脉冲星计时到达时间中红噪声的模型无关判定

Reinabelle Reyes[1] 和 Christopher C. Bernido[2*]

[1]菲律宾大学国家物理研究所，迪利曼，奎松市 1101，菲律宾

[2]理论物理研究中心，中央维萨亚斯研究所基金会，Jagna，保和岛 6308，菲律宾

*** 通讯作者：** C. C. Bernido
cbernido.cvif
@gmail.com

关键词：脉冲星[1], 红噪声[2], 计时残差[3], NANOGrav[4], 脉冲星计时到达时间[5]。

摘要

脉冲星信号中普遍存在噪声，其中红噪声被认为源于星际介质、自旋噪声和脉冲星模式变化等因素。然而，并非所有脉冲星都检测到了红噪声。我们利用北美纳赫兹引力波观测站（NANOGrav）的数据集研究了 23 颗脉冲星，并表明，对计时残差的均方偏差和概率分布进行评估，可以直接判断是否存在红噪声。所得结果与文献报道一致。本文提出的无模型方法可作为通常更复杂的依赖模型方法的补充，用于判断计时残差中是否存在红噪声。

1 引言

为探测引力波，人们加大了对脉冲星计时到达时间噪声的研究力度（Antoniadis 等，2022年；Goncharov 等，2021年；Abbott 等，2016年；Arzoumanian 等，2018；Lam 等，2016年；Dahal，2020年；Hazboun 等，2019年；Lommen，2015年；Wang，2015年；Sarah Burke-Spolaor 等，2019年；Woods，2022年）。已知高斯白噪声在较短时间尺度和较高涨落频率下占主导。另一方面，在较长时间尺度和较低涨落频率下，脉冲星计时观测中会检测到红噪声（Goncharov，2021年；Shannon 和 Cordes，2010年）。脉冲星产生的红噪声可能干扰引力波的探测，因为引力波也可能表现为红噪声背景（Hazboun 等，2020 2022年）。近期一项针对 NANOGrav 11年数据集、涵盖 45 颗毫秒脉冲星的研究发现，采用计时模型拟合仅在 11 颗脉冲星中检测到显著红噪声（Arzoumanian 等，2018）。研究通过贝叶斯因子分析，在这 11 颗脉冲星中发现了红噪声的显著证据。我们将利用该研究的结果，检验本文所述方法的结果。

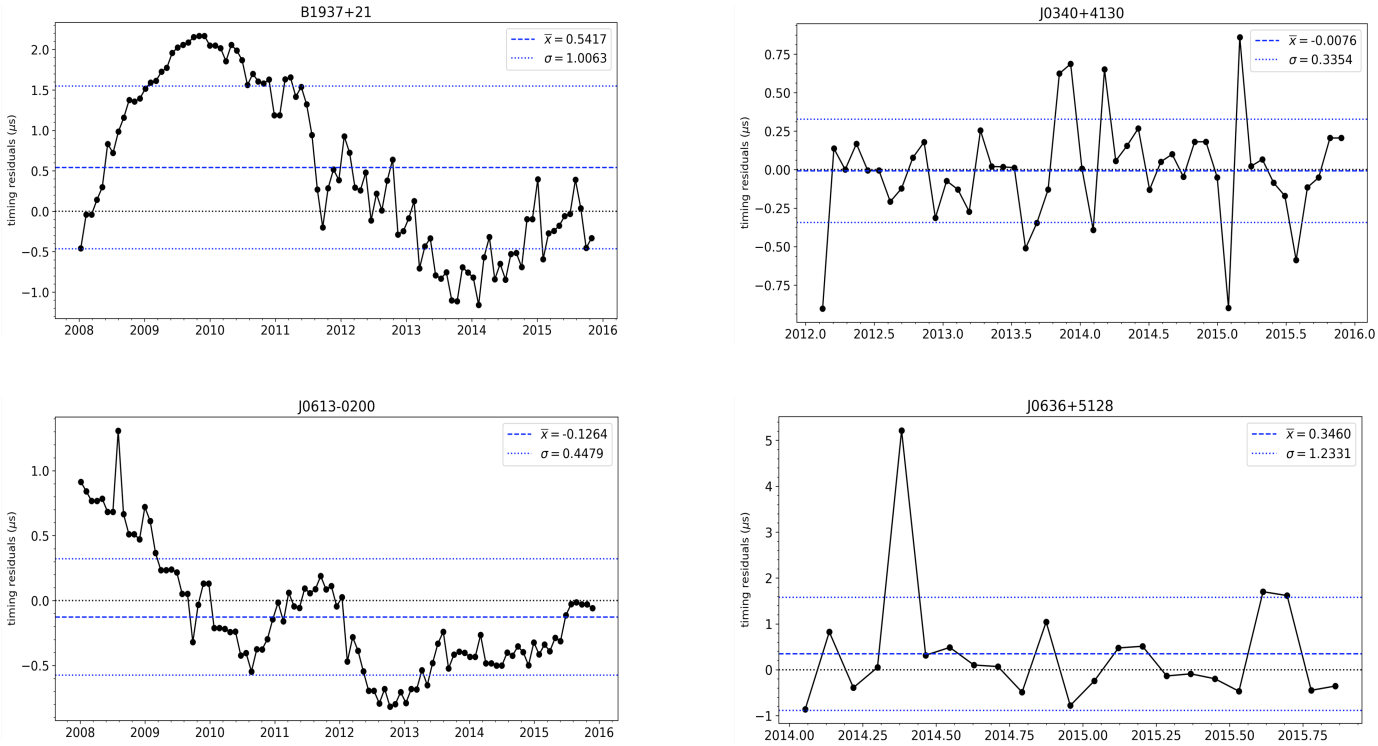
我们利用 NANOGrav 的 11 年数据，获得了 23 颗脉冲星的计时残差。我们计算了2008年至2016年间每颗脉冲星计时残差的均方位移（MSD），并根据其变化行为进行分类。我们也计算了每颗脉冲星相应的概率位移分布，并根据其在不同时间尺度上显现出的显著特征进行分类。结合均方位移和概率位移分布对这

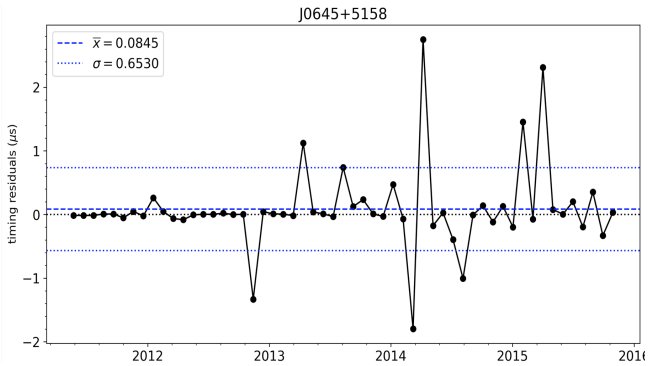
23 颗脉冲星的分类揭示了具有红噪声的脉冲星所共有的特征。尽管脉冲星计时测量存在误差，结果仍呈现出明显的规律，表明哪些脉冲星会表现出红噪声。研究结果与先前的工作（Arzoumanian 等，2018）一致。这种不依赖模型、对脉冲星信号中的红噪声进行的判定，可为现有方法增添有益补充，助力研究和理解脉冲星计时观测中的噪声。第 2 节介绍所用数据和方法。我们在第3节讨论研究结果。

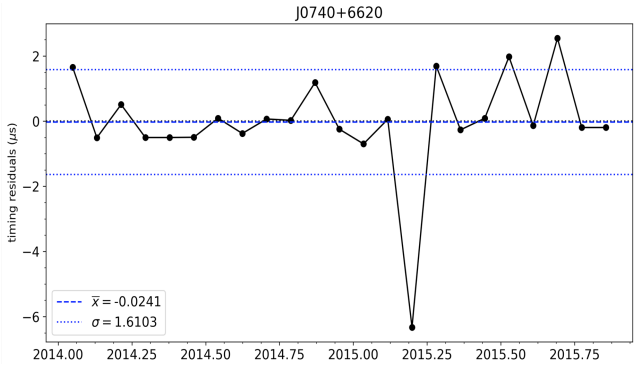
2 数据与方法

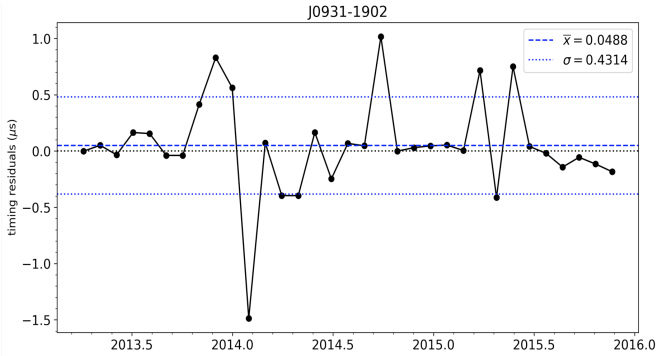
2.1 计时残差

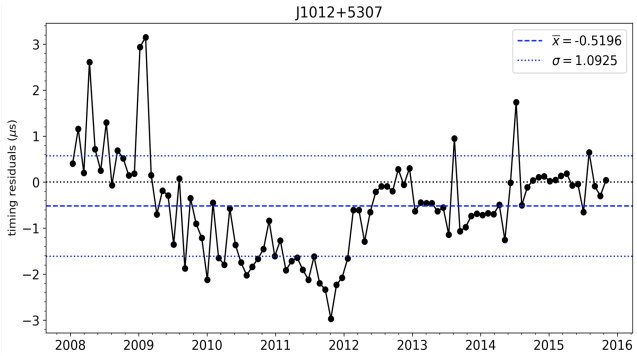
23颗具有820 MHz频段数据的脉冲星的计时残差取自NANOGrav 11年数据（Arzoumanian 等，2018）。尽管820 MHz 波段的原始数据可追溯至2005年，但较早期数据点之间的间隔存在较大的空缺。因此，我们将研究范围限定于2008年及之后的数据。数据完整的脉冲星覆盖了从2008年至2016年的八年时间。为获得时间间隔统一设为30天的时间序列，采用了插值方法。被插值的时间点设为与其最接近的数据点。23颗脉冲星的计时残差（单位为微秒）如图1所示。

