

# 天气雷达远程定标控制器设计

王新舒<sup>1,2</sup>, 弓宇恒<sup>1</sup>, 闫 军<sup>2</sup>, 林弘杰<sup>2</sup>, 张平贵<sup>1</sup>

(1. 内蒙古自治区大气探测技术保障中心, 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古自治区气象干部培训学院, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 新一代天气雷达站的建设普遍采取局站分离的方式, 不利于雷达的日常维护和机外定标, 在极端天气情况下, 由于技术保障人员无法到达雷达站, 严重影响雷达保障的时效性; 天气雷达远程定标控制器能够有效解决雷达远程机外测量与定标的问题, 其由硬件子系统和软件子系统两大部分组成; 硬件系统单片机 STM32F107 为核心控制电路, 软件系统采用 C/S 的架构; 在某新一代天气雷达站经过为期一年实际应用, 远程机外主要输出参数实时监测和在线检查功、实现了对雷达发射机、实现了对雷达发射机、接收机等主要系统机外和机内的远程在线定标并自动生成定标测试报表, 达到了系统设计的目标; 有效提高了保障人员的工作下来, 提高了新一代天气雷达的业务可用性, 其中比列出发射机输出极限改善因子、接收系统动态特性、机外系统相干性三项指标的人工测量与远程机外自动测量的指标, 发射机输出极限改善因子偏差在 0.1~0.2 dB 范围内、接收系统动态特性偏差最大为动态范围 2 dB, 机外系统相干性中回波强度定标偏差为 0.64 dB、机外速度为 0.1 m/s, 指标误差是满足业务应用。

**关键词:** 天气雷达; 远程控制; 机外定标; 实时监测; 自动生成报表

## Design of Remote Calibration Controller for Weather Radar

WANG Xinshu<sup>1,2</sup>, GONG Yuheng<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>2</sup>, LIN Hongjie<sup>2</sup>, ZHANG Pinggui<sup>1</sup>

(1. Atmospheric Detection Technology Support Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China)

2. Inner Mongolia Meteorological Cadre Training College, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** The construction of a new generation of weather radar stations is generally adopted by the method of separating the stations, which is not conducive to the daily maintenance of the radar and external calibration. Under the conditions of extreme weather, the technical support personnel cannot reach the radar station, which seriously affects the timeliness of the radar support. The weather radar remote calibration controller can effectively solve the problem of radar remote measurement and calibration. The controller consists of two parts: hardware subsystem and software subsystem. The single-chip microcomputer STM32F107 of hardware system is the core control circuit, and the software system adopts the C/S architecture. The new-generation weather radar station is practically applied after one year, the remote real-time monitoring and online inspection of main output parameters for the remote aircraft have realized the detection of radar transmitting and receiving. The remote online calibration inside and outside the system and the automatic generation of calibration test reports have achieved the goal of system design, effectively improve the efficiency of support personnel, improve the availability of the new generation of weather radar, including the manual and automatic measurement indicators of transmitter output limit factor, dynamic characteristics of receiving system and coherences of external system, the err of transmitter output limit factor is between 0.1 dB and 0.2 dB, the dynamic maximum err of the receiving system is 2.0 dB, the echo intensity calibration err of the outside system coherence is 0.64 dB, and the outside velocity reaches 0.1 m/s, the indicator err meets the business needs.

**Keywords:** weather radar; remote control; online calibration; real-time monitoring; automatic report generation

## 0 引言

在新一代天气雷达组网中, 鉴于雷达对周围环境的影响, 大部分天气雷达站采用局站分离方式, 将雷达布设在地势较高又远离生活区的偏远地区。某自治区境内现布设 CINRAD/CB 及 CINRAD/CD 两种型号雷达, 为解决局站分离导致保障工作时效性较差的实际问题, 在已设计的 CINRAD/CB 型天气雷达远程机外定标系统基础上, 升级研制天气雷达远程定标控制器, 可满足 CINRAD CA/CB/CD 三种型号雷达远程定标。

2019 年由 J. P. Yin 等人提出了无人机辅助雷达校准技术, 是一种便携式、低成本、可重复雷达校准技术, 可以实现天线指向校准、可恢复天线方向图、可准确计算天气雷达常数<sup>[1]</sup>。

2019 年 J. Liu 等人提出一种基于目标真值与模拟目标向结合的气象雷达远场定标方法, 该方法结合了远场测试、标准金属球回波强度定标和模拟目标定标。该方法利用远场接收装置接收雷达信号, 测量波束宽度、发射功率、发射机脉冲宽度等参数; 利用标准金属球的客观真值特性,

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-03-03。

作者简介: 王新舒(1989-), 女, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事天气雷达设备方向的研究。

通讯作者: 弓宇恒(1970-), 男, 内蒙古包头人, 硕士, 高级工程师, 主要从事大气探测设备方向的研究。

引用格式: 王新舒, 弓宇恒, 闫 军, 等. 天气雷达远程定标控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 120-125, 131.

