

商业卫星自动化测试平台设计与实现^{*}

徐 婧^{1,2}, 邢斯瑞¹, 刁国影¹, 程 龙¹, 李小明¹

(1. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130000; 2. 中国科学院大学, 北京 100000)

摘 要: 综合测试是卫星研制过程中必须且关键的环节, 传统卫星测试系统研制周期长、通用化程度低、体积庞大、不便携带及测试现场走线复杂等问题严重制约商业卫星产业发展; PXI 总线技术是 PCI 在仪器领域的扩展, 其图形化、模块化及可扩展的软件编程风格及硬件集成方式为卫星自动化测试平台的建设提供条件。以 PXI 架构为基础, 结合硬件测试设备、服务器、终端之间的网络通信技术, 提出一套商业卫星自动化测试平台的设计方法, 并结合某型号卫星测试任务进行平台实现。实践表明, 该平台满足商业卫星高性价比、快速、全面、稳定测试的需求。

关键词: 商业卫星; PXI; 网络通信; 自动化测试平台

中图分类号: TN919.5; TP271

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.190919

中文引用格式: 徐婧, 邢斯瑞, 刁国影, 等. 商业卫星自动化测试平台设计与实现[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 78-83.

英文引用格式: Xu Jing, Xing Sirui, Diao Guoying, et al. Design and implementation of commercial satellite auto-test platform[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 78-83.

Design and implementation of commercial satellite auto-test platform

Xu Jing^{1,2}, Xing Sirui¹, Diao Guoying¹, Cheng Long¹, Li Xiaoming¹

(1. Changguang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: Comprehensive test is the necessary and key link of satellites' development process. Traditional test system characterized with long development cycle, low universality, large size and complex connection has restricted the development of the commercial satellite industry seriously. PXI bus is the extension of the PCI in the field of instrument, which contributes to the construction of satellite auto-test platform by its graphical, modular, extensible software programming style and hardware integration way. Using PXI architecture and the wireless-connected technology, a design method of the auto-test platform for commercial satellite is proposed. The method has been verified during the mission of the satellite test work. Practices have proved that the test platform meets the requirements of the commercial satellites' cost-effective, fast and stable test.

Key words: commercial satellite; PXI; network communication; auto-test platform

0 引言

卫星遥感的兴起, 空间分辨率的限制解冻, 商业影像市场的扩大, 带动了商业遥感卫星系统的发展^[1]。在国外, 随着美国商业亚米级遥感卫星的连续发射和成功运营, 遥感卫星商业模式趋向成熟, 形成了完整的产业链^[2]; 在国内, 研制、发射和运营商业遥感卫星刚刚起步, 以市场需求为导向, 开展商业卫星的研制, 推动我国商业卫星及应用的产业化发展, 已成为一项紧迫的任务^[3]。

在航天器发射前, 必须进行全面的系统级测试^[4], 同时由于商业卫星与其他卫星的研制模式存在不同, 具有低成本、研制周期紧、组批生产等特点, 这就需要根据商业卫星特点, 进行地面测试系统的构建。在航天器系统级测试的发展过程中, 首先出现的是单步手动

测试; 其后, 随着航天器研制水平的提高、航天器数量的增多、研制周期的缩短以及对航天器测试要求的逐渐提高, 出现了自动化测试工具; 然后, 随着航天器数量的进一步增多、研制周期的进一步缩短、测试人员的日益紧缺, 测试人力资源逐步被压缩, 自动化测试工具向通用化、小型化、智能化等方向迅速发展^[5-6]。吴伟等人将自动判读系统引入航天器电测, 极大减轻了测试人员的判读负担, 提高了数据判读的准确性^[7]; 戴润峰及何永丛等人从载人航天器的自动化测试软件平台入手, 研究了小卫星及航天器自动化测试技术, 并验证了系统的有效性^[8-9]; 储海洋等人将测试平台扩展到信息管理领域, 研究并实现了单航天器综合测试全生命周期的信息化管理及多航天器并行测试过程集中监控平台^[10]; 何铭俊等人针对卫星研制测试过程中测试设备通用性不强的问题, 研究了基于 PXI 总线的硬件测试设备集成技

^{*} 基金项目: 吉林省科技发展规划项目(20180201111GX)

