

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.0000-0000

低频射电环境 无人值守监测设备样机的研制

张佩玲^{1,2}, 王婧颖¹, 刘天阳^{1,2}, 余¹, 黄滢³

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049 3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

摘要: 近年来, 随着人类活动导致的射频干扰日益增多, 射电天文观测面临严峻挑战。本工作针对野外长期监测需求, 设计并实现了一个基于树莓派、AirSpy 接收器与太阳能供电的低成本自主化低频电磁环境检测系统, 工作频段为 50-300 MHz、噪声系数约为 0.7 ~ 1.9 dB。系统能够自动化扫描采样获取频谱数据, 结合瀑布图与功率谱实现干扰信号的采集与分析。实测结果表明, 在时间分辨率为 0.1ms、频率分辨率为 9.77 kHz 时, 系统可有效捕捉调频广播等典型干扰信号。系统采用低功耗架构与太阳能自主供电, 适用于野外无人值守环境, 可为射电望远镜台址电磁环境评估及射频干扰识别提供支撑。基于单块车载电池 (12V/100Ah) 的蓄电池供电, 系统可持续运行约 39 小时, 配合一块 80W 光伏太阳能板为电池充电, 实测可长时间稳定运行。

关键词: 低频射电天文; 射电干扰监测; 太阳辐射监测; 软件无线电; 无人值守

中图分类号: P161

文献标识码: A

1 引言

进入 21 世纪以来, 随着国际上大批兴起的低频射电望远镜的建设和投入使用^{[1][2]}(见表 1), 比如 21CMA 阵列 (21 CentiMeter Array, 21CMA)^[3], 默奇森宽视场阵列 (Murchison Widefield Array, MWA)^[4], 低频阵列 (Low-Frequency Array, LOFAR)^[5], 氢原子再电离时代阵列望远镜 (The Hydrogen Epoch of Reionization Array, HERA)^[6], 长波长阵列 (Long Wavelength Array, LWA)^[7], 以及国际众多国家投资建设中的平方公里阵列望远镜 (Square Kilometre Array, SKA)^[8] 的低频孔径阵列 SKA1-Low^{[9][10]}, 低频射电天文学进入了一个黄金发展阶段。这些先进的观测设施极大地提升了低频射电天文的观测能力, 使得科

收稿日期: ; 修回日期:

资助项目: SKA 专项资助 (No.2020SKA0110200), 国家自然科学基金重点项目 (12433012)

通讯作者: 王婧颖 jywang@shao.ac.cn

学家能够以前所未有的精度探测宇宙中的低频射电信号，推动了多个重要天文领域的研究进展。

对于上述工作在低频波段的射电望远镜来说，望远镜的观测会受到射频干扰 (Radio Frequency Interference, RFI) 的影响^[1]。国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 制定《无线电规则》对各项无线电业务进行频率划分，用以协调全球的无线电频率资源使用^[2]。根据 ITU 的分类，低频无线电业务包括固定、移动、广播、卫星、射电天文等。其中除了射电天文，其它无线电业务包含了主动发射电磁波的业务。因此低频射电天文很有可能会受到同频段其它发射业务的干扰^[13]。针对低频射电望远镜的干扰分为内部干扰和外部干扰^[14]。内部 RFI 由仪器生成，可以通过对设备仪器的精心设计和调试修改来控制；外部低频波段的 RFI 由人类生产生活产生，主要包括电视信号、调频无线电传输、航空和卫星通信等信号。另外还有闪电^[15]，流星余迹反射^[16]，大气波导效应^[17] 等等自然现象也会产生低频的 RFI 干扰^[18]。

表 1 低频射电观测设备

设备名称	工作频段 (MHz)	简单介绍
21CMA	50-200	21CMA 位于新疆天山深处，是大型低频射电综合孔径望远镜，用于探测宇宙黎明和第一代发光天体。由分布在东-西基线 2.74 公里和南-北基线 4.1 公里上的 81 组对数周期天线 (总计 10287 只) 组成。
MWA	80-300	MWA 是平方公里阵列先导望远镜之一，位于西澳大利亚默奇森射电天文台。两个线性极化处理带宽均为 30.72 MHz，由直径 3 公里区域内的 128 个孔径阵列组成。
LOFAR	10-240	LOFAR 是欧洲新一代射电干涉仪，采用相控阵设计。以荷兰为核心区，共 40 个观测站，是 SKA 的重要探路者。
HERA	50-250	HERA 部署于南非，由 350 台 14 米抛物面天线构成，专注于观测再电离时期及更早期宇宙大尺度结构。
LWA	10-88	LWA 由 53 个相控阵组成，分布在新墨西哥州 400 公里区域。每个台站含 256 对偶极子天线，支持高分辨率孔径合成成像。
SKA1-Low	50-350	SKA1-Low 为稀疏孔径阵列，由 512 个站点构成 (每个站点 256 根天线)，总计 131072 根天线。

射电天文观测的是来自宇宙天体的射电信号，而这些信号通常相对微弱，往往被射电干扰所淹没。实际上，射电干扰信号的强度通常比射电天文信号强一个量级以上^[19]，这使得射电天文测量极易受到 RFI 的影响，还会导致接收机产生非线性效应。随着人类活动增多，RFI 信号对窄带信道的长期污染问题更加严重，使得射电观测设备不可避免地受到更多频率的 RFI 干扰^[20]，从而导致天文观测数据的损失或质量下降。

为了保护射电天文观测设备的正常运行，需要在射电天文台址建立电磁波宁静区 (Radio Quiet Zone, RQZ)^[21]，以减少人为干扰对天文观测的影响。此外，为了更好地理解 RFI 对

