

# 基于脉冲星观测的原子时波动检验研究\*

韩孟纳<sup>1)2)</sup> 童明雷<sup>1)2)†</sup>

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)

(2022年11月19日收到; 2023年1月10日收到修改稿)

脉冲星时 (pulsar time, PT) 具有较高的长期稳定性, 其与原子时 (atomic time, AT) 的建立属于两个完全不同的物理过程. 因此, 脉冲星时可作为原子时波动的一种独立检验方式. 本文结合真实钟差数据, 展示了基于脉冲星时的原子时波动检验结果. 首先, 给出了 Parkes 脉冲星计时阵 (Parkes pulsar timing array, PPTA) 发布数据中四颗毫秒脉冲星的计时结果. 为进行原子时波动的检验, 利用四颗脉冲星的计时模型参数, 仿真生成以地球时 (terrestrial time, TT) (BIPM19) 为参考的脉冲到达时间 (pulse times of arrival, TOAs) 数据, 然后将参考时由 TT (BIPM19) 改为 TT (TAI). 基于此, 分别采用经典加权平均算法与维纳 (Wiener) 滤波算法提取了原子时相对于脉冲星时的波动. 将两种方法得到的检验结果进行对比, 结果表明 Wiener 滤波算法对原子时波动的提取效果优于加权平均算法. 本文在 Wiener 滤波算法提取钟差信号的基础上加入了小波阈值去噪算法以扣除高频噪声, 去噪后 PT 更接近于 TT (BIPM19), 进一步提高了 PT 对 AT 波动的检测能力. 对于 TOA 测量精度为 100 ns 的情况, PT 与 TT (BIPM19) 的差值大致保持在 40 ns 以内. 本文是在给定 TOA 测量精度的前提下研究进一步提高 PT 精度的方法, 对下一步 PT 更加有效的守时应用具有重要意义.

**关键词:** 脉冲星时, 原子时, 钟差, 计时残差**PACS:** 97.60.Gb, 02.10.Ud, 06.30.Ft**DOI:** 10.7498/aps.72.20222208

## 1 引言

时间频率技术包括时间频率的测量、比对、传递和同步, 该技术的发展极大地促进了科学技术的进步. 时间尺度包括频率稳定度与准确度等重要性能指标, 其中稳定度主要反映频率的均匀性, 而准确度反映的是频率与秒定义的一致性<sup>[1]</sup>. 国际原子时 (international atomic time, TAI) 是国际计量局 (bureau international des poids et mesures, BIPM) 采用 ALGOS 算法<sup>[2]</sup> 计算产生的, 其稳定度由全球 90 多个时频实验室的 500 多台原子钟的钟差比对数据共同保持, 准确度由基准频标的驾驭进行维持. ALGOS 算法属于经典加权平均算

法, 其直接计算结果为自由时标 (échelle atomique libre, EAL). EAL 秒长的均匀性好于单台物理钟, 但其与理想时标之间存在频率偏差, 通过基准频标的驾驭可在不降低长期稳定度的同时保证时标的准确度.

地球时 (terrestrial time, TT) 为一种理想的时标, 其尺度单位与旋转大地水准面上的 SI 秒保持一致. TAI 可视为 TT 的一种具体实现, 即  $TT(TAI) = TAI + 32.184 \text{ s}$ <sup>[3]</sup>. 为满足各国钟差比对实时性需求, BIPM 每月发布一次地方原子时  $TA(k)$  与 TAI 的比对数据, 其中  $k$  代表参与原子钟钟差比对的实验室编号. 数据点间隔为 5 d, 因此, TAI 受实时性需求的影响而精度有所降低. 此外, 受 EAL 的季节性及周年性变化、主频标不确

\* 科技部 SKA 专项 (批准号: 2020SKA0120103) 和国家自然科学基金 (批准号: U1831130) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [mltong@ntsc.ac.cn](mailto:mltong@ntsc.ac.cn)

定度及频率驾驭过程不完美等因素的影响, TAI 存在长期频率波动与季节性波动<sup>[4]</sup>. 为获得与理想时间尺度更接近的原子时标, BIPM 利用了所有可用的基准钟数据, 得到事后计算的另一种 TT 实现方式, 记为 TT (BIPM)<sup>[5]</sup>. TT (BIPM $XX$ ) 每年归算一次,  $XX$  为发布年份的后两位数字. 其计算过程中加入了黑体辐射改正及其他改正, 并对 EAL 相对于 TT 的频率偏差进行低通滤波与插值处理. 在脉冲星计时分析中, TT (BIPM) 可作为脉冲到达时间的参考时间尺度.

脉冲星是由大质量恒星超新星爆发或双星吸积塌缩后形成的中子星, 是地球上无法复制的研究高温、高密度、强引力和强磁场的极端条件下的天然实验室<sup>[6-9]</sup>. 脉冲星还被称为基础物理领域的精确时钟, 这归因于脉冲星异常规则的旋转和稳定的脉冲积分轮廓. 脉冲星按照能源机制可分为三类, 分别为旋转供能脉冲星、吸积供能脉冲星和磁场供能的磁星<sup>[10-13]</sup>. 旋转供能脉冲星通过消耗自身的转动能提供其辐射所需的能量, 是最典型的一类脉冲星. 吸积供能脉冲星多位于双星系统, 主要通过吸取伴星的物质来提供辐射所需的能量. 吸积的伴星物质在脉冲星周围沿磁力线高速落向脉冲星的两极, 并与脉冲星表面的物质撞击, 产生高能 X 射线辐射<sup>[14-15]</sup>. 针对脉冲轮廓变化的脉冲星, 研究其自转状态变化以及辐射特征的变化, 分析脉冲星磁层活动与自转变化的相关性, 探究星体磁层活动对自转不稳定性的影响, 可以更全面地认识脉冲星的自转减慢行为和辐射产生、变化的机制. 同时, 开展高灵敏度脉冲星观测, 研究自转不稳定性和辐射之间存在相关性, 为探究脉冲星计时噪声的磁层起源提供了观测依据, 也为研究脉冲星星体内部结构和外部磁层之间的相关性提供了可能. 探究脉冲辐射影响自转不稳定性关键因素以更全面地认识脉冲星.

