廊坊 L&S 波段精密太阳射电流量望远镜及其观测结果介绍

李牧迪[1,2]　董亮[1]　黄文耿[3]　王晶[3]　赵明亮[3]　张洪瑞[4]　覃祎丰[4]

1(中国科学院云南天文台　昆明　650011)

2(中国科学院大学　北京　101408)

3(中国科学院国家空间科学中心　北京　100089)

4(云南大学信息学院　昆明　650500)

摘要　L 波段太阳射电剧烈爆发事件是影响导航通信稳定的潜在因素之一。为此，中国科学院云南天文台与国家空间科学中心针对性的研制了 L&S 波段精密太阳射电流量望远镜，对 L 波段 8 个频点和 S 波段的 2840MHz（即 F10.7 指数）进行了实时监测。在本系统中采用了实时定标技术，实时切换天线和匹配负载接入接收机，将天线输入信号与 50Ω匹配负载的噪声功率差值作为观测数据，降低了由于温漂等影响带来的系统增益变化，提高了观测数据稳定性。该望远镜运行状态良好，通过 1333 天的连续观测，其 F10.7 数据与国际数据对比相关性达 0.95，并在此期间捕捉到多次太阳射电爆发影响导航信号事件。验证了射电望远镜在空间天气关键指数监测领域的效能，为未来面向空间天气用户的长期服务提供技术支撑。

关键词　太阳射电、空间天气、流量观测、F10.7 指数、实时定标;

中图分类号　P161.1

Introduction to the Langfang L&S-band Precision Solar Radio Flux Telescope and Its Observation Results

Li Mudi[1,2]　Dong Liang[1]　Huang Wengeng[3]　Wang Jing[3]　Zhao Mingliang[3]
Zhang Hongrui[4]　Qin Yifen[4]

1(Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

3(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089, China)

4(School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract　Intense solar radio burst events in the L-band are one of the potential factors affecting the stability of navigation and communication. To address this, Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, and National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, have specifically developed the Langfang L&S-band Precision Solar Radio Flux Telescope, which

* 乌鲁木齐市 “红山科创英才” 集聚计划科技 “小组团” 人才项目 —— 空间电磁感知先进阵列技术研发（乌科发〔2025〕22 号；B241018006）；科技部平方公里阵列射电望远镜（SKA）专项（2020SKA0110202）、科技部政府间合作项目（2022YFE0140000）、云南省重点研发项目（202303AP140003）共同资助

最新录用

conducts real-time monitoring of 8 frequency points in the L-band and 2840 MHz (i.e., the F10.7 index) in the S-band. The system adopts real-time calibration technology, which switches the antenna and matched load to access the receiver in real time, and uses the noise power difference between the antenna input signal and the 50Ω matched load as observation data. This reduces the receiver gain variation caused by temperature and other factors, and improves the stability of observation data. Currently, the telescope is in good operating condition. Through 1333 days of continuous observation, the correlation coefficient between its key space weather indicator data (F10.7 index) and international data reaches 0.95. During this period, multiple events of solar radio bursts affecting navigation signals have been captured. This verifies the effectiveness of the radio telescope in monitoring key space weather indices and provides technical support for long-term services to space weather users in the future.

Keywords solar radio, flux, precision monitoring, F10.7 index, real-time calibration

录用稿件，非最终出版稿

0. 背景

太阳射电爆发是太阳耀斑与日冕物质抛射过程中伴随产生的宽频带强电磁辐射，其频段覆盖千米波至毫米波范围[1]。这类爆发产生的强烈背景噪声可在约 8 分钟内抵达地球空间，直接导致无线通信系统接收端本底噪声飙升、信噪比下降，严重时引发信号失锁与定位服务中断，是对空间天气安全构成重大威胁的灾害事件之一[2]。

其中，与全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System,GNSS）信号工作频段高度重合的 L 波段（1-2 GHz），受太阳射电爆发的威胁尤为突出[3]。历史上多次强爆发事件已充分印证其破坏力：2005 年 9 月的爆发使 GPS L1 波段峰值流量升至 8700 SFU（Solar Flux Unit），导致多颗卫星载噪比显著下降[4]；2003 年 10 月的爆发造成 GPS L2 波段信号衰减达 10.0 dB，致使接收机无法完成导航解算[2]； 2015 年 11 月的爆发干扰了日下点区域的航空导航系统[5]；2017 年 9 月的强爆发更是让 L 波段流量突破 7000 SFU 并持续一小时以上，若发生在北斗系统覆盖区域将造成严重影响 。然而，当前国内针对 L 波段太阳射电爆发的监测能力仍存在显著短板：一是传统预警手段（如 X 射线流量监测）对射电爆发的提前预警时间极短，近乎现报状态[6]，难以满足导航系统的应急响应需求；二是现有观测设备多侧重爆发事件的动态频谱捕捉，或仅在 2.84 GHz 等固定频点开展流量监测，缺乏能同步、连续、精确测量 L 波段多个离散频点精密辐射流量的专用系统[6]，无法支撑导航干扰的定量分析；三是常规观测易受接收机增益随温度漂移等因素影响，长期数据稳定性难以保障，进一步限制了监测结果的应用价值。

除了短时太阳射电爆发的实时预警需求，长期、稳定的太阳活动水平表征同样是空间天气业务的核心需求。太阳射电 10.7 厘米波（2840 MHz）流量（即 F10.7 指数），是国际公认的长期稳定太阳活动基本度量指标[7]。其核心物理基础在于，该波段辐射与太阳极紫外（EUV）辐射均源于日冕等离子体，二者在数天至 11 年太阳活动周等多时间尺度上均呈现高度相关性（相关系数 ＞0.85[7,8]），因此被广泛用作太阳 EUV 辐射的关键代理变量，成为热层-电离层经验模型（如 MSIS 系列）、空间天气业务模型中不可或缺的输入参数，直接服务于太阳

能量输入表征、电离层延迟修正及卫星轨道衰减预测等关键应用[9,10]。但当前国内 F10.7 指数的获取与应用仍面临两大核心问题：一是数据高度依赖国际来源，长期以加拿大 DRAO 等国外数据集为主要参考[11]；二是自主监测精度有待提升，早期国内观测数据因设备稳定性、数据处理方法等限制，需经专门校准处理后才能与国际数据形成较高相关性[11]。

为此，构建一个既能监测 L 波段多频点精密流量以服务导航安全预警，又能同步获取高精度 F10.7 指数的观测系统，具有明确的科学价值与应用需求。

基于此，中国科学院云南天文台与国家空间科学中心联合研制了 L&S 波段精密太阳射电流量望远镜。该系统旨在通过对 L 波段 8 个选定频点及 S 波段 2840 MHz 频点的实时、同步、定标观测，填补国内在该领域高精度、多频点连续性监测的空白，为太阳射电爆发对导航信号影响的定量分析、空间天气建模与预警提供高质量的数据支撑。

1. 整机技术方案

本系统由工作于 L-S 波段的 4.5 米天线子系统、接收机子系统、采集与信号处理子系统以及观测软件子系统等四个部分构成，几部分的关系为如下：

1) 天线子系统：采用 4.5 米抛物面天线与赤道式跟踪座架，实时、精准跟踪太阳，将空间的太阳射电辐射信号汇聚并由双圆极化馈源接收，工作频段覆盖 1-3GHz，为 L 与 S 波段观测提供高增益、稳定信号输入。

2) 接收机子系统：采用基于实时定标技术的多通道直接放大式方案。负责将天线馈源接收的微弱信号进行低噪声放大、滤波，并利用 ADL5513 检波芯片将信号功率转换为电压，以精确表征 L 波段 8 个频点及 S 波段 2840 MHz 频点接收通带内的信号总功率。

3) 采集与信号处理子系统：基于 NI cDAQ-9188 模块化硬件平台构建。通过 NI 9215 采集卡将接收机输出的模拟电压转换为高精度数字信号，并进行实时积分降噪；同时由 NI 9472 控制卡精准控制接收机微波开关，在太阳信号、冷空背景、标准噪声源与匹配负载之间切换，实现系统的实时同步标定，消除增益漂移。

4) 观测软件子系统：基于 LabVIEW 平台开发，集成参数配置、采集控制、数据显示、记录存储与异常预警功能。软件可实时显示 L 与 S 波段共 18 个通道的射电流量，并在流量数据超出预设阈值时触发预警，实现观测全流程的自动化与智能化。

2. 天线子系统

廊坊 L&S 波段太阳射电流量望远镜天线采用 4.5 米直径的抛物面天线，赤道式跟踪结构，采用双圆极化馈源，工作于 1-3GHz 频段；

太阳射电望远镜天线系统的主要特点是：采用新型馈源能同时高效宽带接收左/右旋圆极化信号；采用赤道式天线座架及高精度步进电机，具有形式简单、可靠性高、跟踪精度高、跟踪范围大等优势；由天线控制单元控制天线主瓣波束指向并跟踪太阳；天线系统具有自校准功能和完善的故障诊断功能。

天线面由整体实板反射面和反射面背架组装而成；天线座架由底座、赤经轴装置和赤纬轴装置等组成；伺服控制由天线监控单元、天线控制器、天线驱动单元、控保电路、电源和对外接口等组成。图 1 是 4.5 米天线的组成框图。图 2 是天线的整体图。

