

便携式无线电综合测试系统设计

柳颖, 宗长龙, 周婷

(中国人民解放军 91114 部队, 上海 200434)

摘要: 无线通信设备装备数量大、种类多, 开机时间长, 因此需定期维护; 针对修理过程中, 性能指标的测试项目多, 维修人员任务重的问题研制便携式无线电综合测试系统; 首先进行便携式无线电综合测试系统的总体设计; 其次介绍综合测试系统的软硬件平台实现方法, 包括测试资源硬件参数配置及选型、测试执行软件平台设计技术、通信装备自动测试方案和实现技术; 最后对便携式无线电综合测试系统的试验结果进行分析; 应用结果表明: 该系统能实现无线通信设备收发信机整机主要参数的测量, 操作流程简单, 大大降低了性能指标测试环节对操作人员的专业水平要求; 测试的结果数据由计算机进行有效的统计、处理、分析和查询, 提高了测试效率。

关键词: 综合测试仪; 测试资源; PXIe 总线; 开关网络; 测试项目管理; 测试执行; 测试查询; 仪器软面板; 驱动程序库; 动态链接库

Design of Portable Comprehensive Detection Device for Radio

LIU Ying, ZONG Changlong, ZHOU Ting

(91114 Unit, The Chinese People's Liberation Army Troops, Shanghai 200434, China)

Abstracts: Wireless communication equipment has problems of a large number, many types and long startup time, so it needs periodic maintenance. Aiming at the problems of many performance indexes test items and heavy tasks for maintenance personnel in the process of repair, a portable radio comprehensive test system is developed. Firstly, the overall design of portable radio integrated test system is carried out; Secondly, the implementation method of the software and hardware platform is introduced, including the configuration and selection of test resources hardware parameters, the design technology of test execution software platform, the automatic test scheme and implementation technology of communication equipment; Finally, the test results of portable radio integrated test system are analyzed. The application results show that the system can measure the main parameters of wireless communication equipment transceiver. The operation process is simple, the professional level requirements of operators in the performance index test link is greatly reduced. The test result data is effectively counted, processed, analyzed and queried by the computer, and the test is effectively improved.

Keywords: comprehensive test instrument; test resources; PXIe bus; switch network; test project management; test execution; test query; instrument soft panel; drive library; dynamic link library

0 引言

随着科技和国防建设的发展, 军用无线通信设备得到广泛的使用。针对设备日常使用、维护和保障就提出了更高的要求。传统的无线电台的性能指标测试

依赖于通用的综合测试仪, 但绝大部分综合测试仪都没有针对具体的无线通信设备开发出自动的测试程序, 在指标测试时还需要操作人员结合指标的测试流程手动逐步完成, 对操作人员的专业水平有很高的要求, 而且效率较低^[1-3]。其次, 大量测试结果数据还需要

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2021-12-24。

作者简介: 柳颖 (1977-), 女, 江苏如皋人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电路板自动测试和故障诊断技术方向的研究。

引用格式: 柳颖, 宗长龙, 周婷. 便携式无线电综合测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 103-109.

采用人工记录的方式，没有能结合现代计算机技术进行有效的统计、处理、分析和查询。

综上所述，需要研制出一款重量轻、体积小、性价比高、便于携带的面向通用模拟、数字调制以及专用制式通信设备的无线电综合测试系统。早在 1997 年，美国国家仪器公司就推出了 PXI 总线技术，它综合了 PCI、CompactPCI 坚固的插卡结构、VME 总线、VXI 总线和 GPIB 总线的优点，具有数据传输速率高、兼容性强、模块化、小型化、高性能和高集成度的特点，迅速应用于各测试领域和诊断平台^[1]。PXI Express 总线 (PXIe) 是 PXI 总线的扩展，它以具有高数据吞吐量、模块化集成等关键技术优势^[2]成为当今测试行业的主流。便携式无线电综合测试系统以 PXIe 机箱为主体，具有 8 个 PXIe 槽位，以 PXIe 的嵌入式计算机为主控，通过 PXIe 总线控制 PXIe 测试资源^[3]进行测试及测试数据处理，各 PXIe 测试资源具体实现被测通信装备的性能指标测试。

