

基于LabVIEW平台的射电天文台址无线电环境监测软件

周俊贤¹, 董亮^{2,3*}, 周金治¹, 田斌⁴, 李升阳⁴

¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳

²中国科学院云南天文台, 云南 昆明

³云南省中马HF-VHF先进射电天文技术国际联合实验室, 云南 昆明

⁴云南省无线电监测中心, 云南 昆明

收稿日期: 2023年9月25日; 录用日期: 2023年12月1日; 发布日期: 2023年12月13日

摘要

本文介绍了一种基于LabVIEW的控制频谱仪无线电环境监测软件。针对射电天文台址无线电环境勘选和监测的要求, 本软件在频谱仪设计方面充分考虑到了射电天文微弱信号特点, 针对弱信号长时积分、任意精细化监测带宽设置、动态信号频谱瀑布图显示以及多种数据记录等诸多要求设置了软件功能。在数据管理方面, 以“年月日时分秒”的文件名命名规则记录观测信号的最大值和平均值, 方便回溯和分析干扰数据。经实际对射电天文台址无线电环境监测后, 实现了对0~26.5 GHz频段的无线电环境数据自动获取监测, 并将投入长期的射电天文台址无线电环境的监测工作。

关键词

无线电环境, 频谱监测, 自动控制, LabView平台

Radio Environment Monitoring Software Based on LabVIEW Platform

Junxian Zhou¹, Liang Dong^{2,3*}, Jinzhi Zhou¹, Bin Tian⁴, Shengyang Li⁴

¹School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

²Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming Yunnan

³Yunnan Province China-Malaysia HF-VHF Advanced Radio Astronomy Technology International Joint Laboratory, Kunming Yunnan

⁴Yunnan Radio Monitoring Center, Kunming Yunnan

Received: Sep. 25th, 2023; accepted: Dec. 1st, 2023; published: Dec. 13th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 周俊贤, 董亮, 周金治, 田斌, 李升阳. 基于LabVIEW平台的射电天文台址无线电环境监测软件[J]. 软件工程与应用, 2023, 12(6): 774-784. DOI: 10.12677/sea.2023.126075

Abstract

This paper introduces a control spectrum analyzer radio environment monitoring software based on LabView. According to the requirements of radio environment prospecting and monitoring of radio observatory sites, the software takes full account of the characteristics of weak radio astronomy signals in the design of the spectrometer and sets up software functions for many requirements such as long-term integration of weak signals, arbitrary fine-tuned monitoring bandwidth Settings, dynamic signal spectrum waterfall display, and various data recording. In terms of data management, the maximum value and average value of the observed signal are recorded with the filename naming rule of "year, month, day, hour, and second", which is convenient for backtracking and analyzing interference data. After the actual monitoring of the radio environment of the radio observatory site, the automatic acquisition and monitoring of the radio environment data in the band of 0~26.5 GHz has been realized, and the long-term monitoring of the radio environment of the radio observatory site will be put into use.

Keywords

Radio Environment, Spectrum Monitoring, Automatic Control, LabView Platform

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景

射电天文业务是指涉及射电天文使用的一种业务，其频率划分与保护，在国际电联(International Telecommunication Union, ITU)的《无线电规则》中有明确规定[1]。近年来，由于发射机数量的增加和射电天文研究需要的带宽逐步扩大，频率资源使用率越来越高，移动通信、广播电视、微波接力、气象雷达、飞机导航、卫星通信等无线通信业务频率覆盖越来越宽。数字化、智能化、便携式移动式无线通信设备在人们生活中应用越来越广泛，电磁环境有不断恶化的趋势[2]，射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)对射电天文观测的影响日益增加[3]。

另一方面，由于宇宙中遥远天体发射的射电信号非常微弱，目前能测到谱功率流量密度为 $-310\sim-320$ dB (W/m² Hz)，就要求射电望远镜极其灵敏，同时对台址的电磁环境要求极其严格。所以世界上的大型射电望远镜都建立在电磁环境良好的地区，并以站址为中心在一定范围内设定电磁环境保护区[4]。如监测空间中无线电环境的干扰，避免因过多的干扰而影响射电天文观测这一问题的必要性出现在人们视野中。在 ITU 的《无线电规则》中，给出了射电天文业务的频率划分，为了避免有源业务对射电天文业务的无线电干扰，在确定一切有源业务设施时，必须参照这个规则中有关频率分配对射电天文业务保护的规定[4]。同时，为保护射电天文台的电磁环境，对射电天文台址的无线电环境进行严格监测也是不可或缺的一环，这为可以作为后续进行射电天文电磁环境的观测和保护提供一定依据，从而延长射电望远镜的科学寿命。

