

文章编号:1002-0640(2012)11-0137-04

## 移动卫星天线稳定伺服系统的设计与仿真

李荧兴, 贾彦斌, 杨冬梅, 卢军平, 张建红

(北方自动控制技术研究所, 太原 030006)

**摘要:**移动卫星天线稳定伺服系统在运动载体扰动下,能够扫描、精确对准并跟踪通信卫星,实现运动载体对星通信。卫星天线的柔性部件造成的低频机械谐振和系统较低的开环增益是稳定伺服系统设计的难点,因而,设计采用专家系统和串级 PI 调节器相结合的控制算法,同时使用陷波滤波器抑制低频谐振的影响。为了验证算法的可行性,实验运用 MATLAB 和 dSPACE 构成的实时仿真平台进行半实物仿真分析。仿真和实验结果表明:基于专家系统的串级 PI 控制器和陷波滤波器相结合的控制结构可以达到系统指标。

**关键词:**移动卫星天线,稳定伺服系统,专家系统,串级比例积分调节器,半实物仿真

**中图分类号:**TP273

**文献标识码:**A

## Design and Simulation of Stabilized Satellite Antenna Servo System

LI Ying-xing, JIA Yan-bin, YANG Dong-mei, LU Jun-pin, ZHANG Jian-hong

(North Automatic Control Technique Research Institute, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Stabilized satellite antenna servo system can scan, aim and track communication satellites in the presence of carrier's disturbance, and people on the carrier can communicate with satellites. But the design process has a sea of troubles, the antenna has low frequency mechanical resonance caused by compliantly coupled load components, so the open loop gain of antenna system is very low. Then we use the combination of expert system, series connected PI regulator and notch filter to control the system. In order to prove the feasibility of control law, the semi-entity simulation based on MATLAB and dSPACE was used. The results of simulation and experiment indicate that the specification can be satisfied by using the structure of collaborative control.

**Key words:** mobile antenna, stabilized servo system, expert system, series connected PI regulator; semi-entity simulation

### 引言

卫星信息装备建设是我军军事电子装备的重点。预计未来 20 年内,我军将逐步形成天基信息直接支持战略、战役和战术运用的能力。针对未来陆军一体化战术信息系统的需求,移动式车载卫星信息利用系统将是一个重要方向。

基于速率陀螺仪的惯性稳定伺服系统是移动车载卫星信息系统实现“动中通”的重要组成部分,是

承载卫星天线的扰动隔离平台。该惯性稳定伺服平台由三轴转台和稳定伺服控制系统构成。三轴转台的结构强度、刚度、机械谐振等因素直接影响着整个卫星天线伺服系统的性能,所以,三轴转台的结构设计必须满足车体运动的可靠性、保精度要求;稳定伺服控制系统是伺服转台的控制核心,不仅要具备快速的运动响应性能,而且要能够克服由于大口径天线架的柔性环节带来的谐振,保持足够的稳定裕度,因此,设计高效、可靠的稳定伺服控制算法是关键。

### 1 系统分析

移动卫星天线稳定伺服系统必须同时具备对给

收稿日期:2011-09-11

修回日期:2011-12-25

作者简介:李荧兴(1981-),男,四川资阳人,工程师,研究方向:稳定跟踪伺服控制。



$$\frac{\theta(s)}{T_d(s)} = \frac{\frac{K_1 K_2}{s^2(\tau s + 1)} \cdot \frac{(s/\omega_{ar})^2 + 2\zeta_{ar}(s/\omega_{ar}) + \omega_{ar}^2}{(s/\omega_r)^2 + 2\zeta_r(s/\omega_r) + \omega_r^2}}{1 + G_c(s) K_{pwm} \cdot \frac{K_1 K_2}{s(\tau s + 1)} \cdot \frac{(s/\omega_{ar})^2 + 2\zeta_{ar}(s/\omega_{ar}) + \omega_{ar}^2}{(s/\omega_r)^2 + 2\zeta_r(s/\omega_r) + \omega_r^2}} \quad (2)$$

