

反无人机技术综述： 通信技术与人工智能的融合



Overview of Anti-Drone Technology: Integration of Communication Technology and Artificial Intelligence

邱宝华/QIU Baohua

(中国移动通信集团广西有限公司, 中国 南宁 530028)
(China Mobile Group Guangxi Company, Nanning 530028, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202402013

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240418.1204.002.html>

网络出版日期: 2024-04-19

收稿日期: 2024-02-18

摘要: 对当前反无人机技术的最新进展进行了全面的梳理, 内容涵盖了从主动反制策略到被动检测技术的广泛领域。首先, 审视了主动干预技术, 如电磁干扰、激光系统和无线电频率干扰, 以及被动监测技术, 包括雷达、光学和热成像等。随后, 深入探讨了现代通信技术在反无人机系统中的应用, 重点关注了高速数据传输、信号覆盖、高精度定位、动态频率切换、宽频带和多输入多输出(MIMO)技术等方面的支持作用。此外, 还详细分析了人工智能技术在提高反无人机效能方面的研究成果和应用算法, 指出了目前的成就以及未来发展的潜在方向。最后, 展望了反无人机技术的未来发展趋势, 包括自主学习、对抗博弈和多智能体协同等方面, 并对这些新兴趋势可能带来的挑战及其解决方案进行了前瞻性讨论。本研究可为反无人机技术的未来发展提供一个全面的理论框架参考。

关键词: 反无人机技术; 智能无人系统; 通信技术; 人工智能; 自主学习; 对抗博弈; 多智能体协同

Abstract: The latest advancements in anti-drone technology are analyzed, encompassing a wide range of areas from active countermeasures to passive detection methods. The active intervention technologies are discussed including electromagnetic interference, laser systems, and radio frequency jamming, as well as passive surveillance methods like radar, optical, and thermal imaging. Subsequently, the application of modern communication technologies in supporting anti-drone systems is deeply explored, especially high-speed data transmission, signal coverage, high-precision positioning, dynamic frequency switching, broadband, and multiple-input multiple-output(MIMO) technologies. Moreover, the research outcomes and applied algorithms of artificial intelligence in enhancing the efficiency of anti-drone technologies are meticulously analyzed, and their current achievements and potential directions for future development are highlighted. Finally, the future trends in anti-drone technology is forecasted, including autonomous learning, adversarial gaming, and multi-agent collaboration, and discusses the challenges these emerging trends may face along with their solutions. This study can provide a holistic framework for the future development of anti-drone technology.

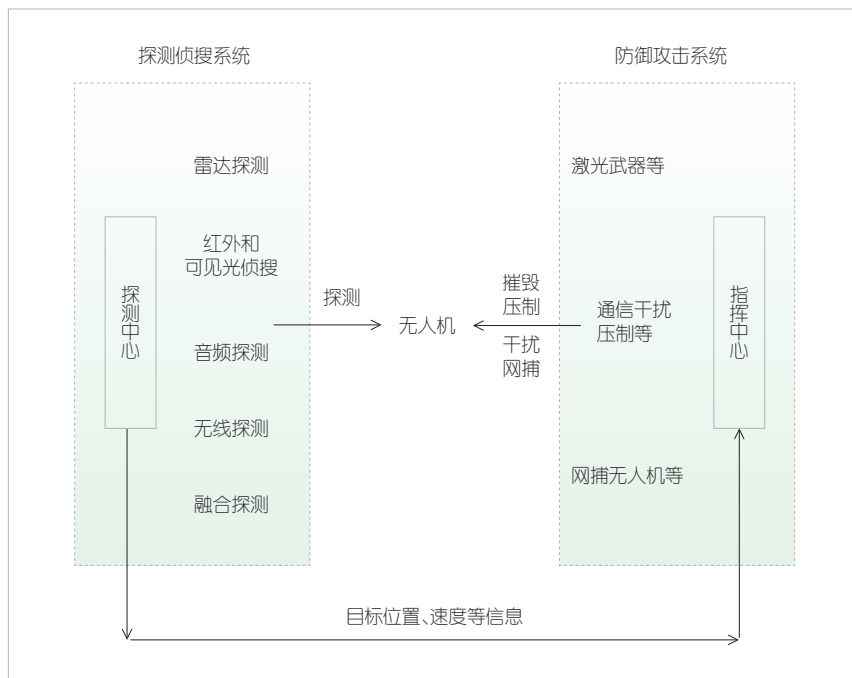
Keywords: anti-drone technology; intelligent unmanned system; communication technology; artificial intelligence; autonomous learning; adversarial gaming; multi-agent collaboration

引用格式: 邱宝华. 反无人机技术综述: 通信技术与人工智能的融合 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(2): 89-99. DOI: 10.12142/ZTETJ.202402013

Citation: QIU B H. Overview of anti-drone technology: integration of communication technology and artificial intelligence [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(2): 89-99. DOI: 10.12142/ZTETJ.202402013

近年来, 智能无人系统^[1-2]的发展日新月异。在俄乌冲突这一现代战争中, 双方都大规模使用了无人机执行多样化任务, 包括侦查、打击和情报搜集等。无人机在战场上发挥重要作用, 甚至改变了传统的战略和战术。因此, 反无人机技术的研究和发展变得尤为重要^[3-5]。无人机技术的进步得益于通信技术和人工智能的迅猛发展, 而反无人机技术的演进同样依赖于这些关键技术的前进。反

无人机技术已经从基础的物理干扰手段, 发展到了更为高级的电子和网络反制策略。主动反制技术, 包括电磁干扰、激光打击和无线电频率干扰等, 能够直接干扰无人机的操作。与此同时, 被动检测技术, 如雷达系统、光学摄像头和热成像技术, 能够在不干预无人机飞行的前提下, 监测和识别空中的无人机活动。图1展示了一套当前广泛采用的反无人机系统架构。



▲图1 反无人机系统示意图

1 反无人机技术的现状

为了有效应对无人机技术的挑战，研究人员已经开发了多种反无人机技术。这些技术主要分为两大类：主动反制技术和被动检测技术^[6]。

1.1 主动反制技术

主动反制技术通过主动干扰无人机的通信和导航系统，阻止其正常运作或使其被迫着陆。该技术具体包括电磁干扰、激光干扰和无线电频率干扰。

电磁干扰：通过向无人机发送强大的电磁信号，干扰其通信链路，使其无法接收指令或传输数据。电磁干扰可以是广播型、定向型或高能脉冲型，具体应用视情况而定^[7-8]。

激光干扰：利用激光束照射无人机，干扰其传感器和摄像头，使图像捕捉和目标识别变得困难^[9]。

无线电频率干扰：通过发射与无人机遥控器相同频率的信号，可以迫使无人机返回或着陆，或者使其无法接收操作者的指令^[10]。

主动反制技术的优势在于它们能够积极应对无人机的威胁，干扰无人机运行并迫使其离开或着陆。然而，这一技术也存在一些局限性，例如：对操作者和附近设备的潜在干扰，以及对无人机通信和导航系统的依赖。

