

doi:

PSR J1115+5030单脉冲的研究*

徐艺琳¹ 曹顺顺² 翁山杉^{1†} 潘之辰^{3‡}

(1 南京师范大学物理科学与技术学院 南京 210023)

(2 北京大学物理学院天文学系 北京 100871)

(3 中国科学院国家天文台 北京 100101)

摘要 本文利用FAST的观测数据研究了脉冲星PSR J1115+5030的单脉冲行为, 包括单脉冲的偏振轮廓和频谱特征等。研究发现该脉冲星的单脉冲偏振特性显著偏离旋转矢量模型(RVM), 且线偏振和圆偏振随相位的变化具有频率依赖, 很可能反映了磁层中正交偏振模式的相干叠加过程。此外, 研究了PSR J1115+5030单脉冲的相位分离谱, 显示高低频比值可能分布于两个不连续的区域。这些研究结果对于揭示脉冲星磁层中粒子的辐射及其传播过程有重要意义。

关键词 脉冲星, 非热辐射, 偏振计, 等离子体物理

中图分类号: P1-4; **文献标识码:** A

1 引言

脉冲星的发现已逾半个世纪^[1], 至今尚未阐明其磁层中粒子加速和辐射的物理过程^[2]。一般认为, 单极感应效应在旋转磁化脉冲星的开放磁力线区内诱导出磁场方向的电场($E_{||}$)。一方面, 受 $E_{||}$ 加速的电子/正电子通过曲率辐射或逆Compton散射等机制辐射高能光子; 另一方面, 高能光子(比如通过 $\gamma - B$ 过程)又被转化为正负电子对。这一雪崩过程导致开放磁力线区充斥着正负电子对等离子体, 并在沿磁力线运动离开脉冲星的过程中产生相干射电辐射。然而, 如何基于这一基本图像来理解丰富的脉冲星辐射行为依然存在着众多挑战。

目前存在两条主要途径来理解脉冲星产生相干射电辐射的物理过程。其一, 依赖磁层动力学过程模拟^[3], 涉及若干边界条件和参数空间的选择。其二, 通过精细观测射电脉冲星的辐射行为, 与理论推测对比, 从而反演磁层动力学。前者需要算力支持, 后者依靠大型射电望远镜。我国已建成的世界最大单口径射电望远镜FAST(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope^[4])为观测研究脉冲星磁层粒子加速和辐射提供了难得的时代机遇^[5--6]。以了解脉冲星磁层中的辐射过程为目的, 本

XXXX-XX-XX收到原稿, XXXX-XX-XX收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12473041)、科技部SKA专项项目(2020SKA0120100)资助

[†]wengss@njnu.edu.cn

[‡]panzc@bao.ac.cn

文通过分析脉冲星PSR J1115+5030的FAST观测数据,研究其单脉冲的偏振结构和能谱特征。

PSR J1115+5030 (PSR B1112+50) 是一颗周期约一秒的普通孤立脉冲星。在该脉冲星发现的初期^[7],研究者就发现其具有显著的消零 (nulling) 现象,消零比率为 $60 \pm 5\%$ ^[8]。1986年, Wright等人在1412 MHz的频率对这颗脉冲星的单脉冲进行分析^[9],发现它的非消零态存在三种不同的辐射模式,其中一个模式的单脉冲序列存在 $P_3 \approx 6P_1$ 的子脉冲漂移现象。Wright等人的工作将PSR J1115+5030标记为具有显著单脉冲调制现象的脉冲星,吸引了不少学者在不同的频段开展对这颗星单脉冲的后续研究,如Ershov和Kuzmin观测到了PSR J1115+5030的巨脉冲^[10]。此外, Karuppusamy等人在110到180 MHz的频段对PSR J1115+5030做了单脉冲分析^[11],测量了它在低频段的能谱、单脉冲的能量分布和波动特性,并且确认这颗星的色散量 (DM) 存在随时间的演化。

本文重点关注脉冲星PSR J1115+5030的单脉冲偏振行为和频谱特征。鉴于单脉冲拥有精细的结构且易受干扰影响,我们利用FAST观测研究该星单脉冲的强度、偏振行为与频谱,以揭示辐射区域的粒子运动变化、理解脉冲星磁层中粒子加速和辐射的物理过程。论文第2节介绍数据的获取,并阐述单脉冲的偏振、频谱等观测结果,给出单脉冲偏振位置角快速旋转的频率依赖行为以及单脉冲频谱随脉冲相位的变化特征。第3节讨论以上观测结果和发现在脉冲星磁层和辐射研究中的意义,并作简要总结。