天文观测的影响, 必须对射频干扰进行长期监测, 特别是在低频射电波段, 由于闪电、电离层散射、流星余迹反射、大气波导效应等因素的影响, 低频射电环境并非静态, 而是动态变化的。因此, 只有通过长期、不间断的监测, 才能深入理解低频 RFI 的特性及其对天文观测的影响。例如, Offringa 等人 (2013 年) [22] 对 LOFAR 的无线电环境进行了监测, 讨论了使用 LOFAR 进行射电天文观测时的频谱占用率问题。Offringa 等人 (2015 年) [23] 利用默奇森宽视场阵列, 基于 aoflagger 射频干扰检测算法与 cotter 预处理管道, 对 72-231 MHz 频段的射频干扰进行了系统性分析与缓解策略验证。Indermuehle 等人 [24] 基于澳大利亚平方公里阵列探路者 (Australian Square Kilometre Array Pathfinder, ASKAP) 的布尔达迪工程测试阵列 (BETA), 通过相控阵馈源 (PAF) 结合软件无线电接收机和软件无线电技术, 对 RFI 进行了深入的分析研究。刘奇等人 [25] 开发了一套检测频段为 100 MHz-12 GHz 的电波环境监测系统用于监测新疆奇台 110 米口径全可动射电望远镜 (QiTai radio Telescope, QTT) 台址的电磁环境。Wang 等人 [26] 开发了一款基于地理信息数据库、气象模型与射频干扰源数据库的综合性分析软件, 可量化评估射电望远镜周边地面与空间射频干扰的影响。

低频射电干扰无论是由自然现象还是人为因素引发, 都具有覆盖范围广、强度随时间变化显著等特征。因此, 无论是现有的低频射电望远镜, 还是未来规划的新台址, 开展长期的低频射电环境监测都至关重要。建立一套能够长期监测低频射电天文站址电磁环境的系统, 对射电天文台址的电磁环境进行实时监测, 并对低频射电干扰进行检测和分析, 将为低频射电天文观测及射电电磁环境保护提供重要的科学依据。该系统需具备高灵敏度和稳定性, 以长期记录和分析低频射电环境的变化趋势, 并提供数据支持, 以优化观测策略和干扰抑制措施。由于低频射电望远镜通常建在远离人类活动的偏远地区, 因此在设计监测系统时, 需要充分考虑设备成本、电力供应方式以及长期运行的维护需求, 以确保系统能够在低维护成本下实现稳定运行。

在本工作中, 基于低成本射频放大器、软件无线电 AirSpy、树莓派和太阳能供电装置等硬件, 构建一个能够在野外独立运行, 并能够对低频射电环境进行长期监测的原型系统。由于系统需在无互联网环境的野外运行, 且固定基础设施缺乏, 传统的无线网络难以满足树莓派之间的通信需求, 因此本系统采用两个树莓派构建 Ad-Hoc 网络, 以实现节点之间的直接通信并形成一个局域网, 从而在一定范围内实现无线数据同步。其中, 一个树莓派负责控制系统进行连续采样, 对采集的 IQ 数据进行加窗处理和快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT), 并以瀑布图形式实时显示数据; 另一个树莓派通过 Ad-Hoc 网络模式, 接收采样数据和瀑布图, 并进行无线数据同步与存储, 确保数据安全。整个设备具有低成本、低功耗的特点, 同时, 由于采集后的数据可与采集设备分开存储, 因此具备一定的防丢失能力。本研究后续计划将该系统用于低频射电实验的选址研究, 以监测不同地点的低频射电环境, 为低频射电观测站的建设提供科学依据。

文章后续的结构如下: 第二章详细描述系统的设计与实现; 第三章进行系统校准, 并给出系统功能验证结果; 第四章总结研究成果, 并进行讨论。

2 系统设计

2.1 系统整体性能需求

低频射电环境监测设备的设计需求主要基于以下三个方面的考虑：首先，低频射电台站选址通常位于人类活动稀少的区域，电力网络往往无法覆盖。因此，设备需采用太阳能供电，并具备长期无人值守自动观测的能力。其次，考虑到野外环境恶劣，硬件设计应尽量采用低成本的现成组件（货架产品）进行组装，以提高可靠性并降低维护成本。最后，为确保数据的安全性，系统将采集设备与数据存储设备分离设计，二者通过临时无线网络传输数据。由于数据存储设备不连接低频天线，体积更小、隐蔽性更高，具备更好的安全性。在多数情况下，采集设备与存储设备中的数据可以实现互为备份，从而进一步提升数据的安全保障能力。

2.2 硬件框架

为满足上述性能需求，系统在硬件架构设计上进行了针对性配置，具体组成如下所述。检测系统的核心硬件由一个低噪声放大器（LNA）、一台 AirSpy 软件无线电接收机、两台树莓派（Raspberry Pi）微型计算机，以及一个太阳能充电的电池模块组成。系统验证阶段采用拉伸全向天线接收调频广播信号，以验证其基础功能。针对野外低频实验对方向性与抗干扰能力的要求，实际部署中将替换为六边形偶极子天线。系统中与 Raspberry Pi 4 连接的结构如图 1 所示。其中，一台树莓派作为主控计算机，运行 Linux 操作系统，通过定制化的控制脚本，实现对 AirSpy 软件无线电的配置、数据采集与预处理。AirSpy 接收机与低噪声放大器共同负责低频射电环境中宽频段信号的接收与模数转换（ADC）。太阳能板为铅酸电池充电，电池则为树莓派与 AirSpy 接收机提供稳定电源支持。系统硬件结构如图 2 所示，其中 LNA 具有 100kHz-6GHz 宽频段响应特性，可提供 30dB 增益且噪声系数低至 0.4dB。

