

## 反射镜光电平台视轴稳定技术研究

宋江鹏<sup>1,2</sup>, 孙广利<sup>2</sup>, 周 获<sup>1</sup>, 蔡慧敏<sup>2</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 天津航技术物理研究所, 天津 300308)

**摘 要:** 针对不同类型反射镜平台视轴运动多样性的特点, 从基本的反射镜视轴运动学关系出发, 采用基于虚拟整体稳定平台的视轴重建方法对反射镜平台视轴惯性角速度进行数学重建。同时, 深入分析了常见的典型单反射镜平台、特殊配置单反射镜平台、极坐标多反射镜平台以及直角坐标多反射镜平台的视轴运动学关系和视轴稳定控制技术。基于典型单反射镜平台俯仰轴视轴稳定控制的数值仿真结果表明, 采用虚拟整体稳定平台方法的视轴稳定控制技术用于反射镜视轴稳定控制是可行的。

**关键词:** 反射镜; 稳定平台; 虚拟整体稳定; 视轴稳定

中图分类号: TH74 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)06-1904-08

## Line-of-sight stabilization techniques for mirror electro-optical platform

Song Jiangpeng<sup>1,2</sup>, Sun Guangli<sup>2</sup>, Zhou Di<sup>1</sup>, Cai Huimin<sup>2</sup>

- (1. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** According to diversity characteristics of the line-of-sight (LOS) kinematics in various mirror platforms, a general method based on the artificial mass stabilization platform was proposed to reconstruct LOS inertial angle rate in various mirror platforms by employing the basic mirror kinematics equations. Then, the LOS kinematics and the LOS stabilization techniques of several common mirror platforms just like the typical single mirror platform, the special configuration single mirror platform, the polar coordinate multi-mirror platform and the orthogonal coordinate multi-mirror platform were analyzed deeply. Lastly, the simulation results of elevation gimbal for the typical single mirror platform show that the method based on the artificial mass stabilization platform is feasible for various mirror LOS stabilization control.

**Key words:** mirror; stabilization platform; artificial mass stabilization; LOS stabilization

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-03

作者简介: 宋江鹏(1980-), 男, 工程师, 博士生, 主要研究方向为光电稳定平台控制系统设计。Email:jjh\_sjp@163.com

导师简介: 周获(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性控制理论及其在飞行器制导和控制方面的研究。

Email:zhoudi@hit.edu.cn

## 0 引言

光电稳定平台以光电探测器为载荷,能够有效隔离载体姿态运动或其他干扰力矩所造成的光电探测器视轴在惯性空间内的抖动,有效补偿由视轴抖动引起的探测器成像模糊,同时在视轴稳定的基础上,实现对目标的自动跟踪,提高跟踪精度。因此,在现代武器系统中得到了非常广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

目前,光电稳定平台主要有整体稳定和反射镜稳定两种方式。前者将光学探测器直接安装在稳定平台上进行稳定,是常见的一种稳定方案,但稳定平台的结构体积和转动惯量较大,不利于稳定平台的小型化设计和快速响应能力<sup>[3]</sup>。后者是在光学系统光路中,稳定一块或多块反射镜,从而实现视轴的稳定。

近年来,受到光电稳定平台小型化、轻量化的需求驱动,反射镜平台得到广泛关注。参考文献[4]较为全面论述了典型单反射镜平台不同陀螺安装方式的捷联稳定控制技术研究。参考文献[5]较为详细介绍了典型单反射镜平台视轴稳定的多种技术手段,包括捷联稳定控制技术和机械半角稳定控制技术。参考文献[6-7]较为全面介绍了不同类型反射镜平台结构配置方案,并简要分析了不同类型反射镜平台视轴指向特点。参考文献[8]推导了反射镜平台视轴惯性角速度运动学方程,但推导过程复杂,没有对不同类型反射镜平台稳定控制技术进行对比、分析。

因此,由于反射镜平台实现方式的多样性,其视轴运动也具有复杂、多变的特点,导致了反射镜平台视轴稳定技术不尽相同。目前尚缺少针对不同类型反射镜平台视轴稳定控制技术的深入研究,特别对于多反射镜平台,现有文献中缺少对其视轴稳定控制方式和特点的深入分析和研究。

文中从基本的反射镜视轴运动学关系出发,采用了虚拟整体稳定平台方法重建反射镜视轴惯性空间角速度,该方法将反射镜视轴运动等效为整体稳定平台视轴运动,推导过程清晰、便于应用,从而可以采用整体稳定平台视轴稳定技术对反射镜平台进行分析和设计。同时,文中对多种类型反射镜平台的视轴稳定控制方式和特点进行了深入分析,从而为不同类型反射镜平台设计提供了参考和理论依据。

