

地球站设备自动化性能测试系统设计与实现

戴昱彤¹, 虞炳文², 杨海坪¹

(1. 中国人民解放军 63819 部队, 四川 宜宾 644000;
2. 中国人民解放军 63796 部队, 四川 西昌 615000)

摘要: 在卫星通信地球站中, 卫通设备通常会面临长时间在线使用的情况, 岗位人员需要经常进行指标测试, 确保设备的可靠性, 以往主要根据经验通过频谱仪等设备进行手动测试, 得到的结果数据记录零散、可应用性低, 整套设备的性能衰减难以测量, 并且难以形成持续记录分析; 基于此提出自动化性能测试系统, 系统通过定制嵌入式平台、性能测试流程, 实现了整套地球站设备的性能测试过程, 利用性能测试原理与仪器控制技术, 采集处理相应节点频谱信息并计算特征值, 利用多源数据进行综合判定与分析, 最终获得在线设备性能测试数据, 并通过曲线直观展示持续性变化情况; 系统的测试结果, 可帮助人员感知设备性能的变化并做好相应工作, 避免设备失效对工作造成影响; 系统具有快速、准确、开放性好的优点, 为后续智能化运维提供了数据基础。

关键词: 地球站; 嵌入式平台; 性能; 测试; 自动化

Design and Implementation on Automatic Performance Testing System for Earth Station Equipment

DAI Yutong¹, YU Bingwen², YANG Haiping¹

(1. 63819 Unit, the PLA, Yibin 644000, China;
2. 63796 Unit, the PLA, Xichang 615000, China)

Abstract: In satellite communication earth stations, there are often the long-term online use for satellite communication equipment and personnel need to regularly conduct indicator tests to ensure the reliability of the equipment. In the past, manual testing was mainly implemented through equipment such as spectrographs based on experience, resulting in scattered data records and low applicability. It is difficult to measure the performance degradation of entire equipment, and difficult to continuously record and analysis. Based on this, an automatic performance testing system is proposed. The system achieves the performance testing process of the entire earth station equipment by customizing the embedded platform and performance testing process. The performance testing principle and instrument control technology are applied to collect and process the corresponding node spectrum information, and calculate the characteristic values. Multiple source data are used to carry out the comprehensive judgment and analysis, ultimately obtain online equipment performance testing data, and visually display the continuous change curves of the data. The testing results show that testers can perceive the equipment performance changes and accomplish corresponding work to avoid the impact of equipment failure on work. The system has the advantages of speed, accuracy, and good openness, providing a data foundation for subsequent intelligent operation and maintenance.

Keywords: earth station; embedded platform; performance; testing; automation

0 引言

目前, 对于地球站设备的信号及设备状态的监测越来越重视, 通过监测频谱信号, 可以判断链路或设备状态, 在设备出现功能性故障之前, 信号的频谱能“多方面”地说明设备在处理信号方面的性能变化程度, 尤其是将信号中的信息与设备状态进行联合分析, 能够更精确地反映在特定条件下的设备能力。而地球站设备上架后, 通常要使用 5 年或更长的时间, 在这个较长的使用周期里, 为了确保设备能够顺利完成任务, 也为了指导设备专项维护工作, 需要从多方面、更深入地体察设备性能变化。

通常, 地球站设备安装调试后仅配备了较为基础的集中监控软件, 目前仅能针对某特定设备指标在特定时间段的变化进行查询, 不具备长期的、联合设备参数与载波特征值的详细记录功能。另外, 对于设备状态的一些变更与特殊事件的记录通常用纸质或电子文档方式存储, 如维修后的性能指标变化情况。这种存储方式不利于岗位人员进行设备性能感知。由于缺乏对设备具体性能指标的获取、存储、显示及分析手段, 在设备的日常使用过程中, 人员的岗位经验显得尤为重要, 这对于岗位人员的培养以及工作自动化、科学化程度的提升都是不利的。

收稿日期: 2023-06-26; 修回日期: 2023-08-03。

作者简介: 戴昱彤(1985-), 女, 硕士研究生, 工程师。

引用格式: 戴昱彤, 虞炳文, 杨海坪. 地球站设备自动化性能测试系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 8-13, 26.