测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

术,有效提高了小卫星测试效率,降低了系统体积及研制成本^[1]。

总结相关研究结果可见,小卫星测试平台逐渐向通用化、智能化、信息化发展,但研究大多相对单一,或围绕硬件或围绕软件进行,忽视了硬件平台与软件平台的信息交互以及服务器与测试设备及终端的信息交互问题。本文提出的商业卫星自动化测试平台设计方法在保留了相关研究优势的基础上,深入探讨基于 PXI 总线技术的测试设备集成方法,充分利用虚拟仪器技术及 PXI FlexRIO、CompactRIO 等灵活的自定义架构进行测试设备研发,同时利用网络通信技术对硬件设备及测试终端与服务器间的数据交互进行自定义开发,构建多星并行智能测试平台及数据交互网络。结果表明,该设计方法功能正确,结构灵活,能适应商业卫星自动快速测试集成的需求。

1 自动化测试平台构建

1.1 平台架构

自动化测试平台面向商业卫星全测试周期,适用于测试性分析、分系统测试、整星测试、大型环境试验测试、大系统对接测试及发射前测试等阶段。采用浏览器/

服务器(B/S)结构组织数据分发,使用基于 PXI 总线的虚拟仪器技术进行通用测试设备研制,符合商业卫星系统小型化、通用化、批量化、周期短、成本低的特点。整体上,测试平台分为存储层、服务层、浏览器层及应用层、外部设备系统。平台结构如图 1 所示。

(1) 存储层

采用 2U12 盘位双控制器磁盘阵列存储器,存储全过程卫星测试数据、设备测试数据、报告表单等文件,与服务器通过高速光纤通道进行数据交互,阵列模块支持热插拔,可对型号卫星数据进行长时间保存。

(2) 服务层

服务层是自动化测试平台的核心,完成核心业务的实现、外部测试设备的接入及系统管理功能。核心业务用于实现卫星的全测试周期测试控制、记录、监测、存储、判读等,具体如下:

①测试过程管理,对全周期测试人员进行权限管理,为指定人员设置测试平台访问入口,并根据测试任务安排权限,系统自动显示并记录访问人员、IP 地址、时间以及进行的操作,保证对卫星操作过程可控可追溯。

