

PSR J1701–3726脉冲消零现象研究*

蔡沿庆^{1,2} 李清莹^{1,2} 田杰^{1,2} 李威^{1,2} 党世军^{1,2†} 尚伦华^{1,2‡} 许鑫^{1,2}
支启军^{1,2} 吴家超^{1,2}

(1 贵州师范大学物理与电子科学学院 贵阳 550025)

(2 贵州省射电天文数据处理重点实验室 贵阳 550025)

摘要 利用Parkes 64 m射电望远镜在中心频率为1369 MHz的观测数据,分析了PSR J1701–3726的脉冲消零现象,发现这颗星的脉冲消零现象存在准周期性,准周期值约为 $81.25P$,其中 P 为PSR J1701–3726的自旋周期,并计算出脉冲消零比(Nulling Fraction, NF)为 $27\% \pm 0.97\%$. 进一步研究单脉冲在脉冲辐射窗口区域的相对能量随时间的变化关系,发现在消零态和爆发态之间存在a、b、c、d共4种不同的切换模式,其中,a模式出现23次,b模式出现6次,c模式出现5次,d模式出现79次,表明状态转换可能存在一定的随机性.

关键词 脉冲星: 个别: PSR J1701–3726, 脉冲消零, 方法: 数据分析

中图分类号: P145; **文献标识码**: A

1 引言

脉冲星是高速自转且具有强磁场的中子星,自20世纪60年代被发现以来,脉冲星的辐射研究一直是天文学领域的研究热点之一. 观测研究表明,脉冲星的单个脉冲轮廓变化不定,但将成百上千个单脉冲叠加之后得到的积分脉冲轮廓是非常稳定的. 然而,有些脉冲星的积分脉冲轮廓会在两种或两种以上的形状之间来回切换,这种现象叫做模式变换^[1]. 还有的脉冲星的脉冲轮廓会在一定的周期内无法被望远镜探测到,在持续一定的脉冲周期后,又恢复到正常辐射状态,这种现象叫做脉冲消零或脉冲缺失^[2]. 脉冲消零现象由Backer^[2]于1970首次发现. 随后, Ritchings^[3]利

用MKIA射电望远镜观测的数据研究32颗脉冲星的单个脉冲,也发现了脉冲消零现象. 到目前为止,观测到具有消零现象的脉冲星已达200多颗^[4],这些脉冲星中有的存在周期性的脉冲消零现象^[5–9]. 研究脉冲星的消零现象可以进一步了解脉冲星的物理辐射机制. 脉冲消零比(Nulling Fraction, NF),即脉冲信号在观测中所处消零状态的时间与观测时长的比值,是描述脉冲消零现象的一个重要参数. 不同消零脉冲星的NF差异一般很大,有的小于1%,但有的可以大于90%^[10]. Ritchings^[3]观测32颗脉冲星时发现NF与脉冲星的年龄相关联,年龄越大的脉冲星,NF的持续时间越长. 李向东等^[11–12]对72颗消零脉冲星的统计分析表明,NF与脉冲等值宽度有很显著的相关关系. Wang等^[10]进

2023-06-21收到原稿,2023-07-25收到修改稿

*大学生创新创业训练计划项目(202210663007),贵州省科技计划项目(黔科合-基础-ZK[2022]一般304),贵州省教育厅高等学校科学研究项目(黔教计[2022]132号、[2022]137号),贵州师范大学学术新苗基金项目(黔师新苗[2022]B18号)资助

†dangsj@gznu.edu.cn

‡lhshang@gznu.edu.cn

行统计研究发现NF与脉冲星的年龄和周期都有正相关的关系,所有NF较大的脉冲星的年龄都超过百万年,但NF与脉冲轮廓没有很强的相关性,并提出模式变换和脉冲消零现象可能是同一现象的不同表现形式.

