

半捷联导引头机电平台观测器的角速率估计

张 跃, 储海荣

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为准确获取半捷联图像导引头视线角速率, 构建了 Kalman 观测器对电机平台进行框架角速率估计。首先, 根据半捷联导引头稳定跟踪原理, 建立了以 Kalman 观测器为状态反馈的数学模型; 其次, 根据编码器误差特性, 应用最优估计理论计算分析了估计精度与观测器参数之间的关系; 再次, 在保证稳定平台带宽的前提下, 设计了两种不同采样率下的 Kalman 观测器; 最后, 进行了数字仿真实验验证。结果表明: 在 2 000 Hz 采样率下, 估计算法角速率精度为 0.098 9 (°)/s, 优于 200 Hz 采样率下的 0.301 3 (°)/s; 两种采样率下导引头带宽均为 59.6 rad/s, 平台隔离度为 1.5%。提高导引头稳定系统采样率并与相应控制参数匹配, 能有效提高平台角速率估计精度。

关键词: 半捷联机电平台; 角速率最优估计; Kalman 观测器; 系统采样率

中图分类号: TJ765.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3794-07

Line of sight angular rate estimation of semi-strapdown seeker electromechanical platform observer

Zhang Yue, Chu Hairong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to estimate the semi-strapdown seeker line of sight (LOS) angular rate accurately, the Kalman observer using for estimating frame angular rate was researched. Firstly, according to the principle of semi-strapdown seeker tracking, mathematical model of Kalman observer for the state feedback was established. Secondly, based on the characteristics of the encoder error, the optimal estimation theory was used to calculate and analyze the relationship among the estimation precision and the observer parameters. Furthermore, under the premise that guarantees the bandwidth of stabilized platform, the Kalman observers under two different sampling rates were designed. Finally, the digital simulation experiment was done, and the result shows that angular rate estimation precision is 0.098 9 (°)/s with 2 000 Hz sampling rate, better than 0.301 3 (°)/s which sampling rate is 200 Hz. Seeker bandwidth which under two kinds of sample rates is 59.6 rad/s, and the seeker disturbance rejection rate is 1.5%. Improve the seeker stabilization system sampling rate and matching with the corresponding control parameters, can effectively improve the reporting rate estimation precision.

Key words: semi-strapdown electromechanical platform; angular rate optimal estimation; Kalman observer; system sampling rate

收稿日期: 2015-04-22; 修订日期: 2015-05-24

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重要项目(YYJ-1122); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目

作者简介: 张跃(1958-), 男, 研究员, 硕士生导师, 硕士, 主要从事飞行器总体技术, 导航、制导与控制等方面的研究。

Email: zhangyue@ciomp.ac.cn

0 引 言

光学图像导引头是精确制导武器的关键部件之一,通常采用陀螺稳定平台隔离弹体扰动,稳定视轴方向,并能直接提取视线角速率信息。随着技术发展,半捷联式导引头撤去了稳定平台上的速率陀螺,达到减小体积和降低成本的目的,但无法直接测量平台惯性角速率,需要通过对平台角速率的估计来实现平台的空间稳定及导弹制导。因此,研究平台角速率估计精度及方法极为重要。

近年来,国内外学者已开展相关研究。参考文献[1]对半捷联导引头平台稳定与跟踪技术进行研究,针对传感器与微分运算方法造成的视线角速率误差较大,提出利用弹目距离信息构建视线角速率滤波模型,达到制导精度要求;参考文献[2]通过平台动力学,研究半捷联图像制导的光轴稳定与视线角速率提取方法,用系统仿真验证命中精度结果,但没有涉及平台伺服性能及平台角速率精度;参考文献[3]讨论了半捷联导引头视线转率提取及视线转率与弹体角速率、框架角速率、探测误差角速率的误差传递特性,没有解决框架角速率的获取方法。参考文献[4]使用 α - β 滤波器及其延迟补偿,使系统的稳定精度提高了 76%,达到了传统常平架式稳定平台的稳定精度;参考文献[5]利用自抗扰控制技术设计了稳定回路的控制器,使平台隔离度达到 4%,未考虑框架角速度的估计精度;参考文献[6]利用跟踪微分器从角位置信号中微分求得角速度信号,并实现导引头稳定控制,系统稳定精度提高了 80%;参考文献[7]通过设计解耦指令分配算法和伺服控制算法实现了对光轴的高精度稳定控制和跟踪,角度误差小于 0.4° 。现有国内外研究主要集中于框架角速