## 1 光学反射矢量基本理论及坐标系定义

在反射镜视轴运动学分析中大量的运用了光学反射矢量的基本理论,包括反射镜物象共轭原理以及反射镜矢量转动原理,如图1所示。其中, $\vec{A}$ 代表入射矢量; $\vec{N}$ 代表镜面法线矢量; $\vec{A}'$ 代表出射矢量<sup>[9]</sup>。

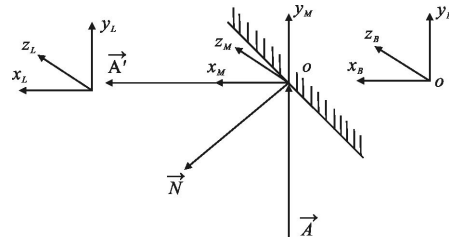


图1 光学反射示意图

Fig.1 Scheme diagram of light reflection

同时,如图1所示,给出以下常用坐标系定义:  
 (1)  $ox_B y_B z_B$  为参考坐标系,与反射镜框架初始安装位置一致, $oy_B$  轴与框架初始方位轴重合,向上为正, $ox_B$  与反射镜初始出射视轴位置一致,向前为正, $oz_B$  轴由右手坐标系确定;  
 (2)  $ox_M y_M z_M$  为反射镜框架坐标系,初始位置与参考坐标系一致, $oz_M$  轴与框架俯仰轴重合,随框架转动。  
 (3)  $ox_L y_L z_L$  为视轴坐标系,初始位置与参考坐标系重合, $ox_L$  轴与反射镜出射视轴方向一致。

然后,定义  $\vec{N}_B = [N_{Bx} \ N_{By} \ N_{Bz}]^T$ , 为镜面法线单位矢量在参考坐标系内投影;  $\vec{A}_B = [A_{Bx} \ A_{By} \ A_{Bz}]^T$ , 为入射矢量在参考坐标系内投影;  $\vec{A}'_B = [A'_{Bx} \ A'_{By} \ A'_{Bz}]^T$ , 为出射视轴矢量在参考坐标系内投影。

基于矢量形式的斯涅尔定律,出射视轴矢量  $\vec{A}'$  在所选参考坐标系中投影  $\vec{A}'_B$  可以表示为:

$$\vec{A}'_B = \vec{A}_B - 2(\vec{A}_B \cdot \vec{N}_B) \cdot \vec{N}_B \quad (1)$$

## 2 单反射镜平台视轴稳定技术

### 2.1 典型单反射镜平台视轴稳定技术

典型单反射镜平台采用方位/俯仰型两框架结构控制单反射镜转动,其中外框架为方位框架,内框架为俯仰框架,并且探测器视轴平行于外框架,如图2所示。图中,外方位框架绕  $oy_M$  旋转  $\alpha$  角、内俯仰框架绕  $oz_M$  旋转  $\beta$  角。视轴运动关系示意图如图3所示。

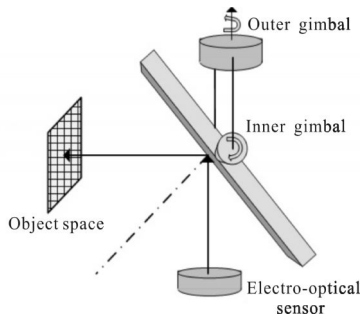


图 2 典型单反射镜平台

Fig.2 A typical single mirror platform

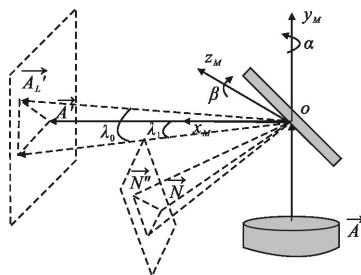


图 3 典型单反射镜视轴运动示意图

Fig.3 Scheme diagram of a typical single mirror LOS kinematics

下面推导视轴转动角与框架转动角  $\alpha$  角、 $\beta$  角之间关系。首先求解镜面法线单位矢量在参考坐标系下投影  $\vec{N}_B$  为：

$$\vec{N}_B = T(-\alpha) \cdot T(-\beta) \cdot \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \quad -\frac{\sqrt{2}}{2} \quad 0 \right]^T \quad (2)$$

式中： $T(-\beta)$ 、 $T(-\alpha)$ 定义如下：

$$T(-\beta) = \begin{bmatrix} \cos(-\beta) & \sin(-\beta) & 0 \\ -\sin(-\beta) & \cos(-\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T(-\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha) & 0 & -\sin(-\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\alpha) & 0 & \cos(-\alpha) \end{bmatrix} \quad (4)$$

