

脉冲星时与原子频率基准结合的时间标准*

杨廷高^{1)2)†} 童明雷^{1)2)3)‡} 胡悦¹⁾²⁾³⁾

1) (中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

2) (中国科学院, 时间基准及应用重点实验室, 西安 710600)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2025 年 11 月 5 日收到; 2025 年 12 月 5 日收到修改稿)

利用国际脉冲星计时阵 (IPTA) 第 2 次释放的版本 A 中 62 颗脉冲星计时资料构建了综合脉冲星时 EPT62. EPT62 的构建充分考虑了每颗星的计时噪声, 采用包括 Cholesky 变换的加权广义最小二乘法, 提取出国际原子时 TAI 的误差信号 EPT62-TAI. 国际权度局 (BIPM) 实时发布原子频率基准与 TAI 的频率差数据, 为时间标准的构建提供定义国际单位制 SI 秒的频率基准. 采用结合平滑滤波器能够将 EPT62-TAI 跟原子频率基准与 TAI 的频率差结合起来, 从而得到脉冲星时与原子频率基准结合的时间标准 CPA. 描述了 CPA 构建过程, 详细比较了 CPA 与 BIPM 构建的地球时的性能. CPA 具有综合脉冲星时的长期频率稳定度, 又有原子频率基准的准确度, 因此也可用作地球时. 最后, 简洁地给出问题讨论与结论.

关键词: 原子时, 频率基准, 毫秒脉冲星, 脉冲星时, 时间标准**DOI:** 10.7498/aps.75.20251505**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251505

1 前言

目前, 时间基准的产生和保持依赖于原子钟. 国际原子时 TAI 是国际权度局 (BIPM) 利用分布在全世界约 80 个守时实验室的 400 台原子钟构建, 并用世界上少数实验室保持的频率基准 (如铯原子喷泉钟等) 实时进行频率校准 (驾驭) 得到的时间标准. 大量守时原子钟的应用保障了 TAI 的频率稳定性, 通过频率基准的频率驾驭, 保障 TAI 秒长 (频率准确性) 符合国际单位制 SI 秒. UTC 是 TAI 与世界时 UT1 协调的时间, UTC 与 TAI 只差整数秒. 从 1987 年开始, BIPM 利用原子钟守时和当时可利用的频率基准资料, 每年通过事后处理, 构建和保持频率稳定性和准确度比 TAI 更好的时间基准 TT(BIPM_{xxxx}), 其中 xxxx

表示发表年份^[1]. TT(BIPM_{xxxx}) 被定义为地球坐标系的坐标时, 简称为地球时. 由于地球时延迟 1 a 才能得到, TAI 加上 32.184 s 的常数修正后, 也可近似用作地球时, 以满足实时性应用.

从 20 世纪 80 年代起, 毫秒脉冲星计时观测逐步发展和完善. 利用射电望远镜对选定的一组毫秒脉冲星进行长期计时观测, 被称为脉冲星计时阵 (PTA)^[2]. 多个脉冲星计时阵联合被称为国际脉冲星计时阵 (IPTA). 至今, IPTA 已经观测 60 多颗毫秒脉冲星, 并于 2016 年和 2019 年先后两次公开释放脉冲星计时观测资料^[3,4]. IPTA 的主要科学目标是探测引力波、检测太阳系行星历表误差和建立脉冲星时间标准等^[5]. 近年来, 在脉冲星时间标准研究方面, Hobbs 等^[6]于 2019 年发表了利用 IPTA 第一次释放的 49 颗星的原始观测数据 (combination A), 采用广义最小二乘拟合算法构

* 中国科学院战略性先导专项 (批准号: XDA0350502) 和科技部 SKA 专项 (批准号: 2020SKA0120103) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangtg@ntsc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: mlton@ntsc.ac.cn

建的脉冲星时间标准 TT(IPTA2016), 同时还给出了利用 8 颗星的计时观测数据采用贝叶斯方法的综合脉冲星时结果. 2022 年和 2024 年我国学者先后利用 IPTA 第 2 次释放资料中的部分脉冲星, 采用改进的维纳滤波算法构建了综合脉冲星时^[7,8]. 这些综合脉冲星时研究结果表明, 尽管算法不同、采用的脉冲星数量不同, 构建的综合脉冲星时与国际原子时 TAI 的钟差时间序列, 跟地球时与 TAI 的钟差时间序列具有相似的长期变化趋势, 证明综合脉冲星时和地球时 TT(BIPMxxxx) 一样, 都能够检测到 TAI 的系统误差. 文献 [9] 综述了上面提到的综合脉冲星时的 3 种不同算法, 并给出了综合脉冲星时与地球时频率稳定度的比较.

综合脉冲星时长期频率稳定度与地球时可比, 甚至更好, 但短期频率稳定度较差, 主要是因为脉冲星时观测误差较大. 原子钟相互比对精度一般不低于 1 ns, 基于原子钟比对资料构建的综合原子时不确定度约为 1 ns 水平. 现在毫秒脉冲星计时观测不确定度平均约 1 μ s, 最好的接近 100 ns 水平, 基于脉冲星计时观测构建的综合脉冲星时数据点的不确定度约为百纳秒量级, 比综合原子时误差大 2 个量级. 另外, 根据综合脉冲星时构建原理, 脉冲星时的秒长不能保障符合 SI 秒要求, 需要用原子频率基准对其频率进行校准. 因脉冲星时不确定度比原子时大 2 个量级, 不能像频率基准驾驭国际原子时那样, 直接采用频率基准驾驭综合脉冲星时. 假设用 EPT 表示综合脉冲星时, EPT 与国际原子时 TAI 的钟差时间序列为 EPT-TAI. 现在, BIPM 在其网站上实时公布定义 SI 秒的原子频率基准 (包括部分二级频率基准) 与 TAI 的频率差数据. 为了充分利用脉冲星时长期频率稳定度的优势, 将脉冲星时与原子频率基准结合起来, 并平滑掉脉冲星时的高频白噪声, 我们采用结合平滑滤波器同时平滑 EPT-TAI、原子频率基准与 TAI 频率差两个时间序列^[10]. 结合平滑滤波器给出这两个时间序列的平滑结果, 且平滑后 EPT-TAI 对时间的一阶导数 (即 EPT-TAI 的频率差) 等于平滑后的原子频率基准与 TAI 的频率差. 这样, 利用结合平滑滤波器既能有效平滑掉输入数据的高频噪声, 也能保证平滑后 EPT 的频率等于频率基准的频率. 经过结合平滑滤波器处理后的 EPT 称为脉冲星时与原子频率基准结合的时间标准 CPA, CPA 具有脉冲星时的长期频率稳定度, 又具有原子频率

基准的准确度.