1 系统结构和原理

无线电综合测试系统由硬件和软件两部分组成。系统结构组成如图 1 所示。硬件平台主要是完成对被测通信设备整机的测试激励的产生、响应信号的采集与分析，通过开关网络与被测装备之间接口的连接等功能。测试系统软件包括平台软件和测试程序两大部分，平台软件提供一个通用的测试执行软件系统环境，测试程序则是在此环境下开发的具体被测通信装备的性能指标测试程序。

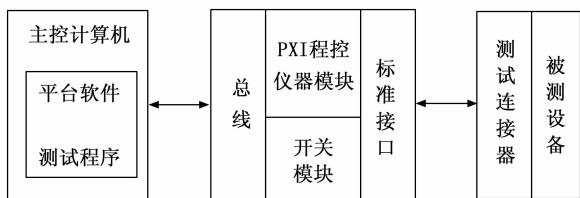


图 1 系统结构组成框图

便携式无线电综合测试系统主要用于短波电台、超短波电台、甚高频电台、全波接收机等一系列无线通信设备整机关键指标的自动测试，具体见表 1。

2 硬件平台设计

无线电综合测试系统硬件平台由主控制器 (PXIe

表 1 无线电综合测试系统覆盖的关键测试指标

测试部件	测试指标
发射机项目	发射功率、频率误差、调制灵敏度、调制特性
接收机项目	接收灵敏度、静噪灵敏度、音频失真系数、音频响应、带外互调、中频抗拒比、镜频抗拒比、阻塞

零槽控制器)、显示屏、各种测试模块、USB HUB、LAN HUB、衰减器、电源转换单元和测试接口适配器等部分组成。硬件平台组成如图 2 所示。

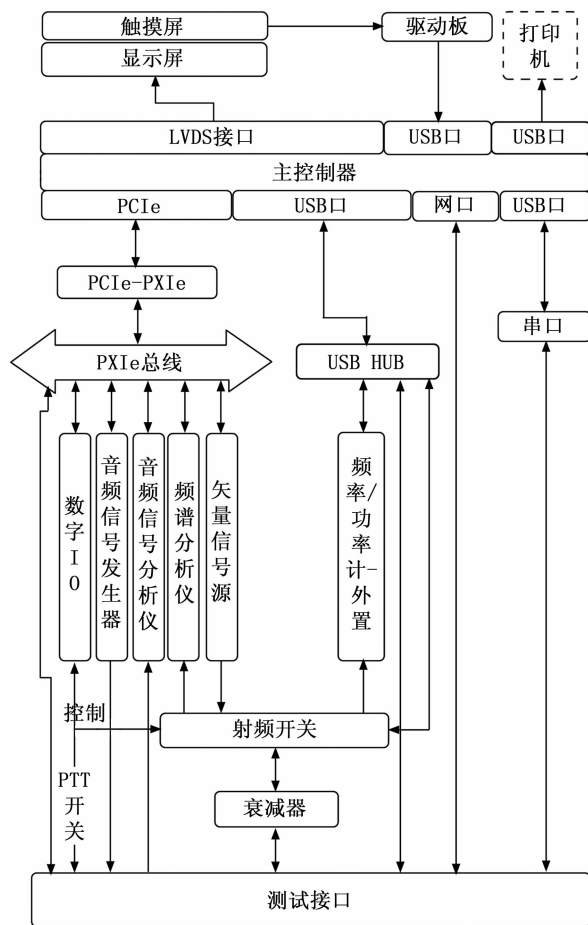


图 2 硬件平台组成框图

其中零槽控制器采用 Intel i7 处理器，8 G 内存，240 G SSD 固态硬盘。测试模块包括矢量信号源 (RFSG)、射频功率计、射频频率计、频谱分析仪 (RFSA)、数字 IO、射频开关、音频信号源、音频信号分析仪等模块。主控制器对外接口主要包括 LVDS 接口、USB 接口、网口、RS232 串口，电源转换单元是将 AC220V 转换为 5 V、3.3 V、12 V，给内部