将公式(3)、公式(4)代入公式(2)，求得：

$$\vec{N}_B = \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \cos\alpha(\cos\beta + \sin\beta) \quad \frac{\sqrt{2}}{2}(-\cos\beta + \sin\beta) \quad -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin\alpha(\cos\beta + \sin\beta) \right]^T \quad (5)$$

设定探测器出射视轴  $\vec{A}$  为反射镜入射视轴矢量，其在参考坐标系投影可以表示为  $\vec{A}_B = [0 \ 1 \ 0]^T$ 。根据公式(1)求得出射视轴在参考坐标系中的投影  $\vec{A}_B$  可以表示为：

$$\vec{A}_B = [\cos\alpha \cdot \cos 2\beta \quad \sin 2\beta \quad -\sin\alpha \cdot \cos 2\beta]^T \quad (6)$$

公式(6)表示了反射镜框架角转动引起视轴转动在参考坐标系下角速度分量，但不是视轴惯性角速度输出的表达式，无法直接用于反射镜视轴稳定控制设计。

目前，基于整体稳定平台的视轴惯性角速度重建技术较为成熟并在以往文献中进行了详细论述。因此，文中通过构建虚拟的整体稳定平台以等效反射镜平台视轴运动，然后采用整体稳定平台视轴重建技术解算出反射镜平台视轴惯性角速度。具体步骤如下：

当反射镜框架依次转动  $\alpha$  角、 $\beta$  角时，视轴在参考坐标系下的投影分量可等效于虚拟两轴整体稳定平台外方位框架转动  $\lambda_1$  角、内俯仰框架转动  $\lambda_0$  角引起的视轴投影分量。设定虚拟稳定平台转动轴与反射镜平台转动轴相对应，外框架绕  $oy_M$  旋转，内框架绕  $oz_M$  旋转。

由图 3 所示推导  $\lambda_1$ 、 $\lambda_0$  和  $\alpha$ 、 $\beta$  角关系<sup>[8]</sup>：

$$\begin{aligned} \cos\lambda_1 &= \frac{A_{Bx}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}} = \cos\alpha \\ \sin\lambda_1 &= \frac{-A_{Bz}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}} = \sin\alpha \\ \sin\lambda_0 &= \frac{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} = \cos 2\beta \\ \sin\lambda_0 &= \frac{A_{By}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} = \sin 2\beta \end{aligned} \quad (7)$$

设定稳定平台基座惯性空间扰动角速度在参考坐标系投影  $\omega_b = [\omega_{Bx} \ \omega_{By} \ \omega_{Bz}]^T$ ，按照整体稳定平台视轴惯性空间角速度解算算法，由载体惯性空间角速度、虚拟框架相对旋转角度、虚拟框架相对旋转角速度可以解算出视轴运动角速度<sup>[10]</sup>：

$$\begin{bmatrix} \omega_{gx} \\ \omega_{gy} \\ \omega_{gz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\lambda_0 & \sin\lambda_0 & 0 \\ -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\lambda_1 & 0 & -\sin\lambda_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\lambda_1 & 0 & \cos\lambda_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{Bx} \\ \omega_{By} \\ \omega_{Bz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\lambda_0 & \sin\lambda_0 & 0 \\ -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将公式(7)代入公式(8)，得到反射镜平台视轴运动角速度：

$$\begin{bmatrix} \omega_{gx} \\ \omega_{gy} \\ \omega_{gz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\beta & \sin 2\beta & 0 \\ -\sin 2\beta & \cos 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{Bx} \\ \omega_{By} \\ \omega_{Bz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos 2\beta & \sin 2\beta & 0 \\ -\sin 2\beta & \cos 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\alpha} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\omega_{gy}$  引起图像的旋转, 在视轴稳定控制设计中不予考虑。  $\omega_{gy}$ 、 $\omega_{gz}$  是视轴在方位、俯仰方向的惯性角速度, 用于视轴稳定控制。由式(9)可得:

$$\omega_{gy} = -\cos \alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \omega_{Bx} + \cos 2\beta \cdot \omega_{By} + \sin \alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \omega_{Bz} + \cos 2\beta \cdot \dot{\alpha} \quad (10)$$

$$\omega_{gz} = \sin \alpha \cdot \omega_{Bx} + \cos \alpha \cdot \omega_{Bz} + 2\dot{\beta} \quad (11)$$