PSR J1701-3726于1992年被Parkes 64 m射电望远镜发现^[13],是一颗具有消零现象和模式变换的脉冲星^[10]. Wang等^[10]基于2004年Parkes 64 m射电望远镜在中心频率为1518 MHz对PSR J1701-3726长达2 h的观测数据,发现这颗脉冲星在60-500 s内频繁出现脉冲消零现象,并统计出NF为14%. 这颗脉冲星的A模式和B模式被零脉冲分隔开来,B模式比A模式要弱和稀少,在2 h的观测中,B模式只出现7-8次,每次持续的时间为1-2 min. 随后,Gajjar等^[7]在中心频率为610 MHz的低频段对PSR J1701-3726进行分析研究,并统计出这颗脉冲星的NF为19%.

本文基于Parkes 64 m射电望远镜于2014年对PSR J1701-3726长达2 h的观测数据,对这颗脉冲星的消零现象的周期性以及消零现象的切换过程开展研究.

2 观测与数据处理

本文使用Parkes 64 m射电望远镜于2014年4月2日对PSR J1701-3726的观测数据,观测中心频率为1369 MHz,带宽为256 MHz,频率通道数为512,数据记录终端为PDFB4 (Pulsar Digital Filter Bank 4),总观测时长为2 h.

本文使用脉冲星数据处理软件对获取的数据进行处理和分析. 首先,利用DSPSR (Digital Signal Processing Software for Pulsar)^[14]进行消色散和周期折叠,为了较好地分析脉冲消零现象,采用单个脉冲周期为一个子积分时长. 其次,利用PSRCHIVE^[15]中的PAZ (Pulsar Archive Zapper)模块进行自动消干扰,并把频域两端信噪比低的5%区域切掉,随后用PAZI (Pulsar Archive Zapper Interface)模块手动消除未被自动识别的射频干扰,最后对消完干扰的数据利用PAM (Pulsar Archive Manipulator)模块折叠频域和偏振信号.

基于以上数据处理工作,共获得2926个单脉冲.

3 结果

本文利用Parkes 64 m射电望远镜对PSR J1701-3726长达2 h的观测数据,对这颗脉冲星进行了详细的单脉冲研究工作,具体结果如下.

3.1 单脉冲能量分布

为进一步研究观测受射电干扰影响程度的大小,可对2926个单脉冲在非射电辐射区域的rms (root mean square)值的分布进行研究. 如果rms值的分布是一个很好的高斯分布,表明观测受射电干扰影响小,相反,如果rms值的分布具有随机性,且没有明显的高斯分布特征,表明观测可能受到较强的射电干扰^[16]. 本文对2926个单脉冲求平均得到一个总平均脉冲轮廓,并对这个平均脉冲轮廓没有明显脉冲信号的区域标记为单脉冲的非射电辐射区域. 随后利用总平均脉冲轮廓的峰值对每一个单脉冲进行归一化处理,算出归一化处理后的单脉冲在非射电辐射区域的rms值. 图1是所有单脉冲rms值的分布直方图,红色虚线是该分布的高斯拟合曲线, μ 与 σ 分别表示高斯拟合曲线的平均值和标准差. 从图1可以看出单脉冲的rms值是一个很好的高斯分布,表明基线噪声水平相对稳定,观测受射电干扰影响小,适用于单脉冲分析研究.

单个脉冲能量直方图首先被Smith^[17]用来研究脉冲星的脉冲消零现象. 在此基础上,本文选取总平均脉冲轮廓具有明显脉冲信号区域来定义单脉冲的脉冲辐射窗口(on-pulse),非脉冲辐射窗口(off-pulse)采用与辐射窗口相同的区间宽度. 随后计算出单脉冲在on-pulse区域与off-pulse区域的能量值,对所有单脉冲在on-pulse区域的能量值求和再取平均得到一个能量均值,利用这个能量均值归一化单脉冲在on-pulse区域与off-pulse的能量值,即得到单脉冲在on-pulse区域与off-pulse区域的相对能量. 图2展示了单脉冲在on-pulse区域与off-pulse区域相对能量的直方图分布情况. 从图2可以看出,on-pulse区域的相对能量存在明显的双峰分布,相对能量在0附近分布的单脉冲对应着PSR J1701-3726的消零子脉冲.