资源供电。测试接口适配器主要针对无线通信设备的对外接口进行设计,具体包括天线口、音频口、数据口、遥控口等接口。

2.1 硬件参数

测试系统的测试资源需根据被测无线通信装备整机指标要求进行配置,即在进行具体指标的测试时,需要配备什么仪器模块给定测量所需的激励信号,通过什么仪器模块采集测试后的响应信号,测量过程中又需要哪些控制模块来配合实现。测试资源的配置需求如表2所示。

硬件测试资源不仅要保证测试系统能测试,还要保证测试准确、可靠,同时测试量程也需留有一定的测试余量。因此测试资源的硬件参数要求如下:

1) 产生矢量信号能力。频率范围:1 MHz~6 GHz;电平范围:−120~−10 dBm;频率准确度:≤ 5×10^{-7} Hz;FM调制率:0 Hz~40 kHz,调制频偏:0 Hz~100 kHz;AM调制率:0 Hz~40 kHz,调制深度:0~100%;

2) 频谱及调制分析能力。频率测量范围:1 MHz~6 GHz;电平范围:−90~+47 dBm;显示平均噪声电平:−120 dBm;解调类型:支持AM、FM及数字调制等方式。

3) 频率测量能力。测量范围:1 MHz~6 GHz;分辨率:1 Hz;测量准确度:≤ 5×10^{-7} Hz;灵敏度:≤15 dBm。

4) 功率测量能力。频率范围:1 MHz~6 GHz;功率测量范围:0~+47 dBm。

5) 音频输出能力。频率范围:10 Hz~20 kHz;频率准确度:≤ $\pm 1 \times 10^{-4}$ Hz;电压范围:±7 Vrms(50 Ω负载);输出波形类型:直流、正弦波、双音等波形。

6) 音频/波形分析能力。频率范围:10 Hz~40 kHz;频率准确度:≤ $\pm 1 \times 10^{-4}$ Hz;电压最大输入:1 mVrms~10 Vrms;信纳德测量范围:0~60 dB;失真度测量范围:0~100%。

7) 串口。1路RS232串口。

8) 网口。通道:1路RJ-45接口;速率:10 M/100 M速率自适应。

2.2 硬件选型

根据测试资源的配置需求进行如下测试资源选型:

1) 矢量信号源采用NI公司的PXIe-5841矢量信号源模块,具有射频信号发生、模拟调制和数字调制等功能。

2) 射频频率/功率计采用Mini-circuit公司的USB功率计模块,主要用于测量被测射频信号的输出功率和频率误差。

3) 频谱分析仪采用NI公司的PXIe-5841射频信号分析仪模块,具有频谱分析、模拟和数字解调分析的功能。

表2 测试资源配置需求明细表

测试名称	所需激励	预期响应	激励模块	测量模块	开关模块
频率范围 频率间隔 频率误差	控制信号、 音频信号	6 GHz以下,优于 10^{-6} 的准确度的射频信号	串口RS232、 音频信号 发生器	频率计、衰减器	射频开关
载波功率 峰包功率 平均功率		200 W以下的 射频信号		功率计、衰减器	
调制灵敏度				频谱分析仪、 衰减器	
灵敏度(包含 模拟、导频静噪)、 音频失真系数、 音频响应等	AM、FM等常见 调制的射频 信号	音频信号	矢量信号源、 衰减器	音频分析仪	

