从第 25 太阳活动周期的多源观测数据分析太阳射电爆发干扰导航事件的风险识别条件

刘逸飞[1] 董 亮[2*] 姜泽军[1] 黄文耿[3] 李牧迪[2,4] 王 晶[3]

1.（云南大学 云南昆明 650504）

2.（中国科学院云南天文台 云南昆明 650216）

3.（中国科学院国家空间科学中心 北京 100090）

4.（中国科学院大学 北京 100049）

*通讯作者：董亮（dongliang@ynao.ac.cn）

摘要 针对 SRB 威胁导航通信系统信道稳定性的问题，本文旨在明确强 SRB 事件的风险识别条件。基于第 25 太阳活动周期中 2022-2024 年的多源观测数据，结合典型 GNSS 受干扰事件，分析了 X-ray 爆发、F10.7 射电流量指数、太阳活动区面积与强 SRB 事件之间的关联特征。统计结果表明，F10.7 > 161.9 SFU、活动区面积 > 250 MSH 及日半面活动区总面积 > 1020 MSH 是强 SRB 发生的典型高风险背景。该阈值组合召回率约 74%，虚警率约 93%，更适用于高风险背景的初筛。案例分析发现，SRB 具有显著的邻近波段同步响应特征；但受限于频谱的分布范围和精细结构，固定频率（如 1415/2695 MHz）可能无法表征工作频段的流量变化。未来的预警应结合动态频谱，在构建工作频段阈值判别模型的同时，强化邻近波段的协同监测。

关键词 太阳射电爆发，X-ray，耀斑，太阳活动周，F10.7 指数，导航干扰，空间天气预警

中图分类号 P228，TN927

最终录用

Identification Criteria for Navigation Interference Events Caused by Solar Radio Bursts Based on Multi-Source Observations During Solar Cycle 25

Liu Yifei[1] Dong Liang[2*] Jiang Zejun[1] Huang Wengeng[3] Li Mudi[2,4] Wang Jing[3]

1.（Yunnan University, Kunming, 650504）

2.（Yunnan Astronomy Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, 650216）

3.（National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100090）

4.（University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049）

*Corresponding author: Dong Liang (dongliang@ynao.ac.cn)

* 中马空间遥感与中低纬度空间天气射电天文观测研究（2022YFE0140000）；云南省重点研发计划：面向南亚东南亚的科技创新中心建设专项：“云南省中马 HF-VHF 频段先进射电天文技术国际联合实验室”（202303AP140003）；乌鲁木齐市“红山科创英才”集聚计划科技“小组团”人才项目（B241018006）

投稿日期：2025-08-01

E-mail:liuyf@stu.ynu.edu.cn

Abstract Solar Radio Bursts (SRBs) are critical space weather events that pose substantial threats to the reliability and stability of navigation and communication system channels. Specifically, the electromagnetic noise generated during these bursts can drastically lower the Carrier-to-Noise Ratio (CNR) of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), leading to potential signal loss or positioning errors. To support effective risk identification for navigation systems, this study aims to clarify the specific background conditions and precursors associated with strong SRB events. This research is based on multi-source observation data from 2022 to 2024 during Solar Cycle 25, combined with typical GNSS interference events. By integrating statistical data with two representative cases of GNSS interference, the study systematically evaluates the correlation characteristics between X-ray bursts, the F10.7 radio flux index, solar active region area, and the occurrence of intense SRBs. Statistical results indicate a specific set of quantitative thresholds that define a high-risk background: an F10.7 index exceeding 161.9 Solar Flux Units (SFU), an individual active region area greater than 250 millionths of a solar hemisphere (MSH), and a total area of active regions on the visible solar hemisphere surpassing 1020 MSH. Retrospective analysis demonstrates that this threshold combination achieves a relatively high recall rate of approximately 74%, successfully flagging the majority of hazardous events. However, the combination also yields a high false alarm rate of roughly 93%. This disparity suggests that while these parameters effectively identify high-risk background environments, they are more suitable for preliminary screening of high-risk conditions rather than precise prediction. The study attributes this primarily to the spectral inconsistency of these events; although radio emissions associated with SRBs typically exhibit pronounced temporal synchronization across adjacent frequency bands, the frequency ranges involved differ substantially between events. Consequently, radio flux enhancements observed at fixed frequencies (e.g., 1415 and 2695 MHz) may fail to represent radio flux variations within operational frequency bands. Therefore, static background indicators should be viewed as preliminary risk screening. Accordingly, future warning strategies should integrate dynamic spectral observations, emphasize coordinated monitoring across adjacent frequency bands, and establish targeted, frequency-specific threshold models tailored to navigation system requirements.

Keywords Solar radio bursts, X-ray, Flare, Solar cycle, F10.7 Index, Navigation Interference, Space Weather Warning

最新录用

0. 引言

太阳射电爆发（Solar Radio Bursts，SRBs）是由耀斑、磁重联或太阳活动区中的非热电子加速产生的瞬态增强型射电辐射，通常覆盖数十到数千兆赫兹的频段。根据动态谱的频率漂移特征，SRB 可分为多种类型，同时也反映了不同的能量释放与传播机制：III 型爆发由高能电子束沿开放磁力线的传播触发，表现为从高频向低频的快速漂移；II 型爆发通常由日冕物质抛射（coronal mass ejection，CME）驱动的日冕激波产生，呈现向低频缓慢漂移的带状结构；IV 型爆发为弥散的连续辐射，往往与大型活动区或 CME 后续持续的能量释放有关。Ndacyayisenga 等[1, 2]指出在 2014-2015 年间的大部分 II 型爆发伴随 CME，此外约 37% 的 III 型爆发与耀斑相关；对 2010-2017 年间的 III 型爆发的统计表明，其发生频率与黑子数高度相关，同时支持了将射电观测应用于空间天气预警。Kumari 等[3]进一步指出在第 24 太阳活动周期中约 81% 的 IV 型爆发伴随白光 CME。随着第 25 太阳活动周期进入高峰期，空间天气事件显著增加，工作在 L 及其邻近频段的导航通信系统受 SRB 的干扰风险持续提升。太阳射电噪声会进入接收机天线的视场，当辐射亮温度超过 6000 K[4]时，会导致接收机载噪比（carrier-to-noise ratio，CNR）下降、失锁以及定位精度下降。2011-2017 年间的多次强 SRB 事件对全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）造成了干扰，部分接收机在爆发的高峰期无法正常捕获或维持卫星信号[5,6]；Bala 等[7]研究发现 1969-1999 年间每年均有数次强射电爆发导致的严重干扰事件；Chen 等[8]与 Cerruti 等[9]也指出 GPS 接收机的 CNR 在 SRB 事件期间明显下降，出现信号失锁的情况。此外，近期的研究进一步表明，即使在缺乏显著电离层扰动的情况下，SRB 也能直接影响 GNSS 信号的质量[10]。因此，提升对 SRB 事件的早期识别能力已成为空间天气预警的重要任务[11]。然而，现有研究多聚焦于单一因素，如耀斑强度或特定频段的射电响应[12,13]，缺乏对多源数据的系统性量化分析。

