

引用格式:杜明洋,毕大平,王树亮.群目标跟踪关键技术研究进展[J].电光与控制,2019,26(4):59-65,90. DU M Y, BI D P, WANG S L. Advances in key technologies of group target tracking[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4):59-65, 90.

群目标跟踪关键技术研究进展

杜明洋, 毕大平, 王树亮
(国防科技大学电子对抗学院,合肥 230037)

摘要: 群目标具有结构固定、运动模式特殊等特点,并且数量规模较大、空间分布密集、互相遮挡现象严重,采用传统的多目标跟踪算法对其进行跟踪会出现错误关联甚至失跟的现象。介绍了3种比较典型的群目标跟踪思路,即中心类跟踪算法、基于随机有限集的算法以及群扩展状态的估计算法,对目前的研究成果进行了分析和总结。最后,基于现有理论以及相近领域先进技术的发展,讨论了群目标跟踪的发展趋势。

关键词: 群目标; 目标跟踪; 群质心; 随机有限集; 扩展状态

中图分类号: V243.2; TN953 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.012

Advances in Key Technologies of Group Target Tracking

DU Ming-yang, BI Da-ping, WANG Shu-liang

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: Group targets have fixed structure, particular motion patterns, large quantity, dense spatial distribution and serious mutual occlusion. Traditional multi-target tracking algorithms may lead to wrong data association and even target loss. Three kinds of typical research ideas for group target tracking are introduced, including the centroid group tracking algorithm, the tracking algorithm based on the random finite set and the extended state tracking algorithm. Then, the research achievements at present are analyzed and summarized. Finally, based on the existing theory and the development of advanced technologies in similar research fields, the development trends of group target tracking are discussed.

Key words: group target; target tracking; centroid of group; random finite set; extended state

0 引言

近年来,对于数量较多、运动存在协同交互的一类目标的跟踪引起了学者的广泛兴趣。主要涉及气象学、生物药理学、神经科学、态势感知、视频监控以及军事应用的相关领域^[1-4]。与传统的多目标不同的是,该类型的目标处于较强的背景噪声中,并且空间分布密集,互相遮挡的现象严重,比较典型的例如迁徙的鸟群、监控录像中的行人、低空的飞机编队等。

传统的多目标跟踪算法对上述目标的跟踪存在一定的局限性。1971年文献[5]提出的最近邻(Nearest Neighbor, NN)算法只适用于稀疏回波环境中跟踪非机动目标;1972年文献[6]提出的概率数据关联(Probabilistic Data Association, PDA)算法对于存在航迹交叉的目标,关联效果不好;针对此,文献[7]提出了联合概率

数据关联(Joint Probabilistic Data Association, JPDA)算法,该算法是目前公认的对密集杂波下的多目标跟踪效果最理想的最优数据关联算法之一^[8],但随着目标数的增长,确认矩阵的拆分会带来组合爆炸;为此,许多学者研究了基于JPDA的简化算法^[9-11];1979年文献[12]将每个可能航迹看作一个假设,提出了多假设跟踪(Multiple Hypothesis Tracking, MHT)算法,该算法过多依赖先验参数,且假设增多会导致计算量增大。

针对上述问题,相关学者提出了“群”的概念。文献[13]将群的特性表述为目标间距满足一定的约束条件,在较长的时间内目标的空间位置相对固定;文献[14]提出,群的典型特点在于其保持相对确定的运动模式,并将群目标分为大群和小群两类。大群是指目标较多、较难区分、传感器无法得到所有个体的信息和特征的群;小群是指成员较少、可以对其个体间的交互及内部关系进行建模的群。从上述两种表述可以看出,群中目标数量多、间距小致使无法对群中的所有个体进行跟踪;群的内部空间位置相对固定说明从节约资源的角度可以对群的整体进行跟踪。因此,近年来

收稿日期:2018-04-25 修回日期:2019-01-20

基金项目:国家自然科学基金(61671453)

作者简介:杜明洋(1994—),男,安徽蚌埠人,硕士,研究方向为多目标跟踪及雷达信号处理。

有学者提出可以从群的质心运动状态和内部结构关系等方面跟踪群目标。本文梳理了目前群目标跟踪领域较为热点的研究方向,介绍其研究近况,并对其未来的发展趋势进行展望。

1 中心类群目标跟踪

1.1 估计群的整体状态

1986年文献[15]将群目标跟踪分为中心群和编队群两种跟踪。中心群跟踪(Centroid Group Tracking, CGT)算法在20世纪70年代由FRAZIER和SCOTT提出,算法流程详见图1。

