

反导多传感器协同任务规划综述

李志汇, 刘昌云, 倪鹏, 于洁, 李松

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

摘要: 针对反导作战多传感器协同任务规划的相关问题, 结合反导作战的特点, 探讨反导作战信息处理过程与多传感器协同任务规划的关系, 并分析多传感器协同任务规划的内涵; 在此基础上, 梳理出多传感器协同任务规划涉及的关键技术, 并综述多源信息综合处理、多传感器协同部署、协同跟踪、协同引导和协同识别等关键技术的研究现状; 最后就多传感器协同任务规划的发展提出一些建议。

关键词: 反导; 多传感器协同; 任务规划; 多源信息融合

中图分类号: TP212, TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2016)01-0029-10

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.01.004

Review on Multisensor Cooperative Mission Planning in Anti-TBM System

LI Zhi-hui, LIU Chang-yun, NI Peng, YU Jie, LI Song

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Multisensor cooperative mission planning in an anti-TBM (tactical ballistic missile) system is studied. Considering the characteristics of anti-TBM, the relationship of process of information processing with multisensor cooperative mission planning is discussed, and then multisensor cooperative mission planning's connotation is analyzed. Furthermore, key techniques of multisensor cooperative mission planning are proposed, and these key techniques including multisource information fusion, multisensor cooperative deployment, cooperative tracking, cooperative guide and cooperative discrimination are reviewed. Finally, suggestions of multisensor cooperative mission planning development are made on anti-TBM system.

Key words: Anti-TBM; Multisensor cooperation; Mission planning; Multisource information fusion

0 引言

弹道导弹具有射程远、命中精度高、再入速度快、灵活性强、威力大等特点, 自问世以来即成为拥有者手中的“杀手锏”, 因此美国等强国对弹道导弹防御技术的研究颇为重视。弹道导弹防御作战是一种典型的体系作战, 要求较高的时效性、准确性、联动性和自主性, 而一体化的多层防御是实现弹道导弹防御的有效途径^[1]。弹道导弹防御作战过程中运用的传感器资源主要包括天基红外预警卫星、地基早期预警雷达、地基多功能雷达以及武器系统的制导雷达等^[2], 各个传感器在监视区域、探测距离、

探测精度、目标识别能力等方面存在较大的差异, 为了有效地识别出弹道目标并对其稳定的跟踪、以及后续的拦截效果评估, 需要传感器之间的协同, 而多传感器之间的协同是当前的研究难点。

反导作战传感器资源的一体化部署、一体化使用, 是保障弹道导弹全程、全维跟踪的关键手段。为了实现传感器资源的一体化作战, 首先要深入开展传感器协同任务规划的研究: 一方面, 要深入挖掘各传感器资源的作战能力, 另一方面, 要构建有效的指挥控制作战管理中心, 对传感器资源进行有效的管理, 最大限度地发挥其工作效能。本文首先从反导信息处理过程与多传感器协同的关系出发, 分析了

多传感器协同任务规划的内涵,进而综述了多传感器协同任务规划的关键技术,并给出了其发展启示与建议。

1 反导作战多传感器协同任务规划的内涵

1.1 反导信息处理过程与多传感器协同任务规划

在反导作战过程中,信息处理过程与多传感器协同任务规划的关系如图 1 所示,多源传感器对监视区域进行探测,发现目标后对其进行跟踪,并将目标信息传输到信息处理系统。信息处理系统对多源传感器传输来的信息进行融合处理,得到目标的弹道及相关信息,并将该信息发送到传感器任务规划模块和指挥控制模块。传感器任务规划模块接收来自信息处理中心和指挥控制中心提供的信息,依据送来的目标信息对所属传感器的探测、跟踪和制导资源进行规划优化,形成一系列传感器任务子序列(优先级处理、时空管理、功率管理以及资源管理),其中,时空管理、功率管理和资源管理主要是传感器

的微观管理,协同引导探测接力跟踪主要体现多传感器之间的协同,即多传感器之间的宏观管理。指挥控制模块对目标信息进行进一步的处理后生成预警信息,并在一定时机生成作战决策(ESG)^[3],发送给中继跟踪系统和相关拦截系统。

从图 1 可以看出,一个完整的反导传感器网络是集天基红外预警卫星、地基早期预警雷达、地基多功能雷达、武器系统制导雷达为一体的协同作战传感器网络,从战略预警、远程跟踪、目标识别、再到拦截制导,各级各类传感器发挥各不相同的作战效能,同时又是紧密联系、密不可分的。

在图 1 中,多源传感器处理、信息处理中心和指挥控制中心对应于信息融合模型,而传感器协同任务规划模块作为信息融合模型的反馈部分,与信息融合模型一起构成了具有动态反馈、实时融合的闭环。由此可知,多传感器协同任务规划是为信息融合服务的,而信息融合则是多传感器协同任务规划的实现平台。

