

基于 USRP 天马望远镜连续谱观测系统

巴桑番多^{1,2,3}, 赵融冰³, 陈天禄^{1,2}, 齐朝祥³, 上官伟华^{3,4}, 张楚原^{3,4}

(1. 西藏大学 宇宙线教育部重点实验室, 拉萨 850000; 2. 西藏大学 理学院 物理系, 拉萨 850000; 3. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 天马望远镜口径为 65 m, 观测性能十分优异。连续谱观测不仅用于评估望远镜性能, 还在研究银河磁场、超新星遗迹及射电源时变特性中具有重要应用。为实现稳定、灵活的连续谱观测任务, 设计并实现了一套基于软件定义无线电 (Software-Defined Radio, SDR) 技术的观测系统, 采用通用软件无线电外设 (Universal Software Radio Peripheral, USRP) 作为硬件平台, 具备良好的扩展性和灵活性, 能够适配多种观测需求。在此基础上, 详细介绍了连续谱观测系统的组成, 包括控制软件、数据采集终端 USRP X410 及数据处理流程, 并开展了实际的连续谱观测。测得目标射电源 0209+724、0345+138 和 1928+738 校准后流量分别为 0.492 1 Jy、0.774 9 Jy 和 3.279 2 Jy, 对应误差为 0.059 1 Jy、0.115 9 Jy 和 0.076 2 Jy。结果验证了系统的稳定性和可靠性, 表明 USRP X410 作为数据采集终端在连续谱观测中具有良好的应用前景。

关键词: 望远镜; 连续谱; USRP; 流量; 数据处理

中图分类号: P111.44 **文献标识码:** A

1 引言

天马 65 m 射电望远镜于 2012 年 10 月正式落成, 并陆续配备了 L、S/X、C、Ku、K、X/Ka、Q 共 7 套接收机, 观测频率范围为 1.25~50 GHz^[1]。作为目前亚洲最大的、可全方位转动的卡塞格林式射电望远镜, 天马望远镜具备出色的射电天文观测能力, 能够开展 VLBI、谱线、脉冲星以及连续谱等多种观测^[2,3]。其中, 连续谱观测在各种观测模式中发挥着重要作用。该模式不仅是评估望远镜性能的重要手段, 还能通过多波段观测确定天体的谱指数, 从而为银河系磁场结构和超新星遗迹的研究提供关键依据; 同时, 通过对连续谱流量的长期监测, 科研人员可以深入探讨射电源的时变特性及星际介质的结构演化。因此, 连续谱观测已成为天马望远镜科学研究中的关键方向之一^[4]。

为满足多样化的连续谱观测需求, 国际上多台大型射电望远镜已配备连续谱观测系统。其中, 美国的绿岸望远镜 (Green Bank Telescope, GBT) 作为全球口径最大的全可动射电望远镜,

收稿日期: 2025-04-22; 修回日期: 2025-06-08

资助项目: 中国科学院技术支撑人才 (E387071002)

通讯作者: 赵融冰 zhaorb@shao.ac.cn, 陈天禄 chentl@utibet.edu.cn

具有较强的代表性。该望远镜配备了由加州理工学院研制的连续谱终端 (Caltech Continuum Backend, CCB), 系统专为 Ka 波段双波束接收机设计, 能够处理频率范围为 26~40 GHz 的信号, 在高频连续谱测量中发挥了重要作用^[5,6]。

相比之下, 目前天马望远镜连续谱观测主要以 DIBAS (Digital Backend System) 系统作为观测终端, 该系统虽可满足基本观测需求, 但在灵活性、可扩展性、便携性及后期维护方面仍存在一定局限。为提升系统性能并满足多样化观测任务的需求, 本文提出并实现了一种基于软件定义无线电 (Software-Defined Radio, SDR) 技术的新型连续谱观测系统。该系统以通用软件无线电外设 (Universal Software Radio Peripheral, USRP) 作为硬件平台, 采用射频前端与软件处理相结合的架构, 具有高度的模块化、可编程性和易扩展等特点。USRP 主要由主板和一个或多个射频前端模块组成。主板上配备了 FPGA 芯片和数字信号处理器 (DSP), 用于信号的数字化与处理; 射频前端模块则负责将射电信号与数字信号相互转换^[7,8]。目前市面上的 USRP 设备主要包括 B 系列、E 系列、N 系列和 X 系列等多个型号。本研究选用 USRP X410 作为连续谱观测系统数据采集终端, 主要承担信号的模数转换 (AD 采样) 任务^[9]。USRP X410 支持的中心频率范围为 1 MHz~7.2 GHz, 并配备四个独立的接收与发射通道, 每个通道的带宽可达 400 MHz^[10]。

与现有系统相比, USRP X410 设备具备更高的集成度, 内置下变频功能, 减少了对外部设备的依赖, 从而有效控制整体系统的搭建成本。此外, 其小型化、轻量化的设计更适用于现场部署及多种应用场景, 在操作便捷性和维护效率方面也显著优于传统系统。

本文围绕系统架构设计、硬件平台配置、控制软件开发、数据采集流程实现及数据处理链路构建展开, 完成了从信号采集到科学产出的完整流程设计与验证。具体包括: 配置 USRP X410 实现数据采集, 开发用于控制采集终端的软件程序, 构建数据处理流程, 涵盖原始数据解析、打开噪声与关闭噪声的数据拆分、定标处理、连续谱绘制、增益曲线拟合及计算校准后目标源流量与流量误差。