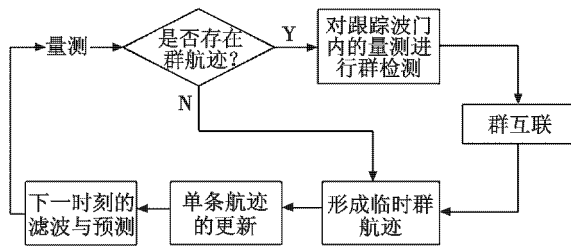


图1 CGT算法流程图

Fig. 1 Flow chart of CGT algorithm

该算法利用Kalman滤波器直接对群中心进行跟踪,是最直接的群目标跟踪算法,实时性较好^[16]。然而,CGT算法同样存在着局限性,以跟踪地面车队为例,可能出现由于山体或建筑物的遮挡而量测丢失的情况(如图2所示),此外,还有密集背景杂波等因素,都会影响确认波门内量测的空间分布,造成跟踪效果恶化。为了解决杂波的干扰,文献[17]采用聚类的思想改进CGT算法,将群内的波动考虑到群中心的计算中,有效提高了传统CGT算法的精度。

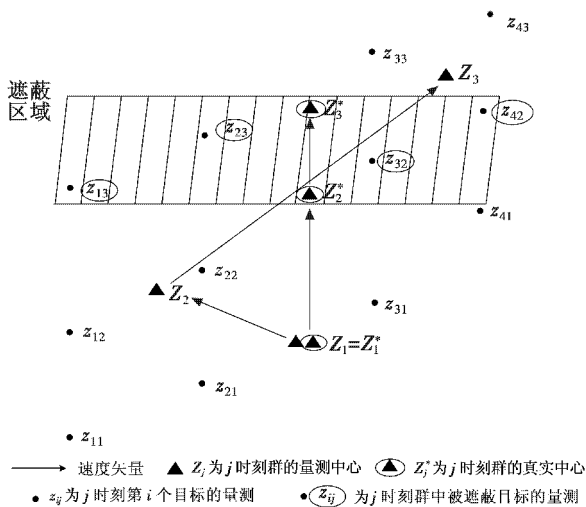


图2 带有遮蔽区域的群目标跟踪

Fig. 2 Group target tracking with shielded area

为了实现量测丢失时群中心的准确估计,FLAD和TAENZER提出了编队群跟踪(Formation Group Tracking, FGT)算法,该算法利用估计的中心航迹与编队成员的相对位置建立航迹文件,当量测丢失时,用目标的预测值代替丢失的量测值来估算群的中心和速度。FGT算法如图3所示。

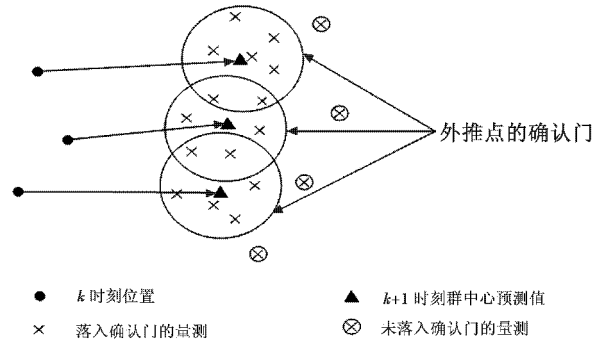


图3 FGT算法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FGT algorithm

CGT算法与FGT算法是目前群目标跟踪最常用的方法^[18],将其与多模型算法相结合,可以实现对群目标加(减)速、转弯等机动的跟踪^[19]。

1.2 基于等效量测的群质心跟踪

耿文东等提出通过计算每一候选回波来自目标的后验概率,加权得到包含所有群内成员综合信息的等效量测,利用等效量测更新群目标运动状态,并将群目标跟踪的研究思路概括如下^[13]:

- 1) 如图4所示,将难以分辨的密集多目标集群转化为较小的密集多目标集群和可分辨单目标,将“密集”转化为“稀疏”问题;
- 2) 将不可分辨密集多目标群看作一个整体;
- 3) 将可分辨单目标作为稀疏多目标跟踪。