2 观测数据分析及结果

本文使用的观测数据来自于FAST的公开数据,获取于2021年11月29日,观测开始于国际时21点29分,观测时长1小时。观测数据采样时间是 $49.152 \mu\text{s}$,数据覆盖1.0至1.5 GHz频率,通道数是4096,观测记录四路偏振。观测开始前,我们进行90秒定标观测。我们注入占空比50%,周期2秒,强度10K的白噪声信号用于观测系统的偏振校准。随后关闭噪声管并将望远镜指向脉冲星。观测使用FAST的19波束L波段接收机,使用中心波束对准脉冲星,仅记录中心波束数据。观测结束后,观测数据存储于FAST数据中心供使用。观测数据记录于559个文件中,每个文件大小约2.2 G。脉冲星PSR J1115+5030的信息来自于psrcat^[12],周期 $P = 1.65643 \text{ s}$,周期导数 $\dot{P} = 2.49 \times 10^{-15} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[13],色散为 $DM = 9.1863 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{pc}$ ^[14]。

观测的前约2分钟望远镜未指向脉冲星,我们用来获取脉冲星单脉冲的数据排除了这些观测时段对应的数据文件。我们使用DSPSR (Digital Signal Processing Software for Pulsar)^[15]折叠观测数据。为了获得足够高的时间分辨率,脉冲星每个周期分为4096个点,每个点对应约0.4 ms时间;通道数保持不变。再使用PSRCHIVE^[16]中的pazi (Pulsar Archive Zapper Interface) 在频域上手工消除显著的干扰,并用paz (Pulsar Archive Zapper) 使全部文件拥有同样的通道消除,共消除了1313个通道。在偏振定标中,我们使用同样的操作处理了噪声管开启时间段的观测数据文件,再利用pac (Pulsar Archive Calibration) 完成偏振定标。使用psradd将折叠后的文件合并,得到平均脉冲轮廓,并压缩通道后作为标准脉冲轮廓使用。通过rmfit计算法拉第旋转量 (Rotation Measure, RM),得到脉冲星PSR J1115+5030的相应数值为 3.51 ± 2.07

$\text{rad}\cdot\text{m}^{-2}$, O'Sullivan等人于2023年使用LOFAR观测数据得到的RM值为 $2.633 \pm 0.051 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$, 在此次计算误差范围内^[17]。

再用*pam* (Pulsar Archive Manipulator) 将计算得到的RM数值用于消旋。最后, 计算每个脉冲周期0至228.5度的无脉冲信号部分数值的均值, 用来作为本底减去单脉冲信号的基线; 使用同一数据段标准差作为噪声, 用来估算单脉冲信噪比。根据脉冲平均轮廓, 取有脉冲信号区域(228.5至246.1度)中的最大值作为信号, 计算每个单脉冲的信噪比并将大于7倍信噪比且宽度大于0.5度(约2.4 ms)的单脉冲挑选出来。观测时间段共筛选出767个非消零单脉冲, 得到的单脉冲瀑布图展示于图1; 消零比约64%, 与先前观测结论一致^[8]。本次有效观测时长约58分钟, 我们将约占64%消零单脉冲(约37分钟观测时间)进行周期叠加, 未发现显著的脉冲星信号。这使得我们怀疑: 该星在消零阶段可能根本就不发射相干射电信号。从图1中还可以看到存在巨脉冲, 以及单脉冲轮廓的剧烈变化。此外, 对比图1中和前两列和后两列中的单脉冲, 似乎PSR J1115+5030在单脉冲数约一千后变得活跃一些。在本节随后的两个小节中, 我们将分别深入研究PSR J1115+5030单脉冲的偏振和频谱这两个属性。