我们曾经采用结合平滑滤波器构建综合脉冲星时 TT(IPTA2016) 与地球时 TT(BIPM2017) 的频率结合的时间标准, 结果表明, 其频率稳定度和频率准确度不亚于地球时 TT(BIPM2017), 证明了方法的可行性^[11]. 但地球时数据需要延迟一年才能得到, 从未来实时性构建和保持 CPA 考虑, 我们利用 IPTA 第 2 次释放的 62 颗脉冲星计时观测资料, 构建了目前时间跨度最长的综合脉冲星时 EPT62, 采用 BIPM 实时发布的频率基准数据构建 EPT62 与原子频率基准结合的时间标准 CPA. 第 2 节将描述 EPT62 构建方法与结果; 第 3 节描述 CPA 的构建方法与结果; 第 4 节给出 CPA 与地球时的比较; 最后是简单讨论与初步结论.

2 综合脉冲星时

2.1 资料及其预处理

IPTA 第 2 次释放数据共包括 65 颗脉冲星, 其中 B1937+21 红噪声显著, 还有 2 颗星脉冲到达时间 (TOA) 数据的时间跨度不到 1 a, 除去这 3 颗星外, 用 62 颗星数据计算综合脉冲星时. 有关每颗星观测数据的详细情况, 请参考文献 [4] 中的表 2. 我们采用 IPTA 第 2 次释放资料的版本 A. 版本 A 数据的计时模型包括了脉冲星白噪声参数 EFAC 和 EQUAD, 也就是说, TOA 的观测误差是用 EFAC 和 EQUAD 参数修正后的结果. 同时, 采用 Keith 等^[12]的方法计算每颗星的色散量 DM 变化, 并消除了其对 TOA 的影响. 版本 A 资料的预处理步骤如下.

1) 采用 Tempo2 软件和版本 A 的 TOA 数据及其参数文件, 拟合脉冲星计时模型, 参考的时间标准为国际原子时 TAI, 采用太阳系天体历表 DE436 和质心坐标时 TCB, 得到每颗星的计时残差数据. 假设单颗脉冲星的 TOA 数量为 n , 用于计算综合脉冲星时的基本数据为 n 行 3 列的矩阵, 3 列数据依次为: TOA 对应的观测历元 (站心 TOA 的约化儒略日 MJD)、拟合后的计时残差和 TOA 误差 (不确定度).

2) 删除射电望远镜观测频率 1000 MHz 以下的的数据行. 因为低频观测信号传播受星际和太阳系介质影响最大, TOA 受信号传播改正的不确定性影响最大.

3) 有的脉冲星在同一观测历元有多个 TOA 观测值, 因而有多个计时残差. 合并同一观测历元多个 TOA 的数据行. 计时残差及其误差采用平均值. 然后将数据行按照观测历元 MJD 从小到大的顺序重新排列.

4) 删除计时残差绝对值大于 3 倍标准偏离的数据行.

按照以上步骤得到每颗脉冲星的观测数据矩阵, 构成综合脉冲星时研究的基础数据.

2.2 算法

2.2.1 计时残差协方差矩阵计算

脉冲星计时噪声包括白噪声和红噪声. 白噪声协方差矩阵主对角线元素由 TOA 观测误差的平方构成, 其余元素为 0. 红噪声的功率谱密度用幂律模型描述^[13]:

$$S(f) = \frac{A^2}{f} \left(\frac{f}{f_r} \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

其中, f 是傅里叶频率, f_r 是参考频率, 通常设为 1 a^{-1} , A 是红噪声幅度, α 是谱指数. 为用傅里叶变换方法估计计时残差的功率谱, 首先将非均匀分布的计时残差采用移动平均方法构成均匀分布的数据点, 移动平均步长一般为 30 d ^[14]. 有的脉冲星偶尔在半年甚至更长时间内没有观测数据, 在这种情况下, 再将移动平均后的残差用线性内插方法补足缺少的数据点. 为减小傅里叶方法频谱渗漏影响, 采用先“白化”后“暗化”方法估计功率谱^[15]. 然后在功率谱的对数域拟合得到幂律模型的谱指数 α 和幅度 A 二参数^[16], 再用二参数按照 (1) 式计算幂律模型功率谱密度 $S(f)$, 最后用下式计算每颗星的红噪声协方差矩阵^[13]:

$$C_{r,ij} = \int_{1/T}^{f_c} S(f) \cos(2\pi f t_{ij}) df, \quad (2)$$

其中, f 是傅里叶频率, ij 是 TOA 观测历元, t_{ij} 是两个历元的差值. 假设 T 是 TOA 观测总时间跨度, 因为脉冲星自转参数拟合, 低于 $1/T$ 的低频信号被自转参数吸收了, 所以, 积分下限是 $1/T$, 积分上限 f_c 为奈奎斯特频率. 脉冲星计时残差协方差矩阵为红噪声与白噪声协方差矩阵之和.

利用资料预处理得到的每颗脉冲星的数据矩阵和初步估计的计时残差的协方差矩阵, 采用包

括 Cholesky 变换的广义最小二乘法重新拟合每颗脉冲星的自转参数^[16]. 因为自转参数拟合程序包括了计时残差的协方差矩阵, 因此能够得到比资料预处理更真实的计时残差. 该过程经过一次迭代后, 最终得到计算综合脉冲星时采用的每颗星的计时残差及其协方差矩阵.

2.2.2 拟合综合脉冲星时

利用 62 颗星的计时残差及其协方差矩阵, 采用包括 Cholesy 变换的广义最小二乘法拟合得到综合脉冲星时数据点. 为此将综合脉冲星时参数建模为按观测时间等间距 (如 180 d) 采样的数据点 (即 TAI 的钟误差值), 在相邻的两个采样数据点之间采用线性内插, 也就是说, 综合脉冲星时两个相邻采样数据点的值与这两个数据点之间计时残差的关系为线性关系^[17]. 假设综合脉冲星时采样间距为 T_s , 这等效于带通为 $1/(2T_s)$ 低通滤波器. 因为综合脉冲星时参数与脉冲星自转参数高度相关, 必须在拟合综合脉冲星时参数时, 同时拟合每颗脉冲星的自转参数, 并在最小二乘方程基础上增加 3 个约束方程, 以便约束综合脉冲星时, 减小其与自转参数的协方差. 3 个约束方程如下^[12]:

$$\sum \Delta_C(t_i) = 0, \quad (3)$$

$$\sum t_i \Delta_C(t_i) = 0, \quad (4)$$

$$\sum t_i^2 \Delta_C(t_i) = 0. \quad (5)$$

(3) 式—(5) 式中, $\Delta_C(t_i)$ 是综合脉冲星时信号在 t_i 时刻的采样值. 约束方程表明, 综合脉冲星时信号平均为 0, 且不含线性与二次项, 计时残差中的线性与二次项变化被吸收到自转参数中. 在广义最小二乘拟合程序中, 忽略了脉冲星的位置、视差、双星的轨道参数. 这些参数误差对综合脉冲星时参数拟合影响较小, 且都是短于 1 a 的周期信号. 即使这种微弱的短周期信号进入脉冲星时参数中, 在应用结合平滑滤波器滤波后, 这种短周期信号一定会作为高频噪声被平滑掉 (参见 3.2 节). 因为不同脉冲星 TOA 测量误差差异很大 (从百分之几到几十 μs), 必须采用加权拟合. 脉冲星计时残差的权取为对应 TOA 观测误差平方的倒数, 3 个约束方程的权取为 62 颗星全部计时残差权的平均. 计算综合脉冲星时的 62 颗星总数据矩阵由每颗星观测数据矩阵按照脉冲星顺序组合而成. 总数据矩阵是

