

# 基于概率假设密度滤波的中段弹道目标群 红外多传感器组跟踪方法

林两魁<sup>1,2</sup> 徐 晖<sup>1</sup> 龙云利<sup>1</sup> 安 玮<sup>1</sup> 谢 恺<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073  
<sup>2</sup>中国人民解放军 94810 部队, 江苏 南京 210007  
<sup>3</sup>炮兵学院军用光电工程教研室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 分析低轨光学星座对中段弹道目标群进行组跟踪的必要性, 提出了一种红外多传感器对中段弹道目标群的组跟踪新方法。该方法以概率假设密度滤波对目标群进行像平面跟踪, 剔除杂波、估计目标状态和个数; 以图像配准方法调整帧间目标状态估计, 提高像平面目标跟踪稳定性; 最后依据像平面目标跟踪结果提取目标群在像平面的质心量测, 运用不敏卡尔曼滤波(UKF)以多传感器序贯滤波方式对目标群进行融合质心组跟踪。结果表明, 新方法适应杂波能力强, 对目标群的质心组跟踪精度优于传统方法, 且有效实现中段弹道目标群的星载红外像平面稳定跟踪。

**关键词** 组跟踪; 概率假设密度; 红外多传感器; 目标群

中图分类号 TN976 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0228002

## An Algorithm of Cluster Tracking for Midcourse Ballistic Object Group by Infrared Multi-Sensor Based on Probability Hypothesis Density Filtering

Lin Liangkui<sup>1,2</sup> Xu Hui<sup>1</sup> Long Yunli<sup>1</sup> An Wei<sup>1</sup> Xie Kai<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup>94810<sup>th</sup> Unit of People's Liberation Army, Nanjing, Jiangsu 210007, China

<sup>3</sup>Military Photo-Electricity Engineering T&R Section, Artillery Academy of People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** The essentiality of cluster tracking for midcourse ballistic target group by low earth orbit(LEO) optical constellation is analyzed. And an improved method of cluster tracking is presented. The probability hypothesis density filter is used to track multi-target on the focal plane, filter out clutter, and estimate target number and state. Then for improving the stability of focal plane target tracking, an image registration method is adopted to adjust interframes target state estimation. Finally, the focal plane 2D centroid measurement of target group is computed based on the focal plane tracking results, and unscented Kalman filter(UKF) is adopted to track the 3D centroid of target group through multi-sensor fusion in sequence. Simulation results show that, the proposed method works well under different clutter rates, and gains a better precision than the traditional one. Meanwhile, it successfully realizes the tracking of each target on the space-based infrared focal plane.

**Key words** cluster tracking; probability hypothesis density; infrared multi-sensor; target group

**OCIS codes** 280.4991; 100.4999; 110.3080

收稿日期: 2010-06-23; 收到修改稿日期: 2010-09-26

基金项目: 中国博士后科学基金(20080430223, 200801493), 武器装备预研基金(9140A21041110KG0148)和安徽省自然科学基金(090412043)资助课题。

作者简介: 林两魁(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事空间光电对抗和多目标跟踪等方面的研究。

E-mail: kk2buaa@163.com

导师简介: 徐 晖(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事空间信息对抗和综合电子战等方面的研究。

E-mail: simo863@vip.sina.com

# 1 引 言

跟踪监视中段弹道目标是弹道导弹防御的重要环节。天基红外星座通过星载传感器组网,能对弹道目标进行全程连续跟踪,是未来弹道导弹防御系统的重要子系统<sup>[1~5]</sup>。然而,弹道目标进行中段飞行时将释放大量伴飞诱饵,构成密集的中段弹道目标群,对天基红外系统的目标跟踪监视提出了挑战<sup>[6~10]</sup>。

组跟踪(cluster/group tracking)已成为天基红外系统跟踪目标群的重要手段<sup>[5~7,9~12]</sup>。组跟踪方法将中段弹道目标群视为一个整体,对群质心和外形进行跟踪,以支持系统的态势感知和传感器调度,将目标群始终置于传感器视场范围内<sup>[11,12]</sup>。文献<sup>[11,12]</sup>总结了组跟踪方法的基本思路;文献<sup>[5,6]</sup>将中段弹道目标群建模为以弹道飞行的椭球,对群质心和形状进行跟踪,但均未考虑杂波对目标群组跟踪所带来的影响:杂波将造成星载红外传感器对目标群质心量测的较大偏差,严重时将导致质心组跟踪滤波器发散<sup>[12]</sup>,从而降低整个信息处理系统的性能。

天基红外信息处理系统在对目标群组跟踪的基础上进行像平面的多目标跟踪处理。传统多目标方法如多假设跟踪(MHT)<sup>[11]</sup>和多帧分配(MFA)<sup>[9]</sup>法,由于其固有的对密集多目标轨迹起始和关联的指数级运算负担而较难适用于目标群像平面跟踪<sup>[9]</sup>;近年来,Mahler<sup>[13,14]</sup>提出的基于随机有限集贝叶斯滤波理论为多目标跟踪研究开辟新领域,通过递推多目标状态集的一阶矩,即概率假设密度(PHD)可有效剔除杂波、估计目标的个数和状态,且其计算量仅与目标个数成正比关系,切合中段弹道目标群的星载红外像平面跟踪应用。显然,直接利用目标群像平面跟踪结果可提取出更为准确的像平面群质心量测,将其回馈到组跟踪中可望提高组跟踪性能;然而,由于像平面多目标跟踪要求传感器帧间视线指向具备强的一致性,而组跟踪又不可避免将产生不稳定的群质心视线指向<sup>[6,7]</sup>,为此引入图像配准方法,将当前成像帧与相同传感器前一采样时刻成像帧进行配准,以调整目标帧间状态估计、提高像平面目标轨迹的平滑性从而提高像平面目标跟踪稳定性。

