特色专题

子午工程槎山太阳射电频谱仪高分辨观测

陈耀[1,2,3], 李传洋[4], 王冰[1,2], 常树旺[1,2], 孔祥良[1,2,3], 宁昊[1,2,3], 宁宗军[5], 杨宇知[5], 吕茂水[1,2], 崔颖丽[1,2], 张子龙[1,2], 严发宝[1,2]

摘要 子午工程II期的槎山米波太阳射电频谱仪(Chashan Broadband Solar radio spectrometer at Meter wavelengths, CBSm)自2022年11月常规观测以来,积累了近千例米波太阳射电暴事件。利用该仪器高时频分辨观测能力,对不同类型射电暴开展统计与事件研究,获得了一系列新发现:I型爆发的持续时间、带宽和峰值强度等物理参数均呈幂律分布;II型暴中超过60%的事件存在带分裂结构,约50%的带分裂事件上下支形态不对称,约40%的II型暴事件与小耀斑或喷流相关;尖峰-III型暴统计揭示了二者具有系统性偏振差异与时频偏移;IV型暴中发现了大量倒漂脉动及兼具条纹和串珠双重周期性的珠状条链等新型精细结构。这些发现可为太阳爆发过程中相干射电辐射机制研究及日冕磁场与密度结构诊断等重要问题提供新的观测数据约束。

关键词 太阳射电暴;频谱精细结构;槎山米波太阳射电频谱仪;子午工程II期;等离子体辐射

太阳射电暴是耀斑和日冕物质抛射过程中高能电子激发等离子体辐射的电磁信号。太阳射电动态频谱以时间为横轴、频率为纵轴,记录射电辐射强度的二维演化,是识别、分类和研究太阳射电暴的核心观测数据。按频谱形态和物理起源,通常将米波太阳射电暴分为I~V型。其中,I型暴表现为叠加在连续谱上的窄带短促点状辐射;II型暴表现为从高频向低频缓慢漂移的带状辐射;III型暴表现为由高频向低频快速漂移的带状辐射;IV型暴表现为持续时间较长的宽带连续谱辐射;V型暴表现为紧随III型暴的弥散宽带连续谱辐射。此外,IV型暴等爆发频谱图上还常叠加多种精细结构,如鱼骨结构(herringbone)、尖峰(spikes)、斑马纹(zebras)、纤维(fibers)、脉动(pulsations)等。这些精细结构携带着辐射源区密度、磁场和波–粒相互作用等微观物理信息。

太阳射电暴的观测始于20世纪40年代。1942年,Hey[1]在第二次世界大战雷达系统中探测到来自太阳的射电辐射。此后数十年间,全球先后建造了大量不同频段的太阳射电探测系统,从早期的单频点辐射流量计到模拟扫频接收机,进一步发展到数字化的多通道频谱仪。在Payne-Scott等[2]、Wild等[3]和Boischot等[4]早期科学发现的工作基础上,逐步形成了I~V型太阳射电暴分类框架[5−9]。相应框架沿用至今,成为指导太阳射电暴分类和机理研究的重要基础。

槎山米波太阳射电频谱仪(Chashan Broadband Solar radio spectrometer at Meter wavelengths, CBSm)部署于山东省威海市槎山太阳观测站(Chashan Solar

1. 山东大学空间科学研究院,威海 264209
2. 山东省太空环境与探测技术重点实验室,威海 264209
3. 山东大学前沿交叉科学青岛研究院,青岛 266237
4. 德州学院物理与电子信息学院,德州 253023
5. 中国科学院紫金山天文台,南京 210008

收稿日期:2026−06−26;修回日期:2026−08−28
基金项目:国家重大科研仪器研制项目(42127804);国家自然科学基金面上项目(42374219, 42574218);国际(地区)合作研究项目(42561160095);国家重点研发计划项目(2022YFF0503002, 2025YFF0510701)
作者简介:陈耀,教授,研究方向为太阳爆发物理过程,电子信箱:yaochen@sdu.edu.cn
引用格式:陈耀, 李传洋, 王冰, 等. 子午工程槎山太阳射电频谱仪高分辨观测[J]. 科技导报, 2026, 44(18): 56−68; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.06.00085

Observatory, CSO), 是子午工程 II 期太阳-行星际宽波段太阳射电频谱监测链分系统之一, 由山东大学空间科学研究院电磁探测实验室设计与运行。CBSm 信号接收单元由 12 m 口径抛物面反射镜、双线极化对数周期馈源及高精度太阳跟踪转台组成, 如图 1 所示。接收机采用高速双通道 14 位模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)采集卡直接采样, 采样率 1.25 GSPS(gigasamples per second, 即每秒 1.25×10^9 次采样), 在现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)KU115 上实现 16k 点快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法[10]。系统工作频段为 90~600 MHz, 主要性能参数如表 1 所示。CBSm 的动态频谱数据通过公开数据库(http://47.104.87.104/SRData/CBSm/)发布。



图 1 CBSm 系统 12 m 抛物面天线

表 1 CBSm 的主要性能参数

参数/指标	数值/技术指标
工作频段	90~600 MHz
频率分辨率	76.294 kHz
时间分辨率	0.839 ms(快速模式0.21 ms)
灵敏度	≤1 SFU@300 MHz(100 kHz, 1 ms积分)
动态范围	≥60~65 dB
极化类型	双圆极化
天线口径	12 m
指向精度	优于0.2°
跟踪精度	优于0.2°

自 2025 年 3 月起, 仪器增加了偏振校准功能, 为辐射机制讨论提供了更多观测约束。CBSm 作为子午工程 II 期太阳射电观测设备之一, 面向太阳爆发过程中的米波射电辐射开展常规监测。大天线与低噪声模拟和高性能数字接收机系统的组合显著提高了系统探测灵敏度, 增强了对弱射电暴和射电暴精细结构的捕捉能力。俄罗斯研究人员在《Science China-Physics, Mechanics & Astronomy》发表综述, 指出 CBSm 可在 90~600 MHz 频段以“前所未有的频率-时间分辨率和灵敏度”(unprecedented frequency-temporal resolution and sensitivity)观测太阳, 为米波太阳射电暴精细结构研究提供了重要观测条件[11]。

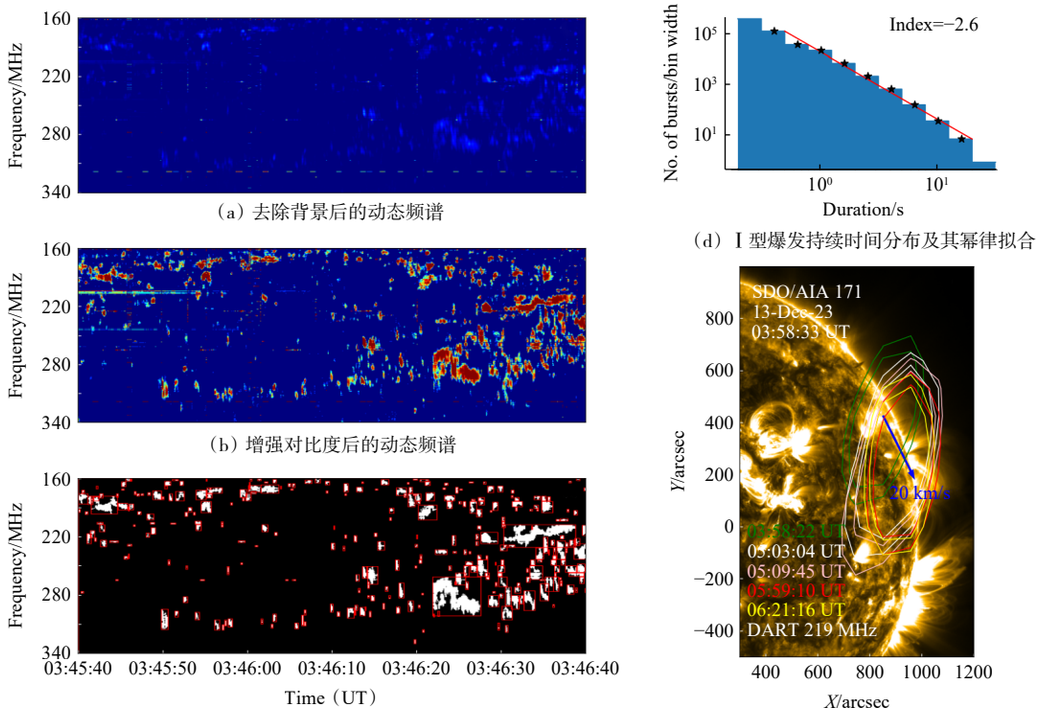
以下主要基于 CBSm 动态频谱数据, 展示其记录的多种类型太阳射电暴事件的新特征和新发现, 并在此基础上探讨太阳射电辐射机制以及日冕参数诊断的新方法。