精确标定回波强度和模拟目标;同时,利用模拟目标在远场产生精确可控的信号,对气象雷达回波强度、速度、频谱宽度、差分反射率因子、差分传播相移等进行标定,使气象雷达的标定客观、准确<sup>[2]</sup>。

2018年由成都信息工程大学及成都远望科技有限责任公司研制的天气雷达标准输出控制器<sup>[3-4]</sup>,可以在统一的监控软件界面显示66项雷达状态参数,记录各参数和关键器件性能变化情况,远程雷达分系统开关控制,运行模式控制、远程空调控制、远程视频实时监控雷达机房、性能参数检查、适配参数检查,参数测试平台参数测试等,以满足无人值守雷达运行要求,减少人工干预带来的影响。标准化控制器仅将气象雷达厂家的远程电源开关机功能和天气雷达软件中各种雷达信息集成在一起对雷达进行数据、状态监测,对机房的状态及UPS、空调监测等,但对雷达机外远程标校功能均未提起<sup>[5]</sup>。

江西省气象探测中心新一代天气雷达远程智能控制系统,侧重于对现有SA天气雷达总配电、发射机、接收机、伺服、RDA系统远程控制与复位<sup>[6-8]</sup>。

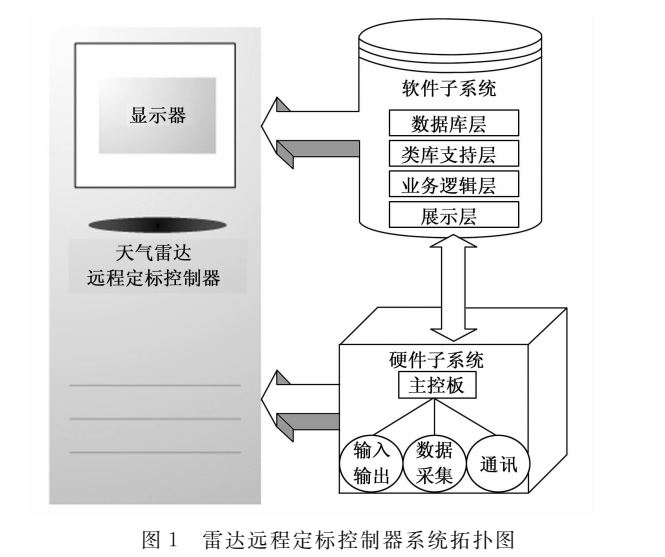
天气雷达远程定标控制器(以下简称:远程定标控制器)可远程进行机内及机外各种参数的测量与定标,输出满足中国气象局测试报表格式要求的系统定标报表。对于提高保障时效性至关重要,是比较新颖和实用的定标控制装备。

### 1 系统需求方案

新一代天气雷达是地级广泛应用的大型民用雷达,监测雷达工作状态,远程获取雷达工作参数,为实现远程机内测量与定标十分重要方式;为实现远程机外测量与定标,在已实现机内测量与定标的情况下,需增加对仪器仪表(信号源、频谱仪、功率计、示波器)的控制并可视化测试仪器显示界面。雷达站的RDA计算机传输到远程定标计算机,并由远程计算机调用数据、图像等生成所需数据监测实况、历史数据曲线、定标报表。天气雷达远程定标控制器应可测量并监测日常雷达维护定标的技术指标、可控制外接定标的测试仪器、可视化测试仪器显示界面、可自动生成对应测试指标的报表。由以上需求,本控制器采用鲁棒控制法设计一个固定控制器,在不确定性扰动下以维持闭环系统的预期性能。