117597 行 3 列的矩阵. 62 颗星总计时残差的协方差矩阵由每颗星的协方差矩阵按顺序组合而成. 总协方差矩阵是 117597×117597 的方阵. 我们采用 180 d 的综合脉冲星时采样间隔, 在拟合得到综合脉冲星时与 TAI 钟差后, 利用拟合后的每颗星的计时残差重新估计协方差矩阵, 用重新估计的协方差矩阵再次拟合综合脉冲星时, 从而得到更真实的结果.

2.3 结果分析

用 62 颗星计时观测资料计算的综合脉冲星时称为 EPT62, EPT62 与 TAI 钟差时间序列 EPT62-TAI 如图 1 所示. 为方便比较, 图 1 还给出同时期的 TT(BIPM2015)-TAI, TT(BIPM2015)-TAI 已消除线性与二次项, 下同. 从图 1 可看出, EPT62 与 TT(BIPM2015) 总体变化趋势相似, 证明 EPT62 能够检测到 TAI 的长期变化误差. 但 EPT62 数据点的误差很不均匀, MJD 50000 之前误差偏大, 且数据点本身波动也大, 早于 MJD 48000 的数据点甚至与地球时相位相反. 这种现象与 62 颗星 TOA 数据点随时间的分布密切相关. 图 2 是 62 颗星计时残差数据点随时间 MJD 的分布. 大约在 MJD 50215 之前, IPTA 观测的脉冲星数量较少, 最早期只有 1 颗星的观测数据可用, 因此计时残差数据点明显稀少, 且在某些时间间隔内没有观测数据, 见图 3. 这导致早期的 EPT62 不确定性较大. 在 MJD 50215 之后, 观测的脉冲星数量逐步增加, 可用的计时残差数据点分布越来越密. 图 2 中部分残差数据点弥散较大, 主要来自 TOA 测量误差较大的脉冲星. 在图 2 中, 最迟的短时间间隔内, 残差数量明显变少, 是因为公开释放的数据较少. 根据 2.2.2 节描述的综合脉冲星时构建原理, EPT62 数据点的精度取决于该数据点采样的时间间隔内可用的计时残差数量与观测精度.

在图 1 中, EPT62 在 MJD 49675 附近的 3 个数据点与地球时偏离约 $1 \mu\text{s}$. 由图 3 可见, 这段时间内, 可用残差稀少, 主要贡献者是 PSR J1713+0747. 我们单独采用该星的全部观测数据, 采用广义最小二乘法提取了 TAI 钟误差信号, 发现在 MJD49675 附近的钟误差信号采样与 EPT62 数据点具有相似的较大正偏离. 这种偏离可能与信号传播改正误差有关. 另外, 在 MJD 54173 附近,

EPT62 相对于地球时有个小的凸起. 在这段时间内, 可利用的脉冲星数量与残差数据点较多, 难以分离出对该偏离影响较大的脉冲星.

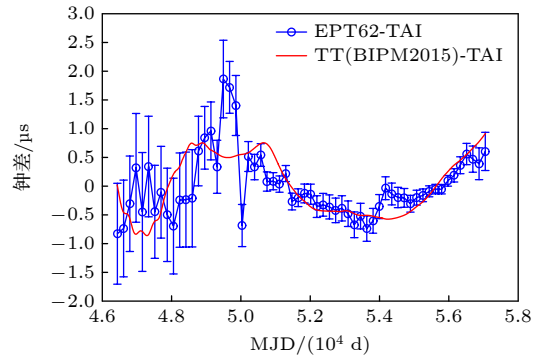


图 1 EPT62-TAI(蓝线)和 TT(BIPM2015)-TAI(红线)的比较

Fig. 1. Comparison between clock difference EPT62-TAI (blue line) and TT(BIPM2015)-TAI (red line).

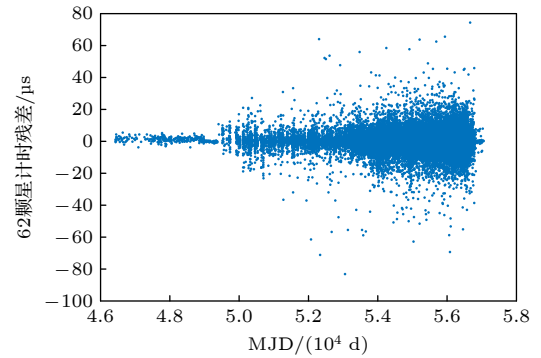


图 2 62 颗星计时残差数据点随时间 MJD 的分布

Fig. 2. Distribution of timing residuals after pre-processing for 62 pulsars in the IPTA second data release.

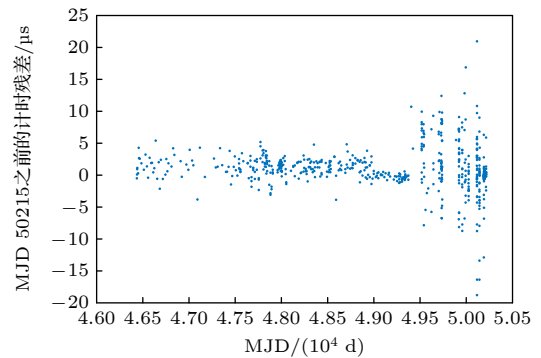


图 3 图 2 中 MJD 50215 之前计时残差数据点随时间 MJD 的分布

Fig. 3. The distribution of timing residuals before MJD 50215 in Fig. 2.

我们采用 σ_Z 方法估计 EPT62-TAI 和 TT(BIPM2015)-TAI 两个钟差时间序列的频率稳定性^[18], 并绘于图 4. 与 Allan 方差不同, σ_Z 是对确

定的时间间隔内钟差数据进行三次多项式拟合, 用拟合得到的三次项的系数定义的, 因此, 对脉冲星时或原子时的频率漂移率是敏感的, 更适合于脉冲星时频率稳定度的估计. 从图 4 可看出, TT(BIPM2015)-TAI 频率稳定度曲线呈现缓慢上升趋势, 随着时间间隔增大, 频率稳定度逐步下降, 这是目前原子时的基本特征. 脉冲星时正好相反, 因为脉冲星时数据点不确定性较大, 白噪声大, 其短期频率稳定度较差, 但随着时间延长, 其频率稳定度曲线呈现下降趋势, 最终与地球时稳定度曲线相交, 证明脉冲星时具有较好长期频率稳定度. EPT62-TAI 时间跨度为 29 a, 是到目前为止构建的时间最长的综合脉冲星时. 其最大时间间隔 (29 a) 的频率稳定度好于地球时, 但与自身前面一个数据点相比却表现略微上升趋势. 这是否表明, 在 29 a 时间尺度上, 综合脉冲星时开始呈现红噪声, 有待于今后用更长时间跨度的脉冲星计时观测证明.

