

文章编号 1004-924X(2017)07-1941-07

# 利用自适应卡尔曼滤波实现光电跟踪中的复合控制

田俊林\*, 胡晓阳, 游安清

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**为了在光电跟踪控制系统中实现复合控制以提高跟踪精度, 构建了基于模型自适应卡尔曼滤波算法的复合控制结构。首先, 利用跟踪脱靶量数据和仪器位置数据合成目标角位置数据; 然后, 利用模型自适应卡尔曼滤波算法对目标角位置数据进行滤波估计以获得目标角速度信息; 最后, 将目标角速度信息前馈到速度回路, 从而构成复合控制系统。实验结果表明: 采用复合控制结构后, 目标跟踪精度提高了 50%。基于模型自适应卡尔曼滤波算法的复合控制技术能够在保持原反馈控制系统稳定性的条件下提高跟踪精度。

**关键词:**复合控制; 卡尔曼滤波算法; 模型自适应; 光电跟踪

**中图分类号:** V556 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1941

## Compound control of photoelectric tracking by using adaptive Kalman filtering algorithm

TIAN Jun-lin\*, HU Xiao-yang, YOU An-qing

(Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, China)

\* Corresponding author, E-mail: tianjunlin22@163.com

**Abstract:** In order to realize compound control for improving tracking accuracy in photoelectric tracking control system, a compound control structure based on adaptive Kalman filtering algorithm for model was established. Firstly, the angular position data of the target was compounded by taking advantages of tracking miss distance data and instrument position data; Then, the angular position data of the target was subject to filtering estimation in order to obtain angular velocity of the target by taking advantages of adaptive Kalman filtering algorithm for model; Finally, the compound control system was established by front feeding the angular velocity of the target to the velocity loop. The experimental result shows that target tracking accuracy is increased by 50% after using the compound control system. Based on adaptive Kalman filtering algorithm for model, under the condition of keeping the stability of the original feedback control system, the tracking accuracy of the compound control system can be improved.

**Key words:** combined control; Kalman filter; model adaptive; electro-optical tracking

## 1 引言

光电跟踪控制系统广泛地应用于光电测控领

域中<sup>[1-9]</sup>。随着技术的不断进步, 对跟踪系统的精度要求也不断提高, 精度指标由原来的角分量级提高到了角秒量级, 甚至更高。复合控制技术是光电跟踪系统提高跟踪性能的重要手段。采用复

合控制技术能够提高系统的无静差度,消除速度滞后误差和加速度滞后误差,并且在提高跟踪精度的同时又不影响原闭环系统的稳定性<sup>[10-12]</sup>。

在光电跟踪控制系统中,为了实现复合控制结构,需要获取目标的角速度信息以形成前馈支路,进而构成反馈控制和前馈控制相结合的控制系统。在无法获得目标角速度的情况下,可以利用测速机或编码器数据计算来获取跟踪仪器的角速度信息来近似代替目标的角速度信息,从而构成等效复合控制系统。研究表明,等效复合控制能够在一定程度上提高跟踪精度<sup>[13]</sup>。

光电跟踪问题中的目标往往具有非合作特性,即目标的运动参数及模型是未知的、时变的,因此需要采用适用的滤波方法获取目标的角速度信息。

卡尔曼滤波算法(Kalman Filter)是一种常用的基于模型的目标运动参数估计算法,将其应用于光电目标跟踪问题时需要解决算法模型与目标实际运动特性之间的失配问题。李文军等利用随机加速度零均值的辛格模型描述目标的运动特性,并以此为

基础实现了复合控制系统,提高了系统跟踪精度<sup>[14]</sup>。

本文以机动目标“当前”统计模型(CSM模型)为基础,通过残差序列检测机制调整目标机动参数,从而构成模型自适应卡尔曼滤波算法,并将滤波估计得到的目标角速度信息前馈到速度回路,最终实现复合控制系统。

## 2 复合控制技术

### 2.1 光电跟踪系统中的反馈控制结构

光电跟踪系统的伺服控制一般由位置反馈回路和速度反馈回路构成,如图 1 所示。由于采用成像跟踪方式,位置反馈实际上是通过成像跟踪传感器获取目标跟踪脱靶量的方式间接实现的。