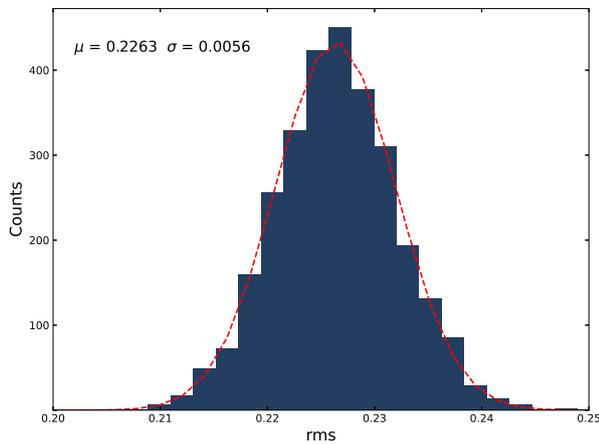


图 1 单脉冲基线噪声的rms直方图, 红色虚线表示对rms分布图的高斯拟合曲线。

Fig. 1 The rms histogram of the single pulses baseline noise, with the red dashed line representing the Gaussian fitting curve to the rms distribution.

3.2 脉冲消零

PSR J1701–3726是一颗具有消零现象和模式变换的脉冲星, Wang等^[10]计算出这颗脉冲星的NF为14%, Gajjar等^[7]在低频段计算出这颗脉冲星的NF为19%, 表明同一颗脉冲星的NF值可能因观测频率和观测时间的不同而有所变化. 本文基于Parkes 64 m射电望远镜在中心频率为1369 MHz的观测数据, 进一步研究这颗脉冲星的消零现象.

Wang等^[10]提到PSR J1701–3726的A模式和B模式被零脉冲分隔开来, B模式比A模式要弱和稀少, 由于本文的工作重点是对消零状态与辐射状态之间的周期性以及切换过程开展研究, 因此不详细区分A模式和B模式. 本文将on-pulse区域能够探测到脉冲信号的单脉冲标记为爆发态单脉冲, 没有明显探测到脉冲信号的单脉冲标记为消零态单脉冲.

本文采用与Bhattacharyya等^[18]类似的方法区分PSR J1701–3726的消零态单脉冲和爆发态单脉冲. 首先计算出每一个单脉冲在辐射窗口区间能量的不确定度 $\sigma_{ep} = \sqrt{n_{on}\sigma_{off}}$, 其中, n_{on} 表示每一个单脉冲在on-pulse窗口的bin数, σ_{off} 表示每一个单脉冲非射电辐射区域的rms值. 随后计算每一个单脉冲在on-pulse区域的能量值, 如果单脉冲在on-

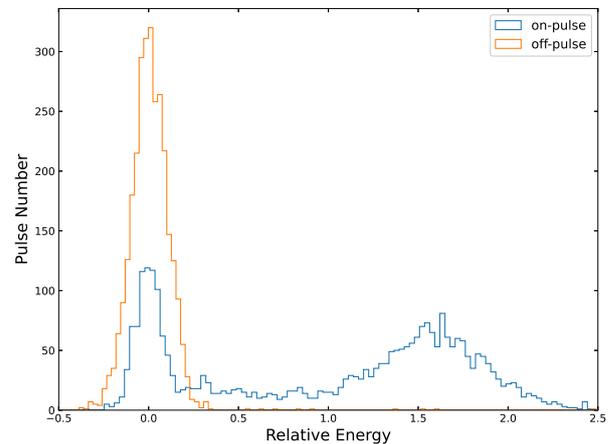


图 2 单脉冲的on-pulse与off-pulse区域的相对能量分布直方图

Fig. 2 The relative energy distribution histogram of single pulses in on-pulse and off-pulse regions

pulse区域的能量值大于一定倍数的 σ_{ep} 就可标记为爆发态单脉冲, 反之可标记为消零态单脉冲. σ_{ep} 倍数的选取并不固定在某一个值, 可参考消零态单脉冲个数的总平均脉冲轮廓有无明显脉冲成分而发生相应的变化.

