

《光电稳定跟踪装置控制技术》专题文章导读

范大鹏

国防科技大学机电工程与自动化学院

光电稳定跟踪装置,通常指瞄准、跟踪、稳定、视线或瞄准线控制装置,该装置具有隔离载体扰动,保持光电传感器载荷在惯性空间的指向的能力,因此在军民用电光技术领域得到广泛的应用。

光电稳定跟踪装置的稳定对象种类很多,比如前视红外热像仪、TV 像机、激光测距/指示器、导弹跟踪装置、波束指向/控制器(激光瞄准镜、激光通信设备)、雷达和 LADAR 等。装置所处的环境由其载体(飞机、导弹、舰船、外太空飞行器或陆地车辆等)的运动所决定。光电稳定跟踪装置核心是一个可以补偿载体运动/振动对视线的扰动,并能使视线跟踪目标的精密机械伺服装置,如自行火控系统、目标侦察和监视系统、移动载体防空系统和外太空激光通信系统等。随着技术的发展,光电稳定装置的稳定精度已达到微弧度量级,这就对装置的机械和控制精度提出了很高的要求。研究这类高精度光电伺服装置的设计、制造和控制问题受到有关专家的高度重视。

国内从事光电稳定跟踪技术研究的单位较多。在《光电稳定跟踪装置控制技术》这一专栏中,我们谨以《光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究》、《光电稳定跟踪装置的控制系统设计》和《光电稳定跟踪装置中微机陀螺滤波方法研究》三篇文章,分别从光电稳定机理、控制系统设计和传感器信号处理等三个方面,说明光电稳定跟踪控制装置的设计方法及可能会遇到的问题。文一着重从运动学角度分析了具有稳定功能且无天顶跟踪盲锥区的新型三轴光电稳定装置的稳定原理,推导了三轴视线稳定的数学模型,从理论上分析了瞄准线稳定精度对图像稳定精度的影响;文二介绍了采用全数字控制技术的光电稳定装置的伺服控制方案,并分析了使用 dSAPCE 半实物仿真系统进行此类控制系统设计的一般过程及可能遇到的问题,针对采用双环结构时的频域耦合问题进行了理论上的解耦分析和设计,提供了一个较为规范的数字控制系统设计和实现方案;鉴于微机陀螺在光电稳定装置中具有广泛的应用前景,文三首先应用随机系统的有关理论推导了陀螺随机噪声对稳定和跟踪精度的影响,分析了典型微机陀螺的信号特征,并对比研究了基于时间序列模型的卡尔曼滤波算法和基于阈值决策的小波去噪方法在微机陀螺信号处理中应用的优缺点,为微机陀螺的应用提供了信号分析和处理的思路。

希望上述文章能对从事相关技术研究的读者有所帮助。

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究

张智永,范大鹏,范世珣

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:介绍了一类使用微机电速率陀螺组合、具有全稳定功能、且无天顶跟踪盲锥区的新型高精度三轴光电稳定跟踪装置的稳定机理。首先分析了该类装置中的坐标系及其相互之间的关系,然后运用多体力学的方法推导了该类装置的运动学方程,得出了三轴平台式速率稳定装置的数学模型。该模型表明,实现三轴全姿态稳定,不同的陀螺安装方法有不同的优缺点。研究了由于瞄准线稳定误差带来的图像相对运动和变形情况,分析了瞄准线稳定精度对图像稳定精度的影响。结果表明,两轴稳定装置绕轴线的旋转会造成比较大的图像稳定误差,而三轴稳定装置可以有效抑制绕轴旋转误差,从而达到较高的图像稳定精度。

关键词:光电稳定跟踪装置;瞄准线;陀螺稳定;图像稳定;精度

中图分类号:V241.5 文献标识码:A

收稿日期:2003-04-22;修订日期:2003-11-18.

基金项目:

Research of the basic principles of E-O stabilization and tracking devices

Zhang Zhi-yong, Fan Da-peng, Fan Shi-xun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With whole stabilization ability, whole airspace tracking and no blind-zone, a high stabilization and tracking accuracy three-axis E-O stabilization and Tracking Devices (EOSTD), which uses a MEMS velocity gyroscope as inertial feedback component, were introduced. The coordinates in this device were analyzed and the kinematic equation and the stabilization model were deduced based on the multi-body kinetic theory. The mathematical model indicates that different gyroscope installation methods can be used to realize three-axis attitude stabilization. Also the motion and distortion of image caused by the jitter of the Line-of Sight (LOS) was researched and the relationship between the LOS stabilization precision and the image stabilization precision was analyzed. The results show that two-axis EOSTD would cause large image stabilization error and three-axis EOSTD could restrain the image rotation around the LOS axis to reach a high stabilization precision.

