

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.06.004

基于 IPTA 数据的毫秒脉冲星综合稳定度评估

姚定凯¹, 孙海峰^{1,2,3}, 沈利荣¹, 刘雨萌¹, 李小平^{1,2,3}

(1. 西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710126;

2. 陕西省空间超限探测重点实验室, 西安 710000;

3. 鹏城实验室, 广东 深圳 518000)

摘要: 利用脉冲星极其稳定的自转频率可以形成一种天文时间基准, 部分毫秒级脉冲星的稳定度甚至超越了原子钟, 但其观测稳定度易受多种噪声源的影响。一般来说, 不同的脉冲星的噪声大部分是相互独立的, 因此可以通过加权综合和滤波算法构建综合脉冲星时, 有效去除计时残差中的噪声。针对此问题, 采用 10 颗毫秒级脉冲星的国际脉冲星计时阵列 (international pulsar timing array, IPTA) 数据进行了稳定度评估分析, 其中 7 颗脉冲星的观测数据长度在 10 年以上。综合考虑单颗脉冲星稳定度评估的结果和观测数据的长度后, 筛选出了 4 颗脉冲星用于构建综合脉冲星时。同时对比了经典加权算法、小波分解算法和维纳滤波算法的综合脉冲星时稳定度结果。结果表明: 脉冲星的长期稳定度优于短期稳定度, 2 颗脉冲星在 1 年处稳定度达 10^{-15} 量级, 8 颗在 1 000 天处也达到了 10^{-15} 量级, 其中 PSR J1600-3053 在 5 年处稳定度达到了最佳, 为 7.023×10^{-16} 。此外, 三种算法中, 维纳滤波建立的综合脉冲星时稳定度最佳, 在 5 年处达到了 1.502×10^{-15} , 优于参与构建的其他所有脉冲星的 5 年稳定度。

关键词: 综合脉冲星时; 计时稳定度; 计时残差; 维纳滤波; 小波分解

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2023)06-0024-08

Ensemble stability estimate of millisecond pulsars using IPTA observations

YAO Dingkai¹, SUN Haifeng^{1,2,3}, SHEN Lirong¹, LIU Yumeng¹, LI Xiaoping^{1,2,3}

(1. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Space Extreme Detection, Xi'an 710000, China;

3. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Utilizing the highly stable rotational frequencies of pulsars can establish an astronomical time reference. In fact, the stability of some millisecond pulsars surpasses that of atomic clocks. However, the observed stability of pulsars is susceptible to various sources of noise. Generally, the noise in different pulsars is mostly independent, allowing for the effective removal of the noise in timing residuals through weighted synthesis and filtering algorithms when constructing pulsar timing arrays. In addressing this issue, an estimation of stability is conducted using data from the international pulsar timing array (IPTA), comprising observations from 10 millisecond pulsars, with 7 of them having data spanning over a decade. Combining the individual timing stability esti-

收稿日期: 2023-07-31; 修订日期: 2023-11-16

基金项目: 国家自然科学基金 (62103313)

作者简介: 姚定凯 (1999-), 男, 博士研究生, 主要从事天文时间基准方面的研究。

通信作者: 孙海峰 (1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高精度自主导航、空间精密测量方面的研究。

mation with the lengths of the observation data, 4 pulsars are selected for the synthesis of a pulsar timing array. Furthermore, a comparison is made among the results of classical weighting algorithms, wavelet decomposition algorithms, and Wiener filtering algorithms in terms of the stability of the ensemble pulsar timing. The findings reveal that long-term stability of pulsars exceeds their short-term stability. The stability of two pulsars reaches the level of 10^{-15} at 1 year, and eight of them achieve this level at 1 000 days. Notably, PSR J1600-3053 exhibits the best stability at 5 years, with a value of 7.023×10^{-16} . Additionally, among the three algorithms, the ensemble pulsar time provided by the Wiener filter shows the best stability, reaching 1.502×10^{-15} at 5 years, surpassing the 5-year stability of all other constructed pulsars.

Key words: Ensemble pulsar time; Timing stability; Timing residuals; Wiener filtering; Wavelet decomposition

0 引言

脉冲星是 20 世纪天文学的四大重要发现之一,它是一种高速旋转的中子星,能够有规律地发射电磁脉冲,在长时间尺度上,脉冲星的自转周期十分稳定,利用脉冲星的计时信息,可以推动许多重要的应用,例如空间自主导航、脉冲星时构建、引力波探测等^[1-4]。

毫秒脉冲星于 1982 年被 Backer 首次发现^[2],它可以长期稳定地向外辐射脉冲信号,部分毫秒脉冲星(如 PSR J0437-4715)的频率稳定度要优于原子钟^[3],可达 10^{-15} 量级,以脉冲星高稳定度自转频率建立的时间基准,被称为脉冲星时(pulsar time, PT)。脉冲星时稳定度的研究始于 1994 年,Kaspi 等^[4]处理了 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 的阿雷西博天文台观测数据,当时间跨度达到 1 年以上时,两颗脉冲星的稳定度可达 10^{-14} 量级。单颗脉冲星的稳定度很容易受到各种噪声源的影响,通过构建综合脉冲星时的方法可以有效提高其稳定度。Petit 等^[3]在 1996 年首次采用经典加权算法,使用三颗毫秒脉冲星的实测数据构建了综合脉冲星时,在 2.5 年的时间尺度上综合稳定度优于单颗脉冲星,达到了 2×10^{-14} 。中科院国家授时中心的仲崇霞^[5]将小波分解与维纳滤波结合,通过该方法构建的综合脉冲星时与经典方法相比稳定度更高。

