

• 专题一:双清论坛“低空经济信息系统与安全管理理论及关键技术”•

DOI: 10.3724/BNSFC-2025.07.25.0005

雷达低空目标探测与防范:进展与展望*

陈小龙^{1**} 陈唯实^{2**} 陈思伟³ 张月⁴ 关键¹

1. 中国人民解放军海军航空大学,烟台 264001
2. 中国民航科学技术研究院 机场研究所,北京 100028
3. 国防科技大学 电子科学学院,长沙 410073
4. 中山大学 深圳电子与通信工程学院,深圳 518107

[摘要] 随着低空经济的快速发展,无人机等低空目标在物流、农业植保、应急救援等领域的应用日益广泛。这类目标具有飞行高度低、运动速度慢、体积尺寸小(通称“低慢小”)的特点,对监视系统提出了极高要求。雷达作为核心探测手段,亟需提升在复杂背景下对鸟类、无人机等低空目标的精准探测与分类能力。本文对比分析了主要低空探测手段,系统综述飞鸟与无人机雷达检测与识别技术进展,重点介绍基于数字阵雷达、外辐射源雷达、气象雷达等典型系统的应用,给出了雷达低空探测在机场鸟击防范、无人机反制等场景的应用,并探讨了分布式雷达、通感一体探测等新兴技术方向。最后,对波形优化设计、智能信息处理等领域的未来发展进行了展望。

[关键词] 雷达目标探测;低空目标;无人机反制;鸟击防范;深度学习

1 雷达低空目标探测概述及挑战

1.1 雷达低空目标探测概述

雷达低空目标探测,是指利用雷达系统对飞行高度通常在1 000米以下(部分研究亦界定为3 000米以下)空域内的飞行目标进行搜索、截获、跟踪与识别的活动^[1]。该高度层受复杂地表环境(城市建筑、山地、海岸线、丛林、基础设施)和地球曲率限制,探测难度大。探测对象多元化,涵盖各类无人机、巡飞弹、小型直升机、低空突防战机、隐身巡航导弹、小型/微型航空器以及大量飞鸟(“低慢小”目标的典型代表,对民航鸟击防范至关重要)^[2,3]。

雷达低空目标探测的战略与战术价值日益凸显:现代战争中,无人机系统展现颠覆性作用,低成本无人机/巡飞弹可高效执行侦察、指示、精确打击及蜂群饱和攻击,对关键军事节点构成严重威胁。低空空域也是非对

称威胁与恐怖活动的温床,小型无人机易被滥用进行非法侦察、走私、袭击敏感设施,隐蔽性强,防御难度大。民用领域需求迫切,如机场净空保护(防无人机扰航)、能源设施安保、边境海岸线监视等。2018年英国盖特威克机场因无人机干扰导致大规模航班取消即为典型案例。机场探鸟雷达对预防鸟击事故、保障起降安全不可或缺^[4]。此外,城市公共安全面临无人机非法航拍、投递等新挑战。因此,雷达低空目标探测是要地防护、城市安防、空域管理及民航安全保障的关键能力要求。

1.2 雷达低空目标探测面临的挑战

雷达系统在实现对低空目标的有效探测时,面临目标特性、传播环境及对抗手段等多方面的技术挑战^[5,6],主要包括以下几个方面。

(1)强杂波干扰。目标微弱回波易被强地/海杂波淹没(低信杂比)。实际杂波具有显著空间非均匀性和

收稿日期:2025-07-25; 修回日期:2025-10-10

* 本文根据国家自然科学基金委员会第407期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email:cxlcx11209@163.com;chenwsh@mail.castc.org.cn

本文受到国家自然科学基金项目(U25B2016,U2433211,U24B20189)、国家重点研发计划项目(2024YFB3909800,2023YFB2604100)、山东省自然科学基金项目(ZR2024JQ003)的资助。

引用格式:陈小龙,陈唯实,陈思伟,等. 雷达低空目标探测与防范:进展与展望. 中国科学基金,2026,40(1):48-64.