1 I 型暴

I 型暴是最常见的射电辐射现象之一, 主要出现在米波和十米波波段, 表现为宽带连续辐射谱(continuum emission)上叠加大量短促(0.1~1 s)、离散的窄带 I 型爆发(type I bursts), 可持续数小时至数天。通常认为 I 型暴与闭合冕环中的非热电子、局地磁重联及等离子体相干辐射过程有关, 但其触发条件以及与太阳爆发活动的关系仍存在争议[8,12-15]。

CBSm 共记录了 600 多例 I 型暴事件。Yang 等[16]利用 CBSm 数据, 对 2023 年 12 月 13 日一次持续约 7 h 的 I 型暴事件开展了高分辨率统计分析(图 2)。基于图像形态学和自适应阈值方法, 在右旋和左旋偏振动态频谱中分别提取出 102073 个和 78773 个独立的 I 型爆发。

经分析发现, I 型爆发具有较短的持续时间(约 0.7 s)和窄带宽(约 5.6 MHz), 相对带宽(瞬时带宽与中心频率之比)约为 2%~3%。其持续时间、带宽、区域面积和峰值强度均呈幂律分布, 幂律指数为 1~3.5。这一幂律特征支持以自组织临界性(self-organized criticality, SOC)雪崩模型解释其能量释放过程[17]。结合太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO)大气成像组件(atmospheric imaging assembly, AIA) 171 Å极紫外图像与稻城圆环阵太阳射电成像望远镜(Daocheng Radio Telescope, DART)的射电成像, 确定射电暴源区位于日面边缘, 并测得其沿日面方向的运动速度约为 20 km/s。此外, 部分 I 型爆发呈链状排列, 并表现出亚秒至秒级准周期性。该大样本统计研究为约束 I 型暴辐射机制和源区物理过程提供了新的观测依据。



（a）去除背景后的动态频谱

（b）增强对比度后的动态频谱

（c）识别出的Ⅰ型爆发，以白色连通区及红色方框标出

（d）Ⅰ型爆发持续时间分布及其幂律拟合

（e）AIA 171 Å图像叠加 DART 射电成像，等值线代表射电源强度最大值的55%和65%

图 2 Ⅰ型爆发的识别、统计分析及源区成像

2 II 型暴

通常认为 II 型暴是由高速运动的日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)结构所驱动的激波激发。激波可通过快费米等机制加速产生高能电子[18−20]，进而激发等离子体辐射产生射电信号——基频在局地等离子体频率附近，谐频在 2 倍等离子体频率附近。根据观测到的 II 型暴频率漂移率，结合给定日冕密度模型，可估算激波的传播速度，是认识日冕和行星际激波特征的重要数据。以下从宽带特征、带分裂统计和喷流驱动机制 3 个方向介绍 CBSm 在该爆发类型方面的主要发现。

2.1 宽带 II 型暴

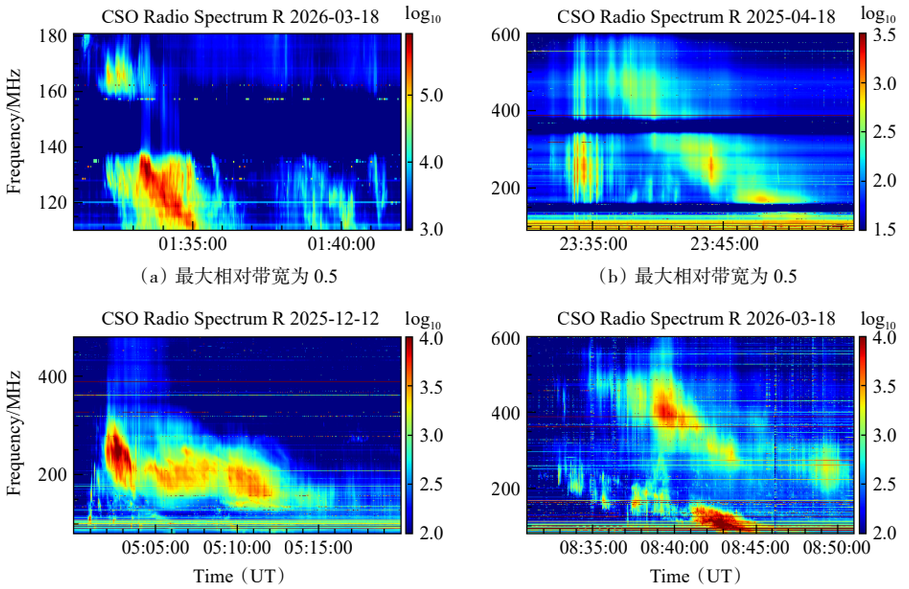
II 型暴的基、谐频辐射带的相对带宽通常低于 0.1~0.5，为窄带辐射，相对带宽达到或超过 0.5 的 II 型暴称为宽带 II 型暴。此前有少量宽带 II 型暴报道[21−24]，但因缺乏精确源区定位，宽带成因不明：究竟来自激波层内的大密度跳变，还是激波同时扫过密度差异悬殊的不同结构，一直没有明确结论。最近，Vasanth 等[25]利用法国 ORFEES(Observations Radiospectrographiques pour FEDOME et l'Etude des Eruptions Solaires)频谱仪和南希日像仪(Nancay Radioheliograph, NRH)数据报道了一个宽带高频 II 型暴，其瞬时带宽约 300 MHz，相对带宽接近 1，亮温度超过 10^{11}~10^{12} K。研究人员将观测到的宽带特征归因于较大的源区密度范围，可能与激波面扫过密度差异显著的日冕结构有关。该研究中 ORFEES 系统天线孔径为 5 m，时间分辨率为 0.1 s，系统灵敏度和分辨率相对较低。

基于 CBSm 数据，观测到 10 例宽带 II 型暴事件，其中较为典型的 4 例如图 3 所示。

2.2 带分裂的统计特征

部分 II 型暴的基谐频辐射带会分裂为上下 2 条近乎平行的子带，称为带分裂(band-splitting)现象。许多研究人员认为，上支(高频)来自密度较高的激波下游，下支(低频)来自密度较低的激波上游。基于上下支频率比 $\gamma=f_u/f_l$ 可估算激波压缩比($n_u/n_l\approx\gamma^2$)，进而可根据激波跳变关系约束激波区域的日冕磁场[26−27]。

基于 RSTN(Radio Solar Telescope Network)的早期数据，已有研究发现，II 型暴带分裂的部分观测特征并不支持上述解释。Du 等[28−29]分析了 18 例事件，发现 II 型暴带分裂频率比主要集中分布在一个相对



（a）最大相对带宽为 0.5　（b）最大相对带宽为 0.5

（c）最大相对带宽为 0.9　（d）最大相对带宽为 0.7，辐射带中存在快速频漂子结构

图 3　典型宽带 II 型暴频谱

较小的范围(1.15~1.25)，对应的激波压缩比为 1.2~1.7，表明不同事件的激波均相对较弱，强度差异较小。这与激波驱动源——CME 的速度及相应日冕参数条件的大范围变化不符。另一方面，观测还发现上支的频谱特征系统性早于下支出现。若上支来自下游、下支来自上游，则考虑到辐射传播延迟，上支应晚于下支出现，而实际观测结果与这一预期相反。上述两方面的观测特征均对上下游解释提出了挑战，因此，带分裂事件的物理起源仍存在很大争议[20,28–31]，有必要基于 CBSm 数据进一步分析此类事件的个例和统计特征。

