

DOI: 10.7652/xjtub201404017

多扩展目标的高斯混合概率假设密度滤波器

韩玉兰¹, 朱洪艳¹, 韩崇昭¹, 王静²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安邮电大学工程学院, 710121, 西安)

摘要: 针对多扩展目标跟踪中状态信息难以估计的问题,提出了一种可以估计扩展目标运动状态和形状信息的多扩展目标高斯混合概率假设密度(RHM-GMPHD)滤波器。首先利用描述凸星形扩展目标量测源分布的随机超曲面模型和传感器量测方程,建立扩展目标运动状态及形状信息与量测之间关系的伪量测函数;然后结合扩展目标状态预报信息,推导了扩展目标状态更新方程,递推地对扩展目标运动状态及形状信息进行估计跟踪。此外,还建立了 Jaccard 距离来度量 RHM-GMPHD 滤波器对目标形状的估计性能。与联合概率数据关联(JPDA)滤波器和 GMPHD 滤波器相比,RHM-GMPHD 滤波器不仅可以估计凸星形扩展目标的形状信息,并能有效提高对目标数和运动状态的估计精度。仿真实验表明,RHM-GMPHD 滤波器对质心估计的均方根误差分别约为 JPDA 和 GMPHD 滤波器的 1/3 和 1/2,对目标数的估计接近真实值,对形状估计的 Jaccard 距离一般小于 0.2。

关键词: 扩展目标跟踪;高斯混合概率假设密度;随机超曲面模型;形状估计

中图分类号: TN274 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0095-07

Gaussian-Mixture Probability Hypothesis Density Filter for Multiple Extended Targets

HAN Yulan¹, ZHU Hongyan¹, HAN Chongzhao¹, WANG Jing²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: A multiple extended-target Gaussian-mixture probability hypothesis density (RHM-GMPHD) filter, which provides the kinematic state and the extension state of extended targets, is proposed to address the difficultly estimated extension state. The pseudo-measurement likelihood function describing the relationship between kinematic state and extension state of extended target and measurements is constructed via the random hypersurface model(RHM) for convex-star extended target and sensor measurement function. Then the predicted state is considered, the update of extend target filter is derived to recursively estimate the kinematic state and extension state for extended targets. Moreover, the Jaccard distance is presented to evaluate the performance of the estimate extension state. Compared with the joint probabilistic data association(JPDA) and GMPHD filter, RHM-GMPHD provides the extension state and enhances the precision of the estimate number and the estimate kinematic state. Simulations indicate that the root-mean-square error of centroid from RHM-GMPHD gets 1/3 of that from JPDA or 1/2 of that from GMPHD. The estimation number of extended targets approaches the true value, and

收稿日期: 2013-09-27。 作者简介: 韩玉兰(1982—),女,博士生;朱洪艳(通信作者),女,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61203220,61221063,61074176);国家“973 计划”资助项目(2013CB329405)。

网络出版时间: 2014-01-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140115.1446.004.html>

Jaccard distance gets usually less than 0.2.

Keywords: extended target tracking; Gaussian-mixture probability hypothesis density; random hypersurface model; estimate of the extension state

扩展目标跟踪在近距离跟踪(如濒海监视、自主式武器、机器人技术)中非常重要^[1]。另外,群目标跟踪在多目标编队、地面空中或海面目标群、人群或兽群跟踪等领域有巨大的应用价值。通常群内目标比较密集,对群目标内所有个体进行跟踪是不现实的也不必要^[2],但可直接对群的整体进行跟踪。由于扩展目标和群目标跟踪的数学描述类似,许多文献将扩展目标与群目标放在一起进行研究^[1,3-6],也有文献将群目标直接称为扩展目标^[1,4-5]。

扩展目标和群目标跟踪在近十几年受到了国内外学者的广泛关注。文献[1,3]将目标形状参数用半正定随机矩阵描述,采用贝叶斯递推的方法,对单个扩展目标或群目标的运动状态和形状跟踪,这种方法被称为随机矩阵法。文献[4-5]提出采用随机超曲面模型来描述量测源在物体表面的分布,对单个扩展目标进行估计与跟踪。多扩展目标或群目标的跟踪方法有2类:一类是将单个扩展目标的跟踪方法与概率多假设跟踪(PMHT)相结合^[6-7]实现多扩展目标的跟踪,由于其数据关联的计算量比点目标繁重得多,并且随着扩展目标个数及量测数急剧增加,因此应用范围受到限制;另一类是基于随机有限集,这类方法递推地传递目标状态的分布信息,不需要数据关联即可从目标状态分布中同时提取目标的个数和状态估计^[8-10],但这类算法只对扩展目标运动状态进行估计,没有考虑形状。文献[11]将随机矩阵法^[1]与扩展目标高斯混合概率假设密度滤波器^[10]相结合,对扩展目标的运动状态和形状进行估计,但其将所有目标都近似为椭圆,形状估计误差较大,影响进一步决策的正确性。

