

多传感器融合技术在防御系统中的应用与探索

——低速中大型航空飞行器

杨 磊

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723000

摘 要：本文深入探讨了多传感器融合技术在低速中大型航空飞行器防御系统中的应用与未来发展方向。文章指出，低速中大型航空飞行器如无人机、高空侦察飞艇等，凭借其低速隐蔽性、长航时滞空能力及低成本优势，对传统防御体系构成严峻挑战。多传感器融合技术通过整合雷达、红外、光电、声学等多模态感知数据，构建起立体化、智能化的目标识别与跟踪网络，为应对此类威胁提供了关键解决方案。本文从技术原理、应用实践、挑战与突破三个维度展开论述，强调多传感器融合技术在提升防御系统感知维度、决策智能化水平及抗干扰能力方面的核心价值，并展望了其在量子传感、数字孪生及脑机接口等技术驱动下的未来发展趋势。

关键词：多传感器融合技术；低速中大型航空飞行器；防御系统

引言

在当代国防科技领域，低速中大型航空飞行器（如无人机、高空侦察飞艇、太阳能无人机等）的防御已成为全球军事强国关注的焦点。这类飞行器凭借其独特的性能优势，对传统防御体系提出了前所未有的挑战。多传感器融合技术作为现代防御系统的核心技术之一，通过整合多种传感器的数据，构建起全方位、多层次的防御网络，为应对低速中大型航空飞行器威胁提供了有效手段。本文将从技术原理、应用实践、挑战与突破三个维度，系统探讨多传感器融合技术在低速中大型航空飞行器防御领域的价值与未来方向。

1 技术本质：多传感器融合的防御逻辑重构

低速中大型航空飞行器的特性决定了单一传感器难以满足防御需求。传统传感器如雷达、红外、光电等，在探测低速目标时往往存在局限性。多传感器融合技术的核心价值，在于通过数据互补与决策协同，突破单一传感器的物理局限，构建起更加完善的目标识别与跟踪网络。

1.1 感知维度的跨越式扩展

多传感器融合系统通过整合不同传感器的数据，实现了目标特征的多维度解构。例如，雷达可以提供目标的距离、速度和航向信息，红外传感器可以捕捉目标的热辐射特征，光电设备可以获取目标的高精度图像，声学阵列可以定位目标的空间坐标。这种多维数据的交叉验证机制，可以有效过滤虚假目标，提升对低速飞行器的识别置信度。具体而言，雷达通过发射电磁波并接收反射信号来探测目标，其优势在于作用距离远、全天候

工作能力强，但易受地物杂波干扰，且对低速目标的探测性能有限。红外传感器则通过探测目标发出的红外辐射来识别目标，具有隐蔽性好、抗干扰能力强等优点，但受天气和光照条件影响较大。光电设备能够提供高分辨率的目标图像，但易受烟雾、尘埃等恶劣天气的影响。声学阵列通过捕捉目标产生的声波信号来定位目标，适用于低空、慢速目标的探测，但作用距离相对较短。多传感器融合技术通过整合这些传感器的数据，实现了优势互补^[1]。例如，在探测低速飞行器时，雷达可以提供目标的大致位置和速度信息，红外传感器可以确认目标的热辐射特征，光电设备可以获取目标的高清图像，声学阵列可以进一步精确目标的位置。通过这种多维数据的交叉验证，可以有效提高目标的识别准确率和跟踪精度。

1.2 决策机制的智能化跃迁

传统防御系统依赖人工判读或预设规则进行决策，难以应对低速飞行器的机动变轨与隐身技术。多传感器融合系统引入人工智能算法，通过动态权重分配与贝叶斯推理，实现了实时威胁评估。系统可以根据目标的行为模式自动调整传感器采样频率与数据融合策略，从而显著提高响应速度和准确性。以卡尔曼滤波算法为例，该算法是一种高效的递归滤波器，能够从一系列的不完全包含噪声的测量中，估计动态系统的状态。在多传感器融合系统中，卡尔曼滤波算法可以用于融合来自不同传感器的数据，以获得更准确的目标状态估计。此外，随着人工智能技术的发展，深度学习算法也逐渐应用于多传感器融合系统中。深度学习算法能够自动学习传感