率的估计精度或平台隔离度上,均未考虑平台动态特性满足指标前提下的框架角速率估计精度与平台隔离度。

文中应用平台动力学构建控制系统状态观测器,在编码器角位置中估计平台角速率,并分析采样率对滤波精度和增益的影响。由于存在模型不确定性和噪声,使用最优估计理论与 Hamiltonian 矩阵法进行 Kalman 观测器设计,优化噪声灵敏度与平台动态特性^[8]。通过仿真验证不同采样率对平台角速率估计精度的影响,并验证平台在满足动态特性要求下能够同时满足角速率估计精度与隔离度的要求。研究结果为半捷联导引头未来的工程应用提供理论依据。

1 半捷联式导引头工作原理

光学导引头多采用二轴框架式稳定平台,内框架为俯仰转动,外框架为方位转动,光学系统和探测器安装在内框架上,直流力矩电机驱动框架轴转动,光电编码器获取框架角位置。半捷联式导引头去掉了框架平台上的速率陀螺,稳定方式是通过将弹体角速率经坐标变换投影至导引头坐标系,再与框架角速率合成反馈构成速率稳定回路^[9]。为了消除弹体扰动对光轴在惯性空间稳定的影响,导引头速率稳定环带宽应是位置跟踪环带宽的 5 倍以上,光轴在惯性空间的自身稳定,需框架角速率估计精度应与平台式陀螺基本一致。

由于电机平台的数学模型及输入指令完备,并可利用扫频法实测其传递函数,具备了构建观测器在噪声中估计角速率的条件。若不考虑各通道的空间耦合影响,半捷联式导引头俯仰通道原理图如图 1 所示,其由电机、带观测器的速率反馈稳定回路

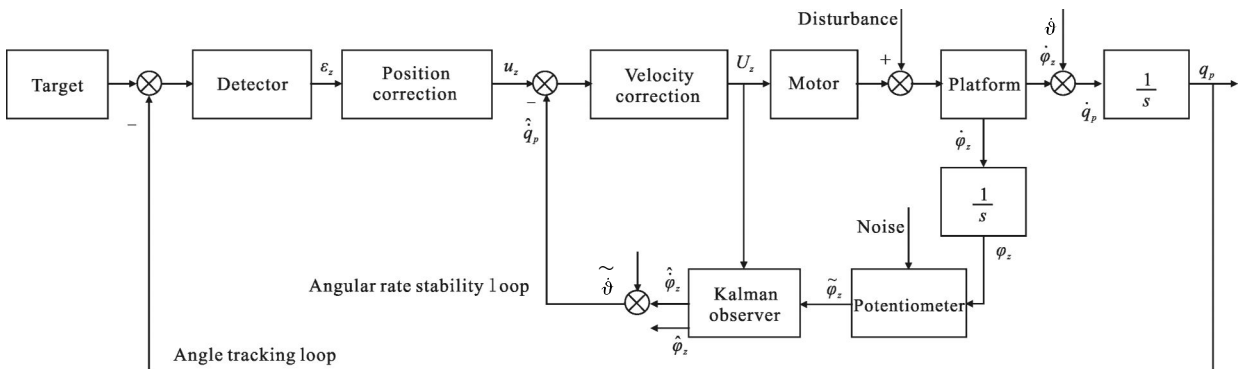


图 1 半捷联式导引头俯仰通道原理框图

Fig.1 Block diagram of semi-strapdown seeker pitch channel

及角度跟踪回路组成^[2]。

图中, \dot{q}_p, \hat{q}_p 为光轴和光轴估计角速率; $\dot{\vartheta}, \hat{\vartheta}$ 为弹俯仰角速率和经陀螺测得的俯仰角速率; $\dot{\varphi}_z$ 为电机相对弹体坐标系角速率; φ_z 为平台框架角; u_z 为视线角速率指令; U_z 为电机驱动电压。