4) 数字 IO 采用 USB 数字 IO 模块, 主要用于模拟 PTT 开关信号和控制开关网络的切换。

5) 射频开关采用 USB 射频开关模块, 主要用于提供射频信号与测试仪器间的切换与复用。

6) 音频信号发生器和音频信号分析仪采用 NI 公司的 PXI-4461 音频信号分析仪模块, 主要用于提供音频信号的产生、采集与分析。

7) 网口采用零槽控制器上自带的网口。

8) RS232 接口采用 USB 串口模块。

3 平台软件设计

平台软件提供一个通用的测试执行软件系统环境, 它对测试程序集解释, 设置测试条件, 向被测设备发送测试激励、并从被测设备接收响应, 将响应数据和指标标准数据执行比较判断, 生成测试报表。无线电综合测试系统的平台软件运行于 Win7 以上的操作系统, 使用 VisualStudio 编程语言实现。其主要功能模块包括用户管理、被测设备及测试项目管理、测试执行、测试查询、仪器软面板、仪器类驱动程序库等, 平台软件设计如图 3 所示。

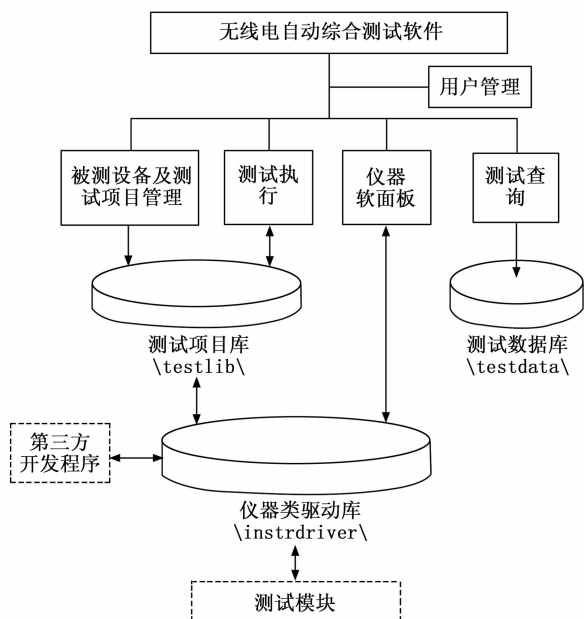


图 3 平台软件设计框图

用户管理模块主要负责用户的权限管理和用户登录, 用户权限分为一般用户、高级用户和管理员用户。其中一般用户只能使用系统中已有被测设备及测试项目的测试功能; 管理员用户除具有一般用户的权

限外还可以添加被测设备和测试项目; 高级用户登录后则可以进入测试仪器界面, 使用系统提供的矢量信号源、射频功率计、射频频率计、频谱分析仪、数字 IO、音频信号发生器、音频信号分析仪、网口和串口等 9 个独立仪器功能。

测试执行模块则根据用户实际测试项目的选择情况, 依次调用测试项目对应的动态链接库^[8]。该动态链接库再调用相关的仪器类驱动函数执行硬件的操作, 顺序显示每个测试项目的序号、名称、数据、判据以及结果, 其中测试判据以及特定的测试参数可由用户设置并传递到动态链接库中, 测试结束后把显示的信息自动存储为文件, 并存放至测试数据文件夹下。

测试查询模块主要用于查询历史的测试数据^[10], 每次测试执行完都会生成一个测试报表文件, 该文件按照时间进行排序, 该模块可以选定某个测试报表文件并打开该文件, 显示具体的测试数据, 该显示格式与测试执行模块显示的格式一致。

仪器软面板模块包括矢量信号源、射频功率计、射频频率计、调制分析仪、数字 IO、音频信号发生器、音频信号分析仪、射频开关、网口和串口等九个仪器的操作界面, 通过该仪器界面可以调用相关的仪器类驱动函数执行硬件操作。该模块适用于高级用户, 只有高级用户才能激活该模块。作为高级用户可以利用系统的测试资源进行二次开发, 即测试程序集的开发。如对某接收机进行性能指标测试时需增加该接收机的失真度参数测试, 编程时只需调用音频信号分析仪驱动库中的“读取失真度值”函数即可实现。通过二次开发, 可以给已有的被测设备添加更多的测试项目, 甚至是添加新的被测设备及其测试项目。

