

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2026.01.04

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: 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性, 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: P145.6 **文献标识码:** A

1 引言

脉冲星的发现已逾半个世纪^[1], 但是至今天文学家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康普顿散射等机制辐射高能光子; 另一方面, 高能光子通过 γ - 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。

目前解释脉冲星产生相干射电辐射物理过程的方法主要有两种: (1) 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; (2) 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。中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]。为了研究脉冲星磁层中的辐射过程, 本文通过分析脉冲星 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。

收稿日期: 2025-04-03; 修回日期: 2025-04-20

资助项目: 国家自然科学基金 (12473041); 科技部 SKA 专项项目 (2020SKA0120100)

通讯作者: 翁山杉, wengss@nju.edu.cn; 潘之辰, panzc@bao.ac.cn

PSR J1115+5030 (PSR B1112+50) 是一颗周期约 1 s 的普通孤立脉冲星。在该脉冲星被发现的初期^[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^[9]在 1 412 MHz 频率对这颗脉冲星的单脉冲进行分析, 发现它的非消零态存在三种不同的辐射模式, 其中一种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^[10]观测到了 PSR J1115+5030 的巨脉冲。此外, Karuppusamy 等人^[11]在 110 ~ 180 MHz 频段对 PSR J1115+5030 做了单脉冲分析, 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 (dispersion measure, DM) 随时间演化。

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, 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。本文第 2 章介绍数据的获取, 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 章讨论以上观测结果及其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 时 29 分, 观测时长 1 h。观测数据采样时间是 $49.152 \mu\text{s}$, 数据覆盖频率 1.0 ~ 1.5 GHz, 通道数是 4 096, 观测记录四路偏振。观测开始前, 需要进行 100 s 定标观测, 注入占空比 50%、周期 2 s、强度 10 K 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 Gbit。脉冲星 PSR J1115+5030 的参数来自于 psrcat^[12], 周期 $P = 1.656 43 \text{ s}$, 周期导数 $\dot{P} = 2.49 \times 10^{-15} \text{ s}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[13], 色散量 $DM = 9.186 3 \text{ cm}^{-3}\cdot\text{pc}$ ^[14]。

观测开始后约 2 min 望远镜未指向脉冲星, 我们在处理脉冲星单脉冲数据时, 排除了这些观测时段对应的原始数据文件。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, 我们将脉冲星每个周期分为 4 096 个点, 每个点对应约 0.4 ms, 通道数保持不变。再使用 PSRCHIVE^[16]中的 pazi (pulsar archive zipper interface) 在频域上手工消除显著的干扰, 并用 paz (pulsar archive zipper) 使全部文件执行相同的通道消除操作, 共消除了 1 313 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), 我们得到脉冲星 PSR J1115+5030 的 RM 数值为 $3.51 \pm 2.07 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$, 相比 O'Sullivan 等人^[17]于 2023 年使用 LOFAR 观测数据得

到的 RM 值 ($2.633 \pm 0.051 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-2}$), 该结果在计算误差范围内。