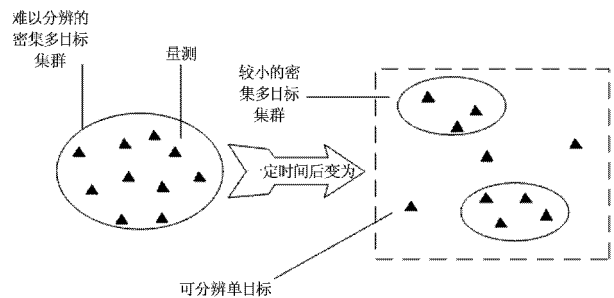


图4 密集多目标转化为稀疏多目标

Fig. 4 Dense multi-target transformed into sparse multi-target

耿文东等通过借鉴编队目标跟踪与多目标跟踪的构成要素与信息处理的架构,总结出群目标跟踪的基本架构如图5所示。

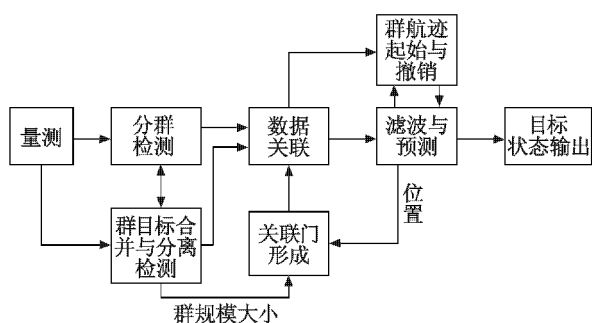


图5 群目标跟踪架构

Fig. 5 Framework of group target tracking

等效量测的计算方法可大致分为两类:1) 直接计算编队的几何中心、质心、重心作为等效量测^[20];2) 间接方法,基于回波的幅度信息^[21],或是通过计算波门内确认量测相对几何中心的权值,然后对其进行加权作为等效量测^[22]。在此基础上,文献[23-26]研究了群的精确航迹起始。文献[27]设计了一整套判断流程,以描述群特有的分裂、合并等问题。文献[28]在已有的模式空间基础上,进一步提出了利用群的位置、指向、机动特征和航迹历史检测群合并与分离机动的新方法。

估计群中心运动状态是解决群内目标无法分辨的有效方法,对群的整体进行跟踪有利于分析复杂环境中群目标的综合态势,并且,该类算法结构简单,运算量相对较小,实时性较强。然而,在实际军事应用中,对于弹道导弹等威胁等级高的群目标,需要对群内目标进行精细跟踪,因此该类算法存在一定的局限性。

2 基于随机有限集理论的群目标跟踪

为了减小传统数据关联算法在跟踪密集多目标时的运算量,并实现未知数目的多目标跟踪,美国洛克希德·马丁公司的 MAHLER 提出了利用随机集跟踪目标的方法,基于一阶贝叶斯滤波器,将概率假设密度(Probability Hypothesis Density, PHD)滤波算法扩展到群的运动和信息的情况。该算法将多目标状态空间的操作转换到单目标状态空间并且避免了数据关联过程,尤其适用于一些关联过程相对复杂的非传统意义上的多目标跟踪问题,如群目标跟踪、海面监视等。近年来的研究成果主要体现在改进 PHD 滤波的执行算法和目标数量估计等方面。

2.1 滤波执行算法

由于 PHD 滤波更新过程中存在着复杂的集合积分,相关学者试图采取混合高斯和粒子滤波等方法作为 PHD 的执行方法。针对线性高斯噪声情况,推导出了高斯混合(Gaussian Mixture, GM) PHD 的解析式^[29],并将其扩展到非线性模型^[30-31]。针对非线性和非高斯量

测模型问题,文献[32]利用序贯蒙特卡罗(Sequential Monte Carlo, SMC)法产生带有权值的粒子,对 PHD 进行逼近,提出了 SMC-PHD 滤波。箱式粒子(Box-Particle) PHD 滤波算法能够解决跟踪过程中由随机性、集理论和关联的不确定性带来的误差。与 SMC-PHD 相比,在不影响跟踪精度的前提下,减少了粒子数,提高了算法的实时性^[33-35]。文献[36]基于 SMC-PHD 滤波,提出利用 GM 拟合重采样后的粒子分布,利用期望最大化(Expectation Maximum, EM)和 MCMC 算法估计模型参数,解决了目标部分可分辨情形下的跟踪问题。为了提升跟踪性能,仅跟踪多个独立的个体具有一定的局限性。于是文献[37]利用 MCMC(Markov Chain Monte Carlo)算法,通过研究蚁群中各目标间的相互作用关系,建立了隐马尔可夫模型以描述相互保持一定距离的蚁群运动,成功地对实际拍摄的蚁群进行了跟踪实验,促进了包含相互作用的多目标跟踪技术的发展。

