

上反射镜式光电系统复合轴稳定机理

李红光, 纪明, 寿少俊, 彭富伦, 李磊

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对高速运动的车辆对光电系统的需求, 提出利用快速反射镜代替原有平面反射镜, 构建上反射镜式光电系统复合轴稳定平台, 并通过理论分析, 推导出该平台的瞄准线矢量方程, 分析瞄准线的运动特性、复合轴稳定补偿原理及控制方法, 并且比较了其与传统一级稳定平台在系统带宽、隔离度方面差异, 最后, 针对实际工程应用, 研究复合轴二级平台轴系安装误差对系统误差的影响。研究表明: 上反射镜式光电系统稳定复合轴平台实现了对一级平台稳定误差的补偿, 系统带宽接近快速反射镜带宽, 约为 200 Hz, 大幅度提升了系统稳定精度, 但是系统对二级平台的安装误差相对比较高, 其误差需要小于 0.05 mrad。

关键词: 光电稳定平台; 反射镜; 复合轴稳定

中图分类号: TN201; TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0731001

Complex axes stabilization theory of optics-eletricity system with upside mirror

Li Hongguang, Ji Ming, Shou Shaojun, Peng Fulun, Li Lei

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to design optics-eletricity system for high speed vehicle, the mirror is replaced by fast steering mirror, and stabilization platform of complex axes is designed for optics-eletricity system with upside mirror. Through theory analysis, vector equation of line of sight for the platform was calculated, movement characteristic and compensation theory of stabilization for complex axes was analyzed, and controlling method of complex platform was presented. In the end, influence of assembly axes error to system error was studied for engineering application. The research result indicate that, Stabilization platform of complex axes for optics-eletricity system with upside mirror implement compensation to error of first platform, bandwidth of system is 200 Hz, which is approximately equal to bandwith of fast steering mirror, and stabilization precision of system is upgraded, but assembly error of second platform should less than 0.05 mrad.

Key words: stabilization platform of optics-eletricity; mirror; stabilization of complex axes

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 兵器集团创新基金支持项目

作者简介: 李红光(1983-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事光电系统及稳定跟踪技术方面的研究。Email: redlight007@163.com

导师简介: 纪明(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电系统及稳瞄总体技术方面的研究。Email: jiming@xa205.com

0 引言

现代战争要求光电系统具有更远的作用距离、更高的分辨率、更宽的光谱范围、更准的瞄准跟踪精度,能够适应载体更快的运行速度,特别是随着车辆机动性能越来越好,车载光电系统需要隔离的扰动越来越复杂,该扰动量级更高,频带范围更宽。在车辆高速运动中,传统的反射镜万向架稳定技术或整体稳定已无法获取高清晰图像^[1-2],无法满足对目标进行探测识别、精确瞄准跟踪等要求,而多框架的万向架稳定平台无法承受车辆运动、武器发射带来的振动、冲击,利用减震器无法满足车载武器系统需要光电系统对目标进行精确测角、定位定向的要求。因此,需要在技术方案上另辟蹊径,研发新形式的稳定平台^[3-5]。

文中将研究由快速反射镜构成上反射镜式光电系统复合轴稳定平台,通过建立坐标系,分析该系统瞄准线矢量方程、瞄准线运动特性,研究上反射镜式光电系统复合轴平台瞄准线稳定机理以及复合轴二级平台的稳定补偿控制方法,最后,分析复合轴二级平台安装误差对系统稳定误差的影响。

1 系统组成

上反射镜式光电系统复合轴稳定平台由一级平台、二级平台组成,如图 1 所示。一级平台采用传统

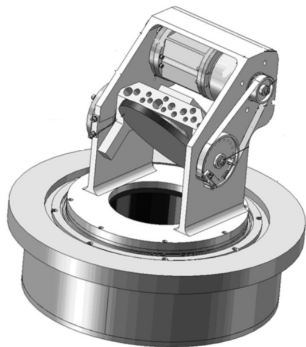


图 1 复合轴稳定平台组件示意图

Fig.1 Schematic diagram of stabilization platform of complex axes

的上反射镜式光电系统方案,外方位、内俯仰的结构框架形式,俯仰框架由二比一机构组成,陀螺安装在电机轴上,而二级平台采用快速反射镜,将其安装在负载轴上,代替原有的平面反射镜,通过平台结构保证光学通道能顺利形成光学铰链,该快速反射镜可在俯仰、方位两个自由度内微量转动,以实现一级平台稳定误差的补偿。