为了监测的射电天文台址的无线电环境并方便保存数据，本研究基于 LabView 软件的图形化编程实现无线电环境的自动监测和数据存储软件。同时兼顾到弱信号以及监测带宽需求，软件可以自定义起止频率、数据积分时间、极化方向、频率点数等信息。本软件使用 GPIB (General Purpose Interface Bus, GPIB)

协议控制德国罗德施瓦茨公司的 FSU26 频谱仪，再由频谱仪观测到数据然后通过传输线传回软件并保存到内存中进行存储。实现了对射电环境的自动化监测并满足测量环境的多种要求。

2. 软件构架及功能介绍

2.1. 软件架构

本软件的架构可以主要分为预设信息录入模块、频谱仪设置模块、数据收集模块、数据处理模块、文件写入模块和前置面板展示模块。图 1 展示了软件总体的框架。

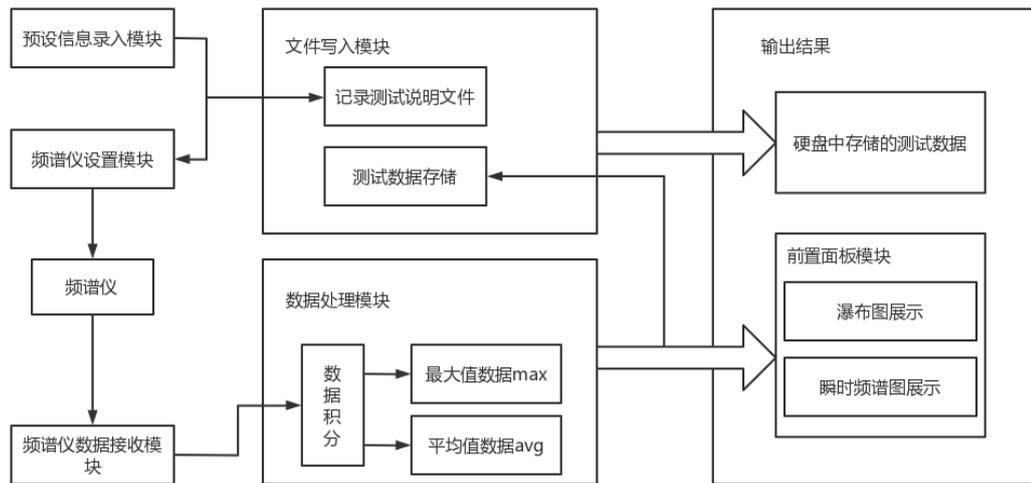


Figure 1. Overall software architecture
图 1. 软件总体架构

在程序开始运行时，首先是将预设信息录入说明文档，随后向频谱仪发送设置请求。当频谱仪向 PC 端发送数据后，数据收集模块将数据读取并送往数据处理模块，此时对数据进行积分，计算出最大值和平均值并送入前置面板模块和文件写入模块，前者将数据可视化为频谱图和瀑布图，后者将数据存储到预设文件夹中，以便后续处理。

2.2. 软件功能

软件功能分为定时测试、个人测试参数设置、动态信号频谱瀑布图和频谱图显示以及数据存储。图 2 是软件功能的关系图。在软件启动后，动态频谱图和瀑布图自动开始显示，只有选择保存数据后才会进行测试数据的存储。具体如下：

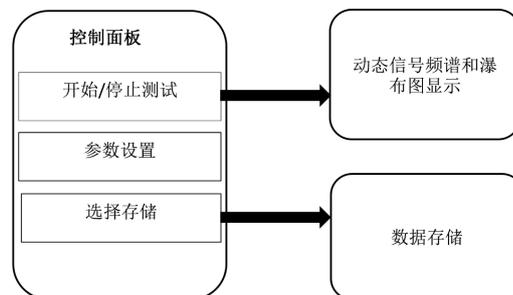


Figure 2. Software function diagram
图 2. 软件功能关系图

(1) 定时测试

在设置页面中设定开始/停止记录时间，点击 **START** 后，到达开始/停止记录时间系统自动开启/终止记录，也可在采集过程中手动停止记录。

(2) 个人参数设置

界面右上角是测试方式设置面板，包含了对项目名称、观测方向、测试极化方向、起止频率、扫描频点、数据存储路径等的设置，以上设置信息也会保存在数据存储文件夹中。

(3) 动态信号频谱瀑布图和频谱图显示

在界面中能看到有 3 个能显示数据图像实时观测的数据界面，最下界面为所观测频段数据的最大保持值及均值的实时显示，中间左边为数据最大值(max)的实时频谱瀑布图的强度图显示，中间左边数据的均值(avg)的实时频谱瀑布图的强度图显示。