最终录用

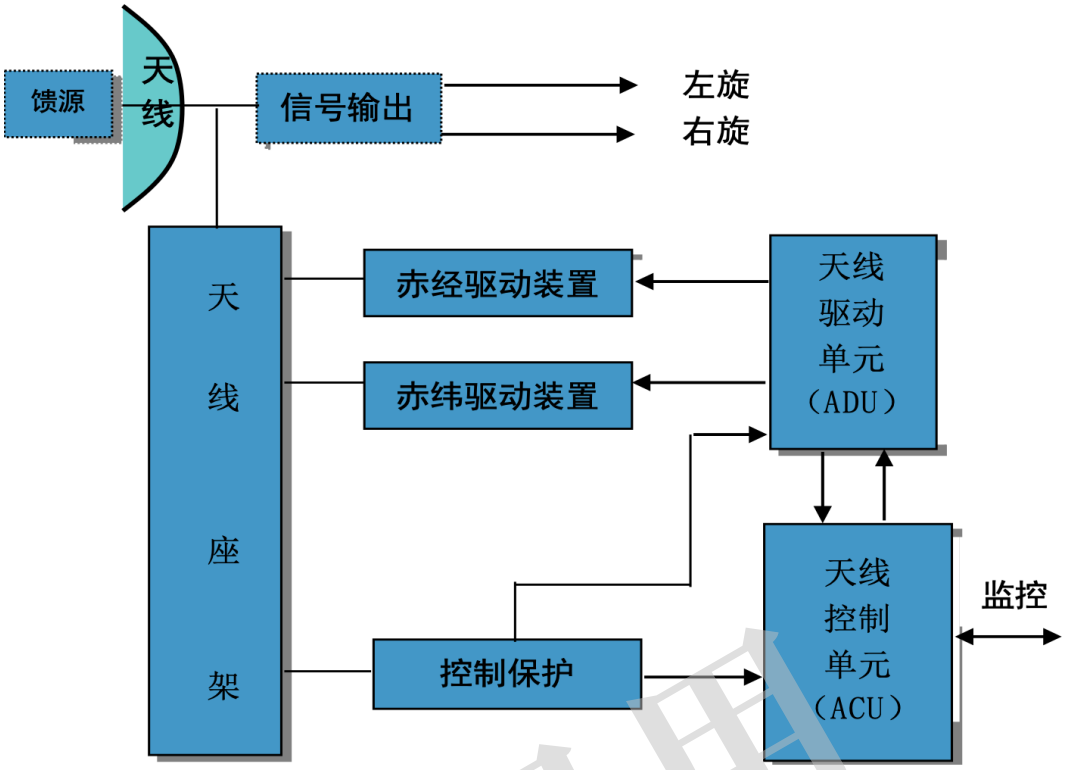


图 1 天线组成框图

Fig.1 Block diagram of the antenna composition

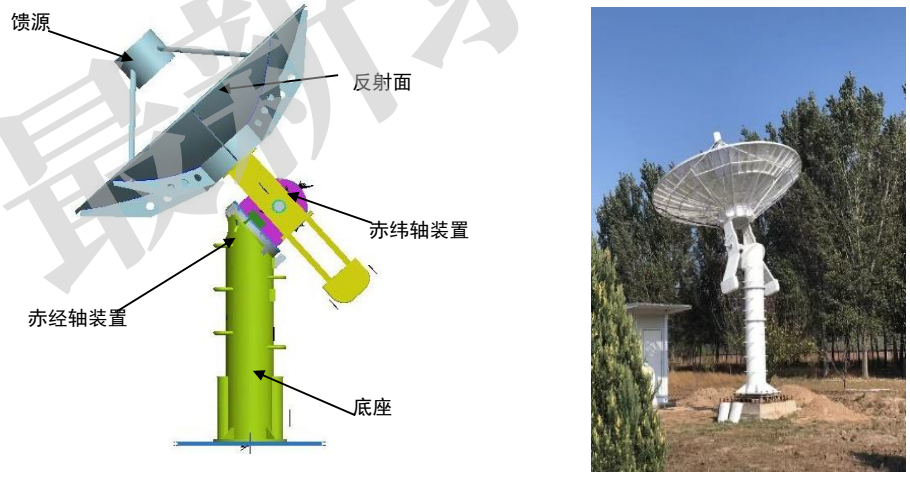


图 2 天线整体示意图

Fig.2 Overall schematic diagram of the antenna

天线的主要参数如表 1：

表 1 天线主要参数

Table 1 Antenna Key Parameters

序号	参数名称	参数	备注
1	天线口径	4.5m±1cm	设计保证
2	天线形式	抛物反射面	设计保证

最新录用

3	座架形式	赤道式（设计保证）	设计保证
4	工作频带	1-3GHz	馈源设计保证
5	天线增益	≥31.0dBi（1427MHz） ≥37.1dBi（2840MHz）	仿真验证
6	第一旁瓣电平	≤-14dB	设计保证
7	极化	左/右旋圆极化	设计保证
8	电压驻波比	≤2.5:1	出厂实测
9	面板精度	≤3 mm（RMS）	同型产品实测
10	驱动形式	程控、手动	设计保证
11	指向精度	≤0.5°（RMS）	同型产品实测
12	转动范围	赤经：±95°，赤纬：-35°～+56°	现场实测
13	转动速度	恒动速度：0.25°/s； 快动速度：≥1°/s	现场实测

最新录用

3. 接收机子系统

接收机子系统是望远镜实现高精度流量监测的核心，负责将天线接收的微弱太阳射电信号进行放大、滤波与射频功率--电压转换。为满足 L 与 S 波段多频点同步、长期稳定观测的苛刻要求，本系统采用了基于实时定标技术的多通道直接放大式接收机方案（XK630 型），其核心任务是在宽温（-30 ~ +60 ℃）工作环境下，保证系统增益的稳定性和测量的绝对精度,接收机关键性能指标如表 2 所示。

表 2 接收机关键性能指标

Table 2 Receiver Key Performances

指标	L 波段	S 波段
监测频点	1230, 1320, 1380, 1426.8, 1520, 1600, 1650, 1695 MHz	2840 MHz
带宽	±2.5 MHz (5MHz)	±5 MHz (10MHz)
LNA 增益	29.65 dB(实测平均值)	31.86 dB(实测值)

指标	L 波段	S 波段
系统增益	58.66 dB(实测平均值)	63.71 dB(实测值)
噪声系数	1.805 dB(实测平均值)	3.249 dB(实测值)
增益起伏	≤ 1% (10 小时内实测)	≤ 1% (10 小时内实测)
动态范围	≥ 40 dB（实测）	≥ 40 dB （实测）

3.1 接收机结构与工作原理

该射电望远镜工作于 L&S 波段，采用多通道选通、直接放大结构，选通 L 波段内 8 个无无线电干扰的 5MHz 带宽信号，作为监测频段进行太阳实时流量测量；同时具备 2.84GHz 频点流量监测能力；

接收机采用“室外低噪声放大单元（ODU）+室内微波处理单元（IDU）”的架构，结构图如图 3 所示。ODU 直接安装于天线馈源后方减少馈线损耗，其核心是低噪声放大器，用于提升初始信噪比。IDU 则完成信号的进一步滤波、增益调整与检波。系统通过实时切换天线信号、标准噪声源与匹配负载作为输入，并计算其功率差值，从而在信号链路上实时消除由温度漂移和器件老化引起的增益波动，确保观测数据的长期绝对精度。

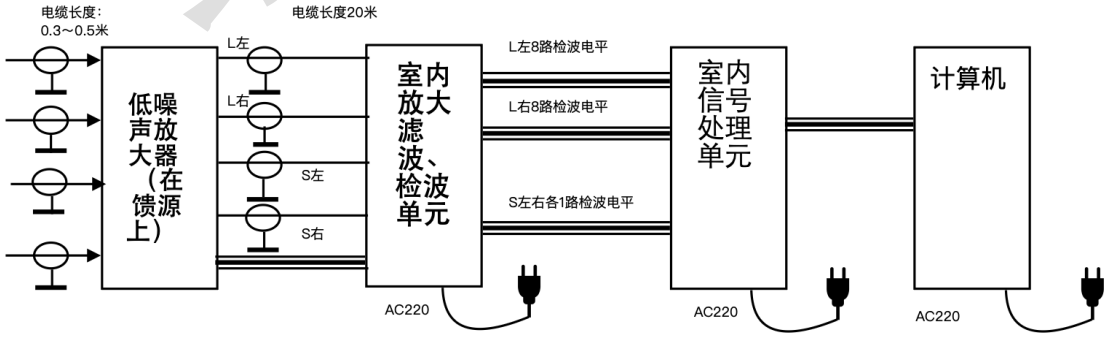


图 3 接收机结构图

Fig.3 Block diagram of the receiver structure

室外低噪声放大单元核心为低噪声放大器，包括 L 频段左右旋和 S 频段左右旋的低噪声放大器，开关，调制器，噪声源及噪声功分器等射频组件组成，低噪放大单元原理图如图 4 所示，安装在天线馈源的位置，天线接口和低噪声放大器的输入接口越近越好，减少电缆插损，提高接收灵敏度。经放大后的射频信号经电缆传输到室外设备。同时控制信号和直流电源通过航空插头和室外设备连接。

