

文章编号 1004-924X(2013)07-1818-07

光电跟踪系统纯角度滤波器的设计

郭 宁^{1*}, 吕俊伟¹, 邓江生²

(1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空仪器计量站, 江苏 南京 210008)

摘要:为了在不增加硬件的条件下改善光电跟踪系统的性能,提出了仅基于目标角度信息的状态估计方法,设计了纯角度跟踪滤波器。首先,分析了带有激光测距仪的红外跟踪系统的工作机理;针对目标机动性特点,建立了球坐标系下目标的“当前”机动模型。然后,针对纯角度跟踪过程中高频图像序列存在复杂噪声干扰的问题,采用集员估计的方法对目标状态模型进行了补偿和调整,并在此基础上设计了自适应椭球滤波算法。最后,以舰载光电跟踪系统对来袭目标的跟踪为例进行了仿真。对比实验结果表明,对于复杂噪声条件下的强机动目标,在激光测距仪回波率为 50% 的情况下,利用基于自适应椭球滤波算法的纯角度滤波器进行辅助跟踪,可以实现方位(俯仰)角度估计均方差 ≤ 0.6 mrad 的稳定跟踪,效果显著优于传统滤波方法,具有良好的工程实用价值。

关键词:光电跟踪;状态估计;纯角度跟踪;椭球滤波

中图分类号:V556.5;TN713 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1818

Design of filter only by angle information in opto-electronic tracking system

GUO Ning^{1*}, LÜ Jun-wei¹, DENG Jiang-sheng²

(1. *Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;*

2. *Naval Station of Aviation Apparatus Measurement, Nanjing 210008, China)*

* *Corresponding author, E-mail: 13356995902@163.com*

Abstract: To improve the precision of an opto-electronic tracking system without installing new equipment, an assistant tracking with surplus angle information was carried out and a filter tracking only by angle information was designed. Firstly, the working principle of the opto-electronic tracking system with a laser-infrared detector was introduced, and a target model based on the “current” statistical model was established in a globe-coordinate. Considering the complex noise interference in the high frequency image series in a angle track process, the set-membership estimation was introduced to repair the maneuvering model, then a self-adjusted ellipsoidal bounding filter whose tracking was only by angle was designed. Finally, a simulation on the course tracking to enemy targets was performed by the opto-electronic system on the ship. The comparison results show when the laser detector probability decreases to fifty percent, the filter designed by ellipsoidal bounding algorithm could track the maneuvering target stably with a Room Mean Square Error(RMSE) of target angle less than 0.6 mrad. The

收稿日期:2013-01-16;修订日期:2013-02-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2010AAJ211)

filter could overcome the effect of non-white noises and has some practical values in engineering.

Key words: opto-electronic tracking; state estimation; tracking only by angle; ellipsoidal bounding filter

1 引言

在光电跟踪过程中,目标距离信息可以帮助系统实现更准确的跟踪和定位。目前很多光电跟踪设备都通过加装激光测距仪获得目标的距离信息,然后与红外(可见光)探测器获得的目标角度信息结合来实现对目标的跟踪和定位。然而,在实际跟踪过程中,由于障碍物遮挡、气象条件干扰、设备发生故障等原因,激光测距仪经常发生数据丢失现象,特别是对于机(舰)载光电跟踪设备来说,探测平台的抖动造成激光测距仪回波率更低,随着目标机动性能的增强,该问题愈显突出。

距离信息的丢失降低了目标状态估计的准确度,进而对系统的跟踪精度产生不良影响。对于此类不完全量测条件下的目标状态估计问题,文献[1]提出了一种基于联邦结构的滤波器设计方法,其思想是按照物理结构把跟踪系统分解为测距和测角2个探测通道,分别对每个通道的量测数据进行状态估计,最后对估计结果进行融合。这种方法充分利用了目标的冗余角度信息,理论上提高了状态估计器的整体性能。然而随着红外(可见光)探测设备探测频率的逐步提高,目标图像序列噪声产生了较强的相关性^[2-3],这种相关性会降低基于白噪声假设的目标状态估计器的估计效果,这是利用高频探测器信息进行目标状态估计必须解决的问题。目前学术界对于此类问题大多采用噪声白化的方法进行处理,也有学者提出了一些去相关滤波算法^[4],但有色噪声能否一定可以表示为白噪声的形式、噪声相关性以何种形式存在都要根据实际情况来考虑,因此上述方法具有很强的保守性。

