

# PSR J0835-4510单脉冲的观测研究\*

闫世钊<sup>1,2</sup> 赵成仕<sup>1,2,3†</sup> 李祎丰<sup>1</sup> 王性川<sup>1,2</sup> 罗近涛<sup>1,2,4‡</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)

(3 中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600)

(4 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室 西安 710600)

**摘要** 利用中国科学院国家授时中心吴平观测站40 m射电望远镜,在L波段对Vela脉冲星(PSR J0835-4510)进行了单个脉冲观测研究.在56 min的观测数据中,共观测到38040个单脉冲.探测到观测时间内辐射的所有单脉冲信号,其中单脉冲的半峰线宽(half-maximum line width,  $W_{50}$ )值分布范围为0.52–3.3 ms,平均值为1.5 ms,小于积分脉冲轮廓的 $W_{50}$  (1.9 ms);单脉冲信噪比(signal-noise ratio, S/N)分布范围为6.8–495,平均S/N值为32.4.约58%单脉冲的峰值相位提前于积分脉冲轮廓峰值相位到达,最早提前2.3 ms.用对数正态分布拟合单脉冲的辐射能量累积分布,平均值为 $\mu = -0.02$ ,标准差 $\sigma = 0.28$ .在脉冲星辐射窗口的前沿区域,探测到1个普通单脉冲,该单脉冲的S/N是47.4.本次共探测到69个S/N大于5倍单脉冲S/N平均值的强脉冲,这些强脉冲较窄, $W_{50}$ 值分布范围为0.52–1.04 ms,相位集中分布在平均脉冲轮廓的上升沿附近.探测到了23个具有双峰结构的单脉冲,主峰和次峰分布在不同的辐射区域.通过对不同类型单脉冲的折叠脉冲轮廓研究,发现强单脉冲和双峰单脉冲对平均脉冲轮廓的影响不同.

**关键词** 脉冲星: 个别: J0835-4510, 脉冲星: 单脉冲, 方法: 数据分析

**中图分类号**: P145; **文献标识码**: A

## 1 引言

脉冲星是快速旋转中子星,具有极强的磁场,以单个脉冲形式辐射周期性信号,被科学家认为是20世纪60年代天文学的四大发现之一.它具有极端物理环境并表现出不同于大多数恒星的物理性质,很快成为了科学家研究的理想候选体.目前,脉冲星的观测研究主要集中在脉冲星巡天、脉冲辐射强度和偏振、脉冲到达时间等<sup>[1]</sup>.通过对脉冲星积分轮廓和单脉冲研究可以更深入地了解脉冲星的

辐射机制.脉冲星积分轮廓十分稳定,能够反映出脉冲星辐射区的几何结构和辐射强度.但对于脉冲星辐射的单个脉冲而言,其轮廓结构、辐射强度以及偏振特性等随时间变化很大,短时标内没有规律可循.单脉冲可以具体反映出脉冲星的辐射特征,具有很高的研究意义.随着观测采样率的提高,单脉冲会呈现出更加精细的结构,如子脉冲和微脉冲结构等<sup>[2]</sup>.部分脉冲星偶尔辐射的单脉冲信号其流量密度比平均脉冲流量密度大几十倍、上百倍甚

2021-12-02收到原稿,2022-01-10收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11873050、U1931128、11973046),科技部SKA专项(2020SKA0120200),中国科学院西部青年学者项目(XAB2021YN27)资助

†jluo@ntsc.ac.cn

‡zhaocs@ntsc.ac.cn

至上千倍,通常称这些单脉冲为巨脉冲.巨脉冲比普通单脉冲更窄,持续时间从纳秒到微秒不等.最初,巨脉冲现象仅从Crab<sup>[3]</sup>和PSR B1937+21脉冲星<sup>[4]</sup>中探测到.

脉冲星PSR J0835-4510 (又称为Vela)是离我们最近、最亮的脉冲星之一,是中小型射电望远镜进行脉冲星研究的优选对象<sup>[5]</sup>. Vela脉冲星周期是89.3 ms,具有极高的线偏振,没有消零脉冲现象<sup>[6]</sup>. Johnston等人于2001年研究发现Vela脉冲星的巨型微脉冲相位在主脉冲峰值相位之前出现,并指出Vela脉冲星单脉冲的流量密度服从对数正态分布<sup>[5]</sup>. Dodson等人于2003年研究分析Vela辐射的大于5倍平均脉冲信噪比的亮脉冲信号<sup>[6]</sup>. 目前对Vela脉冲星的观测数据中还没发现与Crab脉冲星一样的巨脉冲. 单脉冲观测对天线灵敏度、电磁环境等要求高,目前只有部分辐射流量强的脉冲星能够探测到单脉冲. Vela脉冲星自转突变(Glitch)现象发生频繁. Glitch发生时脉冲星自转频率突然增加,这是一种极少见的、不可预测行为,并且不同的脉冲星之间会有很大的不同<sup>[7]</sup>. 根据Palfreyman等人于2016年研究,在Vela脉冲星Glitch发生期间,积分脉冲轮廓会发生变化<sup>[8]</sup>. Krishnamohan等人于1983年提出Vela脉冲星的积分轮廓由4个成分组成,并且指出强脉冲提前于平均脉冲峰值相位到达<sup>[9]</sup>. Feng等人于2021年研究发现强脉冲比平均脉冲轮廓窄,持续时间从纳秒到微秒之间,能量分布遵循幂律<sup>[10]</sup>. Chen等人于2020年详细讨论了在观测波段6800 MHz下Vela辐射的单脉冲峰值流量密度大于2.5 Jy的巨微脉冲辐射特性<sup>[11]</sup>.