本文选取第 25 太阳活动周期中 2022 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日为研究时段，综合使用美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration，NOAA）的地球静止环境业务卫星（Geostationary Operational Environmental Satellite，GOES）提供的 X-ray 爆发数据，澳大利亚空间天气预报中心发布的太阳射电（1415 MHz 和 2695 MHz）流量数据，以及加拿大 Dominion 射电天文台和国家空间科学中心的廊坊 L&S 太阳射电流量精密监测望远镜记录的 10.7 cm 波长太阳射电辐射通量数据（F10.7 指数），以及引入活动区面积进行统计分析。根据 Bala 等[7]的统计，1000 太阳流量单位（solar-flux-unit，SFU，1 SFU = 1×10^{-22} W·m^{-2}·Hz^{-1}）是强干扰事件的合理经验阈值。根据董亮[14]基于香农公式推导出的 GNSS 接收机在 L 波段和 S 波段受 SRB 影响的流量阈值分布，计算得到第一四分位数为 1014.5 SFU。因此，本研究将射电流量峰值超过 1000 SFU 的事件视为强 SRB，并以此探讨 GNSS 干扰风险的识别条件。

X-ray 按能量范围可分为软 X 射线和硬 X 射线，对应了不同的物理背景和辐射机制。尽管在实际观测中两者的界限并不绝对，但在物理起源上存在明显差异。软 X 射线主要由热电子产生，反映了等离子体受热后的辐射行为；而硬 X 射线则多源于非热电子，如回旋

最终录用

共振或轫致辐射等。此外，不同辐射机制在频谱上的斜率存在明显差异。热轫致辐射的亮温度和流量随频率的变化较为平缓，热同步辐射通常在较高频的部分出现流量峰，幂律型非热辐射谱的斜率与电子能谱指数 δ 相关，相对论性辐射在高频端下降得更快。太阳耀斑演化的早期过程主要是热等离子体加热产生软 X 射线辐射，随着能量释放的持续，太阳局部磁场逐步增强，大量热电子在磁重联过程中被加速至非热区间，既驱动硬 X 射线的增强，也引发高亮温度的射电爆发[15]。因此，X-ray 的变化，特别是硬 X 射线的增强，是电子加速活动的重要前兆。

最新录用

1. 数据与方法

1.1 数据预处理

为确保多源观测数据在时间域上的一致性与统计分析的可靠性，本文在正式分析之前进行了系统的数据预处理。首先，对样本中的无效数据（以“//////”标记）进行转换与剔除。其次，对 X-ray 通量、F10.7 指数和活动区面积以及太阳射电流量的序列进行缺失值检测，同时剔除在非爆发时段超出均值 ± 3σ 的异常值。本研究对 X-ray 与射电流量采用线性插值对齐至 1 分钟分辨率。本研究对于缺失的数据分为短期与长期两种情况，对于长时间缺失的情况（主要出现在射电流量记录中），由于缺失时间超过序列的自相关时间尺度，预测不稳定，因此在分析中保持缺失并在后续统计中剔除；对于少量缺失时间较短的样本（如 F10.7 指数和活动区面积的间断观测），为维持时间序列的连续性与短期趋势的一致性，采用自回归积分滑动平均模型（Auto Regressive Integrated Moving Average，ARIMA）进行插补。验证表明，插补后的均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）显著小于原序列的标准差，表明在保持了信号变化特征的同时未引入系统偏差。

1.2 X-ray 爆发数据统计

太阳耀斑等级通常根据 GOES 卫星在 1-8 Å 的软 X 射线通量（Soft X-ray Flux，SXR Flux）峰值进行划分（见表 1）。其中，C 级耀斑虽然在观测上较为常见，但通常对地球空间环境的影响有限；M 级耀斑的能量则足以导致短波通信中断或导航信号误差增加；而 X 级耀斑代表了极端的能量释放，往往伴随 CME、质子事件以及强烈的射电爆发。基于 NOAA 发布的 GOES 卫星观测数据，在 2022 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日共记录到 1556 次 M 级及以上强耀斑事件，其中 M 级事件 1483 次，占总数的 95.31%；X 级事件 73 次，占比 4.69%。

表 1 太阳耀斑等级划分标准

Table 1 Classification criteria of solar flare classes

等级	峰值通量范围（W/m²）	强度
A	$< 10^{-7}$	极弱
B	$10^{-7} \sim 10^{-6}$	微弱
C	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	中等
M	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	较强
X	$> 10^{-4}$	极强

从年度分布来看（见表 2），虽然 2023 年强耀斑事件的总数较 2022 年有所增加，但 X 级耀斑所占的比例仍然较低。然而，2024 年全年强耀斑总数超过前两年总和的 1.6 倍，且 X 级耀斑的比例明显上升，这反映出该年度太阳活动的急剧增强。进一步的分析显示，2024 年强耀斑活动不仅频繁，而且呈现阶段性集中爆发的趋势。例如，仅在 2024 年 5 月便观测到 157 次强耀斑事件，其中 X 级事件 20 次，占全年 X 级事件总数的 37.74%；此外，7 月与 8 月的强耀斑数量也均超过 100 次，构成了当年太阳活动的多峰结构。值得关

最新录用

注的是，在 2024 年 10 月 3 日 12:18 UTC 的 X 级耀斑的软 X-ray 通量峰值高达 9.0×10^{-4} W/m²。

表 2 X-ray 爆发事件统计分析表

Table 2 Statistical summary of X-ray flare events

年份	强耀斑次数	M 级次数	占比	X 级次数	占比
2022	207	200	96.62 %	7	3.38%
2023	381	368	96.59 %	13	3.41%
2024	968	915	94.52 %	53	5.48%

综上所述，2024 年的耀斑无论是在频率还是强度方面，均显示出太阳活动显著增强，表明处于第 25 太阳活动周期的高峰期。NOAA 的空间天气预报中心[16]（Space Weather Prediction Center，SWPC）于 2023 年 12 月对 2019 年预测的太阳活动将在 2025 年前后达到顶峰的结论进行了修订，认为高峰期已提前至 2024 年 1 月至 10 月之间（见图 1）。本研究的结论与 SWPC 修订后的时间窗口基本一致。

