

文章编号 1004-924X(2006)05-0917-05

一种用于光电目标跟踪的非线性滤波算法

陈浩, 谭久彬

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于传统转换测量卡尔曼滤波算法, 提出了一种二阶去偏转化测量卡尔曼滤波算法。该算法对转换测量方程进行二阶泰勒展开, 得到转换测量值误差的均值和方差表达式, 并对转换测量方程进行去偏差补偿, 再经转换测量卡尔曼滤波, 从而显著减小传统滤波算法的线性化误差, 提高远距离目标的跟踪精度。仿真结果表明: 二阶去偏转换测量卡尔曼滤波(SCMKF)算法跟踪精度明显优于传统的扩展卡尔曼滤波(EKF)算法和转换测量卡尔曼滤波(CMKF)算法, 收敛速度比EKF算法至少可提高1倍。

关键词: 目标跟踪; 二阶去偏转换测量卡尔曼滤波(SCMKF); 转换测量卡尔曼滤波(CMKF); 非线性滤波

中图分类号: V556.5 **文献标识码:** A

Nonlinear filtering algorithm for improving opto-electric target tracking

CHEN Hao, TAN Jiu-bin

(*Institute of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: In order to reduce the linear errors and improve the long-range target tracking accuracy, the Second-order debiased Converted Measurement Kalman Filter (SCMKF) algorithm is presented based on conventional CMKF, which is obtained by taking the second-order terms of a Taylor series expansion for the converted measurement functions to approximate the Cartesian coordinate errors. The mean and covariance of Cartesian measurement errors have been derived and the debiasing compensation is applied to SCMKF algorithm, which is helpful to improve long-range tracking accuracy. Simulation results show that the tracking accuracy of SCMKF is much higher than those of EKF and conventional CMKF, and the SCMKF provides faster convergence rate than the EKF.

Key words: target tracking; Second-order Debiased Converted Measurement Kalman Filter(SCMKF); Converted Measurement Kalman Filter(CMKF); nonlinear filtering

1 引言

随着现代技术的发展,对飞行器状态测量提出了愈来愈高的要求,从而也对光电跟踪测量设备的测量精度和速度指标提出了相应要求^[1]。在光电跟踪系统对目标进行跟踪时,由于目标运动的状态通常用直角坐标系来描述,而传感器的测量值是在球(极)坐标系下给出的,此时测量值与目标状态之间是非线性关系,标准的卡尔曼滤波方法不能直接应用。一般有两种处理方法:一是在混合坐标系中应用扩展卡尔曼滤波(EKF)算法,它利用泰勒级数展开,将非线性的测量方程近似线性化,这不可避免地引入了线性化误差,使得跟踪精度不高,并且滤波器存在发散等问题^[2-5]。另一种方法是转换测量卡尔曼滤波(CMKF),它是将球坐标系下的测量值映射到直角坐标系中,但转换测量值是有偏的,并且这种方法使得各测量误差相互耦合,不易进行数据处理,并且当传感器测量误差较大或者目标距离较远时,其跟踪误差也较大。Seong-Taek Park 通过代数运算和合理近似,提出了一种简化的扩展卡尔曼滤波,在一定程度上减小了线性化误差^[6-7]。文献[8][9]采用解耦卡尔曼滤波进行处理,但这种方法推导过程极其复杂,并且易产生病态矩阵而得到错误的滤波值。Bar-Shalom 等人采用统计的方法对转换测量值进行去偏差处理^[10-13],获得了较好的跟踪精度,但其去偏差处理时计算测量误差的均值和方差的过程复杂,不利于实时跟踪。本文利用级数展开的方法,对转换测量方程进行二阶泰勒展开,验证了转换测量值的有偏性。同时,推导了转换测量误差的均值和方差公式,对测量值进行去偏差处理后,采用转换测量卡尔曼滤波方法进行滤波,仿真试验结果证明这种非线性去偏转换测量卡尔曼滤波算法优于传统的转换测量卡尔曼滤波(CMKF)和扩展卡尔曼滤波(EKF)算法。

2 转换测量误差分析

假设一部二维光电跟踪系统位于坐标原点,目标相对于测量系统的真实位置为斜距 r 和方位角 θ ,测量系统的实际测量值为 r_m 和 θ_m ,则 r_m 和 θ_m 可以表示为:

$$\begin{cases} r_m = r + \Delta r \\ \theta_m = \theta + \Delta \theta \end{cases}, \quad (1)$$