此节中  $\lambda_0 = 2\beta$ ,  $\lambda_1 = \alpha$ , 视轴俯仰转动角与反射镜俯仰框架角具有 2:1 关系, 因此无法按照直接稳定方式, 通过直接稳定反射镜来稳定视轴。通常采用机械半角机构或基于公式(10)、公式(11)的视轴捷联稳定控制技术, 实现反射镜稳定控制。同时, 由公式(10)、公式(11)可知,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_0$  与反射镜平台转动角  $\alpha$ 、 $\beta$  角是线性关系。因此, 反射镜平台捷联稳定控制技术与常规两轴整体稳定平台捷联稳定控制技术相类似, 可以等效为非线性、两通道相互独立、弱耦合的控制回路。

因此, 采用虚拟整体稳定平台的方法可以解算反射镜平台视轴惯性空间角速度, 同时可以参照整体稳定平台稳定控制技术对反射镜平台稳定控制特点进行分析。

### 2.2 特殊配置单反射镜平台视轴稳定技术

区别于典型单反射镜平台方式, 当探测器输出视轴不平行于外框架转动轴时, 称为特殊反射镜平台, 仅用于特殊需求场合。下面对该类型反射镜平台视轴稳定控制特点进行分析, 如图 4 所示。设定反射镜方位轴  $oy_M$  与探测器输出视轴  $\vec{A}$  夹角为  $\delta$ , 该反射镜安装方式在系统体积受限的条件下可以实现大俯仰范围搜索<sup>[7]</sup>。

在该种安装方式下, 推导反射镜转动后视轴转动角与反射镜框架旋转角  $\alpha$ 、 $\beta$  角之间关系。由于探测器输出视轴与参考坐标系方位轴  $oy_B$  夹角为  $\delta$ , 其在参考坐标系下投影可以表示为  $\vec{A}_B = [\sin \delta \quad \cos \delta \quad 0]^T$ 。

镜面法线单位矢量在参考坐标系下投影  $\vec{N}_B$  与公式(5)一致, 根据公式(1)求得出射视轴在参考坐标系中的投影  $\vec{A}_B$  为:

$$\vec{A}_B = [\sin \delta \cdot (1 - \cos^2 \alpha \cdot (\sin 2\beta - 1)) + \cos \alpha \cdot \cos 2\beta \cdot \cos \delta \cdot \cos \alpha \cdot \cos 2\beta \cdot \sin \delta + \sin 2\beta \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha (\sin \beta + \cos \beta)^2 \cdot$$

$$\cos \alpha \cdot \sin \delta - \sin \alpha \cdot \cos 2\beta \cdot \cos \delta]^T \quad (12)$$

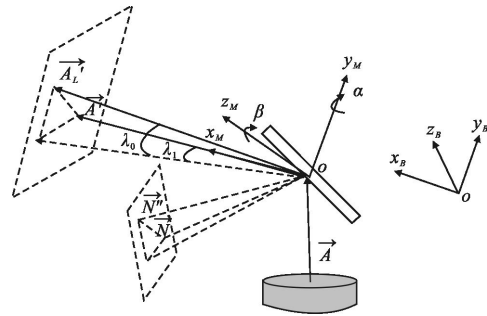


图4 特殊反射镜视轴运动示意图

Fig.4 Scheme diagram of a special single mirror LOS kinematics

已知  $\lambda_1$ 、 $\lambda_0$  和  $\alpha$ 、 $\beta$  角关系为:

$$\begin{aligned} \cos \lambda_1 &= \frac{A_{Bx}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}} \\ \sin \lambda_1 &= \frac{A_{Bz}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}} \\ \cos \lambda_0 &= \frac{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} \\ \sin \lambda_0 &= \frac{-A_{By}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} \end{aligned} \quad (13)$$

将公式(12)代入公式(13)可以得到  $\lambda_1$ 、 $\lambda_0$  与  $\alpha$ 、 $\beta$  之间关系, 由于公式复杂, 这里不再详述。但可知  $\lambda_1$ 、 $\lambda_0$  与  $\alpha$ 、 $\beta$  之间存在强耦合和非线性的关系, 因此反射镜平台视轴稳定控制存在严重的非线性和强耦合。目前, 实现非线性控制的基本思路是利用查表法或局部线性算法逆解控制方程, 同时为了降低控制回路间的耦合干扰, 需要进行解耦控制, 增加了系统控制算法的复杂性以及对传感器输出精度提出了更高的要求<sup>[11]</sup>。因此, 通常情况下不建议使用这种类型的反射镜平台。而在快速反射镜等反射镜小角度转动的应用中, 由于采用小角度近似简化了控制的非线性和耦合特性, 在结构体积受限的条件下, 可以考虑这种类型反射镜平台<sup>[8]</sup>。

