

回波幅度信息辅助的群目标航迹起始方法

靳标^{*①} 李聪^② 张贞凯^①

^①(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212003)

^②(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

摘要: 航迹起始是群目标跟踪的首要环节, 其性能好坏直接影响着目标跟踪航迹的质量。传统的群目标航迹起始方法仅利用目标的位置信息完成分群检测和等效量测求解等步骤, 没有充分利用回波幅度信息, 存在分群检测不理想、等效量测求解不准确等问题, 有可能引起失跟现象。针对此问题, 该文提出一种回波幅度信息辅助的群目标航迹起始方法。首先利用目标位置信息和幅度信息完成分群检测, 然后综合采用幅度加权和位置加权求解等效量测, 最后基于修正的逻辑法进行群目标航迹起始。该文方法在分群检测和求解等效量测等步骤充分利用了回波幅度信息, 不仅可以在集群数量未知的情况下正确划分群, 而且降低了失跟率, 提高了群目标的跟踪性能。仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 目标跟踪; 群目标; 航迹起始; 幅度信息; 聚类

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)04-0723-07

DOI: 10.12000/JR19088

引用格式: 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, 9(4): 723–729. doi: 10.12000/JR19088.

Reference format: JIN Biao, LI Cong, and ZHANG Zhenkai. Group target track initiation method aided by echo amplitude information[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(4): 723–729. doi: 10.12000/JR19088.

Group Target Track Initiation Method Aided by Echo Amplitude Information

JIN Biao^{*①} LI Cong^② ZHANG Zhenkai^①

^①(College of Electronics Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

^②(The School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Track initiation is the first important step in group target tracking, and it has a direct effect on the quality of the overall procedure. Traditional radar target tracking methods only utilize information about the target position to detect group numbers, but they do not use information relating to echo amplitude. Tracks are thus easily lost, as the numbers of detected groups and equivalent measurements are inaccurate. This paper proposes a group target track initiation method aided by echo amplitude information to ameliorate these problems. In this respect, target position and echo amplitude information is used to detect the number of target groups, and equivalent measurements are then computed using amplitude weighting and position weighting. Echo amplitude information is employed in the step of detecting group target numbers and computing the equivalent measurements, and group target tracks are subsequently initialized using the modified logic method. The proposed method can be used to correctly detect the number of target groups when the number is previously unknown. Furthermore, the method reduces the rate of track loss and improves the performance of group target tracking. The effectiveness of the proposed method is validated by the simulation results.

Key words: Target tracking; Group target; Track initiation; Amplitude information; Cluster

收稿日期: 2019-09-27; 改回日期: 2019-12-17; 网络出版: 2020-01-20

*通信作者: 靳标 biaojin@just.edu.cn *Corresponding Author: JIN Biao, biaojin@just.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701416, 61871203), 中国博士后科学基金(2017M613214)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701416, 61871203), The Project funded by China Postdoctoral Science Foundation (2017M613214)

责任编辑: 王海鹏 Corresponding Editor: WANG Haipeng

1 引言

多目标跟踪一直是目标跟踪领域中的热点和难点问题之一^[1-3]。当多个目标的空域分布范围较小且运动特征相近时,多目标跟踪的问题便转化成了群目标跟踪,如分裂的空间碎片^[4-6]、飞机编队^[7]、迁徙的鸟群和迁飞的昆虫种群等^[8]。在群目标跟踪的过程中,雷达视野内的目标个体一般都比较小,并且受限于雷达的分辨率和工作波长,群内个体目标往往是不可分辨的^[9]。在这种情况下再试图对群内所有个体进行跟踪是不现实的,而且在某些实际应用中也是不必要的。因此,需要以“群目标”为对象对集群的整体运动趋势进行跟踪。

群目标跟踪的首要环节是航迹起始,具体是指进入稳定跟踪之前的航迹确认过程。群目标的航迹起始,关键步骤在于分群检测和求解等效量测,即所谓的群起始^[10]。常用的群起始算法包括k-均值聚类 and 集群引晶等^[11]。k-均值聚类算法需要预先已知集群数量,收敛缓慢,而且性能受噪声的影响较大。集群引晶算法则引入门限值进行判别,不需要已知集群数量,但起始收敛缓慢、计算量大,并且要求的前提条件较为苛刻。文献^[10]提出了一种基于群目标几何中心的航迹起始算法,首先根据监视区域内多个目标回波的空间距离进行分群检测预处理,在完成分群检测后再求解每个群目标的几何中心,然后确定该门限区域内的各个目标回波相对于几何中心的权值,并据此构建出等效量测。文献^[10]的算法克服了k-均值聚类和集群引晶算法的缺点,但由于其仅利用目标位置加权求解等效量测,适用于群内个体目标回波幅度比较均匀的群目标,当个体目标的回波幅度随机起伏较严重时该方法将不再适用。