为验证该系统的实际性能, 我们在 C 波段中心频率为 6.256 GHz 的条件下开展了连续谱观测实验, 并对采集到的观测数据进行了处理与分析。实验结果表明, USRP X410 在数据采集过程中运行稳定, 系统整体表现出良好的稳定性与可靠性, 充分展现了其在连续谱观测中的应用潜力与发展前景。

第 2 章详细介绍了天马望远镜连续谱观测系统的整体架构, 包括系统结构、数据采集终端、控制软件以及数据处理流程。第 3 章重点阐述了连续谱观测的方法, 并结合实际观测过程, 对观测结果进行了分析与讨论。最后, 对全文进行了总结, 并对系统的优化与未来发展方向提出了展望。

2 连续谱观测系统

2.1 系统结构

天马望远镜连续谱观测系统(如图 1 所示)由控制软件、天线、接收机、中频传输系统、数据采集终端 USRP X410 及数据处理模块组成。各部分协同工作, 共同完成观测任务。其中, 控制软件负责协调天线、接收机、中频传输系统和数据采集终端 USRP X410 的运行, 并记录设备状态信息。观测过程中, 天线接收来自天体的微弱射电信号, 并将其传输至接收机; 接收机对射频信号进行放大和初步处理后, 信号进入中频传输系统, 以实现信号低损耗、远距离传输, 在中频传输系统中, 射频信号经过电光转换和光电转换, 以保持信号稳定并尽量减少衰减; 随后, 系统对射频信号进行下变频, 并将处理后的中频信号输入至数据采集终端 USRP X410, USRP X410 负责对中频信号进行 AD 采样, 并将采样后的基带信号传输至主机, 以便进行数据记录与存储。观测任务完成后, 数据处理模块对采集到的数据进行系统化处理与分析。

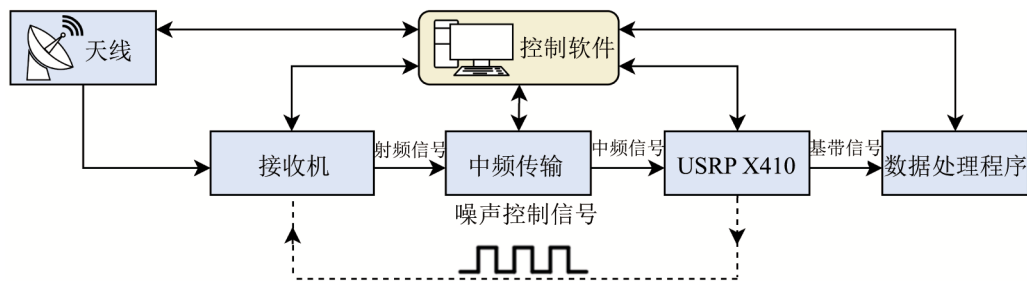


图 1 天马望远镜连续谱观测系统

2.2 数据采集终端

2.2.1 USRP X410

USRP X410 的射频和数字部分在作为一个完整终端时的工作原理如图 2 所示, 其通过放大器、ADC/DAC、数字上下变频和滤波器等关键模块, 实现了从射频信号接收、转换到数字处理与发送的高效信号链路, 保障了射电信号的高质量获取与处理。

天马望远镜连续谱观测系统采用 USRP X410 作为数据采集终端, 主要负责信号的 AD 采样。USRP X410 具备高度集成、宽带宽、多通道等优势, 能够满足现代射电天文观测对高性能数据采集设备的严苛要求。该设备支持 1 MHz ~7.2 GHz 的频率范围, 每通道具备高达 400 MHz 的带宽, 适用于宽频段射电信号的采集。基于 Xilinx Zynq Ultrascale+ ZU28DR RFSoc 架构, USRP X410 内部集成 12 位模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC) 与 14 位数模转换器 (Digital-to-Analog Converter, DAC), 最高采样率为 500 MS/s^[11, 12]。设备还内置 SD-FEC、数字上下变频 (DUC/DDC) 等专用处理模块, 显著提升了前端实时处理能力。同时, 支持 GPSDO、10 MHz 参考时钟与 1 Hz 信号输入, 具备灵活的时频同步能力, 可为高精度观测任务提供稳定的时间基准。USRP X410 的硬件结构紧凑, 采用 4 个发射通道和 4 个接

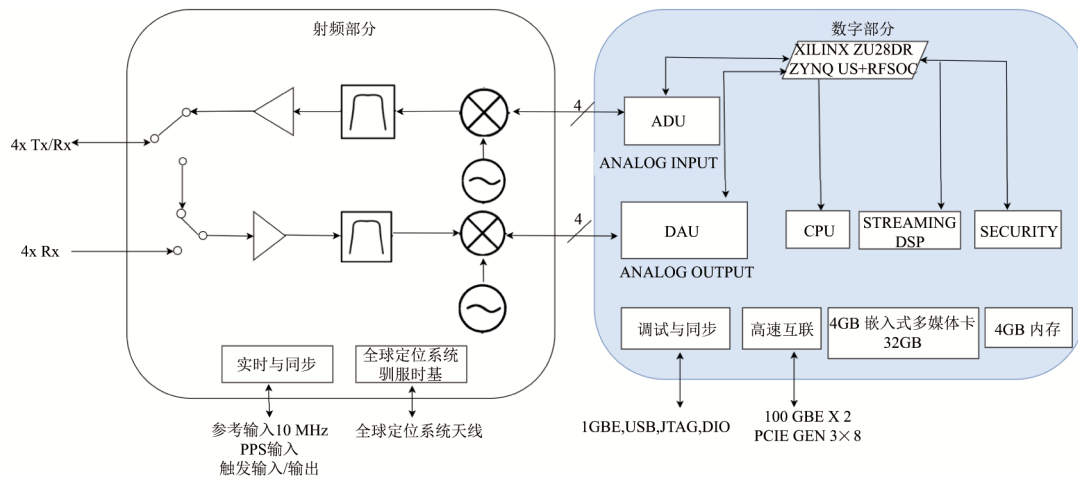


图 2 USRP X410 工作原理示意图

收通道设计,在保障高性能的同时,扩展性与系统集成性优异;并兼容 UHD、GNU Radio 与 RFNoC 等主流开源开发平台,为后续软硬件协同开发和系统部署提供了高度灵活的支持。