Chen XL, Chen WS, Chen SW, et al. Radar low altitude target detection and prevention: Progress and prospects. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2026, 40(1): 48-64. (in Chinese)

时间非平稳性(受地形、植被、建筑、海况、风浪影响),且常具多普勒频移。典型的低空慢速小目标(如小型无人机、飞鸟、悬停直升机)的多普勒频率往往很低,易落入杂波主/副瓣区,频域分离困难。飞鸟产生的“生物杂波”进一步增加了杂波抑制难度。

(2)目标特征微弱多变。目标物理尺寸小,常采用复合材料/隐身设计,雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)极低($<0.001 \text{ m}^2$)。鸟类RCS略大($0.01\sim 0.1 \text{ m}^2$ 量级),但形态、姿态、内部结构复杂导致RCS剧烈起伏。低速/悬停特性使多普勒频移小,易被杂波掩盖。高机动性(如无人机急转、鸟类灵活机动)对跟踪滤波稳定性和数据关联算法鲁棒性要求极高。目标微动(旋翼旋转、鸟翼扑动)产生复杂微多普勒效应,虽为识别提供特征,但也大幅增加了信号复杂性和处理需求(如区分鸟类与无人机)。

(3)复杂电磁环境与干扰。对方可能部署大功率噪声压制干扰,将目标信号完全覆盖;或发射与真实目标特性高度相似的欺骗式干扰信号(如距离门拖引、速度门拖引),误导雷达的探测与跟踪过程。无源干扰如箔条的释放,可在低空形成虚假目标云或遮蔽真实目标。此外,日益密集的民用无线电信号(通信、导航、广播等)造成的电磁频谱拥堵,可能对雷达接收机造成同频或邻频干扰,降低其灵敏度和动态范围。对于民用机场驱鸟雷达,其工作频段需特别注意避免干扰航空电子设备。

(4)地形遮蔽与多径效应。起伏地形(山丘、峡谷)和密集的城市建筑会遮挡雷达波束,形成大范围的探测盲区。低仰角探测时,直达波与地面/海面反射波的相干叠加引起信号幅度起伏和显著测角误差(仰角测量尤甚),甚至产生虚假目标。

(5)地球曲率限制。受地球表面弯曲的影响,雷达对超低空目标存在理论上的最大探测距离(视距限制)。为实现对广阔区域的连续、无缝低空覆盖,必须部署大量雷达站点,并进行复杂且精密的空情信息融合处理,这不仅显著增加了系统成本,也大大提升了建设和维护的复杂性。例如,对于机场鸟情监视,需要在跑道两端及周边关键区域部署多部雷达,以克服地球曲率对超低空飞鸟探测的限制。

综上所述,雷达低空目标探测虽具有重要应用价值(涵盖国防安全、要地防护、城市安防、民航鸟击防范、空域管理),却受到强杂波干扰(含生物杂波)、微弱多变目标特性(含RCS起伏、机动、微动)、复杂电磁对抗、起伏地形与多径效应、固有地球曲率限制以及蜂群/鸟群等密集目标集群共同编织的复杂挑战。克服这些挑战,亟需融合先进的雷达体制(如相控阵、多输入多输出、分布

式)、创新的信号处理算法(如自适应杂波抑制、高分辨处理、微动特征提取与分类)、智能化的数据处理技术(如人工智能辅助的目标识别、跟踪与威胁评估)以及优化的系统架构设计(如多层次、多传感器协同组网)。

2 低空目标雷达检测和识别技术

2.1 低空目标雷达检测技术

2.1.1 长时积累检测技术

低空运动目标的雷达回波可依据目标运动状态的复杂程度划分为匀速运动、匀加速运动以及三阶及以上的高阶运动模型。不同运动形式下,目标在雷达回波中的能量分布及其时频特性存在显著差异。为提升微弱目标的可检测性,信号积累处理被广泛应用于低信杂比环境,其基本思想是通过长时间积累增强有用信号能量、抑制随机噪声,从而改善检测性能。对于匀速目标,主要面临回波能量在距离单元间迁移的“跨距离单元走动”问题;当目标处于匀加速运动状态时,信号能量会同时在距离向与多普勒向发生偏移,形成典型的“双跨”效应。根据积累算法对目标回波相位信息的利用方式,现有信号积累方法可归纳为三类:相参积累、非相参积累及混合积累。其中,相参积累通过相位补偿实现能量的完全叠加,在相同积累时间内可获得最高的积累效率,但对运动参数估计精度和系统同步性要求较高,计算复杂度也相对较大;非相参积累则不依赖精确的相位信息,具有实现简单、工程可行性高的特点,适用于实时性要求较强的场景。

(1)非相参积累检测技术

非相参积累的方法只利用了回波信号的幅度信息来进行累加以提高回波信噪比。由于忽略了相位信息,在积累相同回波脉冲数的情况下获得的增益少于相参积累,但是工程易实现。大部分非相参积累方法在输出积累结果的同时也会得到目标运动的航迹。因此检测前跟踪(Tracking Before Detection, TBD)算法^[7]里常常出现非相参积累的方法。主要方法有:

1)投影变换法^[8],将轨迹映射至低维平面聚焦能量,即利用特定的投影变换(如Hough或Radon变换)将原来处于空间上的目标运动轨迹转换到相应的二维平面内,通过快速地在低维平面内实现能量积累再进行逆变换,从而恢复目标在三维空间中的轨迹。该类方法能够显著减少运算量,但低信噪比性能受限。