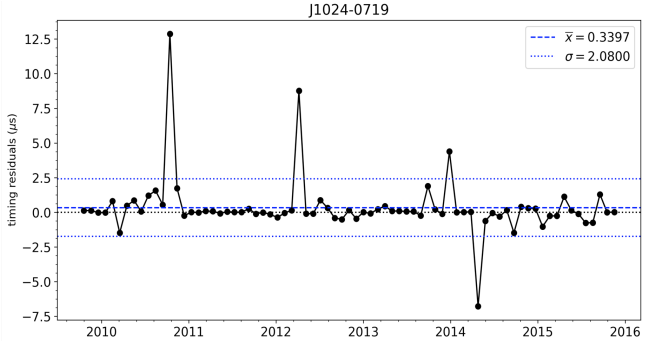


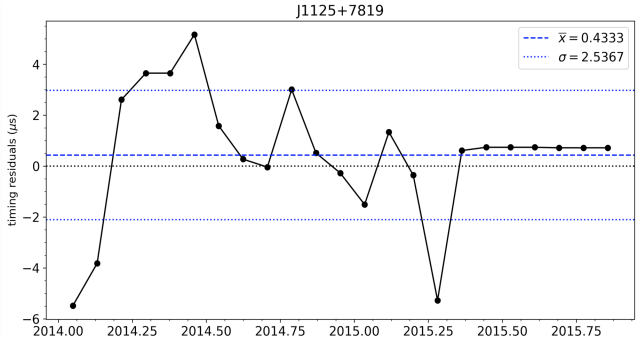

J0645+5158
$\bar{x} = 0.0845$
$\sigma = 0.6530$
timing residuals (μs)

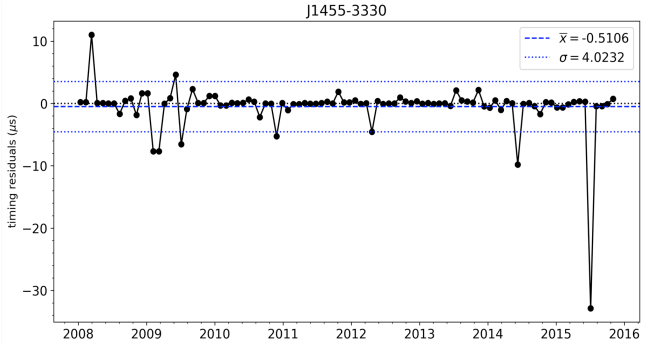

J0740+6620
$\bar{x} = -0.0241$
$\sigma = 1.6103$
timing residuals (μs)

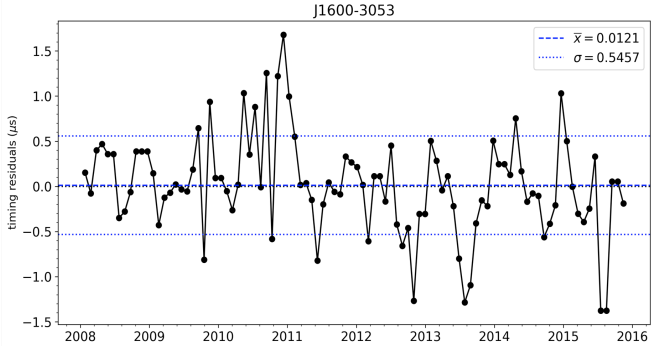

J0931-1902
$\bar{x} = 0.0488$
$\sigma = 0.4314$
timing residuals (μs)

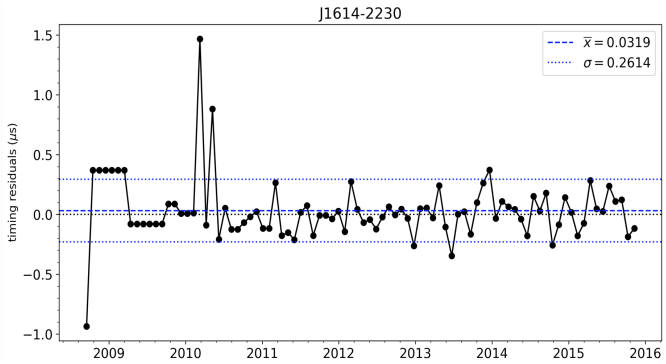

J1012+5307
$\bar{x} = -0.5196$
$\sigma = 1.0925$
timing residuals (μs)

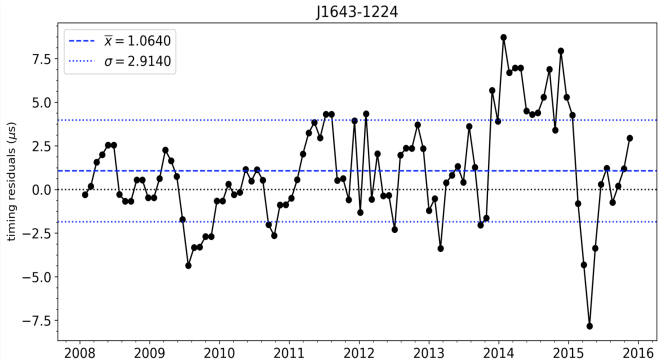

J1024-0719
$\bar{x} = 0.3397$
$\sigma = 2.0800$
timing residuals (μs)

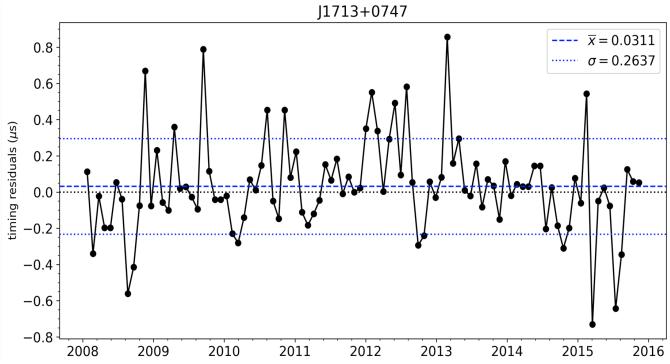

J1125+7819
$\bar{x} = 0.4333$
$\sigma = 2.5367$
timing residuals (μs)

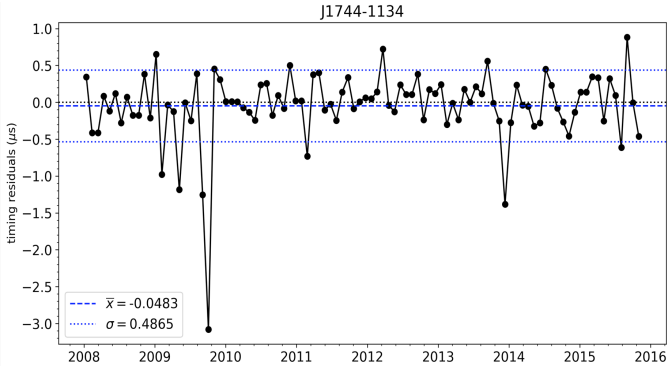

J1455-3330
$\bar{x} = -0.5106$
$\sigma = 4.0232$
timing residuals (μs)

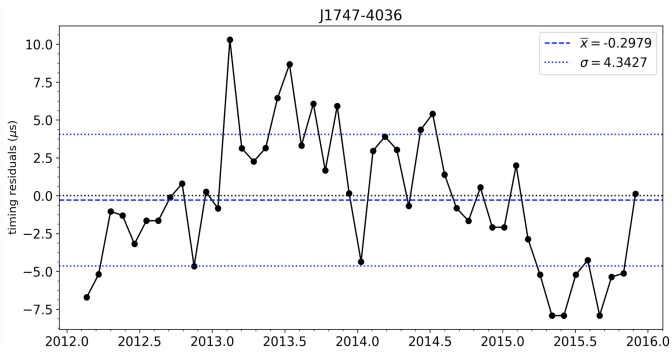

J1600-3053
$\bar{x} = 0.0121$
$\sigma = 0.5457$
timing residuals (μs)