在数据传输方面,USRP X410 配备 100 GbE QSFP28 光口和 PCIe 3×8 两种高速接口,本系统选用 QSFP28 光口作为主要数据传输通道。在加载 UC_200 FPGA 映像后,该接口支持的理论最大传输速率为 100 Gbit/s (详见表 1)^[13],具体的实际传输性能仍受限于 FPGA 映像的配置、主机系统性能以及网络协议栈等多种因素,通常难以达到理论上限。

表 1 USRP X410 的三种 FPGA 映像风格

FPGA 映像类型	每个通道的带宽/MHz	QSFP2 端口 0 接口	QSFP2 端口 1 接口
X4_200	200	4×10 Gbit/s (All Lanes)	未使用
UC_200	200	未使用	100 Gbit/s
CG_400	400	100 Gbit/s	100 Gbit/s

2.2.2 UHD 软件平台

UHD (USRP Hardware Driver) 是由 Ettus Research 开发的开源驱动,用于操作和管理 USRP 设备,支持 Linux、Windows 等多种操作系统。该驱动程序提供了丰富的 API 接口函数,便于用户配置 USRP 设备并实现 PC 与 USRP 之间的数据传输。近年来,许多软件工具,如 LabVIEW、Matlab/Simulink 和 GNU Radio 等,都可以与 USRP 设备配合使用,而这些软件与 USRP 的底层连接部分均依赖于 UHD 实现,从而构建出高效的软件无线电系统^[12]。为了确保与 USRP 设备的兼容性与稳定性,尤其是对于 USRP X410 型号,系统要求使用 UHD 4.1 或更高版本。因此,本系统安装了 UHD 4.6 版本,以提供更好的兼容性与性能支持。

与其他编程语言和工具相比,C 语言具有较高的执行效率,特别是在通信物理层的软件开发中,它还具备较强的跨平台移植性。在使用 UHD 进行 USRP 开发时,主要通过调用其

API 接口函数来实现, 而所有的数据处理和传输则使用 C 和 C++ 语言完成。这种结合不仅增强了代码的灵活性和可移植性, 还显著提高了工作效率, 因此我们能够快速适应多变的信号处理需求。这种高效的开发方式为构建先进的软件通信系统提供了强有力的支持。

在 UHD 平台中的工作流程如图 3 所示。首先通过 UHD 提供的 API 函数创建 USRP 实体, 从而实现与硬件设备的初始化连接:

```
uhd::usrp::multi_usrp::sptr usrp = uhd::usrp::multi_usrp::make(args);
```

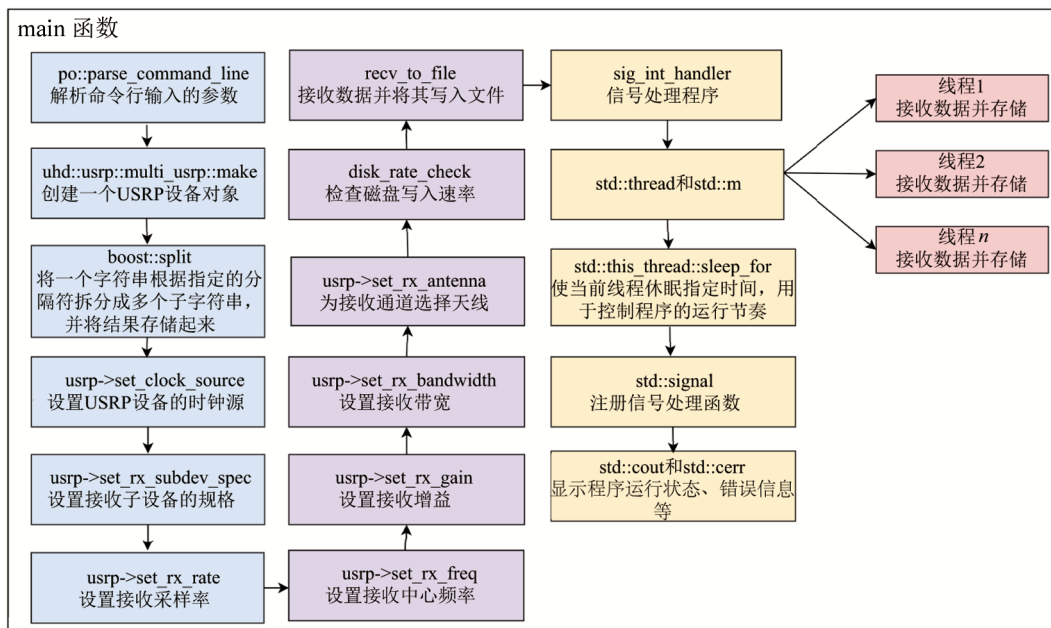


图 3 UHD 工作流程图

在创建过程中, 程序会自动识别并加载设备的相关信息, 例如型号、序列号、固件版本和接口类型等, 为后续的配置与通信奠定基础。

实体创建完成后, 我们可通过 UHD 接口进一步设置 USRP 的关键参数, 包括采样率、中心频率、增益、观测时长和样本数等, 以满足不同的信号采集与处理需求。部分常用参数见表 2。