针对扩展目标形状不规则时难于对形状估计的问题,本文提出了一种基于随机超曲面的扩展目标高斯混合概率假设密度(RHM-GMPHD)滤波器,可以在杂波和漏检测情况下跟踪任意凸星形目标的运动状态和形状。本文为了更新扩展目标的状态,建立了扩展目标的伪量测和量测似然函数,并在合理的假设和近似下,推导了扩展目标运动状态和形状参数的量测更新方程,建立了度量滤波器对不规则形状估计的性能指标。

1 问题描述

扩展目标状态由目标的运动状态参数和形状参

数组成, k 时刻的扩展目标状态集可表示为

$$X_k = \{\mathbf{x}_k^{(i)}\}_{i=1}^{N_{x,k}}, \quad \mathbf{x}_k^{(i)} \triangleq [(\mathbf{c}_k^{(i)})^T, (\mathbf{e}_k^{(i)})^T]^T \quad (1)$$

式中: $N_{x,k}$ 为扩展目标数; $\mathbf{c}_k^{(i)}$ 为第 i 个目标的运动状态向量; $\mathbf{e}_k^{(i)}$ 为其形状参数向量。

本文的研究基于下述假设。

假设1 每个目标状态演化服从线性高斯运动模型,但各目标之间演化互不相关。第 i 个目标的状态演化模型可表示为

$$\mathbf{x}_{k+1}^{(i)} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k^{(i)} + \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k^{(i)} \quad (2)$$

式中: $i=1, \dots, N_{x,k}$; $\mathbf{F}_k$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{G}_k$ 为噪声矩阵; $\mathbf{w}_k^{(i)}$ 为过程噪声,是均值为0、协方差阵为 $\mathbf{Q}_k^{(i)}$ 的高斯噪声。

假设2 量测方程亦服从线性高斯模型,目标产生的量测之间互不相关。

扩展目标从物体表面的不同位置产生量测,产生量测的位置称为量测源,在不同时刻量测源及其数量会发生变化。目标产生量测过程可分2步:首先产生量测源,产生量测源的模型称为量测源模型(本文采用随机超曲面模型^[4-5]);其次由量测源产生量测。设 k 时刻扩展目标有 $N_{y,k}$ 个量测源 $\{\mathbf{y}_k^{(i)}\}_{i=1}^{N_{y,k}}$,由 $\mathbf{y}_k^{(i)}$ 产生的量测 $\mathbf{z}_k^{(i)}$ 是量测源带有噪声的观测值,即

$$\mathbf{z}_k^{(i)} = \mathbf{y}_k^{(i)} + \mathbf{v}_k^{(i)} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{v}_k^{(i)}$ 是均值为0、协方差为 $\mathbf{R}_k$ 的高斯噪声。

假设3 测量集由源于目标的量测和杂波构成,杂波与目标产生的量测之间互不相关,目标产生的量测数和杂波量测数均服从泊松分布。

扩展目标跟踪的目的是:给定直到 K 时刻的累积量测集 $Z^K = \{Z_k\}_{k=1}^K$,对目标状态集 $X_k = \{\mathbf{x}_k^{(i)}\}_{i=1}^{N_{x,k}}$ 进行估计,其中 $Z_k = \{\mathbf{z}_k^{(i)}\}_{i=1}^{N_{z,k}}$ 为 k 时刻量测集, $N_{z,k}$ 为 k 时刻的量测数。

2 扩展目标高斯混合 PHD 滤波器

2.1 随机超曲面模型

随机超曲面模型是描述扩展目标量测源分布的模型^[4],可描述如下。

量测源 $\mathbf{y}_k^{(i)}$ 位于曲线 C 上,曲线 C 满足:若记边界点与质心点之间的距离为 d ,形成的线段为 g ,则线段 g 与曲线 C 的交点与质心间的距离为 $\tilde{s}_k^{(i)} \cdot d$ (其中 $\tilde{s}_k^{(i)}$ 为从一维随机变量尺度因子 $s_k^{(i)}$ 中随机

抽取的值),即

$$\mathbf{y}_k^{(i)} = \boldsymbol{\mu}_k + \tilde{s}_k^{(i)} (\bar{E}(\mathbf{e}_k) - \boldsymbol{\mu}_k) \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\mu}_k$ 为质心位置向量; $E(\mathbf{e}_k)$ 为物体内部所有点形成的集合; $\bar{E}(\mathbf{e}_k)$ 表示 $E(\mathbf{e}_k)$ 的边界。图1为随机超曲面模型产生一个量测源的示意图。

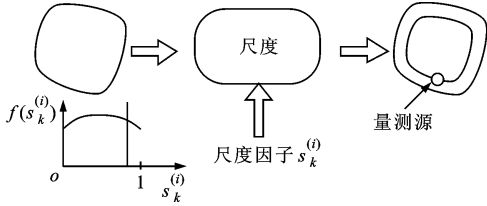


图1 随机超曲面模型产生量测源示意图

尺度因子 $s_k^{(i)}$ 的分布需事先给定。在实际应用中量测源位于扩展目标的表面,因此 $s_k^{(i)}$ 取值范围为 $[0, 1]$ 。 $s_k^{(i)}$ 的选择可以不依赖于形状参数 $\mathbf{e}_k$, 因此易于处理。随机超曲面模型只描述了量测源与质心之间的距离信息,没有确切指出量测源所在位置,这符合对目标形状信息缺乏的描述。

