

基于双重扩展卡尔曼滤波器的共轴跟踪技术研究

杨宏韬^{1,2,3}, 高慧斌¹, 刘鑫¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 为了解决光电经纬仪由于机动目标运动模型不准确而引起的跟踪精度下降的问题, 采用了单隐层前向神经网络(SLFNs)进行建模, 提出了基于状态参数双重扩展卡尔曼滤波估计的共轴跟踪控制技术。仿真与实验结果显示, 对 $83.33^\circ \sin 0.6t$ 的等效正弦目标的速度估计最大误差为 $0.0709(^{\circ})/s$, 跟踪精度为 $2.42'$; 对旋转周期为 4.5 s 的光学动态靶标的跟踪精度达到 $2.96'$ 以内。由此可见, 所建立的模型与机动目标实际模型匹配, 双重扩展卡尔曼滤波器(DEKF)能快速跟踪和估计状态参数。与传统控制方法相比, 提出的方法具有更高的跟踪能力, 能有效提高系统的跟踪精度。

关键词: 共轴跟踪; 光电经纬仪; 双重扩展卡尔曼滤波器

中图分类号: V556; TP183 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0531001

On-axis tracking technology based on the dual extended Kalman filter

Yang Hongtao^{1,2,3}, Gao Huibin¹, Liu Xin¹

- (1. 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
3. Institute of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to solve the problem of the declining tracking accuracy for O-E theodolite caused by maneuvering target model inaccurate, the single hidden layer feedforward networks (SLFNs) model was built for maneuvering target, then an dual extended Kalman filter(DEKF) on-axis tracking control method was proposed. The key state parameters of the mathematical model were estimated by the dual extended Kalman filter(DEKF). In the simulation and experiments, the predicted target velocity error is about $0.0709(^{\circ})/s$ at the peak of velocity and the tracking accuracy is $2.42'$ when tracking the equivalent sine object of $83.33^\circ \sin 0.6t$, the tracking accuracy reaches $2.96'$ when tracking the optical dynamic target with 4.5 s rotation period. Tracking results show that SLFNs mode is matched for maneuvering target, DEKF can fast track and estimate the state parameters. As compared with other control methods, the proposed method has higher accuracy and improves the system tracking precision significantly.

Key words: on-axis tracking; O-E theodolite; DEKF

收稿日期: 2015-09-05; 修订日期: 2015-10-07

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2008AA0047)

作者简介: 杨宏韬(1982-), 男, 博士生, 主要从事光电测量与信息融合方面的研究。Email: hongtao_3110594@126.com

导师简介: 高慧斌(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事精密跟踪控制技术方面的研究。Email: gaohuibin1@163.com

0 引言

随着光电技术的迅猛发展,光电经纬仪的应用范围不断扩展。由于被跟踪目标机动性能的增强,对光电经纬仪的跟踪精度的要求也越来越高,近年来高精度伺服系统已成为大量学者的主要研究方向^[1-2]。为了提高光电经纬仪的跟踪精度,常采用复合控制技术^[3],在光电经纬仪中通过复合控制提高系统的型别,在不改变系统闭环稳定性的基础上降低系统误差。但是,光电经纬仪的探测器只能给出设备与目标之间的脱靶量,无法直接应用于复合控制中。针对此类问题,参考文献[4]将编码器延迟后再和脱靶量相加计算出位置值,再采用卡尔曼滤波进行外推以解决脱靶量滞后对系统带来的问题;参考文献[5]针对光电跟踪目标建立了强跟踪滤波算法,引入强跟踪滤波器渐消因子,实时调节滤波器增益,对目标的运动信息进行估计。上述方法都是在跟踪目标的运动模型已知的前提下获得了较好的跟踪效果,但是对于运动模型难以建立快速机动目标缺少有效的办法。参考文献[6]使用改进的神经网络极限学习机算法,对目标运动状态和脱靶量进行训练,计算出目标的运动信息,虽然解决了目标建模问题,但是所训练数据依赖事后分析,在工程上难以实现。

