

## 远程红外探测系统瞄准线高精度稳定技术

胥青青<sup>1</sup>, 刘伟<sup>2</sup>, 纪明<sup>1</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 尹明东<sup>1</sup>, 李红光<sup>1</sup>

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 总参陆航部装备发展办公室, 北京 100012)

**摘要:** 瞄准线稳定精度是远程红外探测系统的关键指标之一, 主要由伺服环路带宽和隔离度决定。介绍了远程红外探测系统的组成, 分析了基于 FSM 的二级稳定技术的原理, 建立了粗级稳定平台机电模型、精级稳定平台机电模型和光学传递函数模型, 最终搭建了二级稳定伺服控制系统数学模型, 通过分析带宽和隔离度传递函数, 提出了扰动全补偿的边界条件, 同时分析了影响稳定带宽和隔离度的主要因素, 对比了二级稳定和传统稳定的稳定效果。仿真结果显示, 系统速率稳定回路带宽提升至 200 Hz, 1 Hz 隔离度可达 -66 dB, 实际测试稳定精度达到 12  $\mu$ rad, 满足远程红外探测系统对于稳定精度的要求。

**关键词:** 红外探测系统; 稳瞄; 二级稳定; 快速反射镜

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3646-05

## Line-of-sight high-precision stabilization technology of remote infrared detection system

Xu Qingqing<sup>1</sup>, Liu Wei<sup>2</sup>, Ji Ming<sup>1</sup>, Yang Guang<sup>1</sup>, Yin Mingdong<sup>1</sup>, Li Hongguang<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Equipment Development Office of Army Airline in Headquarters of the General Staff PLA, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Stabilization accuracy of the line-of-sight is one of the key specifications of the remote infrared detection system, which is mainly determined by the servo loop bandwidth and isolation. In this paper the composition of the remote infrared detection system was described, the principle of two-level stabilization techniques based on FSM was analyzed, coarse stable platform electromechanical model, fine stable platform electromechanical model, the optical transfer function model and the control system transfer function were established, through the analysis of bandwidth and isolation transfer function, the boundary conditions of the disturbance compensation were explained in detail, stabilized ability of the two-level stabilization and common stabilization were contrastly analyzed. Simulation results show that the bandwidth of stabilization loop reaches about 200 Hz, isolation is superior to -66 dB at 1 Hz, Stabilization accuracy reached 12  $\mu$ rad by actual test, meet the requirements of remote infrared detection system for stabilization accuracy.

**Key words:** infrared detection system; stabilized sighting; two-level stabilization; FSM

收稿日期: 2014-03-12; 修订日期: 2014-04-20

作者简介: 胥青青(1981-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事机载光电稳瞄伺服控制系统设计。Email: 9001444@qq.com

导师简介: 纪明(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电系统总体设计方面的研究。Email: jiming@xa205.com

### 0 引言

远程红外探测系统图像分辨率高,探测距离远,因此具有较长的焦距,较大的入瞳和大面阵焦平面阵列,对于瞄准线稳定精度的要求较高。传统的整体稳定技术经过多年的发展已经获得了广泛的应用,但是受原理和传感器精度等的限制,已经无法跨越  $20 \mu\text{rad}$  的瓶颈<sup>[1]</sup>,因此无法满足远程红外探测系统对于稳定精度的要求。二级稳定技术<sup>[2-3]</sup>经过了多年的发展,已经成为提升光电系统瞄准线的重要手段,因此将二级稳定技术应用到远程红外探测系统中,是提升瞄准线稳定精度的有效途径。

文中针对远程红外探测系统较高的瞄准线稳定精度要求,提出采用二级稳定技术来保证瞄准线的高精度稳定,通过分析系统模型和扰动传递函数,获得了扰动全补偿条件下的二级稳定控制器,揭示了扰动全补偿的理论依据,仿真结果显示,二级稳定技术对于带宽和隔离度提升较为明显。

### 1 系统介绍

远程红外探测系统的主要成像传感器是高分辨率的红外面阵探测器,可以昼夜工作,其主要特点是以被动方式工作。稳定平台是保证高分辨率红外探测系统图像稳定的关键环节,文中系统选择如图 1 所示的二级稳定方式,一级稳定为粗稳平台,实现瞄准线的第一级稳定,光学系统采用共光路方式,从而实现共用快速控制反射镜(FSM)的目的。在精稳反射镜前端设计高倍望远系统可大大压缩光束口径,从而显著减小 FSM 的质积和重量,提升 FSM 的精度和带宽。