2.2 伪量测函数

集合 $E \subset \mathbf{R}^N$ 中的任何一点到质心的线段记为 g , 若 g 上所有点仍属于此集合, 则称集合 E 形成的形状为凸星形^[5]。

下面的讨论局限在二维空间, 高维空间很容易扩展。由式(4)的随机超曲面模型和径向函数^[12] $r(\varphi)$ 对凸星形进行表示

$$E(\mathbf{x}_k) = \{s_k^{(i)} r(\varphi) \boldsymbol{\eta}(\varphi) + \boldsymbol{\mu}_k, \varphi \in [0, 2\pi], s_k^{(i)} \in [0, 1]\} \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}(\varphi) = [\cos(\varphi), \sin(\varphi)]^T$ 为角度 φ 的单位向量; 径向函数 $r(\varphi)$ 可由 Fourier 系数描述

$$r(\varphi) = a_k^{(0)} + \sum_{j=1, \dots, N_F} (a_k^{(j)} \cos(j\varphi) + b_k^{(j)} \sin(j\varphi)) \quad (6)$$

对于固定角度 φ , 式(6)可用向量表示

$$r(\varphi) = \mathbf{r}(\varphi) \mathbf{l}_k \quad (7)$$

式中: $\mathbf{r}(\varphi) = [1, \cos(\varphi), \sin(\varphi), \dots, \cos(N_F\varphi), \sin(N_F\varphi)]$; $\mathbf{l}_k = [a_k^{(0)}, a_k^{(1)}, \dots, a_k^{(N_F)}]^T$, 本文将 $\mathbf{l}_k$ 作为形状参数向量。

由式(3)和式(5)可得量测方程

$$\mathbf{z}_k^{(i)} = s_k^{(i)} \mathbf{r}(\varphi_k^{(i)}) \mathbf{l}_k \boldsymbol{\eta}(\varphi_k^{(i)}) + \boldsymbol{\mu}_k + \mathbf{v}_k^{(i)} \quad (8)$$

式(8)给出了量测值 $\mathbf{z}_k^{(i)}$ 与扩展目标状态 $\mathbf{x}_k$ 之间的关系。由于 $\varphi_k^{(i)}$ 未知, 本文用当前质心点的估计值到量测值 $\mathbf{z}_k^{(i)}$ 形成的向量与 x 轴之间的角度 $\hat{\varphi}_k^{(i)}$ 作为对 $\varphi_k^{(i)}$ 的估计值。

为减小估计值 $\hat{\varphi}_k^{(i)}$ 对状态估计精度的影响, 对

式(8)进行数学处理, 建立伪量测函数 $h^*(\cdot)$, 即

$$\mathbf{0} = h^*(\mathbf{x}_k^t, \mathbf{v}_k^{(i)}, s_k^{(i)}, \mathbf{z}_k^{(i)}) = (s_k^{(i)})^2 \|\mathbf{r}(\hat{\varphi}_k^{(i)}) \mathbf{l}_k\|^2 + 2s_k^{(i)} \mathbf{r}(\hat{\varphi}_k^{(i)}) \mathbf{l}_k \boldsymbol{\eta}^T(\hat{\varphi}_k^{(i)}) \mathbf{v}_k^{(i)} + \|\mathbf{v}_k^{(i)}\|^2 - \|\mathbf{z}_k^{(i)} - \boldsymbol{\mu}_k\|^2 \quad (9)$$

从式(9)可以看出, $h^*(\cdot)$ 建立了扩展目标状态 $\mathbf{x}_k$ 、量测噪声 $\mathbf{v}_k^{(i)}$ 和尺度因子 $s_k^{(i)}$ 与量测 $\mathbf{z}_k^{(i)}$ 之间的关系。

2.3 RHM-GMPHD 滤波器的递推

RHM-GMPHD 滤波器基于以下假设^[13]:

假设4 预测目标数服从 Poisson 分布;

假设5 生存概率和检测概率与目标状态无关;

假设6 目标的新生和衍生强度为高斯混合。

对于多扩展目标跟踪, 其预测方程与标准高斯混合 PHD^[13] 的预测方程相同, 因此这里只介绍量测更新方程。

扩展目标 PHD 的后验强度为 PHD 的预测强度 $\nu_{k|k-1}(\mathbf{x} | Z)$ 与量测伪似然函数 L_{Z_k} 的乘积^[8]

$$\nu_{k|k}(\mathbf{x} | Z) = L_{Z_k}(\mathbf{x}) \nu_{k|k-1}(\mathbf{x} | Z) \quad (10)$$

PHD 的预测强度具有如下高斯混合形式

$$\nu_{k|k-1}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{J_{k|k-1}} \omega_{k|k-1}^{(j)} N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k-1}^{(j)}) \quad (11)$$