由于成像跟踪传感器只能提供目标角位置与传感器视轴之间的偏差(即脱靶量),不能提供目标的空间角位置,因而也无法直接提供目标的角速度和角加速度等运动参数信息,无法直接构成复合控制系统。

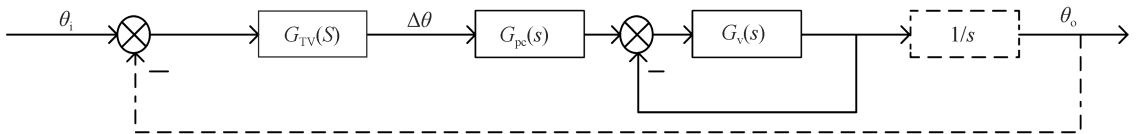


图 1 伺服控制系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of servo control system

### 2.2 复合控制结构设计

在光电跟踪系统中实现复合控制的难点在于获取目标的角速度和角加速度等运动参数信息。首先,利用脱靶量数据与仪器位置数据合成目标位置数据。由于脱靶量数据存在一定的时间滞后,因此在合成目标位置时需要将脱靶量数据与

仪器位置数据在时间上对齐;然后,利用模型自适应卡尔曼滤波算法对目标的运动参数进行滤波估计以获取目标的角速度信息;最后,将滤波估计得到的目标角速度信息前馈到速度回路以构成前馈支路,进而构成复合控制系统。结构框图如图 2 所示。

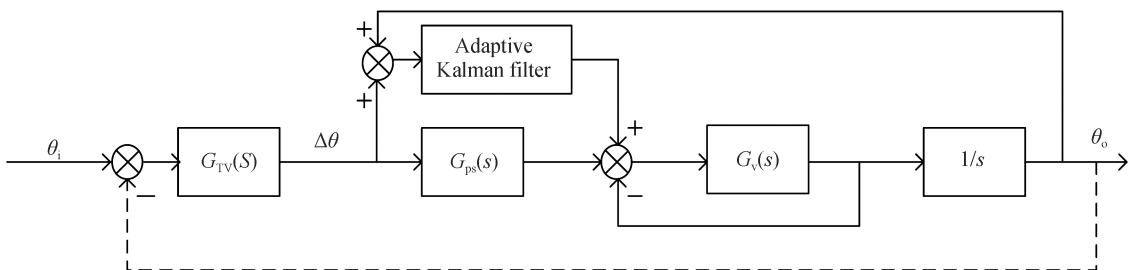


图 2 复合控制系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of combined control system

### 3 模型自适应卡尔曼滤波算法

#### 3.1 机动目标“当前”统计模型

卡尔曼滤波算法是一种基于目标运动模型的滤波估计方法,而在实际应用中目标的运动特性往往是未知的、时变的。另外,由于角度跟踪的特点,光电目标跟踪往往还存在运动模型非线性和观测信息不完备(无距离信息)等问题。为解决上述问题,一方面需要采用合适的运动模型描述目标的运动特性,另一方面也需要对运动模型中的参数进行实时调整,以克服目标运动特性时变以及模型非线性对其的影响。

辛格(Singer)模型将目标的加速度看作是对匀速运动的一种扰动,并采用一阶时间相关过程描述目标的加速度,从而提出了基于一阶时间相关模型的卡尔曼滤波方法<sup>[11]</sup>。Singer 模型本质上是一种先验模型,期待一种先验的目标运动模型能够全面而有效地描述目标的随机机动是不现实的。另外,Singer 模型中随机加速度均值为零的假设也往往与目标的实际运动情况不符。

机动目标“当前”统计(CSM)模型是一种能够较好地描述机动目标运动特性的实用模型,该模型认为,当目标正以某一加速度机动时,下一时刻的加速度取值是有限的,并且只能在“当前”加速度的邻域内<sup>[12-15]</sup>。