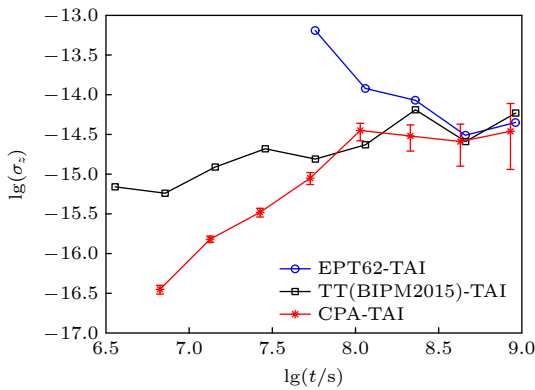


图 4 用 σ_Z 方法计算的 EPT62-TAI, TT(BIPM2015)-TAI 与 CPA-TAI 的频率稳定度曲线
 Fig. 4. Fractional stabilities $\sigma_Z(\tau)$ for the EPT62-TAI, TT(BIPM2015)-TAI and CPA-TAI.

3 脉冲星时与频率基准结合的时间标准

3.1 原子频率基准对时间标准贡献

为计算 TAI, BIPM 首先利用全世界所有可用的守时原子钟, 通过加权平均构建自由原子时 EAL, EAL 的算法能够保障其具有最好的长期频率稳定度, 但其频率不一定准确, 即 EAL 的时间单位不一定符合 SI 秒. SI 秒是用世界上少数实验室保持的原子频率基准钟组实现的, 因此, 原子频率基准具有最佳频率准确度, 被用作基准对 EAL

的频率进行校准 (驾驭). 经过频率驾驭的 EAL 称为 TAI. BIPM 每月计算一次 TAI, 以便保障 TAI 的实时延伸. 原子频率基准与 EAL 的频率差原始测量数据包括有 EAL 频率的周年变化、长期变化和频率基准的不稳定性. 为得到比 TAI 更佳的时间标准, BIPM 每年事后重新处理原子频率基准与 EAL 的频率差数据, 从频率差测量数据中提取出系统性的周年变化和长期变化信号, 再将提取出的频率差系统变化信号对时间积分, 从而得到地球时与 EAL 钟差时间序列 TT(BIPM_{xxxx})-EAL, 再利用 EAL 与 TAI 关系转换得到 TT(BIPM_{xxxx})-TAI^[1].

3.2 结合平滑滤波方法

EPT62 结果进一步证明综合脉冲星时的长期频率稳定度与地球时可比, 甚至更好. 但与地球时相比, 综合脉冲星时具有较大白噪声 (短稳差), 受计时噪声影响, 其频率准确度与 SI 秒会有偏离. 利用 BIPM 实时在其网站上公布的原子频率基准与 TAI 的频率差数据, 采用结合平滑滤波器构建脉冲星时与原子频率基准结合的时间标准.

结合平滑滤波器有两套输入数据, 一套是综合脉冲星时与 TAI 的钟差时间序列 EPT62-TAI 及其对应的测量误差和观测历元 MJD, 数据点的误差用于计算滤波权重; 另一套数据是原子频率基准 psfs(primary and secondary frequency standard) 与 TAI 的频率差和对应的历元 MJD, 滤波器对频率差数据点取等权. 假设输入数据 EPT62-TAI 数据点数为 n_1 , psfs-TAI 频率差 (等同于 psfs-TAI 钟差的一阶导数) 数据点数为 n_2 , 如果两套输入数据的观测历元是完全独立的, 则滤波器的两套输出数据的数据点数都是 $N = n_1 + n_2$; 如果两套输入数据有重叠的观测历元, 则 $N < n_1 + n_2$. 在 BIPM 网站上下载的 psfs-TAI 频率差数据是原子频率基准与 TAI 频率差原始数据在大约两个月期间的平均值, 通过移动平均, 每月给出一个平均值数据点. 因为 EPT62-TAI 不含有线性与二次项, 也就是说, 其频率差不含有线性项, 应用于结合平滑滤波器的 psfs-TAI 频率差也应该消除线性项. 在图 5 给出消除线性项后的 psfs-TAI 频率差曲线 (如蓝线所示). 频率差曲线的系统性变化反映 TAI 的频率误差, 短期波动 (高频噪声) 主要来自频率基准钟的不稳定性. 在早期, 由于世界上可利用的原子频

率基准钟数量少, psfs-TAI 频率差高频噪声较大, 后来随着频率基准钟数量的增加, psfs-TAI 频率差数据点高频噪声逐步变小. 另外, EPT62-TAI 覆盖的时间跨度为 MJD 46437 至 MJD 57052, 但可利用的原子频率基准数据起始于 MJD 47164, 为保障结合平滑滤波器两套输入数据时间跨度近似相同, 输入滤波器的 EPT62-TAI 数据舍去了最早期的 4 个数据点.

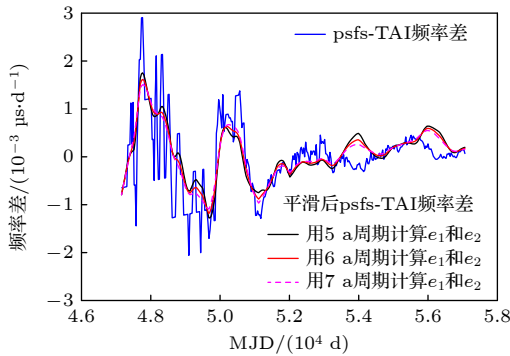


图 5 结合平滑滤波器平滑前后 psfs-TAI 频率差比较; 结合平滑滤波器输入的是 EPT62-TAI 钟差和 psfs-TAI 频率差两套原始数据, 滤波器输出的是两套数据结合的平滑结果; 图中蓝线是输入的 psfs-TAI 频率差, 另外 3 条曲线是采用不同平滑系数的 psfs-TAI 频率差的平滑结果; 有关 EPT62-TAI 钟差用结合平滑滤波器平滑前后曲线的比较, 见图 6; 结合平滑滤波器平滑后的频率差曲线等于对应平滑后钟差时间序列的一阶导数 (即频率差)

Fig. 5. Frequency difference curves for psfs-TAI before and after combined smoothing; the two sets of input data for the combined smoothing filter are clock difference EPT62-TAI and frequency difference of psfs-TAI (blue line); the output results by the filter are smoothed EPT62-TAI and smoothed frequency difference; the blue line is original frequency difference, the other three lines are smoothed frequency differences with different smoothing coefficients used; the clock difference curves before and after combined smoothing are shown in the Fig. 6; the smoothed frequency difference equals to first time derivative (frequency difference) of the smoothed clock difference.