(4) 数据存储

在软件运行前，勾选 **Save** 按钮并选择数据的保存路径，观测数据则会按时间分类存储到计算机硬盘内指定文件夹，方便对特定时间的数据进行抽查和分析。同时，数据文件夹中还附带说明文档，记录了当次测试的参数信息。

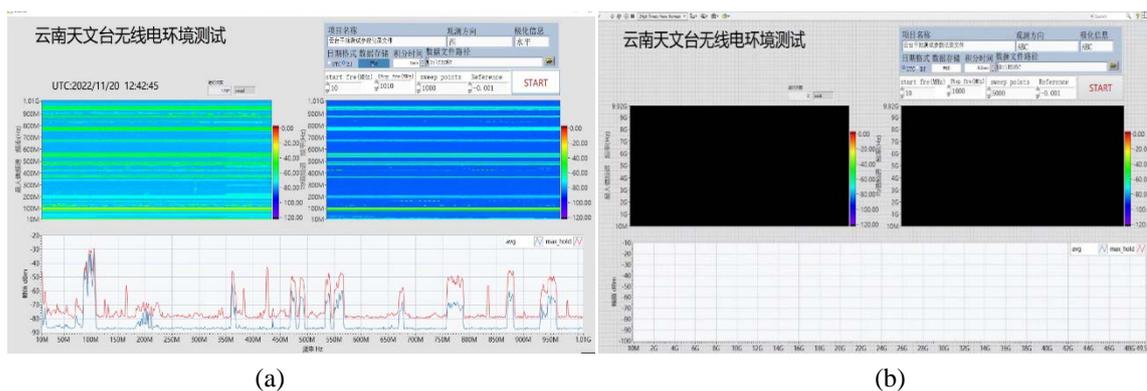


Figure 3. User interface display (a. Front panel after opening; b. Effect image after running)
图 3. 用户界面展示(a. 开启后的前置面板; b. 运行后的效果图)

2.3. 用户界面展示和说明

图 3(a)为软件打开后的前置面板，显示名称为云南天文台无线电环境测试，右侧有一个控制面板，如图 4 所示，包含用户设置的信息，如测试名称、观测方向、极化信息、是否存储和存储路径、起止频率、扫描频点等。用户通过数据当次测试的名称、观测方向、极化方向并将这些信息存储到数据存储路径的说明文档中，以防数据混淆。

时间记录格式有两种选择，分别为国际时间(UTC)和北京时间(BJ)，可根据测试需求选择。同时，为了对弱信号有良好的监测，软件积分时间范围为 3~100 s。起止频率的设定范围为 0~26.5 GHz，与频谱仪参数一致。

点击 **START** 按钮后系统开始工作并显示实时瀑布图和频谱图，如图 3(b)所示。若开始测试前选择了存储并选择过存储路径，则在停止测试后，软件会自动将测试数据存储在对应的路径。上方两个窗口分别为最大值的瀑布图和均值的瀑布图。最下方的坐标系窗口为实时频谱图显示窗口，它包含了最大值频谱(max)和平均值频谱(avg)。

再次点击 **START** 按钮，系统停止测试并进入等待状态。等待状态下，软件会自动将测试数据按照特

定格式存储到预先设置好的数据文件夹中。此时可关闭软件并完成测试。



Figure 4. Settings panel

图 4. 设置面板

2.4. 数据采集与记录

本软件在数据采集时需要对以下参数进行设置，同时这些观测参数会以 txt 文本格式记录在数据存储目录下：

- (1) 观测方向，根据实际观测的方向填入信息，如方向、角度信息等等。
- (2) 积分时间，积分过程是一个用于减少噪声起伏的时间平均过程，当需要达到极其高的灵敏度时，地面观测一般会采用更长的积分时间。本软件设置的积分时间范围为 3~100 s。具体值可根据需求设置即可。

- (1) 极化信息，表示了输入信号的来源是水平极化或是垂直极化。
- (2) 起止频率，决定了本次测试的频段范围。软件支持起止频率范围为 10 MHz~26.5 GHz。
- (3) 扫描频点，在扫描点数为 n 个，起止频率一定的情况下，采样点会根据扫描点数将频段等分为 $n - 1$ 段，频段中包含 $n + 1$ 个采样点。扫面描点越多，频谱越精细，但数据处理速度也会下降。

点击数据存储并开启测试，软件将自动在数据文件路径值的目录下以当天日期为名创建文件夹，并持续记录当前数据。文件记录格式按行排列，每一行都记录一个频谱，记录格式如表 1 所示。