2.2 目标数量估计

PHD 滤波只是对多目标后验强度的一阶近似,丢失了高阶的信息,在低信噪比的环境下估计精度不稳定;此外,PHD 滤波只用一个泊松分布表示未知的势分布,当目标数量规模较大时,对目标数量的估计协方差较大。基于此,文献[38-39]将目标数量的高阶信息加入 PHD 滤波,提出了势概率假设密度(Cardinalized PHD, CPHD),提高了对目标数量的估计精度。对比 PHD 与 CPHD 可以发现,二者计算复杂度与目标数量均为线性关系,其中,PHD 为一阶线性,CPHD 为三阶线性,并且后者估计误差更小、对目标数量的变化响应更慢,能够获得更稳定、更精确的势估计^[40]。对 CPHD 滤波算法的改进主要分为两类。第 1 类是针对不同环境提高算法的精确性,如文献[41]推导了在杂波率和检测轮廓未知情形下的 CPHD 滤波;文献[42-43]提出了一类量测驱动算法以解决标准 CPHD 滤波算法目标新生强度(Target Birth Intensity)未知的问题,但没有考虑数据关联;文献[44]在此基础上给出了 TBI-CPHD 的 GM 实现,采用量测标签的策略进行数据关联,采用高斯元标签进行航迹保持,提出了一种航迹管理的方法,提高了运算效率。第 2 类是针对不同类型目标提高算法的适应性,如文献[45]提出了带有衍生目标模型的 CPHD 滤波器;文献[46]将 CPHD 滤波与多模型理论结合,并进行了 GM 实现,给出了多机动目标的多模型 GM-CPHD 滤波;文献[47]根据单个不可分辨目标似然函数模型,推导得到了杂波环境下的多个不可分辨目标的 CPHD 滤波器。

PHD 滤波算法由于避免了数据关联问题,并且能够实现目标的联合检测与跟踪,所以适用于群目标

这类复杂的多目标情形^[42-44]。随着研究的逐步深入, PHD 滤波器目前已经开始向实际应用领域迈进, 作为一种全新的、理论完备的多目标跟踪技术, PHD 滤波体制将被广泛应用于群目标跟踪领域。

3 群扩展状态的估计算法

“扩展状态”起初是描述因传感器分辨率的提高, 产生了多个回波的单目标, 即扩展目标(Extended Target)。而对于群目标来说, 每个量测可以等效为群质心量测通过扩展状态下散射的结果。通过跟踪群目标的质心运动状态和扩展状态, 可以将一群空间临近目标(Closely Space Object, CSO)等效成为单目标^[48]。这种思路可以将上述两种目标归为一类, 区别在于扩展目标的量测来自于一个目标, 而群目标的量测来自于多个目标。图 6 所示为扩展目标与群目标。

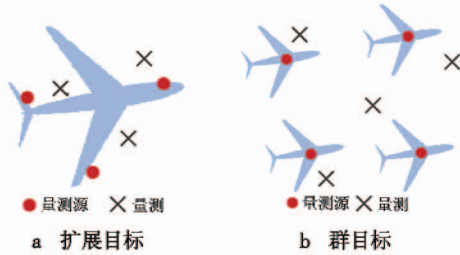


图 6 扩展目标与群目标

Fig. 6 Extended target and group target

描述扩展状态的方法主要包含椭圆或矩形模型^[49]、随机矩阵模型^[50]、高斯曲面特征矩阵模型^[51]、椭圆随机超曲面模型^[52-53]、星凸超曲面模型^[54]等。

3.1 随机矩阵理论

KOCH 等提出将群目标的形状近似为椭圆, 引入服从逆 Wishart 分布的对称正定(Symmetric Positive Define, SPD)的随机矩阵(Random Matrix, RM)来表征目标形态, 将目标运动状态参数描述为 Gaussian 分布, 采用贝叶斯递推的方法对群目标质心的运动状态和扩展状态进行估计, 是目前应用最广泛的形状估计方法, 相关研究也取得了较多成果。在理论研究方面, 文献[55-57]考虑了量测误差; 文献[58]提出了变分贝叶斯推理方法, 重新推导了目标量测更新公式; 文献[59]重新推导了群质心状态的边缘后验概率密度, 修正了群质心状态的协方差更新表达式。在实际应用方面, 文献[60]提出了基于随机矩阵的机动非椭圆目标跟踪框架, 以解决传统算法中一个 SPD 矩阵只能描述一个椭圆(球)型目标、并且难以完全刻画形状丰富的实际运动体(如飞机、舰船等)的问题; 文献[61]通过自适应调整群质心的过程噪声方差和质心状态协方差估计, 利用模糊推理方法自适应输出扩展状态的预测值; 文献[62]