本文基于文献<sup>[5,6]</sup>提出的中段弹道目标群红外多传感器组跟踪框架,引入概率假设密度滤波实现对目标群的红外像平面跟踪,通过对传感器帧间图像进行配准、进而调整目标帧间状态估计以提高

像平面目标跟踪稳定性为纽带,将两种不同信息处理手段结合在一起,提出基于概率假设密度滤波目标群像平面跟踪信息回馈的中段弹道目标群红外多传感器组跟踪新方法。

## 2 跟踪模型

### 2.1 中段弹道目标群的质心组跟踪模型

记  $\mathbf{X}^c = [x^c \ y^c \ z^c \ v_x^c \ v_y^c \ v_z^c]^T$  为目标群质心在地心惯性(ECI)坐标下的状态向量(包括位置和速度),考虑 J2 摄动可对弹道目标运动进行准确建模,其运动模型具体参考文献<sup>[15,16]</sup>,简记为

$$\mathbf{X}_k^c = f(\mathbf{X}_{k-1}^c) + \mathbf{W}^c, \quad (1)$$

式中  $f$  为非线性状态转移函数, $k$  为时间标签; $\mathbf{W}^c$  是模型误差,其误差协方差阵记为  $\mathbf{Q}^c$ 。

星座通过星载红外传感器探测捕获目标,获得目标相对于卫星平台的角度信息  $\mathbf{Z} = [a z \ e l]^T$  (方位角  $a z$ , 俯仰角  $e l$ ),依据几何关系可建立量测模型,简记为

$$\mathbf{Z}_k^i = h(\mathbf{X}_k^i) + \mathbf{V}, \quad i = 1, \dots, N_k \quad (2)$$

式中  $\mathbf{X}_k^i$  为目标  $i$  的状态, $\mathbf{Z}_k^i$  为传感器对目标  $i$  的量测, $h$  为非线性量测函数, $\mathbf{V}$  为量测误差, $N_k$  为  $k$  时刻目标总数。而目标群质心量测则为各个目标量测的非加权平均值<sup>[5,6]</sup>,即

$$\mathbf{Z}_k^c = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{Z}_k^i. \quad (3)$$

### 2.2 中段弹道目标群的星载红外像平面跟踪模型

记  $\mathbf{x}_k = [x_k \ y_k \ v x_k \ v y_k]^T$  为目标在像平面的状态(位置和速度), $\mathbf{z}_k$  为像平面的量测,则目标像平面运动方程和量测方程分别表示如下:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k, \quad (4)$$

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (5)$$

式中  $T$  为传感器量测周期, $\mathbf{w}_k$  和  $\mathbf{v}_k$  分别为过程噪声和量测噪声,均服从零均值高斯分布,且互不相关,对应的过程噪声协方差阵和量测噪声协方差阵分别记为  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$ 。

星载红外像平面的原始图像  $\mathbf{I}^{\text{pa}}$ ,除了目标群还包括视场内恒星、空间驻留物和传感器噪声等。对原始图像进行像平面信号处理提取特征数据<sup>[17]</sup>,作为像平面目标跟踪滤波器的量测数据( $\mathbf{z}_k^i, \mathbf{R}_k^i$ ) $_{i=1}^{M_k}$ , $\mathbf{z}_k^i$  和  $\mathbf{R}_k^i$  分别为第  $i$  个量测的位置和误差协方差阵, $M_k$

为  $k$  时刻的量测总数。

### 3 中段弹道目标群的红外多传感器组跟踪方法及流程

依次描述中段弹道目标群的红外多传感器融合质心组跟踪方法、基于 PHD 滤波的目标群星截红外像平面跟踪方法和基于帧间图像配准的目标状态估计调整方法,给出中段弹道目标群红外多传感器质心组跟踪新方法的详细流程。

#### 3.1 目标群红外多传感器质心组跟踪

将目标群视为一个整体,对其质心进行跟踪,本质上与跟踪单个目标的方法一致,关键在于目标群质心量测的提取,其中杂波是影响质心量测的主要因素。对目标群质心的跟踪滤波分为群质心状态预测、群质心量测提取和群质心状态更新三个部分。由于不敏卡尔曼滤波(UKF)<sup>[18]</sup>比扩展卡尔曼滤波(EKF)<sup>[11]</sup>更具优势(无须求解雅克比矩阵,非线性近似更优且计算量在同一个数量级)<sup>[16]</sup>,并考虑到实际中星座不同传感器采样时间的不同步,故本文采用 UKF 以多传感器序贯融合滤波方式对目标群质心进行组跟踪滤波。

假设  $k$  时刻目标群质心状态估计为  $\hat{\mathbf{X}}_{k|k}^c$ , 误差协方差阵为  $\mathbf{P}_{k|k}^c$ ; 滤波估计  $(k+1)$  时刻群质心状态  $\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}^c$ , 相应协方差阵为  $\mathbf{P}_{k+1|k+1}^c$ 。  $\mathbf{S}_k^c$  为归一化残差协方差阵<sup>[5,6,12]</sup>, 用于判定  $k$  时刻的量测是否来源于目标群。基于 UKF 的多传感器融合目标群质心跟踪单次递推步骤如下。

