

基于修正扩展卡尔曼序贯滤波的信息融合算法

彭志专¹, 冯金富¹, 聂光戌², 谷志勇³

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 3. 空军军训器材研究所, 北京 100097)

摘要:针对基于扩展卡尔曼滤波的融合算法存在滤波精度不高的问题,将修正扩展卡尔曼滤波算法与集中式序贯融合算法相结合,用于毫米波雷达和红外传感器目标融合跟踪。即先对毫米波雷达进行修正扩展卡尔曼滤波,再将滤波结果与红外传感器进行融合滤波。仿真结果表明该算法能够提高对机动目标的跟踪精度,增强跟踪系统对环境变化的适应能力。

关键词:信息融合;机动目标跟踪;修正扩展卡尔曼滤波;序贯滤波

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)05-0033-04

利用毫米波雷达和红外传感器信息进行复合制导与采用单一传感器制导相比,具有无可比拟的优势。毫米波雷达距离分辨率高,并具有良好的穿透性能;红外传感器的角分辨率高,而且不向空中辐射能量,可以克服雷达易被侦察和干扰的缺点。从目标隐身角度来看,目前还没有能对毫米波和红外同时隐身的材料。因此,采用毫米波雷达和红外传感器的信息融合系统尤其适合于反隐身作战的要求,它逐渐成为当前多模复合制导研究的重点^[1-2]。

通过融合毫米波雷达高精度的距离测量和红外传感器高精度的角度测量,可以给出对目标位置的精确估计,实现精确制导。毫米波雷达和红外传感器测量方程在直角坐标系下是非线性的,采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)估计目标状态存在误差,远距离跟踪精度较差^[3]。修正扩展卡尔曼滤波(MEKF)通过线性化误差补偿,使滤波精度得到提高^[4]。对于集中式弹载毫米波雷达红外传感器融合系统,序贯滤波算法对噪声适用面较广^[5]。本文将 MEKF 算法与集中式序贯融合算法相结合,提出了用于毫米波雷达和红外传感器目标融合跟踪算法,以提高机动目标跟踪精度,增强对环境变化的适应能力。

1 机动目标跟踪模型

周宏仁教授提出的机动目标“当前”统计模型对于大机动目标适应能力较强而得到了广泛的应用。根据离散“当前”统计模型^[6],选取目标的位置、速度及加速度在地理惯性坐标系 3 个轴上的投影分量作为状态变量建立机动目标状态方程:

$$X(k+1) = F(k+1, k)X(k) + U(k)\bar{a} + W(k) \quad (1)$$

式中: $F(k+1, k) = \text{diag}\{F \quad F \quad F\}$, $U(k) = \text{diag}\{U \quad U \quad U\}$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & (-1 + \alpha T + e^{-\alpha T})/\alpha^2 \\ 0 & 1 & (-e^{-\alpha T})/\alpha^2 \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} (-T + \alpha T^2/2 + (1 - e^{-\alpha T})/\alpha)/\alpha \\ (T - (1 - e^{-\alpha T})/\alpha)/\alpha \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix}$$

状态量 $X(k) = [x(k) \quad \dot{x} \quad \ddot{x}(k) \quad y(k) \quad \dot{y} \quad \ddot{y}(k) \quad z(k) \quad \dot{z} \quad \ddot{z}(k)]^T$, T 为采样周期, α 为目标机动时

收稿日期:2007-03-07

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:彭志专(1979-),男,湖南益阳人,博士生,主要从事非线性滤波、估计融合研究;