那么角位置  $\theta(s)$  对于常值扰动输入  $T_d$  的稳态值为

$$\theta(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{T_d}{s} \cdot \frac{K_1 K_2 (\omega_{ar}/\omega_r)^2}{s^2(\tau s + 1) + s \cdot G_c(s) \cdot K_1 K_2 K_{pwm} \cdot (\omega_{ar}/\omega_r)^2} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{T_d}{G_c(s) \cdot K_{pwm}} \quad (3)$$

因此,设计的控制器  $G_c(s)$  必须包含两个或两个以上的积分作用时,才能满足在常值扰动下的角位置稳态值  $\theta(s) = 0$ 。

## 2.2 串级 PI 调节器设计

传统的模拟控制系统采用超前滞后校正网络实现,<sup>[3]</sup>但是对于数字控制系统而言,这种校正网络用数字实现起来相对比较烦杂,而且参数调整很不直观,也不能够获得预期的效果。PID 的控制结构简单,用数字控制算法实现起来较为容易,因而,它具备很高的安全性和可靠性,所以,它在伺服系统中应用相当广泛。

本设计使用两级串联的 PI 调节器构成具有两个积分作用的控制器,而且 PI 调节器的  $k_p$  和  $k_i$  参数由专家系统进行实时调节,具有这种结构的控制

$$u_c = \frac{k_{p1}(\omega_c, u_c, \omega)s + k_{i1}(\omega_c, u_c, \omega)}{s} \cdot \frac{k_{p2}(\omega_c, u_c, \omega)s + k_{i2}(\omega_c, u_c, \omega)}{s} e(s) \quad (4)$$

其中,比例和积分增益是在试验的调试过程得到经验参数,把这些经验参数汇总就形成了专家系统。最后,由专家系统根据系统的动态特性实时地调整串级 PI 控制器的比例和积分增益,获得满意的控制效果<sup>[6]</sup>。

## 2.3 抑制低频谐振

基于专家系统的串级 PI 控制器在某种程度上可以改善系统的响应性能,但是它不能解决因为负载柔性环节造成的低频谐振问题。低频谐振是机械结构自身的特性,因而控制器是不能控制的。使用陷波滤波器可以削弱控制器对谐振频率附近信号的响应,使控制系统不响应谐振频率附近信号,避免对该频率信号产生激励。稳定伺服系统使用的陷波滤波器的传递函数如式(5):

$$F_{Notch}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_N \omega_N s + \omega_N^2}{(s + \omega_N)^2}, \zeta_N < 1 \quad (5)$$

其中,  $\omega_N$  为需要抑制的谐振频率,  $\zeta_N$  为阻尼系数,阻尼系数值越小对谐振频率的抑制越强。

比较式(1)和式(5)可以发现,合理地调整陷波滤波器的自然频率  $\omega_N$  和阻尼系数  $\zeta_N$ ,使得  $\omega_N = \omega_r$  和  $\zeta_N \leq \zeta_r$ ,那么稳定伺服控制器就不会响应并激励谐振频率处的信号。

器如图 4 所示。专家系统根据给定信号  $\omega_c$ 、反馈信号  $\omega$  和控制信号  $u_c$  的动态特性,调整 PI<sub>1</sub> 和 PI<sub>2</sub> 调节器的比例增益和积分增益。

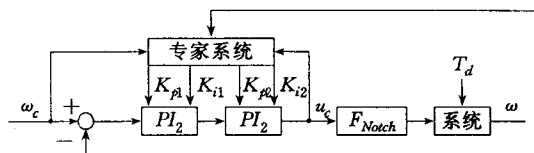


图 4 基于专家系统的串级 PI 控制器

不同的比例增益和积分增益对应不同的动态响应。在天线稳定伺服系统调试中,这些不同的动态特性都可以通过给定信号、反馈信号和控制信号来判别,于是可得比例和积分增益为  $\omega_c$ ,  $\omega$  和  $u_c$  的非线性函数,因此,基于专家系统的串级 PI 控制器可以表示为