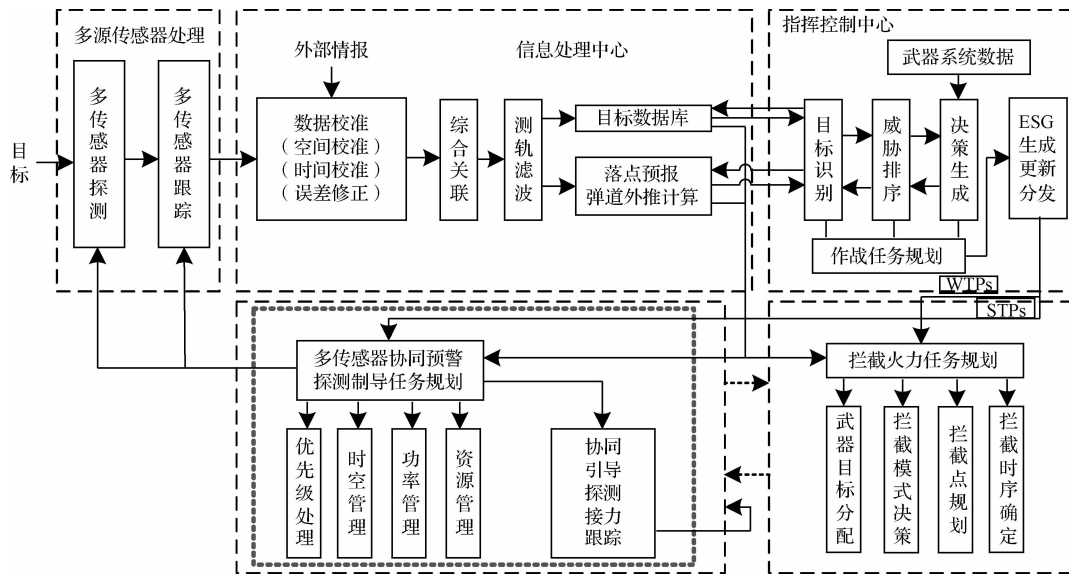


图 1 信息处理过程与多传感器协同任务规划的关系

Fig. 1 The relationship between process of information processing and multisensor cooperative mission planning

1.2 多传感器协同任务规划的内涵

导弹防御系统的核心是指挥控制、作战管理和通信(Command, and Control, Battle Management and Communication, C2BMC)系统,通过 C2BMC 系统将弹道导弹防御系统从战前规划到整个作战过程统筹起来,以时间约束的方式将反导作战的作战过程集成,解决传感器和武器系统之间的协同以及指挥人

员对各分系统的作战管理^[4]。文献[5]指出反导作战管理技术是指对反导体系内的传感器和火力资源进行以任务规划为核心的指挥与控制技术,主要包括传感器资源任务规划和火力资源任务规划两大部分,其中多传感器协同任务规划技术是反导作战管理的关键技术之一。

反导作战多传感器协同任务规划是指根据来袭

弹道导弹的数量、特性和位置,更新战场态势,对反导传感器网络内多个同质或异质传感器进行任务分配,形成传感器的作战计划(包括所选择的传感器、每个传感器的预警区域和范围、工作时间段等),用于反导预警过程中的部署、跟踪、引导和识别的过程。多传感器任务的制定到最终被执行是一个不断迭代、更新的过程。

传感器网络一体化协同作战能力的体现依靠 C2BMC 系统中的多传感器协同任务规划,通过在 C2BMC 系统中引入“交战序列组合”(Engage Schedule Group, ESG)概念实现一体化多层反导的有效规划,ESG 确定了一个特定的防御武器与探测器组合,协同探测、跟踪和拦截敌方的弹道导弹,形成弹道导弹防御的杀伤链。ESG 的基本过程如图 2 所示,每条杀伤链从最初探测到弹道目标开始,到拦截这枚弹道目标结束,整个过程最优化传感器资源和拦截资源,并且整个杀伤网上可能有多种杀伤链。

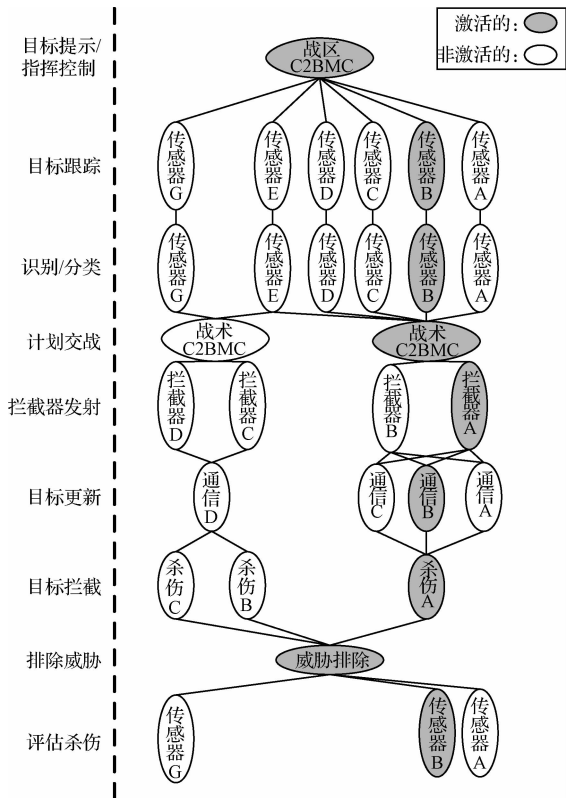


图 2 交战序列组合的基本过程

Fig. 2 The basic process of engage schedule group

2 多传感器协同任务规划的关键技术

反导作战多传感器协同任务规划是与对传感器

资源的作战使用方式紧密相关的,其中传感器网络对目标的探测、跟踪、识别信息是进行作战方案决策、拦截资源优化的前提。因此,反导多传感器协同任务规划是一种实时的任务规划。

图 3 描述了分层式的多传感器协同任务规划的技术实施网,规划层是多传感器协同任务规划;处理层是多源信息综合处理、动态任务匹配和动态资源调度;实施层是多传感器协同部署、协同跟踪、协同引导和协同识别。从上而下形成了一张多传感器协同任务规划的技术实现网,下面具体综述了处理层的多源信息综合处理技术和实施层的多传感器协同部署、协同跟踪、协同引导和协同识别技术。