与此同时,在对中频、射频设备进行专门测试时,通常需要先将被测设备关机,然后用测试电缆连接被测设备与频谱仪,待被测设备开机,再设置频谱仪参数并观察某特定状态下的设备输出频谱情况。在测试过程中,较多环节都需要岗位人员实地、手动操作,费时、费力且不准确,数据记录不标准或不全面。尤其在某些未详细规定的环节或者岗位人员轮换交接频繁时,容易疏漏工作细节,导致设备性能监测存在纰漏,这也与当前设备操作自动化、科学化的整体发展趋势不相适应。由于数据种类、数量、准确性、标准化的欠缺,更难以跟上以后设备监测信息化、智能化的步伐。

因此,基于大量人员操作手动实现的性能测试系统,已经不能满足当前的使用需求。目前性能测试的通常做法是:依托设备状态集中监控系统,岗位人员利用丰富的岗位经验,在设备需要进行某项测试时,将测试仪器连接至相应节点进行信号特征测试。由于针对某节点信号的测试需要将测试仪器连接至相应的节点进行,所以这种测试通常针对少量关键节点进行,整个过程耗时长,且对岗位人员的岗位知识与操作技能要求较高。基于此,亟需开发一种能够立足现有有机房条件,又能够准确、快速、免插拔、结果可记录与利用的自动性能测试系统,及时感知系统设备的性能变化情况,以辅助岗位人员开展日常维护工作。

针对上述问题,提出自动化性能测试的设想,通过开发自动化性能测试系统,减少人员的客观因素干扰,实现快速、准确、标准化、持续性地对设备性能进行监测,留存下完整数据,为后续的数据分析提供基础,同时减轻人员的重复性工作内容。

1 系统结构、测试原理及需求

目前,鲜见针对地球站中射频设备的性能测试平台,但针对移动通信、地球站设备等涉及多频谱节点的设备频谱监测系统却非常多,实现方式也较为成熟。一种实现方式是利用专用硬件(例如编程后的 FPGA 芯片)实现对信号的直接接入与处理^[1-2],此种方式开发成本较高,但性能优良。这种方式中的佼佼者便是使用 USRP 平台进行频谱的获取。USRP 设备能够灵活地将 PC 连接到 RF 世界^[3-7]。另一种实现方式是利用 VISA 实现软件对硬件的控制。VISA (Virtual Instrument Software Architecture, 虚拟仪器软件结构)是对带有 GPIB、串口、以太网、USB 等接口的仪器系统进行配置、编程和故障排除的标准,它提供了系统硬件与应用开发环境之间的编程界面。此种实现方式不借助专用硬件,可直接利用软件对其进行控制,也在诸多领域有应用^[8-13]。无论何种实现方式,都是通过对关键节点频谱数据的获取,联合其它关键参数,对数据进行分析、判别。至今已有频谱数据仓库建设及智能化分析应用等诸多成果^[14-17]。

本文所述的自动化性能测试系统,将采用基于 VISA 软件对硬件的控制的原理进行设计。

1.1 地球站卫星通信系统结构

自动化性能测试系统所涉硬件系统的主要中、射频设备如图 1 所示,上行数据经调制解调器调制输出中频信号,中频信号经上变频器变频为射频信号,高功率放大器将射频信号进行功率放大后由天线发射至对应卫星转发器;下行射频信号经天线接收后,进入低噪声放大器进行信号放大,而后由下变频器变频为中频信号,最后由调制解调器解调为下行数据。在工程应用过程中,大多数设备参数在产品定型后不再调整,部分参数(例如内部电源参数)在监控软件中有实时显示,便于观测其变化。设备在失效前,在漫长的使用过程中会产生性能的缓慢退化,这种退化有的可以通过对设备参数的调整来适当弥补——例如修改某设备的信号衰减量来调整后级设备的输入信号功率。为指导设备维护与设备状态优化设置工作,需先进行设备性能测试,根据测试结果感知设备性能变化。