为了解决上述问题,文中采用单隐层前向神经网络(SLFNs)建立机动目标运动模型,提出了基于状

态参数双重扩展卡尔曼滤波估计的共轴跟踪控制技术。首先,根据 SLFNs 激励函数非线性的特点,利用 DEKF 处理非线性状态估计能力,实现 SLFNs 权值参数的自适应调整,从而实时地建立机动目标运动模型,由于所建立的 SLFNs 模型具有实时性、自适应性的特点,该模型能够实现机动目标的精确建模。其次,在 SLFNs 模型的基础上,利用 DEKF 同时对目标状态进行实时更新以达到精准地估计位置、速度、加速度的目的。最后,将估计出的位置信息引入光电经纬仪伺服系统的位置回路,速度信息作为前馈支路输入速度回路,实现共轴跟踪。该方法不仅解决了机动目标难以精确建模,预测滤波算法状态估计不准确、跟踪效果差的问题,同时有效的提高了光电经纬仪的跟踪精度。

1 共轴跟踪系统的设计

1.1 共轴跟踪原理

共轴跟踪是在复合控制基础上提出的,通过光电经纬仪的自身测量数据获取目标的速度、加速度。位置信息作为位置回路的输入,速度信息作为前馈支路引入到速度回路,从而构成复合控制系统,其核心是预测滤波输出数据的准确性。为了尽可能的降低噪声、干扰以及系统误差,位置回路的带宽设计较低,速度回路的带宽设计较高,从而提高系统的跟踪性能^[7]。共轴跟踪原理图如图 1 所示。

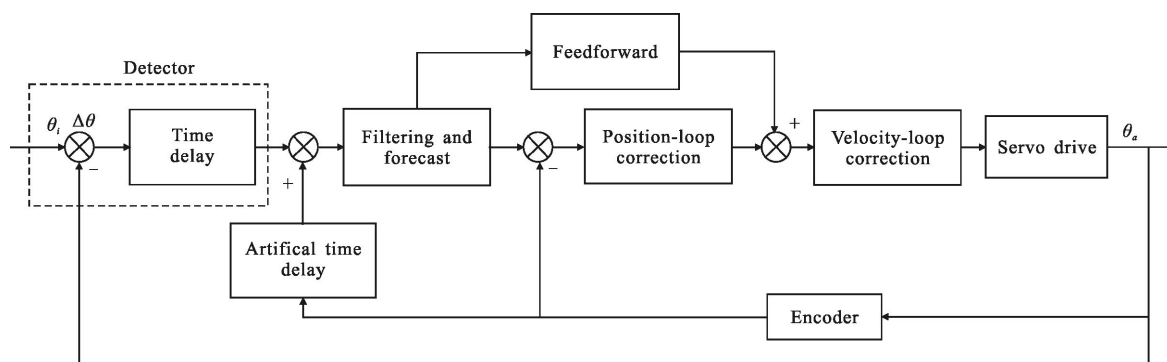


图 1 共轴跟踪系统原理图

Fig.1 Principle of on-axis tracking system

1.2 滤波坐标系、状态变量及观测矩阵的选择

由于光电经纬仪的量测只能提供目标的方位角和俯仰角,其量测坐标为极坐标,无法提供距离信息。并且跟踪控制系统前馈输入也采用在极坐标下

的角速度、角加速度形式,所以采用极坐标系,输入参数直接为该坐标系的量测,简化了算法,因此文中直接采用极坐标系进行滤波处理。选取目标的角度 θ 、角速度 $\dot{\theta}$ 和角加速度 $\ddot{\theta}$ 作为状态变量,即:

$$x_k = [\theta(k) \quad \dot{\theta}(k) \quad \ddot{\theta}(k)]^T \quad (1)$$

由于在光电经纬仪中, 只有目标的角度数据可观测, 故极坐标下卡尔曼滤波器的观测矩阵为:

$$H_k = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (2)$$

2 DEKF 的设计

2.1 通用目标跟踪模型

大多数目标跟踪问题都是基于模型的。依赖于两个描述: 一是目标行为, 通常用运动模型表示, 称为状态转移方程; 另一个是对目标的观测, 称为观测方程。常用下述状态空间模型表示。

$$\begin{cases} x_{k+1} = f_k(x_k, u_k, w_k) \\ z_k = h_k(x_k) + v_k \end{cases} \quad k \in N \quad (3)$$