根据椭圆与正定矩阵的关系, 提出了基于椭圆拟合的群目标跟踪算法, 提高了对群机动的适应能力。

3.2 随机超曲面模型

随机超曲面模型(Random Hypersurface Model, RHM)基于集理论(Set Theoretic)模型, 假设目标的量测是由其上散布的多个量测源和传感器噪声产生的, 通过对量测源建模来反映目标的扩散程度^[63]。模型如图 7 所示。

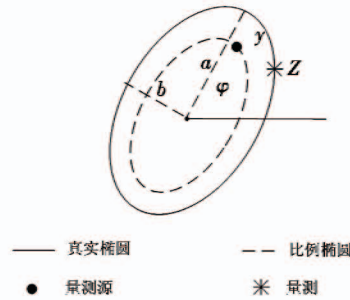


图 7 RHM 模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of RHM model

图中, 椭圆长短轴 a 和 b , 方位角 φ 以及椭圆中心点坐标为确定目标形状的主要参数, 量测源分布在缩小的真实目标形状上, 缩放因子 $s \in [0, 1]$ 。

针对静止的椭圆形扩展目标, RHM 算法在质心状态和形状估计精度上均高于 RM 算法^[63-64], 但 RHM 算法需要预设不同形状的数学方程, 若预设不合理, 将会直接影响到形状估计的精度, 且计算代价高于 RM 算法。对于初始形状参数不准确的情况, 李鹏等提出产生高斯曲面, 并将曲面叠加形成任意形状的量测空间分布模型, 再根据贝叶斯理论进行滤波更新, 该方法鲁棒性较强, 但计算量较大。随着传感器精度和分辨率的不断提高, 将目标看作点或椭圆将不再适用, 对未知的、复杂目标的跟踪将越来越重要。文献[65]通过高斯过程(Gaussian Process, GP)的在线学习对未知物体的外形进行估计, 通过定义置信区间进行筛选和关联, 此外, 本文使用递归运算, 通过推导一个状态空间模型, 将高斯回归过程问题转化为状态估计问题。

RHM 与 RM 作为描述模型的算法, 需要与滤波算法相结合以完成对目标运动状态和扩展状态的估计^[66-68]。文献[66-67]将 RHM 算法与 PHD 算法相结合, 构建基于椭圆 RHM 的量测模型, 该算法在质心运动状态和形状估计上均优于高斯逆 Wishart(GIW) PHD 算法。文献[68]将椭圆 RHM 与 Gamma 高斯混合(GGM) PHD 相结合, 跟踪性能优于传统的基于随机矩阵的 GIW-PHD。

对群目标扩展状态估计的相关研究在运动人群跟踪、飞机编队及海面舰船跟踪等多个领域都有巨大的

应用价值。总结起来,扩展状态的描述方法由矩形、椭圆等简单模型扩展到随机超曲面、星凸等复杂模型,由单一模型扩展到多个模型,由递推估计扩展到在线学习估计。精度不断提高,性能更加优越。通过与先进的滤波算法相结合,可以更加完整地估计目标状态,准确掌握目标态势。

4 未来展望

纵观上述研究进展,着眼于提高密集杂波环境中群目标跟踪的精确度和实时性,适应未来的发展需要,并完善跟踪体系,群目标跟踪的发展趋势可总结为以下几个方面。

1) 基于微动特征提取的群目标精细跟踪。

微动多普勒是指目标的旋转、振动等微小运动对雷达回波产生多普勒调制的现象^[69],如直升机螺旋桨的旋转、舰船上天线的旋转等,可以将其看作目标的特征属性,并作为目标识别的附加信息。文献[70]利用锥形弹头和诱饵的质量分布差异,提取目标的纵横惯量比作为鉴别弹头和诱饵的特征。现有的微动多普勒效应分析和微动特征提取大多是针对孤立的目标,而对于群目标,由于群中多个目标可能在同一雷达波束范围内,互相遮挡现象严重,增大了微动特征提取的难度。文献[71]提出了基于形态学图像处理的策略;文献[72]基于正弦调频信号相位项在贝塞尔函数基上的分解结果,提出了一种群目标的微动参数估计算法。基于微动特征提取的群目标精细跟踪,将是未来群目标跟踪领域的发展趋势。

2) 多传感器信息融合。

多传感器可以提供关于目标不同属性的量测数据,如空间分布特征、外形尺寸特征、电磁辐射特征、身份信息(敌我识别应答)等。通过多个传感器可以实现量测数据的互补,并且融合上述特征信息,能够更加准确地筛选量测。然而不可忽视的是,多传感器提供的量测数据存在着冗余性,如何有效去冗余将是提高算法效率和稳健性的关键。目前的多传感器跟踪算法大多假设各传感器的量测数据独立,采用序贯处理的方法。因此,数据的并行融合处理也将是未来的发展趋势。