其中: Δr 、 $\Delta \theta$ 分别表示斜距和方位角的测量误差,并且两者相互独立,服从零均值高斯分布,方差分别为 σ_r^2 和 σ_θ^2 。

将极坐标系下的测量值映射到直角坐标系,则有:

$$\begin{cases} x_m = r_m \cos \theta_m \\ y_m = r_m \sin \theta_m \end{cases}, \quad (2)$$

从式(2)可以看出,转换后的测量值误差相互耦合,并且还是非线性的。

当斜距和方位角测量误差较小时,采用级数展开的方法对式(2)进行线性化处理,得到转换测量值的误差:

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta r \cos \theta - \Delta \theta r \sin \theta \\ \Delta y = \Delta r \sin \theta + \Delta \theta r \cos \theta \end{cases}, \quad (3)$$

从式(3)可以看出,转换测量方程线性化后的转换测量值误差是无偏的,而实际上从极坐标到直角坐标的转换测量值误差是有偏的。当目标距离较远或者测角误差较大时,这种有偏性尤为突出,严重影响目标的跟踪精度。

从上述线性化过程可以看出,由于传统的转换测量卡尔曼滤波(CMKF)只对转换测量方程进行一阶泰勒展开,忽略了级数展开的高阶部分,掩盖了转换测量误差的有偏性,引入了线性化误差,并且这种线性化误差随测量系统测量误差和作用距离的增大而急剧增大。如果对转换测量方程式(2)进行二阶泰勒展开,得到转换测量值误差为:

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta r \cos \theta - \Delta \theta r \sin \theta - \Delta r \Delta \theta \sin \theta - \frac{1}{2} \Delta \theta^2 r \cos \theta \\ \Delta y = \Delta r \sin \theta + \Delta \theta r \cos \theta + \Delta r \Delta \theta \cos \theta - \frac{1}{2} \Delta \theta^2 r \sin \theta \end{cases}, \quad (4)$$

从式(4)可以看出,对转换测量方程的二阶泰勒展开,其转换测量值误差是有偏的。对上式求均值和方差,得到转换测量值误差的均值为:

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} E(\Delta x | r, \theta) \\ E(\Delta y | r, \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \sigma_\theta^2 r \cos \theta \\ -\frac{1}{2} \sigma_\theta^2 r \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

转换测量值误差的方差为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中:

$$R_{11} = \text{var}(\Delta x) = \sigma_r^2 \cos^2 \theta + r^2 \sigma_\theta^2 \sin^2 \theta + \sigma_r^2 \sigma_\theta^2 \sin^2 \theta + \frac{3}{4} \sigma_\theta^4 r^2 \cos^2 \theta - \frac{1}{4} \sigma_\theta^4 r^2 \cos^2 \theta,$$

$$R_{22} = \text{var}(\Delta y) = \sigma_r^2 \sin^2 \theta + r^2 \sigma_\theta^2 \cos^2 \theta + \sigma_r^2 \sigma_\theta^2 \cos^2 \theta + \frac{3}{4} \sigma_\theta^4 r^2 \sin^2 \theta - \frac{1}{4} \sigma_\theta^4 r^2 \sin^2 \theta,$$

$$R_{12} = R_{21} = \text{cov}(\Delta x, \Delta y) = \left(\sigma_r^2 - r^2 \sigma_\theta^2 - \sigma_r^2 \sigma_\theta^2 + \frac{3}{4} \sigma_\theta^4 r^2 \right) \sin \theta \cos \theta - \frac{1}{4} \sigma_\theta^4 r^2 \sin \theta \cos \theta$$

因此,对转换测量方程(2)式进行去偏差处理,得到新的转换测量方程为:

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} r_m \cos \theta_m \\ r_m \sin \theta_m \end{pmatrix} - \boldsymbol{\mu}, \quad (7)$$

通过高阶近似,推导出极坐标测量值转换到直角坐标过程中引起的偏差量,并对直角坐标系下的转换测量值进行去偏差补偿,得到新的转换测量方程(7),该方程可有效减小极坐标测量值转换到直角坐标过程中线性化引起的偏差,并保证测量方程为线性方程,以便于应用标准卡尔曼滤波算法对测量数据进行处理。

3 去偏转换测量卡尔曼滤波算法

假设目标作匀速直线运动,状态方程为:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{B}\mathbf{w}(k-1), \quad (8)$$

其中: $\mathbf{X}(k)$ 为目标在 k 时刻的状态, $\mathbf{w}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的状态噪声, \mathbf{A} 为状态转移矩阵, \mathbf{B} 为噪声输入矩阵。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ 0 & T \end{bmatrix},$$