从 2022 年 11 月到 2026 年 9 月，CBSm 共观测到 89 例 II 型暴事件，其中 56 例是带分裂事件。基于这些数据，得到以下 3 个新结论：(1) 带分裂事件占比约 63%，显著高于此前数据统计结果(10%~20%)[32–35]。这说明带分裂是 II 型暴的普遍特征，而非罕见现象。(2) 约 50% 的带分裂事件上支较宽，多呈竖漂鱼骨结构，而下支较窄，多为准连续团块或点状。(3) 在基频与谐频同时可见的事件中，有时谐频分裂而基频仍为单带，有时二者均分裂，上下支强度可能一致，也可能不同。上下支形态不对称与基谐频分裂行为的差异现象表明，带分裂的起源可能不在激波上下游等结构层面，而在于辐射过程本身的差异，例如可由低密度空腔结构等非线性过程决定，其具体机制还需进一步的观测和理论研究。

在 56 例带分裂事件中，有 39 例的频谱结构清晰，可明确识别上下支。参照 Du 等[29]使用的逐分钟平均方法，对这 39 例事件的 γ 进行统计。结果显示，约 80% 的 γ 值落在 1.13~1.29，如图 4 和图 5 所示，且同一事件中 γ 未见明显变化。此外，γ 与 CME 速度、耀斑级别无显著相关性，相关系数均小于 0.2。这些结果与 Du 等[29]基于较小样本量的分析结果基本一致。

2.3　喷流驱动的 II 型暴

通常认为 II 型暴是由 CME 所驱动的激波辐射产生。然而，通过对 CBSm 观测到的所有 II 型暴事件源区特征进行逐一分析，发现其中一些事件并不伴随明显的 CME 爆发特征，而是伴有 C 级耀斑和/或小尺度喷流。

Hou 等[36]分析了 1 例 CBSm II 型暴事件，发现该事件并不伴随 CME 爆发，而可能是由喷流驱动的。Cui 等[37]在 CBSm 数据中报道了一个 C3.1 级小耀斑期间出现的带分裂 II 型暴，同时捕捉到 II 型暴带分裂、多组 III 型暴或类 III 型暴和 1 个 N 型暴(图 6、图 7)。该事件中 II 型暴出现在耀斑缓变相，辐射源与喷流驱动的波状扰动前沿在时空上对应，扰动波前速度约为 880 km/s。分析表明，喷流从耀斑区爆发，撞击上方闭合冕环，在低阿尔芬速度冕环内形成激波，加速电子并激发 II 型暴辐射，其中部分电子沿闭合磁环传播时受磁镜反射折返，产生 N 型暴。这 2 例

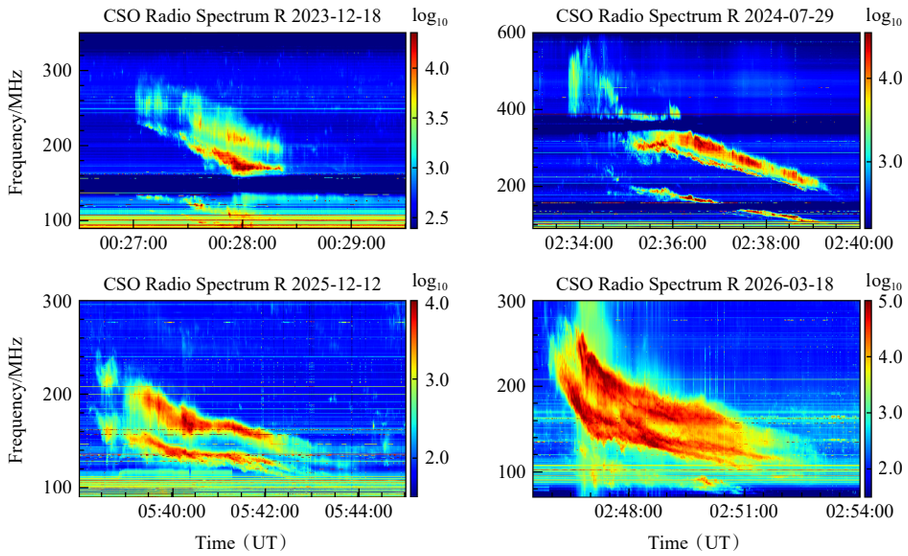
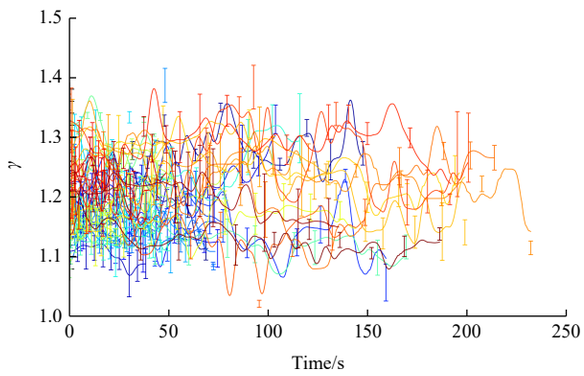
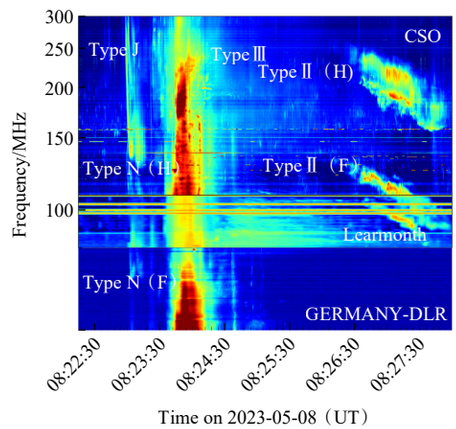


图 4 典型频带分裂 II 型暴频谱



各事件起始时刻已对齐，误差棒由带分裂上下支 90%最大强度边界给出

图 5 39 例带分裂 II 型暴频率比 γ 随时间的演化



CBSm(110~300 MHz)、Learmonth(80~110 MHz)和 GERMANY-DLR(50~80 MHz)的联合观测结果。图中标注了不同类型射电暴(N 型暴、J 型暴、III 型暴和 II 型暴)，其中 N 型暴和 II 型暴均含有基频(F)和谐频(H)结构