式中: x_k, z_k, u_k 分别是 k 时刻目标的状态值、量测值和控制输入向量; $\{w_k\}, \{v_k\}$ 分别是过程噪声序列和量测噪声序列; $f_k(\cdot), h_k(\cdot)$ 是线性或非线性的时变的向量值函数。

2.2 目标状态滤波器

目标模型的准确性直接决定滤波的精度。由于快速机动目标难以建立一个精准的运动模型, 为了在目标运动模型未知的情况下对状态变量进行估计, 采用 SLFNs 建立目标运动方程, 借助参数滤波器所估计出的 SLFNs 权值参数, 通过 DEKF 在获得量测值的情况下, 对目标的运动状态进行估计, 以此来实现目标的角度、角速度和角加速度的预测, 在目标状态滤波器设计过程中需要对上述的机动目标跟踪模型即公式(3)做适当的修改, 如公式(4)所示。

$$\begin{cases} x_{k+1} = F(x_k, w_k) + v_k \\ y_k = Cx_k + n_k, C = [1 \quad 0 \quad 0] \end{cases} \quad (4)$$

利用输入输出节点数与状态维数相等的 SLFNs 建立以 k 时刻状态 x_k 作为输入, 以 $k+1$ 时刻的状态 x_{k+1} 作为输出的运动模型。参考文献[8]表明, 隐含层采用正切 S 激励函数、输出层采用线性激励函数的神经网络, 几乎能以任意精度逼近任何函数, 因此, 模型中采用此类激励函数建模。

公式(4)中,

$$x_k = [\theta(k) \quad \dot{\theta}(k) \quad \ddot{\theta}(k)]^T$$

$$w_k = [w_1(k), b_1(k); w_2(k), b_2(k)]$$

式中: w_k 为 SLFNs 的权值参数; w_1 为输入层与隐层的连接权值; b_1 为隐层节点的阈值; w_2 为隐层与输出

层的连接权值; b_2 为输出层节点的阈值; v_k 为过程噪声; C 为量测矩阵; y_k 为光电经纬仪的量测值 $\theta(k)$; n_k 为量测噪声。

2.3 权值参数滤波器

为了对 SLFNs 权值参数进行估计, 需要建立能够描述其动态特性的状态空间方程, 如公式(5)所示。

$$\begin{cases} w_{k+1} = w_k + r_k \\ x_k = F(x_k, w_k) + e_k \end{cases} \quad (5)$$

式中: r_k, e_k 分别是参数滤波模型的过程噪声和量测噪声。根据公式(5)可知, 在获得目标状态量测值的情况下, 便可以对权值参数进行估计, 但是在跟踪时, 目标的运动状态并不可测。这时, 就需要借助目标状态滤波器所估计出的目标状态, 通过 DEKF 完成权值参数估计, 以达到所建立的目标运动模型能够实时自适应调整, 并且准确描述机动目标的目的。

2.4 算法分析

有了上述两个模型就可以利用 DEKF 实现同时在线估计目标状态和权值参数。实质上, 这两个扩展卡尔曼滤波器(EKF)同时运行。在每个时刻, 目标状态滤波器使用当前时刻权值参数滤波器估计出的权值参数来估计目标状态, 同时参数滤波器使用当前时刻目标状态滤波器估计出的目标状态来估计权值参数。DEKF 原理图如图 2 所示。