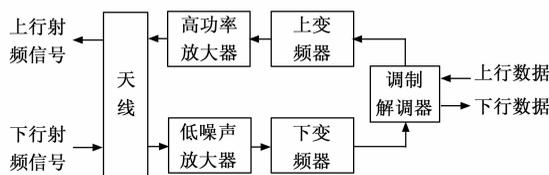


图 1 卫星通信地球站主要中射频设备信息流程图

1.2 自动化性能测试原理

为实现自动化性能测试系统,首先需要实现的是变频器测试内容,变频器测试所涉及的硬件,即中频调制解调器,是卫星通信重要的信道设备,负责完成基带信号至中频信号(L/C)的变换,其性能很大程度上决定了整个卫星链路的传输性能^[18]。特别在高速宽带卫星通信系统中,高阶调制方式要求更高的信噪比^[19-20],对调制解调器的性能提出了更高的要求。传统的对中频调制解调器性能的测试主要是对误码率的测试。在一定的调制解调方式下,误码率与信噪比具有某种对应关系。通常,设备厂家在技术资料里会提供达到 0.1% 的丢包率时,在某种调制解调方式下需要达到的信噪比数值。信噪比与比特信噪比又存在对应关系。在地球站的日常工作中,通常使用监控系统中的“比特信噪比”这一参数来评估链路质量。当这一参数值不能达到链路质量要求时,通常通过提升调制解调器“发送电平”来提升链路质量。当设备送修后,所方通常所做的一种测试是:在输入处加入某种规律变化的输入信号,观测并记录输出处的信号特征参数,通过与理论值的比较得到相关结论。

变频器测试的内容主要包括功能测试、基本性能测试和保护功能测试 3 部分^[21]。变频器设备到地球站上架后,使用环境较为稳定(含供电条件、电磁辐射等方面),岗位人员在使用过程中,应重点关注对基本性能的测试。以某卫通地球站为例,在实际工作中时常观测的参数有 E_b/N_0 、中频发送及接收电平值,各节点设置的频率等参数。链路开通时,岗位人员通过频谱仪观测载波的频谱图形,根据

参数数值与频谱图形综合判断链路质量。这种依赖岗位人员经验来定性地感知链路质量的方式,存在难以捕捉设备性能变化状况的弊端。而设备研制方经常使用激励载波注入的方式以测量设备的一些基本性能参数值。例如在设备输入端口连接一台信号发生器,通过输入特定信号,观察输出端频谱信号的某些特征值(例如信号电平)来测试设备性能。

综上,调制解调器与变频设备通常采用加入激励并记录输出信号的方式进行性能测试,进而计算信号各特征以获得设备性能参数。基于此,所设计自动化性能测试系统,将通过在机房中已固定连接的各设备,通过在某初始节点加入某种激励,获取后续各节点的频谱数据,计算各节点频谱参数并记录,最终达到设备性能测试的目的,构建自动化性能测试的基础。

1.3 自动化性能测试需求

为了实现对地球站设备性能测试的自动化与符合未来的智能化建设需求,性能测试系统要实现以下功能以改进目前工作。

1) 提升测试的准确性与效率。①改变以往人工判读与手动记录方式,改为频谱的数字化获取与特征值科学计算以及对特征值进行科学记录;②对测试流程进行标准化规定,使得每次施测的条件一致,结果具有可比较性,最终达到科学指导维护工作的目的。

2) 很大程度地摆脱对操作人员的经验依赖。①对于某些特定的设备参数,一次性录入后,自动调用,无需操作人员每次根据这些参数对仪器进行设置;②对性能测试的流程进行软件定制,定制后,操作人员能够根据流程提示进行标准化的测试,无需熟练掌握流程的各细节。

3) 测试具有多方确认与检测机制,确保测试过程控制的正确性。不仅在系统中有标准化流程,而且利用设备参数获取等手段,确认各步骤的参数已准确调整,确认流程中每一步骤的正确执行。

4) 测试结果可存储与调出。经过标准化性能测试流程的实施,可存储测试结果,并能够在任何需要的时候调出历史测试结果并进行比对与感知。

5) 测试流程可定制化。随着设备使用年限的增加或者设备型号的更迭与升级,性能测试的内容也可以进行适应性的修改。为了实现此功能,需要软件实现测试流程,以便于适应性升级。

6) 测试过程人机界面友好,便于不同经验程度的人员能够正确实施测试。系统需要给出测试的实施条件、流程进行中的人员操作指导、过程子步骤的状态确认与报错、测试是否正常完成的提示等。