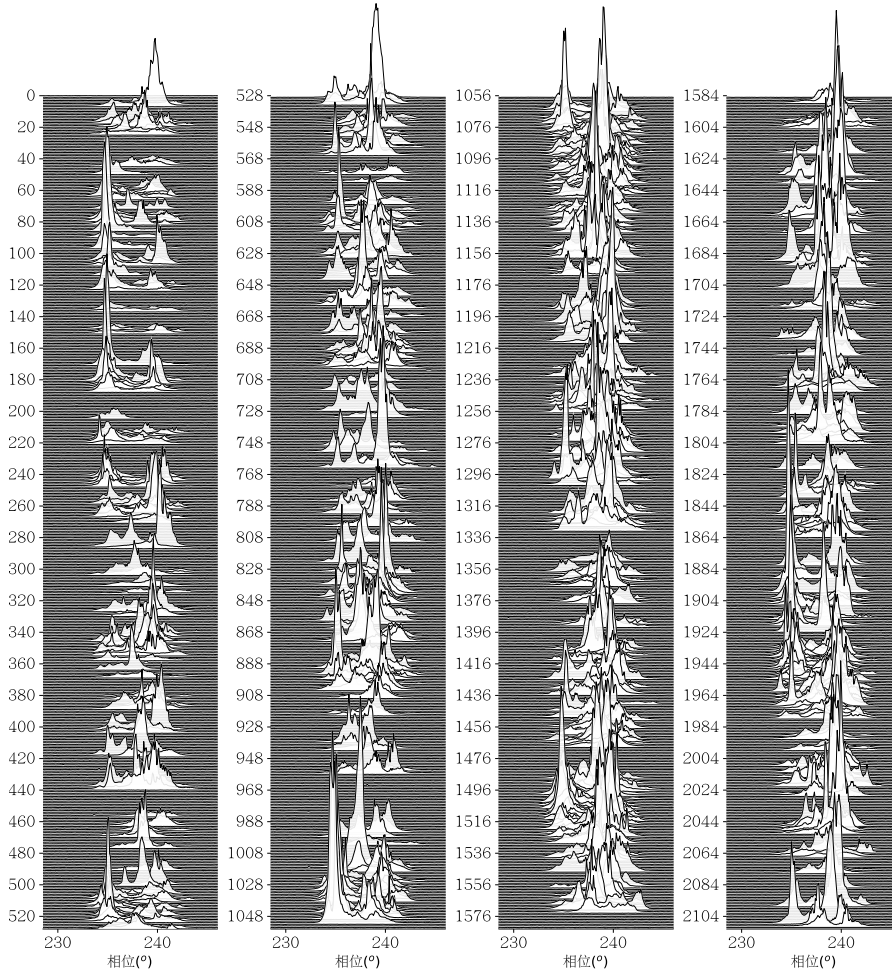


图 1: FAST本次观测脉冲星PSR J1115+5030的单脉冲瀑布图;横轴为相位,纵轴为单脉冲数对应的单脉冲强度。观测数据对应约两千个脉冲星自转周期,包含非消零单脉冲767个。

2.1 单脉冲的偏振辐射行为随相位的改变

人们往往基于旋转矢量模型^[18--20] (Rotating Vector Model, RVM) 利用偏振观测数据来刻画脉冲星磁层中辐射区的几何。考虑到偶极成分的磁场强度随距离递减最慢, RVM模型基于磁偶极磁场位型来描述辐射区。目前,绝大部分射电脉冲星的辐射模型认为射电辐射来源于开放磁力线区。假设强磁场中相对论粒子沿磁力线运动而辐射电磁波的线偏振方向位于(或垂直于)磁力线面,随着脉冲星旋转,观测接收到的线偏振位置角(Position Angle, PA)将会发生缓慢的“S”型曲线变化;在接近磁轴时,PA随脉冲相位变化最显著。在望远镜灵敏度较低的情况下,人们往往通过拟合积分轮廓的PA的“S”型曲线得到脉冲星的磁倾角 α 和碰撞角 β (或视线角 $\zeta = \alpha + \beta$)。一部分年轻脉冲星的偏振特性符合RVM预测,例如具有高线偏振度的Vela脉冲星与PSR

B0525+21等^[18--19], 其PA可以很好地在RVM框架内拟合。研究表明, 高自转能损的脉冲星积分轮廓相对简单, 且线偏振度较高、倾向于能用RVM拟合PA^[21]。

然而, 高灵敏的大型望远镜的观测使得单脉冲的偏振测量研究成为可能。一些低线偏振度脉冲星的积分轮廓的PA往往很难通过RVM拟合, 且单脉冲的PA也与RVM不一致。例如, Cao等人^[22]利用FAST数据研究了PSR B1919+21单脉冲的偏振特性, 发现了单脉冲PA随相位的非RVM快速变化, 并认为这一现象反映了磁层中两个正交偏振模式的相干叠加过程。因色散关系对波模相位差的影响, 正交偏振模式的相干叠加导致单脉冲的PA与圆偏振角(Ellipticity Angle, EA)的频率依赖, 但在PSR B1919+21的观测数据中并未显著体现^[22]。

我们研究了PSR J1115+5030的积分轮廓及单脉冲行为, 其单脉冲也显示出类似PSR B1919+21的PA快速旋转现象。图2展现了56分钟内PSR J1115+5030积分轮廓与PA、EA, 以及全部单脉冲的PA和EA随相位的分布。我们发现不同偏振方向叠加得出的积分轮廓偏振位置角变化均匀且缓慢, 且分别在辐射频率在1.0-1.2GHz和1.3-1.5GHz的积分轮廓PA与EA都没有明显的频率演化(见图2自上而下的第一、三、四、六子图)。此外, 单脉冲的PA的散点分布(见图2第二子图)随相位变化比较平缓, 推测辐射位置可能离磁极中心较远, 辐射高度较高。通过自转能损公式 $\dot{E} = 4\pi^2 I \dot{P} / P^3$, 可简要估算出PSR J1115+5030的 $\dot{E}$ 为 $2 \times 10^{31} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 属于低 $\dot{E}$ 之列。我们注意到它积分轮廓的线偏振度普遍低于30%, 并且PA随相位变化平缓, 因此很难通过RVM拟合其几何常数。