本文利用中科院国家授时中心吴平40 m射电望远镜在1400 MHz频段下对Vela脉冲星开展单脉冲观测研究,主要分析了脉冲星信号辐射强度、脉冲半峰线宽分布、辐射能量分布以及强脉冲辐射特性和双峰单脉冲信号特征等. 本文具体结构安排如下: 第2节介绍了吴平40 m天线Vela脉冲星观测数据情况,第3节介绍了观测数据处理过程,第4节详细分析讨论了Vela辐射的单脉冲、强脉冲、双峰单脉冲辐射特性,第5节为论文研究总结.

## 2 观测

吴平40 m射电望远镜于2014年建成,天线为卡塞格林系统,装配有L波段和S波段接收机. 于2015年底利用现有L波段观测系统平台,配置基于ROACH2 (Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware)的脉冲星消色散终端,初步建成脉冲星观测系统,系统同时具备搜寻和计时模式观测能力,观测频段为1.1–1.75 GHz,终端数据采样为8 bit,数据文件记录格式为标准PSRFITS (Pulsar Flexible Image Transport System)<sup>[12]</sup>. 由于L波段接收机为右旋单极化接收系统,因此脉冲星观测也只具备右旋观测能力. 吴平40 m观测站周围电磁环境良好,适合开展单脉冲观测研究. 2017年10月26日利用该系统对Vela脉冲星进行了56 min的搜寻模式观测,采用的终端配置为1024通道,观测时间分辨率为10.24  $\mu$ s.

射电望远镜观测灵敏度计算公式如下<sup>[13–14]</sup>:

$$S_{\min} = \frac{2(R_{\text{SN}})\beta\kappa(T_{\text{rec}} + T_{\text{sky}})}{\eta A \sqrt{n_p} \tau \Delta f}, \quad (1)$$

其中,  $R_{\text{SN}}$ 是最低探测信噪比;  $\beta$ 是量化损失因子;  $\kappa$ 为玻尔兹曼常数;  $T_{\text{rec}}$ 是接收机噪声温度,  $T_{\text{sky}}$ 是天空背景温度;  $\eta$ 是天线效率;  $A$ 是天线面积;  $n_p$ 是天线极化数,  $\tau$ 是采样间隔;  $\Delta f$ 是观测时采用的有效带宽. 吴平观测站L波段观测系统对应的各个参数值分别为:  $\beta \approx 1$  (8位采样量化),  $T_{\text{rec}} + T_{\text{sky}} \approx 100$  K,  $\eta \approx 70\%$ ,  $A = 1256.0$  m<sup>2</sup>,  $n_p$ 为1, 利用512 bins对Vela脉冲星原始文本数据重采样,其对应的采样时间为0.174 ms.  $\Delta f = 650$  MHz, 通过上式可知,  $R_{\text{SN}} = 5$ 时, 吴平40 m望远镜系统最小可探测的脉冲星流量为5.9 Jy; 本次探测到的单脉冲信噪比平均值为32.4, 本文中的强单脉冲定义为大于5倍单脉冲S/N平均值的单脉冲, 即信噪比S/N = 162的单脉冲. 由(1)式可以计算出, 强单脉冲对应最小流量值约为193.1 Jy.

图1是Vela观测数据中2 s观测时长的单脉冲观测数据, 包括23个完整的脉冲周期, 横坐标是时间(Time, 单位为s), 纵坐标是单脉冲流量(为任意单位a.u.), 从图中可以看出, 本次观测受无线电干扰影响较小, 信号质量很高, 适合用于脉冲星观测

研究.

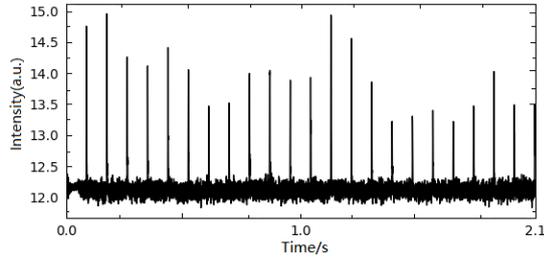


图1 在1400 MHz上观测Vela脉冲星获得的2 s单脉冲记录

Fig. 1 Single pulse record of 2 s obtained by observing Vela pulsar at 1400 MHz

### 3 数据处理

脉冲星辐射的信号极其微弱, 需要增大观测带宽来提高观测系统灵敏度. 但脉冲星信号在星际空间传播过程中, 受到星际介质色散的影响, 造成接收到的高频信号先于低频信号到达. 色散效应会使观测到的脉冲信号展宽, 甚至完全消失, 需要进行处理以消除色散对观测轮廓信号的影响.

对于两个中心频率分别是 $\nu_1$ 和 $\nu_2$ 的辐射的脉冲星信号, 高频信号 $\nu_1$ 会先到达地球, 低频信号 $\nu_2$ 后到达. 两者到达地球所需时间之差为:

$$\begin{aligned} \Delta t &= D \left( \frac{1}{\nu_2^2} - \frac{1}{\nu_1^2} \right) \text{DM} \\ &\approx 4.15 \times 10^6 \left( \frac{1}{\nu_2^2} - \frac{1}{\nu_1^2} \right) \text{DM}, \end{aligned} \quad (2)$$

表1 脉冲星J0835-4510主要参数

Table 1 Main parameters of pulsar J0835-4510

| Name                | RAJ (hh:mm:ss) | DECJ (dd:mm:ss) | P0/s           | DM/( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{pc}$ ) |
|---------------------|----------------|-----------------|----------------|---|
| B0833-45/J0835-4510 | 08:35:20.61149 | -45:10:34.8751  | 0.089328385024 | 67.9                                    |

为了提高数据的质量, 在后续数据处理中, 对所有数据统一去除观测频段的边带通道, 以统一消除边带干扰影响. 如图2为本次观测中的其中2个单脉冲信号, 左图为双峰结构单脉冲信号, 右图为强单脉冲信号, 上方图中黑色实线表示单脉冲轮廓, 黑色虚线表示Vela积分脉冲轮廓, 纵坐标是归一化后的流量强度, 横坐标是脉冲相位. 下方图是