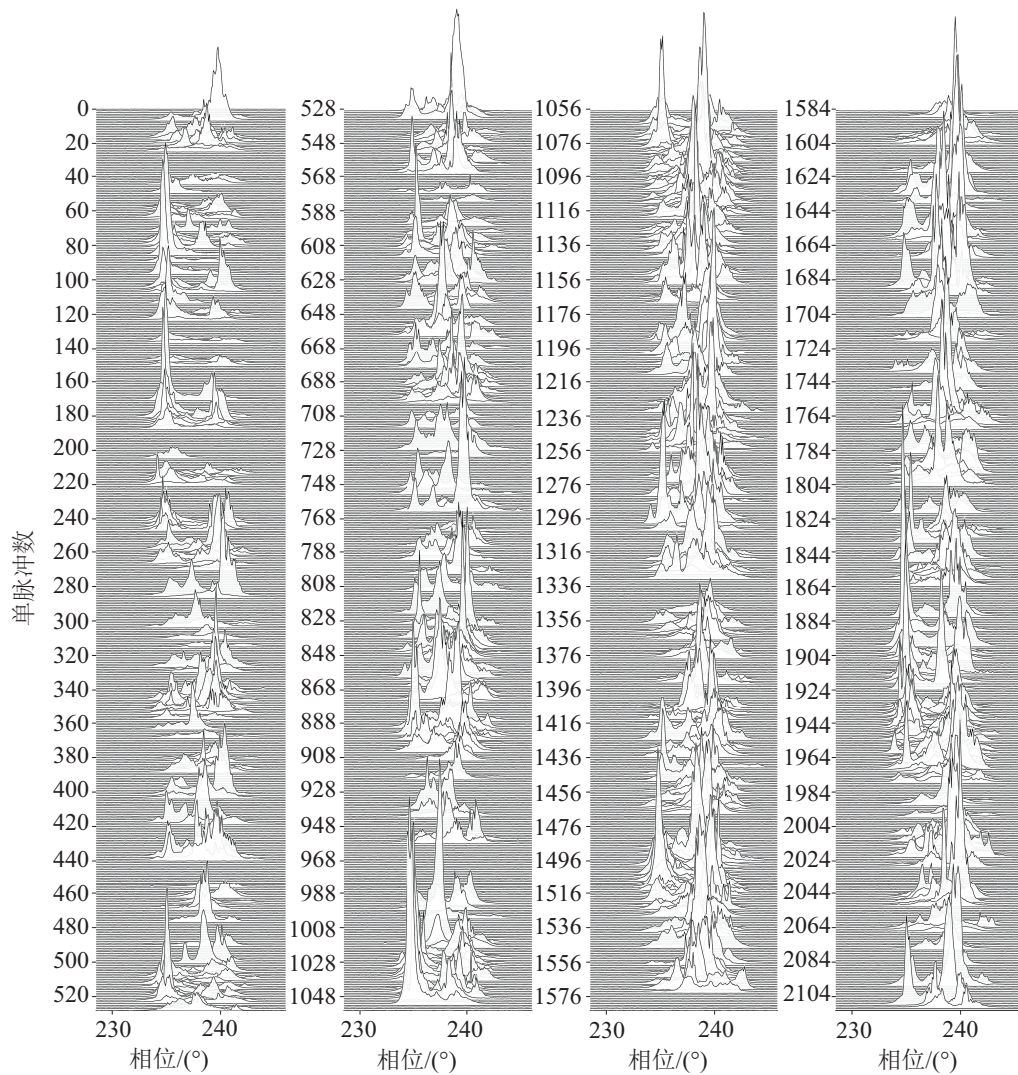
再用 pam (pulsar archive manipulator) 将计算得到的 RM 数值用于消旋。最后, 计算每个脉冲周期 $0^\circ \sim 228.5^\circ$ 的无脉冲信号部分数值的均值, 将该均值作为本底, 对单脉冲信号的基线进行扣除; 使用同一数据段标准差作为噪声, 用来估算单脉冲信噪比。根据脉冲平均轮廓, 取有脉冲信号区域 ($228.5^\circ \sim 246.1^\circ$) 中的最大值作为信号, 计算每个单脉冲的信噪比, 并将大于 7 倍信噪比且宽度大于 0.5° (约 2.4 ms) 的单脉冲挑选出来。在观测时间段共筛选出 767 个非消零单脉冲, 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 min, 我们对约占 64% 消零单脉冲 (约 37 min 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 里左边两列和右边两列中的单脉冲, PSR J1115+5030 在单脉冲数约大于 1 000 后, 活跃度明显提升。以下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。

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结构。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, 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]。

高灵敏度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 的观测数据中此依赖性并未显著体现^[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的 PA 快速旋转现象。图 2 展现了 56 min 内 PSR J1115+5030 积分轮廓及其 PA、EA, 以及全部单脉冲的 PA 和 EA 随相位的分布。由不同偏振方向叠加得出的积分轮廓, 其偏振位置角变化均匀且缓慢; 在 1.0 ~ 1.2 GHz 和 1.3 ~ 1.5 GHz 的辐射频段, 积分轮廓 PA、EA 都没有明显的频率演化特征 (见图 2 a)、c)、d)、f))。此外, 单脉冲的 PA 的散点分布 (见图 2 b)) 随相位变化比较平缓, 由此推测该脉冲星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 $2 \times 10^{24} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, 属于低 \dot{E} 之列。