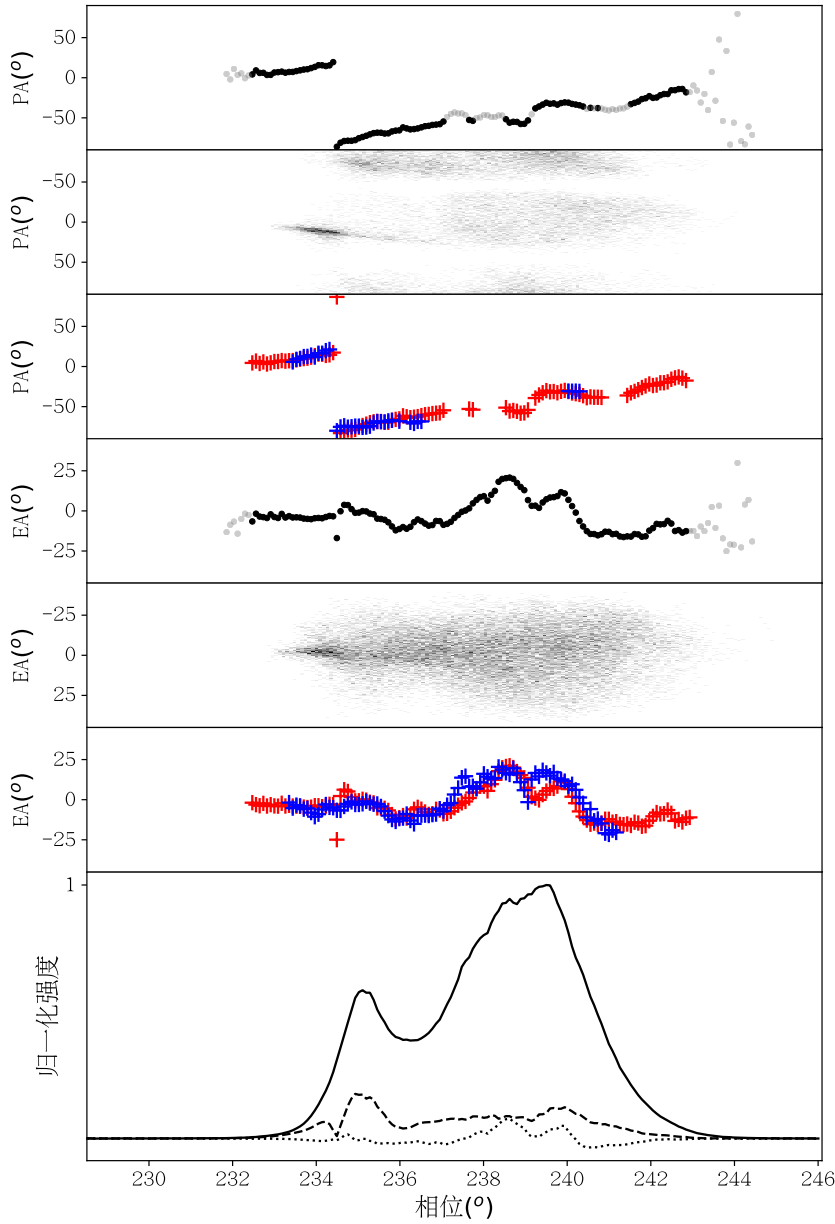


图 2: FAST在56分钟内观测脉冲星PSR J1115+5030测量结果, 反映观测量随相位的变化。自上而下为: 平均脉冲偏振位置角 (PA), 其中灰色标记为误差大于5度的数据点; 单脉冲偏振位置角 (PA) 散点灰度图; 平均脉冲分别在1.0-1.2GHz (红) 与1.3-1.5GHz (蓝) 波段的偏振位置角 (PA); 平均脉冲圆偏振角 (EA), 其中灰色标记为误差大于5度的数据点; 单脉冲圆偏振角 (EA) 散点灰度图; 平均脉冲分别在1.0-1.2GHz (红) 与1.3-1.5GHz (蓝) 的圆偏振角 (EA); 归一化平均脉冲轮廓的总强度 (实线), 线偏振强度 (虚线) 和圆偏振强度 (点线)。