仪器类驱动库是针对无线电综合测试系统的每个硬件功能模块编制的驱动函数, 该函数库按照仪器类别进行区分, 包含仪器初始化、仪器关闭、仪器参数设置、仪器执行等功能。由于采用了仪器类的封装形式, 所以无线电综合测试系统的硬件功能模块发生指标的升级或改变, 并不会影响到上层测试项目库的变更, 也不会影响到仪器软面板的变更。另外该仪器类驱动库是对用户开放的, 用户可以利用这些库函数在第三方的开发环境中编制全新的测试项目库或是修改已有的测试项目库。

对于每个被测设备, 在指定的测试库路径下都有一个文件夹, 用于存放各自的测试项目库。测试项目库是描述某个测试项目的方法和流程的动态链接库, 该测试项目库由被测设备及测试项目管理模块进行管理, 由测试执行模块进行调用。同时, 对于每个被测设备, 在指定的测试数据路径下都有一个文件夹, 用于存放各自的测试数据库。测试数据库是每次测试报表文件的集合, 该测试数据库由测试执行模块生成, 由测试查询模块进行管理, 包括显示和打印。平台软件流程如图 4 所示。

4 试验结果与分析

4.1 测试系统实现

在具备了性能优良的测试执行硬件和软件平台后, 为实现各种无线通信装备的性能指标测试, 其测试程序集的开发是关键。一个完整的测试程序集包括: 仪器参数的设置、电台控制操作、测试方法的算法等。电台是在很多个频点上工作的通信设备, 且有

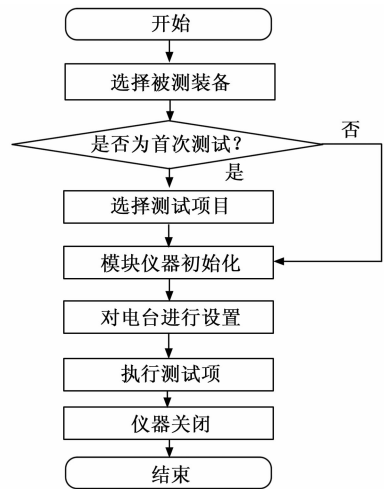


图 4 平台软件流程图

多种工作方式^[9]。因此通信装备的自动测试程序集是按照修理技术标准选取有限的具有代表性的工作频点在选定工作方式下进行编写的。测试前需使用电缆正确连接被测装备与便携式无线电综合测试系统, 测试连接如图 5 所示。