2 电机平台的状态观测器

速率稳定回路的作用是抑制弹体干扰, 由于内外回路带宽差别较大, 在分析稳定回路时可不考虑跟踪回路的作用^[10], 即设跟踪指令为零。在速率稳定回路中, 采用基于电机平台的状态观测器从编码器角位置信息中估计角速率信息。

电机平台传递函数为:

$$\frac{\dot{\varphi}_z(s)}{U_z(s)} = \frac{k_t/l_{jL}}{s^2 + \frac{l_a b_v + r_a j_L}{l_{jL}} s + \frac{r_a b_v + k_e k_t}{l_{jL}}} \quad (1)$$

式中: l_a 为电枢电感; r_a 为电枢电阻; k_e 为反电动势系数; k_t 为电磁转矩系数; b_v 为等效在电机轴上的粘性系数; j_L 为负载转动惯量。

取状态变量 $\varphi_{z1} = \varphi_z$ 为平台框架角, $\varphi_{z2} = \dot{\varphi}_z$ 为角速度, $\varphi_{z3} = \ddot{\varphi}_z$ 为角加速度; 取 $b_0 = k_t/l_{jL}$, $a_1 = (l_a b_v + r_a j_L)/l_{jL}$, $a_0 = (r_a b_v + k_e k_t)/l_{jL}$ 。对系统采用状态空间设计方法, 电机平台状态方程描述为:

$$\begin{cases} \dot{\Phi} = A\Phi + BU_z \\ y = C\Phi \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中: } \Phi = [\varphi_{z1} \ \varphi_{z2} \ \varphi_{z3}]^T; A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}; B = [0 \ 0 \ b_0]^T;$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]。$$

电机平台 Kalman 观测器的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\Phi}} = A\hat{\Phi} + BU_z + L(\tilde{\varphi}_z - C\hat{\Phi}) \\ \hat{y} = C\hat{\Phi} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\hat{\Phi}$ 为电机状态变量的观测值, $\hat{\Phi} = [\hat{\varphi}_{z1} \ \hat{\varphi}_{z2} \ \hat{\varphi}_{z3}]^T$; L 为 Kalman 观测器增益, 取决于测量噪声、过程噪声和控制设计; $\tilde{\varphi}_z$ 为编码器角度。

由图 1 及公式(2)、(3)可构建稳定回路带状态反馈观测器的控制结构, 如图 2 所示。

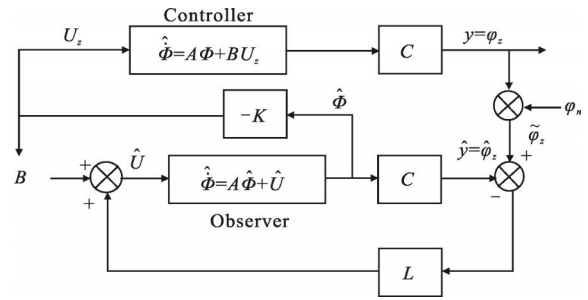


图 2 带观测器状态反馈控制结构图

Fig.2 Observer with feedback control structure diagram

状态反馈控制为 $U_z = -K\hat{\Phi}$, 选择 $K = [0 \ k \ 0]^T$ 进行速率校正, 由传感器输入 $\tilde{\varphi}_z$ 到观测器 $\hat{\Phi}$ 输出, 若设初始条件为零, 取拉普拉斯变换:

$$\frac{\hat{\Phi}(s)}{\tilde{\varphi}_z(s)} = (sI - A + LC + BK)^{-1}L \quad (4)$$