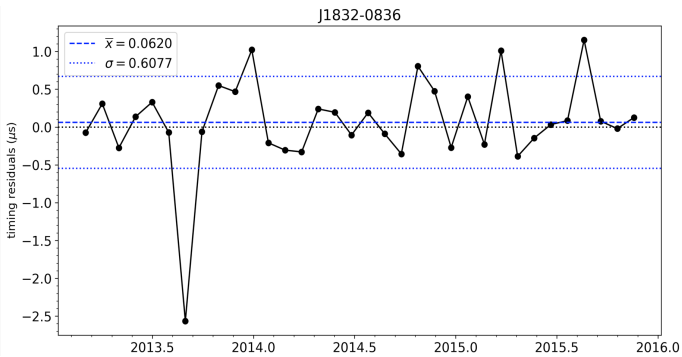

J1614-2230
$\overline{x} = 0.0319$
$\sigma = 0.2614$
timing residuals (μs)

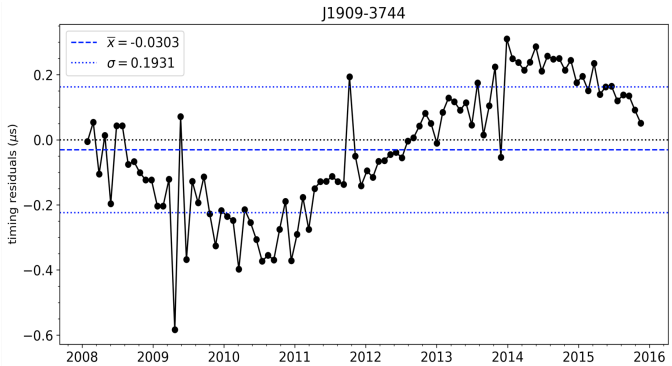

J1643-1224
$\overline{x} = 1.0640$
$\sigma = 2.9140$
timing residuals (μs)

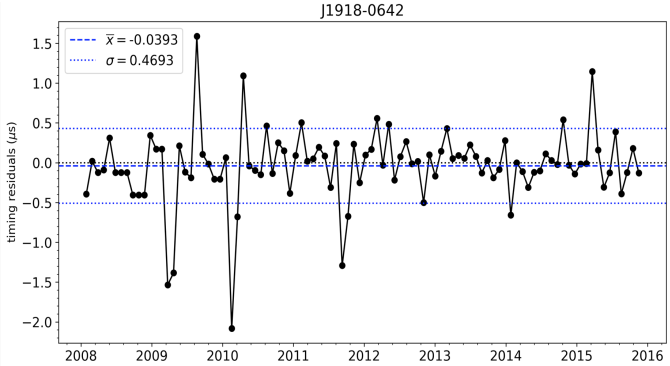

J1713+0747
$\overline{x} = 0.0311$
$\sigma = 0.2637$
timing residuals (μs)


J1744-1134
$\overline{x} = -0.0483$
$\sigma = 0.4865$
timing residuals (μs)


J1747-4036
$\overline{x} = -0.2979$
$\sigma = 4.3427$
timing residuals (μs)


J1832-0836
$\overline{x} = 0.0620$
$\sigma = 0.6077$
timing residuals (μs)


J1909-3744
$\overline{x} = -0.0303$
$\sigma = 0.1931$
timing residuals (μs)


J1918-0642
$\overline{x} = -0.0393$
$\sigma = 0.4693$
timing residuals (μs)

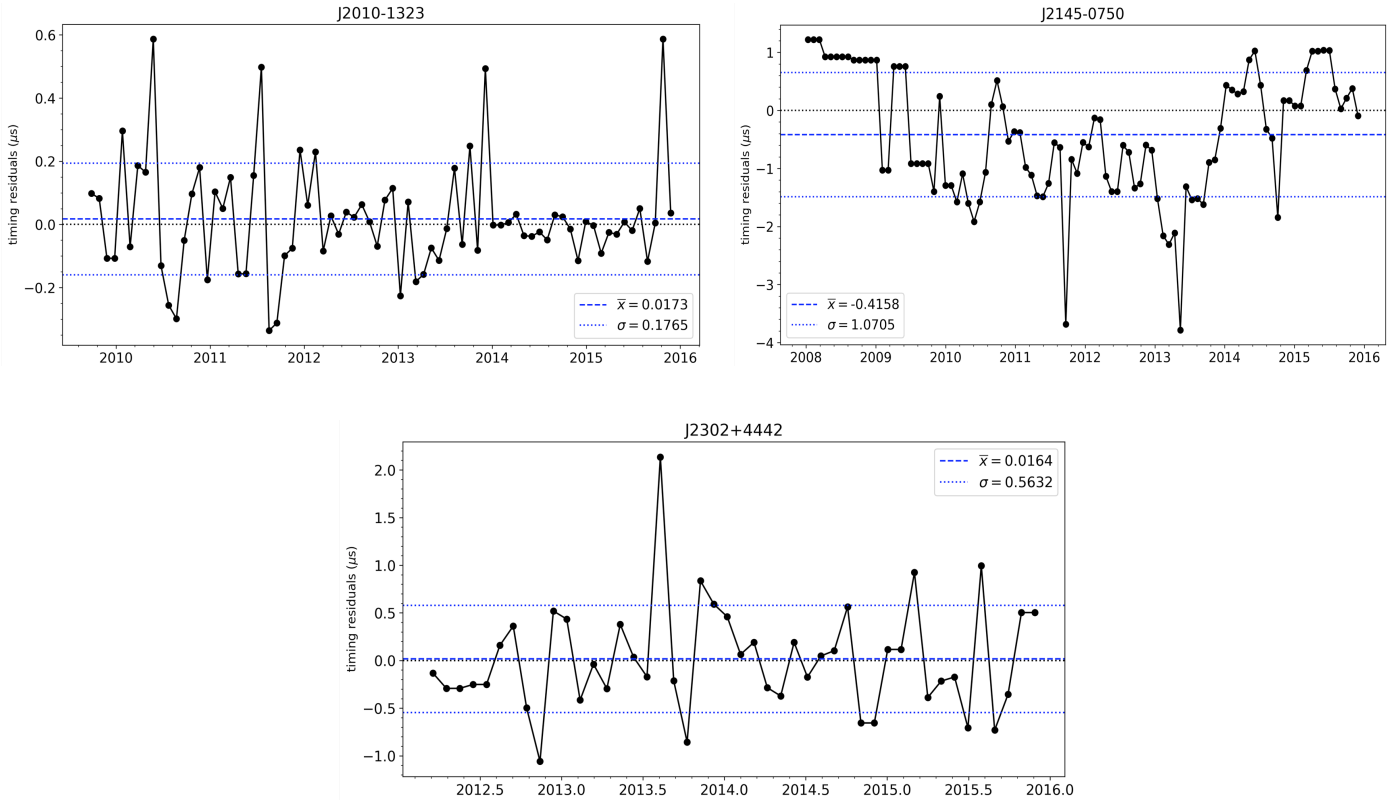


图1： 820 MHz 波段中23颗脉冲星的计时残差。每幅图顶部标出了脉冲星的名称。蓝色虚线表示均值，蓝色点线表示均值上下 +/- 1 个标准差。

2.2 均方位移

我们将 N 定义为计时残差中的数据点总数，将 x_j 定义为时间 t_j 处的数据点值，其中 $j = 0$为 1、2、…、 N。因此，初始时刻 t_0 的计时残差值为 $x_0 = x（t_0）$，而末尾时刻 t_N 的值为 $x_N = x（t_N）$。计时残差的均方位移按以下方式计算：

$$\mathrm{MSD}(\Delta) = \frac{1}{N-\Delta+1}\sum_{j=0}^{N-\Delta}\left(x_{j+\Delta} - x_j\right)^2 \quad , \tag{1}$$

其中，$\Delta < N$为滞后时间。滞后时间 Δ 是任意两个数据点之间的时间间隔或间距。对每个滞后时间 Δ计算公式（1），即可绘制均方位移随滞后时间变化的图。不过，滞后时间越大，在公式（1）中求和的平方偏差就越少。为获得具有统计显著性的图，设定了截止值 Δ 。绘制的均方位移范围截至 ~N/2，见图2和图3。

