

雷达/红外复合导引头信息融合算法

徐琰珂¹, 梁晓庚^{1,2}, 贾晓洪²

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要:毫米波雷达/红外成像复合制导已成为当前多模复合制导技术的研究热点。从毫米波雷达/红外成像复合导引头系统的特点及其工程应用出发,建立了一种基于联邦滤波(FF)的分布式雷达/红外复合导引头信息融合算法。首先,针对扩展卡尔曼滤波存在线性化误差以及雷达测量噪声非高斯的特点,采用粒子滤波算法(PF)设计雷达子滤波器;针对红外传感器不能测量目标距离的特点,采用伪线性卡尔曼滤波算法(PLKF)设计红外子滤波器。然后通过主滤波器进行信息融合,并对两个子滤波器进行信息分配和重置。仿真结果表明,该信息融合算法能够有效地提高雷达/红外复合导引头系统的目标跟踪精度及系统的稳定性。

关键词:复合制导; 信息融合; 联邦滤波; 粒子滤波; 伪线性卡尔曼滤波

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0030-07

Information fusion algorithm for radar/IR compound seeker

Xu Yanke¹, Liang Xiaogeng^{1,2}, Jia Xiaohong²

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: MMW radar/IR compound guidance technology has become a hot research content of compound guidance field. Starting from the characteristic of MMW radar/IR composite seeker system, the federated filter (FF), structured with 2-levels, was used to set up a distribute information fusion algorithm of radar/IR composite seeker in this paper. In order to solve the problems that the extended Kalman filter algorithm had linearization errors and the glint noise of radar sensor was not a Gauss noise, the particle filter algorithm(PF) was used to design radar local filter; in order to solve the problem that the IR sensor couldn't measure the distance between missile and target, the pseudo-linear Kalman filter (PLKF) algorithm was used to design IR local filter; and after that, the main filter was responsible for data fusion and data reset to local filters. Simulations results demonstrate the effectiveness of this mode and show that this information fusion algorithm improves the tracking precision and the stability of radar/IR compound seeker system.

Key words: compound guidance; information fusion; federated filter; particle filter; pseudo-linear Kalman filter

收稿日期: 2011-05-15; 修订日期: 2011-06-22

基金项目: 航空科学基金(20090112002)

作者简介: 徐琰珂(1985-), 女, 博士生, 主要从事复合制导、信息融合等方面的研究。Email: keke_lulu2000@163.com

导师简介: 梁晓庚(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事导弹制导与控制、导弹总体设计等方面的研究。Email: lxxg2288@sohu.com

0 引言

随着光电对抗技术的不断发展以及目标机动性的不断提高,单一模式的导引头已经很难适应现代战场复杂的光电对抗环境,多模复合制导技术应运而生。主动式毫米波雷达/红外成像复合制导是复合制导导弹发展的重要方向^[1],将红外传感器与雷达传感器配合使用能大大提高制导导弹的作战能力,具有全天候作战能力强、制导精度高和抗电子干扰能力较强的优点。为此,国内外许多学者都致力于 MMW 雷达/红外成像复合制导武器系统的研究^[2-3]。

但是,目前在双模复合导引头的数据融合算法中,大多采用的是集中式融合的结构^[2-3]。集中式融合算法存在计算量大、容错性能差等缺点,很难应用于实际工程中。为了解决这一问题,近年来,众多学者开始研究基于分布式融合结构的信息融合算法。其中,联邦滤波算法是分布式融合算法的一个重要的发展方向^[4]。文中从 MMW 雷达/红外成像双模导引头系统的特点出发,建立了一种基于联邦滤波的分布式雷达/红外双模导引头信息融合算法。首先,针对 MMW 雷达/红外双模导引头系统的不同特点,构建了一个具有两级结构的联邦卡尔曼滤波器,分别采用粒子滤波和伪线性卡尔曼滤波算法对子滤波器进行设计,用来对雷达和红外两个传感器的信息进行处理,再通过主滤波器对两子滤波器的结果进行信息融合,并对子滤波器进行信息分配和重置。最后对所设计的数据融合系统进行了仿真研究。

1 目标跟踪模型

1.1 目标运动模型

目前,在目标跟踪算法中,常用的目标运动模型有匀速运动模型(CV)、匀加速运动模型(CA)和当前统计模型(CU)。文中采用 CU 作为对目标运动模型描述。选取系统状态向量为:

$$\mathbf{X}=[x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T \quad (1)$$