对于复杂噪声条件下的状态估计问题,集员估计技术提供了一种新的思路,其思想^[5]是:在假设噪声或噪声功率未知但有界的情况下,利用一个总是包含真实参数的集合来描述目标状态,在一定条件下,随着样本容量增大,集合所包含的范围逐渐缩小,当样本容量趋于无穷时,集合最终收敛于系统的真实参数。与传统统计描述方法相

比,该方法对噪声分布特性没有严格要求,且更接近于实际系统,目前集员估计已广泛应用于信息融合、信号处理、故障检测、鲁棒控制等领域,其中发展最为成熟的是基于椭球集合的估计方法。由于光电跟踪系统高频图像序列噪声更加符合集员估计理论的假设形式,本文利用椭球集合的形式对目标状态模型进行了补偿和调整,并基于“当前”机动模型设计了一种仅基于角度信息的自适应椭球滤波算法(Optimal Bounding Ellipsoid, OBE),对基于OBE算法的跟踪滤波器性能进行了仿真实验。结果表明,自适应椭球滤波算法是解决有色噪声条件下的目标状态估计问题的有效方法,同时该算法在目标距离信息存在不完全量测的情况下也可以满足系统的精度要求。

2 问题描述

一般地,激光测距仪采样频率往往要比红外探测设备采样频率低很多,目前常见的激光测距仪发射重复频率为25次/秒或12.5次/秒,而红外探测设备的输出频率为100次/秒以上。假设两种探测器是重频的,即若测距设备发射周期为 T_1 ,红外测角设备探测周期为 T_2 ,则有 $T_1 = nT_2$ 。记相邻激光发射时刻分别为 k 和 $k+T_1$,在相邻时刻得到的目标距离、俯仰和方位角信息分别为 $y_k = [r_k \ \beta_k \ \xi_k]^T$ 和 $y_{k+1} = [r_{k+1} \ \beta_{k+1} \ \xi_{k+1}]^T$,而在 kT_1 和 $(k+1)T_1$ 时刻之间,测角设备可以测量得到目标的俯仰和方位角度信息记为 $y_{k,i} = [\beta_{k,i} \ \xi_{k,i}]^T, i=1,2,\dots$,跟踪系统探测器工作示意图如图1所示。

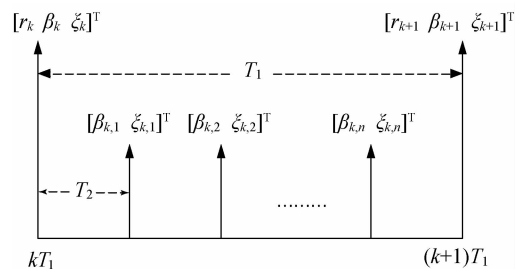


图1 跟踪系统探测器工作周期示意图

Fig. 1 Cycle of detectors in tracking system

3 目标模型的建立

目前应用于纯角度跟踪问题的非线性估计方法主要有扩展 Kalman 滤波算法^[6] (Extended Kalman Filter, EKF) 和伪线性估计算法^[7-9] (Pseudo Linear Estimation Algorithm, PLEA), EKF 由于需要对非线性的观测方程进行线性化处理, 因而在线性化误差较大时存在滤波发散问题, 而 PLEA 则存在滤波估计的有偏性问题。为避免系统非线性造成的不良影响, 本文在球坐标系中建立目标的运动模型, 同时考虑到目标图像序列噪声的相关性问题, 选择椭圆滤波方法进行角度探测通道的目标状态估计, 以“当前”机动模型为例, 建立目标状态空间模型如下:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + U_k \bar{a}_k + v_k, \quad (1)$$

$$y_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{x}_{k+1} + w_{k+1}, \quad (2)$$

