

基于半实物的 S 频段卫星测控仿真系统平台设计

杨永安^{1,2}, 韩忠民², 冯祖仁¹, 李光明³, 张宏伟²

(1. 西安交通大学, 西安 710049; 2. 西安卫星测控中心, 西安 710043;
3. 西安政治学院, 西安 710054)

[摘要] 该仿真系统是为了满足 S 频段卫星测控演练的需要而提出的。根据航天测控系统和 S 频段测控设备的特点, 明确了仿真系统的组成及功能, 并对主要部分进行了详细的描述; 确定了仿真系统运行工作模式、主要技术指标、接口之间关系; 结合实际应用情况, 通过与真星进行对比, 证明通过建立半物理仿真数学模型, 达到了在数据层面上与真星具有等价性, 并展望了未来发展方向。

[关键词] 系统仿真; 航天; 测控系统; S 频段; 卫星

[中图分类号] TP391.9; TN927+.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)12-0085-06

1 引言

20 世纪 70 年代末, 世界无线电行政大会把 S 频段规定为空间飞行器测控频段后, 法国、欧空局、日本等相继建成了多个 S 频段测控站, 并相互组成全球性的 S 频段测控网。80 年代中后期, 我国与巴西联合研制资源一号卫星, 由于巴西使用 S 频段测控站, 因此我国首先在资源一号卫星上采用了 S 频段测控体制; 随后国内研制的实践五号等后续卫星也相继采用 S 频段测控体制。为了与国际航天测控接轨, 具备国际间同频段测控联网的能力以及载人航天器测控需要, 我国也研制了 S 频段测控设备, 组建了 S 频段测控网, 为资源一号等 S 频段卫星测控提供相应支持。为了圆满完成 S 频段卫星的测控任务, 研制开发了 S 频段多星测控仿真系统。该系统属于半实物仿真范畴, 通过和真星标定后, 在信道的电气性能和数据层方面与真星具有等价性, 即从测控站计算机输入端看, 仿真系统模拟产生的测控数据流与真星飞行时的测控数据流一致, 使航天测控系统处于类似实战的环境中, 可用

于星地大回路演练, 以检验测控软件和常数装订的正确性, 培训任务指挥、操作人员, 使他们熟悉卫星正常测控过程和故障情况下的应急处置。另外, 该系统 TT&C 部分兼用于系统标定、星地对接、零值传递和设备校飞等。

2 系统组成及功能

2.1 系统组成

根据航天测控系统的任务以及 S 频段测控设备的特点, S 频段卫星测控仿真系统由 S 应答机、专用接口、计算机、仿真软件、控制台以及电源和连接电缆等组成^[1]。该系统所有设备都安装在监控台中, 构成一个有机整体, 其连接示意图如图 1 所示。

2.2 系统功能

该系统可以模拟卫星各个飞行阶段的状态, 并与航天测控系统构成测控回路, 实现以下功能:

- 提供 S 频段信标和测距转发通道, 完成 S 频段射频、视频仿真;
- 完成星地频率双捕, 射频或视频遥控指令

[收稿日期] 2004-04-12; **修回日期** 2004-06-07

[基金项目] S 频段卫星测控仿真系统 (委字 2130 号)

[作者简介] 杨永安 (1963—), 男, 山东宁津县人, 西安卫星测控中心高级工程师, 西安交通大学电子与信息学院博士研究生, 研究方向为复杂系统的建模与仿真