## 2.4 采样滤波器设计

为了防止系统采样信号中出现假频,需要在陀螺信号进入模数转换之前进行了滤波处理。滤波装置选用模拟电路搭建的贝赛尔滤波器,其作用主要是为了滤除高于奈奎斯特频率的频率成分,一般采用二阶的贝赛尔滤波器,其表达式如式(6):

$$G_f(s) = \frac{\omega^2}{(s/\omega_B)^2 + 2\zeta\omega(s/\omega_B) + \omega^2} \quad (6)$$

其中,  $\omega_B$  为滤波器带宽,  $\omega$  和  $\zeta$  分别为自然频率和阻尼比,取值如表 1 所示。

表 1 贝赛尔滤波器的阻尼比、自然频率和时间延迟<sup>[2]</sup>

阶次	$\omega$	$\zeta$	时间延迟
2	1.27	0.87	$1.3/\omega_B$
4	1.60	0.62	$2.1/\omega_B$
	1.43	0.96	
6	1.90	0.49	$2.7/\omega_B$
	1.69	0.82	
	1.61	0.98	

贝赛尔滤波器具有良好的线性相位特性,所以滤波处理后信号的形状畸变不大。表 1 显示了不同阶次的贝赛尔滤波器自然频率、阻尼比和相应的时

间延迟,本试验选用二阶贝赛尔滤波器。

### 3 仿真分析

#### 3.1 半实物仿真

由于卫星天线稳定伺服系统的结构含有柔性环节,同时考虑系统本身的不平衡力矩、摩擦力矩、死区等非线性因素,所以,建立该系统的数学模型相对比较复杂,因此,选择实际的机电系统最为控制对象是切实可行的方法。因而,对串级 PI 控制器进行半实物仿真分析实验,观察系统的动态响应性能。

半实物仿真顾名思义为包含实物的仿真,某些场合也叫作快速仿真原型。图 5 为采用 MATLAB 和 dSPACE 实时仿真系统与天线系统构成的半实物仿真系统,该系统的实物是被控的天线系统,而且车体的扰动用摇摆台模拟。稳定伺服控制算法由 MATLAB 和 dSPACE 组成的实时系统仿真<sup>[4]</sup>。

本次实验使用 DSP 硬件控制板卡系列的 DS1104 进行半实物仿真。图 5 显示了基于 dSPACE 的半实物仿真平台与被控对象的连接框图,仿真实验分别使用了三路 ADC 和 DAC。

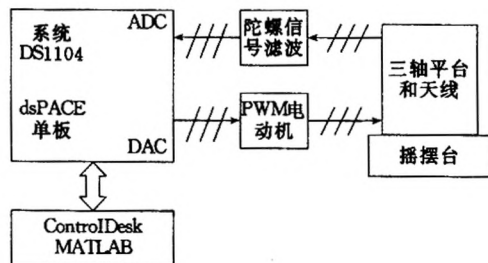


图 5 基于 MATLAB 和 dSPACE 与天线系统构成的半实物仿真系统

在 MATLAB/Simulink 中建立控制器的仿真模型如图 6 所示。由于专家系统的逻辑较为复杂,使用 Simulink 的标准模块比较难于实现,所以设计使用用户自定义的模块 S-Function Builder。用 C 语言编写专家系统的程序,然后编译,最终产生可以用于下载模块。专家系统模块如图 6 所示的 expert system,该模块的输入是给定、反馈和控制信号,输出是串级 PI 控制器的比例和积分增益。