2 系统瞄准线运动学分析

2.1 建立坐标系

如图 2 所示, O_BXYZ 为基座坐标系, $O_{FM}XYZ$ 为快速反射镜镜面坐标系, $O_{ismn}XYZ$ 为快速反射镜坐标系, O_gXYZ 为陀螺坐标系, O_LXYZ 为视轴坐标系, O_AXYZ 为一级平台方位坐标系。

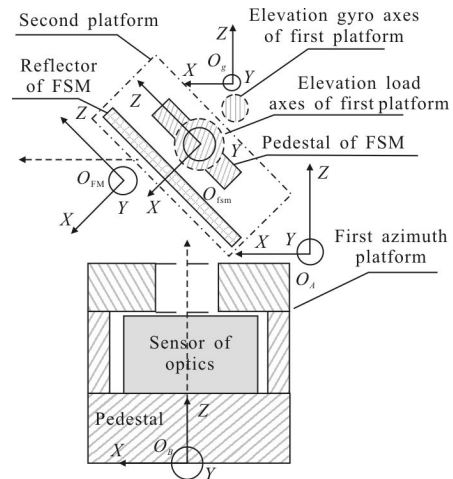


图 2 系统坐标系示意图

Fig.2 Schematic diagram of system coordinate

一级平台的方位角用 φ_0 表示,俯仰反射镜角度用 θ_0 表示,则坐标系 $O_{ismn}XYZ$ 、 O_gXYZ 、 O_LXYZ 与基座坐标系 O_BXYZ 之间的关系如图 3 所示。

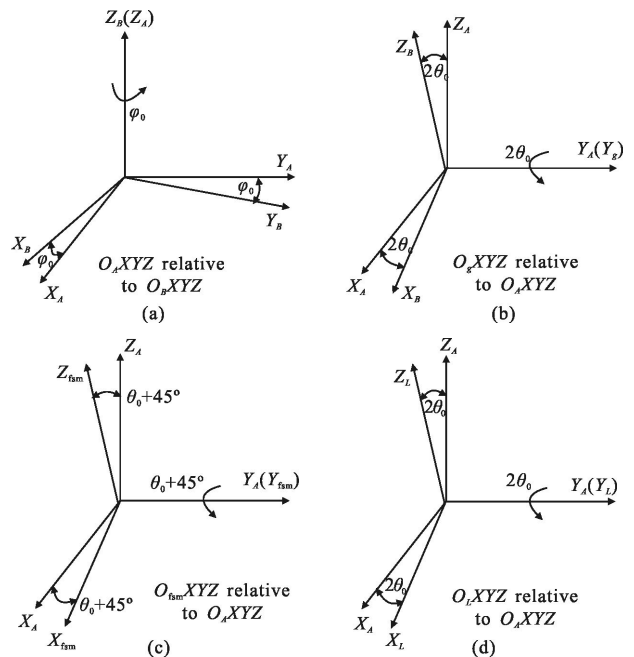


图 3 坐标系相对关系

Fig.3 Comparatively relation of coordinate

当快速反射镜处于零位时,快速反射镜镜面坐标系 $O_{FM}XYZ$ 与快速反射镜坐标系 $O_{fsm}XYZ$ 重合,在快速反射镜的方位、俯仰角度不为零时,坐标系 $O_{FM}XYZ$ 与坐标系 $O_{fsm}XYZ$ 之间的关系如图 4 所示,图中 $O_{fa}XYZ$ 为快速反射镜俯仰坐标系,在此分析的快速反射镜是基于轴承式支撑结构,Z 轴安装在 Y 旋转轴上,先绕 Y 轴旋转 θ_m ,再绕 Z 轴旋转 φ_m 。

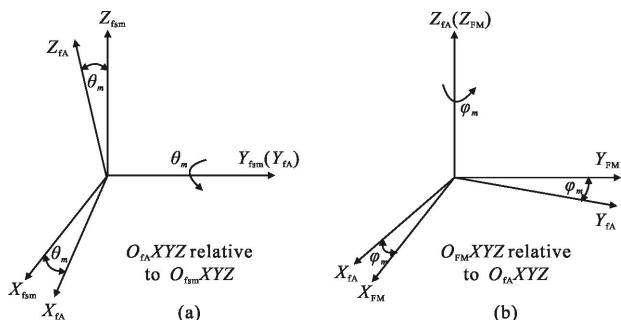


图 4 坐标系 $O_{FM}XYZ$ 与坐标系 $O_{fsm}XYZ$ 之间的关系
Fig.4 Coordinate relation between $O_{FM}XYZ$ and $O_{fsm}XYZ$