器数据的特征, 并实现更精准的目标分类和识别。

1.3 抗干扰能力的指数级提升

低速飞行器常采用复合材料与电磁静默技术降低可探测性。多传感器融合技术通过频谱分散与能量叠加原理, 构建起抗干扰防御屏障。不同传感器对干扰的响应特性不同, 通过融合处理, 可以有效抑制干扰信号, 提高系统的抗干扰能力。例如, 在面对电磁干扰时, 雷达的性能可能会受到影响, 但红外传感器和光电设备受电磁干扰的影响较小^[2]。通过融合雷达、红外和光电传感器的数据, 可以有效提高系统在复杂电磁环境下的目标探测能力。此外, 多传感器融合系统还可以通过冗余设计, 当某个传感器受到干扰或故障时, 其他传感器可以接管其功能, 确保系统的稳定运行。

2 应用实践: 从概念验证到体系化部署

全球主要军事强国已将多传感器融合技术纳入低速飞行器防御体系, 形成了覆盖战略预警、战术拦截、要地防护的多层次防御网络。

2.1 战略预警层的“天基-空基-地基”协同

美国“太空篱笆”(Space Fence)系统通过天基雷达与地基红外望远镜的数据融合, 实现了对近地轨道飞行器的持续跟踪。对于低速中大型飞行器, 其升级版采用了“卫星星座+平流层飞艇”架构, 利用飞艇搭载的多光谱传感器填补天基系统的时间盲区, 构建起无缝隙的预警网络。“太空篱笆”系统是美国空军航天司令部实施的一项空间监视计划, 旨在探测和跟踪地球轨道上的卫星和其他空间物体。该系统采用了先进的雷达技术和数据融合算法, 能够实现对空间目标的精确探测和跟踪。通过与地基红外望远镜的数据融合, 该系统可以获得更全面的目标信息, 提高目标识别的准确率。

2.2 战术拦截层的“硬杀伤-软摧毁”联动

以色列“铁穹”系统的最新改进型集成了有源相控阵雷达、激光雷达与电子支援系统, 可对低速目标进行精确分类。当探测到威胁时, 系统自动选择最优拦截方式: 对小型无人机采用激光定向能武器实施“软摧毁”, 对大型飞行器则调度“铁束”高能激光系统进行“硬杀伤”。这种基于传感器融合的智能决策, 使拦截成功率大幅提升。“铁穹”系统是以色列拉斐尔先进防御系统公司研发的一种近程防空导弹系统, 主要用于拦截火箭弹、炮弹和迫击炮弹等短程威胁。该系统采用了先进的有源相控阵雷达和光电传感器, 能够实现对来袭目标的精确探测和跟踪。通过与电子支援系统的数据融合, 该系统可以获得更全面的目标信息, 提高拦截决策的准确性和效率。

2.3 要地防护层的“分布式-自适应”组网

俄罗斯“道尔-M2DT”防空系统采用模块化设计, 每个作战单元配备独立的多传感器融合终端。在北极圈部署测试中, 系统通过自组织网络实现了-50℃极端环境下的稳定运行, 验证了分布式架构在要地防护中的可靠性。中国“寂静狩猎者”激光防御系统则引入了边缘计算节点, 使末端拦截单元具备局部自主决策能力。“道尔-M2DT”防空系统是俄罗斯研发的一种野战机动防空系统, 主要用于拦截低空、慢速和超低空目标。该系统采用了模块化设计, 每个作战单元都配备了独立的多传感器融合终端, 包括雷达、光电传感器和电子对抗设备等。通过自组织网络, 这些作战单元可以相互通信和协作, 实现对目标的协同探测和跟踪。在极端环境下, 该系统表现出了良好的稳定性和可靠性。

3 技术挑战与突破路径

尽管多传感器融合技术已取得显著进展, 但在动态环境适应性、算法鲁棒性、能源效率等方面仍面临瓶颈, 需从基础理论、材料工艺、系统架构三个层面实现突破。

3.1 动态环境下的数据融合难题

复杂气象条件与电磁干扰会导致传感器数据失真。为解决这一问题, 研究人员提出了“环境感知型融合”概念, 通过在算法中嵌入环境参数模型, 实时修正传感器误差。这种方法显著提高了系统在恶劣环境下的目标保持率^[3]。例如, 在雨雪天气下, 雷达的性能可能会受到影响, 导致目标探测距离缩短和虚警率增加。通过引入环境感知型融合算法, 系统可以根据当前的气象条件自动调整雷达的工作参数和融合策略, 以提高目标探测的准确性和稳定性。