脉冲星具有自转稳定度高的特性, 其中毫秒脉冲星自转的长期稳定度可媲美高精度的原子钟<sup>[16]</sup>. 且与基于原子能级跃迁建立的原子时相比, 脉冲星时建立在恒星质量天体的物理机制, 是与前者完全不同的物理过程. 因此, 基于脉冲星的时间尺度提供了一种独立检验原子时间系统长期稳定性的有效方法. 在进行高灵敏度脉冲星观测时, 单脉冲信号会表现出显著的变化, 如脉冲消零、模式变换和子脉冲漂移等特征. 利用国内外大型望远镜对毫秒

脉冲星进行单脉冲偏振观测, 通过多波段的辐射特征研究脉冲星磁层辐射的物理过程是解决磁层问题的重要方法. 此外, 脉冲星测时会受到色散变化、望远镜系统噪声、射频干扰、脉冲轮廓不稳定、自转不稳定和星际介质引起的噪声等因素的影响. 通过对单脉冲的长时间观测, 研究测时噪声的特征, 分析噪声的物理起源非常重要. 但由单颗脉冲星构建的脉冲星时受脉冲星固有计时噪声、信号传播路径噪声、原子时误差、太阳系历表误差以及引力波背景等多种因素的影响, 致使其短期稳定度与长期稳定度均较差. 若认为除参考原子时外, 其他所有因素对不同脉冲星的影响相互独立, 则结合参考钟对所有脉冲星的计时残差影响相同(单极性)的性质, 可利用多颗脉冲星构建综合脉冲星时间尺度 (ensemble pulsar timescale, EPT)<sup>[17-19]</sup>.

EPT 是同时观测多颗毫秒脉冲星, 并设计相应的算法提取计时残差的公共信号得到的, 其只能以钟差的形式体现. Petit 和 Tavella<sup>[20]</sup> 将原子时与脉冲星时进行比对, 并指出利用多颗毫秒脉冲星构建的综合脉冲星时可用于监测原子时的长期不稳定性; 2012 年, Hobbs 等<sup>[21]</sup> 给出了一种提取多颗星计时残差相关信号的新算法, 并建立了首个脉冲星时间尺度 TT (PT), 作为地球时 TT 的一种新的实现方式; 仲崇霞和杨廷高<sup>[22]</sup> 对比了四种综合脉冲星时算法, 包括经典加权平均算法、小波分析算法、Wiener 滤波算法以及小波域中的 Wiener 滤波算法, 并将四种 EPT 算法应用于两颗毫秒脉冲星观测数据; 杨廷高等<sup>[23]</sup> 基于脉冲星功率谱的幂律模型, 给出构建 EPT 的 Wiener 滤波方法. 本文在 Wiener 滤波提取原子时钟差信号的基础上加入了小波阈值去噪后的结果, 且结合 BIPM 的钟差发布数据<sup>[24]</sup> 对脉冲星时对原子时波动的检验结果进行展示与分析.

PPTA 是国际脉冲星计时阵 (international pulsar timing array, IPTA) 的重要组成部分, 其主要科学目标为直接探测低频引力波、提高太阳系行星历表的精度及建立脉冲星时间尺度<sup>[25]</sup>. 本文首先对 PPTA 中的四颗毫秒脉冲星 (J0437-4715, J1713+0437, J1744-1134, J1909-3744) 观测数据进行处理, 并分析四颗脉冲星的计时残差. 之后基于经典加权平均算法、Wiener 滤波算法以及小波阈值去噪等算法提取原子时相对于 PT 的变化, 并给出 PT 对 TAI 波动的检验结果.

## 2 四颗脉冲星计时分析

本文从 PPTA 第一批发布数据 [26] 中选取了四颗毫秒脉冲星的观测数据, 并采用 Tempo2 数据处理软件 [27] 对其进行处理. 四颗脉冲星的拟合后计时残差如图 1 所示, 计时残差均在零附近波动, 说明四颗星受红噪声的影响较小. 四颗星的观测数据密集程度不同, 其中 J0437-4715 的观测频率最高, 这是因为该星目前为计时精度最高的源, 其计时模型参数的测量精度最高, 因此应用较广泛. 此外, 从图 1 可以看出, 四颗星的稳定度在后期高于前期, 这与射电望远镜灵敏度的提高及接收机技术

的改进有关. 表 1 列出了数据处理过程使用的四颗脉冲星的基本参数, 包括脉冲星名称、在天球参考系中的位置坐标、自转频率、自转频率的一阶导数、周期确定的历元及色散延迟量等, 表中参数是对计时残差进行多次迭代拟合至收敛得到的. 参数的精确测量可以用于对脉冲到达时间进行高精度的预报.