最新录用

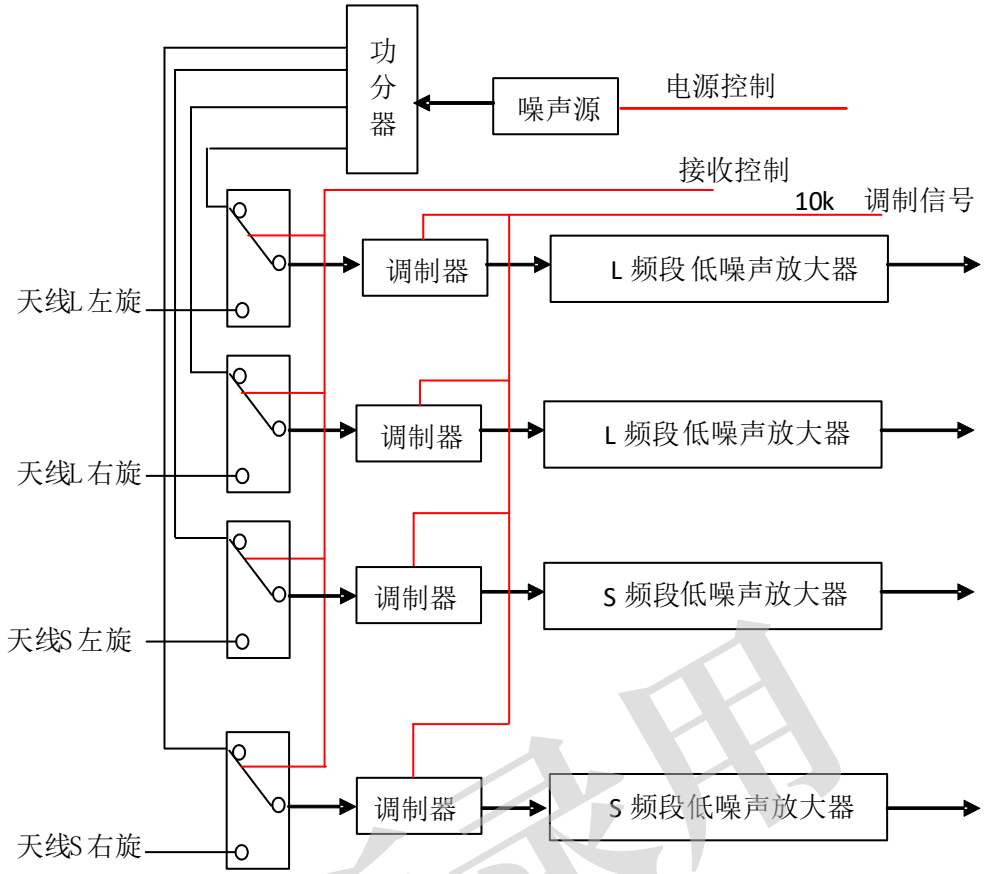


图2.1 低噪声放大器原理框图

图 4 低噪放大器原理结构框图

Fig.4 Principle and structure block diagram of the low-noise amplifier

低噪声放大器包括输入开关，调制器和低噪声放大器部分，输入开关为单刀双掷开关，切换接收观测信号和标准噪声源信号，即观测状态与定标状态的切换。对于单刀双掷开关的要求如下：

（1） 频率： 分别满足 1200—1700MHz，2840MHz 工作频率。

（2） 隔离度： ≥ 25dB

（3） 开关速度： ≤ 2us

（4） 插入损耗： ≤ 1～1.5dB

调制器为解决系统增益变化的问题，其核心功能是抵消接收机中放大器等部件因温度波动、器件老化产生的增益漂移，从而保障长期观测的功率测量精度。硬件配置上，调制器采用适配 L-S 波段（1~3 GHz）的单刀双掷射频开关，关键参数需满足：切换速度≤2 μ s、隔离度≥25 dB、插入损耗≤1.5 dB，可实现信号路径的快速、低损耗切换；工作原理为以 10 kHz 的固定频率周期性切换，前半周期将输入信号接入接收机链路，后半周期将 50 Ω 匹配负载接入链路作为参考基准；协同逻辑上，调制器的切换时序与数据采集卡（NI 9215）的采样时钟严格同步，确保每个电压采样点均对应明确的“输入信号 /50 Ω 负载”状态，为后续通过差分运算消除增益漂移提供可靠的时序基础。

低噪声放大器参数如下：

最新录用

（1） 工作频率： 1200~1700MHz；2840MHz

（2） 噪声系数： ≤ 1dB（最大值）

（3） 增益： ≥ 30dB

（4） 输出动态： Pout(1dB) ≥ 5dBm

噪声源采用商用标准噪声源，超噪比≥ 15dB。功分器采用一分四宽带功分器，1~3GHz带宽。插入损耗≤ 8dB（包括接头和连线）。因此到校准输入的超噪比为7dB左右，根据噪声源和功分器可以准确计算出输入到接收机的噪声温度，进行功率标校。

3.2 检波芯片

检波是接收机子系统实现射频信号功率量化的关键环节。廊坊L&S波段精密太阳射电流量望远镜的接收机子系统需将天线捕获的微弱太阳射电信号（射频波段）转换为可量化的直流电压信号表征带内总功率。由于太阳射电流量的动态范围极宽（平静期流量仅数SFU，强爆发期可达10000 SFU以上），且观测环境温度波动显著（-30～+60℃），检波芯片需满足宽频覆盖、高动态范围、宽温稳定、低噪声四大核心需求，才能支撑多频点精密流量监测与实时定标技术的实现。

本系统最终选定ADI公司的宽带直接检波芯片ADL5513作为核心检波器件，其平方率检波特性与宽频、高稳定性能，可匹配 L 波段（1230～1695 MHz）8个频点及S波段（2840 MHz）信号的同步检波需求，为太阳射电流量的高精度测量提供硬件保障。其关键参数如表3所示(参数源自芯片官方数据手册[11])：

表 3 ADL5513 关键参数

Table 3 ADL5513 Key Parameters

参数类别	参数名称	具体数值	单位
工作频带	工作频率范围	1 ~ 4000	MHz
动态范围	±3dB 动态范围（典型值）	75	dB
温度稳定性	工作温度范围	-40 ~ +125	℃
温度稳定性	全温区检波增益漂移（P_IN=-30dBm）	±0.31	dB
检波性能	灵敏度（最小可检测输入功率）	-70	dBm

3.3 定标模块及方案

定标模块由标准噪声源、50Ω匹配负载及两类单刀双掷射频开关组成，核心通过 “轮换太阳 — 冷空 — 噪声源 — 匹配负载” 流程实现系统实时校准（图 5），两类开关的协同作用及时序逻辑是保障定标精度的关键：输入切换开关负责切换不同信号源（天线、噪声源）的接入，调制器开关负责提供实时负载参考，二者均由 NI 9472 控制卡驱动，切换速度≤2μs，满足高速同步需求。由于在接收机中部分射频部件，如低噪声放大器，容易受到温度影响，而导致其增益/插损产生变化，如果不采用实时定标方式，这部分变化将会折算到

最新录用

太阳射电流量变化中。

具体定标时序为：每 2 小时启动一次定标，首先系统预热 5 分钟，随后按 “太阳观测（30s）→冷空观测（30s）→噪声源定标（30s）→匹配负载定标（30s）” 的顺序执行，每个阶段中调制器开关均以 10kHz 频率周期切换 “信号 / 负载”，确保采集到的各类功率数据均包含系统增益基准信息；所有时序切换与数据采集卡的采样时钟严格同步，避免信号错位导致的校准误差。

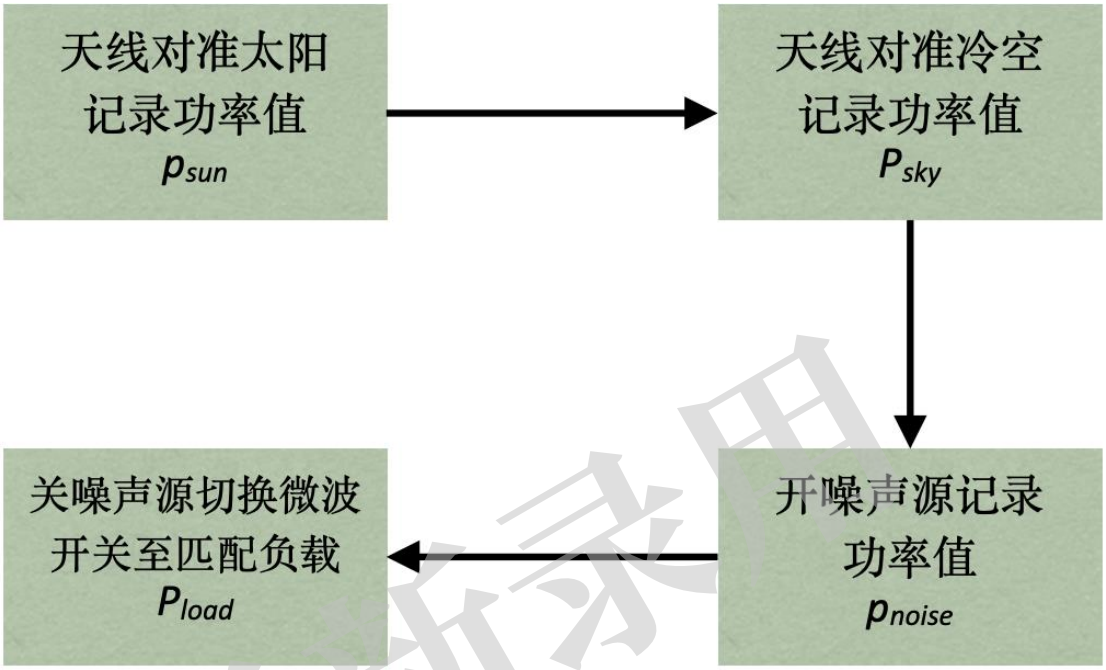


图 5 定标流程图

Fig.5 Flow chart of calibration

每隔 2 个小时，用标准噪声源对接收机进行标校，分别采集太阳（P_{sun}）、冷空（P_{sky}）、噪声源（P_{noise}）和终端（P_{load}）的数据（如图 6）。

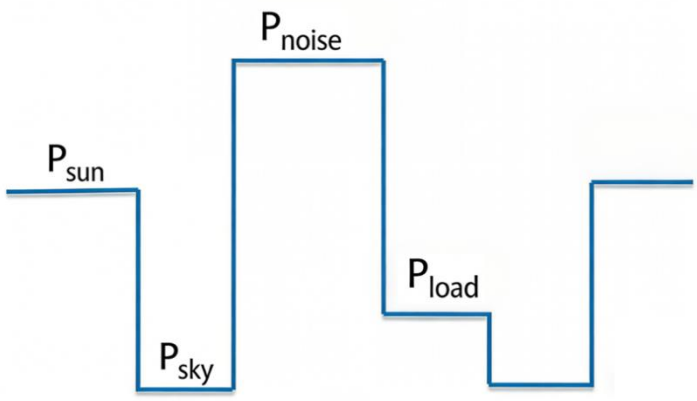


图 6 观测中采集宁静太阳、冷空、噪声源和匹配负载在接收机的读数

Fig.6 Readings of quiet sun, cold sky, noise source and matching load collected by the receiver during observation

定标观测结束后，自动生成 2 分钟的单独定标记录文件，并计算太阳净太阳射电辐射流量 $S_s(f)$-$S_b(f)$，并加载在对后面 2 个小时的观测进行系统校正（见公式 1）。

$$\frac{P_{\text{sun}}(f)-P_{\text{sky}}(f)}{P_{\text{noise}}(f)-P_{\text{load}}(f)}=\frac{S_s(f)-S_b(f)}{N_n(f)-N_t(f)}\cdot A(f) \quad (1)$$

