

# 用户星星间链路天线指向控制系统试验研究

翟 坤, 杨 涂, 陈新龙, 卫洪涛

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 仿真验证是设计控制器的重要一环。设计的用户星天线指向控制系统的半物理仿真试验系统是由天线样机及其驱动器、xPC 实时仿真平台、图像处理计算机和中继卫星模拟器组成。中继卫星模拟器是试验系统的关键, 基于用户星对中继卫星的跟踪规律, 设计中继卫星模拟器。试验结果说明该试验系统有助于工程设计用户星天线指向控制系统。

**关键词:** 仿真; 天线; xPC; 用户星; 中继卫星模拟器

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-1328(2007)06-1628-04

## 0 引言

控制系统的研制过程中, 仿真是一个不可缺少的环节<sup>[1]</sup>。仿真包括数学仿真和实时仿真。对数学仿真阶段完成的控制系统有必要进行实时仿真, 找出因积分算法和积分步长等选择不合理造成计算量过大而产生时间溢出等问题<sup>[2]</sup>。

MATLAB/RTW 能方便地把 Simulink 模型转换为实时仿真代码<sup>[3,4]</sup>。RTW 支持多种目标环境, xPC 是其中较为完善的一种目标环境。基于 MATLAB/Simulink/RTW 一体化设计方法, 可以提高效率, 缩短设计和研制周期, 在工程实践中越来越多地被采用。

用户星星间链路天线(以下简称天线)的高精度指向对天线控制系统提出了较高的要求<sup>[5-7]</sup>, 本文基于 xPC 实时仿真环境, 设计了中继卫星模拟器, 搭建了用户星天线指向控制系统的半物理仿真试验系统, 对天线指向控制系统进行了实时仿真验证。

## 1 试验系统组成

半物理仿真试验系统包括天线样机及其驱动器, xPC 实时仿真平台, 图像处理计算机和由屏幕、投影仪和模拟点生成计算机组成的中继卫星模拟器, 见图 1 所示。

### (1) 天线样机及其驱动器

试验所用天线样机支架高 1.7m, 抛物面天线直径 1m, 重约 4kg。天线有两个自由度: 方位角 -180° ~ 180°, 俯仰角 0° ~ 90°。

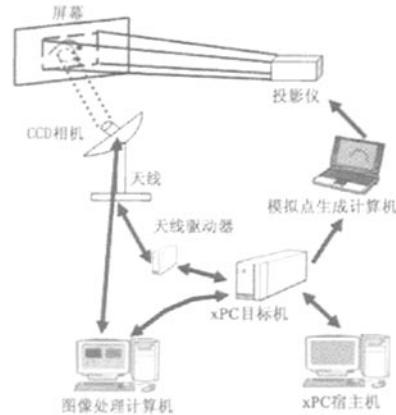


图 1 半物理仿真试验系统结构框图

Fig. 1 Semi-physical simulation system block diagram

-180°, 俯仰角 0° ~ 90°。

天线方位轴和俯仰轴的驱动机构采用 maxon 公司的直流电机、减速器和光电编码器, 并采用一体化的装配方式, 提高可靠性。

### (2) xPC 实时仿真平台

xPC 实时仿真平台的主要任务包括发指令驱动天线运动; 接收天线的位置信息和图像处理计算机的输出; 进行星间链路运动规律计算, 启动中继卫星模拟器; 管理天线的运行模式。

试验中分别采用 PC 机和工控机作为 xPC 目标的宿主机和目标机, 其中宿主机运行系统的 Simulink 模型, 目标机运行由 Simulink 模型生成的代码。

### (3) 图像处理计算机

工程中天线上除了测量转角的光电编码器, 还有用于捕获中继卫星的射频敏感器。而射频敏感器的工作环境较难模拟, 本试验中采用 CCD 相机代替射频敏感器。

试验中 CCD 相机安装在天线上, 视频采集卡安装在图像处理计算机上。视频数据采集程序基于 VC 编写, 采集得到的数据通过串口传送给 xPC 目标机。

### (4) 中继卫星模拟器

本试验系统主要考察用户星天线指向控制系统, 为了接近实际, 设计中继卫星模拟器。它由屏幕、投影仪和模拟点生成计算机组成。

模拟点生成计算机接收 xPC 目标机发出的经星星间链路运动规律计算得到的中继卫星的位置信息, 然后由模拟点生成程序在模拟点生成计算机上产生模拟点, 并通过投影仪投影到屏幕上。