然而, 通过仔细观察PSR J1115+5030的单脉冲会发现, 该脉冲星的辐射行为并非如上所述那么简单, 实际情况似乎更为复杂。

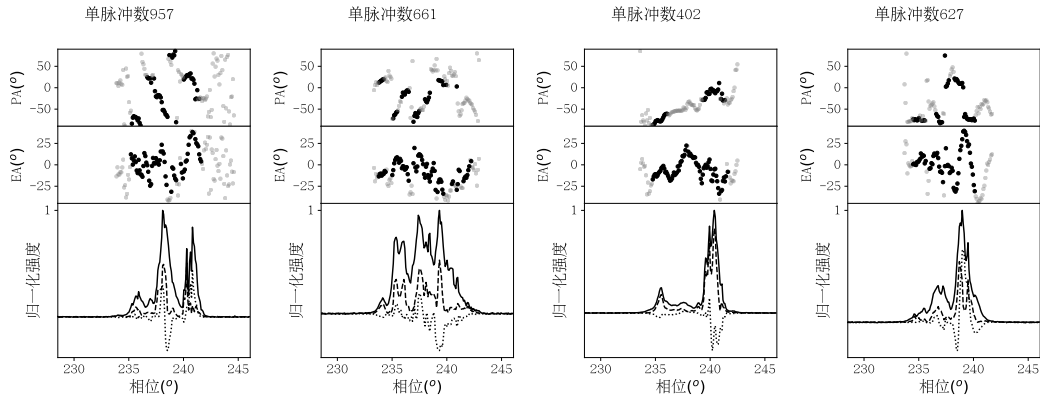


图 3: 第957、661、402、627个单脉冲的辐射行为。每个子图自上而下为: 单脉冲偏振位置角 (PA), 其中灰色标记为误差大于5度的数据点; 单脉冲圆偏振角 (EA), 其中灰色标记为误差大于5度的数据点; 归一化单脉冲轮廓总强度 (实线), 线偏振强度 (虚线) 和圆偏振强度 (点线)。

尽管积分轮廓的偏振位置角PA随相位变化较为平缓, 但如图3所示, 单脉冲PA相位变化方式存在着差异。不同单脉冲PA变化并不一致, 如第957和661个单脉冲 (即单脉冲数957与661) 的偏振方向改变分别为减小和增加, 且似乎存在偏振位置角的快速旋转。但同时, 甚至在一个单脉冲内不同部分的偏振方向还存在变化, 如第627个单脉冲的偏振位置角变化方向先增加后减小。正交模式在脉冲星磁层传播过程中, 偏振波的相干叠加会导致单脉冲的偏振位置角随着脉冲相位发生快速变化, 与脉冲957和661中PA的快速旋转以及EA的振荡表现相似^[22]。因此我们猜测, 这些现象很可能与偏振波的相干叠加或传播效应有关。

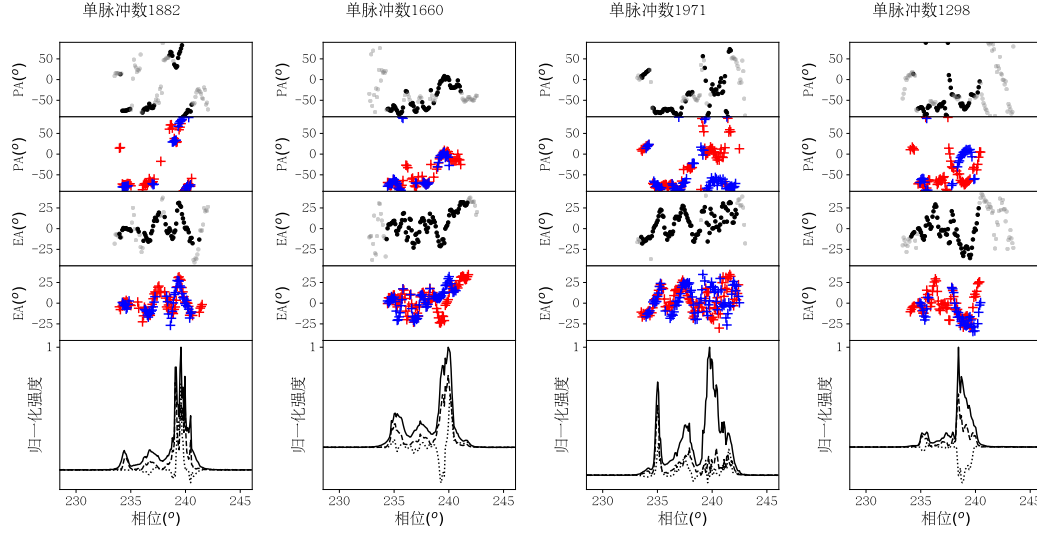


图 4: 第1882、1660、1971、1298个单脉冲辐射行为的频率依赖。每个子图自上而下为: 单脉冲偏振位置角 (PA), 其中灰色标记为误差大于5度的数据点; 单脉冲在1.0-1.2GHz (红) 与1.3-1.5GHz (蓝) 频段的偏振位置角 (PA); 单脉冲圆偏振角 (EA), 其中灰色标记为误差大于5度的数据点; 单脉冲在1.0-1.2GHz (红) 与1.3-1.5GHz (蓝) 频段的圆偏振角 (EA); 归一化单脉冲轮廓总强度 (实线), 线偏振强度 (虚线) 和圆偏振强度 (点线)。