2 自动化性能测试系统设计与实现

根据性能测试系统的需求,要实现性能测试的自动化,一是要实现便捷的信息接入与选择。针对不同的数据,需要设置不同的数据接入方式;二是要使得系统具有标准化

的测试环境,又要具有灵活性便于扩展。前者需要梳理数据类型,并借用一定的设备或联通方式来采集数据。后者便需要进行合理的软硬件分工,使得系统可靠,并具有一定程度的灵活性。

对于一个独立的卫星通信地球站来说,中频、射频设备分布相对集中,且已配备频谱仪等测试仪器,一种经济便捷且较为高效的测试系统实现方式便是建立嵌入式平台,利用专用硬件与定制软件,由软件控制测试流程的实施,硬件根据主机的控制信号具体实施信号的选择与数字化获取。系统架构如图 2 所示。

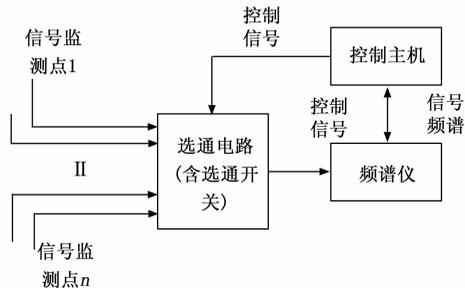


图 2 系统架构图

如图 2 所示,此种系统实现方式,通过如下的软硬件分工,实现了自动化性能测试:控制主机中的软件包含了根据测试原理定制的性能测试流程,根据流程内容用 VISA 技术实现对选通电路、频谱仪的控制。选通电路根据主机发送的信号选通某路信号进入频谱仪。频谱仪根据选通电路送入的信号、主机的控制信号,对信号进行选择、设置,并将设置后的便于观测的信号送入主机。由主机最后完成对频谱数据的特征值计算与存储、显示。

2.1 自动化性能测试系统硬件连接与实现

设备硬件连接如图 3 所示。将各分设备待测信号的输出接口连接至选通开关输入处,控制主机通过串口控制选通开关的信号选择。被选择的信号从选通开关输出至频谱仪信号输入接口。主机通过 USB 连接频谱仪后面板的 GPIB 接口实现对频谱仪显示参数的设置,同样通过 GPIB 接口回传频谱数据。回传的频谱数据进入主机进行相应处理后记录下来,待某性能测试流程完全结束后,进行标准化的存储与展示。

2.2 自动化性能测试系统软件设计与流程实现

系统软件分为两部分功能:1)实现对性能测试所需参数的获取,需要获取的数据类型包括:链路参数、设备状态参数、待测信号节点频谱信息;2)定制性能测试流程并实现精密过程控制,需要定制的流程有:设备参数与状态获取流程、频谱仪设置流程和性能测试流程,前两者是实现性能测试流程的基础流程。

流程软件化实现的方式,便于流程的适应性修改与性能测试流程的扩充,便于针对不同的目的定制相应的流程。

2.2.1 参数获取方式

针对地球站卫通设备的应用场景,如果能在免插拔的

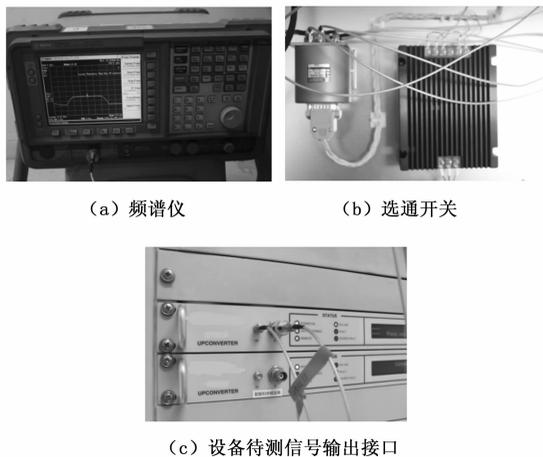


图 3 频谱仪、频谱选择电路和设备射频信号监测点

情况下, 测试某设定状态下设备的各方面性能指标, 且测试结果紧密地贴合应用场景, 那么需要对多方面的数据进行集中获取与综合应用。首先, 需要获取链路特性参数。这部分数据通常由上级文书中规定, 例如中频频点、调制/解调方式、卫星转发器频点等参数。其次, 需要获取设备实时参数。这类参数包含各分设备的各项实时指标, 例如发送、接收电平值, 设备内部电源参数、告警信息等。最后, 需要各待测节点信号的频谱数据。频谱数据直接反映了在上级文书规定的链路状态条件下, 信号在各节点的表现情况。就像人在体检时血液中的各项指标能够反映人身体的状况一样。频谱数据中提取的参数也有类似的功能, 且较能体现设备在某特定方面的表现情况。