Key words: E-O Stabilization and Tracking Device (EOSTD); Line-of-Sight (LOS); gyro stabilization; image stabilization; precision

1 引言

舰艇、飞机和各种战车上的光电系统,由于使用环境经常处于摇摆、颠簸、振动等状态,载体的姿态变化会造成视线轴指向不稳定,从而对被稳定对象的清晰成像、火控设备的瞄准、通信设备的指向产生显著影响;用于人眼观察的摄像系统,图像的不稳定会使观察者产生疲劳感,进而导致误判和漏判;对于目标自动识别与跟踪系统会由于动态跟踪误差增大而降低跟踪目标的能力,因此需要对光电系统进行稳定^[1~5]。陀螺仪由于具有独特的惯性空间稳定性和进动性功能,被广泛地应用于各类稳定系统中。陀螺稳定装置是一种以陀螺仪为敏感元件,使被稳定光电传感器在干扰因素作用下能相对惯性空间保持方位不变,或按指定跟踪指令相对惯性空间转动,从而实现光电传感器指向稳定的陀螺稳定跟踪装置^[6]。

20世纪90年代以来,光电稳定跟踪装置已被广泛地应用于各种军用和民用领域,但随着光电捕获、瞄准、监视和跟踪系统的发展,对图像稳定精度的要求越来越高,传统的使用机械的、机电

结合的或光机电结合的转向机构进行光电图像稳定的光电稳定装置,由于采用两轴瞄准线稳定方式,具有不可避免的图像旋转缺陷,已逐渐不能适应高精度图像稳定系统的要求^[7,8]。随着计算机技术的发展,捷联式三轴稳像的概念受到越来越多的重视,但真正实用化的系统尚不多见,究其原因,一是大部分载体并不能提供高精度的三轴姿态信号,二是角度方式的高精度三轴捷联惯导组合的成本仍然过高,三是纯速率方式的三轴捷联组合难以提高最终的稳定精度^[9~11]。

基于上述原因,基于传统概念但使用新型陀螺(如激光陀螺、光纤陀螺和微机电陀螺等)的三轴平台式光电稳定系统在国外多种新型光电吊舱、导引头和光电桅杆中得到了广泛的应用。

2 光电稳定跟踪装置中的坐标系

光电稳定跟踪装置中的坐标系主要包括惯性坐标系、载体坐标系、框架坐标系和指令视线坐标系^[6,12],其定义如下:

惯性坐标系 $OX_iY_iZ_i$: 坐标系的原点设在地

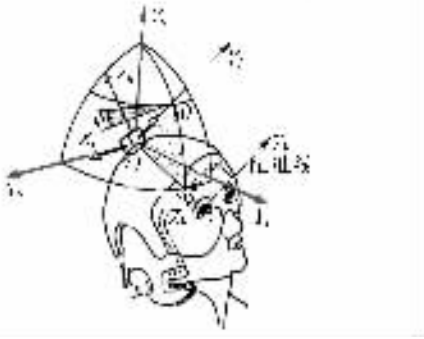


图 1 指令视线与载体坐标系

Fig. 1 LOS command and carrier coordinates

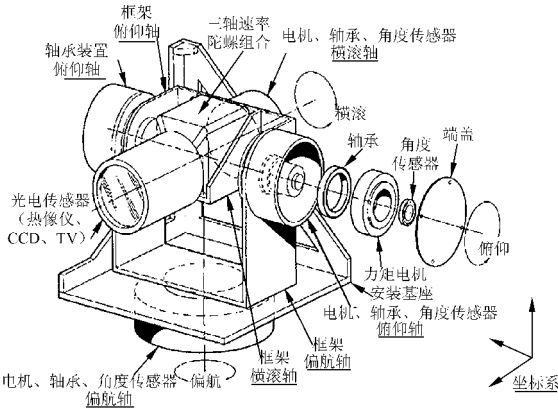


图 2 三轴光电稳定跟踪装置组成

Fig. 2 Constitutes of three-axis E-O stabilization and tracking device

球中心, OZ_i 轴沿地球自转轴, 而 OX_i 轴、 OY_i 轴在地球赤道平面内正交, 并且和 OZ_i 轴组成右手坐标系。当运动体在地球附近运动时, 多采用此坐标系为惯性坐标系。