3.2 异构数据的高效处理瓶颈

多传感器产生的高维数据对计算资源提出了苛刻要求。为解决这一问题, 研究人员开发了基于脉冲神经网络(SNN)的融合芯片, 模拟人脑突触可塑性机制, 实现了数据压缩与特征提取的同步进行。这种芯片在处理多通道传感器数据时, 能效比传统GPU提高了多个数量级。脉冲神经网络是一种新型的神经网络模型, 它模拟了人脑神经元的工作方式, 具有更高的生物可解释性和更低的能耗。基于脉冲神经网络的融合芯片可以实现对多传感器数据的高效处理, 包括数据压缩、特征提取和目标分类等。这种芯片在处理高维数据时表现出了显著的优势, 能够显著提高系统的实时性和能效比。

3.3 轻量化与低功耗的技术矛盾

移动防御平台对传感器系统的重量与功耗极为敏

感。为解决这一问题,研究人员开发了事件驱动型传感器,使待机功耗降低至微瓦级。配合能量收集技术,系统续航时间可延长至数月,为边境巡逻等场景提供了有力支持。事件驱动型传感器是一种新型的传感器技术,它只在检测到目标时才进行数据采集和传输,从而显著降低了系统的功耗^[4]。通过与能量收集技术的结合,事件驱动型传感器可以实现自供电运行,无需外部电源供应。这种技术在移动防御平台中具有广泛的应用前景,可以显著提高系统的续航能力和部署灵活性。

4 未来展望:从技术融合到认知融合

多传感器融合技术的终极目标,是构建具备自主认知能力的防御系统。这需要突破以下三个关键方向:

4.1 量子传感技术的革命性赋能

量子纠缠与压缩感知技术的结合,可实现超分辨率目标探测。基于冷原子干涉仪的量子雷达,其角分辨率较传统雷达提高了多个数量级,有望彻底解决低速飞行器的隐身难题。量子传感技术是一种利用量子力学原理进行高精度探测和测量的技术。量子雷达是量子传感技术的一种重要应用,它利用量子纠缠和量子压缩等原理,可以实现对目标的超分辨率探测和成像。与传统的雷达相比,量子雷达具有更高的探测灵敏度和更强的抗干扰能力,有望在未来的防御系统中发挥重要作用。

4.2 数字孪生驱动的预测性防御

通过构建防御场景的数字孪生体,系统可提前模拟目标轨迹与对抗策略。基于数字孪生的威胁预测技术,使防御资源调配效率大幅提升,显著提高了防御系统的主动性和预见性。数字孪生技术是一种通过建立物理实体的虚拟模型来模拟和预测其行为的先进技术。在防御系统中,数字孪生技术可以用于构建防御场景的虚拟模型,模拟目标的运动轨迹和对抗策略。通过与多传感器融合技术的结合,系统可以实现对目标的实时跟踪和预测,从而提前部署防御资源,提高防御的主动性和预见性。

4.3 脑机接口技术的人机协同

将操作员的认知能力融入传感器网络,形成“人在回路”的增强防御系统。通过脑电信号与传感器数据的实时映射,指挥员能够直接通过意识操控防御节点,显著缩短了决策链路,提高了防御系统的响应速度和准确性。脑机接口技术是一种实现人脑与计算机之间直接通信的技术。在防御系统中,脑机接口技术可以用于将操作员的认知能力融入传感器网络,实现人机协同的防御模式。通过脑电信号与传感器数据的实时映射,指挥员可以直观地感知战场态势,并直接通过意识操控防御节点。这种人机协同的防御模式可以显著提高系统的响应速度和决策准确性,为应对复杂多变的战场环境提供有力支持。

结语

多传感器融合技术正在重塑低速中大型航空飞行器的防御范式。从数据互补到认知协同,从被动响应到主动预测,这场技术革命不仅关乎传感器数量的叠加,更意味着防御理念的质变。面对未来空天威胁的复杂化趋势,唯有持续推动多学科交叉创新,构建开放协同的技术生态,方能在智能博弈中占据先机。当传感器网络从“眼睛”进化为“大脑”,防御系统终将突破物理限制,迈向认知对抗的新纪元。

参考文献

- [1]王海青,詹强,王岩,等.航空电子多传感器融合技术分析[J].飞机设计,2016,36(05):46-51.
- [2]王洲.基于多传感器融合的飞行器导航技术研究是实现[D].成都信息工程大学,2018.
- [3]逯岍.基于Kalman滤波的无人飞行器多传感器数据融合方法研究[D].南京理工大学,2018.
- [4]李勇,王德功,常硕.基于多传感器数据融合的飞机目标自动敌我识别方法[J].四川兵工学报,2012,33(01):33-35.