结合平滑滤波器的基本原理是根据两套输入数据特征找到满足 3 个不同约束条件的平滑方案. 3 个约束条件是滤波器输出钟差平滑曲线的平滑度、钟差平滑曲线对输入钟差数据的保真度和滤波器输出频率差平滑曲线对输入频率差数据的保真度. 用 y_i 表示钟差平滑曲线的第 i 个数据点, $i = 1, 2, 3, \dots, N$. 假设钟差平滑曲线平滑度的数学表达式为 S , 钟差平滑曲线保真度的表达式为 F , 频率差平滑曲线的保真度表达式为 \bar{F} , 3 个表达式都能写成 y_i 的函数. 将 3 个约束条件结合起来, 有

$$Q = S + e_1 \times F + e_2 \times \bar{F}, \quad (6)$$

其中, e_1 和 e_2 分别是钟差和频率差的平滑系数. 令 $Q = \min$, 有

$$\frac{dQ}{dy_i} = 0. \quad (7)$$

由 (7) 式可以得到包含未知数 y_i 的对应于 N 个输入数据的 N 个线性方程. 从 N 个线性方程解出 N 个未知数 y_i , 然后再利用文献 [10] 中的 (4) 式—(7) 式计算得到 N 个频率差的平滑值. 频率差的平滑值等于钟差平滑曲线对时间的一阶导数. 有关 (6) 式中 S , F , \bar{F} 的数学表达式和 (7) 式中 Q 偏导数的数学表达式, 请见文献 [10].

平滑系数 e_1 和 e_2 的取值决定了上述 3 个约束条件的折中程度. 因为脉冲星时数据点的测量误差总体水平较大, 且相互之间差异也较大, 不可能按照两套输入数据的测量误差估计平滑系数. 另一种方法是按照要保留的信号周期估计平滑系数. 如果我们想让一个周期信号的 99% 通过滤波器, 假设该周期信号的周期为 $P_{0.99}$, 则计算两个平滑系数的公式为 [10]

$$\begin{aligned} e_1(P_{0.99}) &= 99(2\pi/P_{0.99})^6, \\ e_2(P_{0.99}) &= 99(2\pi/P_{0.99})^4. \end{aligned} \quad (8)$$

为找到适用于上述两套输入数据的周期信号 $P_{0.99}$, 采用网格搜索方法找到最佳 $P_{0.99}$, 然后用 (8) 式计算两个平滑系数. 有关网格搜索过程与选取平滑系数的详细讨论见文献 [11].

3.3 结果

结合平滑滤波器平滑后的 psfs-TAI 频率差绘于图 5. 图 5 中, 分别给出了用 $P_{0.99} = 5$ a, $P_{0.99} = 6$ a 和 $P_{0.99} = 7$ a 计算平滑系数 e_1 , e_2 的 psfs-TAI 频率差平滑曲线. 3 条曲线只有微小差异, 但 $P_{0.99} = 7$ a 平滑系数的曲线比 $P_{0.99} = 5$ a 平滑系数的曲线更接近 $P_{0.99} = 6$ a 平滑系数的曲线. 采用比 $P_{0.99} = 5$ a 更短周期计算平滑系数的频率差平滑曲线与 $P_{0.99} = 6$ a 平滑系数的结果偏离更大, 且表现有明显的短周期波动. 这种短周期波动来自 EPT62 自身的测量误差, 说明平滑不足. 根据 psfs-TAI 频率差平滑结果判断, 采用 $P_{0.99} = 6$ a 计算平滑系数是合适的.

在图 6 给出了结合平滑滤波器平滑前与平滑后的 EPT62-TAI 曲线, 平滑曲线是采用 $P_{0.99} =$

6 a 计算平滑系数的结果. 图 6 同时绘出了同时期的 TT(BIPM2015)-TAI 曲线. 平滑后的 EPT62-TAI 有效平滑掉了综合脉冲星时的高频噪声, 且更接近于 TT(BIPM2015)-TAI 曲线. 根据结合平滑滤波器原理, 图 5 给出的 $P_{0.99} = 6$ a 平滑系数平滑后 psfs-TAI 频率差曲线就是图 6 中平滑后 EPT62-TAI 的频率差曲线. 因此, 可以认为平滑后 EPT62 的频率是用原子频率基准 psfs 定义的, 其时间单位符合 SI 秒. 结合平滑滤波器平滑后的 EPT62 实质上是脉冲星时与原子频率基准结合的时间标准, 即 CPA(combined pulsar-atomic time), 其与 TAI 的钟差则为 CPA-TAI.

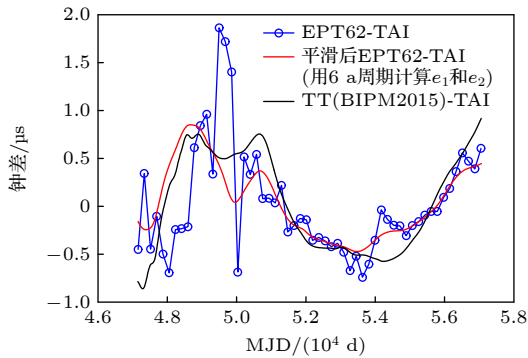


图 6 结合平滑滤波器平滑前后的 EPT62-TAI(平滑后的 EPT62-TAI 在下文中被称为 CPA-TAI) 和 TT(BIPM2015)-TAI, 结合平滑滤波器平滑前后 psfs-TAI 频率差曲线的比较见图 5, 平滑后 EPT62-TAI 的一阶导数(即频率差)等于平滑后 psfs-TAI 频率差, 也就是说, CPA-TAI 的频率差等于平滑后 psfs-TAI 的频率差

Fig. 6. Clock difference curves of EPT62-TAI before (blue line) and after (red line) combined smoothing, the smoothed EPT62-TAI is also referred to as CPA-TAI in the text, the TT(BIPM2015)-TAI is given by black line, the frequency difference curves before and after combined smoothing are shown in the Fig. 5, first time derivative of the smoothed clock difference curve equals to the smoothed frequency difference of psfs-TAI; in other words, frequency difference of the CPA-TAI is equal to the smoothed frequency difference of psfs-TAI.