地理坐标系 $OX_t Y_t Z_t$: 是在载体上用来表示飞行器所在位置的东向、北向和垂线方向的坐标系。地理坐标系的原点选在载体重心处, $X_t OY_t$ 组成水平面, OX_t 指向东, OY_t 指向北, OZ_t 沿垂线方向指向天(东北天)。地理坐标随地球自转相对惯性坐标系运动, 同时随载体的运动相对惯性坐标系运动, 在近地面场合, $OX_t Y_t Z_t$ 可以用来替代惯性坐标系 $OX_i Y_i Z_i$ 。

载体坐标系 $OX_b Y_b Z_b$: 为了确定运动载体相对于惯性坐标系 $OX_t Y_t Z_t$ 的角位置(通常称为首向及水平姿态), 需建立与载体固连的坐标系, 即载体坐标系, 其原点为载体重心 O , 纵轴 OY_b 沿载体首尾向并指向首部, 横轴 OX_b 指向载体右

侧, OZ_b 垂直于载体平面。当载体没有纵摇和横滚变化时, $OX_b OY_b$ 平面即为水平面, 此时 OZ_b 轴沿铅垂线指向天顶。通常, 载体坐标系在惯性坐标系内的姿态可用三个欧拉角 H 、 P 、 R 表示, H 为航向角, P 为俯仰角, R 为横滚角。坐标旋转变换的次序为:

$$OX_t Y_t Z_t \xrightarrow{H} OX_{t1} Y_{t1} Z_{t1} \xrightarrow{P} OX_{t2} Y_{t2} Z_{t2} \xrightarrow{R} OX_b Y_b Z_b$$

$OX_b Y_b Z_b$

指令视线坐标系 $OX_h Y_h Z_h$: 定义指令视线方向为 OY_h 的正方向, OX_h 、 OZ_h 定义为当指令视线平视载体正前方时, 指令视线坐标系 $OX_h Y_h Z_h$ 与载体坐标系 $OX_b Y_b Z_b$ 重合; 指令视线坐标系相对于载体坐标系的方位关系用三个欧拉角 (Ψ 、 θ 、 Φ) 表示, 其中 Ψ 为方位角, θ 为高低角, Φ 为横滚角。三个欧拉角是指令视线坐标系对载体坐标系进行旋转变换得到的。旋转变换的次序类似于载体坐标系。

光电装置框架坐标系 $OX_r Y_r Z_r$: 光电稳定跟踪装置一般采用偏航、高低、横滚三轴框架结构, 偏航轴为外框, 高低轴为中框, 横滚轴为内框, 如图 2 所示。规定光电传感器安装的前向光路为 OY_r 轴正方向, 和指令视线坐标系的定义相似, 当 OY_r 轴与载体坐标系的 OY_b 平行且指向载体正前方时, $OX_r Y_r Z_r$ 与 $OX_b Y_b Z_b$ 重合。框架坐标系相对于载体坐标系的方位关系用三个欧拉角 (θ_a 、 θ_f 、 θ_r) 表示, 其中 θ_a 表示方位角, θ_f 表示高低角, θ_r 表示横滚角。三个欧拉角是框架坐标系对载体坐标系进行三次旋转变换得到的。旋转变换的次序类似于载体坐标系。

3 三轴光电稳定跟踪装置的运动分析

因为三轴平台的输入量(指令角速率)、干扰量(陀螺仪漂移角速率、干扰力矩和载体角速率)和输出量(各轴输出力矩、角速度和角度)均为向量, 所以三轴平台的动力学方程为向量方程, 为了运算方便和物理概念理解的正确, 需要将向量方程改称等效的矩阵方程, 这就出现了向量在坐标系中的变换问题。从陀螺稳定系统的原理而言, 角位移稳定方程和角速率稳定方程均可以实现光电传感器瞄准线的稳定。一般的文献总是从角位移的角度推导捷联式三轴稳定系统的正逆运动学

方程,如上所述,获得准确的姿态角有相当的难度,因此本文从角速率的角度推导平台式三轴稳定系统的运动方程^[13]。

图 3 给出了一个三轴稳定系统的结构原理示意图,其中 A 为方位环,坐标系为 $OX_aY_aZ_a, OZ_a$ 轴和载体坐标系 $OX_bY_bZ_b$ (B 系) 的 OZ_b 轴重合, A 系统绕 OZ_b 轴转角为 θ_a ; F 为俯仰环,坐标系为 $OX_fY_fZ_f, OX_f$ 轴和 A 系的 OX_a 轴重合, F 坐标系绕 OX_a 轴的转角为 θ_f ; R 为横滚环,坐标系为 $OX_rY_rZ_r, OY_r$ 轴和 F 系的 OY_f 轴重合, R 坐标系绕 OY_f 轴的转角为 θ_r 。