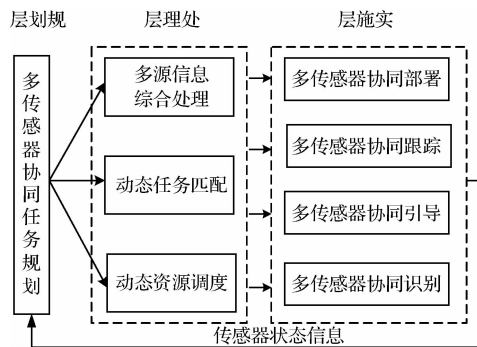


图 3 多传感器协同任务规划技术实施网

Fig. 3 The network of multisensor cooperative mission planning, key techniques, and implementation

2.1 多源传感器信息综合处理技术

多源信息综合处理技术也即多源信息融合技术。反导作战涉及多维传感器资源,基于多源传感器信息综合处理,迅速建立反导作战的综合态势图,实现对弹道目标的实时数据融合处理、高精度的弹道预测,为后续多传感器任务规划提供信息支持。一方面,通过综合处理能够提高对目标的定位精度、目标轨迹的估计精度和多目标的识别精度等;另一方面,通过综合处理能够实现“1 + 1 > 2”的整体探测效果。

在融合模型上,数据融合信息组(DFIG)对实验室联合理事会(Joint Directions of Laboratories, JDL)信息融合模型进行修改,将信息融合功能与资源管理功能相分离,分为 7 级:第 0 级—数据评估、第 1 级—目标评估、第 2 级—态势评估、第 3 级—影响评估、第 4 级—过程优化、第 5 级—用户优化、第 6 级—目标任务管理^[6];其中,目标任务管理属于多传感器协同任务规划的范畴。在融合结构上,主要

分为集中式、分布式和混合式;其中,混合式融合结构兼有前两种融合结构的优点,更适用于反导传感器网络系统。在融合级别上,主要包括决策级、特征级和数据级,对弹道目标的跟踪主要涉及后两个层次^[7]。在融合方法上,多源信息融合方法涉及众多学科,主要有:信号处理与估计理论方法、统计推断方法、信息论方法、决策论方法、人工智能方法和几何方法等^[8];在处理弹道目标信息时根据不同的问题采用不同的方法。

多源信息综合处理的关键问题是多传感器/多目标、多传感器/单目标数据融合问题。针对传感器/多目标跟踪:传统的最邻近^[9]、概率数据关联^[10]、模糊逻辑数据关联^[11]、多维分配技术^[12]和多假设^[13]等方法,大都假设目标数量是固定的,其关键是数据关联,然后将多目标问题转化为并行的单目标跟踪处理问题^[14]。但实际多传感器多目标跟踪存在以下难题:1)目标数量是未知的且目标的出现是随机的;2)当目标数量较多且存在大量虚警时,数据关联将会带来组合爆炸、计算量呈指数型增长问题;3)目标随机性的突发机动。针对这些问题,最近提出的基于随机集理论的概率假设密度^[15-16](Probability Hypothesis Density, PHD)多目标跟踪方法,避免了复杂的数据关联问题,Battistelli等^[17]提出的一致高斯混合势概率假设密度的方法来处理复杂的感知节点在位置上分散的分布式多目标跟踪;杨峰等^[18]提出了面向快速多目标跟踪的协同概率假设密度滤波器,提高了计算效率及状态精度;周卫东等^[19]提出了基于序贯蒙特卡罗方法的基数概率假设密度滤波方法;吴鑫辉等^[20]提出了一种异步多传感器多目标 PHD 航迹合成算法。

不少学者在多目标跟踪问题中采用粒子滤波算法,Sutharsan等^[21]提出了一种分布式重采样粒子滤波(Distributed Resampling Particle Filter, DRPF)调度算法,DRPF把多目标的后验概率密度用所有处理器节点的粒子来表示,能在复杂并行的结构中进行有效地调度并能保持负载平衡;Yi等^[22]采用后验独立的方法能够接近于下一时刻的先验分布,并采用联合采样的方法处理目标由于临近带来的耦合和量测模糊问题;Georgy等^[23]提出一种混合粒子滤波的方法,混合重要密度的使用能提供更好和更快的聚合来估计目标的真实位置,为了跟踪目标数量

未知且变化的问题,提出了两种混合粒子滤波器(一种用来对目标进行探测,另一种用来跟踪多目标)。

2.2 多传感器协同部署

多传感器协同部署是指考虑传感器的探测性能和战场态势,根据协同部署策略,以最大化探测效能为基础,实时地进行多传感器协同部署规划。多传感器协同部署是多传感器协同任务规划的首要环节,其部署方案的优劣直接影响到后续传感器资源的作战效能。理论上存在多种部署方案,需要进行部署方案的选优。此外,防空作战的目标多是各类飞机等,作战时间相对充足,对防空雷达部署是动态的,在目标来袭过程中仍可以动态调整部署方案;反导作战的目标具有其特殊性,作战时间极短,需要提前规划雷达部署方案,因此对反导传感器的部署是决定性的。

针对防空作战领域的传感器协同部署,建立以空域覆盖程度最大为目标,以威力衔接高度、部署间距等为约束条件的协同部署策略在防空作战领域有较好的适应能力^[24-26]。文献[27]研究了不确定空情下的区域防空部署方案优选问题,上述研究针对某一方面建立传感器部署模型,而实际需要考虑的传感器的因素很多,如:跟踪精度,目标识别能力,反隐身能力等,需要综合考虑多种因素实施多传感器协同部署规划。

