

朱力业, 严发宝, 陈耀, 宋红强, 武昭, 李钦正, 李云振. 2027. 太阳射电频谱仪研究现状及发展趋势[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 58(1): 106-119. doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-058.

Zhu L Y, Yan F B, Chen Y, Song H Q, Wu Z, Li Q Z, Li Y Z. 2027. Review on research status and development trends of solar radio spectrometers[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 58(1): 106-119 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2025-058.

太阳射电频谱仪研究现状及发展趋势

朱力业¹, 严发宝^{1,2,4*}, 陈耀^{1,3}, 宋红强^{1,3}, 武昭^{1,3}, 李钦正^{1,4}, 李云振^{1,4}

1 山东大学 空间科学研究院 空间电磁探测技术实验室, 威海 264209

2 山东大学 山东省智能电子封装与应用重点实验室, 威海 264209

3 山东大学 山东省太空环境与探测技术重点实验室, 威海 264209

4 山东大学 低空科学与工程学院, 威海 264209

摘要: 剧烈的太阳活动是灾害性空间天气的源头, 其伴随的强电磁辐射、等离子体喷发以及高能粒子加速等过程, 会在短时间内显著扰动日地空间环境, 进而引发地球电离层扰动、高频通信中断等一系列连锁效应, 对航空、航天、通信等关键领域构成严峻威胁. 随着空间技术的不断发展, 人类社会对精度高、可靠性强的空间天气监测提出了更高要求, 构建高性能太阳射电观测系统, 已成为提升空间天气预警与防御能力的重要举措. 在太阳物理研究中, 不同频段的射电辐射对应着太阳大气中不同高度、不同等离子体密度环境下的辐射机制, 获取尽可能完整的频率覆盖数据不仅是揭示耀斑高能电子加速机理的关键证据, 也是理解太阳爆发的时空演化过程的重要支撑. 因此, 从仪器研制的角度出发, 构建覆盖更宽频段、更高时间与频率分辨率的太阳射电观测系统具有重要意义. 本文系统回顾了国内外太阳射电观测仪器的发展进程, 梳理了从分米波、厘米波再到毫米波的典型射电望远镜与频谱仪的结构特点, 并对比不同仪器的系统设计方案、信号处理链路以及观测频率范围, 进而分析当前太阳射电观测设备现状, 指出现阶段面临的关键技术瓶颈及未来发展趋势. 期望本文的归纳与分析能为后续太阳射电观测系统的规划设计与关键技术攻关提供参考与借鉴.

关键词: 太阳物理; 射电观测; 仪器研制; 辐射流量计; 宽带频谱仪; 信号处理

doi: 10.19975/j.dqyxx.2025-058

中图分类号: P161.4

文献标识码: A

Review on research status and development trends of solar radio spectrometers

Zhu Liye¹, Yan Fabao^{1,2,4*}, Chen Yao^{1,3}, Song Hongqiang^{1,3}, Wu Zhao^{1,3}, Li Qinzhen^{1,4}, Li Yunzhen^{1,4}

1 Laboratory for Electromagnetic Detection, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China

2 Shandong Key Laboratory of Intelligent Electronic Packaging Testing and Application, Shandong University, Weihai 264209, China

3 Shandong Key Laboratory of Space Environment and Exploration Technology, Shandong University, Weihai 264209, China

4 School of Airspace Science and Engineering, Shandong University, Weihai 264209, China

Abstract: Intense solar activity is a major driver of hazardous space weather. The associated processes, including strong electromagnetic radiation, plasma ejections, and high-energy particle acceleration, can significantly disturb the Sun-Earth environment within a short time and further trigger a series of chain effects such as ionospheric disturbances and high-frequency communication interruptions, thereby posing serious threats to critical sectors including aviation, aerospace, and telecommunications. With the continuous advancement of space technology,

收稿日期: 2025-12-09; 录用日期: 2026-04-15

Received Date: 2025-12-09; Accepted Date: 2026-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42127804, 12433013, 42374219)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42127804, 12433013, 42374219)

第一作者: 朱力业 (2000-), 男, 在读博士研究生, 主要从事微波探测与太阳射电仪器研制等方面的研究. E-mail:

zly_20000518@163.com

*通信作者: 严发宝 (1985-), 男, 教授, 主要从事微波探测与太阳射电仪器研制等方面的研究. E-mail:

yanfabao2022@163.com



society has placed increasingly higher demands on space-weather monitoring with high accuracy and reliability. Consequently, the development of high-performance solar radio observing systems has become an important approach to improving space-weather forecasting and mitigation capabilities. In solar physics, radio emissions at different frequencies correspond to radiation mechanisms occurring at different heights and under different plasma-density conditions in the solar atmosphere. Therefore, obtaining observational data with the broadest possible frequency coverage is not only crucial for revealing the acceleration mechanisms of high-energy electrons in solar flares, but also provides important support for understanding the spatiotemporal evolution of solar eruptions. From the perspective of instrumentation development, it is thus of great significance to establish solar radio observing systems with broader frequency coverage and higher temporal and spectral resolutions. This paper systematically reviews the development of solar radio observing instruments worldwide, summarizes the structural characteristics of representative radio telescopes and spectrometers from the decimeter, centimeter, to millimeter wavelength bands, and compares their system designs, signal-processing chains, and frequency coverage. On this basis, the current status of solar radio observing facilities is analyzed, and the key technical bottlenecks and future development trends are discussed. It is hoped that this review will provide useful references for the planning, design, and key-technology development of future solar radio observing systems.

Keywords: solar physics; radio observation; instrument development; radiometer; broadband spectrometer; signal processing

0 引 言

太阳是距离地球最近、且唯一可进行高精度近距离观测的恒星。研究太阳活动不仅有助于理解恒星能量释放机制, 也对揭示太阳射电爆发的产生过程、辐射机制及源区演化具有重要意义。太阳射电辐射可直接反映高能电子、磁场和等离子体状态的变化, 是研究太阳爆发及非热物理过程的重要窗口, 因此对空间天气研究和太阳物理学发展均具有价值。

自 17 世纪利用光学望远镜开展太阳观测以来 (Fabricius, 1611), 人类对太阳的认识不断深化。然而, 光学观测易受云雨和大气视宁度等因素影响。随着天体射电辐射的发现及无线电技术的发展, 射电望远镜应运而生 (Jansky, 1933), 并凭借受天气和昼夜限制较小的优势, 成为与光学观测并列的重要地基观测手段。尤其是射电辐射所具有的独特诊断能力, 使其能够有效探测太阳源区的磁场和等离子体状态 (Lee et al., 2020)。

太阳爆发是空间天气灾害的主要来源, 比如耀斑可在极短时间内产生大量能量达几十 keV 至 MeV 的高能电子 (Brown, 1971), 对电力、卫星、航空和通信系统造成影响, 并带来显著经济损失 (Oughton et al., 2017; Zic et al., 2020)。爆发过程中源区结构、高能电子分布及辐射参数快速演化, 对观测系统的时间、频率和空间分辨能力提出更高要求, 因此高性能太阳射电仪器的发展具有重要意义。

义, 不仅提升对爆发事件的捕获和诊断能力, 还为空间天气预警、太阳活动监测及理论模型验证提供可靠数据。随着第 25 太阳周期整体活动预计高于上一周期 (Oliveira et al., 2025), 建设全方位、全天候、全球覆盖的太阳监测网络将进一步增强观测能力, 为太阳射电爆发研究和活动规律认识提供坚实基础。

本文总结了太阳射电观测仪器的发展历程、研究现状与未来趋势, 重点介绍辐射流量计、两元干涉仪和宽带动态频谱仪, 并讨论黑体定标技术、爆发类型分类等关键问题, 以期对空间天气和太阳物理研究提供参考。

1 观测系统

太阳射电观测仪器大致经历三个阶段: 辐射流量计在特定频点测流量、频谱观测用动态谱刻画爆发过程、成像观测获取射电源空间信息与日冕细节。仪器研制涉及天文、微波电子和数字通信等技术, 可带动高端装备制造、系统集成与数据分析等产业发展。具体项目实施将推动本领域关键技术突破, 提升核心环节自主可控能力, 提升太阳物理与空间天气研究能力, 为太阳活动监测和空间安全提供支撑。

1.1 基本架构

太阳射电动态频谱观测系统基本结构可分为天馈系统、模拟接收机、数字接收机以及上位机数据

显示与分析系统四个模块 (杜静等, 2016), 图 1 展示了四个模块之间的关系及各模块的主要组成. 天馈系统通常由天线反射面与馈源组成, 搭载在跟踪转台上用于对太阳进行实时跟踪. 天线作为太阳射电探测的传感器, 其输出信号为射频信号, 带宽通常较宽且功率较弱, 无法直接由模数转换器 (ADC) 进行采集与处理, 因此, 需要在接收天线输出射频信号后引入模拟调理电路, 调理成能够被数字接收机采集的信号, 这就是模拟前端的作用. 模拟前端由低噪声放大器、功分器、滤波器、检波

器等射频器件组成, 其中, 第一级低噪声放大器对系统整体灵敏度具有决定性影响, 在进行器件选型时要特别注意降低第一级低噪声放大器的噪声系数. 天馈系统传来的电磁波首先进入低噪声放大器, 此处对电磁波信号进行放大处理, 随后通过功分器将信号分配为所需的多路输出, 再分别由不同频段的滤波器进行滤波处理. 不同频率通道依靠微波开关进行轮流选通. 与辐射流量计不同, 频谱仪面向宽带频谱观测需求, 其模拟接收机中通常不设置检波器, 而是采用本振与混频器结构.