令 $l = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T$, 由公式(4)可得:

$$\begin{aligned} \frac{\hat{\varphi}_{z1}(s)}{\tilde{\varphi}_z(s)} &= \frac{l_3 + a_0 l_1 + a_1 l_2 + b_0 k l_1 + (l_2 + a_1 l_1) s + l_1 s^2}{s^3 + (a_1 + l_1) s^2 + (a_0 + l_2 + a_1 l_1 + b_0 k) s + [l_3 + a_1 l_2 + (a_0 + b_0 k) l_1]} \\ \frac{\hat{\varphi}_{z2}(s)}{\tilde{\varphi}_z(s)} &= \frac{l_2 s + (l_3 + a_1 l_2)}{s^3 + (a_1 + l_1) s^2 + (a_0 + l_2 + a_1 l_1 + b_0 k) s + [l_3 + a_1 l_2 + (a_0 + b_0 k) l_1]} \end{aligned} \quad (5)$$

公式(5)表明观测器稳态时, 状态 $\hat{\varphi}_{z1}(t \rightarrow \infty) = \tilde{\varphi}_{z1}(t \rightarrow \infty)$, 状态 $\hat{\varphi}_{z2}$ 为 $\tilde{\varphi}_z$ 的近似微分, $\hat{\varphi}_{z2}(t \rightarrow \infty) \approx \dot{\tilde{\varphi}}_{z1}(t \rightarrow \infty)$ 。

3 Kalman 观测器参数与精度分析

当电机平台角信号测量存在噪声时, 状态观测角速度能否达到导引头稳定精度要求是一个重要问题。

数字式控制需对电机平台的动力学方程(公式(2))离散化:

$$\begin{cases} \Phi(k+1) = A_k \Phi(k) + B_k U_z(k) + \Gamma_k w(k) \\ y(k) = H \Phi(k) + v(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $w(k)$ 为过程噪声; $v(k)$ 为测量噪声; H 阵与 C 阵相同, 为输出阵。

对公式(6)和 Kalman 观测器应用最优估计理论, 有如下噪声阵方程^[8]:

$$\begin{cases} M(k+1) = A_k P(k) A_k^T + \Gamma_k R_w \Gamma_k^T \\ P(k) = M(k) - L(k) H M(k) \\ L(k) = M(k) H^T [H M(k) H^T + R_v]^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $M(k)$ 为测量前状态估计的协方差; $P(k)$ 为测量

后协方差; $L(k)$ 为观测器增益; R_w 为过程噪声 $W(k)$ 的协方差; $R_v=R_v$ 为角度测量噪声的协方差。

经公式(7)推导有:

$$M(k+1)=A_k(M(k)-M(k)H^T(HM(k)H^T+R_v)^{-1}HM(k))A_k^T + \Gamma_k R_w \Gamma_k^T \quad (8)$$

过程噪声由干扰力矩作用产生, 测量噪声为光电编码器误差, 经统计证明其误差分布服从均匀分布^[11], 若测量误差为 $\delta\varphi$, 则均匀分布 $U(-\delta\varphi, \delta\varphi)$ 的均值为零, 方差 R_v 为 $\delta\varphi^2/3$ 。参考文献[8]总结了 Widrow 的详细研究: 均匀的量化误差可作为一个附加噪声模型, 这个噪声模型是与输入信号不相关的白噪声^[12]。

为说明 Kalman 观测器的角度、角速度方差与采样率, 观测器增益与采样率的关系, 采用简化的电机动力学模型, 以便得到公式(8)参数关系解, 掌握误差与观测器参数的关系。

光电平台所需电机参数如表1 所示。

表 1 电机参数表

Tab.1 Motor parameter table

Parameter	Value
Load rotating inertia $J_l/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.008
Armature resistance r_a/Ω	0.47
Armature inductance L_a/H	2.7×10^{-3}
Peak voltage at locked-rotor U_f/V	27
Peak current at locked-rotor I_f/A	2.6
Peak torque at locked-rotor $M_f/\text{N}\cdot\text{m}$	0.12
Equivalent viscosity coefficient $b_v/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	0.001

略去公式(1)电机电感 L_a 及机械阻尼 b_v , 其动力学方程变为二阶状态方程:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -d_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $d_0=k_r k_t/r_a J_l$ 。

