中国科学 : 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 1 期 : 219510
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

射电脉冲星计时阵计时噪声抑制技术的机遇和挑战

李祎丰[1,3], 潘之辰[2,3,4*], 戴印丰[5,6], 钱磊[2,3,4], 李保达[7], 李耀威[8]

1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600
2. 中国科学院国家天文台, 北京 100101
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 贵州大学贵州射电天文台, 贵阳 550025
5. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875
6. 北京师范大学文理学院, 珠海 519087
7. 贵州大学物理学院, 贵阳 550025
8. 湖南师范大学物理与电子科学学院, 长沙 410081
*联系人, E-mail: panzc@nao.cas.cn

收稿日期: 2025-09-11; 接受日期: 2025-11-27; 网络出版日期: 2025-12-11
国家重点研发计划(编号: 2022YFC2205202, 2020SKA0120100, 2020SKA0120201)、国家自然科学基金(编号: 12173052, U2031119, 11773041, 11703047)、中国科学院青年创新促进会(编号: 2023064, 2018075, Y2022027)和中国科学院“西部之光”人才计划资助项目

摘要 射电脉冲星计时阵(Pulsar Timing Array, PTA)通过测量并分析脉冲星的信号到达时间(Time of Arrival, TOA)来探测低频引力波. 其中, TOA误差的降低, 即计时噪声的组成和鉴别方法以及抑制技术, 是提升脉冲星计时精度的重要研究方向. 本文归纳总结了各射电PTA的基本情况, 脉冲星计时噪声的主要成分和相应的噪声抑制方法, 分析了这些噪声的起源及其对计时精度的影响, 使用FAST真实观测数据简单探讨了在高灵敏度条件下射电PTA面临的机遇与挑战. 计时噪声的鉴别是开展相关研究工作的基础, 多种模型的应用使得当今各PTA能实现空前的精度, 如CPTA对多个脉冲星已经实现了低于100 ns的计时精度. 在高灵敏度下, 我们建议开始着手考虑包括脉冲星信号轮廓随频率演化等更多会导致产生计时噪声的因素. 随着更多大口径射电望远镜的建设和投入使用, 借助空前的灵敏度和天空覆盖, 将为PTA 探测低频引力波带来更多的机遇.

关键词 射电脉冲星计时阵, 脉冲星计时噪声, 计时精度

PACS: 95.30.Sf, 98.62.Dr, 98.70.Sa

1 引言

脉冲星是高速旋转的致密天体, 其自转周期稳定性使得可以借助研究其脉冲到达时间(Time of Arrival, TOA)进行高精度天体物理量测量成为可能[1]. 毫秒脉冲星是自转周期短于30 ms的脉冲星, 一般认为其通过

引用格式: 李祎丰, 潘之辰, 戴印丰, 等. 射电脉冲星计时阵计时噪声抑制技术的机遇和挑战. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 219510
Li Y-F, Pan Z-C, Dai Y-F, et al. Opportunities and challenges of noise suppression technology for radio pulsar timing array (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 219510, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0389

© 2025 《中国科学》杂志社

中子星吸积伴星物质加速而形成. 毫秒脉冲星表面磁场比普通脉冲星表面磁场低4个量级, 其自转变化率比普通脉冲星更小, 自转更稳定[2]. 借助数十颗高稳定性毫秒脉冲星组成的脉冲星计时阵(Pulsar Timing Array, PTA), 探测极微弱的低频引力波成为可能. PTA的构想起源于20世纪70年代[3], 时至今日有我国的CPTA (Chinese Pulsar Timing Array)[4]、欧洲的EPTA (European Pulsar Timing Array)[5]、印度的InPTA (Indian Pulsar Timing Array)[6]、使用位于南非的望远镜的MPTA (MeerKAT Pulsar Timing Array)[7]、美国的NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves)[8]和澳大利亚的PPTA (Parkes Pulsar Timing Array)[9]等PTA组织. 为了整合资源、提升探测能力, 国际上还成立了IPTA (Intrernational Pulsar Timing Array)即国际脉冲星计时阵[10]. 2023年6月, 包括CPTA, NanoGrav, PPTA和EPTA 在内的脉冲星计时阵宣布得到低频引力波存在的证据, 其中CPTA在4.6σ置信度水平上发现了具有纳赫兹引力波特征的四极相关信号证据[11], 其他脉冲星计时阵数据最高置信度仅为4.0σ[5–9,12].

PTA使用自转周期更为稳定的毫秒脉冲星, 这些脉冲星所处的环境相对干净, 很少受周围星体影响. 各PTA由于观测设备灵敏度以及天空覆盖的差异, 列入日常观测的PTA脉冲星数量有所差异. 各PTA组织共计对131颗脉冲星进行了观测, 根据最近的文章, 其中CPTA包含57颗脉冲星[4], EPTA第二次数据释放包含了25颗脉冲星[5], 而实际上监测的脉冲星至少有42颗[13], InPTA的第二次数据释放包含了27颗脉冲星[6], MPTA的4.5年数据包含了83颗脉冲星[7], NANOGrav的15年数据包含了68颗脉冲星[8], PPTA的第三次数据释放包含32颗脉冲星[9]. 其中, J0030+0451, J0613-0200, J1024-0719, J1643-1224, J1713+0747, J1744-1134和J2145-0750是上述所有PTA共同观测的脉冲星. 上述脉冲星的简要情况见补充文件.

本文总结归纳并简单分析各PTA的基本信息. 第2节分析了各PTA和其中脉冲星选择标准、测量精度, 并且讨论了PTA脉冲星中一些经典和极端的例子; 第3节讨论现今计时噪声的主要影响因素; 第4节讨论了当前使用的降低计时噪声的方法; 第5节结合FAST观测数据分析了高灵敏度带来的机遇和挑战; 第6节是结论.

2 各PTA的脉冲星选择标准、观测频段差异和计时精度

灵敏度是直接影响脉冲星计时精度的重要因素之一. CPTA当前使用500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)[14], 配置了19波束L 波段接收机, 观测频率为1.0–1.5 GHz. FAST是当今灵敏度最高的单天线射电望远镜, 由于FAST的地理位置和观测天顶角的限制, 其可观测天区为约赤纬–14°至+66°的区域. 目前, CPTA基于57颗毫秒脉冲星3年(2019 年6月–2022年10月)的FAST观测数据. 发布了纳赫兹引力波的探测结果[11]以及第一次计时噪声的分析[4]. 凭借FAST空前的灵敏度, 这57颗脉冲星计时残差的约化χ^2均低于1, 计时精度能达到百纳秒量级结果, 计时误差最低的脉冲星J0154+1833能够达到30 ns[11]. 需要指出的是, PTA脉冲星J0437-4715是非常重要且明亮的观测目标, 使用40 m口径的射电望远镜即可获得优于400 ns的计时精度[15]. PTA的科学目标是探测纳赫兹引力波, 更大口径望远镜的观测意味着将J0437-4715的计时残差降低到可能几十纳秒甚至更低的水平, 这对于探测振幅极小的引力波信号(10 nm量级)是有决定性作用的. 可惜的是, 它的位置非常偏南, FAST无法观测.