### 3 多反射镜平台视轴稳定技术

基于光路可折叠的多反射镜平台在较为紧凑的光学构型条件下可以实现更加灵活的光轴运动和结构布局, 从而得到了广泛关注。通常情况下, 采用两块转动轴相互垂直的反射镜可以满足视轴稳定和指向要求。同时, 为了避免光学渐晕和扩大扫描视场,

第一块反射镜除了绕自身旋转轴旋转以外,还要与第二块反射镜共同绕第二块反射镜的旋转轴运动<sup>[7]</sup>。下面对典型的多反射镜平台视轴运动学关系和视轴稳定技术进行分析。

### 3.1 极坐标式反射镜平台视轴稳定技术

极坐标反射镜平台具有结构简单、尺寸紧凑等优点,可以实现对目标的大离轴角探测与跟踪典型代表为美国的 AIM-9X 滚-摆式导引头<sup>[12]</sup>。极坐标反射镜平台通过 4 块反射镜实现对系统入射视轴的偏转,由于出射光束平行于入射光束,可以实现视轴极坐标控制方式。该系统的视轴运动示意图及简化模型如图 5 所示。

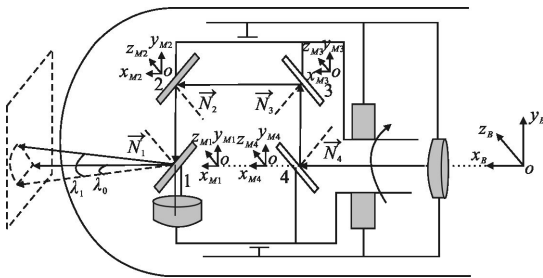


图 5 极坐标式反射镜视轴运动示意图

Fig.5 Scheme diagram of the polar coordinate mirror LOS kinematics

其中第 1、2 块反射镜控制视轴运动,第 3、4 块反射镜不改变视轴指向,完成对视轴偏移的补偿。虽然针对 AIM-9X 导引头极坐标控制方式的研究文献较多,但没有深入研究和分析反射镜的视轴运动关系和稳定控制方式。下面以上节介绍的虚拟稳定平台重建视轴惯性空间角速度的方法为基础,推导极坐标反射镜平台视轴输出角速度并对稳定方式进行分析。

推导过程如下:设定滚动外框带动第 1、2、3、4 反射镜转动  $\gamma$  角,方位内框带动第 1 反射镜转动  $\alpha$  角,定义第 1 块反射镜法线向量在参考坐标系中投影为  $\vec{N}_{1B} = T(-\gamma) \cdot T(-\beta) \cdot [\sqrt{2}/2 \ \sqrt{2}/2 \ 0]^T$ ;定义第 2 块反射镜法线向量在参考坐标系中投影为  $\vec{N}_{2B} = T(-\gamma) \cdot [-\sqrt{2}/2 \ -\sqrt{2}/2 \ 0]^T$ ;定义第 3 块反射镜法线向量在参考坐标系中投影为  $\vec{N}_{3B} = T(-\gamma) \cdot [\sqrt{2}/2 \ -\sqrt{2}/2 \ 0]^T$ ;定义第 4 块反射镜法线向量在参考坐标系中投影为  $\vec{N}_{4B} = T(-\gamma) \cdot [-\sqrt{2}/2 \ \sqrt{2}/2 \ 0]^T$ 。入射视轴矢量在参考坐标系投影可以表示为  $\vec{A}_B = [1 \ 0$

$0]^T$ 。按照第 3.1 节步骤逐步求解入射视轴经过第 4、3、2、1 块反射镜后反射后在参考坐标系投影  $\vec{A}_B$ :

$$\vec{A}_B = [\cos\alpha \ \sin\alpha \cdot \sin\gamma \ -\sin\alpha \cdot \cos\gamma]^T \quad (14)$$

同时,视轴在参考坐标系投影同样可等效为两轴虚拟整体稳定平台外滚转框架转动  $\lambda_1$  角、内方位框架转动  $\lambda_0$  角引起的视轴投影分量。由图 5 推导出  $\lambda_1$ 、 $\lambda_0$  和  $\alpha$ 、 $\beta$  关系:

$$\begin{aligned} \cos\lambda_1 &= \frac{-A_{Bz}'}{\sqrt{(A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} = \cos\gamma \\ \sin\lambda_1 &= \frac{A_{By}'}{\sqrt{(A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} = \sin\gamma \\ \cos\lambda_0 &= \frac{A_{Bx}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} \cos\alpha \\ \sin\lambda_0 &= \frac{\sqrt{(A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} \sin\alpha \end{aligned} \quad (15)$$