新一代天气雷达远程定标控制器系统硬件基于嵌入式系统、测量、控制一体化。软件采用C/S架构,操作方便、系统安全。整个系统可实现xx新一代天气雷达远程遥控开关机,远程雷达发射机机外功率、脉冲包络、频谱宽度、改善因子测试;接收机机外动态范围测试;系统机外强度、速度定标;在线机内外定标,并可输出对应测试指标波形、报表及历史曲线查询。天气雷达远程定标控制器系统拓扑如图1所示。

远程定标控制器系统对仪表控制响应时间为3s、平台对发射机监测响应时间为20s、对雷达性能指标影响0.1dB、发射机机外功率测量影响0.2dB,响应较快速、界面简洁、测量误差较小等优势,扩展更多方面的无人值



守雷达运行的要求。

## 2 定标控制器的设计及实现

控制器的设计包括硬件和软件两方面。

### 2.1 硬件系统设计与实现

远程定标控制器是新一代天气雷达远程定标控制部分关键单元,主要对远程定标过程中对电源系统、微波开关、输入状态的采集与控制。硬件系统由仪器设备、标准化控制器、微波测量接口附件、网络接口、人机界面接口组成。

#### 2.1.1 设计思路

硬件系统以单片机STM32F107为核心控制电路,内部启程大量外围电路,包含7个定时器、2个12位1-Msample/s AD(模数转换器)(快速交替模式下2M sample/s)、2个12位DA(数模转换器)、2个I<sup>2</sup>C接口、5个USART(通用同步/异步串行接收/发射)接口以及以太网10/100 MAC模块,丰富的系统资源完全满足项目设计需求。

控制器设计采用8路输入GPIO接口作为状态输入,8路输出GPIO作为可控继电器驱动输出;2路I/O作为温湿度接口;两路异步串行接口一路作为普通的RS232串口通讯,另一路通过光电隔离作为RS485差分通讯。控制器硬件系统电路如图2所示。

#### 2.1.1.1 以太网通讯接口

STM32F107的以太网控制器包含媒体访问控制器

(MAC), 外部的网络物理层 (PHY) 两个部分。MAC 和 PHY 采用 RMI (精简的独立介质接口) 接口方式。以太网控制器结构如图 3 所示。

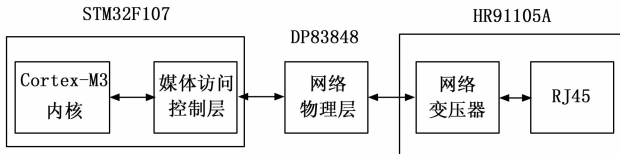


图 3 以太网控制器结构图

#### 2.1.1.2 RS485 和 RS232 通讯接口

STM32F107 具有 5 个独立的通用同步/异步串行接收/发射接口, 其中两个分别作为 RS485 和 RS232 通讯方式。

RS485 采用光电隔离方式进行通讯, 有效避免外部干扰, 6N137 (U9 和 U10) 分别用于数据收发的隔离传输, 普通光耦 TLP521-1 (U8) 作为收发使能控制。SN75176 作为 RS485 差分转换芯片。

#### 2.1.1.3 光耦隔离输入接口

控制器的 8 路输入状态进行数据采集, 采集数据经 STM32F107 处理后经通讯接口传至系统服务器。8 路输入接口采用传统两路 TLP521-4 普通光耦。当每路输入接口电流大于光耦导通电流便可认为输入状态为高电平。光耦输入接口采集微波开关、系统电源状态, 便于对受控状态进行分析。

#### 2.1.1.4 继电器可控输出接口

控制器对外部有 8 路继电器可控输出, 可分常闭常开输出方式, 同时也支持脉冲方式输出 (可由 STM32F107 内部程序设置), 继电器触点可支持 30VDC/5A-250VAC/5A 的电压/电流。STM32F107 的 I/O 节点输出至集成电路 ULN2803, 对 8 路继电器驱动 (采用 4 路)。控制器输出控制微波开关、仪器电源、雷达系统电源等。

#### 2.1.1.5 温湿度接口

控制器采用 STM32F107 中两路通用 I/O 口扩展成两路温湿度接口, 采用 AM2305 温湿度传感器, 可用于采集机房相关环境信息。AM2305 温湿度传感器 5 V 供电, 串行数据线三态结构、双向输出, 与控制器电路采用单总线方式通讯, R2 为传感器上拉电阻, R1、C1 可增加数据抗干扰。