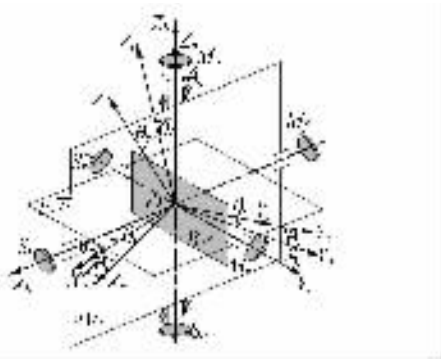


图 3 三轴光电稳定跟踪装置坐标示意图

Fig. 3 Schematic of the coordinate of three-axis E-O stabilization and tracking device

由基座角运动的耦合与隔离的原理知,当基座(B 系)有角速度时,将通过平台安装轴的几何约束和摩擦约束向平台台体耦合。由于方位、俯仰和横滚伺服回路的存在,将会全部隔离耦合过来的基座角速度。B 系、A 系、F 系和 R 系三个坐标系间的相对位置关系如图 4 所示。

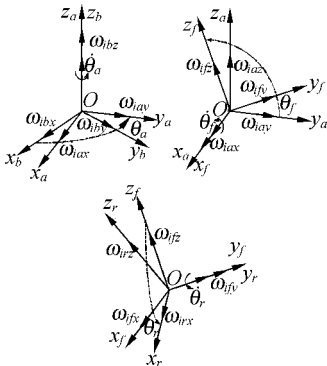


图 4 三轴平台坐标系间的相对运动关系

Fig. 4 Relative motion between different coordinates of three-axis platform

设 $\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz}$ 为载体角速度沿三个坐标轴的分量, 设 $\hat{\omega}_B(t) = [\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz}]^T$ 。

B 系 \rightarrow A 系 \rightarrow F 系 \rightarrow R 系的坐标变换分别通过坐标变换矩阵 $\bar{R}_{\theta_a}, \bar{R}_{\theta_f}$ 和 \bar{R}_{θ_r} 实现, 坐标变换关系如下:

$$\begin{cases} \hat{\omega}_A(t) = \bar{R}_{\theta_a}(t)\hat{\omega}_B(t) + \hat{\theta}_a(t) \\ \hat{\omega}_F(t) = \bar{R}_{\theta_f}(t)\hat{\omega}_A(t) + \hat{\theta}_f(t) \\ \hat{\omega}_R(t) = \bar{R}_{\theta_r}(t)\hat{\omega}_F(t) + \hat{\theta}_r(t) \end{cases}$$

$$\bar{R}_{\theta_a} = \begin{bmatrix} c_{\theta_a} & s_{\theta_a} & 0 \\ -s_{\theta_a} & c_{\theta_a} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \bar{R}_{\theta_f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\theta_f} & -s_{\theta_f} \\ 0 & s_{\theta_f} & c_{\theta_f} \end{bmatrix},$$

$$\bar{R}_{\theta_r} = \begin{bmatrix} c_{\theta_r} & 0 & s_{\theta_r} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{\theta_r} & 0 & c_{\theta_r} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $c_x = \cos(x), s_x = \sin(x), \theta_a$: A 系相对 B 系的转角。 $\hat{\omega}_B(t)$ 为 B 系内的角速率矢量,

$\hat{\omega}_B(t), \hat{\omega}_A(t), \hat{\omega}_F(t)$ 和 $\hat{\omega}_R(t)$ 分别为 A 系、F 系和 R 系内的角速率矢量。

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_a(t) &= [0 \ 0 \ \dot{\theta}_a(t)]^T, \dot{\theta}_a(t) = \omega_{Az}(t) - \omega_{Bz}(t) \\ \hat{\theta}_f(t) &= [0 \ \dot{\theta}_f(t) \ 0]^T, \dot{\theta}_f(t) = \omega_{Fy}(t) - \omega_{Ay}(t) \\ \hat{\theta}_r(t) &= [\dot{\theta}_r(t) \ 0 \ 0]^T, \dot{\theta}_r(t) = \omega_{Rx}(t) - \omega_{Fx}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