事实上,雷达数据录取终端所能提取的目标点迹信息除了空间位置参数外,还包括多普勒和回波幅度等信息,充分利用这些信号层的目标信息辅助雷达数据处理,将有助于提高目标跟踪算法的性能和航迹质量。基于这一思想,本文提出一种回波幅度信息辅助的群目标航迹起始算法。首先综合利用目标位置信息和幅度信息完成分群检测,然后综合采用幅度加权和位置加权求解等效量测,最后基于修正的逻辑法进行群目标的航迹起始。本文方法充分利用了目标的幅度信息,不仅可以在集群数量未知的情况下准确划分群,而且降低了失跟率,提高了跟踪航迹的质量。仿真结果验证了该方法的有效性。

2 问题描述

不失一般性,本文以迁飞性的昆虫种群为例描述群目标跟踪模型。图1为昆虫种群的空间密度分

布情况。如图所示,椭圆区域内的昆虫种群密度较大,这些点的目标回波幅度也比较强,实际情况中要重点对椭圆区域内的目标点迹进行跟踪。本节给出群目标状态模型与观测模型。

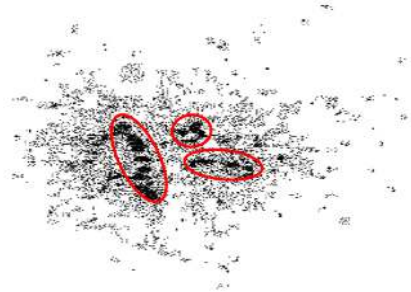


图 1 昆虫种群空间密度分布场景

Fig. 1 Spatial density distribution of insect population

2.1 群目标状态模型

群目标与点目标的区别在于群目标占据了一定的空间,需要有一个状态参量对群目标的形状进行刻画。本文将群目标的形状以椭圆形式建模,利用二维对称正定矩阵表示群目标整体形状的扩展状态。群目标的形状可以用式(1)的数学表达式进行刻画^[12]

$$(y - \mathbf{H}_{k+1|k}^j \mathbf{x}_k^j)^T \mathbf{X}_k^{-1} (y - \mathbf{H}_{k+1|k}^j \mathbf{x}_k^j) = 1 \quad (1)$$

其中, y 表示椭圆表面上的点, \mathbf{X}_k 为一对称正定矩阵,表示目标形状的扩展状态, $\mathbf{H}_{k+1|k}^j$ 是量测矩阵, \mathbf{x}_k^j 是群目标运动状态向量, \mathbf{T} 表示矩阵转置。扩展状态 \mathbf{X}_k 的演变过程可表示为^[13]

$$p(\mathbf{X}_k | \mathbf{X}_{k-1}) = \mathcal{W}(\mathbf{X}_k; \delta_{k|k-1}, \mathbf{X}_{k-1} / \delta_{k|k-1}) \quad (2)$$

其中, $\delta_{k|k-1}$ 是一个标量, $\mathcal{W}(\mathbf{Y}; a, \mathbf{C})$ 为随机矩阵 \mathbf{Y} 的Wishart分布的概率密度函数,定义为

$$\mathcal{W}(\mathbf{Y}; a, \mathbf{C}) = c^{-1} |\mathbf{C}|^{-\frac{1}{2}a} |\mathbf{Y}|^{\frac{1}{2}(a-d-1)} \cdot \text{etr}\left(-\frac{1}{2}\mathbf{C}^{-1}\mathbf{Y}\right) \quad (3)$$

其中, c 是归一化因子, $a > d-1$, $\text{etr}(\cdot)$ 表示 $\exp(\text{trace}(\cdot))$ 。

第 j ($j = 1, 2, \dots, J$) 个群目标的等效量测在二维平面内的运动状态模型为

$$\mathbf{x}_{k+1}^j = \mathbf{F}_{k+1|k}^j \mathbf{x}_k^j + \mathbf{w}_k^j \quad (4)$$