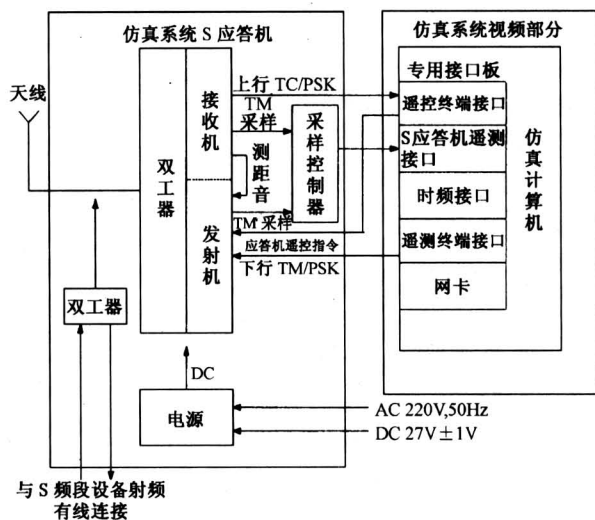


图1 S波段卫星测控仿真系统连接示意图

Fig.1 Sketch chart of S-band satellite TT&C simulation system

接收、解调、译码和执行效果仿真；

- 模拟卫星各类遥测数据的动态生成、格式加工与发送，能通过读取在轨卫星的实测遥测数据，自动设置仿真系统的技术状态；
- 完成星上 OBDH 分系统管理、程控指令执行功能以及轨道动力学和姿态动力学仿真^[2]；
- 通过人机交互手段，可实现部分卫星故障仿真，包括太阳帆板未展开、姿态失去基准、星载数据管理分系统和星载姿轨控计算机故障等仿真；
- 接收地面 S 测控设备遥测分机动态模拟源的中断信号，并向其发送遥测数据（PCM 码），接收远程监控系统（RMCS）转发测控中心的起飞时间 T0 和测控计划。

仿真系统各部分功能如下：

S 应答机：主要提供仿真系统和地面 S 测控设备间信息传递的通道，包括接收、解调由地面 S 测控设备发射的上行遥控信号，为遥控终端接口提供视频信号；接收来自遥测终端接口的遥测视频信号，以调相形式下行发射；接收、解调由地面 S 测控设备发射的上行测距信号，并送发射机调制后返回地面；为地面 S 测控设备提供跟踪信标。

专用接口：包括遥控终端接口、S 应答机遥测接口、遥测终端接口、时频接口、网卡等，其主要功能为：完成遥控视频信号的解调、遥控直接指令的译码、其他类型的遥控指令和注入数据的接收；S 应答机遥测参数的接收、遥控指令控制、遥测信

号发送和副载频调制；接收测控站 B 码时统信号并进行解码、用内部 5 MHz 频率信号产生时钟；接收调制解调器输出的数传信息；实现与地面远程监控系统的联网。

计算机：是整个仿真系统的核心，其主要功能为：遥控指令功能模拟、注入数据处理、遥测数据产生、卫星轨道动力学和姿态动力学模拟、外测数据产生和发送、专用接口驱动和信息显示等。

仿真软件：包括专用接口软件和计算机仿真软件两大类。专用接口软件完成一级信息处理，实现各接口的任务和功能，采用 8031 汇编语言编程；计算机仿真软件完成二级信息处理，采用模块化的设计方法。其主要功能为：火箭分离后消除初始分离姿态扰动、太阳电池帆板展开、消除太阳电池帆板展开的姿态扰动、卫星捕获地球和帆板捕获太阳、推力器姿态控制、动量轮启动后转入正常姿态控制、卫星由初始轨道到冻结轨道过程中各轨道段的轨道变化和机动过程、星上时间修正、卫星重要参数的变化过程和变化量、太阳帆板未展开情况下的地面遥控展开帆板的操作、卫星姿态失去基准时的工作模式切换和控制操作、星上姿轨控计算机故障和地面对其维护操作等仿真。

监控台：为使仿真系统设备工作可靠、维修方便、整齐划一，将所有设备安装在监控台内，监控台为双单元控制台。

3 系统硬件设计

3.1 设计原则

贯彻“实用、可靠、先进、经济”的原则，满足 S 频段卫星的仿真功能要求。采用专用接口、计算机和仿真软件来实现星上 OBDH 功能，在基本硬件的配合下，用软件来适应各种卫星的不同要求，增加了系统的灵活性。S 应答机设计模块化，便于各种环境下的操作使用。接口板采用先进的数字调制、解调技术，具有频段宽、频点多、可编程、使用灵活、集成度高等特点。采用微机技术、信息分布式处理技术，充分发挥软件作用，提高仿真系统的灵活性和可扩充能力。另外，在设计时特别强调以下内容：

