

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-03-0204-10

# 脉冲星计时中噪声对稳定度的影响分析

张哲浩<sup>1,2,3</sup>, 童明雷<sup>1,2</sup>, 赵成仕<sup>1,2</sup>, 朱幸芝<sup>1,2</sup>, 刘舒<sup>1,2,3</sup>, 韩孟纳<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;  
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 脉冲星计时中存在多种噪声, 使得建立的脉冲星时稳定度受到不同程度的影响。首先利用模拟数据, 分别给出了白噪声和脉冲星自转不稳定引起的计时红噪声对脉冲星时稳定度的影响。结果表明脉冲星时稳定度受计时红噪声的影响特征与理论预期一致。同时, 我们采用国际脉冲星计时阵第一批发布的数据, 研究了各种模型参数改正和噪声改正对脉冲星时稳定度的影响, 发现计时模型参数与色散变化的影响要远大于白噪声改正。此外, 通过与模拟数据的分析相比较, 验证了经过各种改正后真实数据中噪声的复杂性, 简单的功率谱模型并不能完全描述残差中的红噪声。

**关键词:** 脉冲星计时; 计时噪声; 脉冲星时; 稳定度

## Analysis of the effect of noises in pulsar timing on the stabilities of pulsar time

ZHANG Zhe-hao<sup>1,2,3</sup>, TONG Ming-lei<sup>1,2</sup>, ZHAO Cheng-shi<sup>1,2</sup>,  
ZHU Xing-zhi<sup>1,2</sup>, LIU Shu<sup>1,2,3</sup>, HAN Meng-na<sup>1,2,3</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;  
2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The existence of various kinds of noise in pulsar timing will give impacts on the stabilities of the established pulsar time in different levels. In this paper, based on the simulated data, we firstly give the impacts of the white noise and the red noise caused by the spin irregularities on the stabilities of pulsar time. It is found that the properties of the pulsar time scale stability affected by the red noise in timing are in accord with the theoretical anticipation. Meanwhile, we use the first data set released by the International Pulsar Timing Array to study how the stability of pulsar time is affected by the corrections of timing model parameters and noises. It is found that the influences from the corrections of timing model parameters and dispersion measure variations are much more significant than those from the white noise corrections. In addition, by the comparison to the simulated data, we verify that the noise in the real data set are still complicated after various corrections, and the power-

收稿日期: 2020-01-17; 接受日期: 2020-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1831130; U1531112); 中国科学院青年创新促进会资助项目 (2017450);  
国家自然科学基金面上资助项目 (11873049)

作者简介: 张哲浩, 男, 硕士, 主要从事脉冲星计时及其导航应用研究。

law model cannot completely describe the red noises in the residuals.

**Key words:** pulsar timing; timing noise; pulsar time; stability

## 0 引言

脉冲星是宇宙中一种自转非常稳定的致密天体,按自转周期的长短可以分为普通脉冲星与毫秒脉冲星。毫秒脉冲星的长期稳定度甚至可以和原子时匹敌,对这类天体的观测可以构建脉冲星时<sup>[1-2]</sup>,并有望成为未来守时的重要组成部分<sup>[3]</sup>。获得脉冲星时间信号的过程被称为脉冲星计时(pulsar timing),首先通过望远镜接收来自星体的辐射获得脉冲轮廓,然后与标准脉冲轮廓做相关来确定脉冲到达时间(times of arrival, TOA),而 TOA 是由参考原子时记录的。确定 TOA 的过程实际上是原子时与脉冲星时的时间比对过程。将这些实际测量的 TOA 与基于计时模型理论预报的 TOA 相比较,两者之差即为计时残差,使用最小二乘法优化残差即可以更新计时模型<sup>[4-6]</sup>。由于脉冲星的自转以及信号传播受到许多因素的干扰,观测得到的 TOA 总是与计时模型计算所得的理论值存在差异,从而计时残差总不为零,或者说残差中存在着噪声。计时残差中的噪声对脉冲星在守时理论,深空导航以及引力波探测等方面的应用产生了根本的影响,因为这些应用都基于对残差信号的分析<sup>[7]</sup>。