##### 1) 状态预测

计算目标状态样本点

$$\boldsymbol{\chi}_{k|k}^{(i)} = \begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k|k}^c, & i = 0 \\ \hat{\mathbf{X}}_{k|k}^c + [\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{k|k}^c}]_i, & i = 1, \dots, n \\ \hat{\mathbf{X}}_{k|k}^c - [\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{k|k}^c}]_i, & i = n+1, \dots, 2n \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\lambda$  为缩放系数, 群质心状态为六维向量即  $n=6$ , 则样本点总数为 13。

计算样本点通过(1)式对状态的单步预测, 即

$$\boldsymbol{\chi}_{k+1|k}^{(i)} = f[\boldsymbol{\chi}_{k|k}^{(i)}], \quad i = 0, 1, \dots, 2n, \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^c = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \boldsymbol{\chi}_{k+1|k}^{(i)}, \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k}^c = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\boldsymbol{\chi}_{k+1|k}^{(i)} - \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^c] \times [\boldsymbol{\chi}_{k+1|k}^{(i)} - \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^c]^T + \mathbf{Q}^c, \quad (9)$$

式中  $W_i^{(m)}$ ,  $W_i^{(c)}$  分别为计算目标状态一阶、二阶统

计特性的权系数。

同时, 以线性扩散对目标群在像平面上的整体运动建模<sup>[6,7]</sup>,

$$\mathbf{S}_{k+1|k+1-T}^G = \alpha_{\text{cluster}} \mathbf{S}_{k+1-T|k+1-T}^G, \quad (10)$$

式中的  $\alpha_{\text{cluster}}$  为扩散系数, 一般在 1~2 之间取值。

##### 2) 质心量测提取

目标群质心量测的计算见(3)式, 其关键在于判定哪些量测来自真实目标。文献[6,7]通过设定群门限来判定哪些量测来自目标群的目标, 即<sup>[5,6]</sup>

$$(\mathbf{z}_{k+1}^i - \mathbf{z}_{\text{Ipa}}^c) \mathbf{S}_{k+1|k+1-T}^G (\mathbf{z}_{k+1}^i - \mathbf{z}_{\text{Ipa}}^c) < d_{\text{max}}^2, \quad i = 1, \dots, M_{k+1}, \quad (11)$$

式中  $\mathbf{z}_{k+1}^i$  为像平面  $(k+1)$  时刻第  $i$  个量测, 共  $M_{k+1}$  个量测;  $\mathbf{z}_{\text{Ipa}}^c$  则为像平面中心,  $d_{\text{max}}$  为指定的门限值。但文献[5,6]均没有考虑到杂波的影响。本文引入目标群的红外像平面跟踪处理, 剔除杂波, 估计目标个数  $\hat{N}_{k+1}$  和目标在像平面的状态  $(\mathbf{x}_{k+1}^i)_{i=1}^{\hat{N}_{k+1}}$ ; 以  $(\mathbf{x}_{k+1}^i)_{i=1}^{\hat{N}_{k+1}}$  中的位置估计替代  $(\mathbf{z}_{k+1}^i)_{i=1}^{M_{k+1}}$  并运用(11)式可获得更为准确的目标群像平面质心量测  $\mathbf{z}_{k+1}^c$ , 并进而转换为传感器对群质心的仅测角量测  $\mathbf{Z}_{k+1}$ 。

##### 3) 状态更新

###### ① 计算目标状态样本点

$$\boldsymbol{\chi}_{k+1}^{(i)} = \begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^c, & i = 0 \\ \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^c + [\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{k+1|k}^c}]_i, & i = 1, \dots, n \\ \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^c - [\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{k+1|k}^c}]_i, & i = n+1, \dots, 2n \end{cases}, \quad (12)$$

###### ② 计算量测的单步预测

$$\boldsymbol{\zeta}_{k+1}^{(i)} = h[\boldsymbol{\chi}_{k+1}^{(i)}], \quad i = 0, 1, \dots, 2n, \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^c = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \boldsymbol{\zeta}_{k+1}^{(i)}, \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{\mathbf{Z}_{k+1|k}}^c = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\boldsymbol{\zeta}_{k+1}^{(i)} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^c] \times [\boldsymbol{\zeta}_{k+1}^{(i)} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^c]^T + \mathbf{R}^c, \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{\mathbf{X}_{k+1|k}^c \mathbf{Z}_{k+1|k}^c} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\boldsymbol{\chi}_{k+1}^{(i)} - \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^c] [\boldsymbol{\zeta}_{k+1}^{(i)} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^c]^T, \quad (16)$$

③ 利用  $(k+1)$  时刻采样的传感器量测对目标群质心状态进行更新

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{\mathbf{X}_{k+1|k}^c \mathbf{Z}_{k+1|k}^c} \mathbf{P}_{\mathbf{Z}_{k+1|k}^c}^{-1}, \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1}^c = \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}^c + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1}^c - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1|k}^c), \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1}^c = \mathbf{P}_{k+1|k}^c - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{P}_{\mathbf{Z}_{k+1|k}^c}^{-1} (\mathbf{K}_{k+1})^T. \quad (19)$$

