

doi: 10.7690/bgzd.2014.09.023

## 当前统计模型下的目标状态鲁棒 $H^\infty$ 预估算法

李 隽<sup>1</sup>, 张 钊<sup>2</sup>, 周 勇<sup>2</sup>

(1. 总装重庆军代局驻绵阳地区军代室, 绵阳 621000;  
2. 中国兵器工业第五八研究所军品部, 绵阳 621000)

**摘要:** 针对常规运动目标滤波算法在提升光电跟踪系统性能方面存在较大困难, 基于运动目标状态的当前统计 (current statistics, CS) 模型, 设计了该模型下的鲁棒  $H^\infty$  滤波预估算法。根据  $H^\infty$  滤波理论及目标状态方程, 求解  $H^\infty$  滤波预估算法, 实现了对目标状态信息的有效预估, 并将其应用于某型光电跟踪系统, 进行了实验验证。实验结果表明: 该算法能有效抑制脱靶量噪声与延迟对跟踪系统带来的不利影响, 相较于 Kalman 滤波算法, 滤波精度更高, 鲁棒稳定性更强, 能够提升系统跟踪精度与性能。

**关键词:** 当前统计; 光电跟踪; 鲁棒  $H^\infty$ ; 预估

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Robust $H^\infty$ Predictive Algorithm with Current Statistics Model of Target State

Li Cui<sup>1</sup>, Zhang Zhao<sup>2</sup>, Zhou Yong<sup>2</sup>

(1. PLA Representative Office in Mianyang District, PLA Military Represent Bureau of General Equipment Headquarters in Chongqing, Mianyang 621000, China;

2. Department of Military Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industry, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulties of improving the performance of electro-optical tracking system that the conventional filtering algorithm for maneuvering target is applied, the robust  $H^\infty$  prediction algorithm which is based on the current statistics (CS) model of target state is designed. According to the theory of  $H^\infty$  and equations of target state, the filtering and prediction algorithm is solved, and achieving accurate information of the target. Apply the algorithm on an electro-optical tracking system. The experiment result shows that the algorithm can restrain the disadvantages effectively which caused by the noise and delay of undershoot, comparing with Kalman algorithm, it has higher filtering accuracy and better robust performance, the tracking accuracy and performance of the system are improved.

**Keywords:** current statistics; electro-optical tracking; robust  $H^\infty$ ; prediction

### 0 引言

光电跟踪系统在军民领域的应用已日益广泛。对于高精度跟踪要求, 目标状态信息的准确获取尤为重要, 很大程度上决定了系统的跟踪性能。目前, 诸如基于 LMS 的横向自适应滤波、Kalman 滤波等目标滤波算法已较为成熟, 但因其自身缺陷以及系统不确定性等多方面因素影响, 在提升系统跟踪性能方面仍存在一定困难。笔者应用机动目标当前统计 (current statistics model, CS) 模型下的鲁棒  $H^\infty$  鲁棒目标状态滤波算法, 并在某型光电跟踪系统上验证其可行性。

### 1 光电跟踪目标当前统计模型<sup>[1-2]</sup>

当前统计模型, 即目标运动过程中, 当其正以某一加速度机动时, 下一瞬时的加速度取值范围有限, 并在其“当前”加速度的邻域内。该模型本质上为带自适应的 Singer 模型, Singer 模型被修正而

具有非零均值  $a(t) = \tilde{a}(t) + \bar{a}(t)$ , 其中  $\tilde{a}(t)$  为零均值 Singer 加速度过程,  $\bar{a}(t)$  为加速度均值。非零均值加速度满足  $\dot{a}(t) = -\alpha\tilde{a}(t) + \omega(t)$ ,  $\omega(t)$  为零均值白噪声过程。那么加速度的时间相关模型为

$$\dot{a}(t) = -\alpha a(t) + \alpha \bar{a}(t) + \omega(t) \quad (1)$$

当前模型一个关键假设为  $\bar{a}_{k+1} = \hat{a}_k$ , 即

$\bar{a}_{k+1} = E[a_{k+1} | Z^k] = E[a_k | Z^k] = \hat{a}_k$ 。根据文献[1]建议, 令

$$\begin{aligned} \bar{a}_{k+1} &= E[a_{k+1} | Z^k] = e^{-\alpha T} E[a_k | Z^k] + \\ &(1 - e^{-\alpha T}) \bar{a}_k = e^{-\alpha T} \hat{a}_k + (1 - e^{-\alpha T}) \bar{a}_k \end{aligned} \quad (2)$$

