

卡尔曼滤波器在抑制力矩扰动中的应用

刘 磊^{1,2}, 沈宏海¹, 张 葆¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在光电稳定平台中, 摩擦力矩以及探测器制冷机扰动力矩都是影响平台稳定精度的主要扰动源之一。为了克服经典控制方法对机载光电稳定平台探测器制冷机扰动力矩和轴系摩擦力矩抑制能力的不足, 在机载光电稳定平台中引入卡尔曼滤波器算法, 其作用在于用递推算法将系统及随机测量噪声滤掉。仿真结果表明, 采用此方法可以有效抑制轴系力矩扰动。与普通 PID 校正算法相比, 采用卡尔曼滤波器闭环校正算法的调速精度由 40% 提高到优于 1%。达到了提高稳定精度, 克服噪声干扰的目的。

关键词: 卡尔曼滤波器; 摩擦力矩; 光电稳定平台; 稳定精度

中图分类号: V243.5; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2240-05

Application of Kalman filter in suppressing torque disturbance

Liu Lei^{1,2}, Shen Honghai¹, Zhang Bao¹

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In O-E stabilization turret, the stirling cooler's disturbance and axis's friction torque are both the main disturbance. Considering the traditional control methods are insufficient to restrain the above two kinds of disturbance, Kalman filter algorithm was introduced to the photoelectric stabilized turret in this paper, its role was to use the recursive algorithm to filter the system and random measurement noise. The simulation results prove it effective. Compared with the classic PID regulator, the regulator based Kalman filter can improve the stable precision from 40% to 1%. The goals to improve the stability and to overcome the noise interference are realized.

Key words: Kalman filter; friction torque; O-E stabilization turret; stable precision

收稿日期: 2013-11-12; 修订日期: 2013-12-14

基金项目: 国家 863 计划(2008AA121803); 国家 973 计划(2009CB72400102A)

作者简介: 刘磊(1984-), 男, 博士生, 主要从事航空平台伺服控制方面的研究。Email: ll1313113@163.com

导师简介: 张葆(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事航空平台成像技术方面的研究。Email: Zhangb@ciomp.ac.cn

0 引言

在动基座光电稳定平台中,摩擦力矩以及探测器制冷机扰动力矩都是影响平台稳定精度的主要扰动源之一^[1]。载体扰动和风阻扰动可以通过引入前馈、加保护罩或精粗结合的二级稳定结构的方法来克服,摩擦力矩、探测器制冷机扰动力矩却因为难以实时测量而给补偿带来困难。

摩擦力矩对系统性能的影响较大。摩擦力矩直接影响到跟踪和定位精度,还可能引起转轴的低速爬行^[2]。为有效抑制摩擦力矩扰动,国内外学者研究了多种方法^[1,3]。由于摩擦力矩的不精确性、传感器反馈信号的测量噪声等诸多因素都会影响到抑制效果。探测器制冷机扰动力矩的抑制国内外却鲜有报道,为克服某型飞机探测器制冷机的扰动力矩,文中引入卡尔曼滤波器算法,研究其对模型噪声、测量噪声的抑制效果。

1 卡尔曼滤波器的原理

卡尔曼滤波器(Kalman Filter)是一个最优化自回归数据处理算法^[4],其特点是在数学模型中考虑了系统的模型误差和测量噪声,提供了直接处理随机噪声干扰的解决方案。它将参数误差作为噪声以及将预估计值作为状态空间变量,充分利用所测量的数据,用递推算法将系统及随机测量噪声滤掉,从而得到准确的空间状态值。文中研究的摩擦力矩和探测器制冷机扰动力矩均难以实时测量,卡尔曼滤波器的递推算法适合此类噪声的抑制。另外,卡尔曼滤波器采用递推形式,适合在数字计算机上实现^[5]。

