

天气雷达故障测试平台远程控制软件设计

郑鹏斌^{1,2}, 李昭春^{1,2}

(1. 海南省气象探测中心, 海口 570203;

2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203)

摘要: 针对天气雷达故障测试平台缺乏远程控制手段而导致使用具有局限性的问题, 开发了可远程控制此平台的软件; 基于天气雷达故障测试平台内置示波器、功率计、频谱仪、信号源 4 种仪表的参数设置需求和板卡驱动方式, 软件采用了标准 C/S 架构的设计方法, 由用户层、驱动管理层、仪表驱动层三部分组成; 在驱动管理层中, 着重研究了天气雷达指标测量的流程、调用驱动的接口以及测量数据的处理方法; 使用该软件远程控制天气雷达故障测试平台进行了天气雷达指标的测量, 测量结果表明远程测量值与现场测量值的误差极小; 软件具备一定的可靠性, 可投入天气雷达故障诊断和定标使用。

关键词: 天气雷达; 远程控制; 故障测试平台; 故障诊断; 定标; 仪表

Design of Remote Control Software for Weather Radar Fault Test Platform

ZHENG Pengbin^{1,2}, LI Zhaochun^{1,2}

(1. Hainan Province Meteorological Detecting Center, Haikou 570203, China; 2. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China)

Abstract: Aiming at the problem that the weather radar failure test platform lacks remote control methods and has limitations in its use, a software that can remotely control this platform has been developed. Based on the parameter setting requirements and the board driver mode of oscilloscope, power meter, spectrum analyzer, and signal source which are built in the weather radar fault test platform, the software adopts the standard C/S architecture design method. The software is composed of three parts: user layer, driver management layer and instrument driver layer. In the driver management, the process of weather radar index measurement, the interface for calling the driver, and the processing method of measurement data are emphatically studied. Using this software to remotely control the weather radar fault test platform to measure weather radar indicators, the measurement results show that the error between the remote measurement value and the field measurement value is extremely small. The software has a certain degree of reliability and can be used for weather radar fault diagnosis and scaling.

Keywords: weather radar; remote control; fault test platform; fault diagnosis; scaling; instrument

0 引言

天气雷达在短临预报、灾害性天气预警等方面发挥着重要的作用, 而天气雷达的故障诊断一直是存在的难题。文献 [1-10] 基于多年的天气雷达故障诊断经验, 提出了针对天气雷达发射机、接收机、伺服的故障诊断及维修方法。在雷达故障诊断和定标中, 仪表有着重要的作用。文献 [11-20] 从实际应用出发, 对示波器、功率计、频谱仪、信号源等测试仪表进行了研究及设计, 在各行各业得到了充分的应用。由于岛礁天气雷达保障的需要, 海南省气象局研制了便携式天气雷达故障测试平台 (以下简称“测试平台”), 其是集示波器、功率计、频谱仪、信号源 4 种测试仪表于一体的设备, 主要用于天气雷达定标和故障诊断, 其中示波器用以测量发射射频脉冲包络; 功率计用以测量发射机输出功率; 频谱仪用以测量发射脉冲射频频

谱、发射机极限改善因子、接收机噪声系数; 信号源用以动态范围测量、回波强度定标和速度测量检验。

在实际使用的过程中, 发现由于缺少远程控制手段, 使测试平台在使用方面存在一定的局限性, 所以针对海南省天气雷达站网的布局特征、保障特点和需求, 结合海南省已经拥有一部测试平台的实际情况, 开发出可远程控制此平台的软件, 用以提高岛礁雷达保障水平, 缩短故障维修时间。

1 总体设计

本设计的软件可远程控制测试平台中的示波器、功率计、频谱仪、信号源进行雷达指标测量, 采用了标准 C/S 架构的设计方法, 主要由用户层、驱动管理层、仪表驱动层三部分组成, 总体框架如图 1 所示。

用户层负责与用户进行交互和向用户展示数据, 包括

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-08-13。

基金项目: 海南省气象局 2021 年科研项目 (hnqxSJ202102)。

作者简介: 郑鹏斌 (1989-), 男, 四川达州人, 硕士, 工程师, 主要从事信号与信息处理, 天气雷达保障方向的研究。

通讯作者: 李昭春 (1965-), 男, 海南琼海人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事天气雷达保障方向的研究。

引用格式: 郑鹏斌, 李昭春. 天气雷达故障测试平台远程控制软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(10): 148-153.