3) 评价指标的确定。

在单目标跟踪系统中,基于最小二乘、均方根误差的距离误差是评价指标的主要内容,而在群目标问题中,由于目标数量较多、量测与目标并非一一对应,这些都给评价指标的确定带来了一定的难度。目前应用于群目标跟踪的评价指标主要包括 HD^[73], WD^[74] 和圆位置误差概率(Circular Position Error Probability, CPEP)^[75]

等,但均存在物理含义不明确等问题。因此,作为提高目标跟踪精度和增强目标跟踪稳健性的基石,跟踪性能测度也是下一阶段需要研究的问题。

4) 智能化处理平台的建立。

以军事领域的应用为例,随着战场电磁环境的日趋复杂以及航空航天技术的迅速发展,未来的跟踪系统将要处理更大规模、更加复杂的飞机编队、弹道导弹以及空间卫星等形式的群目标。传感器产生量测的数目将非常可观,这要求跟踪系统具备多任务并发、目标批处理的能力,并且能够智能化地进行态势分析,对目标进行“选择注意”(Selective Attention),这是当前神经心理学和认知科学领域研究的热点,应用于群目标跟踪领域,旨在识别分析一些抽象的行为特征、运动状态或是空间特征。随着人工智能技术的飞速发展,智能化处理平台也将是未来群目标跟踪领域的发展方向之一。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 潘泉,梁彦,杨峰,等. 现代目标跟踪与信息融合[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [3] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜,等. 多源信息融合[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [4] 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.
- [5] SINGER R A, SEA R G. A new filter for optimal tracking in dense multitarget environment[C]//Proceedings of the 9th Allerton Conference Circuit and System Theory, 1971: 201-211.
- [6] BAR-SHALOM Y, FORTMANN T E. Tracking and data association[M]. New York: Academic Press, 1988.
- [7] FORTMANN T, BAR-SHALOM Y, SCHEFFE M. Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1983, 8(3):173-184.
- [8] STIGLITZ M R, BLANCHARD C. Multitarget-multisensor tracking: advanced applications[J]. Microwave Journal, 1990(8):160.
- [9] DE FEO M, GRAZIANO A, MIGLIOLI R, et al. IMMJP-DA versus MHT and Kalman filter with NN correlation: performance comparison[J]. IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation, 1997, 144(2):49.
- [10] ROECKER J A, PHILLIS G L. Suboptimal joint probabilistic data association[J]. IEEE Transactions on Aero-

- space and Electronic Systems, 1993, 29(2):510-517.
- [11] ZHOU B, BOSE N K. Multitarget tracking in clutter: fast algorithms for data association[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(2):352-363.
- [12] REID D. An algorithm for tracking multiple targets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1979, 24(6):843-854.
- [13] 耿文东, 王元钦, 董正宏. 群目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [14] 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):1-16.
- [15] BLACKMAN S S. Multiple-target tracking with radar applications[M]. Dedham: Artech House, Inc., 1986.
- [16] CHEN W S, LIU H, HU S, et al. Group tracking of flock targets in low-altitude airspace[C]//The 9th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications Workshops (ISPAW), 2011:131-136.
- [17] 张自序. 空间群目标下多假设跟踪方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [18] 张自序, 张伟, 陈明燕. 群目标跟踪综述[C]//综合电子系统技术教育部重点实验室暨四川省高密度集成电路工程技术研究中心 2012 学术年会, 2012:1-10.
- [19] 秦卫华, 顾仁财, 许勇. 基于交互多模型的高机动群目标跟踪技术[J]. 现代导航, 2011(6):431-435.
- [20] 耿文东, 王元钦, 刘红娅, 等. 群目标等效量测形成算法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2007, 18(4):102-105.
- [21] 许英, 赵洪利, 耿文东. 编队目标的重心跟踪方法研究[J]. 无线电工程, 2012, 42(10):61-64.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 何友, 王海鹏, 熊伟, 等. 基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法[J]. 航空学报, 2012, 33(10):1850-1863.
- [25] 王海鹏, 熊伟, 何友, 等. 集中式多传感器群目标灰色精细航迹起始算法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11):2249-2255.
- [26] 王海鹏, 董云龙, 熊伟, 等. 运动状态下多传感器群目标精细航迹起始算法[J]. 宇航学报, 2012, 33(11):1690-1698.
- [27] WANG H L, WANG D S, TIAN L S, et al. A new algorithm for group tracking[C]//Proceedings of CIE International Conference on Radar, 2001:1159-1163.
- [28] 刘红, 耿文东. 基于模式空间的群目标合并与分离方法研究[J]. 无线电工程, 2010, 40(2):53-56.
- [29] VO B N, MA W K. The Gaussian mixture probability hypothesis density filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11):4091-4104.
- [30] CLARK D, VO B T, VO B N. Gaussian particle implementations of probability hypothesis density filters[C]//IEEE Aerospace Conference, 2007:1-11.
- [31] YIN J J, ZHANG J Q, ZHUANG Z S, et al. Gaussian sum PHD filtering algorithm for nonlinear non-Gaussian models[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(4):341-351.
- [32] VO B N, SINGH S, DOUCET A. Sequential Monte Carlo methods for Bayesian multi-target filtering with random finite sets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(4):1224-1245.
- [33] 王丽娟, 王登峰, 张玉宏. 基于多帧状态估计机制的 GM-PHD 滤波器[J]. 电光与控制, 2018, 25(1):92-97.
- [34] PAPI F, VO B N, VO B T, et al. Generalized labeled multi-Bernoulli approximation of multi-object densities[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(20):5487-5497.
- [35] SCHIKORA M, GNING A, MIHAYLOVA L, et al. Box-particle probability hypothesis density filtering[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(3):1660-1672.
- [36] 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.
- [37] KHAN Z, BALCH T, DELLAERT F. MCMC-based particle filtering for tracking a variable number of interacting targets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2005, 27(11):1805-1819.
- [38] MAHLER R. A theory of PHD filters of higher order in target number[C]//Proceedings of SPIE Conference on Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition, 2006:62350K-1-62350K-12.
- [39] MAHLER R. PHD filters of higher order in target number[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(4):1523-1543.