式中: $x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 和 $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ 分别为目标的三维位置、速度以及加速度。该模型下,目标的状态方程可写为:

$$\mathbf{X}_k=\Phi_{k,k-1}\mathbf{X}_{k-1}+\mathbf{u}\mathbf{a}_k+\mathbf{W}_{k-1} \quad (2)$$

式中: \mathbf{W}_{k-1} 是均值为 0、斜方差阵为 \mathbf{Q}_w 的白高斯过程

噪声向量,其他参数的含义详见参考文献[5]。

1.2 MMW 雷达导引头测量模型

MMW 雷达导引头的观测数据包括视线方位角、视线俯仰角、弹目距离等信号,选择其观测向量为:

$$\mathbf{Z}_1(k)=[\varphi_R \ \theta_R \ r]^T$$

式中: φ_R 为雷达导引头测量的方位角; θ_R 为俯仰角; r 为弹目距离。

建立雷达导引头的观测方程如下:

$$\mathbf{Z}_{1,k}=h_1(\mathbf{X}_k)+\mathbf{V}_{1,k} \quad (3)$$

$$\text{其中 } h_1(\mathbf{X}_k)=\begin{bmatrix} -\arctan\left(\frac{z}{x}\right) \\ \arctan\left(\frac{y}{\sqrt{x^2+z^2}}\right) \\ \sqrt{x^2+y^2+z^2} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{V}_1(k)$ 为 MMW 雷达导引头的测量噪声向量,

$\mathbf{V}_1(k)=\begin{bmatrix} v_\varphi^R & v_\theta^R & v_r^R \end{bmatrix}$,其均值为 0,斜方差阵记为:

$$\mathbf{R}_{1,R}=\begin{bmatrix} \sigma_{\varphi_R}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta_R}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_r^2 \end{bmatrix}$$

当导弹与目标距离很近时,雷达角闪烁噪声会严重影响雷达导引头的跟踪精度。由于角闪烁噪声的存在,雷达传感器系统的测角噪声并非是高斯的,根据参考文献[6],雷达的角闪烁噪声可以看作是一个高发生概率的高斯噪声和一个低发生概率的拉普拉斯噪声混合而成,其概率密度函数可以表示为:

$$f(x)=a_1f_g(x)+a_2f_l(x) \quad (4)$$

$$\text{其中 } f_g(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g}\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_g^2}\right)$$

$$f_l(x)=\frac{1}{2\eta}\exp\left(-\frac{|x|}{\eta}\right) \quad (2\eta^2=\sigma_l^2)$$

式中: a_1 为高斯噪声的发生概率; a_2 为拉普拉斯噪声的发生概率,且 $a_1+a_2=1$ 。

角闪烁噪声的均方根为:

$$\sigma=\frac{kL}{R} \quad (5)$$

式中: k 为比例系数,范围在 0.2~0.35 之间; L 为目标横向尺寸; R 为弹目距离。在仿真中认为, $\sigma_g^2=\sigma^2$, $\sigma_l^2=C\sigma^2$,其中, C 根据情况在 $\{\sqrt{10}, 6.7, 10\}$ 之间选择。

雷达的测角噪声受到角闪烁噪声和雷达接收机

热噪声的影响,可以看作是两部分噪声叠加组成。有:

$$\sigma_{\varphi_k} = \sigma_{\theta_k} = \sigma_{\text{热噪声}} + \sigma \quad (6)$$

通常, 雷达接收机的热噪声可以被看作是零均值的高斯白噪声。由公式(5)可见,随着弹目距离的减小,角闪烁噪声的标准差逐渐增大,因此,当弹目距离较近时, 雷达测角噪声主要受到角闪烁噪声的影响。因此,在仿真中,将主要考虑角闪烁噪声对测角噪声的影响。

1.3 红外导引头测量模型

红外成像导引头的观测数据包括视线方位角和视线俯仰角信号,选择其观测向量为:

$$\mathbf{Z}_2(k) = [\varphi_{\text{IR}} \quad \theta_{\text{IR}}]^T \quad (7)$$

式中: φ_{IR} 为红外导引头测量的方位角; θ_{IR} 为俯仰角。

建立红外成像导引头的观测方程如下:

$$\mathbf{Z}_{2,k} = h_2(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_{2,k} \quad (8)$$