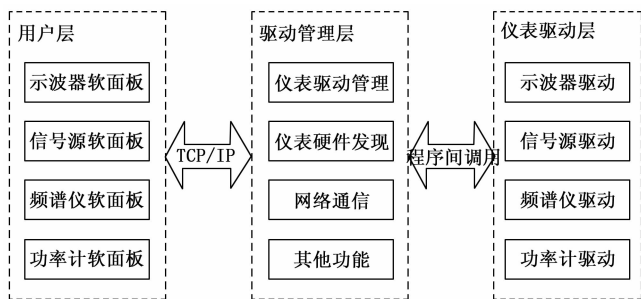


图 1 总体框架

示波器软面板、信号源软面板、频谱仪软面板和功率计软面板。用户层通过 TCP/IP 协议与驱动管理层进行通信, 将用户设置的参数发送到驱动管理层, 驱动管理层将采集到的仪表数据发送到用户层中, 用户层将接收到的数据按不同的数据类型进行展示。

驱动管理层作为用户层与仪表驱动层的中间层, 主要负责仪表驱动程序的管理, 因此驱动程序管理模块是驱动管理层最重要的功能模块。仪表硬件发现模块负责搜索系统中所有的硬件资源和网络资源, 其中硬件资源主要是系统中存在的仪表板卡, 包括示波器、功率计、信号源和频谱仪。仪表硬件发现模块将收集到的所有仪表板卡信息发送给驱动管理模块, 驱动管理模块根据仪表板卡类型的不同调用相关驱动程序, 并将系统中正在运行的驱动程序统一进行管理。网络通信模块负责与用户层的所有通信, 将用户层的设置参数发送给驱动管理模块以设置相关仪表驱动程序, 同时将仪表驱动程序采集到的数据发送给用户层。驱动管理层还有负责完成其他功能的功能模块, 如用来支持信号源网络控制指令的模块, 通过此模块可以用来替代信号源完成接收机的动态范围测试、回波强度测试、最小可测功率测试等测试项。

仪表驱动层为测试平台仪表驱动实现层, 负责仪表具体的参数设置与数据采集, 仪表驱动层主要包括了示波器驱动程序、信号源驱动程序、频谱仪驱动程序、信号源驱动程序, 根据不同的仪表类型, 驱动程序的实现方式也不同。为保证兼容性, 驱动程序全部采用各板卡的官方驱动程序: 使用了 NI PXIe-5114 板卡作为示波器的硬件模块, 因此示波器的仪表驱动采用了 NIScope 驱动; 使用了 M9391A 板卡作为频谱仪的硬件板卡, 因此 M9391A 的频谱驱动采用了 AgM9391 驱动程序, 而噪声系数测试采用了 KtXSAnNoiseFigure 驱动程序; 使用了 NI PXIe-5652 板卡作为信号源的硬件模块, 因此信号源的仪表驱动采用了 niRFSG 驱动; 使用了 NRP-Z81 功率计探头作为功率计的硬件模块, 因此功率计的仪表驱动采用了 rsnrpz 驱动。

2 仪表功能设计

故障测试平台包含示波器、功率计、频谱仪、信号源 4

种仪表, 远程控制软件需分别对各仪表的软面板和驱动管理层进行设计。

2.1 示波器设计

示波器软面板的主界面主要可划分为数据显示和参数设置两个区域。其中在参数设置区域可通过选项页切换到不同的页面: 垂直偏移电压用于设置示波器通道垂直偏移电压, 可调整示波器的测量范围; 幅度用于设置示波器通道的测量范围; 波形垂直位置用于设置本参数可在垂直方向上移动波形; 耦合方式用于设置示波器通道耦合方式, 支持值为 AC、DC 和 GND; 触发通道用于设置示波器触发通道, 支持值为 CH0、CH1; 触发边沿用于设置示波器触发边沿, 支持值为上升沿、下降沿; 触发电平用于设置示波器的触发电平; 时基用于设置示波器的时基, 即时间轴; CH0、CH1 输入阻抗设置示波器 CH0、CH1 的输入阻抗, 支持值为 50 Ω 、1 M Ω ; 波形水平位置用于设置示波器的水平触发位置, 输入值范围为 10%~90%。