2.2 系统瞄准线运动特性分析

2.2.1 基于反射镜的瞄准线运动方程介绍

根据施奈尔反射定律,反射光线与镜面的角度等于入射光线与镜面的角度,如图 5 所示,此处涉及的角度是在反射镜法线与入射光线、反射光线的平

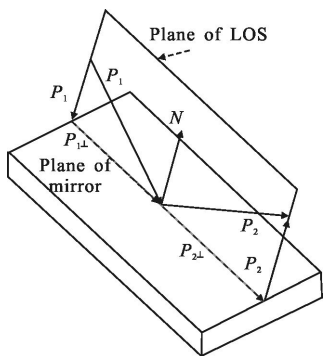


图 5 三维施奈尔定律
Fig.5 Snell's law in 3 dimensions

面内测量的。由施奈尔反射定律和简单的几何分析可知,如果入射光线在直角坐标系中的角度固定,在共平面内,法线倾斜某角度,反射光线偏转的角度正

$$N_{MB} = E(-\varphi_0)E(-(\theta_0+45^\circ))N_{Msm} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0\cos(\theta_0+45^\circ)\cos\varphi_m\cos\theta_m - \cos\varphi_0\sin(\theta_0+45^\circ)\sin\theta_m - \sin\varphi_0\sin\varphi_m\cos\theta_m \\ \sin\varphi_0\cos(\theta_0+45^\circ)\cos\varphi_m\cos\theta_m - \sin\varphi_0\sin(\theta_0+45^\circ)\sin\theta_m + \cos\varphi_0\sin\varphi_m\cos\theta_m \\ -\sin(\theta_0+45^\circ)\cos\varphi_m\cos\theta_m - \cos(\theta_0+45^\circ)\sin\theta_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

快速反射镜反射前的瞄准线矢量与反射后的瞄

好是法线倾斜角度的两倍。然而,法线在直角坐标系中或者其他正交坐标系中倾斜,反射光线的角度并不是简单的 2:1 关系。入射光线用单位矢量 P_1 表示,反射光线用单位矢量 P_2 表示,根据施奈尔定律,反射光线单位矢量 P_2 可以分解为垂直于和平行于反射镜法线单位矢量 N 的两个分量 $P_{2\perp}$ 、 P_{2p} ,如下公式(1)所示。

$$P_2 = P_{2\perp} + P_{2p} = P_{1\perp} - P_{1p}$$

其中

$$\begin{aligned} P_{1\perp} &= P_1 - (P_1 \cdot N) \cdot N \\ P_{1p} &= (P_1 \cdot N) \cdot N \end{aligned} \quad (1)$$

则

$$P_2 = P_1 - 2(P_1 \cdot N) \cdot N \quad (2)$$

可写成矩阵形势 $P_2 = TP_1$, T 是用反射镜法线矢量分量 N_x 、 N_y 、 N_z 表示的转换矩阵。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - 2 \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} \cdot [N_x \ N_y \ N_z] = \begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_yN_x & 1-2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_zN_x & -2N_zN_y & 1-2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2.2 系统瞄准线矢量方程

为了分析方便,定义 P 为反射前的传感器瞄准线单位矢量(传感器固定于载体或者底座上), N 是反射镜法线单位矢量, R 是反射后的系统瞄准线单位矢量。则 $P_B = [1 \ 0 \ 0]^T$ 为在基座坐标系下表示的传感器瞄准线矢量(反射前), $N_M = [0 \ 0 \ 1]^T$ 为在快速反射镜镜面坐标系下表示的反射镜法线矢量;在快速反射镜坐标系下,快速反射镜法线矢量为:

$$N_{Msm} = E(-\varphi_m)E(-\theta_m)N_M = \begin{bmatrix} \cos\varphi_m & -\sin\varphi_m & 0 \\ \sin\varphi_m & \cos\varphi_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_m & 0 & \sin\theta_m \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_m & 0 & \cos\theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_m\cos\theta_m \\ \sin\varphi_m\cos\theta_m \\ -\sin\theta_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