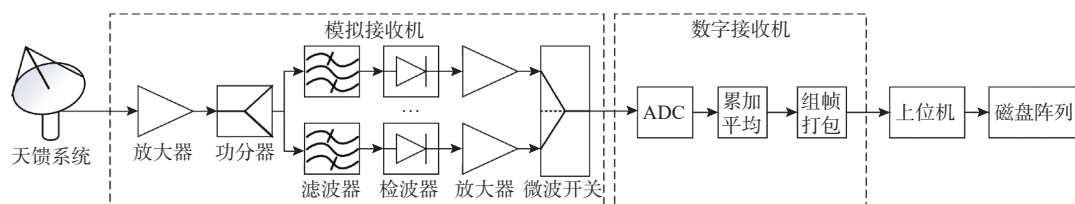


图 1 太阳射电频谱仪的系统结构

Fig. 1 The system architecture of a solar radio spectrometer

太阳射电信号经模拟前端处理后, 将被接收机接收并做进一步的分析与处理, 并将处理结果传送给上位机进行相应的显示. 太阳射电数字接收机可以采取更灵活的信号处理方法, 从输出的数字化数据中获得更多信息, 并且数字化数据能够长期储存. 数字接收机主要由高速 ADC 和高性能现场可编程门阵列 (FPGA) 组成, 其中的数据处理流程的核心在于实时 FFT 运算处理, 作用为将 ADC 采集到的时域数据转换为频谱数据, 除此之外, 还包括加窗、极化合成、累加求平均等操作, 分别用于防止频谱泄漏、调整信号极化方式与降低数据量.

射电信号经数字接收机实时处理后, 需要送至上位机进行显示存储、爆发检测、数据定标等处理, 实现系统观测效果的整体呈现, 最终得到太阳观测的各种图像, 如频谱图、流量图等. 上位机不仅是数据显示和存储的载体, 更是承担着系统硬件器件性能补偿的任务, 良好的数据分析处理方法可以弥补由硬件器件性能导致的误差, 获得质量更高的观测数据和图像.

1.2 辐射流量计

在上述系统架构基础上, 不同太阳射电观测设备在功能侧重及实现方式方面存在明显差异, 例如射电流量计侧重于总辐射强度的时间变化测量, 而宽带射电频谱仪则通过高时间和频率分辨率表征射电辐射的动态谱演化特征, 为爆发机制研究提供更

丰富的信息.

太阳射电流量计的主要功能为测量固定频点的太阳射电辐射强度, 虽然不具备频率分辨能力, 但与太阳射电频谱仪和射电成像仪相比, 其具有结构简单、工作稳定等优点, 适用于观测太阳射电的长期变化. 在太阳活动中, 某些特定频点的辐射流量值与太阳黑子爆发、耀斑爆发、高能电子质子事件等太阳活动有一定的关系 (Chertok, 2018; Grechnev et al., 2013), 常选用的频点对应的波长为 3.2、10.7、20 cm (张磊, 2024). 其中波长 10.7 cm 频点的辐射流量通常与上述太阳活动紧密相关, 其流量是衡量太阳活动的重要指标之一 (Tapping, 2013). 例如, 中国科学院国家天文台研制并部署于北京市怀柔观测基地的 F10.7 cm 射电流量计, 提供了长期的 2.84 GHz 频点的流量观测数据 (Tan and Cheng, 2013). 除 F10.7 cm 流量计之外, 目前已研制的太阳射电辐射流量计工作频段覆盖从分米波到毫米波全波段, 主要包括日本野边山射电辐射流量计 NoRP (1/2/3.75/9.4/17/35 GHz) (Nakajima et al., 1985)、芬兰 Metsähovi 射电天文台的 MRO RT-1.8 辐射流量计 (11.2 GHz) (Kallunki et al., 2015)、俄罗斯西伯利亚射电偏振计 SSRT-Spectropolarimeter (2~24 GHz 偏振测量) (Grechnev et al., 2003)、美国太阳射电望远镜网络 RSTN (245/410/610/1415/2695/4995/8800/15400 MHz) (Abramov-Maximov and Bakunina, 2024)、稻城

星载太阳耀斑毫米波辐射探测谱仪地面验证系统 (50~55 GHz) (Xu et al., 2025) 等, 相关观测数据在太阳耀斑物理核心科学问题的研究中发挥了重要作用 (Yan et al., 2022). 图2给出了怀柔射电流量计与野边山射电辐射流量计的实物照片, 直观展示了太阳射电流量观测设备的外观形态. 图3展示了嵯山毫米波频谱仪 CBS 系统的流量观测结果. 此外, 中国气象部门还建设并运行了多套服务于空间天气业务的太阳监测设备. 例如, 山东石岛部署了业务化太阳光球色球观测设备, 为国家空间天气监测业务提供了观测支撑 (张鹏等, 2025). 在太阳射电监测方面, 明安图和塔什库尔干等台站建设了三频段太阳射电望远镜, 工作频点为 2.801、4.542、9.084 GHz, 已应用于我国空间天气监测相关业务与研究 (耿立红等, 2018).

但随着观测频率的增加, 地球大气中的湍流、云层变化以及水分子和氧气分子对太阳辐射信号的吸收也随之增强, 这将会引起地基系统观测辐射强度的抖动, 从而在一定程度上限制了高频太阳爆发探测的灵敏度 (Pannuti, 2020). 针对此问题, 可通过星载观测直接避免天气条件对观测的影响, 或者

提高地基观测系统的灵敏度, 以此提高微弱耀斑爆发的观测能力. 增大观测天线口径是提高灵敏度最直接的方法, 但口径受制于机械结构、成本造价等诸多因素的限制, 不可能无限制提高. 因此, 可采用双天线互相关方式以抵消宁静太阳背景辐射, 减少整个宁静太阳观测流量的波动, 达到提升观测系统灵敏度的目的 (Ryle, 1952). 目前世界范围内已建成的两元干涉仪包含山东大学毫米波二元干涉仪 (39.5~40 GHz, 同时具备频谱观测能力) (Yu et al., 2023)、日本野边山 NoRP 干涉仪 (80 GHz, 已停运) (Shimojo and Kazumasa, 2023) 与瑞士伯尔尼大学 NIOS 干涉仪 (90 GHz) (Lüthi et al., 1999).

1.3 宽带频谱仪

相比于太阳射电辐射流量计, 太阳射电动态频谱仪能够在一定的时间分辨率和频率分辨率下, 对宽频段太阳射电信号进行连续成谱观测, 获取的太阳射电活动信息涵盖了爆发的持续时间、信号的频谱特征、频带宽度以及爆发过程中频谱的演变规律等多方面内容, 其中, 频谱的精细结构尤为重要,



图2 (a) 国家天文台怀柔 F10.7 cm 射电流量计; (b) 日本野边山射电辐射流量计 NoRP (图片来源: <https://sun.bao.ac.cn/SHDA/index.html>; <https://www.nro.nao.ac.jp/en/public/teles.html>)

Fig. 2 (a) National Astronomical Observatories, Huairou F10.7 cm radio fluxmeter; (b) The Nobeyama Radio Polarimeters (NoRP), Japan (image source: <https://sun.bao.ac.cn/SHDA/index.html>; <https://www.nro.nao.ac.jp/en/public/teles.html>)