其中 $\text{DM} = \int_0^d n_e dl$ , 称为脉冲星的色散量, 为脉冲星视线方向上电子密度沿路径的积分,  $n_e$ 为电子密度,  $d$ 为脉冲星距离,  $l$ 为微分变量.  $D$ 是色散常数, 其值为 $4.15 \times 10^3 \text{ MHz}^2 \cdot \text{pc}^{-1} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}$ . 在接收机频带宽度确定的情况下, 通道展宽与色散量的关系为<sup>[1]</sup>:

$$\Delta\tau = \frac{8.3 \times 10^3 B_i \text{DM}}{\nu^3}, \quad (3)$$

其中,  $\Delta\tau$ 是单通道色散时间延迟, 单位是s;  $B_i$ 是单通道频带宽度, 单位是MHz;  $\nu$ 是接收机中心频率, 单位是MHz. 吴平40 m采用的是数据化多通道消色散系统, 接收机中心频率为1400 MHz, 通道数为1024, 单通道的频带宽度是1 MHz, 单个子通道内的色散时间延迟为0.16 ms. 本次观测得到的Vela脉冲星积分脉冲轮廓 $W_{50}$  (half-maximum line width)为1.9 ms, 子通道内时延对积分脉冲轮廓影响不大.

利用吴平40 m天线2016—2017年近一年的Vela脉冲星计时观测数据, 拟合获得适用于本次Vela单脉冲观测数据处理的最佳星历表, 参数值见表1, 其中, RAJ是J2000坐标系下的赤经, DECJ是J2000坐标系下的赤纬, P0是脉冲星周期. 基于星历表利用DSPSR (Digital Signal Processing Software for Pulsar)<sup>[15]</sup>软件的单脉冲数据处理模式, 获得单脉冲数据文件. 另外为了提高信号的信噪比, 数据处理时, 周期相位采样点设置为512.

去除带宽边带通道数据和强频率通道干扰后, 未做消色散处理的脉冲星信号频谱图, 纵坐标是观测频率, 横坐标是脉冲相位. 从图中可以看到, 由于星际介质的影响, 高频信号先于低频信号到达. 左图中单脉冲为双峰结构, 其中一个脉冲峰值成分在积分脉冲轮廓峰值相位左侧, 处于辐射窗口的前沿区域; 另一个脉冲峰值成分在积分脉冲轮廓的峰

值相位附近. 右图单脉冲只有一个脉冲成分, 其峰值相位是 $282^\circ$ , 提前积分脉冲峰值相位 $0.5\text{ ms}$ 到达,  $W_{50}$ 是 $0.7\text{ ms}$ , 相比于积分脉冲轮廓该单脉冲宽度更窄, 大约是积分脉冲宽度的 $1/3$ . S/N是 $433.4$ , 为单脉冲S/N平均值的 $13.4$ 倍; 该单脉冲的峰值相位在脉冲星辐射窗口范围内, 说明它是从视线扫过的辐射区域发出的. 这两个单脉冲可能来自脉冲星的不同辐射区域.

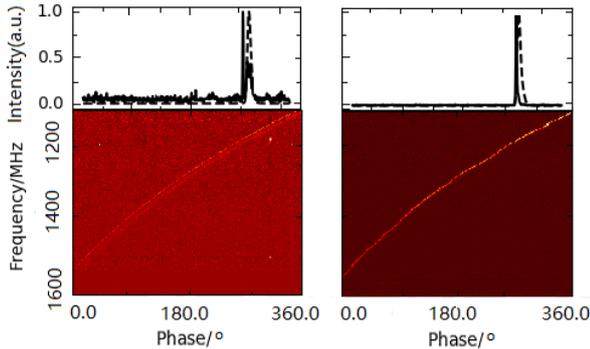


图 2 两个单脉冲的脉冲轮廓与频谱. 上图是脉冲轮廓, 其中黑色虚线轮廓表示本次观测所得的Vela积分脉冲轮廓, 黑色实线表示本次观测获得的2个单脉冲信号; 下图是两个单脉冲的频谱.

Fig. 2 The pulse profiles and spectra of the two single pulses. Upper panels are the pulse profiles, where the dotted line profile represents the Vela integral pulse profile obtained by this observation, and the solid line represents the two single pulse signals obtained by this observation; lower panels are the spectra of the two single pulses.

## 4 结果和分析

为研究Vela脉冲星的单脉冲辐射特性, 利用本次观测获得的单脉冲数据对单脉冲信号进行辐射强度、脉冲半宽特性、辐射能量分布以及强单脉冲和双峰结构单脉冲等方面开展研究.

### 4.1 单脉冲统计分析

单脉冲信噪比能够间接反映观测数据的质量与脉冲信号的辐射强度. 本文利用信噪比来分析Vela脉冲星单脉冲辐射特性, 数据处理时采用单脉冲的主脉冲峰值流量密度来定义单脉冲的S/N. 具体计算方法为:

$$S/N = (\max_{\text{on-pulse}} - \text{mean}_{\text{off-pulse}}) / \sigma_{\text{off-pulse}},$$

其中 $\max_{\text{on-pulse}}$ 表示脉冲星信号的主脉冲峰值流量最大值,  $\text{mean}_{\text{off-pulse}}$ 表示噪声区域的平均值,  $\sigma_{\text{off-pulse}}$ 表示噪声的标准差. 通过对观测数据处理获得的单脉冲信噪比在 $6.8\text{--}495$ 之间, 平均值为 $32.4$ . Vela脉冲星不同辐射区单脉冲的爆发特性, 与单脉冲的爆发相位和爆发强度有关, 采用单脉冲主脉冲峰值相位作为统计脉冲爆发的参考点. 图3为本次探测的单脉冲S/N-相位分布情况, 图(I)中竖直虚线表示Vela积分脉冲轮廓的峰值相位点 $284^\circ$ , 两条水平虚线分别表示5倍和10倍单脉冲S/N平均值分割线, 从图中可以看出S/N大于5倍平均值的单脉冲信号, 其峰值相位全部分布在积分轮廓峰值相位的左侧. Palfreyman等<sup>[8]</sup>提出Vela脉冲星的积分脉冲轮廓有4个成分组成: a区是亮脉冲辐射区(bright pulse emission zone); b区是主脉冲区(large main peak); c区是平缓的拐点区(gentle point of inflection); d区是尾随区(“ledge” to the right), 如图3中的图(II)所示.