式中: $\omega_{k|k-1}^{(j)}$ 为第 j 个高斯函数的权值; $N(\cdot, \cdot)$ 为高斯函数。量测伪似然函数 L_{Z_k} 为

$$L_{Z_k}(\mathbf{x}) = 1 - (1 - e^{-\gamma(\mathbf{x})}) p_D(\mathbf{x}) + e^{-\gamma(\mathbf{x})} p_D(\mathbf{x}) \sum_{\zeta \mapsto Z_k} \omega_{\zeta} \sum_{W \in \zeta} \frac{\gamma(\mathbf{x})^{|W|}}{d_W} \prod_{z \in W} \frac{\phi_z(\mathbf{x})}{\lambda_k c_k(\mathbf{z})} \quad (12)$$

式中: $\zeta \mapsto Z_k$ 表示划分 ζ 将量测集 Z_k 分割为非零胞; ω_{ζ} 为划分 ζ 的权值; d_W 为胞 W 的非零权值系数; $p_D(\cdot)$ 为检测概率; $\gamma(\cdot)$ 为扩展目标产生量测个数的均值; $\phi_z(\cdot) = f^L(\mathbf{z} | \cdot)$ 为量测 $\mathbf{z}$ 的似然函数; λ_k 为单位空间的杂波数; $c_k(\cdot)$ 为杂波分布函数。

将式(11)、(12)代入式(10)得

$$\nu_{k|k}(\mathbf{x} | Z) = \sum_{j=1}^{J_{k|k-1}} d_{k|k}^{(j)} N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k-1}^{(j)}) + \sum_{\zeta \mapsto Z_k} \sum_{W \in \zeta} \sum_{j=1}^{J_{k|k-1}} l_{k|k}^{(j)} N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k-1}^{(j)}) \prod_{z \in W} \phi_z(\mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)}) \quad (13)$$

式中: $d_{k|k}^{(j)} = (1 - (1 - e^{-\gamma^{(j)}}) p_D^{(j)}) \omega_{k|k-1}^{(j)}; l_{k|k}^{(j)} =$

$e^{-\gamma^{(j)}} p_D^{(j)} \omega_{\zeta} \frac{(\gamma^{(j)})^{|W|}}{d_W} (\lambda_k c_k)^{-|W|} \omega_{k|k-1}^{(j)}$, 其中 $\gamma^{(j)}$ 、 $p_D^{(j)}$

分别为 $\gamma(\mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)})$ 和 $p_D(\mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)})$ 的简写, ω_{ζ} 是划分 ζ 为真的概率, 可由下式计算

$$\omega_{\zeta} = \frac{\prod_{W \in \zeta} d_W}{\sum_{\zeta' \vdash Z_k} \prod_{W' \in \zeta'} d_{W'}}$$

$$d_W = \delta_{|W|,1} + \sum_{i=1}^{J_{k|k-1}} e^{-\gamma^{(i)}} p_D^{(i)} \left(\frac{\gamma^{(i)}}{\lambda_k c_k} \right)^{|W|} \omega_{k|k-1}^{(i)} \prod_{l=1, \dots, |W|} \alpha_{k,l}^{(i)} \quad (14)$$

式中: $\delta_{i,j}$ 为克罗内克 δ 函数; $\alpha_{k,l}^{(i)}$ 为归一化因子。

下面对式(13)第二项的求和和内部项进行讨论。由于第1章假设各量测之间互不相关,因此 $N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k-1}^{(j)}) \prod_{z \in W} \phi_z(\mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)})$ 可解释为预测强度的高斯项 $N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k-1}^{(j)})$ (记为 $f_{k,0}^{(j)}(\mathbf{x}_k)$), 由胞 W 中的量测 (记为 $\{\mathbf{z}_{k,l}\}_{l=1}^{|W|}$) 进行序贯地更新得到, 可表示为

$$f_{k,l}^{(j)}(\mathbf{x}_k) = \alpha_{k,l}^{(j)} f^L(\mathbf{z}_{k,l} | \mathbf{x}_k) f_{k,l-1}^{(j)}(\mathbf{x}_k) \quad (15)$$

式中: $f^L(\mathbf{z}_{k,l} | \mathbf{x}_k)$ 为量测 $\mathbf{z}_{k,l}$ 的似然函数。

$f_{k,|W|}^{(j)}(\mathbf{x}_k)$ 可近似为高斯函数 $f_{k,|W|}^{(j)}(\mathbf{x}_k) \approx N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{k|k}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k}^{(j)})$, 因此 PHD 的后验强度 $\nu_{k|k}(\mathbf{x} | Z)$ 可近似为高斯混合

$$\nu_{k|k}(\mathbf{x} | Z) = \sum_{j=1}^{J_{k|k-1}} d_{k|k}^{(j)} N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{k|k-1}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k-1}^{(j)}) + \sum_{\zeta \vdash Z_k} \sum_{W \in \zeta} \sum_{j=1}^{J_{k|k-1}} \omega_{k|k}^{(j)} N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{k|k}^{(j)}, \mathbf{P}_{k|k}^{(j)}) \quad (16)$$

式中: $\omega_{k|k}^{(j)} = l_{k|k}^{(j)} \prod_{l=1, \dots, |W|} \alpha_{k,l}^{(j)}$ 。