- 仿真系统的通用性：为适应多星测控和应用的需要，视频部分要适应不同的 S 频段测控设备，覆盖目前已知和后续未知 S 频段卫星；
- 专用接口板的驱动：设计时要考虑计算机

的升级，在更新计算机时不用重新开发新的程序；

- 专用接口板程序加载：采用每次开机启动系统应用软件时再加载的方式，便于板上程序修改，如需增减某些功能，更改应用程序后可直接加载，不需用专用设备重新固化程序；

- 接口板与计算机通信：采用双口存储器，双方可同时操作该存储器，提高了系统的实时性。

3.2 主要技术指标^[3]

3.2.1 S 应答机

天线	上下行频率范围	与地面 S 测控设备配套一致
	天线形式	分定向和全向两种
	极化形式	圆极化(左右旋)
	波瓣宽度	全向 $\pm 80^\circ$ (-12dB) $\pm 70^\circ$ (-7dB) 定向 22° ($\geq 12\text{dB}$)
双工器	工作频段	与地面 S 测控设备配套一致
	收发隔离度	$\geq 80\text{dB}$
	插入损耗	$\leq 3\text{dB}$
	VSWR	$\leq 1.25(50\ \Omega)$
接收通道	工作频率	固定频点
	跟踪范围	$\geq \pm 115\text{kHz}$
	跟踪速率	$\geq 32\text{kHz/s}$
	接收机灵敏度	-112dBm
	AGC 作用范围	$-112\sim -50\text{dBm}$
	环路带宽	800Hz
	噪声系数	$\leq 2.5\text{dB}$
	输出视频幅度	$0.6\sim 1.2\text{Vrms}$
	调制方式	PM
	遥控副载频范围	与地面 S 测控设备配套一致
	测距音频率范围	与地面 S 测控设备配套一致
发射通道	发射频率	固定频点
	发射功率	500mW
	频率稳定度	$2.5\text{E}-5/\text{日}$ (非相干模式)
	杂波抑制	$\geq -50\text{dBc}$
	调制方式	PM
	遥测副载波范围	与地面 S 测控设备配套一致
	测距音频率范围	与地面 S 测控设备配套一致
	调制范围	$0.1\sim 2\text{rad}$ 可调
	调制线性度	优于 $\pm 5\%$
	调制频响(测距)	$\pm 0.5\text{Db}$
电源	当输入电压为交流电源 $220\text{V}, 50\text{Hz}$ 或直流电源 $27\pm 1\text{V}$ 时, 应答机能正常工作	

3.2.2 专用接口

遥控终端板	调制体制	PSK, MFSK
	码速率	与地面 S 测控设备配套一致
	副载频范围	与地面 S 测控设备配套一致
	码型	NRZ-L, NRZ-M, SP-L, RZ
	输入信号幅度	$0.3\sim 1.2\text{Vrms}$
时统板	输入信号	IRIG B 码信号(直流码)
	内部时统	5MHz 晶振, 计时频率由计算机设置
	内外时统选择	由计算机设置完成; 秒中断和计算机设置的定时中断
中断接口板	接收遥测动态模拟源的中断信号	
遥测终端板	调制体制	PSK, DPSK
	码速率	与地面设备配套一致
	副载频	$5\sim 200\text{K}$ 连续可变
	输出幅度	$0.5\sim 4\text{Vpp}$ 范围, 每隔 0.1Vpp 可调
	字长	8bit
	帧长	$4\sim 1024$ 字可设置
	同步码	$16, 24, 32\text{bit}$ 可设置
	码型	NRZ-L, NRZ-M, NRZ-S, SP-L, SP-M

