

适用于多星并行测试的通用测控地面测试平台设计与实现

高括¹, 刘磊^{1,2}, 杨杰峰¹, 张铭¹

(1. 上海微小卫星工程中心, 上海 201203; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 随着小卫星大规模组网应用的不断增多, 传统单颗卫星测控地面测试系统已不能满足批量化、并行测试的需求; 提出了一种适用于多星并行测试的通用测控地面测试平台的设计方法, 设计并给出了适用于典型三颗卫星并行测试的系统方案以及实施过程; 该平台设计在原有地面测试平台中增加多星并行测试配置项, 测试人员只需根据需要选择相应的卫星进行测试; 该平台功能更加完善、通用性更好, 已成功应用于某卫星星座的并行测试, 大大节省了人力、缩短了星座卫星测试时间, 收到了良好的效果。

关键词: 组网卫星; 并行测试; 地面测试平台

Design and Implementation of Universal TT&C Ground Test Platform for Multi-Satellite Concurrent Testing

Gao Kuo¹, Liu Lei^{1,2}, Yang Jiefeng¹, Zhang Ming¹

(1. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China)

Abstract: With the increasing use of Micro-satellite large-scale networking applications, traditional single-satellite measurement and TT&C ground test systems have been unable to satisfy the requirements for batch and concurrent testing. This paper proposes a design method for a universal measurement and TT&C ground test platform that is suitable for multi-satellite concurrent testing. It also designs and presents a system solution and implementation process for three typical satellites concurrent test. The platform is designed to add configuration items of multi-satellite concurrent test to the original ground test platform. Testers only need to select the appropriate satellite for testing. The platform is more functional and more versatile. It has been successfully applied to the concurrent testing of a satellite constellation, which has greatly saved manpower and shortened the constellation satellite test time, and has received good results.

Keywords: networking satellite; concurrent testing; platform of ground test; satellite constellation

0 引言

随着新航天任务的发展, 低成本、研制周期短、发射更为便捷的小卫星星座或者编队卫星越来越受到人们的青睐^[1-2], 但是能够满足批产化、并行化测试的测控地面测试平台相对较少^[7-10]。文献 [1] 侧重于卫星并行测试中测控前端的通用化设计, 而测控地面测试平台及具体实施方法涉及较少; 文献 [3] 对面向批产化的小卫星自动化测试系统的总体设计方法进行了讨论。

设计以某组网卫星为例系统讨论了多星(以典型三星为例)并行测试的通用测控地面测试平台的设计方法, 该平台已经成功应用于某组网卫星的初样、正样以及批产阶段的接口测试、功能测试、模飞试验、热真空试验、整星 EMC 试验、振动试验、磁试验和老练试验等各阶段的试验任务, 平台功能性能稳定, 满足并行化、批量化测试需求。

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-07-16。

作者简介: 高括(1987-), 男, 河南商丘人, 硕士, 工程师, 主要从事卫星测控总体设计、整星自动化测试系统设计等方向的研究。

大大提高了卫星测试效率, 有效缩短了卫星的测试时间。

1 方案设计

1.1 设计目标

通用测控地面测试平台旨在满足多星并行测试的需求, 兼顾卫星串行测试, 具备灵活的可配置性。可根据型号任务需求灵活选择测试卫星的数量, 合理安排试验计划, 加快卫星型号的研制进度。本文设计的平台具有的主要特点有适用多星并行测试且兼顾单星测试的灵活性、通用性、适应远距离测试、自主识别并解析卫星遥测等。

灵活性: 可根据任务需要灵活配置参与测试的卫星数目, 能够适应卫星的批产并行化测试的需求;

通用性: 该平台测控前端软件的开发是基于人机交互较好的 LabWindows CVI 和 Microsoft SQL Sever 数据库开发的, 具有灵活的可配置型, 通用性较强, 通过修改相应的遥测解析以及遥控配置项即可使用不同卫星型号的测试任务;

适应远距离测试: 该平台射频远距离传输采用的是光纤信号传输方案, 射频信号转化为光信号后传输十几公里

甚至上百公里基本是零衰减。当总装厂房距离综测间距离较远的时候,该方案也能够较好的满足测试需求;