本半物理仿真系统中, 中继卫星模拟器设计的正确与否决定了通过本试验得到的对用户星天线指向控制系统的验证结果是否有效, 是否符合实际情况, 因此, 中继卫星模拟器的设计是本试验的关键。

## 2 中继卫星模拟器

### 2.1 用户星对中继卫星的跟踪规律<sup>[6]</sup>

用户星对中继卫星的跟踪规律, 即星星间链路运动规律, 主要是指用户星天线绕其方位轴和俯仰轴的转动规律。

中继卫星运行在地球同步轨道上, 轨道半径为  $R = 42164\text{km}$ , 中继卫星与惯性坐标系的 X 轴夹角为  $\Omega_M$ 。用户星运行在近地椭圆轨道上, 轨道六要素为:  $a, e, \Omega, w, i, f$ 。则有:

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin \beta \cos u \cos i + R \sin u \cos \beta \\ -R \sin u \sin \beta \\ -r + R \cos u \cos \beta - R \sin u \cos i \sin \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\| \mathbf{d} \| = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (2)$$

其中  $u = f + w$ ,  $\beta = \Omega - \Omega_M$ ,  $r$  是用户星到地心的距离。 $\mathbf{d}$  是中继卫星相对用户星的相对位置矢量在用户星天线体坐标系中的表示。

如果用  $\varphi_1$  表示用户星天线绕方位轴的转角, 用  $\varphi_2$  表示天线绕俯仰轴的转角。则有:

$$d_y \geq 0 \quad \varphi_1 = \arcsin\left(\frac{-d_z}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}}\right)$$

$$\varphi_2 = \arcsin\left(\frac{d_z}{d}\right) \quad (3)$$

$$d_y < 0 \quad \varphi_1 = \begin{cases} -\pi - \arcsin\left(\frac{-d_z}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}}\right) & d_z > 0 \\ \pi - \arcsin\left(\frac{-d_z}{\sqrt{d_x^2 + d_y^2}}\right) & d_z \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \arcsin\left(\frac{d_z}{d}\right)$$

在式(3)和式(4)基础上, 考虑地球的隔断影响和两颗中继卫星间的任务交替, 就得到完整的用户星对中继卫星的跟踪规律。

### 2.2 中继卫星模拟器设计

设计中继卫星模拟器的目的是通过在屏幕上产生一个模拟点, 使用用户星天线跟踪模拟点的运动情况和跟踪实际中继卫星运动情况一样。

如图 2 所示, 用户星天线指向中继卫星的射线 AC 穿过屏幕, 穿过点为 B。中继卫星在轨道上运行一段, 相应地 B 点在屏幕上走过一段轨迹。用户星天线跟踪点 B 和跟踪实际中继卫星运动情况是一样的, 所以点 B 就是中继卫星模拟点。

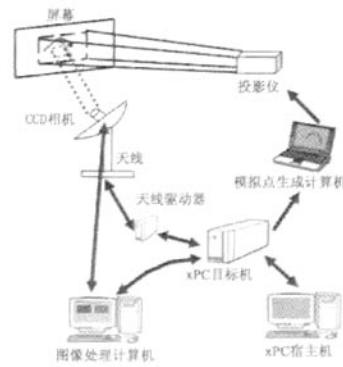


图 2 中继卫星系统示意图

Fig. 2 Sketch map for the TDRSS

用户星天线跟踪模拟点和跟踪实际中继卫星运动情况一样, 主要是指用户星天线跟踪模拟点转过的方位角和俯仰角与跟踪实际中继卫星转过的方位角和俯仰角相同。而用户星天线跟踪实际中继卫星转过的方位角和俯仰角可通过 2.1 节的星星间链路运动规律确定。已知用户星天线需要转动的方位角和俯仰角, 进行逆推, 就可以得到中继卫星模拟点的坐标表达式, 如图 3 所示。