CSM 模型采用非零均值的一阶时间相关模型描述目标的加速度特性,即加速度  $a(t)$  表示为:

$$a(t) = \bar{a}(t) + \tilde{a}(t), \quad (1)$$

其中: $\bar{a}(t)$ 为加速度的均值; $\tilde{a}(t)$ 为加速度的随机分量。其统计特性由一阶时间相关函数 $R_a(\tau)$ 表征:

$$R_a(\tau) = E[\tilde{a}(t)\tilde{a}(t+\tau)] = \sigma_a^2 \exp(-\alpha\tau), \quad (2)$$

其中: $\alpha$ 为机动频率; $\sigma_a^2$ 为加速度方差,当加速度的“当前”概率密度采用实时修正的瑞利分布描述时,可根据式(3)计算。

$$\sigma_a^2 = \begin{cases} \frac{4-\pi}{\pi} [a_{+\max} - \bar{a}(t)]^2, & a(t) > 0 \\ \frac{4-\pi}{\pi} [a_{-\max} - \bar{a}(t)]^2, & a(t) < 0 \end{cases}. \quad (3)$$

#### 3.2 机动参数调整机制

在 CSM 模型中,表征目标加速度特性的机

动参数主要有两个:机动频率  $\alpha$  和方差  $\sigma_a^2$  (或加速度分布极值  $a_{\pm\max}$ )。在目标跟踪过程中,当目标的实际运动特性发生变化时,应当根据实际情况自适应地、实时地调整机动参数。机动参数自适应调整机制采用强跟踪滤波器的调整方法,通过残差序列  $\gamma_k$  来检测目标的实际运动情况,进而调整 CSM 模型中表征目标运动特性的机动参数<sup>[20-24]</sup>。

由卡尔曼滤波理论可知,当目标运动模型和实际运动情况相吻合时,残差序列  $\gamma_k$  应具有如下性质:

$$\begin{cases} \gamma_k = Y_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}, E[\gamma_k] = 0 \\ E[\gamma_k \gamma_j^T] = \begin{cases} H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k, & j = k, \\ 0, & j \neq k \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

而当目标运动模型和实际运动情况不吻合时,根据先验运动模型得出的目标状态一步预测值  $\hat{X}_{k|k-1}$  便会产生较大的偏差。相应地,状态预测误差方差矩阵也不再是滤波器给出的理论值,此时残差序列不再满足式(4)所示的关系。

状态预测误差方差矩阵的理论值为:

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} P_{k-1|k-1} \Phi_{k|k-1}^T + Q_k, \quad (5)$$

可见,状态预测误差方差矩阵  $P_{k|k-1}$  与状态转移矩阵  $\Phi_{k|k-1}$  和过程噪声方差矩阵  $Q_k$  有关,而  $\Phi_{k|k-1}$  和  $Q_k$  则与目标的机动参数有关<sup>[23]</sup>。因此,可以通过比较残差序列  $\gamma_k$  的实际统计特性和状态预测误差方差矩阵  $P_{k|k-1}$  的关系实时调整机动参数,从而使得目标运动模型更加接近于实际运动情况。

$$\text{令 } \hat{V}_k = E[\gamma_k \gamma_k^T]. \quad (6)$$

由于  $\hat{V}_k$  为统计量,不能仅利用时刻的残差  $\gamma_k$ ,可仿照强跟踪滤波器中的方法计算,即:

$$\hat{V}_k = \frac{\sigma \hat{V}_{k-1} + \gamma_k \gamma_k^T}{1 + \phi}, \hat{V}_0 = 0, \quad (7)$$

其中, $0 < \phi \leq 1$  为遗忘因子。再令

$$\begin{cases} N_k = \hat{V}_k - R_k \\ M_k = H_k (\Phi_{k|k-1} P_{k-1|k-1} \Phi_{k|k-1}^T + Q_k) H_k^T \end{cases}, \quad (8)$$

则可得 k 时刻的调节因子:

$$\lambda_k = \begin{cases} \frac{\text{trace}(N_k)}{\text{trace}(M_k)}, \frac{\text{trace}(N_k)}{\text{trace}(M_k)} > 1 \\ 1, \frac{\text{trace}(N_k)}{\text{trace}(M_k)} \leq 1 \end{cases}, \quad (9)$$