对连续系统状态矩阵 A_1 等离散化, 应用小采样步长 T 得:

$$A_{k1} = e^{A_1 T} = I + A_1 T + \frac{A_1^2 T^2}{2!} + \dots \quad (10)$$

略去电磁阻尼 d_0 与 T 乘积和 T^2 小量, 可得

$$A_{k1} \approx \begin{bmatrix} 0 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; H_1 \text{ 为 } C \text{ 的降阶阵}, H_1 = [1 \ 0]; \text{ 对于过程}$$

噪声阵:

$$\Gamma_{k1} = \left(I + \frac{A_1 T}{2!} + \dots \right) T G_1 \quad (11)$$

式中: $G_1 = [0 \ 1]^T$, 则 $\Gamma_{k1} \approx [0 \ T]^T$; $R_w = \frac{R_{\text{wpsd}}}{T}$, R_{wpsd} 为过程噪声谱密度。

将 A_{k1} , H_1 和 Γ_{k1} 代入公式(8)对应参数阵, 解公式(8)并令 $M(k+1)=M(k)$ 得稳态值解:

$$\begin{cases} 2m_{12} + Tm_{22} - (2Tm_{11}m_{12} + T^2m_{12}^2)/T(R_v + m_{11}) = 0 \\ m_{22} - (Tm_{12}^2 + m_{11}m_{12})/T(R_v + m_{11}) = 0 \\ R_{\text{wpsd}} - m_{12}^2/T(R_v + m_{11}) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: m_{11} 为观测器估值的角度方差; m_{12} 为协方差; m_{22} 为角速度方差。测量误差与过程噪声如表 2 所示。

表 2 系统测量误差、过程噪声参数

Tab.2 Measurement error and process noise

Parameter	Value	Parameter	Value
$\delta\varphi_z$	$\pm 0.015^\circ (\pm 54'')$	R_v	$(0.015^\circ)^2/3$
$\delta\dot{\varphi}_z$	$0.5 \times 57.3 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}^2$	R_w	$820.826 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}^2$

先解出公式(12)中的 m_{12} , 再解 m_{11} 与 m_{22} , 令 σ_{11} , σ_{22} 为 m_{11} , m_{22} 的标准差, 其与采样率关系如图 3 所示。图 4 为观测器增益 l_1 , l_2 随采样率变化关系曲线。