冯金富(1964-),男,江苏泰兴人,教授,博士生导师,主要从事武器系统管理与控制研究。

间常数的倒数, \bar{a} 为机动加速度“当前”均值, $W(k)$ 为协方差为 $Q(k)$ 的噪声。

对于目标跟踪系统,除了建立状态方程还需要建立传感器测量方程。毫米波雷达可以直接测量目标的距离、方位角及俯仰角。设 $r_R(k)$, $\theta_R(k)$, $\phi_R(k)$ 为目标距离、方位角及俯仰角的测量值, $v_{r_R}(k)$, $v_{\theta_R}(k)$, $v_{\phi_R}(k)$ 为测量噪声。其测量方程为式(2)^[7-8]。

$$\begin{bmatrix} r_R(k) \\ \theta_R(k) \\ \phi_R(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)} \\ \arctan \frac{y(k)}{x(k)} \\ \arctan \frac{z(k)}{\sqrt{x^2(k) + y^2(k)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{r_R}(k) \\ v_{\theta_R}(k) \\ v_{\phi_R}(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_i(k) \\ \phi_i(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{y(k)}{x(k)} \\ \arctan \frac{z(k)}{\sqrt{x^2(k) + y^2(k)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\theta_i}(k) \\ v_{\phi_i}(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

红外传感器只能直接测量目标的方位角 $\theta_i(k)$ 及俯仰角 $\phi_i(k)$, 其测量方程为式(3)。

2 修正扩展卡尔曼滤波(MEKF)

毫米波雷达红外传感器目标融合跟踪系统中,系统的状态方程是线性的,不存在线性误差。但是测量方程是非线性的,因此,应采用扩展卡尔曼滤波进行目标状态估计。扩展卡尔曼滤波通过泰劳近似展开的方法将非线性测量方程线性化。

毫米波雷达的线性化测量方程可表示为

$$\mathbf{Z}^R(k) = \mathbf{H}^R(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}^R(k) \quad (4)$$

$$\mathbf{H}^R(k) = \begin{bmatrix} x(k)/r(k) & 0 & 0 & y(k)/r(k) & 0 & 0 & z(k)/r(k) & 0 & 0 \\ -y(k)/s^2(k) & 0 & 0 & y(k)/s^2(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x(k)/z(k)/r^2(k)s(k) & 0 & 0 & -y(k)z(k)/r^2(k)s(k) & 0 & 0 & s(k)/r^2(k) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同样红外传感器的线性化测量方程可表示为

$$\mathbf{Z}^I(k) = \mathbf{H}^I(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{v}^I(k) \quad (5)$$

但是由于线性化过程只取泰劳展开的一次项,忽略了高阶项,产生线性化误差,当跟踪目标距离较远时,滤波器性能急剧下降,甚至发散。

目前,非线性滤波应用较为广泛,但是并不是一种滤波算法对每种非线性系统均能适用,在解决具体非线性系统的滤波问题时,应当考虑建立特殊滤波方程的可能性。修正扩展卡尔曼滤波算法通过估计测量噪声的均值修正滤波器输出,通过估计测量噪声的方差匹配测量噪声协方差矩阵,以对线性化误差补偿,减小非线性测量值的影响,使滤波器精度得到提高。

根据该算法,毫米波雷达的测量噪声均值估计为

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}^{RP}(k) = \left[\frac{\hat{r}(k)}{2} [(\tilde{\phi}^R(k))^2 + (\tilde{\theta}^R(k))^2 - \sigma_{\phi^R}^2 - \sigma_{\theta^R}^2] \quad 0 \quad 0 \right]^T \quad (6)$$

毫米波雷达的测量噪声协方差估计为

$$\hat{\mathbf{R}}^{RP}(k) = \text{diag} \{ \sigma_r^2 + \hat{r}(k)(\sigma_{\phi^R}^4 + \sigma_{\theta^R}^4)/2 \quad \sigma_{\phi^R}^2 \quad \sigma_{\theta^R}^2 \} \quad (7)$$

$\tilde{\phi}^R(k) = \phi^R(k) - \hat{\phi}^R(k)$, $\tilde{\theta}^R(k) = \theta^R(k) - \hat{\theta}^R(k)$; $\sigma_{\phi^R}^2$, $\sigma_{\theta^R}^2$ 为方位角、俯仰角测量噪声协方差。由式(6)、(7)可看出 MEKF 未对测量角度做出线性化误差补偿,测量方程线性化过程对方位角、俯仰角产生的误差较小,因此红外传感器采用正常的 EKF。