Table 1. Format of single row data storage

表 1. 单行数据存储的格式

单次频谱记录时间	x(1)	x(2)	x(3)···x(N), x(1)到 x(N)为频点对应的值
----------	------	------	--------------------------------

每行数据存储的时间间隔为程序设定的积分时间。数据 x 为每个频点对应的值，单位为 dBm。N 的大小取决于扫描频点的大小。例如，当扫描频点 $n = 4000$ 时，N 的值应为 $n + 1$ ，即将起止频段等分 $n - 1$ 份后存在 $n + 1$ 个频点，他们的值分别对应到 $x(1)$ 到 $x(N)$ 。

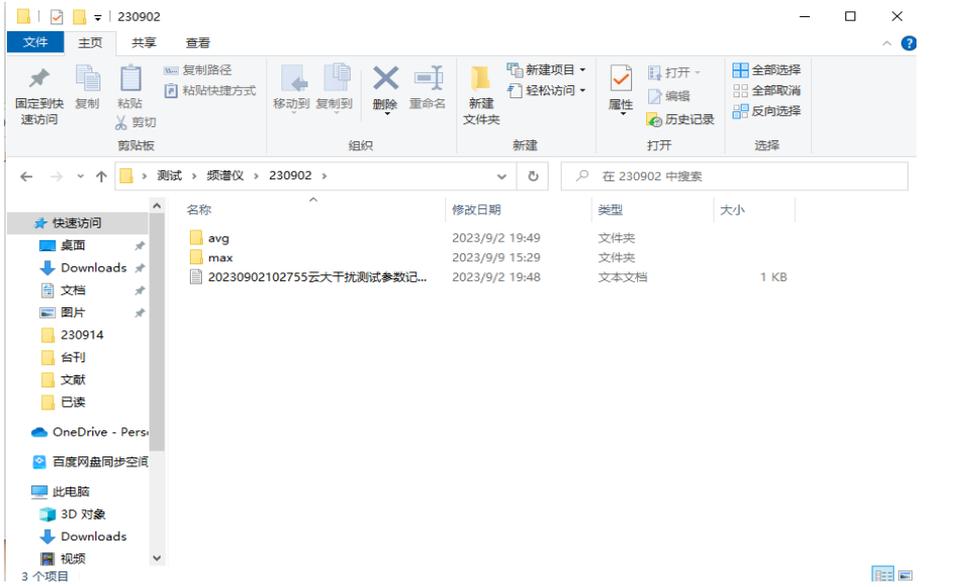
同时，记录文件文件名称为所记录数据当天日期，如：20230909 则为 2023 年 09 月 09 日所测数据，文件夹内则分为 3 个文件，如图 5(a)，第一个文件名为 avg 代表所测数据的均值数据，第二个文件名为 max 代表所测数据的最大值数据，第 3 个文件则是所测数据的各种所需的测试信息等。图 5(b)为数据文件记录的数据展示。