3 扩展目标形状估计的性能指标

本文借鉴了 Jaccard 系数^[14]的思想,建立了几何形状间的 Jaccard 距离,将其作为对扩展目标形状估计的性能指标。本文定义几何形状 X 与 Y 之间的 Jaccard 距离为

$$D_{\text{Jac}}(X, Y) = 1 - \frac{S(R(X) \cap R(Y))}{S(R(X) \cup R(Y))} \quad (17)$$

式中: $R(X)$ 、 $R(Y)$ 表示由几何形状 X 、 Y 所形成的区域; $S(\cdot)$ 表示区域的面积; D_{Jac} 的取值范围为 $[0, 1]$ 。Jaccard 距离体现了 2 个几何形状的大小、位置、方向共同作用下的差异。本文首先将估计形状的质心移到实际质心位置,再采用 Jaccard 距离对形状的估计性能进行度量。

可以证明, Jaccard 距离符合度量的条件。

(1) 正定性: $D_{\text{Jac}}(X, Y) \geq 0$, 当且仅当 $X=Y$ 时等号成立。

(2) 对称性: $D_{\text{Jac}}(X, Y) = D_{\text{Jac}}(Y, X)$ 。

(3) 三角不等式

$$D_{\text{Jac}}(X, Z) \leq D_{\text{Jac}}(X, Y) + D_{\text{Jac}}(Y, Z) \quad (18)$$

显然条件(1)、(2)成立,下面对条件(3)进行证明。

证明 为了表达方便,令 S_X 、 S_{XY} 分别作为 $S(R(X))$ 和 $S(R(X) \cap R(Y))$ 的简写,并记 $J_{XY} = S(R(X) \cap R(Y)) / S(R(X) \cup R(Y))$, 且满足 $J_{XY} = \frac{S_{XY}}{S_X + S_Y - S_{XY}}$, 由此可得

$$S_{XY} = \frac{J_{XY}}{1 + J_{XY}} (S_X + S_Y) \quad (19)$$

由几何形状的并交关系,下列不等式成立

$$S_Y - S_{YZ} - S_{XY} + S_{XZ} \geq 0 \quad (20)$$

$$S_X \geq S_{XY}; \quad S_Z \geq S_{YZ} \quad (21)$$

将式(19)的关系应用到式(20),可得

$$\left(1 - \frac{J_{XY}}{1 + J_{XY}} - \frac{J_{YZ}}{1 + J_{YZ}}\right) S_Y \geq \left(\frac{J_{XY}}{1 + J_{XY}} - \frac{J_{XZ}}{1 + J_{XZ}}\right) S_X + \left(\frac{J_{YZ}}{1 + J_{YZ}} - \frac{J_{XZ}}{1 + J_{XZ}}\right) S_Z \quad (22)$$

将式(19)应用到式(21),可得

$$S_X \geq J_{XY} S_Y; \quad S_Z \geq J_{YZ} S_Y \quad (23)$$

由式(17)可知,当 $J_{XY} \leq J_{XZ}$ 或 $J_{YZ} \leq J_{XZ}$ 时, $D_{XY} \geq D_{XZ}$ 或 $D_{YZ} \geq D_{XZ}$ 成立,因此式(18)成立。

当 $J_{XY} \geq J_{XZ}$ 且 $J_{YZ} \geq J_{XZ}$ 时,由式(23)得

$$\left(\frac{J_{XY}}{1 + J_{XY}} - \frac{J_{XZ}}{1 + J_{XZ}}\right) S_X \geq J_{XY} \left(\frac{J_{XY}}{1 + J_{XY}} - \frac{J_{XZ}}{1 + J_{XZ}}\right) S_Y \quad (24)$$

$$\left(\frac{J_{YZ}}{1 + J_{YZ}} - \frac{J_{XZ}}{1 + J_{XZ}}\right) S_Z \geq J_{YZ} \left(\frac{J_{YZ}}{1 + J_{YZ}} - \frac{J_{XZ}}{1 + J_{XZ}}\right) S_Y \quad (25)$$

由式(22)、(24)、(25)整理得

$$1 + J_{XZ} \geq J_{XY} + J_{YZ} \quad (26)$$

再由式(17),可证式(18)成立。

4 仿真结果

4.1 仿真场景设置

监测区域为 $[-1\ 000\ \text{m}, 1\ 000\ \text{m}] \times [-1\ 000\ \text{m}, 1\ 000\ \text{m}]$, 扩展目标数未知且时变。扩展目标的状态向量 $\mathbf{x}_k = [x_k, y_k, v_k^x, v_k^y, \mathbf{e}_k^T]^T$ 由质心的位置 $[x_k, y_k]^T$ 、速度 $[v_k^x, v_k^y]^T$ 和形状参数 $\mathbf{e}_k$ 组成。状态演化服从式(2), $\mathbf{F}_k = \text{diag}(\mathbf{A}_k, \mathbf{I}_n)$, $\mathbf{Q}_k = \text{diag}(\mathbf{C}_k, 0.03\mathbf{I}_n)$, $\mathbf{I}_n$ 为 n 阶单位矩阵, $\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 & T\mathbf{I}_2 \\ \mathbf{0}_{\mathbf{I}_2} & \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{C}_k =$

$$\sigma^2 \begin{bmatrix} \frac{T^4}{4} \mathbf{I}_2 & \frac{T^3}{2} \mathbf{I}_2 \\ \frac{T^3}{2} \mathbf{I}_2 & T^2 \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}, T=1\ \text{s} \text{ 为取样周期}, \sigma=1.5 \text{ 为过}$$