由公式(15)可知,  $\lambda_0 = \alpha$ ,  $\lambda_1 = \beta$  视轴转动角与反射镜框架角具有 1:1 关系。因此,可以完全按照整体稳定平台控制方式进行视轴稳定控制:(1) 将陀螺安装在第 1 块反射镜最内框直接测量视轴输出角速度,按照整体稳定平台直接稳定控制方式实现视轴稳定控制;(2) 当系统体积、结构受限时,将陀螺安装在基座上,按照整体稳定平台捷联稳定控制方式实现视轴稳定控制,该种稳定控制方式在 AIM-9X 导引头中使用。

### 3.2 直角坐标反射镜平台视轴稳定技术

第 3.1 节所述极坐标式反射镜平台可以实现大离轴角探测与跟踪,但在小离轴角附近存在奇异性问题。在不需稳定平台视场范围覆盖前半球的条件下,改变第 1、2 块反射镜的安装位置使出射光束垂直于入射光束<sup>[7]</sup>,从而实现与常规方位-俯仰两框架整体稳定平台类似的直角坐标多反射镜平台形式,该系统的视轴运动示意图及简化模型如图 6 所

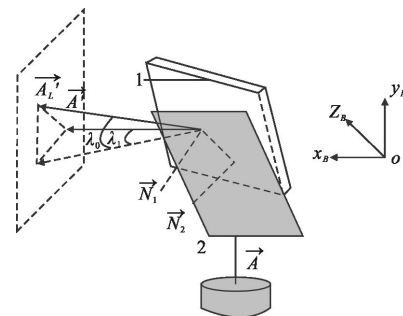


图 6 直角坐标反射镜视轴运动示意图

Fig.6 Scheme diagram of the orthogonal coordinate mirror LOS kinematics

示。其中,方位外框架带动第 1、2 块反射镜绕共同转动,俯仰内框架带动第 1 块反射镜转动。

推导过程如下: 设定方位框带动第 1、2 反射镜转动  $\alpha$  角,俯仰框带动第 1 反射镜转动  $\beta$  角。定义第 1 块反射镜法线向量在参考坐标系中投影为  $\vec{N}_{1B} = T(-\alpha) \cdot T(-\beta) \cdot [\sqrt{2}/2 \ 0 \ -\sqrt{2}/2]^T$ ; 定义第 2 块反射镜法线向量在参考坐标系中投影为  $\vec{N}_{2B} = T(-\alpha) \cdot [0 \ -\sqrt{2}/2 \ \sqrt{2}/2]^T$ 。入射视轴矢量在参考坐标系投影表示为  $\vec{A}_B = [0 \ 1 \ 0]^T$ 。求解出入射视轴经过反射镜后在参考坐标系投影  $\vec{A}_B'$ :

$$\vec{A}_B' = [\cos\alpha \cdot \cos\beta \ \sin\beta \ -\sin\alpha \cdot \cos\beta]^T \quad (16)$$

求解  $\lambda_1$ 、 $\lambda_0$  和  $\alpha$ 、 $\beta$  角关系:

$$\begin{aligned} \cos\lambda_1 &= \frac{A_{Bx}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}} = \cos\alpha \\ \sin\lambda_1 &= \frac{-A_{Bz}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}} = \sin\alpha \\ \cos\lambda_0 &= \frac{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{Bz}')^2}}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} \cos\beta \\ \sin\lambda_0 &= \frac{A_{By}'}{\sqrt{(A_{Bx}')^2 + (A_{By}')^2 + (A_{Bz}')^2}} \sin\beta \end{aligned} \quad (17)$$

由公式(17)可知,  $\lambda_0 = \alpha$ ,  $\lambda_1 = \beta$ , 视轴转动角与反射镜框架角具有 1:1 关系。因此,直角坐标双反射镜平台解决了常规单反射镜平台光路 2:1 关系,与方位/俯仰两框架整体稳定平台控制方式完全一致。

### 4 仿真实验

由于常规单反射镜平台俯仰轴具有视轴转动与反射镜转动角度固有的 2:1 的特性,此节选取常规单反射镜平台俯仰轴进行建模、仿真。俯仰轴机电模型示意图如图 7 所示<sup>[4]</sup>。其中  $u_a$  为俯仰框电机输入