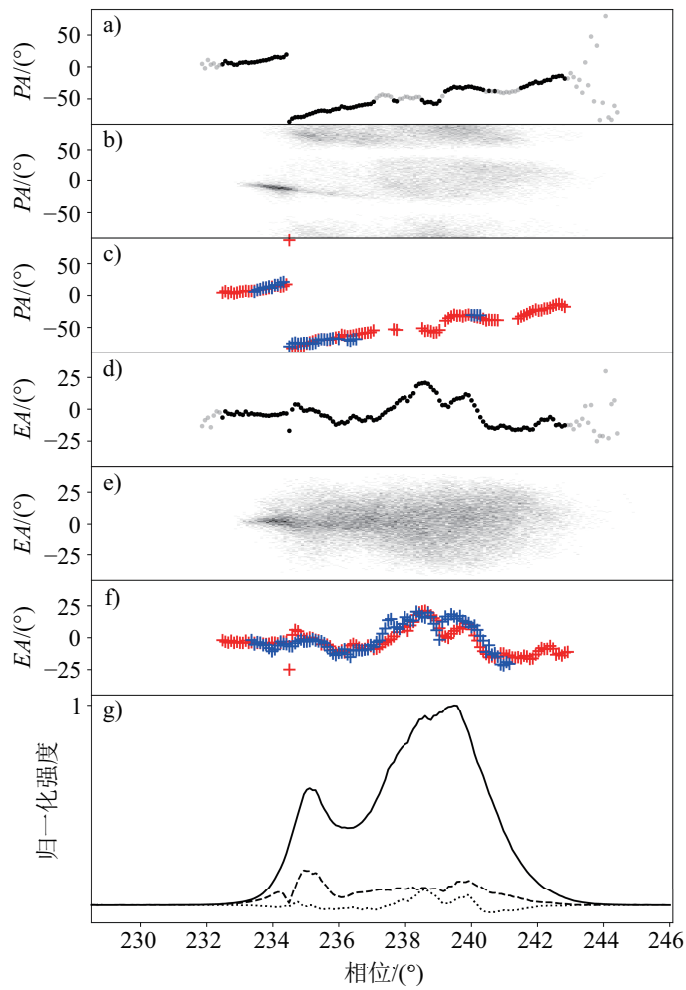
注：观测数据对应约 2 000 个脉冲星自转周期，包含非消零单脉冲 767 个。

图 1 FAST 本次观测脉冲星 PSR J1115+5030 的单脉冲瀑布图

我们注意到其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。

然而，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，实际情况更为复杂。

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 随相位变化方式存在明显差异。不同单脉冲 PA 变化并不一致，如第 957 和 661 个单脉冲的偏振位置角分别呈减小和增大的趋势，且存在偏振位置角的快速旋转。但同时，甚至在一个单脉

