

集群目标管道式跟踪技术

王宁宁 汪吉莞 李迪

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：针对整体集群目标之间发生复杂的交互行为，设计了基于多散射点的群目标滤波算法来实现多个无人机集群的整体跟踪。该算法将雷达探测到的点云数据进行分群划分，按照点云分布规律分成多个群，然后对划分后的群进行群中心跟踪，包括状态预测、点群关联、状态更新、以及航迹维持等过程。最后通过仿真验证了该方法对群目标整体跟踪的有效性。

【关键词】：群目标跟踪；分群检测；点云数据；群中心跟踪

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.020

1 引言

对于群目标整体跟踪滤波算法，不需要对目标群内的每一个体的状态进行估计，但是整体集群目标之间将发生复杂的交互行为，例如多集群合并和单集群分裂的行为，这些复杂的交互行为将使得多个整体群目标的跟踪出现困难。现有群目标整体跟踪方法包括通过质心与扩散范围表征群目标整体状态^[1]、采用椭圆随机超曲面模型对群目标量测源建模^[2]，以及融合SMC-PHD滤波实现非线性场景下的跟踪方法等^[3]。群目标跟踪主要包括分群检测和航迹确认两个步骤，其中分群检测包括以态势估计等应用为背景的分群算法^[4-8]和基于相似度矩阵的分群算法，航迹确认方法通常利用等效量测信息计算航迹为真的后验概率，如修正的逻辑法^[9]和基于运动补偿的航迹起始方法^[10]等。

本文将使用基于多散射点的群目标滤波算法来实现多个无人机集群的整体跟踪。具体的做法是将雷达探测到的点云数据进行分群划分，按照点云分布规律分成多个群，然后对划分后的群进行群中心跟踪，包括状态预测、点群关联、状态更新、以及航迹维持等过程。在群中心跟踪过程中，对于多群同时跟踪且群间距比较小的情况需要对同时落入两个群关联门内的量测点进行归属判断。

2 群目标管道式跟踪技术

2.1 群目标多散射点分群检测

分群检测的基本思想是将具有基本相同运动特性且属于同一集合的点迹合并为子群^[11]，本文采用基于距离均值的自适应聚类算法对雷达量测点迹进行分群检测。自适应 K 值均值聚类的初始聚类中心的选取遵循以下两条原则，并且在第一次迭代中设 $i = 2$ 且 $d_i^* = d(\mu_i, g_c)$ 。

①寻找 P 中最大化 $d_i(p) = d_{i-1}^* + d(p, \mu_{i-1})$ 的坐标 p_j ，并将 p_j 设为 μ_i ，其中 d_{i-1}^* 是上一次迭代中的 d_i^* ， μ_{i-1} 是上一次迭代中的 μ_i ；

$$\mu_i = p_j \quad (2-1)$$

$$d_i^* = d_{i-1}^* + d(p_j, \mu_{i-1}) \quad (2-2)$$

$$s.t. p_j = \arg \max_{p \in P} d_i(p) \quad (2-3)$$

②从 P 中移除位于中心为上次迭代确定的初始均值 μ_{i-1} ，半径 $r_{ex} d_{i-1}^* / (i-1)$ 球体(或圆形)中的点 P ，即对于坐标 $p \in P$ ，如果下式成立，则从 P 中删除 P ；

$$d(p, \mu_{i-1}) \leq r_{ex} \frac{d_{i-1}^*}{i-1} \quad (2-4)$$

遵循上述两条原则进行迭代，直到选取出了 K 个初始均值点，或者 P 为空集。

2.2 相关门交叉情况下量测归属确定

在进行量测值与群目标航迹关联时，如果两个群目标航迹非常接近，将会出现同一个量测值同时落入两个群目标的关联门内，对此，需要确定在群目标相关门交叉时量测值的归属判断。

第一步判断是否交叉。不失一般性，考虑两个相关门情况下，两个预测中心之差 $H(k)\hat{X}_i(k|k-1) - H(k)\hat{X}_j(k|k-1) \leq 2\gamma$ 时出现相关门交叉（三个以上的情形仅需要两两比较即可）， $\hat{X}_i(k|k-1)$ 与 $\hat{X}_j(k|k-1)$ 分别为两个关联门的预测中心即预测值。

第二步判断哪些回波位于交叉区域，量测 $Y_i(k)$ 同时满足 $Y_i(k) - H(k)\hat{X}_i(k|k-1) \leq \gamma$ 与 $Y_i(k) - H(k)\hat{X}_j(k|k-1) \leq \gamma$ 确定为交叉区域内的回波（三个以上情形同样处理），满足上述条件的回波数量设为 l_k 。