基于以上思想, 本文首先选取5倍 σ_{ep} 来区分处于爆发态和消零态的单脉冲, 结果显示消零态单脉冲个数的总平均脉冲轮廓存在一定的弱辐射成分. 随后选取3倍的 σ_{ep} , 结果显示消零态单脉冲个数的总平均脉冲轮廓依然存在微弱的辐射成分. 为尽量避免弱辐射成分被区分到消零态, 本文选取2倍 σ_{ep} , 即单脉冲在on-pulse区域的能量值大于2倍的 σ_{ep} 就标记为爆发态单脉冲, 小于2倍的 σ_{ep} 就标记为消零态单脉冲. 得到处于消零态和爆发态的单脉冲个数, 图3展示了与消零态和爆发态对应的平均脉冲轮廓. 从图3可以看出, 处于消零态单脉冲个数的总平均脉冲轮廓没有明显的脉冲成分, 表明大部分弱辐射成分没有区分到消零态, 同时可以看出处于爆发态单脉冲个数的总平均脉冲轮廓是一个多峰结构.

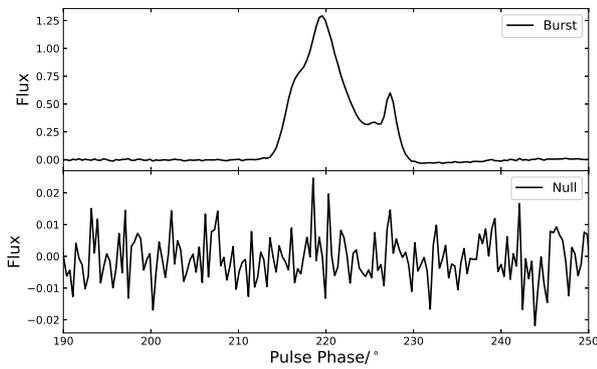


图 3 消零态(下图)和爆发态(上图)的平均脉冲轮廓

Fig. 3 Mean pulse profiles of null state (lower subgraph) and burst state (upper subgraph)

统计出消零态的总持续时长与总观测时长的比值即得NF. NF的误差用 $\sqrt{n_p}/N$ 给出, 其中, n_p 是处于消零态的单脉冲个数, N 是总的单脉冲个数^[10]. 最后计算得到的NF值为 $27\% \pm 0.97\%$, 此结果与Gajjar等^[7]和Wang等^[10]给出的结果基本吻合. 区分出处于消零态与爆发态的单脉冲之后, 可分别得到消零态与爆发态的持续时间序列. 图4是消零态与爆发态持续时间序列的分布直方图, 可以看出大部分消零态的持续时长为0–5个周期, 只有极少部分持续时间较长, 表明这颗脉冲星的消零态以短标为主.

Herfindal等^[5]于2007年在研究PSR B1133+16时首次发现周期性的脉冲消零现象. 随后, 周期性的脉冲消零现象被陆续发现^[6–9]. 为进一步研究周期性的脉冲消零现象在本文所用的观测数据中是否存在, 本文基于Gajjar等^[19]的分析思路, 将处于消零态和爆发态的单脉冲分别标记为0和1, 得到一组只包含0和1的序列, 对这组序列进行傅里叶变换, 所得频谱如图5所示. 从图5可以看出PSR J1701–3726的脉冲消零现象存在明显的周期性, 其周期值约为 $81.25P$, P 为PSR J1701–3726的自旋周期.

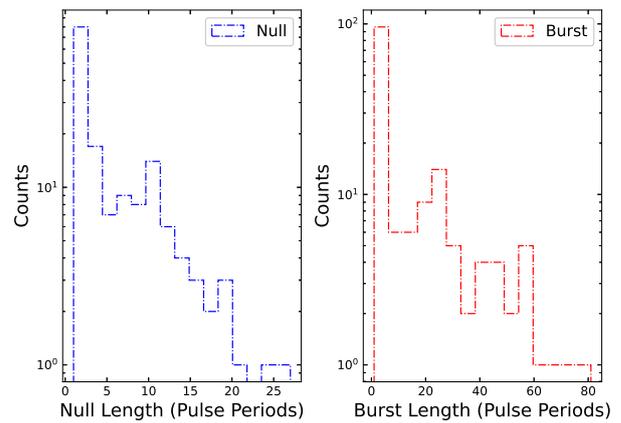


图 4 消零态(左图)和爆发态(右图)持续时间序列的分布直方图

Fig. 4 Histogram of the distribution of duration of null state (left) and burst state (right)