#### 2.1.1.6 硬件子系统实现

控制器采用盒式结构, 长为 20 cm、宽 10 cm, 厚 2 cm。控制器外接一个 12 V 电源, 上排为控制器对外控制接口, 下排左侧为 RS485 通讯接口、中间为网络接口和电源输入, 右侧为信号输入端口。

### 2.2 软件系统设计与实现

软件子系统采用 Client-Server (C/S) 架构, 基于 C# 编程语言, 采用 MySQL 数据库。服务器负责数据的管理, 客户端负责完成与用户的交互任务。

#### 2.2.1 设计思路

软件系统由服务器端程序和客户端程序两大模块组成。如图 4 所示。

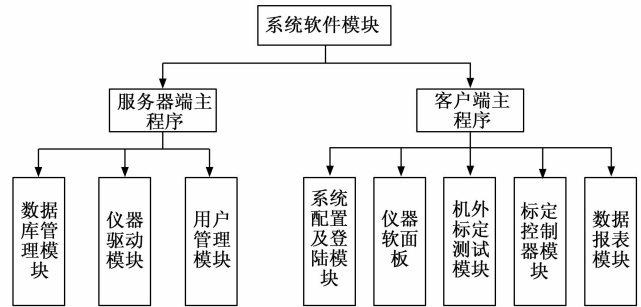


图 4 软件系统模块构成

#### 2.2.2 软件架构

软件系统采用 C/S 架构, 主要包括 MySQL 数据库层、类库支持层、业务逻辑层、展示层 4 个部分, 外接服务总线, 软件系统架构如图 5 所示。具有交互性强、安全的存取模式、响应速度快、利于处理大量实时数据的特点。

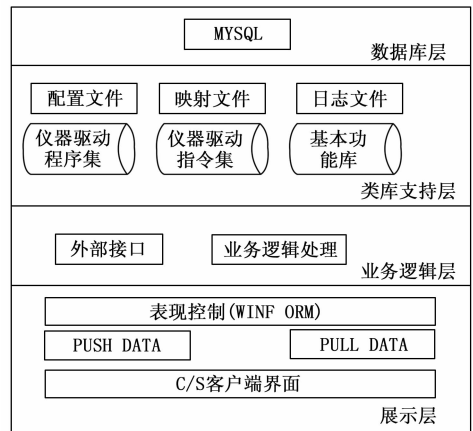


图 5 系统软件架构图

数据库层的作用是采集、存储、归档、检索所需数据, 清除无效数据、用户权限设置等功能, 本软件系统采用 MySQL 数据库。类库支持层的作用是对测试仪器实时命令、数据及数据流控制并实现自动获取数据。业务逻辑层提供一系列建模工具和后台处理逻辑完成故障诊断人员的故障诊断、测试人员的系统标校、集成测试、验证测试工作, 该层主要采用组件化模式和批处理模式。展示层建立客户端与服务端的通讯服务关系, 可实现各仪表的软操作界面 (显示信号源、示波器、频谱仪、功率计软面板界面) 控制实际测试仪表, 实现远程在线机外定标、获取数据生成测试报表, 在客户端展示本平台最终所需的功能需求。