从广义的角度讲,任何非模型化因素引起的残差都可被称为噪声。残差中的噪声按功率谱分为两类:白噪声与红噪声。白噪声源自大量随机因素的影响,这些随机因素在脉冲信号产生,传播以及接收中随处可见。对于脉冲星时而言,可以将多颗星的残差综合并处理从而降低噪声水平<sup>[1]</sup>。随着测量时间跨度的不断增加,白噪声对模型参数拟合的影响也会逐渐降低<sup>[8]</sup>。红噪声则不同,随着测量时间跨度的增加,它会在计时残差中逐渐显现并破坏残差的稳定度,进而干扰模型参数的确定。J. P. W. Vebiest<sup>[9]</sup>, G. Hobbs<sup>[10]</sup>以及 W. A. Coles 等人<sup>[11]</sup>曾提出不同的方法用于解决红噪声条件下的计时模型拟合问题, G. Hobbs 与 W. A. Coles 的方法已被模块化为脉冲星计时软件 Tempo2<sup>①</sup>的一部分。同时, A. E. Rodin<sup>[12]</sup>, G. Hobbs 等<sup>[13]</sup>研究了相应的算法以降低红噪声对脉冲星时稳定度的影响。由于红噪声的来源广泛,产生机制复杂,寻求有效的处理方法仍是一个问题。历史上很多学者提出过各种噪声模型用于评估红噪声,如 J. M. Cordes 和 D. J. Helfand<sup>[14]</sup>使用拟合后计时残差中红噪声成分的均方根反映噪声的大小,具体某颗星的噪声水平通过与 Crab 脉冲星的噪声相比而得到。A. Arzoumanian<sup>[15]</sup>提出使用自转频率以及频率的二阶导数评估噪声水平,这种方法对时间跨度有一定的要求,且频率的二阶导数很小时也不适用。R. M. Shannon<sup>[16]</sup>的方法使用拟合后计时模型的自转频率,频率导数和数据的时间跨度作为评估量,文献[17]曾使用这种模型对 Parkes 脉冲星数据库中脉冲星的噪声进行过评估。与此同时,人们也对红噪声的起源提出过各种猜想,如 S. M. Kopeikin<sup>[18]</sup>根据散射噪声理论将脉冲星自转噪声分为随机游走噪声与闪烁噪声,并据此证明噪声平稳部分的功率谱为幂律形式。

对于脉冲星时而言,稳定度是最为重要的特性之一。影响脉冲星时稳定度的因素有很多,例如参考原子时误差、太阳系历表误差以及引力波等<sup>[19]</sup>。本文主要讨论各种计时噪声对脉冲星时稳定度的影响。首先使用模拟数据研究白噪声与自转红噪声(脉冲星自转的不稳定)对稳定度的影响,而后分析真实数据中参数改正对稳定度的影响,其中真实数据使用国际脉冲星计时阵(International Pulsar Timing Array, IPTA)第一批发布的数据<sup>[20]</sup>。

## 1 IPTA 的噪声模型

在脉冲星计时观测中,白噪声可以归结于两种噪声源<sup>[20]</sup>,其一是反映观测设备随机影响的辐射计噪

① <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/tempo2>

声，它被表述为

$$\sigma_{\text{rad}} = k \frac{S_{\text{sys}} P \delta^{3/2}}{S_{\text{mean}} \sqrt{t_{\text{int}} n_{\text{pol}} \Delta f}}, \quad (1)$$

式(1)中,  $k$  为改正系数;  $S_{\text{sys}}$  是系统等效流量密度, 是反映观测系统自身热噪声强弱的一个量;  $P$  是脉冲星的脉冲周期;  $\delta$  是脉冲占空比 (脉冲宽度与周期之比);  $S_{\text{mean}}$  是脉冲星一个周期内的平均流量密度;  $n_{\text{pol}}$  是偏振数;  $t_{\text{int}}$  是观测持续时间;  $\Delta f$  是观测带宽。

另一种噪声源—相位抖动噪声, 被表示为

$$\sigma_{\text{jitter}} \propto \frac{f_j W_{\text{eff}} (1+m_1^2)}{\sqrt{N_p}}, \quad (2)$$

式(2)中,  $f_j$  是抖动参数;  $W_{\text{eff}}$  是有效脉冲宽度;  $m_1$  是调制指数, 等于脉冲能量分布的标准差除以均值;  $N_p$  是观测中的所有子脉冲数。与辐射计噪声不同, 相位抖动噪声产生的根源在于单脉冲的不稳定, 它可能与脉冲星自身的辐射有关<sup>[21]</sup>。

脉冲星计时中的白噪声反映了 TOA 的随机波动, 它的大小可以通过 TOA 的不确定度近似评估, 但在低信噪比的观测中, 白噪声往往被低估, 而在高信噪比的观测中, 相位抖动噪声则会额外增加白噪声。IPTA 使用 3 种改正参数修正 TOA 的不确定度以重新估计白噪声的大小, 分别是与系统有关的误差因子  $F$ (EFAC) 以及相位抖动噪声改正因子  $Q$ (EQUAD) 与 ECORR (类似 EQUAD, 在 Tempo2 中不使用)。脉冲星计时软件 Tempo2 对白噪声的改正使用下式实现

$$\sigma_{\text{new}} = F \sqrt{Q^2 + \sigma_{\text{old}}^2}, \quad (3)$$

式(3)中,  $\sigma_{\text{new}}$  与  $\sigma_{\text{old}}$  分别是改正后与改正前的 TOA 不确定度。

与白噪声相比, 红噪声的种类更加复杂<sup>[21]</sup>。脉冲星计时中的红噪声包括脉冲星的自转红噪声, 色散 (dispersion measure, DM) 变化导致的噪声, 观测设备噪声以及某一频带下的噪声。IPTA 发布的数据对自转红噪声使用功率谱模型描述<sup>[11]</sup>

$$P(f) = \frac{P_0}{(1+f^2/f_c^2)^{q/2}}, \quad (4)$$

式(4)中,  $P_0$  代表红噪声的强度,  $f$  为傅立叶频率,  $f_c$  是转折频率,  $q$  为谱指数。图 1 展示了某一参数改变对该模型功率谱曲线的影响。 $P_0$  越大, 谱密度在低频段的强度越大; 转折频率  $f_c$  与谱指数  $q$  共同确定曲线的拐点, 当频率大于 (小于) 拐点时, 谱密度的二阶导数大于 (小于) 0;  $q$  则反应了曲线的陡峭程度,  $q$  越大, 谱密度随频率增加而下降得越快。