当方位、俯仰和横滚伺服回路同时工作时, B 系与 R 系内的角速率矢量 $\hat{\omega}_B(t)$ 和 $\hat{\omega}_R(t)$ 的关系为:

$$\hat{\omega}_R(t) = \bar{R}_{\theta_r} \bar{R}_{\theta_f} \bar{R}_{\theta_a} \hat{\omega}_B + \bar{R}_{\theta_r} \bar{R}_{\theta_f} \hat{\theta}_a + \bar{R}_{\theta_r} \hat{\theta}_f + \hat{\theta}_r, \quad (3)$$

理想情况下, 因为光电传感器的视线轴与 R 系的 Oy_r 轴重合, 所以欲实现三轴稳定效果, 需要使 R 系的三个坐标轴感受到的扰动速率均为零, 即 $\hat{\omega}_R(t) = [\omega_{rx} \ \omega_{ry} \ \omega_{rz}]^T = 0$, 则方位、俯仰和横滚电机需按照以下的速度旋转:

$$\begin{cases} \omega_a = -(\omega_{bx}s_{\theta_a}s_{\theta_f} + \omega_{by}c_{\theta_a}s_{\theta_f} + \omega_{bz}c_{\theta_f}) \cdot \sec\theta_f = \\ \quad -\omega_{fz} \cdot \sec\theta_f \\ \omega_f = -(\omega_{bx}c_{\theta_a} + \omega_{by}s_{\theta_a}) = -\omega_{fx} \\ \omega_r = -(-\omega_{bx}s_{\theta_a}c_{\theta_f} + \omega_{by}c_{\theta_a}c_{\theta_f} + \omega_{bz}s_{\theta_f} + s_{\theta_f}\dot{\theta}_a) = \\ \quad -(-\omega_{bx}s_{\theta_a} + \omega_{by}c_{\theta_a})\sec\theta_f \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)给出了三轴速率陀螺视轴稳定系统角速率补偿的一般表达式, 可以通过该式归纳出

三种陀螺安装方法(下面所指的速率陀螺均为单自由度速率陀螺):捷联式稳定方式(Strapdown Line Of Sight Stabilization,简称 SLOSS)和直接稳定方式(Direct Line Of Sight Stabilization,简称 DLOSS)。

由于计算机数字控制技术的发展,SLOSS 系统的应用也越来越广泛,该类型系统采用三个速率陀螺,分别正交安装在车体上(沿车体坐标系 ox_b 、 oy_b 和 oz_b 方向安装),敏感基座的旋转角速率(ω_{ibx} 、 ω_{iby} 和 ω_{ibz}),再根据转台角位置传感器提供的方位、俯仰角的值,通过数学平台解算出平台的三轴理想旋转角速率,从而使载体扰动等价于瞄准线的扰动。系统通过速率前馈补偿器产生控制信号来消除扰动。由于扰动没有直接在瞄准线坐标系内测量,基座速率传感器必须准确地测量基座的运动速率。

DLOSS 系统使用安装在瞄准线轴上的速率陀螺组合,通常在精密稳定场合中应用较多。该方式需要三个速率传感器和相应的速率补偿回路,易于实现。其安装方式通常有三种:

Method 1: 将三个陀螺安装在 F 系(分别平行于轴 ox_f 、 oy_f 和 oz_f)上,敏感俯仰坐标系的旋转角速率 ω_{fx} 、 ω_{fy} 和 ω_{fz} ,方位、俯仰和横滚电机的目标速度分别为 $-\omega_{fz} \sec\theta_f$ 、 $-\omega_{fx}$ 和 $-\omega_{fz}$ 。方位和俯仰电机与相应的陀螺的关系为反馈稳定,即在考虑耦合的前提下,陀螺是控制回路的反馈元件,控制系统的目标是使方位陀螺与俯仰陀螺的输出保持在零均值左右变动;横滚电机与相应的陀螺的关系为前馈稳定,即横滚陀螺的输出作为横滚电机的目标速度,但横滚电机的转动不影响横滚陀螺的输出。

Method 2: 将两个陀螺安装在 F 系,分别与 ox_f 和 oz_f 轴平行,敏感 ω_{fx} 和 ω_{fz} ,另外一个陀螺安装在 R 系(平行于轴 oy_r)上,敏感 ω_{ry} 。方位、俯仰和横滚电机与陀螺的关系均为反馈稳定,这里不再赘述。

Method 3: 将三个陀螺全部安装在 R 系(平行于轴 ox_r 、 oy_r 和 oz_r)上,敏感 R 系的旋转角速率 ω_{rx} 、 ω_{ry} 和 ω_{rz} ,这种安装的主要问题在于由于横滚角度的存在,方位陀螺和俯仰陀螺存在交叉耦合关系,必须进行解耦运算将其还原到俯仰坐标系的 ox_f 和 oz_f 轴上。