则  $\bar{a}_{k+1}$  不仅依赖当前的信息  $\hat{a}_k$ , 且依赖过去的信息  $\bar{a}_k$ , 模型不再为单纯的当前统计模型。

在基于电视图像的目标跟踪中, 将目标方位与俯仰的运动看作相互独立的机动运动, 脱靶量即为目标相对视轴的偏离量, 换算至方位角  $\Delta x$  与俯仰角  $\Delta y$ 。将该脱靶量信号与位置编码器测量值  $(x_0, y_0)$

复合为目标方位与俯仰角数据, 即

$$\begin{cases} x = x_0 + \Delta x \\ y = y_0 + \Delta y \end{cases} \quad (3)$$

该合成目标信号即为含噪的目标位置量测值。

考虑方位目标状态  $\mathbf{x} = [x, \dot{x}, \ddot{x}]^T = [x, v, a]^T$ , 其当前模型状态空间表示为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\alpha \end{pmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \end{pmatrix} \bar{a}(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \omega(t) \quad (4)$$

设系统采样周期为  $T$ , 式 (4) 离散化状态方程为

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{U}(k)\bar{a} + \Gamma W(k) \quad (5)$$

式 (5) 中,

$$\Phi(k) = \begin{pmatrix} 1 & T & (-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}) / \alpha^2 \\ 0 & 1 & (1 - e^{-\alpha T}) / \alpha \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{U}(k) = \begin{pmatrix} -T/\alpha + T^2/2 + (1 - e^{-\alpha T}) / \alpha^2 \\ T - (1 - e^{-\alpha T}) / \alpha \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{pmatrix} \quad (7)$$

假设  $W(k)$  为离散时间白噪声序列, 则有  $E[W(k)W^T(k+j)] = 0 (\forall j \neq 0)$ 。

对于所观测的含噪目标位置数据, 其测量方程可表述为

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \quad (8)$$

式中,  $H(k) = [1 \ 0 \ 0]$ ,  $V(k)$  为电视跟踪量测噪声, 并假设其近似为  $(0, \sigma^2)$  的高斯白噪声。

上述即为离散化的机动目标当前统计模型, 对该模型采用鲁棒  $H^\infty$  滤波方法进行目标状态滤波与预测。

## 2 鲁棒 $H^\infty$ 滤波与预测<sup>[3-4]</sup>

根据  $H^\infty$  滤波理论及目标状态方程, 求解  $H^\infty$  滤波算法, 其过程较为繁复, 仅给出系统递推滤波与预估方程:

$$\hat{X}(k+1|k) = \Phi(k)\hat{X}(k) + \mathbf{U}(k)\bar{a} \quad (9)$$

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)(Y(k+1) - H(k+1)\hat{X}(k+1|k)) \quad (10)$$

$$K(k+1) = P(k+1)H^T(k+1) \cdot [I + H(k+1)P(k+1)H^T(k+1)]^{-1} \quad (11)$$

$$P(k+1) = \Phi(k)P(k)\Phi^T(k) + \Gamma\Gamma^T - \Phi(k)P(k) \cdot [H^T(k) \ L^T(k)]R_c^{-1}(k) \begin{pmatrix} H(k) \\ L(k) \end{pmatrix} P(k)\Phi^T(k) \quad (12)$$

$$R_c(k) = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H(k) \\ L(k) \end{pmatrix} P(k) [H^T(k) \ L^T(k)] \quad (13)$$