EPTA主要使用德国Effelsburg的100 m口径射电望远镜、英国Jodrell bank的76 m口径Lovell射电望远镜、法国Nançay的等效于94 m的中星仪式望远镜、意大利Sardinia的64 m射电望远镜以及荷兰Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT)的14台25 m口径的射电望远镜. 观测数据能够覆盖从300 MHz到4 GHz. 受限于望远镜都位于欧洲, 最靠南的脉冲星J1909-3744仅Nançay望远镜可以有效观测. EPTA的第二次数据释放加入了印度uGMRT的3.5年在300–500和1260–1460 MHz频段的同步观测数据, 因此数据包含25颗脉冲星, 计时精度最高的J1909-3744能够达到140 ns[5].

InPTA的主要观测设备是印度的uGMRT, 由30台45 m的望远镜组成. uGMRT观测覆盖4个频带, 分别是120–250, 250–500, 550–850和1050–1450 MHz, InPTA主要在其300–500和1260–1460 MHz进行脉冲星

的双频同步观测[6]. InPTA观测是通过将uGMRT分成多个子阵列来进行的, 同时在不同的频带中观测同一个源, 每个频带的带宽为100或200 MHz. InPTA最南能观测到J0437-4715, 最北能观测到J1125+7819, 观测范围能够基本覆盖南天, 其中精度最高的脉冲星J1022+1001计时残差达到1095 ns[6].

MPTA数据来源于Karoo Array Telescope (MeerKAT, “Meer”为南非语“多”)的观测. MeerKAT由64台口径13.5 m的望远镜构成, 有3个主要观测频段: UHF频段(580–1015 MHz, 数字采样范围为544–1088 MHz)、L频段(900–1670 MHz, 数字采样范围为856–1712 MHz)和S频段(1750–3500 MHz, 分为5个子频段). MeerKAT主要在L频段观测PTA脉冲星[7]. MeerKAT可以认为是平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometer Array, SKA)中频孔径阵列的前身, 展现了未来SKA射电望远镜的性能趋势. MPTA发布了2019年2月–2023年8月83颗脉冲星的L频段观测结果, 其中最南和最北的脉冲星分别为J1036-8317和J2229+2643, 计时精度最高的脉冲星为J1909-3744, 但未给出具体的计时精度. MPTA第一次数据释放给出了J1909-3744的计时误差能够达到76 ns, 此数据释放包含78颗脉冲星, 其中计时精度最高的脉冲星J2241+5236, 达到了49 ns[16].

NANOGrav主要使用的望远镜包括美国305 m口径Arecibo射电望远镜、100 m口径GBT (Robert C. Byrd Green Bank Telescope), 以及由27台25 m口径望远镜组成的VLA (Very Large Array), 覆盖了327 MHz–3 GHz观测频段[8]. Arecibo射电望远镜在FAST完工前是世界最大单口径射电望远镜. 首颗毫秒脉冲星J939+2134 (B1937+21)[17]和首个脉冲双星系统J1915+1606 (B1913+16)[18]都是由其发现的. 通过观测B1913+16的轨道衰减间接证实了引力波的存在, 这一工作获得了1993年诺贝尔物理学奖[18]. Arecibo射电望远镜具有与FAST类似的结构, 观测天区覆盖赤纬约0–40°范围. Arecibo射电望远镜为NANOGrav提供在327, 430, 1400以及2100 MHz 4个频段的数据. Arecibo射电望远镜在2020年12月垮塌, 其在PTA方面的观测就此终止, 而其他望远镜一直持续观测至今. 多种望远镜的结合使得NANOGrav具有非常广阔的天空覆盖, 其观测的最南最北的脉冲星分别为J0437-4715和J1125+7819, 最高计时精度的脉冲星是J1939+2134, 能够达到57 ns[8].

PPTA使用的是澳大利亚Parkes射电望远镜(Murriyang), 口径64 m, 在700, 1400和3100 MHz[19] 3个频段持续了18年以上的脉冲星观测[9]. 近几年更新了接收机系统, 配备了频率覆盖为704–4032 MHz的超宽带接收机[19]. Parkes望远镜位于南天, 其观测的脉冲星也主要位于南天. 在PPTA第三次数据释放中包含的32颗脉冲星, 其中仅有6颗位于北天, 且最北的脉冲星赤纬仅为21°. PPTA正在观测的毫秒脉冲星有10颗以上计时精度优于1000 ns, 其中精度最高的计时观测J1939+2134计时误差在特定频段能够达到50 ns[9].

各PTA的简要信息归纳如表1所示.

综上所述, 各PTA的计时精度主要受限于望远镜的灵敏度. 在保证灵敏度的前提下, 更大的天区覆盖或许能带来更多的探测机遇. 当今的PTA脉冲星计时精度基本达到μs量级或者达到更高精度, 在这一精度下对于观测数据的校准以及排除观测设备带来的计时噪声显得更加重要. 一些经典的PTA脉冲星, 如J0437-4715, J1939+2134 (B1937+21), J1713+0747以及J1022+1001等都是PTA的首选观测目标, 而同时各PTA的脉冲星选择也考虑了灵敏度和可用观测时间的因素. Arecibo射电望远镜的垮塌必然会影响NANOGrav的后续数据, 随着时间的推移, 可否使用包括GBT和VLA在内的望远镜弥补这一损失将受到检验. 而我国正在建设的新疆奇台射电望远镜(QiTai radio Telescope, QTT)[20]、计划建设的云南景东望远镜(Jingdong Radio Telescope, JRT)[21]和已经建成的吉林桦甸百米级全可动射电望远镜[1], 也会为PTA的观测带来更多机遇.

3 射电PTA计时噪声的主要成分

在PTA观测中, 高精度的TOA测量对于探测纳赫兹引力波背景至关重要. 然而, 观测数据中普遍存在各种类型的噪声, 对其进行建模和区分, 可以加强共同谱过程的识别和分析. 根据各PTA项目的观测结果, PTA计时数据中的噪声来源复杂, 主要涵盖白噪声、非色散红噪声、色散噪声与散射噪声等多个物理机制[7].