②卫星数据管理,支持多模式的星地通信,包括 CAN

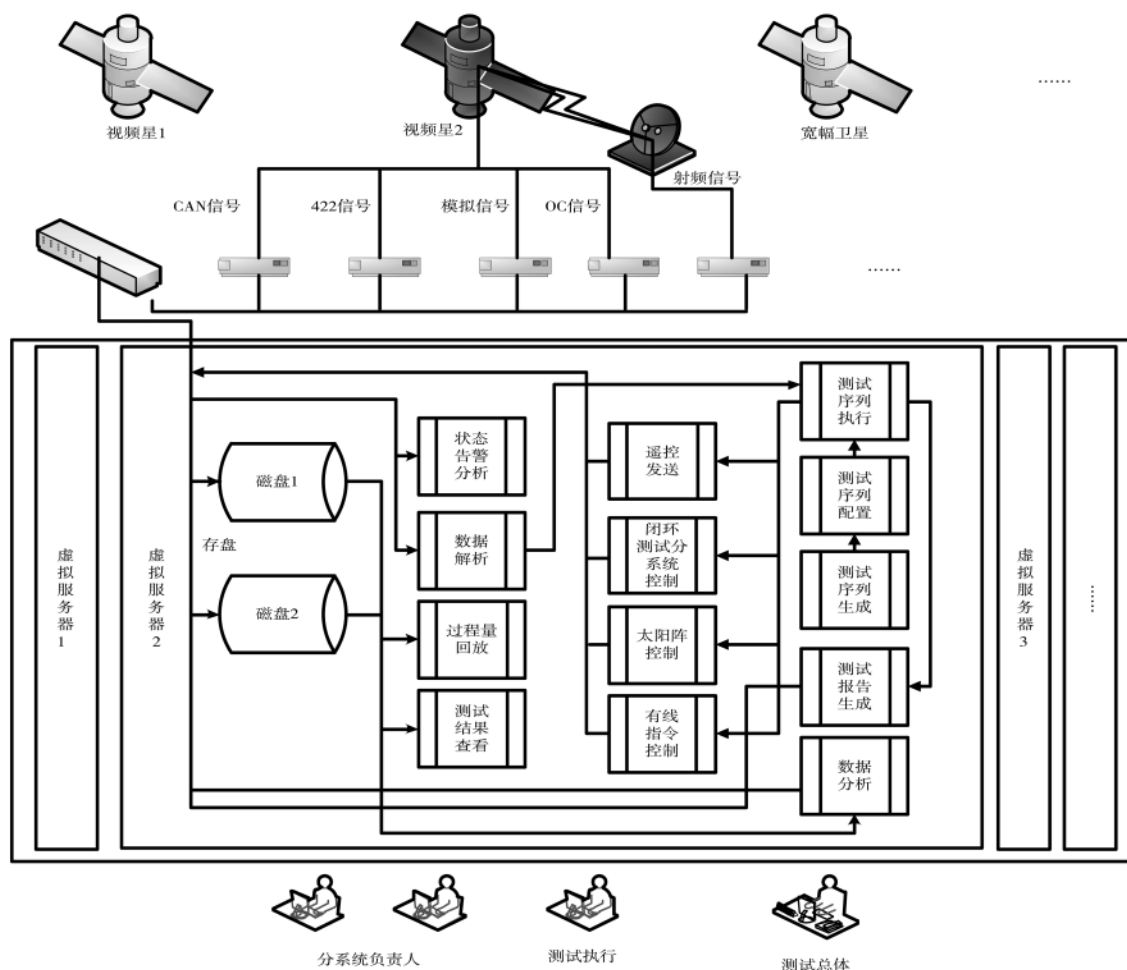


图 1 自动化测试平台架构

测控技术与仪器仪表

Measurement Control Technology and Instruments

通信、Cortex 通信、PXI 测控地检设备通信等,平台可灵活快速切换星地通信模式,无需重启或等待;对有线及射频通道卫星数据进行同步存储,与当前通信方式无关;任意通信模式下,可进行星上遥测数据的解析与实时显示、遥测参数的自定义预警与判读、遥控指令及注入数据的上行、自定义的遥测遥控模块、遥测遥控协议表格一键式导入等。

③地面数据管理,对于存储的数据,平台提供历史查询入口,包括遥控历史及遥测历史查询,查询方式支持时间段检索、关键字检索、按 UTC 时间排序等多种;显示方式支持历史列表显示、实时回放显示、历史曲线显示等多种;数据形式支持解析数据及原码的导出。

④外部测试设备管理,提供外部测试设备接口,实现平台对测试设备集中远程控制、运行状态监测、测试数据存储等功能,集成硬件测试设备包括 CAN 监视设备、太阳电池阵模拟器、脱插监控设备、闭环模拟器、GPS 模拟器、无线转发设备、动力学显示设备、分系统专用测试设备等。

⑤自动化测试管理,提供图形化及列表形式的自动化测试序列生成与自动执行功能。支持测试用例的导入导出存储、测试过程状态监视与自主判读、测试报告自主生成并存储。

(3)浏览器层及应用层

浏览器层是平台与用户的交互界面,用户通过浏览器进行平台访问,目前采用的 Firefox 浏览器可使软件达到较好的应用效果,不同的角色用户(包括测试指挥、测试执行、分系统测试监测等)通过浏览器访问软件平台,完成相应的工作。

(4)外部设备系统

自动化测试平台依赖于外部设备进行各阶段测试激励施加、测试数据采集、测试信号监测等工作。系统外部测试设备均采用开放式硬件开发环境,通过卫星局域网与平台服务层通信,用户通过应用层实现对外部测试设备的远程连接、程控指令手动及自动发送、测试数据接收并存储、测试设备工作状态监测并告警等功能。灵活的外部测试设备集成平台的实现,使自动化测试平台小型便携及通用化成为可能。

本文提出基于 PXI 通用总线架构的外部测试设备集成平台,与综测平台一起,作为小卫星自动化测试平台的关键部分,在 1.2 节做详细介绍。

1.2 基于 PXI 架构的集成测试与处理技术

测试总线技术从 20 世纪 70 年代首个测试总线标准出现以来,已经历了近四十年发展历程,其间先后出现了 GPIB、VXI、PXI、LXI 等大量测试总线标准^[12]。现代卫星测试设备构建的原则是优先选用商用仪器和设备,根据测试需求进行集成,并开发相应的软件,PXI 作为模块化的卡箱式仪器,有力推动了新型自动化测试技术的发展,促进了部队在武器装备使用、维护方面保障