$$P^{-1}(k|k) = P^{-1}(k) + H^T(k)H(k) - \gamma^{-2}L^T(k)L(k) \quad (14)$$

递推方程中参数为  $L(k) = [1 \ 0 \ 0]$ ,  $H(k) = [1 \ 0 \ 0]$ 。设系统初始状态为  $X(0)$ ,  $\hat{X}(0)$  为对初始状态的估计, 初始估计误差方差为  $P(0) = E\{[X(0) - \hat{X}(0)][X(0) - \hat{X}(0)]^T\}$ 。 $\gamma$  需在实际应用中根据实验适当选取。实际上, 当  $\gamma \rightarrow \infty$  时,  $H^\infty$  滤波器即退化为 Kalman 滤波器。当  $\gamma$  取最小值时滤波器鲁棒性最好, 但方差不一定最小; 当  $\gamma \rightarrow \infty$  时方差最小, 而鲁棒性较差。

Kalman 滤波<sup>[5]</sup>在系统模型和噪声统计特大型精确已知情况下, 可获得最优预估, 而  $H^\infty$  滤波器仅需噪声能量有限, 即可有效抑制模型与噪声不确定性带来的影响, 具有良好的鲁棒性。

一般情况下, 将鲁棒  $H^\infty$  方法应用在图像跟踪器上对目标状态进行滤波与估计, 可使图像跟踪与伺服控制相对独立。文中未在图像上进行目标状态的滤波与预测, 而尝试将该方法应用于图像跟踪器所观测的脱靶量信息, 滤波预估出较好的目标状态信息, 并作用于伺服控制系统, 取得了较好效果。

以某型光电跟踪平台(静基平台)为例, 其图像跟踪器控制频率 50 Hz, 脱靶量输出周期  $T=0.02$  s, 伺服控制频率 800 Hz, 测试得脱靶量输出延时为 3 帧 ( $\tau=60$  ms)。设  $t$  时刻获得图像跟踪器脱靶量输出, 该值为  $t-T$  时刻实际含噪测量数据(脱靶量输出滞后一个周期), 与  $t-T$  时刻位置数据合成目标位置, 依赖  $t-2T$  时刻数据对该合成目标位置序列进行滤波, 得到  $t-T$  时刻目标滤波预估值, 并进行一步无噪状态转移, 作为当前目标的瞬时状态信息。

算法实现流程如图 1。

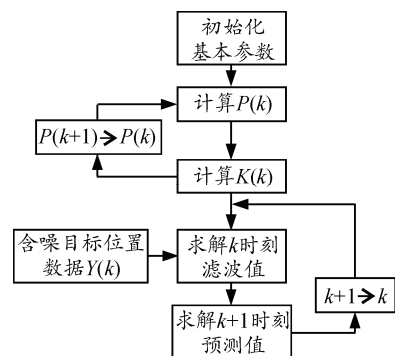


图 1 算法实现流程

### 3 算法实验结果

在某型光电跟踪转台上进行所设计算法实验验证。实验条件：跟踪视场 ( $0.06 \text{ rad} \times 0.05 \text{ rad}$ )，目标运动等效正弦  $0.698 2 \sin(0.5t) \text{ rad}$ 。实验中，首先通过人工导引将目标拉入视场，然后进入粗跟踪，使目标逐渐进入视场中心范围内，达到设定阈值后启动预估算法实现精跟踪。该系统中  $\gamma$  取值为 0.4。以方位方向为例，实验结果如图 2、图 3。