图 6 2023 年 5 月 8 日射电暴动态频谱

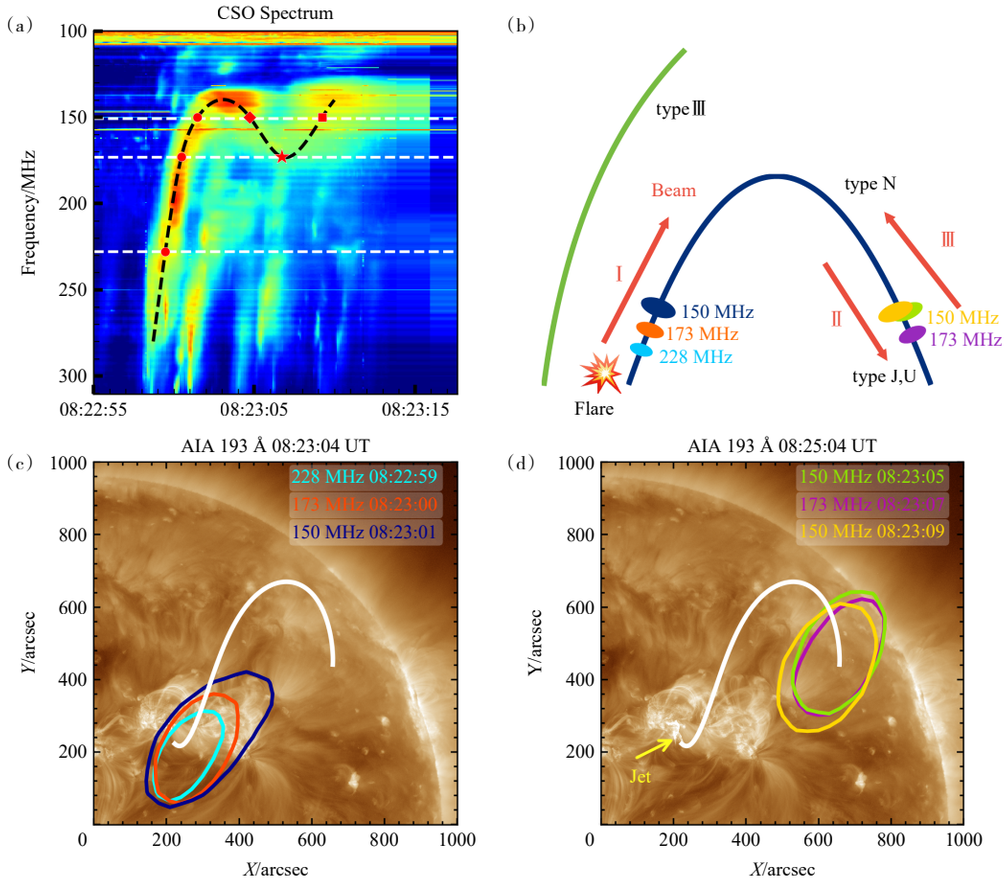
事件为小尺度喷流驱动日冕激波并产生 II 型暴提供了观测证据。

除上述典型个例分析外，Cui 等[37]利用 CBSm 观测数据，并结合 RSTN、e-Callisto 射电频谱和其他波段数据，对 2022 年 11 月至 2025 年 12 月期间记录的米波 II 型暴事件进行了初步筛选和分类。结果发现，在已识别的 II 型暴样本中，约 40% 不伴随宽且快的 CME，进一步分析表明，这部分样本很可能与喷流活动有关。这一结果提示，小尺度喷流是日冕激波及相应 II 型暴的重要驱动过程之一。

3 尖峰-III 型暴对

III 型暴在动态频谱上表现为从高频向低频快速漂移的辐射结构，通常认为其来源于电子束沿大尺度闭合磁环或开放磁场传播过程中激发的等离子体辐射。尖峰暴则是亚秒级窄带爆发，其带宽仅为中心频率的百分之几。尖峰暴通常位于 III 型暴高频起始端，并呈簇状分布，二者组合形成尖峰-III 型暴对。基于较低分辨率数据的早期统计分析显示，二者几乎同时出现，且尖峰频率略高于 III 型暴起始频率，偏振度也明显更强[38−39]。

截至 2026 年 2 月 6 日，CBSm 已记录上百例尖峰-III 型暴对事件，基于其中 35 例形态清晰的事件，



(a) CBSm 动态频谱, 黑色虚线标示 N 型暴结构, 白色虚线表示 NRH 的成像频率(150、173 和 228 MHz), 红色符号标示(c)和(d)中展示的 6 个选定数据点; (b) N 型暴产生机制示意; (c)AIA 193 Å极紫外图像及叠加其上的 NRH 射电源等值线, 等值线表示各频率射电源强度最大值的 70%; (d)对应于(a)中红色菱形、星号和方形标记数据点的射电源等值线

图 7 N 型暴的动态频谱及源区成像

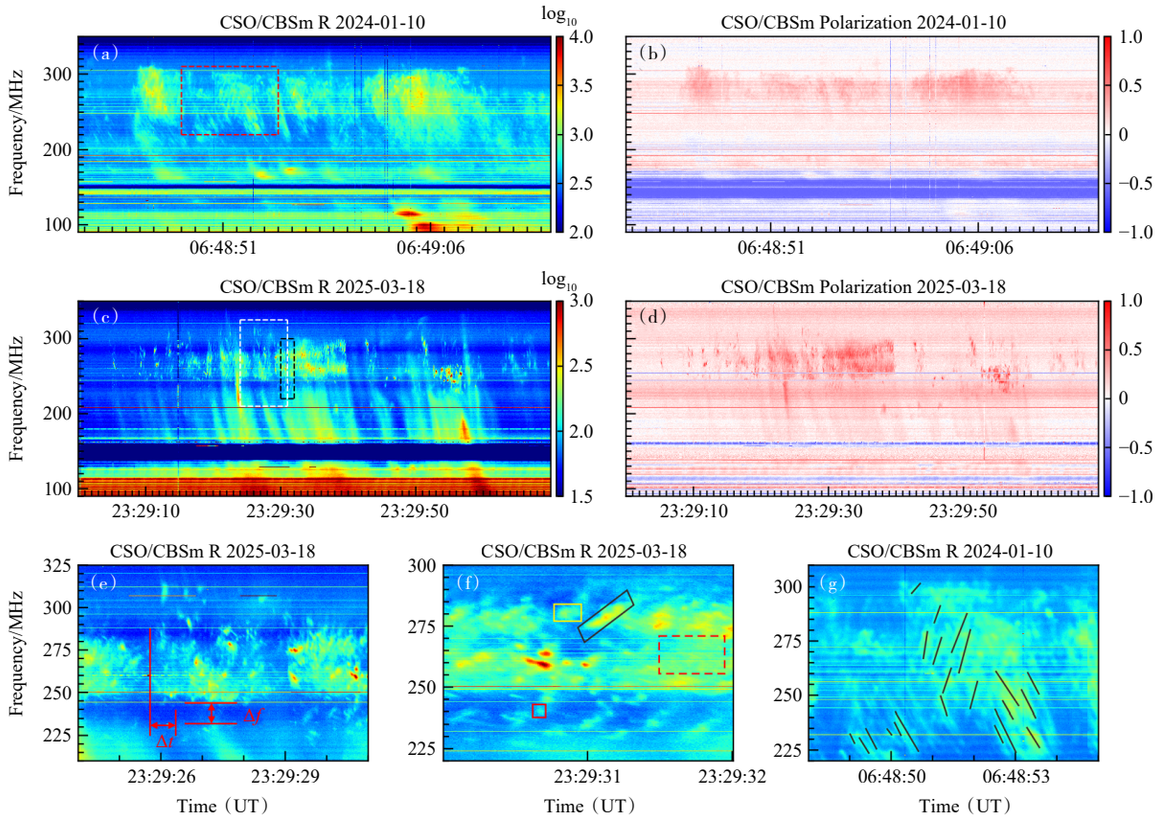
Chang 等[40]识别出 502 对尖峰-III 型暴对, 开展了目前最大样本数的统计研究。结果发现, 约 87% 的尖峰簇先于 III 型暴出现, 提前量为 0.5~3 s; 约 80% 的尖峰簇在频率上高出 III 型暴起始频率 3~30 MHz; 约 64% 的尖峰偏振度超过 0.6(部分接近 1.0), 远高于 III 型暴的典型偏振度(< 0.4)。尖峰簇在形态上呈点状、团块状、漂移状和弥散状 4 类(图 8)。部分事件还观测到正漂和负漂共存的双向漂移结构, 漂移率约 20~100 MHz/s。此外, 还发现超过 80% 的此类事件在极紫外图像中伴随可辨认的喷流或类喷流结构。

受频谱仪分辨率限制, 此类亚秒级形态细节未被系统记录。根据尖峰暴的高偏振、窄带、亚秒级等特征, 相应辐射源区对应于电流片重联发生的小尺度区域; 而根据低偏振、宽带、快速频漂等特征, III 型暴对应于逃逸电子沿大尺度磁场传播。后续, 还需结合成像数据和模型研究, 分析 0.5~3 s 的时间间隔和 3~30 MHz 的频率偏移的物理起源。

4 IV 型暴

根据频谱形态, 可将 IV 型暴分为无整体频率漂移的稳态 IV 型暴和整体随时间漂移的运动 IV 型暴两类。其中, 稳态 IV 型暴与耀斑后相及闭合磁结构中捕获的高能电子有关, 运动 IV 型暴则可能与 CME 抛射体有关。针对 IV 型暴的辐射过程, 此前研究提出了等离子体基波或谐波辐射、回旋同步辐射等多种可能机制, 但不同机制的适用条件和相对贡献仍存在争议, 高时间-频率分辨率观测有助于进一步理解 IV 型暴的物理过程。