阿雷西博望远镜(Arecibo observatory)最先对各大脉冲星展开长期观测,但随着使用时间的延长,器件逐渐老化,维护成本也逐渐变高,因此其逐渐被弃用。当前,脉冲星的高精度计时观测主要借助于脉冲星计时阵列,由各国的射电望远镜联合建立而成,如 Parkes 脉冲星计时阵列(Parkes pulsar

timing array, PPTA)、欧洲脉冲星计时阵列(European pulsar timing array, EPTA)和北美纳赫兹引力波观测天文台(North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves, NANOGrav),三者又共同组成了国际脉冲星计时阵(international pulsar timing array, IPTA)。IPTA 到目前已对 60 余颗毫秒脉冲星进行了长期观测^[6],国内外学者使用这些数据对脉冲星时进行了详细的研究。同时,中国 500 m 口径球面射电望远镜(five-hundred-meter aperture spherical telescope, FAST)通过对脉冲星进行巡天观测,截止到目前,FAST 已经发现了 800 多颗新脉冲星。

利用脉冲星计时阵列数据可以构建脉冲星时,Hobbs 等^[7]利用 PPTA 的数据和 Cholesky 计时模型,建立了精度与国际原子时相媲美的综合脉冲星时间尺度 TT(PPTA11)。Rodin 等^[8]研究了基于最优维纳滤波方法的综合脉冲星时算法,同样建立了与原子时精度相当的综合脉冲星时。尹东山等^[9]利用 Vondrak 算法构建了由 36 颗毫秒脉冲星参与的综合脉冲星时;张彩红等^[10]以 Parkes 观测的 12 颗毫秒脉冲星实测数据为基础,采用傅立叶级数建立了高稳定度的综合脉冲星时并利用其实现了地球时;周庆勇等^[11-12]分别对 IPTA 计时数据、中子星内部成分探测器(neutron star interior composition explore, NICER)观测数据和 FAST 模拟数据对脉冲星时稳定度进行了评估,同时使用了 4 颗毫秒脉冲星数据采用双谱滤波算法构建了综合脉冲星时。2018 年,Rodin 等^[8]基于 1995—2010 年 64 m Parks 的脉冲星数据,构建了综合脉冲星时间尺度 PT-TT (BIPM2011),在 15 年的观测区间上,波动不超过 $(0.8 \pm 0.4) \mu\text{s}$,15 年稳定度 $\sigma_z = (0.6 \pm 1.6) \times 10^{-15}$ 。2020 年,

Hobbs 等^[13]采用 IPTA DR1 数据集 40 多颗脉冲星时间建立了 TT(IPTA16)脉冲星时间尺度。在通过 TT(IPTA16)评估了 TT(BIPM17)的稳定度后, Hobbs 认为脉冲星时在未来 10 年内,很难对 TT 时间尺度的稳定性做出贡献,但其在原子时间尺度的独立检查方面是非常有价值的。2022 年,董明雷等^[14]基于脉冲星功率谱的幂律模型,开发了一种构建脉冲星综合时间尺度的维纳滤波算法,结果表明:当观测时间大于 8 年时,EPT-TAI 的频率稳定性略优于 TT(BIPM2015)-TAI。

上述研究充分论证了综合脉冲星时的构建方法并分析了其稳定度。为了得到更稳定的综合脉冲星时,关键之一是脉冲星的选择,需要兼顾到观测数据的长度和计时稳定度,但针对此问题的研究较为缺失。因此,本文采用 IPTA 数据对 10 颗毫秒脉冲星的稳定度进行了评估,从中筛选出了 4 颗脉冲星,分别使用经典加权算法、小波分解算法和维纳滤波算法构建了综合脉冲星时,并开展了稳定度的评估。

1 脉冲星稳定度评估方法

频率稳定度是时间基准最重要的特性,它影响到很多领域的科学研究和实际应用。对于原子时而言,其稳定度的分析方法一般采用 $\sigma_y(\tau)$ 评估方法,即 Allan 方差^[15],但 $\sigma_y(\tau)$ 估计方法对频率一阶导数的变化并不敏感。但对于脉冲星来说,频率一阶导数的变化不可忽略且每颗脉冲星的一阶导数值都不相同。脉冲星的频率变化特征导致传统的 $\sigma_y(\tau)$ 方法并不适用于脉冲星时的评估,鉴于此,需要采用一种更合适的评估方法用于评估脉冲星时的稳定度。

Taylor 等^[16]提出了与脉冲星计时残差的三次差分相联系的 $\sigma_z(\tau)$ 估计方法,该估计方法更适用于对脉冲星时稳定度的评估。

$$D_3(t, \tau) = \frac{x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) - 3x\left(t + \frac{\tau}{6}\right) + 3x\left(t - \frac{\tau}{6}\right) - x\left(t - \frac{\tau}{2}\right)}{2\sqrt{5}\tau} \quad (1)$$