其中: 目标状态向量 $\mathbf{x}_k = (\beta \xi \beta \xi \beta \xi)^T$, 即目标状态由方位和俯仰方向的目标角度位置、角速度和角加速度组成, 状态转移矩阵 \mathbf{F}_k 和参数 U_k 的定义参见文献[10], 限于篇幅, 此处不予赘述。目标的机动加速度可表示为 $a_k = \bar{a}_k + \tilde{a}_k$, 其中 \bar{a}_k 为机动加速度均值, 在一个采样周期内可看作常数, \tilde{a}_k 为机动加速度的随机分量, 其统计特性由一阶时间相关函数 $R_a(\tau)$ 表示:

$$R_a(\tau) = E[\tilde{a}_k \tilde{a}_{k+\tau}^T] = \sigma_a^2 \exp(-\alpha \tau), \quad (3)$$

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

其中: α 为机动频率, σ_a^2 为机动加速度方差, $a_{+\max}$ 和 $a_{-\max}$ 分别为“当前”加速度取值为正和为负时的极值。

v_k 为能量有界的虚拟噪声序列, 属于椭圆集合: $v_k \in E(0, \mathbf{Q}_k)$, 其中:

$$\mathbf{Q}_k = 2\alpha \begin{bmatrix} q_{11}\sigma_\beta^2 & 0 & q_{12}\sigma_\beta^2 & 0 & q_{13}\sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & q_{11}\sigma_\xi^2 & 0 & q_{12}\sigma_\xi^2 & 0 & q_{13}\sigma_\xi^2 \\ q_{12}\sigma_\beta^2 & 0 & q_{22}\sigma_\beta^2 & 0 & q_{23}\sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & q_{12}\sigma_\xi^2 & 0 & q_{22}\sigma_\xi^2 & 0 & q_{23}\sigma_\xi^2 \\ q_{13}\sigma_\beta^2 & 0 & q_{23}\sigma_\beta^2 & 0 & q_{33}\sigma_\beta^2 & 0 \\ 0 & q_{13}\sigma_\xi^2 & 0 & q_{23}\sigma_\xi^2 & 0 & q_{33}\sigma_\xi^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

σ_β 和 σ_ξ 分别为方位和俯仰方向的机动加速度方差, 量测矩阵为:

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

量测噪声为未知分布能量有界的有色噪声序列, 属于椭圆集合: $w_k \in E(0, R_k)$ 。

4 纯角度自适应椭圆滤波算法

4.1 算法流程

建立目标状态模型后, 给出自适应椭圆滤波算法步骤如下:

(1) 记测距设备探测频率为 $f_1 = \frac{1}{T_1}$, 测角设备探测频率为 $f_2 = \frac{1}{T_2}$, 分别取采样时刻 kT_2 、 $(k+1)T_2$ 及 $(k+2)T_2$ 的目标方位和俯仰角度量测值, 初始化得到目标的初始状态椭圆中心: $\mathbf{x}_k = (\beta \xi \beta \xi \beta \xi)^T$ 。

(2) 计算初始状态椭圆形状矩阵

$$\mathbf{P}_{k|k} = \begin{bmatrix} \sigma_\beta^2 & 0 & \sigma_\beta^2 f_2 & 0 & \sigma_\beta^2 f_2^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\xi^2 & 0 & \sigma_\xi^2 f_2 & 0 & \sigma_\xi^2 f_2^2 \\ \sigma_\beta^2 f_2 & 0 & 2\sigma_\beta^2 f_2^2 & 0 & 3\sigma_\beta^2 f_2^3 & 0 \\ 0 & \sigma_\xi^2 f_2 & 0 & 2\sigma_\xi^2 f_2^2 & 0 & 3\sigma_\xi^2 f_2^3 \\ \sigma_\beta^2 f_2^2 & 0 & 3\sigma_\beta^2 f_2^3 & 0 & 6\sigma_\beta^2 f_2^4 & 0 \\ 0 & \sigma_\xi^2 f_2^2 & 0 & 3\sigma_\xi^2 f_2^3 & 0 & 6\sigma_\xi^2 f_2^4 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