在基座坐标系下,快速反射镜法线矢量为:

瞄准线矢量之间的转换矩阵 T 为:

$$T = \begin{bmatrix} 1-2N_{MBx}^2 & -2N_{MBx}N_{MBy} & -2N_{MBx}N_{MBz} \\ -2N_{MBy}N_{MBx} & 1-2N_{MBy}^2 & -2N_{MBy}N_{MBz} \\ -2N_{MBz}N_{MBx} & -2N_{MBz}N_{MBy} & 1-2N_{MBz}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

则在基座坐标系下,快速反射镜反射后的瞄准线矢量:

$$R_B = TP_B = \begin{bmatrix} -2N_{MBx}N_{MBz} \\ -2N_{MBy}N_{MBz} \\ 1-2N_{MBz}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 复合轴平台瞄准线稳定原理分析及系统控制方法

3.1 一级反射镜平台的稳定机理简介

假设快速反射镜处于零位,此时瞄准线的运动只受到一级反射镜的运动特性影响。设一级平台方位框架相对载体转动角度为 φ_0 ,载体干扰角速度耦合到方位环的方程为:

$$\begin{bmatrix} \omega_{Ax} \\ \omega_{Ay} \\ \omega_{Az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 & 0 \\ -\sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{Bx} \\ \omega_{By} \\ \omega_{Bz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于一级平台俯仰轴系间存在二比一关系,俯仰反射镜轴旋转角度为 θ_0 ,则瞄准线相对方位框架转动角度为 $2\theta_0$,方位坐标系对瞄准线的耦合关系有:

$$\begin{aligned} N_{MBx} &= \cos\varphi_0 \cos(\theta_0+45^\circ) \cos\varphi_m \cos\theta_m - \cos\varphi_0 \sin(\theta_0+45^\circ) \sin\theta_m - \sin\varphi_0 \sin\varphi_m \cos\theta_m \\ N_{MBy} &= \sin\varphi_0 \cos(\theta_0+45^\circ) \cos\varphi_m \cos\theta_m - \sin\varphi_0 \sin(\theta_0+45^\circ) \sin\theta_m + \cos\varphi_0 \sin\varphi_m \cos\theta_m \\ N_{MBz} &= -\sin(\theta_0+45^\circ) \cos\varphi_m \cos\theta_m - \cos(\theta_0+45^\circ) \sin\theta_m \end{aligned}$$

则在陀螺坐标系下,复合轴平台系统 LOS 矢量为:

$$R_L = \begin{bmatrix} R_{Lx} \\ R_{Ly} \\ R_{Lz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_0 & 0 & -\sin 2\theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\theta_0 & 0 & \cos 2\theta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 & 0 \\ -\sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_B \quad (12)$$

若快速反射镜处于零位位置,即 φ_m, θ_m 均为零,则

$$R_B^0 = TP_B^0 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 \cos(2\theta_0) \\ \sin\varphi_0 \cos(2\theta_0) \\ -\sin(2\theta_0) \end{bmatrix} \quad (13)$$

则复合轴平台系统瞄准线矢量为:

$$\begin{bmatrix} \omega_{Lx} \\ \omega_{Ly} \\ \omega_{Lz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_0 & 0 & -\sin 2\theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\theta_0 & 0 & \cos 2\theta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{Ax} \\ \omega_{Ay} \\ \omega_{Az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2\dot{\theta}_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

陀螺安装在一级平台的俯仰电机轴上,方位陀螺敏感俯仰电机轴的方位角速度 ω_{gz} ,俯仰陀螺敏感俯仰电机轴俯仰角速度 ω_{gy} ,其等于俯仰反射镜轴的俯仰角速度的二倍,即瞄准线俯仰角速度^[1]。因此,陀螺输出为俯仰电机轴上的惯性角速度,调整一级平台俯仰电机轴与反射镜安装轴之间的关系,使得方位陀螺、俯仰陀螺的敏感轴均与瞄准线轴正交,则:

$$\omega_{Ly} = \omega_{Ay} + 2\dot{\theta}_0 = \omega_{gy} \quad (10)$$

$$\omega_{Lz} = \omega_{Ax} \cdot \sin 2\theta_0 + \omega_{Az} \cdot \cos 2\theta_0 = \omega_{gz} \quad (11)$$