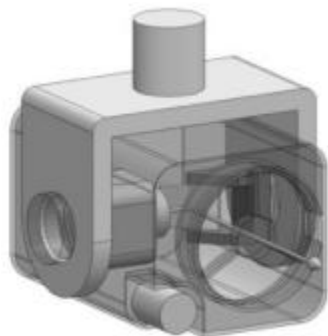


图 1 二级稳定结构形式

Fig.1 Structure of two-level stabilization

### 2 二级稳定技术原理

远程红外探测系统采用的二级稳定技术原理组成示意图如图 2 所示,其中 1 是速率陀螺、2 是 FSM、3 是粗平台电机、4 是粗平台、5 是光学系统、6 是探测器。系统可划分为粗级稳定平台和精级 FSM 平台,粗级稳定平台是传统的两轴两框架结构形式,精级 FSM 平台置于粗级稳定平台的光具座上并安放在需要精确稳定的光学通道中,粗级稳定平台对外界扰动进行初步隔离,采用粗精组合二级稳定技术对速率陀螺信号进行融合处理,用于控制 FSM,实现瞄准线残余扰动的补偿,进而实现高精度的稳定<sup>[4-7]</sup>。

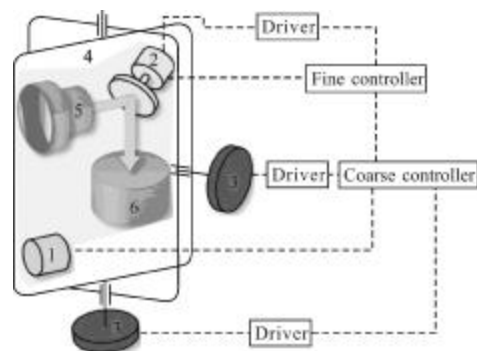
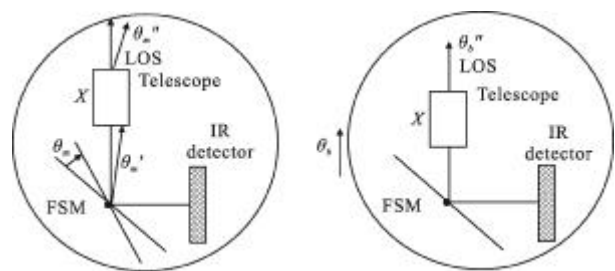


图 2 二级稳定系统原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of two-level stabilization

图 2 所示示意图中,瞄准线受转动基座和 FSM 的复合控制,建立瞄准线运动关系如图 3 所示。图 3 中光学系统倍率为  $X$ 。图 3(a)中,反射镜旋转  $\theta_m$ ,因



(a) 反射镜旋转 (a) Mirror rotation  
 (b) 整体传感器旋转 (b) Whole sensor rotation

图 3 反射镜/瞄准线转动关系

Fig.3 Kinematics of mirror/LOS rotation

此瞄准线旋转  $\theta_m' = 2\theta_m$ ,通过  $X$  倍的望远镜后,瞄准线为  $\theta_m'' = 2\theta_m/X$ ;图 3(b)中,传感器整体旋转  $\theta_s$ ,因此瞄准线旋转  $\theta_s'' = \theta_s$ 。瞄准线运动是图 3 所示两种运动

的复合,所以瞄准线的运动方程为:

$$\theta_{los} = \theta_m'' + \theta_b'' = 2\theta_m'/X + \theta_b \quad (1)$$

### 3 控制系统模型

#### 3.1 粗平台模型

粗平台电机的传递函数可近似为:

$$G_2(s) = \frac{C_m}{(Ls+R)Js+C_mC_e} \quad (2)$$

式中: $C_m$ 为力矩系数, $nm/A$ ;  $C_e$ 为电势系数, $V/(rad \cdot s^{-1})$ ;  $R$ 、 $L$ 为电阻和电感, $\Omega$ 和  $H$ ;  $J$ 为转动惯量, $kg \cdot m^2$ 。

速率反馈采用速率陀螺来完成,传递函数为:

$$H_1(s) = k_u \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (3)$$

这是一个二阶振荡环节, $\xi$ 是阻尼系数, $\omega_0$ 是陀螺带宽, $k_u$ 为陀螺比例因子,陀螺速率反馈回路的单位为 $V/(rad \cdot s^{-1})$ 。