3. 频谱仪控制系统构成

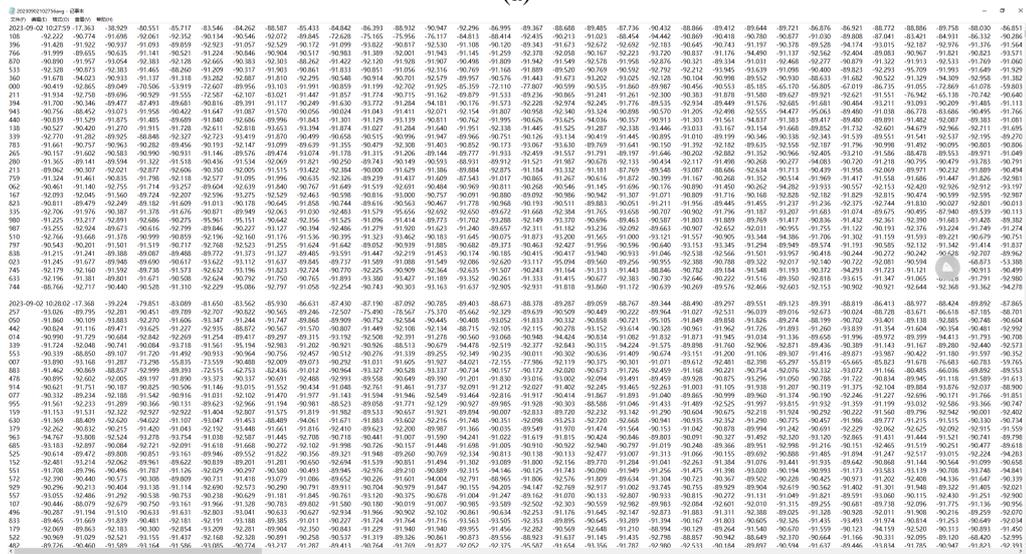
3.1. 控制系统

FSU26 支持 GPIB (IEEE-488)总线控制并传输数据，本软件通过 LabVIEW 编程环境，使用 GPIB 转

USB 的转接口实现频谱仪与 PC 端的通信。控制系统硬件连接如图 6。该数据传输路径将自定义的设置数据传输到频谱, 如频段起始频率、极化方式、分辨率带宽、积分时间及执行次数, 并将采集到的信号保存在预设地址中, 便于对后续数据的处理分析。控制系统的 PC 端 LabVIEW 安装环境为 Windows 10 系统, 安装版本为 LabVIEW 2017。



(a)



(b)

Figure 5. Data format display
图 5. 数据格式展示



Figure 6. Hardware connection diagram
图 6. 硬件连接示意图

当预设好测试参数后, 点击 **START** 即开始运行程序。开始运行后, 软件首先会将预设的测试参数打包通过 **GPIB** 接口协议传输到频谱仪, 频谱仪根据预设参数进行设置后开始读取天线传入的测试数据并打包发送到 **PC** 端, 随后软件读取数据对其进行数据处理, 最后自动将处理后的数据通过瀑布图和瞬时频谱图展示到软件前置面板的坐标系中。图 7 展示了控制系统运行的流程:

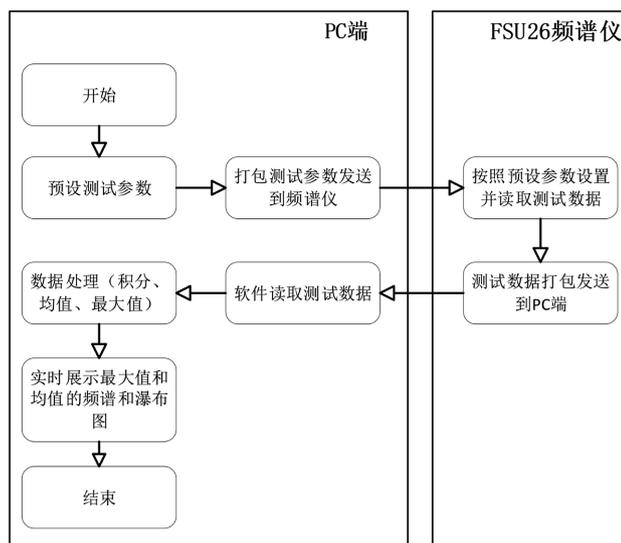


Figure 7. The control flow
图 7. 控制流程

3.2. FSU26 频谱仪

德国罗德施瓦茨公司的 FSU26 工作频率 20 Hz~26.5 GHz, 平均噪声电平为-158 dBm, 频率分辨率带宽支持 1 Hz 到 50 MHz, 拥有极高的测量速度, 支持时域模式的快速邻信道功率(ACP)的测量, 最高每秒能进行 70 次, 包括 **GPIB** 总线传输[5]。其部分重要参数见表 2。

Table 2. R&S FSU26 spectrometer parameters [5]

表 2. R&S FSU26 频谱仪参数[5]

设备	型号	频率范围	技术指标	分辨率带宽
R&S FSU26 频谱仪	RS-HL050	20 Hz~26.5 GHz	相位噪声: 137 dBc/Hz	10 Hz~20 MHz

3.3. GPIB 接口协议

3.3.1. GPIB 协议简介

Hewlett Packard 在 60 年代末发明了通用接口总线, 或简称为 **GPIB**, 使得在电脑和仪器之间的通信得以轻松实现[6]。1975 年, IEEE 协会确立了 **GPIB** 标准。目前, **GPIB** 的用途被延伸到很多领域, 例如 **PC** 端、扫描仪、频谱仪、示波器等仪器设备之间的通信和控制。

GPIB 也叫 **HPIB**, 是一个数字化的 24 脚并行总线, 如图 8 所示, 由 16 条信号线和 8 条地线组成。这 16 条信号线分为 8 条数据线、5 条控制线和 3 条握手线。8 条数据线: 从 **DIO1** 到 **DIO8**, 用来传送命令、地址和数据; 5 条控制线: 分别为 **ATN** (**ATTENTION**——注意)线、**IFC** (**INTERFAC CLEAR**——接口清除)线、**REN** (**REMOF ENAHLE**——远控可能)线、**SRQ** (**SERVICE REQUEST**——服务请求)线和 **EOI** (**END ORIDENTIFY**——结束或识别)线, 用来管理通过接口的有序信息流; 3 条握手线: **DAV** 线、**NRFD**