不失一般性,离散非线性系统的系统方程、测量方程可以表示成如下形式:

$$\begin{cases} X_k = AX_{k-1} + BU_{k-1} + GW_{k-1} \\ Y_k = CX_k + V_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_k 与 V_k 均为白噪声信号,分别表示系统的模型噪声和测量噪声,并假设这些信号为零均值的高斯分布序列,它们的协方差矩阵分别为 Q 和 R ,即:

$$\begin{cases} p(W) \sim N(0, Q) \\ p(V) \sim N(0, R) \end{cases} \quad (2)$$

图 1 所示为卡尔曼滤波器基本结构图,卡尔曼滤波器的作用在于从观测信号中估计出状态变量,

并且使估计出的状态值尽量接近实际值,即要好似其估计得均方误差矩阵 P 最小^[6]。由正交定理可得,此时对应着的卡尔曼增益矩阵 K_{kf} 。

$$K_{kf} = PC^T R^{-1} \quad (3)$$

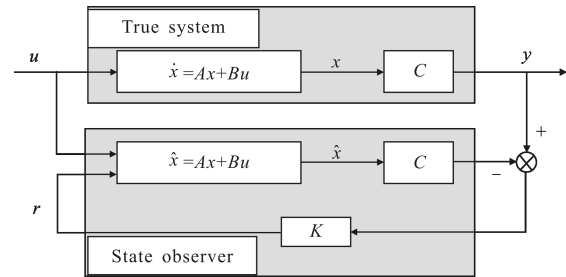


图 1 卡尔曼滤波器基本结构图

Fig.1 Basic structure of Kalman filter

Kalman 滤波器的方程可以分为两部分。

(1) 时间更新方程:

$$\begin{cases} \hat{X}_k^- = A \hat{X}_{k-1} \\ P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q \end{cases} \quad (4)$$

该方程负责获得当前时刻状态的先验估计 \hat{X}_k^- ,以及为下一时刻获得误差协方差估计 P_k^- 。

(2) 测量更新方程:

$$\begin{cases} K_{kf} = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R)^{-1} \\ \hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_{kf} (Y_k - \hat{X}_k^-) \\ P_k = (I - K_{kf} C) P_k^- \end{cases} \quad (5)$$

测量更新方程负责反馈,将先验估计和新的测量值结合起来获得校正后的后验估计。

结合初始条件:

$$\begin{cases} \hat{X}_0 = X_0 \\ P_0 = P_0 \end{cases} \quad (6)$$

便组成了离散系统扩展卡尔曼滤波递推方程。

由以上分析可见,对于输入和输出信号可以直接测量的系统,只要建立合适的状态空间模型、选择好合适的状态变量、得出噪声统计规律 Q 和 R 就可以对控制系统进行估计和滤波而获得满意的效果^[7]。

2 卡尔曼滤波器在光电平台中的实现

在陀螺稳定平台中一般采用直流力矩电机驱动稳定平台,直流力矩电机的等效电路图如图 2 所示^[8],

其各参数见表 1,由此可建立如下平衡方程(公式(7))。

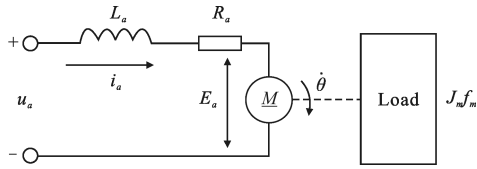


图 2 直流力矩电机原理图

Fig.2 Schematic diagram of DC torque motor

电枢回路电压平衡方程:

$$u_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_a \quad (7)$$

式中: $E_a = K_e \dot{\theta}(t)$ 。

电磁转矩方程:

$$M_m(t) = K_t i_a(t) \quad (8)$$

电机轴上的转矩平衡方程:

$$J_m \frac{d\dot{\theta}(t)}{dt} + f_m \dot{\theta}(t) = M_m(t) - M_f(t) \quad (9)$$