- [40] VO B T, VO B N, CANTONI A. Performance of PHD based multi-target filters [C]//The 9th International Conference on Information Fusion, 2006:1-8.
- [41] MAHLER R P S, VO B T, VO B N. CPHD filtering with unknown clutter rate and detection profile [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59 (8) : 3497-3513.
- [42] LUNDGREN M, SVENSSON L, HAMMARSTRAND L. A CPHD filter for tracking with spawning models [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 7 (3) : 496-507.
- [43] GEORGESCU R, WILLETT P. The multiple model CPHD tracker [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(4) : 1741-1751.
- [44] 连峰,元向辉,陈辉. 基于势概率假设密度滤波器的不可分辨目标跟踪算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12) : 2445-2451.
- [45] STREIT R L, STONE L D. Bayes derivation of multitarget intensity filters [C]//The 11th International Conference on Information Fusion, 2008:1686-1693.
- [46] TOBIAS M, LANTERMAN A D. Techniques for birth-particle placement in the probability hypothesis density particle filter applied to passive radar [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2008, 2(5) : 351-365.
- [47] 董鹏,敬忠良,雷明,等. 基于关联的自适应新生目标强度 CPHD 滤波 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(4) : 725-731.
- [48] 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.
- [49] GRANSTROM K, LUNDQUIST C, ORGUNER U. Tracking rectangular and elliptical extended targets using laser measurements [C]//Proceedings of the 14th International Conference on Information Fusion, 2011:592-599.
- [50] WIENEKE M, KOCH W. Probabilistic tracking of multiple extended targets using random matrices [C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010:769812-1-769812-12.
- [51] 李鹏,杨金龙,葛洪伟. 基于高斯曲面特征矩阵的扩展目标形状估计 [J]. 光电子·激光, 2014, 25(9) : 1803-1811.
- [52] BAUM M, HANEBECK U D. Random hypersurface models for extended object tracking [C]//IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), 2009:178-183.
- [53] BAUM M, NOACK B, HANEBECK U D. Extended object and group tracking with elliptic random hypersurface models [C]//The 13th International Conference on Information Fusion, 2010:1-8.
- [54] BAUM M, HANEBECK U D. Shape tracking of extended objects and group targets with star-convex RHMs [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Information Fusion, 2011:1-8.
- [55] GRANSTROM K, ORGUNER U. On spawning and combination of extended/group targets modeled with random matrices [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(3) : 678-692.
- [56] FELDMANN M, FRANKEN D, KOCH W. Tracking of extended objects and group targets using random matrices [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4) : 1409-1420.
- [57] FELDMANN M, FRANKEN D. Advances on tracking of extended objects and group targets using random matrices [C]//The 12th International Conference on Information Fusion, 2009:1029-1036.
- [58] ORGUNER U. A variational measurement update for extended target tracking with random matrices [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(7) : 3827-3834.
- [59] FELDMANN M, KOCH W. Comments on "Bayesian approach to extended object and cluster tracking using random matrices" [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2) : 1687-1693.
- [60] LAN J, LI X R. Tracking of maneuvering non-ellipsoidal extended object or target group using random matrix [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(9) : 2450-2463.
- [61] 李振兴, 刘进忙, 李松, 等. 一种改进的群目标自适应跟踪算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(10) : 117-123.
- [62] 李波睿, 慕春棣, 白天明, 等. 一种混合的扩展目标跟踪方法 [J]. 航空学报, 2014, 35(5) : 1336-1346.
- [63] BAUM M, HANEBECK U D. Extended object tracking with random hypersurface models [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(1) : 149-159.
- [64] BAUM M, FELDMANN M, FRANKEN D, et al. Extended object and group tracking; a comparison of random matrices and random hypersurface models [J]. GI Jahrestagung, 2010, 176(2) : 904-906.
- [65] WAHLSTROM N, OZKAN E. Extended target tracking using Gaussian processes [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(16) : 4165-4178.