在机动目标“当前”统计模型中,表征目标机动特

性的参数 和 往往都是未知的。对于机动频率，可在目标机动性较弱时先验地取为某些较小的经验值，当目标机动性增强时，利用调节因子 进行调节，如式(10)所示。

$$\alpha_k = \lambda_k \alpha. \tag{10}$$

对于机动加速度方差  $\sigma_a^2$ ，由式(3)可以看出，需要确定“当前”加速度  $a(t)$  分布的极值以及均值  $\bar{a}_k$ 。均值  $\bar{a}_k$  可取为“当前”时刻加速度的预测值，如式(11)：

$$\bar{a}_k = \hat{a}_{k|k-1}. \tag{11}$$

而极值  $a_{\pm max}$  可取为与均值  $\bar{a}_k$  成比例关系，如式(12)：

$$a_{\pm max} = c \bar{a}_k = c \hat{a}_{k|k-1}, \tag{12}$$

其中  $c$  为比例系数。在目标机动性较弱时  $c$  可先验地取为某些较小的经验值，当目标机动性增强时，利用调节因子  $\lambda_k$  进行调节，如式(13)。

$$c_k = \lambda_k c. \tag{13}$$

### 3.3 模型自适应算法

以 CSM 模型为基础，引入机动参数自适应调整机制的模型自适应卡尔曼滤波算法可以描述如下。

(1)计算  $k$  时刻的状态预测值  $\hat{X}_{k|k-1}$  及预测误差方差矩阵  $P_{k|k-1}$ ；

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k|k-1} &= \Phi C A_{k|k-1} \hat{X}_{k-1|k-1} \\ P_{k|k-1} &= \Phi_{k|k-1} P_{k-1|k-1} \Phi_{k|k-1}^T + Q_k. \end{aligned} \tag{14}$$

(2)计算  $k$  时刻的残差序列  $\gamma_k$ ，进而得到调节因子  $\lambda_k$ ，详见文献[19~20]；

$$\begin{aligned} \gamma_k &= Y_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}, \\ \lambda_k &= \begin{cases} \frac{\text{trace}(N_k)}{\text{trace}(M_k)}, \frac{\text{trace}(N_k)}{\text{trace}(M_k)} > 1 \\ 1, \frac{\text{trace}(N_k)}{\text{trace}(M_k)} \leq 1 \end{cases}. \end{aligned} \tag{15}$$

(3)调整  $k$  时刻的机动频率  $\alpha_k$  和方差  $\sigma_a^{*2}$ ；

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \lambda_k \alpha, \\ c_k &= \lambda_k c, \\ \sigma_a^{*2} &= \frac{4-\pi}{\pi} [(c_k-1)\hat{a}_{k|k-1}]^2. \end{aligned} \tag{16}$$

(4)计算  $k$  时刻的修正状态转移矩阵  $\Phi^*_{k|k-1}$  和修正过程噪声方差矩阵  $Q^*_{k|k-1}$ ；

$$\begin{aligned} \Phi^*_{k|k-1} &= \Phi_{k|k-1}(\alpha_k) \\ Q^*_{k|k-1} &= Q_k(\alpha_k, c_k), \end{aligned} \tag{17}$$

(5)计算  $k$  时刻的修正状态预测误差方差矩阵  $P^*_{k|k-1}$ ；

$$P^*_{k|k-1} = \Phi^*_{k|k-1} P_{k-1|k-1} \Phi^{*T}_{k|k-1} + Q^*_{k|k-1}. \tag{18}$$

(6)观测更新。

$$\begin{aligned} K_k &= P^*_{k|k-1} H_k^T (H_k P^*_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}, \\ \hat{X}_{k|k} &= \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Y_k - H_k \hat{X}_{k|k-1})^{-1}, \\ P_{k|k} &= (I - K_k H_k) P^*_{k|k-1}. \end{aligned} \tag{19}$$