## 3 原子时波动检验方法

原子时的建立与脉冲星时的建立属于两个完全不同的物理过程, 而 TT (PT) 与 TT (BIPM) 的差异很小, 因此其他时间尺度相对于 TT (BIPM)

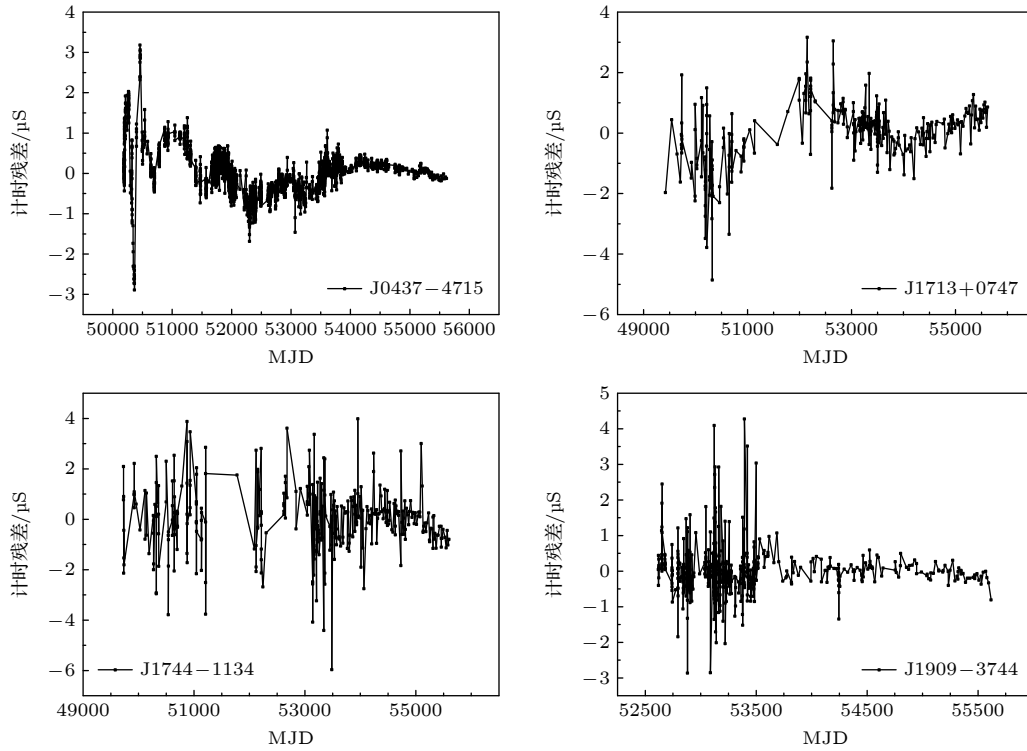


图 1 四颗脉冲星的计时残差 [28]

Fig. 1. Timing residuals of the four pulsars [28].

表 1 四颗脉冲星的基本参数 [28]

Table 1. Basic parameters of the four pulsars [28].

参数	含义	数值			
PSRJ	脉冲星名称	J0437-4715	J1713+0747	J1744-1134	J1909-3744
RAJ/(hh:mm:ss.sss)	J2000赤经	04:37:15.8961766	17:13:49.5327233	17:44:29.4057898	19:09:47.4346727
DECJ/(°)	J2000赤纬	-47:15:09.11071	+07:47:37.49783	-11:34:54.68134	-37:44:14.46677
$F_0/s^{-1}$	自转频率	173.6879458121841	218.8118404348010	245.4261197130545	339.3156872882437
$F_1/s^{-2}$	自转频率的一阶导数	$-1.728362 \times 10^{-15}$	$-4.08381 \times 10^{-16}$	$-5.38183 \times 10^{-16}$	$-1.614845 \times 10^{-15}$
PEPOCH/MJD	周期确定的历元	54500	54500	54500	54500
DM/( $cm^{-3} \cdot pc$ )	色散	2.6449	15.9903	3.1369	10.3927

的波动可利用 TT (PT) 加以检验. TOA 实测数据以测站本地时间为参考, 在观测数据处理过程中, 为扣除钟差的影响, 需将 TOA 转至 TT (BIPM) 时间尺度. 在本文中, 为进行原子时钟差检验的研究, 需将 TOA 转至 TAI 尺度. 从图 1 可以看出, 上述四颗脉冲星的计时残差波动范围较大, 该值比 TT (TAI) 相对于 TT (BIPM) 的钟差大得多, 且 TOA 数据的密集程度各不相同. 因此, 仅依靠这四颗星的 PPTA 观测数据难以检验 TAI 的波动情况, 需要提高脉冲星的计时精度并对候选源开展连续观测. 为方便计算, 本文采用仿真数据, 说明脉冲星对原子时波动的检验能力并对检验方法进行介绍. 本文利用 PPTA 数据中四颗星的参数文件仿真生成 TOA 数据, 四颗星的基本参数如表 1 所列. 仿真过程中 TOA 的不确定度设定为 100 ns, 数据时间区间为 [50190, 55618], 数据长度约 14.8 yr, 两次连续观测的时间间隔约 10 d. 数据处理的具体方法为: 将 TT (BIPM19) 作为仿真过程中脉冲到达时间的参考时间尺度, 生成 TOA 文件, 然后将参考时由 TT (BIPM19) 改为 TT (TAI). 按射电脉冲星数据处理流程对 TOA 数据进行处理, 得到拟合前计时残差. 为与真实钟差 TT (BIPM19)-TT (TAI) 进行比较, 这里将计时残差取负号. 由于原子钟钟差只考虑二阶以下的差值, 因此需对上述得到的拟合前计时残差进行二次多项式拟合并扣除, 得到拟合后计时残差. 四颗星的拟合前后计

时残差如图 2 所示, 可以看出, 四颗星的计时残差变化趋势基本一致, 只是受脉冲星自身噪声的影响, 残差波动程度有微小差异. 下文分别采用经典加权平均算法与 Wiener 滤波算法<sup>[29]</sup> 构建 EPT, 并基于此给出脉冲星时对原子时波动的检验结果.

### 3.1 经典加权平均算法

为消除单颗星的噪声对脉冲星时间的影响, 本节采用经典加权平均算法对上述四颗星的拟合后计时残差数据进行原子时钟差信号的提取. 加权平均算法中各颗脉冲星的权重反比于各星以 TT (BIPM) 为参考时得到的计时残差 RMS 值的平方, 各星对应的归一化权重值如表 2 所列. 利用加权平均算法提取的原子时钟差信号如图 3 所示. 图 3 中的蓝线为扣除二次多项式后的 TT (BIPM19)-TT (TAI), 其由 BIPM 发布的钟差数据得到, 红线为图 2 中四颗脉冲星的拟合后计时残差经加权平均计算后得到的 TT (PT)-TT (TAI). 从二者的对比结果来看, TT (PT) 可检测 TAI 相对于 TT (BIPM) 的变化, 说明综合脉冲星时可用于检验原子时的波动.