2)动态规划法^[9],一种阶段性最优搜索代替穷尽搜索的优化方法,将多维轨迹搜索转化为多阶段一维优化问题。通过分段计算累积函数并与门限进行对比,评定能否检测到目标并追溯目标轨迹。累积函数的选取通

常有两种:一种是以后验概率密度形式。另一种是以目标回波幅度作为积累值的形式。

3)粒子滤波法^[10],本质上是贝叶斯估计和蒙特卡罗积分的结合,通过将离散变量加入目标状态向量中,利用马尔科夫链变控制离散变量转移,得到与运动状态的混合估计,估计目标出现概率将其与门限做比较来进行目标检测。为保持检测性能,需要大量粒子完成估计,这增大了算法的运算量降低了实时性。

4)随机有限集法^[11],将多目标量测和多目标状态分别作为集值集合,并将状态和量测建模为随机有限集,利用贝叶斯近似的滤波技术实现复杂条件下的多目标估计。

(2)长时相参积累检测技术

低空目标特别是低空慢速小目标探测的主要难题是复杂杂波弱小目标的检测,通常需要采用长的波束驻

留时间或者凝视探测来实现高多普勒分辨率。相参积累的距离-多普勒(Range-Doppler, R-D)平面内,能够有效地实现目标与杂波分离,从而可实现强杂波背景下的多类目标检测(图1)。

相参积累算法同时利用了目标回波的幅度和相位信息,具有最高的能量积累效率。随着积累时间的增加,跨单元现象更加明显,导致能量发散,积累增益下降,需采用校正补偿方法和搜索积分方法进行克服。常用算法框架可归纳成图2所示内容。

1)跨单元校正补偿方法

距离校正补偿。Keystone变换通过尺度变换实现慢时间与快时间频域的解耦合,实现线性距离走动的消除。匀速运动目标导致的线性距离走动可以用一阶Keystone变换进行校正,而匀加速运动目标回波产生的距离徙动则可以用二阶Keystone变换进行校正^[12,13]。

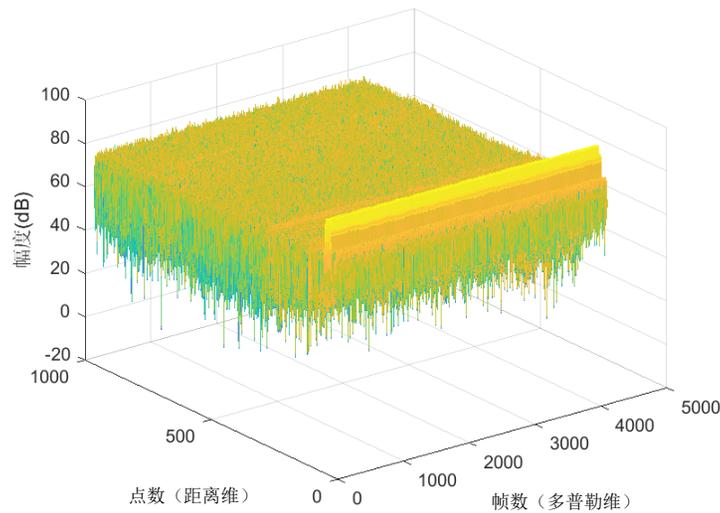


图1 相参积累的R-D平面 Fig.1 The R-D Plane of Coherent Integration

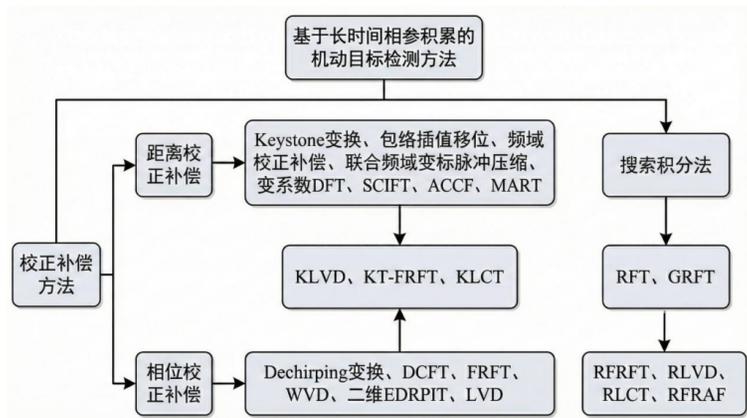


图2 相参积累算法框架 Fig.2 The Algorithm Framework of Coherent Integration

在工程实现时有DFT-IFFT法、插值法和快速算法CZT-IFFT法。但是在目标速度存在模糊时都需要对模糊因子进行搜索补偿,大大降低了运算速度。包络插值移位^[14]和频域校正补偿^[15]的核心是在时频中对走动单元进行移位或在频域里对延迟项进行补偿以消除距离单元走动。相比时域的方法,在频域里实现会使运算量更小,但是两种方法均需在高信噪比条件下使用,对低慢小目标探测性能较差。