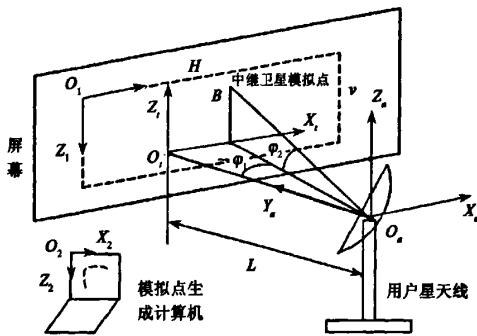


图 3 中继卫星模拟器原理图

Fig.3 Principle map for the TDRS simulator

图 3 中  $O_a X_a Y_a Z_a$  是用户星天线本体坐标系,  $O_1 X_1 Z_1$  是  $O_a X_a Y_a Z_a$  的投影坐标系。 $O_1 X_1 Z_1$  是投影区域的定位坐标系, 原点在投影区域的左上角, 两个坐标轴分别沿着投影区域的上边和左侧边。 $O_2 X_2 Z_2$  是模拟点生成计算机屏幕的定位坐标系, 原点在屏幕的左上角, 两个坐标轴分别沿着屏幕的上边和左侧边。若天线样机与屏幕间垂直距离为  $L$ , 投影坐标系的原点  $O_1$  在  $O_1 X_1 Z_1$  中的坐标为  $(a, b)$ , 模拟点生成计算机上的图像经过投影仪放大  $\lambda$  倍后影到屏幕上, 则有中继卫星模拟点  $B$  在  $O_2 X_2 Z_2$  中的坐标  $B_x$  和  $B_z$  可表示为:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{1}{\lambda} [-L \times \tan(\varphi_1) + a] \\ B_z &= \frac{1}{\lambda} \left[ -L \times \frac{\tan(\varphi_2)}{\cos(\varphi_1)} + b \right] \end{aligned} \quad (5)$$

在模拟点生成计算机上, 按照式(5)编程产生一个亮点, 通过投影仪就能在屏幕上生成中继卫星模拟点。

### 3 示例

用户星天线指向捕获中继卫星的策略为: 首先开环回扫; 回扫结束后, 如果中继卫星模拟点进入 CCD 相机视场, 则进入自动跟踪; 否则进行扫描, 模拟点进入 CCD 相机视场, 则退出扫描, 进入自动跟踪。

用户星初始轨道根数如下:  $a = 7012\text{km}$ ,  $e = 0.001$ ,  $i = 97.9^\circ$ ,  $\Omega = 24^\circ$ ,  $u = 164^\circ$ 。中继卫星系统中东星的初始幅角为  $\Omega_M = 126.3^\circ$ 。选择黑色幕布作为中继卫星模拟器的屏幕,  $L = 5\text{m}$ ,  $a = 1.64\text{m}$ ,  $b = 1.1\text{m}$ ,  $\lambda = 1/800$ 。

在 xPC 宿主机上搭建 Simulink 模型, 采用 ode1

算法和 0.1s 的采样步长, 仿真 1000s, 得到如下的仿真结果。

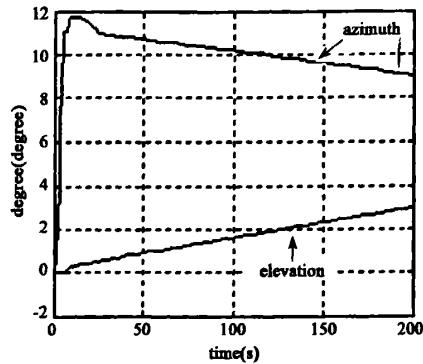


图 4 天线的转动角度

Fig.4 Rotation angle of antenna

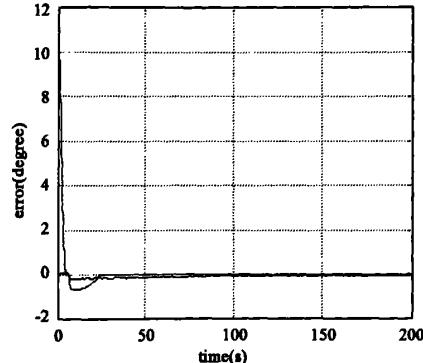


图 5 天线指向偏差曲线

Fig.5 Error curve of antenna pointing

图 4 中方位角和俯仰角是由光电编码器测量, xPC 目标机采集得到的。图 5 中的天线指向和中继卫星模拟点之间的角偏差是由 CCD 相机测量, 通过图像处理计算机采集, 并在 xPC 宿主机上显示得到的。