其中, 群目标运动状态向量 $\mathbf{x}_k^j = [x_k^j \ \dot{x}_k^j \ y_k^j \ \dot{y}_k^j]^T$, 包括第 j 个群目标在 x 方向上的位置 x_k 和速度 \dot{x}_k , 以及在 y 方向上的位置 y_k 和速度 \dot{y}_k 。状态转移矩阵为

$$\mathbf{F}_{k+1|k}^j = \mathbf{I}_2 \otimes \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, \mathbf{I}_2 为二维单位矩阵, \otimes 代表Kronecher积, Δt 为观测间隔。状态噪声 $\mathbf{w}_k^j \sim N(0, \mathbf{Q}_k^j \otimes \mathbf{X}_k^j)$, 状态噪声协方差包括运动状态协方差 \mathbf{Q}_k^j 和扩展状态 \mathbf{X}_k^j 两部分, 表示群目标状态不仅受运动状态的影响, 还受扩展状态 \mathbf{X}_k^j 的影响。运动状态协方差矩阵为^[14]

$$\mathbf{Q}_k^j = \mathbf{I}_2 \otimes q_k^j \begin{bmatrix} \Delta t^3/3 & \Delta t^2/2 \\ \Delta t^2/2 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, q_k^j 为状态噪声强度。

2.2 群目标观测模型

将雷达在 k 时刻接收到的观测点迹集合表示为 \mathbf{Z}_k 。假设雷达位于原点位置并保持静止, $\mathbf{Z}_k = \{\mathbf{z}_k^i\}_{i=1}^{n_k}$ 表示 k 时刻的 n_k 个量测组成的集合。每一个观测向量 \mathbf{z}_k 都包含径向距离 r_k , 方位角 θ_k 两个位置参量和幅度参量 A_k , 即

$$\mathbf{z}_k = [\theta_k \quad r_k \quad A_k]^T \quad (7)$$

观测模型为

$$\mathbf{z}_{k+1}^i = \mathbf{H}_{k+1|k}^i \mathbf{x}_k^i + \mathbf{v}_k^i \quad (8)$$

其中, 量测矩阵为

$$\mathbf{H}_{k+1|k}^i = \mathbf{I}_2 \otimes [1 \quad 0 \quad 0] \quad (9)$$

量测噪声 $\mathbf{v}_k^i \sim N(0, \lambda \mathbf{X}_k^i + \mathbf{R}_k^i)$, 其中 λ 为一个标量, 以描述扩展状态 \mathbf{X}_k^i 的作用大小。 \mathbf{R}_k^i 为真实量测噪声协方差, 即

$$\mathbf{R}_k^i = \begin{bmatrix} \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, 方位角 θ_k 观测噪声方差为 σ_θ^2 ; 径向距离 r_k 的观测噪声方差为 σ_r^2 。在运动状态参量 \mathbf{x}_k 和群目标形状参量 \mathbf{X}_k 相互独立的条件下, 群目标状态的似然函数可表示为^[15,16]

$$p[\mathbf{Z}_k | n_k, \mathbf{x}_k, \mathbf{X}_k] \propto N(\mathbf{z}_k; \mathbf{H}_{k+1|k} \mathbf{x}_k, \mathbf{X}_k/n_k) \cdot \mathcal{W}(\mathbf{Z}_k; n_k - 1, \mathbf{X}_k) \quad (11)$$

3 幅度信息辅助的群目标航迹起始方法

本部分首先利用聚类算法完成分群检测, 然后通过群内目标幅度加权和距离加权求解等效量测, 最后利用等效量测起始航迹。具体算法流程如图2所示。

3.1 分群检测

首先设定目标幅度门限, 大于门限的幅值点的个数为集群数量的初始估计 L , 通过 k -均值聚类算法得到子群数据和子群中心 O_k^l , 完成粗划分群。

定义 k 时刻 l 个子群中心与第 j 个子群中心的距离为^[17-19]

$$\Delta R_{lj} [O_k^l, O_k^j] = |O_k^l - O_k^j| \quad (12)$$

那么, 子群中心之间的空间距离判别矩阵为

$$S_{lj} = \begin{bmatrix} 0 & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1L} \\ \delta_{21} & 0 & \cdots & \delta_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{L1} & \delta_{L2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (13)$$