1) 吉林市人民政府. 2024. 中国科学院国家天文台120 m射电雷达系统项目2024年度收官总结会在桦甸市召开. 取自www.jlcity.gov.cn.

表 1 主要脉冲星计时阵列(PTA) 组织情况

Table 1 The organization of the main pulsar timing array (PTA)

名称	成立时间 成员国/地区	主要观测望远镜	观测频段 (GHz)	脉冲星数量	计时噪声 (μs)	参考文献
中国脉冲星计时阵列(CPTA)	2016年 中国	FAST 500 m等	1.00–1.50	57	0.030–0.500	[11]
欧洲脉冲星计时阵列(EPTA)	2005年 德国、英国、法国、荷兰、意大利等	Effelsberg 100 m、Jodrell Lovell 76 m、Nançay射电望远镜、WSRT等	0.30–4.00	42	0.130–34.500	[13]
印度脉冲星计时阵列(InPTA)	2015年 印度	uGMRT (upgraded GMRT)等	0.30–1.46	27	1.095–28.114	[6]
南非脉冲星计时阵列(MPTA)	2014年 南非	MeerKAT等	0.90–1.67	78	0.049–5.539	[16]
北美纳赫兹引力波天文台(NANOGrav)	2007 年 美国、加拿大	GBT 100 m、Arecibo 305 m射电望远镜(2020年前)等	0.32–3.00	68	0.057–9.907	[8]
澳大利亚脉冲星计时阵列(PPTA)	2004年 澳大利亚	Parkes 64 m (Murriyang)射电望远镜等	0.70–3.00	32	0.110–69.000	[9]

白噪声(White Noise)本质上是指时间上不相关的高频随机噪声. 主要来源为望远镜接收机的有限系统温度和TOA估计中的系统误差. 对其参数化建模, 可以通过以下3个参数进行描述[7]: (1) EFAC (E_F), 是TOA不确定度的缩放因子, 用于校正估算误差, 通常值接近为1. 如果显著偏离1可能表明系统或者模板存在问题; (2) EQUAD (E_Q), 表示系统级误差的等效白噪声(如射频干扰白噪声), 与频率无关; (3) ECORR (E_C), 通道相关噪声, 由同一观测中分通道数据间的相关性引起(如抖动噪声)[22,23]; 在所有PTA数据中, 白噪声都普遍存在, 需要针对不同后端和频段进行独立建模.

非色散红噪声(Achromatic Red Noise)表现为TOA的长期、低频相关性漂移, 其功率谱密度通常符合幂律形式$P(f) \propto f^{-\gamma}$, 其中$\gamma_{\rm Red} \approx$1.5–3.5 [7]. 其可能的物理来源包括脉冲星自转不稳定性, 如中子星内角动量交换[24]与磁层扭矩扰动[25]; 星周介质扰动, 如围绕脉冲星的行星或小行星带;还有来自引力波背景信号(Stochastic Gravitational Wave Background, SGWB)的贡献. 非色散红噪声的存在可能与SGWB信号产生混淆, 因此准确建模至关重要[7].

色散(Dispersion Measure, DM)噪声源于星际介质(InterStellar Medium, ISM)中自由电子密度的湍流变化, 表现为TOA随观测频率变化的漂移, 延迟形式为$\Delta t \propto \nu^{-2}$[26]. 其功率谱亦常采用幂律形式建模, 但引入了频率依赖项. 色散噪声在许多脉冲星中显著存在(例如MeerKAT 样本中有58颗脉冲星需建模色散噪声)[7]; 且可能与太阳风效应存在关联, 因此常需使用协方差联合建模.

散射噪声(Scattering Noise)是由ISM中小尺度结构引起的多路径传播效应, 延迟呈$\Delta t \propto \nu^{-\alpha}$[27]. 然而, 实际情况中由于星际介质或折射效应, α 值可能发生偏移[28]. 目前通常将散射指数α作为自由参数进行拟合建模(MeerKAT亦采用该策略).

准确建模各类噪声不仅是提高TOA精度的基础, 更是探测纳赫兹引力波背景信号的前提. 未来的PTA工作需进一步细化噪声模型, 包括非幂律噪声的建模、ISM效应的动态建模、噪声成分的解耦和系统误差的量化. 从现在的工作来看, 未来需要延长观测时间并采用多软件验证方法, 以确保共同谱信号的可靠识别与分析.

4 PTA计时噪声的主要抑制方法

随着下一代望远镜的启用和观测灵敏度的提升, 针对脉冲星建立合适的噪声模型并进行分析将变得越来越重要. 白噪声(如热噪声、散粒噪声)是脉冲星观测中最基础的噪声源, 主要通过优化数据处理实现抑制[7]. 使用大口径望远镜(如FAST和MeerKAT)和

低噪声接收机, 降低系统温度, 提升观测灵敏度, 过能够减少热噪声的影响[29]. 白噪声的抑制主要通过覆盖更宽的观测频率范围(如1–8 GHz)以及利用傅里叶域相干消色散技术(Frequency-Domain De-dispersion Technique, FDDT)提高信噪比(S/N)[30]. 采用脉冲轮廓模板匹配和参数化噪声模型, 修正TOA不确定性中的白噪声成分[31].

非色散红噪声(如脉冲星自转不稳定性、双星轨道扰动)具有低频相关性, 需通过统计噪声建模和多源联合分析区分. 基于贝叶斯证据比较, 选择包含红噪声的最优模型(如幂律谱模型), 利用Arrival-Darling统计量验证残差分布[32]. 通过PTA中多颗脉冲星的红噪声交叉相关性, 分离固有红噪声与随机引力波背景等共同信号[12]. 延长观测时间(如10年以上), 提高低频段频谱分辨率, 也可能精确表征红噪声的谱指数和幅度[33].

色散主要由星际自由电子引起, 会导致低频信号延迟. 色散噪声(星际介质电子密度波动)和散射噪声(脉冲展宽)是频率相关的星际介质噪声, 需通过物理建模和动态校正抑制. 采用时变色散模型(如随机游走模型)拟合色散残差[6], 捕捉ISM的随机变化, 并结合全球大气模型(如ECMWF)修正地球大气对色散的影响[5]. 利用不同频率下的散射时间, 通过频域去卷积或贝叶斯散射模型, 可以一定程度从TOA残差中分离散射噪声[32].

在实际的PTA观测中包含多种噪声源, 为了避免不必要地参数扩展, 各PTA普遍通过构建噪声预测模型来进行噪声抑制[7]: 基于贝叶斯证据比较, 结合到达时间模型和脉冲星参数化噪声, 为每颗脉冲星选择最可能的噪声模型, 并使用Arrival-Darling统计量[34]检验去噪残差是否符合预期的χ^2分布. 若噪声扣除后的残差通过该检验, 且归一化χ^2接近1, 则认为噪声模型可接受.