$P_{\text{sun}}(f)$:天线对准太阳时接收机记录的总功率值;

$P_{\text{sky}}(f)$:天线偏开太阳对准冷空时接收机记录的背景功率值;

$P_{\text{load}}(f)$:接收机接入 50Ω 匹配负载时记录的基准功率值;

$S_s(f)$:太阳射电的真实辐射流量密度;

$S_b(f)$:冷空背景的真实辐射流量密度;

$N_n(f)$:标准噪声源的固有辐射功率;

$N_t(f)$:50Ω 匹配负载的固有热噪声功率;

已知噪声源的特性可得到$N_n(f)-N_t(f)$=常数。$A(f)$为天线系统的频率特性，可以通过每天的宁静太阳流量与 SGD（太阳和地球物理资料）上相应频段上的标准流量进行长期相关获得。

4. 采集与信号处理子系统

采集与信号处理子系统是望远镜实现多频点信号量化、实时处理与稳定记录的核心环节，其核心功能是接收接收机子系统输出的模拟电压信号，通过高精度数据采集、程序化开关控制、实时数据处理及标准化记录存储，将太阳射电流量信息转化为可长期存储、分析的数字数据，同时配合实时定标技术消除系统误差，保障观测数据的精度与稳定性。该子系统由硬件设备、控制逻辑、数据处理机制及软件配置四部分构成，整体架构紧凑、功能协同高效。

4.1 核心硬件组成

子系统基于 NI（National Instruments）模块化硬件搭建，具备高可靠性与扩展性，其结构图如图 7 所示，核心硬件配置如下：

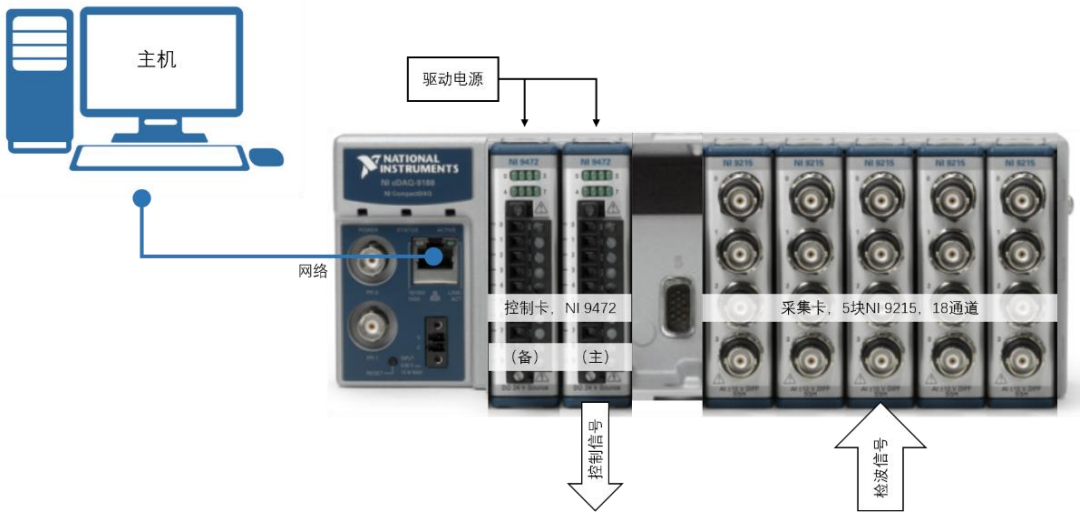


图 7　采集与信号处理子系统硬件组成

Fig.7　Hardware composition of the acquisition and signal processing subsystem

最新录用

1. **机箱单元**：采用 NI cDAQ-9188 机箱作为硬件集成平台，该机箱支持以太网通信协议，可实现远程控制与数据传输，配备 8 个插槽用于模块扩展，适配 5 块采集卡与 2 块控制卡，同时为数据采集卡与控制卡提供统一的同步通信接口，通过精确的时钟同步机制，保障多模块协同工作的稳定性与信号采集、开关控制的时序同步性。
2. **数据采集卡（AI）**：配置 5 块 NI 9215 模拟输入采集卡，该采集卡采用 16 位 ADC 分辨率，单卡支持 4 路差分输入通道，5 块卡协同实现 18 路信号并行采集能力（含冗余通道备用），核心用于采集接收机子系统经 ADL5513 检波转换后的直流模拟信号。采集卡输入电压范围支持 ±10V，可完全适配接收机子系统 0.47~4.7V 的检波输出电压，采样率固定为 100 S/s，能精准捕获 L 波段 8 个频点、S 波段 2840 MHz 频点的左 / 右旋圆极化信号对应的电压数据，为多频点流量监测提供高精度硬件支撑。
3. **控制卡**：配置 2 块 NI 9472 数字输出控制卡（1 块主控、1 块备用），每块卡具备 8 路独立数字输出通道，单通道最大输出电流达 20mA，支持 12~24V DC 外部供电，可直接驱动微波开关矩阵的切换执行机构，如图 8 所示。硬件接口包含 Vsup(供电端)、DO(数字输出端)、COM(公共端)及设备连接端口；其通过 Port0 Line0 和 Port0 Line1 两路信号实现两级精准控制，Line0 负责切换天线信号（Low 电平）与噪声源信号（High 电平），日常观测时保持 Low 电平接收太阳射电信号，每日 9:00、12:00、15:00 切换为 High 电平开展 3 分钟定标测试，Line1 则切换第一级输入信号（Low 电平）与 50Ω 负载信号（High 电平），每个控制周期内通过两路采集数据相减消除系统本底噪声；控制卡的电平切换时序由采集软件统一调度，切换延迟可在 Constant.vi 中配置，确保开关稳定切换后启动数据采集，全程无需人工干预。

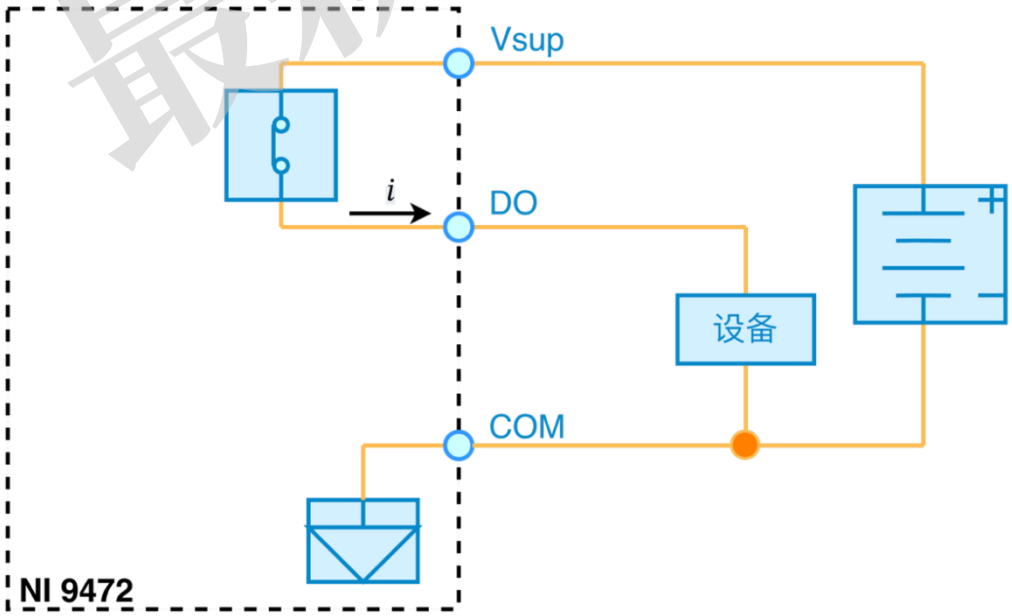


图 8　控制卡连线图

Fig.8　Wiring diagram of the control card

最新录用

5. 观测软件子系统

观测软件子系统是廊坊 L&S 波段精密太阳射电流量望远镜实现“参数配置 - 数据采集 - 实时显示 - 记录存储 - 异常预警”全流程自动化运行的核心支撑，基于 LabVIEW 软件开发平台构建，具备模块化设计、操作便捷、稳定性强等特点。其核心目标是协同采集与信号处理子系统的硬件设备，完成多通道射电信号的实时监测、数据标准化管理，并通过可视化界面呈现观测结果，同时响应定标流程触发与异常事件预警，为观测人员提供直观、高效的操作与分析工具。软件界面如图 9 所示：