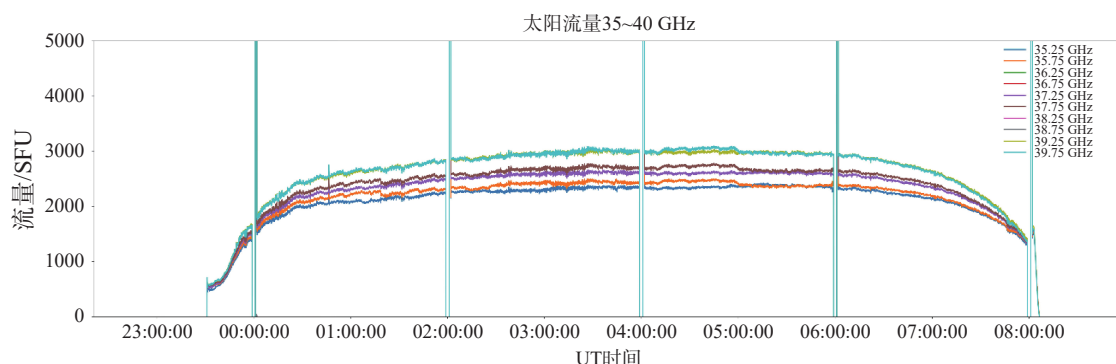


图3 太阳流量观测结果 (图片来源: <http://47.104.87.104/SRData/CBSmm/dailyView/2025/11/CBS35Gflux20251126.jpg>)

Fig. 3 The solar flux observation results (image source: <http://47.104.87.104/SRData/CBSmm/dailyView/2025/11/CBS35Gflux20251126.jpg>)

有助于更深入地研究爆发源的动力学特征 (Zhang et al., 2019). 不同系统的观测数据通常通过专门的服务器网站公开展示, 可供相关研究人员访问与下载使用, 为研究太阳活动提供了更加详实的科研数据支撑, 图 4 展示了山东大学榭山站的 CBSm 系统于 2024 年 4 月 23 日观测到的太阳爆发频谱精细结构.

目前国内外已建成多套宽带太阳射电动态频谱仪系统, 主要包含澳大利亚纳拉布赖 Culgoora 频谱仪 (0.018~1.8 GHz) (Prestage et al., 1994)、巴西太阳望远镜 BSS (0.2~2.5 GHz) (Sawant et al., 2001)、中国太阳射电宽动态频谱仪 SBRS (0.7~1.5 GHz、1.0~2.0 GHz、2.6~3.8 GHz、4.5~7.5 GHz、5.2~7.6 GHz, 其中位于北京怀柔观测基地的 1.0~2.0 GHz、2.6~3.8 GHz 与 5.2~7.6 GHz 设备已停运) (Fu et al., 2004)、榭山毫米波频谱仪 CBS (35~40 GHz) (Shang et al., 2022)、榭山厘米波频谱仪 CBScm (6~15 GHz)

(Zhang et al., 2023)、榭山太阳射电厘米波宽带谱仪 CBSdm (3~6 GHz) (Yan et al., 2026)、榭山高分辨率低频阵列 CBS-LFA (0.025~0.11 GHz) (Wang et al., 2022)、子午工程二期宽波段太阳射电频谱仪 (0.03~0.4 GHz、0.09~0.3 GHz、0.4~2 GHz、2~15 GHz) (王威等, 2024)、捷克 Ondrejov 频谱仪 (0.8~4.5 GHz) (Nishizuka et al., 2015)、安徽蒙城太阳射电频谱仪 McSRS (12~16 GHz) (王璐等, 2017)、瑞士 Phoenix-3 频谱仪 (0.1~5 GHz) (Benz et al., 2009a) 等. 图 5 展示了多套典型太阳射电频谱仪的实物外观, 包括子午工程二期的榭山米波太阳射电频谱仪, 直观展示了太阳射电频谱观测设备的典型外观与系统构成. 此外, 面向更宽频观测需求, 国内还布局了超宽带太阳射电频谱监测系统, 该类系统在中国东部台站与四川稻城协同部署, 包含十米波、米波、分米波和厘米波 4 套频谱仪, 其频率范围分别为 15~

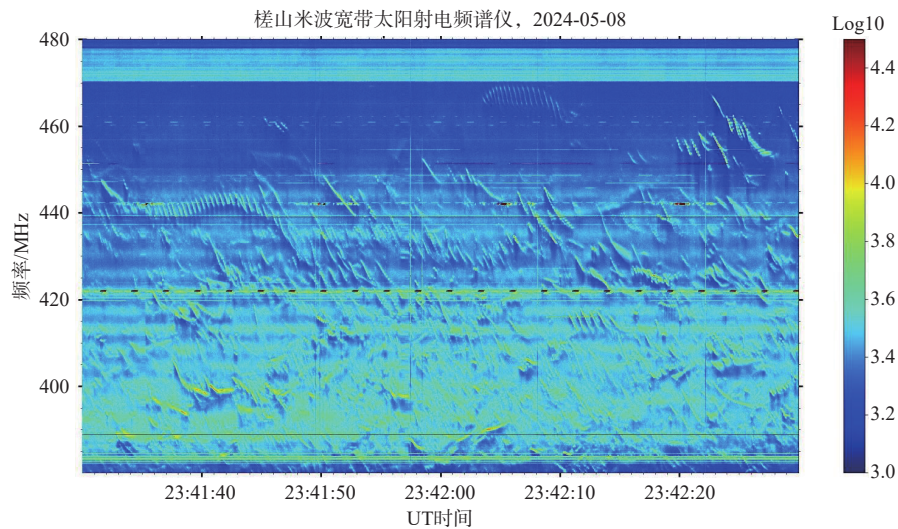


图 4 山东大学榭山站太阳射电频谱精细结构 (图片来源: <http://47.104.87.104/SRData/CBSm/RadioBurstEvent/typeII/jpg2/CBSm2024-05-08T234140c.jpg>)

Fig. 4 Fine structure of solar radio spectrum (image source: <http://47.104.87.104/SRData/CBSm/RadioBurstEvent/typeII/jpg2/CBSm2024-05-08T234140c.jpg>)



图 5 (a) 35~40 GHz 的毫米波太阳射电频谱观测系统; (b) 子午工程二期的榭山米波太阳射电频谱仪; (c) 比利时皇家天文台的 HSRS 射电频谱仪 (图片来源: <https://sidc.be/humain/home>)

Fig. 5 (a) The 35~40 GHz millimeter-wave solar radio spectroscopic observation system; (b) Chashan Broadband Solar Radio spectrometer at a meter wavelength of the Chinese Meridian Project Phase II; (c) The HSRS radio spectrometer at the Royal Observatory of Belgium (image source: <https://sidc.be/humain/home>)

80 MHz、100~750 MHz、600~4200 MHz 和 4~15 GHz (郭少杰等, 2023), 联合后可实现 15 MHz~15 GHz 的连续频谱覆盖。

当前国内外主要的射电观测频谱仪系统及其观测频段与参数信息如表 1 所示。

随着电子信息技术的不断发展, 太阳射电频谱仪的频率覆盖范围、时间分辨率和频率分辨率等指标也得到了大幅提升, 这对于获取太阳射电爆发的精细频谱结构具有重要意义。例如, 山东大学已建成的槎山米波宽带太阳射电频谱仪 (Chashan broadband solar radio spectrometer at a meter wavelength, CBSm) 实现了 90~600 MHz 频段连续覆盖 (Chang et al., 2024), 该系统被认为具备“前所未有的频率-时间分辨率与灵敏度” (Kuznetsov, 2025; Li et al., 2025), 已能够对米波段太阳爆发活动进行高精度探测。这充分表明, 对米波段高时间-频率分辨率观测的需求正在快速增长, 且该频段对于研究活动区演化、日冕密度结构与低层爆发起源具有重要的科学价值。然而, 现有太阳射电宽带观测系统多覆

盖米波至厘米波范围, 部分专用系统可延伸至更高频段, 系统观测频率范围主要受科学目标、大气传播和系统能力制约: 不同频段对应不同的辐射机制和诊断需求; 低频信号受电离层截止、吸收及干扰影响, 部分频率难以有效到达地面; 在毫米波及邻近高频段, 水汽和氧气等大气成分的吸收会使大气透过率下降, 影响观测灵敏度与稳定性; 同时, 高频接收机和天线系统的设计、标定与长期运行面临更高的技术要求和成本。未来可在多台站协同观测基础上, 逐步构建频率连续覆盖的太阳射电观测体系。