线和 NDAC 线，用于控制设备之间消息字节的传送。发送消息方(源方)和接收消息方(受方)利用这 3 条握手线进行三线挂钩，以保证数据线上的消息(命令或数据)能准确无误地传送。



Figure 8. GPIB interface
图 8. GPIB 接口

受目前 TTL 接口收发器(驱动器)最大驱动电流 48 mA 限制，GPIB 单条母线上最多同时挂载 15 个器件。若需要使用更多的仪器设备，则需要在控制器上添置一个 GPIB 接口。

GPIB 母线上采用与 TTL 电平相容的正极性、负逻辑，即以低电平小于或等于 0.8 V 为“真态”或“0 态”；以高电平大于或等于 2.0 V 为“假态”或“1 态”。必须注意，正电平负逻辑关系是针对母线上的状态而完成的。至于器件内部采用何种逻辑关系与此无关。由上述各种特性可以看出，GPIB 接口系统具有简单方便、灵活适用、易于实现等特点，为可编程仪器提供了一种通用的接口标准。

3.3.2. GPIB 总线协议

在 GPIB 系统中，器件与 GPIB 总线之间的交互作用被定义为接口功能。例如，当器件向总线发送数据时，这种作用被定义为讲话者功能；而当器件从总线上接收数据时，这种作用则被定义为听众功能。这五种基本接口功能构成了 GPIB 数字接口功能要素的核心，确保消息字节能够在数据输入输出线(简称 DIO 线)上进行双向、异步且准确无误的传递。它们管理和控制着消息字节的传递[7]。

① 控者(Controller)功能，简称 C 功能。这种接口功能主要是为计算机或其他控制器而设立的。一般来说，自动测试系统都由计算机来控制和管理。

② 讲者(Talker)功能，简称 T 功能；或者扩大讲者(Extended Talker)功能，简称为 TE 功能。一个器件(仪器或计算机)如果需要向别的器件传送数据必须具有讲者功能。

③ 听者(Listener)功能，简称为 L 功能；或扩大听者(Extended Listener)功能，简称为 LE 功能。L 功能是为一切需要从母线上接收数据的器件设立的。

④ 源方挂钩(Source Hand Shake)功能，简称 SH 功能。SH 功能赋予器件保证多线消息正确传递的能力，SH 功能设置在多线消息发送源方器件接口功能区内，所以称为“源方挂钩”。

⑤ 受方挂钩(Acceptor Hand Shake)功能，简称 AH 功能。AH 功能则赋予器件保证正确地接收远地多线消息的能力。而 AH 功能设置在多线消息接收方器件接口功能区内，称为“受方挂钩”[8]。

3.4. LabVIEW 的 GPIB 控制流程

在 LabVIEW 的编程中，NI 官方为我们提供了部分 GPIB 控制协议的子 VI，部分子 VI 的名称以及对应功能见表 3。

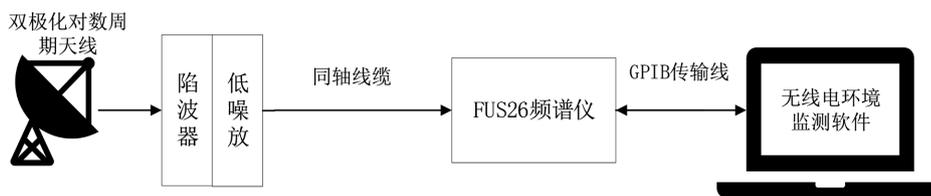
Table 3. GPIB control instructions for LabVIEW [9]**表 3.** LabVIEW 的 GPIB 控制指令[9]

Palette Object	Description
GPIB 读取函数	从地址字符串中的 GPIB 设备中读取数量为字节总数的字节。
GPIB 写入函数	使数据写入地址字符串指定的 GPIB 设备。
GPIB 清零函数	发送 SDC (选中设备清零)或 DCL (设备清零)命令。
GPIB 初始化函数	在地址字符串中配置 GPIB 接口。
GPIB 触发函数	发送 GET (成组执行触发)至地址字符串所指定的设备。