2.3 概率位移分布

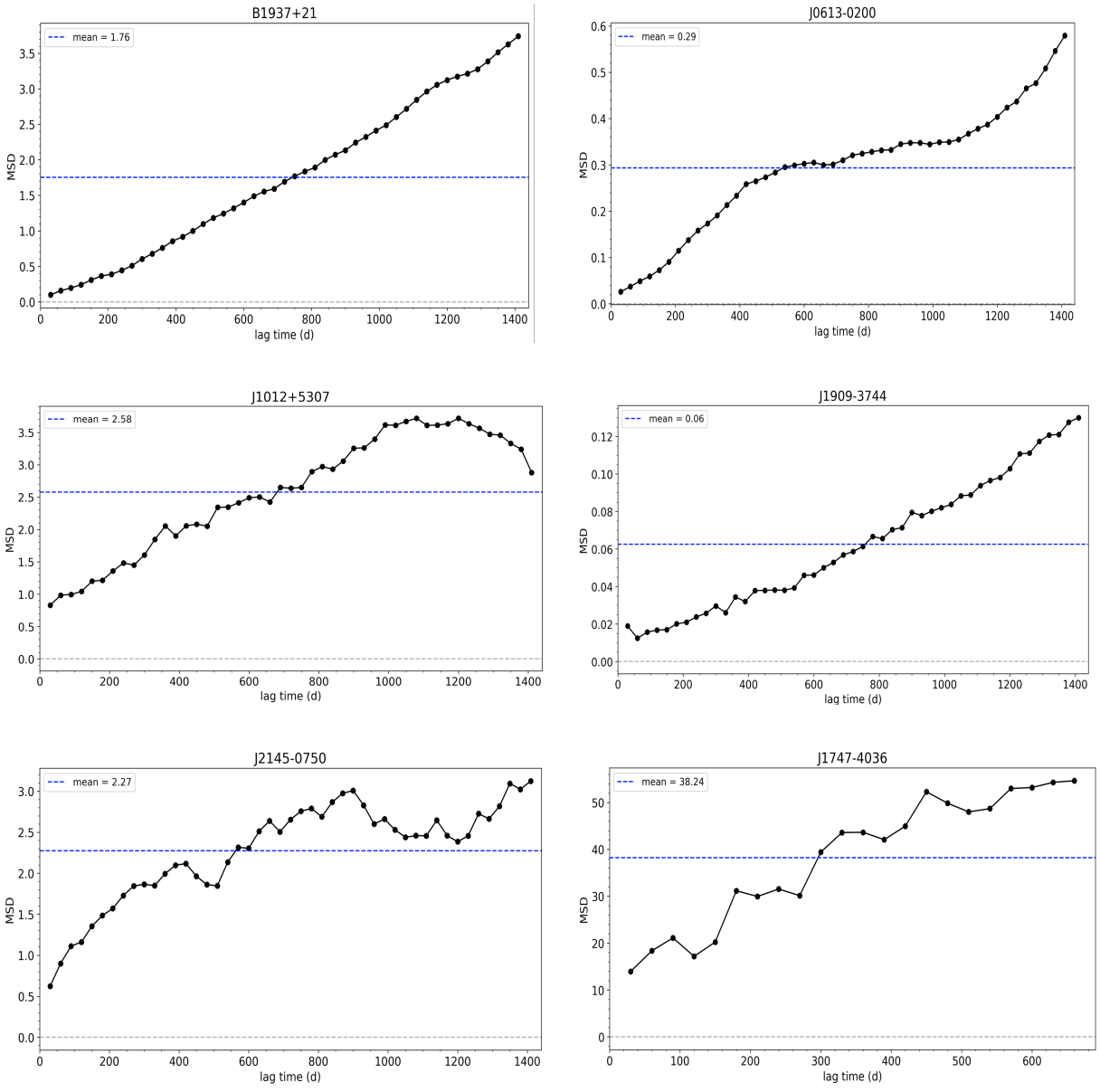
从数据集中，我们再次考虑 x_j ，即时间 t_j处的计时残差值。对于固定的滞后时间 Δ，我们考察差值（或位移）$x_{j+\Delta} - x_j$，并在遍历 j的不同取值时，统计相似位移出现的次数。然后，我们可以绘制概率

位移分布，显示给定 Δ时相似值出现的频率。图 4 至图 6 展示了随着滞后时间 Δ 增加，各脉冲星的概率位移分布。

3 结果与讨论

3.1 两种均方位移

从第 2 节所示的脉冲星计时残差中，可以发现两种不同类型的均方位移。一类均方位移随滞后时间增加而增大，另一类则在滞后时间增加时基本保持平坦。我们分别将这两种均方位移标记为图 2 所示的递增均方位移和图 3 所示的平坦均方位移。



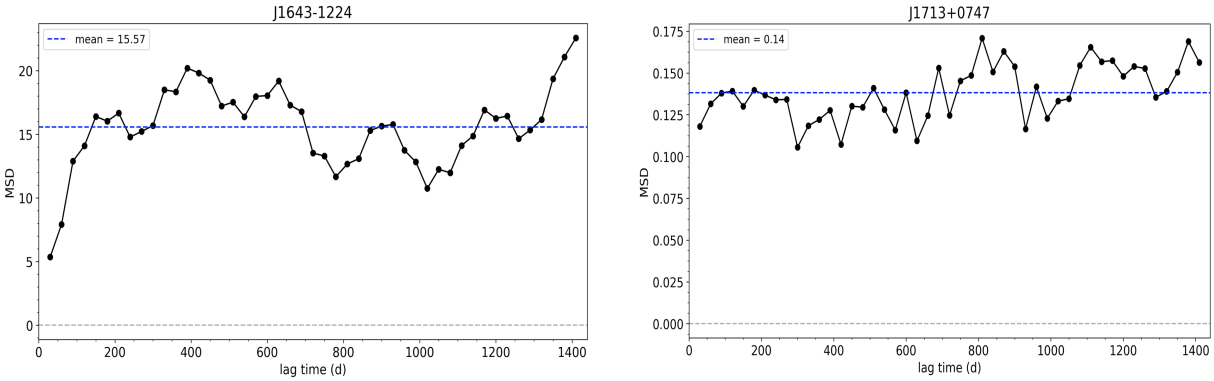
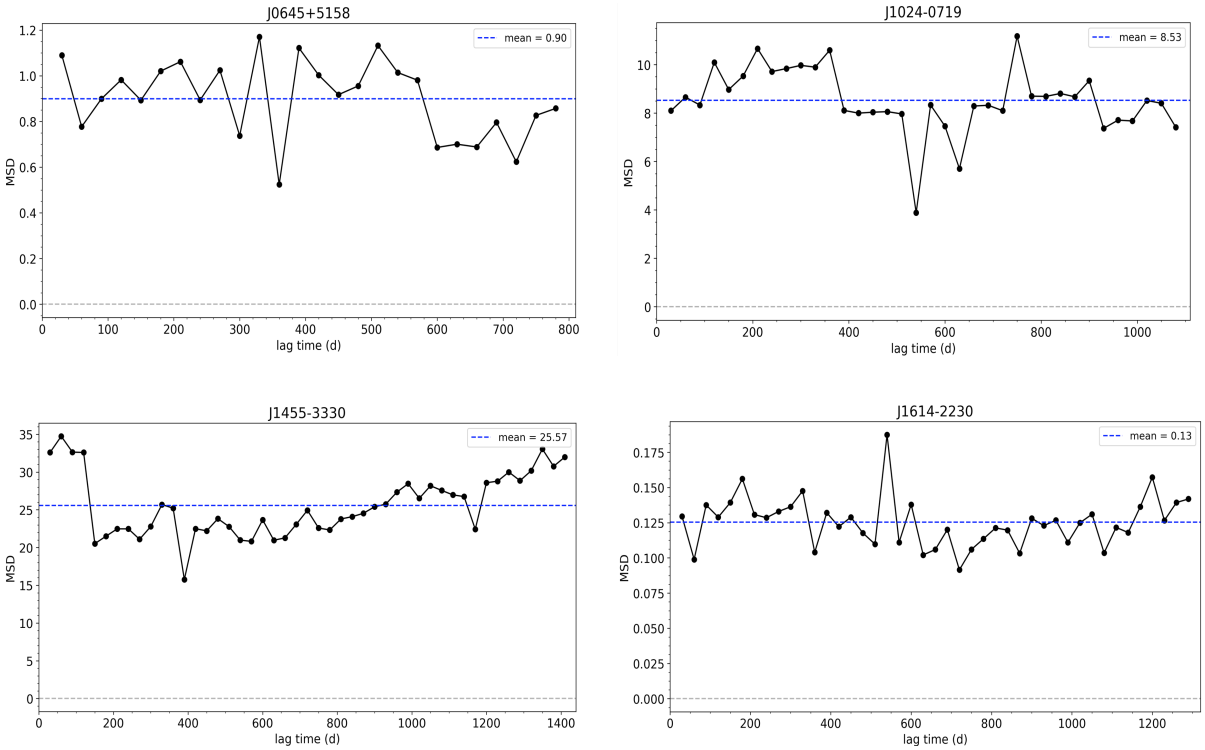
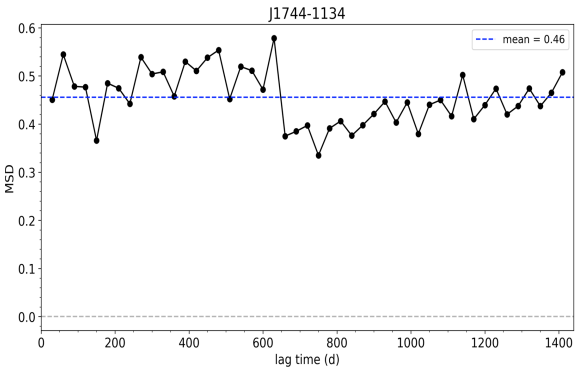
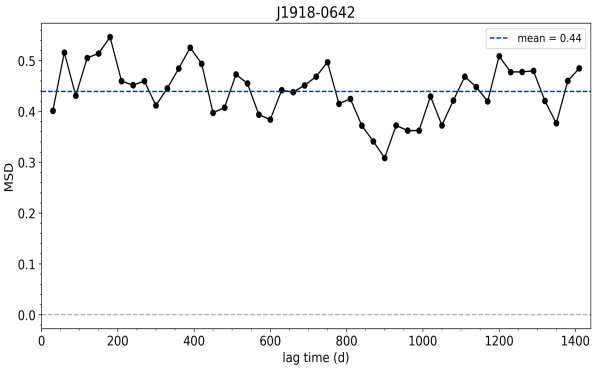
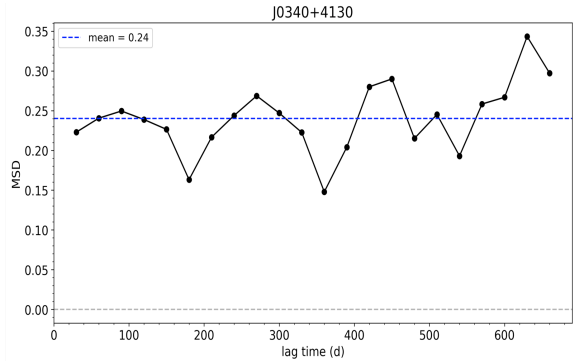