在数据传输阶段, UHD 提供了 `recv()` 函数用于数据的接收, 其函数格式如下:

```
recv(bufs, samps_per_buff, md, timeout, enable_size_map);
```

其中, `bufs` 是数据缓冲区, `samps_per_buff` 表示每次接收的样本数量, `md` 用于存储接收元数据 (如时间戳和状态信息), `timeout` 设置接收等待时间, `enable_size_map` 用于控制样本大小映射功能。通过该接口, 可以实现主机与 USRP 设备之间稳定、高效的数据接收, 为后续的信号处理与系统开发提供坚实保障。

表 2 UHD 常用参数

参数	描述
args	设备地址参数（例如：192.168.10.2）
file	读取（Tx）或保存（Rx）二进制样本的文件名
type	样本的数据类型（double、float、short）
rate	采样率
freq	射频中心频率
gain	射频链路增益
ant	天线选择
bw	模拟前端滤波器带宽（单位：Hz）
ref	参考源选择（内部、外部、MIMO）
channels	所使用的通道
wirefmt	数据传输格式

2.3 控制软件

2.3.1 连续谱扫描软件

连续谱扫描软件是天马望远镜进行连续谱指向扫描观测的关键工具，主要用于控制望远镜指向扫描与跟踪观测。在观测前，用户需编写并载入观测纲要，然后通过软件指引望远镜按照设定的赤经、赤纬坐标移动至目标位置。当望远镜达到目标位置后，将自动执行十字扫描或跟踪观测，扫描轨迹和观测数据分别在界面左侧和右侧实时显示。同时，望远镜状态区域提供观测目标、运行状态及姿态参数等信息，便于用户随时掌握系统运行情况。

2.3.2 天线控制软件

在进行连续谱观测时，我们使用了当前天马望远镜的天线控制软件。该软件的主要功能是精确控制射电望远镜，确保其能够实时、稳定地跟踪观测目标，从而满足不同观测需求^[14]。为了实现对多种观测模式的支持，该软件不仅具备天线状态监控和保护功能，还提供了友好的图形化与数字化控制界面，确保用户操作便捷、直观。该软件采用 Java 语言开发，具有良好的跨平台兼容性，能够在 Linux 和 Windows 操作系统下运行，满足不同环境下的使用需求。

天马望远镜的天线控制软件，涵盖了对多个关键系统的实时监测与调控。通过集成多个功能模块，软件实现了对观测系统的精细化管理，确保天线的稳定运行和观测任务的顺利执行。具体而言，该软件包含多个功能模块，包括天线监控、气象监测、报警信息管理、接收机监控、天气信息监测等功能。这些模块共同构成了完整的观测系统控制平台，确保望远镜的高效运行和观测数据的可靠性。

2.3.3 终端控制软件

为实现对数据采集终端 USRP X410 的高效管理，本研究自主开发了一款基于 Linux 系统的终端控制软件，集成参数配置、数据采集控制与实时可视化功能，确保观测数据的稳定获取与高效处理。软件采用 Python 语言编写，图形界面由 PyQt6 构建，并嵌入 PyQtGraph 实现频谱的实时绘制。

图形用户界面设计直观, 操作简便。界面左侧用于设置关键参数, 包括 USRP 地址、中心频率、采样率、增益及数据存储路径; 右侧实时展示频谱图, 便于用户监控信号变化; 顶部显示日期、时间与星期; 底部设有“Start”与“Stop”按钮, 实现一键控制采集流程, 显著简化操作并提升效率。

软件采用多线程架构, 确保数据采集、信号处理与界面交互并行不冲突, 系统运行更为流畅稳定。整体架构由以下模块组成:

(1) 图形界面模块 (PyQt6)。基于 QMainWindow 构建主框架, 利用 QWidget 与布局类 (QVBoxLayout、QHBoxLayout) 组织各功能组件; 通过 QLabel 和 QLineEdit 实现参数显示与输入; QPushButton 控制数据采集流程; QTimer 实现时间动态更新; QThread 支持多线程操作。

(2) 数据可视化模块 (PyQtGraph)。使用 PlotWidget 绘制实时频谱, 结合 plot()、setPen() 呈现信号曲线; setRange() 与 enableAutoRange() 控制显示范围, setLabel() 增强图像可读性。

本系统在提升 USRP X410 操作便捷性的同时, 增强了对连续谱观测过程中信号变化的实时响应与监控能力, 为高质量观测数据的获取提供了有力支撑。

2.4 数据处理方法

图 4 展示了本研究中所采用的数据处理流程, 分为三个阶段: 原始数据处理、数据预处理和数据后处理。每一阶段分别由对应的 Python 脚本执行, 处理内容包括数据拆分、定标、合并数据、绘制连续谱及校准目标源的流量等操作。