应用上述方法, 针对不同的噪声抑制需求, CPTA, EPTA, MPTA和NANOGrav等都进行了噪声抑制模型的构建[4,5,7,12].

EPTA使用TempoNest进行贝叶斯时序分析, 结合红噪声、色散噪声和系统噪声模型, 引入Shapiro延迟和年轨道视差等效应修正噪声模型. EPTA与InPTA数据联合处理, 通过多通道分析验证了噪声抑制模型的稳定性[7], 提出共同谱假设分离GWB信号与个体噪声, 利用高斯过程动态色散模型精确修正ISM效应[13]. EPTA第二批数据释放中J1843-1113去噪前的计时误差为3470 ns, 去噪后计时误差能够达到810 ns[5].

MPTA采用功率谱密度模型描述共同非相关红噪声, 并假设其谱指数与超大质量黑洞双星产生的引力波背景一致. MPTA噪声抑制模型在频率覆盖范围的高频段部分显著降低了白噪声水平, 使加权计时残差中位数降至500 ns[7]. 其中计时精度最高的J1909-3744去噪后计时误差由392 ns降至76 ns[16].

NANOGrav基于15年数据使用自由谱和幂律模型分析红噪声和GWB信号, 引入“BayesWave” 通道验证噪声与信号的分离. NANOGrav的平均观测带宽(1.2 GHz)显著高于EPTA(0.6 GHz), 白噪声抑制效率更高, 对低色散脉冲星(DM < 30 pc cm^{-3}) J0437-4715计时误差去噪后能够达到110 ns[8].

PPTA第三次数据释放结合超宽带接收机观测, 改进了色散测量和散射噪声的校准方法. 其噪声模型通过多频段动态谱分析优化, J1713+0747的计时误差去噪后可达110 ns[9].

CPTA提出了标准噪声模型包括3个白噪声、2个红噪声、2个动态色散和2个用于色散年变化的参数[4]. CPTA将噪声优化大致分为3个步骤, 首先进行参数确定, 通过贝叶斯模型比较, 优化频率箱数量和高频截止频率等关键参数; 噪声分析时利用TEMPONEST[35], ENTERPRIS[36], 42 和42++[37] 开展单脉冲星噪声特性分析; 最后基于贝叶斯因子最大化原则, 确定最优噪声抑制模型. CPTA依托FAST望远镜的灵敏度优势, 能分解红噪声、色散测量噪声等成分, 并通过4套独立贝叶斯分析流程交叉验证模型可靠性. 由于数据时间跨度较短, 部分噪声项(如白噪声与红噪声)之间存在协变性问题, 限制了低频噪声的分离能力[12]. 随着观测的持续, 这些问题是很有可能解决的. 各种噪声抑制方法的综合应用以及各种噪声模型的建立使得当今各PTA的观测数据已达到数百纳秒水平. 随着更高灵敏度观测设备的建设和更多观测的开展, 利用PTA探测低频引力波也会面临更多的挑战.

5 高灵敏度下PTA面临的机遇和挑战

引力波的测量为人类探索宇宙开辟了新途径, 而PTA是目前已知唯一检测纳赫兹波段引力波的有效

方法[4]. 当前的PTA计时精度受限于望远镜灵敏度、带宽等多个因素. 单纯的灵敏度提升并不能直接满足更高精度的计时需求. 在高灵敏度下, 观测设备自身引入的计时噪声, 如钟差、不同偏振信号通路的增益差等, 都会更加显著. 因而, 对于数据校准方法和脉冲星计时噪声的鉴别要求也会相应提高. 以FAST为例, 不同偏振信号通路的增益差异会带来数十纳秒的计时噪声, 且对于不同的脉冲星因其偏振分量不同也存在差异. 另外, FAST的增益稳定性、天线效率的稳定性, 也可能随不同的指向、天气、季节、昼夜等因素发生变化, 都需要校正. 这些之前并非重要的计时噪声产生因素现在可能都需要考虑. 同时, 对于脉冲星辐射机制和数据处理方法的研究也需要深入, 包括对于脉冲星辐射机制的新理解以及对于TOA获取方法的新突破. 在更高的灵敏度下, 不同频率下脉冲轮廓的些许差异即有可能带来百纳秒甚至更多的噪声. 这些噪声对于探测低频引力波的影响同样也是非常显著的.

典型的脉冲星信号覆盖约百MHz至数GHz频率范围, 脉冲轮廓相对复杂, 并非多个高斯成分简单叠加, 且随频率变化而演化[38]. 我们简单采用FAST对于PTA脉冲星J1713+0747的一次观测数据来简单探索脉冲星脉冲轮廓轻微变化带来的计时噪声变化. 脉冲星J1713+0747是PTA中观测最多的脉冲星之一, 自20世纪90年代被发现以来, 已被Arecibo射电望远镜、GBT、FAST等全球大型射电望远镜连续观测超过30年, 其自转周期为4.57 ms, 独特的物理属性和长期稳定的观测表现使其成为脉冲星计时研究的关键目标之一[39], 其参数由psrcat获得, 如表2所示. 它在2021年4月发生脉冲轮廓的变化[40], 这一变化对利用它探测低频引力波产生了一定程度的影响. 我们使用这一变化之前, 即FAST在2020年8月24日的观测数据进行测试, 数据中心频率为1250 MHz, 总带宽500 MHz, 观测时间55 min. 使用的程序包括PRESTO[41]和PSRCAT[42].

我们按照表2参数, 使用PRESTO中的prepfold程序折叠观测数据, 设置脉冲轮廓由1024个点组成, 由此获得了整个观测频段(1000–1500 MHz)的脉冲平均轮廓. 随后, 通过设置prepfold命令的-ignorechan参数忽略的通道范围, 分别得到f1 (1000–1125 MHz), f2 (1125–1250 MHz), f3 (1250–1375 MHz)和f4 (1375–1500 MHz) 4个子频带的脉冲平均轮廓. 获取TOA的过程是比较平均脉冲轮廓与观测数据得到的轮廓的过程. 所以, 为了便于看出脉冲轮廓的区别, 我们将上述各脉冲轮廓归一化并画图表示, 如图1所示.