缩比测试方法(该方法仅适用于点目标),相对于外场试飞法,引入了真实的大气路径和场景,并且能够根据试验当天的天气状况,对大气路径的透过率进行校正,对已有红外探测距离试飞数据的 A,B 两型IRST 开展了探测距离缩比试验,测试最大误差在 12%,利用该试验方法可以开展IRST 红外探测距离类比考核与评估,能够及早暴露外场试验的一些问题,降低成本和风险,缩短产品研发周期。针对构成测试误差的因素,接下来将开展大气背景辐射、路径辐射测试工作研究,将大气透过率的修正与大气背景辐射、路径辐射的修正相结合,开展不同天气条件下大气背景辐射测量和IRST 缩比探测试验工作研究,进一步提高IRST 红外探测距离缩比探测试验精度。

参 考 文 献

- [1] 刘忠领,于振红,李立仁,等. 红外搜索跟踪系统的研究现状与发展趋势[J]. 现代防御技术,2014,42(2): 95-101.
- [2] 杨百剑,万欣. 新一代机载红外搜索跟踪系统技术发展分析[J]. 激光与红外,2011,41(9):961-964.
- [3] 小哈德逊 R D. 红外系统原理[M].《红外系统原理》翻译组,译.北京:国防工业出版社,1975.
- [4] 刘俊池,李洪文,王建立,等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学精密工程,2015,23(6): 1547-1557.
- [5] 刘丹丹,黄印博,魏合理,等. 我国典型地区大气透过率的计算分析[J]. 大气与环境光学学报,2013,8(4): 262-270.
- [6] 杨词银,张建萍,曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报,2011,30(3): 284-288.
- [7] 郭汉洲,郭立红,杨词银,等. 基于大气程辐射比例修正的红外辐射特性测量[J]. 激光与红外,2017,47(2):198-202.
- [8] 王东,赵威,陈勇,等. 天空背景红外辐射亮度测量及其对目标探测的影响分析[J]. 红外技术,2015,37(9):774-777.
- (上接第 65 页)
- [66] 张慧,徐晖,王雪莹,等. 一种基于椭圆随机超曲面模型的群目标高斯混合 PHD 滤波器[J]. 光学学报,2013,33(9):0904001-1-0904001-10.
- [67] 刘祖鹏,刘艳君. 基于星-凸形 RHM 的扩展目标跟踪算法[J]. 电光与控制,2017,24(9):72-76,82.
- [68] 李翠芸,林锦鹏,姬红兵. 一种基于椭圆 RHM 的扩展目标 Gamma 高斯混合 CPHD 滤波器[J]. 控制与决策,2015,30(9):1551-1558.
- [69] CHEN V C, LI F, HO S S, et al. Analysis of micro-Doppler signatures [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(4):271-276.
- [70] 陈行勇,黎湘,郭桂蓉,等. 微进动弹道导弹目标雷达特征提取[J]. 电子与信息学报,2006,28(4):643-646.
- [71] ZHAO M M, ZHANG Q, LUO Y, et al. Micromotion feature extraction and distinguishing of space group targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(2):174-178.
- [72] 张群,何其芳,罗迎. 基于贝塞尔函数基信号分解的微动群目标特征提取方法[J]. 电子与信息学报,2016,38(12):3056-3062.
- [73] KANUNGO T, MOUNT D M, NETANYAHU N S, et al. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7):881-892.
- [74] HOFFMAN J R, MAHLER R P S. Multitarget miss distance via optimal assignment[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2004, 34(3):327-336.
- [75] RUAN Y, WILLETT P. The turbo PMHT [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4):1388-1398.