④ 依据(11)式中过门限的目标像平面状态估

计,更新  $S_{k+1|k+1}^G$ , 具体参考文献[6,7]。

### 3.2 基于概率假设密度滤波的目标群星载红外像平面跟踪

Mahler<sup>[13,14]</sup>提出的基于随机有限集 PHD 滤波是多目标贝叶斯滤波的次优方法。Ba-Ngu Vo<sup>[19]</sup>成功应用粒子滤波方法实现了 PHD 滤波,随之 PHD 滤波方法开始被广泛应用于多目标跟踪领域。

概率假设密度滤波的单次递推包括预测和更新两部分。分别记  $D_{k|k-1}(x), D_{k|k}(x)$  为  $(k-1)$  时刻预测和  $k$  时刻更新的概率假设密度,则概率假设密度滤波的单次递推表达式如下<sup>[19]</sup>:

$$D_{k|k-1}(x) = \int \phi_{k|k-1}(x, \xi) D_{k-1|k-1}(\xi) d\xi + \gamma_k(x), \quad (20)$$

$$D_{k|k}(x) = \left[ v(x) + \sum_{z \in Z_k} \frac{\psi_{k,z}(x)}{\kappa_k(z) + \langle \psi_{k,z}, D_{k|k-1} \rangle} \right] D_{k|k-1}(x), \quad (21)$$

式中  $\phi_{k|k-1}(x, \xi) = e_{k|k-1}(\xi) f_{k|k-1}(x | \xi) + \beta_{k|k-1}(x | \xi)$ ,  $\psi_{k,z}(x) = p_D(x) g_k(z | x)$ ,  $\kappa_k(z) = \lambda_k c_k(z)$ ,  $v(x) = 1 - p_D(x)$ ,  $\langle f, g \rangle = \int f(x) g(x) dx$ ,  $\gamma_k$  为新生成目标的 PHD,  $e_{k|k-1}(\xi)$  是目标存活概率;  $f_{k|k-1}(\cdot | \cdot)$  为单目标状态转移分布,由(4)式确定;  $\beta_{k|k-1}(\cdot | \xi)$  为子目标的 PHD;  $p_D(x)$  为目标检测概率;  $g_k(\cdot | \cdot)$  是似然函数;  $\lambda_k$  则为泊松(Poisson)杂波模型的平均杂波个数,  $c_k$  为杂波密度。

采用文献[19]的粒子 PHD 滤波实现对目标群的像平面跟踪,得到  $k$  时刻的描述目标状态集 PHD 的粒子集  $[\mathbf{x}_k^{(i)}, \omega_k^{(i)}]_{i=1}^{L_k}$ ,  $\mathbf{x}_k^{(i)}, \omega_k^{(i)}$  分别表示  $k$  时刻第  $i$  个粒子及其权值,  $L_k$  则为粒子总数;对粒子集进行聚类,即可获得目标的像平面状态估计  $(\mathbf{x}_k^i)_{i=1}^{\hat{N}_k}$ 。本文引入 PHD 滤波方法应用于目标群的星载红外像平面跟踪,既满足了系统分布式信息处理的需要,又可滤除像平面上的大量杂波,为组跟踪提供准确的像平面群质心量测。

### 3.3 帧间图像配准方法

星载红外传感器对目标群的质心组跟踪不可避免出现误差,导致传感器视线指向在相邻成像帧内不能指向对应位置<sup>[7]</sup>,故目标群在像平面的投影轨迹呈现不连续性,使得目标群的像平面跟踪结果不稳定,必须采取措施抑制这种帧间目标运动的非平滑性。鉴于目标群的数目多,且目标在帧间成像周期内由于扩散引起的移动距离短、在像平面近似不

动,可采用帧间图像配准方法<sup>[20~22]</sup>,对过门限图像(降低噪声影响)进行配准,得出两帧图像的二维配准偏移,利用配准结果调整相同传感器前一采样时刻的目标估计,从而既解决了目标群像平面帧间运动的平滑性问题,又可避免对当前图像进行处理而破坏群质心组跟踪的稳定性。

根据星载红外传感器的成像特点,仅考虑帧间图像的二维平移配准。图像配准采用文献[20]图像配准方法,该方法为基于非线性优化和离散傅里叶变换的高效配准算法,配准精度达到子像素精度且运算快速、占用内存少,具体内容可参考文献[20]。假设对相同传感器在相邻时刻  $(k-1), k$  的采样图像进行配准,在帧间两幅过门限图像配准时,首先利用  $(k-1)$  时刻像平面目标跟踪结果提取出来源于目标估计的量测,并对这些量测进行(11)式的过门限处理剔除门限外量测点重构过门限图像,并将重构图像与  $k$  时刻成像帧过门限图像进行配准,从而最大限度降低噪声和杂波对配准的影响,提高配准的稳定性和有效性。

记  $(\mathbf{x}_{k-1}^i)_{i=1}^{\hat{N}_{k-1}}$  为  $(k-1)$  时刻的目标像平面状态估计,将  $k$  时刻的过门限图像与  $(k-1)$  时刻重组的过门限图像进行配准,得到帧间目标状态偏差  $\Delta \mathbf{x}_{k-1} = [\Delta \mathbf{x}_{k-1}^{\text{row}} \quad \Delta \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{\text{col}} \quad 0 \quad 0]^T$ ,  $\Delta \mathbf{x}_{k-1}^{\text{row}}$  和  $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{\text{col}}$  分别为两幅图像配准的行与列的偏置,则在当前时刻目标群像平面跟踪之前,对  $(k-1)$  时刻的目标像平面状态估计进行调整,

$$\mathbf{x}_{k-1}^i = \mathbf{x}_{k-1}^i + \Delta \mathbf{x}_{k-1}, \quad i = 1, \dots, \hat{N}_{k-1}. \quad (22)$$