第三步比较位于交叉区域内回波相对于每个预测中心概率的大小。在给定关联门限 γ 下，对雷达回波的初选通过检验

残差向量的范数是否小于 γ 来确定观测是否为候选回波，即 $g(k) \leq \gamma$ 。

3 基于多散射点的群跟踪算法

群跟踪算法的主要功能架构如下图所示，图中蓝色模块为常规跟踪模式（典型卡尔曼滤波跟踪）下的操作模块，橙色模块为支持多散射点群跟踪而添加的操作模块。

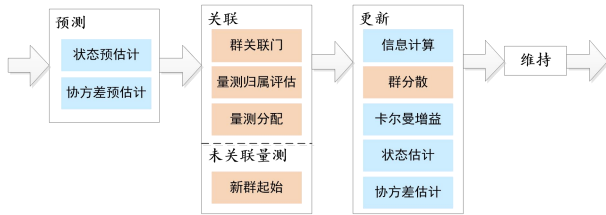


图1 群跟踪算法功能架构

具体过程如下：

(1) 预测阶段

基于 $n-1$ 时刻的状态和过程协方差对 n 时刻的状态估计和协方差预估计，预测公式为：

$$s_{apr}(n) = Fs(n-1) \quad (2-5)$$

$$P_{apr}(n) = FP(n-1)F^T + Q(n-1) \quad (2-6)$$

上式的预测过程与卡尔曼滤波一致，其中 $Q(n)$ 是过程噪声协方差矩阵。可以通过 $H(s_{apr}(n))$ 将 $s_{apr}(n)$ 从笛卡尔坐标系转到球坐标系。

(2) 关联阶段

对于落入跟踪航迹关联门内的每个量测点，建立一个打分机制用于确定量测的归属。

$$B_{ij}^2 = \ln|C_{Gi}| + d_{ij}^2 \quad (2-7)$$

式中 $|C_{Gi}|$ 由航迹 i 的残差协方差矩阵确定，

$d_{ij}^2 = y_{ij}^T \text{inv}(C_{Gi}) y_{ij}$ ， y_{ij} 是量测 j 归属于航迹 i 的残差矢量。

量测 j 分配至拥有最高打分结果的航迹 i 。

(3) 未关联量测的处理

对无航迹关联的测量初始化新群跟踪，选择量测点为起始点并设群中心，将关联门内其余量测点加入群集并重置质心，完成聚类后对集群进行多个方面的评估，合格则创建跟踪对象并初始化离散矩阵，不合格则舍弃。

(4) 更新阶段

在完成基于关联门的量测点选取后，对跟踪航迹进行更新。具体过程如下：

(a) 对于每条航迹，对所关联到的量测值计算其均值 $\bar{u}(n)$ 。

(b) 计算新息矢量。

$$y(n) = \bar{u}(n) - H(s_{apr}(n)) \quad (2-8)$$

(c) 计算新息协方差矩阵。

$$C(n) = J_H(s_{apr}(n))P_{apr}(n)J_H^T(s_{apr}(n)) + R_c(n) \quad (2-9)$$

式中 R_c 表示群中心的测量误差协方差矩阵。

(d) 计算卡尔曼滤波增益 $K(n)$

$$K(n) = P_{apr}(n)J_H^T(s_{apr}(n))\text{inv}(C(n)) \quad (2-10)$$

(e) 计算后验状态矢量 $s(n)$

$$s(n) = s_{apr}(n) + K(n)y(n) \quad (2-11)$$

(f) 计算后验误差协方差矩阵 $P(n)$

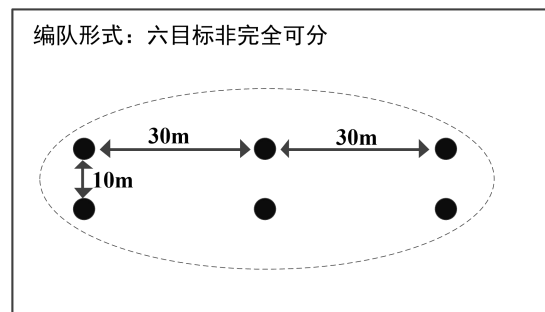
$$P(n) = P_{apr}(n) - K(n)J_H(s_{apr}(n))P_{apr}(n) \quad (2-12)$$