表 2 四颗脉冲星的归一化权重  
Table 2. Normalized weights of the four pulsars.

PSR	J0437-4715	J1713+0747	J1744-1134	J1909-3744
RMS/ $\mu$ s	0.215	0.457	0.653	0.191
$w_i$	0.385	0.085	0.042	0.488

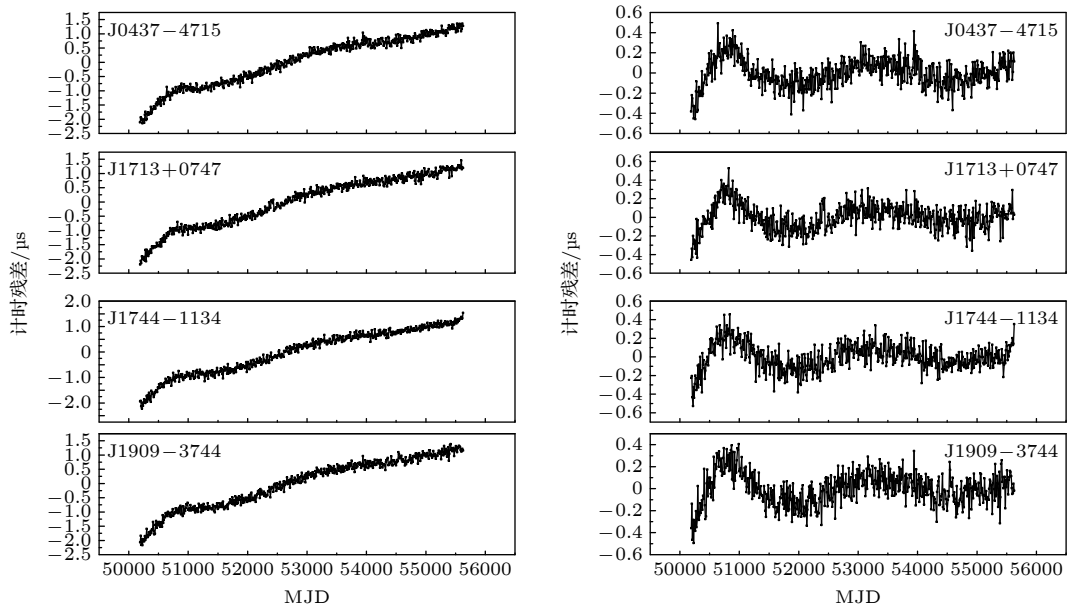


图 2 以 TAI 为参考时四颗星的拟合前后计时残差

Fig. 2. Pre-fit and post-fit timing residuals of four pulsars when the reference time scale is TAI.

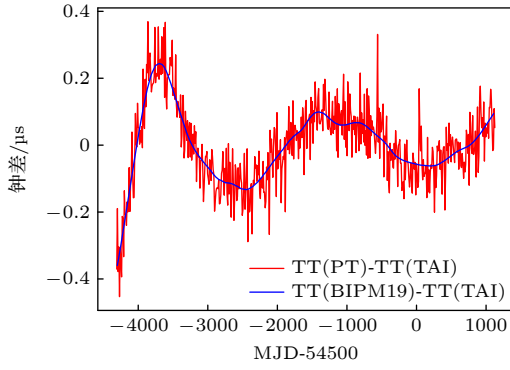


图 3 经典加权平均算法计算的 TT (PT)-TT (TAI)

Fig. 3. TT (PT)-TT (TAI) calculated by classical weighted average algorithm.

### 3.2 Wiener 滤波算法

2008 年, Rodin<sup>[30]</sup> 提出了采用 Wiener 滤波算法将原子钟钟差与脉冲星固有噪声对计时残差的贡献相区分, 以构建综合脉冲星时的方法. 本文也采用 Wiener 滤波方法, 从四颗星的拟合前计时残差中提取 TT (TAI) 与 TT (PT) 的差值, 并与 TT (BIPM19)-TT (TAI) 扣除二次项后的结果进行比较.

各星的拟合后计时残差  $x$  主要由两部分构成,  $x = s + v$ . 其中,  $s$  为待提取的原子时噪声信号,  $v$  为各脉冲星固有计时噪声. Wiener 滤波算法利用信号与噪声的相关函数建立滤波模型, 该算法也是一种线性最小均方误差估计, 实际信号与估计信号的差  $s - \hat{s}$  要有最小方差, 即<sup>[29]</sup>:

$$E\{e^2\} = E\{(s - x * h)^2\} = \min. \quad (1)$$

对 (1) 式中的  $h$  求导并令导数为 0, 可得维纳霍夫方程<sup>[31]</sup>:

$$Q_{sx}(j) = \sum_m h(m) Q_{xx}(j - m). \quad (2)$$

经 Wiener 滤波处理后, 相关信号的最优估计值为

$$\hat{s} = Q_{sx} Q_{xx}^{-1} x = Q_{ss} Q_{xx}^{-1} x, \quad (3)$$

式中,  $Q_{xx}$ ,  $Q_{ss}$ ,  $Q_{sx}$  均为协方差矩阵, 是各自对应的协方差构建的托普利兹矩阵. 矩阵对角线上的元素相等, 平行于主对角线上的元素也相等, 且矩阵中各元素关于此对角线对称. 协方差函数分别为<sup>[30]</sup>

$$\begin{aligned} \text{cov}(x, x) &= \langle x_i, x_j \rangle = \langle s_i, s_j \rangle + \langle v_i, v_j \rangle, \\ \text{cov}(s, s) &= \langle s_i, s_j \rangle, \\ \text{cov}(s, x) &= \langle s_i, x_j \rangle = \langle x_i, s_j \rangle = \langle s_i, s_j \rangle, \\ \text{cov}(v, v) &= \langle v_i, v_j \rangle, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $n$  为滤波输入的测量值个数,  $\langle \rangle$  符号代表综