示波器驱动管理层通过调用官方驱动 NIScope 对外接口来控制 NI PXIe-5114 板卡, 如图 2 所示。其调用 niScope_ConfigureChanCharacteristics 设置通道阻抗; 调用 niScope_ConfigureVertical 设置垂直通道参数; 调用 niScope_ConfigureHorizontalTiming 设置水平参数; 调用 niScope_ConfigureTriggerEdge 设置示波器为模拟边沿触发; 调用 niScope_ConfigureTriggerImmediate 设置示波器触发方式为立即触发, 调用 niScope_InitiateAcquisition 设置示波器采集状态; 调用 niScope_ActualRecordLength 获取每个通道数据量; 调用 niScope_ActualNumWfms 获取示波器已启用的通道数据; 调用 niScope_Fetch 采集示波器数据。

示波器在天气雷达定标中最重要的作用是测量发射机输出的脉宽, 其脉宽的定义为 0.1~0.9 Um (Um 为幅度) 所占用的时间。本设计在使用示波器驱动自带的 autoset 算法快速找到信号的频率、最大值、最小值信息后, 首先根据采集到的波形数据计算信号大概脉冲宽度, 再根据所测量到的大概脉冲宽度值对测量处的信号进行放大后再进行精确测量, 由此自动得出脉宽值。示波器在测量某些信号时, 由于计算结果跳动过大导致测量结果不准确, 例如通过调制组件的 XS1 测量人工线电压, 故在测量此类信号时引入了多点平均算法, 具体代码如下:

```
void MultipointAverage(ref double[] wavedata, int radius) // 示波器多点平均算法函数;
{
    if (radius == 0 || radius == 1 || wavedata.Length <= radius) return; // 判断数据是否为空, 空则结束;
    double[] tempwavedata = wavedata.ToArray();
    // 读取需要计算的数据;
    for (inti = 0; i < tempwavedata.Length; i++) // 循环计算每一位数据;
```

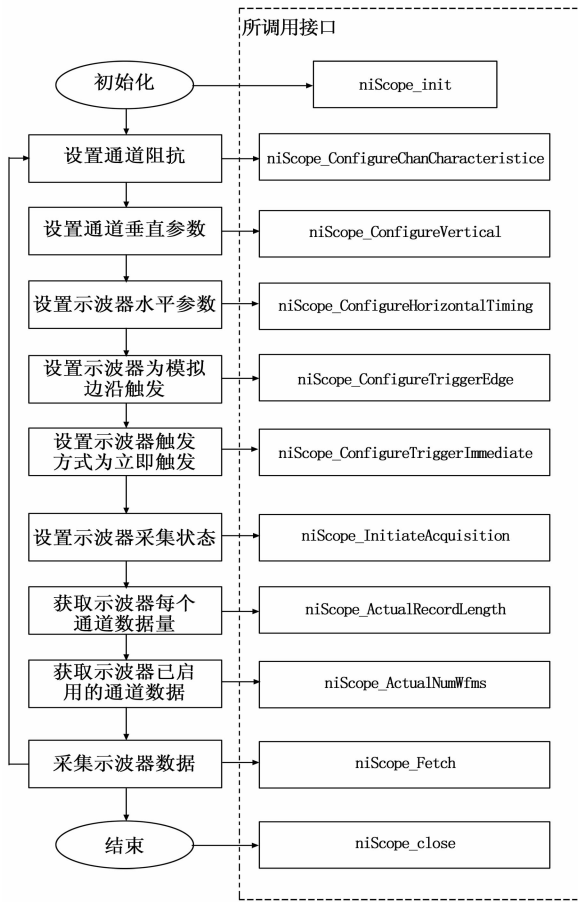


图 2 示波器设计流程及调用接口

```

{
int start = i - radius / 2; //开始位置记录;
int end = i + radius - radius / 2; //结束位置记录;
if (start < 0) start = 0; //起始位置判断防止数组越界;
if (end > tempwavedata.Length) end = tempwavedata.Length; //结束位置判断防止数组越界;
double[] selectdata = new double[end - start]; //记录数据大小;
Array.Copy(tempwavedata, start, selectdata, 0, selectdata.Length); //拷贝指定大小指定位置;
wavedata[i] = selectdata.Average(); //求已知数据平均数并赋值;
}
}
    
```

2.2 功率计设计

远程控制软件的功率计模块能测量输入信号的平均功率与峰值功率。在远程控制软件的功率计用户界面功能项包含信号中心频率、总损耗、脉宽、重复频率、占空比、单位转换、波形锁定、校零等。用户界面将功率计参数发送给驱动程序后，由驱动程序根据注入信号采集功率数据，采集完成后将采集到的功率数据发送到用户界面显示。当输入信号小于阈值时，为了提高小信号的测量精度，功率