其中: T 为采样间隔。

直角坐标系下的去偏测量方程为:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{X}(k) + \mathbf{v}(k), \quad (9)$$

其中: $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 为观测矩阵, $\mathbf{v}(k)$ 为零均值的测量噪声,其方差为式(6)推导得到的 \mathbf{R} 。

此时,目标状态方程和测量方程在直角坐标系下均为线性方程,且过程噪声和测量噪声均为独立的零均值噪声,可以采用标准卡尔曼滤波算法进行滤波,滤波过程如下:

状态的一步预测:

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k-1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(k-1|k-1),$$

预测测量值为:

$$\hat{\mathbf{Z}}(k|k-1) = \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k|k-1),$$

状态的估计:

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k) = \hat{\mathbf{X}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k|k-1)],$$

预测状态的协方差为:

$$\hat{\mathbf{P}}(k|k-1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{P}}(k-1|k-1)\mathbf{A}' + \mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B}',$$

状态的协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{P}}(k|k) = \hat{\mathbf{P}}(k|k-1) - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}\hat{\mathbf{P}}(k|k-1),$$

卡尔曼滤波增益:

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}'[\mathbf{H}\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}' + \mathbf{R}(k)]^{-1},$$

其中: $\mathbf{Q} = E[\mathbf{w}(k), \mathbf{w}'(k)]$ 为系统过程噪声的方差。

4 仿真结果

设测量系统位于坐标系原点,目标做匀速直线运动,其初始位置为(150 km, 120 km),初始速度为(-0.6 km/s, -0.7 km/s),目标的状态方程用式(8)表示,状态过程噪声为相互独立的零均值高斯白噪声,在各坐标轴上的标准偏差均为 0.5 m/s²。跟踪系统进行 100 次测量,采样间隔为 $T=1$ s。滤波器的初始状态方差为 $P_0 = \text{diag}(10 \text{ km})$,目标的初始状态由采样点的前两个测量值计算得到,测量系统的斜距测量误差的标准偏差为: $\sigma_r=0.03$ km,针对方位角测量误差的标准偏差分别为: $\sigma_\theta=1.0^\circ$ 和 1.5° ,分别用扩展卡尔曼滤波(EKF)算法,传统的转换测量卡尔曼滤波(CMKF)算法和本文提出的非线性去偏转换测量卡尔曼滤波(SCMKF)算法对目标进行 1000 次

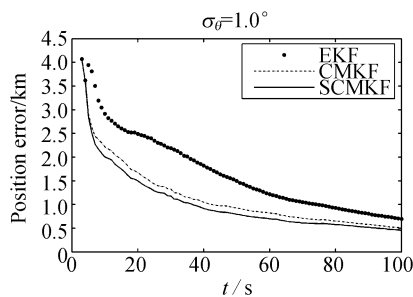


图 1 采用 EKF,CMKF 和 SCMKF 三种滤波算法得到的位置跟踪误差比较曲线($\sigma_\theta=1.0^\circ$)

Fig. 1 Comparison of position errors for three kinds of filter algorithms ($\sigma_\theta=1.0^\circ$)

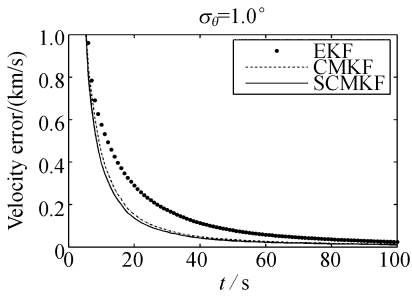


图 2 采用 EKF, CMKF 和 SCMKF 三种滤波算法得到的速度跟踪误差比较曲线 ($\sigma_\theta = 1.0^\circ$)

Fig. 2 Comparison of velocity errors for three kinds of filter algorithms ($\sigma_\theta = 1.0^\circ$)

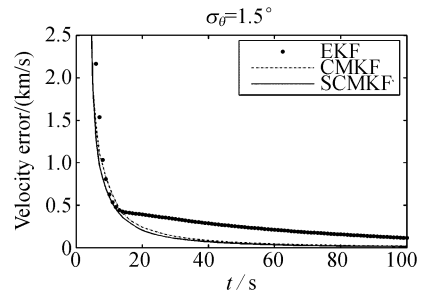


图 4 采用 EKF, CMKF 和 SCMKF 三种滤波算法得到的速度跟踪误差比较曲线 ($\sigma_\theta = 1.5^\circ$)