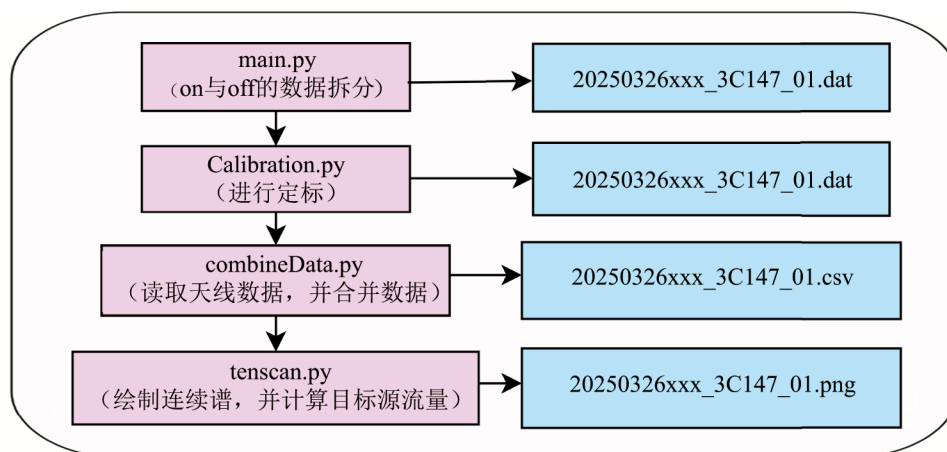


图 4 数据处理流程图

2.4.1 原始数据处理

原始数据处理主要针对 USRP X410 采集的基带数据进行整理和初步分析, 以确保数据的可靠性。本系统采用接收机耦合固体噪声源的方式实现流量定标^[15], 因此采集后的原始数据包括两类: 一类是在噪声注入开启 (on) 状态下采集的数据, 另一类是在噪声注入关闭 (off) 状态下采集的数据。

原始数据处理流程如下: 首先, 读取 USRP X410 采集的原始基带数据, 再对数据进行折

叠处理, 以增强周期性特征并降低随机噪声的影响。接着, 计算折叠后数据的平均幅度以提高稳定性, 并绘制折叠后的时域图 (如图 5 所示), 直观展示数据的周期性变化趋势。基于折叠后的时域图的结果, 将噪声开启 (on) 与关闭 (off) 状态的数据加以区分, 并分别提取出来; 随后, 将这两部分数据分别存入独立的文本文件, 为后续研究提供可靠的数据支持。

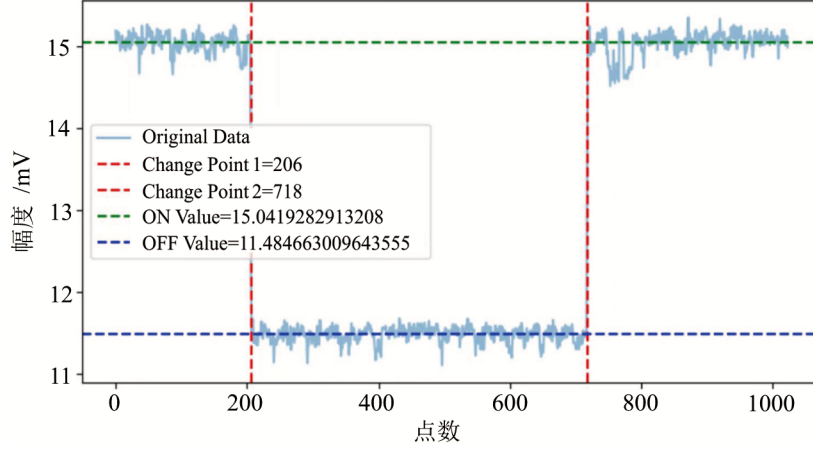


图 5 折叠后的时域图

图 5 展示了 10 个周期的折叠结果。图中带宽为 128 MHz, 积分时长为 0.1 s, 积分后共得到 1 024 个点。这种处理方式不仅有助于提升信号的信噪比, 还能更清晰地展现数据的周期性特征。

2.4.2 数据预处理

数据预处理的具体步骤如下。首先, 数据预处理模块读取原始数据处理的结果。原始数据处理后的数据中包含两组数据, 一组是带有噪声注入 $P_{\text{on}}^{\text{C}}(t)$, 另一组无噪声注入 $P_{\text{off}}^{\text{C}}(t)$, 其中 t 表示数据记录的时间。接着, 采用式 (1) 和式 (2) 分别计算出定标因子 τ 和定标处理后的数据 $T(t)$ [4]。

$$\tau = \frac{T_{\text{m}}^{\text{C}}}{P_{\text{on}}^{\text{C}}(t) - P_{\text{off}}^{\text{C}}(t)}, \quad (1)$$

$$T(t) = \frac{P_{\text{on}}^{\text{C}}(t) + P_{\text{off}}^{\text{C}}(t)}{2} \times \tau = T_{\text{off}}^{\text{C}}(t) + \frac{T_{\text{m}}^{\text{C}}}{2}, \quad (2)$$

其中, T_{m}^{C} 为全带宽平均噪声定标温度。

该定标方法基于噪声源定标原理, 即在接收机耦合一个已知温度的固体噪声源, 通过测量带有噪声注入 $P_{\text{on}}^{\text{C}}(t)$ 和无噪声注入 $P_{\text{off}}^{\text{C}}(t)$ 的值, 并结合已知的噪声源温度 T_{m}^{C} , 可以进一步推导出系统温度 T_{sys} , 如式 (3) 所示 [15]:

$$T_{\text{sys}} = \frac{P_{\text{off}}^{\text{C}}(t)}{P_{\text{on}}^{\text{C}}(t) - P_{\text{off}}^{\text{C}}(t)} \times T_{\text{m}}^{\text{C}}. \quad (3)$$

然后, 数据预处理程序读取天线位置数据 $P_a(t)$, 并根据 $T(t)$ 中的时间值 t 对 $P_a(t)$ 进行线性插值, 得出 $T(t)$ 对应的天线位置值, 从而得到 $T(p)$, 其中 p 为所述赤经或赤纬的位置数据。