1.2 被动检测技术

被动检测技术依赖传感器和监测系统，用于检测和识别无人机。相关技术包括雷达系统、光学摄像头和热成像。

雷达系统：利用无线电波来探测无人机的位置和速度，提供关于无人机的精确信息^[11]。

光学摄像：使用可见光或红外光来捕捉无人机的图像，有助于监测人员对无人机进行视觉识别^[12]。

热成像：利用目标的红外辐射来检测其热量分布，对于在夜间或恶劣天气条件下识别无人机非常有用^[13]。

被动检测技术的优势在于它们不会干扰无人机的通信和导航系统，因为它们依赖于传感器和监测设备。然而，它们也有一些限制，如有限的探测范围和受天气条件的影响。

现代通信技术和人工智能在推动无人机技术发展的同时，也在不断促进反无人机技术的发展。在接下来的章节中，我们将探讨通信技术和人工智能如何在反无人机系统中起着核心作用。

2 通信技术在反无人机技术中的关键作用

智能无人系统使得无人机在某些特定任务和情境下可以实现一定程度的自治操作。但对于更复杂的任务和决策来说，即使无人机具有高级的人工智能，也可能需要人的干预。因此，通信技术在反无人机技术中起着关键的作用^[14]。

1) 高速数据传输

高速数据传输在反无人机技术中的应用是多方面的，主要包括以下几个方面：

(1) **实时数据传输：**在反无人机系统中，实时性是关键。5G和6G等高速通信技术能够确保雷达数据、光学图像、红外扫描等信息以极低延迟传输到控制中心^[15]。这样，操作员可以迅速对无人机的动作做出反应，如改变方向、调整高度等，从而提高拦截的成功率。

(2) **多源数据融合：**反无人机系统通常需要从多个探测设备收集数据，包括雷达、声纳、摄像头和其他传感器。高速数据传输能力使得这些来自不同源的数据可以迅速合并，以便进行综合分析^[6]。这种多源数据融合技术有助于更准确地确定无人机的定位、轨迹和意图，从而为拦截策略

提供支持。

(3) 快速决策支持: 通过高速数据传输, 反无人机系统可以将收集到的数据快速进行分析, 以便操作员能够迅速做出决策。这种快速决策支持有助于系统及时识别无人机的类型, 评估潜在威胁并制定最佳的拦截策略。

(4) 增强的情报共享: 高速数据传输还允许反无人机系统与其他安全机构或部队共享情报。这种情报共享可以提高对无人机威胁的整体应对能力, 同时也能够在更大的范围内协调拦截行动。

(5) 支持高级应用程序: 随着技术的发展, 反无人机系统将能够支持更多高级应用程序, 如机器学习算法、人工智能等。这些高级应用程序需要大量的数据处理和分析, 而高速数据传输提供了必要的数据处理速度和带宽。

总之, 高速数据传输在反无人机技术中的作用是至关重要的。它不仅提高了系统的实时响应能力, 还增强了数据融合、决策支持和情报共享的能力。随着通信技术的不断进步, 反无人机系统将变得更加高效和准确。

2) 增强的信号覆盖和稳定性

在过去, 有限的通信范围可能会限制反无人机系统在某些偏远或具有挑战性的环境中的使用, 例如山区、森林或城市深处等。但是, 随着信号覆盖的扩展, 这些地区不再是“死角”, 反无人机系统可以轻松部署和操作。除了扩展的操作范围, 增强的信号稳定性也意味着反无人机系统在各种复杂环境中都可以保持高水平的性能。无论是在高楼大厦之间、大风雨中, 还是在其他各种干扰比较强的环境中, 现代通信技术都能够确保反无人机系统获得比较稳定、准确的数据流, 使其在各种条件下都能有效地执行任务。

增强的信号覆盖和稳定性不仅为反无人机系统提供了更大的工作范围, 而且大大提高了对潜在威胁的响应速度和精确度^[7]。此外, 稳定的通信链接还可以支持远程操作和实时策略调整。这意味着即使在最具挑战性的环境中, 操作员仍然可以保持与系统的通信, 根据实时数据调整拦截策略或部署其他资源。总之, 现代通信技术的信号覆盖和稳定性为反无人机系统提供了更高的灵活性、反应速度和战术效果。

3) 高精度的定位技术

高精度定位技术已成为现代通信技术的关键组成部分, 为众多行业带来了前所未有的优势。在反无人机技术领域, 这一进展尤为关键。通过集成卫星导航系统, 如全球定位系统 (GPS) 和北斗等, 反无人机系统的定位精度得到了显著增强^[8]。这些先进的导航系统不仅为反无人机系统提供了持续性和稳定性的定位服务, 而且还通过多卫星数据融

合技术, 确保了定位数据的准确性和可靠性。

在复杂的地形环境中, 例如城市高楼大厦、山区等地, 高精度定位技术能够帮助反无人机系统快速识别并精确锁定目标位置, 进而实施有效的干预措施。此外, 高精度定位技术还可以与其他传感器和侦测设备, 如雷达、红外摄像机等, 协同工作, 形成一个综合的监控网络。这种多元化的数据输入不仅扩大了系统的探测范围, 还提升了对于目标无人机行为分析和预测的能力。

通过对这些数据进行实时分析, 反无人机系统能够预判无人机的未来动作, 并据此提前部署相应的策略, 如电磁干扰、物理拦截等, 从而提升拦截的成功率。可以预见, 随着技术的不断进步, 高精度定位技术将在未来反无人机战术中扮演更加重要的角色。

4) 动态频率切换与干扰

动态频率切换是现代通信技术的一项关键进步, 它使得设备能够在不同频率间迅速切换, 以确保通信的稳定性与安全性^[9]。在反无人机技术领域, 这一能力成为了一种强大的工具, 用于干扰和中断敌方无人机的通信链路。利用动态频率切换技术, 反无人机系统能够快速检测并识别目标无人机所使用的通信频率, 并立即实施干扰措施。

随着无人机技术的发展, 许多无人机已经具备了自动切换备用频率的能力, 以应对可能的干扰。然而, 动态频率切换技术能够使反无人机系统实时追踪并干扰这些频率的变化, 以确保无人机始终处于失联状态。