3 基于序贯滤波的毫米波雷达红外传感器目标融合跟踪

在线性系统中有 3 种集中式融合算法,分别是:并行滤波、序贯滤波、数据压缩滤波。这 3 种算法已被证明是等效最优的,考虑并行滤波将引入高维矩阵乘法和求逆运算,计算量较大,而毫米波雷达和红外传感器

测量噪声协方差矩阵不匹配,不宜采用数据压缩滤波算法,因此本文采用序贯滤波算法。

基于修正扩展卡尔曼序贯滤波毫米波雷达红外传感器融合算法的中心思想是:将毫米波雷达滤波误差协方差阵 $P^R(k/k)$ 替换红外传感器预测误差协方差阵 $P^I(k/k-1)$;毫米波雷达状态滤波值 $\hat{X}^R(k/k)$ 替换红外传感器状态预测值 $\hat{X}^I(k/k-1)$ 。最终组成全局状态滤波 $\hat{X}(k/k)$ 、全局状态滤波误差协方差阵 $P(k/k)$,对下一步的全局状态预测 $\hat{X}(k+1/k)$ 以及全局状态预测误差协方差阵 $P(k+1/k)$,具体的算法是:

1) 估计毫米波雷达测量噪声的均值 $\hat{\mu}^{RP}(k)$ 和协方差矩阵 $\hat{R}^{RP}(k)$

2) 计算毫米波雷达滤波增益矩阵

$$K^R(k) = P^R(k/k-1)(H^R(k))^T [H^R(k)P^R(k/k-1)(H^R(k))^T + \hat{R}^{RP}(k)]^{-1} \quad (8)$$

3) 计算毫米波雷达状态滤波值

$$\hat{X}^R(k/k) = \hat{X}^R(k/k-1) + K^R(k)[Z^R(k) - h^R(\hat{X}^R(k/k-1)) - \hat{\mu}^{RP}(k)] \quad (9)$$

4) 计算毫米波雷达滤波误差协方差阵

$$P^R(k/k) = [I - K^R(k)H^R(k)]P^R(k/k-1) \quad (10)$$

5) 计算红外传感器滤波增益矩阵

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

6) 计算全局状态滤波

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}^R(k/k) + K^I(k)[Z^R(k) - h^I(\hat{X}^R(k/k))] \quad (12)$$

7) 计算全局状态滤波误差协方差阵

$$P(k/k) = [I - K^I(k)H^I(k)]P^R(k/k) \quad (13)$$

4 仿真分析

对本文提出的基于修正扩展卡尔曼序贯滤波毫米波雷达红外传感器融合算法进行了仿真。毫米波雷达采样周期为 0.2 s,测距噪声均方差为 25 m,测角噪声均方差为 0.001 rad;红外传感器采样时间为 0.1 s,测角噪声均方差为 0.008 rad。20 s 后传感器噪声特性发生变化,毫米波雷达测角噪声均方差变为 0.007 rad;红外传感器测角噪声均方差变为 0.002 rad。假设目标在三维空间内运动,起始位置为 [1 600 1 900 1 200],运动速度为 300 m/s,前 20 s 内目标作方位角、俯仰角都为 45° 的匀速直线飞行,20 s 后目标以法向 6 g 的加速度在 X-Y 平面内做圆周运动,至 60 s 飞行结束。

仿真结果比较了直角坐标系内毫米波雷达、红外传感器滤波估计误差和融合后的滤波估计误差水平。本文给出了 X 轴位置的误差曲线图,图 1 为毫米波雷达和红外传感器单独滤波的误差曲线,图 2 为融合后的滤波误差曲线。