表 2 脉冲星J1713+0747 的参数

Table 2 Model parameters of pulsar J1713+0747

PSRJ	J1713+0747
RAJ (hms)	17:13:49.5331917
DECJ (dms)	07:47:37.49258
DM (cm^{-3} pc)	15.99180
PEPOCH	55000
F0 (Hz)	218.8118404171605
F1 (s^{-2})	-4.08385×10^{-16}
PMRA	4.9215

需要说明的是, 这里的脉冲轮廓取1024个点来自经验. 这一数值在数据处理中一般会选择在32–4096之间的一个数字. 一方面, 对于比较强的脉冲星, 尤其是PTA脉冲星或者是脉冲轮廓较为复杂的脉冲星, 平均脉冲轮廓的精细刻画有助于提高计时精度. 另一方面, 对于平均脉冲轮廓较为平缓的脉冲星, 使用过多的点会降低信号信噪比从而引入计时误差. 为了排除过多因素的影响以及使用合理的数值, 我们的工作仅分析单次观测并且经验性地选取了平均脉冲轮廓的点数.

图上可以看出, 不同子频带的脉冲星轮廓均有细微差异, 且差异沿脉冲轮廓缓慢变化, 并不是由随机噪声所带来的. 为了验证这些差异是否会带来计时误差的增加, 我们分别使用全部频段的脉冲轮廓和各个子频带的脉冲轮廓来获取每一个子频带数据的TOA. 每个子频带获取128个TOA, 每个TOA对应25.78 s的观测时间, 如图2所示. 每一子频带, 以及全部的带宽下, TOA的均值和标准差如表3所示.

由此可以见, 在误差标准差相差无几的情况下, 除1125–1250 MHz外, 每个子频带用各自的平均脉冲轮廓得到的TOA的误差显著小于使用总轮廓得到的TOA误差. 因此, 我们可以认为, 在高灵敏度下, 脉冲轮廓的轻微差异的确导致了计时噪声的产生. 并且, 我们也可以认为, 脉冲轮廓的差异带来的计时噪声大约为几十至百纳秒量级, 对于当前的引力波探测来说是值得考量的计时噪声产生因素.

然后, 我们用另一简单实验来分析脉冲星轮廓的复杂程度. 如果将整个观测频段分成更多子频带, 将会进一步细化脉冲轮廓随频率而演化的规律. 而同时, 在

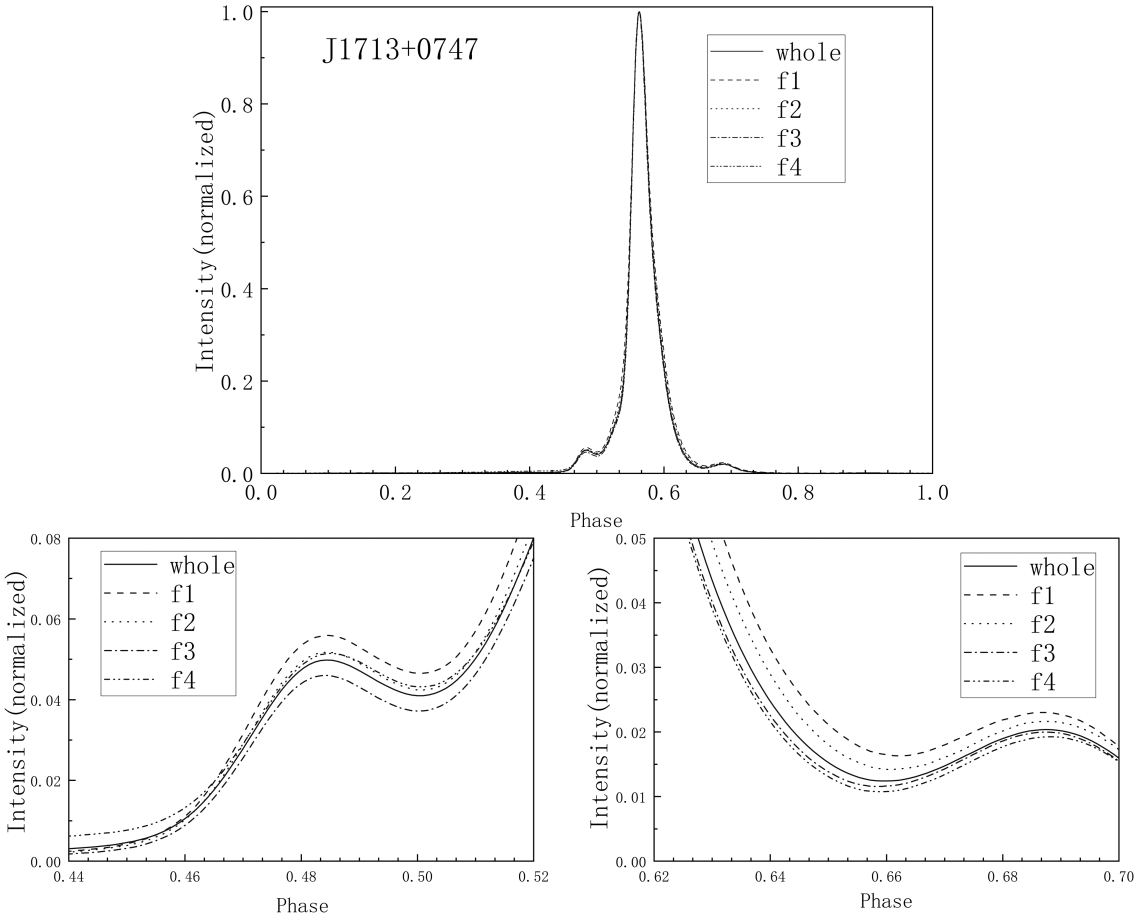


图 1 脉冲星子频段平均轮廓对比. 脉冲星J1713+0747的轮廓均源自FAST在2020年8月24日的观测, 由PRESTO中的prepfold程序折叠观测数据, 设置脉冲轮廓由1024个点组成并进行了标准化处理, 所有轮廓已按脉冲相位对齐, 并以各自的峰值强度进行归一化. 各子图中, whole对应FAST整个观测频段, 即1000–1500 MHz, f1, f2, f3和f4分别对应1000–1125, 1125–1250, 1250–1375和1375–1500 MHz. 上图: 对比了全频段轮廓. 左下图: 对上图相位0.44–0.52区域的放大; 右下图: 对上图相位0.62–0.70区域的放大

Figure 1 Comparison of average Pulsar Profiles in segmented Frequency Bands. All profiles were generated from FAST observations on 24 August 2020. The observational data were folded using the prepfold routine in PRESTO, producing profiles with 1024 phase bins that were subsequently standardized. All profiles are aligned in pulse phase and normalized to their respective peak intensities. In each panel, "whole" corresponds to the full FAST observing band (1000–1500 MHz), while f1, f2, f3, and f4 represent the sub-bands 1000–1125, 1125–1250, 1250–1375, and 1375–1500 MHz, respectively. The main panel displays a comparison of the full-band profiles. The bottom-left inset shows a magnified view of the phase range 0.44–0.52 from the main panel, and the bottom-right inset provides a magnification of the phase range 0.62–0.70.