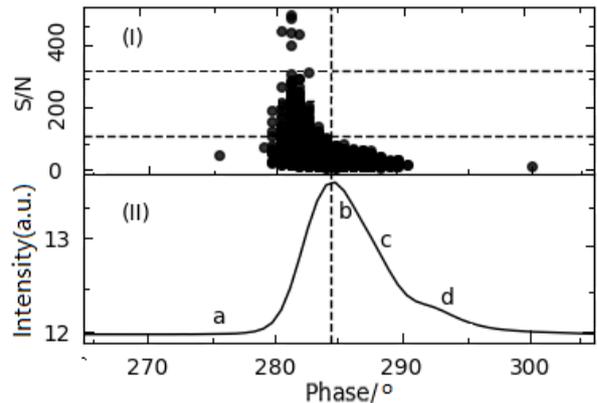


图 3 单脉冲S/N-相位分布情况(图(I))和Vela积分脉冲轮廓图(图(II)). 图中竖直虚线表示积分脉冲轮廓的峰值相位点 $286^\circ$ , 水平虚线表示5倍的单脉冲S/N平均值分割线和10倍的积分脉冲S/N值分割线.

Fig. 3 S/N-phase distribution of single pulse (panel I) and the Vela integral pulse profile (panel II). In the figure, the vertical dotted line represents the peak phase point of the integral pulse profile at  $286$  degrees, and the horizontal dashed lines represent the 5 times single pulse S/N divider and the 10 times integral pulse S/N divider.

本次观测探测到的所有单脉冲均在脉冲星辐射窗口的4个区域内, 其中在a区域探测到1个单脉

冲信号, 脉冲爆发率为1次/56 min. Chen等<sup>[11]</sup>在6800 MHz观测频率下4 h探测到的9个, 爆发率为1次/26.6 min, 大于本次观测a区爆发率. 本次探测到的这个单脉冲的峰值相位是275°, 信噪比是47.4. 提前积分脉冲轮廓峰值相位到达时间最大为2.3 ms, 这与Johnston等<sup>[16]</sup>在1413 MHz频率下得到的Vela脉冲的单脉冲最早提前积分脉冲轮廓峰值相位2.2 ms接近. 在d区域探测一个峰值相位延迟于积分轮廓峰值相位3.6 ms的单脉冲信号, 该单脉冲是一个双峰结构单脉冲, 本文中双峰结构单脉冲爆发相位采用信噪比较高的脉冲峰值相位作为参考. 该双峰结构单脉冲信号相位靠后的脉冲峰值信噪比略高( $S/N \sim 9$ ), 因此统计图中, 该点的相位分布略靠后. 约58%的单脉冲相位分布在a区域内和b区域的前沿, 这部分单脉冲峰值相位到达时间比积分脉冲峰值相位到达时间提前. 约97%的单脉冲分布在b区域内, 表明本次探测到的绝大部分单脉冲的峰值相位分布在积分脉冲轮廓的主脉冲区域内.

脉冲星辐射的单脉冲半宽能够反映其辐射点的大小, 通过对单脉冲信号半宽的研究, 可进一步了解脉冲星的辐射特性, 本文中采用脉冲 $W_{50}$ 来分析Vela脉冲星的单脉冲半宽特性, 利用单脉冲的峰值流量密度与噪声均值作为计算 $W_{50}$ 的基准参考点. 其中, 峰值流量密度与噪声均值采用的值与计算单脉冲 $S/N$ 时的值一致. 通过分析得到本次观测的全部单脉冲 $W_{50}$ 值的范围为0.52–3.3 ms, 平均值为1.5 ms, Vela积分脉冲轮廓的 $W_{50}$ 是1.9 ms, 单脉冲 $W_{50}$ 的平均值比积分脉冲轮廓的 $W_{50}$ 略窄. 比Johnston等<sup>[16]</sup>在1.4 GHz观测频率得到的1.4 ms略宽, 比Chen等<sup>[11]</sup>在6800 MHz观测频率得到的2.62 ms略窄. 图4给出了本次观测中探测到的单脉冲 $W_{50}$ 分布情况, 图中虚线表示积分脉冲轮廓的 $W_{50}$ 值. 可以看出大部分(约91%)单脉冲的宽度比积分脉冲轮廓的宽度窄. 在虚线右侧, 随着脉冲宽度的增加单脉冲辐射数量迅速减少. 这部分单脉冲 $W_{50}$ 分布在1.9–3.3 ms之间,  $W_{50}$ 分布的中位数是1.93 ms; 峰值辐射相位分布处于辐射区域的b、c、d区域之间.

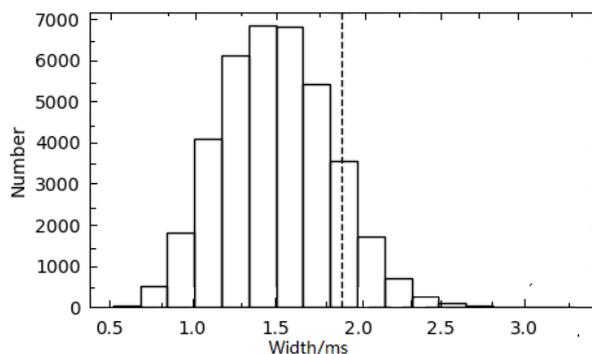


图4 38040个单脉冲 $W_{50}$ 分布情况, 其中虚线表示平均脉冲轮廓的 $W_{50}$ 值.