2 组成单元

2.1 天馈系统

天馈系统是太阳射电观测系统的最前端单元, 主要由天线反射面与馈源组成, 其功能是收集来自太阳的射电辐射, 进行聚焦并将信号耦合至后端接

表 1 现有太阳射电观测频谱仪系统对比

Table 1 Comparison of existing solar radio spectrometer systems

类型	名称	国家	频率/GHz	时间分辨率/ms	频率分辨率
流量计	怀柔	中国	2.84	1	—
流量计	NoRP	日本	1、2、3.75、9.4、17、35	1000	—
流量计	SSRT	俄罗斯	2~24	/	1375 MHz/point, 16 points
流量计	RT-1.8	芬兰	11.2	1	—
流量计	SoFar	中国	50~55	1	833.3 MHz/point, 6 points
流量计	RSTN	美国	0.245、0.41、0.61、1.415、2.695、4.995、8.8、15.4	1	—
干涉仪	毫米波干涉仪	中国	39.5~40	0.1	0.153 MHz
干涉仪	NoRP	日本	80	100~300	—
干涉仪	NIOS	瑞士	90	31	—
频谱仪	子午工程 II 期	中国	0.03~0.4、0.09~0.3、0.4~2、2~15	1~100	0.1~10 MHz
频谱仪	SBRS	中国	1~2、2.6~3.8、5.2~7.6	1~10	1~10 MHz
频谱仪	BBMS	俄罗斯	4~8	10	153.8 MHz/point, 26 points
频谱仪	Phoenix-3	瑞士	0.1~5	0.1	0.9 MHz/point, 5000 points
频谱仪	Ondrejov	捷克	0.8~4.5	10	14.5 MHz/point, 256 points
频谱仪	BSS	巴西	0.2~2.5	10~1000	1~10 MHz
频谱仪	HSRS	比利时	0.275~1.495	250	0.098 MHz
频谱仪	Culgoora	澳大利亚	0.018~1.8	—	3 MHz
频谱仪	McSRS	中国	12~16	2	100 MHz/point, 40 points
频谱仪	CBS	中国	35~40	536	0.153 MHz
频谱仪	CBScm	中国	6~15	2.1	3 MHz
频谱仪	CBSdm	中国	3~6	0.26	3 MHz
频谱仪	CBS-LFA	中国	0.025~0.11	4	0.03 MHz

收链路. 根据天线结构特征, 主要分类有抛物面天线、卡塞格伦天线、对数周期天线等. 图 6 直观展示了几种典型天线的结构形式与外观特征. 对于抛物面天线而言, 天线反射面的几何形状与口径尺寸决定了系统的增益、角分辨率以及主旁瓣分布特性, 而馈源则负责将聚焦后的电磁波转换为射频信号并传输至后端接收链路. 针对太阳射电辐射覆盖频段

宽、辐射强度变化剧烈的特点, 天馈系统通常需在宽频范围内保持良好阻抗匹配和方向图稳定性, 以保证不同频段观测结果的一致性. 在实际应用中, 天馈系统还需兼顾机械稳定性、环境适应性以及长期运行的可靠性, 尤其是在野外台站和无人值守观测条件下, 其结构设计和材料选择对系统性能具有重要影响.

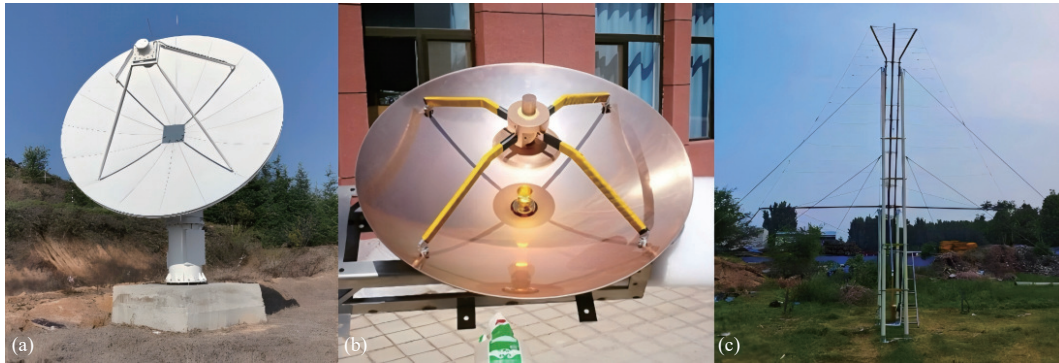


图 6 天线类型. (a) 普通抛物面; (b) 卡塞格伦; (c) 对数周期

Fig. 6 Antenna types. (a) Conventional parabolic; (b) Cassegrain; (c) Log-periodic

2.2 模拟前端

模拟前端位于天馈系统与数字接收机之间, 是保证射电信号质量的关键环节. 其主要任务是在抑制系统本底噪声和外部干扰的同时, 对微弱射电信号进行线性放大和频谱调理, 以满足后续数字化处理的动态范围和采样要求. 按照结构特点, 可将模拟接收机分为超外差结构、零中频结构、数字零中频结构、带通采样结构等.

超外差接收机通过将射频信号下变频至中频进行放大与滤波, 具有灵敏度高、频率选择性好和动态范围大的优点, 是传统射电观测系统中应用最为广泛的结构, 但其多级混频使系统复杂度较高. 零中频接收机则将射频信号直接变频至基带, 结构相对简洁, 便于实现宽带接收和多通道并行处理, 但需重点解决直流偏置和低频噪声等问题. 数字零中频接收机在零中频结构基础上进一步将信号数字化后完成正交解调和频谱处理, 可有效提升系统一致性和灵活性, 更适合现代高集成度、软件可重构的射电频谱仪设计. 带通采样结构则利用高速模数转换器对射频或中频信号进行直接采样, 在数字域完成频谱搬移与信道化处理, 能够显著简化模拟前端结构, 但对采样率、动态范围及抗干扰能力提出了更高要求. 不同接收机结构在系统复杂度、带宽能力和性能指标等方面各具优势, 需要结合具体观测需求进行合理选型.

由于太阳爆发期间信号强度可能在极短时间内发生剧烈变化, 模拟前端设计除需满足基本的信号接收与放大功能外, 还必须综合兼顾低噪声系数与高动态范围, 以避免弱信号被系统本底噪声淹没, 同时防止强信号引起链路压缩、失真甚至饱和. 此外, 为适应宽带观测需求, 模拟前端还需具备良好的频率响应一致性和增益平坦度, 以降低幅度起伏对动态谱分析和射电流量定量测量的影响.

噪声系数 (noise figure, NF) 是衡量接收机噪声性能的重要参数, 用于表征信号通过系统后信噪比的劣化程度. 对于由多级器件级联构成的模拟前端, 总噪声系数可由公式 (1) 表示:

$$NF = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (1)$$

其中, F_i 为第 i 级的噪声因子, G_i 为第 i 级的功率增益. 由该式可知, 前级低噪声放大器的噪声性能对整个接收链路影响最大, 因此模拟前端通常优先选用低噪声、高增益的首级放大器, 以尽可能降低系统总噪声温度并提高对微弱太阳射电信号的探测能力.

另一方面, 动态范围 (dynamic range, DR) 反映了接收系统同时处理强、弱信号的能力, 通常可理解为系统在保证线性工作的条件下, 最大可接收信号与最小可检测信号之间的范围. 若以功率表示, 则动态范围可写为公式 (2):

$$DR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) \quad (2)$$

其中, $P_{\max}$ 为系统在线性区内可承受的最大输入功率, $P_{\min}$ 为由系统噪声底决定的最小可检测输入功率. 对于太阳射电观测而言, 安静太阳、弱爆发和强爆发之间往往存在显著的功率跨度, 因此系统必须具备足够大的动态范围, 才能兼顾微弱信号探测与强爆发记录.

实际工程中, 系统动态范围与接收链路的增益分配、1 dB 压缩点 ($P_{1\text{dB}}$) 和三阶交调截点 (IP3) 密切相关. 其中, $P_{1\text{dB}}$ 用于表征系统进入非线性压缩区的功率阈值, IP3 反映系统抑制强信号互调失真的能力. 由于天线输出的太阳射电信号通常较弱, 需经模拟前端适当放大后才能送入数字接收机; 但增益过大又易在强爆发或干扰条件下导致后级进入非线性区. 因此, 模拟前端增益设计需综合考虑天线输出功率、接收机输入范围及系统动态范围要求, 在保证弱信号可检测的同时, 尽可能维持强信号条件下的线性响应.

综上, 太阳射电接收系统模拟前端的设计本质上是在低噪声、高增益与大动态范围之间进行优化折中: 一方面通过低噪声器件和合理级联结构提升系统灵敏度, 另一方面通过优化增益分配和提高线性指标保证强信号条件下的稳定工作, 从而为宽带太阳射电动态谱观测和高精度流量测量提供可靠基础.