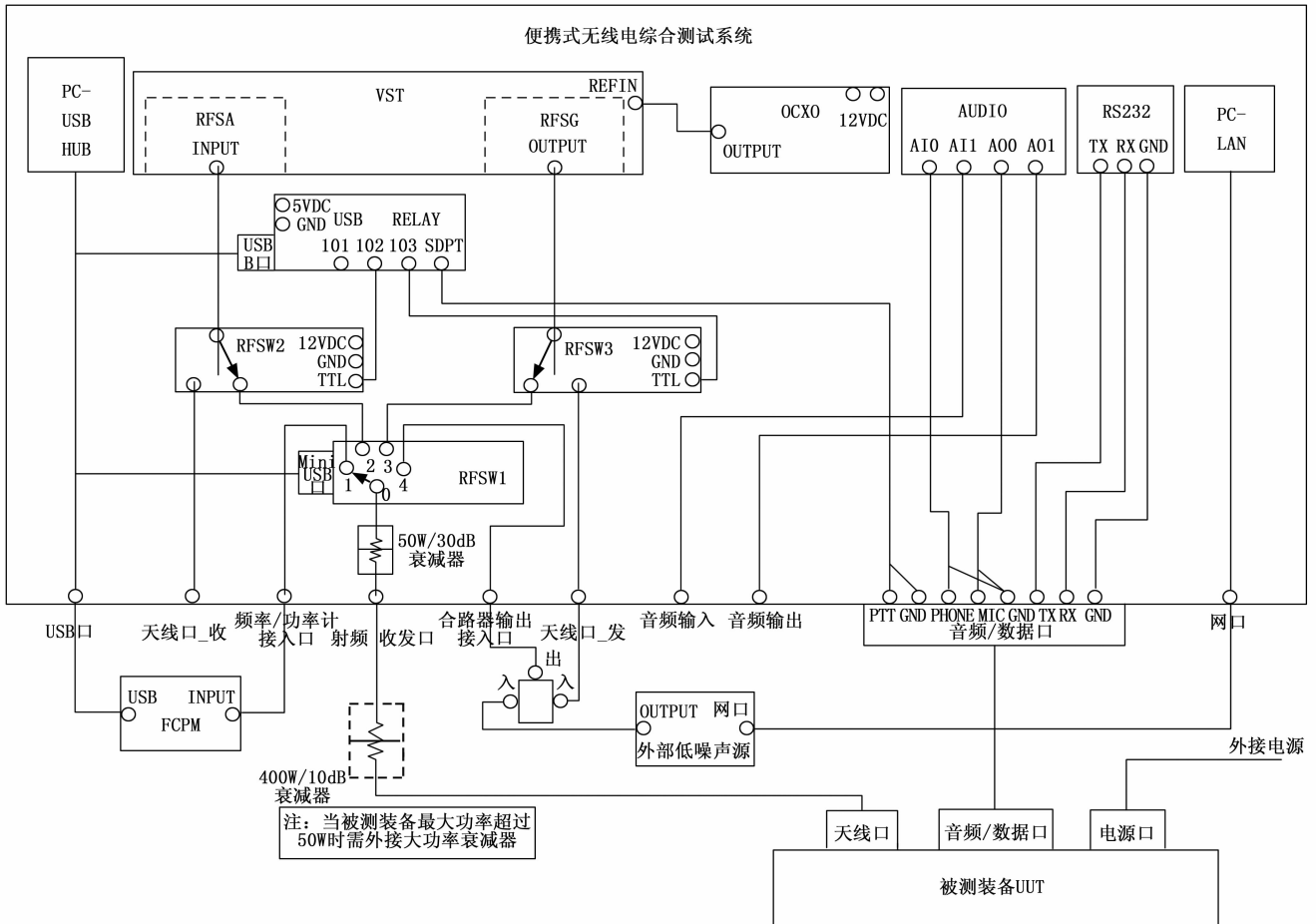


图 5 测试连接示意图

便携式无线电综合测试系统通过其后面板上的音频/数据口实现被测电台的遥控设置、音频输入、音频输出、PTT 发射控制等。被测电台的天线口与测试系统的射频收发口相连,当被测电台的发射功率超过 50 W 时需外接功率衰减器。

4.2 测试方案

4.2.1 发射功率、频率误差测试

在进行发射功率及频率误差的指标测试时,射频开关 1 需切换至“1”通道,使被测电台天线口的信号切换至功率/频率计模块,即图 5 中的“FCPM”内部。将测试系统音频/数据口中的 RS232 串口信号与被测电台的遥控口相连,软件设置被测电台的不同功率等级(小功率、大功率)和不同频率。操作数字 IO,将 PTT 信号置低,使电台处于发射状态;软件操作功率/频率计,读取并记录发射功率数值。

频率误差的测试方法与发射功率的测试相似,只是频率误差的测量需将电台的发射功率设置为“小功率”状态。软件操作功率/频率计,读取频率数值。

4.2.2 调制灵敏度、调制特性测试

进行调制灵敏度及调制特性的指标测试时,需通过测试软件将射频开关 1 (RFSW1) 切换至“2”通道,将射频开关 2 (RFSW2) 连接至频谱分析测量通道 (RFSA)。

调制灵敏度指标的测试过程如下:使用串口控制电台处于“小功率”状态;操作数字 IO 模块,将 PTT 信号置低,使电台处于发射状态;操作音频信号发生器:输出一个音频信号(频率 1 kHz,电平值步进增加),对被测电台进行调制;操作频谱分析仪:使用频偏测量功能测量整机输出信号的频偏值。判定测量的频偏值是否为额定频偏,如果是则记录此时音频信号发生器的输出信号电压,如果否则继续步进增加音频信号输出电压。记录下的音频信号发生器的输出信号电压值即为被测电台的调制灵敏度。