在第4节的仿真中,将  $0 \sim (k-1)$  时刻的来自同一传感器的目标估计状态集进行同步调整,以获得经图像配准后目标轨迹平滑性的直观显示。

### 3.4 中段弹道目标群的红外多传感器质心组跟踪方法流程

不妨假定以两个星载红外传感器  $S_1$  和  $S_2$  对目标群进行探测跟踪,传感器采样周期  $T$ ,两个传感器的采样时间错开  $T/2$ ;以多传感器序贯融合方式执行目标群的质心组跟踪。假定  $(t-T/2)$  时刻  $S_1$  对目标群质心的滤波状态估计为  $[\hat{\mathbf{X}}_{t-(T/2)|t-T/2}^c, \mathbf{P}_{t-(T/2)|t-T/2}^c]$ , 则传感器  $S_2$  在  $t$  时刻对目标群进行探测成像,对该时刻的目标群质心组跟踪新方法的流程如图1所示。

首先将  $S_2$  传感器视线指向群质心的预测位置  $\hat{\mathbf{X}}_{t-T/2}^c$ , 进行探测成像<sup>[10,17]</sup>;原始图像  $\mathbf{I}_t^{\text{pa}}$  经像平面信号处理得到过门限图像  $\mathbf{I}_t^{\text{det}}$  和量测  $(z_t^i, R_t^i)_{i=1}^M$ ;将  $\mathbf{I}_t^{\text{det}}$  和  $S_2$  在  $(t-T)$  时刻的过门限图像  $\mathbf{I}_{t-T}^{\text{det}}$  进行配

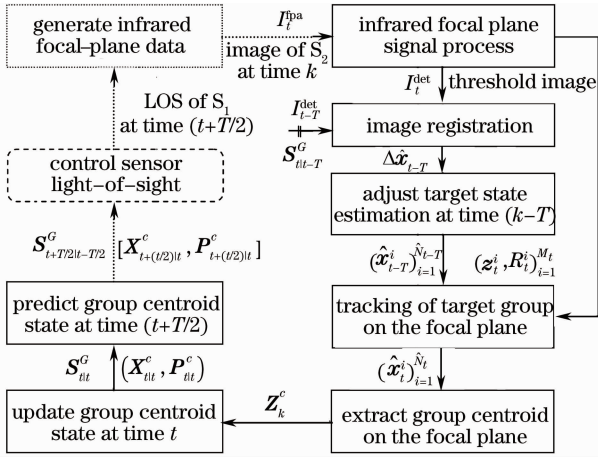


图1 跟踪方法流程图

Fig. 1 Flow chart of the tracking method

准,利用配准结果  $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{t-T}$  调整  $(t-T)$  时刻的目标像平面估计  $(\hat{\mathbf{x}}_{t-T}^i)_{i=1}^{N_{t-T}}$ ; 然后执行基于 PHD 的目标群像平面跟踪,提取出目标群在  $S_2$  的群质心量测  $\mathbf{Z}_t$ ; 最后启动群质心跟踪滤波流程进行质心的  $t$  时刻状态更新和  $(t+T/2)$  时刻状态预测,最终控制  $S_1$  传感器的视线指向以接续跟踪目标群,进入下一时刻的跟踪流程。

## 4 仿真结果

### 4.1 仿真场景与参数

低轨光学星座采用文献[23]星座参数: T/P/F/h/i 为 28/4/2/1596km/77.8°; 星载红外像平面大小  $128 \times 128^{[3]}$ ; 弹道目标进入中段后以不同的相对速度同时释放弹头及大量诱饵,目标总数 20,信噪比在 10~20 之间取值。取星座第二轨道面第三颗星“STSS-23”和第三轨道面第二颗星“STSS-32”对目标群进行质心组跟踪,其星载红外传感器分别记为  $S_1, S_2$ 。跟踪时长 900 s,传感器采样周期  $T$  取 10 s,不同传感器采样时间间隔 5 s。仿真场景如图 2 所示。

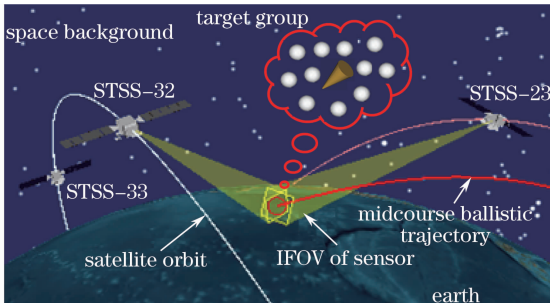


图2 仿真场景示意图

Fig. 2 Simulation scenario

取文献[6]为对比方法,记为  $M_1$  方法,本文方法记为  $M_2$  方法。质心状态起始估计的误差协方差阵  $\mathbf{P}_0 = \text{diag}[1.5 \times 10^3 \quad 1.5 \times 10^3 \quad 1.5 \times 10^3 \quad 10 \quad 10 \quad 10]$ ,而目标群质心跟踪的过程噪声协方差阵  $\mathbf{Q}^c$  和量测误差协方差阵  $\mathbf{R}^c$  取值分别如下:

$$\mathbf{Q}^c = \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1 \quad 0.01 \quad 0.01 \quad 0.01],$$

$$\mathbf{R}^c = \text{diag}[\sigma_{\text{los}}^2 / \cos^2(\epsilon l) \quad \sigma_{\text{los}}^2].$$