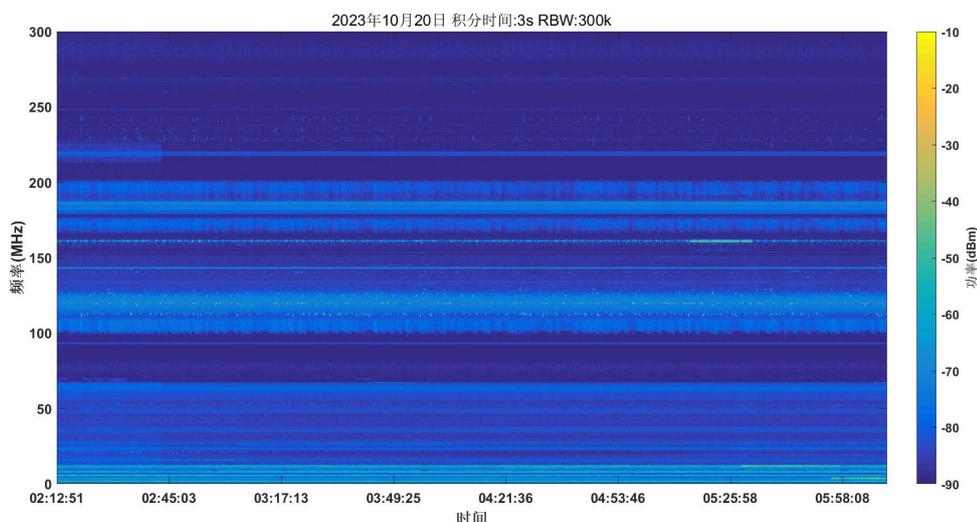
本软件通过 NI-VISA 实现 GPIB 的驱动。在获取到频谱仪的 GPIB 地址后,使用清零函数将总线状态清零,而后初始化 GPIB 系统配置互设备地址。此后,PC 端即可使用读取和写入函数与频谱仪进行数据传输。

4. 观测数据展示与分析

此处展示的观测数据获取来源如下图 9 所示:

**Figure 9.** Test equipment architecture**图 9.** 测试设备架构

测试使用 HF-VHF 双极化对数周期天线作为监测天线,测试频段 0~300 MHz,通过陷波器将电台信号(88~108 MHz)过滤掉后使用低噪声放大器将信号放大并接入频谱仪。频谱仪在得到 PC 端传递的设置参数后读取数据并通过 GPIB 传输线将数据传输到 PC 端。图 10 展示了 2023 年 10 月 20 日在中国科学院云南天文台采集的部分数据,时间分辨率为 3 s,分辨率带宽 300 k。

**Figure 10.** 0~300 MHz waterfall chart on October 20th**图 10.** 10 月 20 日 0~300 MHz 瀑布图

通过观察瀑布图,可以看到云南天文台台址的无线电环境相对比较稳定。在过滤掉电台频段的情况下,0 到 300 MHz 的频段范围内仍然存在些许干扰。通过对比瀑布图色阶可以发现,干扰信号的幅度并不大。可以通过观察瞬时频谱对干扰信号进行分析。

由于信号的瞬时频谱存在过多的噪声,导致底噪和小幅度干扰混叠在一起。假设系统噪声频谱为 $\sigma(\omega t)$, 频域信号频谱为 $x(\omega t)$, 则瞬时信号频谱可表示为

$$S(\omega t) = \sigma(\omega t) + x(\omega t) \quad (1)$$

而系统噪声频谱满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(\omega t) dt = 0 \quad (2)$$

式 2 可以离散表示为

$$\frac{1}{N} \sum_1^N \sigma(\omega t) \approx 0 \quad (3)$$

可见,对瞬时信号进行累加求和再取均值可以减少噪声对信号本身的影响,即

$$\frac{1}{N} \sum_1^N S(\omega t) = \frac{1}{N} \sum_1^N \sigma(\omega t) + x(\omega t) = \frac{1}{N} \sum_1^N x(\omega t) \quad (4)$$