测量模块能自动切换运行模式。

功率计驱动管理层通过调用 rsnrpz 对外接口来控制 NRP-Z81 功率计，如图 3 所示。调用 rsnrpz_chan_mode 设置功率计工作模式；调用 rsnrpz_chan_setCorrectionFrequency 设置功率计频率；调用 rsnrpz_scope_configureScope 设置功率计采集参数；调用 rsnrpz_trigger_setSource 和 rsnrpz_trigger_configureInternal 设置功率计触发方式；调用 rsnrpz_meas_fetchBufferMeasurement 采集功率计数据。

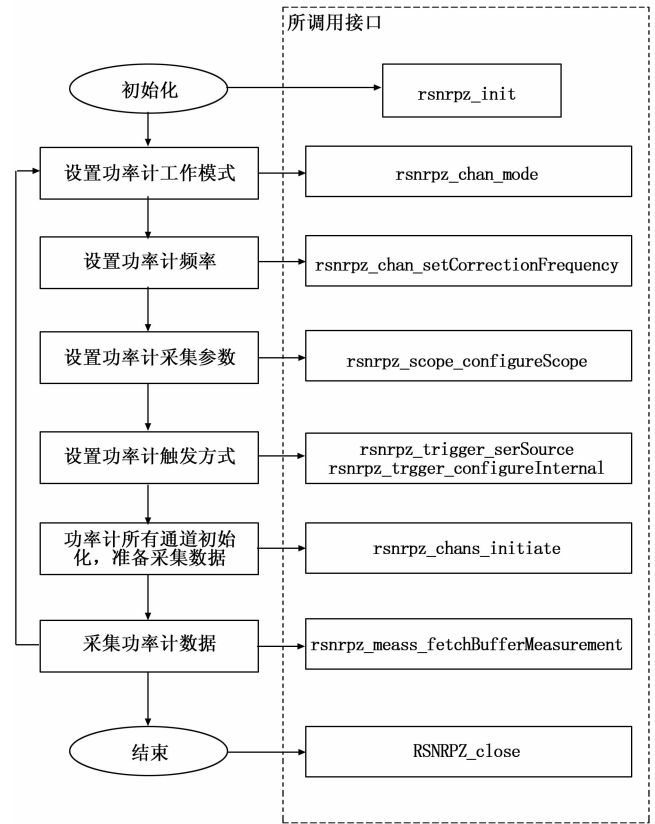


图 3 功率计设计流程及调用接口

为保证功率计能准确测量实际功率，此模块还做了滤波后比对功能：当滤波后功率值在 ± 0.2 dBm 范围内变化时直接输出；当滤波后功率值在 $0.2 \sim 0.5$ dBm 范围内变化时，保持值不变，但需在第二位小数上加一个随机数；当滤波后功率值变化超过 0.5 dBm 且连续出现 5 次时认为测量功率已发生变化。

功率计模块可显示输入脉冲调制信号的脉冲波形，可根据输入信号的不同自动调整波形大小，并能测量出脉冲调制信号的重复频率、脉宽和占空比，用以辅助检测功率测量是否准确，其具体代码如下：

```

set.Scope_time = d.Pulse_Duration * 4; //示波器时间设置;
set.Getwavedata = true; //设置状态;
set.Offset = -0.2; //设置偏置电压;
set.Scope_point = 1000; //设置采样点数;
    
```

```

set. Trigger_level = d. peak - 2; //设置触发电平;
Dynamometer_data d1 = Set_Config(set, out isError, true); //
功率计参数读取;
d1. data = d1. data ?? new Dynamometer_wavedata(); //判断
是否有数据结构, 有则新建数据结构;
d1. data. wave = d1. data. wave ?? new List<double>(); //判
断是否有数据结构, 没有则新建数据结构;
d1. data. wave = d1. data. wave. Select(x => x + tempconfig.
offset). ToList(); //计算波形数据;
d1. peak += tempconfig. offset; //峰值计算;
d1. Duty_Cycle = (d1. Pulse_Duration / d. Pulse_Period) *
10000; //占空比计算赋值;
d1. Pulse_Period = d. Pulse_Period; //脉宽赋值;
d. average += tempconfig. offset; //加上补偿(线损);
d1. controlbyte = tempconfig. controlbyte; //测试标志位置
赋值;
d1. meas_Type = tempconfig. Meas_type; //测试类型赋值;
d1. UI = tempconfig. UI; //是否是界面数据标志位型赋值;
d1. unit = tempconfig. unit; //单位数据赋值型赋值;
d1. hardware_name = this. hardlocalinfo. hardname; //所用仪
表名称;
Data = d1; //功率计参数整体赋值;