2.3 数字接收机

在射电观测仪器中, 数字接收机是实现高时频分辨率观测的核心单元, 通常由 ADC 和数字信号处理两大部分组成. ADC 将前端模拟射频或中频信号转换为离散数字信号, 其分辨率、采样率、输入动态范围和带宽等关键参数直接决定了系统的动态范围、灵敏度及频谱分辨率. 随着高速高精度 ADC 技术的发展, 基于直接采样或带通采样的数字接收架构逐渐成为宽带射电观测系统的主要技术方向. 在数字处理部分, FPGA 凭借其并行处理能力强、实时性高和接口资源丰富等优势, 已成为数字接收机中最常用的核心处理平台, 可高效完成高速数据缓存、傅里叶变换、加窗、数字滤波及数据重组等典型数字信号处理任务; 相比之下, DSP 芯片通常用于处理实时性要求较低的特定信号处理模块. 数字接收机在运行过程中需严格遵循采样定理, 通过合理选择低通或带通采样方式, 并结合前端滤波措施以避免频谱混叠. 在频谱分析中, FFT 算法是实

现时域到频域转换的基础方法, 而窗函数和数字滤波技术用于抑制频谱泄漏、提高频率和幅值估计精度. 总体而言, 数字接收机通过将高速采样硬件与可重构数字处理平台相结合, 为现代太阳射电观测系统提供了高灵活性、高稳定性和强可扩展性的技术支撑.

对于数字接收机而言, 频率分辨率 d_f 和时间分辨率 d_t 是两个核心参数. 太阳射电爆发的精细结构承载丰富信息, 具有重要科学研究价值, 这要求观测设备具备较高的时频分辨率. 频率分辨率是指系统分辨两个相邻频率幅值的能力, 由采样频率与傅里叶变换点数决定. 时间分辨率是指仪器在某一特定频率通道下连续刷新的最短时间间隔, 由采样系统最大采样速率和累加次数共同决定. 在太阳射电望远镜中, 接收机数据处理流程通常包括对接收信号的累加求平均, 用以提高信噪比. 最高时间分辨率则是指在不进行积分平均、以最短可支持的采样间隔实时获取数据的能力. 前者与数据灵敏度有关, 后者决定了能否捕捉快速变化事件 (如太阳爆发电脉冲) 的能力.

$$d_f = \frac{f_s}{N} \quad (3)$$

$$d_t = \frac{N}{f_s} \quad (4)$$

其中, f_s 表示系统采样频率, N 表示傅里叶变换的点数. 从公式可以看出, 这两个参数呈反比关系, 无法同时增大, 因此, 在观测系统设计中, 需要对这两个参数进行权衡.

3 数据处理

3.1 流量定标

太阳辐射流量是衡量太阳活动的重要指标, 其准确测量和标定有助于研究日冕物质抛射、日珥爆发等现象, 揭示太阳物理过程、磁场演化及动力学特征, 并为后续数据分析提供可靠依据. 此外, 太阳辐射监测还可用于评估太阳活动对地球空间环境的影响, 为采取防护措施提供依据. 太阳射电观测设备的数据产品主要包括以下几类: 频谱原始数据、频谱数据、频谱快视图与流量等. 数据标定的核心是将原始观测数据转换为标准物理量, 如太阳流量单位 (solar flux unit, SFU). 主要步骤包括系统响应校正 (去除仪器噪声和增益变化)、绝对或相对

定标 (采用标准黑体或已知射电源进行校准) 以及单位转换 (将电压或功率数据转换为射电流量). 标定后的数据可用于太阳活动研究、空间天气预警及多台站数据比对. 射电辐射流量定标可按校准对象分为整体定标和分部定标, 也可按参考源类型分为相对定标和绝对定标 (Rohlfs and Thomas, 2013). 整体定标将观测系统视为整体, 利用标准辐射源 (如黑体、已知星体) 进行标定. 分部定标分别校准天线和接收机, 天线定标确定效率/有效面积, 建立辐射温度与噪声温度的关系, 接收机定标建立输出电压与输入噪声温度的对应关系. 相对定标依赖外部辐射源或台站数据, 是目前应用最广的方法. 绝对定标采用标准黑体辐射源, 精度高, 但成本较高且操作难度大. 定标保证了不同时间、不同设备和台站的数据一致性, 有助于科研合作与数据共享.

在采用相对定标方法对数据进行校准时, 首先需要选取某台站在特定频点的流量值 F_q 作为参考, 然后将实际观测数据代入下述公式, 从而得到校准后的太阳射电流量密度 F_c :

$$F_c = \frac{R_2 - R_1}{R_3 - R_1} F_q \quad (5)$$

其中, F_c 表示校准后的太阳射电流量密度, F_q 为标准宁静状态下的太阳射电流量密度, F_q 的值可参考其它观测系统的测量读数, 单位为 SFU, 其与常用单位的换算关系为 $1 \text{ SFU} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$; R_1 代表系统观测天空背景时的上位机读数, R_2 代表系统观测太阳时的上位机读数, R_3 代表系统观测宁静状态的太阳的上位机读数, 均为无量纲数.

针对毫米波波段太阳射电辐射通量的精确观测需求, Shang 等 (2023) 依托 35~40 GHz 毫米波太阳射电频谱仪, 率先提出了基于新月的相对定标方案. 首先, 根据新月亮度温度通过公式 (6) 推算出太阳在 37.25 GHz 处的亮度温度为 11636 K (标准差 652 K). 随后, 结合太阳射电通量与亮度温度的关联模型, 并以恒温噪声源为参考完成通量定标. 该方法最终实现了 35~40 GHz 频段内 3000~4000 SFU 的通量测量, 系统一致性偏差为 $\pm 5.3\%$, 灵敏度为 5~8 SFU. 但该方案仍依赖天体参考源, 尚未实现与国际标准的直接溯源.

$$F_{\text{sun_model}}(T_{\text{sun}}, \nu) = \int I_\nu d\Omega \approx I_\nu \Omega = \pi I_\nu \theta^2 = \frac{2kT_{\text{sun}} \nu^2}{c^2} \pi \theta^2 \quad (6)$$

其中: I_ν 为辐射强度, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, k 是

玻尔兹曼常数 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, ν 是频率, c 是光速 ($3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), Ω 是立体角 $6.84 \times 10^{-5} \text{ sr}$, θ 为日地张角, 单位 rad, 计算出在 37.25 GHz 频点下温度模型对应的太阳射电辐射流量 $F_{\text{sun_model}}(T_{\text{sun}}, \nu)$.

$$\frac{\Delta T_{a_sun}}{(T_h - T_c) C_{\text{tran}}} = \frac{T_{a_sun} - T_{a_sun_bg}}{(T_h - T_c) C_{\text{tran}}} = \frac{R_{\text{sun}} - R_{\text{sun_bg}}}{R_h - R_c} \quad (7)$$

式 (7) 为应用噪声源时的系统流量定标公式, 其中: ΔT_{a_sun} 为天线对准太阳和背景时输出噪声温度增量, 单位为 K; T_h 、 T_c 分别为噪声源的热态 (开启) 和冷态 (关闭) 标称温度, 定标单元采用恒温控制, 该值稳定可靠, 单位为 K; C_{tran} 为噪声源等效到天支路转移系数; R_{sun} 、 $R_{\text{sun_bg}}$ 分别表示系统指向太阳和天空背景时的上位机测量示数; R_h 、 R_c 分别为噪声源热态 (开启) 和冷态 (关闭) 时的上位机示数. 定标前的上位机示数通常为幅值的无量纲数.

为进一步优化上述问题, Zou 等 (2023) 针对 35~40 GHz 观测系统的绝对校准需求, 研制了基于金属锥阵列与贴片式吸波材料的黑体辐射源, 通过有限积分技术 (FIT) 优化黑体锥阵列的几何参数 (如锥高约 50 mm、吸波贴片厚度约 1 mm), 并结合时域门技术抑制杂散信号, 实现了发射率超过 0.9995 的高性能黑体, 同时, 通过对称加热系统将锥顶与锥底的温差控制在 0.20°C 以内, 为该频段观测系统提供了可直接溯源国际标准的校准基准. 在此基础上, Xu 等 (2026) 进一步将校准频段拓展至 50~70 GHz, 设计了 10×10 锥阵列黑体辐射源, 其锥高为 50 mm, 周期为 10 mm, 吸波涂层厚度为 1 mm. 该黑体实测发射率达到 0.9996, 并通过 FPGA 模糊控制的温度调控系统, 实现了 $\leq 0.3^\circ \text{C}$ 的温度均匀性. 通过高低温两点校准法, 该黑体建立了 50.5~51.5 GHz 频段太阳耀斑探测光谱仪的输出方程, 并完成了从设备校准到系统级观测数据定标的全链路验证, 为更高频段的太阳毫米波辐射精准观测提供了关键技术支撑.