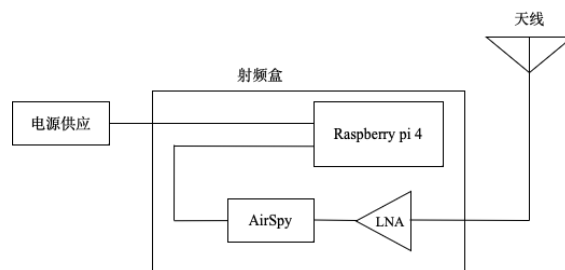


图 1: 系统框图

2.2.1 频谱监控 AirSpy SDR 模块

AirSpy 是一款小巧而高效的软件定义无线电（Software Defined Radio, SDR）接收机，能为开发者提供一个低成本、开源的 SDR 平台。典型应用有：VHF/UHF/SHF 无线电监测、ADS-B、空中交通管制、宽带扫描仪和业余无线电等。作为一款成熟的商业接收机，AirSpy 有成本效益高、开源、跨平台、高效性能和易于部署等特点，便于搭建属于自己的无线电系统。本工作中选择的 AirSpy 型号是 AirSpy R2。其采样率包括 2.5 MSPS, 10 MSPS, 本工



注: 三张小图从左至右依次为: 射频盒内部结构、系统所采用的低噪声放大器、太阳辐照监测系统的内部结构。

图 2: 系统硬件

作中选择的采样率是 10 MSPS (本工作使用的 AirSpy 典型参数见表2)。

表 2 AirSpy 参数览表

参数	说明
是否支持全双工模式	否
是否支持自动增益控制	是
支持流格式	16 位复数定点格式 (CS16), 32 位复数浮点格式 (CF32)
本机默认格式	16 位复数定点格式 CS16, 满量程为 32767
天线模式	接收模式 (RX)
总增益范围	[0, 45] dB
低噪声放大器 (LNA) 增益范围	[0, 15] dB
混频器 (Mixer) 增益范围	[0, 15] dB
可变增益放大器 (VGA) 增益范围	[0, 15] dB
支持的接收频率范围	[24, 1800] MHz
支持的射频频率范围	[24, 1800] MHz
支持的采样率范围	10 MSPS 和 2.5 MSPS

2.2.2 核心控制器树莓派

为实现对 AirSpy 采样数据的管理与处理, 系统配备了树莓派作为核心控制器, 具体说明如下。树莓派是一种基于 ARM 架构的单板计算机, 具备中低复杂度的数字信号处理 (DSP) 能力, 适用于音频分析、传感器数据处理、基础射频信号分析等轻量级任务。Raspberry Pi 4B 搭载 4 核 Cortex-A72 处理器与最高 8GB LPDDR4 内存, 支持 Python、C/C++ 等常用编程语言, 并兼容 GNURadio 等常见 DSP 开发工具, 在处理 1-2 通道音频 FFT、IIR/FIR 滤波或低采样率数据分析时表现良好。以 1024 点 FFT 为例, 在单核 C 语言实现下, Raspberry Pi 4B 可实现约 3000 次/秒的处理速度。相比之下, 搭载 Cortex-A76 处理器和更快内存的 Raspberry Pi 5, FFT 性能可提升至约 6000 次/秒。二者处理 AirSpy 射频数据时可稳定支持 10 MSPS 采样率, 虽然性能有限, 不及专业 DSP 芯片和高端计算平台, 但树莓派在低功

耗、性价比和可编程性方面优势明显，是教学实验、科研原型和边缘计算场景中的理想平台。

电池通过供电口为 Raspberry Pi 4B、AirSpy 软件无线电模块以及低噪声放大器提供电源。铝制外壳在防止电磁干扰的同时，还为检测系统的散热提供了保障。外壳背部设有导热柱，可将树莓派主芯片产生的热量更有效地传导至外壳，从而提升散热效率。

2.2.3 供电系统及太阳辐照监测系统介绍

鉴于系统需在野外长期稳定运行，**电源为支撑系统长期稳定工作的基础**，下文将介绍相应的供电与监测系统。太阳能供电和辐射监测装置由带有支架的太阳能板（尺寸为 560mm × 710mm）、MPPT 太阳能控制器、MODBUS RTU 数据记录仪、485 型的光合有效辐射传感器以及光合硅能蓄电池组成，构成一个完整的太阳能辐照记录系统。所有连接线路均进行了防水处理。该装置不仅为射频盒提供电源，还具备监测和记录太阳辐照强度、太阳能板充电电压及蓄电池充放电电压等功能。该系统的设计主要用于监测未来低频实验站址的太阳能资源状况，为后续太阳能电站的建设提供参考依据。

2.3 软件框架

2.3.1 程序流程

系统以树莓派为主控平台，通过 SoapySDR 库的 Python API 控制 AirSpy SDR 设备，实现 50–300 MHz 频段的扫描、IQ 数据采集与处理。**扫描采样程序的流程如图 3 所示。随后，具备按日期自动创建存储目录功能的循环采样程序被封装为运行于树莓派平台的 Linux 系统服务，支持开机自启与后台运行。**基于 SoapyAirSpy 插件实现 AirSpy 的底层驱动适配，完成采样参数的配置。系统可实时执行 1024 点 FFT 运算，输出复数格式的频谱数据。

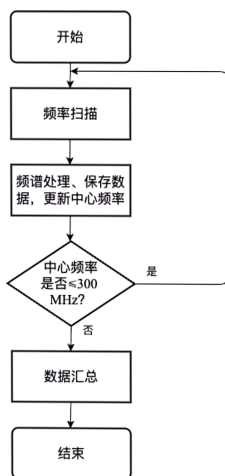


图 3: 程序流程图

2.3.2 功能指标实现

为了实现上述程序流程中的关键控制与数据采集操作，系统对 SDR 接口及其功能指标进行了详细配置与实现，具体如下所述。SoapySDR 是一个用 C/C++ 编写的开源通用 API

和运行时库, 用于与各种 SDR 设备接口。由于 SoapySDR 本身只是一个通用框架, 不直接支持特定硬件, 因此需要使用 SoapyAirSpy 模块, 它作为 SoapySDR 的扩展插件, 专门用于支持 AirSpy SDR 设备。SoapyAirSpy 能够将 SoapySDR 的 API 调用转换为对 AirSpy 的底层硬件操作, 例如, 它可以将 AirSpy 输出的原始 ADC 采样数据转换为 SoapySDR 支持的浮点或复数格式 (如 SOAPY_SDR_CF32 和 SOAPY_SDR_CS16)。此外, 为了在树莓派中使用 SoapySDR 的 Python 接口, 还需安装 libpython3-dev 库以支持 Python 绑定功能。