能力的提升和技术进步。在卫星地面测试领域,基于 PXI 总线技术的数据采集及处理设备已经逐渐取代传统专用测试测量仪器^[13-15]。本平台硬件选用美国 NI 公司生产的嵌入式 PXI 总线系统组件及 Compact RIO 组件,通过板卡的增减进行平台功能增减;上位机软件利用图形化编程语言 LabVIEW 进行开发。

1.2.1 星地间射频链路数据传输系统

测控分系统作为卫星在轨与地面通信的唯一接口,其地面测试至关重要,同时为模拟真实星地通信状态,地面往往还需要开发专用软件进行射频数据接收,如 Cortex 软件等。本系统将星地射频通信功能与单机测试功能综合,实现了高性能的位定时同步,同时兼容多种测控体制,可进行多星、多测控体制并行数据处理。系统架构如图 2 所示。

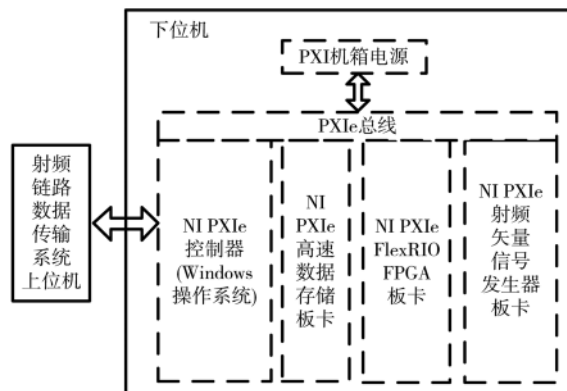


图 2 数据传输系统硬件示意图

系统由 NI PXIe 机箱、NI PXIe 控制器及 PXIe 板卡组成。控制器运行 Windows 操作系统,板卡间经由背板通过 peer to peer 方式进行数据传输,控制器与板卡间通过队列进行数据传输。用户可利用外置输入及显示设备操作控制器软件,进行程序的运行与配置。

1.2.2 姿控闭环模拟系统

姿控闭环模拟系统是对卫星姿态测量、姿态控制及对外接口等特性的测试。传统卫星姿控测试方法仿真周期通常为 50 ms、20 ms,且部分采用全物理仿真方法,操作复杂,研制成本高。本系统将仿真周期控制在 1 ms,能够真实反映卫星在轨情况;同时采用半物理仿真的方式采集卫星真实在轨飞行情况,通过系统模拟星上的电气接口及工作特性,完成姿控系统地面仿真测试;系统集成了 GPS 信号模拟器功能,解决了传统卫星测试必须单独开发 GPS 模拟器的难题。系统架构如图 3 所示。

下位机由 NI PXI 机箱、NI PXIe 控制器及 PXI 板卡组成。控制器运行 LabVIEW RT 操作系统,采用四核 Core i7 处理器,主要实现对闭环控制器的控制和运算模型的实现,控制周期在 1 ms 以内。上位机采用 NI Veristand 软件开发环境,通过 LAN 与下位机进行通信,通过上位机对动力学模型进行控制,可灵活配置各接口,