驱动器一般采用 H 桥方式驱动,传递函数为:

$$G_{amp}(s) = K_{amp} \quad (4)$$

#### 3.2 精平台模型

精平台的控制是一个高带宽的位置闭环控制,功能框图如图 4 所示。控制系统由位置传感器和其信号调理电路采集 FSM 位置信号,和位置命令信号比较后送入 PI 调节器进行计算,控制通道包含一个限波器,用于限制 FSM 机械谐振,输出信号送入功率放大器,驱动 FSM 运动<sup>[8-10]</sup>。

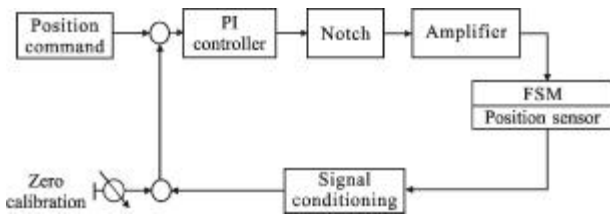


图 4 FSM 控制原理框图

Fig.4 Diagram of FSM control system

文中对 FSM 模型进行简化后,其传递函数为:

$$G_F = k_f \frac{\omega_1^2}{(s^2 + 2\xi_1\omega_1s + \omega_1^2)} \quad (5)$$

式中: $k_f$ 为 FSM 比例因子, $rad/V$ 。

#### 3.3 系统模型

结合传统稳定回路和二级稳定回路后的系统控制框图如图 5 所示。其中: $G_1$ 为一级稳定回路控制

器; $G_2$ 为机电参数; $G_3$ 为负载; $G_4$ 为积分器; $H_2$ 为反电势系数; $H_1$ 为陀螺反馈; $K$ 为二级稳定控制器; $G_F$ 为 FSM 闭环传递函数; $K_2$ 为光学传递函数, $K_2=2/X$ 。传统稳定回路如图 5 虚线框所示,能够实现常规的瞄准线稳定,二级稳定回路工作于系统的前向通道,对传统稳定的残差进行提取,进而控制反射镜运动进行残差补偿。

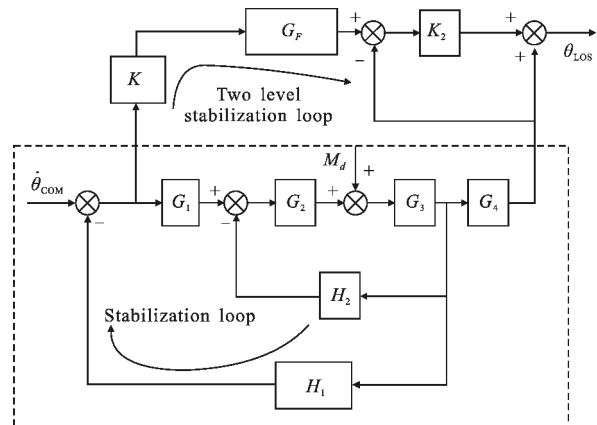


图 5 二级稳定控制框图

Fig.5 Control block diagram of two-level stabilization

由图 5 控制框图可知,系统最终输出的瞄准线角度对输入的角速度命令传递函数为:

$$\phi_{p1} = \frac{\theta_{LOS}}{\dot{\theta}_{COM}} = \frac{(1-K_2)G_1G_2G_3G_4 + KG_FK_2}{1 + H_2G_2G_3 + H_1G_1G_2G_3} \quad (6)$$

系统输出的瞄准线角度对输入扰动传递函数为:

$$\phi_{d1} = \frac{\theta_{LOS}}{M_d} = \frac{-K_2G_3G_4 + G_3G_4 - G_3H_1KG_FK_2}{1 + H_2G_2G_3 + H_1G_1G_2G_3} \quad (7)$$

为了实现二级稳定回路对于扰动  $M_d$  的全补偿,可令:

$$-K_2G_3G_4 + G_3G_4 - G_3H_1KG_FK_2 = 0 \quad (8)$$

可以求得: $K = \frac{G_4(1-K_2)}{H_1G_FK_2}$ 。

为了对二级稳定系统和传统整体稳定系统的带宽和隔离度进行对比分析,求取传统陀螺稳定平台的闭环传递函数和扰动传递函数,因此,传统陀螺稳定平台瞄准线对速度命令传递函数为:

$$\phi_{p2} = \frac{G_1G_2G_3G_4}{1 + H_2G_2G_3 + H_1G_1G_2G_3} \quad (9)$$

传统陀螺稳定平台瞄准线对扰动传递函数为:

$$\phi_{d2} = \frac{G_3G_4}{1 + H_2G_2G_3 + H_1G_1G_2G_3} \quad (10)$$

对比公式(7)和公式(9)可知,由于二级稳定控制

器  $K$  可调,二级稳定的扰动传递函数(公式(7))理论上可以实现对任何扰动的零输出,这也是二级稳定控制优于传统整体稳定的关键。

### 3.4 二级稳定控制器

由上面的理论分析可知,影响二级稳定系统性能的主要因素是二级稳定控制器  $K$ ,而  $K$  主要由速率陀螺和 FSM 传递函数构成,因此,最终稳定效果主要受速率陀螺和 FSM 影响,确切地说主要受速率陀螺和 FSM 建模精度影响。二级稳定控制器设计为:

$$K = \frac{(s^2 + 2\xi_0\omega_0s + \omega_0^2)(s^2 + 2\xi_1\omega_1s + \omega_1^2)}{k_r k_f \omega_0^2 \omega_1^2 (s^2 + 2\xi_2\omega_2s + \omega_2^2)s} \quad (11)$$

### 3.5 仿真参数

该系统仿真模型的参数来源于控制系统静态设计,已知的参数如表 1 所示。将上述静态参数带入仿真模型后,进行动态的控制系统综合设计,稳定回路采用一阶控制网络,设计带宽为 30 Hz,FSM 闭环带宽设计为 280 Hz。

该系统粗平台静态参数如表 1 所示。

表 1 静态参数

Tab.1 Static parameters

	Unit	Typical values
Resistance	$\Omega$	8
Inductance	H	0.0011
Moment of inertia	$kg \cdot m^2$	0.4
EMF	$V/(rad \cdot s^{-1})$	5.426
Torque coefficient	$nm/A$	5.417
Velocity	$rad/s$	57.5
Voltage	V	28
Current	A	6
Current factor	V/A	2.5
Gyro bandwidth	Hz	100
Gyro damping	-	0.7
Gyro factor	$V/(rad \cdot s^{-1})$	$15/\pi$

## 4 带宽和隔离度仿真分析

控制系统的带宽和隔离度是评价系统性能的关键指标,由于文中系统的特殊性,实际瞄准线在惯性空间中的运动情况已经无法通过传统的测量陀螺信号的方法来获得,因此也无法直接获得系统的带宽和隔离度。为了能够得到精确的速率稳定回路带宽

和隔离度曲线,在仿真模型中对瞄准线的输出信号进行了微分和增益匹配处理,使其在物理意义上与输入速度命令信号一致,进而评价系统的性能。微分和增益匹配处理的具体方法是通过对二级稳定后的瞄准线输出进行微分,并且乘以陀螺增益因子。

### 4.1 带宽仿真

带宽指标是衡量系统响应速度的一个重要指标,仿真带宽通过 simulink 的 LTI 工具求取  $\dot{\theta}_{LOS}$  对于  $\dot{\theta}_{CMD}$  的 bode 图,获得的速率稳定回路带宽仿真如图 6 所示。

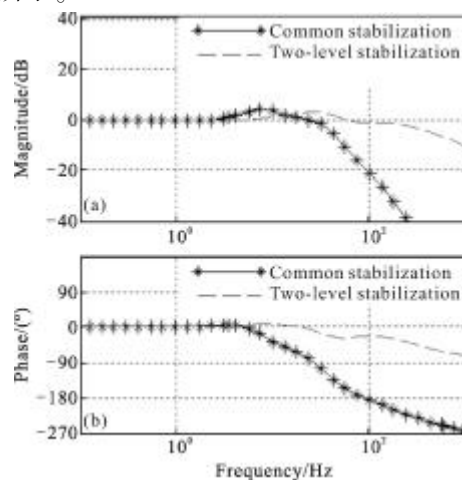


图 6 带宽仿真

Fig.6 Bode for bandwidth

带宽仿真显示二级稳定将系统带宽由原来的 30 Hz 提升到 200 Hz,显著提升了陀螺稳定回路的带宽,非常有利于提升系统的快速性。

### 4.2 隔离度仿真

隔离度曲线能够显示稳定系统的抗扰动能力,因此求取了  $\dot{\theta}_{LOS}$  对于  $M_d$  的 bode 图,获得的隔离度曲线如图 7 所示。隔离度曲线显示二级稳定将 1 Hz 隔离

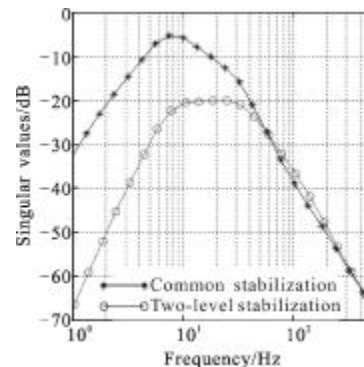


图 7 隔离度仿真

Fig.7 Bode for isolation

度由原来的-32 dB 提升至-66 dB, 将 10 Hz 隔离度由原来的-5.7 dB 提升至-20.6 dB, 极大地提升了低频段的稳定效果。从仿真图中还可以看出, 二级稳定系统对 40 Hz 以前的扰动均具有较好的隔离能力, 同时对于高频隔离能力没有影响。