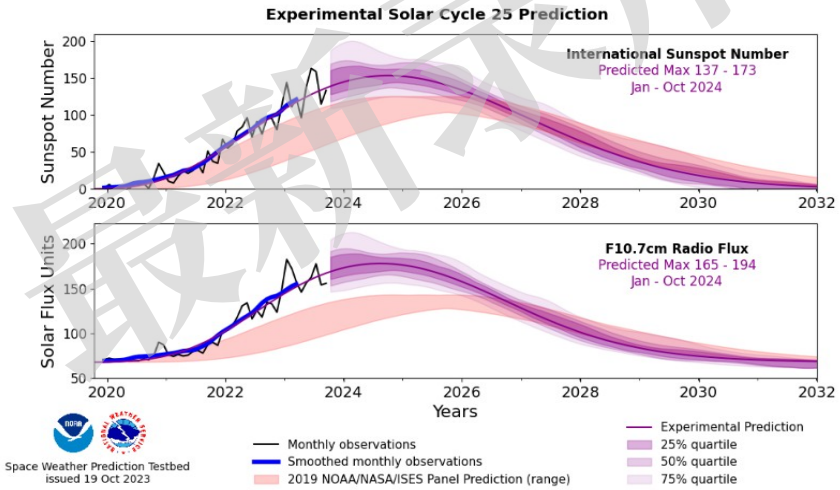


图 1 SWPC 于 2019 与 2023 年对第 25 太阳活动周期高峰期的预测对比

Fig.1 Comparison of Solar Cycle 25 peak forecasts by SWPC in 2019 and 2023

1.3 射电事件统计

本研究采用迭代中位数法（Iterative Median Method）进行射电爆发事件的检测。中位数（median）表示数据的中心位置，中位数绝对离差（Median Absolute Deviation，MAD）用于衡量数据的分布范围。该方法能够根据射电流量的变化检测事件的峰值，并通过对阈值进行动态调整以避免误判。具体过程为利用中位数估算序列的基线（baseline），以 MAD 衡量序列的波动性，通过两次迭代计算，即初步计算中位数和 MAD 获得粗略的序列基线和波动范围，再重新计算中位数和 MAD 来排除短暂弱峰的影响，得到修正后的基

线与噪声水平；为避免在背景极度稳定的条件下造成误判，引入最小 MAD 阈值，当 MAD 小于该阈值时，认为数据稳定，不判定为爆发，在本研究中该阈值取 1.5；然后设置最终判定阈值：

$$final_{threshold} = baseline + n_{MAD} \times MAD \quad (1)$$

其中 n_{MAD} 为阈值倍数参数，用于调节算法的敏感性，在本研究中取 3.0。根据该算法，对每个样本分别在 1415 MHz 与 2695 MHz 频段进行独立检测，当任一频段的射电流量超过最终阈值时，则判定为阳性事件，同时输出基线、MAD 和阈值等统计信息以供查验。

对程序自动判定的结果进行人工复核后，本研究将事件分为三类：瞬时爆发（burst）、持续事件（sustained）和观测伪像（artifact）。其中瞬时爆发是本文关注的目标事件类型。持续事件则作为独立类别保留，用于区分算法的误判与可能存在的持续辐射过程。持续事件的形成可能源于三种情况：（1）基线的缓慢上升；（2）物理上存在的持续射电辐射（如 IV 型爆发）；（3）观测仪器基线漂移造成的伪信号。未来可结合频谱形态、极化特征以及成像观测进一步明晰持续事件的物理来源，同时区分出观测伪像。程序判定为有效的 396 个样本经人工复核后得到 64 个持续事件和 102 个观测伪像；程序判定为无效的 308 个样本经人工复核发现其中 39 个实际为爆发事件，同时 24 个实际为持续事件据此得到程序的敏感度（召回率）为 85.50%，精确度为 58.08%，特异度为 61.84%，总体准确率为 70.88%，假阴性率为 14.50%。

这些结果表明，此自动方法的漏检率较低，能够识别大多数瞬时爆发，但仍存在中等比例的虚警，主要原因是将持续事件和观测伪像误判为瞬时爆发。基于上述分析，我们认为应提高 n_{MAD} 以减少稳定背景下的误判，同时增加多次筛选流程（如基于持续时间、频谱形态或人工复核等途径）以在应用层面降低虚警率。

1.4 F10.7 指数统计

F10.7 指数，又称为 10.7 厘米太阳射电流量（对应频率约为 2800 MHz），是表征太阳整体活动水平的重要指标之一。该指数自 1947 年以来由加拿大国家研究委员会持续记录，是目前空间天气领域应用最广泛的代理参数之一。F10.7 指数反映了太阳高层大气（包括色球层和过渡区）射电辐射的强度，其变化呈现出明显的周期性[17]：一是与约 11 年的太阳活动周期相当的持续时间，反映了太阳内部磁场结构与动力过程的演化；另一类为约 27 天的短周期波动，反映了太阳表面大气的活动结构（如日珥）随自转的变化情况[18]。此外，作为估算太阳的远紫外（FUV）与极紫外（EUV）辐射强度的重要代理指标，F10.7 指数被广泛应用于热成层（又称热层）和电离层的建模研究[19]。具体而言，地球热层大气密度的变化在很大程度上受太阳短波辐射和太阳风的耦合驱动，而 F10.7 指数因其连续性和易获取性，通常被用作短波辐射强度的代表参数[20]。

根据历史经验统计，F10.7 指数的年均值低于 90 SFU 通常对应太阳低活动年，90 至 180 SFU 为中等活动年，而年均值高于 180 SFU 则表征太阳进入高度活动期[21]。尽管这一划分标准并非绝对，但在研究太阳活动对电离层、大气密度及卫星通信系统的影响时，具有一定的参考意义。

录稿录用

1.5 太阳活动区面积统计

太阳活动区是太阳表面以黑子群为主体、磁场活动高度集中的区域，是耀斑、射电爆发及 CME 等剧烈活动的主要发生源，其面积反映了该区域内磁能积聚的规模与释放潜力，单位为太阳半球面积（millionths of solar hemisphere，MSH）。

为便于统计分析，本文将活动区面积划分为三个等级：小型活动区（面积 < 100 MSH）、中型活动区（$100\ \text{MSH} \leq$ 面积 $\leqslant 500$ MSH）以及大型活动区（面积 > 500 MSH）。虽然该分级方式主要是为了处理数据与识别趋势的便利性，并不严格对应物理临界阈值，但在大尺度统计分析中具备良好的区分度与适应性。

最新录用

2. 统计结果

2.1 SRB 与 X-ray 爆发的时间关联

在 2022 至 2024 年间记录的 1556 次 X-ray 爆发中，明确伴随 SRB 的有 269 次，占比 17.29%。其中 2022 年 36 次，2023 年 77 次，2024 年则显著上升达到 156 次，是前两年之和的约 1.4 倍。这一趋势与 2024 年 X-ray 爆发次数也达到顶峰的情况相符，反映出太阳活动增强期间的射电响应更为频繁。其余 1287 次未监测到射电流量响应则说明太阳活动虽频繁，但并非都会引发射电爆发。综上所述，SRB 与 X-ray 爆发存在一定相关性，但并不完全对应。