表 1 电机模型各参数的物理意义

Tab.1 Physical meaning of the parameters of the motor model

Symbol	Physical meaning
u_a/V	Input voltage
L_a/H	Armature winding inductance
i_a/A	Armature current
R_a/Ω	Armature winding resistance
$\dot{\theta}/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	Motor speed
$M_m/N \cdot \text{m}$	Electromagnetic torque
$K_e/V \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$	Coefficient of EMF
$K_t/N \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	Motor torque coefficient
$J_m/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Rotary inertia
$f_m/N \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	Viscous friction coefficient
$M_f/N \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	Load disturbance torque

忽略摩擦力矩 M_f 的影响、假设初始条件为零,则可以导出如下为微分方程:

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) \quad (10)$$

式中: $a_0 = \frac{K_t K_e + R_a f_m}{L_a J_m}$; $a_1 = \frac{f_m}{J_m} + \frac{R_a}{L_a}$; $b_0 = \frac{K_t}{L_a J_m}$ 。

取电机转动角速度、角加速度为状态变量,可以得到图 3 所示的电机系统结构框图。

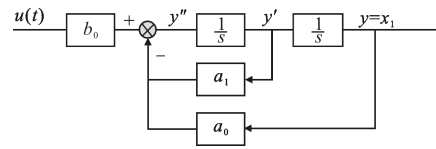


图 3 电机系统结构框图

Fig.3 Motor system structure diagram

考虑到模型不精确带来的噪声、角速率测量噪声等影响^[9],可得到图 4 所示的电机系统卡尔曼滤波结构框图(见图 5)以及如下状态空间方程。

$$\dot{x} = Ax + \begin{bmatrix} B & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ v \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} y \\ y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ C \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ v \end{bmatrix} \quad (12)$$

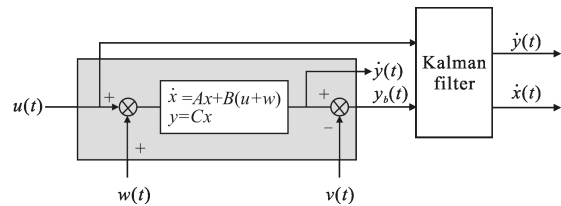


图 4 考虑模型噪声、测量噪声后电机系统卡尔曼滤波结构图
Fig.4 Structure diagram of Kalman filter considering model noise and measurement noise

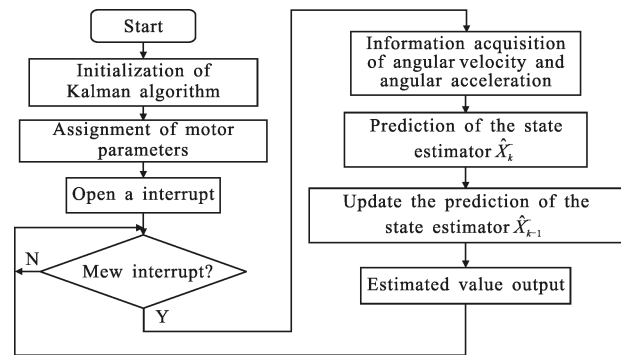


图 5 卡尔曼滤波器算法流程图

Fig.5 Kalman filter algorithm flow chart

将电机实际参数:

$$\begin{cases} K_t = 0.097 \text{ N} \cdot \text{m/A} \\ K_e = 0.097 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1} \\ L = 4 \text{ mH} \\ R = 4 \Omega \\ J = 0.00406 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ f_m = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$$

代入公式(11)(12),得:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1.1111 \times 10^5 \end{bmatrix}$$

$$B = 10^6 \begin{bmatrix} 0 \\ 2.6546 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0]$$

考虑模型噪声和测量噪声后的状态矩阵为:

$$a = \begin{bmatrix} 1 & 9 \times 10^{-6} \\ 0 & 5.56 \times 10^{-9} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0.02368 & 0.02368 & 0 \\ 23.89 & 23.89 & 0 \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可以得到卡尔曼滤波器的递推公式,将陀螺噪声、扰动等因素考虑进去后的原始信号如图 6 所示,经过卡尔曼滤波后的输出信号如图 7 所示,曲线表明该滤波器对控制干扰和测量噪声具有很好的滤波作用^[10]。