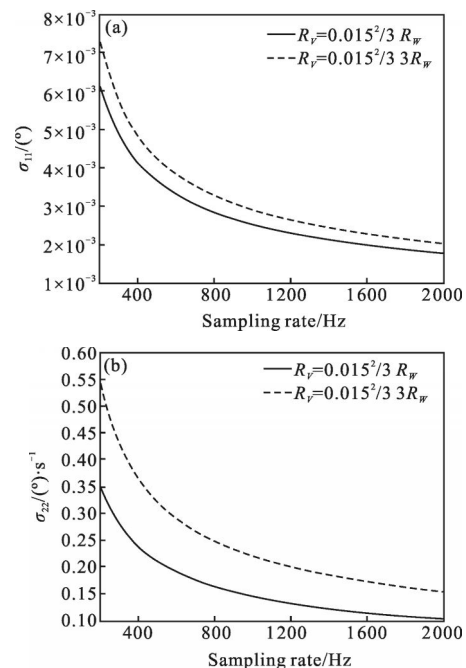


图 3 Kalman 观测器角及角速率标准差 σ_{11} , σ_{22}

Fig.3 Kalman filter angle and angular rate standard deviation σ_{11} and σ_{22}

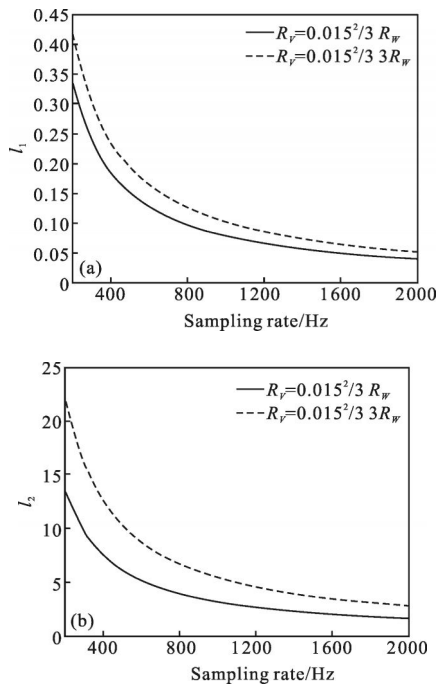


图 4 Kalman 观测器增益 l_1 、 l_2
Fig.4 Kalman filter gain l_1 and l_2

图 3 中, 当采样率为 200 Hz 时, σ_{11} 与 σ_{22} 分别为 0.0061° 与 $0.35^\circ/s$; 当采样率为 2000 Hz 时, σ_{11} 与 σ_{22} 分别为 0.0018° 与 $0.1^\circ/s$, 其结果与参考文献[13]一致。

Kalman 观测器角速度标准差 σ_{22} 的大小直接影响制导与平台稳定精度, 导引头陀螺零位漂移一般要求在 $0.1 \sim 0.25^\circ/s^{[14]}$, 因此观测角速度能基本满足要求, 但应严格控制过程噪声。

4 系统控制器与观测器设计

根据前述参数设计的基本关系, 建立如图 5 所示的离散全模型稳定回路系统, 并进行保证动态特性前提下的控制器设计, 其中机电平台动力模型见公式(6)及对应离散 Kalman 观测器, 系统模型如图 5 所示。

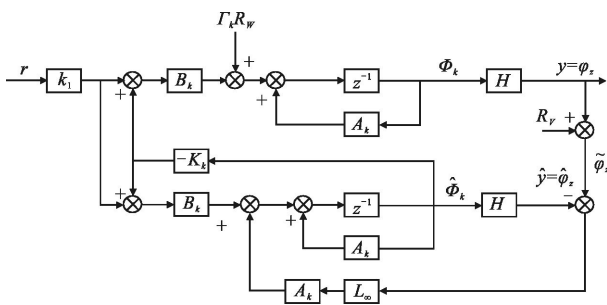


图 5 半捷联导引头稳定回路仿真原理图

Fig.5 Simulation schematic of semi-strapdown seeker stable loop

控制器和观测器可相互独立设计, 用极点配置方法设计控制器 K_k 。极点 $z_{1,2} = 0.7839 \pm 0.1746i$ 、 $z_3 = 0.2725$, 将带宽设计在 70 rad/s 处。控制器增益 K_k 如表 3 所示。

表 3 系统性能参数

Tab.3 System performance parameters

Parameter	$a_0=911.1, a_1=174.2, b_0=6416.7$
$K_k(200 \text{ Hz})$	$k_1=105.055, k_2=2.958, k_3=0.0174$
$L_\infty(200 \text{ Hz})$	$l_1=0.320, l_2=12.313, l_3=-60.893$
$\sqrt{M_\infty}(200 \text{ Hz})$	$\sigma_{11\infty}=0.0059, \sigma_{22\infty}=0.3175$
Bandwidth(200 Hz)	59.8 rad/s
Parameter	$a_0=911.1, a_1=174.2, b_0=6416.7$
$K_k(2000 \text{ Hz})$	$k_1=149.203, k_2=3.873, k_3=0.026$
$L_\infty(2000 \text{ Hz})$	$l_1=0.038, l_2=1.466, l_3=-7.269$
$\sqrt{M_\infty}(2000 \text{ Hz})$	$\sigma_{11\infty}=0.0017, \sigma_{22\infty}=0.0965$
Bandwidth(2000 Hz)	59.6 rad/s

对公式(6)应用 Hamiltonian 矩阵^[8]计算稳态增益 L_∞ :

$$H_c = \begin{bmatrix} A_k^T + C^T R_v^{-1} C A_k^{-1} \Gamma_k R_w \Gamma_k^T & -C^T R_v^{-1} C A_k^{-1} \\ -A_k^{-1} \Gamma_k R_w \Gamma_k^T & A_k^{-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