自主识别并解析卫星遥测:该平台的测控前端软件能够自主识别相同组帧格式的卫星的遥测数据。该平台软件能够跟据收到的卫星遥测数据自主判别卫星星号,并调用对应卫星的遥测遥控配置,进而完成遥测遥控相关测试任务。这点在人员短缺的情况下尤为重要。

1.2 平台系统设计

完整的卫星测控地面测试平台应当支持测试卫星与地面的星地链路和卫星与中继卫星的中继链路。本文设计平台的核心为一台基于 PXIe 总线板卡形式的多通道测控综合地检设备和基于 LabWindows CVI 和 Microsoft SQL Sever 数据库的通用可配置测控前端软件。多星(本文以典型 3 颗卫星为例)并行测试测控测试平台场景连接图如图 1。

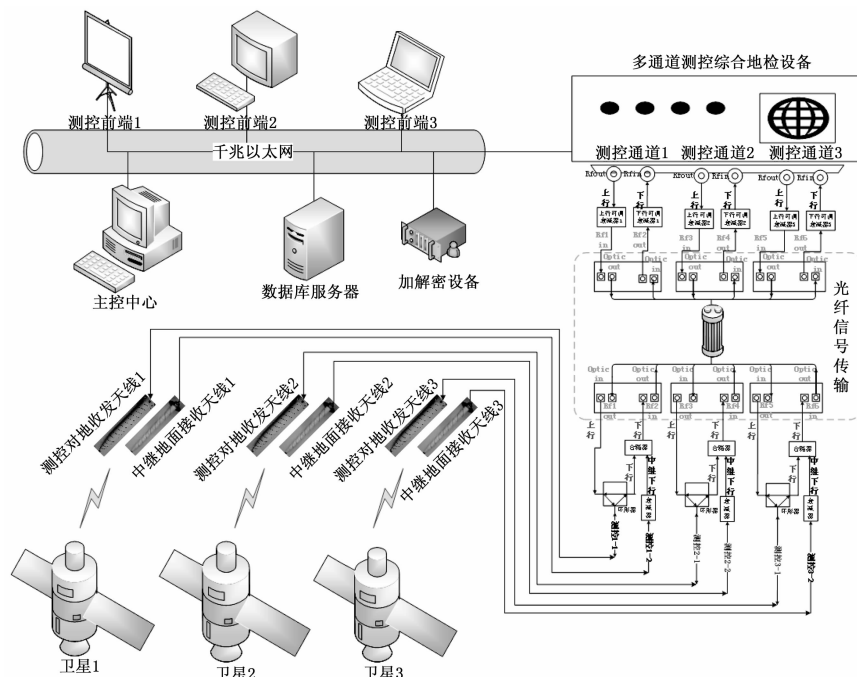


图 1 多星(典型 3 颗星)并行测控测试平台场景连接图

测控地面测试平台主要分布在综合测试间和总装测试厂房两个地方,两者通过光纤连接通信。数据库服务器主要负责卫星全周期的遥测遥控数据的存储;测控前端机负责测控前端软件的运行及测控数据的处理、转发等;加解密设备负责测控上下行的加解密工作;测控综合地检设备负责遥测、遥控、测距、测速及时差测量、业务数据通信、上行信号调制、下行信号解调、变频等任务,采用 PXIe 板卡集成架构,它的优点是集成度高、操作简便、价格便宜等;光纤信号传输系统主要负责综合测试间和总装测试厂房之间的信号通信,优点是信号传播距离远、损耗小。综合测试间的测控前端、加解密设备、

测控综合地检设备、主控中心等设备通过千兆以太网 TCP/IP 或者 UDP 协议进行通信。

平台为适应部分有加解密需求的型号,本平台设计预留加解密设备接口,能够实现快速开发并投入使用。

下面对多星并行测控测试平台的关键部分进行详细阐述:

多通道测控综合地检:

多通道测控综合地检与卫星测控应答机构成的测控系统能够完成遥测、遥控、测距、测速及时差测量、业务数据通信等基本功能。该地检采用 PXIe 架构,可扩展性强,通道数可以根据任务选择,每个通道均可以独立完成一颗卫星的遥控遥测信号的处理,其硬件组成框图如图 2 所示。