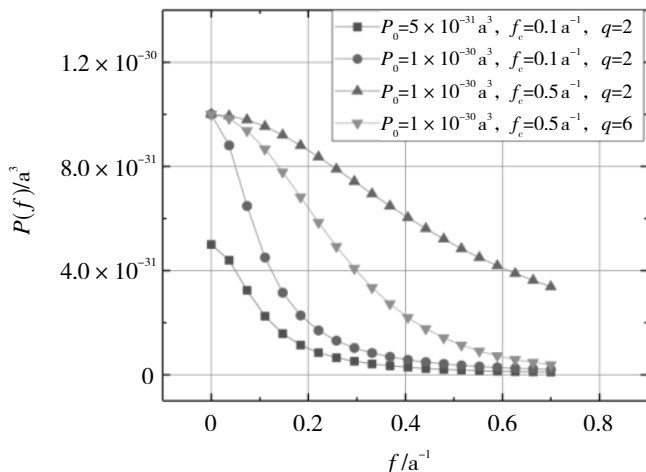


图 1 参数改变对自转噪声功率谱密度曲线的影响

对于 DM 变化以及系统与频带噪声，IPTA 发布的数据也给出了模型参数。由星际介质色散造成的脉冲延迟被表示为

$$t = D \times \frac{D_M}{f^2}, \tag{5}$$

式 (5) 中,  $D$  为常量,  $D_M$  代表色散量 (由测站到脉冲星间电子密度的积分),  $f$  为观测频率。由于相对运动, 测站到脉冲星的视线扫过星际介质而导致  $D_M$  发生变化, 脉冲星计时软件 Tempo2 使用  $D_M$  的 Taylor 多项式描述这种变化, IPTA 发布的计时模型参数给出了  $D_M$  及其导数的数值, 并在 TOA 文件中嵌入了每个 TOA 的  $D_M$  改正量。IPTA 给出的关于  $D_M$  更详细的模型参数与设备、频带噪声一同适用于数据分析软件 Tempest, 这些内容可以参考文献<sup>[22]</sup>。

## 2 脉冲星时的稳定度

描述原子时的稳定度统计量通常以 Allan 方差为代表。由于脉冲星计时数据的分布具有随机性, D. N. Matsakis 等<sup>[23]</sup>提出了另一种统计量  $\sigma_z$ 。 $\sigma_z$  的计算方式是使用三次多项式函数拟合长度为  $\tau$  的 (拟合后) 计时残差, 并利用三次项系数  $c_3$  确定其数值

$$\sigma_z(\tau) = \frac{\tau^2}{2\sqrt{5}} \langle c_3^2 \rangle^{1/2}, \tag{6}$$

式 (6) 中, 尖括号表示以  $c_3$  不确定度的平方倒数为权做加权平均。与 Allan 方差等统计量不同,  $\sigma_z$  的计算方式不要求残差以相等间隔分布, 对分析脉冲星数据尤为方便。理论分析表明<sup>[23-24]</sup>, 如果时间序列的噪声谱可以表示为

$$S(f) \propto f^{\alpha-2}, \tag{7}$$

则  $\sigma_z^2$  服从

$$\sigma_z^2(\tau) \propto \tau^\mu, \tag{8}$$

$$\mu = \begin{cases} -(\alpha+1) & \alpha < 3 \\ -4 & \text{其他} \end{cases}. \tag{9}$$

在实际分析中,  $\sigma_z$  与  $\tau$  通常都取为对数, 从式 (8) 可知  $\sigma_z$  随测量区间长度的变化为

$$\lg \sigma_z \propto \frac{\mu}{2} \lg \tau. \tag{10}$$

对应 S. M. Kopeikin<sup>[18]</sup>提出的噪声理论, 使用式 (7) 表示脉冲星计时中常见的红噪声时,  $\alpha$  的取值范围为  $-4 \sim 1$ , 考虑到白噪声, 式 (10) 中对数  $\sigma_z$  曲线 (这里是直线) 的斜率范围为  $-1.5 \sim 1.5$  (如图 2 所示,

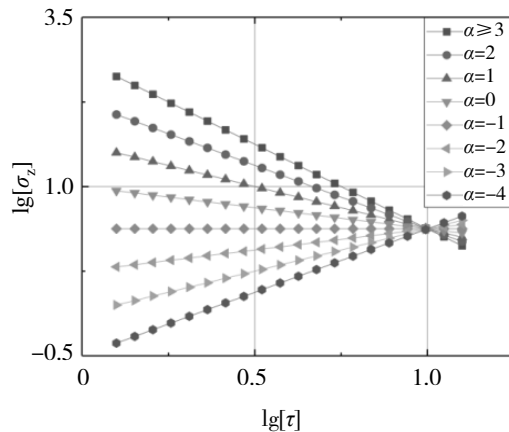
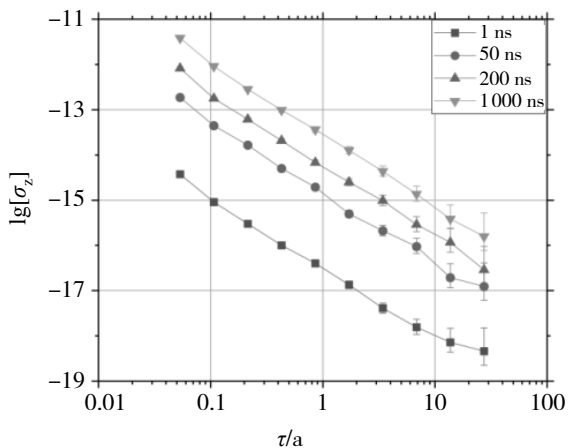