2.4.3 数据后处理

数据后处理程序的主要任务是读取经过预处理后的数据, 并对其进行进一步的分析和处理。具体的后处理步骤如图 6 所示, 预处理数据包括目标源和定标源的观测数据。首先, 我们对观测数据进行基线移除, 并通过高斯拟合进行数据处理; 接着计算指向偏差量、幅度、HPBW 和 RMS 等参数; 随后, 数据后处理程序依据定标源的观测数据, 计算出增益曲线和央斯基-开尔文转换系数, 以校准目标源的流量。在后处理过程中, 程序还会绘制目标源和定标源的观测数据, 并展示增益曲线, 以对观测数据进行质量控制^[4]。

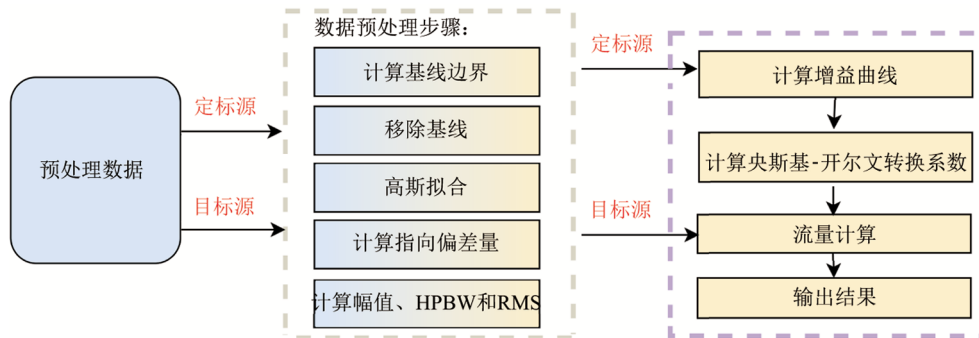


图 6 数据后处理流程图

3 连续谱观测实验

3.1 连续谱观测方法

天马望远镜的连续谱观测方法分为两种模式: 单点观测和成图观测。前者通过十字扫描进行, 每组十字扫描包含多个沿着赤经和赤纬方向的子扫描; 后者则通过飞行扫描 (on-the-fly, OTF) 来实现, 可以视为多次单点观测的集合。在本次观测中, 我们选用的连续谱观测方法是单点观测^[4]。

为了确保目标源流量的准确校准, 观测过程中会穿插观测流量校准源。由于望远镜的指向误差会降低连续谱流量测量的精度, 因此在观测校准源的同时, 需及时校正望远镜的指向误差。通过快速调整望远镜指向, 提高了观测数据的准确性和可靠性, 确保科学结果的精度, 并为后续的数据分析提供更高质量的数据。

3.2 观测实验与数据分析

为了验证 USRP X410 作为连续谱观测系统数据采集终端的有效性, 我们在 2025 年 3 月份选取不同流量的射电源进行观测。观测工作在 C 波段 6.25 GHz 频率下进行, 采用的带宽为 128 MHz, 噪声注入周期设定为 100 ms。

在本次观测中,我们选择了 3C147、0209+724、0345+138 和 1928+738 共 4 颗射电源进行测量。其中,3C147 作为定标源^[5],其余 3 颗射电源作为目标源进行观测。观测采用方位角扫描速率 $15.12'' \cdot s^{-1}$,俯仰角扫描速率 $7.92'' \cdot s^{-1}$,单次扫描角度为 $300''$,并累计执行了 25 次有效扫描。在观测中系统温度 T_{sys} 维持在 50 K 左右。

对观测数据进行基线移除处理后,结果如图 7 所示,其中 a) 至 d) 分别对应 3C147、0209+724、0345+138 和 1928+738 的高斯拟合轮廓,纵坐标 T_a 表示天线亮温度。

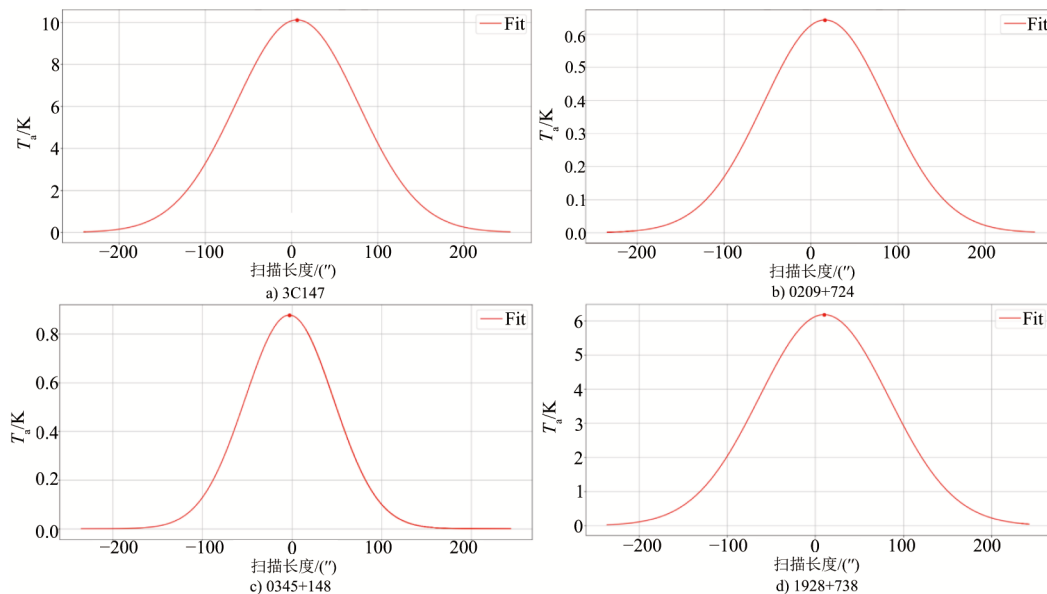
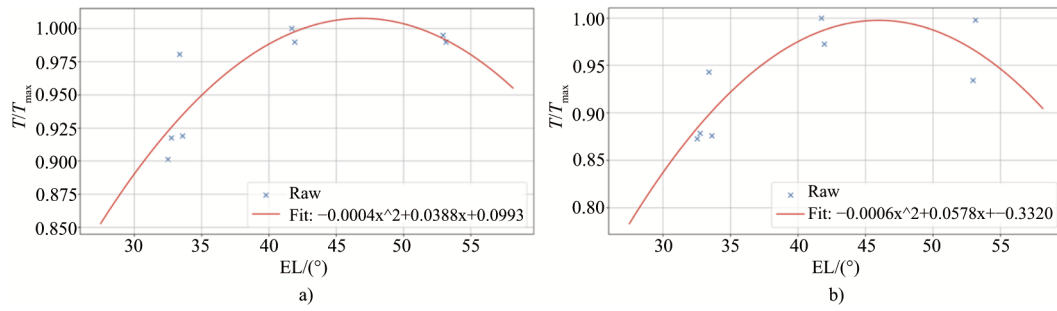