各协方差阵中,位置单位 m,速度单位 m/s;  $\sigma_{\text{los}}$  为视线误差,取值  $30 \mu\text{rad}$ 。(10)式的扩散系数  $\alpha_{\text{cluster}}$  设为 1.1,群门限  $d_{\text{max}}$  取为 3。PHD 滤波采取与目标个数成正比的粒子数策略,每个目标分配 500 个粒子,新生成粒子数为 2000;为适应对具有不同像平面运动速度的目标进行跟踪,实际应用中(4)式的传感器周期  $T$  取为 1 s,同时提高过程噪声矩阵大小,取  $\mathbf{Q} = \text{diag}[1.25 \quad 1.25 \quad 0.09 \quad 0.09]$ ,位置单位为 pixel,速度单位为 pixel/s。

### 4.2 仿真结果

设置不同的杂波密度,  $\lambda_1 = 0.0005$  和  $\lambda_2 = 0.0025$ ,即平均每帧有 8 个和 41 个杂波点。对两种方法分别进行 50 次蒙特-卡罗(Monte-Carlo)仿真。

图 3 给出不同方法对目标群质心组跟踪的 Monte-Carlo 统计结果,评价指标为群质心状态估计的均方根误差(RMSE)。

由图 3 可以看出,在前 200 s 时间内,两种方法跟踪精度基本一致,这是由于在该时间段内目标群各目标距离近而难以分辨,群目标在像平面上的量测波门小,杂波对跟踪性能的影响相对较小;在 200 s 后,由于目标群各目标逐渐扩散,群目标量测波门逐渐变大,杂波成为影响目标群质心跟踪的主要因素,此时在不同杂波条件下,  $M_2$  方法的群质心跟踪精度均优于  $M_1$  方法。同时可以看出,  $M_1$  方法对杂波敏感,在高杂波密度条件下出现了发散趋势;而  $M_2$  方法对杂波适应性强,在两种不同杂波条件下,  $M_2$  方法的跟踪精度趋于一致,始终保持好的稳定性,这是由于本文方法采用了像平面的目标跟踪滤波结果,大大抑制杂波影响,获得更为准确的群质心像平面量测。

稳定的目标像平面跟踪对天基红外信息处理系统的性能至为重要。下面给出  $M_2$  方法中的像平面跟踪结果。图 4 为仿真单次运行时  $\lambda_2$  条件下,不同方法和不同星载红外像平面,对目标群的量测集和各目标在像平面上的真实投影点集。由图 4 可以看出,  $M_1$  方法的目标真实投影轨迹连续性弱,其中图 4(b)中有两个目标在跟踪后期甚至脱离了传感

器视场;而  $M_2$  方法的目标投影真实轨迹相对平滑,这是两种方法对群目标质心组跟踪具有不同跟踪精

度的结果。

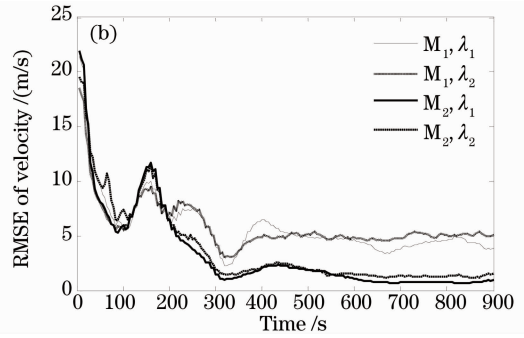
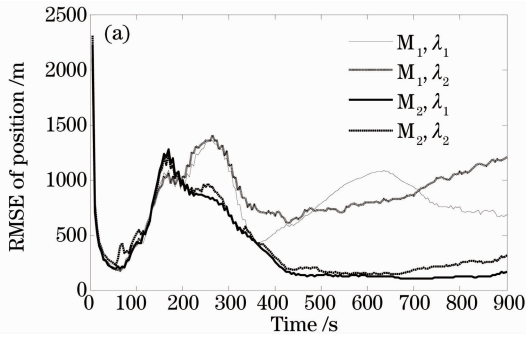


图 3 目标群质心组跟踪结果。(a)位置均方根误差,(b)速度均方根误差

Fig. 3 Tracking results of target group centroid. (a) RMSE of position, (b) RMSE of velocity