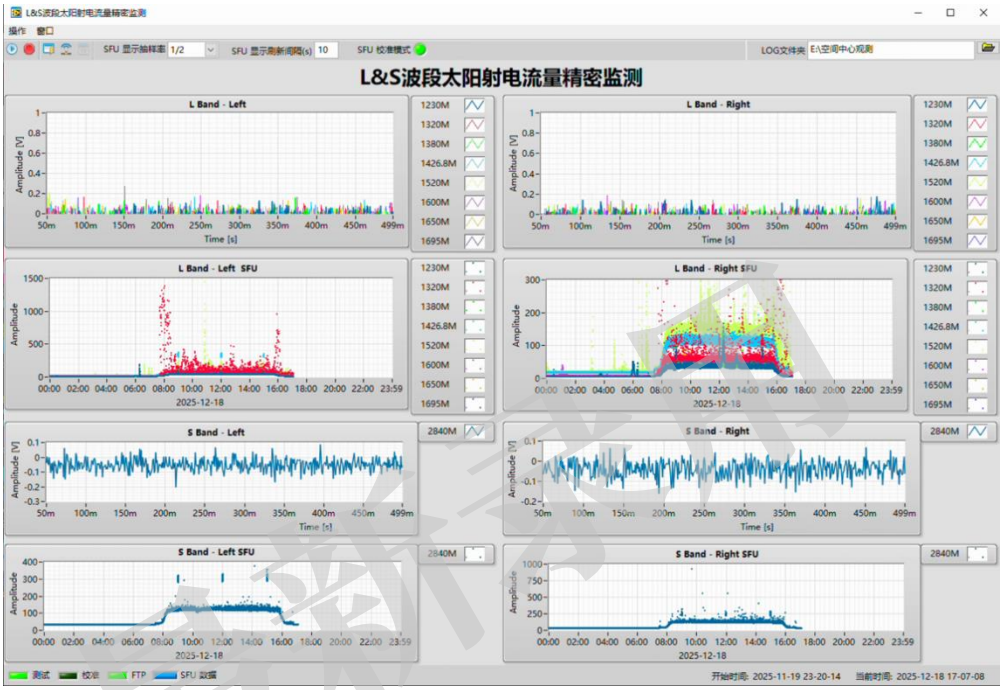


图 9　软件界面

Fig.9　Software interface

5.1 软件核心功能

软件子系统围绕望远镜精密监测需求，整合五大核心功能，实现观测全流程闭环管理：

1. **参数可视化配置**：支持采集通道、控制通道、采样参数、记录规则及定标时间的个性化配置与默认保存，适配硬件设备的协同工作需求；
2. **采集流程自动化控制**：通过程序指令驱动 NI 9472 控制卡实现微波开关切换，同步触发 NI 9215 采集卡完成 18 通道数据并行采集，自动区分日常观测与定标观测模式并切换；
3. **多维度数据实时显示**：动态呈现 L 波段 8 个频点（左/右旋极化，共 16 通道）及 S 波段 2840MHz（左/右旋极化，共 2 通道）的射电流量幅值（以电压为表征），支持时间轴追溯与多通道对比；
4. **标准化数据记录**：按预设规则自动生成日常观测文件与定标文件，实现数据的分类存储、定时归档，保障数据的可追溯性与完整性；
5. **异常事件预警**：实时监测各通道流量数据，当数值超出预设阈值（基于历史宁静期数据与定标基准值）时，触发声光预警并记录异常事件的时间、频点及幅值信息。

5.2 程序架构设计

软件采用多循环协同架构，通过消息队列实现模块间数据交互，确保采集、处理、记录流程的同步性与稳定性，架构分为三大核心循环，程序架构图如图 10 所示：

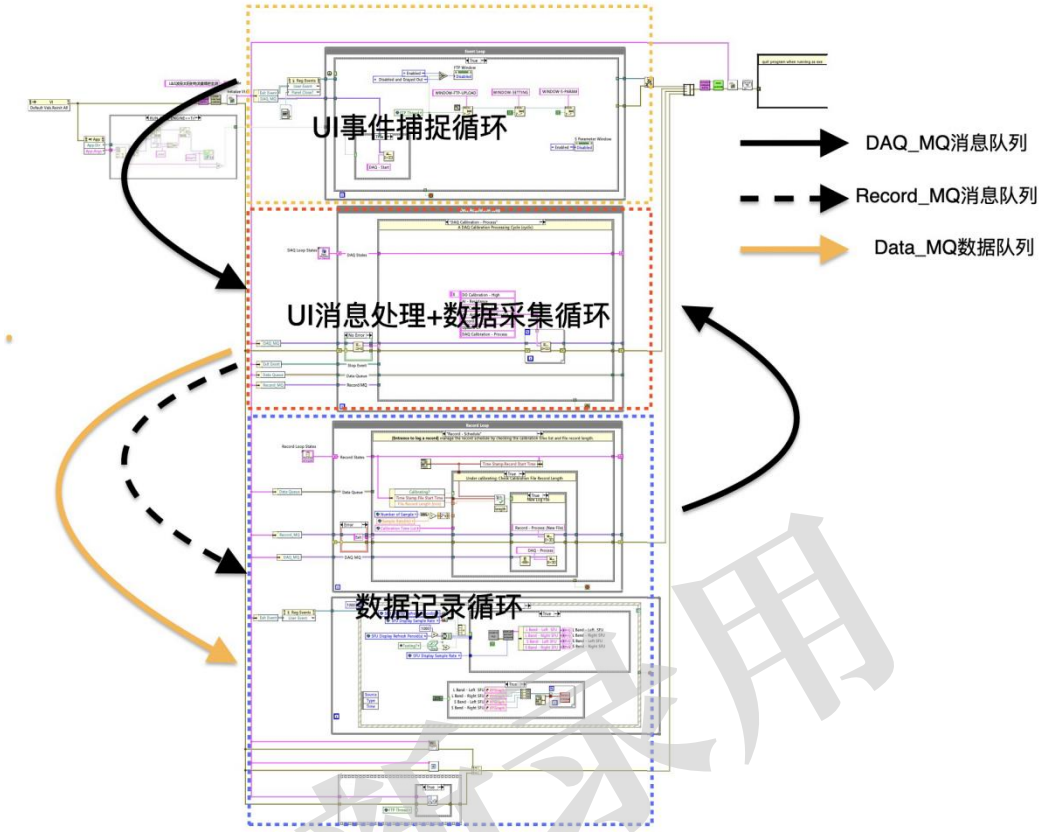


图 10　程序架构图

Fig.10　Program architecture diagram

1. **UI 事件捕捉循环**：实时响应用户操作（启动 / 停止 / 退出、路径修改等），触发对应功能模块的状态切换，同时将用户指令通过 DAQ_MQ 消息队列传递至数据采集模块；
2. **UI 消息处理 + 数据采集循环**：接收 UI 循环指令后，初始化 DAQ 设备（NI 9215、NI 9472），按预设参数驱动控制卡完成微波开关切换，同步触发采集卡采集 18 通道数据，将原始数据暂存至 Data_Q 数据队列；同时实时读取采集数据，更新主界面的幅值曲线显示；
3. **数据记录循环**：监听 Data_Q 数据队列，按记录规则将数据写入文件：日常观测模式下每 10 分钟生成新文件，定标模式下持续记录 3 分钟后生成独立定标文件；

6. 观测数据分析

6.1 观测数据的预处理

观测数据的预处理是廊坊 L&S 波段精密太阳射电流量望远镜数据处理链路的前置环节，其核心目标是通过标准化的数据转换、系统增益校准及国际标准对标，消除原始数据中的随机噪声、背景辐射干扰与系统误差，提取出准确表征太阳射电净流量的标准化数据，为后续长期观测趋势分析、短时爆发事件识别及空间天气指标反演提供高质量的数据基础。

F10.7 指数的计算需同步获取两类观测数据：一是天线跟踪太阳时采集的射电辐射电压

最新录用

序列$V_{\mathrm{solar}}[i]$；二是天线偏开太阳 2°时采集的冷空背景电压序列$V_{\mathrm{sky}}[i]$，两组数据均由 NI 9215 采集卡以 100 S/s 的采样率同步记录[12,13]。

接收机中采用的 ADL5513 检波芯片为对数响应特性，其输出电压与输入功率呈对数关系。为获得真实的功率值，需将对准太阳和冷空时采集的电压序列$V_{\mathrm{solar}}[i]$和$V_{\mathrm{sky}}[i]$，依据检波器标定系数 0.021 V/dB，根据公式 2 和公式 3 逐点转换为线性功率值$P_{solar_line}[i]$和$P_{sky_\mathrm{line}}[i]$：

$$P_{solar_line}[i] = 10^{\frac{\frac{V_{solar}[i]}{0.021}}{10}} \tag{2}$$

$$P_{sky_line}[i] = 10^{\frac{\frac{V_{sky}[i]}{0.021}}{10}} \tag{3}$$

将上述数组进行平均，就得到太阳辐射功率线性平均值$P_{sola\mathrm{r_mean}}$和冷空功率线性平均值P_{sky_mean}。

为获得稳定可靠的校准常数，选取太阳活动宁静日（无耀斑爆发）的国际公布 F10.7 指数作为基准F_{107}^{S}，通过公式 4 多次计算得到收敛的修正因子 S_0，：

$$S_0 = \frac{F_{10.7}^{S} * P0_{solar_mean}}{P0_{sky_mean}} \tag{4}$$

利用收敛后的修正因子S_0，结合每日中午 12:33-13:03 时段的功率积分均值$P_{\mathrm{solar_mean}}$和$P_{\mathrm{sky_mean}}$，由公式 5 计算得到当日 F10.7 指数。

$$F_{10.7} = S_0 * \frac{P_{solar_mean}}{P_{sky_mean}} \tag{5}$$

6.2 长期观测数据展示

本研究对国产 F10.7 数据与国际参考数据进行对比分析，评估国产数据质量。分析结果表明，国产数据与国际数据之间具有高度一致性，序列对比如图 11 所示。散点图(图 12)与回归分析显示两者皮尔逊相关系数为 0.909，表明国产数据与参考数据线性相关极强且无显著系统偏差。差异分布分析显示平均差异为 0.93，如图 13 所示，表明国产数据整体略高于参考数据但偏差较小。Bland-Altman 一致性分析中 95%的数据点落在一致性界限（-30.67, 32.53）内，平均差异线（+1.86）接近零线，进一步证实测量方法的一致性。综合评估显示国产 F10.7 数据在一致性、准确性和稳定性方面表现较好，数据质量满足科学研究应用需求。