调制特性的指标测试过程与调制灵敏度相似:操作音频信号发生器产生一个频率 1 kHz 的信号,对被测电台进行调制;操作频谱分析仪:使用频偏测量功能,当达到额定频偏值时记录此时的音频信号输出电压幅度;改变音频信号发生器的频率,一般设置 300 Hz、500 Hz、2 kHz、3 kHz,重复上述测量过

程。记录下这几个音频信号的输出电压幅度,分别与 1 kHz 音频时的电压幅度作比较,其差值便是调制特性。

4.2.3 接收机灵敏度、音频失真系数、音频响应测试

进行接收机性能的测试时,需通过测试软件将射频开关 1 (RFSW1) 切换至“3”通道,将射频开关 3 (RFSW3) 连接至矢量信号源输出通道 (RFSG)。操作矢量信号源:按规定的测量频率将标准调制的射频信号输出至被测装备的天线口。操作音频信号分析仪:测量输出音频信号的信噪比,当信噪比大于 12 dB 时,步进减小矢量信号源的输出电平,当音频信号的信噪比小于等于标准信噪比时,记录此时的矢量信号源输出电平,即为接收机灵敏度。音频失真系数的测试流程如图 6 所示。

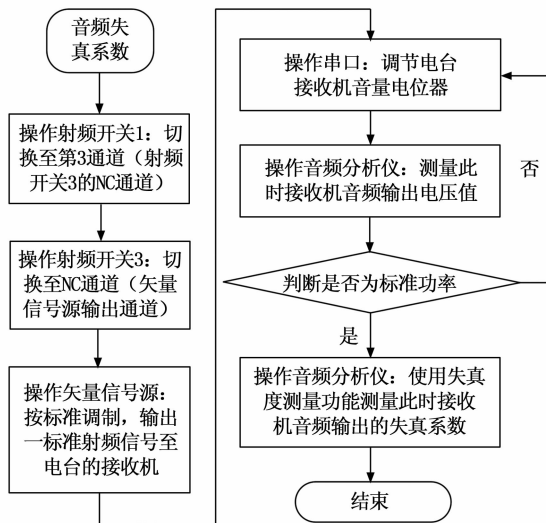


图 6 音频失真系数测试流程图

音频响应的定义为:在恒定频偏的确定输入信号下,调制信号频率与输出信号电平的变化关系^[6]。其测试方法是在测试接收机灵敏度指标的基础上进行的。操作射频信号源,使调制频率在音频范围内改变,使用音频分析模块测量出接收机音频输出电压值,再根据公式计算出不同调制频率的音频响应。具体测试流程如图 7 所示。

4.3 测试性能分析

在明确测试方案的基础上,编写了四型无线通信装备的性能指标测试程序集,根据电台接口定义制作

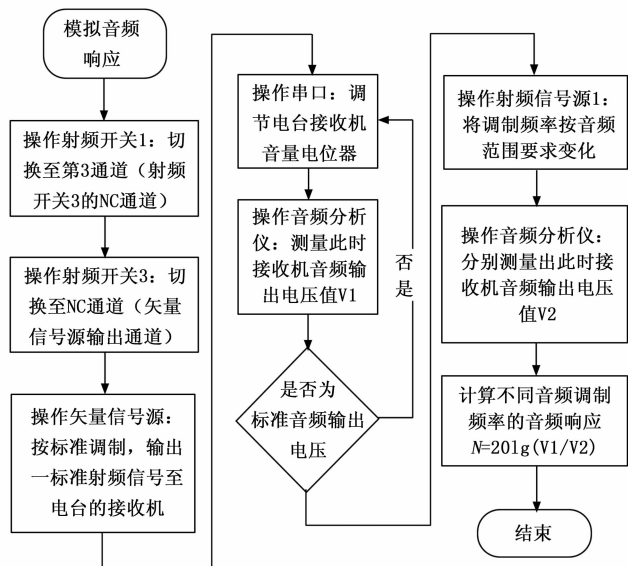


图7 音频响应测试流程图

4种匹配连接电缆,进行实机测试。测试表明测试系统可完成上述电台的频率误差、发射功率、调制特性、接收灵敏度、音频失真系数、音频响应等性能指标测试,主要技术指标的测试覆盖能力为100%,测试准确率达到95%以上。测试系统的连续工作时间不小于24小时。