每一个子频带中, 带宽的减小也会带来信噪比的降低. 我们将观测频段分成1, 2, 4, 8, 16, 32, 64和128个子频带, 用每个子频带各自的脉冲轮廓来获取各自子频带的TOA. 每个子频带获取的TOA数目均是128, 随后计算这128个TOA误差的均值.

我们猜测, 在信号足够强且脉冲轮廓不随频率演化时, 无论分成几个子频带, TOA的误差不会发生显著变化. 如果这个脉冲星在不同频率下的脉冲轮廓差异显著, 那么这个轮廓的差异可能会在计时噪声中占主导. 因此, 计时噪声将会呈现和频率子带数目不太相关的某种分布.

结果如图3所示, 都有至少一组TOA的误差均值在200 ns以下, 而误差均值的最大值在分成8个或更多子频带后显著增加. 右侧直方图为切分128个子频带时的TOA误差分布, 表明59个TOA误差都小于300 ns. 在已证实这一脉冲星脉冲轮廓随频率变化且这一变化影

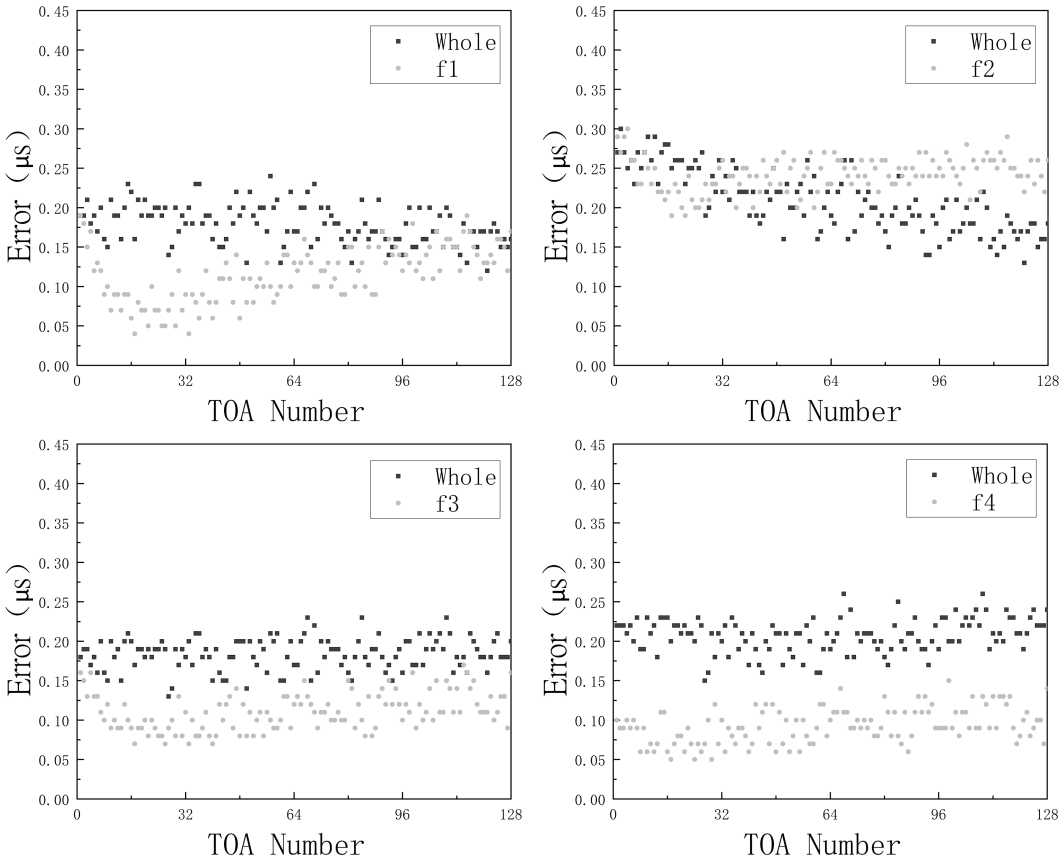


图 2 子频段中脉冲星计时残差对比. 4个图中f1, f2, f3和f4分别对应1000–1125, 1125–1250, 1250–1375和1375–1500 MHz, whole对应FAST整个观测频段, 即1000–1500 MHz. 横坐标为TOA的序数, 纵坐标为TOA的误差. 结果表明相同子频段内, 子频带轮廓获得的计时残差和全频带轮廓的计时残差相比, 除f2频段外都有显著的降低

Figure 2 Comparison of pulsar timing errors in segmented frequency bands. The four panels (f1, f2, f3, f4) correspond to the sub-bands 1000–1125, 1125–1250, 1250–1375, and 1375–1500 MHz, respectively. "Whole" represents the full FAST observing band (1000–1500 MHz). The *x*-axis shows the TOA index, and the *y*-axis displays the timing error. Results demonstrate that within the same sub-band, the timing errors obtained using the sub-band-specific profiles are significantly reduced compared to those derived from the full-band profile, with the exception of the f2 sub-band.

表 3 使用不同脉冲轮廓模板TOA 误差的均值与标准差

Table 3 The mean and standard deviation of TOA using different pulse profile templates

	1000–1125 MHz		1125–1250 MHz		1250–1375 MHz		1375–1500 MHz		1000–1500 MHz
	总轮廓	子轮廓	总轮廓	子轮廓	总轮廓	子轮廓	总轮廓	子轮廓	总轮廓
误差均值(μs)	0.18	0.11	0.21	0.24	0.18	0.11	0.21	0.09	0.19
误差标准差(μs)	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03

响计时精度的前提下, 我们认为随着切分出的子频带数增加而依然保持较低计时误差的子频带表现了信号的强度依然足够. 而闪烁、RFI消除等原因, 导致一些子带的信号强度降低, 因而计时误差就显著升高了. 因此, 我们认为, 在高灵敏度观测数据中, 尤其是在信号强度足够的前提下, 尝试使用同时考虑时域和频域的二维模板拟合并获得TOA是值得的.