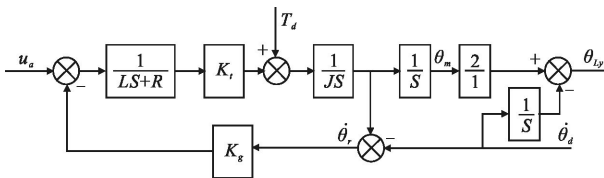


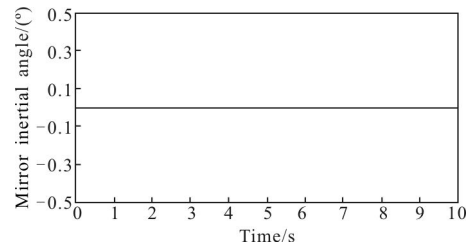
图 7 俯仰轴机电模型示意图

Fig.7 Schematic drawing of the elevation axis electromechanical model

电压,  $L$  为电机电枢电感,  $R$  为电机电枢内阻,  $K_t$  为力矩系数,  $J$  为转动惯量,  $K_s$  为反电动势系数,  $\dot{\theta}_b$  为

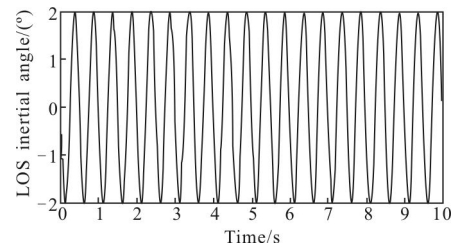
载体扰动角速度,  $\dot{\theta}_r$  为框架相对速度,  $\theta_m$  为视轴惯性角度,  $\theta_{ly}$  为视轴惯性角度,  $T_d$  为总干扰力矩。在相同的仿真环境下建立反射镜平台稳定回路控制模型,通过对反射镜直接稳定和基于视轴重建的虚拟整体稳定平台两种方法比较,验证基于视轴重建的虚拟整体稳定平台控制技术的有效性。

图 8 和图 9 分别是采用上述两种稳定方法的反射镜惯性角度输出响应和视轴惯性角度输出响应。其仿真条件为:俯仰框架稳定回路输入为零;载体干扰运动为正弦信号,其幅值是  $2^\circ$ ,频率是 2 Hz。



(a) 反射镜惯性角度输出

(a) Mirror inertial angular output



(b) 视轴惯性角度输出

(b) LOS inertial angular output

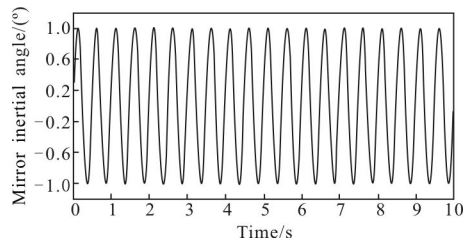
图 8 反射镜稳定控制仿真结果

Fig.8 Simulation result of mirror stabilization control

由图 8 可见,当直接稳定反射镜平台时,反射镜惯性输出角度为零,但视轴输出角度为  $2^\circ$ 、2 Hz 正弦运动,与载体扰动干扰运动一致。因此,采用直接稳定反射镜方法尽管实现了反射镜惯性空间稳定,但无法实现视轴惯性空间稳定。

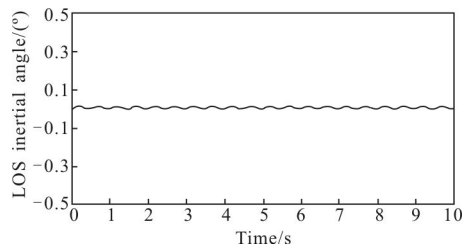
由图 9 可见,当采用基于视轴重建的虚拟整体稳定平台视轴控制方法时,反射镜惯性输出角度为  $1^\circ$ 、2Hz 正弦运动,以克服反射镜 2:1 特性。同时视轴输出角度最大值约为  $0.012^\circ$ ,即视轴的稳定精度达到  $0.012^\circ$ 。尽管稳定控制回路特性差异会导致视轴稳定精度有所变化,但该方法具有隔离载体干扰运

动,实现视轴惯性空间稳定的能力。



(a) 反射镜惯性角度输出

(a) Mirror inertial angular output



(b) 视轴惯性角度输出

(b) LOS inertial angular output

图 9 视轴稳定仿真结果

Fig.9 Simulation result of LOS stabilization

因此,当反射镜平台视轴转动与反射镜转动角度不是 1:1 关系时,反射镜直接稳定控制方法并不能够使视轴保持惯性空间稳定,而采用视轴重建的虚拟整体稳定平台方法可以实现反射镜平台的视轴稳定控制。