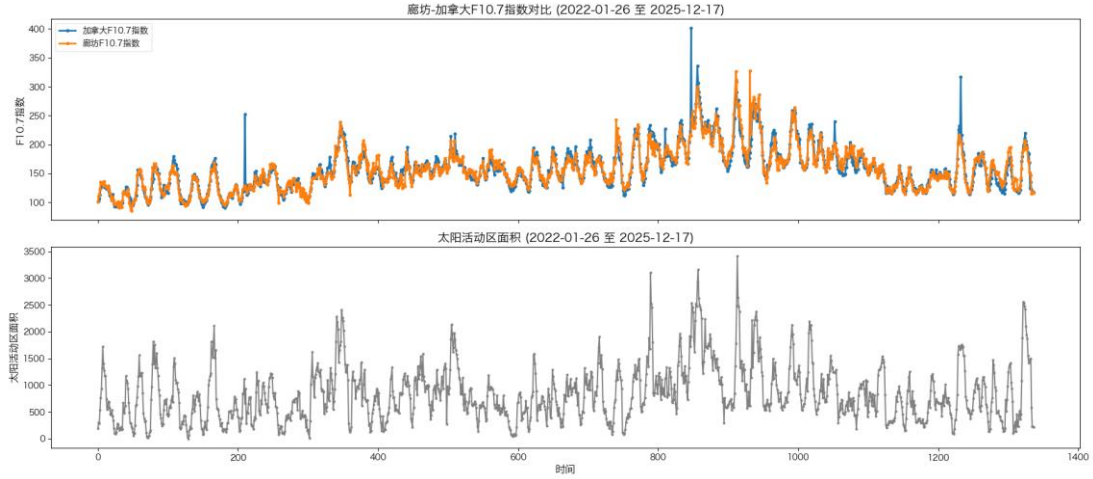


图 11　廊坊数据与国际 F10.7 指数对比序列图

Fig.11　Comparison sequence diagram of Langfang data and international F10.7 index

对于部分尖峰的显著差异，核心原因是太阳射电爆发的定向辐射特性与两台站的地理跨

最新录用

度。加拿大 DRAO 台站（西经 119°）位于西八区，廊坊台站（东经 116°）位于东八区，两台站时区差达 16 小时，观测时段天然处于“昼夜互补”状态。太阳射电爆发多为短时事件，持续时长通常在分钟至数小时量级，且爆发强度随时间快速演化。当 DRAO 台站处于白天（太阳观测窗口内）捕捉到某一爆发事件并形成数据尖峰时，廊坊台站因处于夜间（未开展太阳跟踪观测）或观测时段未覆盖该爆发的时间区间，未能记录到对应强度的信号；反之，廊坊台站白天观测到的爆发尖峰，DRAO 台站也可能因时区差异处于非观测时段而缺失。此类差异是太阳射电观测中地理区位导致的典型现象，不影响两套数据的独立可靠性，反而印证了廊坊系统对本地观测区域太阳活动的真实响应能力。

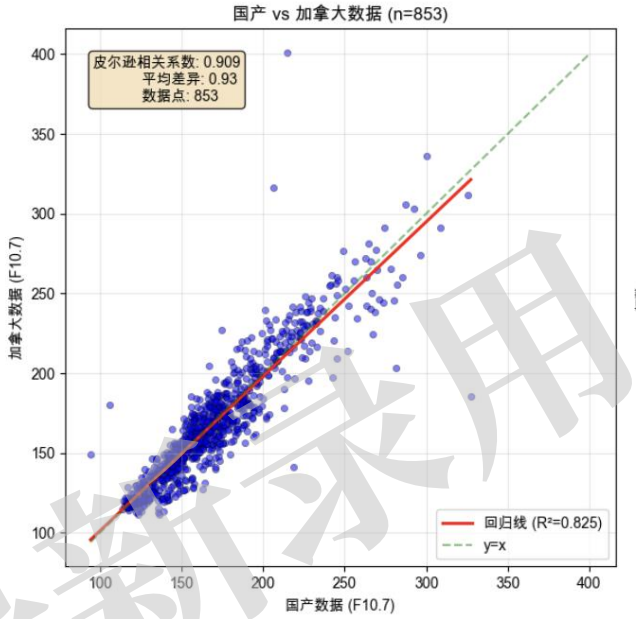


图 12　自主 F10.7 指数与国际 F10.7 指数相关性散点图

Fig.12　Scatter plot of the correlation between the self-developed F10.7 index and the international F10.7 index

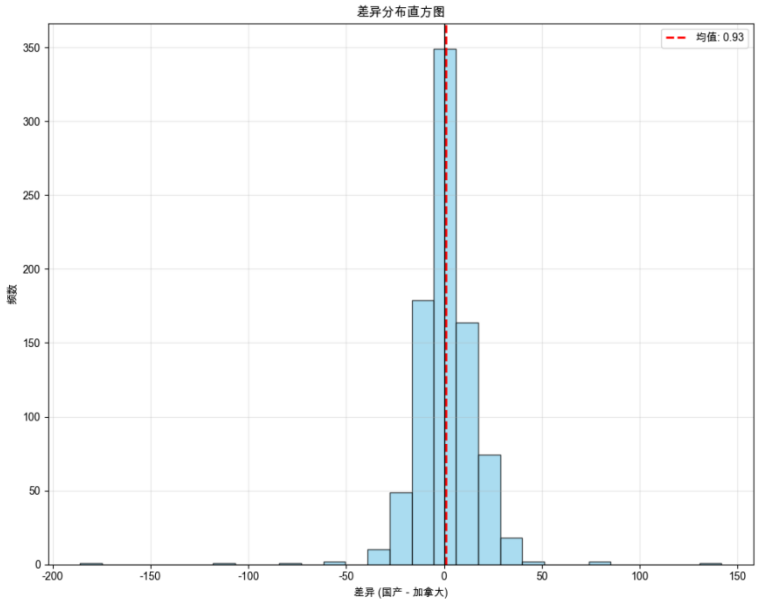


图 13 自主 F10.7 指数与国际 F10.7 指数差异分布图

最新采用

Fig. 13 Difference distribution plot between the self-developed F10.7 index and the international F10.7 index

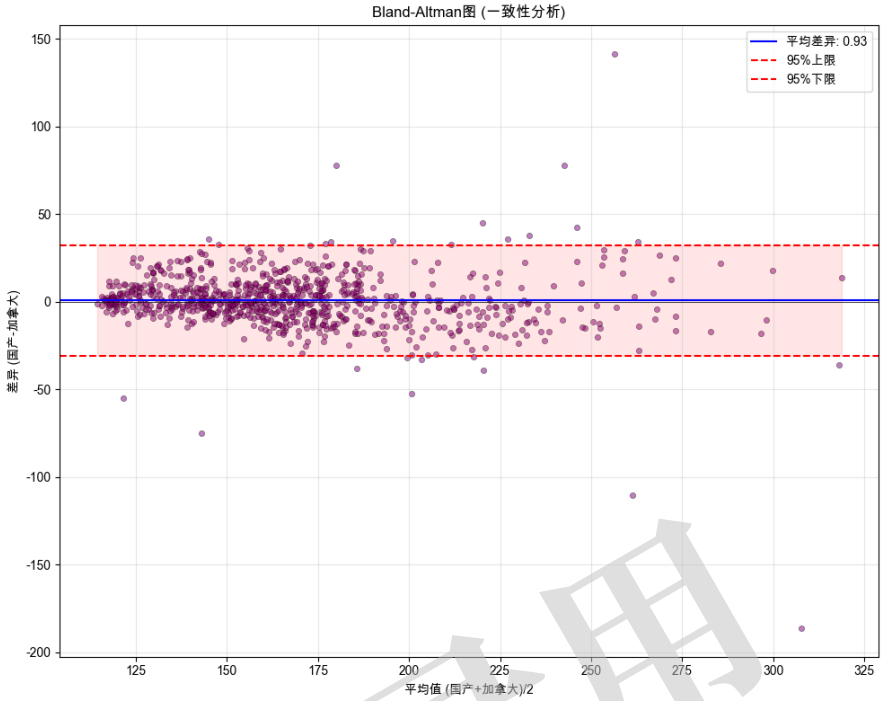


图 14 自主 F10.7 指数与国际 F10.7 指数 Bland-Altman 图

Fig. 14 Bland-Altman plot of the self-developed F10.7 index versus the international F10.7 index

6.3 短时爆发观测数据展示

为验证望远镜对太阳射电短时爆发事件的捕捉效能、数据可靠性及对导航通信的实际影响，选取多起典型事件开展跨数据对比分析，结果如下：

(1) 与国际卫星数据的同步验证

为验证望远镜对太阳射电短时爆发事件的捕捉效能及数据可靠性，选取多起典型爆发事件，将廊坊 L&S 波段望远镜观测数据与美国 GOES 卫星实时 X-ray 数据进行跨频段、多极化方式的同步对比。观测覆盖 L 波段 1380MHz、S 波段 2840MHz 等关键频点，包含左 / 右旋圆极化信号监测及 15 秒、30 秒不同积分步长配置(如图 14-17 所示)，各类对比图均显示，望远镜观测数据与 GOES 卫星实时 X-ray 在时间演化上高度契合，爆发起始、峰值及衰减节点的时间偏差均小于 30 秒，平静时段幅值相对误差≤5%，爆发时段数据一致性良好。

最新录用

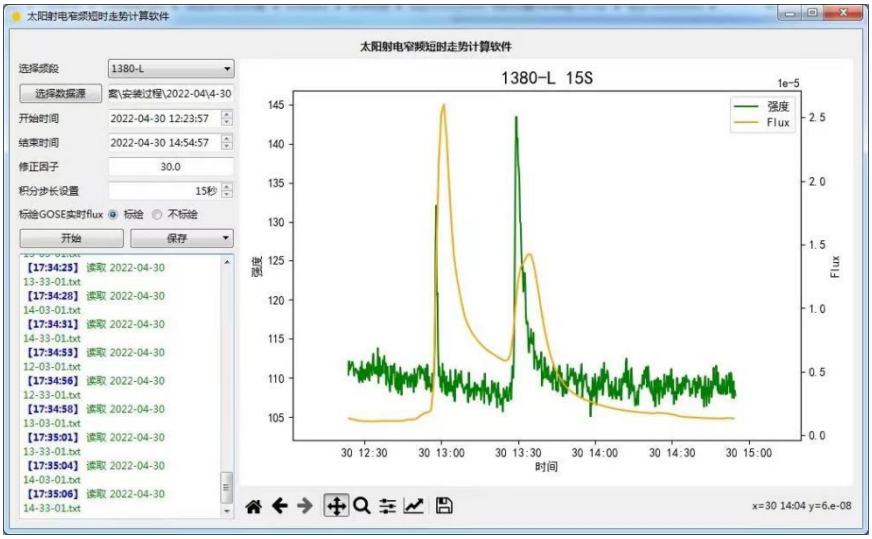


图 14　L 波段 1380MHz 左旋极化（15 秒积分步长）射电流量与 GOES 卫星 X-ray 对比图

Fig.14　Comparison diagram of radio flux at L-band 1380MHz Left-Hand Polarization (15-second integration step) and GOES satellite X-ray

