

机载光电跟瞄平台稳定控制系统 H_∞ 滤波器设计

李燕凡, 刘珊中, 魏玲
(河南科技大学信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 针对三自由度光电跟瞄平台系统状态不可完全观测的特点, 进行可观测结构分解。对可观测部分设计 H_∞ 滤波器, 并结合状态反馈 H_∞ 稳定控制对所设计的 H_∞ 滤波器进行仿真研究。结果表明, 在噪声统计特性存在不确定性的条件下, H_∞ 滤波器能很好地观测系统的状态, 并且达到较好的滤波效果, 具有一定的鲁棒性。

关键词: 光电跟瞄平台; 结构分解; H_∞ 滤波器; 鲁棒性

中图分类号: V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0060-04

An H_∞ Filter Designed for Stabilization Control System of Airborne EO Tracking and Pointing Platform

LI Yan-fan, LIU Shan-zhong, WEI Ling
(Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Considering that it is impossible to implement complete observation to the states of the 3-DOF airborne electro-optical (EO) tracking and pointing platform, we made structural decomposition on the basis of the system's observability. An H_∞ filter was designed for the observable states of the system. And the designed H_∞ filter was studied through simulation combined with state feedback H_∞ stabilization control. The simulation results showed that: When there is uncertainty condition in the noise statistical properties, the H_∞ filter can observe the system states effectively and achieve better filtering effect with certain robustness.

Key words: electro-optical tracking and pointing system; structural decomposition; H_∞ filter; robustness

0 引言

机载环境下的三轴环架进行的是非线性强耦合且受各种扰动影响的运动。为了提高光电跟瞄平台的控制性能, 国内外学者从控制系统的结构、控制算法和滤波器设计等方面进行了研究^[1-2], 针对跟瞄系统状态不可直接测量, 文献[3-4]通过设计 Kalman 滤波器对系统进行状态观测并滤波。但 Kalman 滤波器是假设状态空间系统由已知统计特性的白噪声过程驱动的, 对于未知不确定的干扰, Kalman 滤波器的应用受到了一些限制。对此类系统研究者提出了新的 H_∞ 滤波器, 如文献[5]的对比研究表明, H_∞ 滤波器比 Kalman 滤波器具有更好的估计精度和鲁棒性能。文献[6-8]提出一种 LMI 的 H_∞ 滤波器设计方法, 数值例子计算证明

了该滤波器的良好性能, 并且仿真验证了 H_∞ 滤波器的准确性和有效性。文献[9-11]对各种不同系统存在不确定干扰下设计了 H_∞ 滤波器, 并验证了其鲁棒性。

对受未知不确定干扰的光电跟瞄平台, 首先进行了可观测性结构分解; 再利用系统的输入输出信息重构系统的状态向量, 设计基于 LMI 的 H_∞ 滤波器对系统进行状态观测, 并仿真研究, 以达到提高系统稳定控制性能的目的。

1 稳定控制系统可观测性结构分解

考虑机载光电跟瞄平台三轴环架间耦合及相互作用力, 忽略环架的弹性形变, 假设各个环架都是刚体, 各环的转轴共点且相邻两轴是严格正交的。建立 3 个环架坐标系及惯性坐标系, 根据环架的受力和作用情况, 得到环架的动力学方程, 进行简化和平衡点线性化处理, 得到系统状态空间方程表达式为

$$\begin{cases} \dot{X} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ Y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; $u \in \mathbf{R}^m$ 为控制输入; $Y \in \mathbf{R}^p$

收稿日期: 2014-07-21

修回日期: 2014-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(61203047); 河南省教育厅自然科学研究项目(12A120004)

作者简介: 李燕凡(1988—), 女, 河南平顶山人, 硕士生, 研究方向为光电跟瞄平台的稳定控制。

为测量输出; $w \in \mathbf{R}^q$ 为外部扰动; 状态变量 $X = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T$, α, β, γ 分别是3个环架的转角; $Y = [\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T = Cx$, $\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$ 分别是3个环架转动的角速度。基于系数矩阵 A 和 C , 通过可观性秩判据 $\text{rank } Q = [C, CA, \dots, CA^5] = 3 < n = 6$ 可知, 系统是 不可完全观测的。

在此定义稳定系统性能指标为

$$Z = Lx + Du \quad (2)$$

状态反馈 H_∞ 稳定控制器为

$$u = Kx \quad (3)$$

基于可观性线性非奇异变换下的属性, 对式(1)~式(3)引入线性非奇异变换

$$\hat{x} = Fx \quad (4)$$

式中, $F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

将式(4)分别代入式(1)~式(3), 则系统按照可观性结构分解为可观测和不可观测两个部分, 即式(5)和式(6)