3.2.3 计算机 基本配置需求为：CPU P2 450 以上；内存 128 M 以上；硬盘 10 G 以上。

3.3 主要接口关系

3.3.1 S 应答机

S 应答机接收机向遥控终端输出一路遥控副载波信号，其信号参数与星上状态一致。采样显示器通过串行口，实时向遥控终端接口中的 8031 送 S 应答机的遥测参数。遥控终端接口向 S 应答机输出六条遥控指令的控制信号，其信号参数与星上状态一致。

遥测终端接口向 S 应答机送一路或两路已调的副载波信号，其信号参数与星上状态一致。

3.3.2 遥控终端接口板

S 应答机的采样显示器向接口送 S 应答机的遥测参数，通讯接口为 RS-232。S 应答机的遥测参数有：测距状态、应答机锁定信号、相干/非相干状态、TC 视频输出状态、AGC 电平、F(S) 输出、发射机功率、PD 噪声电平、接收机温度、发射机通断状态等。S 应答机的接收机向接口板送一路遥控视频信号，其幅度为 $0.3\sim 1.2\text{Vrms}$ ，输出

阻抗不大于1 k Ω 。接口板还向S应答机送以下六路控制信号：发射机开关机信号、相干/非相干工作模式、测距通/断信号，其信号参数与星上状态相同。

地面设备 遥控终端向接口板送一路遥控视频信号，输出视频幅度为 $1 \pm 0.2 V_{rms}$ ，阻抗600 Ω 。

3.3.3 遥测终端接口板

S应答机 接口板向S应答机送一路或两路遥测视频信号，信号参数与星上状态相同。

地面设备 可向地面设备送四路遥测视频信号，地面设备遥测终端的输入接口为视频幅度为 $1 \pm 0.2 V_{rms}$ ，阻抗1 k Ω 。

3.3.4 时频接口板

调制解调器 调制解调器向接口板送一路数据信号和一路码钟信号，接口标准为RS-232。

地面设备 地面时统设备向接口板送IRIG B (DC) 码，接口为RS-422。

上述接口板与计算机均采用PCI/ISA总线连接，信息交换通过接口板内双口RAM进行，双口RAM容量不小于4K字节，接口板一侧优先级高。接口板占用计算机的中断源可通过开关设置为IRQ2~IRQ7中任一个。

4 系统软件设计

整个软件包括系统软件和应用软件两大类，系统软件采用Windows NT for sever 4.0操作系统，应用软件包括专用接口软件和计算机仿真软件两部分，下面主要就应用软件进行描述。

4.1 专用接口软件

该仿真系统专用接口为自行研制的4块不同的PCI/ISA总线板卡，在软件实现上，每块板卡均由对应的设备驱动程序来管理应用程序对板卡的访问。设计的接口设备驱动程序包括：遥测终端板驱动程序、时频板驱动程序、遥控终端板驱动程序，而S应答机遥测终端板没有设计独立的驱动程序，而是采用遥控终端板驱动程序来管理该板卡。在实际应用中，通过将遥控终端板映射后的虚拟地址加2KB的偏移修正，来获得该卡的双端口基址。所有驱动程序均根据接口板的特性，按照微软DDK的规范进行设计，具有以下共同功能：

- 具有初始化设备的功能，可以根据管理员在系统注册表中的配置信息，实现硬件资源的映

射，并完成必要的设备初始化工作；

- 具有驱动程序的卸载功能，可以动态地加载设备驱动程序；

- 管理设备的中断，进行对应的I/O操作；

- 通过实现读设备I/O请求，为应用软件提供设备中断事件，实现应用软件与低层硬件之间的同步；

- 通过I/O控制代码实现硬件端口地址区域至应用程序地址空间的映射；

- 完全支持异步操作，提高系统整体性能，方便应用开发使用；

- 利用硬件资源，在驱动程序内部支持软件调试，加快系统的开发进度。

4.2 计算机仿真软件

计算机仿真软件包括主控和遥测、遥控两个进程，其中主控进程是作为一个公用模块进行设计的，而遥测遥控进程是作为一个专用模块而进行设计的，采用Microsoft Visual C++ 6.0, MFC, WIN32API, Microsoft Visual Foxpro工具编程，通信机制采用进程间通信机制和线程间通信机制。