开始采样时, AirSpy 内部模数转换器负责将模拟无线电信号转换为数字信号, 硬件数字处理模块中, 将 I 路和 Q 路这两路的 ADC 采样值组合 SOAPY_SDR_CF32 的复数形式。通过 SoapySDR 设置, AirSpy 将采样点输出为 32-bit 实部 + 32-bit 虚部共 64-bit 复数形式的数据格式, 经过快速傅立叶变换之后获得频率分量信息。时间分辨率和频率分辨率为

$$\Delta t = \frac{N}{f_s}, \quad (1)$$

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t}, \quad (2)$$

其中 f_s 为采样率, N 为 FFT 点数。在采样率为 10 MSPS、总样本数 614400、FFT 点数 1024 时, Δt 约为 0.1 ms、 Δf 约为 9.77 kHz。将 IQ 数据和元数据保存为 npy 文件和频率随时间变换的瀑布图, 瀑布图保存为 png 格式。瀑布图横坐标为频率, 单位是 MHz; 纵坐标为时间, 单位是 ms。对 1024 个点进行 FFT 得到一条频谱信息, 重复 600 次, 最终得到 600 行独立的频谱信息。采样程序会按照日期创建存储目录, 并以日期信息为存储目录命名。npy 文件和 png 图片以采样日期、时间、扫描中心频率、扫描次数等信息命名, 并保存在系统自动创建存储目录中。系统开机后, 将后台自动运行采样程序。实际应用中可通过积分降采样降低时间分辨率, 以提升灵敏度并减少存储占用。

2.3.3 数据存储管理

在完成数据采样与频谱分析后, 系统还需要将结果安全地存储和管理, 相关方法如下所述。采样、数据保存和数据传输等步骤都是单线程工作。考虑数据与检测系统设备分离, 观测数据文件夹将会同步到与系统设备隔得较远的另一个 Raspberry Pi 5 处。同时, 考虑 Raspberry pi 5 本地存储介质难以满足长期连续采集需求, 以及 IQ 数据需完整保留后支持离线分析, 要求存储系统具备高吞吐量 (>50 MB/s) 与大容量 (>1 TB)。通过树莓派接口连接一个存储容量为 1 TB 外部硬盘 (实际可用内存为 931.5 G), 并将数据文件系统挂载到该硬盘。按照当前设置的采样率大小和数据格式, 1TB 的硬盘预计可以储存 10.94 小时的数据, 但实际时间还会受硬件性能、压缩效率等因素影响。

2.3.4 双树莓派系统工作

为提升数据的存储安全性和系统的整体可靠性, 本系统采用双树莓派架构。其中, 两台树莓派通过无线通信建立连接, 实现采集设备与数据存储的物理分离, 具体配置如下所示。使用两个 Raspberry Pi 型号和版本如下: Raspberry Pi 4B 内核版本为 6.1.21-v8+, 操作系统为基于 Debian 11 的 Raspberry Pi OS (Raspbian 11, 代号 bullseye); Raspberry Pi 5

内核版本为 6.6.20+rpt-rpi-2712, 操作系统为基于 Debian 12 的 Raspberry Pi OS (Debian GNU/Linux 12, 代号 bookworm)。

两台树莓派被配置为 Ad-Hoc 模式, 以建立点对点的无线通信链路。Ad-Hoc 模式是一种无需依赖固定基础设施, 由终端节点自主组织形成的临时性网络架构。通过配置 Ad-Hoc 网络, 两台树莓派可以通过无线链路直接互联。在配置过程中, 需将两台树莓派的无线网卡设置为相同的 SSID、频道 (Channel) 和 IP 地址段, 以确保它们可以相互通信。在无线通信建立后, 系统使用 rsync 工具进行数据文件同步。rsync 基于 ssh/scp 协议进行加密传输, 能有效保障数据传输的安全性。为了实现系统开机自动同步数据文件, 将 rsync 同步脚本配置为系统服务, 使其在设备启动时自动运行。考虑到 rsync 本身不具备失败任务的自动重传机制, 脚本中添加了超时检测与重试策略, 以增强传输的鲁棒性。同时, 系统还引入了 inotify 机制对文件系统进行监控。

3 系统测试和验证

3.1 系统噪声温度测量

为了衡量射电监测系统自身的性能, 使用 Keysight FieldFox 9913A 和 Keysight 346A 噪声源, 基于 Y 因子算法测量了系统设备的噪声系数^[29] [34]。Y 因子定义为标准噪声源打开与关闭两种状态时器件的输出功率比

$$Y = \frac{P_{\text{on}}}{P_{\text{off}}} \quad (3)$$

噪声源关闭状态时的温度 T_{off} 等于标准温度 T_0 , 有 $T_{\text{off}} = T_0 = 290 \text{ K}$, 根据热噪声功率计算公式, P_{off} 为

$$P_{\text{off}} = KT_0BG + N_A \quad (4)$$

在噪声源开启时, 根据热噪声功率, 带入超噪比 $\text{ENR} = \frac{T_{\text{on}} - T_0}{T_0}$, P_{on} 为

$$P_{\text{on}} = KT_0BG(1 + \text{ENR}) + N_A \quad (5)$$

其中 T_{on} 是噪声源工作状态时的温度, K 为玻尔兹曼常数, B 为信号分析仪中频带宽, G 是系统的增益, N_A 是系统产生的额外噪声。带入式(4)和式(5)Y 因子可表示为