脉冲星的脉冲轮廓普遍认为存在随着频率的演化. 在典型的观测频率上, 脉冲星观测大约会覆盖不超过1 GHz的频率范围. 目前, Parkes望远镜已经有超宽带接收机(704–4032 MHz)[19], FAST也有用于测试的超宽带接收机(500–3300 MHz)[43,44]. 配合FAST空前

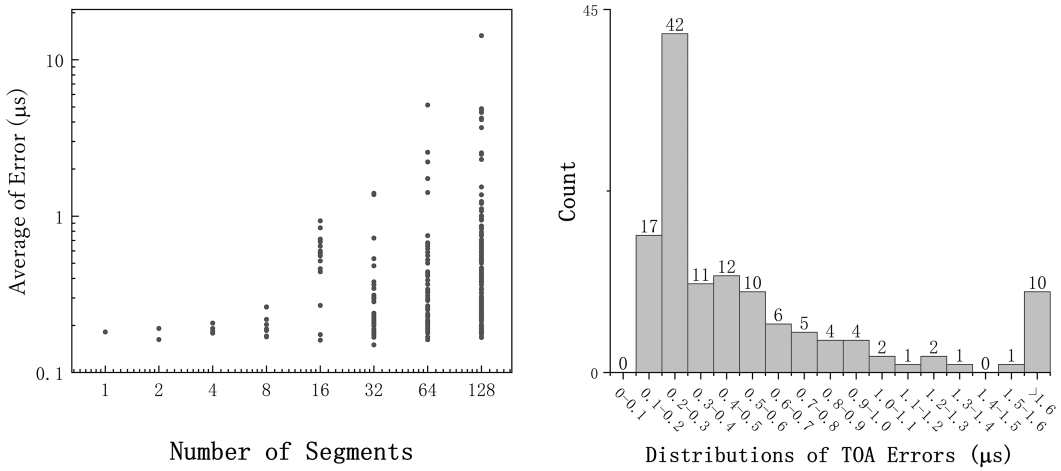


图 3 脉冲星子带切分段数对应计时残差结果(左图)与脉冲星子频带切分128段对应计时残差均值频数分布直方图(右图). 左图展示了基于同一观测数据、采用不同子频带切分数量(1–128段)所获得的计时残差. 纵坐标采用对数尺度, 展示计时精度与频带切分精细度之间的关系. 右图为切分128个子频带时计时误差的分布情况, 横坐标为计时误差分布区间, 纵坐标为分布数

Figure 3 The number of segments of the pulsar subband corresponds to the timing error result (left) and the histogram of the mean frequency distribution of the timing errors corresponding to the 128-segment segmentation of the pullsar sub-frequency band (right). Left: Timing errors obtained from the same dataset employing different numbers of sub-band segments (1 to 128). The logarithmic *y*-axis illustrates the relationship between timing precision and segmentation granularity. Right: Frequency distribution histogram of timing errors for the 128-segment case, with the *x*-axis showing error distributions and the *y*-axis indicating counts.

的灵敏度, 我们相信使用超宽带接收机能得到更高计时精度的观测数据. 我们使用FAST数据的尝试证实了在FAST观测数据中脉冲星脉冲轮廓的频率演化对于计时的影响. 若使用覆盖更大频率范围的接收机, 使用时域和频域的二维模板拟合或许是必要的. 我们已经尝试使用FAST现有观测设备来研究更大频率范围下的脉冲星轮廓演化, 相关工作正在开展, 争取尽快发表.

上述简单的数据分析仅仅讨论了在更高灵敏度下一个典型的脉冲星在不同频率下脉冲轮廓的变化以及由此带来的计时噪声. 此外, 如具备更大带宽, 或处理更多的PTA 脉冲星, 面临的数据处理难度可想而知. 高灵敏度观测设备毫无疑问将会带来低频引力波探测的更多新机遇, 有望进一步打开低频引力波这一全新的观测窗口, 在实现这一愿景之前, 有大量的原创性的工作需要完成.

6 结论

综上所述, 本文结论如下:

(1) 目前, CPTA, EPTA, InPTA, MPTA, NANOGrav和PPTA在观测或者有观测数据的PTA脉冲星共有131颗, 各PTA都在进行观测的PTA脉冲星有7颗.

(2) 各PTA的差异主要在于观测设备, 观测脉冲星数量和观测频段. 目前活跃的PTA组织有CPTA, EPTA, InPTA, NANOGrav, PPTA和MPTA等.

(3) 当前, PTA数据中的噪声来源主要包括白噪声、红噪声(色散和非色散)、散射噪声等. 此外, PTA脉冲星稳定性还会受如脉冲星自身脉冲轮廓稳定性以及观测设备的影响.

(4) 当前各PTA已就各种噪声建模并予以抑制. 这些噪声模型共同作用, 使得当前PTA的最高计时精度已低于100 ns.

(5) 对FAST观测J1713+0747的数据处理结果能够发现在一定的带宽下, 脉冲星轮廓将会有差异, 而这种差异能够带来脉冲星计时残差较为明显的影响, 频率相关的脉冲星轮廓变化确实影响计时精度.

在高灵敏度下, 机遇与挑战并存. 简单的测试表明对脉冲星脉冲轮廓的更精细刻画会带来脉冲星计时精度的提高. 随着更多大口径射电望远镜的建设和投入观测, 无论在观测时间和天空覆盖, 还是在灵敏度等诸多方面, 都将带来更多机遇更多发现.