定义 $\sigma_z(\tau) = \sqrt{D_3(t, \tau)}$, 该方法对频率一阶导很敏感,适用于脉冲星时稳定度分析。Matsakis 等^[17]利用 τ 区间上拟合三次项系数的加权均方根定义 $\sigma_z(\tau)$, 当外部输入为约化儒略日时间 $t_{\text{MJD},i}$ 、计时残差 x_i 和误差 σ_i , 它的计算步骤可以分为以下

几步:

1) 将时间单位转换为秒 $t_i = t_{\text{MJD},i} \times 86\,400$ ($i = 1, \dots, n$)。

2) 计算时间跨度 $T = t_n - t_1$ 。

3) 将序列等分为长度为 τ 的不重叠子区间, $\tau = T, T/2, T/4, \dots$ 。

4) 在每个子序列上进行三次多项式拟合:

$$X(t) = c_0 + c_1(t - t_0) + c_2(t - t_0)^2 + c_3(t - t_0)^3 \quad (2)$$

使得加权平方和 $\left[\frac{x_i - X(t_i)}{\sigma_i}\right]^2$ 最小, 以误差 σ_i 的倒数为权重, 它的值取自脉冲到达时间 (time of arrival, TOA) 的不确定度。值得注意的是, 并不是每个 τ 区间都是可用的, 其应该满足以下两个条件: 区间内至少有四个点且区间内第一个点和最后一个点之间的时间跨度大于 $\tau/\sqrt{2}$ 。 τ 的取值与数据的分布情况有关并不能无限小, 设区间个数为 m , 可用 τ 区间个数为 n , 当 $n/m < 0.1$ 时, 可用区间数小于 10%, 此时停止 τ 区间的划分。定义 $\sigma_z(\tau)$ 如下

$$\sigma_z(\tau) = \frac{\tau^2}{2\sqrt{5}} \langle c_3^2 \rangle^{1/2} \quad (3)$$

其中, $\langle c_3^2 \rangle$ 表示子区间内 c_3 平方的加权平均值, 权重为 c_3 误差的倒数。求出 $\sigma_z(\tau)$ 的值后一般采用对数坐标系绘制 $\sigma_z(\tau)$ 随 τ 区间长度的变化情况。

2 综合脉冲星时算法

2.1 经典加权算法

经典加权算法是对多颗单脉冲星定义的脉冲星时进行加权综合。基于脉冲星时的稳定度 $\sigma_z(\tau)$ 评估方法, 对每颗脉冲星的计时残差进行加权平均, 取权标准为每颗脉冲星定义的脉冲星时 PT_i 的长期不稳定度的倒数, 并且还要尽量消除由残差的系统性趋势所引入的噪声。基于以上的理论, 综合脉冲星时 EPT 可以表示为

$$AT - EPT = \sum_i W_i (AT - PT_i) \quad (4)$$

式中, $AT - PT_i$ 表示每颗脉冲星的计时残差, 权重 W_i 反比于对应脉冲星的稳定度, 一般以 TOA 时间跨度开方时间点处的稳定度作为取权标准。结合本文脉冲星实测数据, 选取了稳定度曲线倒数第二个点的倒数为权重进行加权, 得到综合脉冲星时计时残差。

2.2 小波分解算法

经典加权算法在综合脉冲星的计时残差时只能采用一个权值,这就导致该算法没有充分考虑到脉冲星时的短期稳定度和长期稳定度,因此存在着一定的缺陷。为了充分考虑脉冲星时的短期和长期稳定度,可以将脉冲星的计时残差按照不同频段进行分解,在各个频段处分别进行加权,再进行综合计算得到综合脉冲星时。

小波分解可提取不同频率下的信号信息,并对信号的局部特征进行精细描述。这使得小波分解在信号处理、图像处理和数据压缩等领域得到广泛应用。

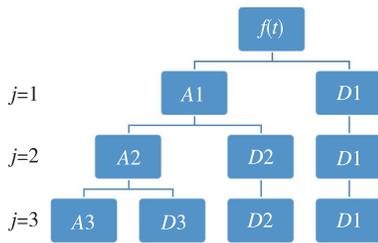


图 1 三层小波分解结构图

Fig. 1 Three-level wavelet decomposition diagram

图 1 给出了三层小波分解的树状结构图,这里 A 表示的是低频, D 表示的是高频,而数字编号 j 表示的是层数。基于小波理论与小波尺度,可以将脉冲星计时残差展开为小波级数,并将信号分为两层

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \beta_{j_0, k} \varphi_{j_0, k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_{j, k} \varphi_{j, k}(t) \quad (5)$$

式中, $j \geq j_0$ 为基本特征提取, $j \leq j_0$ 为细节近似提取。根据小波理论,脉冲星信号的局域能量和方差具有相同的量纲,并给出了如下定义

$$\sigma_j^2 = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{k=n_1}^{n_2} (n_2 - n_1) \alpha_{j, k}^2} \\ \frac{1}{\sum_{k=n_1}^{n_2} (n_2 - n_1) \beta_{j, k}^2} \end{cases} \quad (6)$$