在 269 次 SRB 事件中，大部分都与 X-ray 爆发呈现高度同步性，如表 3 和表 4 所示。高达 94.42% 的 SRB 事件在 X-ray 爆发开始后的 1 分钟内出现，这表明 X-ray 爆发的起始点是监测 SRB 事件的可靠触发信号。不同步的事件中仅有 1 次（占比 0.37%）的延迟超过了 1 小时，达到了 1.16 小时，该事件发生于 2024 年 8 月 9 日。这些延迟事件提示，极少数 SRB 滞后的非典型事件可能涉及非同步的电子加速机制，驱动其产生的能量释放过程并非与 X-ray 相同步。此外，不同射电频段间的响应虽然整体同步，但也存在一定的独立性。如在 2023 年 4 月 6 日的事件中，2695 MHz 的射电流量与 X-ray 通量响应同步，而 1415 MHz 则延迟了 2 分 27 秒。

表 3 射电爆发与 X-ray 爆发开始时间同步次数的分布统计表

Table 3 Distribution of coincidence counts between radio burst onsets and X-ray flare onsets

时间窗口	事件数	占比
≤ 1 min	254	94.42%
≤ 2 min	256	95.17%
≤ 5 min	262	97.40%
≤ 10 min	263	97.77%

表 4 射电爆发晚于 X-ray 爆发开始时间延迟的分布统计表

Table 4 Distribution of delays where radio burst onsets follow X-ray flare onsets

延迟区间	事件数	占比
> 1 min	15	5.58%
> 2 min	13	4.83%
> 5 min	7	2.60%
> 10 min	6	2.23%
> 60 min	1	0.37%

2.2 强 SRB 事件的响应分析

本研究进一步在 269 次 SRB 事件中，筛选出 27 次射电流量峰值超过 1000 SFU（约占 SRB 事件总数的 10.04%，占全部 X-ray 爆发事件的 1.74%）的强射电爆发事件进行分

最新录用

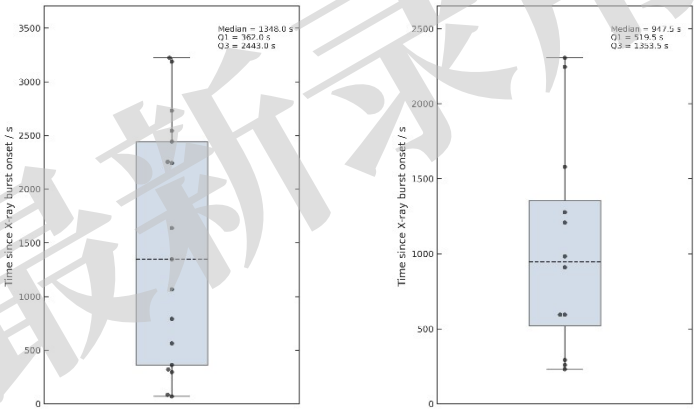
析。其中仅 2024 年 5 月 9 日与 2024 年 10 月 26 日的事件中 1415 MHz 和 2695 MHz 频段都出现了强射电爆发。

根据 2.1 节的结论，绝大多数 SRB 事件与 X-ray 爆发的开始时间相同，因此 X-ray 爆发的开始时间可视作 SRB 事件的开始时间。考虑到爆发的突然性和暂现性，具有非平稳随机信号特征，因此本文未采用互相关函数进行分析，而是通过提取事件的关键参数构建统计分布图来反映不同频段射电流量的特征值。在此定义两个关键参数：

峰值出现时间：从 X-ray 爆发开始到射电流量达到峰值的时间，反映了事件的物理演化尺度；

阈值穿越时间：从 X-ray 爆发开始到射电流量首次超过 1000 SFU 的时间，反映了风险识别的有效提前量（Lead Time）。

峰值出现时间的统计结果（见图 2）显示，1415 MHz 频段的射电流量达到峰值的时间分布的中位数为 1348.0 秒（约 22.5 分钟），2695 MHz 频段的射电流量达到峰值的时间分布的中位数为 947.5 秒（约 15.8 分钟）。这表明强射电爆发的能量释放过程需要持续积累，也反映了磁重联过程中电子由热态向非热态转换的加速机制的特征，且强爆发事件往往伴随更显著的磁能储存与释放特征。这类高强度并发事件虽然属于少数，但是对导航系统的干扰风险极高，值得重点关注。



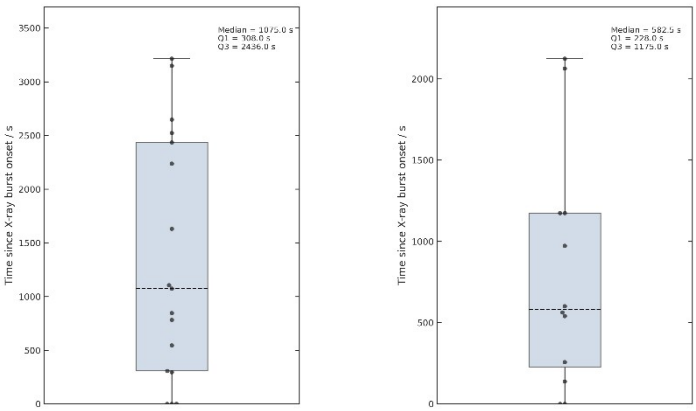
(a) 1415 MHz **(b) 2695 MHz**

图 2 峰值时间分布

Fig.2 peak time distribution

从预警角度看，阈值穿越时间是评估时效性的核心指标。阈值穿越时间的统计结果（见图 3）显示，2695 MHz 射电流量越过阈值的时间分布的中位数仅为 528.5 秒（约 8.8 分钟），显著快于 1415 MHz 的 1075.0 秒（约 17.9 分钟）。尤其值得注意的是，2695 MHz 越过阈值的时间分布的第一四分位数（Q1）仅为 228.0 秒（约 3.8 分钟），这意味着 25% 的强爆发事件在 X-ray 爆发开始后的 4 分钟内即可对临近该波段的导航通信构成威胁。

最新录用



(a) 1415 MHz **(b) 2695 MHz**

图 3 首次越过阈值相对时间分布

Fig.3 Distribution of the first-passage time for radio flux to exceed the threshold

2.3 强 SRB 事件的太阳背景关联

为构建事前风险的识别条件，本文首先绘制了 2022-2024 年间 F10.7 指数的连续变化图（见图 4）。结果显示，27 次强 SRB 事件大多数发生在 F10.7 指数处于中高的阶段，说明 F10.7 指数作为背景参数具有重要意义。然而，其中仍有部分事件的 F10.7 指数值落在阈值以下，这提示仅使用 F10.7 指数难以构建可靠的预警条件，需要与其他参数结合。