(3) 进行时间更新, 得到 $(k+1)T_2$ 时刻的时间更新椭圆 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}$, 椭圆中心为:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{F}_{k+1|k} \mathbf{x}_{k|k}. \quad (8)$$

椭圆形状矩阵:

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{F}_{k+1|k} \frac{\mathbf{P}_{k|k}}{1-\beta_k} \mathbf{F}_{k+1|k}^T + \frac{\mathbf{Q}_k}{\beta_k}, \beta_k \in (0, 1). \quad (9)$$

(4) 计算量测残差序列 $\mathbf{e}_{k+1} = \mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}$, 令 $\tilde{w}_{k+1} = E[\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T]$, 考虑到光电跟踪系统量测误差的相关性, 有 $\tilde{w}_{k+1} = \frac{\rho \tilde{w}_k + \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T}{1+\rho}$, $\tilde{w}_0 = 0$, 其中 $0 < \rho \leq 1$ 为遗忘因子, 其取值与跟踪系统量测误差的相关性有关, 若量测误差相关性较大则 ρ 取值增大, 反之则减小。令:

$$\mathbf{M}_{k+1} = \tilde{w}_{k+1} - R_k, \quad (10)$$

$$N_{k+1} = S_{k+1} - \frac{R_{k+1}}{\rho_{k+1}} = \mathbf{H}_{k+1} \frac{\mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T}{1 - \rho_{k+1}} + 1 = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{F}_k \frac{\mathbf{P}_{k|k}}{(1 - \beta_k)(1 - \rho_{k+1})} \mathbf{F}_k^T \mathbf{H}_{k+1}^T. \quad (11)$$

得到调节因子:

$$\lambda_{k+1} = \begin{cases} \frac{\text{trace}(\mathbf{M}_{k+1})}{\text{trace}(\mathbf{N}_{k+1})}, \frac{\text{trace}(\mathbf{M}_{k+1})}{\text{trace}(\mathbf{N}_{k+1})} > 1 \\ 1, \frac{\text{trace}(\mathbf{M}_{k+1})}{\text{trace}(\mathbf{N}_{k+1})} < 1 \end{cases}. \quad (12)$$

(5)根据调节因子调节机动频率 α 及加速度方差:

$$\alpha_{k+1} = \lambda_{k+1} \alpha_k, \quad (13)$$

进而对 \mathbf{F}_k 、 \mathbf{Q}_k 和 $\mathbf{P}_{k+1|k}$ 进行修正。

(6)量测更新

$$S_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \frac{\mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T}{1 - \rho_{k+1}} + \frac{\mathbf{R}_{k+1}}{\rho_{k+1}}, \rho_{k+1} \in (0, 1), \quad (14)$$

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{S}_{k+1}^{-1}}{1 - \rho_k}, \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} + \mathbf{k} e_{k+1}, \quad (16)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{k+1|k+1} = \frac{\mathbf{P}_{k+1|k}}{1 - \rho_{k+1}} - \frac{\mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k}}{1 - \rho_{k+1}}, \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = (1 - \delta_{k+1}) \bar{\mathbf{P}}_{k+1|k+1}, \quad (18)$$

$$\delta_{k+1} = \mathbf{e}_{k+1}^T \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \mathbf{e}_{k+1}. \quad (19)$$

4.2 关于算法的两点说明

(1) 算法步骤(5)中机动频率 α 的取法:一般先假设目标的机动性较弱, α 取一个较小的经验值,当目标机动性能增强时, λ_{k+1} 随之变大,那么利用 $\alpha_{k+1} = \lambda_{k+1} \alpha_k$ 对机动频率进行调节使之也增强,进而使状态方程更接近目标的机动情况。反之,若目标机动性能始终弱,则 $\lambda_{k+1} = 1$,机动频率 α 取值也不会发生变化,这就克服了“当前”运动模型对弱机动目标跟踪精度下降的缺点。

(2)在以上噪声椭球的更新过程中,噪声边界的估计采用了保守的估计方法,而在实际观测过程中,当量测椭球集合 O_{k+1} 与时间更新椭球 $E_{k+1|k}$ 满足一定关系时,量测更新步骤是可以省略的,现给出一种更符合实际情况的判别方法:

$$\mathbf{e}_{k+1}^T \mathbf{R}_{k+1} \mathbf{e}_{k+1} \leq \eta, \eta \in (0, 1], \quad (20)$$