参考文献

1 Lorimer D R, Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2012
2 Yin D J, Zhang L Y. Statistical analysis of physical parameters of pulsars. Acta Astron Sin, 2023, 64: 83–95
3 Sazhin M V. Opportunities for detecting ultralong gravitational waves. Sov Astron, 1978, 22: 36–38.
4 Chen S, Xu H, Guo Y, et al. The Chinese Pulsar Timing Array data release I. Single pulsar noise analysis. Astron Astrophys, 2025, 699: A165
5 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
6 Rana P, Tarafdar P, Nobleson K, et al. The Indian Pulsar Timing Array data release 2: I. Dataset and timing analysis. Publ Astron Soc Aust, 2025, 42: e108
7 Miles M T, Shannon R M, Reardon D J, et al. The MeerKAT Pulsar Timing Array: The 4.5-yr data release and the noise and stochastic signals of the millisecond pulsar population. Mon Not R Astron Soc, 2025, 536: 1467–1488
8 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
9 Zic A, Reardon D J, Kapur A, et al. The Parkes Pulsar Timing Array third data release. Publ Astron Soc Aust, 2023, 40: e049
10 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
11 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
12 Agazie G, Anumarlapudi A, Archibald A M, et al. The NANOGrav 15 yr data set: Evidence for a gravitational-wave background. Astrophys J Lett, 2023, 951: L8
13 Desvignes G, Caballero R N, Lentati L, et al. High-precision timing of 42 millisecond pulsars with the European Pulsar Timing Array. Mon Not R Astron Soc, 2016, 458: 3341–3380
14 Nan R, Li D. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project. IOP Conf Ser-Mater Sci Eng, 2013, 44: 012022
15 Luo J T, Gao Y P, Yang T G, et al. Pulsar timing observations with Haoping Radio Telescope. Res Astron Astrophys, 2020, 20: 111
16 Miles M T, Shannon R M, Bailes M, et al. The MeerKAT Pulsar Timing Array: First data release. Mon Not R Astron Soc, 2023, 519: 3976–3991
17 Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system. Astrophys J, 1975, 195: L51
18 Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C, et al. A millisecond pulsar. Nature, 1982, 300: 615–618
19 Hobbs G, Manchester R N, Dunning A, et al. An ultra-wide bandwidth (704 to 4032 MHz) receiver for the Parkes radio telescope. Publ Astron Soc Aust, 2020, 37: e012
20 Wang N, Xu Q, Ma J, et al. The Qitai radio telescope. Sci China-Phys Mech Astron, 2023, 66: 289512
21 Wang M, Xu Y H, Wang J C, et al. Jingdong 120-m pulsar radio telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 119501 [汪敏, 徐永华, 王建成, 等. 景东120 m口径全可动脉冲星射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 119501]
22 Shannon R M, Osłowski S, Dai S, et al. Limitations in timing precision due to single-pulse shape variability in millisecond pulsars. Mon Not R Astron Soc, 2014, 443: 1463–1481
23 Parthasarathy A, Bailes M, Shannon R M, et al. Measurements of pulse jitter and single-pulse variability in millisecond pulsars using MeerKAT. Mon Not R Astron Soc, 2021, 502: 407–422
24 Melatos A, Link B. Pulsar timing noise from superfluid turbulence. Mon Not R Astron Soc, 2014, 437: 21–31
25 Cheng K S. Outer magnetospheric fluctuations and pulsar timing noise. Astrophys J, 1987, 321: 799
26 Phillips J A, Wolszczan A. Time variability of pulsar dispersion measures. Astrophys J, 1991, 382: L27
27 Lang K R. Interstellar scintillations of pulsar radiation. Science, 1969, 166: 1401–1403
28 Cordes J M, Shannon R M, Stinebring D R. Frequency-dependent dispersion measures and implications for pulsar timing. Astrophys J, 2016, 817: 16
29 Wilson T L, Rohlfs K, Hüttemeister S. Tools of Radio Astronomy. Berlin: Springer, 2013
30 Curyło M, Pennucci T T, Bailes M, et al. Wide-band timing of the Parkes Pulsar Timing Array UWL data. Astrophys J, 2023, 944: 128
31 Wang J, Verbiest J P W, Shaifullah G M, et al. Effect of matching algorithm and profile shape on pulsar pulse time of arrival uncertainties. Res Astron Astrophys, 2023, 23: 125020
32 Goncharov B, Reardon D J, Shannon R M, et al. Identifying and mitigating noise sources in precision pulsar timing data sets. Mon Not R Astron Soc, 2021, 502: 478–493
33 Chalumeau A, Babak S, Petiteau A, et al. Noise analysis in the European Pulsar Timing Array data release 2 and its implications on the

gravitational-wave background search. Mon Not R Astron Soc, 2022, 509: 5538–5558
34 Stephens M A. EDF statistics for goodness of fit and some comparisons. J Am Stat Assoc, 1974, 69: 730–737
35 Lentati L, Alexander P, Hobson M P, et al. TempoNest: Bayesian analysis tool for pulsar timing. Astrophysics Source Code Library, 2025. ascl:2504.031
36 Ellis J A, Vallisneri M, Taylor S R, et al. ENTERPRISE: Enhanced numerical toolbox enabling a robust pulsar inference SuitE. Zenodo, 2020
37 Caballero R N, Lee K J, Lentati L, et al. The noise properties of 42 millisecond pulsars from the European Pulsar Timing Array and their impact on gravitational-wave searches. Mon Not R Astron Soc, 2016, 457: 4421–4440
38 Hankins T H, Rickett B J. Frequency dependence of pulsar profiles. Astrophys J, 1986, 311: 684
39 Caballero R N, Xu H, Lee K, et al. Chinese Pulsar Timing Array upper limits on microhertz gravitational waves from supermassive black-hole binaries using PSR J1713+0747 FAST data. Res Astron Astrophys, 2025, 25: 035022
40 Lin F X, Lin H H, Luo J, et al. Profile changes associated with dispersion measure events in PSR J1713+0747. Mon Not R Astron Soc, 2021, 508: 1115–1127
41 Ransom S M, Eikenberry S S, Middleditch J. Fourier techniques for very long astrophysical time-series analysis. Astron J, 2002, 124: 1788–1809
42 Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. The Australia Telescope National Facility Pulsar catalogue. Astron J, 2005, 129: 1993–2006
43 Liu H F, Jiang P, He C, et al. An ultra-wide bandwidth low-frequency radio astronomical cryogenic receiver for FAST telescope. Res Astron Astrophys, 2022, 22: 115016
44 Zhang C P, Jiang P, Zhu M, et al. Performance of FAST with an ultra-wide bandwidth receiver at 500–3300 MHz. Res Astron Astrophys, 2023, 23: 075016

Opportunities and challenges of noise suppression technology for radio pulsar timing array

LI Yi-Feng[1,3], PAN Zhi-Chen[2,3,4*], DAI Yin-Feng[5,6], QIAN Lei[2,3,4], LI Bao-Da[7] & LI Yao-Wei[8]

[1]*National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*
[2]*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
[4]*Guizhou Radio Astronomical Observatory, Guizhou University, Guiyang 550025, China*
[5]*School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
[6]*Faculty of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China*
[7]*College of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, China*
[8]*School of Physics and Electronics, Hunan Normal University, Changsha 410081, China*
**Corresponding author (email: panzc@nao.cas.cn)*

Pulsar timing array (PTA) is a set of extremly stable millisecond pulsars with which their time of arrival (TOA) are used to detect low frequency gravitational waves. The timing noise reducing, or, minimizing the error of TOAs, uses several techniques to identify different origins of timingn noise and obtian the high precision timing results. We present a review of the statues of current PTAs, the types of timing noise and corresponding reducing methods, and analyze the orgins of these timing noises and the effects of these noises on the timing. With the real FAST data, it is suggested that with such an unparallel sensitivity, both oppotunities and challenges exist in the pulsar timing studies. The construction and operation of more large-aperture radio telescopes will enhance both the sensitivity and sky coverage of the PTA, leading to greater opportunities for detecting low-frequency gravitational waves.

pulsar timing array, pulsar timing noise, timing accuracy

PACS: 95.30.Sf, 98.62.Dr, 98.70.Sa

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0389