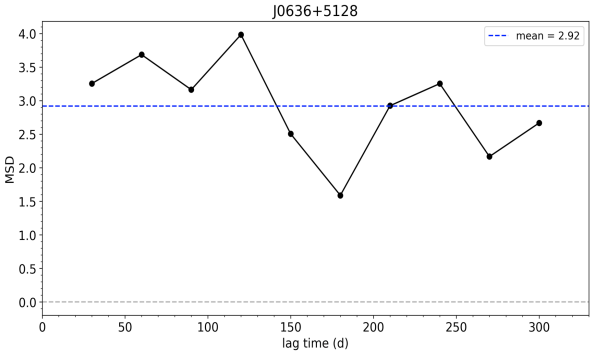
图 2：脉冲星 B1937+21、J0613-0200、J1012+5307、J1909-3744、J2145-0750、J1643-1224 和 J1713+0747 的递增均方位移。脉冲星 J1713+0747 （右下）的振幅最小，贝叶斯因子也最低，因此难以检测到红噪声（Arzoumanian 等，2018）。这八颗脉冲星均表现出红噪声。

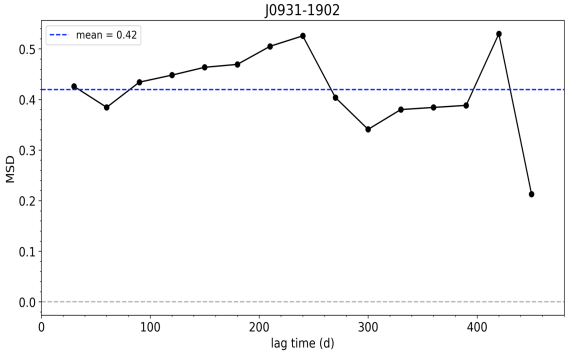


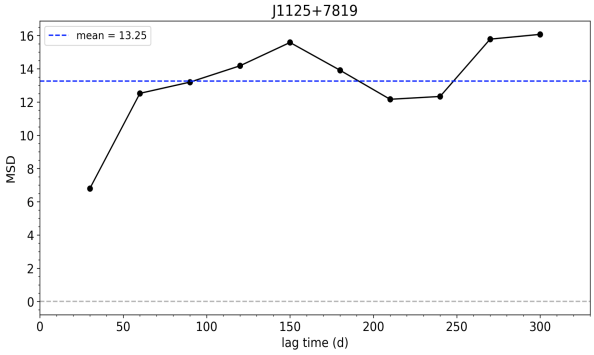

J1744-1134
mean = 0.46
MSD
lag time (d)

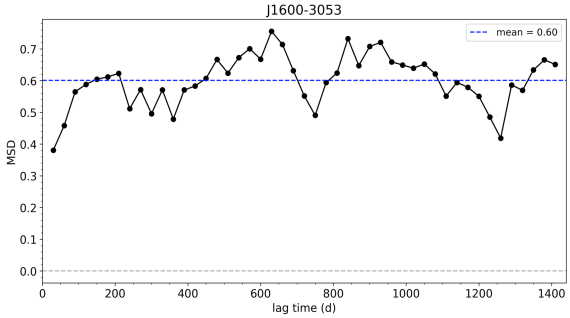

J1918-0642
mean = 0.44
MSD
lag time (d)

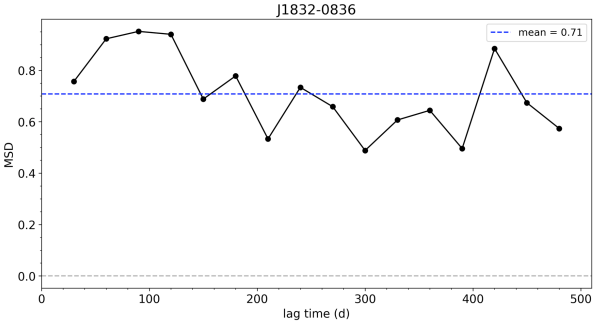

J0340+4130
mean = 0.24
MSD
lag time (d)


J0636+5128
mean = 2.92
MSD
lag time (d)


J0931-1902
mean = 0.42
MSD
lag time (d)


J1125+7819
mean = 13.25
MSD
lag time (d)


J1600-3053
mean = 0.60
MSD
lag time (d)


J1832-0836
mean = 0.71
MSD
lag time (d)

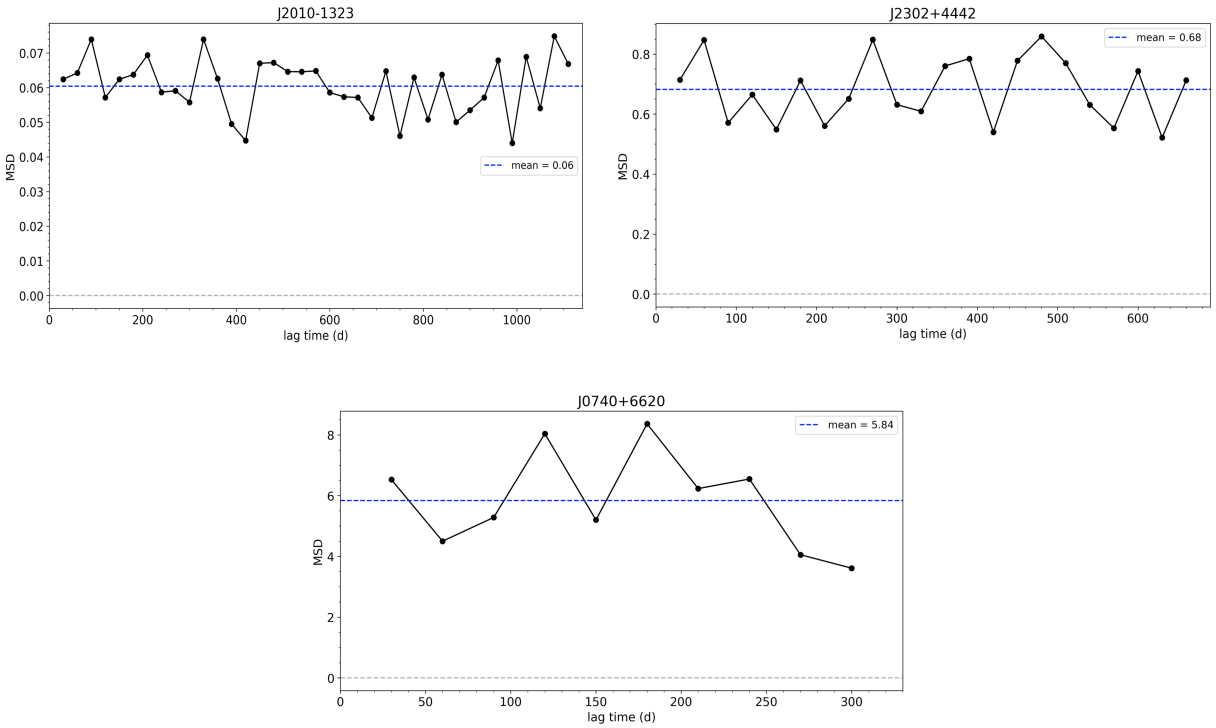
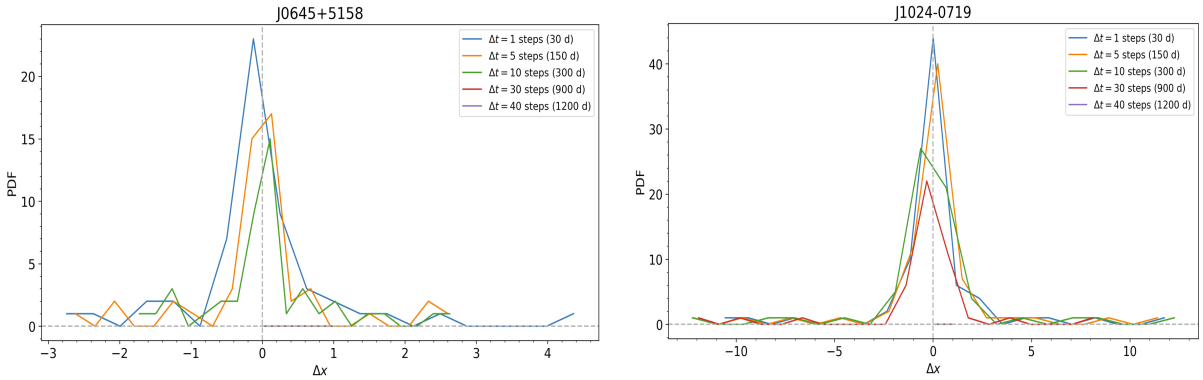


