravitational waves, with the Chinese Pulsar Timing Array (CPTA) achieving the highest-confidence results to date. As such, the demand for improved pulsar timing precision will continue to grow. In this study, we investigated the impact of polarization calibration on pulsar timing accuracy using polarization observation data of globular cluster pulsars obtained with the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST). We selected four pulsars—M3D, M5E, M53A, and NGC6760A—for detailed analysis. The results show that polarization calibration can reduce TOA (time-of-arrival) uncertainties by an average of tens to hundreds of nanoseconds. Specifically, the average TOA uncertainties for M3D and M5E were reduced by 642 and 89 ns, respectively, corresponding to 1.7 and 2.2 times their standard deviations—indicating a significant improvement in timing precision. Additionally, polarization calibration reduces the root-mean-square (RMS) of timing residuals, with M3D showing a reduction of up to 390 ns, further confirming its beneficial impact. Changes in pulse profiles before and after calibration suggest that the improvement in TOA precision is likely associated with narrower pulse widths, rather than changes in pulse sharpness or signal-to-noise ratio (S/N). Overall, polarization calibration enhances both TOA measurement accuracy and timing residual RMS, making it an essential step for high-precision pulsar timing with FAST. These findings provide important technical support for precision pulsar timing with FAST, particularly in the context of PTA-based nano-Hertz gravitational wave detection.

pulsar, polarization calibration, pulsar timing

PACS: 97.60.Gb, 95.75.Wx, 95.85.Bh

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0253