公式(13)为 6×6 方阵, 首先计算稳定的特征值, 其次用其特征向量构成 X_l 与 A_l 两 3×3 方阵, 再求稳态方差 $M_\infty = A_l X_l^{-1}$, 最后计算稳态 Kalman 增益:

$$L_\infty = M_\infty C^T (H M_\infty H^T + R_v)^{-1} \quad (14)$$

系统性能参数如表 3 所示, 其中角度与角速度的理论设计标准差 $\sigma_{11\infty}$ 与 $\sigma_{22\infty}$ 分别由 M_∞ 获得。

基于控制器-观测器的系统闭环传函会发生改变, 系统动态特性下降, 在采样率为 200 Hz 与 2000 Hz 两种情况下的带宽一致, 均为 59.8 rad/s, 满足稳定平台跟踪要求。

5 系统仿真

为验证离散 Kalman 观测器半捷联导引头算法, 在两采样率下进行平台隔离度与角速率估计精度的系统仿真。在图 5 所示的系统中加入幅值为 2° 、频率为 3 Hz 的正弦扰动 ($\dot{\vartheta} = 2 \sin(6\pi t)$), 其中系统进行了补偿, 观测器模型的不确定性为 10%, 隔离度曲线如图 6 所示。在同样条件下对系统精度进行仿真, 角

度与角速度估计误差分别如图 7 和图 8 所示,估计精度如表 4 所示。

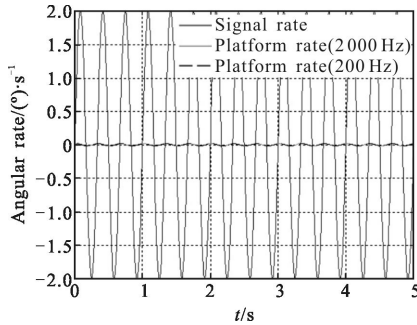


图 6 半捷联导引头稳定回路隔离度

Fig.6 Semi-strapdown seeker stable loop isolation curve

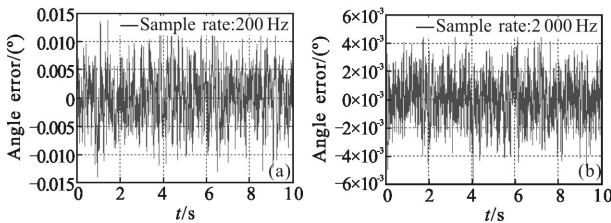


图 7 角度估计误差曲线

Fig.7 Angle estimation error curve

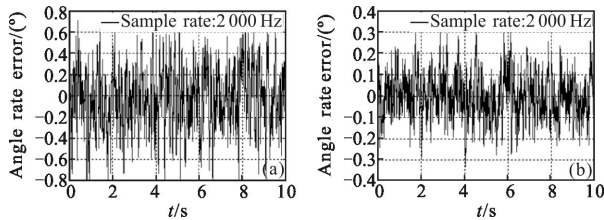


图 8 角速度估计误差曲线

Fig.8 Angular rate estimation error curve

表 4 估计精度

Tab.4 Estimation accuracy

Sampling rate	200 Hz	2 000 Hz
Angle estimation accuracy(1σ)	0.004 7°	0.001 5°
Angular rate estimation accuracy(1σ)	0.301 3 (°)/s	0.098 9 (°)/s

从表 4 中可以看出, 采样率 2 000 Hz 的观测器的精度为 0.098 9 (°)/s, 优于采样率为 200 Hz 的观测器精度 0.301 3 (°)/s。可见系统的参数与采样率的匹配能够有效提高 Kalman 观测器的滤波精度。在两种设计参数下, 导引头稳定回路闭环带宽为 59.6 rad/s, 快速性一致; 系统角速率隔离度为 1.5%, 与陀螺稳定平台式导引头速率环设计相当。