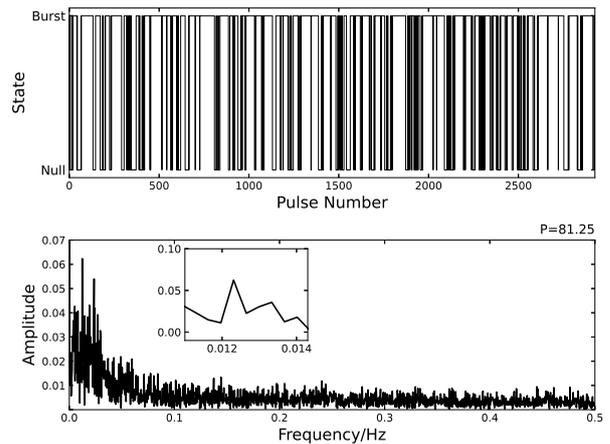


图 5 PSR J1701–3726脉冲能量的低频准周期波动谱. 上子图表示用0和1标记的处于消零态和爆发态的单脉冲序列, 下子图表示0-1序列的傅里叶功率谱. 插图显示了对最强光谱特征的放大.

Fig. 5 Low-frequency quasi-periodic fluctuations in the pulse energy of PSR J1701–3726. The upper subgraph represents single pulse sequences in null state and burst state marked with 0 and 1, and the lower subgraph represents the Fourier power spectrum of the one-zero sequence. The inset plot exhibits the zoom in on the strongest spectral feature.

3.3 消零前后过程研究

对消零脉冲星的消零态与爆发态之间切换过程的研究可以进一步了解脉冲星的物理辐射

机制. Bhattacharyya等^[18]研究PSR B0818-41时发现, 当这颗脉冲星从爆发态切换到消零态时是一种缓慢变化的过程(本文称gradual模式), 但由消零态切换到爆发态则是一种急剧变化的过程(本文称abrupt模式). Wen等^[20]在研究PSR J1727-2739时发现另一种切换模式, 即由爆发态切换到消零态时, 既存在gradual模式, 也存在abrupt模式. 这些现象在PSR J1701-3726中还没有被研究过, 基于Bhattacharyya等^[18]和Wen等^[20]的工作, 本文对PSR J1701-3726的消零态与爆发态之间的切换过程开展研究. 图6展示了部分单脉冲在on-pulse区域的相对能量随时间的变化关系. 从图6可以看出, PSR J1701-3726的消零态和爆发态之间存在4种不同的切换模式, 本文对这4种模式标记为a模式、b模式、c模式和d模式. 这4种模式的定义分别如下, a模式: 从消零态到爆发态是gradual模式, 从爆发态到消零态是abrupt模式; b模式: 从消零态到爆发态和从爆发态到消零态都是gradual模式; c模式: 从消零态到爆发态是abrupt模式, 从爆发态到消零态是gradual模式; d模式: 从消零态到爆发态和从爆发态到消零态都是abrupt模式.

在本文2 h的观测数据中, 统计出a模式出现23次, b模式出现6次, c模式出现5次, d模式出现79次, 这表明PSR J1701-3726的消零态与爆发态之间的切换过程主要表现为突然的状态转换. 本文猜测在消零态与爆发态之间的切换模式可能受到一种随机出现的弱辐射模式的调制作用, 当这种弱辐射模式发生时, 切换过程对应gradual模式, 反之对应abrupt模式.

4 总结与讨论

本文基于Parkes 64 m射电望远镜的观测数据对PSR J1701-3726的脉冲消零现象进行了分析研究, 发现在本次观测数据中这颗脉冲星的NF为 $27\% \pm 0.97\%$, 且脉冲消零现象存在准周期性, 周期值约为 $81.25P$. 进一步研究单脉冲在on-pulse区域的相对能量随时间的变化关系, 发现这颗脉冲星的消零态和爆发态之间存在4种不同的切换模式, 即a模

式: 从消零态到爆发态是gradual模式, 从爆发态到消零态是abrupt模式; b模式: 从消零态到爆发态和从爆发态到消零态都是gradual模式; c模式: 从消零态到爆发态是abrupt模式, 从爆发态到消零态是gradual模式; d模式: 从消零态到爆发态和从爆发态到消零态都是abrupt模式.