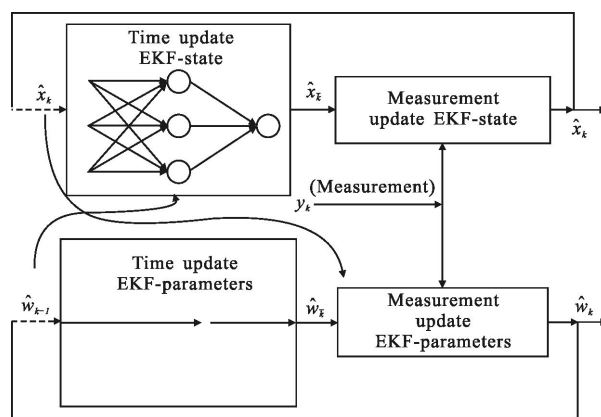


图 2 DEKF 原理图

Fig.2 Principle of DEKF

DEKF 算法的计算过程如下:

(1) 初始化。由于卡尔曼滤波器对初值具有较好的鲁棒性, 所以 $\hat{w}_0, P_{w_0}, \hat{x}_0, P_{x_0}$ 的初值的选取无需很精确。

(2) 参数滤波的时间更新

$$\hat{w}_k^- = \hat{w}_{k-1} \quad (6)$$

$$P_{w_k}^- = P_{w_{k-1}} + R_{k-1}^r = \lambda^{-1} P_{w_{k-1}} \quad (7)$$

公式(7)中 $\lambda \in (0, 1]$

(3) 目标状态滤波的时间更新

$$\hat{x}_k^- = F(\hat{x}_{k-1}, \hat{w}_k^-) \quad (8)$$

$$P_{x_k}^- = A_{k-1} P_{x_{k-1}} A_{k-1}^T + R^V \quad (9)$$

公式(9)中 $A_{k-1} = \left. \frac{\partial F(x, w_k^-)}{\partial x} \right|_{x_{k-1}}$

(4) 目标状态滤波的量测更新

$$K_k^x = P_{x_k}^- C^T (C P_{x_k}^- C^T + R^y)^{-1} \quad (10)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k^x (y_k - C \hat{x}_k^-) \quad (11)$$

$$P_{x_k} = (I - K_k^x C) P_{x_k}^- \quad (12)$$

(5) 参数滤波的量测更新

$$K_k^w = P_{w_k}^- (C_k^w)^T [C_k^w P_{w_k}^- (C_k^w)^T + R^e]^{-1} \quad (13)$$

$$\hat{w}_k = \hat{w}_k^- + K_k^w (y_k - C_k^w \hat{w}_k^-) \quad (14)$$

$$P_{w_k} = (I - K_k^w C_k^w) P_{w_k}^- \quad (15)$$

公式(13)中 $C_k^w = \left. \frac{\partial F(x_{k-1}, w)}{\partial w} \right|_{w_k^-}$, $R^e = 0.5I$ 。

3 共轴跟踪仿真模型的建立

由于光电经纬仪具有水平轴和垂直轴两个机械轴系，因此设计了两套相互独立的跟踪伺服系统——方位、俯仰跟踪伺服系统，这两套系统的设计区别仅在于方位系统具有正割补偿环节，是典型的速度内回路双闭环单输入单输出位置随动系统^[9]。文中以方位系统为例进行试验，针对某型号经纬仪建立的方位共轴跟踪控制系统的仿真模型如图 3 所示。方位跟踪系统控制对象传递函数为：