其中

$$\delta_{lj} = \begin{cases} 0, \Delta R_{lj} [O_k^l, O_k^j] < M \\ 1, \Delta R_{lj} [O_k^l, O_k^j] > M \end{cases} \quad (14)$$

其中, M 为子群的距离门限。由于 $\Delta R_{lj} [O_k^l, O_k^j] = \Delta R_{jl} [O_k^j, O_k^l]$, 即 $\delta_{lj} = \delta_{jl}$, 所以判别矩阵为上三角矩阵。判别矩阵元素为0对应的两个子群合并, 并得到精确的集群数量, 然后再次通过 k -均值聚类算法精确划分子群, 并求出子群中心, 从而完成分群检测。具体的算法流程如图3所示。可见, 分群检测大大减少了整体航迹的数量, 降低了计算机的存储量和计算负担。

3.2 等效量测形成

分群检测之后, 采取距离加权和幅度加权的方法求解群目标的等效量测。对于第 i 个子群中心, 群内第 i 个量测的距离权值为

$$\eta_k^i = \frac{R_i - \bar{R}}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})} \quad (15)$$

第 i 个量测的幅度权值为

$$\mu_k^i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (16)$$

那么等效量测可表示为



图2 本文算法的流程

Fig. 2 The flow of the algorithm in this paper

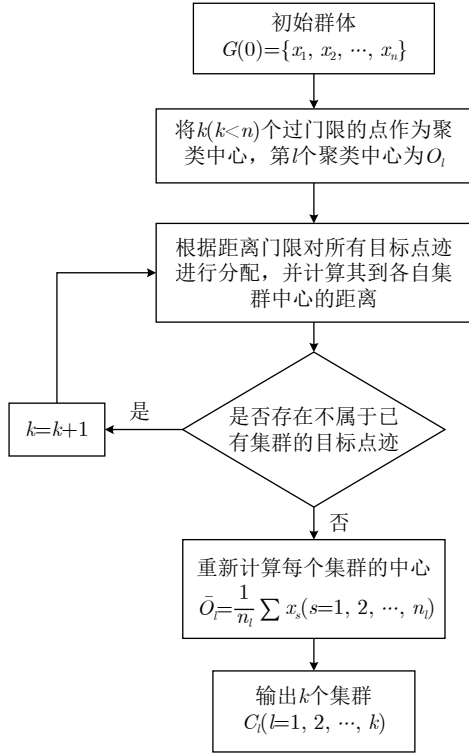


图3 分群检测的具体流程

Fig. 3 The specific process of cluster detection

$$z_k^e = \sum_{i=1}^n \left(\alpha \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} + \beta \frac{R_i - \bar{R}}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})} \right) z_k^i \quad (17)$$

其中, A_i 和 R_i 分别为群内第 i 个目标的幅度值和距离值, \bar{R} 为集群中心的距离值, z_k^i 为第 i 个原始量测, α 和 β 分别为幅度和距离的权重, 并且 $\alpha + \beta = 1$ 。

3.3 航迹起始

航迹起始采用修正的逻辑法^[20]进行, 具体步骤如下:

步骤1 用第1次扫描求得的群目标等效量测为航迹根节点, 用目标最大速度建立初始相关波门, 对落入相关波门的第2次扫描得到的等效量测建立可能航迹;

步骤2 对每个航迹进行外推, 以外推点为中心, 后续相关波门的大小通过航迹外推误差协方差计算得到, 将落入波门内的等效量测与外推点进行关联;

步骤3 如果后续的波门内没有等效量测, 则删除此航迹, 继续步骤2, 直到形成稳定的航迹。

4 仿真实验与结果分析

3个群目标分别为随机生成的100个高斯分布的点迹集合, 其中心位置均值分别为 $p_1=[55000 \text{ m}, 55000 \text{ m}]$, $p_2=[53500 \text{ m}, 53500 \text{ m}]$, $p_3=[52000 \text{ m},$

52000 m], 群中目标点迹幅度的概率密度函数服从莱斯分布^[8]。子群之间的距离门限为1550 m, 航迹起始门限为4。仿真实验分别从分群检测、求解等效量测和航迹起始成功率等方面进行对比。为了计算航迹起始的成功率, 对每条已起始条航迹求其后5个周期内的群目标中心位置估计均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE), 如果RMSE小于100 m即为航迹起始成功, 如果大于100 m则判定为不成功。目标 j 位置估计的均方根误差定义为

$$\sigma_r^j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{k|k}^{j,i} - x_k^j)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{k|k}^{j,i} - y_k^j)^2} \quad (18)$$