因此,当 $\omega_{Ly}=0$ 且 $\omega_{Lz}=0$ 时,一级平台就可以实现瞄准线稳定^[6]。由于轴系间的正交误差、平行误差以及控制误差等各种因素,单纯的一级平台对扰动的隔离能力有限,系统瞄准线稳定误差不能满足系统性能要求,有上述公式可知,其误差即是陀螺的输出。

3.2 二级平台快速反射镜的稳定补偿原理

依据上述分析中公式(5)~(7)可知,在基座坐标系下,复合轴平台系统瞄准线矢量为:

$$R_B = TP_B = \begin{bmatrix} -2N_{MBx}N_{MBz} \\ -2N_{MBy}N_{MBz} \\ 1-2N_{MBz}^2 \end{bmatrix}$$

其中

$$R_L = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_0 & 0 & -\sin 2\theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\theta_0 & 0 & \cos 2\theta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 & 0 \\ -\sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 \cos(2\theta_0) \\ \sin\varphi_0 \cos(2\theta_0) \\ -\sin(2\theta_0) \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (14)$$

因此,快速反射镜的角度不为零时,其使复合轴平台系统瞄准线矢量偏离矢量 R_L^0 的角度为:

方位向偏离角度为:

$$\varphi_{Lm} = \arctan \frac{R_{Ly}}{R_{Lx}} \quad (15)$$

俯仰向偏离角度为:

$$\theta_{Lm} = \arctan \frac{R_{Lz}}{R_{Lx}} \quad (16)$$

由上述分析可知,陀螺输出是一级平台的瞄准线稳定速度误差,分别为 ω_{gx} 、 ω_{gy} ,当快速反射镜转动造成的系统瞄准线矢量偏转角度 $\varphi_{Lm} = - \int \omega_{gx}$ 、 $\theta_{Lm} = - \int \omega_{gy}$ 时,一级平台的瞄准线稳定误差被快速反射镜运动带来的瞄准线运动消除。在实际控制系统中, ω_{gx} 、 ω_{gy} 为陀螺输出, φ_0 、 θ_0 为一级平台的方位、俯仰角度,则当 $\varphi_{Lm} = - \int \omega_{gx}$ 、 $\theta_{Lm} = - \int \omega_{gy}$ 时,可以求解出 θ_m 、 φ_m 的值,作为快速反射镜的位置控制指令,从而实现复合轴稳定误差补偿控制。

由上述公式可知,当一级平台的方位、俯仰角度为 0° 时,系统瞄准线方位、俯仰偏移量与快速反射镜方位、俯仰角度的变化近似线性关系。一级平台方位角度变化对快速反射镜角度变化与系统瞄准线角度的关系没有影响,一级平台俯仰角度变化使得快速反射镜俯仰角度变化造成的系统瞄准线方位角度

偏移量增大,一级平台俯仰越大,系统瞄准线方位、俯仰偏移量与快速反射镜方位、俯仰角度的变化关系的非线性程度越强。

3.3 复合轴补偿控制方法及频率特性

由上述分析可知,复合轴稳定系统的控制框图如图 6 所示,轴系间关系的解耦是通过上述分析中方位、俯仰陀螺信号与快速反射镜方位、俯仰角度变化之间的关系转换得到,光学耦合是物理存在的快速反射镜运动对系统瞄准线的影响。图中 ω_{cmd_az} 、 ω_{cmd_el} 为系统方位、俯仰角速度指令, ω_{los_az} 、 ω_{los_el} 为一级平台的方位、俯仰角速度, T_{d_az} 、 T_{d_el} 为载体方位、俯仰扰动, θ_{os_az} 、 θ_{os_el} 为系统方位俯仰角速度,由于二级平台快速反射镜控制系统为位置闭环系统,实际物理测量中不存在复合轴稳定角速度量,而只有系统瞄准线位置量 θ_{los_az} 、 θ_{los_el} ,假设复合轴稳定系统瞄准线方位、俯仰角速度为 ω_{los_az} 、 ω_{los_el} ,其分别由 θ_{los_az} 、 θ_{los_el} 微分处理得到。