图3： 脉冲星 J0645+5158、J1024-0719、J1455-3330、J1614-2230、J1744- 1134、J1918-0642、J 0340+4130、J0636+5128、J0931-1902、J1125+7819、J1600-3053、J1832- 0836、J2010-1323、J 2302+4442 和 J0740+6620 的平坦均方位移。这十五颗脉冲星均未表现出红噪声。

3.2 三类概率位移分布

随着滞后时间增加，脉冲星的概率位移分布呈现出三种类型的轮廓。我们将计时残差的概率位移分布始终呈单峰、即使滞后时间不断增加也不改变的脉冲星归为1型（见图4）。2型脉冲星的计时残差概率分布仅在滞后时间较短时呈单峰，而在滞后时间较长时则发展为多峰（见图5）。另一方面，3型无论滞后时间取何值，均呈现多峰和宽分布（见图6）。



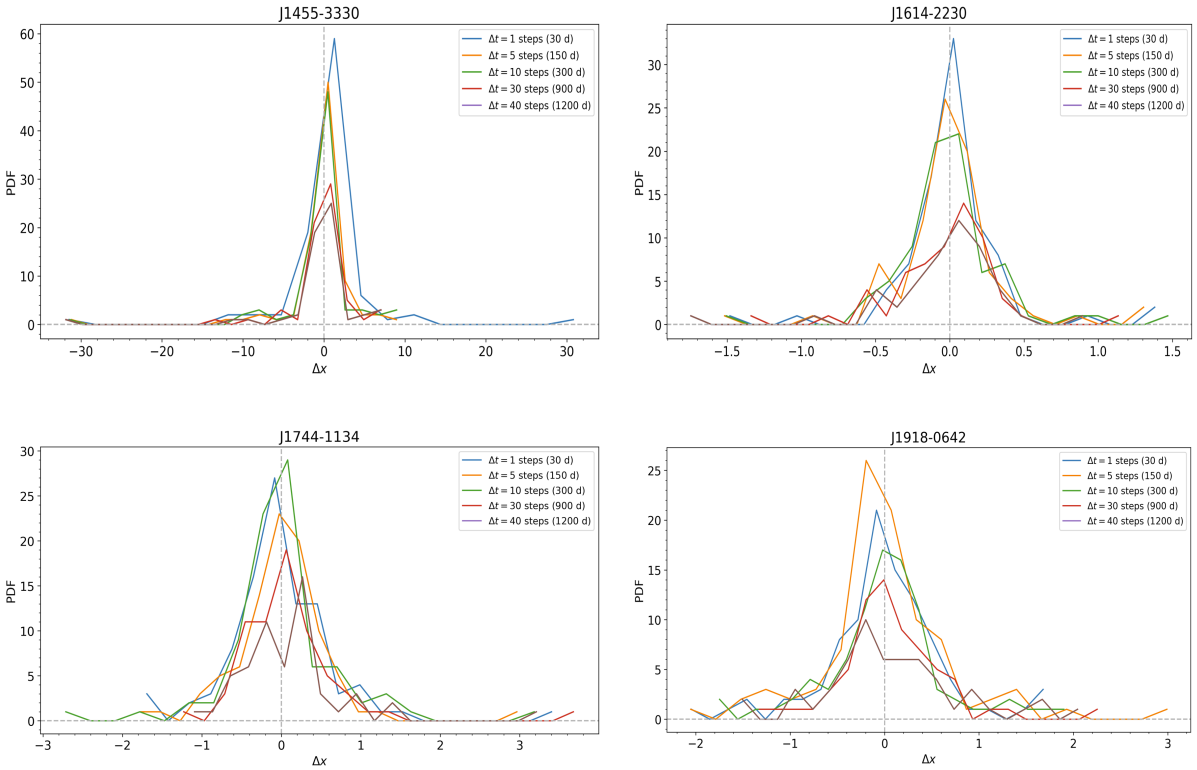
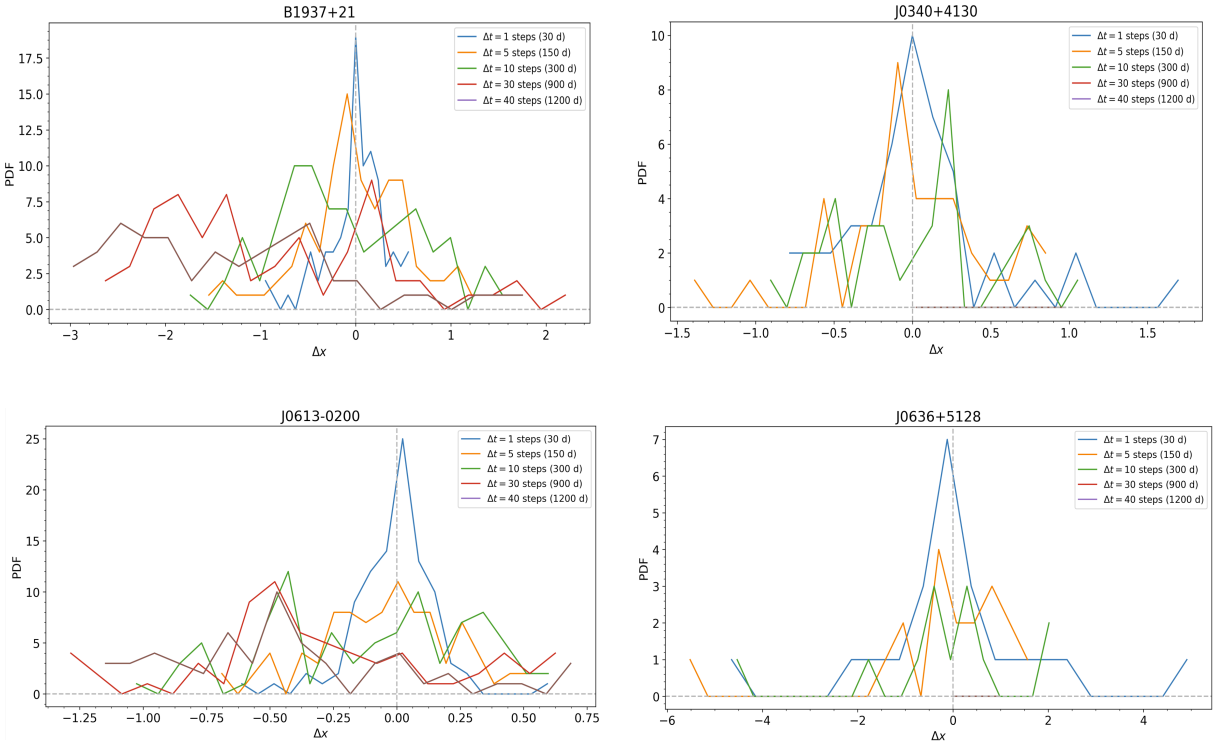
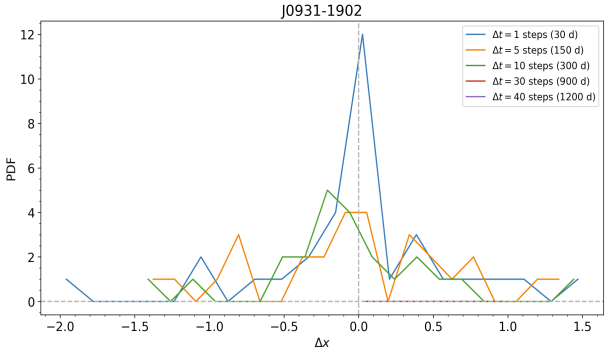
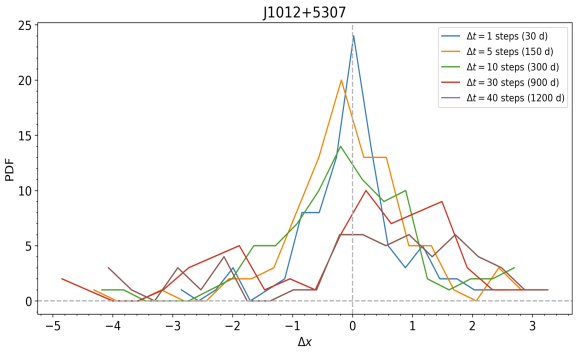
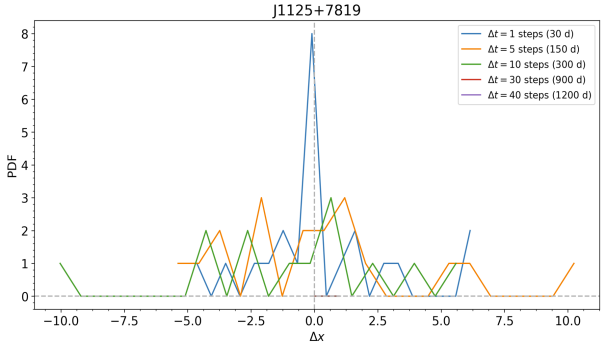