针对反导作战多传感器协同部署研究较少,有限的文献也是针对单一体制的传感器部署^[28-29]。文献[30]建立了对多目标探测的地基反导预警雷达优化配置模型;文献[31]建立了一种基于一维距离像识别的雷达配置模型。反导多传感器协同部署虽不同于防空,但仍然可以借鉴防空雷达部署中的方法,需要注意的问题是:1)防御的对象不同;2)对传感器资源的需求能力不同,如反导侧重对弹道目标的识别和跟踪能力;3)部署方案的特性不同,反导是决定性的。

在无线传感器网络中^[32],针对传感器节点的选择部署研究较为广泛,以提高网络覆盖率、数据传输能力和减少网络能耗等为目标,合理地部署传感器节点。

2.3 多传感器协同跟踪

多传感器协同跟踪问题属于多平台多传感器管

理,它是以完成特定的反导作战任务为目标,以传感器资源的边界条件为约束,以任务规划准则为条件,通过建立优化函数,在合适的时间及时选择合适的传感器对合适的弹道目标进行实时跟踪,达到最优化传感器资源的目的。

多传感器多目标协同跟踪的问题是当前的研究热点,传统的方法有基于信息论、规划论与滤波理论相结合的方法^[33]。近年来,基于后验克拉美罗界^[34-35]、Rényi 信息差异^[36]、随机有限集概率假设密度滤波^[37]和智能优化技术^[38]等方法也应用到多传感器多目标协同跟踪领域。Guido 等^[39]针对目标数量未知且没有虚假探测的联合估计问题,基于序贯蒙特卡罗方法,首先产生采样来估计目标的数量和解决量测和目标关联的不确定性;其次,使用修正的不敏卡尔曼滤波方法解决多目标跟踪。Fu 等^[40]针对大规模无线传感器网络中多目标跟踪的传感器分配问题,采用分布式传感器分配方法,通过反复迭代的子梯度搜索,达到近似优化。

在传感器管理方面,国内外学者提出了很多方法,Jason 等^[41]通过比较基于信息论的传感器管理方法在贝叶斯目标跟踪中的应用,采用粒子滤波方法更新目标的运动和量测,传感器的选择标准为期望信息增益、Rényi 差异、线性高斯近似;其中,线性高斯近似的方法比 Rényi 差异能够提供更精确的目标定位。Stiven 等^[42]提出了一种协同粒子滤波算法,假设未知传感器的噪声,在全连通性网络中采用集中式粒子滤波方案。Severson 等^[43]提出了一种分布式、一致方法来最优化弹道目标监视和跟踪中的雷达资源管理。Hoang 等^[44]提出了一种基于随机有限集的方法,采用多贝努力滤波方法来连接两种不同的控制目标,适用于非线性非高斯模型。Pandremmenou 等^[45]提出了一种视觉传感器网络中的性能驱动分层优化方案,采用纳什均衡方案构成混合整数优化问题,并采用粒子群优化算法进行求解。Zhang 等^[46]在分布式无线传感器网络中,提出了一种多重信赖管理框架进行信赖管理,使用三种水平的信赖建立节点之间可靠的关系。文献[47]针对多平台飞机的传感器管理问题,提出了一种基于双边组合拍卖的传感器管理方法。文献[48]综合考虑多种因素使用单步前向预测的动态闭环控制结构进行传感器管理。

2.4 多传感器协同引导

多传感器协同引导主要是解决目标穿越不同传感器探测空域时的连续跟踪问题,包括确定交班传感器的引导信息和引导方式、接班传感器的搜索截获方式。引导信息来源于传感器网络系统,为地基雷达所用,引导信息指引的正确与否直接决定了被引导传感器搜索性能的优劣;因此,引导信息应当考虑交接双方的因素确定,应最大限度地满足被引导传感器对搜索的需求。引导策略包含引导时机和引导方式,不同的传感器之间交接时具有不同的引导时机,引导方式主要有:单次长预报引导、分段长预报引导和一步预测引导。

在搜索策略上,文献[49]研究了跟踪制导雷达的最优搜索策略;文献[50]研究了机载传感器无引导搜索策略;文献[51]提出了基于遗传算法的静态最优波位编排模型。在雷达交接班上,文献[52]研究了多目标情况下的指示交接问题;文献[53-54]研究了反导预警雷达交接班模型及交接班的时机;文献[55]提出了基于协作任务优先级英式拍卖协议的协作机制,解决了多传感器指示交接中的“指示谁”的问题;文献[56]建立了弹道目标的指示模型。

2.5 多传感器协同识别

目标识别是反导过程中的重要环节,反导目标识别的方法众多,不同方法的原理、特性、优缺点不同,弹道目标在不同飞行阶段所表现出来的特点也不一样,只有充分利用来袭导弹在各阶段表现出来的各种目标特性,利用不同阶段的传感器进行协同识别,才是目标识别的有效途径。多传感器协同识别是基于信息融合的识别方法,结合战场态势,实时对多种传感器进行合理地支配和使用,综合运用多个传感器在时间和空间上的冗余和互补信息,迅速达到目标识别的目的。

针对微多普勒的目标识别,文献[57]提出了一种基于散射中心模型的回波模拟方法。文献[58]从微多普勒效应产生机理分析提出了 ISAR 成像的干扰新方法。文献[59]提出了一种利用 Duffing 振子在低信噪比条件下提取雷达目标微动特征的方法。常用的协同识别方法有基于模糊神经网络、证据理论和粗糙集等^[60-61]。文献[62]从功能模型、结构模型、算法模型三个方面分析了多传感器目标

融合识别系统的研究现状。文献[63]提出一种直觉模糊核 c -均值聚类算法用于中段弹道目标识别。文献[64]利用红外光谱数据融合的思想,提出了一种基于粒子群优化概率神经网络的大气层外空间弹道目标识别方法。