3.2 爆发分类

太阳射电观测对研究临边爆发事件的日冕磁场特征具有重要意义. 此类事件中, 微波辐射直接投影于弱天空背景, 避免了太阳盘面辐射的干扰 (Papaioannou et al., 2016). 极紫外和硬 X 射线成像是热过程演化研究中的重要优势, 而射电观测则在磁场参数和非热电子分布诊断方面提供了互补

信息. 耀斑上升相及峰值附近的微波辐射主要来自非热电子的回旋同步辐射, 反映了磁场结构、强度演化及高能电子分布的关键信息. 低频射电观测多采用动态频谱, 可将射电暴分为 I-V 型 (Wild and McCready, 1950). I 型暴持续时间长、无明显频率漂移且偏振度高; II 型暴频漂缓慢, 常伴基波-谐波结构或鱼骨状精细结构, 与耀斑及日冕物质抛射密切相关; III 型暴特征为信号从高频向低频快速漂移; IV 型暴为宽频带辐射, 多出现于 II 型暴之后; V 型暴则表现为 III 型暴的拖尾. 图 7 展示了嵯山米波宽带太阳射电频谱仪观测到的典型太阳射电爆发频谱结构. 高频微波辐射中, 宁静太阳的辐射

源于热电子韧致辐射 (亮温度随频率降低缓慢增强), 而爆发期辐射主要由非热电子回旋同步辐射主导, 频谱呈先升后降趋势. 关键参数如辐射强度、峰值频率、光薄区谱指数及偏振度等, 对诊断耀斑高能电子和日冕物理参数具有重要价值. 针对太阳射电爆发的自动分类算法展开研究, 可以帮助研究人员更高效、准确地获取太阳活动的持续时间、辐射强度、爆发数量与种类、时空演化等关键信息. 常见用于太阳射电爆发分类的神经网络主要包括 LSTM 网络 (Xu et al., 2019)、Faster R-CNN 网络 (Hou et al., 2020)、YOLO 网络 (Scully et al., 2023)、GAN 网络 (Zhang et al., 2021) 等.

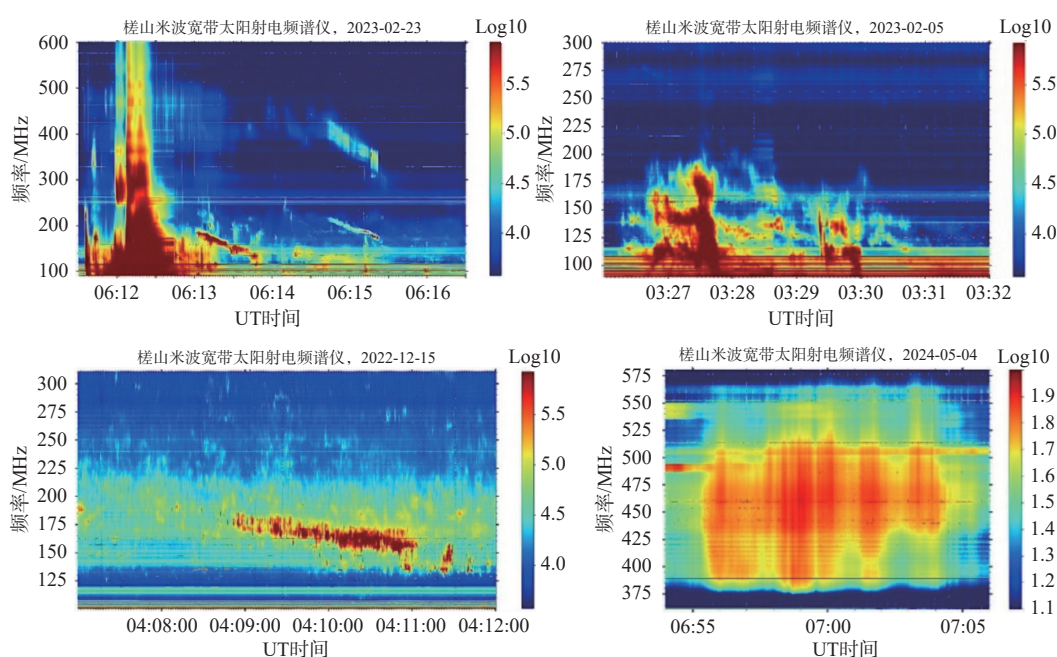


图 7 不同类型的太阳爆发频谱结构 (图片来源: <http://47.104.87.104/SRData/CBSm/RadioBurstEvent>)

Fig. 7 The spectral characteristics of various types of solar eruptions (image source: <http://47.104.87.104/SRData/CBSm/RadioBurstEvent>)

4 未来发展趋势

太阳射电观测设备发展至今, 已逐步形成辐射流量计、宽带频谱仪和综合孔径日像仪三类主要仪器. 三者各具特点、功能互补, 共同构成了太阳射电观测的重要技术体系. 在全球范围内, 中国、俄罗斯、美国等国家已建成多套较为完善的太阳射电观测系统, 这与几十年来国内外研究机构在该领域的持续投入和重要贡献密不可分. 近年来, 中国科学院国家空间科学中心、中国科学院国家天文台、紫金山天文台、上海天文台、山东大学等单位持续推动射电望远镜技术及观测网络的发展. 例如, 中

国科学院国家空间科学中心明安图团队, 围绕明安图射电频谱日像仪等观测设备, 在太阳射电精细结构诊断、爆发活动研究以及空间天气应用等方面开展了系统工作 (Yan et al., 2021, 2024); 子午工程二期宽波段监测系统以及多频段宽带频谱仪研制方面也取得了系列进展. 与此同时, 我国太阳观测仪器体系也正由传统地基平台向空基平台不断拓展 (Li et al., 2023). 总体来看, 相关研究通过长期投入与技术创新, 不仅提升了观测设备的频率分辨率、时间分辨率和灵敏度, 也推动了太阳活动物理机制研究、空间天气预报以及高精度数据获取能力的发展, 为太阳射电仪器研制和相关理论研究奠定了基础.

尽管如此, 由于不同观测系统的建设时间、技术路线和设备结构存在差异, 观测数据的综合分析共享仍面临诸多挑战. 在宽频带覆盖、毫秒级时间分辨率以及多站链网化协同观测等方面, 相关技术仍存在一定瓶颈. 具体而言, 一是高频段观测难度较大, 分米波及厘米波段射电信号易受大气、水汽吸收以及仪器本底噪声影响, 导致信号衰减, 从而制约高分辨率成像质量. 图 8 给出了 ALMA 站址在不同水汽含量条件下的天顶大气透过率, 结果表明, 水汽含量增加会显著降低大气透过率, 并在部分频段形成强吸收特征; 二是数据处理实时性仍然受限, 高时频分辨率观测将产生海量数据, 对实时处理与高速存储能力提出了更高要求, 进而影响对太阳耀斑、射电爆发等快速事件的及时响应; 三是多站协同观测的一致性保障较为复杂, 不同站点在硬件响应、接收带宽、系统增益及本地射频环境等方面存在差异. 对于频谱仪组网观测而言, 其核心目标在于实现全球覆盖、连续监测和数据共享, 因此相较于干涉成像系统, 频谱仪组网观测更侧重时间同步、频率设置协调、数据格式统一以及辐射定标一致性. 针对上述问题, 可从多个层面加以改进. 在高频段观测方面, 可通过优化低噪声接收机、设计超宽带天线以及加强环境电磁屏蔽等手段提升系统灵敏度, 并结合数值模拟与校正算法补偿大气效应. 在数据处理方面, 可引入高性能 GPU/FPGA 加速架构、分布式存储和流式处理技术, 以实现多通道数据的快速融合、实时频谱生成与在线事件识

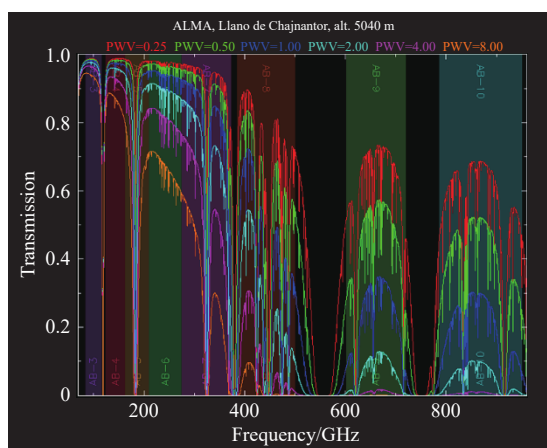


图 8 几种典型水汽含量下, ALMA 站址天顶方向大气透过率 (图片来源: <https://help.almascience.org/file.php/1322953YHPMNKZQAWNQDGD0/atmo.png>)

Fig. 8 Zenith atmospheric transmission at the ALMA site under several typical precipitable water vapour (PWV) conditions. (image source: <https://help.almascience.org/file.php/1322953YHPMNKZQAWNQDGD0/atmo.png>)

别. 在多站协同观测方面, 则可通过统一时间同步与频率基准、采用标准化数据格式以及联合辐射定标方法, 提高多站数据的兼容性、可比性和观测精度 (Benz et al., 2009b).