5 结束语

便携式无线电综合测试系统主要用于短波电台、超短波电台、全波接收机等一系列无线通信设备整机关键指标的自动测试,集成度高,测试简便,极大地提高了检测效率。通过匹配外置功率衰减器的方法实现大功率发射机的发射性能指标测试;通过网口外接矢量信号源的方法,可实现双矢量信号源需求的接收机性能指标测试,如带外互调、中频抗拒比、镜频抗拒比、阻塞等指标的测试。该测试系统不仅能利用测试资源进行二次开发,给已有的被测通信设备添加更多的测试项目,而且能添加新的被测设备及其测试项目。目前该测试系统已在通信装备的修理机构试用,有效解决了通信装备自动化检测的难题,满足了通信装备快速检测修理的需要^[13]。

参考文献:

[1] 潘增寿,黄雪明. 基于PXIe总线的便携检测设备设计[J]. 现代信息技术, 2019, 3(16): 48-50.

[2] 王朕,秦亮,王朝轰. 基于PXI总线的便携式引进装备通用电路板故障诊断仪的设计[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(3): 99-102.

[3] 丁万成,付緬言. 基于PXI Express总线的多通道数字化软件技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(4): 126-129.

[4] 时旺,孙宇锋,何玉珠,等. 基于GPIB的无线电综测仪的自动测试系统[J]. 微计算机信息, 2008, 24(25): 104-106.

[5] 张宸. 超短波无线电发射机常规电性能指标测试方法浅析[J]. 信息通信, 2014(3): 191-193.

[6] 张宸. 超短波无线电接收机常规电性能指标测试内容及方法浅析[J]. 大众科技, 2014, 16(3): 80-83.

[7] 陈诚,任攀. 基于合成仪器的航空无线电综合测试设备[J]. 高科技产品研发, 2015(4): 12-13.

[8] 宋文波,邵天宇. C#与虚拟仪器技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2021.

[9] 韩海舰,李文海. 机载超短波语音通信系统性能测试方法研究[J]. 研究与开发, 2016, 35(1): 49-55.

[10] 明日科技. C#编程入门指南[M]. 北京: 中国工信出版集团, 2020.

[11] 袁华四. 无线电综合测试仪校准装置的研究及其不确定度分析[J]. 应用技术与研究, 2020(6): 77-81.

[12] 赵玲. 无线电检测技术应用研究[J]. 监测检测, 2020(10): 50-52.

[13] 马飒飒,牛刚,夏明飞,等. 通控设备一体化测试诊断平台设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(1): 18-20.

[14] 徐敏. 软件无线电技术在通信领域的应用探究[J]. 科研应用, 2017(10): 180-182.

[15] 王立新. 机载电台二级自动测试设备研究与设计[J]. 电讯技术, 1997, 37(5): 10-17.

[16] 蔡志芳. 船舶高频无线电装置通信误码监测系统设计与实现[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(11): 109-111.

[17] 谷歆海. 网络分析仪的工作原理及在测量领域的应用[J]. 电子工程师, 2008, 34(7): 15-19.

[18] 董锋剑,何惊,张羽. 基于PXIe总线和LabVIEW数据采集[J]. 信息科技, 2018(7): 39-43.

[19] 俞希学,张嵩彪,陈凯捷. 基于LabVIEW和PXIe的动态信号同步采集系统设计[J]. 电器与能效管理技术, 2012, 20(1): 18-20.

[20] 曹成俊,张宏伟. 自动测试系统中的总线技术[J]. 现代电子技术, 2008(14): 159-163.