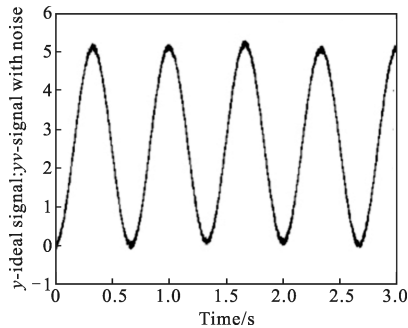


图 6 卡尔曼滤波前的输入输出信号曲线

Fig.6 Input and output signal curve before Kalman filter

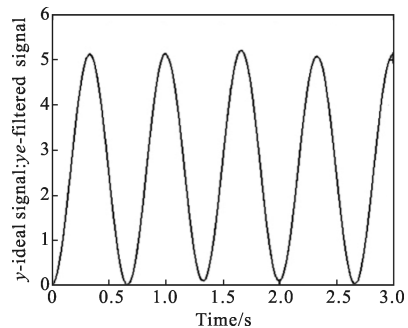


图 7 卡尔曼滤波后的输入输出信号曲线

Fig.7 Input and output signal curve after Kalman filter

3 基于卡尔曼滤波器的校正对扰动的抑制

基于以上对于卡尔曼滤波的原理、实现方法和

滤波效果的分析,将带有卡尔曼滤波器的机电结构作为一个整体的被控制对象,上述方法同样可以应用到伺服系统中。如图 8 所示,与通常的电机控制器不同的是,基于卡尔曼滤波器的速率回路控制系统中采用卡尔曼滤波输出的速率估计值作为反馈信号,经过迭代控制后输出控制量驱动电机运动。

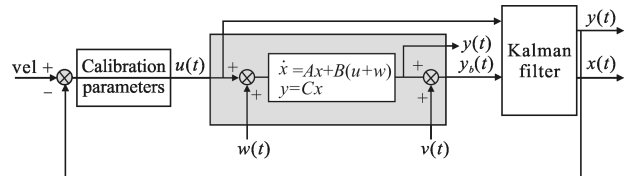


图 8 基于卡尔曼滤波器的光电平台速率回路控制框图

Fig.8 Control diagram of electro-optical platform frame rate loop based on Kalman filter

如图 9、图 10 所示,采用卡尔曼滤波器闭环校正系统的阶跃响应曲线明显优于普通超前滞后校正系统的阶跃响应曲线,调速精度可以由 40% 提高到优于 1%,由此可见卡尔曼滤波器有效消除了摩擦力矩、探测器扰动所导致的角速率波动(见图 11、图 12)。