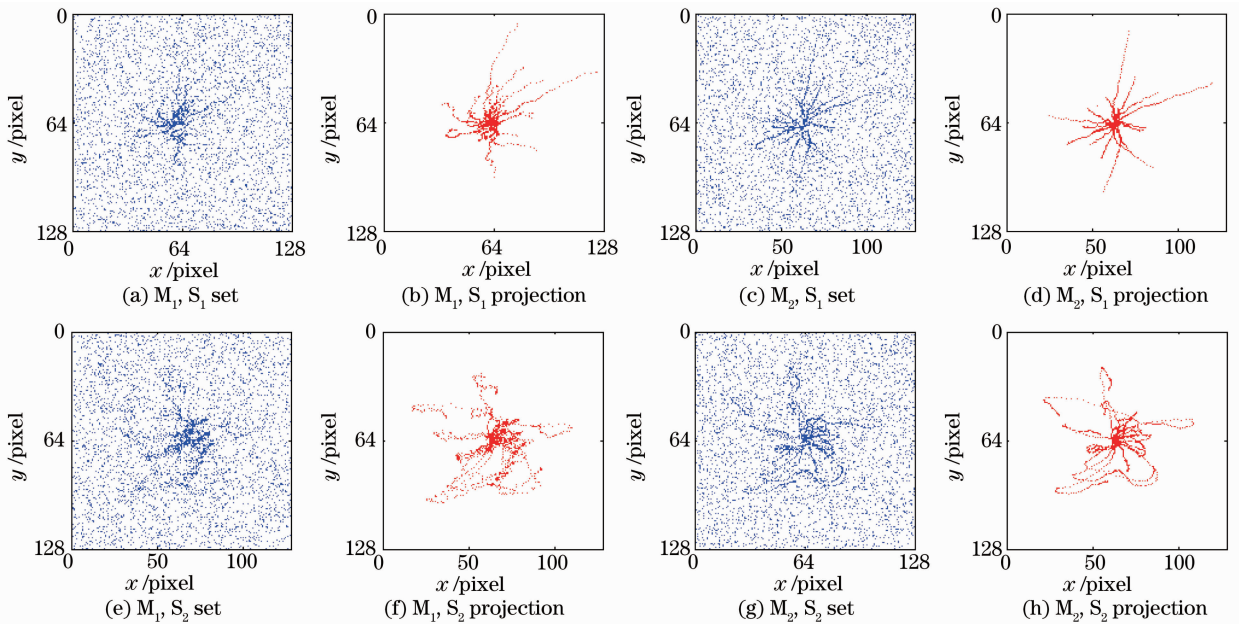


图 4 像平面量测集与目标真实投影

Fig. 4 Measurement set and target true projection on the focal plane

图 5 为  $M_2$  方法单次运行时的目标群像平面跟踪状态估计结果,对比图 4,5,显然可见基于 PHD 滤波的目标群像平面跟踪滤除了大量杂波,从而有效提取更为准确的群质心像平面量测;同时,对比图 5 和图 4(d),(h)结果,发现  $M_2$  方法的目标状态估计具有更为平滑的帧间状态,表明本文所采用的图像匹配方法是有效的。

图 6 为  $M_2$  方法 50 次 Monte-Carlo 仿真的像平面跟踪目标个数估计统计平均值。其中,真实目标个数估计是由对未添加杂波和噪声的图像数据进行信号处理提供。由图可以看出,像平面对目标群各

目标的个数分辨是时变的,而基于 PHD 滤波的像平面跟踪方法较好跟踪时变目标个数,仅在跟踪后期对目标个数估计有一定的偏差(小于 5),但总体上像平面跟踪方法滤除了大量杂波,从而可有效提取源于目标的量测,为组跟踪提供准确的目标群质心量测。

综合上述仿真结果,表明  $M_2$  方法能有效实现目标群的星载红外像平面稳定跟踪,并在此基础上获得优于传统方法的目标群质心像平面量测,从而提高了目标群的质心组跟踪精度,保障了整个天基红外信息处理系统的性能。

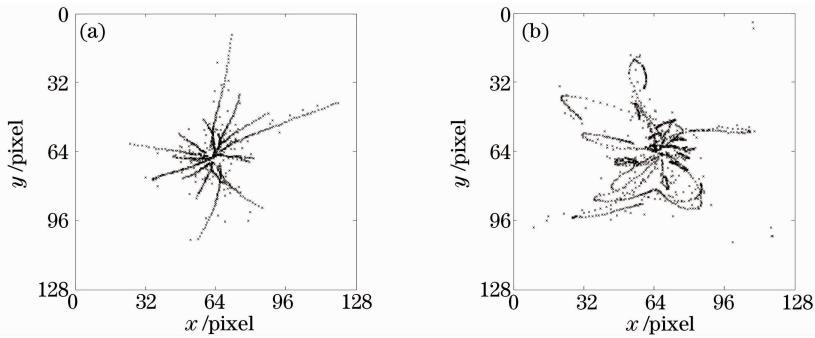
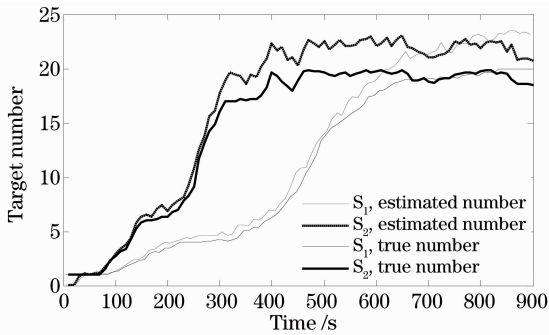
图5 目标群像平面跟踪结果。(a) $S_1$ 跟踪结果,(b) $S_2$ 跟踪结果Fig. 5 Target group tracking results on the focal plane. (a) track result of  $S_1$ , (b) tracking result of  $S_2$ 