式中: $h_2(\mathbf{X}_k) = \begin{bmatrix} -\arctan\left(\frac{z}{x}\right) \\ \arctan\left(\frac{y}{\sqrt{x^2+z^2}}\right) \end{bmatrix}$

$\mathbf{V}_{2,k}$ 为红外导引头的测量噪声向量,其均值为 0,协方差阵记为 $R_{2,\text{IR}}$:

$$R_{2,\text{IR}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\varphi_{\text{IR}}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta_{\text{IR}}}^2 \end{bmatrix}$$

红外成像导引头的测角误差主要由其质心测量误差引起。由于背景辐射、接收机热噪声等原因,使得探测器上目标的视在质心偏离目标真实成像质心,从而产生了测角噪声。

假设红外成像导引头的瞬时视场是 $2^\circ \times 2^\circ$,即探测器焦平面对红外导引头所张的视场角为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。设红外探测器阵元数为 256×256 ,则每个探测器阵元对红外导引头观测窗所张的角度为:

$$\Delta\varphi_{\text{IR}0} = \frac{2}{256-1} \times \tan(2^\circ/2) \quad (9)$$

$$\Delta\theta_{\text{IR}0} = \frac{2}{256-1} \times \tan(2^\circ/2) \quad (10)$$

由于质心偏移量一般较小(往往只有几个像元),因此,由质心测量误差引起的角度误差可近似表示为:

$$\Delta\varphi_{\text{IR}} = \Delta\varphi_{\text{IR}0} \times \hat{x}_c \quad (11)$$

$$\Delta\theta_{\text{IR}} = \Delta\theta_{\text{IR}0} \times \hat{y}_c \quad (12)$$

式中: \hat{x}_c, \hat{y}_c 分别为探测器两个方向上的质心测量误差。已经证明,红外成像导引头的质心测量误差可模型化为零均值高斯白噪声^[7],设其方差为 σ_{IR}^2 。则有:

$$E[\Delta\varphi_{\text{IR}}] = 0, \sigma_{\varphi_{\text{IR}}}^2 = \sigma_{\text{IR}}^2 \times (\Delta\varphi_{\text{IR}0})^2 \quad (13)$$

$$E[\Delta\theta_{\text{IR}}] = 0, \sigma_{\theta_{\text{IR}}}^2 = \sigma_{\text{IR}}^2 \times (\Delta\theta_{\text{IR}0})^2 \quad (14)$$

可见, 红外成像导引头的测角噪声仍可看作是零均值的高斯白噪声。

2 基于联邦滤波的数据融合算法

联邦滤波器是一种具有两级结构的分散化滤波方法,它由若干个子滤波器和一个主滤波器组成,各个子滤波器独立地进行测量和更新,主滤波器对各个子滤波器的结果进行融合,融合后的结果反馈到各个子滤波器,作为下一个处理周期的初值。理论证明,有反馈的联邦滤波器与集中式融合是等价的^[8],并且相比于集中式滤波结构,基于联邦滤波的分布式融合结构具有更低的运算量,因而具有广泛的应用前景。

2.1 雷达/红外双模导引头融合结构

图 1 为 MMW 雷达/红外双模导引头融合结构。其中,时空基准模块为每个局部滤波器和主滤波器提供相应的时空配准信息,各子滤波器的局部估计

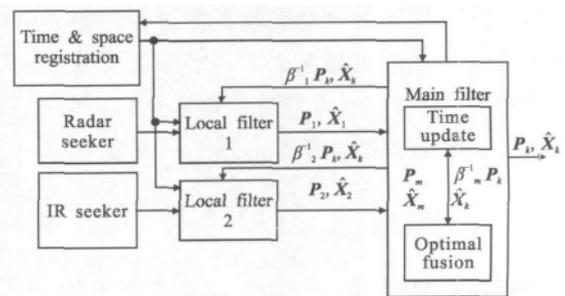


图 1 雷达/红外复合导引头融合结构图

Fig.1 Information fusion chart of radar/IR compound seeker system

值 \hat{X}_i 和协方差阵 P_i 被送到主滤波器中,和主滤波器的估计值 \hat{X}_m 和 P_m 一起进行融合,得到全局最优估计 \hat{X}_k 及协方差阵 P_k ,同时,将 P_k 按照一定的比例在局部滤波器和主滤波器中进行适当的分配后,反馈到子滤波器中,以重置各子滤波器的估计值^[9]。其信息分配原则为:

$$\hat{X}_i = \hat{X}_k, P_i = \beta_i^{-1} P_k \quad (i=1, 2) \quad (15)$$

式中: β_i 是信息分配系数, 且满足

$$\sum_{i=1}^2 \beta_i + \beta_m = 1$$

分配后的信息在各子滤波器中完成时间更新和测量更新后, 送入主滤波器进行融合, 融合算法为:

$$P_k^{-1} = \sum_{i=1}^2 P_{i,k}^{-1} + P_{m,k}^{-1} \quad (16)$$

$$\hat{X}_k = \sum_{i=1}^2 P_k P_{i,k}^{-1} \hat{X}_{i,k} + P_k P_{m,k}^{-1} \hat{X}_{m,k} \quad (17)$$

2.2 MMW 雷达子滤波器设计

由于经典的扩展卡尔曼滤波(EKF)以及无迹卡尔曼滤波(UKF)都是基于对模型线性化处理和测量噪声高斯假设下的, 在非线性和非高斯条件下, 其滤波误差较大, 甚至可能引起滤波发散。而粒子滤波是以随机采样方法来逼近非线性分布, 利用状态空间中的一系列加权随机样本集(粒子)来近似系统状态的后验概率密度函数, 这些样本没有明确的格式, 因此, 可以不受模型线性和噪声高斯假设的约束^[10]。

由于雷达观测方程的非线性以及角闪烁噪声的非高斯特性, 所以采用序贯重要度重采样粒子滤波算法来设计雷达子滤波器。

滤波算法步骤如下。

(1) 初始化粒子, 从已知初始分布 $p(X_0)$ 中采集初始样本集 $\{X_0^i\}, i=1, \dots, N$ 。

(2) 选择密度函数: $q(X_k | X_{k-1}^i, Z_k) = p(X_k | X_{k-1}^i)$, 并对其进行采样, 获得样本集 $\{X_k^i\}, i=1, 2, \dots, N$ 。

(3) 计算权值: $\tilde{\lambda}_k^i = \tilde{\lambda}_k^{i-1} \frac{p(Z_k | X_k^i) p(X_k^i | X_{k-1}^i)}{q(X_k^i | X_{k-1}^i, Z_k)}$ 。

(4) 归一化权值: $\lambda_k^i = \frac{\tilde{\lambda}_k^i}{\sum_{j=1}^N \tilde{\lambda}_k^j}$ 。

(5) 重采样: 用新的采样值 $\{X_k^{j*}\}$ 代替 $\{X_k^j\} (j=1, 2, \dots, N)$, 并更新权值: $\lambda_k^j = 1/N$ 。

(6) 输出 k 时刻雷达子滤波器的状态估计及其估计的协方差阵:

$$\hat{X}_{i,k} = \sum_{j=1}^N \lambda_k^j X_k^{j*} \quad (18)$$

$$P_{1,k} = \sum_{j=1}^N \lambda_k^j (X_k^{j*} - \hat{X}_{1,k})(X_k^{j*} - \hat{X}_{1,k})^T \quad (19)$$

这样, 就得到了雷达子滤波器局部状态估计值 $\hat{X}_{1,k}$ 和相应的协方差阵 $P_{1,k}$ 。

2.3 红外子滤波器设计

由于红外导引头只具有角度信息而没有距离信息, 所以, 由公式(2)和公式(7)组成的红外导引头子系统不能对目标状态进行正确估计, 必须对系统方程进行改造, 文中采用伪线性卡尔曼滤波的方法对红外纯方位跟踪系统进行设计。

根据参考文献[11], 对公式(7)进行伪线性化, 得:

$$Z_{\text{IR},k} = H_k X_k + n_k \quad (20)$$

其中,

$$H_{2,k} = \begin{bmatrix} \sin\varphi & 0 & \cos\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\varphi \sin\theta & -\cos\theta & -\sin\varphi \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$Z_{\text{IR},k} = 0$, n_k 为 k 时刻的有效测量误差, 服从均值为 0, 方差为

$$R_2 = \begin{bmatrix} r_h^2 \sigma_{\varphi_{\text{IR}}}^2 & 0 \\ 0 & r^2 \sigma_{\theta_{\text{IR}}}^2 \end{bmatrix}$$

的高斯分布。其中 $r_h = \sqrt{x_k^2 + z_k^2}$; $r = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}$ 。