如图 4 所示, 设备链路参数大多是以纸质文件方式下达, 系统实现时用一次性手动录入的方式实现, 方便后续系统内部多次运用。例如运用于频谱仪显示参数的设置, 将目标频段频谱置于便于观测记录的位置; 位于监控网络中的设备状态数据, 使用网络请求/应答的方式获取(性能测试系统与设备集中监控系统由网络设备连接), 实现对参数的自动比对与判别, 例如某设备状态是否满足某一测试步骤要求的判别、某测试步骤完成后给出设置更改提示信息以便进行下一步测试等; 系统软件控制对进入频谱仪的信号的选择, 利用链路参数等信息设置频谱仪, 实现对信号频段的选择与显示参数设置, 最终软件根据获取到的频谱数据计算相应的特征值并进行记录。从图 4 中可知, 多源数据的获取, 在某一特定链路状态下, 为设备性能的精确测试提供了可能。在实际工作中, 地球站通常工作在某几种常用的链路状态之下, 测试在常用链路状态下的性能, 会对实际工作产生更精准的指导。进一步地, 由于测试状态、实施流程可以被精确记录, 对于类似的地球站设备, 便于测试结果共享, 这一点为设备故障预测等智能化应用提供了珍贵样本。

2.2.2 设备参数与状态获取流程

性能测试软件通过与现有集中监控系统进行通信获取

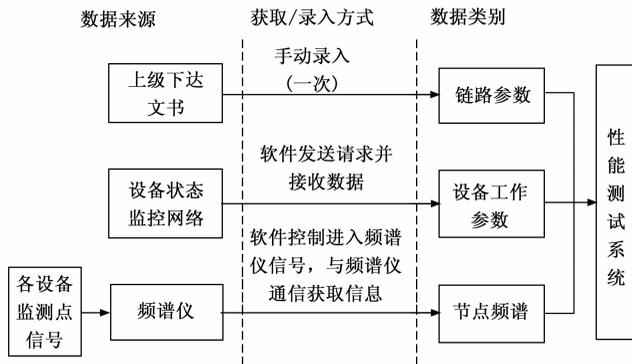


图 4 多源信息数据处理图

设备参数、状态信息数据, 如图 5 所示。

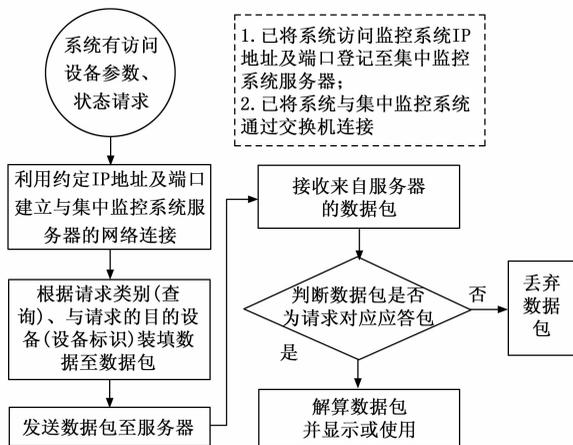


图 5 设备参数及状态获取流程图

如图 5 所示, 当系统有访问某设备某参数的请求时, 根据集中监控系统研发时的数据格式, 组帧发送相应的网络数据包至监控系统服务器。此时必须确保该软件访问监控系统的 IP 地址与端口已在监控服务器端进行登记, 监控服务器端可识别并接收软件数据包并应答。软件定时监听数据包, 当到达的数据包某字段与所期待的应答包一致时, 结算数据包, 并记录其中的有用数据。通常, 这些数据用于判断某设备的状态是否为当前测试步骤要求的目标状态, 或者利用当前状态引导人员设置设备参数以进行下一步的测试。