6 结 论

文中在分析半捷联导引头工作原理的基础上, 建立稳定平台的状态观测器, 针对光电编码器误差特性, 提出了利用 Kalman 观测器估计平台框架角与角速率的方法, 研究了保证系统带宽前提下采样率对角度与角速率估计精度的影响。仿真验证结果表明: 光电编码器误差为 0.015°, 采样率分别为 2 000 Hz 与 200 Hz 的 Kalman 观测器估计的框架角速率精度分别为 0.098 9 (°)/s 与 0.301 3 (°)/s, 且导引头稳定回路带宽均为 59.6 rad/s, 系统隔离度也为 1.5%。数字 Kalman 观测器便于实时应用, 且电子器件、光电编码器等硬件的发展使系统高采样率成为可能。文中提出的 Kalman 观测器在保证系统带宽前提下估计框架角及角速率, 且精度满足半捷联导引头稳定要求, 为半捷联导引头的进一步工程研制提供了设计基础。

参考文献:

[1] Jia Xiaoyuan, Zhao Chao. New stabilization control and guidance information extract approach with a semi-strapdown structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2474-2479. (in Chinese)
贾筱媛, 赵超. 半捷联稳定控制方案与制导信息提取方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2474-2479.

[2] Song Jianmei, Kong Lixia, Fan Jianhua. The guidance information reconstruction of semi-strapdown imaging seeker guidance system [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31 (12): 1573-1579. (in Chinese)
宋建梅, 孔丽霞, 范健华. 半捷联图像寻的制导系统导引信息构造方法[J]. *兵工学报*, 2010, 31(12): 1573-1579.

[3] Yang Baoqing, Xu Long, Yao Yu. Los information reconstruction of half strapdown seeker [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(7): 839-843. (in Chinese)
杨宝庆, 徐龙, 姚郁. 半捷联式导引头视线转角率提取算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(7): 839-843.

[4] Mao Dapeng, Ding Jinwei, Wang Guohua, et al. Key technology of semi-strapdown stabilization inengineering application[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(10): 1171-1176. (in Chinese)
毛大鹏, 丁金伟, 王国华, 等. 半捷联稳定在工程应用中的关键技术[J]. *激光与红外*, 2012, 42(10): 1171-1176.

- [5] Cheng Dong, Su Jinping, Chen Yun, et al. Light axis stabilization of semi-strapdown infrared imaging seeker [J]. *Computer Measurement and Control*, 2012, 11: 3008–3010. (in Chinese)
程冬, 粟金平, 陈韵, 等. 红外成像半捷联导引头光轴稳定方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 11: 3008–3010.
- [6] Sun Gao, Zhu Mingchao, Liu Hui, et al. Application of tracking differentiator in semi-strapdown seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 785–789. (in Chinese)
孙高, 朱明超, 刘慧, 等. 跟踪微分器在半捷联导引头中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 785–789.
- [7] Li Xueqin, Lu Xiaodong, Zhou Jun, et al. Stable control technology of optical platform for pitch/yaw semi-strapdown seeker [J]. *Computer Measurement and Control*, 2014, 3: 781–783, 786. (in Chinese)
李雪芹, 卢晓东, 周军, 等. 俯仰/偏航式半捷联导引头光学平台稳定控制技术 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 3: 781–783, 786.
- [8] Franklin G F, Powell J D, Workman M. Digital Control of Dynamic Systems [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [9] Zhang Yue. Strapdown optical seeker: stabilization, tracking principle and system simulation [J]. *Optic Precision Engineer*, 2008, 16(10): 1942–1948. (in Chinese)
张跃. 捷联式导引头的稳定、跟踪原理与系统仿真[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1942–1948.
- [10] Wang Guangxiong, He Lian. Control System Design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
王广雄, 何联. 控制系统设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] Wang Jiaqi. Overall Design of Optical Instruments [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008.
- [12] Bernard Widrow, Istvan Kollar, Liu Mingchang. Statistical theory of quantization [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2): 353–361.
- [13] Belanger P R. Estimation of angular velocity and acceleration from shaft-encoder measurement [J]. *The International Journal Robotics Research*, 1998, 17(11): 1225–1233.
- [14] Mu Hong. Design of Air Defense Missile Radar Seeker [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2006. (in Chinese)
穆宏. 防空导弹雷达导引头设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2006.