$$Y = \frac{KT_0BG(1 + \text{ENR}) + N_A}{KT_0BG + N_A} \quad (6)$$

由于噪声因子为

$$F = 1 + \frac{N_A}{KTBG} \quad (7)$$

式(6)可化简得到 Y 因子与噪声系数的关系为

$$Y = \frac{\text{ENR} + F}{F} \quad (8)$$

变形得到噪声因子为

$$F = \frac{\text{ENR}}{Y - 1} \quad (9)$$

即可通过 ENR 值和 Y 因子的值计算出系统设备的噪声因子。系统增益 G 为

$$G = \frac{P_{\text{on}}}{KB(T_{\text{on}} + T_{\text{R}})} \quad (10)$$

T_{R} 为噪声温度。 T_{on} 与超噪比 ENR 的关系为

$$T_{\text{on}} = T_0(\text{ENR} + 1) \quad (11)$$

T_{R} 与超噪比 ENR 的关系为

$$T_{\text{R}} = T_0 \left(\frac{\text{ENR}}{Y - 1} - 1 \right) \quad (12)$$

将式(11)和式(12)带入式(10)中求出系统增益。

表 3 噪声系数和增益测量结果

中心频率 /MHz	ENR /dB	P_{off} /dBm	P_{on} /dBm	Y /dB	NF /dB	G /dB
50	5.64	-11.652	-5.702	3.936	0.963	41.36
60	5.63	-10.629	-4.601	4.007	0.849	42.50
70	5.62	-9.724	-3.637	4.062	0.760	43.49
80	5.61	-7.829	-1.734	4.069	0.740	45.41
90	5.60	-7.903	-2.048	3.850	1.051	45.02
100	5.59	-8.302	-2.382	3.908	0.953	44.72
110	5.59	-8.175	-2.551	3.651	1.356	44.45
120	5.58	-8.806	-2.756	4.027	0.770	44.40
130	5.58	-8.793	-2.727	4.042	0.748	44.44
140	5.58	-8.677	-2.625	4.029	0.767	44.53
150	5.57	-7.901	-2.224	3.696	1.263	44.81
160	5.57	-7.831	-1.890	3.927	0.905	45.24
170	5.57	-7.491	-1.360	4.103	0.652	45.83
180	5.56	-6.674	-0.656	3.998	0.792	46.51
190	5.56	-5.375	0.099	3.527	1.534	47.07
200	5.56	-4.407	0.760	3.286	1.969	47.60
210	5.55	-4.834	0.914	3.757	1.146	48.00
220	5.55	-5.111	0.787	3.889	0.943	47.92
230	5.55	-6.085	-0.066	3.999	0.781	47.11
240	5.54	-7.924	-1.949	3.958	0.830	45.22
250	5.54	-8.035	-2.072	3.947	0.846	45.10
260	5.54	-11.020	-5.319	3.716	1.200	41.76
270	5.53	-7.392	-1.490	3.892	0.918	45.67
280	5.53	-4.992	0.918	3.899	0.907	48.08
290	5.53	-5.076	0.854	3.917	0.880	48.02
300	5.52	-5.305	0.518	3.822	1.014	47.66

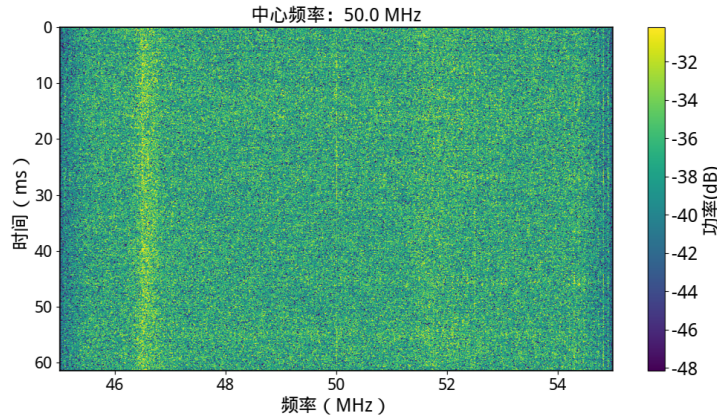
校准的核心链路为低噪声放大器、射频电缆、AirSpy 接收机等硬件。由于 AirSpy 控制采样, 系统中设置 AirSpy 采样率为 10 MSPS, 则测量带宽为 10 MHz。中心频率根据低频

实验需求, 从 50 MHz 到 300 MHz 变化, 每隔 10 MHz 进行一次测量。实际测量时气温为 23 摄氏度左右, 与标准温度的差别较小可以忽略, 直接带入 $T_0 = 290$ K 计算。AirSpy 内部放大器参数设置如下: 低噪声放大器增益 (G_{lna}) 为 10, 混频器增益 (G_{mix}) 为 7, 可变增益放大器 (G_{vga}) 为 10。将系统采集到的 IQ 数据转换为平均信号功率, 并分别记录有信号 (P_{on}) 和无信号 (P_{off}) 状态下的功率值。系统校准结果如表3所示。测量结果表明, 在实际监测射电环境条件下, 以 10 MSPS 的采样率正交采样时, 系统的噪声系数约为 0.7 ~ 1.9 dB, 对应的噪声温度范围约为 53 ~ 166 K。考虑到系统关注的频率范围为 50-300 MHz, 此范围内的天空噪声本身较高, 因此约 166 K 的系统噪声温度在用于射电环境监测时是可以接受的。

3.2 系统验证

3.2.1 频谱监测数据分析

系统完成设备的组装和测量后, 在办公室环境下开展了初步的验证。下面展示系统断开天线连接一个 50 欧姆负载后测量系统内部响应的结果, 设置采样中心频率为 50 MHz 时单次扫描的瀑布图 (图4), 以及一次完整扫描采样 50-300 MHz 的瀑布图 (图5)。