其中,参数 η 的取值增大时,选择更新的几率随之增大,但同时边界估计误差也会增大,因此在应用中要根据噪声和系统模型与初始假设的符合程度

确定对 η 进行取值,平衡计算负担和估计精度。

5 实验与结果分析

为检验本文提出的自适应椭球滤波算法性能,以对末端机动反舰导弹的跟踪为例进行仿真实验。条件设定如下:我方舰艇的初始位置为 (6 400 m, 7 680 m, 0), 来袭导弹的初始位置为 (0, 0, 1 000 m), 初始状态椭球的形状矩阵为 $10^4 \mathbf{I}_3$, 飞行速度为 340.3 m/s。激光测距仪的探测周期为 $T_1 = 0.04$ s, 红外传感器的采样周期为 $T_2 = 0.01$ s, 忽略两探测器之间的距离,即认为它们处于同一位置,不存在空间配准问题。导弹距离舰艇 2.4 km 时完成爬升和攻角调整,开始俯冲攻击,其攻击过程三维轨迹及其在俯仰方向的投影如图 2 和 3 所示。

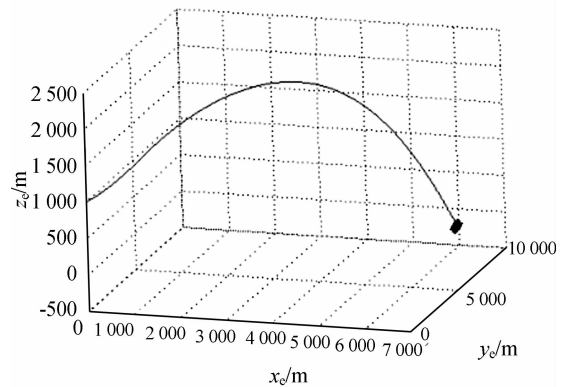


图 2 导弹飞行轨迹三维示意图
Fig. 2 Three-dimensional track of missile

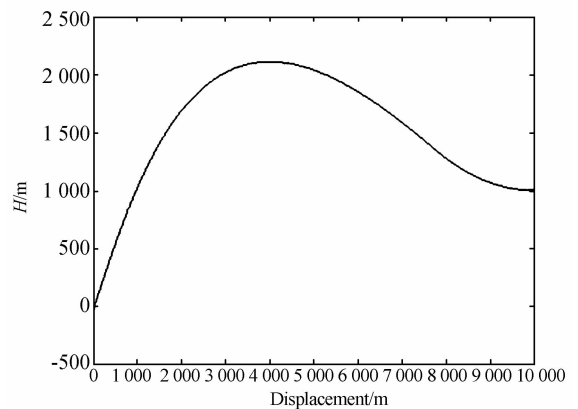


图 3 导弹轨迹在俯仰方向上的投影
Fig. 3 Elevation projection of missile track

5.1 目标信息完全量测的情况

首先考虑传感器对目标信息完全量测的情况,即 $P_L = P_R = 1$,其中 P_L 和 P_R 分别为激光和红外探测器的探测概率。此时分别利用 EKF 算法、文献[1]提出的基于 UCMKF 算法的双通道联邦结构滤波器以及本文给出的 OBE 算法对目标进行跟踪,仿真条件为:目标运动模型采用上文介绍的自适应“当前”机动模型,测距和测角设备量测噪声均为零均值高斯白噪声,测距误差标准差为 5 m,俯仰标准差为 0.5 mrad,分别进行 500 次蒙特卡罗仿真,得到目标位置估计误差均方差(RMSE)比较如图 4 所示。