图 7 不同流量的射电源观测结果

此外,我们基于定标源 3C147 绘制了增益曲线,结果如图 8 所示。图中纵坐标 T 表示天线温度, T_{max} 表示最大天线温度;横坐标 EL 表示俯仰角。通过对增益曲线的分析,并利用其对应的央斯基/开尔文转换系数,我们对目标源的观测数据进行了校准。最终,经过校准后的流量及误差分析结果如图 9 所示。目标射电源 0209+724、0345+138 和 1928+738 有效扫描次数分别为 8 次、6 次、4 次;观测时间分别为 16 min、12 min、8 min。从图 9 可以看出,3 颗目标射电源校准后的流量分别为 0.492 1 Jy、0.774 9 Jy 和 3.279 2 Jy;其对应的流量误差分别为 0.059 1 Jy、0.115 9 Jy 和 0.076 2 Jy。图中的红色虚线表示的是平均流量。

为了对观测数据进行定量分析,我们查阅了 NRAO VLA 校准源手册网站中各目标射电源在 5 GHz 和 8.11 GHz 频率下的已知流量数据,并采用线性插值的方法,推算其在 6.256 GHz 频率处的理论流量值。将所得理论流量与实际观测流量列于表 3 中,以便开展对比分析。

通过对观测结果进一步分析,我们发现数据中存在一定的误差,误差主要来源于观测带宽较窄,影响了观测流量的精度。为解决这一问题,未来我们计划扩展带宽范围,以提升信号的质量。



注: a) 和 b) 分别为定标源 3C147 的左旋与右旋的增益曲线。

图 8 定标源 3C147 的增益曲线

表 3 目标射电源的理论与观测流量值 mJy

射电源名	理论值	观测值	绝对误差
0209+724	442.7	492.1	49.4
0345+138	541.0	774.9	233.9
1928+738	3 282.8	3 279.2	3.6

4 总结与展望

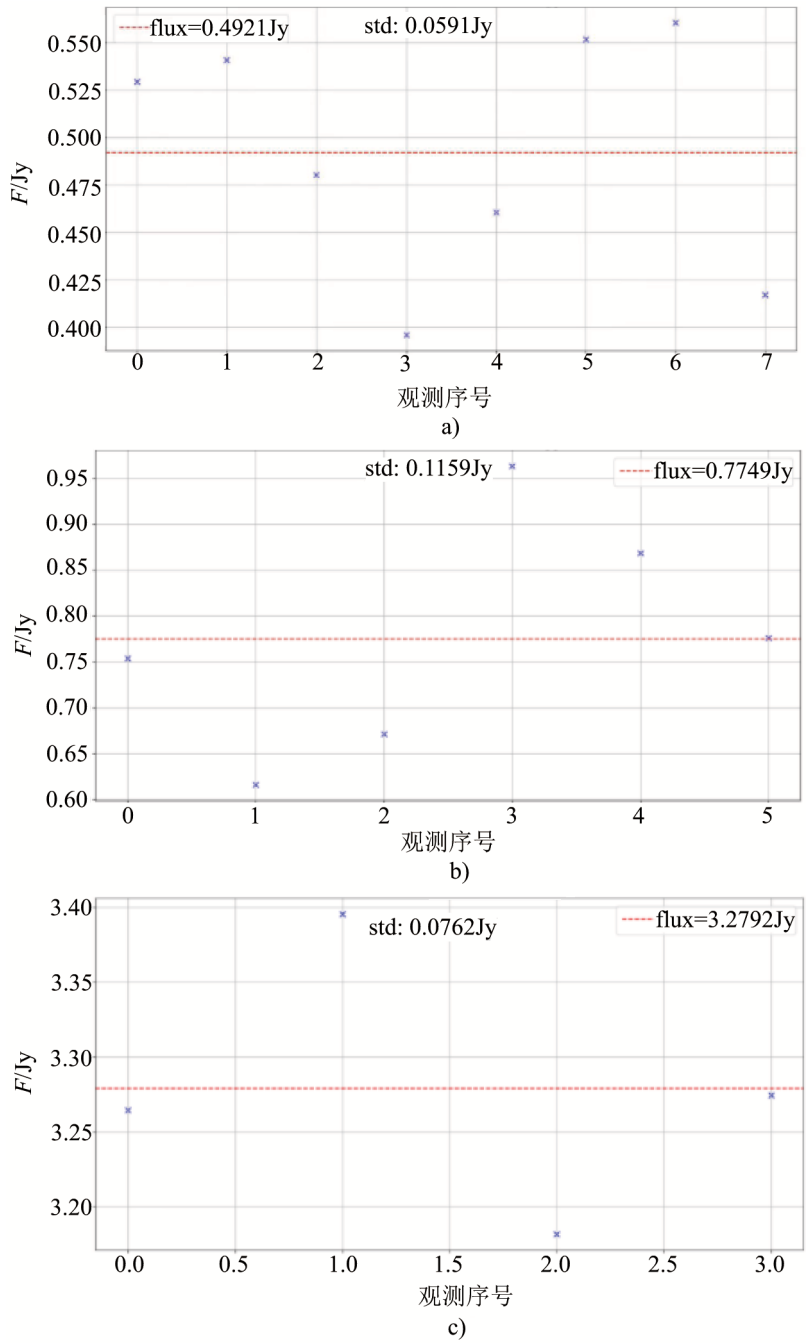
本文围绕 USRP X410 作为天马望远镜连续谱观测系统数据采集终端的应用展开了系统性研究, 并基于射电源 3C147、0209+724、0345+138 和 1928+738 的观测数据对其稳定性进行了评估。研究表明, 该系统能够长期稳定运行, 并成功获取定标后的观测数据, 在当前技术条件下基本满足连续谱观测的需求。然而, 系统测量精度仍受观测带宽限制, 导致一定程度的误差。为克服这一限制, 未来我们计划将带宽从 128 MHz 扩展到 250 MHz, 并结合 USRP X410 内置下变频功能, 直接将其安装于馈源舱内。这一改进将有效减少信号传输过程中的损耗与干扰, 从而进一步提高射电源流量测量的精度。