3 多传感器协同任务规划的发展启示与建议

反导作战的核心是对弹道目标的有效拦截,反导作战多传感器协同任务规划的研究都要服从于这个核心目的。结合反导信息处理过程与多传感器协同的关系和多传感器协同任务规划关键技术的研究现状,提出了如下发展启示与建议。

3.1 多层传感器协同部署技术的运用

文献[65]在分析未来弹道导弹预警系统的发展趋势中指出,有效的弹道导弹预警系统部署应具有以下特点:天基为主、手段多样,多层探测搜索、全程预警。因此,多传感器协同部署要突破以同一体制下的传感器协同这一限制,发展陆基雷达、海基雷达、天基卫星等不同体制下的传感器协同技术手段。多传感器协同部署不能仅考虑空域覆盖、最大探测效能等约束,还要考虑包括目标识别、跟踪精度等因素在内的约束,研究不同传感器之间的交接配合情况下的协同部署。其次,反导作战雷达部署是决定性的,提前规划多种类型的雷达部署方案,能针对不同的目标快速选择合理的部署方案。

3.2 走“多源信息融合技术+需求牵引”的发展模式

从反导信息处理过程与多传感器任务规划之间的关系可知,多源传感器之间的信息融合是进行多传感器任务规划的关键,如何充分利用各种量测信息,快速、准确地得到来袭弹道目标的信息诸元,是信息处理过程中需要重点研究的内容,亦是多传感器实现协同任务规划的落脚点。当前信息融合主要研究热点在 DFIC 模型中的第 0 级、第 1 级和第 2 级,相应的算法比较成熟,可用于处理多个弹道目标跟踪、甚至弹道群目标跟踪。另外,反导传感器资源包括:天基红外、低轨卫星、地基雷达等,涉及多源异类传感器融合,这是当前的研究难点。

3.3 反导传感器网络的一体化设计与研发

美军通过其 C2BMC 系统把相互孤立的传感器连接起来,构成 BMDS 的全球通信网络,充分发挥了

各传感器的最大潜力,实现了传感器力量的倍增。美军的整个反导预警体系构成了一个多层次的网络,而多维反导预警平台则构成了网络中的节点,预警平台分布具有多维性、探测体制具有多样性、探测实效具有多段性,这实质上构成了一个混合大尺度无线传感器网络。而对无线传感器网络的研究技术相对成熟,反导预警传感器网络虽与无线传感器网络不同,如当前网络级传感器管理的研究仅仅从某一方面进行,诸如:能量消耗问题、网络通信问题、网络寿命问题、网络覆盖问题等^[66],但也有诸多相似之处,因此开展研究无线传感器网络与传感器任务规划相结合的方法具有较好的应用前景。

3.4 形成快速准确的综合态势感知图

态势感知是 C2BMC 的主要功能之一,通过 C2BMC 对各传感器、噪声和干扰等信息进行融合/综合处理,去伪存真、去粗取精,为各级指挥官在进行弹道导弹防御时提供实时精确的态势感知图。反导作战过程对时间的要求极高,作战时机转瞬即逝,充分利用多传感器协同任务规划系统对传感器资源进行动态优化,形成对弹道目标各自的一条最优 ESG,迅速为指挥员提供清晰的决策方案。

3.5 先进的作战管理与辅助决策分析技术的运用

先进的作战管理与辅助决策技术能使许多影响实时作战的人工任务实现自动化处理,能够更早地发射拦截弹、更多地进行拦截,减少作战所需的时间。Hero 等^[67]系统阐述了传感器管理的理论、算法和应用,总结出当前传感器管理的四种主要的方法,即传感器管理是一个决策过程、马尔科夫决策过程、多武器系统决策过程和信息最优化决策过程。通过反导信息处理过程可知,指挥控制中心负责对信息处理中心送来的弹道目标信息进行处理生成作战决策,决策信息又作为反馈信息送给多传感器协同任务规划系统。因此,决策方法的好坏直接影响到多传感器协同任务规划的效果;具备先进的辅助决策技术,也将使当前许多影响实时作战的人工任务实现自动化处理,减少作战所需时间。

4 结束语

如何充分调度多种异类传感器资源对弹道目标进行有效地识别并形成稳定的跟踪是多传感器协同任务规划的关键问题,多传感器协同任务规划是实

现一体化多层反导的重要环节。本文系统分析了反导信息处理过程与多传感器协同的关系,研究了多传感器协同任务规划的内涵,进一步梳理和综述了多传感器协同任务规划涉及的关键技术,在此基础上,提出了对多传感器协同任务规划的发展启示与建议。进一步深入研究多传感器协同任务规划及其关键技术,对未来反导传感器资源的网络化建设具有重要的支持作用和参考意义。