合平均. 由于拟合后计时残差属于广义平稳随机过程, 因此协方差函数只与时间差有关<sup>[32]</sup>. 假设不同脉冲星的固有计时噪声互不相关, 钟信号的协方差函数可由多颗脉冲星残差数据之间的互协方差函数获得, 即:

$$\langle s_i, s_j \rangle = \langle x_i, x_j \rangle, \quad (k, l = 1, 2, \dots, M), \quad (5)$$

式中,  $k$  与  $l$  代表两颗不同的脉冲星,  $M$  为脉冲星的总数. 多星综合处理后的残差信号为

$$\hat{s}_e = \frac{2}{M(M-1)} \sum_m^{M(M-1)} m Q_{ss} \cdot \sum_{i=1}^M w^i Q_{xx}^{-1} \cdot i r, \quad (6)$$

式中,  $w^i$  为第  $i$  颗脉冲星的权重.

四颗星的拟合后计时残差经 Wiener 滤波处理后提取到的钟差信号如图 4 所示, 这里四颗星各自的归一化权重仍采用表 2 的值. 图 4 中的蓝色曲线代表 TT (BIPM19)-TT (TAI), 红线为对四颗脉冲星的拟合后计时残差使用 Wiener 滤波算法提取的 TT (PT)-TT (TAI). 从图 4 可以看出, 经 Wiener 滤波提取到的钟差信号与 TT (BIPM19)-TT (TAI) 的变化趋势一致, 且与经典加权平均算法构建的综合脉冲星时结果相比, Wiener 滤波提取的钟差信号波动程度更低, 与 TT (BIPM19)-TT (TAI) 的变化趋势更加接近. 为更加形象地证明这一结果, 将加权平均算法与 Wiener 滤波算法得到的 TT (PT) 与 TT (BIPM19) 之间的差值示于图 5, 图中的黑线为加权平均结果, 红线为 Wiener 滤波结果. 从图 5 可以看出, 两种方法计算的 TT (PT) 相对于 TT (BIPM) 的差值均在零附近波动, 波动振幅约 100 ns, 即仿真过程设定的 TOA 不确定度. 这

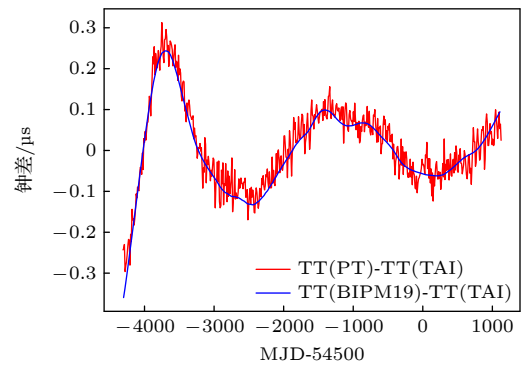


图 4 Wiener 滤波算法计算的 TT (PT)-TT (TAI)

Fig. 4. TT (PT)-TT (TAI) calculated by Wiener filtering algorithm.

说明 TOA 测量精度是影响 PT 对原子时波动检验结果的一个重要因素, 应通过提高观测设备的灵敏度、尽可能地削弱红噪声影响、提高计时模型精度等方式提高 TOA 的测量精度 [33]. 从图 5 还可以明显地看出, Wiener 滤波算法计算的 TT (PT1)-TT (BIPM19) 小于经典加权平均算法 TT (PT2)-TT (BIPM19) 计算的结果, 说明 TT (PT1) 与 TT (BIPM19) 更加接近, 即 Wiener 滤波算法更适用于原子钟钟差信号的提取.

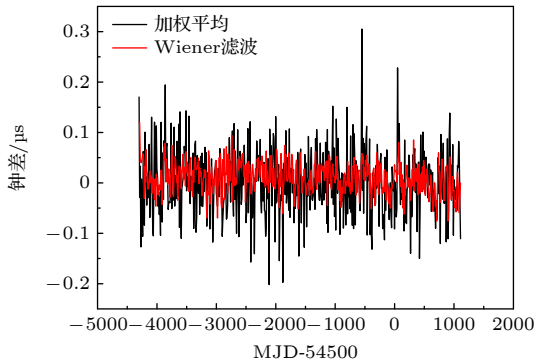


图 5 TT (PT) 与 TT (BIPM19) 的差值

Fig. 5. Differences between TT (PT) and TT (BIPM19).

#### 4 钟差信号去噪

为进一步扣除各颗脉冲星的计时噪声, 更好地展示综合脉冲星时与 TT (BIPM) 之间的关系, 本文采用了小波变换法 [34] 对上述所得钟差信号进行平滑降噪处理. 小波分析在天体物理测量中具有可行性和应用前景, 是近年来国际上一个前沿研究领域, 它是一种信号与信息处理的工具, 是继 Fourier 分析之后的又一有效的时频分析方法 [35]. 小波在整个时间范围内的振幅均值为零, 其具有突变的振幅和频率, 且具有有限的持续时间. 小波变换没有采用加窗的思想, 也没有做傅里叶变换, 而是将傅里叶变换中的无限长的三角函数基更换为有限长的、会衰减的小波基, 通过伸缩和平移对信号进行多尺度细化分解.