## 5 系统试验

测试系统原理如图 8 所示, 稳定平台安装在角振动台上, 角振动台模拟真实的扰动环境, 测试装置由自准直仪、光源和 PC 机组成。自准直仪全视场  $5^\circ$  (线阵探测器)、分辨率 0.4"、测量频率 1 kHz。为了实现自准直测试, 在图 2 中的光路中增加自准直光束反转棱镜, 将自准直仪的入射光返回至自准直仪的探测器, 满足自准直测试的要求。

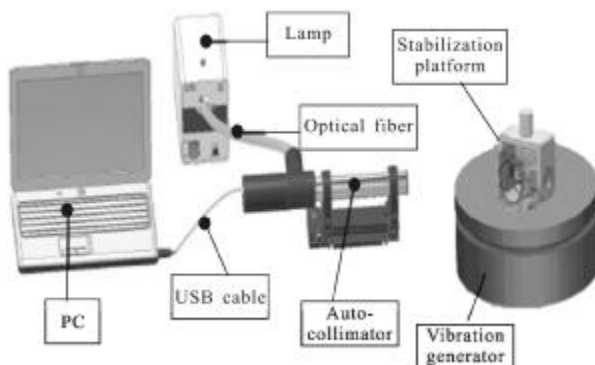


图 8 测试系统

Fig.8 Test system

系统集成完成后, 在角振动台上进行了摇摆试验, 实验条件为正旋摇摆(2 Hz,  $3^\circ$ )。实验结果显示, 原来的整体稳定控制稳定精度( $1\sigma$ )为  $80 \mu\text{rad}$ , 采用二级稳定控制后, 稳定精度提高到  $12 \mu\text{rad}$ , 显著提高了系统的稳定精度。

## 6 结论

稳定精度是远程红外探测系统的一项重要指标, 采用文中的方法能够有效保证稳定精度指标满足系统的要求。文中给出的测试装置能够方便快捷地测量系统的瞄准线抖动, 对系统分析具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Xu Feifei, Ji Ming, Xie Jing, et al. The application of FSM in the high accuracy line-of-sight stabilization system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 9-13. (in Chinese) 徐飞飞, 纪明, 谢静, 等. FSM 在高精度瞄准线稳定系统中的应用研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(1): 9-13.
- [2] Ji Ming. Line of sight combined stabilization technique based on control channel blend [J]. *Fire Control & Command Control*, 1999, 24(4): 37-41. (in Chinese) 纪明. 基于控制通道融合的瞄准线组合稳定技术[J]. *火力与指挥控制*, 1999, 24(4): 37-41.
- [3] Ji Ming. Line-of-sight coarse/fine combination two-level stabilization technique in armed helicopters [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(3): 289-293. (in Chinese) 纪明. 武装直升机瞄准线粗/精组合二级稳定技术[J]. *航空学报*, 1997, 18(3): 289-293.
- [4] Jenkins S, Hilkert J. Line-of-sight stabilization using image motion compensation [C]//*SPIE, Acquisition, Tracking, and Pointing III*, 1989, 1111: 98-115.
- [5] Masten M. Inertially stabilized platforms for imaging optical systems[J]. *IEEE CSM*, 2008, 28: 47-64.
- [6] Masten M, Hilkert J M. Electromechanical system configuration for pointing, tracking, and stabilization applications[C]//*SPIE*, 1987, 779: 75-87.
- [7] Algrain M, Powers R. Line-of-sight pointing accuracy-stability analysis and computer simulation for small spacecraft [C]//*SPIE*, 1996, 2739: 62-76.
- [8] Suite M R, Burris H R, Moore C I. Fast steering mirror implementation for reduction of focal-spot wander in a long-distance free-space communication link [C]//*SPIE*, 2004, 5160: 439-446.
- [9] Germann L M. Specification of fine-steering mirrors for line-of-sight stabilization systems, active and adaptive optical components[C]//*SPIE*, 1992, 1543: 202-212.
- [10] Harry Marth, Michael Donat. Latest experience in design of piezoelectric driven finesteering mirrors, active and adaptive optical components[C]//*SPIE*, 1992, 1543: 248-261.