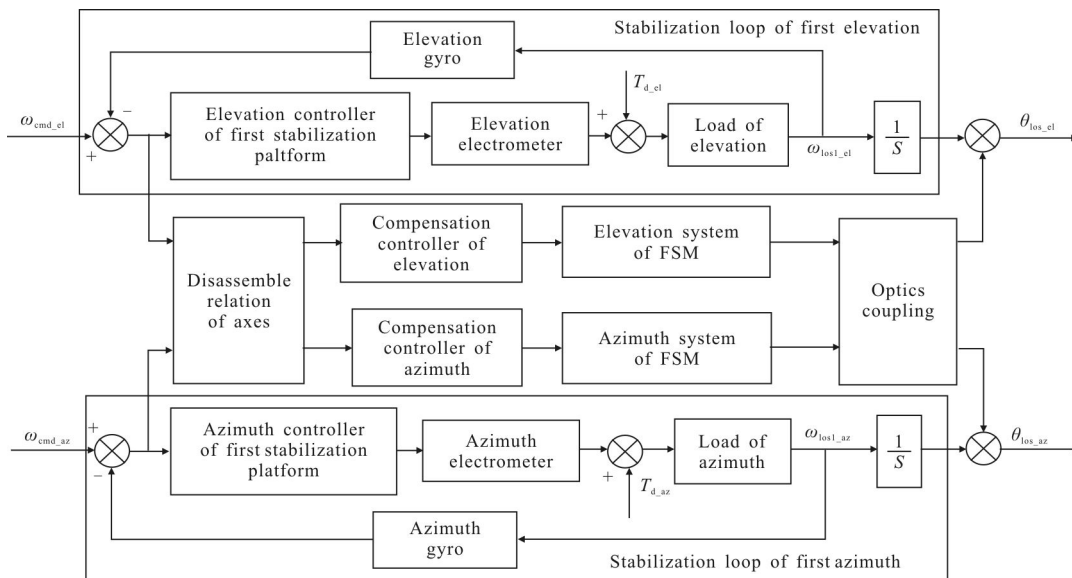


图 6 控制系统框图

Fig.6 Diagram of control system

以复合轴稳定系统方位控制系统为例,方位控制系统闭环特性为 $\phi(s) = \frac{\omega_{os_az}}{\omega_{cmd_az}}$,图 7 中,曲线 Model(2) 所示,图中曲线 Model(1) 为传统一级稳定平台系统方位闭环特性曲线,其为 $\phi_1(s) = \frac{\omega_{os1_az}}{\omega_{cmd_az}}$,两者相比较可知,复合轴稳定系统带宽远大于传统一级稳定系统

带宽,与二级平台快速反射镜的带宽相近,约为 200 Hz。

光电系统控制回路的隔离度代表了控制系统对扰动力矩的隔离能力,通常用 $\frac{\omega_{os}}{T_d}$ 表示,其值越小,系统隔离能力越强。同样以方位控制系统为例,图 8 中 Model(1)、Model(2) 曲线分别为传统一级平台系

统隔离度 $\frac{\omega_{\text{osl}_{az}}}{T_{d_{az}}}$ 、复合轴稳定控制系统隔离度 $\frac{\omega_{\text{osl}_{az}}}{T_{d_{az}}}$ ，由图可知，复合轴稳定控制系统对扰动的隔离能力远大于传统一级稳定平台。