中频信号调理单元为多通道测控综合地检的核心单元,它完成中频信号的采集、数字下变频、解调制扩、数据恢复等功能,实现遥测、测距和业务数据接收;与此同时能够生成遥控、测距和业务模拟数据,完成扩频和调制后以 70 MHz 中频发送给上变频模块,然后送到射频输出口。

上变频模块负责将 70 MHz 的中频信号上变频的 S 频段,下变频模块负责将接收到的卫星 S 波段的测控射频信号下变频到 70 MHz 中频。上、下变频模块均能够覆盖整个 S 频段,具有很好的通用性。

该地检设备还提供了高精度铷钟板卡,驯服后的时钟精度达到了 10^{-11} 量级,它提供了相当于原子钟的功能,为整个综合地检的多个通道提供稳定的时钟参考。具有集成化程度高、精度高、价格便宜等优点。

多通道综合测控地检设备具有简单的外部接口,每个通道可以相对独立对应一颗卫星的测试任务,只有上行信号输出和下行信号输入两个射频对外接口,基带信号、中频信号、上下变频等均由设备内部连接通信,增加了设备的可靠性、稳定性、

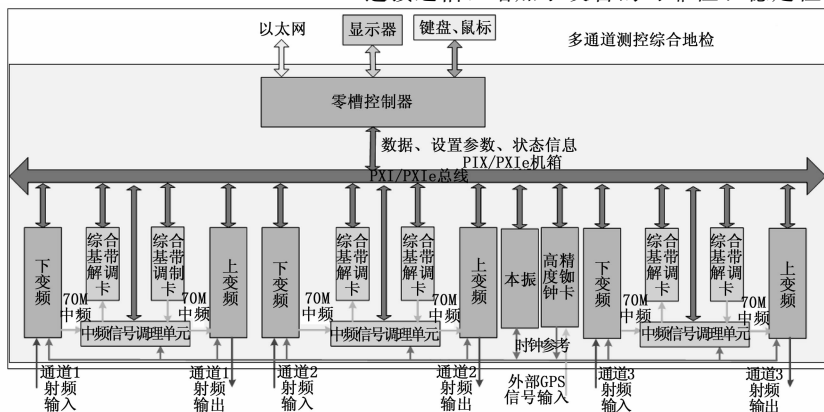


图 2 多通道测控综合地检功能框图

易操作性。

2 多星并行测试测控前端软件

多星并行测试的通用测控地面测试平台的软件为本设计的重要一环。它不仅包含传统的测控前端软件的遥测遥控处理, 还具有自主识别对应卫星的遥测信息, 并调用相应卫星的处理函数以及配置项进而对收到的卫星遥测数据进行解析、实时处理、分发实时显示、遥测原始数据以及解析后的遥测数据及时进行数据库存库等一系列的操作; 同时该软件还能够和测试中心通过 TCP/IP 协议进行数据通信, 和加解密设备通过 UDP 协议进行通信。

测控地面测试平台软件主要由初始化模块、遥控及自动化测试、遥测及数据分发、数据库模块和数据处理函数库 5 个模块组成, 主要功能如表 1 所示。测控地面测试平台测控前端软件采用友好的人机交互界面, 主界面如图 3 所示, 主要分为 8 个功能区域, 下面逐一进行介绍。

表 1 测控前端软件主要模块

模块名称	函数名称	主要功能
初始化模块	Initial. c	数据库连接, TCP/IP 及 UDP 建立, 主界面及相关控件、全局变量初始化, 读取配置文件, 创建日志等
遥控及自动化测试	TcAndAuto Test. c	读取遥控配置组帧生成测控指令, 图形界面化遥控面板, 并行遥控指令转发及自动化测试等
遥测及数据分发	TmAndDataDis. c	自主判别卫星遥测, 实时接收遥测数据并解析、按分系统实时显示、存库及遥测分发处理等
数据库模块	SqlData Pool. c	前端软件与数据库接口, 遥控遥测信息存储、管理、查询等
数据处理函数库	Process Func. c	配置整个组网卫星所有卫星的遥测遥控处理相关函数, 增加卫星型号方便, 扩展性可移植性强