图 3(彩图见期刊电子版)为模型自适应卡尔曼滤波算法的原理图，其中红色虚线框中的部分表示目标机动参数调整机制。

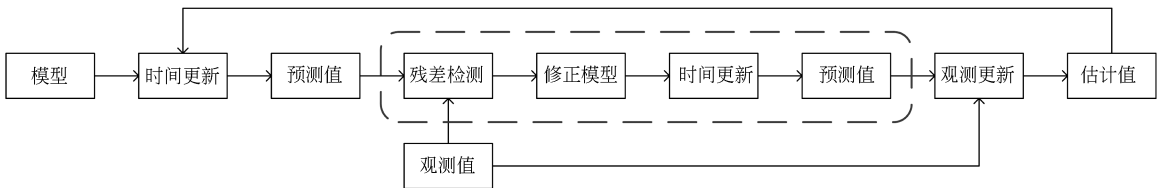


图 3 模型自适应滤波算法原理图

Fig. 3 Principle of model adaptive Kalman filter

## 4 验证实验与结果

### 4.1 实验场景

为了验证本文提出的基于模型自适应卡尔曼滤波的复合控制技术，在某实际的光电跟踪系统中对一旋转靶标进行跟踪实验。旋转靶标与跟踪系统之间的相对布局如图 4 所示。靶标在竖直平

面内旋转，旋转周期为 5.8 s。旋转靶标与跟踪系统之间的水平捷径距离为 690 cm，旋转中心与水平捷径之间的垂直距离为 85 cm，靶标的半径为 69 cm，作为被跟踪目标的 LED 固定在旋转靶标的边缘。

需要说明的是，尽管旋转靶标与跟踪系统之间的相对布局是已知固定的(从而目标相对于跟踪系统的运动特性也是已知固定的)，在验证实验

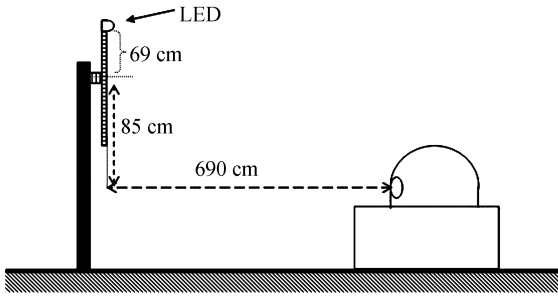


图 4 旋转靶标与跟踪系统的相对布局

Fig. 4 Geometrical layout of rotary target and tracking system

中采用的模型自适应卡尔曼滤波算法并未利用关于旋转靶标运动性质的任何信息。滤波算法采用机动目标“当前”统计模型进行状态预测,得到状态预测值  $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$  及预测误差方差矩阵  $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 。然后,利用实际观测值  $\mathbf{Y}_k$  计算残差  $\boldsymbol{\gamma}_k$ ,从而得到调

节因子  $\lambda_k$ 。最终,利用调节因子  $\lambda_k$  调整机动参数,进而调整目标运动模型。这种处理保证了算法运动模型与目标实际运动特性失配这一普遍存在的问题。

### 4.2 实验结果

图 5(彩图见期刊电子版)所示为分别采用反馈控制和复合控制对上述旋转靶标进行跟踪的实验结果,其中上图为反馈控制和复合控制跟踪误差的对比曲线,下图为经过模型自适应卡尔曼滤波得到的目标角速度曲线。需要说明的是,由于滤波算法需要一定的收敛时间,因此速度前馈是在第 100 步(时长 4 s)附近加入的,在此之前控制系统采用反馈控制结构。从图中可以看出,采用复合控制后系统的跟踪精度得到明显的改善,最大跟踪误差由反馈控制时的 40 个像素降低到 20 个像素,降低了 50%,相应地精度提高了 50%。