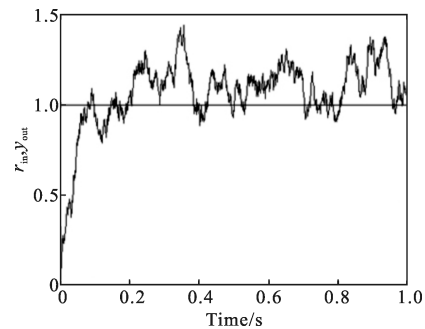


图 9 不采用卡尔曼滤波器时速率回路的阶跃响应曲线

Fig.9 Step response curve of speed loop without Kalman filter

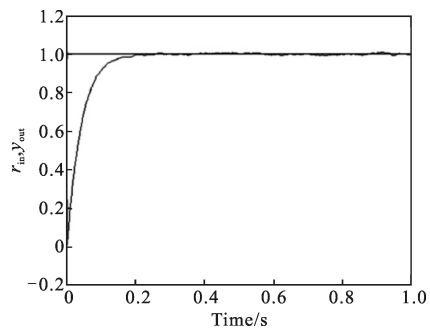


图 10 基于卡尔曼滤波器时速率回路的阶跃响应曲线

Fig.10 Step response curve of speed loop based on Kalman filter

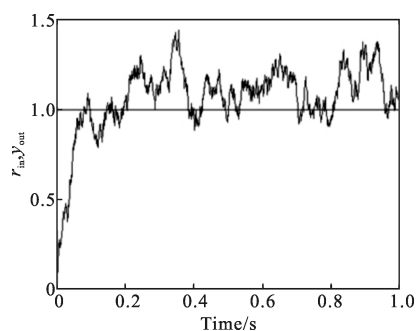


图 11 叠加到陀螺反馈信号上的轴系摩擦扰动角速度

Fig.11 Friction angular velocity superimposed onto the gyro feedback signal

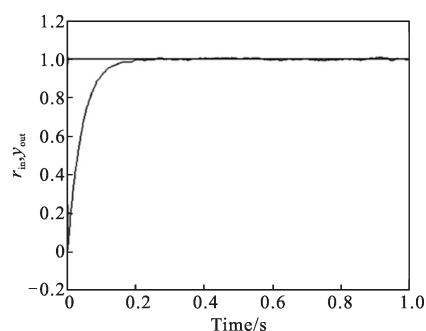


图 12 用于卡尔曼滤波器仿真分析的光电平台红外探测器的扰动角速度

Fig.12 Angular speed of photoelectric platform infrared detector for the Kalman filter simulation

4 结论

仿真结果表明使用卡尔曼滤波器能够有效的抑制摩擦力矩以及探测器制冷机扰动力矩对光电平台稳定性的影响。但仍然需要后续的硬件实验进一步验证方法的有效性。

参考文献:

- [1] Li Yongjun, Yang Wenshu, Fan Yongkun, et al. Controller design and simulation for friction moment compensation on high-precision turntable [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(12): 126–130. (in Chinese)
李拥军, 杨文淑, 范永坤, 等. 高精度转台摩擦力矩补偿控制器设计与仿真[J]. *光电工程*, 2008, 35(12): 126–130.
- [2] 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.
- [3] Yang Yuankai, Liang Xuying. Dynamic compensation for friction moment in accurate test table [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1983, 9(4): 248–252. (in Chinese)
杨元恺, 郎需英. 精密转台中摩擦力矩的动态补偿 [J]. *自动化学报*, 1983, 9(4): 248–252.
- [4] Shen Yeqing, Gong Huajun, Xiong Yan. Object tracking in precision guided system and Kalman filtering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 105–110. (in Chinese)
沈晔青, 龚华军, 熊琰. 精确制导系统中的目标跟踪与卡尔曼滤波[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S): 105–110.
- [5] Yao Xiujuan, Zhang Yongke, Peng Xiaole, et al. Design of a digital controller for ratio gyrostabilized TV seeker platform [J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, 13(3): 75–77. (in Chinese)
姚秀娟, 张永科, 彭晓乐, 等. 速率陀螺稳定电视导引头平台数字控制器设计[J]. *电光与控制*, 2006, 13(3): 75–77.
- [6] Zheng Yan, Tan Qingchang, Wang Shufan, et al. Kalman filter for automatic tracking on the vehicular fire control system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 346–351. (in Chinese)
郑岩, 谭庆昌, 王树范, 等. 车载火控系统自动跟踪的卡尔曼滤波[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(2): 346–351.
- [7] Bo Li. Nonlinear induced disturbance rejection in inertial stabilization systems[C]//SPIE, 1996, 2739: 421–427..
- [8] Qin Jirong, Shen Anjun. Modern DC Servo Control Technology and Its System Design [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999. (in Chinese)
秦继荣, 沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [9] Zhang Shaode, Chen Zhucheng. Design method for servo-system based on disturbance observer [J]. *Journal of UEST of China*, 2005, 34(1): 85–88. (in Chinese)
张绍德, 陈主成. 一种基于干扰观测器的伺服系统设计 [J]. *电子科技大学学报*, 2005, 34(1): 85–88.
- [10] Zhao Yanling, Wu Shuhong. MATLAB and SIMULINK Engineering Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)
赵彦玲, 吴淑红. MATLAB 与 SIMULINK 工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.