此外, 现代通信技术还提供了更为复杂和多样化的干扰策略。除了传统的信号阻断方法外, 反无人机系统还可以发送伪造的控制指令, 诱使无人机执行错误的动作, 如降落或偏离航线。这种“智能干扰”策略不仅提高了拦截的成功率, 还显著降低了误伤无辜设备的风险。

展望未来, 我们可以预期动态频率切换与干扰技术将在反无人机战略中扮演更加关键的角色, 为防御无人机系统提供更加有效和灵活的手段。

5) 宽频带技术

宽频带技术的引入为反无人机技术带来了革命性的变化。与传统的通信技术相比, 宽频带技术能够在更广泛的频率范围内进行工作, 从而消除了检测和干扰无人机时的盲区。宽频带技术的应用使得反无人机系统能够同时监视多个频段, 从而允许操作员更加准确地确定哪些频率正在被潜在威胁的无人机所使用, 并针对性地实施干扰措施^[10]。

这种技术不仅显著提高了干扰的成功率, 还减少了对其他非目标通信设备的非必要干扰, 降低了误伤的风险。

此外,宽频带技术在复杂电磁环境中的适应性也是其另一个重要优势。在现代城市环境中,众多通信设备、信号塔和其他电子设备产生的电磁干扰使得电磁环境极为复杂。宽频带技术使得反无人机系统能够在这样的环境中迅速识别并响应潜在威胁的无人机信号。

宽频带技术的广泛频率覆盖范围、精确的干扰能力以及对复杂电磁环境的适应性,都极大地提升了反无人机技术的能力。这些技术进步为反无人机战略提供了更加有效和灵活的手段,以应对不断演进的无人机威胁。

6) 多输入多输出(MIMO)技术

MIMO技术是通信领域近年来的重大突破。它通过使用多个发射天线和接收天线同时传输和接收数据,显著提高了数据传输的速度和可靠性^[6]。在反无人机技术领域,MIMO技术也发挥着至关重要的作用,为无人机的检测、跟踪和拦截提供了强有力的技术支持。

MIMO技术的多天特性使得系统能够从不同角度和位置接收到无人机的信号,并可以利用这些信号差异可以精确计算出无人机的位置。这种方法不仅极大地提高了目标检测的准确性,还使得对无人机的跟踪更加稳定和可靠。此外,当无人机尝试通过改变频率或使用干扰器来规避检测时,MIMO系统的多频特性能够迅速适应并重新锁定目标。

此外,MIMO技术增强了反无人机系统的信号干扰能力。与传统的单一输入输出系统相比,MIMO技术允许系统同时对多个目标发射干扰信号。这意味着在多架无人机同时出现的情况下,系统仍然能够有效地进行拦截。由于MIMO技术能够提供更强大的信号输出,其干扰效果也更为显著,从而大大增加了无人机被成功拦截的概率。

总的来说,无论是提高定位准确性、增强跟踪稳定性,还是提升干扰效果,MIMO技术都为反无人机技术的发展提供了强有力的技术支撑。

3 人工智能在反无人机技术中的关键角色

人工智能技术在无人机的发展中扮演着至关重要的角色,这一作用在反无人机技术领域同样显著。随着无人机技术的发展,飞行器具备了微小尺寸、高速机动性,以及可能采用的隐蔽或低空飞行轨迹等特性。这些特性使得传统的人工监视和控制手段面临着重大挑战。然而,人工智能技术的应用为这些挑战提供了有效的解决方案。

3.1 人工智能为何重要

在反无人机技术领域,人工智能的重要性体现在以下3

个方面:

1) 高速数据处理与实时决策

无人机的快速移动和短时间内执行复杂任务的能力要求反无人机系统能够实时跟进和应对。人工智能系统能够快速处理来自雷达、相机和其他传感器的庞大数据流,并立即作出响应决策,如自动跟踪、识别无人机类型及其潜在威胁,并实施相应的防御措施。这一能力是传统手段所难以企及的。

2) 模式识别和异常检测

人工智能在模式识别和异常行为检测方面表现出色。通过深度学习,系统可以从过去的数据中学习无人机的飞行模式,并能够识别出与众不同、异常或威胁性的行为。这在识别敌对或非法无人机行为方面至关重要,尤其是在它们试图模仿正常的商业无人机操作或采取隐蔽行动时。

3) 自适应与持续学习

无人机技术和用途的不断进化意味着传统的反无人机方法可能很快就会过时。人工智能可以通过不断学习新的无人机特征、战术和干扰技术来适应这种变化,不仅能够根据新的威胁数据更新其模型,还能预测和对抗未来潜在的无人机发展趋势。

这3个原因共同体现了人工智能在处理高速移动目标、复杂数据环境以及不断变化的威胁景观中的关键作用,使其在反无人机技术中变得不可或缺。随着现代人工智能,特别是深度学习和增强学习的发展,反无人机技术的能力得到了大幅度的提升。

3.2 智能算法在反无人机技术中的应用

现有的人工智能技术主要应用于处理和分析多种传感器(如雷达、红外、可见光等)所收集的数据。研究表明,单独使用任一种传感器通常无法有效地探测到无人机,而一个高效的无人机探测系统通常依赖于多种传感器的组合使用。为了提升探测的准确性和效率,实现多传感器数据融合变得至关重要。人工智能算法在这里扮演了一个关键角色,特别是在从大量噪声干扰的数据中提取出有用信息,以及识别潜在的无人机威胁方面。表1详细列出了现有研究中提及的不同传感器收集的信息,以及相应的人工智能算法。

1) 雷达探测数据处理

雷达技术在监测和预警海上与陆地目标方面具有重要作用,而在无人机探测领域,其重要性更是显著。雷达探测的基本原理是发射电磁波并接收反射信号,从而获取目标的位置、速度、形状等多维信息。在雷达数据处理中,

关键任务包括检测低空、慢速、小尺寸的目标（即“低慢小”目标），以及有效区分无人机与鸟类等干扰源。为了提高目标检测的准确性，算法的发展至关重要。从传统算法到现代神经网络和深度学习的应用，这一进步极大地提升了雷达探测的性能。

在传统算法的基础上，研究者们通过创新方法取得了显著的性能提升。例如，文献[11]提出了一种基于稀疏字典学习的方法，用于从海杂波中提取有效信息以识别无人机。文献[12]和[13]将多普勒频谱作为图像处理，利用神经网络 LeNet^[45]和 GoogleNet^[46]来区分目标和杂波。研究结果显示，LeNet 在处理回波方面更加高效，而 GoogleNet 则在检测概率和虚警率方面表现更佳。文献[18]和[46]使用短时傅里叶变换（STFT）来生成频谱图，并通过主成分分析（PCA）进行降维处理。这些研究将 66 种类别的无人机通过 K 最近邻（KNN）、随机森林（RF）、朴素贝叶斯（NB）和支持向量机（SVM）进行分类。结果显示，随机森林在分类精度上最为出色，其次是朴素贝叶斯，而 SVM 和 KNN 的精度相对较低。在文献[19]中，研究者通过使用 STFT 将频谱转化为图像后，再利用深度卷积神经网络（DCNN）对无人机进行分类。文献[20]则直接将 DCNN 应用于原始微多普勒频谱图上，提出的 DCNN 模型能够自动学习特征，无须借助任何领域专门知识。