参 考 文 献

- [1] 黄树彩,康红霞,李为民. 空天信息支持反导武器系统拦截作战效果分析[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(3):508-511. [Huang Shu-cai, Kang Hong-xia, Li Wei-min. Intercepting operational effects analysis of anti-BM weapon systems with aerospace information support [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012,34(3):508-511.]
- [2] 吴林锋,王刚,刘昌云,等. 基于多智能体的反导传感器任务规划算法[J]. 现代防御技术,2012,40(3):88-93. [Wu Lin-feng, Wang Gang, Liu Chang-yun, et al. Task planning of anti-ballistic missile sensors based on MAS [J]. Modern Defence Technology, 2012,40(3):88-93.]
- [3] 黄树彩,刘军兰,康红霞. 弹道导弹防御的交战程序组设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2011,12(3):35-39. [Huang Shu-cai, Liu Jun-lan, Kang Hong-xia. Design of the engage schedule group for ballistic missile defense[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2011,12(3):35-39.]
- [4] 刘邦朝,王刚,刘昌云. 美军反导指控/作战管理与通信系统分析与启示[J]. 飞航导弹,2014,4:55-58. [Liu Bang-chao, Wang Gang, Liu Chang-yun. Analysis and revelation of U. S. C2BMC [J]. Aerodynamic Missile Journal,2014,4:55-58.]
- [5] 王刚,王明宇,杨少春,等. 反导作战管理技术研究[J]. 现代防御技术,2012,40(1):26-30. [Wang Gang, Wang Ming-yu, Yang Shao-chun, et al. Research of anti-missile management technique[J]. Modern Defence Technology, 2012,40(1):26-30.]
- [6] 陈科文,张祖平,龙军. 多源信息融合关键问题、研究进展与新动向[J]. 计算机科学,2013,40(8):6-13. [Chen Ke-wen, Zhang Zu-ping, Long Jun. Multisource information fusion, key issues, research progress and new trends[J]. Computer Science, 2013,40(8):6-13.]
- [7] 刘也,余安喜,朱炬波,等. 弹道目标实时跟踪中的滤波方法综述[J]. 宇航学报,2013,34(11):1417-1426. [Liu Ye, Yu An-xi, Zhu Ju-bo, et al. Survey of filter algorithm for ballistic target real-time tracking[J]. Journal of Astronautics, 2013,34(11):1417-1426.]
- [8] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜. 多源信息融合[M]. 北京:清华大学出版社,2010:1-14.
- [9] Aziz A M. A new nearest-neighbor association approach based on fuzzy clustering[J]. Aerospace Science and Technology,2013,26(2):87-97.
- [10] Svensson L, Svensson D, Guerriero M, et al. Set JPDA filter for multitarget tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2011,59(10):4677-4691.
- [11] Aziz A M, Tummala M, Cristi R. Fuzzy logic data correlation approach in multisensory-multitarget tracking systems[J]. Signal Processing,1999,76(5):195-209.
- [12] Sathyan T, Sinha A, Kirubarajan T, et al. MDA-based data association with prior track information for passive multitarget tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011,47(1):539-556.
- [13] Sathyan T, Chin T J, Arulampalam S, et al. A multiple hypothesis tracker for multitarget tracking with multiple simultaneous measurements[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2013,7(3):448-460.
- [14] 杨峰,王永齐,梁彦,等. 基于概率假设密度滤波方法的多目标跟踪技术综述[J]. 自动化报,2013,39(11):1944-1956. [Yang Feng, Wang Yong-qi, Liang Yan, et al. A survey of PHD filter multi-target tracking[J]. Acta Automatica Sinica, 2013,39(11):1944-1956.]
- [15] Le Q, Lance M K. Probability hypothesis density-based multitarget tracking for proximity sensor networks [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013,49(3):1476-1496.
- [16] Mallick M, Vo B N, Thia K, et al. Introduction to the issue on multitarget tracking [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2013,7(3):373-375.
- [17] Battistelli G, Chisci L, Fantacci C, et al. Consensus CPHD filter for distributed multitarget tracking[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2013,7(3):508-520.
- [18] 杨峰,王永齐,梁彦,等. 面向快速多目标跟踪的协同 PHD 滤波器[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(11):2113-2121. [Yang Feng, Wang Yong-qi, Liang Yan, et al. Collaborative PHD filter for multi-target tracking[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014,36(11):2113-2121.]
- [19] 周卫东,张鹤冰,吉宇人. 基于 SMC-CPHD 的多目标跟踪算法研究[J]. 宇航学报,2012,33(4):443-450. [Zhou Wei-dong, Zhang He-bing, Ji Yu-ren. Multi-target tracking algorithm based on SMC-CPHD filter[J]. Journal of Astronautics, 2012,33(4):443-450.]
- [20] 吴鑫辉,黄高明,高俊. 异步多传感器多目标 PHD 航迹合成算法[J]. 航空学报,2013,34(12):2785-2793. [Wu Xin-hui, Huang Gao-ming, Gao Jun. PHD for composite tracking algorithm based on asynchronous multi-sensor multi-target measurements [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(12):2785-2793.]