4 CPA 和地球时的比较

如果脉冲星计时观测资料实时可用, 则用 TAI 做参考可以实时性地构建并保持综合脉冲星时, 再采用结合平滑滤波器可以实时性地构建并保持 CPA-TAI. 根据地球时 TT(BIPMxxxx) 构建原理, TT(BIPMxxxx)-TAI 需要迟 1 a 才能得到(见 3.1 节). 因此, TT(BIPMxxxx)-TAI 只适用于事后

处理应用, 而 CPA-TAI 基本能够满足用户实时性需求. 当然, 在实时性构建并保持 CPA-TAI 方面, 还有很多问题需要深入研究, 该文只是在可行性方面进行初步探讨.

在图 4 中绘出了 CPA-TAI 频率稳定度曲线. CPA-TAI 在保持 EPT62-TAI 长期频率稳定度的同时, 明显改进了 EPT62-TAI 的短期稳定度水平. 从图 4 还可看出, 在任何时间尺度上 CPA-TAI 的稳定度与 TT(BIPM2015)-TAI 可比. CPA-TAI 短期频率稳定度好于 TT(BIPM2015)-TAI, 表明 TT(BIPM2015) 可能仍存在某种程度的高频噪声, 有可能是构建 CPA 与构建 TT(BIPMxxxx) 采用不同的滤波方法所致.

CPA 与地球时 TT(BIPMxxxx) 的频率稳定度可比, 二者的时间单位都是用原子频率基准定义的, 与 TT(BIPMxxxx) 一样, CPA 也能用作地球时. 另外, 具有较高频率稳定性和频率准确度的实时性时间标准可以用来驾驭原子钟. 例如, 氢钟具有较高短期频率稳定度, 但在一个月或更长时间尺度上, 其频率稳定度变差. 利用 CPA 对氢钟进行频率驾驭, 可以改善氢钟的长期频率稳定度水平, 为用户提供更理想的时间频率信号. 作为用 CPA 驾驭原子钟的例子, 我们选用美国海军天文台(USNO)保持的地方原子时 TA(USNO)(世界上精度最好的地方原子时), 采用卡尔曼滤波的频率驾驭方法, 用图 6 所示的 CPA(红线) 驾驭 TA(USNO). TAI-TA(USNO) 钟差数据从 BIPM 网站下载得到. CPA-TAI 钟差加 TAI-TA(USNO) 得到 CPA-TA(USNO), 再用卡尔曼滤波方法将 TA(USNO) 驾驭到 CPA. 图 7 给出了将 TA(USNO) 驾驭到 CPA 后残差的频率稳定度(红线)和 TAI-TA(USNO) 的频率稳定度曲线(蓝线). 经过频率驾驭后的残差基本消除了 TA(USNO) 的系统误差, 因此其中长期频率稳定度比 TAI-TA(USNO) 明显改进. 短稳略微变差, 是因为频率驾驭本身又叠加了部分白噪声的缘故, 也与卡尔曼滤波器收敛前的不稳定性有关. 图 7 还给出了用同样方法将 TA(USNO) 驾驭到 TT(BIPM2015) 后的频率稳定度曲线(黑线). 除去个别数据点上翘外, 红线与黑线呈现相似特征, 表明 CPA 的频率稳定度水平与 TT(BIPM2015) 相近. 有关用卡尔曼滤波方法驾驭原子钟的理论与算法, 请参考文献 [19].

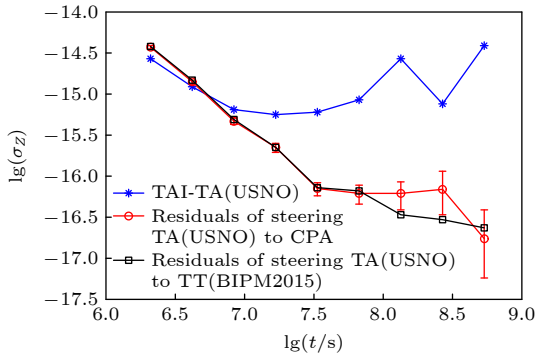


图7 TAI-TA(USNO) 的频率稳定度与将 TA(USNO) 分别驾驭到 CPA 和 TT(BIPM2015) 后残差的频率稳定度比较
Fig. 7. σ_Z stability for TAI-TA(USNO) and σ_Z curves for the residuals after steering TA(USNO) respectively to CPA and to TT(BIPM2015).

5 讨论与结论

利用 IPTA 第 2 次释放的脉冲星计时资料构建了综合脉冲星时 EPT62, 并利用 BIPM 在其网站公布的原子频率基准与 TAI 的频率差数据, 采用结合平滑滤波器构建了脉冲星时与原子频率基准结合的时间标准 CPA. CPA 的频率稳定度与 TT(BIPMxxxx) 可比, 其频率准确度满足 SI 秒定义要求. 因而, CPA 与 TT(BIPMxxxx) 一样也可用作地球时. 根据 CPA 构建原理, 未来利用脉冲星计时观测有可能实时性构建并保持 CPA.

EPT62 时间跨度为 29 a, 因 62 颗星计时残差数据点随观测时间畸形分布, 早期可利用的残差数据稀缺, EPT62 早期结果的不确定度偏大. 另外, 图 1 所示 EPT62-TAI 有小部分数据点与 TT(BIPM2015)-TAI 有明显偏离, 有的偏离与计时残差数据点分布有关, 另有个别偏离可能是 TOA 数据中 DM 变化修正误差或其他原因所致(如图 1 中 MJD 54173 附近的 EPT62-TAI 数据点)^[20]. IPTA 第 2 次释放的是 2016 年前的资料, 如果以后进一步释放近期观测资料, 舍去早期稀少的部分数据后, 可以大大改进计时残差数据点随时间的分布状态, 因此能够构建精度进一步改进, 且具有足够长时间跨度的综合脉冲星时. 关于综合脉冲星时算法, 因为在脉冲星计时阵中, 参考钟误差、太阳系行星历表误差与引力波信号具有互不相同的空间相关性, 从多颗脉冲星计时残差提取参考钟误差信号时, 忽略了太阳系行星历表误差与引力波信号的微小影响. 将来, 利用更高精度的脉冲星计时资料,

最好采用同时拟合每颗脉冲星的独立参数(计时模型参数)与 3 个公共参数(参考钟误差、太阳系行星历表误差、引力波信号模型参数)的综合性分析方法^[21].

结合平滑滤波器能够将综合脉冲星时与原子频率基准结合起来, 得到的 CPA 在频率稳定度与频率准确度两方面非常接近 TT(BIPMxxxx). 随着脉冲星计时观测的发展, 综合脉冲星时精度将逐步提高; 随着原子频率基准的发展, 频率基准与 TAI 频率差数据质量将逐步改进. 未来用结合平滑滤波器构建的 CPA 精度必将得到进一步改进.

目前关于 CPA 的研究局限于在固定时间段内构建 CPA 的方法. 未来, 如果更长时间跨度脉冲星计时资料可用, 我们将进一步研究实时性构建并连续保持 CPA 的技术与方法.

数据可用性声明

支撑本研究成果的数据集可在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00253> 中访问获取.