$$G_s(s) = \frac{0.763}{(0.663s+1)(0.008s+1)}$$

速度回路校正参

$$G_{vc}(s) = \frac{3200(0.16s+1)(0.008s+1)}{(8.8s+1)(0.0025s+1)}$$

数为：

$$G_{pc}(s) = \frac{4050(0.45s+1)^2}{(6.75s+1)^2}$$

正参数为：图 3 中 DEKF 为双重扩展卡尔曼滤波算法 S 函数。

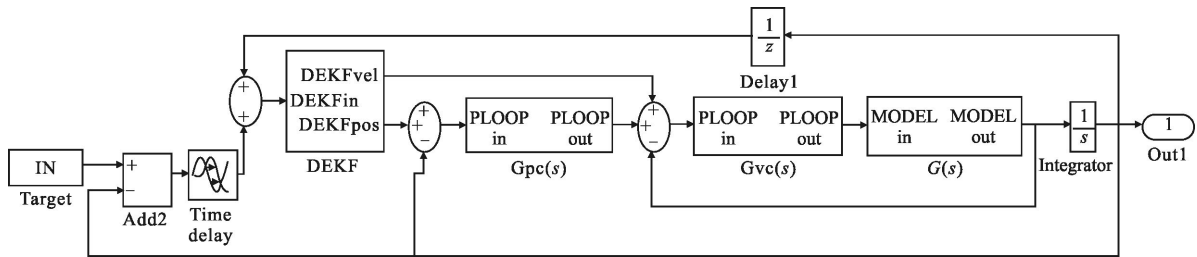


图 3 共轴跟踪控制系统仿真图

Fig.3 Simulation of on-axis tracking control system

4 仿真与实验分析

4.1 位置合成及脱靶量滞后处理

光电经纬仪工作时，脱靶量的提取需要经过图像处理器的信号采集、处理、及提取运算等环节，使其滞后于目标曝光时刻。为了准确获得目标的实时位置，采取脱靶量与对应时刻编码器合成的处理方法^[9]。工程上，红外处理器的工作频率一般为 100 Hz (0.01 s)，滞后时间为 1~2 个周期，文中设定模型滞后时间为 2 个周期，因此，目标的测量位置为：

$$\theta_{k-2} = \Delta\theta_k + \theta_{k-2}^b \quad (16)$$

式中： θ_{k-2} 为目标的位置； $\Delta\theta_k$ 为脱靶量； θ_{k-2}^b 为编码器值。将公式(16)作为 DEKF 的量测值代入公式(11)中，估计出 $k-2$ 时刻的角度 θ_{k-2} 、角速度 $\dot{\theta}_{k-2}$ 和角加速度 $\ddot{\theta}_{k-2}$ ，然后依据公式(17)预测出当前时刻的目标角度 $\hat{\theta}_k$ 、角速度 $\hat{\dot{\theta}}_k$ 和角加速度 $\hat{\ddot{\theta}}_k$ 。 $\hat{\theta}_k$ 作为数引信号进入伺服系统位置回路， $\hat{\dot{\theta}}_k$ 馈入速度回路。

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_k \\ \hat{\dot{\theta}}_k \\ \hat{\ddot{\theta}}_k \end{bmatrix} = F_k^2 \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{k-2} \\ \hat{\dot{\theta}}_{k-2} \\ \hat{\ddot{\theta}}_{k-2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

4.2 仿真结果与分析

以速度为 $50(^{\circ})/s$, 加速度为 $30(^{\circ})/s^2$ 的目标等效正弦 $\theta=83.33^{\circ}\sin(0.6t)$ 进行仿真。红外图像处理器的采样周期为 $0.01 s$, 编码器的采样周期 $0.001 s$ 。仿真时使用 Matlab 软件, 计算出当 SLFNs 的隐层节点数为 4 时 DEKF 算法(.m 文件)的处理时间为 $0.002 s$, 小于红外图像处理器的信号采样周期。共轴跟踪系统的核心是对目标速度的估计, 估计的准确度越高, 系统跟踪误差越小。图 4 为目标角速度估计结果及估计误差。由仿真结果计算出系统对目标角速度的估计误差最大值为 $0.0709(^{\circ})/s$ 。图 5 为共轴跟踪系统与速度滞后补偿的跟踪误差对比图, 其中, 共轴跟踪系统的最大跟踪误差为 $2.42'$, 速度滞后补偿的最大跟踪误差为 $6'$, 跟踪精度有大幅度提高。由仿真分析可知, 当 SLFNs 的隐层节点数为 4 时, DEKF 算法既能够满足系统的实时性, 又能满足系统的准确性。