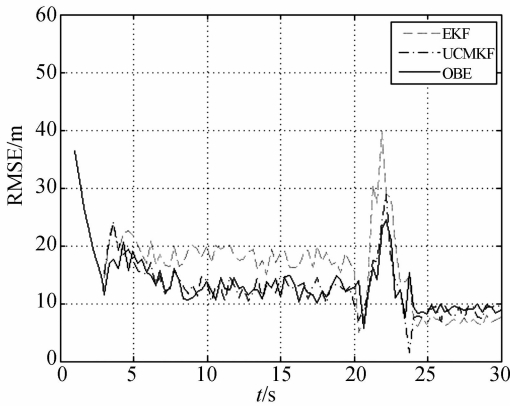


图 4 位置 RMSE 比较图($P_L = P_R = 1$)

Fig. 4 Comparison of position errors(RMSE, $P_L = P_R = 1$)

从图 4 可以看出,在红外和激光探测器探测概率均为 1 的情况下,由于 UCMKF 算法和 OBE 算法充分利用了红外探测器获得的目标角度信息,系统的跟踪效果明显好于 EKF 滤波器,说明了基于目标冗余角度信息跟踪策略的有效性,此时 UCMKF 和 OBE 算法的跟踪效果没有明显的差别。

5.2 目标距离信息不完全量测的情况

考虑激光测距设备探测概率下降的情况,令 $P_L = 0.5, P_R = 1$,考虑到高频图像序列噪声的相关性,即红外探测器的量测噪声不再服从零均值高斯白噪声的假设条件,在实验中令其服从均匀分布,且 $\omega_{k2} \in [-10'', 10'']$,激光探测器的量测噪声仍服从零均值高斯分布,测距误差标准差为 5 m,得到的目标位置 RMSE 比较如图 5 所示。

在图 5 中, $P_L = 0.5, P_R = 1$,即激光测距仪存

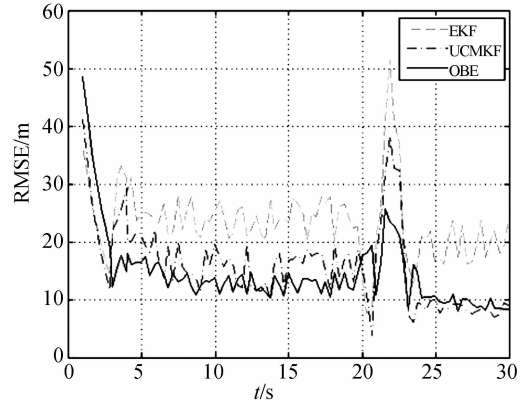


图 5 位置 RMSE 比较图($P_L = 0.5, P_R = 1$)

Fig. 5 Comparison of position errors(RMSE, $P_L = 0.5, P_R = 1$)

在不完全量测,此时 EKF 算法的跟踪性能明显下降,特别是目标距离舰艇 2.4 km 附近开始俯冲攻击时,由于目标机动造成了运动模型的变化,得到的目标位置 RMSE 已经超过了 50 m,若红外探测器视场为 $3^\circ \times 2.25^\circ$ (水平 \times 垂直),经过换算后可以发现此时目标已经逸出了视场。不完全量测条件下各种滤波算法估计性能比较见表 1。

表 1 各种滤波算法估计性能比较

Tab. 1 Comparison of estimation performance for filters

算 法	方位角 RMSE/($^\circ$)	俯仰角 RMSE/($^\circ$)
EKF	0.278	0.621
UCMKF	0.052	0.118
OBE	0.017	0.023

从表 1 可以看出,在发生不完全量测时,虽然 UCMKF 算法要优于 EKF 算法,但是和 OBE 算法的跟踪效果已经有了明显的差距,其主要原因有两个:一是纯角度跟踪时的量测噪声已不服从白噪声假设,跟踪器的实际效果受到了影响;二是文献[1]中联邦结构滤波器的融合方法放大了纯角度滤波器的作用,而激光测距仪具有很高的测量精度,利用纯角度滤波器的结果与其融合,反而可能降低系统整体的跟踪效果。基于 OBE 算法的纯角度跟踪滤波器在激光测距仪工作时刻并不参与信息融合,这样既省去了融合步骤,降低了计算负担,又保证了系统的可靠性。

6 结 论

对于带有激光测距仪的红外跟踪系统来说,目标距离信息的丢失会导致跟踪滤波器整体性能的下降。利用目标冗余角度信息进行跟踪,是在不增加硬件的前提条件下保证系统跟踪精度的有效方法。本文着重研究了仅利用目标角度信息的滤波器设计方法,建立了球坐标系下的目标运动模型,并考虑了高频图像序列噪声的相关性特点,