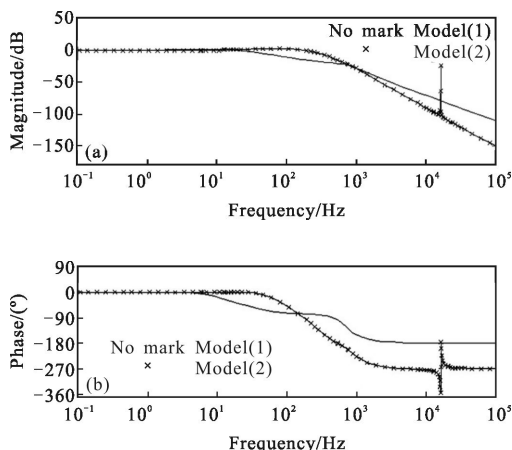


图 7 系统闭环频率特性波特图

Fig.7 Bode diagram of system close loop

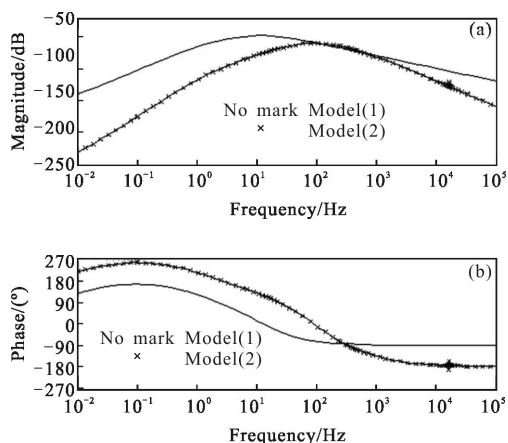


图 8 系统隔离度

Fig.8 Isolation of system

4 快速反射镜安装误差对系统补偿误差的影响

上述分析均是在理想情况下进行的，在实际工程中，快速反射镜安装时其旋转轴系与一级平台的旋转轴不可能完全平行或者正交，假设快速反射镜坐标系 $O_{\text{fsm}}XYZ$ 是由一级平台方位坐标系 O_aXYZ 绕 Y 轴旋转 $-(\theta_0+45^\circ)$ ，然后绕 X 轴旋转 $-\varepsilon$ 得到， $-\varepsilon$ 即为安装误差，则在基座坐标系下，快速反射镜法线矢量为：

$$N_{MB} = \begin{bmatrix} N_{MBx} \\ N_{MBy} \\ N_{MBz} \end{bmatrix} = E(-\varepsilon)E(-\varphi_0)E(-(\theta_0+45^\circ))N_{Mfsm} \quad (17)$$

则由上述公式(6)、(7)和(12)可知，在陀螺坐标系下快速反射镜反射后的瞄准线矢量：

$$R_L = \begin{bmatrix} R_{Lx} \\ R_{Ly} \\ R_{Lz} \end{bmatrix} = E(2\theta_0)E(\varphi_0)R_B = E(2\theta_0)E(\varphi_0)TP_B =$$

$$\begin{bmatrix} \cos 2\theta_0 & 0 & -\sin 2\theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 2\theta_0 & 0 & \cos 2\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2N_{MBx}N_{MBz} \\ -2N_{MBy}N_{MBz} \\ 1-2N_{MBz}^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

当快速反射镜的角度不为零时，其使复合轴平台系统瞄准线矢量偏离矢量 R_T^0 的角度：

方位向偏离角度

$$\varphi_{Lm}^\varepsilon = \arctg \frac{R_{Ly}}{R_{Lx}} \quad (19)$$

俯仰向偏离角度

$$\theta_{Lm}^\varepsilon = \arctg \frac{R_{Lz}}{R_{Lx}} \quad (20)$$

在不考虑其他因素影响的情况下，造成的瞄准线稳定补偿误差为：

方位补偿误差角度

$$\Delta \varphi_{Lm} = \varphi_{Lm} - \varphi_{Lm}^\varepsilon \quad (21)$$

俯仰补偿误差角度

$$\Delta \theta_{Lm} = \theta_{Lm} - \theta_{Lm}^\varepsilon \quad (22)$$

下面均假设快速反射镜角度 $\varphi_m=2 \text{ mrad}$ 、 $\theta_m=2 \text{ mrad}$ ，分析当一级平台在不同角度时，快速反射镜安装误差 ε 与系统补偿误差的关系。一级平台俯仰反射镜轴角度为 $\theta_0=0^\circ$ 、方位角度 $\varphi_0=0^\circ$ 时，快速反射镜安装误差 ε 带来的补偿误差曲线如图 9 所示。

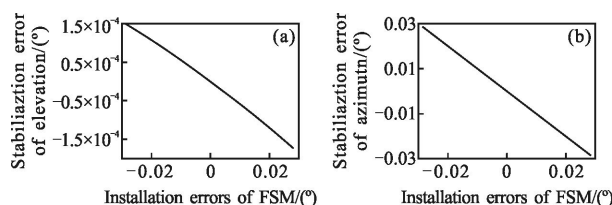


图 9 快速反射镜安装误差带来的补偿误差曲线 1

Fig.9 Compensation error curve 1 caused by assembly error of FSM

一级平台反射镜轴角度 $\theta_0=10^\circ$ 、方位角度 $\varphi_0=0^\circ$ 时，快速反射镜安装误差 ε 带来的补偿误差曲线如

图 10 所示。一级平台反射镜轴角度为 $\theta_0=0^\circ$ 、方位角度 $\varphi_0=90^\circ$ 时，快速反射镜安装误差 ε 带来的补偿误差曲线如图 11 所示。