从技术发展趋势来看, 射电频谱仪正呈现出多方向、多平台和多应用导向的演进特征. 首先, 在观测频带方面, 系统正由传统的米波、分米波逐步向更高频的厘米波、毫米波扩展, 同时向空间甚低频方向延伸, 以突破地球电离层对低频无线电波的屏蔽限制, 获取更多地面难以探测的太阳低频射电辐射信息, 从而更完整地刻画太阳大气不同高度层的辐射特性. 其次, 在观测平台方面, 频谱仪正由单一地面部署逐步向高空气球、空间载荷乃至月球背面等平台拓展, 以满足太阳射电长期连续观测、规避地面射频干扰以及实现全天候运行的需求. 尤其是在受地球电离层限制的甚低频和超低频波段, 未来观测将更加依赖卫星、月基等空间平台. 已有研究指出, 空间甚低频太阳射电探测目前仍以频谱观测为主, 而低频定位与成像仍是今后发展的重要方向 (陈林杰等, 2021); 此外, 中国科学院国家空间科学中心团队还提出了面向行星际激波低频射电源快速定位的空间低频干涉成像观测设想 (Deng et al., 2023; Wang et al., 2025). 图 9 展示了 NASA SunRISE 任务的六颗小卫星实物图, 该任务通过空间分布式射电干涉阵列探测和定位太阳射电暴, 为空间天气监测和太阳高能粒子事件预警提供支持. 图 10 展示了 LOFAR 阵列核心区, LOFAR

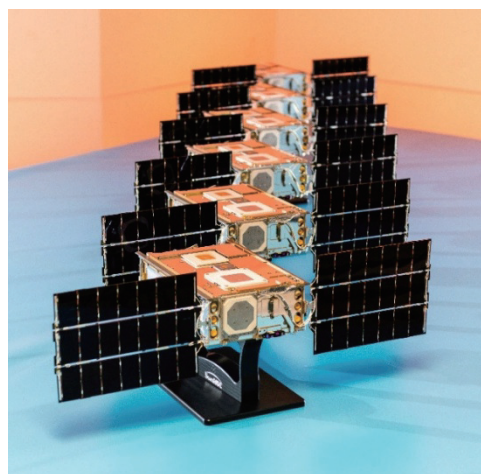


图 9 用于六星编队分布式射电干涉任务的卫星实物图 (图片来源: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia25789-completed-sunrise-smallsats-pictured-together/>)

Fig. 9 Photograph of the satellites for the six-satellite formation distributed radio interferometry mission (image source: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia25789-completed-sunrise-smallsats-pictured-together/>)



图 10 用于低频信号探测的 LOFAR 阵列核心区 (图片来源: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/04/Core_of_LOFAR_radio_astronomy_network)

Fig. 10 The LOFAR array core for low-frequency signal detection (image source: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/04/Core_of_LOFAR_radio_astronomy_network)

是覆盖欧洲西北部的大规模低频射电望远镜阵列, 可用于探测低频射电信号, 并研究早期宇宙和低频射电天体现象。

在接收与信号处理技术层面, 面向太阳射电观测对宽带、高动态范围和长期稳定运行的要求, 系统设计正朝着数字接收机与宽带模拟前端协同、高集成度、低功耗以及多通道并行处理的方向发展, 以更好适应偏远野外台站和无人值守条件下对能耗、可靠性及维护成本的严格要求。同时, 实时成像与动态谱生成算法也在持续优化, 为快速捕获太阳爆发事件提供了技术支撑。另一方面, 机器学习与人工智能方法在太阳射电观测中的应用潜力日益显现, 尤其在复杂电磁环境下的射频干扰识别与抑制、爆发事件自动检测以及高时间分辨率数据快速处理等方面, 展现出良好的应用前景。

此外, 多站协同观测与网络化运行模式也将成为太阳射电观测的重要发展方向。通过统一接口规范、高精度时间同步以及多源联合定标技术, 可实现跨站点、跨频段的数据融合分析, 从而为高精度、多尺度的太阳射电物理研究和空间天气监测提供更有力的支撑。总体而言, 随着相关技术的持续进步, 我国射电天文学研究正迈向新的发展阶段。然而, 尽管我国在太阳射电观测设备建设方面已取得显著进展, 但在部分关键环节, 如超宽频带连续覆盖、高一致性多站联合定标、长期稳定运行能力以及海量数据实时处理等方面, 仍有持续优化空间。基于此, 围绕重大科研仪器开展自主研发、推动核心技术突破, 对于提升我国射

电观测仪器整体水平、促进射电天文学的长期发展具有重要意义。在这一背景下, 相关单位正积极推进射电干涉测量仪器的规划与研制工作, 以期为我国射电天文学研究提供新的技术支撑, 推动相关领域进一步发展。

5 结 论

空间天气灾害源于太阳活动, 尤其与太阳爆发现象密切相关。对这类事件开展持续监测与及时预警, 对于保障国家空间基础设施安全运行和促进空间资源的和平利用具有重要意义。经过长期发展, 全球已建成众多太阳射电观测台站和观测仪器, 逐步形成了覆盖低频至高频、米波至毫米波等多个频段的多层次观测体系, 为太阳物理和空间天气研究提供了重要支撑。未来几年, 随着国际子午圈等重大观测项目相关设备的陆续建成并投入运行, 我国射电天文学研究有望迈入新的发展阶段。新站址、新设备与新技术的应用将有望提升射电天文领域的观测能力和研究深度, 同时也对宽带高精度定标、复杂环境下的稳定运行以及海量观测数据的高效处理提出了更高要求。在此背景下, 加强与国际先进观测设施的协同观测和数据共享, 深化关键技术与重大科学问题方面的合作研究, 对于提升我国射电天文学整体研究水平具有重要意义。同时, 这也将有助于推动相关领域的多学科交叉融合与青年人才培养, 为我国太阳射电观测技术和空间天气研究的持续发展提供有力支撑。

致谢

本文作者谨向中国科学院国家空间科学中心王威老师等专家学者致以诚挚谢意, 感谢其在本文撰写过程中给予的宝贵指导和建议。

References

- Abramov-Maximov V E, Bakunina I A. 2024. Preflare fluctuations of radio emission from active regions of the Sun according to observations at RSTN[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 64(7): 1054-1058.
- Benz A O, Monstein C, Beverland M, et al. 2009a. High spectral resolution observation of decimetric radio spikes emitted by solar flares—first results of the Phoenix-3 spectrometer[J]. *Solar Physics*, 260(2): 375-388.
- Benz A O, Monstein C, Meyer H, et al. 2009b. A world-wide net of solar radio spectrometers: e-CALLISTO[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 104(1): 277-285.