因为需要额外考虑陀螺的安装问题,DLOSS

系统的平台机械框架的体积通常会受到很大影响。较大的机载框架在气流中受到空气阻力和湍流的影响会增大,从而增加了伺服系统的负载,对某些对体积要求极为严格的系统来说是不允许的。限于篇幅,本文及后面的文章只讨论 DLOSS 系统设计的有关问题。

对于一个两轴(方位、俯仰)陀螺稳定系统来说,若要保持光电传感器的瞄准线在惯性空间中没有变化,陀螺一般安装在俯仰环坐标系(分别平行于 ox_f 和 oz_f 轴)内,敏感瞄准线在方位和俯仰方向的角速率 ω_{fa} 和 ω_{fy} ,平台方位、高低电机的目标角速度 ω_a 和 ω_f 应该为:

$$\begin{cases} \omega_a = -(\omega_{ibx} \sin \theta_a \sin \theta_f + \omega_{iby} \cos \theta_a \sin \theta_f + \\ \omega_{ibz} \cos \theta_f) \sec \theta_f = -\omega_{fz} \cdot \sec \theta_f \\ \omega_f = -(\omega_{ibx} \cos \theta_a + \omega_{iby} \sin \theta_a) = -\omega_{fx} \end{cases}, \quad (5)$$

同样,方位和俯仰电机与相应的陀螺的关系为反馈稳定,控制系统的目标是使方位陀螺与俯仰陀螺的输出保持在零均值左右变动。

4 姿态运动引起的目标图像变化^[14-15]

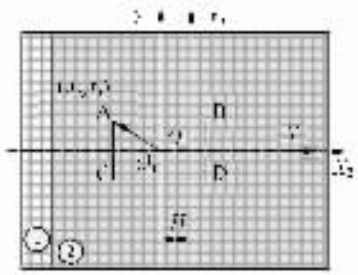
以 CCD 为成像器件的电视摄像机和多元红外热像仪,一般安装在转台内环轴上,其视场是矩形的。下面推导在载体姿态变化条件下,引起 CCD 视场内目标的附加运动情况。设 CCD 视场角度为 (θ_A, θ_E) ,对应像素点数为 (N_A, N_E) 。则 CCD 视场内角度与像素点的比例关系为:

$$K_A = N_A / \theta_A, K_E = N_E / \theta_E, \quad (6)$$

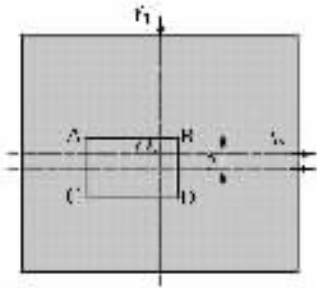
假设在载体水平状态时,CCD 视场内的某一静止目标的象素点 A 的坐标为 (X_t, Y_t) ,在载体俯仰角为 P 、横滚角为 R 、俯仰角运动速度为 ω_{ibx} 、横滚角运动速度为 ω_{iby} 时,CCD 视场内的目标坐标和形状的变化如图 5 所示。

运用计算机图形学的二维图形几何变换的有关坐标平移和旋转的理论,载体发生首摇、纵摇和横摇(H 、 P 、 R)后,目标点 A 在新坐标系内的坐标 (X_t', Y_t') 计算公式为:

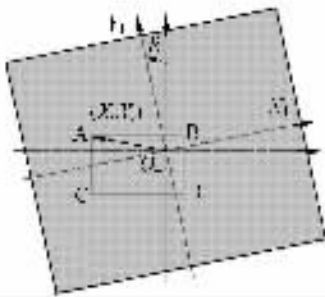
$$\begin{aligned} X_t' &= (X_t - H \cdot K_A) \cdot c_R - (Y_t - P \cdot K_E) s_R \\ Y_t' &= (X_t - H \cdot K_A) \cdot s_R + (Y_t - P \cdot K_E) c_R, \end{aligned} \quad (7)$$



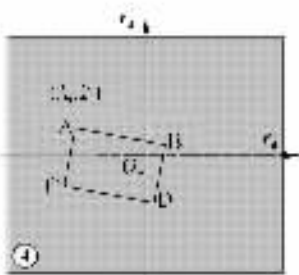
(a)原始图像
(a) Primary image



(b)载体偏航变化时的图像
(b) Image after carrier yaw



(c)载体俯仰变化时的图像
(c) Image after carrier pitching



(d)载体横滚变化时的图像
(d) Image after carrier rolling

图 5 载体姿态变化时目标图像在光电传感器视场内的形状和位置变化

Fig. 5 Target image changes in the E-O sensor LOSV while carrier attitudes changing