通过软面板快速准确地设置测试仪器的相关测试系数, 4 种仪表无间隔控制可直观显示出数据图形并输出符合中国气象局要求的测试报表, 对于实现远程机外定标尤为重要。

#### 2.3 人机界面设计与实现

本定标控制器的人机界面设计采用触摸一体机的形式, 便于雷达站机务人员可视、操作。

### 3 定标控制器测试与定标的方法及结果分析

天气雷达远程定标控制器与雷达暨测试仪器架构如图 6

所示<sup>[10-12]</sup>。

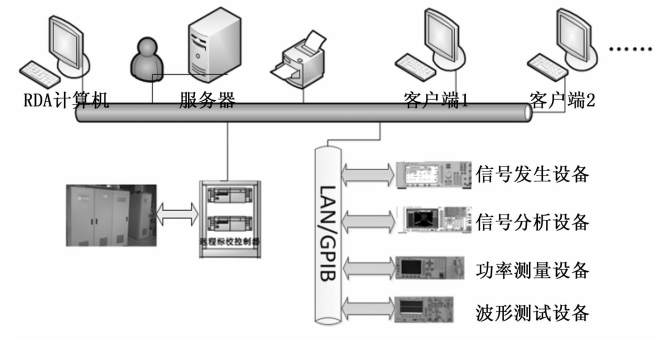


图 6 天气雷达远程定标控制器

### 3.1 天气雷达测量与定标方法

#### 3.1.1 C 波段天气雷达测量与定标的参数

CINRAD CA/CB/CD 天气雷达定标主要分为机内和机外的测量与定标。机内测量主要为机内动态范围测量、系统相干性测量；机内定标主要分为机内强度定标、机内速度定标。机外测量主要有发射机输出射频信号的脉冲包络、功率、频谱宽度、极限改善因子（输入、输出），接收机的噪声系数、动态范围；机外定标主要由机外强度定标、机外速度定标<sup>[8,13-14]</sup>。

#### 3.1.2 天气雷达机内测量与定标

远程机内动态范围及系统相干性测量、强度及速度定标，主要依靠 RDA 计算机实现测量与定标，RDA 计算机关联服务器并安装 VNC-SEVER 软件，远程登录以实现控制 RDA 计算机，远程连接如图 7 所示。

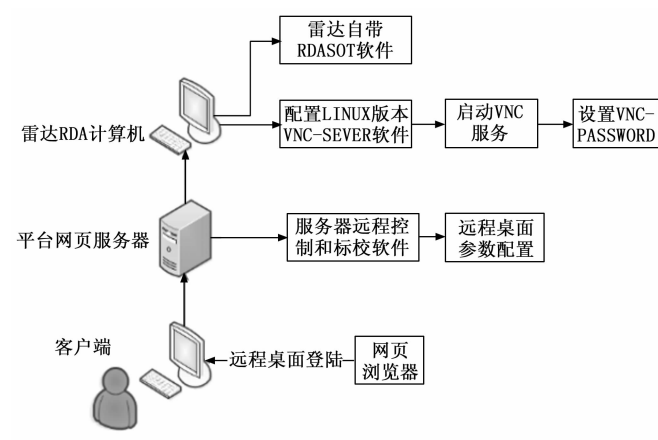


图 7 远程桌面连接图

机内定标主要是依靠频率源完成。机内强度定标，将四位开关打至频率源 RFTEST 输出端，测量低噪声放大器前端的功率，一般测量值大致为 -15 dBmW 左右，数控衰减器控制测试通道的衰减进行机内强度定标。机内速度定标，将频率源七位移相开关，分别接至不同的移相角度，来定标速度、谱宽。

#### 3.1.3 天气雷达机外测量与定标

##### 3.1.3.1 机外测量

机外发射机参数主要是测量发射机输出峰值功率、发

射机输出检波包络（上升沿、下降沿、顶降）、发射机输出相位噪声。本平台实时监测发射机峰值功率、发射机输出包络（上升沿、下降沿、顶降）、发射机相位噪声<sup>[15,17-18]</sup>。

C 波段雷达发射机输出峰值功率 $\geq 250$  kW，在发射机输出端口定向耦合器输出接一双定向 C 波段同轴耦合器，定向耦合支路耦合度为 40 dB。双定向耦合一端口测量发射机相位噪声，另一端口接检波器测量发射机包络参数，直通支路接 40 dB 衰减器测量发射机功率，参数测量如图 8 所示。

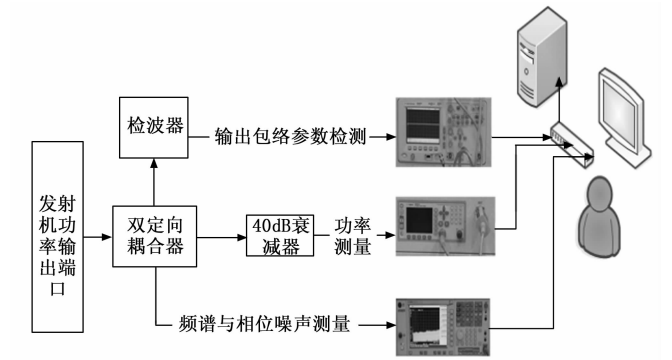


图 8 机外发射机参数测量示意图

##### 3.1.3.2 机外定标

机外定标是由外接信号源代替雷达发射机内频率源，信号通过二位开关及 20 dB 定向耦合器注入低噪声放大器，并用示波器、功率计、频谱仪测试天气雷达发射系统的发射射频脉冲包络、发射机输出功率、发射机输出频谱、发射机极限改善因子（输入端、输出端）等指标。