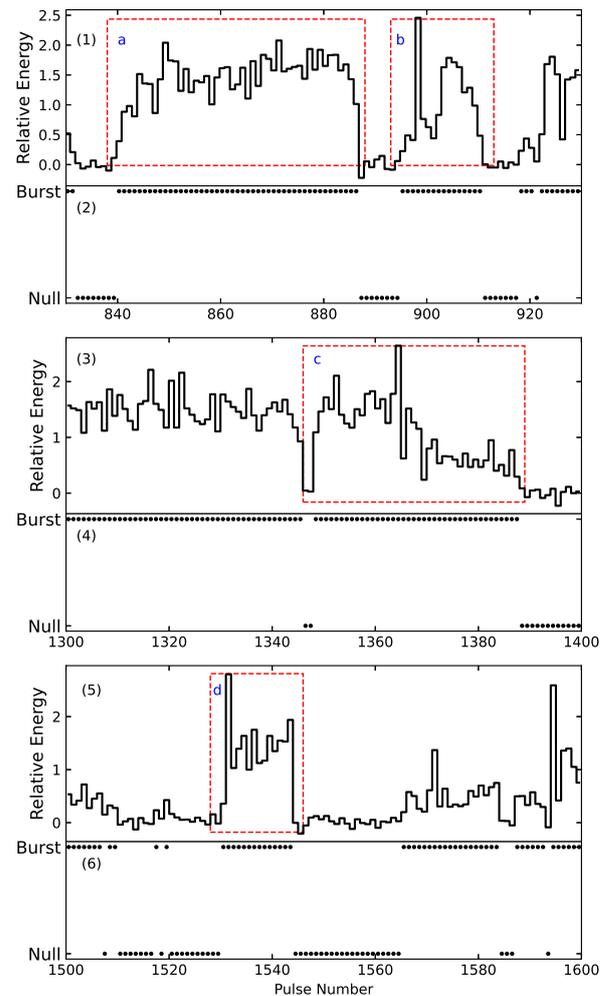


图6 子图(1)、(3)、(5)表示单脉冲on-pulse区域的相对能量随时间的变化. 子图(2)、(4)、(6)表示每一个单脉冲对应的状态. a、b、c和d分别表示消零态和爆发态之间4种不同的切换模式.

Fig. 6 Subgraphs (1), (3) and (5) show the on-pulse relative energy of the single pulses vs. pulse number. Subgraphs (2), (4) and (6) show the corresponding state of each single pulses. a, b, c, and d represent four different switching modes between the null state and the burst state, respectively.

在2 h的观测中, d模式占主导地位, a模式次之, 而b模式和c模式出现的次数比较稀少. 本文猜测这4种切换模式可能受到一种随机出现的弱辐射模式的调制作用, 当弱辐射模式发生时, 消零态与爆发态之间的切换过程是缓慢进行的, 即对应gradual模式, 反之对应abrupt模式.

理论上对脉冲消零现象主要有两种解释: 一种理论认为脉冲消零现象是由几何原因造成的, 这种情况下脉冲星并没有真正意义上停止脉冲辐射, 只是观测视线恰好扫过脉冲星的非射电辐射区域或者脉冲星的辐射束方向偏离了原来的传播方向; 脉冲星因自身原因导致辐射停止是另一种理论解释, 比如基于Ruderman和Sutherland提出的极冠真空隙模型^[21](以下称RS模型), 当正负电子对停止放电时可导致脉冲消零现象. Filippenko和Radhakrishnan^[22](以下称FR)于1982年发现RS模型很难解释与脉冲消零相关联的一些现象, 比如模式变换, 于是FR对RS模型作了一定的修正. 他们假设脉冲星的射电辐射区局限在间隙区内的一定区域(可简称为磁流管). 当脉冲星处于正常辐射状态时, 磁流管内是一种雪崩式的放电过程, 一次放电过程结束以后, 在间隙内的电势差会迅速减小, 一段时间以后又恢复到一定的临界值, 随后开始下一次放电过程. 当脉冲星出现消零现象时, 磁流管内并未停止放电过程, 只是由通常的雪崩式的放电变为连续的、稳定的、低能的放电. 基于这个修正, FR较好地解释了脉冲消零与模式变换相联系的现象^[11-12]. Wang等^[10]提到PSR J1701-3726的脉冲消零现象与模式变换密切相关, 借助FR对RS模型的修正, 可以用此理论较好地解释PSR J1701-3726的脉冲消零现象与模式变换相