Fig. 4 The distribution of  $W_{50}$  of 38040 pulses, where the dotted line represents the  $W_{50}$  of the average pulse profile

利用单脉冲辐射区域的积分面积表示单脉冲的相对辐射能量(为任意单位a.u.), 其分布范围为4.8–132. 利用单脉冲的能量平均值( $\langle E \rangle$ )归一化每一个单脉冲的能量( $E$ ). 使用对数正态曲线(Lognormal)拟合了单脉冲的能量累积分布, 对数正态分布方程为:

$$P(E) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2 E}} \exp \left[ -\frac{(\lg E - \mu)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (4)$$

其中的 $E$ 是单脉冲的能量,  $A$ 、 $\mu$ 和 $\sigma$ 分别是对数正态分布的幅度值、均值和方差. 图5是38040个单脉冲能量累积统计分布图. 目前研究表明, 普通脉冲星单脉冲能量累积分布符合对数正态分布, 一些脉冲星辐射的巨脉冲信号能量累积服从幂律分布. 图中实线为Vela单脉冲能量累积分布拟合曲线, 拟合参数值为 $\mu = -0.02$ ,  $\sigma = 0.28$ , 拟合曲线与拟合参数值的对数正态分布曲线的JS散度(Jensen-Shannon divergence)为0.06. 从图5上看拟合曲线与辐射能量累积分布符合较好, 但是利用Kolmogorov-Smirnov test (KS)检验无法通过, 可能由于本文采用的单脉冲数据样本相对较少, 另外, 由于Vela脉冲星爆发较多强脉冲, 导致其能量累积分布与用于统计普通脉冲星单脉冲能量累积分布的对数正态分布有一些偏离. 虚线指示了归一化后的平均脉冲轮廓的能量值. 本次探测中超过46%的单脉冲能量大于平均脉冲轮廓能量, 超过9.5%的单脉冲能量大于2倍的单脉冲能量平均

值, 探测到5个能量大于5倍单脉冲能量平均值的单脉冲, 没有探测到能量大于10倍单脉冲能量平均值的单脉冲. 本次观测到的单脉冲能量大部分小于2倍平均脉冲轮廓能量, 没有发现与Crab脉冲星相似的巨脉冲现象. 探测到的单脉冲信噪比的最小值是6.8, 单脉冲的能量最小值是4.8, 没有在本此观测中发现Vela脉冲星的消零单脉冲现象.

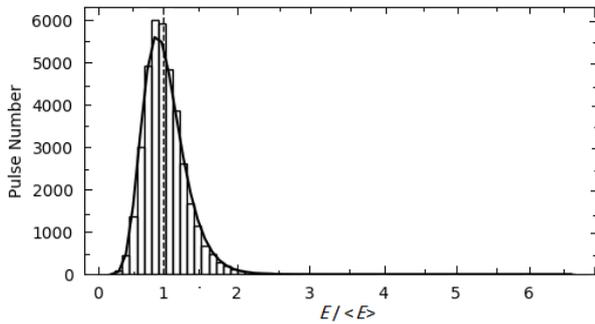


图5 单脉冲能量分布图. 用积分脉冲轮廓能量对单脉冲能量进行了归一化. 实线是拟合脉冲星能量直方图的对数正态曲线, 虚线指示了归一化的平均脉冲轮廓能量值.

Fig. 5 The distribution of the energy of single pulses. The single pulse energy is normalized by integral pulse energy. The solid line is a lognormal curve fitting the pulsar energy histogram. The dotted line indicates the normalized energy value of average pulse profiles.

## 4.2 单个强脉冲分析

通常将脉冲星辐射的单脉冲信号强度大于5倍单脉冲平均辐射流量的信号称为强脉冲. 从本次观测数据中, 共探测到69个S/N大于单脉冲平均S/N (32.4) 5倍的强脉冲信号, 强脉冲的爆发率为1.8%. 其中, 大于10倍平均S/N的强脉冲共6个, 爆发率为0.016%. 其中, 最强的单脉冲S/N为495, 大约为单脉冲S/N平均值的15.3倍. 这些强脉冲星的脉冲半宽较窄, 其 $W_{50}$ 在0.52–1.04 ms之间. 相位分布在279.8°–282.7°之间. 为了探究强脉冲辐射与脉冲星辐射窗口的关系, 图6展示了本次观测得到的69个强单脉冲的S/N-相位分布, 与积分脉冲轮廓的关系图. 可以看出强脉冲的峰值相位分布在积分脉冲轮廓的上升沿附近, 即积分脉冲轮廓的b区域内, 其中最早到达的强单脉冲提前积分脉冲轮廓峰值相位1.5 ms. 本次观测没有在积分脉冲轮廓

的a区域内探测到强脉冲信号. 正如本文第2节中指出的, 在脉冲辐射前沿区域探测到了1个单脉冲, 但它的S/N小于2倍的单脉冲S/N平均值, 并不满足本文的强脉冲定义.

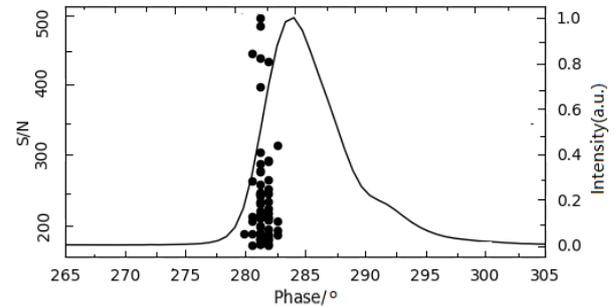


图6 S/N-相位分布(点)与Vela积分脉冲轮廓辐射范围的关系图. 实线表示Vela积分脉冲轮廓. 横坐标表示脉冲星相位, 左侧纵坐标表示单脉冲信噪比, 右侧纵坐标表示脉冲星流量强度, 单位为1.