图 3 多通道可配置测控前端软件主界面

区域 1: 测控前端软件功能选项区, 包括开始/结束测试任务、配置项加载、功能测试入口、卫星通道选择、测试工具选择等;

区域 2: TCP/IP 通道建立显示区, 包括测控前端与

控综合地检设备、综测主控中心、数传设备的连接显示情况, LED 绿灯表示连接成功, 红灯表示连接失败;

区域 3: 实时显示整星遥测信息, 显示内容包括遥测帧信息, 遥测分包信息以及按分系统显示的解析后的遥测量信息, 便于各分系统设计师快速定位要关注的遥测量;

区域 4: 整星重点关注的遥测量固定显示;

区域 5: 显示接收卫星遥测对应的卫星编号以及遥控指令添加发送界面;

区域 6: 已添加的遥控指令显示及发送指令选取区域;

区域 7: 测控前端软件操作记录显示区域;

区域 8: 多星并行测试卫星通道选择区域。

该测控前端软件图形操作界面的设计为测试人员与测试平台系统提供实时互动功能, 方便测试人员实时监测卫星状态和遥控指令的操作^[4-6]。测控前端软件主要分为上行遥控和下行遥测处理两个部分, 具体处理流程见 2.1~2.2 章节。

2.1 遥控处理流程

多星并行测试的通用测控地面测试平台软件的遥控处理过程相对于传统测控前端软件增加了卫星通道选择、遥控明密通道选择等, 能够适应多星并行测试的需求。遥控处理流程如图 4 所示。

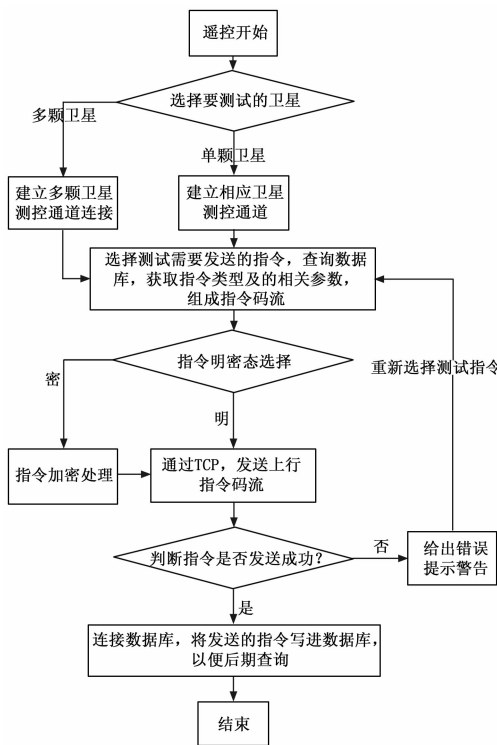


图 4 多星并行测试遥控处理流程图

卫星测试开始后, 上行遥控首先选择要测试的卫星号, 可以选择单颗卫星, 也可以选择多星同时测试模式; 根据选取的卫星号加工并生成相应遥控指令; 根据测试需求选择遥控明态通道或者遥控密态通道测试; 然后通过 TCP/IP 协议发送到测控综合地检设备进行调制、上变频、发送给