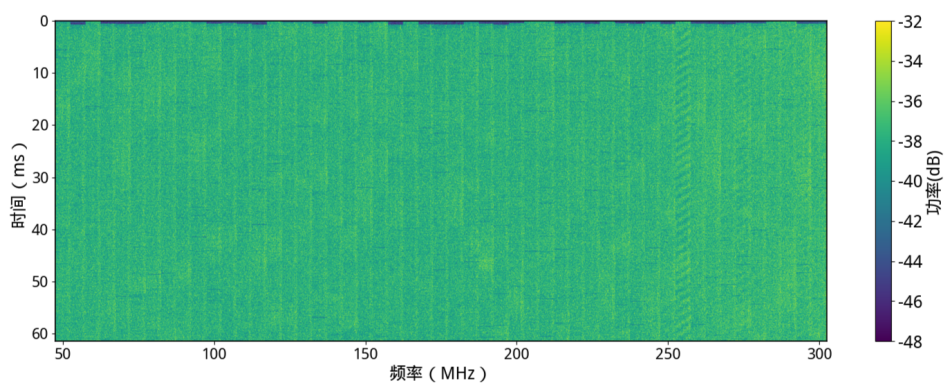


注: 扫描 50 MHz 时得到的频率信号随时间变化的瀑布图, 扫描时 AirSpy 连接 50 欧姆负载, 采样率设置为 10 MSPS, 采样中心频率为 50 MHz。

图 4: 某一时刻全向天线单次扫描的瀑布图和频谱分布图

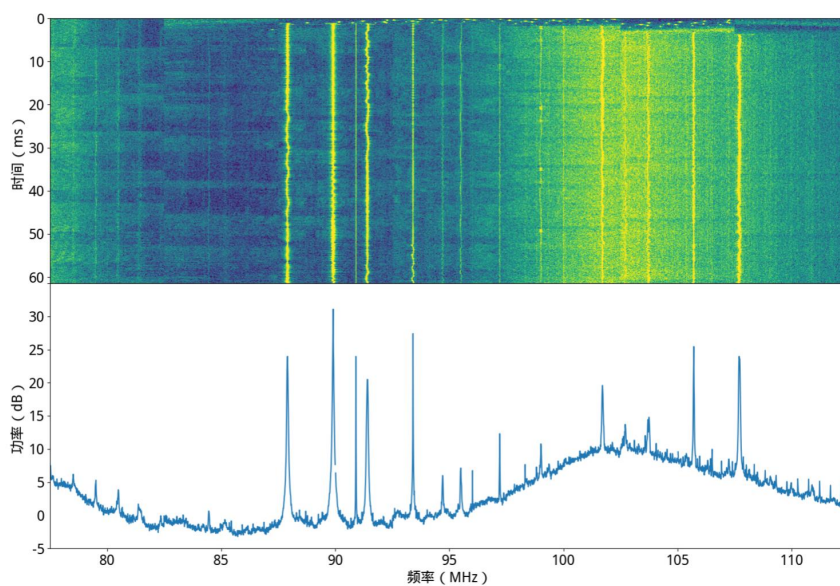
系统连接负载后单次扫描和完整扫描得到的瀑布图中仅显示背景噪声, 无明显结构, 说明内部影响较为平坦。为检测 80-110 MHz 内接收到调频广播的情况, 使用了一根不锈钢材质、孔距 21 mm、偏头底座 M3 光孔的拉杆伸缩天线进行采样, 尝试对周围无线电环境进行测试。扣除带宽截断部分和直流分量后得到 77.5-112.5 MHz 频段内的瀑布图和功率随着频率变化的频谱图 (图6)。

对图6所示结果进行分析可知, 在系统扫描 77.5-112.5 MHz 频段范围内, 87.5-108 MHz 调频广播标准频段中, 瀑布图和频谱分布图均显示出高功率窄带信号的存在。这些信号具有连续稳定的水平带状能量分布和明显的频谱峰值特征, 符合调频广播信号的典型特征。信号



注: 完整扫描 50-300 MHz 时得到的频率信号随时间变化的瀑布图, 其中 AirSpy 连接 50 欧姆负载, 采样率设置为 10 MSPS。

图 5: 一次扫描 50-300 MHz 的瀑布图



注: 扫描 77.5-112.5 MHz 时得到的频率信号随时间变化的瀑布图和功率平均后的频谱分布图, 其中 AirSpy 连接一根简单拉伸全向天线, 采样率设置为 10 MSPS。

图 6: 某一时刻全向天线接收频率信号随时间变化的瀑布图和频谱分布图

功率显著高于环境噪声,表明在未使用前置放大器的条件下,系统仍具备有效捕获 FM 信号的能力。此外,瀑布图中浅黄色轨迹的稳定性进一步反映了所接收信号的载波相位噪声性能。为验证采集结果的正确性,首先将实测数据与标准频谱仪的扫描结果(图7)进行了对比。在扣除 90–91.4 MHz 频段内的一条直流分量后,共识别出 14 条功率显著高于噪声基底的窄带信号。进一步分析表明,这些信号对应于已知 FM 频点(见表4)。上述观测结果与标准数据之间的一致性验证了实验的可靠性。需要注意,由于 AirSpy 接收机硬件带通滤波器的限制,瀑布图在右侧高频端可能存在带宽截断现象。