CBSm 共记录到 37 例 IV 型暴事件。对这些事



(a)(b) 2024 年 1 月 10 日事件的动态频谱及对应偏振度谱,红色虚线框表示(g)的范围;(c)(d) 2025 年 3 月 18 日事件的动态频谱及偏振度谱,白色和黑色虚线框分别表示(e)和(f)的范围;(e) 典型尖峰-III 型暴对,对应(c)中白色框区域,标注了时间超前量 Δt 和频率间隔 Δf;(f) 对应(c)中黑色虚线框区域的放大图,展示尖峰簇中的几种典型形态:团块状(黄色实线框)、点状(红色实线框)、弥散状(红色虚线框)、漂移状(黑色倾斜框);(g) 对应(a)中红色框区域的放大图,黑实线标示不同漂移方向的结构

图 8 尖峰–III 型暴对的频谱特征及精细结构

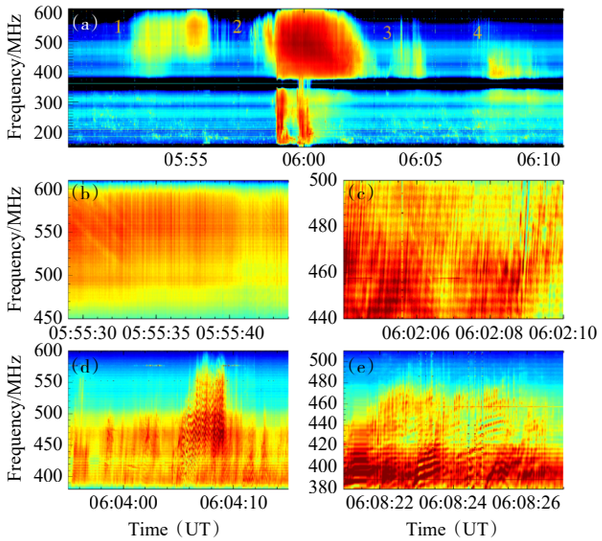
件的统计分析发现,其中存在大量过去较少报道的间歇性脉冲结构。测量表明,间歇性脉动的相对带宽平均值为 69%,重现周期平均值为 709 ms。不同事件中脉冲带宽、周期和频率截止边界有所差异。

以其中一例代表性事件进行详细分析,分析结果如图 9 所示。该事件可分为 4 部分,且各部分都包含明显的脉动结构及其他类型精细结构。其中,第 1 部分主要为无明显频漂的脉动(图 9(b));第 2 部分包含大量倒漂脉动(图 9(c));第 3 和 4 部分则同时包含倒漂脉动和斑马纹(图 9(d)、(e))。从第 2 部分可识别出超过 2500 个倒漂脉动,频率范围为 370~610 MHz,相对带宽为 49%,平均周期为 112 ms,单个脉动的频漂速度在 100~500 MHz/s。第 3 部分可识别出相邻斑马纹的间距约为 10 MHz。结合多波段成像数据,倒漂脉动和斑马纹的源区位置一致,都位于正极性黑子上方的磁环足点处(图 10)。不同频率的源位置略有偏移,与等离子体辐射频率随密度变化的一般特征一致,且二者均为强左旋偏振,亮温超过 10^{10} K,表明二者均可能源自等离子体辐射机制。

5 珠状条链

在 IV 型暴频谱图中,可发现周期性出现的窄带条纹特征,平均周期小于 1 s[41−43]。

Li 等[44]利用 CBSm 数据,发现了一类新型频谱精细结构。该结构由周期性窄带条纹组成,后随条纹出现于前一条纹结束之时(“首尾相接”),重现周期 < 1 s。条纹链整体可呈现不同频漂模式(图 11(c)~(h)),负漂、正漂和近零频漂率的事件均有记录。单条纹通常向低频漂移,低频侧常伴吸收特征。部分条纹上叠加了沿条纹方向等间距排列的“珠子”(图 11(a)、(b)),故命名为珠状条链。串珠之间时间间隔约 0.1 s,频



(a) 中 1~4 为事件的 4 个部分;(b)~(e) 为各部分的精细结构放大图

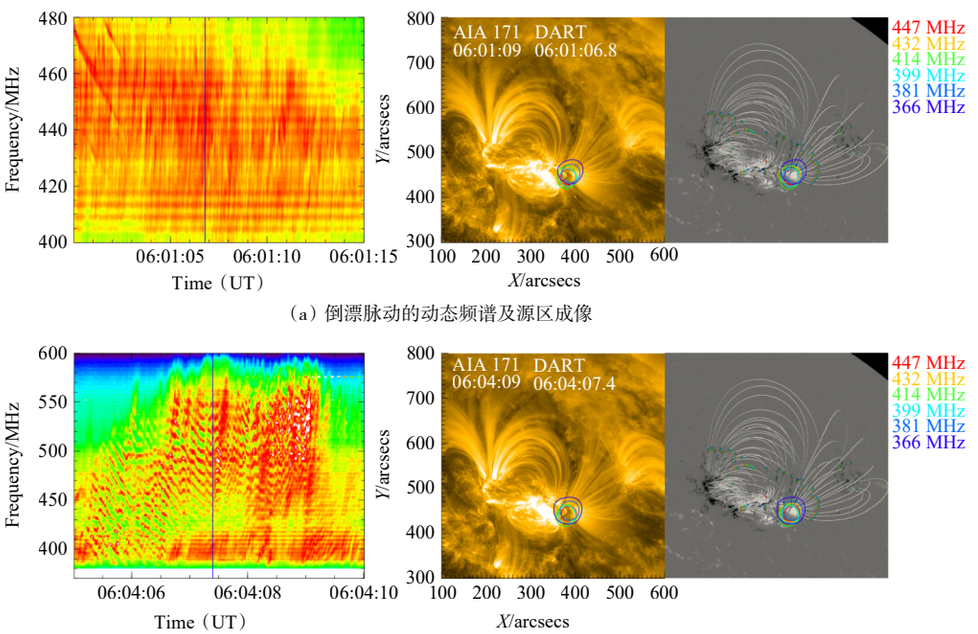
图 9　2024 年 5 月 5 日 IV 型暴动态频谱

率间隔小于 1 MHz。条纹与串珠同时呈现的双重周期性此前尚未被报道,体现了该类精细结构的独特性质。

2022 年以来 CBSm 已观测到多例此类事件。图 11(a)展示了一例由 35 个单条纹组成的链,整体呈波浪状,珠状结构出现在中间约 6 min 的时段。测量后发现链结构整体持续约 20 s,单条纹持续约 0.4~0.7 s,重现周期约 0.5~0.8 s 且随时间递增;条链频宽约 2~5 MHz,瞬时带宽约 1 MHz,频漂率约–7~–10 MHz/s;吸收结构强度相对于 IV 型连续谱下降约 30%。单条纹放大可分辨串珠的时间间隔约 0.1 s、频率间隔小于 1 MHz(图 11(b))。

针对上述特征,Li 等[45]提出了基于等离子体双共振(double plasma resonance, DPR)不稳定性的解释模型。在弱磁化等离子体中,束缚电子驱动 DPR 不稳定性产生高杂波,其频率满足 $\omega_{uh} \approx s\,\Omega_{ce}$,其中,$\omega_{uh}$ 为高杂波频率,s 表示谐波数,取正整数,Ω_{ce} 为电子回旋频率。等离子体密度或磁场的时间变化调制 ω_{pe}/Ω_{ce}(ω_{pe} 为电子等离子体频率),使其逐次改变一个单位(由 s 变为 s+1 或 s−1),产生相邻谐次高杂波,后经波模转换形成周期性条纹链。串珠状辐射增强则归因于频率约 10 Hz 的磁流体力学(magnetohydrodynamic, MHD)波对辐射过程的周期性调制。根据 Li 等[45]提出的模型,在背景密度数值上叠加振幅 20%、频率 10 Hz 的正弦密度扰动,便可复现沿条纹的串珠结构。