其中 $c_R = \cos(R)$, $s_R = \sin(R)$ 。

对上式进行偏微分,可以求得目标点 A 坐标的变化速度为:

$$\begin{aligned} \dot{X}_t' &= (K_A H s_R - X_t s_R - Y_t c_R + K_E P c_R) \dot{R} + \\ &\quad K_E s_R \dot{P} - K_A c_R \dot{H}, \\ \dot{Y}_t' &= (K_E P s_R - X_t c_R - K_t H c_R - Y_t s_R) \dot{R} - \\ &\quad K_E c_R \dot{P} - K_A s_R \dot{H}. \end{aligned} \quad (9)$$

从上式可以看出,当载体发生姿态变化时, CCD 视场内的固定目标的坐标会发生相应的变化,反映在驾驶员的视场内,则不仅有两个方向的平移,还有像的旋转。如果使用两轴稳定平台,则只能消除目标图像的平移,而不能消除像的旋转;而三轴稳定平台则可以起到完全稳像的作用。

5 瞄准线稳定与图像稳定精度的关系

式(9)、(10)给出了载体姿态变化与 CCD 视场内目标特性变化的关系,在此基础上可以初步估算瞄准线稳定精度与图像稳定精度的关系。假定瞄准线稳定精度为: $\Delta H = \Delta P = \Delta R = 0.1 \text{ mrad}$, 则: $\sin \Delta H \approx \Delta H$, $\cos \Delta H \approx 1$; $\sin \Delta P \approx \Delta_p$, $\cos \Delta P \approx 1$; $\sin \Delta R \approx \Delta_R$, $\cos \Delta R \approx 1$ 。

$$K_A = N_A / \theta_A = 320 / 10^\circ = 320 / 0.174533 \text{ rad} = 1833.5 \text{ (像素点/rad)}$$

$$K_E = N_E / \theta_E = 240 / 7.5^\circ = 240 / 0.130899 \text{ rad} = 1833.5 \text{ (像素点/rad)}$$

$$\begin{aligned} \Delta X &= |X_t' - X_{\text{target}}| = |(X_t - \Delta H \cdot K_A) \cdot c_{\Delta R} - \\ &\quad (Y_t - \Delta P \cdot K_E) s_{\Delta R} - X_t| \approx \\ &\quad |\Delta H \cdot K_A - Y_t \Delta_R + K_E \Delta P \cdot \Delta_R|, \end{aligned} \quad (9)$$

省略二阶小量,则: $\Delta X \leq |K_A \Delta H| + |Y_{\text{target}} \Delta R|$ 。同理:

$$\Delta Y \leq |X_t \Delta_R| + |K_E \Delta_p|, \quad (10)$$

这里需要说明的是这里 ΔH 、 ΔP 的单位是 rad,而 Δ_R 则是数值上与 ΔR 相等的一个纯数字量。所以, $\Delta R \leq 1 \text{ mrad}$ 的前提下,对图像稳定精度影响最大的是方位轴和俯仰轴的稳定精度。

例如,对于像素点为 320×240 、视场角为 $10^\circ \times 7.5^\circ$ 、瞄准线稳定精度为 0.1 mrad 的 CCD 探测器,即 $X_t = Y_t = 100$, $\Delta H = \Delta P = \Delta R = 0.1 \text{ mrad}$,由(9)、(10)得:

$$\Delta X = |K_A \Delta H| + |Y_t \Delta_R| = 0.19335 \text{ 像素点};$$

$$\Delta Y = |X_t \Delta_R| + |K_E \Delta_p| = 0.19335 \text{ 像素点}。$$

即图像在 X、和 Y 方向的抖动均不超过 0.2

个像素点。

如果是两轴稳定系统,则 Δ_R 的影响比较大,若前面的 $\Delta R = 50 \text{ mrad} = 2.865^\circ$,则:

$$\Delta X = |K_A \Delta H| + |Y_L \Delta_R| = 5.18335 \text{ 像素点};$$

$$\Delta Y = |X_L \Delta_R| + |K_E \Delta_P| = 5.18335 \text{ 像素点}.$$

即由于图像的旋转,图像在 X 、和 Y 方向的抖动均超过 5 个像素点。

对于用于飞机驾驶员或坦克车长等夜视观瞄用的光电稳像装置,考虑到人眼的视觉暂留效应,人眼对低于 0.5 个像素点的图像抖动不敏感;对于用于目标识别或外太空探测用的稳像装置,则必须要求更高的图像稳定精度,即瞄准线稳定精度必须在 $100 \mu\text{rad}$ 以下。