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = A_0 x_0 + B_{10} w + B_{20} u \\ y_0 = C_0 x_0 \\ z = L_0 x + D_0 u \\ u = K_0 x_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{n_0} = A_{n_0} x_{n_0} \\ z = L_{n_0} x_{n_0} + D_{n_0} u \\ u = K_{n_0} x_{n_0} \end{cases} \quad (6)$$

系数矩阵分别为

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & -0.0875 & 0.0525 \\ -0.0391 & 0 & -0.0525 \\ -0.0031 & 0.0045 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{10} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -0.5526 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B_{20} = \begin{bmatrix} 5.8824 & 0 & 0 \\ 0 & 2.6316 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3425 \end{bmatrix}, C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$L_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$A_{n_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, K_0 = \begin{bmatrix} -0.2163 & -0.0202 & -0.0001 \\ -0.0488 & -0.4889 & 0.0082 \\ -0.2493 & 0.0584 & -3.5064 \end{bmatrix},$$

$$C_{n_0} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$K_{n_0} = \begin{bmatrix} -0.2215 & -0.0121 & 0.0070 \\ -0.0183 & -0.5432 & -0.0024 \\ -0.0303 & 0.0282 & -4.0308 \end{bmatrix},$$

$$D_0 = D_{n_0} = D.$$

分解后系统结构如图1所示。

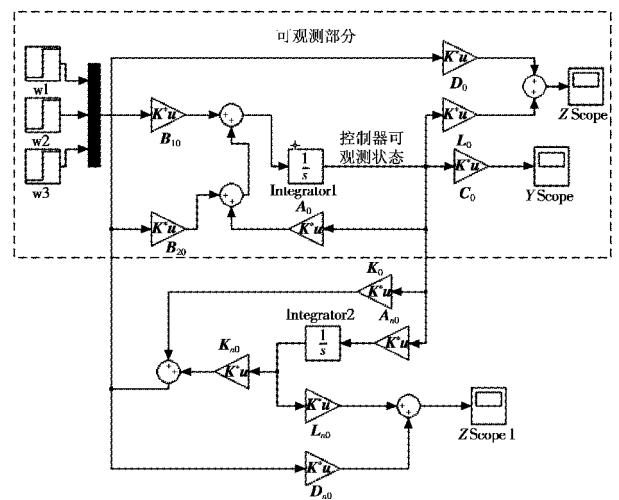


图1 系统结构图

Fig. 1 Block diagram of the system

2 H_∞ 滤波器设计

对可观系统式(5)设计 H_∞ 滤波器。在滤波器的设计中总是假定系统是渐近稳定的。对给定的常数 $\gamma > 0$, 要求设计一个渐近稳定的线性滤波器

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_f \hat{x}(t) + B_f y(t) \\ \hat{z}(t) = C_f \hat{x}(t) + D_f y(t) \end{cases} \quad (7)$$

使得从输入 w 到估计误差 $\tilde{z} = z - \hat{z}$ 的传递函数的 H_∞ 范数小于给定的常数 γ 。具有这样性质的滤波器式(7)为系统式(5)的一个 H_∞ 滤波器。定义 $\tilde{x}(t) = [x^T(t) \ \hat{x}^T(t)]^T$, 则滤波误差动态方程为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A} \tilde{x}(t) + \tilde{B} w(t) \\ \tilde{z}(t) = \tilde{C} \tilde{x}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ B_f C & A_f \end{bmatrix}$, $\tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ B_f D \end{bmatrix}$, $\tilde{C} = \begin{bmatrix} L - D_f C^T \\ -C_f \end{bmatrix}$ 。

则 H_∞ 滤波器的设计问题就是要求滤波器式(7)使得滤波误差动态方程式(8)是渐近稳定的, 且扰动 w 到

估计误差 \tilde{z} 的传递函数满足 $\|H_{\tilde{z}w}(s)\|_{\infty} < \gamma$ 。

根据连续时间系统的有界实定理,给出 H_{∞} 滤波器的存在条件。

定理1 对给定的常数 $\gamma > 0$, 系统式(5)存在一个 H_{∞} 滤波器, 当且仅当存在对称矩阵 $R > 0, X > 0$ 和矩阵 M, N, Z, D_f , 使得矩阵不等式(9), 式(10)成立^[12]。