参考文献

- [1] Guinot B 1988 *Astron. Astrophys.* **192** 370
- [2] Foster R S, Backer D C 1990 *Astron. J.* **361** 300
- [3] Verbiest J P W, Lentati L, Hobbs G, van Haasteren R, Demorest P B, Janssen G H, Wang J B, Desvignes G, Caballero R N, Keith M J, Champion D J, Arzoumanian Z, Babak S, Bassa C G, Bhat N D R, Brazier A, Brem P, Burgay M, Burke-Spolaor S, Chamberlin S J, Chatterjee S, Christy B, Cognard I, Cordes J M, Dai S, Dolch T, Ellis J A, Ferdman R D, Fonseca E, Gair J R, Garver-Daniels N E, Gentile P, Gonzalez M E, Graikou E, Guillemot L, Hessels J W T, Jones G, Karuppusamy R, Kerr M, Kramer M, Lam M T, Lasky P D, Lassus A, Lazarus P, Lazio T J W, Lee K J, Levin L, Liu K, Lynch R S, Lyne A G, Mckee J, McLaughlin M A, McWilliams S T, Madison D R, Manchester R N, Mingarelli C M F, Nice D J, Osłowski S, Palliyaguru N T, Pennucci T T, Perera B B P, Perrodin D, Possenti A, Petiteau A, Ransom S M, Reardon D, Rosado P A, Sanidas S A, Sesana A, Shaifullah G, Shannon R M, Siemens X, Simon J, Smits R, Spiewak R, Stairs I H, Stappers B W, Stinebring D R, Stovall K, Swiggum J K, Taylor S R, Theureau G, Tiburzi C, Toomey L, Vallisneri M, van Straten W, Vecchio A, Wang Y, Wen L, You X P, Zhu W W, X J Zhu 2016 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **458** 1267
- [4] Perera B B P, DeCesar M E, Demorest P B, Kerr M, Lentati L, Nice D J, Osłowski S, Ransom S M, Keith M J, Arzoumanian Z, Bailes M, Baker P T, Bassa C G, Bhat N D R, Brazier A, Burgay M, Burke-Spolaor S, Caballero R N, Champion D J, Chatterjee S, Chen S, Cognard I, Cordes J M, Crowter K, Dai S, Desvignes G, Dolch T, Ferdman R D, Ferrara E C, Fonseca E, Goldstein J M, Graikou E,

- Guillemot L, Hazboun J S, Hobbs G, Hu H, Islo K, Janssen G H, Karuppusamy R, Kramer M, Lam M T, Lee K J, Liu K, Luo J, Lyne A G, Manchester R N, McKee J W, McLaughlin M A, Mingarelli C M F, Parthasarathy A P, Pennucci T T, Perrodin D, Possenti A, Reardon D J, Russell C J, Sanidas S A, Sesana A, Shaifullah G, Shannon R M, Siemens X, Simon J, Spiewak R, Stairs I H, Stappers B W, Swiggum J K, Taylor S R, Theureau G, Tiburzi C, Vallisneri M, Vecchio A, Wang J B, Zhang S B, Zhang L, Zhu W W, Zhu X J 2019 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **490** 4666
- [5] Manchester R N 2011 *AIP Conf. Proceed.* **1357** 65
- [6] Hobbs G, Guo L, Caballero R N, Coles W, Lee K J, Manchester R N, Reardon D J, Matsakis D, Tong M L, Arzoumanian Z, Bailes M, Bassa C G, Bhat N D R, Brazier A, Burke-Spolaor S, Champion D J, Chatterjee S, Cognard I, Dai S, Desvignes G, Dolch T, Ferdman R D, Graikou E, Guillemot L, Janssen G H, Keith M J, Kerr M, Kramer M, Lam M T, Liu K, Lyne A, Lazio T J W, Lynch R, McKee J W, McLaughlin M A, Mingarelli C M F, Nice D J, Osłowski S, Pennucci T T, Perera B B P, Perrodin D, Possenti A, Russell C J, Sanidas S, Sesana A, Shaifullah G, Shannon R M, Simon J, Spiewak R, Stairs I H, Stappers B W, Swiggum J K, Taylor S R, Theureau G, Toomey L, van Haasteren R, Wang J B, Wang Y, Zhu X J 2020 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **491** 5951
- [7] Yang T G, Tong M L, Gao Y P 2022 *Res. Astron. Astrophys.* **22** 105012
- [8] Zhang Z H, Tong M L, Yang T G 2024 *Astron. J.* **962** 2
- [9] Yang T G, Gao Y P, Tong M L, Li B, Zhao C S, Luo J T, Zhu X Z, Sun P F, Wei F 2023 *Acta Aeronaut. Astronaut. Sin.* **44** 526443 (in Chinese) [杨廷高, 高玉平, 童明雷, 李变, 赵成仕, 罗近涛, 朱幸芝, 孙鹏飞, 魏飞 2023 *航空学报* **44** 526443]
- [10] Vondrák J, Čepek A 2000 *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **147** 347
- [11] Yang T G, Tong M L, Li B, Zhang Z H, Zhu X Z, Gao Y P 2025 *Res. Astron. Astrophys.* **25** 025009
- [12] Keith M J, Coles W, Shannon R M, Hobbs G B, Manchester R N, Bailes M, Bhat N D R, Burke-Spolaor S, Champion D J, Chaudhary A, Hotan A W, Khoo J, Kocz J, Osłowski S, Ravi V, Reynolds J E, Sarkissian J, van Straten W, Yardley D R B 2013 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **429** 2161
- [13] Lee K J, Bassa C G, Janssen G H, Karuppusamy R, Kramer M, Liu K, Perrodin D, Smits R, Stappers B W, van Haasteren R, Lentati L 2014 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **441** 2831
- [14] Petit G, Tavella P 1996 *Astron. Astrophys.* **308** 290
- [15] Coles W, Hobbs G, Champion D J, Manchester R N, Verbiest J P W 2011 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **418** 561
- [16] Caballero R N, Lee K J, Lentati L, Desvignes G, Champion D J, Verbiest J P W, Janssen G H, Stappers B W, Kramer M, Possenti A, Tiburzi C, Perrodin D, Osłowski S, Babak S, Bassa C G, Brem P, Burgay M, Cognard I, Gair J R, Graikou E, Guillemot L, Hessels J W T, Karuppusamy R, Lassus A, Liu K, McKee J, Mingarelli C M F, Petiteau A, Purver M B, Rosado P A, Sanidas S, Sesana A, Shaifullah G, Smits R, Taylor S R, Theureau G, van Haasteren R, Vecchio A 2016 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **457** 4421
- [17] Hobbs G, Coles W, Manchester R N, Keith M J, Shannon R M, Chen D, Bailes M, Bhat N D R, Burke-Spolaor S, Champion D, Chaudhary A, Hotan A, Khoo J, Kocz J, Levin Y, Osłowski S, Preisig B, Ravi V, Reynolds J E, Sarkissian J, van Straten W, Verbiest J P W, Yardley D, You X P 2012 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **427** 2780
- [18] Matsakis D N, Taylor J H, Eubanks T M 1997 *Astron. Astrophys.* **326** 924
- [19] Yang T G, Gao Y P, Tong M L, Li B, Zhao C S, Zhu X Z 2024 *J. Time Freq.* **47** 192 (in Chinese) [杨廷高, 高玉平, 童明雷, 李变, 赵成仕, 朱幸芝 2024 *时间频率学报* **47** 192]
- [20] Lentati L, Shannon R M, Coles W A, Verbiest J P W, van Haasteren R, Ellis J A, Caballero R N, Manchester R N, Arzoumanian Z, Babak S, Bassa C G, Bhat N D R, Brem P, Burgay M, Burke-Spolaor S, Champion D, Chatterjee S, Cognard I, Cordes J M, Dai S, Demorest P, Desvignes G, Dolch T, Ferdman R D, Fonseca E, Gair J R, Gonzalez M E, Graikou E, Guillemot L, Hessels J W T, Hobbs G, Janssen G H, Jones G, Karuppusamy R, Keith M, Kerr M, Kramer M, Lam M T, Lasky P D, Lassus A, Lazarus P, Lazio T J W, Lee K J, Levin L, Liu K, Lynch R S, Madison D R, McKee J, McLaughlin M, McWilliams S T, Mingarelli C M F, Nice D J, Osłowski S, Pennucci T T, Perera B B P, Perrodin D, Petiteau A, Possenti A, Ransom S M, Reardon D, Rosado P A, Sanidas S A, Sesana A, Shaifullah G, Siemens X, Smits R, Stairs I, Stappers B, Stinebring D R, Stovall K, Swiggum J, Taylor S R, Theureau G, Tiburzi C, Toomey L, Vallisneri M, van Straten W, Vecchio A, Wang J B, Wang Y, You X P, Zhu W W, Zhu X J 2016 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **458** 2161
- [21] Lentati L, Taylor S R, Mingarelli C M F, Sesana A, Sanidas S A, Vecchio A, Caballero R N, Lee K J, van Haasteren R, Babak S, et al. 2015 *Mon. Not. Ro. Astron. Soc.* **453** 2576