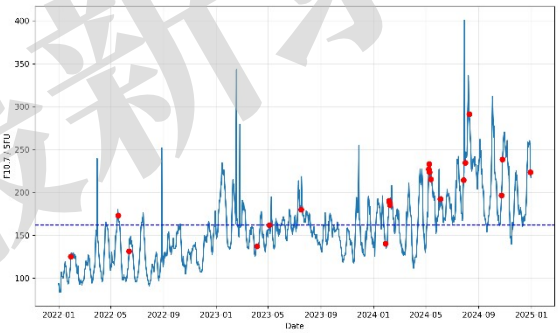


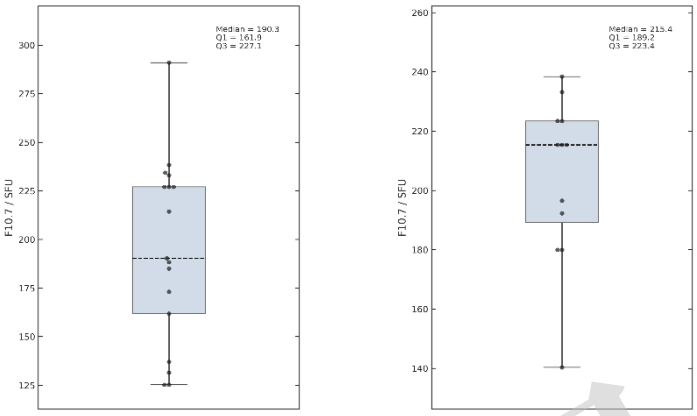
图 4 2022 至 2024 年 F10.7 射电流量指数时序图。红色圆点表示强 SRB 事件，水平虚线表示 F10.7 = 161.9 SFU。

Fig.4 Time series of the F10.7 Solar Radio Flux Index in 2022-2024. Red dots represent strong SRB events; the horizontal dashed line indicates F10.7 = 161.9 SFU.

本文进一步分析了这 27 次事件当日的太阳活动背景参数，包括 F10.7 指数、事件来源活动区的面积，并采用日面活动区总面积作为补充。这样能有效避免爆发对应的活动区面积存在缺失的情况，以及与同为日面指标的 F10.7 指数在物理上保持一致性。同时，本文在以两个频段的第一四分位数（Q1）中的较小值这一最宽松准则来选取阈值，以保证风险识别的阈值组合尽可能不遗漏强爆发事件。

F10.7 统计结果（见图 5）显示，1415 MHz 强射电爆发事件的 F10.7 指数分布的 Q1 值为 161.9 SFU，而 2695 MHz 的为 189.2 SFU；事件来源活动区的面积分布的统计结果

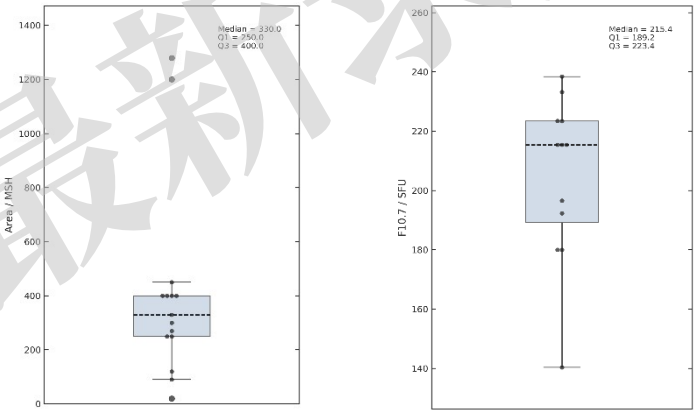
（见图 6）显示，1415 MHz 强射电爆发事件对应的活动区的面积分布的 Q1 值为 250 MSH，2695 MHz 的为 395 MSH。日面活动区总面积分布的统计结果（见图 7）显示，1415 MHz 强射电爆发事件当日的日面活动区总面积的 Q1 值为 1020 MSH，2695 MHz 的为 1037.5 MSH。综上，本文最终采用的风险识别阈值组合为：F10.7 等于 161.9 SFU，活动区面积为 250 MSH，日面活动区总面积为 1020 MSH。



(a) 1415 MHz **(b) 2695 MHz**

图 5 强 SRB 当日 F10.7 指数分布

Fig.5 Distribution of F10.7 index on days with strong SRBs

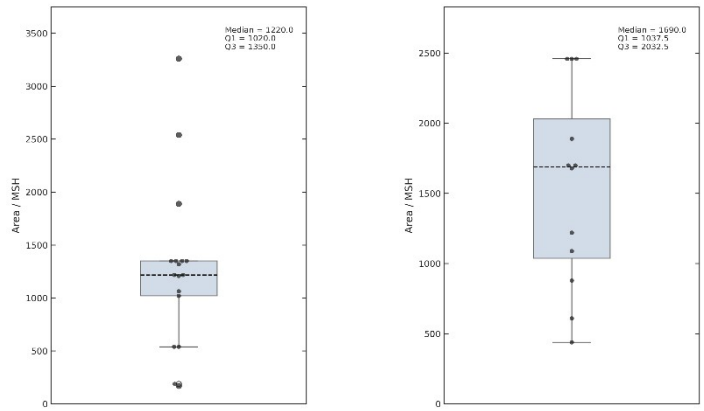


(a) 1415 MHz **(b) 2695 MHz**

图 6 强 SRB 当日活动区面积分布

Fig.6 Distribution of active region areas on days with strong SRBs

最新录用



(a) 1415 MHz **(b) 2695 MHz**

图 7 强 SRB 当日活动区总面积分布

Fig.7 Distribution of total active region area on days with strong SRBs

2.4 风险识别指标的有效性评估

为检验该阈值组合的有效性，本研究计算了其召回率（Recall），即风险识别条件成功命中的事件数占总数的比例。在全部 27 次强 SRB 事件中，我们使用 F10.7 指数大于等于 161.9 SFU、活动区面积大于等于 250 MSH 和日面活动区总面积大于等于 1020 MSH 的条件进行回溯检验，结果见表 5。

表 5 不同指标及组合的召回率比较

Table 5 Comparison of Recall Rates for Different Indicators and Their Combinations

指标	F10.7	活动区面积	日面活动区总面积	F10.7 & 活动区面积	F10.7 & 日面活动区总面积
命中（True Positive，TP）总数	22	21	20	18	20
漏报（False Negative，FN）总数	5	3	7	9	7
召回率	81.48%	87.50%	74.07%	66.67%	74.07%

为了在鲁棒性较高的情况下尽可能避免遗漏强爆发事件，本文最终采用 F10.7 指数和日面活动区总面积的 Q1 值作为阈值组合。虽然该阈值组合在召回率上表现较好，能够覆盖约 74% 的强 SRB 事件，但该组合在非爆发期的表现（如虚警率）将在 3.1 节中结合全样本数据进一步讨论。

最新录用

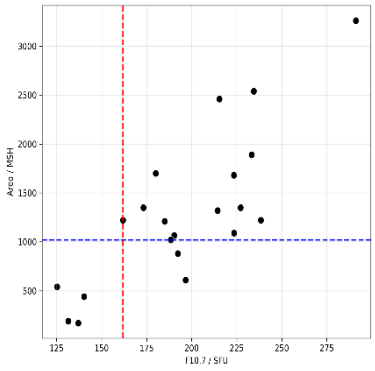


图 8 强 SRB 事件当日 F10.7 指数与日面活动区总面积分布图。黑色圆点表示 27 次强 SRB 事件，竖直虚线表示 F10.7 = 161.9 SFU，水平虚线表示日面活动区总面积为 1020 MSH。

Fig.8 Scatter plot of the F10.7 index versus the total solar active region area on days with strong SRB events. Black dots represent 27 strong SRB events; the vertical dashed line indicates F10.7 = 161.9 SFU; the horizontal dashed line indicates the total solar active region area of 1020 MSH.