其中, (x_k^j, y_k^j) 为 k 时刻目标 j 的真实位置, $(x_{k|k}^{j,i}, y_{k|k}^{j,i})$ 为第 i 次Monte-Carlo实验目标 j 的位置估计值, N 为Monte-Carlo实验次数, 这里 N 取为500。

图4为量测空间点迹的分布图。从图中可以看出3个间距较近的集群, 群内部没有固定的几何结构。图5为仅利用位置信息分群后的态势图, 利用 k -均值聚类算法后得到5个集群。图6为利用幅度信息辅助后再次分群的态势图, 其中幅度权值 $\alpha = 0.2$ 和距离 $\beta = 0.8$ 。由图可知分群后得到3个群,

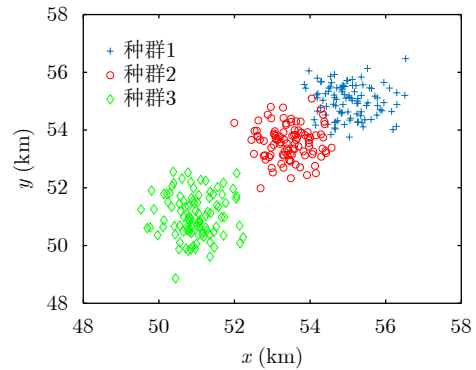


图4 量测点迹空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of measuring point trace

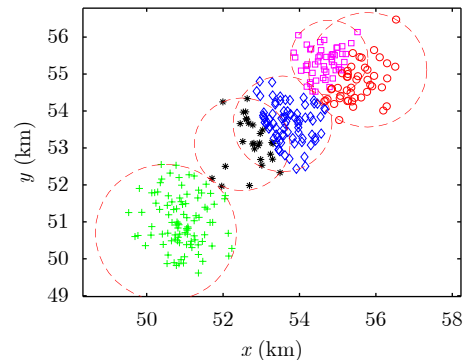


图5 基于位置信息的分群结果

Fig. 5 The clustering result based on location information

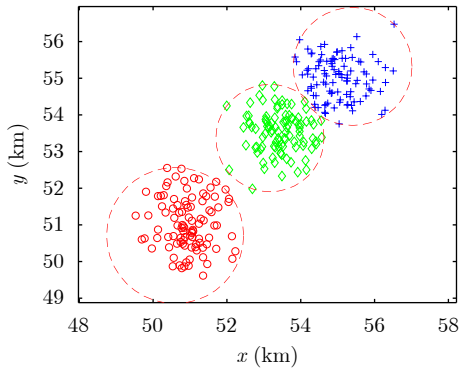


图6 幅度信息辅助的分群结果

Fig. 6 The clustering result aided by echo amplitude information

很明显幅度在分群过程中起到了关键作用。图7为幅度距离加权形成的等效量测与群几何中心为等效量测的对比图，二者空间位置有明显的差别，这对后续是否能够稳定跟踪有很大影响。面向工程应用的一个实际问题是幅度、距离权值的分配问题。针对不同的幅值观测场景，设置恰当的权值比例将有利于正确起始航迹和稳定跟踪。图8为以种群1为例，不同权值比例形成的等效量测航迹起始对比图，另外两个种群的对比结果相似，这里予以省略。

从图8中可以看出，当幅度权值较大时，航迹明显偏离种群1整体的空间位置。这是因为量测幅值个别点有较大差异，在幅度未知的条件下求解等效量测，会对幅度权值依赖过多，将有可能导致目标航迹偏离真实航迹，从而影响后续的稳定跟踪。可见幅度的权重不能太大，实际中应该以距离权重为主，幅度权重为辅。表1对比了幅度、距离权值不同时航迹起始的成功率。针对本文的仿真场景，幅度权值为0.2，距离权值为0.8的情况下，航迹起