2) 红外和可见光探测数据处理

红外和可见光探测是无人机监测的两种关键技术。红外探测捕捉无人机发出的红外波段图像，而可见光探测则获取无人机在可见光波段的图像。这两种方法都广泛应用各类图像处理技术，如降低噪声和抑制背景，以确保对无人机的有效探测和识别。近年来，基于深度学习的技术已成为处理红外和可见光图像的主流趋势。这些方法通常先利用传统图像处理技术确定潜在的目标区域，再通过深度学习进行更精确的目标检测和特征提取。

由于可见光探测不能提供距离信息并且受光照条件影响较大，许多研究正致力于将红外图像与可见光图像，以及雷达数据与可见光传感器信息结合起来，以提高无人机探测的准确性。尽管在反无人机领域，基于深度学习的红外探测技术研究还处于初级阶段，但其已经从其他目标探测领域获得了一定的启发，有望被有效地转化并应用于无人机探测。

文献[21]探索了一种结合可见光和红外图像的方法，通过利用 VGG-19 网络提取深层特征，并与图像的细节内容结合，实现了融合图像的重构。这项技术不仅对无人机探测有效，也适用于多曝光和多焦点图像融合等其他的一些应用。文献[22]提出了一种基于生成对抗网络（GAN）的红外和可见光图像融合方法，着重于平衡保留红外热辐射信息与增强可见光图像细节之间的关系。而文献[23]研究了雷达与可见光传感器协同监视跟踪低空目标的方法，通过实现量测模型切换和数据的在线更新，以获得更准确的目标信息。

文献[24-25]开发了基于模型的无人机增强技术，结合 Faster-RCNN 检测器和多域网络跟踪器，并通过利用图像序列中的残差信息来提高跟踪精度。文献[26]创建了基于网络抓取的图像和人工数据集，使用基于 VGG 和 CNN 的端到端检测模型进行无人机和鸟类的检测。文献[27]和[28]则分别运用了 ResNet-101、Faster-RCNN 和单步多框检测器（SSD）模型对无人机和鸟类进行检测和分类，展示了这些模型在训练和测试数据集上的优异性能。文献[29]提出了一种基于 CNN 的时空语义分割方法，该方法使用 U-Net 架构来识别图像中的感兴趣区域，并利用 ResNet 分类网络来确定这些区域是否包含无人机。

3) 声音探测数据处理

音频探测技术在无人机监测中扮演着补充角色，它通过捕捉无人机运动时产生的独特声音特征来进行探测。这

▼表1 反无人机采用的不同探测技术及相应的算法

探测技术	人工智能算法(包括信号处理算法)	相关文献
雷达	LeNet、GoogleNet、PCA、KNN、RF、NB、SVM、DCNN 等	[11-13, 17-20]
红外和可见光	VGG-19、GAN、Faster-RCNN、U-Net、ResNet 等	[21-29]
声音	MFCC、LPCC、SVM、GMM、CNN、RNN 等	[30-33]
无线	SVM、RF、CNN 等	[34-37]
多传感器融合	贝叶斯融合、基于信号方差的融合、最优融合等	[38-44]

CNN: 卷积神经网络
DCNN: 深度卷积神经网络
GAN: 生成对抗网络
GMM: 高斯混合模型
KNN: K最近邻

LPCC: 线性预测倒谱系数
MFCC: 梅尔频率倒谱系数
NB: 朴素贝叶斯
PCA: 主成分分析
RCNN: 区域卷积神经网络

RF: 随机森林
RNN: 循环神经网络
SVM: 支持向量机
VGG: 视觉几何组

种技术的主要挑战包括环境噪声的干扰、探测距离的限制,以及公共无人机声音数据集的缺乏。尽管如此,音频探测仍然被视为雷达和可见光探测的有效补充,尤其是在需要区分无人机和其他飞行器的情况下。

在无人机音频探测领域,研究人员通常采用梅尔频率倒谱系数(MFCC)、线性预测倒谱系数(LPCC)等特征提取方法,并结合机器学习算法进行声音数据的分类。以下是一些研究案例:

文献[30]中,研究人员使用了MFCC和LPCC方法来提取特征,并采用多种内核的SVM从包含鸟声、飞机和雷暴声的复杂环境中检测和分类无人机声音。实验结果表明,MFCC方法在性能上优于LPCC。

文献[31]改进了MFCC的流程和参数,并结合了一阶差分和多距离分段采集法。通过训练高斯混合模型(GMM),研究者建立了一个无人机音频的“指纹库”,并实现了84.4%的识别率。

文献[32]探讨了在高噪声环境下无人机声音的检测。为了解决训练数据不足的问题,研究者在无人机声音数据集中添加了多种环境声音数据进行数据扩充,并使用GMM、CNN和循环神经网络(RNN)进行检测。结果显示,RNN在各种背景数据集上表现最佳,而GMM和CNN性能相对较差。

文献[33]提出了一种由高清摄像头和麦克风组成的音频辅助摄像机阵列,通过结合视频和音频数据,使用方向分布直方图处理视频数据,并使用MFCC和SVM处理音频数据,最终采用SVM检测场景中的无人机。这种音视频结合的方法显著提高了检测框架的性能。

这些研究表明,尽管音频探测技术在无人机监测中面临着诸多挑战,但通过适当的特征提取和先进的机器学习算法,仍然可以实现对无人机声音的有效探测和识别。随着技术的进步,音频探测技术有望在未来得到更广泛的应用,并进一步提高无人机监测系统的整体性能。

4) 无线探测数据处理

无线探测技术是识别和定位无人机的一种重要手段,它通过监测无人机在通信过程中产生的无线电信号,提取这些信号的频谱特征,并构建无人机特征库,以便对无人机进行检测和定位。无线探测技术的主要方法包括到达时间法(TOA)、到达时间差(TDOA)和无线电测向技术。近年来,随着人工智能技术的发展,SVM、遗传算法、聚类算法和深度学习方法等已被广泛应用于无线电信号的特征提取和分类处理,以实现更准确和高效的无人机探测与定位。