滤波算法步骤如下。

(1) 滤波初始化: 给定滤波初值 \hat{X}_0, P_0 。

(2) 预测: $\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} + u a_k$ 。

(3) 计算预测误差阵: $P_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_w$ 。

(4) 计算滤波增益: $K_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_{2,k} P_{k|k-1} H_{2,k}^T + R_2]^{-1}$ 。

(5) 计算滤波误差阵: $P_{2,k} = [I - K_k H_{2,k}] P_{k|k-1}$ 。

(6) 状态值更新: $\hat{X}_{2,k} = X_{k|k-1} - K_k H_{2,k} \hat{X}_{k|k-1}$ 。

这样, 即可得到局部状态估计值 $\hat{X}_{2,k}$ 和相应的协方差阵 $P_{2,k}$ 。

2.4 主滤波器设计

令主滤波器的信息分配系数 $\beta_m = 0$, 则 $P_m^{-1} = 0$, 在主滤波器中不进行滤波运算, 只对各子滤波器的信息进行综合, 即取主滤波器的估计值为:

$$P_k^{-1} = \sum_{i=1}^2 P_{i,k}^{-1}, \hat{X}_k = \sum_{i=1}^2 P_k P_{i,k}^{-1} \hat{X}_{i,k} \quad (21)$$

根据信息分配原则, 将全局估计 \hat{X}_k 及其协方差

阵反馈到雷达和红外子滤波器中,重置它们的估计值,以构成整个系统的滤波循环,即:

$$\hat{X}_{i,k} = \hat{X}_k \quad (22)$$

$$P_{i,k} = \beta_i^{-1} P_k \quad (23)$$

$$Q_{i,k} = \beta_i^{-1} Q_k \quad (24)$$

3 仿真分析

设目标做蛇形机动,在地面坐标系下,目标的初始位置在 (15 000, 8 000, -8 000), 初始速度为 (200, -50), 初始加速度为 (0, 5, 0), 加速度随时间在 y 方向按蛇形机动规律变化, 目标初始状态噪声方差 $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma_z^2 = 0.1 \times 10^{-4}$ 。导弹初始位置在 (0, 0, 0), 速度大小为 340 m/s, 导弹初始速度方向沿弹目视线方向指向目标。采用比例导引制导方式, 比例系数 $N=4$ 。MMW 雷达导引头初始距离测量噪声的标准差为 25 m, 测角噪声为角闪烁噪声, 取初始均方根值 $\sigma = 0.0002 \text{ rad}$, $\sigma_g = \sigma$, $\sigma_1 = \sqrt{10} \sigma$ 。目标横向尺寸 $L=15 \text{ m}$, 比例系数 $k=0.3$, $\alpha_2=0.05$, 采样粒子数为 $N=150$; 红外导引头质心测量误差的方差为 $\sigma_{\text{IR}}^2 = 0.5$ 。假设两传感器的原点重合, 且数据已经完成了时空配准, 根据所设计的融合模型, 进行 100 次蒙特卡罗仿真。

图 2 为地面坐标系下,弹目相对运动轨迹图,由图可见,所设计的跟踪算法能够实现对机动目标的良好跟踪。图 3~图 5 为采用文中的双模融合算法与采用单模导引头对目标跟踪时,在 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上的位置误差。从图中可以看出,文中的双模融合算法能够显著提高目标跟踪的精度。由于红外导引头属于纯角度跟踪,因此,其跟踪的滤波稳定性

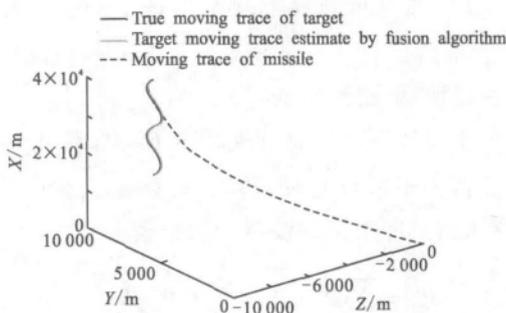


图 2 弹目相对运动轨迹

Fig.2 Moving trace of missile and target

差,随着仿真时间的增加,红外导引头系统会出现一定程度的滤波发散,采用双模复合制导可以有效地克服红外单模系统的滤波发散现象,增加了系统的稳定性。

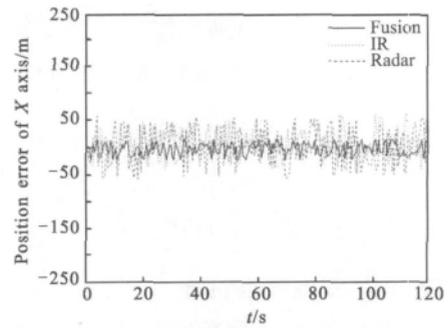


图 3 单/双模 X 轴位置跟踪误差比较

Fig.3 Comparison of X axis position error by using single mode data processing system/dual-mode data fusion system