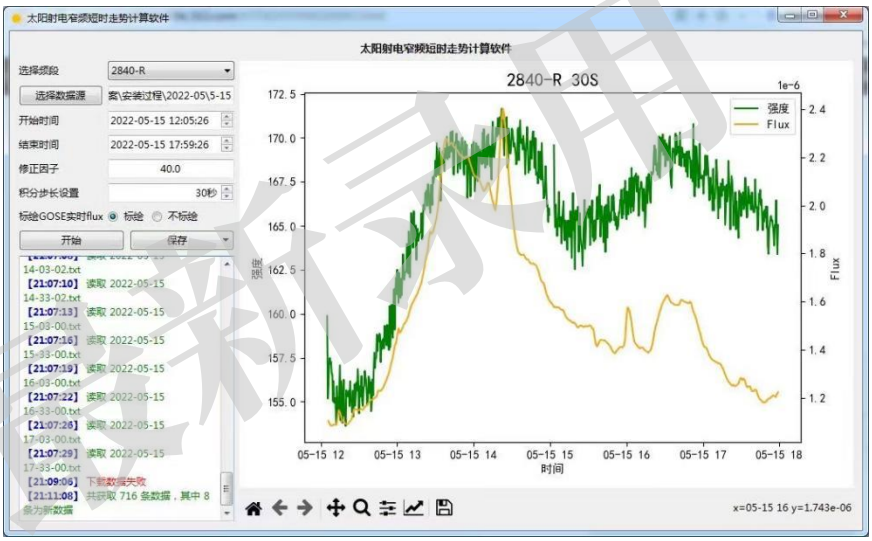


图 15　S 波段 2840MHz 右旋极化（30 秒积分步长）射电流量与 GOES 卫星 X-ray 对比图

Fig.15　Comparison diagram of radio flux at S-band 2840MHz Right-Hand Polarization (30-second integration step) and GOES satellite X-ray

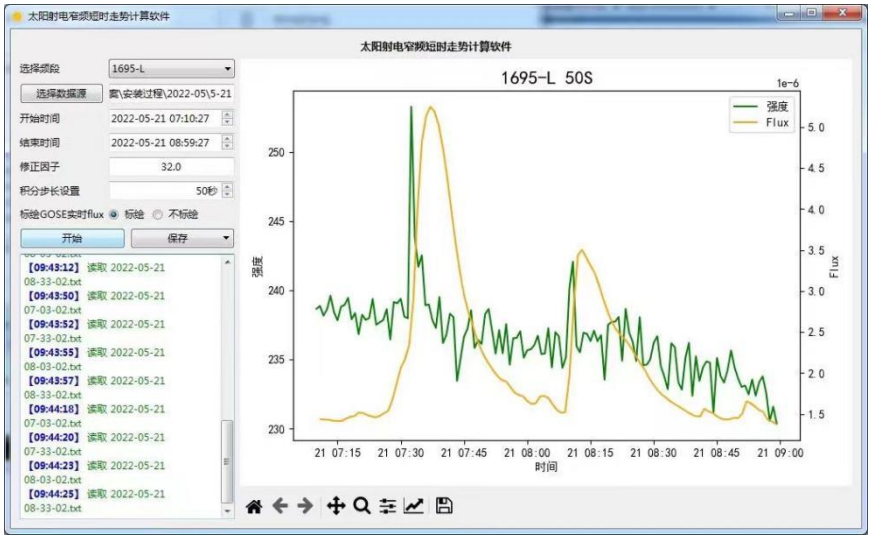


图 16　L 波段 695MHz 左旋极化（30 秒积分步长）射电流量与 GOES 卫星 X-ray 对比图

Fig.16　Comparison diagram of radio flux at L-band 1695MHz Left-Hand Polarization (30-second integration step) and GOES satellite X-ray

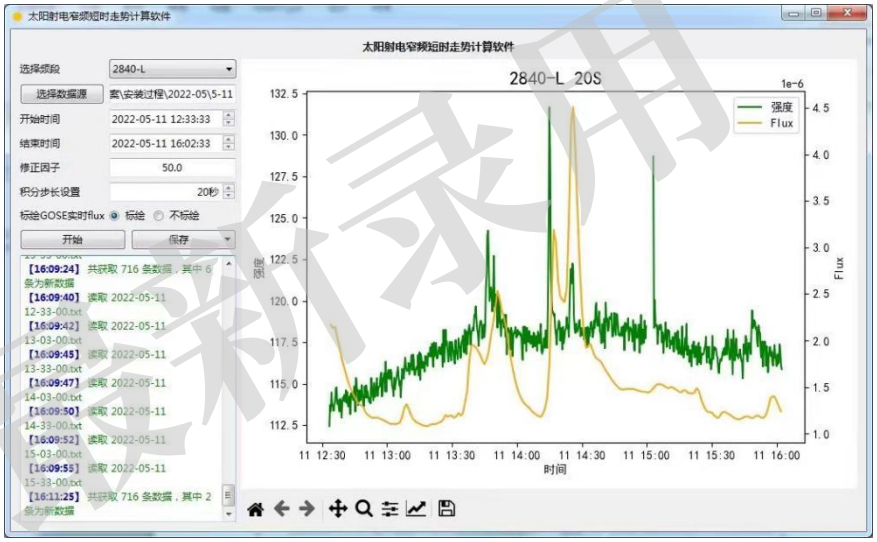


图 17　S 波段 2840MHz 左旋极化（20 秒积分步长）射电流量与 GOES 卫星 X-ray 对比图

Fig.17　Comparison diagram of radio flux at S-band 2840MHz Left-Hand Polarization (20-second integration step) and GOES satellite X-ray

(2)　典型 SRB 干扰导航通信事件实测

选取 2024 年两起典型 SRB 干扰事件，结合廊坊 L&S 望远镜观测数据、GOES 卫星 X-ray 通量数据及北斗导航系统载噪比（CNR, Carrier-to-Noise Ratio）监测数据展开分析：

2024 年 5 月 9 日事件：16:45-18:00 UTC 期间，太阳活动区爆发 X1.1 级耀斑，望远镜 1426.8MHz 通道捕捉到射电流量峰值约 1800 SFU（图 18），与 GOES 卫星记录的软 X 射线通量峰值（17:20 UTC）高度同步（图 19）。同期北斗地基接收站监测到 1230MHz 通道 CNR 瞬时降低约 5 dB（图 20），干扰持续数分钟，虽未导致信号失锁，但已对高精度导航构成风险。

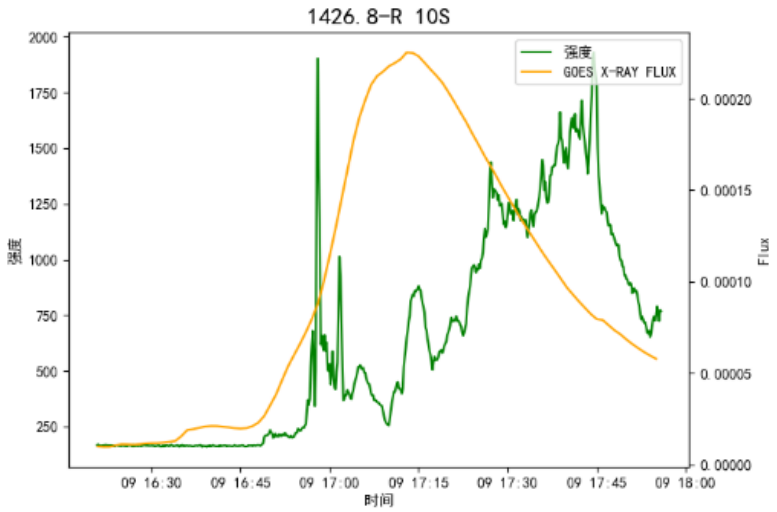


图 18　1426.8 MHz 波段 30 秒采样太阳射电爆发与 X-ray 通量对应分析

Fig.18　Corresponding analysis of solar radio burst and X-ray flux with 30-second sampling at 1426.8 MHz band

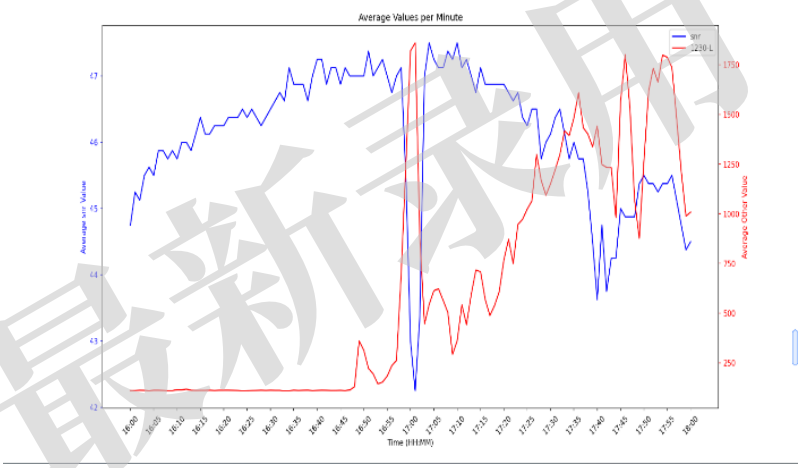


图 19　北斗导航系统载噪比与太阳射电爆发流量变化关系

Fig.19　Relationship between the carrier-to-noise ratio (CNR) of the Beidou navigation system and the variation of solar radio burst flux

2024 年 7 月 28 日事件：9:30-12:00 UTC 期间，太阳活动区爆发 M1.1 级耀斑，望远镜 1520MHz 通道观测到射电流量与 X-ray 通量呈双峰值同步演化，第二轮爆发峰值达约 2600 SFU（图 20）。事件导致北斗 L 波段相关通道 CNR 瞬时下降约 3 dB（图 21），对依赖导航连续性与稳定性的应用场景构成实质性影响。