考虑实际控制器完成功能和计算机的计算能力,初步设定稳定伺服控制环路的采样时间为 0.004 s (即采样频率为 250 Hz)。在阶跃输入条件下调节陷波滤波器的阻尼比,如图 7(a) 阻尼比为 0.5 的阶跃响应,如图 7(b) 为阻尼比为 0.12 的阶跃响应。最终确定陷波滤波器的阻尼比为 0.12 时比较合适。

参数调整好后,稳定伺服控制系统在摇摆台上

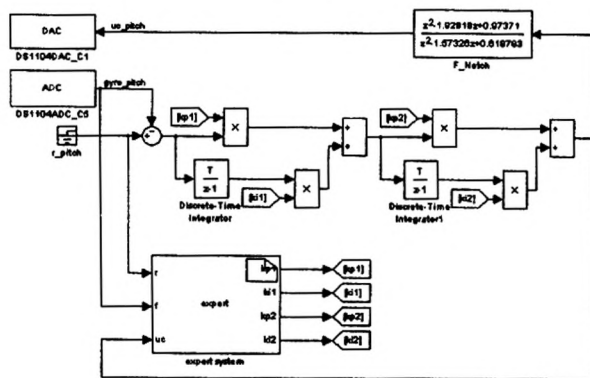


图 6 基于专家系统的 PI 控制器的 MATLAB/Simulink 模型

进行载体模拟扰动实验,摇摆台以幅值为  $7^\circ$ , 频率为 0.5 Hz 的正弦对方位轴和俯仰轴进行摇摆,俯仰速率陀螺信号输出电压的幅值为 0.015 V,如图 8 所示,折合  $0.3^\circ/\text{s}$ 。从安装在稳定伺服平台上的激光笔投射到目标位置的位移变化,可以估算出俯仰轴在该扰动下的精度为  $0.2^\circ$ 。该精度值能够满足卫星天线接收和发送信息的要求。

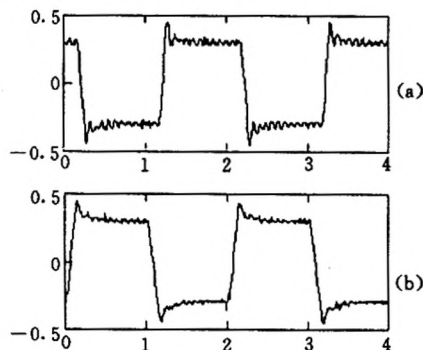


图 7 不同阻尼比下的系统阶跃响应

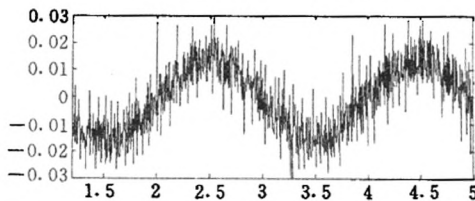


图 8 在  $7^\circ/0.5 \text{ Hz}$  的正弦摇摆下速率陀螺的输出信号

#### 3.2 仿真结果分析

基于实际卫星天线系统的半实物仿真不采用实际对象的数学模型,消除了建立对象的精确数学模型的复杂过程和建模不完全等因素的影响,能够最大限度地真实地反映稳定伺服控制算法的稳定性和伺服性能,具有很高的可信度。针对实际系统设计的专家系统和实时调整的参数可以稍加修改地移植到几乎所有的数字处理器,如数字信号处理器、工业控制机、单片机等,具有很强的实用性。

(下转第 146 页)

表 5 伪卫星相对位置对模型估计精度的影响

估计精度 项目 相对位置	$\delta\Delta T_0(s)$	$\delta\Delta\omega(m)$	$\delta\Delta x_I(m)$	$\delta\Delta y_I(m)$
PL1:[15000, 15000]	$1.93\times 10^{-7}$	$1.28\times 10^{-9}$	363.26	323.92
PL2:[40000, 20000]				
PL1:[15000, 15000]	$1.05\times 10^{-7}$	$2.95\times 10^{-10}$	54.73	43.27
PL2:[40000, -20000]				