实现远程机外定标，需利用单刀双掷微波开关控制二位开关，以达到控制信号。单刀双掷微波开关分为常闭、常开端和公共端。接收机二位开关前接单刀双掷微波开关，二位开关后端为 20 dB 定向耦合器和低噪声放大器前端，微波开关连接如图 9 所示。将常闭端和定向耦合器的输出端相连接，常开端通过射频电缆接至信号源输入端，公共端接至低噪声放大器输入端。微波开关在工作频率 DC-6 GHz 时，最大损耗为 0.2 dB，端口隔离度 $\geq 70$  dB，故不会影响雷达整体参数。雷达正常工作时，微波开关不工作，接收的小信号通过常闭端送至低噪声放大器输入端。远程定标时，微波开关吸合，信号源输出信号经微波开关，并在定向耦合器衰减 20 dB，到达低噪声放大器输入端。测量或定标结束后，须将微波开关关闭，恢复到雷达正常工作方式。

机外动态范围测量，信号源输出信号经微波开关注入场放前端，测量前只需将信号源（Agilent E4428C）配置好网络参数（IP、gateway），接入网络，将微波开关切换至测试通道（即信号源输出至低噪声放大器输入端），远程操作 RDASOT 软件，即可进行机外动态测试。

机外强度定标，在远程客户端控制信号源，RDASOT 软件集成了对信号源控制的功能。测试时，客户端远程登陆 RDA 计算机，切换微波开关至测试通道，通过 RDA-SOT 软件完成机外强度定标，定标完毕后将开关切换至正常工作通道。

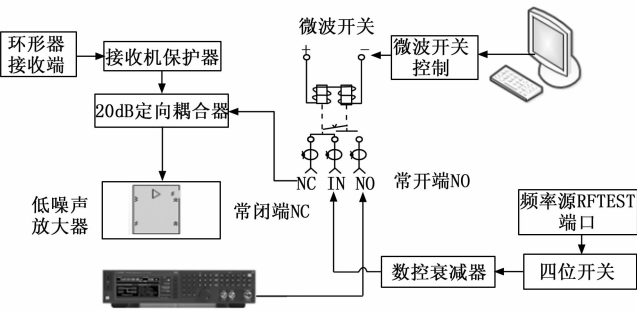


图 9 微波开关接入示意图

机外速度定标，软件系统集成了对信号源的控制，客户端可完全控制信号源，技术人员输入信号的各项参数（如频率、幅度），与实际调试信号源一样，通过远程桌面控制RDASOT 软件，以实现机外速度定标。界面简洁、测量误差较小等优势，扩展更多方面的无人值守雷达运行的要求。