Fig. 6 S/N-phase distribution (points) in relation to the radiation range of Vela integral pulse profile. The solid line represents the Vela integral pulse profile. The abscissa represents pulsar phase, the left ordinate represents single pulse signal-noise ratio, and the right ordinate represents pulsar flux intensity, in units of 1.

Palfreyman等人于2016年研究发现<sup>[8]</sup>Vela脉冲星积分脉冲轮廓形状会随着时间缓慢变化, 并且在微自转突变(“microglitch”)之后这种变化会出现不连续性. Palfreyman等<sup>[17]</sup>指出脉冲星辐射的亮脉冲总是在积分脉冲轮廓的前沿, 并且影响积分脉冲轮廓的 $W_{10}$  (峰值流量点1/10处的轮廓宽度)和 $W_{50}$ 值. 本文将全部强脉冲折叠获得的脉冲轮廓与Vela积分脉冲轮廓进行比较, 研究强脉冲信号对积分脉冲轮廓的影响. 如图7所示, 虚线是本次观测探测到的69个强单个脉冲折叠轮廓, 实线是Vela积分脉冲轮廓. 从图中可以看出, 强单脉冲的折叠脉冲轮廓的c和d成分不太明显, 强单脉冲对积分脉冲轮廓的c、d成分是否有贡献, 需要更多的观测数据验证. 强单脉冲折叠脉冲轮廓的峰值相位提前积分脉冲轮廓峰值相位约0.9 ms. 强单脉冲积分脉冲轮廓的 $W_{50}$ 为0.87 ms, 约占积分脉冲轮廓 $W_{50}$  (1.9 ms)的45.8%, 说明强脉冲的爆发区域较小, 从图6可得到相同结论. 强单脉冲平均脉冲轮廓的S/N是213.3, 为单脉冲平均S/N的6.2倍. 强脉冲会在脉冲

相位流量强度和脉冲宽度上对积分脉冲轮廓产生一定的影响,尤其是积分轮廓上升沿区域.

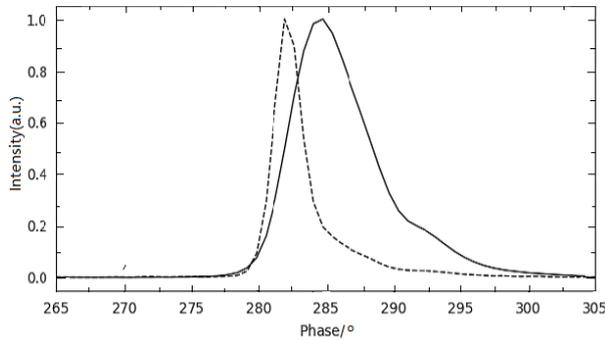


图7 强脉冲折叠轮廓与Vela积分脉冲轮廓比较,其中,虚线为强脉冲折叠轮廓,实线为Vela积分脉冲轮廓.

Fig.7 Comparison between the strong pulse superposition profile and the Vela integral pulse profile, where the dashed line is the strong pulse superposition profile and the solid line is the Vela integral pulse profile.

### 4.3 双成分单脉冲分析

脉冲星辐射的单脉冲信号强度、形状等特性随时间变化很大,在观测系统具有高灵敏度和高时间分辨率时,观测到的单脉冲信号会显示出精细的微结构成分.有助于进一步理解脉冲星的辐射机制. Vela脉冲星通常辐射的单脉冲信号单一,为单峰结构,导致其积分脉冲轮廓单一,随着望远镜观测系统时间分辨率的提高,Johnston等<sup>[5]</sup>首次在1413 MHz频段下探测到Vela单脉冲的微结构轮廓.本次观测数据中探测到Vela部分单脉冲具有双峰结构,文中将双峰脉冲中脉冲爆发相位靠前的脉冲定义为主峰,相位靠后的脉冲定义为次峰,本文双峰单脉冲信号具体搜寻方法如下:

- (1)根据积分脉冲轮廓找到单脉冲的主脉冲窗口;
- (2)用多项式拟合单脉冲的主脉冲窗口;
- (3)对次峰脉冲的S/N、 $W_{50}$ 以及主峰和次峰脉冲的相位间隔设置一定的阈值.

通过对观测到全部单脉冲信号统计分析得知,本次双峰搜寻时的相关参数设置为:多项式阶数为14,次峰脉冲的S/N阈值为11, $W_{50}$ 阈值为10个相位点,主次脉冲峰值成分间隔最少为15个相位点时,筛选出的单脉冲具有明显的双峰结构.

在观测数据中共检测出23个具有明显双峰结构的单脉冲,双峰单脉冲爆发率较低为0.7%.为了确保是真实的双峰单脉冲信号,对23个双峰单脉冲数据的频率通道进行进一步消干扰处理,以提高脉冲信号的信噪比.图8给出了23个双峰单脉冲轮廓图,图中虚线指示了积分脉冲轮廓的峰值相位.从图中可以看出,主峰峰值相位在 $274^{\circ}$ – $287^{\circ}$ 之间,次峰峰值相位在 $286^{\circ}$ – $301^{\circ}$ 之间.从图8看出,双峰单脉冲分为两类:(1)主峰脉冲峰值相位在积分脉冲轮廓峰值相位附近,共22个信号,脉冲编号分别为1–14、16–23.其特点是主峰信号脉冲半宽较宽,次峰辐射强度变化明显,其中14号双峰结构单脉冲、次峰脉冲信噪比略高于主峰脉冲,该信号为图3给出的单脉冲爆发相位统计图中最右边的点;(2)次峰脉冲峰值相位在积分脉冲轮廓峰值相位附近,共1个信号,脉冲编号为15.其特点是单脉冲的主峰脉冲信号半宽窄,主峰脉冲相位在 $278^{\circ}$ 附近.