从表 5 中可以看出,伪卫星位于载体运动轨迹异侧时的估计精度远远高于同侧时的估计精度。

## 4 结 论

研究了在 GPS 和北斗受到干扰条件下惯导系统与双伪卫星的测距紧组合问题。研究结果表明,利用两颗伪卫星的伪距测量序列可以将接收机钟差、钟漂和惯导的水平位置误差估计出来。仿真结果表明,在两颗伪卫星处于载体异侧的条件下,如果惯导的初始位置误差为 280 m,则对钟差的估计精度优于 110 ns( $1\sigma$ ),对惯导位置误差的估计精度优于 70 m( $1\sigma$ )。

### 参考文献:

- [1] Bartone C G, Kiran S. Flight Test Results of an Integrated Wideband Airport Pseudolite for the Local Area Augmentation System[J]. Navigation, 2001, 48(1): 35-48.
- [2] Progre I F, Michalson W R. A Combined GPS Satellite/Pseudolite System for Category III

Precision Landing [C] // Position Location and Navigation Symposium. IEEE, 2002 :212-218.

- [3] Wang W, Liu Z Y, Xie R R. INS/GPS/Pseudolite Integrated Navigation for Land Vehicle in Urban Canyon Environments [C] // IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. IEEE, 2004 : 1182-1185.
- [4] LeMaster E A, Rock S M. Field Test Results for a Self-Calibrating Pseudolite Array[C]//Proceedings of the Institute of Navigation GPS-2000 Conference. Salt Lake City, UT: ION, 2000 : 1046-1055.
- [5] Dai L, Zhang J, Pack C R, et al. GPS and Pseudolite Integration for Deformation Monitoring Applications[C]//13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U. S. Inst. of Navigation GPS ION-2000. Salt Lake City, Utah: ION, 2000 :19-22.
- [6] Kee C, Jun H, Yun D, et al. Development of Indoor Navigation System Using Asynchronous Pseudolites[C]//13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U. S. Inst. of Navigation. Salt Lake City, Utah: 2000 :1038-1045.
- [7] Rizos C, Barnes J. A New Pseudolite-Based Positioning Technology for High Precision Indoor and Outdoor Positioning[EB/OL]. <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/snap.htm>. 2005-11-2.
- [8] Yun D, Kee C. Centimeter Accuracy Stand-alone Indoor Navigation System by Synchronized Pseudolite Constellation [C] // 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2002. Portland, Oregon: 2002 :213-225.

(上接第 140 页)

## 4 结 论

移动卫星天线的结构具有柔性环节,系统存在较低频率的机械谐振,而且系统开环增益较低。基于专家系统的 PI 控制器能够最大限度地提升系统开环增益,改善系统的动态特性,并结合陷波滤波器抑制低频谐振。使用 MATLAB/Simulink 和 dSPACE 构成的半实物仿真平台,方便地完成了控制器的设计、仿真,并且在实际系统中完成半实物仿真,充分验证了控制算法。

实际控制系统采用 TMS320F2812 完成控制算法和逻辑,控制算法结构和参数都使用半实物仿真实验所使用的算法和最终调整的参数,实际的控制效果与半实物仿真结果基本一致,达到了预期效果,

实现了载体运动中的不间断通讯。

### 参考文献:

- [1] 胡寿松. 自动控制原理(第三版)[M]. 北京:国防工业出版社,1994.
- [2] 奥斯特隆姆,著,周兆英,译. 计算机控制系统原理与设计(第三版)[M]. 北京:电子工业出版社,2001.
- [3] 秦继荣. 现代直流伺服控制技术及其系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [4] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计:MATLAB 语言与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [5] 奥斯特隆姆,著,李清泉,译. 自适应控制[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [6] George E. Control System Design Guide[M]. USA: Elsevier Science, 2002.

## 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,一直致力和专注于微波、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>