程噪声的标准差, $\mathbf{0}_2$ 为 2 阶零矩阵, 本文设置 n 为 11。量测源均匀分布在扩展目标表面(即尺度因子的平方服从 $[0, 1]$ 上的均匀分布^[4])。量测为带有噪声的量测源位置, 量测噪声是协方差阵为 $\Sigma_v = \text{diag}(0.2, 0.2)$ 的零均值高斯噪声。设置尺度因子是服从均值为 0.5、方差为 0.02 的高斯分布(与实际不符)。本文用 UKF 对式(15)进行处理。

扩展目标的生存概率和检测概率均为 0.99。杂波量测数目服从均值为 10 的泊松分布, 在监测区域均匀分布。每个目标在每一时刻产生量测的个数服从均值为 20 的泊松分布。设置新生强度为

$$v_b(\mathbf{x}) = 0.1N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_b^1, \mathbf{P}_b) + 0.1N(\mathbf{x}; \mathbf{m}_b^2, \mathbf{P}_b) \quad (27)$$

式中: $\mathbf{m}_b^1 = [1, 1, 0, 0, 2, 0, \dots, 0]^T$; $\mathbf{m}_b^2 = [1, 10, 0, 0, 2, 0, \dots, 0]^T$; $\mathbf{P}_b = \text{diag}[1, 1, 1, 1, 0.03, \dots, 0.03]$ 。

设置衍生强度为

$$v_\beta(\mathbf{x}) = 0.05N(\mathbf{x}; \xi, \mathbf{P}_\beta) \quad (28)$$

式中: $\mathbf{P}_\beta = \text{diag}[1, \dots, 1]$; ξ 为衍生出新目标的本体目标的状态向量。目标的主轴方向与运动方向一致。

4.2 凸星形扩展目标的跟踪

采用 RHM-GMPHD、JPDA 和 GMPHD 滤波器对形状如图 2 所示的 3 个凸星形扩展目标进行跟踪, 目标航迹如图 3 所示。目标 1、2 的生存周期为 1~30 s, 大约 16 s 时两目标相交, 目标 3 的生存周期为 21~30 s。形状参数先验函数设置为均值 $[2, 0, \dots, 0]^T$ 、方差为 $\text{diag}[0.03, \dots, 0.03]$ 的高斯函数。为得到 JPDA、GMPHD 和 RHM-GMPHD 滤波器在质心位置、数目及形状方面的估计性能, 本文进行了 100 次 Monte Carlo 仿真实验, 结果如图 4~6 所示。

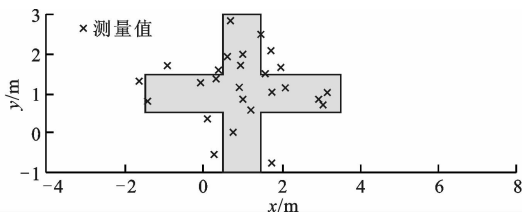


图2 凸星形扩展目标的形状

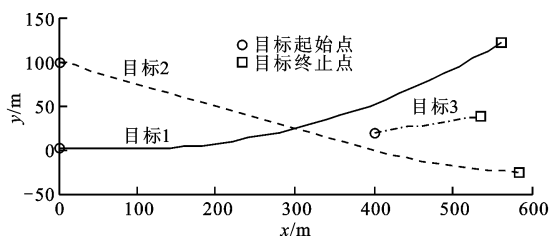


图3 目标运动轨迹

图 4 给出了本文 RHM-GMPHD 滤波器、针对多点目标的 JPDA 滤波器, 以及针对点目标的

GMPHD 滤波器的位置均方根误差曲线。由图 4 可以看出, RHM-GMPHD 滤波器在质心估计方面的跟踪性能, 明显优于将扩展目标当做点目标的 JPDA 和 GMPHD 滤波器。由于 JPDA 滤波器不能自适应地估计目标数, 因此在估计过程中设置目标数已知, 图 5 给出了 RHM-GMPHD 和 GMPHD 滤波器的目标估计数。由于 GMPHD 将扩展目标当做点目标, 因此目标数估计出现严重偏差, 而 RHM-GMPHD 滤波器只有在两目标的距离较近时出现一些偏差。