致谢

感谢刘龙辉师兄以及在研究过程中给予我指导、帮助与鼓励的所有老师、同学、朋友和家人。

参考文献:

- [1] Liu Q, Shen Z, Hong X, et al. Astronomical Techniques and Instruments, 2024, 1: 239
- [2] Guan W H S, Zhao R B, Zhang D, et al. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2022, 9: 896040
- [3] Wu Y J, Liu Q H, Li J, et al. Astronomical Research and Technology, 2017, 14: 1
- [4] Dong J, Timur M, Liu Q H, et al. Progress In Astronomy, 2019, 37: 203
- [5] Rabidoux K, Pisano D, Kepley A A, et al. ApJ, 2013, 780: 19



注：从 a) 到 c) 分别为目标射电源 0209+724、0345+138 和 1928+738 校准后的流量及误差。

图 9 校准后的流量及误差分析结果图

- [6] Staff G S. <https://www.gb.nrao.edu/~glangsto/GBTog.pdf>, 2015
- [7] 刘鸿鹏. 硕士论文, 北京: 北京交通大学, 2013: 74
- [8] 周锦标, 赵乾宏, 刘明波. 电子测量技术, 2017, 40: 114
- [9] Zhang C Y, Zhao R B, Zhang D, et al. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, 10: 1167331
- [10] Fan J, Wang W, Wu Y, et al. Guangzhou, China: IEEE, 2024: 20
- [11] Rice M, Croft H, Gillis J, et al. Tucson, AZ, USA: International Foundation for Telemetry, 2023
- [12] Popescu D C, Vida R. *Infocommunications Journal*, 2022, 14: 16
- [13] Ettus Research. https://files.ettus.com/manual/page_usrp_x4xx.html, 2025
- [14] Zhao R B, Ai I, Wang S F, et al. *Astronomical Research and Technology*, 2007, 4: 64
- [15] 吴亚军. 博士论文. 上海: 上海天文台, 2017: 1

USRP-Based Continuum Spectrum Observation System for the Tianma Telescope

BASANG Fan Duo^{1,2,3}, ZHAO Rongbing³, CHEN Tianlu^{1,2}, QI Zhaoxiang³,
SHANGGUAN Weihua^{3,4}, ZHANG Chuyuan^{3,4}

(1. The Key Laboratory of Cosmic Rays, Ministry of Education, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. Department of Physics, College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China; 3. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Tianma Radio Telescope, with a diameter of 65 meters, possesses excellent observational capabilities. Among its various observation modes, continuum spectrum observation plays a crucial role—not only in evaluating the telescope’s performance but also in studying the Galactic magnetic field, supernova remnants, and the temporal variability of radio sources. To enable stable and flexible continuum spectrum observations, this paper presents the design and implementation of an observation system based on Software-Defined Radio (SDR) technology. The system utilizes a Universal Software Radio Peripheral (USRP) as the hardware platform, providing strong scalability and adaptability to meet diverse observational requirements. This paper provides a detailed introduction to the components of the continuum observation system, including the control software, the USRP X410 data acquisition terminal, and the data processing workflow. Practical observations were conducted using this system, and the calibrated flux densities of the target radio sources 0209+724, 0345+138, and 1928+738 were measured to be 0.492 1 Jy, 0.774 9 Jy, and 3.279 2 Jy, respectively, with corresponding errors of 0.059 1 Jy, 0.115 9 Jy, and 0.076 2 Jy. These results validate the stability and reliability of the system, demonstrating that the USRP X410 is a promising data acquisition device for continuum spectrum observations.

Key words: telescope; continuum spectrum; USRP; flux; data processing