```

2.3 频谱仪设计

故障测试平台的频谱仪模块具有频谱测量功能和噪声系数测试功能, 所以远程控制软件也需要对这两种功能分别进行设计。频谱测量功能设有多级菜单, 其功能项包括雷达中心频率、峰值搜寻、单位转换、频谱锁定、span、rbw、amp、trace、trigger、reset、marker 等; 噪声系数功能包含了测量模式(放大器、上变频器、下变频器)、边带模式、本振频率、中频频率、校准功能等, 另外还在固定频率的基础上增加了扫频功能。

在设计频谱仪驱动程序时, 为了提高驱动程序的兼容性, 所有频谱仪模块的控制功能均采用安捷伦官方驱动程序。其官方驱动程序可分为 3 个部分, 分别为 AgM90XA 驱动、AgM9391 驱动和 KtXSAnNoiseFigure 驱动。AgM90XA 驱动为频谱仪模块的中间驱动层, 无法直接调用此驱动完成频谱仪驱动程序的编写, 但需要此驱动完成所有控制指令的转发, 因此在驱动程序初始化时必须启动此驱动程序; AgM9391 驱动程序为频谱仪模块实际控制程序, 所有的频谱仪模块的操作最终均需由此完成, 但此驱动未实现噪声系数测试功能, 噪声系数测试功能由 AgM90XA 驱动实现; KtXSAnNoiseFigure 驱动通过连接到 AgM90XA 驱动实现了噪声系数功能。3 个驱动程序关系如图 4 所示。

在频谱模式下, 驱动管理程序需先进行设置频谱中心频率、参考电平、采集参数(Span、RBW)、触发方式等才能得到频谱数据。下面给出了驱动管理层在频谱模式下调用驱动程序的部分代码:

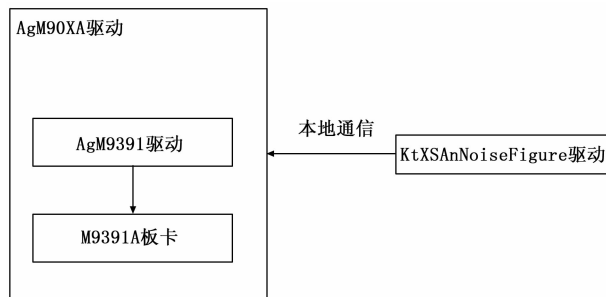


图 4 频谱仪驱动程序间关系

```

agM9391. AcquisitionMode = AgM9391AcquisitionModeEnum.
AgM9391AcquisitionModeSpectrum; //设置频谱仪采集模式为频谱
模式

```

```

agM9391. SpectrumAcquisition. Averaging. Mode = AgM9391
SpectrumAveragingEnum. AgM9391SpectrumAveragingOff; //关闭
频谱仪内部平均功能, 平均功能由自设计的算法来实现

```

```

agM9391. RF. Frequency = config. Center_Ferquery; //设置频
谱仪中心频率

```

```

agM9391. RF. Power = reflevel; //设置频谱仪参考电平 agM
9391. SpectrumAcquisition. Configure ( config. Span, config. RBW,
AgM9391FFTWindowShapeEnum. AgM9391FFTWindowShapeFlat
Top); //设置频谱仪 Span 和 RBW, 并设置 FFT 窗函数为 Flat
Top 窗

```

```

agM9391. Triggers. AcquisitionTrigger. Period = 0; //关闭采
集触发延迟

```

```

agM9391. RF. IFBandwidth = 160000000; //设置频谱仪 IF 带
宽, M9391A 的 IF 最大带宽为 160M

```

```

agM9391. Triggers. AcquisitionTrigger. TimeoutMode = AgM
9391TriggerTimeoutModeEnum.