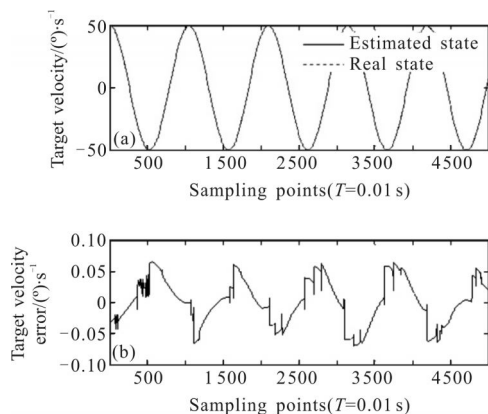


图 4 目标角速度及误差图

Fig.4 Target angular velocity and error

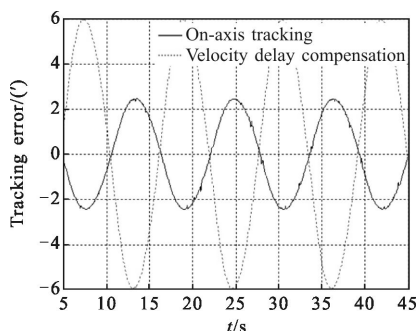


图 5 共轴跟踪与速度滞后补偿的跟踪误差对比图

Fig.5 Tracking error contrast between the on-axis tracking control and velocity delay compensation

4.3 实验结果与分析

采用光学动态靶标^[10]对位置-速度闭环控制方

法、速度滞后补偿控制方法和共轴跟踪控制方法进行验证, 其中, 速度滞后补偿函数为 $\frac{0.9}{0.325+1}$ 。动态靶标的中心点相对靶标的俯仰角为 26° , 锥角为 13.5° , 靶标旋转周期为 $4.5 s$ 时目标点的最大角速度为 $24.2(^{\circ})/s$, 最大角加速度为 $30.7(^{\circ})/s^2$ 。由于靶标的旋转轴线与水平面的夹角受限, 速度没有达到 $50(^{\circ})/s$ 的指标要求, 但加速度超过指标要求, 因此, 实际对比时以加速度 $30(^{\circ})/s^2$ 为准。试验结果如图 6、图 7 和表 1 所示。

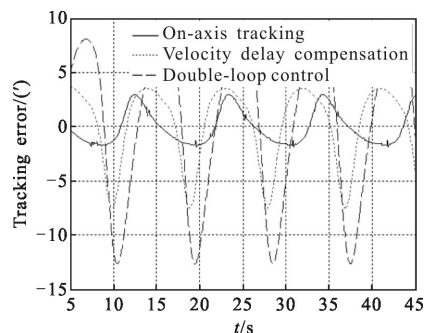


图 6 光学动态靶标试验结果对比图

Fig.6 Contrast of experiment results for optical dynamic target

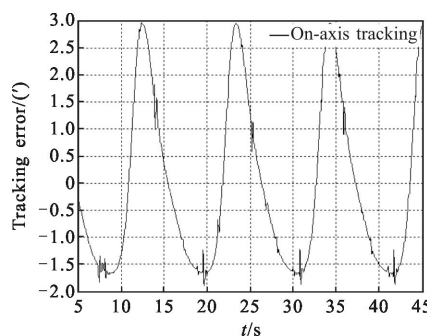


图 7 共轴跟踪稳态误差图

Fig.7 Steady state error of on-axis tracking

表 1 误差对比

Tab.1 Comparison of error

| Control method | Tracking error/(') | Random error/(") |
|-----------------------------|--------------------|------------------|
| Double-loop control | 12.67 | 48.36 |
| Velocity delay compensation | 7.5 | 24.13 |
| On-axis tracking | 2.96 | 19.98 |

由表 1 可知, 采用位置-速度闭环控制, 系统最大跟踪误差为 $12.67'$, 随机误差为 $48.36''$; 采用速度滞后补偿控制, 系统最大跟踪误差为 $7.5'$, 随机误差