相位(多普勒)校正补偿。包括Dechirping变换、离散Chirp傅里叶变换(Discrete Chirp-Fourier Transform, DCFT)、吕分布(Lv's Distribution, LVD)和分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)等。Dechirping变换^[16]与DCFT^[17]通过搜索来估算目标的频率漂移,随着搜索精度的增加,补偿结果更加精准,但也导致计算量显著增加。FRFT方法通过引入分数阶实现对信号在时频平面上的非整数旋转,该变换可以将信号在不同的时间—频率域中进行转化,在FRFT域上实现信号能量的聚集^[18]。LVD方法在中心频率—调频斜率域实现了信号能量的聚焦,能够抑制交叉项带来的干扰^[19]。

2) 搜索积分长时间相参积累方法

搜索积分长时间相参积累方法主要通过参数(距离、速度、加速度)搜索确定轨迹并积累能量^[20],以Radon傅里叶变换(Radon-Fourier Transform, RFT)^[21]、Radon分数阶傅里叶变换(Radon-FRFT, RFRFT)^[22]为代表。由于二维搜索的运算量较大,研究人员又提出了基于Chirp-Z的快速RFT算法^[23]。随后对RFT方法向高维参数空间进行推广,即广义RFT(GRFT)^[24],对距离、速度参数进行多维联合搜索,得到目标可能的运动轨迹,然后进行能量积累,但高维搜索仍存在运算量大的问题。

2.1.2 多特征融合检测技术

深度学习技术通过数据驱动,具有复杂抽象信息处理能力,泛化能力高的优势,从信号数据特征学习角度开展研究,为雷达目标检测技术的发展提供了新方向。借助深度学习特征提取性能优势,汪翔等^[25]从距离像和距离—多普勒谱图中提取多层次互补特征,并通过局部—全局结构捕捉时间与频域的序列关联性,最终通过多层次特征融合与非线性映射得到检测结果。针对目标帧间多维特征,王治飞等^[26]提出了相应的神经网络检测模型,从时频域实现了虚警抑制。为提高特征提取的有效性和对重要特征的关注度,卷积块注意力机制模块^[27]被用于雷达目标检测网络中,通过特征融合与注意力加权机制使模型具备更强的检测精度与泛

化性能。基于深度学习的多特征融合方法,利用特征之间的互补性提升目标识别的准确性和鲁棒性。通过引入注意力机制,神经网络可以更加精确地提取这些关键特征。注意力机制可以通过计算输入特征的重要性权重,使模型更加关注对目标分类和识别最有用的特征部分,从而提升识别性能。例如,复杂场景中可能存在多个微弱目标,目标的检测、分离和识别难度大。近年来Transformer网络由于具有较优的长程依赖关系表征能力而得到广泛关注,克服了卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)在浅层堆叠时难以获取全局信息的局限。

2.2 低空目标雷达识别技术

雷达检测到飞鸟与无人机等低空目标后,其识别流程通常是通过信号处理提取特征,然后利用特征差异并借助分类器实现目标的分类识别。特征本身的区分度是影响识别效果的关键。相比传统支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器,深度学习方法因其高效挖掘高维抽象特征的能力和良好的泛化性,在雷达识别领域得到广泛应用,低空目标雷达特征提取与识别典型技术如图3所示。

2.2.1 基于RCS特征的识别技术

RCS蕴含了目标的材质、结构和运动信息,是目标识别的重要依据。现有研究主要通过分析目标RCS随时间的统计特性,利用无人机与飞鸟等在散射机制上的本质差异进行分类^[28]。陈唯实等^[4]围绕探鸟雷达技术,系统分析了目标回波幅度等飞鸟目标特性,为分类奠定了理论基础。张梦晨等^[29]利用气象雷达数据,通过参数化表征反射率等特征,对比分析了鸟群、降水及云目标的特征差异,揭示了反射率在区分鸟群与气象目标上的显著统计特性。针对无人机群运动状态识别,田鹤等^[30]基于旋翼编队实测数据,获得了其时域和频域的RCS统计分布模型;进而提出改进的梅尔频率倒谱系数方法实现RCS倒谱的参数化表征,并利用混合高斯模型和隐马尔可夫模型对不同运动状态的倒谱特征建模,揭示了编队运动状态规律。此外,极化特征也有区分飞鸟和无人机的潜力。Torvik等^[31]利用监视雷达提取的多个极化特征结合最近邻分类器实现了较高精度的鸟—机分类。值得注意的是,当飞鸟和无人机的RCS相近时,基于RCS的识别可能面临困难,主成分分析和无监督深度学习可作为更好的识别手段^[32]。总体而言,基于RCS特征的技术因其低成本、低算力需求,在工程实践中仍作为重要的辅助手段。