```

```

AgM9391TriggerTimeoutModeAutoTriggerOnTimeout; //设置频
谱仪触发的超时模式

```

```

agM9391. Triggers. AcquisitionTrigger. Mode = AgM9391Acqu-
isitionTriggerModeEnum. AgM9391AcquisitionTriggerModeImmed-
iate; //设置频谱仪触发模式为立即触发

```

在噪声系数模式下, 本频谱仪模块除可提供冷热噪声功能测量整个雷达接收通道的噪声系数外, 还可通过 DUT 模式测量模拟接收通道的噪声系数, 其设计流程如图 5 所示。目前雷达系统一般采用超外差式接收机, 所以在测量模式中设计了上变频和下变频模式, 另外为了测量在接收系统中极为重要的低噪声放大器的性能, 还设计了放大器模式。

2.4 信号源设计

本软件的信号源模块可控制信号源输出标准的连续波信号和调制信号。故障测试平台拥有两个网口, 网口 1 用于普通接入网络, 网口 2 专门用于信号源模块接收雷达控制主机的网络控制, 所以在设计信号源软面板时, 除了设计信号频率、幅度、调制方式外, 还需要设计信号源模块的 IP 地址设置、远程控制是否打开。

本模块将用户设置的参数发送到信号产生模块驱动程

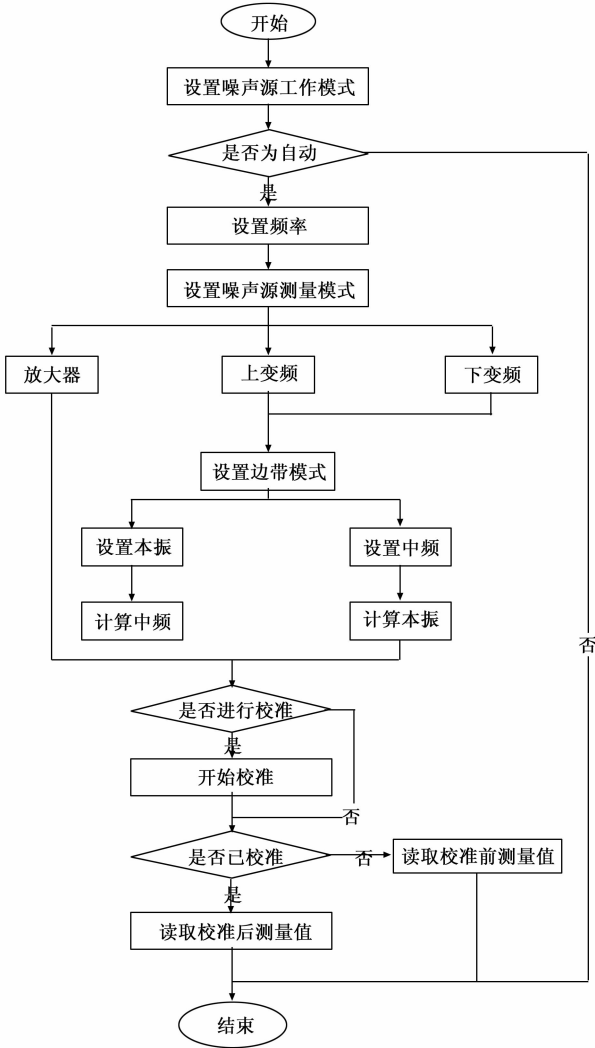


图 5 噪声系数测量功能设计流程

序中，同时信号产生模块驱动程序实时监听网口 2 的网络控制指令，当监听到网络控制指令后，信号产生模块驱动程序按照控制指令设置信号产生模块，同时将接收到的控制指令反馈到用户界面中，此时用户界面禁止用户控制信号产生模块，并将信号产生模块的控制权移交给网络控制，控制流程如图 6 所示。

其网络外部设备控制信号源监听主程序如下：

```
void Singallistener(TcpListener listener)
{ while
(! MainTokenSource. IsCancellationRequested)
{ try
{ TcpClient tcpclient = listener. AcceptTcpClient(); // 监听 TCP
指针获取
tcpclient. ReceiveTimeout = 500; // 监听时间设置
System. IO. StreamReader reader = new System. IO. StreamReader(
tcpclient. GetStream()); // 新建 TCP
string tcpipdata = reader. ReadToEnd(); // 读取外部仪表控制
WriteDebugInfo("外部信号源控制指令:" + tcpipdata, "，
```