Time standard combined by pulsar time with atomic frequency standard*

YANG Tinggao^{1)2)†} TONG Minglei^{1)2)3)‡} HU Yue¹⁾²⁾³⁾

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

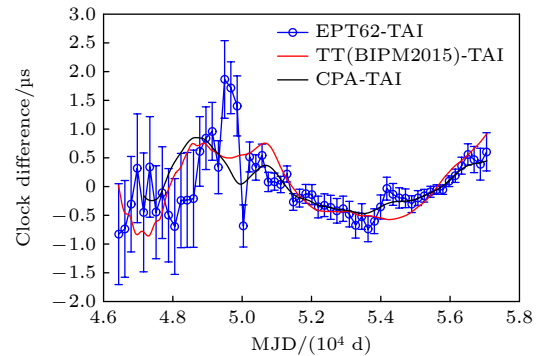
2) (*Key Laboratory of Time Reference and Application, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 5 November 2025; revised manuscript received 5 December 2025)

Abstract

A new time-scale EPT62 is constructed based on the observations of 62 millisecond pulsars in the Version A of the second data release from the International Pulsar Timing Array (IPTA). Timing noise is analyzed carefully for each pulsar, and then a weighted generalized least square algorithm is performed via Cholesky transformation to extract clock error of the referenced international atomic time-scale (TAI). The EPT62 spans 29 years, and the clock difference EPT62-TAI is shown in the figure. The clock difference between terrestrial time TT(BIPM2015) and TAI is also shown in this figure. EPT62-TAI and TT(BIPM2015)-TAI show generally similar trends except early few data points. Because available observational data are much sparse before MJD 50215, the corresponding EPT62-TAI data points in this period have larger errorbar. The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) published real-time frequency difference data between primary and secondary frequency standards (psfs) and TAI to provide frequency standards that define the SI second for constructing time-scale. The combined smoothing filter is employed to combine the clock difference EPT62-TAI and the frequency difference between frequency standards and TAI. Then pulsar time and atomic frequency standards combined time-scale (CPA) is derived through a combined smoothing filter. The clock difference CPA-TAI is shown by a black curve in the figure. The frequency difference curves of psfs-TAI clock difference before and after combined smoothing is presented. The constructing process of the CPA is described. The property of the CPA is compared in detail with terrestrial time TT(BIPMxxxx). The CPA combines the long term frequency stability of the EPT62 with the accuracy of the atomic frequency standards. In general, the property of the CPA is compatible to that of the TT(BIPMxxxx). The comparison of fractional frequency stability σ_z curves for EPT62-TAI, CPA-TAI and TT(BIPM2015)-TAI is shown in this study. The CPA can also be used as terrestrial time TT(BIPMxxxx). Terrestrial time TT(BIPMxxxx) becomes available one year later, whereas CPA may be computed and maintained in “real-time” in the future. Finally, a brief discussion and some conclusions are given.



Keywords: atomic time, frequency standard, millisecond pulsar, pulsar time, time-scale

DOI: [10.7498/aps.75.20251505](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251505)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251505](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251505)

* Project supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA0350502) and the SKA Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2020SKA0120103).

† Corresponding author. E-mail: yangtg@ntsc.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: mltong@ntsc.ac.cn

脉冲星时与原子频率基准结合的时间标准

杨廷高 童明雷 胡悦

Time standard combined by pulsar time with atomic frequency standard

YANG Tinggao TONG Minglei HU Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 051101 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251505

CSTR: 32037.14.aps.75.20251505

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251505>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于脉冲星观测的原子时波动检验研究

Research on variation test of atomic time based on pulsar observation

物理学报. 2023, 72(7): 079701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222208>

航天器处X射线脉冲星观测信号模拟方法

Simulation method of X-ray pulsar observation signal at spacecraft

物理学报. 2022, 71(22): 229701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221097>

临近空间X射线脉冲星信号传输特性分析

Analysis of transmission characteristics of X-ray pulsar signal in near-space

物理学报. 2025, 74(12): 129401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250183>

基于铯基准钟与光抽运守时型小铯钟的时间尺度算法

Time scale algorithm based on cesium atomic fountain clock and optically pumped small cesium clocks

物理学报. 2025, 74(19): 129401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250642>

基于异步光学采样的电光频率梳时间抖动测量

Using asynchronous optical sampling to measure timing jitter of electro-optic frequency combs

物理学报. 2024, 73(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240400>

毫秒时间分辨同步辐射X射线衍射和高压快速加载装置及应用

Millisecond time-resolved synchrotron radiation X-ray diffraction and high-pressure rapid compression device and its application

物理学报. 2022, 71(10): 100702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212360>