- [21] Sutharsan S, Kirubarajan T, Lang T, et al. An optimization-based parallel particle filter for multitarget tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48 (2): 1601–1618.
- [22] Yi W, Morelande M R, Kong L J, et al. A computationally efficient particle filter for multitarget tracking using an independence approximation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61 (4): 43–56.
- [23] Georgy J, Noureldin A, Mellema G R. Clustered mixture particle filter for underwater multitarget tracking in multistatic active sonobuoy systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-PART C: Application and Reviews, 2012, 42 (4): 547–560.
- [24] 王中杰, 李侠, 周启明, 等. 基于多约束条件遗传算法的雷达网优化部署 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30 (2): 265–268. [Wang Zhong-jie, Li Xia, Zhou Qi-ming, et al. Optimal deployment of radar network based on multi-constrained GA [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30 (2): 265–268.]
- [25] 潘伟. 基于自适应遗传算法的雷达组网优化部署 [J]. 电子信息对抗技术, 2013, 28 (4): 34–38. [Pan Wei. Optimal deployment of radar network based on adaptive genetic algorithm [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2013, 28 (4): 34–38.]
- [26] 刘旭, 李为民. 基于遗传算法的空间多传感器优化部署模型研究 [J]. 战术导弹技术, 2014, 2: 38–42. [Liu Xu, Li Weimin. Research on space multi-sensor optimal disposition model based on genetic algorithm [J]. Tactical Missile Technology, 2014, 2: 38–42.]
- [27] 阳林, 刘付显, 张搏. 基于风险决策的区域防空部署方案优选方法 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2012, 14 (6): 34–37. [Yang Lin, Liu Fu-xian, Zhang Bo. Optimum of disposition schemes for area air-defense operation based on risk decision [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 14 (6): 34–37.]
- [28] 任俊亮, 邢清华, 苏晓勇. 反导预警雷达的优化配置问题研究 [J]. 现代防御技术, 2013, 41 (4): 11–15. [Ren Jun-liang, Xing Qing-hua, Su Xiao-yong. Research on optimal deploy of detecting single target early warning GBRs in antimissile operation [J]. Modern Defence Technology, 2013, 41 (4): 11–15.]
- [29] 任俊亮, 邢清华. X波段雷达探测多弹道时的配置问题研究 [J]. 现代防御技术, 2013, 41 (6): 20–24. [Ren Jun-liang, Xing Qing-hua. Research on deployment of X band radar detecting multi-trajectories in early warning system of missile defense [J]. Modern Defence Technology, 2013, 41 (6): 20–24.]
- [30] 任俊亮, 邢清华. 探测多目标时的反导预警雷达优化配置研究 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50 (11): 233–236. [Ren Jun-liang, Xing Qing-hua. Research on optimal deployment of detecting multi-target early-warning GBRs in missile defense system [J]. Computer Engineering and Application, 2014, 50 (11): 233–236.]
- [31] 任俊亮, 邢清华, 邹志刚, 等. 基于一维距离像识别的反导雷达配置模型研究 [J]. 光电与控制, 2014, 21 (3): 76–91. [Ren Jun-liang, Xing Qing-hua, Zou Zhi-gang, et al. Deployment of target recognition radar based on range profile in missile defense system [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21 (3): 76–91.]
- [32] 刘钦. 多传感器组网协同跟踪方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013. [Liu Qin. Study on multisensor collaborative tracking in sensor networks [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.]
- [33] 刘先省, 申石磊, 潘泉. 传感器管理及方法综述 [J]. 电子学报, 2002, 30 (3): 394–398. [Liu Xian-xing, Shen Shi-lei, Pan Quan. A survey of sensor management and methods [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30 (3): 394–398.]
- [34] Tharmarasa R, Kirubajan T. Decentralized sensor selection for large-scale multisensor-multitarget tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 (2): 1307–1324.
- [35] 赵砚, 张寅生, 易东云, 等. 基于PCRLB的低轨星座对自由段多目标的多传感器调度算法 [J]. 宇航学报, 2011, 32 (4): 842–850. [Zhao Yan, Zhang Yin-sheng, Yi Dong-yun, et al. PCRLB-based multi-sensor management for coasting-phase multi-target tracking using LEO satellite constellation [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32 (4): 842–850.]
- [36] Kreucher C M, Hero A O, Kastella K D. An information-based approach to sensor management in large dynamic network [J]. Proceeding of the IEEE, 2007, 95 (5): 978–999.
- [37] Li W L, Jia Y M, Du J P, et al. Gaussian mixture PHD filter for multi-sensor multi-target tracking with registration errors [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 93: 86–99.
- [38] Ling Q, Fu Y F, Tian Z. Localized sensor management for multi-target tracking in wireless sensor networks [J]. Information Fusion, 2011, 12 (1): 194–201.
- [39] Guido H J, Wang X D. Joint multitarget tracking and sensor localization in collaborative sensor networks [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 (4): 2361–2375.
- [40] Fu Y F, Ling Q, Tian Z. Distributed sensor allocation for multi-target tracking in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48 (4): 3538–3553.
- [41] Jason M A, Brian R L C. Sensor management for particle filter tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 47 (1): 503–523.
- [42] Steven S D, Marcelo G S B. Cooperative target tracking using decentralized particle filtering and RSS sensors [J]. IEEE