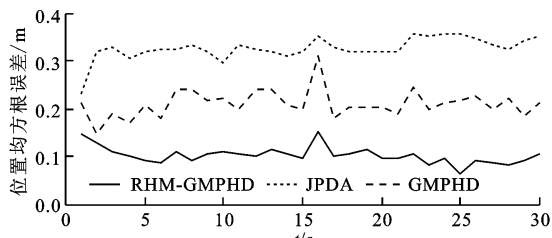


图4 位置均方根误差

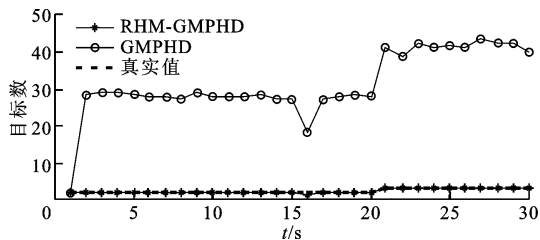


图5 真实与估计目标数

RHM-GMPHD 滤波器对形状估计的 Jaccard 距离如图 6 所示, 可知 RHM-GMPHD 滤波器对扩展目标形状也能较好地跟踪估计。在目标相交时, 由于无法区分两目标量测信息而造成对形状估计的偏差增大, 因此 Jaccard 距离会有所增加。当出现新生目标时, 初始形状估计的误差也有所增加。

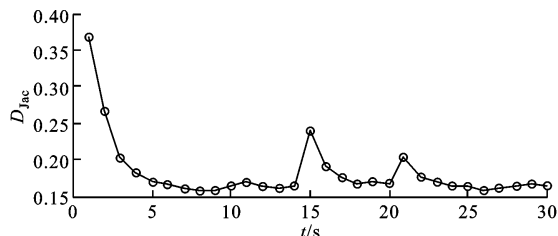


图6 真实形状与估计形状间的 Jaccard 距离

4.3 凸星形群目标的跟踪

为了能够较好地评估 RHM-GMPHD 滤波器在跟踪形状发生动态变化的群时的性能, 故不考虑新生目标。对 2 个群目标进行跟踪, 群目标航迹与图 3 扩展目标 1、2 的航迹相同。群目标是由 38 个点目标组成的队列(群目标 1 的初始位置如图 7 所示), 产生的量测服从均值为 20 的泊松分布。群目

标的形状随时间发生变化,1~10 s 群目标形状不发生变化;10~20 s 各目标由质心向外扩散,目标尺寸增大;20~30 s 各目标向质心靠拢,形状尺寸减小。为得到 JPDA、GMPHD 和 RHM-GMPHD 滤波器在质心位置、数目及形状方面的估计性能,本文进行了 100 次 Monte Carlo 仿真实验,结果如图 8~10 所示。

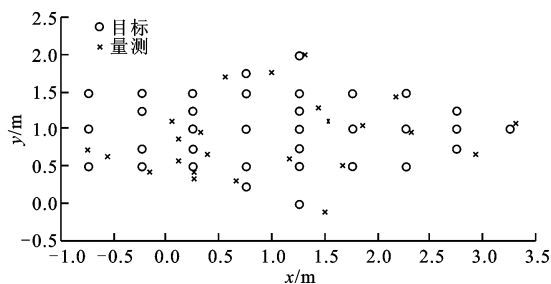


图 7 群目标 1 的初始位置及量测

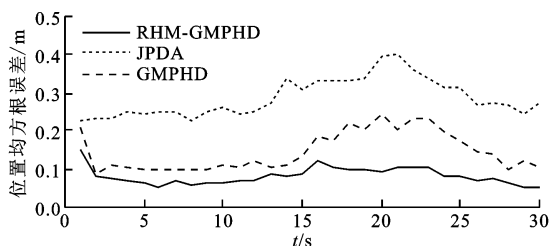


图 8 位置均方根误差

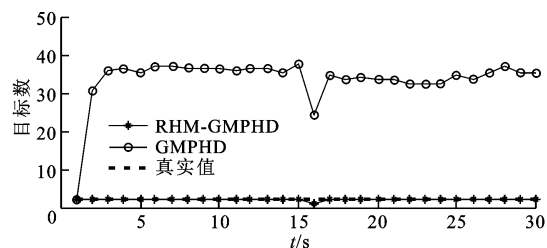


图 9 真实与估计目标数

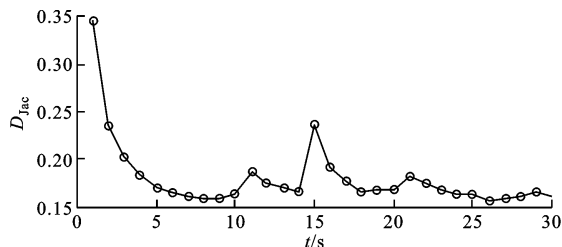


图 10 真实形状与估计形状间的 Jaccard 距离

由图 8~10 可知,当群目标形状尺寸发生变化时,RHM-GMPHD 滤波器也能较好地跟踪其质心位置和形状。在 2 个群目标合为一个群时,会造成质心位置估计的误差增大,但形状尺寸变化对估计性能影响不大,而形状尺寸的变化对 JPDA 和 GMPHD 滤波器的质心估计性能产生了较大的影响。由图 9 可得,RHM-GMPHD 滤波器的目标估

计数接近真实值,远远优于 GMPHD 滤波器。

图 10 中,将连接群目标边界上的点形成的曲线,视为群目标的实际形状。

5 结 论

本文提出的多扩展目标滤波器 RHM-GMPHD,可以在杂波和漏检测下对任何凸星形扩展目标和群目标的运动状态和形状进行估计跟踪。推导了 RHM-GMPHD 滤波器的递推方程,讨论了多扩展目标滤波器对形状的性能评估,定义了几何形状间的 Jaccard 距离。仿真结果表明,即使目标转弯或事先指定的尺度因子的概率分布与实际不符,RHM-GMPHD 滤波器也可以较好地跟踪多个凸星形扩展目标的位置和形状,并且能较好地跟踪形状动态变化的群目标的质心位置和形状。