2.2.3 频谱信号获取流程

平台通过分时共用的方式使用频谱仪进行相应节点频谱信息的获取。主机需预先安装仪器驱动, 软件编程时通过调用 VISA 库, 进行仪器控制。根据运用场景, 定制了如图 6 所示的频谱获取流程, 提取相关目标节点频谱。首先, 要根据频谱节点的类别(是中频还是射频节点, 是设备输入还是输出节点等信息), 对中心频率进行设置, 此处要使用到之前输入的相应的链路参数。其次, 根据调制解调方式, 设置频谱的显示带宽 SPAN, 为便于观察, 不同的调制解调方式下 SPAN 设置比率不同。此处同样要使用到链路参数中的

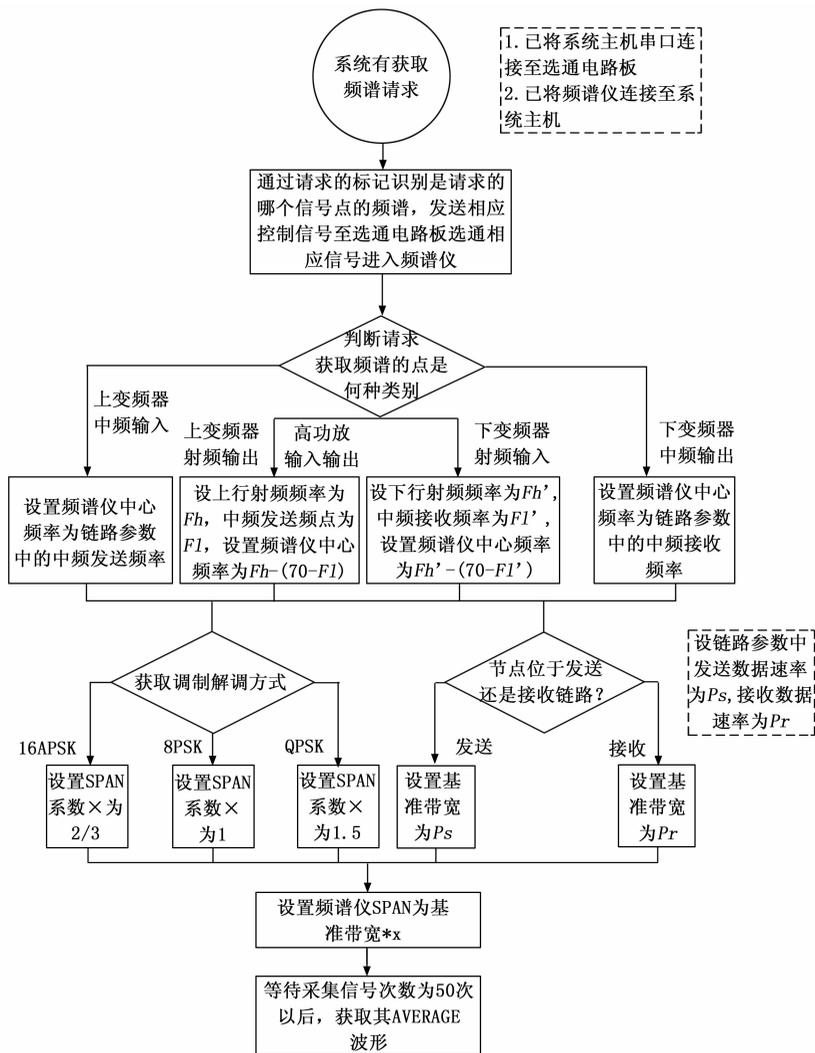


图 6 频谱信号获取流程图

“调制解调类型”。再次，根据节点处于发送还是接收链路，设置 SPAN 设置的基准带宽，此处要使用到链路参数中的“发送（或接收）数据带宽”。最后，为了得到较平滑的频谱曲线，可获取平均以后的频谱数据，这个过程会耗费一定时间，推荐在时效性要求较低的测试场景使用。

图 6 中定制了某地球站常用的 3 种调制解调方式情况下，频谱仪参数的设置方法。在实际中，可根据不同的常用调制解调方式及使用习惯进行设置。某调制解调方式条件下，在囊括了整个信号频谱的情况下，SPAN 值设置越小，越能够得到更细致的频谱数据。

2.2.4 自动化性能测试流程

为便于不同经验的操作人员正确实施测试流程，需要设计统一标准的流程。流程中需要提示人员操作以及自动确认设备状态是否已达测试条件，若未达到测试条件需要给出进一步提示信息指导人员调整设备状态直至确认状态达到测试条件。达到条件后，系统进行预定操作并记录性能测试数据。过程中提示人员更改设备状态、确认状态后