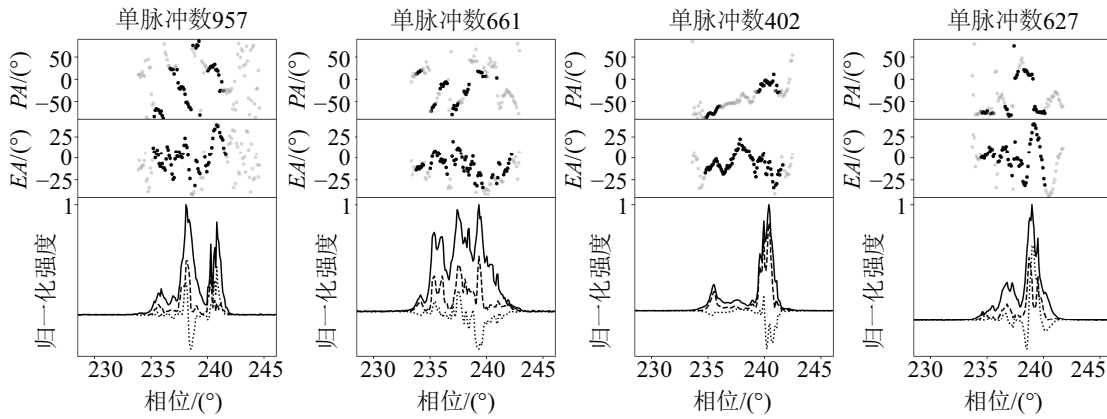


注: 分图纵轴自上而下分别为平均脉冲偏振位置角、单脉冲偏振位置角(散点灰度图)、平均脉冲分别在 1.0 ~ 1.2 GHz (红) 与 1.3 ~ 1.5 GHz (蓝) 波段的偏振位置角、平均脉冲圆偏振角、单脉冲圆偏振角(散点灰度图)、平均脉冲分别在 1.0 ~ 1.2 GHz (红) 与 1.3 ~ 1.5 GHz (蓝) 波段的圆偏振角、归一化强度。a) 和 d) 中灰色标记为误差大于 5° 的数据点。g) 中实线表示平均脉冲轮廓的总强度, 虚线表示线偏振强度, 点线表示圆偏振强度。

图 2 FAST 在 56 min 内观测到的脉冲星 PSR J1115+5030 观测量随相位的变化

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先增大后减小。在脉冲星磁层传播过程中, 正交模式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, 与单脉冲数 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。

进一步深入地研究单脉冲偏振的频率演化发现, 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, 虽然第 1 882 个单脉冲 PA 和 EA 的频率依赖不明显, 但第 1 660、1 971 和 1 298 个单脉冲中, 尽管前半部分没有频率上的演化, 最后一个子脉冲部分却



注：灰色标记为误差大于 5° 的数据点。实线表示平均脉冲轮廓的总强度，虚线表示线偏振强度，点线表示圆偏振强度。

图 3 第 957、661、402、627 个单脉冲的观测量随相位的变化

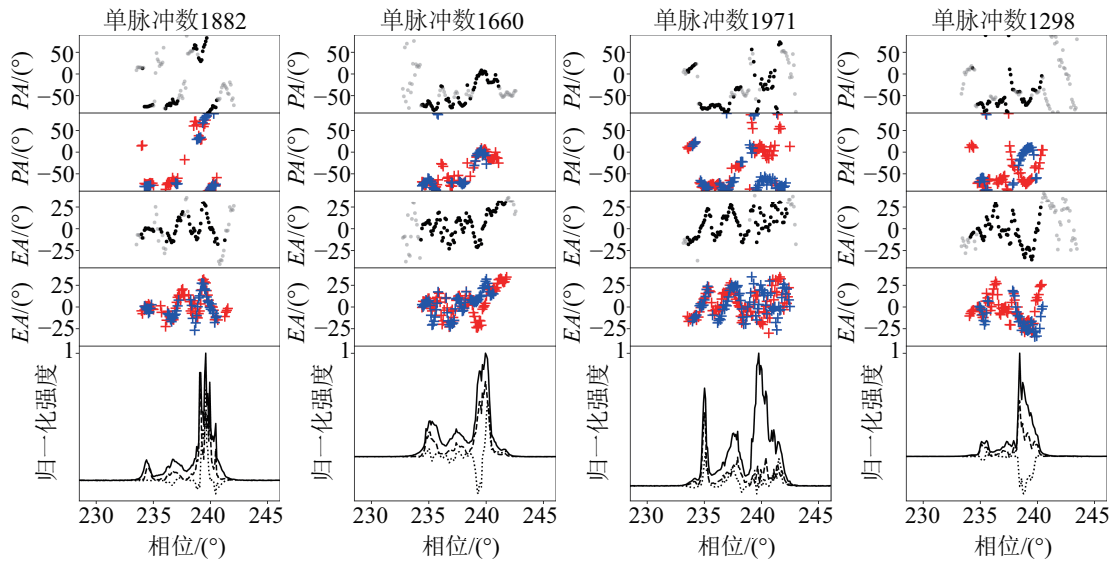
显示出明显的频率依赖性。相对于 PSR B1919+21 而言^[22]，PSR J1115+5030 的 PA 随相位快速转动行为具有显著的频率依赖性，这支持了磁层中正交偏振模式相干叠加这一机制。