不同频率下的取权标准为 σ_j , 再对参与综合的脉冲星信号 $f^i(x) (i = 1, \dots, l)$ 进行加权和后重构

$$\bar{f}(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\sum_i \sigma_j^i \beta_{j_0, k}^i \varphi_{j_0, k}(t)}{\sum_i \sigma_j^i} + \sum_{j=-\infty}^{j_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\sum_i \sigma_j^i \beta_{j_0, k}^i \varphi_{j_0, k}(t)}{\sum_i \sigma_j^i} \quad (7)$$

也可以表示为

$$\bar{f}(x) = \frac{\sum_i \omega_i f^i(x)}{\sum_i \omega_i} \quad (8)$$

式中, ω_i 为不同频率下的 σ_j , $\bar{f}(x)$ 为所求综合脉冲星时信号。基于小波分解算法,可以将残差信号分解成不同频率的子信号,在不同频率尺度上进行加权,可以兼顾脉冲星的短期稳定度和长期稳定度。

2.3 维纳滤波算法

维纳滤波算法通过最小化均方误差原则,将观测到的信号通过滤波器进行处理,以估计原始信号的近似值。维纳滤波器的设计需要考虑信号和噪声的特性,以及所期望的滤波效果。

由单颗脉冲星定义的脉冲星时会受到多种噪声源的影响。将这些干扰源分成两个独立的、互不相干的噪声源,一部分为参考原子钟误差的影响,另一部分为原子钟误差影响之外的其他噪声影响。根据维纳滤波原理,可以将脉冲星计时中原子钟误差的影响和其他噪声的影响分开,将估计的原子钟误差消除后,剩余信号即可作为脉冲星的计时残差进行综合。

假定 n 个观测量 $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 为已知,且 $\mathbf{r} = \mathbf{s} + \boldsymbol{\varepsilon}$, 其中, \mathbf{s} 和 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是互不相关的两个量, \mathbf{s} 为脉冲星计时残差中由参考钟的误差引起的部分, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是与脉冲星本身有关的计时噪声。维纳滤波算法是将脉冲星的计时残差输入维纳滤波器,得到的输出即为估计的由参考钟的误差引起的残差 \mathbf{s} 。 $\mathbf{r}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\varepsilon}$ 的相关函数方程可写成以下形式

$$\begin{cases} R_{r_i r_j} = \langle r_i, r_j \rangle = \langle s_i, s_j \rangle + \langle \varepsilon_i, \varepsilon_j \rangle \\ R_{s_i s_j} = \langle s_i, s_j \rangle \\ R_{s_i r_j} = \langle s_i, r_j \rangle = \langle s_i, s_j \rangle = R_{s_i s_j} \\ R_{\varepsilon_i \varepsilon_j} = \langle \varepsilon_i, \varepsilon_j \rangle \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示综合平均, $(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。若测量值 \mathbf{r} 和式(9)已知,则可由维纳滤波器推断出信号 \mathbf{s} 的估计,如式(10)所示

$$s(k) = \sum_{j=1}^n h(k, j) r(j) \quad (10)$$

其中, $h(k, j)$ 是离散线性时变系统的冲激响应,又根据线性最小均方误差估计的正交条件,可得离散维纳滤波方程

$$R_{sr}(k, j') = \sum_{j=1}^n h(k, j) R_{rr}(j, j') \quad (11)$$

进行快速傅里叶变换得

$$R_{sr}(\omega) = H(\omega) R_{rr}(\omega) \quad (12)$$

从而可得 $H(\omega)$, 对其进行反傅里叶变换并代

入式(12)中,并将估计的原子时误差从脉冲星前计时残差中消除,剩余的残差 \hat{s}_1 可以作为脉冲星的后计时残差进行加权综合,权重 λ_i 取估计信号 \hat{s}_1 均方根的倒数,如式(13)所示

$$EPT = \sum_i \hat{s}_1 \cdot \lambda_i \quad (13)$$

由于目前还无法脱离参考钟实时脉冲星计时观测,因此必须对至少两颗脉冲星在同一时间尺度下进行观测,在此基础上结合脉冲星的脉冲到达时间,可以确定噪声与信号之间的相关函数

$$\begin{aligned} \langle {}^1r_i + {}^2r_i, {}^1r_j + {}^2r_j \rangle &= \langle {}^1\epsilon_i, {}^1\epsilon_j \rangle + \langle {}^2\epsilon_i, {}^2\epsilon_j \rangle + \\ &\quad \langle {}^1\epsilon_i, {}^2\epsilon_j \rangle + \langle {}^2\epsilon_i, {}^1\epsilon_j \rangle + \\ &\quad 4\langle s_i, s_j \rangle \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \langle {}^1r_i - {}^2r_i, {}^1r_j - {}^2r_j \rangle &= \langle {}^1\epsilon_i - {}^2\epsilon_i, {}^1\epsilon_j - {}^2\epsilon_j \rangle \\ &= \langle {}^1\epsilon_i, {}^1\epsilon_j \rangle + \langle {}^2\epsilon_i, {}^2\epsilon_j \rangle - \\ &\quad \langle {}^1\epsilon_i, {}^2\epsilon_j \rangle - \langle {}^2\epsilon_i, {}^1\epsilon_j \rangle \end{aligned} \quad (15)$$