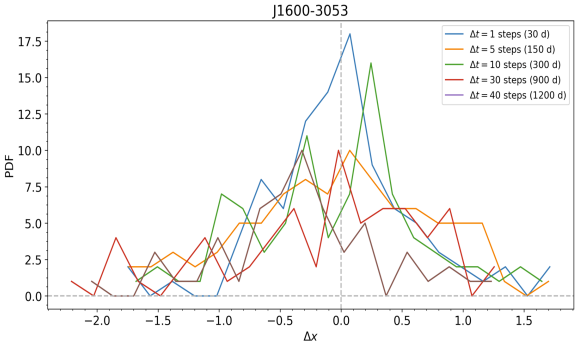
图 4：1 型概率分布无论滞后时间的值如何，均为单峰分布。此类脉冲星包括：J0645+5158、J1024-0719、J1455-3330、J1614-2230、J1744-1134 和 J1918-0642。这六颗脉冲星均不存在红噪声。

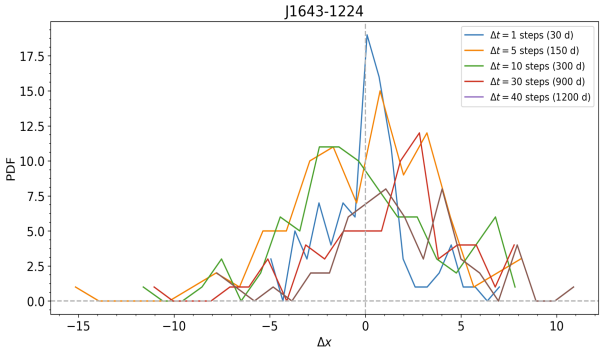


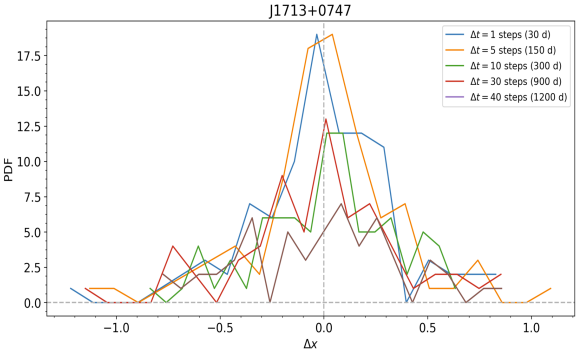

J0931-1902
PDF
Δx
Δt = 1 steps (30 d)
Δt = 5 steps (150 d)
Δt = 10 steps (300 d)
Δt = 30 steps (900 d)
Δt = 40 steps (1200 d)

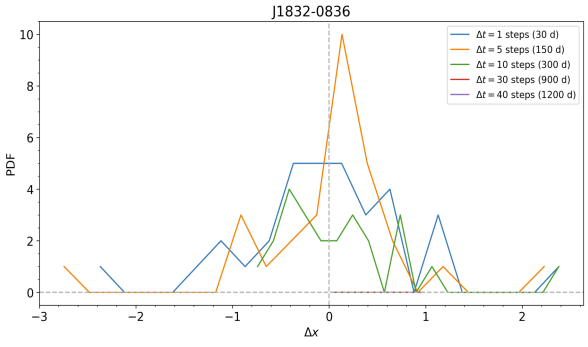

J1012+5307
PDF
Δx
Δt = 1 steps (30 d)
Δt = 5 steps (150 d)
Δt = 10 steps (300 d)
Δt = 30 steps (900 d)
Δt = 40 steps (1200 d)

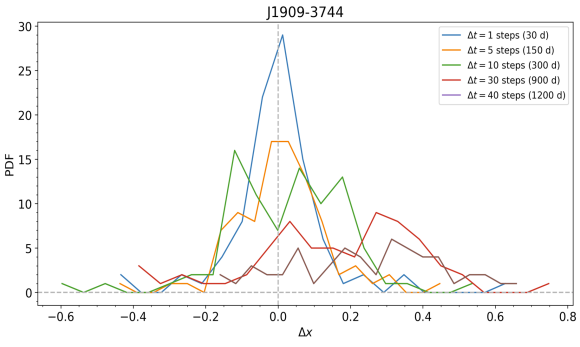

J1125+7819
PDF
Δx
Δt = 1 steps (30 d)
Δt = 5 steps (150 d)
Δt = 10 steps (300 d)
Δt = 30 steps (900 d)
Δt = 40 steps (1200 d)


J1600-3053
PDF
Δx
Δt = 1 steps (30 d)
Δt = 5 steps (150 d)
Δt = 10 steps (300 d)
Δt = 30 steps (900 d)
Δt = 40 steps (1200 d)


J1643-1224
PDF
Δx
Δt = 1 steps (30 d)
Δt = 5 steps (150 d)
Δt = 10 steps (300 d)
Δt = 30 steps (900 d)
Δt = 40 steps (1200 d)


J1713+0747
PDF
Δx
Δt = 1 steps (30 d)
Δt = 5 steps (150 d)
Δt = 10 steps (300 d)
Δt = 30 steps (900 d)
Δt = 40 steps (1200 d)


J1832-0836
PDF
Δx
Δt = 1 steps (30 d)
Δt = 5 steps (150 d)
Δt = 10 steps (300 d)
Δt = 30 steps (900 d)
Δt = 40 steps (1200 d)


J1909-3744
PDF
Δx
Δt = 1 steps (30 d)
Δt = 5 steps (150 d)
Δt = 10 steps (300 d)
Δt = 30 steps (900 d)
Δt = 40 steps (1200 d)

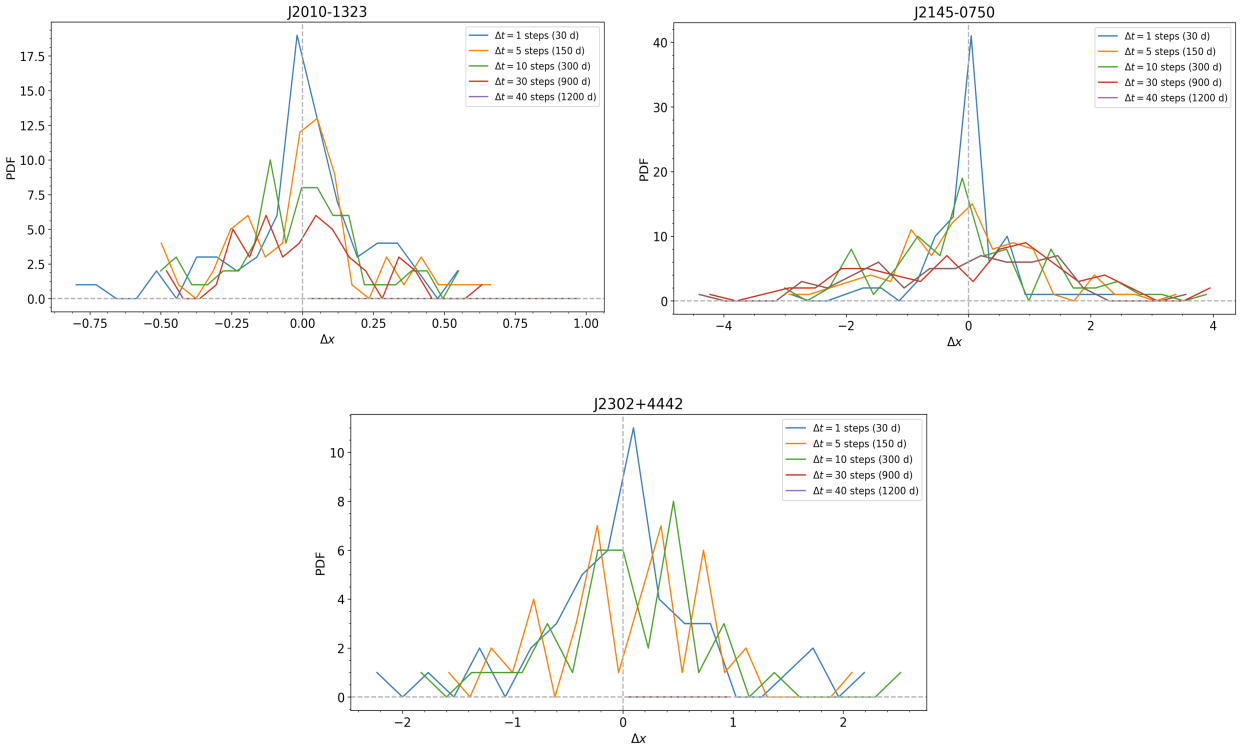


图5： 2型概率分布在滞后时间较短时呈单峰，在滞后时间较长时呈多峰。此类型的脉冲星有：B1937+21、J0340+4130、J0613-0200、J0636+5128、J0931-1902、J1012+5307、J1125+7819、J1600-3053、J1832-0836、J1909-3744、J2010-1323、J2145-0750 和 J2302+4442。这15颗脉冲星中，7颗表现出红噪声，8颗没有红噪声。