2.2 单脉冲的相位分离谱

为研究单脉冲的频率特性，我们将 1.3 ~ 1.5 GHz 定为高频，1.0 ~ 1.2 GHz 为低频，并计算单脉冲在高频与低频的辐射强度比值。后续讨论中已去除高低频强度比值误差大于 0.02 的测量值。

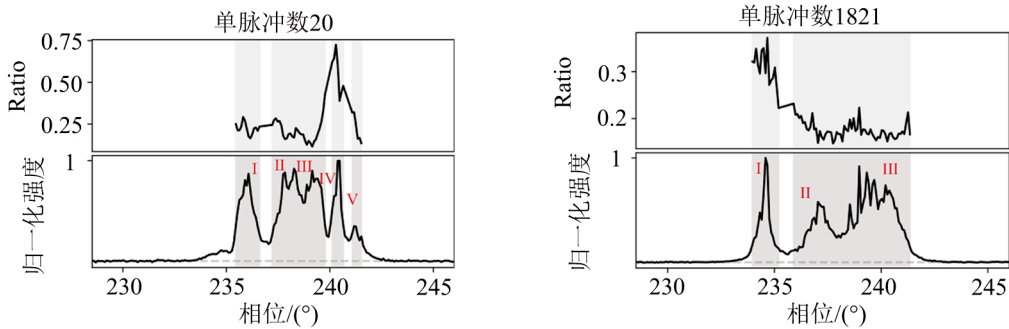
图 5 选取了两个可用点较多、且高低频强度比值存在较为明显变化的单脉冲，即第 20、1821 个单脉冲。我们发现，单脉冲中不同成分的高低频强度比值存在明显的相位依赖性。如第 20 个单脉冲的成分 IV 的比值明显高于其他四个成分，即成分 IV 的辐射谱较硬，而其他辐射成分则较软，很可能源于不同的辐射机制。再如第 1821 个单脉冲的成分 I 的辐射明显地比 II、III 两成分要硬；尽管仅靠辐射强度难以辨别，但 II、III 两成分的辐射起源可能有别于 I。此外，我们也研究了频率演化，发现第 20 个单脉冲的 PA 与 EA 无明显演化，第 1821 个单脉冲的 I 成分 EA 存在较小的演化。

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强度比值的散点灰度图。由图 6 可见，PSR J1115+5030 的高低频强度比值在 0.2 附近显示出多模式分布形态（如图 b）所示，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，这一离散的硬度比值分布并不非常显著，还有待更多的观测验证。