基于该模型和 CBSm 数据,可推断源区电子密度。进一步地,由相邻条纹的首尾频率间隔还可诊断

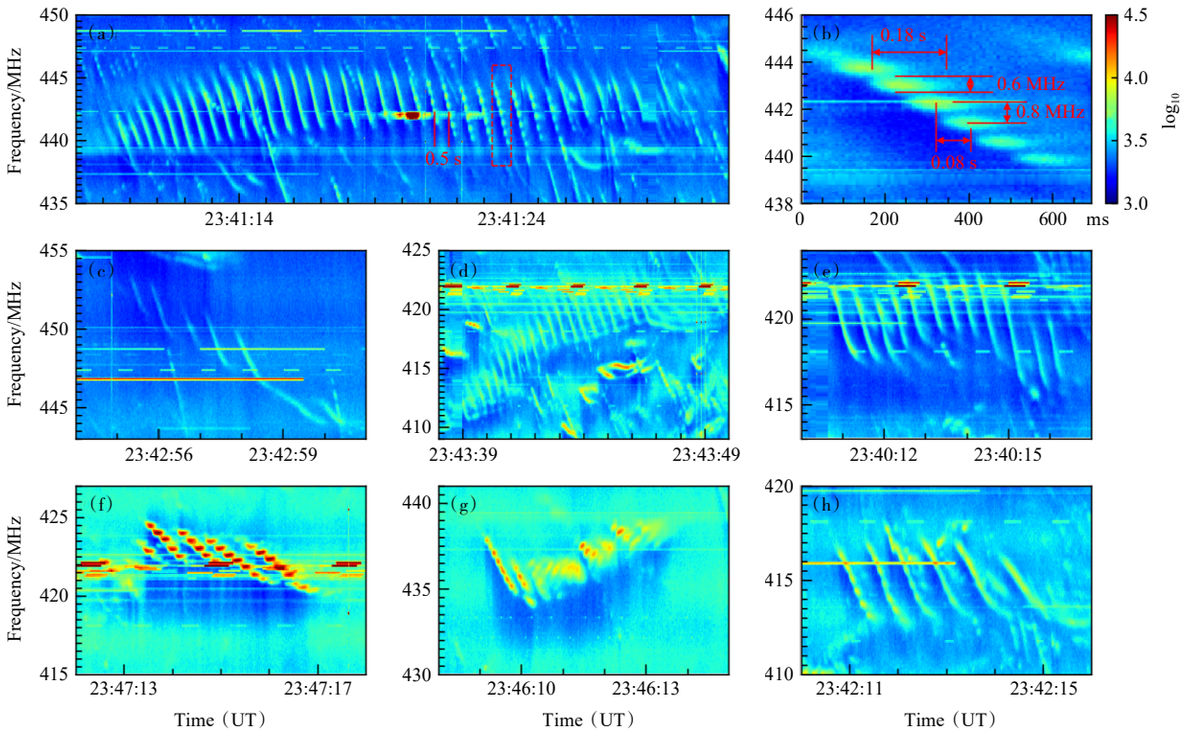


(a) 倒漂脉动的动态频谱及源区成像

(b) 斑马纹结构的动态频谱及源区成像

频谱图中的竖线表示 DART 射电成像观测时刻。AIA 171 Å极紫外图像和日震与磁场成像仪(Helioseismic and Magnetic Imager, HMI)视向磁图上叠加 DART 射电源等值线,等值线表示射电源强度最大值的 95%,HMI 视向磁图中还叠加了非线性无力场(nonlinear force-free field, NLFFF)外推磁力线

图 10　2024 年 5 月 5 日 IV 型暴中精细结构的动态频谱及源区成像



(a) 珠状条链动态频谱,珠状结构出现在中间部分,其中标注了条纹时间间隔;(b) 单条纹放大图((a)中红色虚线框),其中标注了串珠时间、频率间隔周期、串珠持续时间和频率宽度;(c)~(h) 具有不同频漂率的条纹链:负频漂率((c, f))、正频漂率((d, g))和零频漂率((e, h));(c)~(e) 无珠状结构的条纹链;(f)~(h) 含珠状结构的条纹链

图 11 2024 年 5 月 8 日珠状条链结构及其不同频漂特征

磁场强度。由此得到源区磁场 0.2~1.7 G,电子密度为 (1~7)×10^8 cm^{-3}。

6 其他频谱精细结构

6.1 斑马纹

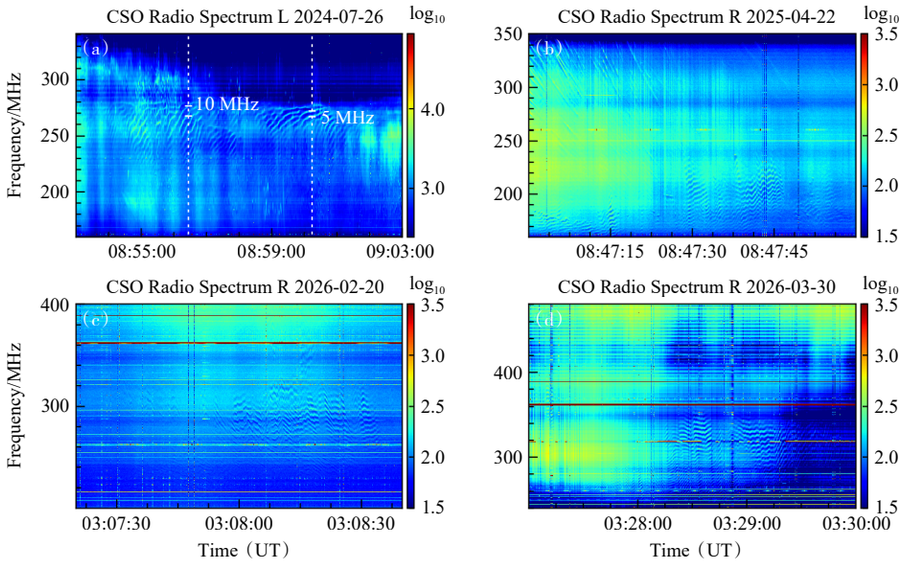
斑马纹是动态频谱上近乎等间距排列的平行窄带群,条纹间距通常在数 MHz 量级。在特定辐射模型下,条纹间距可用于约束磁场或密度梯度[46−48]。

在 CBSm 数据中,斑马纹有时与珠状条链共存于同一耀斑的不同时段,二者共享相似的频段和频率漂移特征[44],说明二者可能具有相近的辐射源环境和辐射机制。CBSm 的 76.29 kHz 频率分辨率能够精细测量斑马纹条纹间距及其变化,为进一步开展斑马纹统计分析,并与 DPR 模型预测结果进行定量比较、检验其形成机制,提供观测依据。

CBSm 共记录到 15 例斑马纹事件。条纹间距 3~10 MHz,相对间距 1%~4%,单条纹带宽 1~2 MHz,相对带宽 0.4%~0.7%。单次事件的条纹大约为十几到二十几条,总频率跨度通常为几十到上百 MHz。间距随频率变化的规律不一,部分事件中条纹间距随频率升高呈微弱增大趋势。图 12 展示了 4 例典型的斑马纹事件。