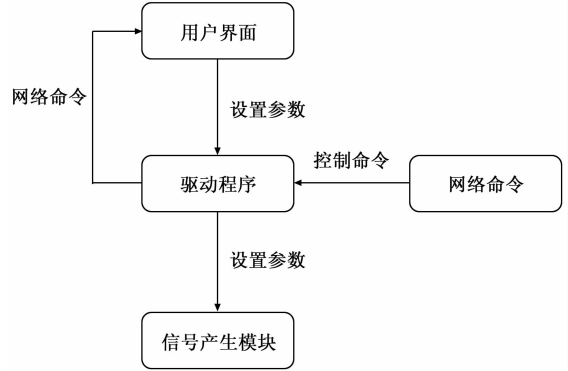


图 6 信号源控制流程

```
true); // 日志现实设置
string ip = tcpclient. Client. LocalEndPoint. ToString(). Split(';')
[0]; // 读取外部仪表信息
tcpclient. Close(); // 关闭 TCP
reader. Dispose(); // 读取数据
if (tcpipdata. Trim(). Length == 0) continue; // 判断时间是否结束
tcpipdata = tcpipdata. Trim(); // 获取连接时间
int index = running_hard_list. FindIndex(x => x. Hard. type
== Hardware_type. 信号源); // 获取信号源数据
if (index == -1) continue; // 判断是否获取到数据
RFSG. IRFSGGrfsg = (RFSG. IRFSG) running_hard_list [index]. Hard; // 获取驱动
rfsg. Config. IP = ip; // 设置信号源 IP
Matchmatch = Regex. Match(tcpipdata, "(; OUTP){1}(ut){0,1}(:STAT){0,1}(e){0,1}(ON|OFF|1|0)", RegexOptions. IgnoreCase).
```

3 实际应用

远程控制软件可控制测试平台完成天气雷达故障诊断和所有的天气雷达机外仪表标定项测量。在保证测试平台和装有远程控制软件的电脑网络可连接的情况下，以东方天气雷达故障以及脉冲测试和频谱测试为例，来说明本软件的功能和性能。

3.1 故障诊断

天气雷达故障测试平台在东方新一代天气雷达站进行长时间机外参数测量的测试。机务人员在巡查东方雷达时发现雷达无回波显示，正在空转。位于海口的省级保障人员在接到故障报警后，利用本软件远程控制天气雷达故障测试平台进行了故障诊断。利用测试平台的功率计模块测量发射机输出，读数为 0 kW，意味着发射机未发射电磁波，根据发射机的工作原理，首先检查高频放大链路中速调管的输入是否满足要求，经测试平台的功率计模块测量得速调管的输入为 33.47 dBm，满足使用要求，则意味着整个高频方法链路没有故障。再用测试平台的示波器模块测量 3A12 调制组件的 XS1 口，测得电压为 0 V，由于此口是根据人工线电压 1: 1 000 的采样值，则意味着人工线电压

为 0。再用测试平台的示波器模块测量 3A10 开关组件的充电触发信号 ZP1, 无波形, 则意味着开关组件出现故障, 更换开关组件后故障得以排除。

3.2 示波器测量发射机输出脉冲

采用远程控制软件的示波器功能对发射机输出脉冲进行测量。发射机输出端经定向耦合器、固定衰减器以及测试线缆连接至测试平台的示波器输入端 CH0, 雷达控制终端发射重复频率为 322 Hz 的窄脉冲信号并打开高压, 即可在示波器软面板上显示窄脉冲的波形, 并可通过添加测量项, 直接测试脉冲的正脉宽, 上升时间、下降时间、顶降等。表 1 给出了远程测量值与现场测量值的比较, 其可以看出测量值之间的差异很小。

表 1 远程测量值与现场测量值的比较

测量值	窄脉冲脉宽/s	宽脉冲脉宽/s	上升时间/s	下降时间/s	顶降/%
现场测量值	1.562×10^{-6}	4.713×10^{-6}	168×10^{-9}	154×10^{-9}	3.52
远程测量值	1.565×10^{-6}	4.721×10^{-6}	165×10^{-9}	148×10^{-9}	3.49

3.3 频谱仪测量发射机输出频谱

采用远程控制软件的频谱仪功能对发射机输出频谱进行测量。发射机输出测试端连接至测试平台的频谱仪的 RF_IN 端。雷达开机的情况下, 输入雷达的中心频率为 2.96 GHz, *Span* 为 50 MHz, 分辨率带宽 *RBW* 为 30 kHz, 即可读取频谱。为防止频谱仪内部的放大器饱和, 一般设置参考电平为 15 dBm。本设计的频谱仪功能带有自动测量谱宽的功能, 即可自动测量功率偏移 $-10 \sim -60$ dB 的左、右谱宽, 进而计算出整个谱宽值, 如图 7 所示。