Fig. 4 Comparison of velocity errors for three kinds of filter algorithms ($\sigma_\theta = 1.5^\circ$)

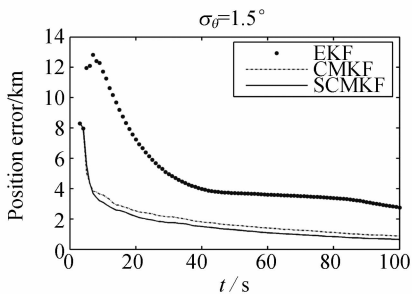


图 3 采用 EKF, CMKF 和 SCMKF 三种滤波算法得到的位置跟踪误差比较曲线 ($\sigma_\theta = 1.5^\circ$)

Fig. 3 Comparison of position errors for three kinds of filter algorithms ($\sigma_\theta = 1.5^\circ$)

蒙特卡洛跟踪仿真试验, 得到各滤波算法的位置跟踪误差曲线和速度跟踪误差曲线如图 1 至图 4 所示。从图中可以看出, 本文提出的非线性去偏转换测量卡尔曼滤波算法跟踪精度高于传统的转换测量卡尔曼滤波算法和扩展卡尔曼滤波算法, 并且具有更快的收敛速度。

5 结 论

传统的转换测量卡尔曼滤波算法和扩展卡尔曼滤波算法在滤波过程中都采用了线性化近似, 不可避免地引入了线性化误差。当测量系统的测量精度较高时, 线性化误差较小, 随着测量误差和作用距离的增大, 线性化误差急剧增大。而本文的非线性转换测量卡尔曼滤波算法对测量方程进行二阶泰勒展开, 减小了线性化误差, 同时也将传统转换测量卡尔曼滤波线性化处理过程中忽略掉的误差偏差量表示出来, 并对其测量方程进行去偏差补偿, 可有效地提高测量系统的跟踪精度。本文提出的跟踪算法可广泛适用于光电目标跟踪, 尤其是对测角误差较大的跟踪系统, 或远距离目标跟踪, 该算法相对于传统的滤波跟踪算法具有更高的跟踪精度。

参考文献:

- [1] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2):105-116. WANG J Q, JING G, YAN C X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2):105-116. (in Chinese)
- [2] HSIEH CH SH. General two-stage extended Kalman filters[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(2):289-293.
- [3] FARINA A, RISTIC B, BENVENUTI D. Tracking a ballistic target: comparison of several nonlinear filters[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(3):854-867.
- [4] NORDSJO A E. A constrained extended Kalman filter for target tracking[C]. *Radar Conference, Proceedings of the IEEE*, 2004:123-127.

- [5] 袁洪印,郭立红,谭振江,等. 组合 Kalman 隔点预测法用于跟踪机动目标的仿真研究[J]. *光学精密工程*,2004,14(2):169-173.
YUAN H Y, GUO L H, TAN Z J, *et al.* Tracking mobile target by composed Kalman leap prediction method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(2):169-173. (in Chinese)
- [6] PARK S T, LEE J G. An efficient filtering algorithm for improved radar tracking[C]. *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications*, 1996:1078-1083.
- [7] PARK S T, LEE J G. Design of a practical tracking algorithm with radar measurements[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(4):1337-1344.
- [8] SUNG T, LEE J G. A sufficient condition for stability of a decoupled tracking filter in LOS coordinate system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(2):593-599.
- [9] 王宏强,黎湘,庄钊文,等. 解耦的转换测量 Kalman 滤波算法[J]. *电子学报*,2003,31(6):867-870.
WANG H Q, LI X, ZHUANG Z W, *et al.* Decoupled converted measurement Kalman filter[J]. *Acta Eelectronic Sinica*, 2003, 31(6):867-870. (in Chinese)
- [10] LERRO D, YAAKOV B S. Tracking with debiased consistent converted measurements versus EKF[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(3):1015-1022.
- [11] MO L B, SONG X Q, ZHOU Y Y, *et al.* Unbiased converted measurements for tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(3):1023-1027.
- [12] DUAN Z S, HAN C Z, LI X R. Comments on unbiased converted measurements for tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(4):1374-1377.
- [13] ZOLLO S, RISTIC B. On polar versus Cartesian coordinates for target tracking[C]. *Fifth International Symposium on Signal Processing and its Application*, 1999:499-502.

作者简介:陈浩(1980—),男,四川内江人,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所攻读博士生,主要从事光电探测技术,飞行器相对状态测量与导航技术等。E-mail:ch_hao1980@163.com