2.5 两次 SRB 干扰导航通信的典型事件分析

为评估前文提出的 F10.7 指数、日面活动区总面积以及 SRB 与 X-ray 爆发时序等指标在实际过程中的适用性与稳定性，本文选取 2024 年两次典型的导航受干扰事件，对上述指标进行跨参数验证。需要强调的是，这两次事件仅作为案例，目的是展示物理现象和时序特征，进一步的分析需在更多的事件样本上进行。

2.5.1 2024 年 5 月 9 日 SRB 事件分析

2024 年 5 月 9 日 8:45-10:00 UTC 期间，太阳活动区出现 X 1.1 级耀斑，引发了射电爆发。GOES 卫星记录的数据显示，该事件中的软 X 射线通量在约 9:20 UTC 达到峰值（见图 9[22]）。与此同时，射电流量在多个频率通道上都出现了明显增强，其中 1415 MHz 通道的射电流量峰值达到约 1900 SFU，2695MHz 更是达到 2500 SFU（见图 10）；并且 1426.8 MHz 也达到约 1800 SFU（见图 11）。当日的 F10.7 指数为 233.2 SFU，日面活动区总面积达到 1890 MSH，均超过本文提出的潜在风险阈值。

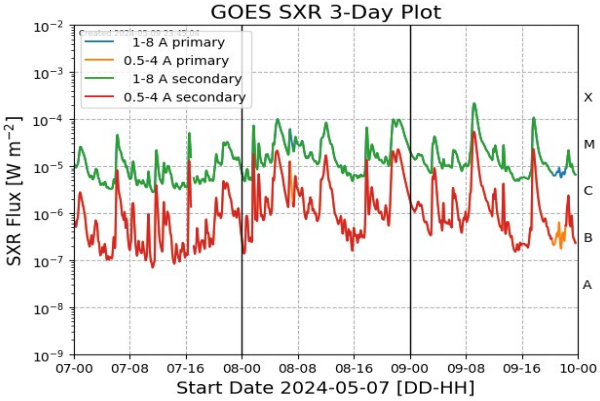


图 9 2024 年 5 月 7 日至 9 日 GOES 软 X 射线三日通量演化图[22]

最新录用

Fig.9 GOES Soft X-Ray Flux Evolution from 7 to 9 May 2024[22]

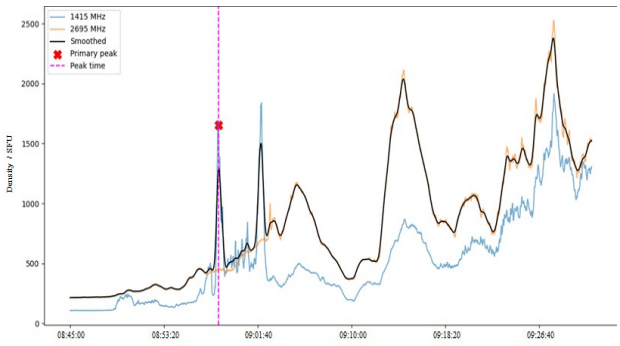


图 10 2024 年 5 月 9 日的事件中 1415 MHz 和 2695 MHz 射电流量演化图

Fig.10 Time profiles of radio flux at 1415 MHz and 2695 MHz during the May 9, 2024 event

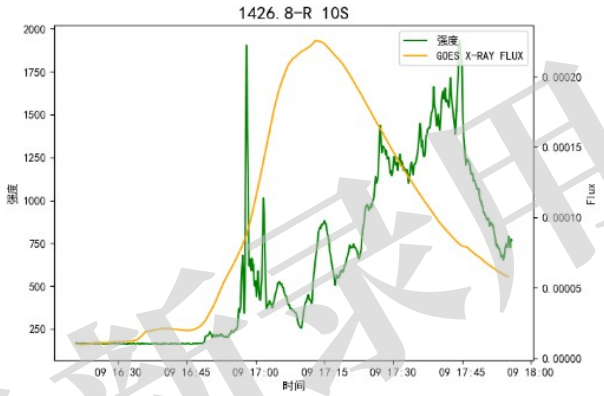


图 11 基于 30 秒采样数据的 1426.8 MHz 太阳射电爆发与 X-ray 通量时序对比

Fig.11 Time-series comparison Between 1426.8 MHz Solar Radio Burst and GOES X-Ray Flux based on 30s sampling data

北斗地基接收站在约 9:00 UTC 时，监测到 CNR 瞬时降低约 5 dB，且干扰持续了数分钟（见图 12）。这一变化与射电流量的快速增强在时间上高度一致，表明了 SRB 对导航信号具有显著的即时影响。尽管本次事件未造成信号失锁，但信道的短时饱和足以对高精度导航构成风险。

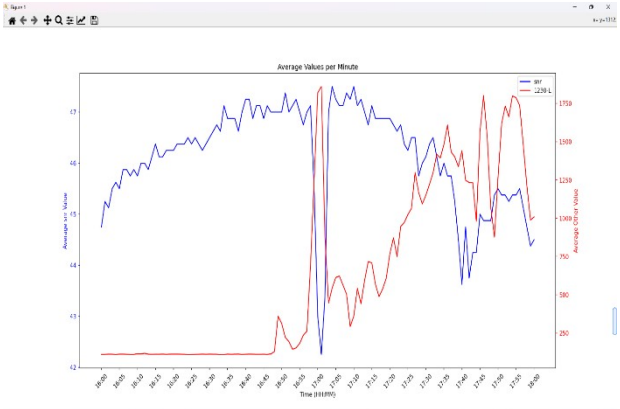


图 12 北斗导航系统载噪比与太阳射电爆发流量变化关系

最新录用

Fig.12 Variations of BeiDou CNR and Solar Radio Burst Flux

2.5.2 2024 年 7 月 28 日 SRB 事件分析

另一典型事件发生于 2024 年 7 月 28 日 1:30-4:00 UTC 期间，太阳活动区出现 M 1.1 级耀斑（见图 13[23]），并伴随多频段射电流量的快速增强。当日 F10.7 指数为 214.4 SFU，活动区面积为 1320 MSH，也均超过本文设定的风险阈值组合。GOES 卫星的数据显示，1-8 Å 软 X 射线通量在约 2:00 UTC 时突增并达到初始峰值，与此同时，1520 MHz 通道的射电流量也迅速升高，随后两者短暂回落，并在约 4:00 UTC 几乎同步进入第二轮增强阶段，射电流量迅速攀升至约 2600 SFU 的峰值（见图 14），展现出高强度 SRB 的典型特征。