图 2 不同类型噪声下对数  $\sigma_z$  曲线的变化, 这里假设所有曲线交于相同点 (1, 1)

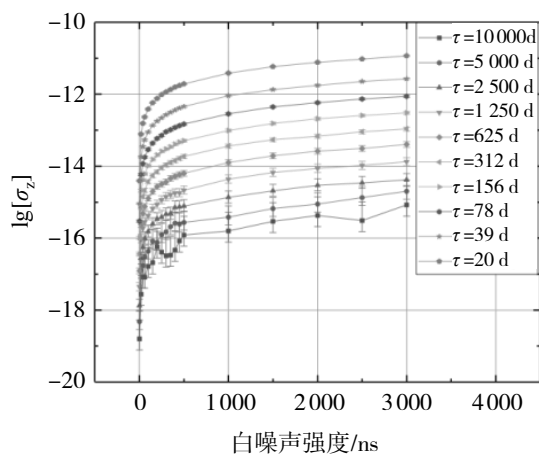
$\alpha$  均为整数), 这从理论上给出了  $\sigma_z$  曲线在不同噪声下随测量区间长度的变化情况。  $\alpha \geq 3$  时曲线斜率恒为  $-2$ ,  $\alpha > 2$  的 (高频) 噪声在脉冲星计时中并未发现。当  $-1 < \alpha \leq 2$  ( $= 2$  对应白噪声) 时, 虽然存在红噪声, 稳定度仍随着观测时间的增加而提高。  $\alpha < -1$  时, 随着观测时间的增加, 稳定度越来越差。

### 3 模拟数据分析噪声对稳定度的影响

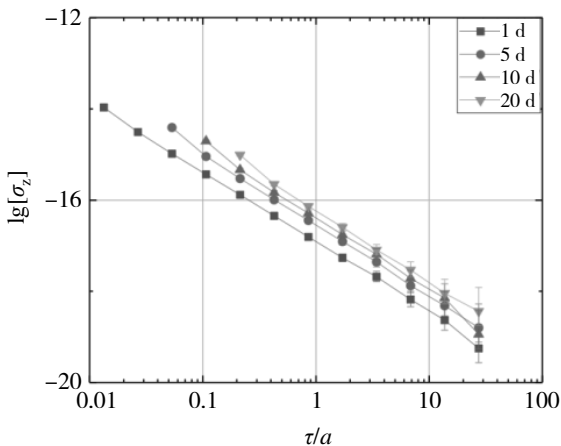
我们首先使用模拟数据研究噪声对稳定度的影响, 数据由脉冲星计时软件 Tempo2 的 fake 插件生成, 所在区间取为约化儒略日 (modified julian date, MJD) 45 000~55 000 (大约 27 a), 每 5 d 一个观测点, 且为等间隔分布。为了考察不同强度白噪声的作用, 模拟数据的均方根 (RMS) 取以下几个数值: 1, 50, 200, 1 000 ns (因为模拟数据的误差相等, 因此 RMS 与加权均方根 WRMS 相同)。为了减小模拟数据随机性的影响, 我们对每种强度的白噪声模拟 20 次,  $\sigma_z$  取为 20 次计算结果的平均值。计算的稳定度如图 3 (a) 所示。图 3 (b) 是  $\sigma_z$  曲线与噪声强度的关系, 是 RMS 为 1 ns~3  $\mu$ s 更详细的残差的稳定度曲线。可以看出, 随着测量区间长度  $\tau$  (非整数天时标注为近似整数) 的增加, 不同强度噪声对应的  $\sigma_z$  曲线的整体变化趋势是相同的。在测量区间长度相等时,  $\sigma_z$  的数值随噪声强度的增加而增加, 且增加的趋势不断减小。需要指出的是, 除了白噪声强度, 数据点的密集度也是影响  $\sigma_z$  数值的因素。我们使用 fake 插件模拟位于 MJD 45 000~55 000 之间的残差, RMS 取为 1 ns, 相邻两个数据点的间隔依次为 1, 5, 10, 20 d 4 种情况, 同样每种观测数据模拟 20 次。  $\sigma_z$  的计算结果列于图 3 (c), 可以看出, 当数据分布变得稀疏时,  $\sigma_z$  的数值也在增加。