在无线电信号处理领域的研究中,一些技术虽然不是专门为无人机探测设计的,但为该领域提供了有价值的见解。例如,文献[34]中,研究者采用SVM识别无线电信号,并通过多项式搜索算法优化多项式核函数的SVM,使其在识别无线电对地干扰信号方面的准确性和鲁棒性超越传统的遗传算法。文献[35]提出了一种创新的典型频谱方法,用于分析广播频段的频谱数据。该方法通过重复实验提取关键特征,并利用聚类算法构建典型频谱,进而识别干扰源和非法广播,为无线电监测提供了新的视角。

文献[36]采用图像二值化和去噪算法将二维图像转换为二进制格式,再通过六层卷积神经网络(CNN)进行特征提取和分类,有效地检测、跟踪和定位辐射源。文献[37]引入了一种深度门控递归单元卷积网络,专注于无线电信号的特征提取和分类。该方法在对比测试中表现优于SVM和RF,准确率高达90.6%,有效地实现了对31种不同信号的分类。

文献[35]和[36]的方法主要针对单样本分类,而文献[37]的方法适用于多样本情况,显示了深度学习在无线电波形分类中的潜力。这些研究为无人机探测领域提供了新的技术思路和方法参考,有助于推动该领域的技术发展。

5) 多传感器融合数据处理

多传感器数据融合能够将来自雷达、红外线、可见光摄像机和声波监测等不同传感器的信息进行整合。融合算法可以通过学习不同传感器的数据表征,优化数据融合过程中的特征提取和决策逻辑,可以在各种环境条件下识别和跟踪目标,即便在视线不佳或天气条件恶劣的情况下也能保持高准确率^[38]。特别是在传感器之一被干扰或失效时,融合算法可以重新分配资源,以确保系统的整体性能不受影响。通过这种自我调节的机制,反无人机系统在面对日益复杂的无人机威胁时,可以保持高度的灵活性以及鲁棒性。

最近的研究成果在多传感器数据融合方面展现了创新的方法和显著的潜力。例如,文献[39]针对雷达和红外传感器的数据融合进行了深入研究,分析了5种不同的融合技术:贝叶斯融合、基于信号方差的融合、最优融合、基于误差方差的融合和基于扩展卡尔曼滤波器的融合。研究发现,使用扩展卡尔曼滤波器的融合方法在跟踪性能上优于其他方法。文献[40]探索了激光雷达和红外传感器的融合,以实现高速低空目标的三维定位。在这项工作中,卡尔曼滤波器和扩展卡尔曼滤波器被用于优化状态估计和数据融合过程,且这种融合主要发生在决策级别。文献[41]采用基于导引滤波器的混合多尺度分解方法来融合图像,通过自

适应增强可见光图像,并利用红外图像的像素值进行指数变换,提取红外特征信息,实现了在特征级别的有效融合。文献[42]通过对红外和可见光图像进行特征提取,然后将局部方差偏移、对比和熵作为证据,在特征级别上进行融合。文献[43]将声学、红外摄像机和雷达传感器结合起来进行鸟类监测,通过对这些传感器收集的数据进行预处理,包括对声学传感器数据的特征提取和分类,以及对红外图像进行背景减影、斑点检测、阈值化和噪声抑制,同时对雷达数据采用粒子滤波器进行处理。在数据融合的阶段,文献[43]则采用了两级融合的架构,首先在特征级别上融合了红外和雷达数据,然后在决策层上将这些融合的特征向量与声学数据相结合,并且使用模糊贝叶斯方法^[44]进行最终的融合。

这些研究表明,多传感器融合技术不仅能够提高无人机探测系统的性能,而且在不同领域的应用中也显示出巨大的潜力。未来,随着传感器技术的进步和算法的不断发展,多传感器融合技术将在无人机探测和跟踪领域发挥更加重要的作用,并为系统的优化和升级提供新的方向和思路。

基于上述分析,我们看到人工智能算法成功应用于快速数据处理、模式识别以及实时决策等领域。然而,自适应学习和自我进化,在对抗无人机的算法中仍是一片待开发的领域。这些技术的进步对于促进人工智能自我演化至关重要,它们是实现完全自动化、由人工智能驱动的反无人机系统的关键。虽然目前这样的系统大多仍处于概念和规划阶段,但已经有了一些令人鼓舞的进展^[44]。

人工智能的发展极大地促进了无人机技术的进步,同时也对反无人机系统提出了更高的技术要求。接下来我们将预测未来的发展趋势,并讨论可能遇到的挑战。

4 未来发展趋势与挑战

为了有效应对无人机技术进步带来的威胁和挑战,反无人机技术需要在以下3个核心领域实现重大突破:自主学习、对抗博弈以及多智能体协同。

4.1 自主学习

反无人机技术的发展正呈现出一个明显的趋势,即集中在自主学习领域。随着无人机技术的飞速发展,传统的反无人机系统在适应新策略和变化方面面临越来越大的挑战。为了有效地应对这些挑战,自主学习成为了关键的发展方向。未来的反无人机系统需要利用先进的机器学习算法,应对各种无人机的新威胁。

自主学习的重要性在于系统的实时适应性和智能反应策略。通过从每次遭遇中学习,反无人机系统能够不断优化自身的反应策略,从而提高拦截成功率。特别是,当无人机在遭遇干扰后改变飞行策略时,人工智能算法能够迅速识别这一变化,并灵活地调整预测算法,以适应新的飞行模式。这种自我调整能力对于对抗日益复杂和自主的无人机系统至关重要,因为这些系统可能会实时动态地调整飞行路径,以规避侦测或反制。通过不断的学习和适应,反无人机系统能够提前部署资源,如调整传感器指向、准备干扰设备或调动拦截无人机,从而有效地中和无人机,确保其在进入关键区域或执行潜在任务之前被成功阻截。这一发展趋势为未来的反无人机技术的提升奠定了坚实基础。

然而,随着这一发展趋势,一系列挑战也随之而来,需要精心设计的解决方案来应对。

首先,无人机系统的不断演进增加了系统对新策略和变化的适应难度,这需要更高级别的智能化。解决这一挑战的关键在于优化智能学习算法。传统反无人机系统可能无法快速适应无人机的新策略和变化,缺乏实时智能学习能力。因此,引入深度强化学习^[47]等先进机器学习算法变得至关重要。通过大量数据进行模型训练,系统能够持续提升对不断变化的威胁的感知和应对能力,实现系统的智能化进化。

其次,无人机在遭遇干扰后的实时反应性以及飞行策略的动态调整带来了更大的复杂性,传统系统难以满足这种需求。解决这一挑战的途径是引入实时反应性和动态调整的处理机制。通过实时决策算法,反无人机系统能够在毫秒级别内做出智能决策,确保在无人机遭遇干扰时能够迅速而有效地调整应对策略。结合传感器网络,系统可实现对无人机动态调整路径的实时监测和反制,保持对无人机的持续有效拦截。这样的系统能够应对威胁的多样性和动态性,提高反无人机系统的整体应对能力。