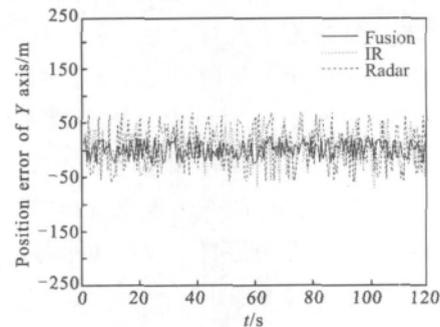


图 4 单/双模 Y 轴位置跟踪误差比较

Fig.4 Comparison of Y axis position error by using single mode data processing system/dual-mode data fusion system

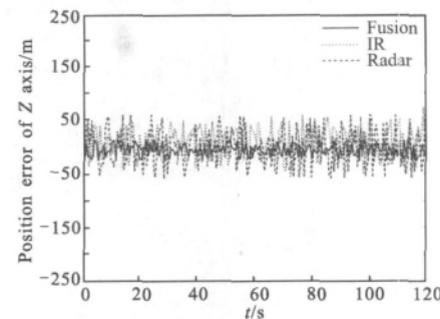


图 5 单/双模 Z 轴位置跟踪误差比较

Fig.5 Comparison of Z axis position error by using single mode data processing system/dual-mode data fusion system

将雷达子滤波器改为使用传统的 EKF 滤波算法,并与文中的 PF-联邦滤波算法进行对比,图 6~图 8 为两种融合算法位置估计误差仿真图。从仿真

结果中可以看出,采用 PF-联邦滤波算法的估计精度要比采用 EKF-联邦滤波算法的估计精度高。同时,随着导弹和目标距离的接近,目标角闪烁噪声增大,导致基于 EKF 的联邦滤波算法估计误差变大,而文中所设计的 PF-联邦滤波算法却能够保持稳定的滤波精度,使估计误差始终保持在一个稳定的范围内。但是,应当指出,较之 EKF-联邦滤波算法而言,由于引入了粒子滤波,PF-联邦滤波算法的计算量有所增

加,使得系统实时性变差。

4 结论

文中从毫米波雷达/红外双模导引头系统的特点以及工程应用出发,将粒子滤波应用于联邦滤波结构中,建立了一种分布式 MMW 雷达/红外双模导引头信息融合算法。最后,采用该算法对典型战情条件下的雷达/红外探测信息进行了融合。仿真结果表明,文中设计的信息融合算法能够有效地提高武器系统的目标跟踪精度,并且能够有效克服因模型非线性和噪声非高斯所引起的滤波发散现象,提高了系统的稳定性和抗干扰能力,具有较大的工程应用价值。

在文中的算法中,由于引入了粒子滤波,使得算法计算量增大,因此,下一步工作的重点是研究降低该算法复杂度的方法,以满足实际系统实时性的要求。

参考文献:

- [1] Wang Fei, Lei Humin. Optimum fusion algorithm for tracking based on IR/MMW dual-sensor guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 250-254. (in Chinese)
王飞, 雷虎民. 红外/毫米波雷达双模制导跟踪融合算法的优化[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 250-254.
- [2] Wang Luping, Li Biao, Hu Minlu. Target tracking algorithm based on the data fusion of multi-sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 194-197. (in Chinese)
王鲁平, 李彪, 胡敏露. 一种基于多传感器数据融合的目标跟踪算法[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(2): 194-197.
- [3] Pan Bo, Feng Jinfu, Li Qian, et al. Tracking algorithm for MMW/IR multi-sensors-fusion[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(3): 230-235. (in Chinese)
潘勃, 冯金富, 李骞, 等. 毫米波/红外多传感器融合跟踪算法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(3): 230-235.
- [4] Carlson N A. Federated square filter for decentralized parallel processes [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electric*, 1990, 26(3): 517-524.
- [5] Zhou Hongren, Jing Zhongliang, Wang Peide. Maneuver Target Tracking [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991: 134-153. (in Chinese)
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: 134-153.
- [6] Wu Wengrong. Target tracking with glint noise [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(1): 174-185.