(5) 航迹维持阶段

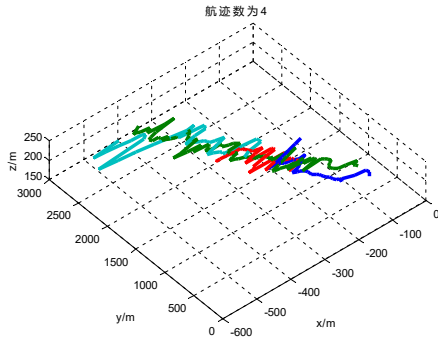
航迹维持阶段根据更新状态判定航迹更新或删除。定义航迹的三种状态，瞬态航迹准确起始，未必对应真实目标；稳态航迹可视作一个跟踪目标，其关联条件根据航迹的动/静态及位置而定；消失航迹为未关联量测时进入消失航迹序列。

4 算法验证

下图给出了由6架无人机组成的非完全可分群目标，呈“前3后3”模式排布，成员的左右距离约30m，前后距离约10m。在此编队下，雷达全程无法完全分辨出6个目标。



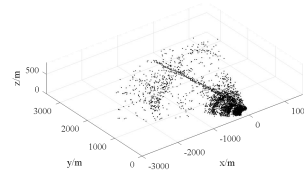
(a)6 机集群的群编队示意图



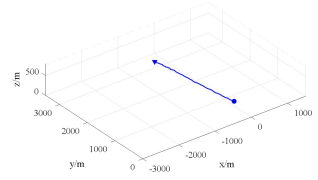
(b)雷达实际跟踪结果（三维）

图 2 非完全可分群目标的无人机编队示意和雷达实际跟踪效果

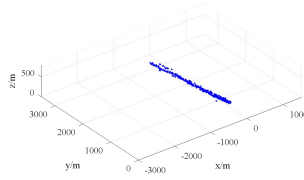
图 3 所示为采用群目标跟踪处理的结果。由于雷达的空间分辨能力有限，其输出的目标点迹数量小于真实群成员的数量，且点迹数量随时间（距离）动态变化，这种条件下，群整体跟踪算法仍然能够稳定地输出群跟踪航迹。相比于雷达实际跟踪情况，所采取的群整体跟踪策略避免了因群内目标之间的交叉关联导致的航迹扭曲甚至反复断批的现象，有力提升了目标稳定跟踪性能。



(a)点迹图



(b)航迹图



(c)群内成员

图 3 非完全可分群目标的点迹及群跟踪处理结果
(六无人机单群编队)

5 结语

本文针对不可分辨状态下集群目标跟踪问题，提出了基于量测点云聚类的群目标管道式跟踪算法，通过跟踪点云数据划分后的群中心，实现群跟踪航迹的稳定输出。仿真结果表明提出的算法能够在无法分辨出所有集群目标的情况下实现对群整体目标的稳定跟踪。

参考文献：

- [1] 恽鹏,郑世友,张世仓,许二帅.杂波干扰环境下的变分贝叶斯目标跟踪算法[J].计算机仿真.2024(11).
- [2] 滕明,侯亚威,李伟杰.基于椭圆随机超曲面模型 CPHD 滤波器的多扩展目标跟踪算法[J].现代雷达.2024(05).
- [3] 高乙月;蒋德富;刘铭;付伟.基于 SMC-PHD 滤波的显式航迹维持算法[J].计算机与现代化.2017(12).
- [4] 黄雷;郭雷.一种面向态势估计中分群问题的聚类方法[J].计算机应用.2006(05).
- [5] 马钰棠,孙鹏,张杰勇,闫云飞,赵亮.基于 MDk-DPC 的空中目标自动分群方法[J].北京航空航天大学学报.2024(10).
- [6] 龙真真,张策,吴伟胜,等.基于多帧数据的目标分群算法[J].计算机工程,2009(23).
- [7] 熊伟,顾祥歧,徐从安,等.多编队目标先后出现时的无先验信息跟踪方法[J].电子与信息学报,2020,(7).
- [8] 靳标,李聪,张贞凯.回波幅度信息辅助的群目标航迹起始方法[J].雷达学报,2020,(4).
- [9] 金元华,叶春茂,陈映,等.一种基于宽带雷达回波的航迹起始方法[J].系统工程与电子技术,2019,(1).
- [10] 耿文东.基于群目标几何中心的群起始算法研究[J].系统工程与电子技术,2008,(2).
- [11] Jain AK,Duin Robert PW,Mao JC,Statistical pattern recognition:A review.IEEE Trans.Actions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(1):4-37.