若 $\langle {}^1\epsilon_i, {}^2\epsilon_j \rangle = \langle {}^2\epsilon_i, {}^1\epsilon_j \rangle = 0$,则根据式(14)和式(15)有

$$\langle s_i, s_j \rangle = \frac{\langle {}^1r_i + {}^2r_i, {}^1r_j + {}^2r_j \rangle - \langle {}^1r_i - {}^2r_i, {}^1r_j - {}^2r_j \rangle}{4} \quad (16)$$

对于参与综合的 n 颗脉冲星,可组成 $n(n-1)/2$ 个相互独立的脉冲星对,由每个脉冲星对得到其互相关函数,再由 $n(n-1)/2$ 个互相关函数的平均得到综合脉冲星时的平均互相关函数。

此外,本小节中自相关函数与互相关函数的实现均采用自功率谱与互功率谱的逆变换实现,首先对第 I 颗脉冲星计时残差取傅里叶变换,如式(17)所示

$$x_1(\omega) = \sum_{L=1}^N [r_{I,L} h_L \cdot \exp(-j\omega L\delta)] \quad (17)$$

式中, h_L 为对残差进行平滑窗口的添加,采取合适的窗口可以减小频谱渗漏; $r_{I,L}$ 中的下标 I 表示第 I 颗脉冲星, L 表示计时残差中的第 L 个数据点, N 为计时残差的长度。 n 颗脉冲星的自功率谱与互功率谱如式(18)所示

$$x_{I,K}(\omega) = |x_I(\omega)x_K^*(\omega)| \quad (18)$$

式中的 K 表示第 K 颗脉冲星,当 $K=I$ 时,得自功率谱;当 $K \neq I$ 时,得第 I 颗与第 K 颗脉冲星的互功率谱;式中的 $*$ 表示复数共轭运算。自协方差和互协方差的计算公式如式(19)所示

$$\text{cov}(r_I, r_K) = \sum_{\omega=1}^N [X_{I,K}(\omega) \cdot \exp(j\omega L\delta)] \quad (19)$$

式中, N 表示第 N 个傅里叶频率。维纳滤波算法是利用脉冲星计时残差的互相关函数消除参与综合

的脉冲星之间的共同影响,如红噪声、引力波、星历表和参考钟的误差等,提取出共同信号外的残差,但维纳滤波算法得到的综合脉冲星时仍然受到各种高频噪声的影响,因此还需选择合适的方法进行平滑滤波,进一步降低高频噪声的影响。

3 实验结果分析

3.1 单颗脉冲星时稳定度分析

本文下载了IPTA数据包,并使用Tempo2导出了其中10颗毫秒脉冲星计时残差PT-TT(BIPM),分别为PSR B1937+21, PSR B1855+09, PSR J0437-4715, PSR J0030+0451, PSR J0023+0923, PSR J1012+5307, PSR J1455-3330, PSR J1600-3053, PSR J1024-0719和PSR J1614-2230,如图2所示。

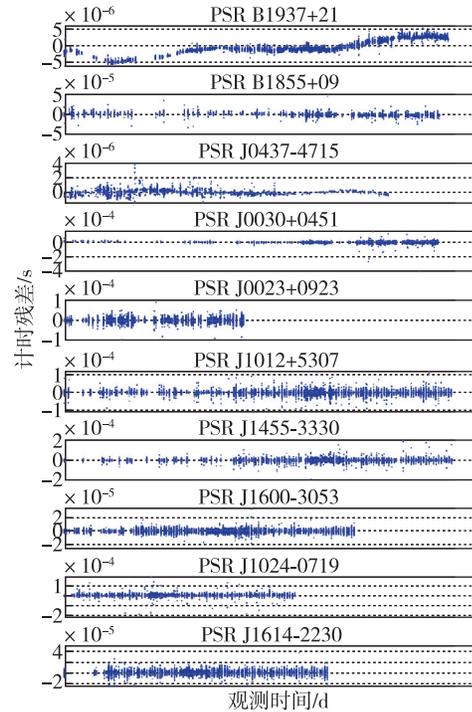


图2 10颗毫秒级脉冲星的计时残差PT-TT(BIPM)
Fig. 2 Timing residuals PT-TT(BIPM) of 10 millisecond pulsars

从图2可以看出,计时残差基本分布在 $10 \mu\text{s}$ 之内,部分脉冲星的残差甚至达到了微秒和亚微秒量级,10颗脉冲星的标准差分别为0.45, 1.38, 0.17, 2.53, 1.95, 7.97, 13.81, 1.95, 10.39和2.99 μs 。由于观测计划的不同或受其他因素的干扰,有些脉冲星的观测时间较短,其中有7颗脉冲星的数据达到了10年以上,最短的观测长度为6年。当观测时间为整个数据长度时, σ_c 方法评估得到的脉冲星计时稳定度准确度并不高,因此将稳定度曲线中最后一个点