相应卫星；指令发送成功将发送的指令存入数据库，如果指令发送不成功则给出错误提示警告，重新生成相关测试指令。

2.2 遥测处理流程

多星并行测试的通用测控地面测试平台软件的遥测处理过程相对于传统测控前端软件遥测处理增加了卫星遥测自动识别功能、遥测数据分发功能等。遥测处理流程如图 5 所示。

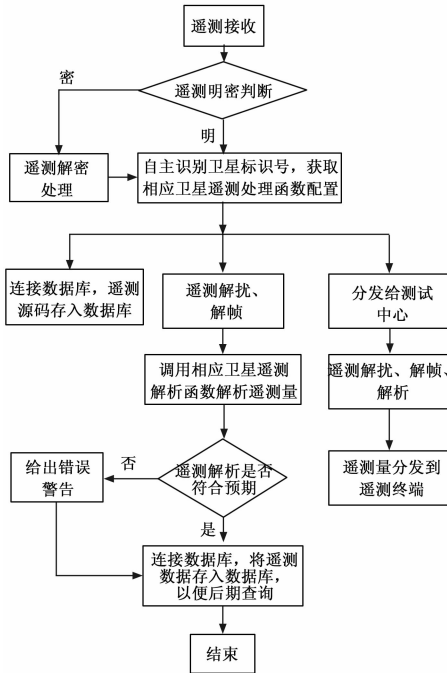


图 5 多星并行测试遥测处理流程图

遥测接收开始，测控前端软件首先判断遥测数据的明密态信息（如果是密态的数据，先要经过解密处理），通过的遥测帧副导头自动识别卫星号，选择相应卫星的遥测处理函数配置，然后将遥测原始数据存库，接下来遥测帧解扰、解帧处理，同时分发给测试中心进行后续处理；遥测解析后将各遥测量存入数据库，如果出现遥测量超出预先设置的门限，软件自动给出错误警告，并将错误的信息存入数据库。

该软件运行在分布式测控前端工控机上，根据参与测试的卫星数量进行配置，每台参与卫星测试的测控前端机均配有相应的数据库，用于存储对应卫星的遥测原始数据以及解析后的遥测数据和遥测参数配置。这样既保证了卫星的并行测试需求，又能将各个卫星的数据实时处理、存库、广播分发各个分系统的显示终端，通过物理隔离使得不同卫星的数据相对独立处理，增加了系统的鲁棒性和可维护性，提高了系统稳定性。

3 光纤信号传输系统

为满足卫星总装厂房和卫星综合测试间距离较远的测试需求，本文测试平台选用光纤传输（图 1 绿色虚线内）。

综合测试间和总装厂房各安装一套多通道的光端机，用于将测控射频信号和光信号进行转化，中间用光纤进行传输。光纤传输的优点是信号传播距离远、差损小。

3.1 射频信号调节模块

卫星型号要求测控支持对地测控和中继测控两种模式，由于卫星采用测控天地一体化设计，中继上行和对地测控的上行信号同频同码且分时工作，整星测控信号一共可分为对地/中继测控上行、对地测控下行、中继测控下行三路。为保证多通道测控综合地检的一组上下行通道满足一颗卫星的测试任务，必须对三路测控信号进行射频调节及整合。

为此，设计了一套地面射频信号调节方案，单通道的连接图如图 6 所示。由于中继下行信号比对地下行信号强 10 dB 左右，而对地下行和上行信号使用收发公用天线与卫星进行信号交互，在对地测控天线下端连接一个环形器实现上下行复用一天线，环形器本身有 3 dB 左右的衰减，因此对地下行信号比中继下行信号弱 13 dB 左右，需要在中继下行链路中加入 13 dB 的大功率衰减器，以保证对地下行信号和中继下行信号到达测控综合地检入口电平的一致性。

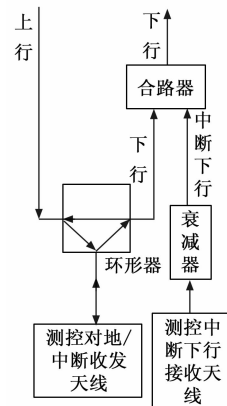


图 6 射频信号调节示意图

4 试验验证

适用于多星并行测试的测控地面测试平台已经成功应用于某组网卫星的各阶段的测试任务，平台建成 1 年多时间，累计服役于十几颗卫星。非常好的完成了多星并行测试任务，成功完成多星并行测控指令上注，多颗卫星并行测试的遥测数据接收、解析、转发、存储等，平台运行稳定可靠，收到了很好的效果。

5 结论

针对组网卫星研制周期短、测试任务重、测试人员短缺的特点，设计并实现了适用于多星并行测试的测控地面测试平台，详细介绍了平台的系统构成、工作原理和关键技术。该平台的设计实现提高了卫星测试效率、缩小了测试人员队伍、间接缩短了批产卫星的研制周期，达到了很好的使用效果，为多星并行测试的测控地面测试平台的设计提供借鉴。

（下转第 12 页）