为 24.13"; 采用共轴跟踪时, 系统最大跟踪误差为 2.96', 随机误差为 19.98"。采用 DEKF 构成的共轴跟踪系统, 不但能明显提高系统的跟踪精度, 并且在很大程度上减小光电经纬仪的随机误差。

5 结 论

光电经纬仪伺服系统具有宽的频带是系统跟踪准确性和快速性的保证, 共轴跟踪技术可以有效地解决伺服系统频带带宽的问题。如何提高预测滤波算法输出数据的准确性是实现共轴跟踪技术的核心。文中采用 SLFNs 建立机动目标自适应模型, 利用 DEKF 实现权值参数的实时调整, 同时对目标状态进行实时更新以达到精准估计的目的, 并结合共轴跟踪, 提出了基于状态参数双重扩展卡尔曼滤波估计的共轴跟踪控制技术。仿真与实验结果表明: DEKF 构成的共轴跟踪系统可以使光电经纬仪的跟踪精度达到 2.96' 以内, 与传统的位置-速度闭环控制的 12.67'、速度滞后补偿方法的 7.5' 相比在跟踪精度上有了大幅度的提高; 解决了机动目标难以精确建模, 预测滤波算法状态估计不准确、跟踪效果差的问题, 满足了光电经纬仪的跟踪精度要求, 为提高光电经纬仪的跟踪精度提供了一种新的方法和思路。

参考文献:

- [1] Ma Dongxi, Fan Dapeng, Zhu Huazheng. Smooth adaptation for transition of acquisition and tracking switching of electro-optical tracking system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1129-1133. (in Chinese)
马东玺, 范大鹏, 朱华征. 光电跟踪系统捕获跟踪切换的平滑调节方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1129-1133.
- [2] Ma Dongxi, Zhang Wenbo, Fan Dapeng. Satisfactory control for E-O tracking system based on multi-rate input algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2484-2491. (in Chinese)
马东玺, 张文博, 范大鹏. 光电跟踪伺服系统的输入多采样率满意控制[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2484-2491.
- [3] Ma Jianguang. Principle and application of combined control and equivalent combined control [J]. *Optic Engineering*, 1988, 15(5): 1-16. (in Chinese)
马佳光. 复合控制及等效复合控制原理及应用[J]. 光学工程, 1988, 15(5): 1-16.
- [4] Li Wenjun, Chen Tao. Equivalent combined control technique based on Kalman filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 279-284. (in Chinese)
李文军, 陈涛. 基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 279-284.
- [5] Li Xiaofeng, Xu Jun, Wang Hongshui, et al. Research on nonlinear filter and simulation to optoelectronic tracking [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (S): 219-221. (in Chinese)
李晓峰, 徐军, 王洪水, 等. 非线性滤波在光电跟踪中的应用及仿真研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 219-221.
- [6] Wang Weili, Guo Jin, Cao Lihua, et al. On-axis tracking based on ELM data fusion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 751-758. (in Chinese)
王威立, 郭劲, 曹立华, 等. 基于神经网络极限学习机数据融合的共轴跟踪[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 751-758.
- [7] Ma Jianguang. Basic technologies of the acquisition, tracking and pointing systems [J]. *Optic Engineering*, 1989, 3: 1-42. (in Chinese)
马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989, 3: 1-42.
- [8] Wei Haikun. Theory and Method of the Neural Network Structure Design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 73-79. (in Chinese)
魏海坤. 神经网络结构设计的理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 73-79.
- [9] Wang Jianli. Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
王建立. 光电经纬仪电视跟踪伺服系统捕获跟踪快速运动目标技术的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- [10] Zhang Ning, Shen Xiangheng, Yang Liang, et al. Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite by using harmonic property of dynamic target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1286-1294. (in Chinese)
张宁, 沈湘衡, 杨亮, 等. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪性能 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1286-1294.