由图 4 和图 5 可知, 用户星天线经过回扫捕获到中继卫星模拟点, 然后进入自动跟踪, 在自动跟踪阶段, 指向精度达到  $0.1^\circ$ , 满足工程需求。

### 4 结论

设计了中继卫星模拟器, 搭建的半物理仿真试验系统, 有助于工程设计用户星天线指向控制系统。

### 参考文献:

- [1] 张新邦, 林来兴, 索旭华. 卫星控制系统仿真技术 [J]. 计算机仿真, 2000, 17(2): 57~59 [ZHANG Xin-bang, LIN Lai-xing, SUO Xu-hua. Simulation technology of satellite control system [J]. Computer Simulation, 2000, 17(2): 57~59]

- Xu-hua. Satellite control system simulation techniques [J]. Computer Simulation, 2000, 17(2): 57 - 59 (in Chinese)]
- [2] Isermann R, Schaffnit J, Sinsel S. Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems[J]. Control Engineering Practice(S0967 - 0661)1999, (7): 643 - 653
- [3] Daniel Burns, Thomas G, Sugar. Rapid embedded programming in the mathWorks environment[J]. Journal of computing and Information Science in Engineering(S1530 - 9827), 2002, 2: 237 - 241
- [4] 杨涤,李立涛,杨旭,等.系统实时仿真开发环境与应用[M].北京:清华大学出版社,2002[YANG De, LI Li-tao, YANG Xu, et al. System Real-time Simulation Development Environment and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002(in Chinese)]
- [5] 孙小松,杨涤,杨旭,翟坤.用户星对中继卫星的跟踪规律研究[J].宇航学报,2004, 25(1): 41 - 45 [SUN Xiao-song, YANG De, YANG Xu, ZHAI Kun. The tracking laws of user satellite tracking TDRS[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(1): 41 - 45]
- [6] 翟坤,杨涤,孙小松.TDRSS 中用户星的星 - 星天线跟踪规律深
- 人研究[J].飞行力学,2004, 22(3): 88 - 91[ZHAI Kun, YANG De, SUN Xiao-song. The in-depth research on the tracking laws of the user satellite's satellite-satellite antenna in TDRSS[J]. Flight Dynamics, 2004, 22(3): 88 - 91]
- [7] 孙小松,杨涤,耿云海,杨旭.中继卫星天线指向控制策略研究[J].航空学报,2004, 25(4): 376 - 380[SUN Xiao-song, YANG De, GENG Yun-hai, YANG Xu. The antenna pointing control strategy study of tracking and data relay satellite[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4): 376 - 380(in Chinese)]



作者简介:翟坤(1979-),男,博士研究生,研究方向为挠性多体卫星动力学、控制与仿真。

通信地址:哈尔滨工业大学 333#(150001)

电话:15910770451

E-mail:zkroger@163.com

## The Experiment Study of the User Satellite's Inter-Satellite Link Antenna Pointing Control System

ZHAI Kun, YANG Di, CHEN Xin-long, WEI Hong-tao

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Simulation is an important step during the design of the controller. The semi-physical simulation experiment system that has been designed in this paper for the user satellite's inter-satellite link antenna pointing control system includes four parts: the antenna pattern and its drive, xPC real-time simulation system, the image processing computer and the TDRS simulator. The TDRS simulator is the key for the experiment system. Based on the known tracking laws from the TDRS to the user satellite, the TDRS simulator is designed. The experiment results validate that the experiment system is beneficial to the design of the user satellite's antenna pointing control system.

**Key words:** Simulation; antenna; xPC; User satellite; TDRS simulator

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>