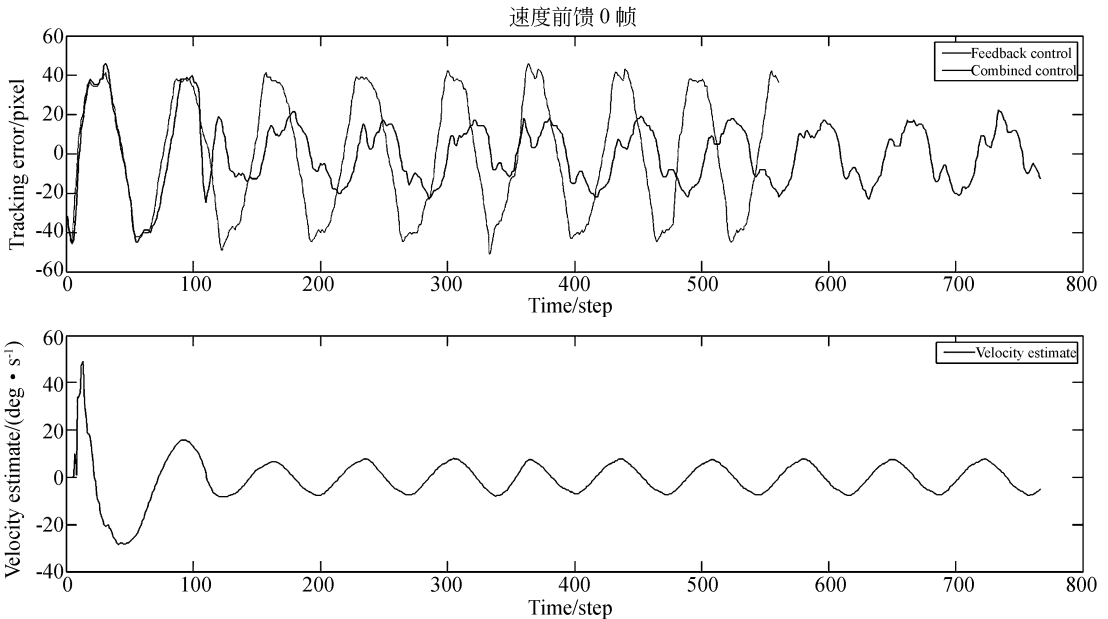


图 5 反馈控制与复合控制的实验结果比较

Fig. 5 Comparison of tracking errors between feedback control and combined control

## 5 结 论

本文对基于自适应卡尔曼滤波算法的复合控制技术进行了研究。在利用脱靶量和仪器位置合成目标角位置的基础上,通过模型自适应卡尔曼

滤波算法获得目标的角速度信息,进而构成复合控制系统,并且在实际的光电跟踪平台上进行了实验验证。实验结果表明,由于模型自适应卡尔曼滤波算法能够提供有效的前馈角速度信息,在对旋转靶标进行跟踪时复合控制的跟踪精度较反馈控制提高了 50%。

## 参考文献:

- [1] G. Downey. Electro-Optical tracking systems considerations [J]. *SPIE*, 1989, 1111: 70-84.
- [2] G. Downey. Electro-Optical tracking systems considerations II [J]. *SPIE*, 2003, 5082: 139-153.
- [3] 葛兵, 高慧斌, 余毅. 光电着舰引导系统的视轴稳定[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1577-1583.  
GE B, GAO H B, YU Y. LOS stabilization of optoelectronic landing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1577-1583. (in Chinese)
- [4] 王建立, 吉桐柏, 高昕, 等. 加速度滞后补偿提高光电跟踪系统跟踪精度的方法[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 681-685.  
WANG J L, JI T B, GAO X, *et al.*. Study of improving the optoelectronic system capability to track moving targets by using acceleration delay compensation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 681-685. (in Chinese)
- [5] G. Downey, H. W. Fountain, T. Riding. Sled tracking system [J]. *SPIE*, 1991, 1482: 40-47.
- [6] W. J. Bigley. Supervisory control of EO tracking and pointing [J]. *SPIE*, 1990, 1304: 207-218.
- [7] 郭劲. 战术激光武器系统若干关键技术分析及发展研究[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(1): 7-14.  
GUO J. Key technology analyse and develop researching of the tactical laser weapon system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(1): 7-14. (in Chinese)
- [8] 单海蛟, 刘伟宁, 王嘉成, 等. 多传感器自主跟踪中的数据融合方法[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 801-809.  
SHAN H J, LIU W N, WANG J C, *et al.*. Data fusion method in multi-sensors autonomous tracking [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(8): 801-809. (in Chinese)
- [9] 丁鹏, 张叶, 刘让, 等. 结合形态学和 Canny 算法的红外弱小目标检测[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8): 793-800.  
DING P, ZHANG Y, LIU R, *et al.*. Infrared small target detection based on adaptive Canny algorithm and morphology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(8): 793-800. (in Chinese)
- [10] 孙丽娜, 宋悦铭, 戴明. 采用复合控制提高机载光电平台的数字跟踪精度[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 265-269.  
SUN L N, SONG Y M, DAI M. Improving digital-leading tracking precision for photoelectric platform by complex control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 265-269. (in Chinese)
- [11] 扈宏杰, 王元哲. 机载光电平台的复合补偿控制方法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1272-1281.  
HU H J, WANG Y ZH. Composite compensation control scheme for airborne opto-electronic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1272-1281. (in Chinese)
- [12] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于卡尔曼滤波器的交流伺服系统自适应滑模控制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2088-2095.  
DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Adaptive sliding mode control for AC servo system based on Kalman filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2088-2095. (in Chinese)
- [13] 黄永梅, 傅承毓, 尹义林. 光电经纬仪中的等效复合控制技术[J]. *光电工程*, 1998, 25(S): 116-120.  
HUANG Y M, FU CH Y, YIN Y L. An equivalent combined control technique for photoelectric theodolite [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(S): 116-120. (in Chinese)
- [14] 李文军, 陈涛. 基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 279-284.  
LI W J, CHEN T. Equivalent combined control technique based on Kalman filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 279-284. (in Chinese)
- [15] R. A. Singer. Estimating optimal tracking performance for manned maneuvering targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1970, 6(4): 473-483.
- [16] X. R. Li, V. P. Jilkov. Survey of maneuvering target tracking. Part I: Dynamic models [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(4): 1333-1364.
- [17] 王晓华, 敬忠良. 仅有角测量的被动式机动目标跟踪[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(6): 845-850.  
WANG X H, JING ZH L. Bearings-only passive tracking for maneuvering target [J]. *Control Theory And Applications*, 2002, 19(6): 845-850. (in Chinese)
- [18] 刘向东, 程翔, 张河. 基于角测量的机动目标跟踪算法[J]. *兵工学报*, 2006, 27(6): 1035-1038.