2.2.2 基于微动特征的识别技术

当目标的部件(如无人机的旋翼,鸟类的翅膀)存在

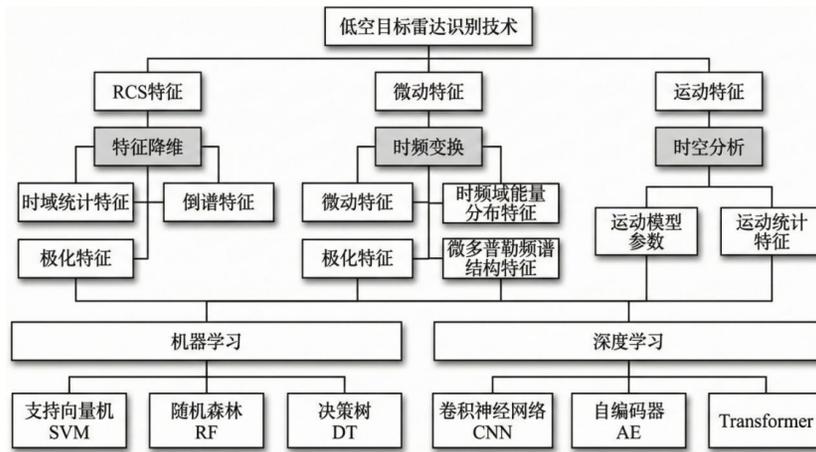


图3 特征提取与识别技术框架

Fig.3 The Technical Framework of Feature Extraction and Recognition

周期性微动(旋转、振动)时,会在雷达回波的主多普勒频移周围产生独特的边带频谱,称为微多普勒效应(Micro-Doppler Effect, MDE)^[33]。由此产生的微多普勒特征(Micro-Doppler Feature, MDF)是区分鸟类、无人机等“低慢小”目标较稳健的特征,也是当前研究中报道最多的特征,表1给出了典型海空目标微多普勒特征。Pavlo等^[34]最早将MDF应用于鸟—机识别,通过对MDF奇异值分解进行特征提取,开发了基于MDF的无人机自动识别完整流程,利用朴素贝叶斯分类器和SVM分类器成功识别了固定翼无人机、四旋翼无人机、直升机、叶片和鸟类。Narayanan等^[35]利用定制便携雷达获取的数据,较全面地对比了不同分类器对微多普勒带宽和周期性的识别效果。近年来,深度学习方法在该领域应用活跃,White等^[36]提出高保真无人机微多普勒声谱图合成方法,并结合AlexNet验证了其在城市环境鸟—机分类中的有效性;Chakraborty等^[37]基于构建的连续波雷达数据集DIAT- μ SAT,提出迁移学习网络利用MDF识别不同叶片无人机及仿生鸟等小目标;White等^[38]提出基于卷积自编码器的无监督—有监督两阶段训练框架,系统验证了缩减编码层特征数能提升雷达声谱图潜在表示的质量。除鸟—机识别外,Mandal等^[39]提出了一种卷积神经网络和混合蛙跳算法相结合的网络框架,更深入地对无人机的行为活动进行了识别。MDF作为表征目标微动的“特征指纹”,基于其对目标微动信息的高敏感性、强抗杂波干扰能力以及多场景适应性,已然成为当前低空目标识别领域的核心技术支撑。