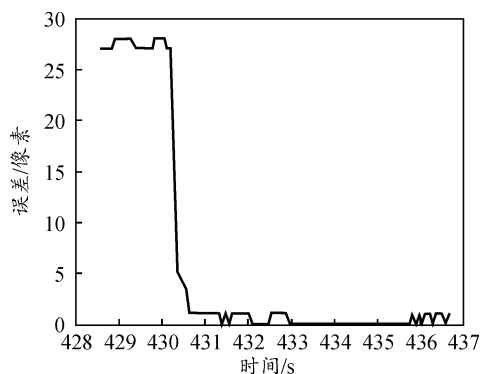


图 2 静目标跟踪脱靶量输出

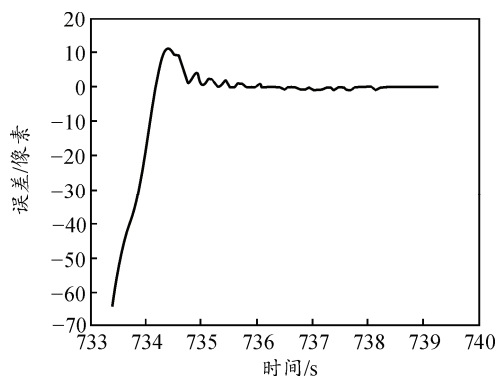


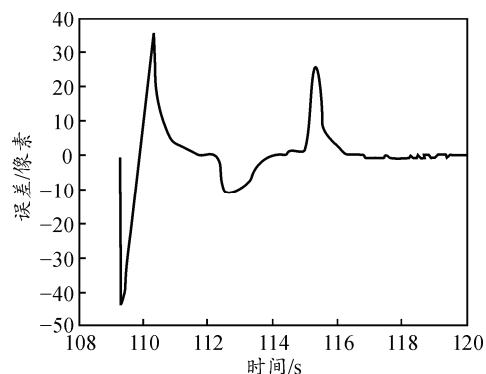
图 3 动目标跟踪脱靶量输出

图 2、图 3 分别为实验系统对静止点目标及运动点目标跟踪的脱靶量输出曲线。实验结果表明：鲁棒  $H^\infty$  算法能够有效地实现对目标状态进行预估，稳态跟踪误差约为 1 个像素，误差约为  $82.4 \mu\text{rad}$ ，达到了该跟踪系统性能指标要求，跟踪性能得到较大提升。

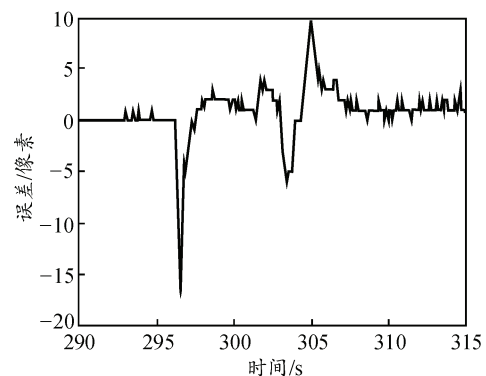
实验中，进行了鲁棒  $H^\infty$  与 Kalman 滤波算法的性能对比，人工控制靶标的启停，那么目标将具有较大的机动性，其跟踪结果如图 4。

通过对比图 4(a)、(b)可知：鲁棒  $H^\infty$  算法能更稳定地实现对机动目标的跟踪，相较于 Kalman 算法，

其稳定误差较小，鲁棒性更强。



(a) 鲁棒  $H^\infty$  滤波跟踪效果



(b) Kalman 滤波跟踪效果

图 4 鲁棒  $H^\infty$  与 Kalman 算法效果对比

### 4 结论

实验结果表明：鲁棒  $H^\infty$  算法能较为准确地预估机动目标状态信息，其速度、加速度等信息也可加入至伺服控制系统，提供速度、加速度滞后补偿，以提高系统跟踪性能。鲁棒  $H^\infty$  算法中  $\gamma$  的选取根据试验取得，具有一定的局限性，对算法鲁棒性及滤波精度有直接影响。滤波参数的选取需进一步研究。

### 参考文献：

- [1] 韩崇昭. 多源信息融合[M]. 北京：清华大学出版社，2006：147-149.
- [2] 姬伟. 陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D]. 南京：东南大学，2006：87-94.
- [3] 李金梁，黄国荣.  $H^\infty$  鲁棒滤波增益研究[J]. 弹箭与制导学报，2007，27(5)：108-112.
- [4] 王青，刘文美. 一种带加速度补偿的  $H^\infty$  次优滤波目标跟踪算法[J]. 系统仿真学报，2006，18(7)：2042-2045.
- [5] 黄永梅，张桐. 卡尔曼预测滤波对跟踪传感器延迟补偿的算法研究[J]. 光电工程，2006，33(6)：4-8.