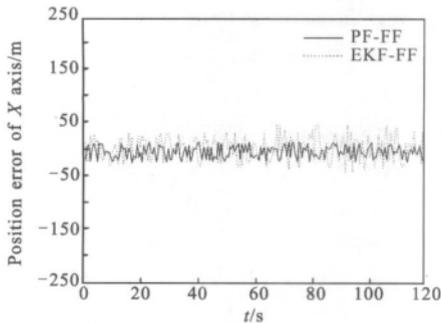


图6 两种融合算法 X 轴位置跟踪误差比较

Fig.6 Comparison of X axis position error by using EKF-federated filtering algorithm/PF-federated filtering algorithm

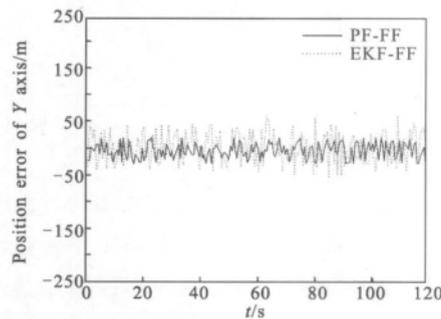


图7 两种融合算法 Y 轴位置跟踪误差比较

Fig.7 Comparison of Y axis position error by using EKF-federated filtering algorithm/PF-federated filtering algorithm

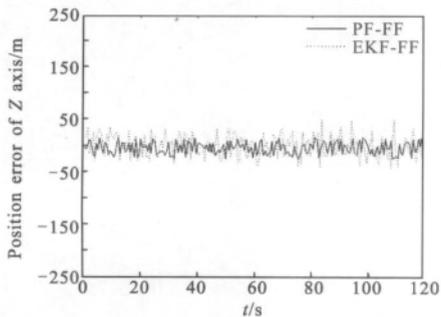


图8 两种融合算法 Z 轴位置跟踪误差比较

Fig.8 Comparison of Z axis position error by using EKF-federated filtering algorithm/PF-federated filtering algorithm

- [7] He You, Wang Guohong, Lu Dajin, et al. Multisensor information fusion with applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 212-249. (in Chinese)
何友, 王国宏, 陆大金, 等. 多传感器信息融合及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 212-249.
- [8] Han Chongzhao, Zhu Hongyan, Duan Zhansheng. Multi-Source Information Fusion [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 262-286. (in Chinese)
韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 262-286.
- [9] Zhu Hong, Guan Yong, Guan Guixia. Information fusion of GPS/DR integrated navigation based on federal filter [J]. *Microcomputer Information*, 2008, 21(4-1): 233-234. (in Chinese)
朱虹, 关永, 关桂霞. 基于联邦滤波的 GPS/DR 组合导航信息融合 [J]. 微计算机信息, 2008, 21(4-1): 233-234.
- [10] Li Shaojun, Zhu Zhenfu. Track-before-detect algorithm via particle filtering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 352-357. (in Chinese)
李少军, 朱振福. 采用粒子滤波的先跟踪后检测算法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 352-357.
- [11] Xin Yunhong, Yang Wanhai. Pseudo-linear kalman filter with application to the passive tracking of multi-stations IRSTs [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, 24(5): 374-377. (in Chinese)
辛云宏, 杨万海. 基于伪线性卡尔曼滤波的多站 IRTS 系统跟踪技术 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(5): 374-377.

下期预览

高超声速激波辐射对红外成像系统的影响分析

杜磊¹, 赵剡¹, 安永泉^{1,2}, 吴发林¹

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 带有红外成像探测系统的飞行器在大气层内高速飞行时, 其光学窗口外高温激波流场的热辐射将降低成像探测的信噪比和探测距离。首先根据近场辐射成像光路的几何关系推导了焦平面上单元像素接收的流场辐射功率和流场向其与窗口界面外发射的辐射亮度的函数关系, 然后采用箱带模型描述了流场的辐射机制, 并求解出辐射传递方程以计算该辐射亮度。计算了探测器上的流场辐射功率分布和目标的辐射成像结果。计算结果表明: 激波流场为光学薄介质, 其对目标辐射的吸收可以忽略; 成像系统接收的流场辐射能量为非均匀背景噪声; 当高度不变、马赫数增大时, 该能量将增大, 信噪比将减小; 当马赫数不变、高度增大时, 该能量将减小, 信噪比将增大。