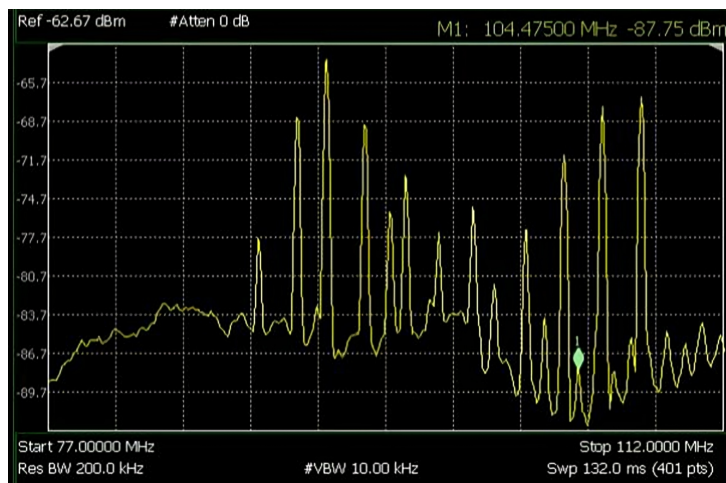


图 7: 频谱分析仪扫描图

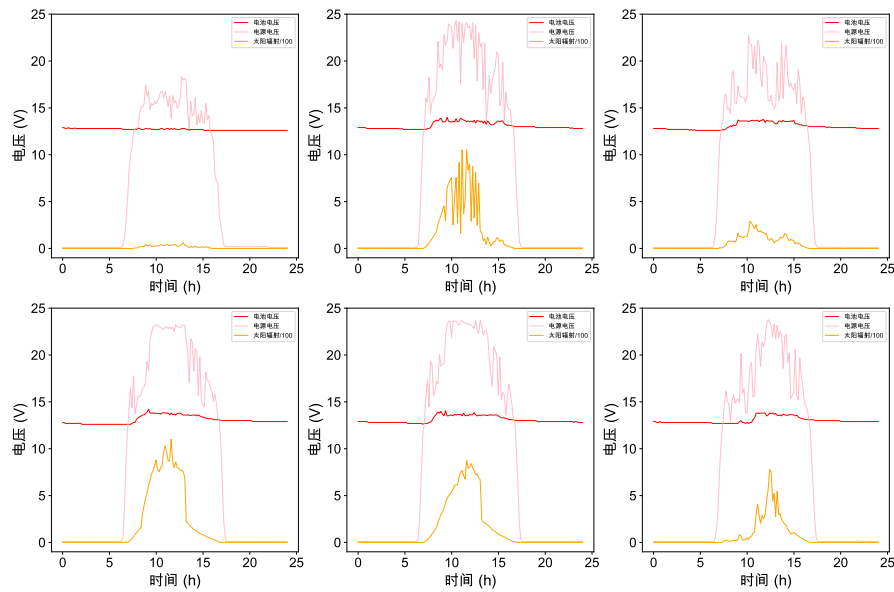
3.2.2 太阳辐照记录测试

太阳辐照记录仪测试地点位于上海天文台天文大厦楼顶(北纬 31.22°, 东经 121.48°),前期开展了为期 24 天的试运行。设备依靠太阳能和自带电池可持续运行。相关数据通过 RS-485 通信接口的记录仪按天记录。在这 24 天中,选取具有代表性的 6 天,展示了不同天气条件下的太阳辐照及其他相关参数情况,如图8与表5与所示。

图中红色实线是电池电压,粉色是太阳能板充电电压,橙色是太阳辐照仪记录的太阳辐照数据。光合有效辐射传感器采用光电感应原理,可用来测量光谱范围在 400 ~ 700nm 的光合有效辐射。单位是每秒照射到每平方米面积上的光子数(以摩尔计数 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。根据记录仪保存的数据可知,除 12 月 18 日外,其他 5 天最低电池电压都要为 12.6V。电池电压最高值和太阳辐射最高值均出现在 12 月 20 日。从结果可见,一天中从早上 7:00 左右到下午 17:00 整前,光合有效辐射传感器返回有效辐射测量值,与太阳能板充电电压的变化相符合。并且经由太阳能充电管理器 MPPT 调节,即使在阴雨天,太阳能充电电压也能到 15V 以上,在辐射条件较好的情况下,充电电压可以达到 20V 以上,比如在 12 月 20 日和 12 月 21 日这两天,充电电压在 20V 的时间在 4 小时以上。

表 4 图6信号对应 FM 干扰

频率 (MHz)	广播电台
87.9	HIT FM
89.9	899 都市广播
91.4	中央人民广播电台经济之声
93.4	上海新闻广播
94.7	经典音乐广播
95.5	中国交通广播
97.2	上海戏剧曲艺广播
99.0	中央人民广播电台中国之声
100.1	浦东广播 100.1 沸点音乐
101.7	动感 101
102.7	闵行广播电台
103.7	Love Radio
105.7	上海交通广播
107.7	中央人民广播电台音乐之声



注: 上半部分三张小图的观测时间为: 2024.12.10、周二, 2024.12.18、周三, 2024.12.19、周四; 下半部分三张小图的观测时间和天气情况从左到右为: 2024.12.20、周五, 2024.12.21、周六, 2024.12.25、周三。

图 8: 太阳辐照情况

表 5 典型天气的参数情况

日期	天气	电池电压 (V)	电源电压 (V)	太阳辐射值 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
2024.12.10	小雨转中雨	[12.6, 12.9]	[0.1, 18.7]	[0, 363]
2024.12.18	多云转阴	[12.7, 14.6]	[0, 24.9]	[0, 1172]
2024.12.19	阴转晴	[12.6, 14.2]	[0.1, 23.6]	[0, 322]
2024.12.20	晴	[12.6V, 14.7]	[0.1, 23.7]	[0, 1196]
2024.12.21	晴转多云	[12.6, 14.3]	[0, 24]	[0, 995]
2024.12.25	阴转多云	[12.6, 14.4]	[0.1, 24.2]	[0, 835]

4 总结与讨论

本研究设计并实现了一套基于低成本硬件 (Raspberry Pi、AirSpy SDR) 和太阳能供电的低频射电环境监测系统, 主要用于 50-300 MHz 频段的射频干扰监测与天文信号探测。系统核心由射频前端 (天线、低噪声放大器)、数据采集模块 (AirSpy SDR) 及嵌入式处理单元 (Raspberry Pi) 组成。供电部分采用由光合硅能蓄电池、太阳能电池板和充电控制器构成的离网能源系统, 并通过串口数据记录仪实现长期运行的数据存储。初步测试表明, 系统在 50-300 MHz 频段内能够稳定捕获环境射频信号, 动态范围和灵敏度均满足常规监测需求。预计通过进一步引入定制化低噪声放大器并优化系统采样频率范围, 可显著提升信号接收效率。同时, 为进一步增强系统的可用性, 将完善软件功能, 例如增加 RFI 自动识别与记录功能, 并配备图形用户界面, 以提高操作的便捷性。后续计划在未来的低频观测实验中, 于多个候选站址部署该类监测设备, 对低频环境进行长期观测, 系统性评估 RFI 对低频射电天文观测的影响, 并为低频实验选址与干扰抑制策略提供数据支持。