- Brown J C. 1971. The deduction of energy spectra of non-thermal electrons in flares from the observed dynamic spectra of hard X-ray bursts[J]. *Solar Physics*, 18(3): 489-502.
- Chang S W, Wang B, Lu G, et al. 2024. Development of a 90–600 MHz meter-wave solar radio spectrometer[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 272(1): 21.
- Chen L J, Yan Y H, Tan B L, et al. 2021. Study of very low frequency solar radio emission detection with space vector antenna[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 8(1): 100-108 (in Chinese).
- Chertok I M. 2018. Diagnostic analysis of the solar proton flares of September 2017 by their radio bursts[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 58(4): 457-463.
- Deng L, Yan J Y, Wu L, et al. 2023. Interplanetary shock three-dimensional tomography based on small satellites[C]// 2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS): 1-4.
- Du J, Yan Y H, Xu Z C, et al. 2016. Upgrading and improvement of the 2840 MHz solar radio flux radiometer[J]. *Astronomical Research & Technology*, 13(1): 52-57 (in Chinese).
- Fabircius J. 1611. De Maculis in Sole Observatis, Et Apparente Earum Cum Sole Conversione, Narratio[M]. Wittenberg: Johann Rhau-Gorlichsen
- Fu Q J, Ji H R, Qin Z H, et al. 2004. A new solar broadband radio spectrometer (SBRS) in China[J]. *Solar Physics*, 222(1): 167-173.
- Geng L H, Tan C M, Dun J P, et al. 2018. Two new 3-bands solar radio polarimeters and spaceweather[J]. *Astronomical Research and Technology*, 15(4): 380-389 (in Chinese).
- Grechnev V V, Lesovoi S V, Smolkov G Y, et al. 2003. The Siberian Solar Radio Telescope: The current state of the instrument, observations, and data[J]. *Solar Physics*, 216(1): 239-272.
- Grechnev V V, Meshalkina N S, Chertok I M, et al. 2013. Relations between strong high-frequency microwave bursts and proton events[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65: S4.
- Guo S J, Shen F X, Gao G N, et al. 2023. Development of solar radio spectrometer with ultra-wideband and ultra-high resolution[J]. *Astronomical Research and Technology*, 20(6): 518-526 (in Chinese).
- Hou Y C, Zhang Q M, Feng S W, et al. 2020. Identification and extraction of solar radio spikes based on deep learning[J]. *Solar Physics*, 295(10): 146.
- Jansky K G. 1933. Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin[J]. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 21(10): 1387-1398.
- Kallunki J, Uunila M, McKay-Bukowski D. 2015. Multi-frequency solar observations at Metsähovi Radio Observatory and KAIRA[J]. *Astronomische Nachrichten*, 336(6): 566-569.
- Kuznetsov A. 2025. A new type of fine spectral structure in the solar radio emission[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 68(10): 109631.
- Lee J, White S M, Chen X, et al. 2020. Microwave study of a solar circular ribbon flare[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 901(1): L10.
- Li C, Tian H, Huang Y. 2023. New era of Chinese solar instruments[J]. *Science China Technological Sciences*, 66(4): 1203-1204.
- Li C Y, Chen Y, Wang B, et al. 2025. A novel fine spectral structure of solar radio bursts with periodic beaded stripes observed by CBSSm of CMP-II[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 68(10): 109611.
- Lüthi T. 1999. Nulling interferometer for solar flare observations at 90 GHz[D]. Bern: Institute of Applied Physics, University of Bern.
- Nakajima H, Sekiguchi H, Sawa M, et al. 1985. The radiometer and polarimeters at 80, 35, and 17 GHz for solar observations at Nobeyama[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 37(1): 163-170.
- Nishizuka N, Karlický M, Janvier M, et al. 2015. Particle acceleration in plasmoid ejections derived from radio drifting pulsating structures[J]. *The Astrophysical Journal*, 799(2): 126.
- Oliveira D M, Zesta E, Garcia-Sage K. 2025. Tracking reentries of Starlink satellites during the rising phase of solar cycle 25[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 12: 1572313.
- Oughton E J, Skelton A, Horne R B, et al. 2017. Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure[J]. *Space Weather*, 15(1): 65-83.
- Pannuti T G. 2020. The Physical Processes and Observing Techniques of Radio Astronomy[M]. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Papaioannou A, Sandberg I, Anastasiadis A, et al. 2016. Solar flares, coronal mass ejections and solar energetic particle event characteristics[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 6: A42.
- Prestage N P, Luckhurst R G, Paterson B R, et al. 1994. A new radio spectrograph at Culgoora[J]. *Solar Physics*, 150(1): 393-396.
- Rohlfs K, Wilson T L. 2013. Tools of Radio Astronomy[M]. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Ryle M. 1952. A new radio interferometer and its application to the observation of weak radio stars[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 211(1106): 351-375.
- Sawant H S, Subramanian K R, Faria C, et al. 2001. Brazilian solar spectroscopy (BSS)[J]. *Solar Physics*, 200(1): 167-176.
- Scully J, Flynn R, Gallagher P T, et al. 2023. Improved Type III solar radio burst detection using congruent deep learning models[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 674: A218.
- Shang Z Q, Xu K, Liu Y, et al. 2022. A broadband solar radio dynamic spectrometer working in the millimeter-wave band[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 258(2): 25.
- Shang Z Q, Wu Z, Liu Y, et al. 2023. The calibration of the 35–40 GHz solar radio spectrometer with the new moon and a noise source[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 268(2): 45.
- Shimojo M, Iwai K. 2023. Over seven decades of solar microwave data obtained with Toyokawa and Nobeyama Radio Polarimeters[J]. *Geoscience Data Journal*, 10(1): 114-129.
- Tan B, Cheng Z. 2013. The mid-term and long-term solar quasi-periodic cycles and the possible relationship with planetary motions[J]. *Astrophysics and Space Science*, 343(2): 511-521.
- Tapping K F. 2013. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7)[J]. *Space Weather*, 11(7): 394-406.
- Wang L, Zhang P, Liu S M, et al. 2017. Calibration of the Mengcheng solar radio spectrometer[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 58(1): 48-60

- (in Chinese).
- Wang W, Yan Y H, Tan B L, et al. 2024. Wide-band solar radio spectral monitoring in the Phase II of Chinese Meridian Project[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 55(1): 1-5 (in Chinese).
- Wang Y, Deng L, Yan J Y, et al. 2025. Formation design for interplanetary shock imaging interferometric array[J]. *Advances in Space Research*, 75(9): 6752-6769.
- Wang Y X, Dong Z, Lu G, et al. 2022. Design of a high-resolution antenna array solar observing system for radio frequencies of 25–110 MHz[J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 39: e030.
- Wild J P, McCready L L. 1950. Observations 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 Chemistry*, 3(3): 387-398.
- Xu L, Yan Y H, Yu X X, et al. 2019. LSTM neural network for solar radio spectrum classification[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 19(9): 135.
- Xu X F, Zhao Z F, Liu Q, et al. 2025. A 50–55 GHz millimeter-wave radiometer spectrometer for solar flare detection[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 279(1): 29.
- Xu X F, Kong Y Z, Lu G, et al. 2026. Research on calibration black-body radiation source for solar flare detection Spectrometer (50–70 GHz)[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 74(1): 647-655.
- Yan F B, Wu Z, Shang Z Q, et al. 2022. The first flare observation with a new solar microwave spectrometer working in 35–40 GHz[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 942(1): L11.
- Yan F B, Zhang Y Z, Liu G, et al. 2026. Design of a new solar radio observing system working in 3–6 GHz[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 138(1): 014504.
- Yan Y H, Chen Z J, Wang W, et al. 2021. Mingantu spectral radioheliograph for solar and space weather studies[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8: 584043.
- Yan Y H, Zhou Z C, Yao X, et al. 2024. Solar radio imaging-spectroscopic observations of fine structures in a flare event[C]// United Nations Germany Workshop on the International Space Weather Initiative: Preparing for the Solar Maximum: 229-240.
- Yu Y L, Xu S, Zhang L, et al. 2023. A two-element interferometer for millimeter-wave solar flare observations[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 267(1): 14.
- Zhang L, Su Y R, Wu Z, et al. 2023. A new 6–15 GHz solar radio observation system[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 268(1): 27.
- Zhang L. 2024. Development of a broadband solar radio spectrometer in centimeter wave and research on signal processing method[D]. Weihai: Shandong University (in Chinese).
- Zhang P, Li R, Zhao K, et al. 2025. Development of an Integrated Meteorological Observation System in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(3): 729-760 (in Chinese).
- Zhang P J, Yu S J, Kontar E P, et al. 2019. On the source position and duration of a solar type III radio burst observed by LOFAR[J]. *The Astrophysical Journal*, 885(2): 140.
- Zhang W D, Yan F B, Han F Y, et al. 2021. Auto recognition of solar radio bursts using the C-DCGAN method[J]. *Frontiers in Physics*, 9: 646556.
- Zic A, Murphy T, Lynch C, et al. 2020. A flare-type IV burst event from Proxima Centauri and implications for space weather[J]. *The Astrophysical Journal*, 905(1): 23.
- Zou T, Shang Z Q, Shen Y P, et al. 2023. Research on calibration sources for a 35–40 GHz millimeter-wave solar radio observation system[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(5): 4094-4101.

附中文参考文献

- 陈林杰, 颜毅华, 谭宝林. 2021. 基于空间矢量天线的太阳低频射电爆发探测研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 8(1): 100-108.
- 杜静, 颜毅华, 徐之材, 等. 2016. 2840 MHz 太阳射电辐射流量计的升级改造[J]. *天文研究与技术*, 13(1): 52-57.
- 耿立红, 谭程明, 敦金平, 等. 2018. 三频段太阳射电望远镜与空间天气[J]. *天文研究与技术(中英文)*, 15(4): 380-389.
- 郭少杰, 沈发新, 高冠男, 等. 2023. 超宽带超高分辨率太阳射电频谱仪的研发[J]. *天文研究与技术(中英文)*, 20(6): 518-526.
- 王璐, 张平, 刘四明, 等. 2017. 蒙城太阳射电频谱仪的定标[J]. *天文学报*, 58(1): 48-60.
- 王威, 颜毅华, 谭宝林, 等. 2024. 子午工程二期宽波段太阳射电频谱监测[J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 55(1): 1-5.
- 张磊. 2024. 榭山宽频厘米波太阳射电连续谱仪研制及信号处理方法研究[D]. 威海: 山东大学.
- 张鹏, 李锐, 赵坤, 等. 2025. 中国综合气象观测系统的业务发展[J]. *气象学报*, 83(3): 729-760.