- LIU X D, CHENG X, ZHANG H. An algorithm of tracking a maneuvering target with bearings-only measurements [J]. *ACTA ARMAMENTARII*, 2006, 27(6): 1035-1038. (in Chinese)
- [19] 郭宁, 吕俊伟, 邓江生. 光电跟踪系统纯角度滤波器的设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1818-1824.
- GUO N, LV J W, DENG J SH. Design of filter only by angle information in opto-electronic tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1818-1824. (in Chinese)
- [20] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 非线性系统带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波[J]. *控制与决策*, 1990, 5: 1-6.
- ZHOU D H, XI Y G, ZHANG ZH J. Suboptimal fading extended Kalman filtering for nonlinear systems [J]. *Control and Decision*, 1990, 5: 1-6. (in Chinese)
- [21] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器[J]. *自动化学报*, 1991, 17(6): 689-695.
- ZHOU D H, XI Y G, ZHANG ZH J. A suboptimal multiple fading extended Kalman filter [J]. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 1991, 17(6): 689-695. (in Chinese)
- [22] 周东华, 王庆林. 有色噪声干扰的非线性系统强跟踪滤波[J]. *北京理工大学学报*, 1997, 17(3): 321-326.
- ZHOU D H, WANG Q L. Strong tracking filtering of nonlinear systems with colored noise [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1997, 17(3): 321-326. (in Chinese)
- [23] 田俊林, 付承毓, 唐涛. 仅有角度观测信息情况下目标机动自适应跟踪算法研究[J]. *光电工程*, 2011, 38(10): 57-65.
- TIAN J L, FU CH Y, TANG T. Maneuver-adaptive target tracking algorithm with bearings-only measurements [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 57-65. (in Chinese)
- [24] 田俊林, 付承毓, 唐涛, 等. 过程噪声方差实时补偿的非定轨目标跟踪[J]. *光电工程*, 2012, 39(1): 68-73.
- TIAN J L, FU CH Y, TANG T, *et al.*. A non-orbit target tracking filter based on variance compensation of process noises [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(1): 68-73. (in Chinese)

#### 作者简介:



田俊林(1983—),男,天津人,博士,助理研究员,2006年于北京航空航天大学获得学士学位,2009年、2012年于中科院光电技术研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事目标跟踪及自动控制方面的研究。E-mail: tianjunlin22@163.com