(a) 不同强度噪声下的稳定度



(b) 不同测量区间长度下的稳定度



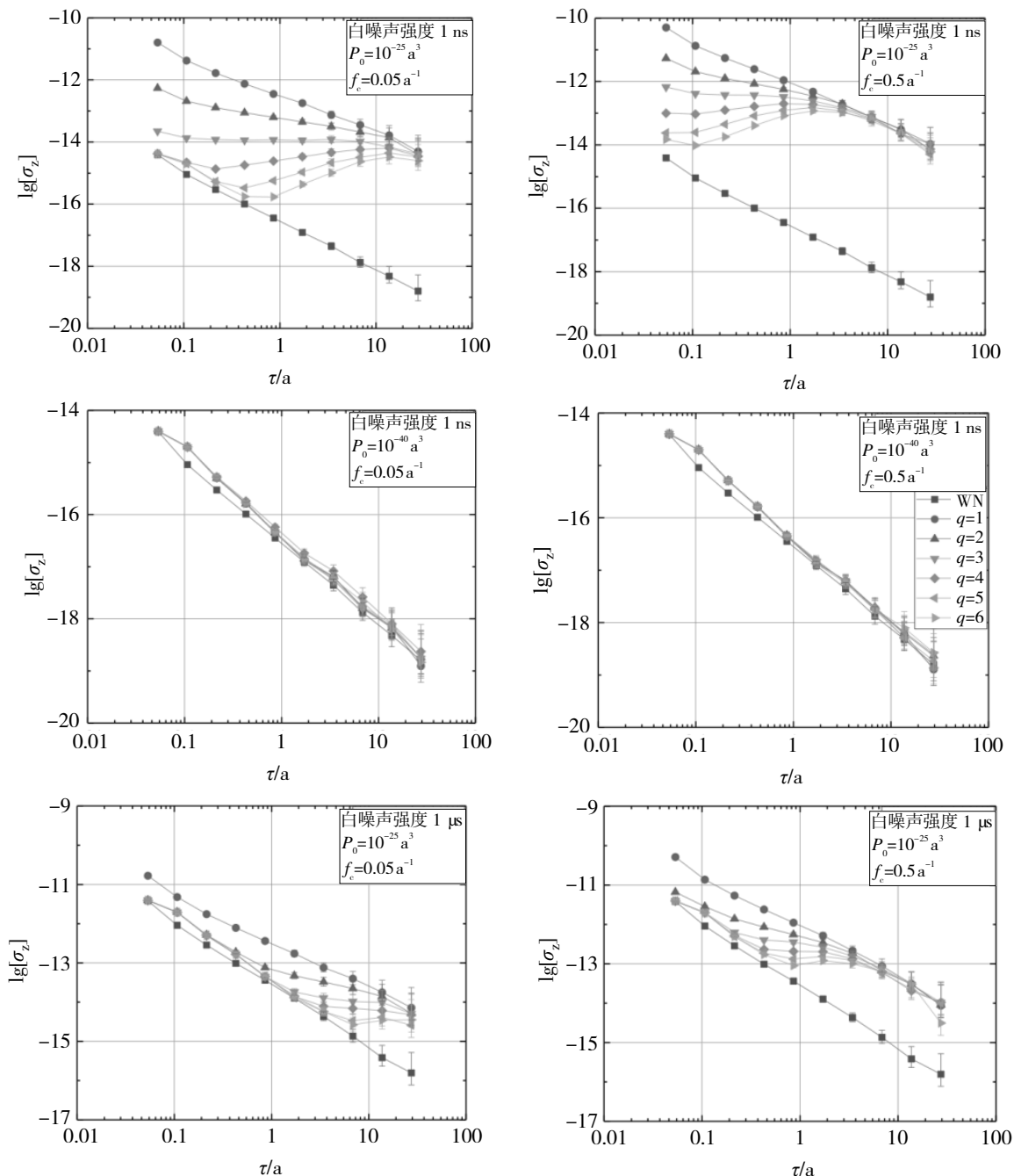
(c) 不同观测疏密程度的稳定度

图 3 只含有白噪声的模拟数据计算所得的  $\sigma_z$

如果将红噪声加入上述残差中，就得到了包含白噪声（谱密度表示为  $P_{WN}$ ）与红噪声的残差。鉴于 DM 变化与系统、频带噪声的复杂性，下面我们只模拟自转红噪声。这时模拟数据中噪声谱密度可表示为

$$P(f) = \frac{P_0}{(1 + f^2/f_c^2)^{q/2}} + P_{WN} \quad (11)$$

简单起见，我们只计算以下几种情形：红噪声的强度取  $10^{-25} \text{ a}^3$  与  $10^{-40} \text{ a}^3$  两个值，转折频率取  $0.05 \text{ a}^{-1}$  与  $0.5 \text{ a}^{-1}$  两个值，谱指数为 1, 2, ..., 6 六个值。我们以上述 RMS 为 1 ns 与 3  $\mu\text{s}$  的模拟白噪声数据为基础，加入这几种红噪声，每种红噪声对应的残差同样模拟 20 次，并算出相应的  $\sigma_z$  与 RMS，结果列于图 4 与表 1。



注：每幅图的图例给出了相应数据的噪声类型（白噪声强度，红噪声强度  $P_0$  以及转折频率  $f_c$ ），不同曲线对应的谱指数在第 4 幅图中标示（WN 代表白噪声）