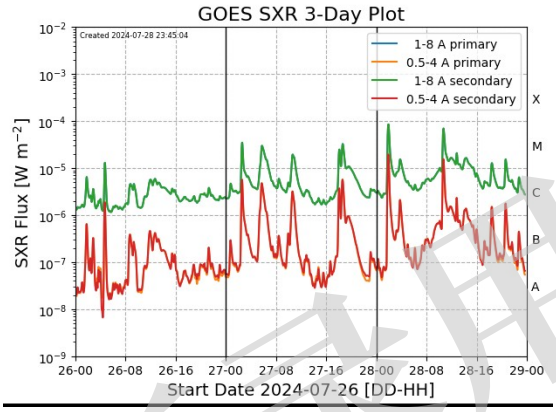


图 13 2024 年 7 月 26 日至 28 日 GOES 软 X 射线三日通量演化图[23]

Fig.13 GOES Soft X-Ray Flux Evolution from 26 to 28 July 2024[23]

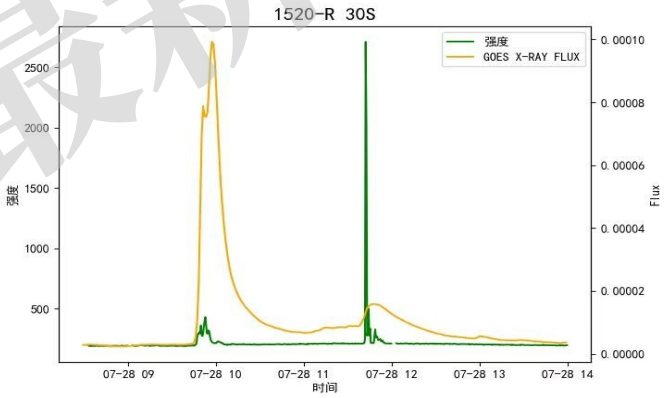


图 14 1520MHz 波段 30 秒采样太阳射电爆发与 X-ray 通量对应分析

Fig.14 Time-series comparison Between 1520 MHz Solar Radio Burst and GOES X-Ray Flux with 30-Second Sampling

事件发生期间，北斗系统导航的信号质量受到明显影响，L 波段通道的 CNR 出现约 3 dB 的瞬时下降，持续数分钟后恢复（见图 15）。尽管此次事件同样未造成接收信号失锁，但是高精度定位与授时服务已受到实质性影响，这在依赖导航定位的连续性与稳定性的应用场景中更为显著。

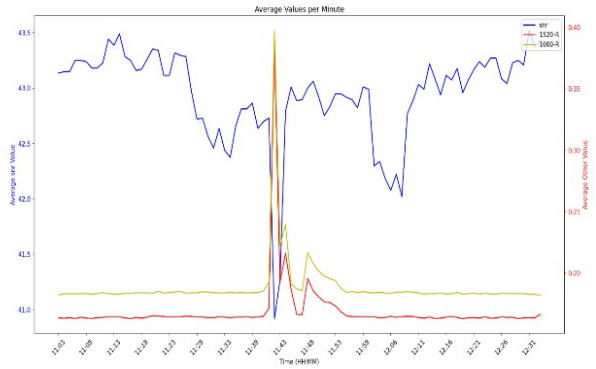


图 15 北斗导航系统载噪比与太阳射电爆发流量变化关系

Fig.15 Variations of BeiDou CNR and Solar Radio Burst Flux

最新录用

3. 讨论

强 SRB 事件往往是在复杂的太阳活动背景下产生的，涉及多种物理量的协同演化。因此，在统计量化的基础上，需要从阈值有效性、频谱差异性以及样本局限性等方面进一步讨论本研究得到的结论的适用性与边界。

3.1 组合阈值效能与局限性

前文提出的 F10.7 指数与日面活动区总面积的组合阈值在对已知的爆发事件进行的回溯检验中表现出较高的召回率。为评估其适用性，我们将其应用于 2022-2024 年间的样本数据，在剔除活动区面积记录缺失的样本后，总数为 1087 天。结果显示，该阈值组合共触发预警 285 次，其中命中 20 次，召回率为 74.07%，但精确率仅为 7.02%，虚警率高达 92.98%。这表明，该阈值组合不足以独立推断出强 SRB 的发生，更适合用于识别太阳活动的高风险背景，作为分级预警体系中的第一级（关注级）；而具体的爆发时刻和强度（警报级）则需依赖实时频谱监测进行确认。这种分级处理能够有效平衡漏报风险与响应成本。该结论与既往的对太阳活动的统计研究一致，即在太阳活动旺盛时，F10.7 指数与活动区面积处于持续高位，而强 SRB 仍属于小概率事件。因此，仅依赖静态的背景阈值难以构建有效的预警模型。要降低虚警率，必须结合实时的动态量（如 X-ray 流量变化率、动态频谱特征等）。

3.2 频谱响应的非一致性分析

除背景条件外，射电爆发在不同频段响应的非一致性是影响风险识别准确率的另一关键因素。以 2.5.1 节中分析的事件为例，该事件中 1230 MHz、1426.8 MHz 以及 1415 MHz 和 2695 MHz 均在时间上表现出显著的同步性，呈现出典型 III 型爆发的特征以及随后持续的能量释放过程。类似地，2.5.2 节中事件的背景参数（F10.7 指数、日面活动区总面积）均超过本文提出的统计阈值，1520 MHz 和 1620 MHz 射电流量也表现出高度一致的特征，但 1415 MHz 和 2695 MHz 在同一时段均未观测到流量跃升。这说明该事件的频率覆盖范围较小，两个固定频点偏离了核心区域，这也造成了对强 SRB 事件风险背景的评估结果存在偏差。

综上所述，由于 SRB 存在复杂的频谱演化（如频率漂移、窄带尖峰等），基于科学台站现有的固定频点（如 1415 MHz 和 2695 MHz）数据来推测导航工作频段（如 1575.42 MHz）的受扰情况可能存在误报。在实际应用中，不能简单依赖相近频率的代表性，而应构建覆盖导航工作频段的独立监测体系，或利用宽带动态频谱数据进行全频段的通量积分与预警。

3.3 研究局限性与未来展望

需要指出的是，本研究仍存在一定局限性：首先，统计样本仅覆盖 2022-2024 年，时间跨度受限的主要原因在于廊坊 L&S 望远镜在 2021 年底才具备稳定的数据输出能力。此外，本文仅引入 Learmonth 台站的数据，其因地球自转无法全天候监测射电流量，可能导

最新录用

致在地球自转造成的观测盲区时段内，部分短时爆发事件可能未被纳入统计或完整记录。同时，目前的样本尚未覆盖完整的太阳活动周期，因此相关统计规律的显著性与适用性仍需在未来结合更长的时间序列加以判断。同时，本文的研究主要依赖科学观测频点（1415 和 2695 MHz）来反映导航工作频段的风险，缺乏直接针对 GNSS 中心及近邻频率的长期通量统计数据。