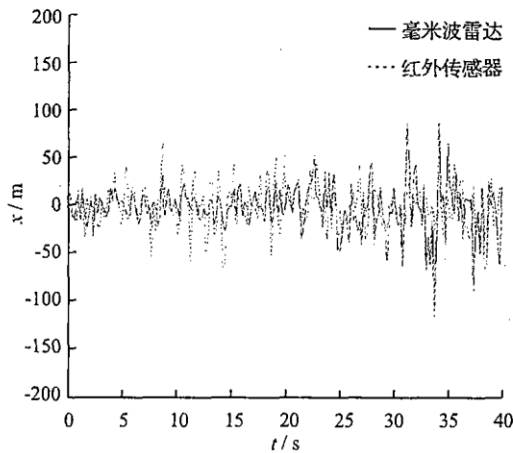


图1 融合前 X 轴位置误差曲线

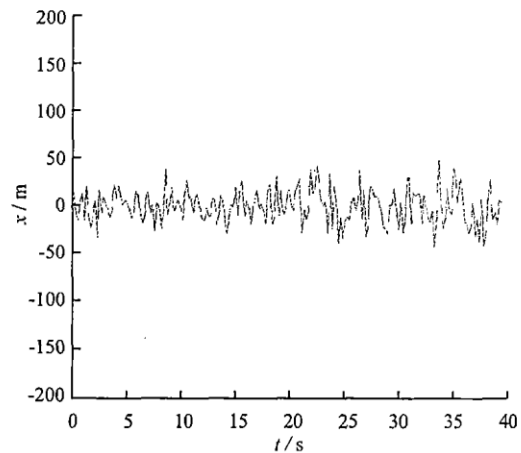


图2 融合后 X 轴位置误差曲线

从仿真曲线中可以明显的看出融合后的状态量精度偏向于精度更高的传感器,使融合后的数据更接近目标运动的真实数据,达到了信息融合的目的,并且取得了很好的效果。

5 结论

本文设计了一种基于修正扩展卡尔曼序贯滤波的毫米波雷达红外传感器融合算法。采用该算法对毫米波雷达红外传感器的目标状态信息进行了融合,能够提高目标跟踪系统的抗干扰能力,增强了系统对环境变化的适应能力。

参考文献:

- [1] 雷虎民. 导弹制导与控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 李文. 国外精确制导技术的现状及发展[J]. 红外技术,1999,21(1):10-12.
- [3] 刘晨,冯新喜. 杂波环境下基于红外传感器和雷达融合的机动目标跟踪算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(2):25-30.
- [4] Park Seong-Taek, Jang Gyu Lee. Improved Kalman Filter Design for Three-Dimensional Radar Measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2):727-739.
- [5] Gan Qiang, Harris C J. Comparison of Two Measurement Fusion Methods for Kalman-filter based Multisensor Data Fusion[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(1):273-280.
- [6] 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.
- [7] Blair W D, Rice T R, Alouani A T. Asynchronous Data Fusion for Target Tracking with a Multi-tasking[J]. Radar and Optical Sensor, Acquisition, Tracking and Pointing, 2001, 148:234-280.
- [8] Farina A, Ristic B, Benvenuti D. Tracking a Ballistic Target: Comparison of Several Nonlinear Filters[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions, 2002, (38):854-867.

(编辑:姚树峰)

A Novel Fusion Algorithm Based on Modified Extend Kalman Sequential Filtering

PENG Zhi-zhuan¹, FENG Jin-fu¹, NIE Guang-shu², GU Zhi-yong³

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. College of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Air Force Research Institute of Military Training Instrument, Beijing 100097, China)

Abstract: A fusion algorithm for millimeter wave (MMW) radar and infrared (IR) sensor is discussed in this paper. Modified extend Kalman filter (MEKF) is simple yet very effective in accounting for the measurement of non-linearity. On condition of combining MEKF with sequential filter, the optimum state of maneuvering target is obtained. The target is tracked with MMW radar using MEKF, and then the filtering results are fused with information from IR sensor through sequential filter. In this way, the global state is updated at the fusion center. Simulation shows that the novel method can significantly improve the state estimation precision of composite guidance system and strengthens the adaptability of the tracking system to environmental changes.

Key words: information fusion; maneuvering target tracking; MEKF; sequential filter