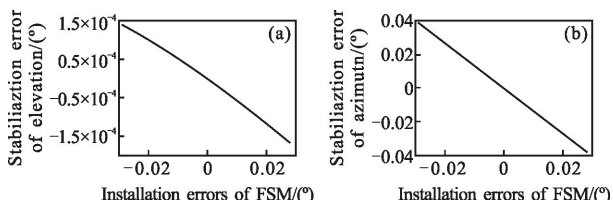


图 10 快速反射镜安装误差带来的补偿误差曲线 2

Fig.10 Compensation error curve 2 caused by assembly error of FSM

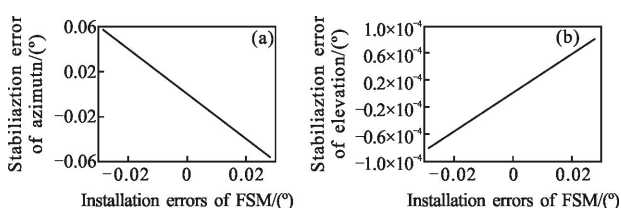


图 11 快速反射镜安装误差带来的补偿误差曲线 3

Fig.11 Compensation error curve 3 caused by assembly error of FSM

由图 9~11 可知，一级平台方位角度 $\varphi_0=90^\circ$ 时，快速反射镜安装误差带来的系统俯仰稳定误差最大，快速反射镜 ε 角度安装误差为 0.5 mrad 时，系统俯仰稳定误差约为 0.06° 。快速反射镜安装误差带来的系统方位稳定误差随一级平台的俯仰角度变大而变大，当一级平台俯仰角度 $\theta_0=0^\circ$ 时， ε 角度为 0.5 mrad 时，系统方位稳定误差约为 0.04° 。因此，考虑到控制系统本身存在误差，假设系统稳定误差指标为 $80 \mu\text{rad}$ 时，快速反射镜的安装误差必须小于 0.05 mrad 。

5 结束语

文中针对高速运动车辆对光电系统的需求，设计了上反射镜式光电系统复合轴稳定平台，推导了系统瞄准线矢量方程，分析了上反射镜式光电系统复合轴平台瞄准线稳定机理，并且给出复合轴平台稳定补偿控制方法。对该平台瞄准线稳定机理的分析结果表明，上反射镜式光电系统复合轴平台能够

实现对一级平台稳定误差的补偿。通过复合轴稳定控制频率特性的分析可知，复合轴稳定平台的系统闭环带宽远大于传统一级稳定控制，近似等于二级平台带宽，其对抗扰动的隔离度也远大于传统一级稳定方式。因此，该稳定平台能够大幅度提升系统瞄准线稳定精度。最后，对二级平台安装误差对系统误差影响的分析结果表明，系统对二级平台的安装精度要求相对较高。

上反射镜式光电系统复合轴稳定平台能够满足车载武器系统对光电系统的要求，实现在高速运动中对目标进行瞄准、打击、激光指示等功能，增大了战士的生存机率。该技术也可以应用到机载、舰载光电系统中。

参考文献：

- [1] Feng Yingfeng, Yang Kuntao, Li Zhong. Theoretical analysis of LOS gyro stabilization system for periscope [J]. *Ship Science and Technology*, 2002, 24(S): 18–21. (in Chinese)
- [2] Liu Quansheng, Huo Mingliang, Gao Yushui. Modeling and simulink on up-mirror stabilizing system based on simulink [J]. *Ordnance Industry Automaiton*, 2014, 33 (3): 77–79. (in Chinese)
- [3] Wang Huilin, Ji Ming, Qi Hua. Study of a new compensation method of line-of-sight stabilization with high accuracy [J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, 22(5): 40–42. (in Chinese)
- [4] Xu Qingqing, Liu Wei, Ji Ming. Line-of-sight high-precision stabilization technology of remote infrared detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3646–3651. (in Chinese)
- [5] Xu Feifei, Liu Sha, Yin Mingdong, et al. Performance comparison and analysis of coarse and fine combinedstabilization control system based on mirror compensation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1): 15–20. (in Chinese)
- [6] Fan Dapeng, Zhang Zhiyang, Fan Shixun. Research of basicprinciples of E–O stabilization and tracking devices[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 673–679. (in Chinese)