3.2 天气雷达机外测量与定标实例

以发射机改善因子测量数值为例进行实例介绍<sup>[19]</sup>，打开发射机改善因子测量界面，如图 10 所示，左侧为流程区域，右侧为报表区域。

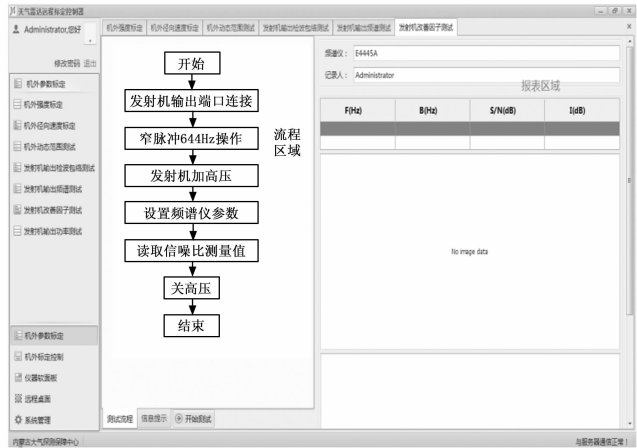


图 10 发射机改善因子测量界面

按照测试流程执行完成以后，在右侧报表区域，填写相应的测试结果，图片框和表格均可重新编辑。点击【报表】按钮，按照预定的报表模板生成报表，如图 11 所示。

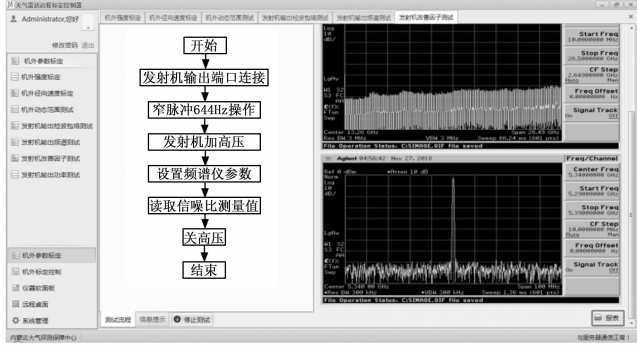


图 11 报表生成界面

3.3 天气雷达定标参数测试

本天气雷达远程定标控制器样机安装在某新一代天气雷达站，由于机内仅通过远程连接，不存在外部设备对信号的衰减，故仅对该站雷达机外指标（发射机脉冲包络、发射机输入、输出信号频谱、发射机输出功率、发射机极限改善因子；接收机机外动态范围测试；系统机外强度、速度定标；），本次测试在呼和浩特相关单位中远程机外定标，进行测量结果比对。

3.3.1 参数测试结果比对

3.3.1.1 发射系统机外指标

发射机输出极限改善因子测量表格输出：

1) 人工测量：测量方法参照普来赛—西门子雷达公司提供的方法<sup>[20]</sup>。用频谱仪检测信号功率谱密度分布，从中求取信号和相位噪声的功率谱密度比值  $S/N$  (dB)，根据信号的重复频率  $F$  (Hz)，谱分析带宽  $B$  (Hz)，计算出极限改善因子  $I$  (dB)。

$$I = \frac{S}{N} + 10\text{Log}B - 10\text{Log}F$$

分别对雷达高重复频率（1 000 Hz 左右）和低重复频率（600 Hz 左右）时的发射机极限改善因子进行测量。测量仪表采用 Agilent E4445A，测量数据及计算结果如表 1 所示，频谱图如图 12 所示。

表 1 测量数据及计算结果

$F/\text{Hz}$	$B/\text{Hz}$	$(S/N)/\text{dB}$	$I/\text{dB}$
644	3	84.42	61.1
1 282	3	87.62	61.31

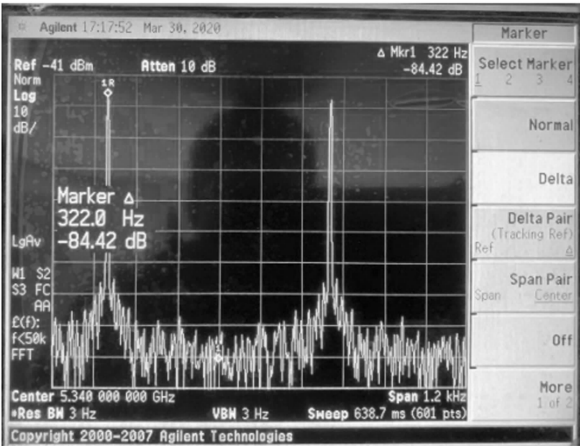


图 12 输出 644 Hz 功率密度比值  $S/N$  的频谱图

2) 远程机外测量：发射机输出极限改善因子输出报表如表 2 所示，输出频谱如图 13 所示。

表 2 发射机输出极限改善因子测量报表

$F/\text{Hz}$	$B/\text{Hz}$	$(S/N)/(\text{dB})$	$I/\text{dB}$
644	3	79.5	56.18
1282	3	83.5	57.28



图 13 输出 644 功率谱密度比值 S/N 的频谱图

发射机输出极限改善因子人工测量与远程机外测量比对如图 14 所示。

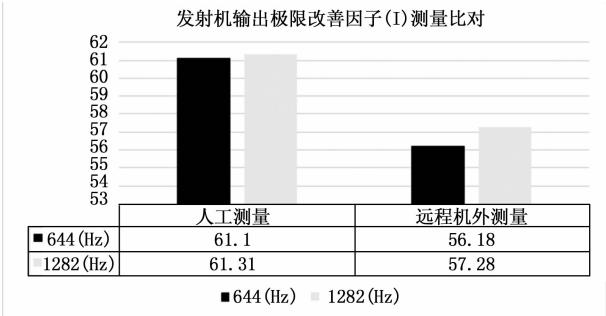


图 14 发射机输出极限改善因子测量比对

3.3.1.2 接收系统机外指标

接收系统动态特性测试:

1) 人工测量: 接收系统指从雷达的接收机前端, 经接收支路信号处理器到终端。信号源产生的信号由接收机前端注入, 信号可用外接信号源产生, 经接收机信号处理器在数据终端读取信号的输出数据。改变输入信号的幅度, 测量系统的输入输出特性。测量仪表采用 Agilent E4428C 信号源。

2) 远程机外测量。两种测量方法比对如图 15 所示。

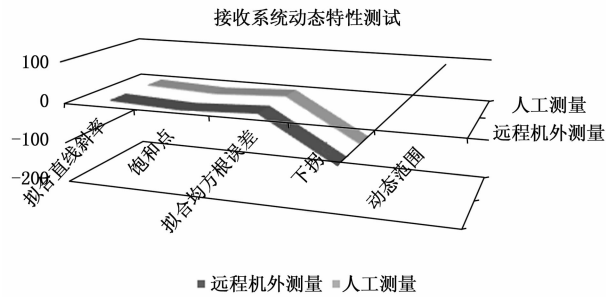


图 15 接收系统动态特性测试比对

3.3.1.3 机外系统相干性

1) 回波强度定标:

外接信号源注入功率为  $-90 \sim -40$  dBm 的信号, 在距离  $5 \sim 200$  km 范围内检验其回波强度的测量值, 回波强度测量值与注入信号计算回波强度测量值的最大差值应不大于  $\pm 1$  dB。

(1) 人工定标: 测量仪表采用 Agilent E4428C 信号源, 可得出最大差值范围  $-0.89$  dB。

(2) 远程机外定标: 径向速度最大差值范围  $-0.25$  dB。

2) 机外速度定标:

(1) 人工测量: 最大差值 (m/s):  $-0.31$ 。

(2) 远程机外测量: 速度定标测量输出最大差值 (m/s):  $-0.41$ 。

误差仅为  $0.1$  m/s。

3.3.2 结果分析

由发射机输出极限改善因子、接收系统动态特性、机外系统相干性数据结果比对可以看出, 远程机外测量与定标的数据与人工测量的数据虽存在一定的误差, 发射机输出极限改善因子偏差在  $0.1 \sim 0.2$  dB 范围内、接收系统动态特性偏差最大为动态范围  $2$  dB, 机外系统相干性中回波强度定标偏差为  $0.64$  dB、机外速度为  $0.1$  m/s, 目前系统稳定、运行较为良好。

4 结束语

从 2019 年 12 月起, 某中心研发的“天气雷达远程定标控制器”, 在某国家天气雷达站进行了项目应用。本设备实现了新一代天气雷达技术保障人员对天气雷达发射机远程机外主要输出参数实时监测和在线检查功能、实现了对雷达发射机、实现了对雷达发射机、接收机等主要系统机外和机内的远程在线定标并自动生成定标测试报表。

本定标控制器在某站新一代天气雷达技术保障业务中应用效果显著, 有效提高了保障人员的工作效率, 提高了新一代天气雷达的业务可用性, 在为期一年多的应用中, 该定标控制器性能稳定。

对于测试数据误差的问题, 在后续情况允许条件下继续优化。

参考文献:

[1] YIN J P, HOOGEBOOM P, UNAL C, et al. UAV-aided weather radar calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57 (12): 10362 - 10375.

[2] LIU J, WANG X P, HAN X, et al. The method research that far-field calibration of weather radar based on the combination of objective truth value and simulating target [C] //2019 International Conference on Meteorology Observations (ICMO), 2020.

[3] 熊 峰, 潘 雪, 刘 颖, 等. C 波段天气雷达巡检报告自动生成系统的设计与实现 [J]. 气象科技, 2021, 49 (2): 303 - 307.

[4] 蒲晓勇, 程昌玉, 李 俊. 天气雷达远程水平定标的设计与实现 [J]. 气象水文海洋仪器, 2020, 12 (4): 80 - 81.

[5] 邵 楠, 胡学英. 国家级雷达维修维护测试软件平台的设计与实现 [J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 9 (3): 45 - 49.

[6] 曲绍君, 李方军, 裴建勋, 等. 雷达发射脉冲包络检测及波形参数分析 [J]. 气象灾害防御, 2020, 24 (4): 41 - 44.

(下转第 131 页)