去除,得到了图 3 和表 1。

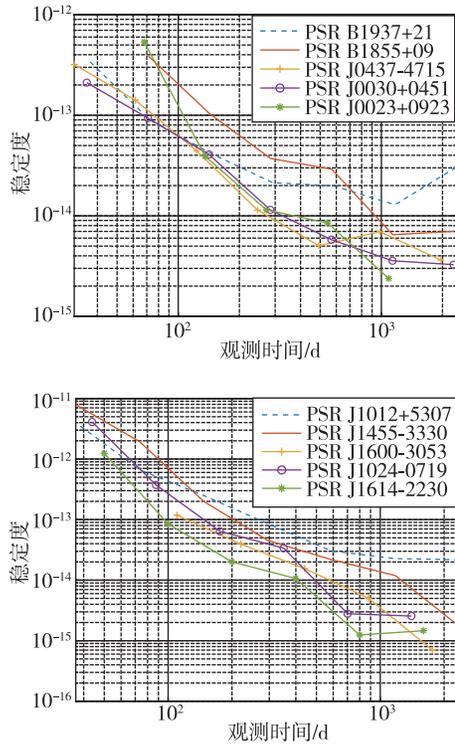


图 3 10 颗毫秒级脉冲星的计时稳定度

Fig. 3 Timing stability of 10 millisecond pulsars

表 1 毫秒级脉冲星计时稳定度

Tab. 1 Millisecond pulsar timing stability

脉冲星	1 年稳定度	最终稳定度	RMS/ μ s
PSR B1937+21	2.089×10^{-14}	3.032×10^{-14} (6.5 a)	0.45
PSR B1855+09	3.402×10^{-14}	7.015×10^{-15} (6 a)	1.38
PSR J0437-4715	7.169×10^{-15}	3.624×10^{-15} (5.5 a)	0.17
PSR J0030+0451	8.945×10^{-15}	3.265×10^{-15} (6 a)	2.53
PSR J0023+0923	1.008×10^{-14}	2.380×10^{-15} (3 a)	1.95
PSR J1012+5307	6.230×10^{-14}	2.178×10^{-14} (6.5 a)	7.97
PSR J1455-3330	3.622×10^{-14}	1.741×10^{-15} (6.5 a)	13.8
PSR J1600-3053	2.000×10^{-14}	7.023×10^{-16} (5 a)	1.95
PSR J1024-0719	2.924×10^{-14}	2.558×10^{-15} (4 a)	10.39
PSR J1614-2230	1.156×10^{-14}	1.464×10^{-15} (4.5 a)	2.99

从图 3 和表 1 可得,有 8 颗脉冲星的最终稳定度达到了 10^{-15} 量级,PSR J1600-3053 在 5 年处稳定度最佳,达到了 1×10^{-16} 量级。由脉冲星观测数据所定义的脉冲星时的稳定度会随着观测时间的延长而变好,但观测时间足够长之后,稳定度会呈现出波动的趋势。这主要是因为脉冲星计时观测受白噪声与红噪声的影响。当观测时间较短时,脉冲星时稳定度主要受白噪声的影响,但白噪声的影响会随着观测时间延长而减弱,这就使得稳定度在

整体趋势上随着观测时间的延长而变好。稳定度的评估同样对红噪声比较敏感,受红噪声的影响,在长时间尺度上部分脉冲星的稳定度会呈现局部上升的趋势。

3.2 综合脉冲星时构建算法

将不同原子钟进行加权综合后形成的国际原子时具有更高的稳定度,类似地,通过加权综合不同脉冲星的观测数据来构建综合脉冲星时,也可以得到更加稳定的综合脉冲时间尺度 *EPT*。构建综合脉冲星时的关键是脉冲星的选择,本文综合考虑了以下因素:脉冲星的短期及长期稳定度、脉冲到达时间的信噪比以及观测数据的长度。通过综合考虑,本文选择了 PSR B1937+21, PSR B1855+09, PSR J0437-4715, PSR J0030+0451 这 4 颗毫秒级脉冲星用于构建综合脉冲星时。由于不同脉冲星的观测长度不同,在构建综合脉冲星时,需要截取 4 颗脉冲星都存在观测数据的 MJD 区间,本文截取了 10 年的观测数据。为了减少计时残差中不均匀观测和高频噪声的影响,保证综合脉冲星时的稳定性,本文对每颗脉冲星的计时残差进行了窗口长度为 5 个数据点的移动平均,得到了平滑后的计时残差,如图 4 所示。

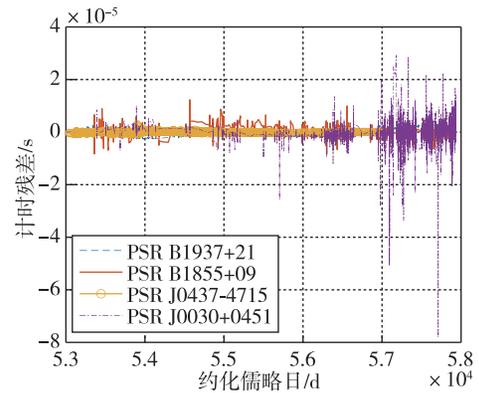


图 4 移动平均后计时残差

Fig. 4 Timing residuals after moving averaging

对比图 2 和图 4 可知,进行移动平均后,脉冲星计时残差中的高频噪声明显减少,残差数据更加平滑。移动平均后通常采用三次样条插值来产生综合脉冲星计时残差,但三次样条插值误差较大。由于红噪声是缓慢变化的低频波动,因此可以使用多项式进行拟合,剩余白噪声的模型参数则利用高斯函数来拟合,通过拟合模型得到的参数,即可获得模拟计时残差,结果如图 5 所示。