6 结 论

文章介绍了光电稳定跟踪装置中的各种坐标系及其相互间的关系,进行了三轴光电稳定跟踪装置的运动分析,得出了三轴陀螺稳像装置对姿态变化干扰的全补偿公式,并分析了两轴陀螺稳像装置所不可避免的图像旋转缺陷;文章还推导了载体姿态变化造成的固定目标在视场内的坐标变化公式,在此基础上分析了瞄准线稳定精度对图像稳定精度的影响。本文的分析为光电稳定跟踪装置伺服系统的设计打下了基础。

参考文献:

- [1] MURPHY K, GOLDBLATT S, WARREN J, *et al.* Pointing and stabilization system for use in a high-altitude hovering helicopter[J]. *SPIE*, 1999, 3692: 23-32.
- [2] WANDNER K, KÖRCHER H J. The pointing control system of SOFIA[J]. *SPIE*, 2000, 4014: 360-369.
- [3] RUFFATTO D, BROWN D, POHLE R. Stabilized high-accuracy optical tracking system(shots)[J]. *SPIE*, 2001, 4365: 10-18.
- [4] 沈宏海, 刘晶红, 贾平. 摄像稳定技术[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(2): 115-120.
SHEN H H, JIA P, LIU J H. Overview of image stabilization[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2): 115-120. (in Chinese)
- [5] 贾平, 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(1): 82-88.
JIA P, ZHANG B. Critical technologies and their development for airborne opto_electronic reconnaissance platforms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 82-88. (in Chinese)
- [6] 郭富强, 于波, 王叔华. 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
GUO F Q, YU B, WANG SH H. *Gyro stabilization devices and its application*[M]. Xi an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995. (in Chinese)
- [7] FENG Y F, ZHU Y. Image rotation of two-axis line-of-sight stabilization system[J]. *SPIE*, 2005, 6024: 1-6.
- [8] 廖佳锋, 张坤石. 动基座潜望式仪器瞄准线稳定时像倾斜的特性分析[J]. *光学与光电技术*, 2004, 2(2): 13-17.
LIAO J F, ZHANG K SH. Characteristics analysis of the image tilt in LOS stabilization action of periscope instrument on moving platform[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, 2(2): 13-17. (in Chinese)
- [9] KENNEDY P J, RHONDA L. Direct versus indirect line of sight(los)stabilization[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11: 3-15.
- [10] 王小军. 全空域跟踪的舰载雷达驱动系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2002.
WANG X J. *Servo system study for shipborne radar tracking in the whole airspace*[D]. Harbin Engineering University, 2002. (in Chinese)
- [11] 严武升, 刘宏. 基于前馈补偿的舰载雷达三轴稳定跟踪的研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 1998, 25(5): 650-654.
YAN W SH, LIU H. Study on the 3-axis steady-tracking problem for shipborne radar based on feedforward compensation[J]. *Journal of Xidian University*, 1998 25(5): 650-654. (in Chinese)
- [12] 王永年, 祝梁生, 孙隆和. 头盔显示/瞄准系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
WANG Y N, ZHU L SH, SUN L H. *Helmet display/pointing system*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [13] 金光, 王家骥, 倪伟. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(5): 89-94.

- JIN G, WANG J Q, NI W. The three-error axis of theodolite with the utilization of the coordinate to the variation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(5):89-94. (in Chinese)
- [14] HEARN D, BAKER M P. 计算机图形学(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
HEARN D, BAKER M P. *Computer Graphics(Second Edition)*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry. 2002. (in Chinese)
- [15] 岳敏, 欧阳玲, 阚志宏. 红外成像导引头图像稳定精度研究与优化设计[J]. 西安:西北工业大学学报,1996,14(3):429-432.
YUE M, OU Y L, QUE ZH H. On imaging-stability precision and optimum design for infrared-image homing system[J]. *Journal Of Northwestern Polytechnical University*. 1996, 14(3):429-432. (in Chinese)

作者简介:张智永(1979—),男,国防科学技术大学机电工程与自动化学院博士研究生,研究方向为军用光电稳定跟踪装置设计,军用机电测控系统设计。