2.2.3 基于运动轨迹的识别技术

无人机目标的飞行轨迹相对稳定且持续时间长,而鸟类目标的飞行轨迹较为多变、机动性高、持续时间较短。因此,通过探鸟雷达长时间对鸟类和无人机的飞行

轨迹、飞行高度、飞行方向等数据进行积累统计,可以解析目标在空间中的运动轨迹特征的差异,实现对低空目标的辨识。该技术与基于MDF的识别技术形成互补,在强杂波环境或目标微动特征不显著时展现独特价值。例如,借助探鸟雷达掌握机场周边留鸟的活动节律及过境候鸟的相关迁徙情况,实现对目标航迹的自动跟踪^[40],然后结合探测区域鸟情人工调研结果,可进一步提升鸟类活动的识别与预测^[2,41]。Mohajerin等^[42]通过迁移并优化轨迹的均值、方差等统计特征并与多层感知机相结合,在多场景仿真和实测轨迹数据上,证明了雷达轨迹分类技术在鸟—机识别中的高可行性。Liu等^[43]通过研究鸟类和无人机的固有飞行力学和行为模式,以目标运动模型转换频率为特征,提出了一种通过提取雷达轨迹中的目标运动特征进行目标识别的方法,采用基于运动模型的低空非合作无人机与飞鸟目标轨迹差异特征提取,能够为两者的识别提供新的技术途径。为支撑群目标航迹关联与跟踪滤波等研究,史孟鑫等^[44]公开了一个基于高分辨相控阵雷达的低空无人机群目标数据集,涵盖了无人机群多种的编队形式和运动样式,为航迹关联、跟踪等算法的验证提供实测数据支撑。同期,针对当前缺少杂波环境下雷达探测无人机目标数据的数据多样性有待提高的问题,海军航空大学团队^[45]发布了国内首个多波段多体制雷达“低慢小”探测数据集,采用Ku波段调频连续波雷达、外辐射源被动雷达、数字阵雷达等,收录了多种类型无人机、快艇、飞鸟、直升机等目标雷达回波数据,为“低慢小”目标特性分析和识别研究提供了数据支撑。

2.2.4 多特征融合识别技术

单一特征在复杂环境下往往难以稳定识别无人机、鸟类及其他“低慢小”目标。为克服各类特征的局限,近

年来研究者提出了基于多特征融合的“低慢小”目标识别技术,通过在数据层、特征层或决策层对RCS特征、微动特征及运动特征进行融合,实现更高的鲁棒性与泛化性能。海军航空大学团队^[46]提出了一种基于K波段雷达动态多特征数据融合的“低慢小”目标分类网络模型,该模型设计了局部特征提取模块,以从距离周期图中提取局部特征,通过全局特征提取模块提取时频谱图中的全局特征,使用三维卷积网络捕获多帧距离周期数据间的动态变化特征,相比传统AlexNet等网络分类准确率提升6%以上。Wu等^[47]基于L波段全息凝视雷达,提出了一种融合多维特征与多层分类器系统的“低慢小”目标识别新方法,在RCS、微多普勒和运动三维度中筛选有效特征,实现了直升机、小型固定翼/旋翼无人机以及鸟类的分类识别。Jiang等^[48]通过设计专门的子网络提取目标的几何结构特征与微动特征,使用注意力机制融合特征后进行训练,相较于单一特征方法在小型无人机目标识别中展现出更高的鲁棒性。Meng等^[49]设计了一种时空频图注意卷积网络,将目标RCS与运动特性联合为时—空—频图结构,实现了可靠飞机识别。总体而言,基于多特征融合的认识技术能够最大化发挥RCS、微动和运动轨迹各自优势,已逐步成为低空小目标识别

的发展趋势与研究热点。

3 典型低空目标探测雷达系统

3.1 数字阵列雷达低空目标探测

相控阵雷达克服了机械扫描雷达天线旋转的局限,通过改变阵元间信号的相位实现波束指向的快速调整,形成稳定单一方向的窄波束,但仍无法实现探测区域的宽覆盖和长时间探测。近年来,数字阵列雷达的出现,极大提高了雷达发射和接收的灵活性,其发射波形产生与接收信号处理的全数字化处理,具有局域系统瞬时动态范围大、资源利用率高、系统能耗低等优点,成为世界各国先进雷达主流趋势(图4)。

海军航空大学与中山大学等单位合作,创新提出并设计了“数字阵+全波形+泛探”新体制雷达,也称数字阵全态势感知雷达,综合相控阵、数字阵、多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达的优势,采用“宽发窄收”模式,系统在发射端发射全向或宽角度的波束,接收端采用数字波束形成技术,同时形成多个窄波束覆盖监视区域,可实现对观测空域的时域、空域的连接监测,其工作原理如图5所示。与传统雷达相比,除了以高数据率获取距离、方位、俯仰的测量信息以外,还