小波变换的数学表达式为

$$W(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) * \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt, \quad (7)$$

其中,  $f(t)$  为原始信号;  $a, \tau$  为尺度和平移量, 二者分别控制小波函数的伸缩和平移:  $a$  与频率相关, 而  $\tau$  与时间对应. 因此, 小波变换的优点在于不仅

可以获得频率, 而且可以定位到时间, 所以更适用于分析瞬时信号, 且其对于大部分信号的平滑去噪以及监测的效果都比较好. 经小波分解后的信号可以表示为

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m \varphi(t-m) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} d_{nm} \phi(2^n t - m), \quad (8)$$

式中,  $\varphi(t)$  为母小波, 其构成基本的小波函数;  $n$  决定了小波基的频率特性, 而  $m$  控制着小波基的时域转换;  $\phi(t)$  为父小波, 可以在不同的分辨级上对信号进行分解. 小波分解结构树如图 6 所示, 对于三层分解, 信号可表示为  $S = a_3 + d_3 + d_2 + d_1$ . 多分辨分解可得到概貌信号和细节信号, 概貌信号只有一个, 其随着分解次数的增加越来越光滑; 细节信号随着分解次数的增加而增加. 根据这一原理, 可实现信号和噪声的分离, 之后再对信号的重构即可实现信号去噪.

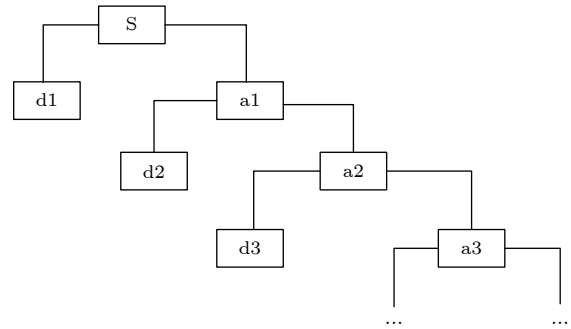


图 6 小波分解树结构图

Fig. 6. Structure diagram of the wavelet decomposing tree.

经小波阈值去噪后的钟差信号 TT (PT1)-TT (TAI) 如图 7 所示. 图 7 上图中的蓝线为原始钟差信号, 下图为原始信号去噪后的结果, 两个图中的黄色曲线代表 TT (BIPM19)-TT (TAI). 本文选用 Daubechies8 小波 [36], 选择不同的阈值将得到不同的滤波结果. 为平衡信号保留与噪声扣除之间的关系, 本文阈值选为 0.4. 从图 7 可以看出, 经小波阈值扣除相应噪声后, 钟差对比结果更加清晰, 四颗星构建的 TT (PT) 与 TAI 的差值与 TT (BIPM19) 与 TAI 的差值近似一致.

小波阈值去噪前后 TT (PT1) 相对于 TT (BIPM19) 的变化情况如图 8 所示. 与去噪处理前相比, 去噪后残差的波动范围更小, 说明小波阈值

去噪可扣除部分非相干噪声, 去噪后钟差信号检验效果更好. 去噪后 TT (PT1)-TT (BIPM19) 的分布情况如图 9 所示, 图中蓝色曲线为正态分布曲线. TT (PT1) 相对于 TT (BIPM19) 的残差服从高斯分布, 说明扣除钟差后的噪声类型为高频噪声.

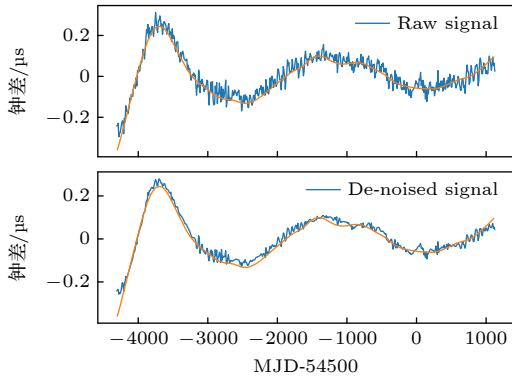


图 7 TT (PT)-TT (TAI) 经小波阈值去噪前后的对比图  
Fig. 7. TT (PT)-TT (TAI) before and after processing by wavelet threshold denoising method.

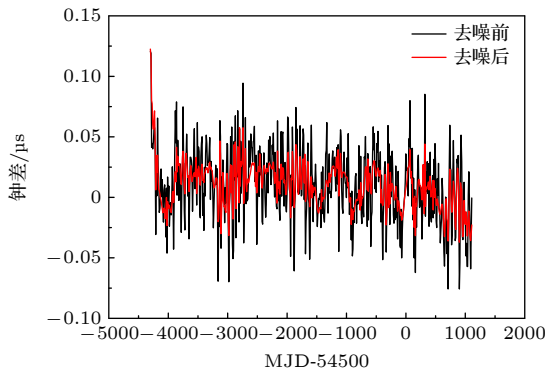


图 8 小波阈值去噪前后 TT (PT) 相对于 TT (BIPM19) 的变化  
Fig. 8. Changes of TT (PT) relative to TT (BIPM19) before and after wavelet threshold denoising.

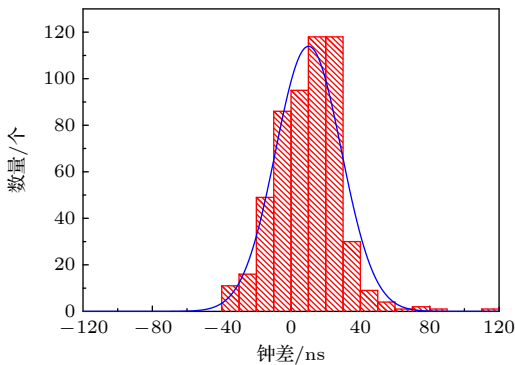


图 9 小波阈值去噪后 TT (PT)-TT (BIPM19) 的分布图  
Fig. 9. Distribution map of TT (PT)-TT (BIPM19) after processing by wavelet threshold denoising method.