设计了纯角度自适应椭球滤波算法。实验结果表明,基于 OBE 算法的纯角度滤波器,在目标距离信息丢失的情况下可以保持对目标状态的连续跟踪和预测,补偿由探测概率下降造成的性能损失,而且 OBE 算法可以适用于量测噪声存在相关性的情况,对于强机动目标也能实现良好的跟踪效果。在激光测距仪探测概率为 50% 的情况下,可以实现角度估计均方差在 0.6 mrad 之内的稳定跟踪,基本满足了复杂环境下目标跟踪的精度要求。

参考文献:

- [1] 陈黎. 不完全量测下光电跟踪系统估计性能研究及其滤波器实现[D]. 南京:南京理工大学,2009:63-68.
CHEN L. *Research on estimation performance of optic-electric tracking systems with intermittent observations and filters development* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009:63-68. (in Chinese)
- [2] 陈黎,戚国庆,盛安冬. 有色观测噪声条件下的分布式 Kalman 最优融合[J]. 系统仿真学报,2009,7:4443-4446.
CHEN L, QI G Q, SHENG A D. Distributed Kalman optimal fusion with colored measurement noises [J]. *Journal of System Simulation*, 2009,7:4443-4446. (in Chinese)
- [3] 孙婷. 基于状态噪声去相关卡尔曼滤波的视频目标跟踪技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2009:29-30.
SUN T. *Tracking on the maneuvering targets based on Kalman filter with decorrelation of state noises* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009:29-30. (in Chinese)
- [4] SONG E B, ZHU Y M, YOU Z S. The Kalman type recursive state estimator with a finite-step correlated process noises [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2008:196-200.
- [5] 宁志刚,汪仁煌,谭义. 集员辨识综述[J]. 广东有色金属学报,2005,15(4):63-65.
NING Z G, WANG R H, TAN Y. Summary on set membership estimation [J]. *Journal of Guangdong non-ferrous metals*. 2005, 15(4): 63-65. (in Chinese)
- [6] 唐涛,黄永梅. 改进的 EKF 算法在目标跟踪中的应用[J]. 光电工程,2005,32(9):16-18.
TANG T, HUANG Y M. Application of improved EKF algorithm in target tracking [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(9): 16-18. (in Chinese)
- [7] 赵怀坤,林岳松,朱胜利. 基于强跟踪滤波器的纯方位机动目标跟踪算法[J]. 系统仿真学报,2009,21(2):474-477.
ZHAO H K, LIN Y S, ZHU S L. Strong tracking filter with application to bearings-only passive maneuvering target tracking [J]. *Journal of System Simulation*, 2009,21(2):474-477. (in Chinese)
- [8] 孙丽娜,宋悦铭,戴明. 采用复合控制提高机载光电平台的数引跟踪精度[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)
- [9] 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)
- [10] 周宏仁,敬忠良,王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京:国防工业出版社,1991:134-147.
HONGREN Z, JING ZH L, PEIDE W. *Tracking of Maneuvering Targets* [M]. Beijing: Nation Defense and industry Publishing Company, 1991:134-147. (in Chinese)

作者简介:



郭宁(1982—),男,安徽砀山人,工程师,博士生,2001年于海军航空工程学院获得学士学位,2007年海军航空工程学院获得硕士学位,主要从事目标跟踪与识别、自动控制等方面的研究。E-mail: 13356995902@163.com



邓江生(1965—),男,山东烟台人,高级工程师,1995年于海军航空工程学院获得学士学位,主要从事航空测量、图像处理、导航技术等方面的研究。E-mail: djs650805@163.com

导师简介:



吕俊伟(1960—),男,山东牟平人,教授,博士生导师,1985年于吉林工业大学获学士学位,1988年于吉林工业大学获硕士学位,2003年于法国第戎大学获博士学位,主要从事模式识别与智能系统、目标探测、跟踪与识别等方面的研究。E-mail: ljwei369@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)