图6 像平面跟踪的目标个数估计结果

Fig. 6 Target-number estimation from tracking on focal plane

## 5 结 论

从天基红外信息处理系统的性能出发,分析影响中段弹道目标群质心组跟踪的因素,引入基于概率假设密度滤波的目标群星载红外像平面跟踪方法,并以图像配准方法调整帧间目标状态估计,将目标群的质心组跟踪和目标群像平面跟踪方法有效结合起来,提出基于概率假设密度滤波像平面跟踪信息回馈的目标群红外多传感器组跟踪新方法。仿真结果表明,新方法适应杂波能力强,对目标群的质心组跟踪精度优于传统方法,且有效实现了中段弹道目标群的星载红外像平面稳定跟踪,有力保障了整个天基红外信息处理系统的性能。

## 参 考 文 献

- 1 N. S. Andreas. Space-based infrared system (SBIRS) system of systems[C]. IEEE Aerospace Conference, 1997, 4: 429~438
- 2 STSS: ensuring national security through missile defense[EB/OL]. 2008, [http://www.as.northropgrumman.com/products/stss/assets/STSS\\_Brochure\\_0508.pdf](http://www.as.northropgrumman.com/products/stss/assets/STSS_Brochure_0508.pdf)
- 3 Chris Harlanbakis. Space tracking and surveillance system (STSS) block 06 sensor suit[EB/OL]. 2010, [http://www.raytheon.com/businesses/rtnwcm/groups/sas/documents/content/rtn\\_sas\\_ds\\_stss.pdf](http://www.raytheon.com/businesses/rtnwcm/groups/sas/documents/content/rtn_sas_ds_stss.pdf)
- 4 R. Klungle, H. Haque. Stereo tracking & target recognition in

- IR space sensors[C]. AIAA Space Technology Conference & Exposition, 1999. 1~10
- 5 O. E. Drummond, S. S. Blackman, G. C. Petrison. Tracking clusters and extended objects with multiple sensors[C]. *SPIE*, 1990, **1305**: 362~375
- 6 M. A. Zimmer, M. J. Tsai. Tracking of a single cluster of closely spaced objects using one and two passive optical sensor [C]. *SPIE*, 1992, **1698**: 268~280
- 7 M. J. Waxman, O. E. Drummond. A bibliography of cluster (group) tracking [C]. *SPIE*, 2004, **5428**: 551~560
- 8 J. Korn, H. Holtz, M. S. Farber. Trajectory estimation of closely spaced objects (CSO) using infrared focal plane data of an STSS (space tracking and surveillance system) platform[C]. *SPIE*, 2004, **5428**: 387~399
- 9 S. Gadaleta, A. B. Poore, S. Roberts *et al.*. Multiple hypothesis clustering, multiple frame assignment, tracking[C]. *SPIE*, 2004, **5428**: 294~307
- 10 Lin Liangkui, Xie Kai, Xu Hui *et al.*. Research on infrared imaging simulation of midcourse ballistic object target complex [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, **28**(3): 218~223
- 林两魁, 谢 恺, 徐 晖等. 中段弹道目标群的红外成像仿真研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(3): 218~223
- 11 Blackman, R. Popoli. Design and Analysis of Modern Tracking Systems[M]. Artech House, 1999
- 12 He You, Xiu Jianjuan, Zhang Jingwei *et al.*. Radar Data Processing With Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009
- 何 友, 修建娟, 张晶炜等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009
- 13 R. P. S. Mahler. Statistical Multisource-Multitarget Infomation Fusion[M]. Artech House, 2007
- 14 R. P. S. Mahler. Multitarget Bayes filtering via first-order multitarget moments [J]. *IEEE Tran. Aero. Elect. Syst.*, 2003, **39**(4): 1152~1178
- 15 X. R. Li, V. P. Jilkov. A survey of maneuvering target tracking-part II: ballistic target models [C]. *SPIE*, 2001, **4473**: 559~581
- 16 Xie Kai, Xue Mogen, Zhou Yiyu *et al.*. Comparison of ballistic target tracking filters in the space-based infrared LEO constellation [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, **28**(3): 694~701
- 谢 恺, 薛模根, 周一宇等. 天基红外低轨星座对目标的跟踪算法研究[J]. *宇航学报*, 2007, **28**(3): 694~701
- 17 D. Macumber, S. Gadaleta, A. Floyd *et al.*. Hierarchical closely-spaced objects (CSO) resolution for IR sensor surveillance [C]. *SPIE*, 2005, **5913**: 591304
- 18 S. J. Julier, J. K. Uhlmann. Unscented filtering and nonlinear estimation[C]. *Proc. IEEE*, 2004, **92**(3): 401~422

- 19 Ba-Ngu Vo, S. Singh, A. Doucet. Sequential monte methods for multi-target filtering with random finite sets[J]. *IEEE Trans. Aeros. Elect. Syst.*, 2005, **41**(4): 1224~1245
- 20 M. Guizar-Sicairos, S. T. Thurman, J. R. Fienup. Efficient subpixel image registration algorithms[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(2): 156~158
- 21 Hao Zhicheng, Zhu Ming. Serial image registration based on multiple restriction matching algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 702~707  
郝志成, 朱 明. 基于多约束准则匹配算法的序列图象配准[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 702~707
- 22 Wang Ledong, Wang Jiang'an, Kang Sheng *et al.*. An algorithm of adjacent frame matching used for head-on point targets tracking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3004~3009  
王乐东, 王江安, 康 圣 等. 相邻帧间匹配的迎头点目标跟踪算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3004~3009
- 23 Irene A. Budianto, John R. Olds. A Collaborative Optimization Approach to Design and Deployment of a Space Based Infrared System Constellation[C]. *IEEE NAECON*, 2000. 385~393