## 5 总结与展望

本文首先对 PPTA 发布数据中四颗毫秒脉冲星的观测数据进行处理, 得到以 TT (BIPM19) 为参考时间尺度时四颗星的计时结果. 随后, 利用参考钟对所有脉冲星计时残差影响相同的特点, 构建脉冲星时对原子时的波动情况进行检验, 并基于 PPTA 仿真数据给出 TAI 相对于 TT (PT) 的波动结果, 证实了脉冲星时是检验原子时波动的一种有效手段. 分别采用了两种方法构建 EPT, 即经典加权平均算法与 Wiener 滤波算法. 将二者的结果进行对比, 得出在原子时异常波动检验方面, Wiener 滤波算法构建的 EPT 要优于经典加权平均算法的结论. 最后, 对提取的 TAI 相对于 TT (PT) 的钟差信号进行小波阈值去噪处理, 去噪后 TT (PT) 与 TT (BIPM19) 相似性更加明显, 进一步扣除了脉冲星自身噪声对检验结果的影响.

本文研究中仅给出了由四颗毫秒脉冲星的仿真数据得到的检验结果. 在实际观测中, 所用脉冲星的计时精度、观测数据的密集程度等也是影响检验结果的重要因素. 为更好地反映原子时的波动情况, 需对候选源开展持续而密集的观测, 提高 TOA 测量精度, 深入研究影响脉冲星计时精度的因素, 尤其是产生机制尚不明确的红噪声对脉冲星稳定度的影响. 此外, 增加计时精度较高的毫秒脉冲星数量有望进一步提高原子时波动的估计精度.

我国自主研发的、世界最大的单口径射电望远镜 FAST 于 2021 年 3 月 31 日对全球开放, 接受来自全世界的观测申请. FAST 凭借大口径、宽频带、高灵敏度、覆盖天区 70% 等高性能指标优势, 目前巡天观测到的新脉冲星数量达到 300 多颗. 其中, 部分毫秒脉冲星 1—2 yr 的计时精度明显优于 IPTA [37–38]. 因此, 基于 FAST 的脉冲星观测数据构建 EPT 有望提高原子时波动的检验能力. 在后续工作中, 我们也将进行脉冲星筛选、候选源取权方案的研究. FAST 已经发现了很多毫秒脉冲星和双星, 我们计划对这些脉冲星开展脉冲到达时间观测, 评估它们的计时精度, 筛选计时精度高的脉冲星, 这对提高极低频引力波探测的灵敏度、建立更高精度的脉冲星时间标准等方面的研究具有重要的应用价值. 在 FAST 正常观测的基础上, 配套发展相应的测时数据处理方法, 开发相应软件. 通过

FAST 数据与国内其他望远镜测时数据融合、中国数据与国际脉冲星测时阵公开数据的比对, 形成中国脉冲星计时阵列数据, 用来建立高精度脉冲星时间标准, 并应用于国家标准时间的守时工作中, 提高独立自主和安全可靠性能。

## 参考文献

- [1] Allan D W 1987 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **34** 647
- [2] Panfilo G, Arias E F 2009 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **57** 140
- [3] Kaplan G H 2006 arXiv: 0602086[astro-ph]
- [4] Guinot B 1988 *Astron. Astrophys.* **192** 370
- [5] Petit G 2003 *Proceedings of the 35th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting* San Diego, California, December 2–4, 2003 p317
- [6] Gao Z F, Wang N, Shan H, Li X D, Wang W 2017 *Astrophys. J.* **849** 19
- [7] Gao Z F, Li X D, Wang N, Yuan J P, Wang P, Peng Q H, Du Y J 2016 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **456** 55
- [8] Fu G Z, Xing C C, Wang N 2020 *Eur. Phys. J. C* **80** 582
- [9] Wang H, Gao Z F, Jia H Y, Wang N, Li X 2020 *Universe* **6** 63
- [10] Zhu C, Gao Z F, Li X D, Wang N, Yuan J P, Peng Q 2016 *Mod. Phys. Lett. A* **31** 1650070
- [11] Yan F Z, Gao Z F, Yang W S, Dong A J 2021 *Astron. Nachr.* **342** 249
- [12] Gao Z F, Wang N, Peng Q H, Li X D, Du Y J 2013 *Mod. Phys. Lett. A* **28** 1350138
- [13] Gao Z F, Song D L, Li X, Shan H, Wang N 2019 *Astron. Nachr.* **340** 241
- [14] Deng Z L, Gao Z F, Li X D, Shao Y 2020 *Astrophys. J.* **892** 4
- [15] Deng Z L, Li X D, Gao Z F, Shao Y 2021 *Astrophys. J.* **909** 174
- [16] Lorimer D R, Kramer M 1965 *Handbook of Pulsar Astronomy* (New York: Cambridge University Press) pp32–34
- [17] Coles W, Hobbs G, Champion D J, Manchester R N, Verbiest J P W 2011 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **418** 561
- [18] 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. R. Astron. Soc.* **491** 5951
- [19] Gao F, Tong M L, Gao Y P, Yang T G, Zhao C S 2019 *Res. Astron. Astrophys.* **19** 100
- [20] Petit G, Tavella P 1985 *Astron. Astrophys.* **308** 290
- [21] 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. R. Astron. Soc.* **427** 2780
- [22] Zhong C X, Yang T G 2009 *Acta Astronom. Sin.* **50** 425 (in Chinese) [仲崇霞, 杨廷高 2009 *天文学报* **50** 425]
- [23] Yang T G, Tong M L, Gao Y P 2022 *Res. Astron. Astrophys.* **22** 105012
- [24] BIPM Time Department <https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/data/>[2022-10-07]
- [25] Hobbs G 2013 *Classical Quant. Grav.* **30** 224007
- [26] PPTA Data Release <https://doi.org/10.4225/08/534CC21379C12>[2022-10-08]
- [27] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N 2006 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **369** 655
- [28] Manchester R N, Hobbs G, Bailes M, Coles W A, van Straten W, Keith M J, Shannon R M, Bhat N D R, Brown A, Burke-Spolaor S G, Champion D J, Chaudhary A, Edwards R T, Hampson G, Hotan A W, Jameson A, Jenet F A, Kesteven M J, Khoo J, Kocz J, Maciesiak K, Osłowski S, Ravi V, Reynolds J R, Sarkissian J M, Verbiest J P W, Wen Z L, Wilson W E, Yardley D, Yan W M, You X P 2012 *Publ. Astron. Soc. Pac* **30** 17
- [29] Wiener N, Mathematician C 1949 *Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series: with engineering applications* (Massachusetts: MIT press) pp1043–1054
- [30] Rodin A E 2008 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **387** 1583
- [31] Noor M A 1993 *J. Optim. Theory Appl.* **79** 197
- [32] Kopeikin S M 1999 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **305** 563
- [33] Tong M L, Yang T G, Zhao C S, Gao Y P 2017 *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.* **47** 099503 (in Chinese) [童明雷, 杨廷高, 赵成仕, 高玉平 2017 *中国科学: 物理学 力学 天文学* **47** 099503]
- [34] Zhao R M, Cui H 2015 *Proceedings of the 14th International Symposium on Plasma Chemistry* Sousse, Tunisia, December 18–20, 2015 p1
- [35] Shan H, Yuan J P, Wang N, Wang Z 2022 *Astrophys. J.* **935** 117
- [36] Wang Y H, Wang D X, Yang H S 2004 *Journal of Liaoning Institute of Technology* **24** 7 (in Chinese) [王英红, 王冬霞, 杨洪升 2004 *辽宁工学院学报* **24** 7]
- [37] Cameron A D, Li D, Hobbs G, Zhang L, Miao C C, Wang J B, Yuan M, Wang S, Jacobs Corban G, Cruces M, Dai S, Feng Y, Han J, Kaczmarek J F, Niu J R, Pan Z C, Qian L, Tao Z Z, Wang P, Wang S Q, Xu H, Xu R X, Yue Y L, Zhang S B, Zhi Q J, Zhu W W, Champion D J, Kramer M, Zhou S Q, Qiu K P, Zhu M 2020 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **495** 3515
- [38] Han J L, Wang C, Wang P F, Wang T, Zhou D J, Sun J H, Yan Y, Su W Q, Jing W C, Chen X, Gao X Y, Hou L G, Xu J, Lee K J, Wang N, Jiang P, Xu R X, Yan J, Gan H Q, Guan X, Huang W J, Jiang J C, Li H, Men Y P, Sun C, Wang B J, Wang H G, Wang S Q, Xie J T, Xu H, Yao R, You X P, Yu D J, Yuan J P, Yuen R, Zhang C F, Zhu Y 2021 *Res. Astron. Astrophys.* **21** 107