将本次观测中探测到的所有双峰单脉冲按照周期折叠并将辐射强度归一化获得双峰单脉冲折叠脉冲轮廓,与Vela积分脉冲轮廓进行比较,进而研究双峰信号对积分脉冲轮廓的影响.结果如图9所示,虚线表示Vela积分脉冲轮廓,实线表示全部双峰结构单脉冲折叠的积分脉冲轮廓,从图中可以看出,两者的峰值相位大致相同.从图8得知双峰单脉冲有一个峰与积分脉冲轮廓峰值相位接近,且22个单脉冲主峰脉冲的峰值相位在积分轮廓峰值相位附近,因此对积分轮廓形状的前沿附近贡献较大.双峰单脉冲折叠脉冲轮廓有3个成分,另两个分别位于主峰脉冲的前后,这是由于上面提到的双峰单脉冲的两种脉冲轮廓结构,导致折叠脉冲轮廓有3个峰值成分.前一个峰值成分出现在积分脉冲轮廓的a区域,主要由第2类双峰单脉冲的主峰脉冲贡献.后一个峰值成分出现在积分脉冲轮廓的d区域.该成分主要由第1类双峰单脉冲信号的次峰脉冲产生.从图9中的看出,与两个峰值成分相对应的积分脉冲轮廓相位处的辐射较弱,间接证明双峰单脉冲的爆发率较低.双峰单脉冲的折叠轮廓对积分轮廓的两个边缘有影响;强脉冲折叠轮廓对积分轮廓的上升沿有影响. Vela脉冲星的双峰单脉冲是偶尔爆发还是经常爆发以及对积分脉冲轮廓相位辐射区的影响还需要更多的观测数据验证.

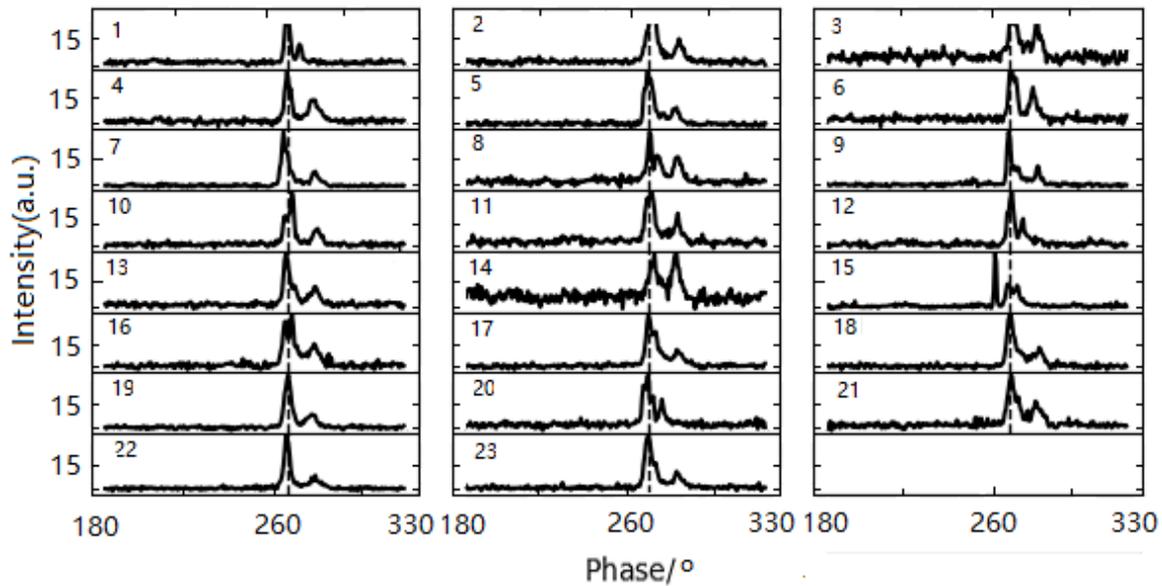


图 8 Vela的23个双峰单脉冲轮廓图. 其中虚线表示Vela积分脉冲轮廓峰值相位.

Fig. 8 The profiles of 23 two-component single pulses of Vela. The dashed line represents the peak phase of the Vela integral pulse profile.

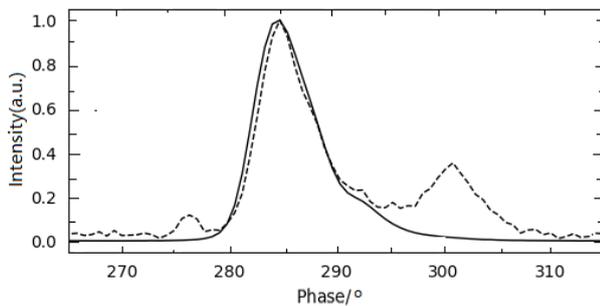


图 9 Vela双峰单脉冲折叠轮廓与积分脉冲轮廓的比较

Fig. 9 Comparison between the double peak single pulse folded profile and the integral pulse profile of Vela

## 5 结论

利用吴平40 m天线对Vela脉冲星的56 min单脉冲观测数据开展了单脉冲辐射特性研究. 观测数据探测到了Vela爆发的全部单脉冲信号, 共计38040个. 探测到的信号最低信噪比为6.8. 对这些单脉冲的 $W_{50}$ 、S/N和能量的累积分布等进行了详细分析. 从根据分析结果得知, 大多数单脉冲的宽度比积分脉冲轮廓窄. 单脉冲能量累积分布拟合曲线与拟合参数值对数正态分布曲线的JS散度

为0.06. 另外, 在Vela脉冲星的亮脉冲辐射区域探测到1个单脉冲信号, 它的S/N不满足本文对强脉冲的定义, 我们认为普通单脉冲也可能提前主脉冲到达. 本次共探测到了69个S/N大于5倍单脉冲S/N平均值的强单脉冲信号, 最强的单脉冲S/N是单脉冲S/N平均值的14.5倍. 本次探测到的强脉冲爆发率为1.8%, 它们均爆发在Vela积分脉冲轮廓的b成分区域内, 没有在a成分区域中探测到强脉冲.