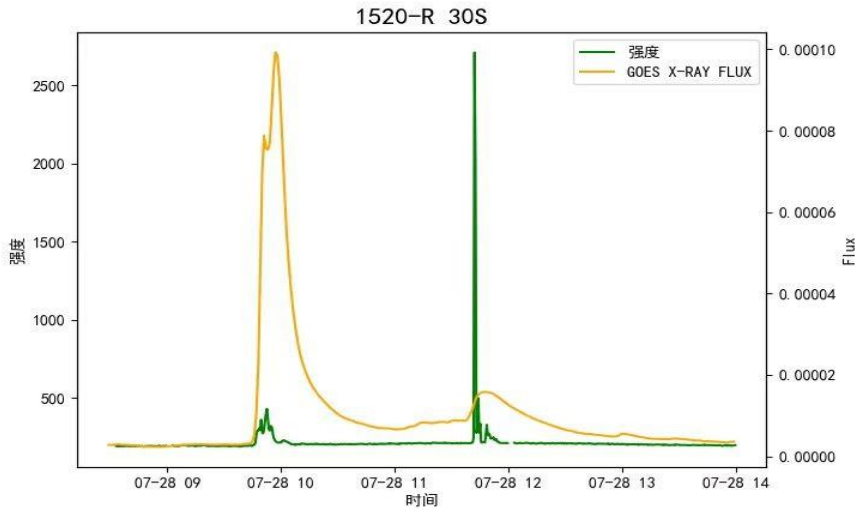
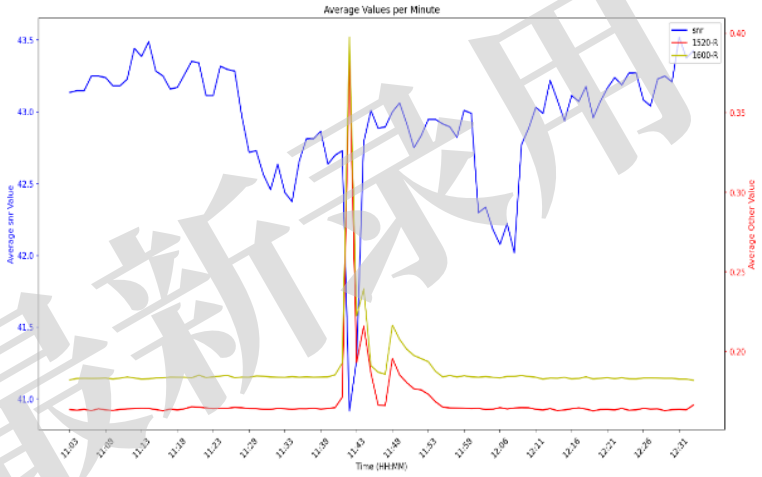


图 20　1520MHz 波段 30 秒采样太阳射电爆发与 X-ray 通量对应分析

Fig.20　Corresponding analysis of solar radio burst and X-ray flux with 30-second sampling at 1520MHz



band

图 21　北斗导航系统载噪比与太阳射电爆发流量变化关系

Fig.21　Relationship between the carrier-to-noise ratio (CNR) of the Beidou navigation system and the variation of solar radio burst flux

上述观测结果表明，廊坊 L&S 波段望远镜不仅具备捕捉 SRB 事件多频段流量变化的能力，其数据还能与卫星数据、导航系统监测数据形成有效联动，为太阳射电爆发对导航通信的实时干扰分析、风险评估提供高质量双数据支撑，充分满足空间天气预警与导航安全保障的应用需求。

7. 国内外同类型设备性能对比

为明确廊坊 L&S 波段精密太阳射电流量望远镜的技术优势，选取加拿大 DRAO 射电观测站、澳大利亚 Learmonth 太阳观测站、中国稻城太阳射电圆环阵列等国内外典型太阳射电监测设备，从观测频段覆盖、系统灵敏度、动态范围、定标能力及核心应用方向等关键指标展开对比分析，具体参数如表 7 所示。

最新录用

设备名称	观测频段覆盖	极化方式	系统灵敏度(200MHz 带宽)	瞬时动态范围	定标技术	核心应用方向
廊坊 L&S 波段精密太阳射电流量望远镜	L 波段 8 个频点 +S 波段 2840MHz	双圆极化	0.003 sfu	≥40 dB	太阳-冷空-噪声源-负载实时轮换定标	L 波段导航频段监测+F10.7 指数高精度反演
加拿大 DRAO 射电观测站	2800MHz（单频点）	单极化	0.010 sfu[14]	~30 dB[14]	每日定期噪声源定标	F10.7 指数长期监测
澳大利亚 Learmonth 太阳观测站	1415MHz 、2450MHz（离散频点）	单极化	0.008 sfu[15]	~35 dB[15]	每周人工定标	太阳射电爆发事件监测

最新录用

8. 总结与展望

廊坊 L&S 波段精密太阳射电流量望远镜是针对 L 波段太阳射电爆发对导航通信的威胁及高精度 F10.7 指数监测需求，由中国科学院云南天文台与国家空间科学中心联合研制的专用观测设备，填补了国内 L 波段多频点精密流量与 S 波段 F10.7 指数同步、连续、高精度监测的空白。

技术上，望远镜整合 4.5 米抛物面天线、实时定标多通道接收机、NI 模块化采集处理系统及 LabVIEW 观测软件，核心创新采用采用高精度实时轮换定标方案（太阳—冷空—噪声源—匹配负载），搭配 ADL5513 宽频检波芯片，有效抵消温度漂移影响，保障了 L 波段 8 个频点与 S 波段 2840MHz 频点的同步量化精度，系统具备宽温适应、高稳定性及智能化观测能力。

观测成果方面，经 1333 天连续运行验证，其 F10.7 指数与国际数据相关系数达 0.95，能反映第 25 太阳活动周水平；成功捕捉多次太阳射电爆发事件，短时爆发观测数据与 GOES 卫星数据高度吻合。

该望远镜为太阳射电爆发对导航信号影响的定量分析、空间天气建模及预警提供了可靠数据支撑，为我国导航通信安全预警及空间天气业务化服务奠定硬件基础，其技术方案与观测模式可为同类设备研发提供重要参考。

参考文献

[1] NITA G M, GARY D E, LEE J. Statistical study of two years of solar flare radio spectra obtained with the

Owens valley solar array[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, **605**(1): 528-545. DOI: 10.1086/382219

[2] CERRUTI A P, KINTNER JR 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. DOI: 10.1029/2007SW000375

[3] CARRANO C S, BRIDGWOOD C T, GROVES K M. Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS[J]. *Radio Science*, 2009, **44**(1): RS0A25. DOI: 10.1029/2008RS004071

[4] KINTNER P M, LEDVINA B M, DE PAULA E R. GPS and ionospheric scintillations[J]. *Space Weather*, 2007, **5**(9): S09003

[5] DONG Liang, YAN Xiaojuan, HUANG Wengeng, *et al*. X-ray aura analysis of the solar radio burst interfering with navigation signal events on November 4, 2015[J]. *Astronomical Techniques and Instruments*, 2021, **18**(3): 294-300. DOI: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20210524.001 (董亮, 闫小娟, 黄文耿, 等. 2015 年 11 月 4 日太阳射电爆发干扰导航信号事件中的 X 射线先兆分析[J]. 天文研究与技术, 2021, **18**(3): 294-300. DOI: 10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20210524.001)

[6] FURNELL W, SHENOY A, FOX E, *et al*. First results from the LUCID-Timepix spacecraft payload onboard the TechDemoSat-1 satellite in Low Earth Orbit[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **63**(5): 1523-1540. DOI: 10.1016/j.asr.2018.10.045

[7] TAPPING K F. The 10.7 cm solar radio flux ($F_{10.7}$)[J]. *Space Weather*, 2013, **11**(7): 394-406. DOI: 10.1002/swe.20064

[8] 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

[9] SCHONFELD S J, WHITE S M, HENNEY C J, *et al*. Coronal sources of the solar $F_{10.7}$ radio flux[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **808**(1): 29. DOI: 10.1088/0004-637X/808/1/29

[10] DE SOUZA ECHER M P, DOMINGUES M O, YAMASHITA C S, *et al*. Multiscale aspects of the solar indexes Mg II, F10.7 and sunspot number[J]. *Solar Physics*, 2024, **299**(8): 107. DOI: 10.1007/s11207-024-02348-1

[11] Analog Devices, Inc. ADL5513: 1 MHz to 4 GHz, 80 dB logarithmic detector/controller data sheet (Rev. B) [R/OL]. Norwood: Analog Devices,Inc.,2023. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adl5513.pdf.

[12] YAN Shuainan, LI Xuebao, DONG Liang, *et al*. Application of $F_{10.7}$ index prediction model based on BiLSTM-attention and Chinese autonomous dataset[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(2): 251-261. DOI: 10.11728/cjss2024.02.2023-0040 (闫帅楠, 李雪宝, 董亮, 等. 基于 BiLSTM-Attention 的 $F_{10.7}$ 指数预测模型与中国自主数据集的应用[J]. 空间科学学报, 2024, **44**(2): 251-261. DOI: 10.11728/cjss2024.02.2023-0040)

[13] Jiangsu University of Science and Technology. Solar F107 index prediction method based on multi-source observation data: CN, 202311456278.5[P]. 2024-05-03 (江苏科技大学. 一种基于多源观测数据的太阳 F107 指数预测方法: 中国, 202311456278.5[P]. 2024-05-03)

[14] NRC Dominion Radio Astrophysical Observatory. Dominion Radio Astrophysical Observatory research facility [EB/OL].Ottawa:National Research Council Canada, [2025-04-15]. https://nrc.canada.ca/en/research-development/nrc-facilities/dominion-radio-astrophysical-observatory-research-facility.

最新录用

[15] EPELOA J, MEZA A. Total column water vapor estimation over land using radiometer data from SAC-D/Aquarius[J]. *Advances in Space Research*, 2018, **61**(4): 1025-1034. DOI: 10.1016/j.asr.2017.11.023

最新录用