主控进程按线程可划分为主线程、时间线程、控制线程、加速线程、网络线程组等，其主要功能如下：

- 网络通信功能：能够与测控站RMCS设备进行网络通信，采用协议为UDP，使用组地址方式，编程接口采用Windows Socket。

- 控制时序功能：提供标准北京时时标（精确到1 ms），能够提供标准北京时间，提供外测、遥测、雷达数据发送定时，提供加速仿真后的北京时，提供校时功能，提供加速仿真时的时间计算功能。

- 外测数据打包发送功能：主动段/返回段按外测定时读取弹道数据，打包处理发送到RMCS；运行段按起飞时间计算外测轨道数据，按照格式打包发送到RMCS；具备提供固定外测数据发送，可检验环境状态。通过与外测动力学模型交互，保证计算数据的正确性。

- 遥测遥控数据打包发送功能：与遥测、遥控进程通信，取得遥测数据，并打包发送到RMCS；通过Windows NT中内存映射功能以及进程间事件通信功能，与遥测、遥控进程进行通信，按照两进程间的通信约定，取得遥测原始码，打包处理后发送到RMCS。

- 仿真雷达数据功能：模拟各种型号雷达设备，向 RMCS 发送固定雷达数据。
- 加速仿真功能：可以加速仿真过程，到达预定的跟踪时刻，进行特定弧段的仿真过程。
- 多站连续仿真功能：在一个测站仿真跟踪结束后，可以立即转到下一个跟踪测站的仿真。
- 其他功能：提供友好的人机界面和良好的操作手段。

遥测、遥控进程按线程可划分为主线程、遥控接收线程、遥测接收线程、遥控处理线程、遥测处理线程、服务处理线程等，其主要功能如下：

- 遥控接收、译码功能：响应遥控事件，通过射频/视频接收、解调遥控指令和遥控注入数据，并依据指令码表对遥控指令数据进行译码；
- 遥测发送功能：响应遥测事件，接收遥测中断板帧中断信号，按照卫星遥测帧格式逐帧发送遥测原始码，同时发送遥测事件，通知网络发讯线程接收遥测原始数据；
- 通信功能：利用 Windows NT 的内存映射和事件机制，并按照两进程间的通信约定，与控制进程进行通信，将遥测原始码发往控制进程；
- 一般遥控处理功能：响应遥控处理消息，处理遥控指令和注入数据，对于有关 AOCS 的遥控指令，将指令分发给控制进程；根据遥控指令，查询遥控遥测参数描述表，对相应遥测参数进行处理；时间符合遥控指令和注入数据处理；对注入数据进行 CRC 校验、和校验；对密钥参数注入、加密遥控数据、加密指令进行签名认证、解密处理；对特殊注入数据进行异或还原处理；根据遥控注入数据，对相应遥测参数进行处理。

• 一般遥测处理功能：按照卫星遥测帧格式，调用遥测反编码动态连接库，进行遥测编码（反编码动态连接库与型号任务相关），实时产生遥测数据，包括特征参数（同步字、卫星识别字、卫星时间、格式识别字、段模式字、帧计数）和工程参数的模拟；

• 遥测、遥控故障模拟功能：任意指定条遥控指令不执行，任意指定块注入数据故障等；可以指定任意波道的遥测参数故障等；

• 显示记盘数据功能：系统日志的显示；实时遥测、组合遥测原始码的显示；重要遥测参数页面的显示；遥控指令原始数据、代号及注入数据的显示；响应遥控记盘消息，记录各类遥控信息。