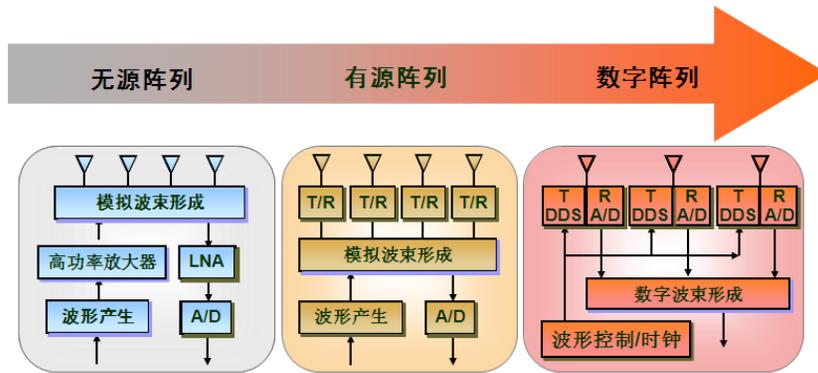


图4 数字阵列雷达体制示意图

Fig.4 The Schematic Diagram of the Digital Array Radar System

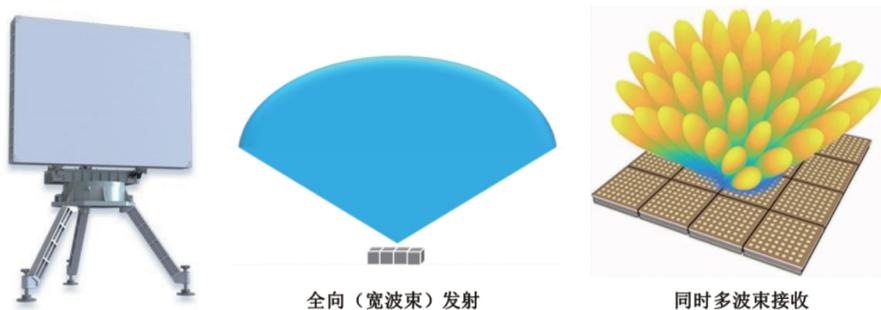


图5 数字阵泛探雷达体制示意图

Fig.5 The Schematic Diagram of the Digital Array Omnidirectional Detection Radar System

能通过长时间积累获得目标的高分辨多普勒信息,实现时域、空域和频率的联合处理和高分辨估计,特别适合复杂背景下的“低慢小”目标探测和识别^[6,50]。此外,雷达的宽波束发射并不定向辐射能量,空间功率密度极低,电磁辐射在安全范围内,同时不影响其他电子设备的正常使用。雷达的高度集成化,具有高可靠性、可扩展性,极大降低了用户使用和维护门槛。

3.2 外辐射源被动雷达低空目标探测

外辐射源雷达是一种以非合作发射源为照射信号的双基地雷达体制,其发射信号可来自广播电视台、通信基站或其他无线电发射装置,接收端通过捕获目标对该外辐射信号的反射回波,实现对空域目标的探测与识别(图6)。外辐射源雷达系统可探测跟踪无人机、直升机、鸟类、气球等多种类型低空目标(包括无线电静默的非合作目标),具有绿色环保、电磁隐蔽、节约频谱、易组网的特点和优势,适合对电磁辐射有限制同时又对探测性能要求较高的应用场合^[51,52]。

外辐射源信号处理流程如图7所示,具体包括如下步骤:(1)参考信号提纯。从参考通道接收到的信号中去除辐射源基站直达波以外的多径反射及其他干扰分量,仅保留辐射源基站的直达波信号。(2)参考信号预处理。对参考信号预处理抑制副峰。通过预处理可以有效降低副峰影响,提高后续目标检测的准确性。(3)干扰相消。由于干扰的能量远高于目标回波信号,极易淹没弱小的目标回波分量。因此,在目标检测之前必须对干扰进行有效的相消处理,以去除强直达波和多径干扰,为后续处理保留更纯净的目标信号。(4)距离-多普勒处理。通常采用匹配滤波进行长时间相干积累处理,从而在距离-多普勒域内实现目标能量的集中,增强目标回波的可检测性。(5)动目标检测与参数估计。在距离-多普勒图中检测目标,获取双基地距离和多普勒参数。(6)目标定位与跟踪。利用从外部辐射源接收到的回波信号来估算目标的位置和运动轨迹。常用方法有基于目标到达角与双基地距离的联合定位法与基于到达时间差的定位法。

由于复杂电磁环境导致雷达回波中混杂着海面反射、气象干扰等强杂波,严重降低目标信号的信噪比。特别是针对“低慢小”目标,其微弱回波极易被杂波淹没。在强杂波和噪声背景下,快速准确地定位目标是态势感知的基础需求。传统恒虚警率检测在复杂海况下虚警率高、易漏警、适应性差,如何解决多目标混叠情况下的定位难题,提升态势感知能力仍有待解决。