图 4 不同类型噪声对  $\sigma_z$  曲线的影响

表 1 不同类型噪声下残差的均方根

白噪声强度	$P_0$	$f_c$	不同的谱指数所对应的残差均方根/ $\mu\text{s}$					
			$q=1$	$q=2$	$q=3$	$q=4$	$q=5$	$q=6$
1 ns	$10^{-25}$	0.05	6.567	2.544	1.606	1.231	1.133	0.911
	$10^{-25}$	0.50	18.610	8.598	6.942	5.934	5.240	5.332
	$10^{-40}$	0.05	$1.903 \times 10^{-3}$	$1.905 \times 10^{-3}$	$1.902 \times 10^{-3}$	$1.814 \times 10^{-3}$	$1.908 \times 10^{-3}$	$1.905 \times 10^{-3}$
1 $\mu\text{s}$	$10^{-40}$	0.50	$1.908 \times 10^{-3}$	$1.910 \times 10^{-3}$	$1.899 \times 10^{-3}$	$1.908 \times 10^{-3}$	$1.897 \times 10^{-3}$	$1.913 \times 10^{-3}$
	$10^{-25}$	0.05	6.998	3.072	2.514	2.398	2.124	2.128
	$10^{-25}$	0.50	18.777	8.928	7.215	6.004	5.801	5.347

注： $P_0$  为红噪声强度， $f_c$  为转折频率， $q$  为谱指数。

从图 4 可以看出，强度为  $10^{-40} \text{ a}^3$  的红噪声对  $\sigma_z$  曲线的影响是很小的，即使是 RMS 等于 1 ns 的残差，红噪声的影响依然不明显。强度为  $10^{-25} \text{ a}^3$  的红噪声对 RMS 为 1  $\mu\text{s}$  的残差产生的影响依然清晰可见，只是相比于 RMS 为 1 ns 的残差，不同谱指数对  $\sigma_z$  曲线的影响已经被削弱。通过对比同一行左右两图可以明显看出相同谱指数下转折频率对长期稳定度趋势的影响差异，较大的转折频率使得残差在较短的测量区间开始体现出白噪声的特性。总而言之，噪声特性导致的  $\sigma_z$  曲线的变化趋势与理论给出的情形基本一致。表 1 与图 4 对应，列出了不同噪声下的残差 RMS。总体上看，谱指数越高，红噪声导致的残差弥散度增加越小，转折频率较大，RMS 的增加也较大。强度为  $10^{-40} \text{ a}^3$  的红噪声对残差 RMS 的影响基本不随谱指数的改变而改变，只是使 RMS 的数值增加不到 1 个纳秒。

#### 4 真实数据中参数改正对稳定度的影响

真实数据的噪声特性比模拟数据复杂得多，而且真实数据的分布与不确定度也具有随机性，这使得相同噪声对真实数据与模拟数据稳定度曲线的影响存在差异。在研究中，我们着重考虑参数改正对稳定度造成的影响。

IPTA 第一批发布的数据包含 3 种类型<sup>[20]</sup>，其中 Combination “A” 是一种原始的观测数据，除了基本的计时模型参数外只包含设备延迟参数 jump。Combination “B” 在 Combination “A” 的基础上修正了与 Combination “A” 共有的计时模型参数数值，并加入了白噪声改正参数与 DM 变化参数。在这两种数据中，计时模型参数（包括设备延迟参数）与白噪声改正参数都存放在 .par 文件中，DM 变化参数则在存有 TOA 的 .tim 文件中。Combination “B” 还给出了描述本类数据残差中自转红噪声的模型参数。Combination “C” 是一种 Temponest 版本的数据。虽然 IPTA 的参数改正常常是同时进行的，这里我们着重关注不同参数改正对残差稳定度的影响，因此考虑以下几种情形：① 使用 Combination “A” 的计时模型与 TOA 文件得到原始的计时残差；② 使用去除了白噪声改正的 Combination “B” 计时模型与 Combination “A” 的 TOA 文件得到的计时残差；③ 使用 Combination “B” 的计时模型与 Combination “A” 的 TOA 文件得到的计时残差；④ Combination “B” 数据的计时残差。上述 4 种残差对应的模型参数差别是：② 比 ① 改正了计时模型参数，③ 比 ② 改正了白噪声，④ 比 ③ 改正了 DM 变化。我们选取有代表性的 4 颗星 PSRs J0437-4715, J1713+0747, J1909-3744, J1910+1256，计算以上每种残差的  $\sigma_z$  与 WRMS，结果分别列于图 5 与表 2。