未来工作将进一步优化系统性能。例如, 将 AirSpy SDR 的数据接收线程绑定至树莓派的指定处理核心, 配合预分配的循环缓冲区, 以降低任务切换带来的延迟; 在硬件层面采用多层电磁屏蔽设计, 以增强系统的抗干扰能力。同时, 结合多个监测节点, 在空间维度尝试实现 RFI 信号的源定位。在现有 50-300 MHz 频段定性监测的基础上, 逐步建立长周期电磁环境数据库, 为后续射电干扰建模与干扰源追踪提供支撑。最后, 对于野外台站的电磁环境监测, 必须高度重视野外环境的防雷措施。例如, 在天线区域外 3-5 米处安装独立避雷针, 为系统安装浪涌保护器等。

参考文献:

- [1] 何梦钊, 郑倩, 陕欢源, 等. 天文学进展, 2023, 41: 113
- [2] 赵碧轩, 郑倩, 张泽康, 等. 天文学进展, 2021, 39: 455
- [3] Huang Y, Wu X P, Zheng Q, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2016, 2: 016
- [4] Bowman J D, Cairns I, Kaplan D L, et al. PASA, 2013, 30: e031
- [5] van Haarlem M P, Wise Michael W, Gunst AW, et al. A&A, 2013, 556: A2
- [6] DeBoer D R, Parsons A R, Aguirre J E, et al. PASA, 2017, 129(974): 045001.
- [7] Ellingson S W, Clarke T E, Cohen A, et al. Proceedings of the IEEE, 2009, 8: 1421
- [8] Carilli C, Rawlings S. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0409274>, 2004
- [9] de Lera Acedo E, Razavi-Ghods N, Troop N, et al. Experimental Astronomy, 2015, 39: 567
- [10] Benthem P, Gerbers M, de Vaate J G B, et al. URSI GASS, 2017
- [11] An T, Chen X, Mohan P, et al. <https://arxiv.org/abs/1711.01978>, 2017
- [12] Regulations R. Technical report, R-REG-RR, 2016.
- [13] 张海燕. 天文学进展, 2017, 35: 473
- [14] Porko J P G. Master's thesis. Helsinki: Aalto University, 2011: 14
- [15] Rison W, Krehbiel P R, Stock M G, et al. Nature Communications, 2016, 7: 10721
- [16] Min W, Jun L, Tao L, et al. 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems. 2006, 1: 624
- [17] Liu F, Pan J, Zhou X, et al. Journal of Communications and Information Networks. 2021, 6: 101.
- [18] 高文帅, 赵碧轩, 郭铨, 等. 天文学进展, 2022, 40: 284
- [19] Ciardi B, Labropoulos P, Maselli A, et al. MNRAS, 2013, 2: 1755
- [20] 安涛, 陈骁, 劳保强, 等. 天文学报, 2017, 5: 43
- [21] Wilson C, Chow K, Harvey-Smith L, et al. ICEAA, 2016,
- [22] Offringa A R, De Bruyn A G, Zaroubi S, et al. A&A, 2013, 549: A11
- [23] Offringa A R, Wayth R B, Hurley-Walker N, et al. PASA, 2015, 32: e008
- [24] Indermuehle B T, Harvey-Smith L, Wilson C, et al. 2016 Radio Frequency Interference (RFI), 2016
- [25] Wang Y, Zhang H, Wang J, et al. Universe, 2023, 9(6): 277
- [26] 刘奇, 王国, 刘晔, 等. 中国科学. 2019, 49(9): 99-107.
- [27] Mitola J. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1993, 4: 25
- [28] Krishnan R, Babu R G, Kaviya S, et al. ICPCSI, 2017.
- [29] 董建涛. 国外电子测量技术, 2009, 3: 25
- [30] Note A A. Agilent Technology. 2001
- [31] 赵卫普, 李建斌, 李金增, 等. 天文学进展, 2015, 3: 395

Development of a Prototype for Unattended Low-Frequency Radio Environment Monitoring Equipment

Zhang Pei-ling^{1,2}, Wang Jing-ying¹, Liu Tian-yang^{1,2}, Yu Yun¹, Huang Yan³

(1.Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2.School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In recent years, radio astronomical observations have faced significant challenges due to increasingly severe radio frequency interference caused by human activities. To address the demand for long-term field monitoring, this study designs and implements a low-cost, autonomous low-frequency electromagnetic environment monitoring system based on a Raspberry Pi, an AirSpy receiver, and solar supply, operating in the 50-300 MHz band with a noise figure of 0.7 ~ 1.9 dB. The system automatically performs frequency scanning and data acquisition, enabling the collection and analysis of interference signals through waterfall plots and power spectrum monitoring. Experimental results demonstrate that the system effectively captures typical interference signals, such as FM radio broadcasts, with a time resolution of 0.1 ms and a frequency resolution of 9.77 kHz. The system adopts a low-power architecture and solar-powered autonomous operation, making it suitable for unattended field environments. It provides critical support for electromagnetic environment assessment at radio telescope sites and identification of interference signals. When powered by a single vehicle battery (12V/100Ah), the system achieves continuous operation for approximately 39 hours. Field tests confirm that the system can maintain stable long-term operation when combined with an 80W photovoltaic solar panel for battery charging.

Key words: low frequency radio astronomy; radio interference monitoring; solar radiation monitoring; software defined radio; unattended