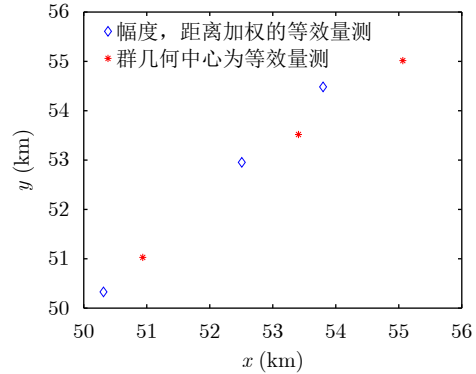


图7 等效量测对比

Fig. 7 Equivalent measurement comparison

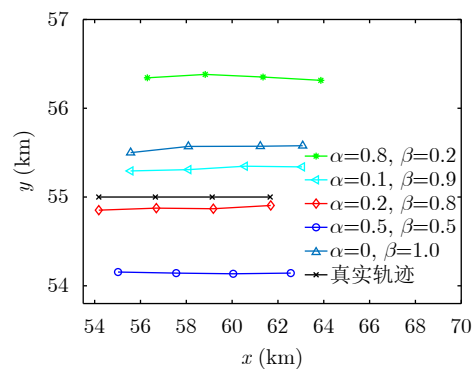


图8 不同权值大小时的起始航迹对比

Fig. 8 Comparison of initial tracks with different weights

始成功率最高。而幅度权值为0.8，距离权值为0.2时，航迹起始成功率只有80%。当幅度权值为0.1，距离权值为0.9时，由于求解等效量测幅度作用小，导致此时等效量测不准确，航迹起始成功率反而低一些。因此在实际工程应用中还需根据观测场景，来合理分配二者的权值。

表1 幅度、距离不同权值下航迹起始成功率

Tab. 1 The success rate of track start under different weights of amplitude and distance

	$\alpha = 0.8, \beta = 0.2$	$\alpha = 0.5, \beta = 0.5$	$\alpha = 0.2, \beta = 0.8$	$\alpha = 0.1, \beta = 0.9$	$\alpha = 0, \beta = 1.0$
航迹起始成功率(%)	80	93	98	95	89

5 结束语

传统的群目标航迹起始算法仅利用目标的位置信息完成分群检测和求解等效量测，存在分群检测不理想，等效量测求解不准确等问题。针对此问题，本文提出了一种幅度信息辅助的群目标航迹起始方法。该方法综合利用目标的位置和幅度信息，可以在集群数量未知的情况下完成分群检测，并利用目标距离和幅度加权求解每个群目标的等效量测，最终实现群目标的稳定航迹起始。该方法相对于仅利用位置信息的航迹起始方法，起始成功率更高，更利于后续的目标跟踪。

参考文献

- [1] NIEDFELDT P C and BEARD R W. Convergence and complexity analysis of recursive-RANSAC: A new multiple target tracking algorithm[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(2): 456-461.
- [2] ÚBEDA-MEDINA L, GARCÍA-FERNÁNDEZ Á F, and GRAJAL J. Adaptive auxiliary particle filter for track-before-detect with multiple targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(5): 2317-2330. doi: 10.1109/TAES.2017.2691958.
- [3] ZHU Yun, WANG Jun, and LIANG Shuang. Efficient joint probabilistic data association filter based on Kullback-