最后,跨领域合作与信息共享成为另一个解决方案。多领域的无人机技术发展需要不同领域专家的协同合作和信息共享,以整合各种数据源和技术。解决这一挑战的关键在于建立跨领域的合作机制。联合研发和跨领域团队合作,能够促进信息共享和技术整合,可以推动反无人机系统的综合性发展,提升系统在复杂环境下的适应性和效果。这样的协同性和综合性发展将为未来的反无人机系统提供更为全面、高效的解决方案,使其能够更好地适应不断变化的无人机威胁。

4.2 对抗博弈

在未来反无人机系统的发展中, 对抗博弈将成为一个关键的焦点。这一趋势涉及系统与无人机之间智能对抗的模拟和优化, 目的是提升系统的适应性和对无人机威胁的整体应对能力。这一发展方向是对无人机技术快速演进和多样化应用的响应, 要求系统不仅具备高效的感知能力, 还需要通过对抗博弈来应对无人机可能采取的多种战术和策略。

在对抗博弈的框架下, 未来的反无人机系统将通过建立智能对抗模型, 模拟无人机可能的战术和行为, 包括可能的规避策略、干扰手段以及突然变化的飞行路径。利用深度学习和强化学习等先进技术, 系统能够从历史数据中学到无人机的行为模式, 并实时更新模型以适应新的威胁。这样的模拟将使系统能够更加准确地预测和解读无人机的行为。

基于对抗博弈的模型, 反无人机系统可以预测无人机的可能动作, 提前识别潜在威胁。这使得系统能够在无人机进入关键区域之前, 通过智能的防御措施进行部署, 例如: 调整传感器指向, 准备干扰设备或调动拦截无人机。这样的预测性部署将大大提高系统的反应速度和对抗效果, 增强整个反无人机系统的实战能力。

随着无人机技术的快速演进, 反无人机系统在对抗博弈方面面临着一系列挑战。

首先, 系统需要适应技术的快速发展, 应对日益多样化的无人机威胁。为此, 建立开放式的软件架构和模块化硬件设计显得尤为重要, 以便系统能够轻松升级和适应新技术。

其次, 随着对抗模型变得更加复杂, 高效的数据处理与分析能力成为关键。在此方面, 运用高性能计算平台和优化算法, 以及云计算和边缘计算技术^[48], 将提高数据分析的效率和响应速度。

最后, 深度强化学习虽为系统提供了先进的学习能力, 但也带来了大量数据和计算资源的需求, 以及模型可解释性的挑战。解决这一问题的途径在于使用更高效的学习算法, 以及采用模型简化和优化技术以改善可解释性。

对于实时更新与适应新威胁的要求, 实现自适应学习系统并采用分布式数据收集和处理系统是关键。此外, 准确预测无人机的行为对于有效防御至关重要, 需要结合多种数据源和智能分析技术来提高预测的准确性。

应对这些挑战的解决方案需要包括持续的技术创新、跨领域协作、模型和算法的标准化、强化防御部署策略, 以及人机协同。通过不断探索新的传感技术、人工智能算

法和计算平台, 系统可以保持技术的领先地位。与军事、网络安全、人工智能等不同领域的专家合作, 可以共同解决复杂问题。

此外, 制定标准化的模型和算法框架可以提高开发效率和互操作性。采用多层次、多维度的防御策略, 包括物理拦截、电子干扰等手段, 可以加强系统的防御能力。加入人工智能辅助决策的人机协同系统, 将提高系统对复杂环境的适应能力和作战效率。

综上所述, 通过采取灵活、创新、协同的策略, 反无人机系统将能够有效对抗日益复杂的无人机威胁, 确保关键区域的安全与稳定。

4.3 多智能体协同

多智能体协同的应用将成为一个关键趋势, 特别是在应对逐渐增加的无人机群威胁方面。这种趋势指向了不同反无人机系统之间必须实施的高效信息共享和协作作战, 目的是实现更广泛的监控范围和更精准的任务执行能力。由于无人机技术正迅速发展, 尤其是无人机群带来的新型挑战, 单个反无人机系统面对这种复杂多目标的威胁时往往显得不够充分。因此, 开发能够协同作战的多智能体系统变得至关重要。这类系统能够在各自单元之间实现有效的通信和协调, 例如: 通过共享有关无人机群的位置、速度和飞行方向等关键信息, 各单元可以共同制定出更为有效的拦截和干扰战术。这样的方法不仅提升了单一系统的防御能力, 也极大地增强了整体网络防御体系的效能和适应性。

与单智能体系统相比, 多智能体系统的主要优势在于各个智能体之间能够互相学习并共享能力, 从而极大地提高整体协同决策的效率和有效性。这些智能体能够独立作出决策, 同时通过与其他智能体的交互实现知识和经验的互惠共享。例如, 一个智能体发现的有效防御策略可以通过网络共享给其他智能体, 从而增强整体系统对新挑战的适应能力。协同决策进一步增强了这种系统的效能, 特别是在处理诸如多目标拦截和战术规避等复杂战术情况时。此外, 未来的研究将致力于提高系统的自适应能力, 而这依赖于先进的机器学习算法, 使智能体能够快速学习并优化其行动模式。同时, 随着智能体间互动和数据共享的增加, 保证信息安全和系统稳定运行也成为重要的研究方向, 而这需要发展高效的加密通信协议和鲁棒网络架构。综合来看, 多智能体系统的发展将专注于增强自主决策、学习能力、协同决策效率、自适应性以及系统的安全性和稳定性, 以应对日益复杂的安全挑战。

在当今日益复杂的安全环境中,多智能体协同系统在反无人机领域中应对无人机群等威胁的能力变得至关重要。这一系统面临的主要挑战之一是如何实现高效的信息共享与协作作战。为应对无人机群等复杂威胁,不同反无人机系统之间必须能够有效地共享信息和协调行动。针对这一挑战,可采用的解决方案包括开发高级通信协议和数据共享平台,以确保可以实时、准确地交换信息。此外,运用云计算和边缘计算的相关技术,可以大幅地提高数据处理速度和响应时间,从而加强了多智能体系统的整体协作效率。