从图 5 可得,模拟计时残差可以很好地还原出

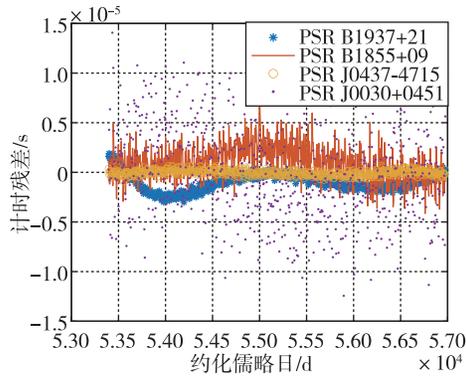


图5 模拟计时残差

Fig. 5 Simulated timing residuals

红噪声的趋势,具有很高的准确性,随后利用三种综合脉冲星时算法构建的综合脉冲星时 EPT-TT (BIPM)如图6所示。

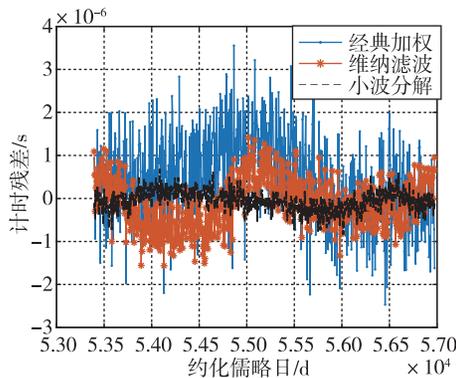


图6 综合脉冲星时 EPT-TT (BIPM)

Fig. 6 Ensemble pulsar timing EPT-TT (BIPM)

计算了由经典加权法、小波分解法和维纳滤波法构建的综合脉冲星时的 RMS,分别为 1.01×10^{-6} , 2.36×10^{-7} 和 5.67×10^{-7} 。随后对其稳定度进行了计算,如图7所示,从稳定度曲线中可以看出,在短期内小波分解法的稳定度最佳,维纳滤波法居中,而经典加权法最差。在5年时间尺度上,三种算法得到的稳定度依次为 4.523×10^{-15} , 4.764×10^{-15} 和 1.502×10^{-15} ,维纳滤波法稳定度最佳,这主要是因为维纳滤波法可以有效去除不同脉冲星之间共同的趋势项,增强了综合脉冲星时的长期稳定度。

为了验证 EPT-TT(BIPM)的有效性,本文将脉冲星时的参考原子时溯源至 TT(TAI),导出了 EPT-TAI 计时数据,与 TT(BIPM2017)-TAI 进行了对比,如图8所示。

从图8可以看出 EPT-TAI 与 TT(BIPM2017)-TAI 的趋势基本一致,但 EPT-TAI 中还残留着较多的高频噪声,在后续的研究中可以考虑与其他滤

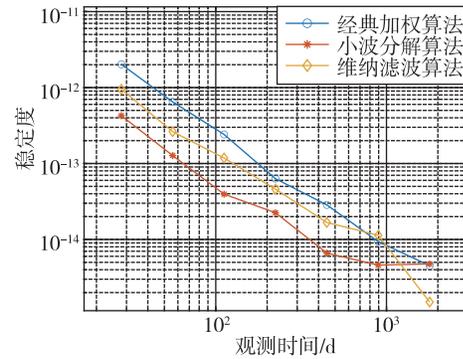


图7 利用三种综合脉冲星时算法得到的计时稳定度

Fig. 7 Timing stability obtained using three different ensemble pulsar algorithms

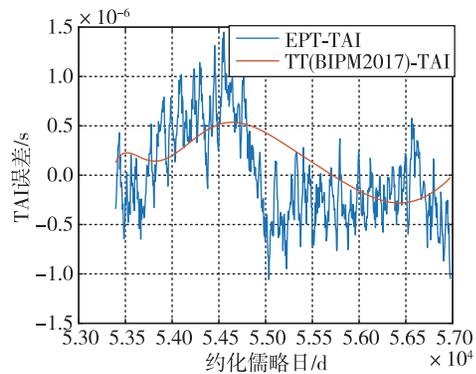


图8 维纳滤波提取的钟差信号 EPT-TAI 和参考钟差信号 TT(BIPM2017)-TAI

Fig. 8 Time difference signal EPT-TAI extracted by the Wiener filter and the reference time difference signal TT(BIPM2017)-TAI

波算法相结合,减小其噪声。

4 结论

本文以 IPTA 的 10 颗毫秒级脉冲星数据为基础,采用 3 种算法构建了综合脉冲星时,并评估了其稳定度,得到如下结论:

1)在 10 颗毫秒级脉冲星中,PSR J1600-3053 的 5 年稳定度最优,为 7.023×10^{-16} 。综合考虑单颗脉冲星的稳定度和观测数据的长度后,筛选出了 4 颗脉冲星用于构建综合脉冲星时。

2)通过经典加权算法、小波分解算法和维纳滤波算法构建了综合脉冲星时,其中维纳滤波建立的综合脉冲星时取得了最佳的稳定度,在 5 年处达到了 1.502×10^{-15} ,优于参与构建的其他所有脉冲星的 5 年稳定度。

在当前的观测条件下,测量噪声、未消除的色散红噪声和钟差跳变等是限制脉冲星长期稳定度的主

要因素。综合脉冲星时算法的目的就是为了尽可能压制这些噪声,从而得到更加稳定的脉冲星时。但脉冲星稳定度的真值是无法确定的,因此也无法真正确认哪种综合脉冲星时算法效果是最佳的。在后续的研究规划中,我们将采用仿真方法,在已知脉冲星稳定度的前提下,确定哪种算法效果是最佳的。

脉冲星时空基准构建是当前的一个热门研究领域,FAST的建立大大增强了我国观测脉冲星的能力,很大程度上解决了脉冲星计时方面的一些问题。除了本文提及的三种算法,现如今也有多种算法被运用于综合脉冲星的建立中,比如卡尔曼滤波算法、小波域中的维纳滤波算法等,这些算法都可以有效地削弱噪声源的干扰。我们在未来将致力于从脉冲星计时残差中提取钟差信号,以进一步推动脉冲星时应用的研究工作。

参考文献

- [1] JENET F A, HOBBS G B, LEE K J, et al. Detecting the stochastic gravitational wave background using pulsar timing[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2005, 625(2): 123-126.
- [2] BACKER D H C, KULKARNI S R, HEILES C, et al. A millisecond pulsar[J]. *Nature*, 1982, 300(5893): 615-618.
- [3] PETIT G, TAVELLA P. Pulsars and time scales[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1996, 308(1): 290-298.
- [4] KASPI V M, TAYLOR J H, RYBA M F. High-precision timing of millisecond pulsars. III. Long-term monitoring of PSRs B1855+09 and B1937+21[J]. *Astrophysical Journal*, 1994, 428:713.
- [5] 仲崇霞. 综合脉冲星时算法及脉冲星时应用[D]. 西安:中国科学院国家授时中心,2007.
ZHONG Chongxia. Algorithm of ensemble pulsar time and application of pulsar time[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2007(in Chinese).
- [6] MANCHESTER R N. The international pulsar timing array[J]. *Class Quantum Gravity*, 2013, 30: 55-61.
- [7] HOBBS G, COLES W, MANCHESTER R N, et al. Development of a pulsar-based time-scale[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 427(4): 2780-2787.
- [8] RODIN A E, FEDOROVA V A. A pulsar time scale based on Parkes observations in 1995-2010[J]. *Astronomy Reports*, 2018, 62: 378-382.
- [9] 尹东山, 高玉平, 赵书红. 综合脉冲星时间尺度[J]. *天文学报*, 2016, 57(3): 326-225.
YIN Dongshan, GAO Yuping, ZHAO Shuhong. Ensemble pulsar time scale[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2016, 57(3): 326-335(in Chinese).
- [10] 张彩红, 刘经南, 聂桂根, 等. 利用综合脉冲星时实现地球时[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(5): 589-594.
ZHANG Caihong, LIU Jingnan, NIE Guigen, et al. Realizing terrestrial time using ensemble pulsar time[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5): 589-594(in Chinese).
- [11] 周庆勇, 魏子卿, 闫林丽, 等. 面向综合定位导航授时系统的天地基脉冲星时间研究[J]. *物理学报*, 2021, 70(13): 471-483.
ZHOU Qingyong, WEI Ziqing, YAN Linli, et al. Space/ground based pulsar timescale for comprehensive PNT system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(13): 471-483(in Chinese).
- [12] 周庆勇, 魏子卿, 张华, 等. 基于双谱滤波的综合脉冲星时算法研究[J]. *天文学报*, 2021, 62(2): 88-97.
ZHOU Qingyong, WEI Ziqing, ZHANG Hua, et al. Research on ensemble pulsar time algorithm based on bispectral filter[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2021, 62(2): 88-97(in Chinese).
- [13] HOBBS G, GUO L, CABALLERO R N, et al. A pulsar-based timescale from the international pulsar timing array[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 491(4):5951-5965.
- [14] YANG G, TONG M, GAO Y. Wiener filtration algorithm of an ensemble pulsar timescale based on a power-law model of pulsar power spectrum[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2022, 22(10):129-140.
- [15] ALLAN D W. Time and frequency (time-domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1987, 34(6): 647-654.
- [16] TAYLOR J H. Millisecond pulsars: nature's most stable clocks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 79(7): 1054-1062.
- [17] MATSAKIS D N, TAYLOR J H, EUNANKS T M. A statistic for describing pulsar and clock stabilities[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1997, 326: 924-928.