通过比较Vela标准积分脉冲轮廓和强脉冲的折叠脉冲轮廓研究发现单个强脉冲数量的变化可能会引起积分脉冲轮廓宽度、相位以及辐射流量强度的变化. 但是积分脉冲轮廓和强脉冲的积分脉冲轮廓的组成成分是否相同还需要更多的观测数据来验证. 本次观测数据共探测到23个双峰结构单脉冲, 根据轮廓结构及主峰爆发相位可分为两种类型, 一类主峰爆发相位处于积分脉冲轮廓峰值附近, 另一类次峰爆发相位处于积分脉冲轮廓峰值附近. 通过比较双峰单脉冲折叠轮廓与Vela标准积分脉冲轮廓发现, 双峰折叠轮廓有3个成分, 左边成分主要由第2类双峰单脉冲的主峰脉冲信号产生, 对应积分脉冲轮廓a辐射区, 右边脉冲成分主要由第1类

双峰单脉冲的次峰脉冲信号产生, 对应积分脉冲轮廓d辐射区, 主脉冲成分在积分轮廓峰值相位附近. 根据两边成分对应的积分轮廓相位处的辐射强度, 可推断双峰单脉冲的爆发率较低. Palfreyman等人于2016年研究发现Glitch发生后Vela脉冲星的亮脉冲爆发率会增加, 进而影响积分脉冲轮廓形状<sup>[8]</sup>. Glitch发生时是否会引起双成分单脉冲数量的增加, 进而影响积分脉冲轮廓, 需要更多的观测数据分析研究.

### 参考文献

- [1] 吴鑫基, 张晋, 王娜. 天文学进展, 1999, 17: 236
- [2] Roberts N, Lorimer D R, Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 8-14
- [3] Staelin D H, Reifenstein III E C. Science, 1968, 162: 1481
- [4] Cognard I, Shrauner J A, Taylor J H, et al. ApJ, 1996, 457: L81
- [5] Johnston S, van Straten W, Kramer M, et al. ApJ, 2001, 549: L101
- [6] Dodson R, Legge D, Reynolds J E, et al. ApJ, 2003, 596: 1137
- [7] Wang J B, Wang N, Tong H, et al. Ap&SS, 2012, 340: 307
- [8] Palfreyman J L, Dickey J M, Ellingsen S P, et al. ApJ, 2016, 820: 64
- [9] Krishnamohan S, Downs G S. ApJ, 1983, 265: 372
- [10] Feng Y, Hobbs G, Li D, et al. ApJ, 2021, 908: 105
- [11] Chen J L, Wen Z G, Hao L F, et al. ApJ, 2020, 899: 118
- [12] Luo J T, Gao Y P, Yang T G, et al. RAA, 2020, 20: 111
- [13] 海里且·尼左木丁, 艾力·伊沙木丁, 刘志勇, 等. 天文学报, 2010, 51: 253
- [14] Nizamdin B, Esamdin A, Liu Z Y, et al. ChA&A, 2011, 35: 37
- [15] van Straten W, Bailes M. PASA, 2011, 28: 1
- [16] Johnston S, Kerr M. MNRAS, 2018, 474: 4629
- [17] Palfreyman J L, Hotan A W, Dickey J M, et al. ApJ, 2011, 735: L17

## An Observational Study of Single Pulse of PSR J0835-4510

YAN Shi-zhao<sup>1,2</sup> ZHAO Cheng-shi<sup>1,2,3</sup> LI Yi-feng<sup>1</sup> WANG Xing-chuan<sup>1,2</sup> LUO Jin-tao<sup>1,2,4</sup>

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

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

(3 Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

(4 Key Laboratory of Precision Navigation & Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

**ABSTRACT** Vela pulsar (PSR J0835-4510) was observed in L-band with the 40-meter radio telescope at the Haoping Observatory of National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences. 38040 single pulses were detected in 56 minutes. The half-maximum line width ( $W_{50}$ ) of these single pulses ranges from 0.52 to 3.3 ms, with an average value of 1.5 ms. This is smaller than that of the integral profile, which is 1.9 ms. The signal-noise ratio (S/N) of single pulses ranges from 6.8 to 495, with an average S/N value of 32.4. About 58% of the peak of single pulses arrived earlier than the peak of integral pulse profile, the earliest was 2.3 ms earlier. Lognormal distribution fits the radiation energy of single pulses with average  $\mu = -0.02$  and standard deviation  $\sigma = 0.28$ . One normal single pulse was detected in the leading edge of the pulsar radiation window, with the S/N values of 47.4. There are 69 single pulses with S/N larger than 5 times the detected average S/N value of single pulses. These strong pulses are relatively narrow, and their  $W_{50}$  ranges from 0.52 to 1.04 ms. These pulses are located near the rising edge of the average pulse profile. There are 23 single pulses detected with bimodal structure. The primary and secondary peaks are located in different radiation regions. It is found that the influences of strong single pulses and double peak single pulses on average pulse profile are different by studying the integral pulse profile of different types of single pulses.

**Key words** pulsars: individual: J0835-4510, pulsars: single pulse, methods: data analysis