参考文献:

- [1] KOCH J W. Bayesian approach to extended object and cluster tracking using random matrices [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(3): 1042-1059.
- [2] 连峰,韩崇昭,刘伟峰,等. 基于 SMC-PHDF 的部分可分辨的群目标跟踪算法 [J]. 自动化学报, 2010, 36(5): 731-741.
LIAN Feng, HAN Chongzhao, LIU Weifeng, et al. Tracking partly resolvable group targets using SMC-PHDF [J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(5): 731-741.
- [3] FELDMANN M, FRANKEN D, KOCH J W. Tracking of extended objects and group targets using random matrices [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4): 1409-1420.
- [4] BAUM M, HANEBECK U D. Random hypersurface models for extended object tracking [C]// Proceedings of International Symposium on Signal Processing and Information Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 178-183.
- [5] BAUM M, HANEBECK U D. Shape tracking of extended objects and group targets with star-convex RHMs [C]// Proceedings of the International Conference on Information Fusion. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 338-345.
- [6] BAUM M, NOACK B, HANEBECK U D. Mixture random hypersurface models for tracking multiple extended objects [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 3166-3171.

- [7] WIENEKE W, KOCH J W. Probabilistic tracking of multiple extended targets using random matrices [C]// Proceedings of Signal and Data Processing of Small Targets. Orlando, Florida, USA: SPIE, 2010: 419-430.
- [8] MAHLER R. PHD filters for nonstandard targets; I Extended targets [C]// Proceedings of the International Conference on Information Fusion. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009: 915-921.
- [9] ORGUNER U, LUNDQUIST C, GRANSTROM K. Extended target tracking with a cardinalized probability hypothesis density filter [C]// Proceedings of the 14th International Conference on Information Fusion. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2011: 1-8.
- [10] GRANSTROM K, LUNDQUIST C, ORGUNER U. Extended target tracking using a Gaussian mixture PHD filter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(4): 3268-3286.
- [11] GRANSTROM K, ORGUNER U. A PHD filter for tracking multiple extended targets using random matrices [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(11): 5657-5671.
- [12] ZHANG D S, LU G J. Study and evaluation of different Fourier methods for image retrieval [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(1): 33-49.
- [13] VO B N, MA W K. The Gaussian mixture probability hypothesis density filter [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4091-4104.
- [14] 潘磊, 雷钰丽, 王崇骏, 等. 基于权重的 Jaccard 相似度度量的实体识别方法 [J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(6): 141-145.
- PAN Lei, LEI Yuli, WANG Chongjun, et al. Method on entity identification using similarity measure based on weight of Jaccard [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(6): 141-145.

(编辑 刘杨)

(上接第 89 页)

- [2] TOMIYASU K, PACELLI J L. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1983, GE-21(3): 324-329.
- [3] HU C, LONG T, ZENG T, et al. The accurate focusing and resolution analysis method in geosynchronous SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3548-3563.
- [4] HOBBS S, SNAPIR B, CORSTANJE R, et al. Simulation of geosynchronous radar and atmospheric phase compensation constraints [C]// Proceedings of IET International Radar Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2013: 1-6.
- [5] YANG W, DING Z, ZHU Y, et al. Improved two-step algorithm in geosynchronous SAR [C]// Proceedings of IET International Radar Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2013: 1-5.
- [6] 赵秉吉, 齐向阳, 宋红军, 等. 基于椭圆轨道的 Geo-SAR 精确多普勒参数解析计算方法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2642-2647.
- ZHAO Bingji, QI Xiangyang, SONG Hongjun, et al. Accurate Doppler parameters estimation of Geo-SAR based on elliptical orbit [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(11): 2642-2647.
- [7] 包敏. 地球同步轨道 SAR 与中高轨道 SAR 成像算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [8] LI F K, GOLDSTEIN R M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(1): 88-97.
- [9] KRIEGER G, MOREIRA A, FIEDLER H, et al. Tandem-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3317-3341.
- [10] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. IEEE Proceedings, 2000, 88(3): 333-382.
- [11] 龙四春, 李陶. D-InSAR 中参考 DEM 误差与轨道误差对相位贡献的灵敏度研究 [J]. 遥感信息, 2009(2): 3-6.
- LONG Sichun, LI Tao. Phase sensitivity study on D-InSAR for reference DEM and orbit error [J]. Remote Sensing Information, 2009(2): 3-6.
- [12] BRUNO D. Geosynchronous synthetic aperture radar: design and applications [D]. Cranfield, Bedfordshire, UK: Cranfield University, 2009.
- [13] HU C, LI X, LONG T, et al. GEO SAR interferometry: theory and feasibility study [C]// Proceedings of IET International Radar Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2013: 1-5.
- [14] ZEBKER H A, VILLASENOR J. Decorrelation in interferometric radar echoes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 950-959.

(编辑 刘杨)