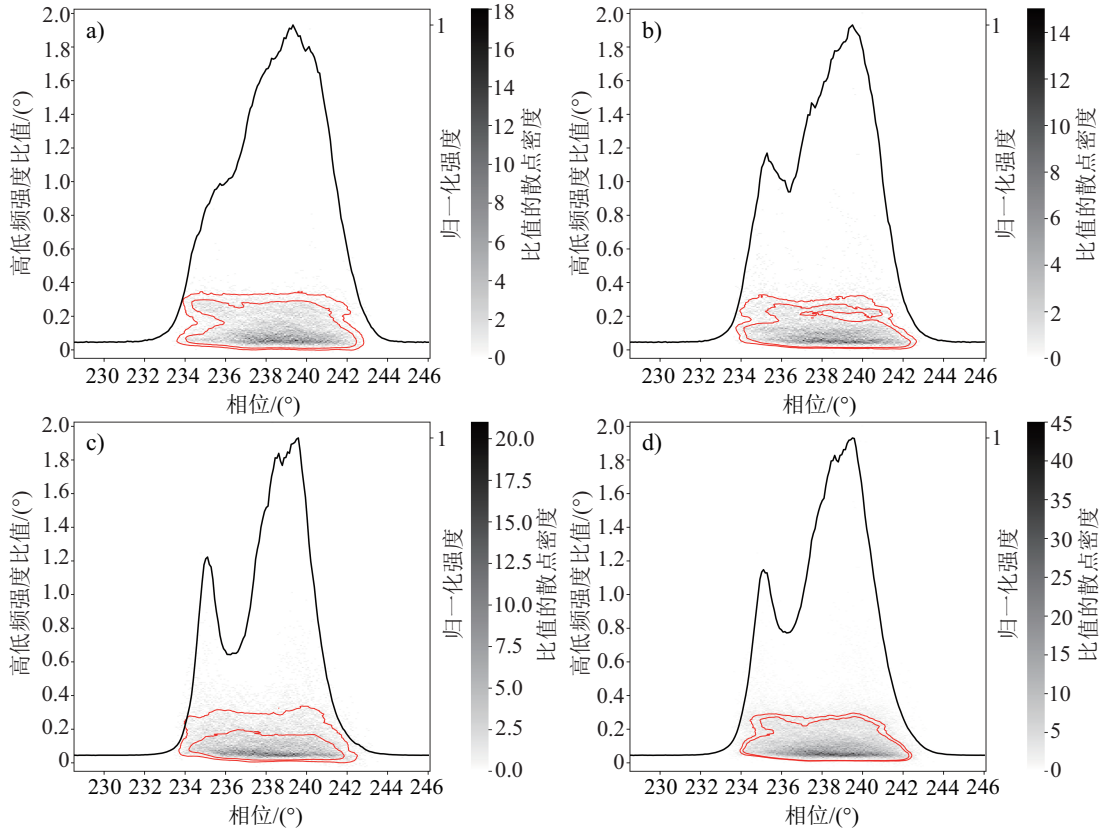
注: 每个分图的纵轴自上而下分别为单脉冲偏振位置角、单脉冲在 1.0 ~ 1.2 GHz (红) 与 1.3 ~ 1.5 GHz (蓝) 频段的偏振位置角、单脉冲圆偏振角、单脉冲在 1.0 ~ 1.2 GHz (红) 与 1.3 ~ 1.5 GHz (蓝) 频段的圆偏振角、归一化强度。灰色标记为误差大于 5° 的数据点。实线表示平均脉冲轮廓的总强度, 虚线表示线偏振强度, 点线表示圆偏振强度。

图 4 第 1882、1660、1971、1298 个单脉冲辐射行为的频率依赖性



注: 上图纵轴为单脉冲 1.3 ~ 1.5 GHz 与 1.0 ~ 1.2 GHz 的强度比值 (Ratio); 下图纵轴为 1.0 ~ 1.5 GHz 的归一化单脉冲轮廓强度。灰色部分为强度比值误差小于 0.02 的部分。

图 5 第 20、1821 个单脉冲的频谱与轮廓



注：实线为归一化后的单脉冲脉冲总强度。灰度表征比值的散点密度。a) 单脉冲脉冲强度信噪比小于 250 的高低频比值分布，共选用 310 个单脉冲中 13 653 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 11 239 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 16 971 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 41 863 个点。

图 6 单脉冲高低频强度比值随相位的变化

3 结论与讨论

自脉冲星被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被阐明。除了粒子动力学模拟等数值实验外，利用中国高灵敏度大型射电望远镜 FAST 观测单脉冲偏振特性，进一步为脉冲星辐射机制研究提供了新的契机。本文使用 FAST 对 PSR J1115+5030 近 1 h 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被发现的特征外，本次观测发现了 PSR J1115+5030 的两个新观测特征。

(1) 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存在频率上

的演化。

(2) 单脉冲的相位分离谱的高低频强度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是由临界磁力线分割形成的两个区域, 分别对应于脉冲星极冠区不同部位的放电区域^[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 为电子的洛伦兹因子, 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强度比值。因此, 上述结果可能支持环间隙模型。当然, 频谱高低频强度比值也可能源于磁层中的传播效应, 但传播效应通常会产生单模态分布。故而, 为了解释相位分离谱的观测特征, 我们未来将利用 FAST 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, 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*, 2004, 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*, 2004, 606: L49
- [25] Qiao G J, Lee K J, Zhang B, et al. *ApJL*, 2004, 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

XU Yilin¹, CAO Shunshun², WENG Shanshan¹, PAN Zhichen³

(1. School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Department of Astronomy, School of Physics, 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