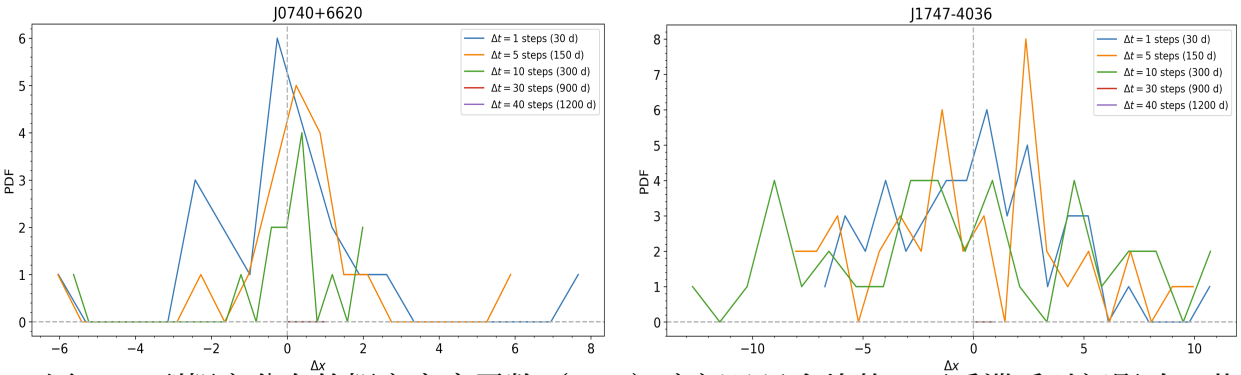


图6： 3型概率分布的概率密度函数（PDF）宽阔且呈多峰状，不受滞后时间影响。此类型的脉冲星有：J0740+6620 和 J1747-4036。前者没有红噪声，而后者有。

3.3 具有红噪声的脉冲星

我们在表1中根据脉冲星的均方位移和概率分布轮廓总结了其分类。为确定哪些脉冲星表现出红噪声，我们采用 Arzoumanian 等人（2018年）的研究。值得注意的是，脉冲星中红噪声的出现仅限于所有具有递增均方位移的脉冲星。

在所研究的脉冲星中，概率密度函数还呈现出一些有趣的特征。尽管滞后时间增加，1型概率密度函数始终呈现单峰。所有具有1型概率密度函数的脉冲星也都具有平坦均方位移。1型概率密度函数从不表现出红噪声。然而，有两颗1型脉冲星，即 J1744- 1134 和 J1918-0642（在表1中以星号标记），在滞后时间等于40个步长时呈现双峰，但总体上仍在零点附近形成峰值。2型概率密度函数同样很有意思。在滞后时间较短时，它呈单峰；但随着滞后时间增加，会发展出多峰。2型概率密度函数可能具有红噪声，也可能不具有红噪声。递增均方位移似乎是具有红噪声的脉冲星所必需的特征。有两颗脉冲星不属于上述两种类型。我们将脉冲星 J0740+6620 和 J1747-4036 标记为3型，其特征是无论滞后时间如何，概率密度函数都较宽且呈多峰。表1对此进行了总结：只有具有递增均方位移的脉冲星明确表现出红噪声。

表1具有红噪声的脉冲星的概率密度函数和均方位移特征。红点表示存在红噪声。

PDF	平坦均方位移	递增均方位移	红噪声
1型	J0645+5158		
1型	J1024-0719		
1型	J1455-3330		
1型	J1614-2230		
1型	J1744-1134*		
1型	J1918-0642*		
2型	J0340+4130		
2型	J0636+5128		
2型	J0931-1902		
2型	J1125+7819		
2型	J1600-3053		
2型	J1832-0836		
2型	J2010-1323		
2型	J2302+4442		
2型		B1937+21	●
2型		J0613-0200	●
2型		J1012+5307	●
2型		J1909-3744	●
2型		J2145-0750	●
2型		J1643-1224†	●
2型		J1713+0747‡	●

3型 J1747-4036

3型 J0740+6620

4 结论

计时残差中存在的固有误差使得分析脉冲星到达时间中的噪声变得困难。尽管如此，我们已经证明，根据均方位移及其概率分布轮廓对计时残差进行分类，可以揭示一种能够区分具有红噪声的脉冲星的潜在模式。特别是，所有相对于滞后时间绘制时呈现递增均方位移的脉冲星，都具有红噪声过程。研究结果具有说服力，并展示了一种相当准确且直接的程序，可用于确定脉冲星中是否存在红噪声（见表1）。这种无模型方法可以补充现有的脉冲星红噪声判定方案；后者依赖于包含拟合参数的依赖模型的统计程序（Arzoumanian 等，2018）。计时残差中递增均方位移所呈现的红噪声独特特征，可能有助于深入了解中子星的性质；这些中子星的内部动力学至今仍未得到充分理解（Cromartie 等，2020）。
[illegible]噪声模型的持续改进，也可能受益于计时残差中观察到的这种独特均方位移行为。

利益冲突

作者声明，本研究是在不存在任何可能被视为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下开展的。

作者贡献

R. R. 负责构思、整理数据、生成所有图表并审阅论文。C. C. B. 负责构思、撰写并审阅论文。

致谢

R. R. 谨此感谢理论物理研究中心、CVIF 以及 Jagna；当地的自然美景和丰富的科学历史直接启发了本项工作。

参考文献

Abbott, B.P. 等，2016年。观测到来自双黑洞并合的引力波。《物理评论快报》，116:061102。

Aggarwal, K. 等，2020年。NANOGrav 11年数据集：引力波记忆的限制，《天体物理学杂志》，889，38。

Antoniadis, J. 等，2022年。国际脉冲星计时阵列第二次数据发布：各向同性引力波背景的搜索。《皇家天文学会月刊》510，4873–4887。

Arzoumanian Z. 等，2018年，《天体物理学杂志增刊》，235，37。 数字对象标识符 10.3847/1538-4365/aab5b0。

Chalumeau, A. 等，2022年。《欧洲脉冲星计时阵列第二次数据发布中的噪声分析及其对引力波

Cromartie, H.T. 等，2020年。极大质量毫秒脉冲星的相对论性沙皮罗延迟测量。《)880-2。

Dahal, P.K.，2020年。脉冲星计时阵列在引力波研究中的综述。《天体物理学与天文学杂志》，41:8。

Goncharov B. 等，2021年，《皇家天文学会月刊》，502，478–493。

Hazboun, J.S.、Romano, J.D. 和 Smith, T.L.，2019年。脉冲星计时阵列的现实灵敏度曲线,

Hazboun, J.S. 等，2020年。脉冲星计时阵列贝叶斯引力波背景统计的模型依赖性，《天体物理

Lam M.T. 等，2017年，《天体物理学杂志》，
834:35

Lommen, A.N.，2015年。脉冲星计时阵列：引力波探测的希望。《物理学进展报告》

Sarah Burke-Spolaor 等，2019年。纳赫兹引力波的天体物理学。《天文学与天体物理学评论》27:5 https://doi.org/10.1007/s00159-019-0115-7

Shannon, R.M. 和 Cordes, J.M，2010年。自旋噪声在毫秒脉冲星精密计时中的作用评估。《天体物理学杂志》725:1607–1619。

Wang, Y.，2015年。脉冲星计时阵列中的噪声，《物理学杂志：会议系列》610 012019

Woods, P.，2022年。脉冲星感受到噪声。*Nature Astronomy* **6**, 176.
ttps://doi.org/10.1038/s41550-022-01621- 2

数据可用性声明

本研究生成和分析的数据集可在 Zenodo 存储库中找到，访问链接为：
https://zenodo.org/record/7678397#.Y_sr9exBw-Q。