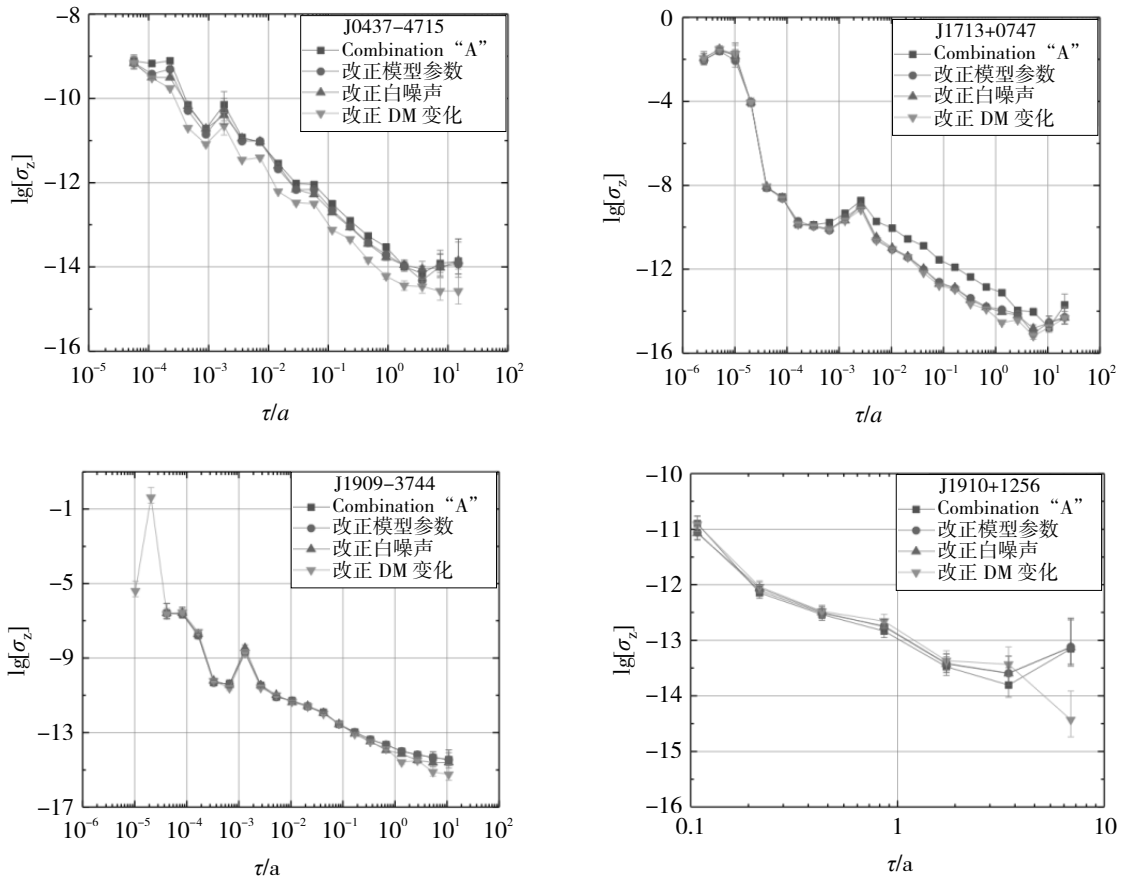


图 5 从 Combination “A” 到 Combination “B” 数据转换中不同参数改正对残差的稳定度曲线的影响

表 2 IPTA 给出的真实数据的红噪声模型参数以及从 Combination “A” 到 Combination “B” 改正过程中残差的 WRMS

脉冲星	红噪声模型			残差 WRMS/ $\mu\text{s}$			
	$q$	$f_c/a^{-1}$	$P_0/a^3$	Combination “A”	改正模型参数	改正白噪声	改正 DM 变化 (Combination “B”)
J0437-4715	2.000 00	0.067 286	$1.865\ 09 \times 10^{-40}$	0.703	0.602	0.958	0.202
J1713+0747	2.771 67	0.047 136	$4.986\ 10 \times 10^{-27}$	2.091	0.445	0.366	0.305
J1909-3744	-	-	-	0.258	0.258	0.238	0.194
J1910+1256	5.954 80	0.145 159	$4.636\ 57 \times 10^{-26}$	2.784	3.000	3.021	7.356

注： $q$  为谱指数， $f_c$  为转折频率， $P_0$  为红噪声强度，WRMS 为加权均方根。

从 WRMS 上看，从 Combination “A” 到 Combination “B” 的每一步参数改正几乎都对残差产生了影响，其中，更改计时模型参数对 PSR J1713+0747 的残差有较大影响，其余 3 颗星则变化不大；白噪声改正总体上对残差影响不大，且白噪声改正并不都使得残差的弥散度增加；除了 PSR J1713+0747 外，DM 变化改正相对于其他参数改正对残差的影响最大。需要指出的是，除了 PSR J1910+1256，其他 3 颗星经过参数改正后残差的 WRMS 都已减小，这颗星出现反常的原因应当是 Combination “A” 中未消除的 DM 变化与其余红噪声发生抵消使得残差的弥散度降低。与 WRMS 对应，残差稳定度的变化也有类似的特点，即较大的 WRMS 改变伴随着较大的稳定度变化，但最终 Combination “B” 数据的稳定度



要优于 Combination “A”。在模拟数据的研究中我们知道强度为  $10^{-40} \text{ a}^3$  量级的红噪声对  $\sigma_z$  曲线几乎没有影响, 因此从 PSR J0437-4715 的  $\sigma_z$  曲线可以推断 Combination “B” 数据的红噪声并没有被噪声模型 (表 2) 完全描述。使用 Cholesky 谱分析对残差进行白化也可以发现白化后的残差功率谱高于估计值, 说明存在模型描述之外的噪声成分。