进行数据记录，直至达到测试终止条件。测试流程如图 7 所示。

测试的流程设计，尤其是精确的状态控制与确认机制，具有重要意义。由于地球站有天线这一将载波发送到自由空间的设备，还包含中、射频设备，所以在测试时需要注意的事项较多，例如，有的测试只能在设备空闲时进行。有的还要考虑一些测试的边界条件，以免对设备造成损坏。这些都可以在本系统的软件中进行条件的判断与边界的设置，而且这种更改是可以固化到软件中，且可随着测试条件、设备类型与情况的变化而进行适应性修改。

图 7 为通用流程，在实际工作中，应根据某特定情境下的特定性能测试目标细化内容。需要将成熟岗位经验及设备说明书中的边界条件输入，这一点大大降低了对施测人员在经验上的要求，避免了大多数为设备引入风险的操作。

3 试验结果与分析

为对自动化性能测试系统运行性能进行分析与评估，根据图 7 的通用性能测试流程，定制了测试调制解调器与变频器性能的试验流程。软件界面如图 8 所示。

界面左上角区域为测试条件展示区。提示操作人员如何将设备调整至测试准备状态。当达到测试条件后，利用图标反馈操作人员可进行下一步测试。界面右上角区域用于设置测试起止条件与测试步进大小。最右侧显示测试进行的程度。界面中间为“实时性能测试结果”展示区域。在按照指导成功实施完一次测试流程后，该区域将此次测试流程中测得的性能数据展示于该区域。对测得的数据可选择保存数据或截图。

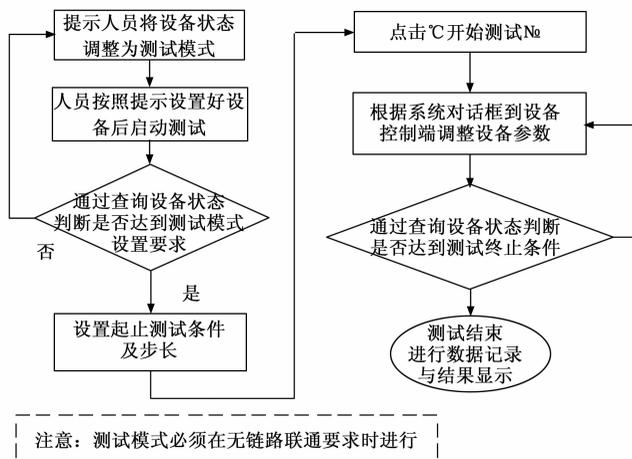


图 7 性能测试流程图

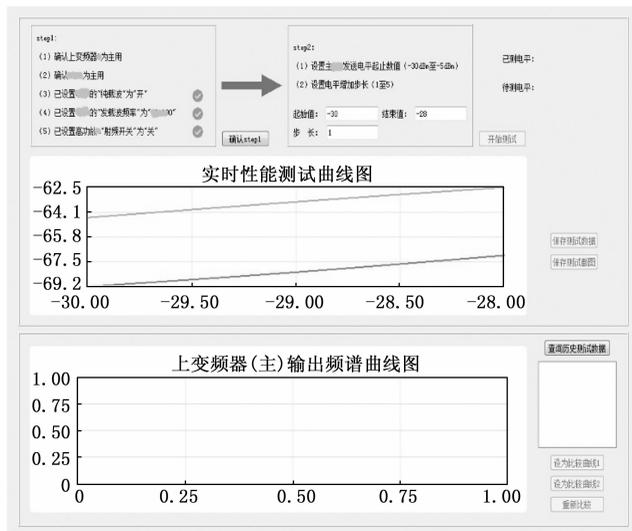


图 8 性能测试结果展示图

一旦选择了保存数据, 数据即进入数据库, 可在页面下端进行选择调出。系统支持将两次测试数据进行对比显示, 便于操作人员观测与得出结论。

从这样一个性能测试的特例可知, 系统不仅能实现性能测试过程的自动化判定与进行, 而且能够将测试的数据进行存储与应用。便于岗位人员定期进行性能测试实验, 通过观察多次相同实验条件下测试结果的差异, 感知设备的性能变化情况, 以指导设备维护与升级换代工作。另一方面, 测试数据也为后续智能化应用(例如设备的智能化健康管理)打下了基础。