- 其他功能：可以人工设置星箭分离/未分离标志；可以进行遥测数据初值的设置；可自行发送任意条遥控指令和任意块注入数据等。

5 系统工作原理

该仿真系统按上行和下行信号的性质可分为：星地射频仿真和星地视频仿真两种工作模式。

5.1 星地射频仿真

在此模式中，遥控、遥测、测距信号为射频信号，测角、测速等外测数据为 PCM 码，具体工作过程如下：

- 1) 通过键盘向仿真计算机输入卫星的初始姿态、轨道、工程参数等信息，完成仿真专用接口板的初始化、时统校时和姿态轨道初值计算；
- 2) 仿真计算机通过时频接口接收测控计划或 T0。待时间符合后，仿真计算机根据卫星姿态、轨道、遥测初值形成下行信息流，其中遥测数据经副载频和载频调制，形成射频信号发送，地面 S 测控设备通过无线信道接收、解调、处理；外测数据从网上送地面远程监控系统，整个系统工作开始；
- 3) 地面 S 测控设备按卫星实战状态设置，接收仿真系统产生的各种信息，按实战时对卫星的测控要求，对仿真系统进行相应操作，其控制信息流由地面 S 测控设备调制成上行射频信号，经无线信道送仿真系统接收、解调和处理。
- 4) 仿真计算机根据接收到的上行信息，一方面进行姿态轨道动力学仿真，形成姿态轨道数据和外测数据；另一方面根据遥控指令、注入数据及仿真参数的要求，产生遥测数据，形成下行信息流。
- 5) 重复上述 3)、4) 过程，就实现了星地射频仿真。

5.2 星地视频仿真

此模式基本与星地射频仿真模式相同，主要区别在于：对于遥测数据，S 应答机通过双工器将遥测视频信号有线接入地面 S 测控设备接收机，后续过程同星地射频仿真相应过程；对于遥控数据，地面 S 测控设备中的发射机，将遥控终端发出的遥控视频信号不进行载波调制，而是通过 S 应答机双工器有线接入应答机。

6 结论

本仿真系统已成功地应用于航天测控设备校

飞、卫星任务联试、国际测控联网等任务,取得了满意的使用效果。在新测控设备校飞试验中,不仅验证了设备的动态指标精度和性能,而且还发现了许多潜在问题,如:地面设备发射机上行频率扫描电路设计不满足卫星遵循的 ESA 标准,以致不能完成星地频率双捕问题。圆满地完成了我国资源一号等 S 频段卫星的星地对接、系统联试、软件测试等工作。为了支持神舟飞船及与国际 S 测控网接轨,分别与法国和瑞典等国家的 S 频段设备成功地进行了对接试验。应用实践及与真星标定表明,该仿真系统通过建立半实物仿真模型,在信道的电气性能和数据层方面与真星具有等价性。但未来航天

测控系统仿真还面临以下研究课题:专用航天器仿真语言的开发、多媒体环境以及在轨航天器仿真、仿真的置信度和精度分析以及仿真试验与飞行试验一体化研究等。

参考文献

- [1] 康凤举. 现代仿真技术与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
- [2] 周 军. 航天器控制原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001
- [3] 许 东. S 频段统一测控系统 [M]. 西安: 西安卫星测控中心, 2001

Platform Design of S-Band Satellite TT&C Simulation System Based on Hardware-in-the-Loop

Yang Yongan^{1,2}, Han Zhongmin², Feng Zuren¹, Li Guangming³, Zhang Hongwei²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Satellite

Control Center, Xi'an 710043, China; 3. Xi'an Politics Institute, Xi'an 710054, China)

[Abstract] For accomplishing the need of S-band satellite tracking, telemetry and control (TT&C) drilling, the simulation system is put forward. Firstly, according to the characteristics of space TT&C system and S-band TT&C equipments, composing and function of the simulation system are defined. The main part of the simulation system is described in detail. Secondly, those of the simulation system, such as the work mode, the main technique specification, the interface regulation, are confirmed. Finally, combining with the actual application, the simulation system that based on hardware-in-the-loop mathematics model is proved to reach equipollence on data layer by contrast to engineering satellite. At the same time, the development tendency of TT&C simulation system is prospected.

[Key words] system simulation; space; tracking, telemetry and control (TT&C) system; s-band; satellite