## 5 结语

脉冲星计时中的噪声来源很多。模拟数据的分析展示了白噪声与功率谱模型给出的自转红噪声对稳定度的影响。对白噪声而言, 噪声强度越小, 数据越密集, 稳定度越好。对于红噪声而言, 谱指数越大, 稳定度在噪声谱密度近似幂律时随着测量区间长度增加变差的程度越大; 而转折频率越大, 数据从较短的测量区间开始就体现出白噪声特性。在研究参数改正对真实数据稳定度的影响中, 白噪声改正对稳定度的影响不大, 计时模型参数与 DM 变化的改正会显著影响稳定度的大小, 且残差 WRMS 与稳定度的改变量是互相对应的。经过参数改正, IPTA Combination “B” 数据的稳定度明显优于 Combination “A”, 而残差的 WRMS 并不一定都减小。此外, PSR J0437-4715 参数改正后的残差  $\sigma_z$  曲线与功率谱分析都表明 IPTA 给出的红噪声模型不能完全模拟残差中的红噪声。

## 参考文献:

- [1] PETIT G, TAVELLA P. Pulsars and time scales[J]. *Astronomy and Astrophys*, 1996, 308(1): 290-298.
- [2] ILYASOV Y P, KOPEIKIN S M, RODIN A E. The astronomical timescale based on the orbital motion of a pulsar in a binary system[J]. 1998, 24(2): 228-236.
- [3] P RIZ R, GARBIN E, ROLDAN P, et al. PulChron: a pulsar time scale demonstration for PNT systems[C] // 50th Annual Precise Time and Time Interval System and Applications Meeting, Virginia: ION, 2019.
- [4] HOBBS G B, EDWARDS R T, MANCHESTER R N. Tempo2, a new pulsar-timing package-I. An overview[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, 369(2): 655-672.
- [5] LORIMER D R, KRAMER M. *Handbook of Pulsar Astronomy*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [6] EDWARDS R T, HOBBS G B, MANCHESTER R N. TEMPO2, a new pulsar-timing package-II. The timing model and precision estimates[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, 372: 1549-1574.
- [7] BECKER W, KRAMER M, SESANA A. Pulsar timing and its application for navigation and gravitational wave detection[J]. *Space Science Review*, 2018, 214(1): 1-25.
- [8] KOPEIKIN, SERGEI M. Millisecond and binary pulsars as nature's frequency standards-II. The effects of low-frequency timing noise on residuals and measured parameters[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1999, 305(3): 563-590.
- [9] VERBIEST J P W, BAILES M, COLES W A, et al. Timing stability of millisecond pulsars and prospects for gravitational-wave detection[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 400: 951-968.
- [10] HOBBS G, LYNE A G, KRAMER M, et al. Long-term timing observations of 374 pulsars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, 353: 1311-1344.
- [11] COLES W A, HOBBS G, CHAMPION D J, et al. Pulsar timing analysis in the presence of correlated noise[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 418(1): 561-570.
- [12] RODIN A E. The optimal filters for the construction of the ensemble pulsar time[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, 387(4): 1583-1588.
- [13] HOBBS G B, COLES W A, 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.

- [14] CORDES J M, HELFAND D J. Pulsar timing III. Timing noise of 50 pulsars[J]. *The Astrophysical Journal*, 1980, 239: 640–650.
- [15] ARZUMANIAN A, NICE D J, TAYLOR J H, et al. Timing behavior of 96 radio pulsars[J]. *The Astrophysical Journal*, 1994, 422: 671–680.
- [16] SHANNON R M, CORDES J M. Assessing the role of spin noise in the precision timing of millisecond pulsars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 725(2): 1607–1619.
- [17] 杨廷高, 童明雷, 高玉平. 毫秒脉冲星计时噪声估计[J]. *时间频率学报*, 2014, 37(2): 80–88.
- [18] KOPEIKIN S M. Millisecond and binary pulsars as nature's frequency standards-I. A generalized statistical model of low-frequency timing noise[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1997, 288: 129–137.
- [19] 丁勇恒, 童明雷, 赵成仕. 影响脉冲星时稳定度的因素分析[J]. *时间频率学报*, 2017, 40(4): 260–267.
- [20] VERBIEST J P W, LENTATI L, HOBBS G B, et al. The international pulsar timing array: first data release[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458(2): 1267–1288.
- [21] OSLOWSKI S, STRATEN W V, HOBBS G B, et al. High signal-to-noise ratio observation and the ultimate limits of precision pulsar timing[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 418(2): 1258–1273.
- [22] LENTATI L, SHANNON R M, COLES W A. From spin noise to systematics:stochastic process in the first international pulsar timing array data release[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458(2): 2161–2187.
- [23] MATSAKIS D N, TAYLOR J H, EUBANKS T M. A statistic for describing pulsar and clock stabilities[J]. *Astronomy and Astrophys*, 1997, 326: 924–928.
- [24] BARNES J A, ANDREW R C, CUTLER L S, et al. Characterization of frequency stability[J]. *IEEE Transactions Instrumentations on Instrumentation Measurement*, 1971, IM-20(2): 105–120.