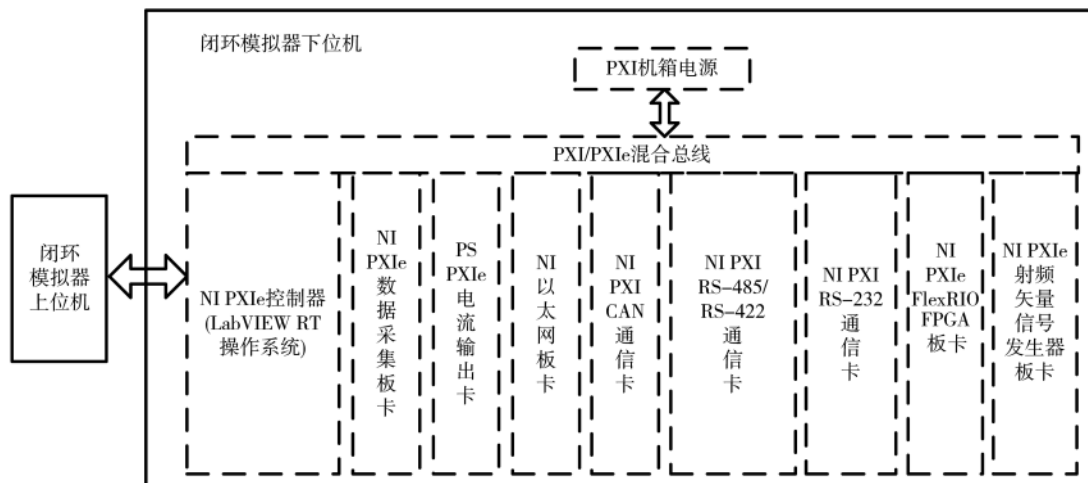


图3 信号模拟系统硬件示意图

同时显示动力学模型的计算结果。

1.2.3 卫星电源信号直采及紧急控制系统

通常情况下,地面系统监测卫星能源状态均通过分系统下传的工程参数帧确定,下传数据需要采集、组帧、下传,由遥测观察的数据往往滞后于分系统当前状态。卫星电源分系统作为卫星整星安全的核心系统,对系统实时监测及快速控制能力有较高要求,当星上出现紧急状况时,往往需要第一时间查看状态并进行卫星断电操作,若通过测控或中心机链路进行操作,数据链路长,且不能完全保证链路通畅。基于此,通过对卫星电源分系统关键点模拟量的直接采集和开关控制,构建卫星电源信号直采及紧急控制系统,从物理链路上直接对星上能源进行监视,并在紧急状况下直接控制,保证卫星安全。系统架构如图4所示。

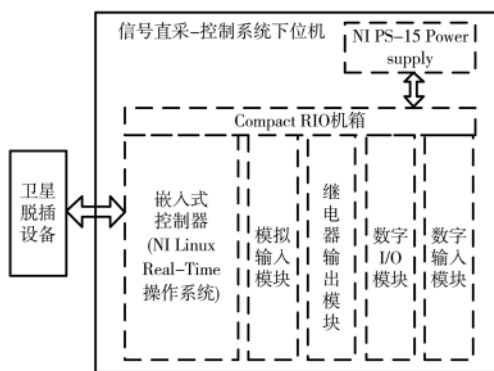


图4 模拟信号直采-控制系统

系统采用NI集成的便携式集成机箱Compact RIO架构,配合实时控制器、可重配置FPGA及工业级I/O模块,控制器运行Linux RT操作系统,实现模拟电压采集、数字电压采集、数字脉冲采集及继电器等功能。用户可通过LAN口使用上位机程序进行设备调试与控制,运行稳定后可将程序下载到实时操作系统开机自主运行。

1.3 综合测试平台

综合测试平台是自动化测试平台的中央管理系统,集测试过程管理、监控、判读、存储业务于一体,运行在服务层Linux操作系统下,用户通过浏览器访问平台,完成相应操作。较传统测试软件,本平台具有以下优势:

(1)集成了多种智能算法,可直接通过平台完成较复杂的模型搭建、测试用例生成、多级预警、故障诊断等功能;

(2)软件系统采用B/S结构,客户端基于浏览器表现形式,较传统测试软件采用的C/S结构更灵活、易用,完全避免了大量的客户端维护工作;

(3)服务层采用Java技术进行开发,提供安全、稳定的使用体验,同时能够适应多种操作系统,实现Windows与Linux跨平台使用,系统单独配置基于Windows操作系统的便携式笔记本服务器,为外场或远距离测试提供可能。

综测软件平台登录界面及主要功能页面分别如图5、图6所示。



图5 综测平台登录界面

1.4 基于网络通信技术的数据分发与交互

随着科学技术的不断发展,局域网也正逐步向无线化、多网合一的方向发展,在这个多网合一快速发展的过程中,带动了多种无线技术的广泛应用。WiFi便是其

测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments



图 6 综测平台主要功能界面

中一种,已经被广泛应用于智能家居、车载等领域。

小卫星自动化测试平台从本质上看是一个数据传输与处理平台,包括硬件测试平台与服务层的数据交互、服务层与存储层的数据交互、服务层与终端之间的数据交互,大量数据的实时稳定传输是需要考虑的重要问题。