该系统应用于设备性能测试后, 较之应用前的性能测试过程, 在测试时间与测试准确性上有极大提升, 具体如表 1 所示。

表 1 系统应用前后效果对比

岗位工作内容	应用前	应用后
设备性能测试	手动连接仪器测试; 频繁更换仪器测试点, 仪器频繁开关机; 一次仅记录某参数值; 对频谱特征参数的计算为估计值; 过程控制依赖人员经验; 测试数据记录准确性较低; 数据记录 > 10 min, 零散, 结构随意; 完成流程用时 > 2 h; * 对比不便; 性能变化难以感知, 一旦失效影响大; 智能化升级困难。	测试过程无插拔; 无需更换仪器测试点, 仪器运行持续稳定; 一次完整记录 400 个频谱点数据; 对频谱特征的计算为准确值; 过程控制准确, 对人员经验要求低; 测试数据记录准确性高; 数据存储 < 1 s, 集中, 结构标准; 完成流程用时 < 10 min; * 便于调出与对比; 性能一旦下降及时采取措施, 避免失效; 智能化升级容易。

* 针对发送、接收链路节点, 流程中以测试 8 个节点频谱数据演练并记录。

除了表 1 中的直观效益, 系统还具有如下优点: 1) 系统打破了信息壁垒, 便于设计面向岗位实际工作场景的测试流程, 实用、针对性强; 2) 测试过程快速, 结果精准, 结果调出方便, 无需交接, 数据还可用于人员训练; 3) 系统开放性好, 测试项目可通过修改软件流程方便定制; 4) 为后续装备智能化评估等应用提供数据来源与软硬件平台。

4 结束语

卫星通信地球站设备出厂投入使用后, 在较长的使用周期中, 性能下降是必然趋势。日常设备维护工作中, 单独测试需插拔设备, 且设备数量较多, 加之应用场景中测试能力有限, 很难实现设备性能的多方面、准确评估。为此, 针对地球站设备设计了一种基于 VISA 仪器编程技术的嵌入式平台, 通过硬件定制与性能测试流程的定制, 实现了免插拔、自动化的性能测试系统。在设备相对集中的独立地球站, 对实时性相对要求较低的情况, 是一种兼具实用性、效费比的方案。由于是软件定制测试流程, 系统开放性好, 使得诸多测试例程便于实现。提出的性能测试流程及测试方式, 打破了以往对于单台设备的合规化测试思想, 而利用软件“黑盒”测试思想, 测试系统在应用场景的可用性程度较高。在设备失效前较长的使用过程中, 对地球站设备维护使用工作具有较强且长期的指导意义。

参考文献:

- [1] 周锦标, 赵乾宏, 刘明波. 测量船卫星通信多路频谱在线监测系统设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (5): 114 - 119.
- [2] 冯 莉. 一款基于嵌入式的频谱监测软件设计及实现 [J]. 技术研究, 2017 (7): 5 - 18.
- [3] 马振华. 基于 USRP 平台的频谱监测系统设计与实现 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [4] WELCH T B, SHEARMAN S. Teaching software defined radio using the USRP and LabVIEW [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. IEEE, 2012: 2789 - 2792.
- [5] 苏 倩. 基于 USRP 的电磁频谱感知实验系统的设计与实现 [D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [6] 郭志刚, 付 毅. 基于 USRP 的无线电收发系统研究 [J]. 电子质量, 2016 (11): 5 - 10.
- [7] 雷雯雯. 异构网场干扰分析及基于 GNU Radio 和 USRP 的实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [8] 杜 明, 张于燕, 刘玉兰. VISA 环境下频谱监测系统的开发 [J]. 计算机与网络创新生活, 2012 (20): 58 - 60.
- [9] 徐 利, 张良国. 基于 VISA_COM 的测量仪器通用测试系统的开发 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3297 - 3300.
- [10] 赖 彪, 贾惠芹. 基于 VISA 标准的示波器程控方法的研究 [J]. 研究与发现, 2011, 30 (3): 41 - 43.
- [11] 孙睿阳, 方信响. 基于 VISA 和 Django 的自动化测试系统的设计与实现 [J]. 计量科学与技术, 2020, 10: 47 - 50.

(下转第 26 页)