$$\begin{bmatrix} RA + A^T R & RA + A^T X + C^T Z + M^T & RB & L^T - C^T D_f - N^T \\ * & A^T X + XA + C^T Z + ZC & XB & L^T - C^T D_f \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

$$X - R > 0 \quad (10)$$

利用 LMI 工具箱中的求解器 feasp 来检验该线性矩阵不等式的可行性,并在可行的情况下求出相应的可行解。若 R, X, M, N, Z, D_f 是线性矩阵不等式系统, 即式(9)、式(10)的一个可行解, 那么可得到系统 H_{∞} 滤波器的系数矩阵分别为: $A_f = (R - X)^{-1} M, B_f = (R - X)^{-1} Z, C_f = N, D_f = D_f$ 。

给定 $\gamma = 0.8$, 得到线性矩阵不等式的可行解, 进而可以得到滤波器的系数矩阵。带有滤波器的系统结构如图2所示。

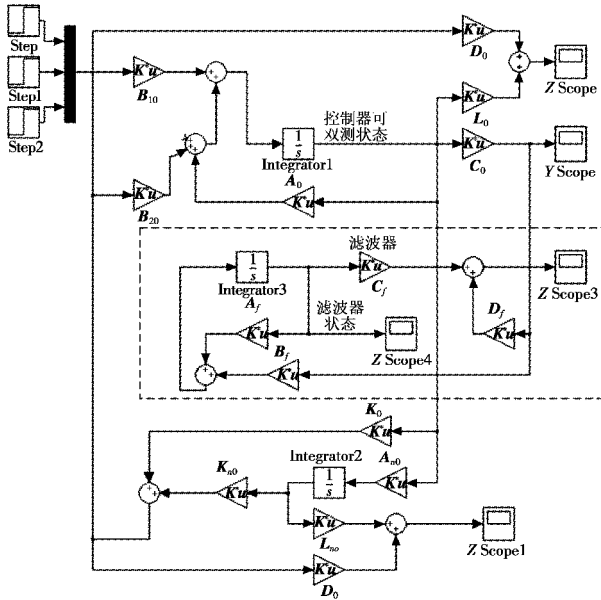


图2 带有滤波器的系统结构图

Fig. 2 Block diagram of system with filter

3 仿真研究

结合机载光电跟瞄平台状态反馈 H_{∞} 稳定控制器, 对可观测部分加入设计的 H_{∞} 滤波器, 在干扰作用下进行仿真研究, $t = 1$ s 时, 在方位框架、俯仰框架和横滚框架上基座角加速度加幅值分别为 0.05, 0.02, 0.1 的

阶跃扰动信号, 则: 1) 没有加滤波器时系统的状态输出曲线如图3所示; 2) 在加入 H_{∞} 滤波器之后, 控制器真实状态输出曲线和 H_{∞} 滤波器观测估计状态输出曲线对比如图4所示。

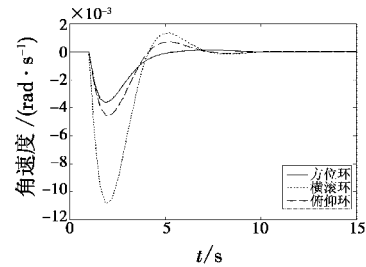


图3 没有滤波器的状态输出曲线

Fig. 3 State output curve without filter

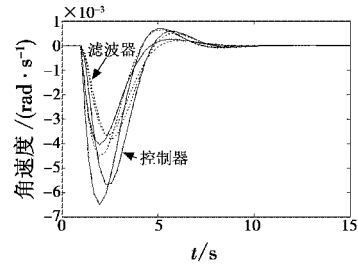


图4 加入滤波器后状态曲线对比图

Fig. 4 Comparison of state output after adding filter

4 结论

通过对状态不可完全观测的三自由度光电跟瞄平台进行可观测结构分解, 结合状态反馈 H_{∞} 稳定控制可知, 对可观测系统设计的 H_{∞} 滤波器能很好地观测系统状态, 并且达到了较好的滤波效果, 具有一定的鲁棒性。

参考文献

- [1] 耿延洛, 王合龙, 周洪武. 机载光电探测跟踪系统总体精度分析方法研究[J]. 电光与控制, 2004, 11(2): 18-20. (GENG Y L, WANG H L, ZHOU H W. Study on accuracy analysis of airborne electro-optical detecting and tracking system[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(2): 18-20.)
- [2] 黄一, 吕俊芳, 卢广山. 机载光电跟瞄平台稳定与跟踪控制方法研究[J]. 飞机设计, 2003(3): 38-42. (HUANG Y, LÜ J F, LU G S. Research on methods of stabilization & tracking control for an airborne electro-optical tracking & pointing platform[J]. Aircraft Design, 2003(3): 38-42.)
- [3] 范大鹏, 张智永, 范世珣, 等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 673-680. (FAN D P, ZHANG Z Y, FAN S X, et al. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14