考虑传输数据对处理速度、可靠性、实时性的要求,配置卫星整体局域网,充分利用各种网络通信技术的优点,有线通信与无线连接相结合,构建自动化测试平台数据分发与交互系统。具体包括以下内容:

(1)TCP/UDP 协议结合的测试数据传输。平台服务层及存储层作为相对独立的整理固定于一个机箱,内置千兆交换机,服务层通过 LAN 口与交换机相连;测试大厅每个工位分别配置网络交换机,通过网线与服务器机箱内总交换机相连;每颗卫星的地面测试设备通过 LAN 口与相应工位的网络交换机相连。由此,即构建了总体-分布式的硬件网络环境。

对于要求快速、小量传输的数据(如射频链路遥测数据),采用 UDP 通信协议,提高数据传输速率;对于数据可靠性要求较高的数据(如星上直采数据),采用 TCP 通信协议,最大限度保证数据有效性。

(2)高速光纤数据传输。为保证服务层实时数据传

输,平台服务层与存储层采用光纤通信技术,利用其通信容量大、抗电磁干扰、损耗低的优势。

(3)基于 WiFi 技术的数据管理。传统测试系统中,客户端通过有线局域网访问服务软件,终端的摆放位置往往受到网线长度、交换机位置的约束,造成大量地面测试人员或监视观察人员集中在较小的区域内,且交换机网线众多,不仅需要考虑走线,当终端移动时还需考虑网线的对应问题。

商业卫星地面测试较为灵活,会出现多颗卫星并行测试的情况,终端也不会固定使用,因此提出利用无线保真技术(WiFi),构建移动终端的无线传输体系。在服务器机箱内部署 WiFi 通信模块,测试终端通过 WiFi 加入局域网,访问服务层,即可实现无线数据管理。

利用 WiFi 技术,也使平台终端扩展成为可能。传统的测试终端多为 PC 或工控机,本文提出的平台允许平板、手机远程访问服务层,大大完善了测试体系。

2 试验结果与分析

自动化测试平台研制完成后,应用于某型号卫星的完整测试周期,时长约为 4 个月,包括单机对接测试、整星桌面联试、大型环境试验、总装测试及发射场测试等阶段,测试地点包括电子学测试大厅、环境试验站、总装大厅、发射场测试厂房,连续加电时间长达两个月。在测试期间均按照计划顺利完成任务,数据进行了实时保存、服务器运行稳定、未出现误码等情况。测试过程中具体指标见表 1。

除上述自动化测试平台的指标验收外,平台在测试任务中验证了上行遥控链路、下行遥测链路、CAN 总线监视与数据存储、关键参数二级告警等功能,功能均正常,某型号卫星现已在轨运行超过 4 个月,整星状态良好,间接证明了地面自动化测试平台的有效性。

3 结论

采用商业卫星自动化测试平台进行卫星测试,具备

表 1 自动化测试平台验证结果

序号	项目类别	项目名称	实测结果
1	硬件测试设备集成平台	测控综合测试设备	无误码,通信正常
2		闭环模拟设备	速率匹配,正常
3		信号监测设备	指令与状态均正常
4		其他测试设备	运行稳定
5	综测服务平台	遥测遥控功能	实时显示存储,历史查询正常
6		自动化测试功能	序列生成正确,自动执行过程可监测可控
7	测试模式	服务器机箱	运行稳定可靠
8		便携式服务器	设备便携,功能正常
9		测试指挥车测试	机动性强,功能正常
10	测试系统重构	不同场地测试设备展开、收拢与重构	展开与重构时间低于 1 小时;收拢时间低于 1.5 小时
11	并行测试	多颗卫星同时测试	5 颗卫星同时测试正常
12	自动化程度	测试项自动生成比例	高于 60%
13		测试项自动化测试比例	高于 80%
14	测试时间	单项测试项测试时间	缩短 30% 以上

测控技术与仪器仪表 Measurement Control Technology and Instruments

传统卫星测试系统功能及性能特点外,在研制成本、系统体积、重构时间及自主程度等方面均有较大改善。通过某型号卫星地面测试任务的充分验证,符合商业卫星快速并行测试技术需求,保证了商业卫星整体研制进度,促进了自动化测试技术的发展。