进一步深入地研究单脉冲偏振的频率演化我们会发现, 部分单脉冲存在线偏振和或圆偏振随频率的演化特征。如图4所示, 似乎在单脉冲的不同子脉冲部位中, 偏振在频率上有演化。虽然第1882个单脉冲PA和EA的频率依赖不明显, 但第1660、1971和1298个脉冲中, 尽管前半部分没有频率上的演化, 最后一个子脉冲部分却显示出明显的频率依赖。相对于PSR B1919+21而言 [22], PSR J1115+5030的PA随相位快速转动行为具有显著的频率依赖, 这支持了磁层中正交偏振模式相干叠加这一机制。

2.2 单脉冲的相位分离谱

为研究单脉冲的频率演化特性, 我们将1.3–1.5 GHz定为高频, 1.0–1.2 GHz定为低频, 并计算高频与低频的比值。后续结论中已去除高低频比值误差大于0.02的测量值。

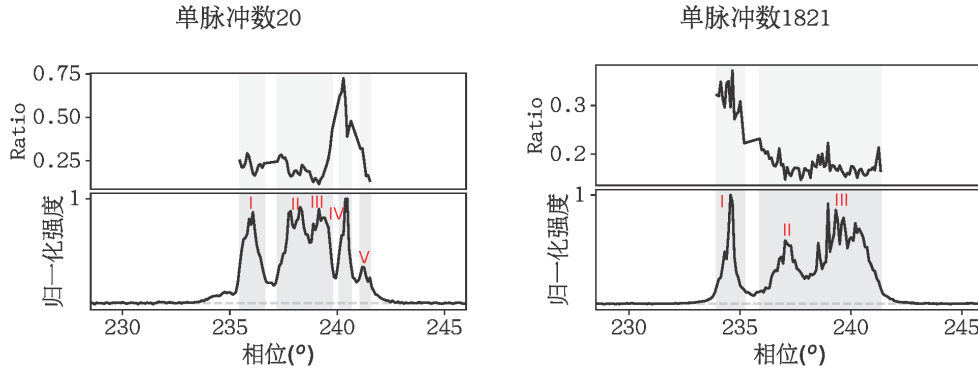


图 5: 第20、1821个单脉冲的频谱和偏振行为。每个子图的上图: 单脉冲1.3-1.5 GHz与1.0-1.2 GHz的强度比值 (Ratio); 下图: 1.0-1.5 GHz的归一化单脉冲轮廓强度 (Intensity)。灰色部分为选取的比值误差小于0.02的部分。

图5选取了两个可用点较多、且高低频比值存在较为明显变化的单脉冲, 即第20、1821个单脉冲。我们发现单脉冲中不同成分的高低频比值存在明显的相位依赖。如第20个单脉冲的成分IV的比值明显高于I、II、III和V等其他四个成分, 即成分IV的辐射谱较硬, 而其他辐射成分则较软, 很可能源于不同的辐射机制。再如第1821个单脉冲的成分I的辐射明显地比II、III两成分要硬; 尽管仅靠辐射强度难以辨别, 但II、III两成分的辐射起源可能有别于I。此外, 我们也考察了频率演化, 发现单脉冲数20的PA与EA无明显演化, 单脉冲数1821的I成分EA存在较小的演化。