此外,自主决策和智能体之间的学习能力也是多智能体协同系统面临的关键挑战。在这方面,每个智能体不仅需要有能力独立作出决策,还要能够从其他智能体那里学习并共享知识和经验。解决这一挑战的方法是利用先进的机器学习和人工智能算法,例如深度强化学习,以增强智能体的自主学习和决策能力。此外,实施智能共享机制可以使一个智能体的学习成果被其他智能体所利用,从而提升整个系统的智能水平和响应能力。为了提高协同决策的效率与有效性,设计高级的决策支持系统和协同算法至关重要,以确保智能体在考虑全局最优解时能够有效地协作。

与此同时,增强多智能体系统在面对环境变化和新型威胁时的自适应能力同样重要。集成的自适应学习机制可以使系统根据环境的变化自动调整其行为和策略。此外,保障信息在多智能体系统间传输的安全性和系统的稳定运行也不容忽视。这需要实施高效的加密通信协议和鲁棒的网络架构设计,以增强系统对外部干扰和内部故障的抵抗能力。总而言之,通过实施这些解决方案,多智能体协同系统能够在提高自主决策和学习能力的同时,保持高效的协同决策,有效应对环境变化,并确保系统的信息安全和稳定性。这些措施将共同提升反无人机系统面对日益复杂和多样化威胁时的总体效能和适应性,为未来安全环境中的挑战提供有效的解决方案。

5 结束语

本文全面探讨了反无人机技术的发展趋势、技术原理,以及通信技术和人工智能在这一领域的关键作用。通过各章节的深入分析,本文得出以下结论:

首先,随着无人机技术的快速进步,反无人机技术的需求变得尤为迫切。尽管无人机为社会带来了诸多便利,但其广泛应用也引发了对安全和隐私的担忧。反无人机技术的研究与开发,旨在应对无人机可能带来的各种潜在威

胁,如侵犯隐私、侵犯领空和实施恶意攻击等。

其次,通信技术在反无人机技术中扮演了核心角色。通过优化通信系统,提高数据传输的稳定性和实时响应能力,反无人机技术的运行效率得到了显著提升。随着通信技术的持续进步,反无人机系统的性能和可靠性也将得到进一步加强。

最后,人工智能在无人机目标识别和自主决策方面起到了至关重要的作用。深度学习和计算机视觉技术的应用,使得系统能够精确识别无人机目标,并及时做出智能响应,从而提升了系统的自主性和效率。

未来,反无人机技术的发展将依赖于自主学习、对抗博弈和多智能体协同等关键技术,以更好地适应不断变化的无人机威胁。然而,这一领域也面临着诸多挑战,包括隐身和低速小目标的识别、高机动性无人机的应对、智能无人机和无人机群的出现、法律和道德问题的处理、成本和可持续性,以及国际合作的重要性。克服这些挑战需要跨学科的研究和国际合作。

总的来说,反无人机技术的发展离不开通信技术和人工智能的支持,同时也需要应对未来的挑战。只有通过持续的创新和合作,我们才能更好地保障社会安全、保护隐私和维护法律秩序。本论文期望能为反无人机技术领域的研究和实践提供有价值的参考,推动该领域的发展与进步。

参考文献

- [1] 张涛, 芦维宁, 李一鹏. 智能无人机综述 [J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 32-35. DOI: 10.3969/j.issn.1671-833X.2013.12.003
- [2] ZHANG T, LI Q, ZHANG C S, et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems [J]. Frontiers of information technology & electronic engineering, 2017, 18(1): 68-85. DOI: 10.1631/FITEE.1601650
- [3] 张静, 张科, 王靖宇, 等. 低空反无人机技术现状与发展趋势 [J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 1-8. DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.01.001
- [4] 蔡亚梅, 姜宇航, 赵霜. 国外反无人机系统发展动态与趋势分析 [J]. 航天电子对抗, 2017, 33(2): 59-64
- [5] CHAMOLA V, KOTESH P, AGARWAL A, et al. A comprehensive review of unmanned aerial vehicle attacks and neutralization techniques [J]. Ad hoc networks, 2021, 111: 102324. DOI: 10.1016/j.adhoc.2020.102324
- [6] 王妮. 基于多源信息融合的无人机视觉导航技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019
- [7] 周新民, 吴佳晖, 贾圣德, 等. 无人机空战决策技术研究进展 [J]. 国防科技, 2021, 42(3): 33-41. DOI: 10.13943/j.issn1671-4547.2021.03.05
- [8] 刘宏, 万立健, 陆亚英. 基于北斗卫星导航系统的远距离海洋工程高精度定位技术 [J]. 测绘通报, 2017, (5): 62-66. DOI: CNKI:SUN:

- CHTB.0.2017-05-015
- [9] YAN S, CAO X Y, LIU Z L, et al. Interference management in 6G space and terrestrial integrated networks: challenges and approaches [J]. *Intelligent and converged networks*, 2020, 1(3): 271-280. DOI: 10.23919/ICN.2020.0022
- [10] GHOSH A, RATASUK R, MONDAL B, et al. LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology [J]. *IEEE wireless communications*, 2010, 17(3): 10-22. DOI: 10.1109/MWC.2010.5490974
- [11] DONG Z W, SUN J, SUN J M, et al. Research on sea clutter suppression using sparse dictionary learning [C]//*Proceedings of IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. IEEE, 2019: 967-971. DOI: 10.1109/ITAIC.2019.8785824
- [12] WANG L, TANG J, LIAO Q M. A study on radar target detection based on deep neural networks [J]. *IEEE sensors letters*, 2019, 3(3): 7000504. DOI: 10.1109/LENS.2019.2896072
- [13] CHEN X L, SU N Y, GUAN J, et al. Integrated processing of radar detection and classification for moving target via time-frequency graph and CNN learning [C]//*Proceedings of URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*. IEEE, 2019: 1-4
- [14] 罗俊海, 王芝燕. 无人机探测与对抗技术发展及应用综述 [J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 530-544
- [15] RAJ V, C A A. Understanding the future communication: 5G to 6G [J]. *International research journal on advanced science hub*, 2021, 3(Special Issue 6S): 17-23. DOI: 10.47392/irjash.2021.159
- [16] SHEKHAR, SINGHAL A, SHARMA R, et al. Study of analysis of multiple input and multiple outputs (mimo) technology in wireless communication [C]//*Proceedings of International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE)*. IEEE, 2016: 658-662. DOI: 10.1109/ICMETE.2016.134
- [17] TAN R, LIM H S, SMITS A B, et al. Improved micro-Doppler features extraction using Smoothed-Pseudo Wigner-Ville distribution [C]//*Proceedings of IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. IEEE, 2016: 730-733. DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848099
- [18] SUN Y X, FU H, ABEYWICKRAMA S, et al. Drone classification and localization using micro-doppler signature with low-frequency signal [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*. IEEE, 2018: 413-417. DOI: 10.1109/ICCS.2018.8689237
- [19] PARK D, LEE S, PARK S, et al. Radar-spectrogram-based UAV classification using convolutional neural networks [J]. *Sensors*, 2020, 21(1): 210. DOI: 10.3390/s21010210
- [20] LIU Y, LIU J Y. Recognition and classification of rotorcraft by micro-Doppler signatures using deep learning [C]//*International Conference on Computational Science*. Springer, 2018: 141-152. DOI: 10.1007/978-3-319-93698-7_11
- [21] LI H, WU X J, KITTLER J. Infrared and visible image fusion using a deep learning framework [C]//*Proceedings of 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. IEEE, 2018: 2705-2710. DOI: 10.1109/ICPR.2018.8546006
- [22] MA J Y, YU W, LIANG P W, et al. FusionGAN: a generative adversarial network for infrared and visible image fusion [J]. *Information fusion*, 2019, 48: 11-26. DOI: 10.1016/j.inffus.2018.09.004
- [23] 张雅雯, 胡士强. 低空目标的雷达/可见光协同监视跟踪方法研究 [J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(6): 234-240
- [24] CHEN Y R, AGGARWAL P, CHOI J, et al. A deep learning approach to drone monitoring [C]//*Proceedings of Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*. IEEE, 2017: 686-691. DOI: 10.1109/APSIPA.2017.8282120
- [25] SCHUMANN A, SOMMER L, KLATTE J, et al. Deep cross-domain flying object classification for robust UAV detection [C]//*Proceedings of 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*. IEEE, 2017: 1-6. DOI: 10.1109/AVSS.2017.8078558
- [26] AKER C, KALKAN S. Using deep networks for drone detection [EB/OL]. [2024-02-26]. <https://arxiv.org/abs/1706.05726>
- [27] NALAMATI M, KAPOOR A, SAQIB M, et al. Drone detection in long-range surveillance videos [C]//*Proceedings of 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*. IEEE, 2019: 1-6. DOI: 10.1109/AVSS.2019.8909830
- [28] MAGOULIANITIS V, ATALOGLOU D, DIMOU A, et al. Does deep super-resolution enhance UAV detection? [C]//*Proceedings of 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*. IEEE, 2019: 1-6. DOI: 10.1109/AVSS.2019.8909865
- [29] CRAYE C, ARDJOUNE S. Spatio-temporal semantic segmentation for drone detection [C]//*Proceedings of 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*. IEEE, 2019: 1-5. DOI: 10.1109/AVSS.2019.8909854
- [30] ANWAR M Z, KALEEM Z, JAMALIPOUR A. Machine learning inspired sound-based amateur drone detection for public safety applications [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2019, 68(3): 2526-2534. DOI: 10.1109/TVT.2019.2893615
- [31] 王威, 安腾飞, 欧建平. 无人机被动音频探测和识别技术研究 [J]. *声学技术*, 2018, 37(1): 89-93
- [32] JEON S, SHIN J W, LEE Y J, et al. Empirical study of drone sound detection in real-life environment with deep neural networks [C]//*Proceedings of 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. IEEE, 2017: 1858-1862
- [33] LIU H, WEI Z Q, CHEN Y T, et al. Drone detection based on an audio-assisted camera array [C]//*Proceedings of IEEE Third International Conference on Multimedia Big Data (BigMM)*. IEEE, 2017: 402-406. DOI: 10.1109/BigMM.2017.57
- [34] KONG M M, LIU J, ZHANG Z H, et al. Radio ground-to-air interference signals recognition based on support vector machine [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*. IEEE, 2015: 987-990. DOI: 10.1109/ICDSP.2015.7252025
- [35] YAN H H, ZHOU B, LIU J, et al. Radio signal recognition based on constructing typical spectrum [C]//*Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*. IEEE, 2016: 1889-1894. DOI: 10.1109/CompComm.2016.7925030
- [36] ZHANG M, DIAO M, GUO L M. Convolutional neural networks for automatic cognitive radio waveform recognition [J]. *IEEE access*, 2017, 5: 11074-11082. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2716191
- [37] LI R D, HU J H, YANG S Y. Deep gated recurrent unit convolution network for radio signal recognition [C]//*Proceedings of IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. IEEE, 2019: 159-163. DOI: 10.1109/ICCT46805.2019.8947225
- [38] MUZAMMAL M, TALAT R, SODHRO A H, et al. A multi-sensor data fusion enabled ensemble approach for medical data from body sensor networks [J]. *Information fusion*, 2020, 53: 155-164. DOI: 10.1016/j.inffus.2019.06.021

- [39] RAJESWARI K, ISHWARYA A, VAISHNAVI K K, et al. Performance analysis of data fusion methods for radar and IRST 3D target tracking [C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). IEEE, 2017: 2570–2574. DOI: 10.1109/WiSPNET.2017.8300227
- [40] ILYAS K, ULLAH I. A state estimation and fusion algorithm for high-speed low-altitude targets [C]//Proceedings of 19th International Multi-Topic Conference (INMIC). IEEE, 2016: 1–5. DOI: 10.1109/INMIC.2016.7840127
- [41] LUO J Z, RONG C Z, JIA Y X, et al. Fusion of infrared and visible images based on image enhancement and feature extraction [C]//Proceedings of 11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). IEEE, 2019: 212–216. DOI: 10.1109/IHMSC.2019.00056
- [42] WANG A L, JIANG J N, ZHANG H Y. Multi-sensor image decision level fusion detection algorithm based on D-S evidence theory [C]//Proceedings of Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. IEEE, 2014: 620–623. DOI: 10.1109/IMCCC.2014.132
- [43] MIRZAEI G, JAMALI M M, ROSS J, et al. Data fusion of acoustics, infrared, and marine radar for avian study [J]. IEEE sensors journal, 2015, 15(11): 6625–6632. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2464232
- [44] 刘海燕, 陈红林, 史志富, 等. 基于模糊贝叶斯网络的空中目标多传感器融合识别研究 [J]. 电光与控制, 2009, 16(3): 37–41. DOI: 10.3969/j.issn.1671-637X.2009.03.010
- [45] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(11): 2278–2324. DOI: 10.1109/5.726791
- [46] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y Q, et al. Going deeper with convolutions [EB/OL]. [2024-02-26]. <http://arxiv.org/abs/1409.4842>
- [47] 刘全, 翟建伟, 章宗长, 等. 深度强化学习综述 [J]. 计算机学报, 2018, 41(1): 1–27. DOI: 10.11897/SP.J.1016.2018.00001
- [48] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型 [J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907–924. DOI: 10.7544/j.issn1000-1239.2017.2016094

作者简介



邱宝华, 中国移动通信集团广西有限公司总经理;
主要研究方向为智能社会治理。