参考文献

- [1] 肖潇.商业遥感卫星市场现状及发展研究[J].卫星与网络, 2017(7): 62-64.
- [2] 薛永军,王东伟.国外商业遥感产业创新动态及相关启示[J].中国航天, 2017(8): 6-10.
- [3] 袁媛,葛宇,李楠,等.关于商业卫星质量与可靠性控制的思考[J].质量与可靠性, 2016(6): 21-23.
- [4] JONES H. Integrated systems testing of spacecraft[C]. The 37th International Conference on Environmental Systems (ICES). Chicago: Aviation Industry Development Research, 2007.
- [5] 富小微,王华茂,闫金栋,等.航天器系统级测试现状分析[J].航天器工程, 2017, 26(1): 120-126.
- [6] 张伟东,董振兴,朱岩,等.星载固态存储控制器标准化通用仿真测试平台设计[J].电子技术应用, 2019, 45(7): 117-120.
- [7] 吴伟,张威,潘顺良,等.自动判读系统在载人航天器电测中的应用[J].航天器环境工程, 2011, 28(6): 628-631.
- [8] 戴润峰,袁媛,冯孝辉.基于工作流的小卫星自动化测试系统设计方法研究[J].计算机测量与控制, 2011, 19(12): 2912-2915.
- [9] 何永丛,潘顺良,李鸿飞.载人航天器自动化测试系统设计与应用[J].计算机测量与控制, 2015, 23(10): 3258-3259, 3263.
- [10] 储海洋,何晓宇,宋宏江,等.航天器综合测试信息管理平台的构建与应用[J].航天器工程, 2015, 24(6): 123-128.
- [11] 何铭俊,洪雷,曹丽君.一体化小卫星综合测试系统的设计[J].计算机测量与控制, 2016, 24(9): 15-18.
- [12] 郭恩全,苗胜.测试总线发展的回顾与展望[J].电子测量与仪器学报, 2009, 23(8): 1-6.
- [13] 何俊,郑靖,梁斌.基于 PXI 的高速并行数据采集系统设计[J].自动化应用, 2010(11): 19-20, 23.
- [14] 龚潺,张丹,桑小冲.基于 PXI 的卫星地面测试信号采集控制系统[J].电子测量技术, 2015, 38(3): 129-132.
- [15] 高茹,曹丽君,曾鸿.基于 PXI 总线的小卫星扩频应答机模拟器的设计与实现[J].计算机测量与控制, 2016, 24(10): 226-229.

(收稿日期: 2019-08-16)

作者简介:

徐婧(1989-),通信作者,女,博士研究生,中级研究员,主要研究方向:卫星测试、图像处理, E-mail: xujing.bei-hang@163.com.

邢斯瑞(1987-),男,硕士研究生,副研究员,主要研究方向:卫星总体、测试。

刁国影(1985-),女,硕士研究生,中级研究员,主要研究方向:卫星通信、射频测试。

(上接第 18 页)

4 结论

通过采取本文基于 CBB 架构宽带通信雷达一体超外差接收机设计方法,运用文中的 7 种 CBB 研制出 2U (1U=44 mm) 19 寸通信雷达一体接收机,频段覆盖 0.1 GHz~18 GHz,只需要更换射频预选前端 CBB 就可以满足目前项目所需要的多种接收机要求。随着 CBB 库的种类的不断增多,后续可以满足更多项目的接收机快速拼接设计。

采用 CBB 技术进行接收机设计,可以最大限度地继承与利用已有的硬件和软件研究成果,从而降低研制风险,避免同一水平上的重复研制,缩短研制周期,节省研制费用。基于以上分析,CBB 架构的设计方法必将成为接收整机的主流设计模式。

参考文献

- [1] 张宝辉.模块化总体设计研究[D].长沙:国防科学技术大学, 2004.
- [2] 金烈元.武器装备的通用化、系列化、组合化[M].北京:国防工业出版社, 2008.
- [3] 周辉.产品研发管理[M].北京:电子工业出版社, 2012.
- [4] 张昌菊.军品研制中的 CBB 管理研究[J].航天标准化, 2012(2): 4-8.
- [5] 马嵩.一种超宽带高精度侦测接收机的设计[J].电子设计工程, 2019, 27(3): 189-193.
- [6] 成彦. Ka 频段收发组件模块化设计技术[J].电讯技术, 2012, 52(6): 960-963.

(收稿日期: 2019-12-20)

作者简介:

马嵩(1986-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:宽带微波电路设计。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所