为探究这种频谱变化的现象是否存在普遍性, 我们还绘制了全部单脉冲高低频比值的散点灰度图。

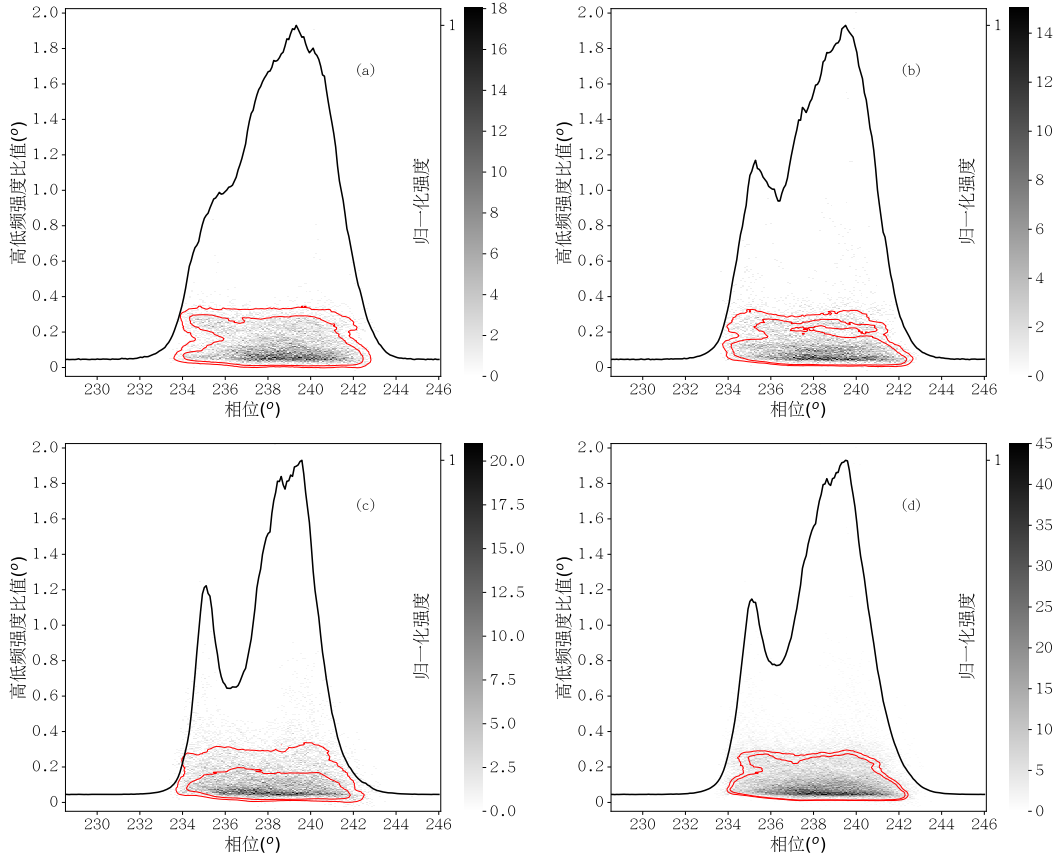


图 6: 单脉冲高低频强度比值的散点灰度图。横轴为脉冲相位, 纵轴为高低频比值大小, 其中实线为归一化后的单脉冲脉冲总强度。高频指1.3GHz-1.5 GHz、低频指1.0GHz-1.2 GHz, 而灰度表征比值的散点密度。四张子图依据单脉冲峰值强度来绘制。(a). 单脉冲脉冲总强度信噪比小于250的高低频比值分布, 共选用310个单脉冲中13653个点; (b). 信噪比大于250但小于500的高低频比值分布, 共选用193个单脉冲中11239个点; (c). 信噪比大于500的高低频比值分布, 共选用257个单脉冲中16971个点; (d). 全部单脉冲的高低频比值分布, 使用全部760个单脉冲中41863个点。

由图6可见, PSR J1115+5030的高低频比值在0.2附近似乎显示出多模式分布形态。(如图b, 较为明显)。这一特征跟图5中选取的两个单脉冲的频谱变化较为一致。不过, 这一离散的高低频比值分布并不非常显著, 还有待未来更多的观测验证。

3 结论与讨论

自脉冲星发现后的半个世纪以来, 其磁层动力学和相干辐射机制至今仍未阐明。除了粒子动力学模拟等数值实验外, 利用我国高灵敏度的大型射电望远镜FAST观测单脉冲的偏振特性进一步为研究脉冲星的辐射机制提供了新的契机。本文使用FAST对PSR

J1115+5030近一小时的观测数据研究了其单脉冲的偏振辐射与频谱演化等特征。除了显示单脉冲消零和强度波动等先前已经发现的特征外,本次观测发现了PSR J1115+5030的两个新观测特征。

一、发现PSR J1115+5030单脉冲偏振位置角PA存在非RVM的快速旋转行为,且PA和圆偏振角EA随相位的变化存在频率依赖;这些观测特征暗示:脉冲星开放磁力线区某些正交偏振模式会相干叠加 [22]。观测表明, PA随相位演化的趋势不定, 部分单脉冲PA的频率演化往往存在于同一个单脉冲的某个子脉冲部位。同时, 单脉冲不同部分的流量也可能会存在频率上的演化。