## 5 结论

反射镜平台充分利用了光学设计,系统结构形式灵活,可以根据系统结构空间灵活布置在成像光路中。同时,灵活的光学设计也带来了稳定控制方式和控制策略的多样性。文中通过推导反射镜视轴运动学关系,建立了基于虚拟整体稳定平台的反射镜视轴惯性空间角速度重建方法,实现了对不同类型反射镜平台的视轴稳定控制,同时对不同类型反射镜平台视轴稳定控制的技术特点进行了分析,并得到以下结论:

(1) 典型单反射镜平台具有视轴转动与反射镜转动角度固有的 2:1 的特性。因此,无法采用直接稳定控制方式,常采用 2:1 机械传动机构或重建视轴惯性空间角速度的方法以实现视轴稳定控制。随着微处理器技术、传感器技术的发展以及反射镜平台

轻量化、高精度的需求,基于视轴惯性空间角速度重建的捷联稳定控制技术已成为反射镜视轴稳定控制的主要发展方向。

(2) 特殊单反射镜平台视轴稳定控制具有强耦合、非线性的特点。因此,无法采用直接稳定控制方式或机械传动方式,同时需要复杂的控制算法和高精度的传感器保证捷联稳定控制性能,在反射镜小角度转动的应用中可以考虑采用该类型反射镜平台。

(3) 极坐标和直角坐标多反射镜平台采用多块反射镜控制视轴运动,可以实现视轴转动与反射镜转动角度 1:1 关系。因此,可以根据结构布局、性能指标等因素在直接稳定和捷联稳定两种稳定方式之间选择。同时,根据出射光束和入射光束平行或垂直的关系可以实现视轴极坐标控制和直角坐标控制,具有实现方式多样性的特点。但多块反射镜安装精度对稳定平台控制性能的影响是需要进一步研究的工程应用问题。

## 参考文献:

- [1] Hilkert J. Inertially stabilized platform technology [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28(1): 26-46.
- [2] Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng, Zhang Zhiyong, et al. Analysis and design of multi-loop IMC controller for electro-optical serve control systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2020-2027. (in Chinese)  
周晓尧, 范大鹏, 张智永, 等. 光电伺服控制系统多回路内模控制器分析与设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 2020-2027.
- [3] Zhu Huazheng, Fan Dapeng, Zhang Wenbo, et al. Influence analysis of the mass imbalance torque on the performance of seeker servo mechanism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 767-772. (in Chinese)  
朱华征, 范大鹏, 张文博, 等. 质量不平衡力矩对导引头伺服机构性能影响分析 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 767-772.
- [4] Hong Huajie, Wang Xuewu, Weng Ganfei. Mirror stabilization in electro-optical reconnaissance system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 591-597. (in Chinese)  
洪华杰, 王学武, 翁干飞. 光电侦查装备中的反射镜稳定技术[J]. *应用光学*, 2011, 32(4): 591-597.
- [5] Hilkert J. A comparison of inertial line-of-sight stabilization techniques using mirror[C]//SPIE, 2004, 5430: 13-22.
- [6] Casey W L, Phinney D D. Representative pointed optics and

- associated gimbal characteristics [C]//SPIE, 1988, 887: 116–123.
- [7] Netzer Y. Line-of-sight steering and stabilization [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(1): 96–104.
- [8] Hilkert J. Development of mirror stabilization line-of-sight rate equations for an un-conventional sensor-to-gimbal orientation [J]. *SPIE Proceedings*, 2009, 7338: 10.1117/12.818805
- [9] Hui Bin, Li Jingzhen, Huang Hongbin, et al. Optical analysis of space two-axis scanning mirror [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(9): 508–511. (in Chinese)  
惠彬, 李景镇, 黄虹宾, 等. 45°二维扫描镜扫描轴系特性分析[J]. *红外技术*, 2006, 28(9): 508–511.
- [10] Dong Xiaomeng, Zhang Ping, Fu Kuisheng. Strapdown control of orthogonal three-axis opto-electronic guidance platform [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 34(11): 5–9. (in Chinese)  
董小萌, 张平, 付奎生. 三轴直角结构光电导引平台的捷联控制[J]. *光电工程*, 2010, 34(11): 5–9.
- [11] Fan Dapeng, Zhou Yuan, Lu Yafei, et al. Overview of beam steering technology based on rotational double prisms [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 137–150. (in Chinese)  
范大鹏, 周远, 鲁亚飞, 等. 旋转双棱镜光束指向控制技术综述[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 137–150.
- [12] Jiang Huhai. Research on strategy for target tracking in zenith zone of the roll-pitch seeker [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)  
姜湖海. 滚摆式导引头过顶跟踪控制策略研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.