# Research on variation test of atomic time based on pulsar observation\*

Han Meng-Na<sup>1)2)</sup> Tong Ming-Lei<sup>1)2)†</sup>

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

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

( Received 19 November 2022; revised manuscript received 10 January 2023 )

## Abstract

Pulsar time (PT) has high long-term stability, and its establishment process is completely different from that of atomic time (AT). Therefore, pulsar-based time scale can be used as an independent test for the fluctuation of atomic time scale. In this paper, the test results of the fluctuation of atomic time using pulsar time are presented in combination with the real clock difference data. In order to test the fluctuation of atomic time, the timing model parameters of four pulsars are used to simulate the pulse times of arrival (TOAs) data with TT(BIPM19) as the reference, and then the reference time is changed from TT(BIPM19) to TT(TAI). Based on this, the classical weighted average algorithm and the Wiener filtering algorithm are used to extract the variations of the atomic time relative to the pulsar time. The test results obtained by the two methods are compared, and it shows that the Wiener filtering algorithm is better than the weighted average algorithm for the extraction of the fluctuation of the atomic time. The wavelet threshold denoising method is added to the clock difference signal extracted by the Wiener filtering algorithm to deduct the high-frequency noise. After denoising, PT is closer to TT(BIPM19), which further improves the ability of PT to detect the fluctuation of AT. For the TOA measurement accuracy of 100 ns, the difference between PT and TT(BIPM19) can be kept roughly within 40 ns. This paper studies the method of further improving the accuracy of PT under the premise of given TOA measurement accuracy, which is of great significance for the next step to use PT for more effective application of time keeping.

**Keywords:** pulsar time, atomic time, clock difference, timing residual

**PACS:** 97.60.Gb, 02.10.Ud, 06.30.Ft

**DOI:** 10.7498/aps.72.20222208

---

\* Project supported by the SKA Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2020SKA0120103) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1831130).

† Corresponding author. E-mail: [mltong@ntsc.ac.cn](mailto:mltong@ntsc.ac.cn)



## 基于脉冲星观测的原子时波动检验研究

韩孟纳 童明雷

### Research on variation test of atomic time based on pulsar observation

Han Meng-Na Tong Ming-Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 079701 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222208

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222208>

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

#### 面向综合定位导航授时系统的天地基脉冲星时间研究

Space/ground based pulsar timescale for comprehensive PNT system

物理学报. 2021, 70(13): 139701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210288>

#### 基于两级压缩感知的脉冲星时延估计方法

Pulsar time delay estimation method based on two-level compressed sensing

物理学报. 2018, 67(9): 099701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172100>

#### 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>

#### 基于自归一化神经网络的脉冲星候选体选择

Pulsar candidate selection based on self-normalizing neural networks

物理学报. 2020, 69(6): 069701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191582>

#### 原子钟噪声变化时改进的Kalman滤波时间尺度算法

An improved Kalman filter time scale algorithm for atomic clock noise variation

物理学报. 2020, 69(17): 170201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191920>

#### 具有多物理特性的X射线脉冲星导航地面验证系统

Ground verification system of X-ray pulsar navigation with multi-physical properties

物理学报. 2019, 68(8): 089701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182232>