二、发现单脉冲的相位分离谱的高低频比值分布可能是多模态的。 理论研究表明, 脉冲星开放磁力线区可能存在若干加速区, 如真空内间隙、外间隙、核间隙和环间隙等 [23], 其中核间隙和环间隙为被临界磁力线分割的两个区域, 对应于脉冲星极冠区不同部位的放电点 [24--25]。如果脉冲星的射电辐射源于相干曲率辐射机制 [26], 则对于确定视线的观测者而言, 其观测到的辐射特征频率主要依赖于 γ^3/ρ , 其中 γ 为电子的Lorentz因子、 ρ 为辐射点磁力线的曲率。鉴于核间隙和环间隙在极冠区的放电存在两条途径, 我们推测观测者将看到两种相位分离的高低频比值。因此, 这里的发现可能支持了环间隙模型。当然, 频谱高低频比值也可能起源于磁层中的传播效应, 但往往会产生单模态分布。是故, 为了理解相位分离谱的观测特征, 我们希望未来利用FAST观测进一步研究更多脉冲星单脉冲的相位分离谱。

致谢

感谢卢吉光博士建议利用高低频强度比来刻画频谱硬度的思路; 感谢姚菊枚老师向FAST申请了本次论文使用的数据。感谢两位审稿人认真阅读初稿, 并提出建设性意见。

参考文献

- [1] Manchester R N. Journal of Physics: Conf. Ser., 2017, 932(1): 012001
- [2] Philippov A, Kramer M. Annual Review A&A, 2022, 60: 495
- [3] Spitkovsky A. ApJL, 2006, 648(1): L51
- [4] Nan R, Li D, Jin C, et al. IJMPD, 2011, 20(06): 989
- [5] Jiang P, Yue Y L, Gan H Q, R Yao, H Li, G F Pan, et al. Sci. China-Phys. Mech. Astron., 2019, 62: 959502
- [6] Lu J G, Lee K J, Xu R X. Sci. China-Phys. Mech. Astron., 2020, 63: 229531
- [7] Bonsignori-Facondi S R, Salter C J, Sutton J M. A&A, 1973, 27: 67
- [8] Ritchings R T. MNRAS, 1976, 176: 249
- [9] Wright G A E, Sieber W, Wolszczan A. A&A, 1986, 160: 402
- [10] Ershov A A, Kuzmin A D. AstL, 2003, 29: 91
- [11] Karuppusamy R, Stappers B W, Serylak M. A&A, 2011, 525: A55
- [12] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. Astronomical Journal, 2005, 129(4): 1993
- [13] Hobbs G, Lyne A G, Kramer M, et al. MNRAS, 2004b, 353: 1311
- [14] Bilous A V, Kondratiev V I, Kramer M, et al. A&A, 2016, 591: A134
- [15] Van Straten W, Bailes M. PASA, 2011, 28: 1
- [16] Hotan A W, Bunton J D, Harvey-Smith L, et al. PASA, 2004, 21: 302

- [17] O’Sullivan S P, Shimwell T W, Hardcastle M J, et al. MNRAS, 2023, 519: 5723
- [18] Radhakrishnan V, Cooke D J. Astrophysical Letters, 1969, 3: 225
- [19] Lyne A G, Manchester R N. MNRAS, 1988, 234: 477
- [20] Blaskiewicz M, Cordes J M, Wasserman I. ApJ, 1991, 370: 643
- [21] Oswald L S, Johnston S, Karastergiou A, et al. MNRAS, 2023, 520: 4961
- [22] Cao S, Jiang J, Dyks J, et al. ApJ, 2025, 983: 43
- [23] Harding A. The Emission Physics of Millisecond Pulsars, Millisecond Pulsars. Berlin: Springer, 2022: 57
- [24] Qiao G J, Lee K J, Wang H G, et al. ApJL, 2004a, 606: L49
- [25] Qiao G J, Lee K J, Zhang B, et al. ApJL, 2004b, 616: L127
- [26] Wang W Y, Zhang B, Chen X L, et al. ApJL, 2019, 876: L15

A study of the single pulses of PSR J1115+5030

Yilin Xu¹ Shunshun Cao² Shanshan Weng¹ Zhichen Pan³

(1 School of physical science and technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2 Department of astronomy, Peking University, Beijing 100871, China)

(3 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

ABSTRACT Using the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), we study the single pulses of PSR J1115+5030, focusing on their polarization properties and spectral characteristics. Our analysis reveals that the single-pulse polarization significantly deviates from predictions of the rotating vector model (RVM). The frequency dependence of both linear and circular polarization as a function of pulse phase likely arises from the coherent superposition of two orthogonal polarization modes within the magnetosphere. Furthermore, the phase-resolved spectra of single pulses exhibit a bimodal distribution in the ratio of high-frequency (1.3–1.5 GHz) to low-frequency (1.0–1.2 GHz) flux density, suggesting multi-mode distribution. These results provide insights into the radiative processes and propagation effects in pulsar magnetospheres.

Key words pulsar, non-thermal radiation, polarimetry, plasma physics