- (4):673-680.)
- [4] 刘珊珊,孙隆和,车宏. H_∞ 控制在机载光电跟瞄系统中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(12): 114-117. (LIU S Z, SUN L H, CHE H. Application of H_∞ control to airborne electro-optical tracking & pointing system[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(12): 114-117.)
- [5] 王新屏,张显库,张丽坤. H_∞ 鲁棒滤波器与 Kalman 滤波器的对比[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10): 1267-1269. (WANG X P, ZHANG X K, ZHANG L K. Comparison of H_∞ robust filter and Kalman filter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(10): 1267-1269.)
- [6] 林岳松,薛安克,钱积新. 基于 LMI 方法的鲁棒 H_∞ 滤波器设计[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(5): 81-85. (LIN Y S, XUE A K, QIAN J X. Design of robust H_∞ filter based on LMI approach[J]. Journal of Circuits and Systems, 2004, 9(5): 81-85.)
- [7] 王振华,沈毅,张筱磊,等. 不确定线性描述系统的鲁棒 H_∞ 滤波器[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1878-1883. (WANG Z H, SHEN Y, ZHANG X L, et al. Robust H_∞ filter for uncertain linear descriptor systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(9): 1878-1883.)
- [8] 周佳加,刘站奇,侯恕萍,等. 基于 LMI 的 H_∞ 滤波器在 UUV 纵倾控制中的应用[J]. 中国造船, 2013, 54(4): 137-145. (ZHOU J J, LIU Z Q, HOU S P, et al. Numerical simulation for the pitch control of UUV based on H_∞ filter and LMI method [J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(4): 137-145.)
- [9] GERSHON E, SHAKED U, YAESH I. H_∞ control and filtering of discrete-time stochastic systems with multiplicative noise[J]. Automatica, 2001, 37(3): 409-417.
- [10] 王军. 基于 LMI 的参数不确定线性系统鲁棒 H_∞ 滤波方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007. (WANG J. Robust H_∞ filtering method study based on LMI of linear systems with parameters uncertain [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007.)
- [11] GUO Y F, LI S Y. Improved H_∞ filtering for Markov jumping linear systems with non-accessible mode information[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009(11): 2180-2189.
- [12] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 214-218. (YU L. Approach of linear matrix inequality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 214-218.)
-
- (上接第 20 页)
- [2] 方雯,刘秉瀚. 反馈调节机制的暗通道去雾算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(7): 1998-2001. (FANG W, LIU B H. Dehazing algorithm based on dark channel with feedback regulation mechanism [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(7): 1998-2001.)
- [3] FATTAL R. Single image dehazing [C]//ACM Transactions on Graphics, 2008. doi: 10.1145/1360612.1360671.
- [4] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]//Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR, 2009: 1956-1963.
- [5] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Kyoto, Japan, 2009: 2201-2208.
- [6] GIBSON K, VO D, NGUYEN T. An investigation in dehazing compressed images and video [C]//Proceedings of IEEE Conference, 2010. doi: 10.1109/OCEANS. 2010. 5664479.
- [7] CHAUDHRY A, IQBAL K, KHAN A, et al. Enhancing contrast of compressed images: Reducing block artifacts adaptively [C]//Multitopic Conference, INMIC '06, IEEE, 2006: 140-145.
- [8] MATLIN E, MILANFAR P. Removal of haze and noise from a single image [C]//SPIE Conference on Computational Imaging, 2012. doi: 10.1117/12.906773.
- [9] SCHECHNER Y Y, AVERBUCH Y. Regularized image recovery in scattering media [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(9): 1655-1660.
- [10] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising [C]//IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, 2005: 60-65.
- [11] LOU Y, ZHANG X, OSHER S, et al. Image recovery via nonlocal operators [J]. Journal of Scientific Computing, 2010, 42(2): 185-197.
- [12] WU C B, YAO C Y, LIU B D, et al. DCT-based adaptive thresholding algorithm for binary motion estimation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(5): 694-703.
- [13] TANG J S, PELI E, ACTON S. Image enhancement using a contrast measure in the compressed domain [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(10): 289-292.