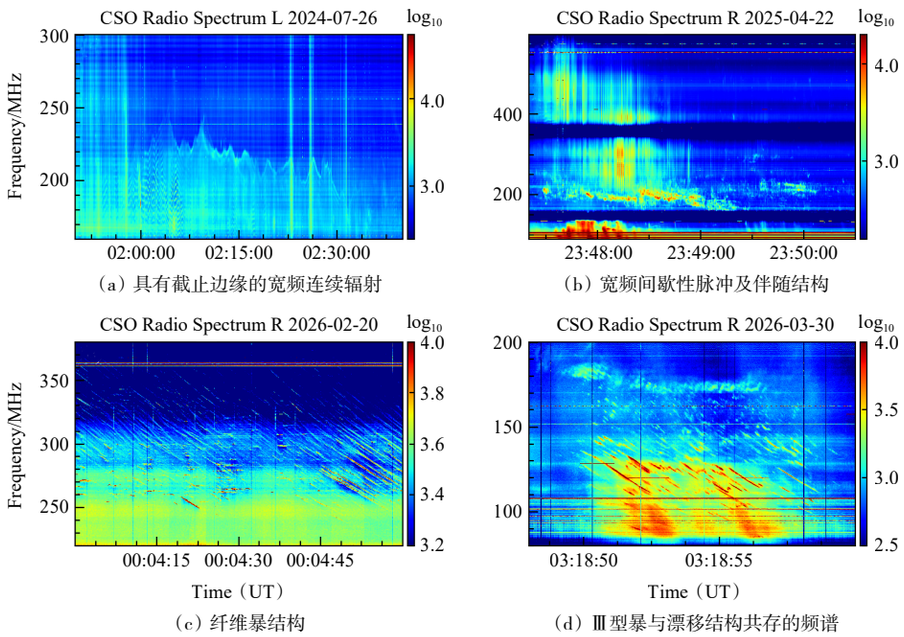
6.2 复杂频谱形态

CBSm 还观测到多种具有复杂形态、不易归类的频谱结构。图 13(a)展示了一种宽频连续辐射谱,其高频端呈现清晰的截止边缘(又称“蕾丝花边(lace bursts)”),边缘强度高于下方宽频辐射并伴随频率波动。在该辐射背景上出现间歇性类 III 型辐射增强并叠加斑马纹。图 13(b)的主体为宽频间歇性脉冲,位于高频段,其低频端呈现为 I 型爆发链,而更低频段则为 III 型暴。图 13(c)展示了 IV 型暴高频端出现的大量缓慢频漂条纹,也称为纤维暴。这些条纹频漂率彼此近似,相互叠加交织,并伴随更精细的点状辐射。图 13(d)中 III 型暴与漂移结构伴随出现,相互叠加,漂移结构的频漂率小于 III 型暴,部分呈现点状或团状形态。这些复杂频谱形态表明,射电暴的频谱结构远比传统分类所描述的更加丰富。



标出的两个频率表示相邻亮条纹的频率间隔

图 12　4 例典型的斑马纹动态频谱



（a）具有截止边缘的宽频连续辐射

（b）宽频间歇性脉冲及伴随结构

（c）纤维暴结构

（d）Ⅲ型暴与漂移结构共存的频谱

图 13　复杂射电暴动态频谱示例

7　结论

当前，对太阳射电暴的形态分类和物理机制已经形成了较为系统的认识。基于子午工程 II 期 CBSm 12 m 天线提供的高灵敏度，凭借 76.29 kHz 频率分辨率和 0.84 ms 时间分辨率，记录下多个太阳射电暴的新型频谱结构和已知爆发事件的新特征，主要包括：

1）自动识别并统计分析了约 10 万个 I 型爆发，其持续时间（约 0.7 s）、带宽（约 5.6 MHz）和峰值强度均呈幂律分布（指数 1~3.5），并发现 I 型爆发链具有亚秒至秒级准周期性。该幂律特征支持以 SOC 雪崩模型解释其能量释放过程，为约束 I 型暴相关粒子加速与辐射机制提供了新依据。

2）在 89 例 II 型暴中发现约 63% 的事件存在带分裂，γ 主要集中在 1.13~1.29，且与 CME 速度、耀斑级别无显著相关性。约 50% 的带分裂事件上下支形

态不对称：上支较宽，多呈竖漂鱼骨结构；下支较窄，多为准连续团块。同时发现基、谐频分裂行为及上下支强度存在差异，这些结果为理解带分裂物理起源提供了新的观测约束。此外，约 40% 的 II 型暴不伴随典型 CME，而是与喷流活动相关，表明喷流驱动激波是产生 II 型暴的重要途径之一。

3）在 35 例（共 502 对）尖峰-III 型暴对中，约 87% 表现为尖峰先于 III 型暴（提前 0.5~3 s），约 80% 存在 3~30 MHz 频率偏移，约 64% 尖峰偏振度高于 0.6，远高于 III 型暴的典型偏振度（<0.4）。尖峰簇形态包括点状、团块状、漂移状和弥散状等 4 类。超过 80% 事件与喷流活动相关。二者在偏振、漂移率和频率范围上的系统差异对应不同辐射环境，而时间间隔与频率偏移为两者间的物理联系与空间关联提供约束。

4）共观测到 37 例 IV 型暴事件，发现大量此前较少报道的间歇性脉冲结构，其平均相对带宽约 69%，周期约 709 ms，提示 IV 型暴爆发过程中的能量释放与辐射产生机制可能比传统认识更为复杂。进一步发现倒漂脉动与斑马纹可在同一事件中共存，二者源区位置一致，均位于正极性黑子上方的磁环足点处，且均为强左旋偏振、亮温超过 10^{10} K，表明二者均可能源自等离子体辐射机制。

5）发现了一种新型珠状条链精细结构，条链表现出<1 s 的条纹周期和约 0.1 s 的串珠周期，可由 DPR 不稳定性与 MHD 波动调制共同解释。基于观测数据与相关模型得到源区磁场约 0.2~1.7 G、电子密度约 10^8 cm^{-3}。

6）观测到 15 例斑马纹事件，条纹间距约 3~10 MHz，条纹带宽 1~2 MHz，总频率跨度通常为几十到上百 MHz，以及多类复杂频谱结构（多类型射电暴叠加、漂移结构交织、高频端频谱截断及间歇性增强等）。

得益于子午工程 II 期 CBSm 系统的高灵敏度、高时间和频率分辨率，所观测结果可为不同类型太阳射电暴的辐射机理和驱动过程研究提供新的观测约束和新的源区物理参数诊断方法。为理解记录的观测现象，未来需从粒子加速到射电辐射的多尺度数值模型扩展，并结合子午工程 II 期 DART 等多波段天地基数据，进一步分析相应爆发机理、高能电子加速过程、等离子体的不稳定性及其激发射电辐射的产生原理，以及磁场和密度结构调制辐射的频谱形态的作用机制等。

参考文献（References）

[1] Hey J S. Solar radiations in the 4–6 metre radio wave-length band[J]. Nature, 1946, 157(3976): 47−48.

[2] Payne-Scott R, Yabsley D E, Bolton J G. Relative times of arrival of bursts of solar noise on different radio frequencies[J]. Nature, 1947, 160(4060): 256−257.

[3] Wild J P, McCready L L. Observatioas of the spectrum of high-intensity solar radiation at metre wavelengths. I. The apparatus and spectral types of solar burst observed[J]. Australian Journal of Scientific Research Series A: Physical Sciences, 1950, 3(3): 387−398.

[4] Boischot A. Les émissions de type IV[C]//Paris Symposium on Radio Astronomy (IAU Symposium, Vol. 9). Stanford, Calif. : Stanford University Press, 1959: 186−187.

[5] Ginzburg V L, Zheleznyakov V V. On the possible mechanisms of sporadic solar radio emission (radiation in an isotropic plasma)[J]. Soviet Astronomy, 1958, 2: 653.

[6] Kundu M R. Solar radio astronomy[M]. New York: Interscience Publishers, 1965.

[7] McLean D J, Labrum N R. Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

[8] Elgaroy E O. Solar noise storms[M]. Oxford: Pergamon Press, 1977.

[9] Wild J P, Smerd S F, Weiss A A. Solar bursts[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1963, 1: 291.

[10] Chang S W, Wang B, Lu G, et al. Development of a 90–600 MHz meter-wave solar radio spectrometer[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2024, 272(1): 21.

[11] Kuznetsov A. A new type of fine spectral structure in the solar radio emission[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2025, 68(10): 109631.

[12] Melrose D B. A plasma-emission mechanism for type I solar radio emission[J]. Solar Physics, 1980, 67(2): 357−375.

[13] Bentley R D, Klein K L, van Driel-Gesztelyi L, et al. Magnetic activity associated with radio noise storms[J]. Solar Physics, 2000, 193: 227−245.

[14] Iwai K, Miyoshi Y, Masuda S, et al. Solar radio type-I noise storm modulated by coronal mass ejections[J]. The Astrophysical Journal, 2012, 744(2): 167.