- Transactions on Signal Processing, 2013, 61(14):3632-3646.
- [43] Severson T A, Derek A P. Distributed multitarget search and track assignment with consensus-based coordination [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2):864-875.
- [44] Hoang H G, Vo B T. Sensor management for multi-target tracking via multi-Bernoulli filtering [J]. Automatica, 2014, 50(2):1135-1142.
- [45] Pandremenou K, Lisimachos P K, Konstantinos E. P, et al. Game-theoretic solutions through intelligent optimization for efficient resource management in wireless visual sensor networks [J]. Signal Processing: Image Communication, 2014, 29(2):472-493.
- [46] Zhang B, Huang Z H, Xiang Y. A novel multiple-level trust management framework for wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2014, 72(7):45-61.
- [47] 吴巍, 王国宏, 李朝霞, 等. 基于双边组合拍卖的传感器管理算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(10):1960-1965. [Wu Wei, Wang Guo-hong, Li Zhao-xia, et al. Sensor management based on combinatorial double auctions [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(10):1960-1965.]
- [48] 谢恺, 韩裕生, 薛模根, 等. 天基红外低轨星座的传感器管理方法 [J]. 宇航学报, 2007, 28(5):1331-1336. [Xie Kai, Han Yu-sheng, Xue Mo-gen, et al. Algorithm for sensor management in the space-based infrared LEO constellation [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5):1331-1336.]
- [49] 赵峰. 弹道导弹防御跟踪制导雷达探测技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2007. [Zhao Feng. Study on detection techniques of tracking and guiding radars in ballistic defense [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.]
- [50] 吴必富. 机载传感器无引导搜索策略研究 [J]. 电讯技术, 2014, 54(5):574-577. [Wu Bi-fu. Study on uncued search strategy for airborne sensor [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5):574-577.]
- [51] 李志淮, 谭贤四, 王红, 等. 临近空间高超声速目标跟踪制导雷达最优波位编排模型 [J]. 光电子·激光, 2013, 24(4):794-798. [Li Zhi-huai, Tan Xian-si, Wang Hong, et al. A model of the optimal beam arrangement on tracking and guiding radar for near space hypersonic targets [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(4):794-798.]
- [52] 张华睿, 杨宏文, 郁文贤. 多目标情况下IRST和雷达的指示交接问题 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5):1101-1106. [Zhang Hua-rui, Yang Hong-wen, Yu Wen-xian. The handoff method ofIRST and radar under muti-target scenario [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(5):1101-1106.]
- [53] 阮菲, 高玉良, 蒯美青. 面向反导预警作战的雷达交接时机选择方法 [J]. 现代防御技术, 2013, 41(4):121-140. [Ruan Fei, Gao Yu-liang, Lian Mei-qing. Radars mission occasion selection approach for antimissile early warning [J]. Modern Defence Technology, 2013, 41(4):121-140.]
- [54] 蒯美青, 高玉良, 陈鹏, 等. 反导预警雷达交接班效能仿真模型框架研究 [J]. 空军预警学院学报, 2013, 27(4):282-287. [Lin Mei-qing, Gao Yu-liang, Chen Peng, et al. Simulation model framework for mission shifting efficiency on anti-missile early warning radar [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2013, 27(4):282-287.]
- [55] 赵建恒, 许蕴山, 肖冰松, 等. 基于任务驱动的传感器指示交接研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(7):2277-2280. [Zhao Jian-heng, Xu Yun-shan, Xiao Bing-song, et al. Research on sensor indication and handover based on task driven [J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(7):2277-2280.]
- [56] 全杰. 基于弹道导弹探测网的目标指示模型 [J]. 计算机仿真, 2014, 8:54-59. [Quan Jie. Target indication model based on detecting network for ballistic missile [J]. Computer Simulation, 2014, 8:54-59.]
- [57] 徐少坤, 刘记红, 付耀文, 等. 弹道中段微动目标宽带回波模拟 [J]. 宇航学报, 2012, 33(3):339-345. [Xu Shao-kun, Liu Ji-hong, Fu Yao-wen, et al. Wideband radar echo simulation of micro-motion targets in ballistic midcourse [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(3):339-345.]
- [58] 李松, 何劲, 冯有前, 等. 基于微多普勒效应的ISAR成像干扰新方法 [J]. 宇航学报, 2012, 33(6):736-745. [Li Song, He Jin, Feng You-qian, et al. A novel jamming method for dechirping ISAR based on micro-doppler effect [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(6):736-745.]
- [59] 邓冬虎, 张群, 罗迎, 等. Duffing振子在低信噪比雷达目标微动特征提取中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2):453-458. [Deng Dong-hu, Zhang Qun, Luo Ying, et al. The Application of duffing oscillators to micro-motion feature extraction of radar target under low SNR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(2):453-458.]
- [60] 李勇, 王德功, 杨佐龙. 模糊神经网络与证据理论的飞机目标敌我识别 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2012, 30(1):78-82. [Li Yong, Wang De-gong, Yang Zuo-long. Fuzzy neural network and D-S theory used in friend and foe identification of aircraft target [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2012, 30(1):78-82.]
- [61] 苏伟, 李为民, 赵永. BP和D-S结合的多传感器协同目标识别推理机制 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2014, 15(2):29-32. [Su Wei, Li Wei-min, Zhao Yong. A study of reasoning mechanism on multiple sensors cooperative with target identification based on BP neural network and D-S evidence theory [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2014, 15(2):29-32.]
- [62] 吴瑕, 周焰, 蔡益朝, 等. 多传感器目标融合识别系统模型研

- 究现状与问题[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1413 - 1420. [Wu Xia, Zhou Yan, Cai Yi-chao, et al. Research actualities and problem on multisensor target recognition system model [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1413 - 1420.]
- [63] 范成礼, 邢清华, 付强, 等. 基于直觉模糊核聚类的弹道中段目标识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1362 - 1367. [Fan Cheng-li, Xing Qing-hua, Fu Qiang, et al. Technique for target recognition in ballistic midcourse based on intuitionistic fuzzy kernel clustering [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(7): 1362 - 1367.]
- [64] 张国亮, 杨春玲, 王瞰来. 基于优化概率神经网络和红外多光谱融合的大气层外空间弹道目标识别[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 896 - 902. [Zhang Guo-liang, Yang Chun-ling, Wang Jian-lai. Discrimination of exo-atmospheric targets based on optimization of probabilistic neural network and IR multi-spectral fusion [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(4): 896 - 902.]
- [65] 袁俊. 弹道导弹预警系统及其发展趋势[J]. 国防科技, 2007, 3: 33 - 36. [Yuan Jun. Ballistic missile early warning system and development trend [J]. National Defense Science & Technology, 2007, 3: 33 - 36.]
- [66] 罗开平, 姜维, 李一军. 传感器管理述评[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1900 - 1907. [Luo Kai-ping, Jiang Wei, Li Yi-jun. Review of sensor management [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1900 - 1907.]
- [67] Hero A O, Cochran D. Sensor management: past, present, and future [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(12): 3064 - 3075.

作者简介:

李志汇(1991 -), 男, 硕士生, 主要从事目标跟踪与传感器管理技术方面的研究。

通信地址: 西安市长乐东路甲字一号空军工程大学防空反导学院研三队(710051)

电话: 17791814968

E-mail: lizihui_13@163.com

(编辑: 牛苗苗)