- Leibler divergence for multi-target tracking[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(10): 1540–1548.
- [4] VIVONE G and BRACA P. Joint probabilistic data association tracker for extended target tracking applied to X-band marine radar data[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(4): 1007–1019. doi: [10.1109/JOE.2015.2503499](https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2503499).
- [5] LIAN Feng, HAN Chongzhao, LIU Weifeng, *et al.* Unified cardinalized probability hypothesis density filters for extended targets and unresolved targets[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(7): 1729–1744. doi: [10.1016/j.sigpro.2012.01.009](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.01.009).
- [6] CAO Xianbin, JIANG Xiaolong, LI Xiaomei, *et al.* Correlation-based tracking of multiple targets with hierarchical layered structure[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(1): 90–102. doi: [10.1109/TCYB.2016.2625320](https://doi.org/10.1109/TCYB.2016.2625320).
- [7] 王聪, 王海鹏, 何友, 等. 基于ICP的稳态部分可分辨编队目标精细跟踪算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(6): 1123–1131.
WANG Cong, WANG Haipeng, HE You, *et al.* Refined tracking algorithm for steady partly resolvable group targets based on ICP[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(6): 1123–1131.
- [8] 方琳琳, 周超, 王锐, 等. 昆虫目标雷达散射截面特征辅助跟踪算法[J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 598–605. doi: [10.12000/JR19067](https://doi.org/10.12000/JR19067).
FANG Linlin, ZHOU Chao, WANG Rui, *et al.* RCS feature-aided insect target tracking algorithm[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(5): 598–605. doi: [10.12000/JR19067](https://doi.org/10.12000/JR19067).
- [9] 封洪强. 雷达在昆虫学研究中的应用[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 1–13. doi: [10.3969/j.issn.0529-1542.2011.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0529-1542.2011.05.001).
FENG Hongqiang. Applications of radar in entomological research[J]. *Plant Protection*, 2011, 37(5): 1–13. doi: [10.3969/j.issn.0529-1542.2011.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0529-1542.2011.05.001).
- [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, 30(2): 269–272. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.02.019](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.02.019).
GENG Wendong. Study of group-initialization method based on group-target center of geometry[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(2): 269–272. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.02.019](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.02.019).
- [11] 周大庆, 耿文东, 倪春雷. 基于编队目标重心的航迹起始方法研究[J]. 无线电工程, 2010, 40(2): 32–34. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2010.02.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2010.02.011).
ZHOU Daqing, GENG Wendong, and NI Chunlei. Study of track initiation method based on barycenter of formation target[J]. *Radio Engineering of China*, 2010, 40(2): 32–34. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2010.02.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2010.02.011).
- [12] 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. doi: [10.1109/TAES.2008.4655362](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4655362).
- [13] 韩玉兰, 朱洪艳, 韩崇昭. 采用随机矩阵的多扩展目标滤波器[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 98–104. doi: [10.7652/xjtuxb201507017](https://doi.org/10.7652/xjtuxb201507017).
HAN Yulan, ZHU Hongyan, and HAN Chongzhao. A multi-target filter based on random matrix[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(7): 98–104. doi: [10.7652/xjtuxb201507017](https://doi.org/10.7652/xjtuxb201507017).
- [14] JIN Biao, JIU Bo, SU Tao, *et al.* Switched Kalman filter-interacting multiple model algorithm based on optimal autoregressive model for manoeuvring target tracking[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(2): 199–209.
- [15] GNING A, MIHAYLOVA L, MASKELL S, *et al.* Ground target group structure and state estimation with particle filtering[C]. The 2008 11th International Conference on Information Fusion, Cologne, Germany, 2008: 1–8.
- [16] LI Yunxiang, XIAO Huaitie, SONG Zhiyong, *et al.* A new multiple extended target tracking algorithm using PHD filter[J]. *Signal Processing*, 2013, 93(12): 3578–3588. doi: [10.1016/j.sigpro.2013.05.011](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.05.011).
- [17] LAN Jian and LI X R. Extended-object or group-target tracking using random matrix with nonlinear measurements[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(19): 5130–5142. doi: [10.1109/TSP.2019.2935866](https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2935866).
- [18] MIHAYLOVA L, CARMÍ A Y, SEPTIER F, *et al.* Overview of Bayesian sequential Monte Carlo methods for group and extended object tracking[J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 25: 1–16. doi: [10.1016/j.dsp.2013.11.006](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2013.11.006).
- [19] DANIYAN A, LAMBOTHRAN S, DELIGIANNIS A, *et al.* Bayesian multiple extended target tracking using labeled random finite sets and splines[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(22): 6076–6091. doi: [10.1109/TSP.2018.2873537](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2873537).
- [20] 何友, 修建娟, 关欣. 雷达数据处理及应用[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 108–174.
HE You, XIU Jianjuan, and GUAN Xin. *Radar Data Processing with Applications*[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 108–174.

作者简介



靳 标(1986-), 男, 山西翼城人, 博士, 江苏科技大学电信学院副教授, 研究方向为雷达信号检测与目标跟踪, 认知雷达发射波形设计等。

E-mail: biaojin@just.edu.cn



李 聪(1994-), 男, 河北唐山人。现为西安交通大学电子与信息学部硕士研究生。主要研究方向为阵列信号处理, 智能天线系统。

E-mail: a1870692245@163.com



张贞凯(1982-), 男, 江苏徐州人, 博士, 副教授, 2013年在南京航空航天大学电子信息工程学院获得博士学位, 现担任江苏科技大学电子信息学院副教授, 主要研究方向为雷达通信一体化技术、雷达信号处理、水下目标定位等研究, 目前已发表论文78篇。

E-mail: zhangzhenkai@just.edu.cn