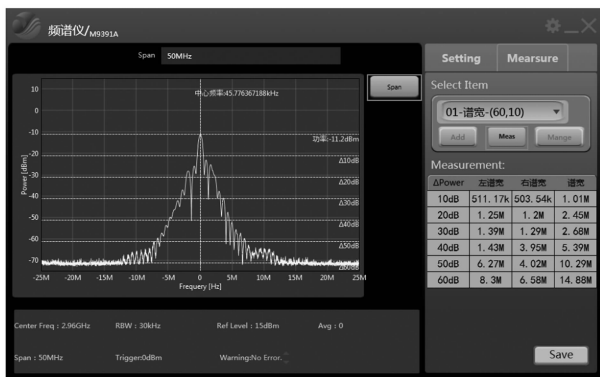


图 7 频谱仪自动测量发射机输出频谱

4 结束语

本设计的测试平台远程控制软件可成功控制天气雷达故障测试平台内的示波器、功率计、频谱仪、信号源进行雷达指标的测量, 且远程测量的值与现场测量的值误差极小, 具有相当的可靠性, 可在天气雷达故障诊断和定标中发挥一定的作用。在设计中, 由于程序架构和数据处理算

法不完善, 导致频谱仪模块的底噪会比较大, 可能会导致有用信号的丢失, 后续还待改进。

参考文献:

- [1] 潘新民, 崔炳俭, 王全周, 等. 新一代天气雷达天馈系统故障分析诊断方法和技巧 [J]. 气象科技, 2013 (6): 982-987.
- [2] 梁华, 任京伟, 刘永强, 等. 新一代天气雷达 (CINRAD/CC) 发射系统典型故障分析与处理 [J]. 干旱气象, 2013 (3): 622-626.
- [3] 杨传凤, 袁希强, 黄秀韶, 等. CINRAD/SA 雷达发射机故障诊断技术与方法 [J]. 气象, 2008 (2): 115-118.
- [4] 周红根, 周向军, 祁欣, 等. CINRAD/SA 天气雷达伺服系统特殊故障分析 [J]. 气象, 2007 (2): 98-101.
- [5] 梁华, 刘永强, 秦三杰, 等. 新一代天气雷达移动维修测试平台研制 [J]. 干旱气象, 2018 (1): 150-154.
- [6] 姜小云, 李昭春, 吴俞. 新一代天气雷达远程故障诊断与应急维修应用探讨 [J]. 干旱气象, 2016 (2): 376-381.
- [7] 黄裔诚, 黄殷, 郭泽勇. 一次 CINRAD/SA 天气雷达频率源故障的分析与处理 [J]. 气象与环境科学, 2017 (2): 127-132.
- [8] 李强, 刘永亮. 新一代天气雷达发射机故障个例诊断与分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2010 (2): 109-110.
- [9] 王志武, 卢兴来, 陈昊. 天气雷达测试维修数据库的设计及应用 [J]. 气象科技, 2016 (6): 896-901.
- [10] 郭泽勇, 梁国锋, 周钦强, 等. CINRAD/SA 雷达内码故障分析和排查方法 [J]. 气象科技, 2015 (1): 22-29.
- [11] 吕德东, 刘畅, 朱晓辉. 基于 FPGA 的虚拟示波器的设计和实现 [J]. 电子设计工程, 2018 (14): 82-85.
- [12] 张维通, 王润洁, 康廷勇, 等. 基于 EMWIN 和 ARM Cortex-M4 内核的数字示波器 [J]. 电子世界, 2018 (12): 13-15.
- [13] 郭宏伍, 马东吉, 黄金成, 等. 基于 ARM 的便携式数字示波器设计 [J]. 科技视界, 2018 (12): 243-244.
- [14] 梁宏倩. 基于 AD8317 的峰值功率计设计 [J]. 电子测试, 2020 (22): 22-23.
- [15] 钟青, 袁文泽, 史艳平, 等. 毫米波功率计量标准器芯片的研制 [J]. 计量学报, 2019 (2): 329-332.
- [16] 闫大帅, 张德海, 陆浩. 基于 FPGA 的频谱仪 2.4 GHz 数字单元设计 [J]. 电子设计工程, 2017 (10): 166-169.
- [17] 周体民, 佐风玲, 吴宜轩, 等. 基于 Zedboard 的便携式频谱仪的设计与实现 [J]. 电子科技, 2017 (7): 139-141.
- [18] 贺小琦, 董晓龙, 朱迪, 等. 一种用于深空探测的宽带低功耗频谱仪的设计与试验 [J]. 电子设计工程, 2019 (3): 178-183.
- [19] 张步高, 马希直. 基于 AD9910 的信号源实时显示系统设计 [J]. 电子技术应用, 2018 (8): 94-97.
- [20] 贺军义, 蒋坚, 李男男. 基于 FPGA 的 DDS 信号发生器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (2): 231-233.