联系的现象. 但基于这颗脉冲星在消零态时, 其平均脉冲轮廓没有观测到明显的脉冲成分, 因此猜测当消零态出现时, 这颗脉冲星的磁流管内可能存在放电终止的现象.

参 考 文 献

- [1] Backer D C. *Nature*, 1970, 228: 1297
- [2] Backer D C. *Nature*, 1970, 228: 42
- [3] Ritchings R T. *MNRAS*, 1976, 176: 249
- [4] Wang P F, Han J L, Han L, et al. *A&A*, 2020, 644: A73
- [5] Herfindal J L, Rankin J M. *MNRAS*, 2007, 380: 430
- [6] Herfindal J L, Rankin J M. *MNRAS*, 2009, 393: 1391
- [7] Gajjar V, Joshi B C, Kramer M. *MNRAS*, 2012, 424: 1197
- [8] Basu R, Mitra D. *MNRAS*, 2018, 476: 1345
- [9] Basu R, Mitra D. *MNRAS*, 2019, 487: 4536
- [10] Wang N, Manchester R N, Johnston S. *MNRAS*, 2007, 377: 1383
- [11] 李向东, 汪珍如. *天文学报*, 1995, 36: 1
- [12] Li X D, Wang Z R. *ChA&A*, 1995, 19: 302
- [13] Johnston S, Lyne A G, Manchester R N, et al. *MNRAS*, 1992, 255: 401
- [14] Van Straten W, Bailes M. *PASA*, 2011, 28: 1
- [15] Hotan A W, Bunton J D, Harvey-Smith L, et al. *PASA*, 2004, 21: 302
- [16] Rejep R, Wang N, Yan W M, et al. *MNRAS*, 2022, 509: 2507
- [17] Smith F G. *MNRAS*, 1973, 161: 9P
- [18] Bhattacharyya B, Gupta Y, Gil J. *MNRAS*, 2010, 408: 407
- [19] Gajjar V, Yuan J P, Yuen R, et al. *ApJ*, 2017, 850: 173
- [20] Wen Z G, Wang N, Yuan J P, et al. *A&A*, 2016, 592: A127
- [21] Ruderman M A, Sutherland P G. *ApJ*, 1975, 196: 51
- [22] Filippenko A V, Radhakrishnan V. *ApJ*, 1982, 263: 828

A Study of Pulse Nulling in PSR J1701–3726

CAI Yan-qing^{1,2} LI Qing-ying^{1,2} TIAN Jie^{1,2} LI Wei^{1,2} DANG Shi-jun^{1,2} SHANG Lun-hua^{1,2}
XU Xin^{1,2} ZHI Qi-jun^{1,2} WU Jia-chao^{1,2}

(1 School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)
(2 Guizhou Provincial Key Laboratory of Radio Astronomy and Data Processing, Guiyang 550025)

ABSTRACT Using the observation data of Parkes 64 m radio telescope at a central frequency of 1369 MHz, the pulse nulling phenomenon of PSR J1701–3726 was analyzed. It is found that the pulse nulling phenomenon of this pulsar has quasi-periodic, and the quasi-period value approximately is $81.25P$, where P is the rotation period, and the pulse nulling ratio NF (Nulling Fraction) is calculated to be $27\% \pm 0.97\%$. Further study on the change of relative energy in the on-pulse region over time shows that there are four different switching modes a, b, c and d between null state and burst state, among which mode a occurs 23 times, mode b occurs 6 times, mode c occurs 5 times, and mode d occurs 79 times, indicating that there may be some randomness in state transitions.

Key words pulsars: individual: PSR J1701–3726, pulse nulling, methods: data analysis