在应用层面，未来研究可从两方面推进：一是在数据层面，加强国内多源观测资料的联合使用，如融合夸父（ASO-S）、羲和（CHASE）、风云以及地基 L&S 望远镜的数据，构建“天-地”一体化的多波段协同监测体系；二是在方法层面，引入机器学习与统计建模的方法，融合 X-ray、F10.7 指数与活动区面积等多源时序数据，尝试建立从光球层磁场、日冕极紫外图像到特定工作频段射电通量的跨域映射模型，形成兼具背景风险评估与实时事件触发的智能化预警框架。

最新录用

4. 结论

本文基于第 25 太阳活动周期中 2022 至 2024 年的多源观测数据，从 X-ray 通量、F10.7 指数与活动区面积三个关键参数出发，系统评估了其与 SRB 事件之间的响应关系，并结合两件典型的 GNSS 干扰案例进行了验证分析。

时间相关性分析表明，射电爆发与 X-ray 爆发的开始时间具有显著的同步特征：94.42% 的事件的时间差在 1 分钟内，97.78% 的事件的时间差在 10 分钟内，说明两者在多数情况下具有紧密的物理关联。参数统计结果显示，SRB 的发生概率在高 F10.7 指数和活动区大面积出现时显著提高。其中，F10.7 与日面活动区总面积的组合条件表现出相对较高的召回率（约 74%），在太阳活动的高峰期具有较好的风险指示能力。但全样本评估表明，该阈值组合存在较高的虚警率，同时在太阳活动高峰期以外时段的适用性尚需进一步检验。

鉴于不同频率 SRB 的典型背景水平与爆发响应幅度存在系统性差异，本文认为 SRB 事件的风险识别存在两类时间尺度：一类是基于 F10.7 指数和活动区面积的 24 小时背景概率预报；另一类是基于耀斑、X-ray 流量变化及射电频谱演化的分钟级实时预警。融合这两类时间尺度，是提升空间天气业务化风险识别能力的重要方向。因此，在未来有必要针对北斗导航系统工作频段单独进行阈值提取与验证，构建面向具体业务需求的风险识别模型。

最新录用

参考文献

[1] NDACYAYISENGA T, UWAMAHORO J, SASIKUMAR RAJA K, *et al*. A statistical study of solar radio Type III bursts and space weather implication[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **67**(4): 1425-1435

[2] NDACYAYISENGA T, UMUHIRE A C, UWAMAHORO J, *et al*. Space weather study through analysis of solar radio bursts detected by a single-station CALLISTO spectrometer[J]. *Annales Geophysicae*, 2021, **39**(5): 945-959

[3] KUMARI A, MOROSAN D E, KILPUA E K J. On the occurrence of type IV solar radio bursts in solar cycle 24 and their association with coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **906**(2): 79

[4] Australian Bureau of Meteorology. Space weather: Satellite communications and space weather [EB/OL]. [2025-07-31]. https://www.sws.bom.gov.au/Educational/1/3/2

[5] MUHAMMAD B, ALBERTI V, MARASSI A, *et al*. Performance assessment of GPS receivers during the September 24, 2011 solar radio burst event[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2015, **5**: A32

[6] MARQUÉ C, KLEIN K L, MONSTEIN C, *et al*. Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, **8**: A42

[7] BALA B, LANZEROTTI L J, GARY D E, *et al*. Noise in wireless systems produced by solar radio bursts[J]. *Radio Science*, 2002, **37**(2): 1018

[8] CHEN Z Y, GAO Y, LIU Z Z. Evaluation of solar radio bursts' effect on GPS receiver signal tracking within International GPS Service network[J]. *Radio Science*, 2005, **40**(3): RS3012

[9] CERRUTI A P, KINTNER P M, GARY D E, *et al*. Effect of intense December 2006 solar radio bursts on GPS receivers[J]. *Space Weather*, 2008, **6**(10): S10D07

[10] WRIGHT I G, RODRIGUES F S, GOMEZ SOCOLA J, *et al*. On the detection of a solar radio burst event that occurred on 28 August 2022 and its effect on GNSS signals as observed by ionospheric scintillation monitors distributed over the American sector[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2023, **13**: 28

[11] FLORES-SORIANO M. Solar radio bursts impact on the International GNSS Service Network during Solar Cycle 24[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2024, **14**: 32

[12] HAMILTON R J, PETROSIAN V, BENZ A O. Statistical study of the correlation of hard X-ray and type III radio bursts in solar flares[J]. *The Astrophysical Journal*, 1990, **358**: 644

[13] HAMIDI Z S, RAMLI N, SHARIFF N N M. Statistical analysis of solar radio burst type III and type IV with relation to solar activities[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, **1152**: 012018

[14] DONG Liang. The Assessment and Pre-alarm Methods Research for the Solar Radio Burst Events Interfering the Communication Systems[D]. Kunming: Yunnan University, 2016 (董亮. 太阳射电爆发干扰通信系统评估与预警方案的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016)

[15] YANG F, ZHU X F, CHEN X Y, *et al*. Intense L-band solar radio bursts detection based on GNSS carrier-to-noise ratio decrease over multi-satellite and multi-station[J]. *Sensors*, 2021, **21**(4): 1405

[16] NOAA SWPC. NOAA forecasts quicker, stronger peak of solar activity [EB/OL]. [2025-07-31]. https://www.swpc.noaa.gov/news/noaa-forecasts-quicker-stronger-peak-solar-activity.

[17] TAPPING K F. The 10.7 cm solar radio flux ($F_{10.7}$)[J]. *Space Weather*, 2013, **11**(7): 394-406

[18] TOBISKA W K, WOODS T, EPARVIER F, *et al*. The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(14): 1233-1250

[19] QIAN L Y, MURSULA K. Evaluating F10.7 and F30 radio fluxes as long-term solar proxies of energy deposition in the thermosphere[J]. *Annales Geophysicae*, 2025, **43**(1): 175-182

最新录用

[20] EMMERT J T. Thermospheric mass density: a review[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(5): 773-824

[21] Institute of Space Science and Physics, Shandong University. Solar F10.7 Index [EB/OL]. [2025-07-31]. https://space.wh.sdu.edu.cn/info/1050/1759.htm (山东大学空间科学研究院. 太阳 F107 指数[EB/OL] [2025-07-31]. https://space.wh.sdu.edu.cn/info/1050/1759.htm)

[22] SolarMonitor. SolarMonitor: [EB/OL]. [2025-07-31]. https://solarmonitor.org/index.php?date=20240509

[23] SolarMonitor. SolarMonitor: [EB/OL]. [2025-07-31]. https://solarmonitor.org/index.php?date=20240728

最新录用

第一作者简介：刘逸飞，男，2002 年 10 月出生于四川省自贡市，现为云南大学中国西南天文研究所硕士研究生。E-mail: liuyf@stu.ynu.edu.cn

通信作者简介：董亮，男，博士，现为中国科学院云南天文台高级工程师，硕士研究生导师，主要研究方向为射电天文技术及其转化应用、空间天气研究、无线电环境测试技术等。E-mail: dongliang@ynao.ac.cn

最新录用