[15] Li C Y, Chen Y, Wang B, et al. EUV and magnetic activities associated with type-I solar radio bursts[J]. Solar Physics, 2017, 292(6): 82.

[16] Yang Y Z, Ning Z J, Song Y X, et al. High-resolution observational features of type I solar radio bursts[J]. The Astrophysical Journal, 2025, 985(2): 257.

[17] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(4): 381−384.
[18] Holman G D, Pesses M E. Solar type II radio emission and the shock drift acceleration of electrons[J]. The Astrophysical Journal, 1983, 267: 837−843.
[19] Knock S A, Cairns I H. Type II radio emission predictions: Sources of coronal and interplanetary spectral structure[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2005, 110(A1): 2004JA010452.
[20] Cairns I H. Coherent radio emissions associated with star system shocks[M]//Miralles M P, Sánchez Almeida J. The sun, the solar wind, and the heliosphere. Berlin: Springer, 2011: 267.
[21] Feng S W, Du G H, Chen Y, et al. Simultaneous radio and EUV imaging of a multi-lane coronal type II radio burst[J]. Solar Physics, 2015, 290(4): 1195−1205.
[22] Lv M S, Chen Y, Li C Y, et al. Sources of the multi-lane type II solar radio burst on 5 November 2014[J]. Solar Physics, 2017, 292(12): 194.
[23] Morosan D E, Pomoell J, Kumari A, et al. Shock-accelerated electrons during the fast expansion of a coronal mass ejection[J]. Astronomy & Astrophysics, 2022, 668: A15.
[24] Zhang P J, Morosan D, Kumari A, et al. Spatially resolved radio signatures of electron beams in a coronal shock[J]. Astronomy & Astrophysics, 2024, 683: A123.
[25] Vasanth V, Chen Y, Michalek G. A wide-band high-frequency type-II solar radio burst[J]. Astronomy & Astrophysics, 2025, 702: A15.
[26] Smerd S F, Sheridan K V, Stewart R T. On split-band structure in type II radio bursts from the Sun[C]//Coronal Disturbances. Dordrecht: Springer Netherlands, 1974: 389.
[27] Smerd S F, Sheridan K V, Stewart R T. Split-band structure in type II radio bursts from the sun[J]. Astrophysical Letters, 1975, 16: 23−28.
[28] Du G H, Chen Y, Lv M S, et al. Temporal spectral shift and polarization of a band-splitting solar type II radio burst[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2014, 793(2): L39.
[29] Du G H, Kong X L, Chen Y, et al. An observational revisit of band-split solar type-II radio bursts[J]. The Astrophysical Journal, 2015, 812(1): 52.
[30] Treumann R A, Labelle J. Band splitting in solar type II radio bursts[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1992, 399: L167.
[31] Cairns I H. Fine structure in plasma waves and radiation near the plasma frequency in Earth's foreshock[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1994, 99(A12): 23505−23513.
[32] Nelson G J, Melrose D B. Type II bursts[M]//McLean D J, Labrum N R. Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths. Cambridge: Cambridge University Press, 1985: 333−359.
[33] Vršnak B, Aurass H, Magdalenić J, et al. Band-splitting of coronal and interplanetary type II bursts: I. Basic properties[J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 377(1): 321−329.
[34] Vršnak B, Magdalenić J, Aurass H, et al. Band-splitting of coronal and interplanetary type II bursts: II. Coronal magnetic field and Alfvén velocity[J]. Astronomy & Astrophysics, 2002, 396(2): 673−682.
[35] Vršnak B, Magdalenić J, Zlobec P. Band-splitting of coronal and interplanetary type II bursts: III. Physical conditions in the upper corona and interplanetary space[J]. Astronomy & Astrophysics, 2003, 413(2): 753−763.
[36] Hou Z Y, Tian H, Su W, et al. A type II radio burst driven by a blowout jet on the Sun[J]. The Astrophysical Journal, 2023, 953(2): 171.
[37] Cui Y L, Kong X, Li Z, et al. A solar jet-induced perturbation propagating through coronal loops and in-loop electron beam transport as indicated by type II and type N radio bursts[J]. Astronomy and Astrophysics, 2026, 706: A197.
[38] Benz A O, Jaeggi M, Zlobec P. Fine structure near the starting frequency of solar type III radio bursts[J]. Astronomy and Astrophysics, 1982, 109(2): 305−313.
[39] Benz A O, Csillaghy A, Aschwanden M J. Metric spikes and electron acceleration in the solar corona[J]. Astronomy and Astrophysics, 1996, 309: 291−300.
[40] Chang S, Li C, Wang B, et al. Type-III solar radio bursts with spike-like toppings[J]. Astronomy and Astrophysics, 2026, 710: A272.
[41] Mann G, Baumgaertel K, Chernov G P, et al. Interpretation of a special fine structure in type-IV solar radio bursts[J]. Solar Physics, 1989, 120(2): 383−391.
[42] Chernov G P. Unusual stripes in emission and absorption in solar radio bursts: Ropes of fibers in the meter wave band[J]. Astronomy Letters, 2008, 34(7): 486−499.
[43] Karlick M, Bárta M, Klassen A, et al. Sawtooth bursts: Observations and model[C]//Wilson A. Solar variability: From core to outer frontiers (ESA Special Publication). Noordwijk: ESA, 2002: 303−306.
[44] Li C Y, Chen Y, Wang B, et al. A novel fine spectral structure of solar radio bursts with periodic beaded stripes observed by CBSm of CMP-II[J]. Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 2025, 68(10): 109611.
[45] Li C Y, Chen Y, Wang B, et al. Coronal diagnostics via modeling periodic-beaded stripes of solar radio bursts[J]. The Astrophysical Journal, 2026, 1003(2): 131.
[46] Karlick M, Yasnov L V. Determination of plasma parameters in solar zebra radio sources[J]. Astronomy & Astrophysics, 2015, 581: A115.
[47] Tan B L, Yan Y H, Tan C M, et al. Microwave zebra pattern structures in the x2.2 solar flare on 2011 February 15[J]. The

Astrophysical Journal, 2012, 744(2): 166.
[48] Li C Y, Chen Y, Ni S L, et al. PIC simulation of double plasma resonance and zebra pattern of solar radio bursts[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2021, 909(1): L5.

Novel observations of solar radio bursts using high-resolution data of CBSm

CHEN Yao[1,2,3], LI Chuanyang[4], WANG Bing[1,2], CHANG Shuwang[1,2], KONG Xiangliang[1,2,3], NING Hao[1,2,3], NING Zongjun[5], YANG Yuzhi[5], LÜ Maoshui[1,2], CUI Yingli[1,2], ZHANG Zilong[1,2], YAN Fabao[1,2]

1. Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China
2. Shandong Key Laboratory of Space Environment and Exploration Technology, Weihai 264209, China
3. Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao 266237, China
4. College of Physics and Electronic Information, Dezhou University, Dezhou 253023, China
5. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract Since the start of routine observations in November 2022, the Chashan Broadband Solar radio spectrometer at Meter wavelengths (CBSm) of the Chinese Meridian Project Phase II has accumulated nearly one thousand meter-wave solar radio burst events. With its high time and frequency resolution, we carry out statistical and case studies of different burst types, and obtain a series of new findings. Type I bursts show power-law distributions in duration, bandwidth, and peak intensity. Among the Type II bursts observed, more than 60% exhibit band splitting, about 50% of the band-splitting events show asymmetric morphologies between the two branches, and about 40% of Type II bursts are associated with small flares or jets. Statistics of spike–Type III burst pairs reveal systematic polarization differences and time-frequency offsets between the two types of bursts. For Type IV bursts, a large number of reverse-drifting pulsations and a new fine spectral structure, beaded stripes combining the double periodicity of stripes and beads, are identified. These findings provide new observational constraints on coherent radio emission mechanisms and on the diagnosis of coronal magnetic field and density structures.

Keywords solar radio bursts; spectral fine structures; CBSm; Chinese Meridian Project Phase II; plasma emission

（责任编辑 傅雪）