使用 Matlab 对上述数据进行均值滤波得到图 11。

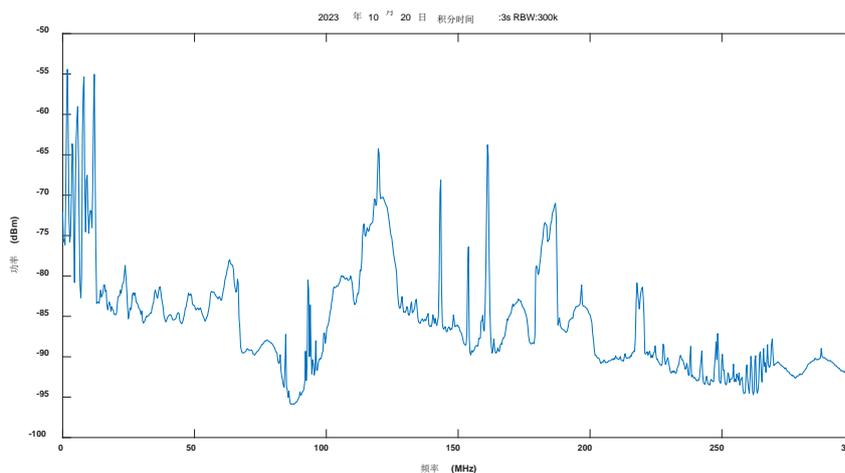


Figure 11. Instantaneous spectrogram

图 11. 瞬时频谱图

如图 11 所示,在去除掉电台干扰信号后,云南天文台台址的 0~300 MHz 内主要受干扰频段有: 0~27 MHz、110~126 MHz、143 MHz、153 MHz、180~190 MHz、217~220 MHz。其中,低频段 0~27 MHz 属于设备干扰和环境噪声,110~126 MHz 是台址东边机场的 FM 通信频段,而 140~160 MHz 的干扰源极大可能来源于路由设备,而 180~190 MHz、217~220 MHz 频段属于国际电信联盟划分给业余无线电通信用的频段[10] [11]。

5. 总结

针对射电天文无线电环境的勘测要求,本文介绍了一种基于 LabView 控制频谱仪无线电环境监测软件。该软件做到了针对弱信号长时积分、精细化监测带宽设置、动态信号频谱瀑布图显示等功能,并且

能够较好地保存实时数据,方便后续对数据进行处理和分析。软件主要基于 GPIB 通信协议实现了对频谱仪的控制和数据读取,通过用户界面录入预设观测要求的参数,在开始观测后,软件将预设值的指令下发给 FUS26 频谱仪,从而完成频谱仪参数的设置。随后,频谱仪将观测数据传输到软件并保存在 PC 端的内存中,方便随时存储和调用数据,为后续的处理提供了便利性。同时,该软件也在射电天文无线电环境中进行了长期的观测,为射电天文台址的无线电环境监测做出重大贡献。

致谢

感谢我的两位导师,云南天文台的董亮老师和西南科技大学的周金治老师。董老师在我学习的过程中细心指导我,兢兢业业,含辛茹苦,视学生如己出。周老师在我的成长过程中给予了我很多鼓励和指导。两位老师在科学研究领域忘我与精益求精的精神,深厚的学术造诣、睿智、对学生的包容和爱,将影响我今后的人生,我将受益一生。再次向两位老师致以崇高的敬意和诚挚的感谢。

基金项目

国家自然科学基金天文联合基金(U2031133);科技部平方公里阵列射电望远镜(SKA)专项(2020SKA0110202);国家重点研发计划(2022YFE0140000)中国科学院国际伙伴计划(114A11KYSB20200001)、云南省建设面向南亚东南亚科技创新中心专项(202303AP140003)、云南省国际超新星研究重点实验室(202302AN360001)和昆明市对外(国际)合作基地项目(GHJD-2021022)资助。

参考文献

- [1] 彭涛,冯宝强,万峻,等.射电天文业务干扰评价和电磁环境保护探讨(上)[J].中国无线电,2007(3):40-44.
- [2] Larkina, V. (2004) The Low Frequency Radio Interference Are a Means of Diagnostic of Environment. 2004 Asia-Pacific Radio Science Conference Proceedings, Qingdao, 24-27 August 2004, 17-18.
- [3] 刘奇,王玥,刘晔,等. QTT 台址自动化电波环境监测系统[J].中国科学:物理学力学天文学,2019,49(9):103-111.
- [4] 李建斌,彭勃,孙建民,等.射电天文站电磁环境测量方法及分析[J].电波科学学报,2009,24(3):523-528.
<https://doi.org/10.13443/j.cjors.2009.03.003>
- [5] Rauscher, C. (2001) Fundamentals of Spectrum Analysis.
https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/specifications/5214_6974_22/FPL1000_specs_en_5214-6974-22_v1200.pdf
- [6] 徐庆玉,范立斌,李田甜,等.基于 LabVIEW 和 GPIB 的示波器及频谱分析仪校准模块的设计与系统测试[J].黑龙江科学,2023,14(6):49-51.
- [7] 张世箕,杨安禄,陈长龄.自动测试系统[M].成都:电子科技大学出版社,1993.
- [8] 陈光驷,王厚军,田书林,李为民.现代测试技术[M].成都:电子科技大学出版社,2002.
- [9] National Instruments. LabVIEW 编程参考手册[Z/OL].
<https://www.ni.com/docs/zh-CN/bundle/labview-api-ref/page/intro.html>, 2023-09-14.
- [10] 北峰通信.史上最全无线通信频率分配表[Z/OL].<https://zhuanlan.zhihu.com/p/55862694>, 2019-01-28.
- [11] 杨升炎.有线电视广播系统构成与频段划分、频道配置[J].黑龙江科学,2020,11(4):122-123.