3.3 气象雷达低空目标探测

气象雷达特别适合大尺度范围内的迁徙鸟群目标

探测,且便于有效组网^[53]。因此,通过建立基于气象雷达的全国鸟情预警系统对候鸟迁徙情况进行监视预警,将有助于降低目前居高不下的鸟击事件数量。雷达数据能够提供飞行中生物目标的空间分布、密度、高度、速度和方向等信息,双极化雷达甚至能提供目标的形状信息,极大提高对鸟类、昆虫、蝙蝠和降水等目标的识别能力^[54]。自20世纪40年代起,基于雷达的鸟情监视预警技术已经从零散的研究发展为有组织的研究。目前,图8展示的美国下一代气象雷达(Next Generation Weather Radar, NEXRAD)^[55]和图9展示的欧洲气象雷达信息交换运行计划(Operational Program on the Exchange of Weather Radar Information, OPERA)^[56],已能通过雷达组网的方式,获取大陆尺度上的鸟类迁徙数据。这些系统为鸟类生态学研究提供了独特且覆盖广泛的信息来源,有助于更深入地理解鸟类迁徙规律,从而为相关生态学研究及机场鸟击防范工作提供支持。

4 雷达低空目标防范技术

有效探测是前提,而精准防范是保障低空安全的最终目标。本部分聚焦两大关键应用领域:机场鸟击防范

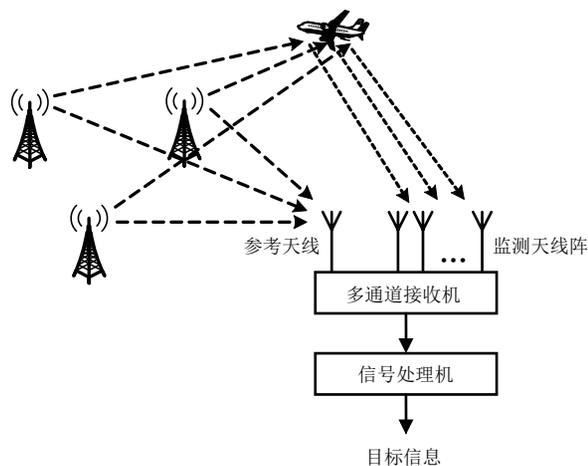


图6 外辐射源雷达工作原理
Fig.6 The Working Principle of Passive Bistatic Radar

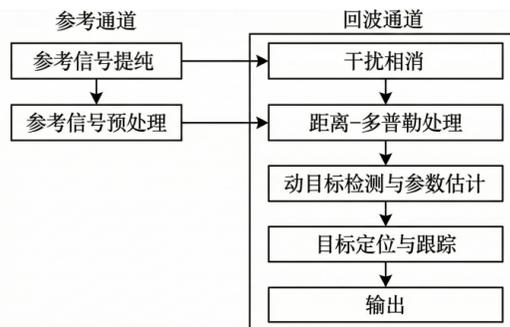


图7 外辐射源雷达信号处理
Fig.7 Signal Processing of Passive Bistatic Radar

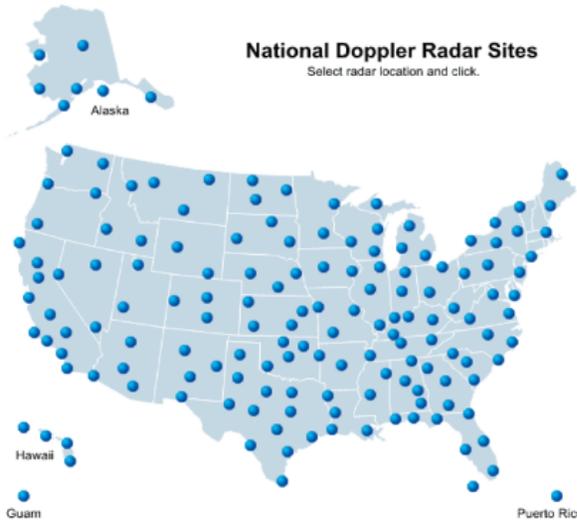


图8 美国NEXRAD国家气象雷达网
 Fig.8 The NEXRAD National Weather Radar Network in the United States

与无人机反制。前者依托雷达对鸟类目标(典型“低慢小”目标)的实时监测,评估鸟情活动规律与碰撞风险,为机场驱鸟作业、航班调度提供决策支持。后者则针对日益严峻的恶意无人机威胁,利用雷达提供的目标信息引导软杀伤(如通信干扰、导航诱骗)或硬杀伤(如激光、微波、动能拦截)等反制系统,实现对非法入侵、侦察或攻击无人机的有效处置。

4.1 机场鸟击防范

探鸟雷达能够实现对单只飞鸟目标的精准探测与跟踪,特别适用于机场终端区的鸟情监测。2000年以来,国内外先后出现了多款专业探鸟雷达,代表性的型号包括美国Merlin雷达^[57]、加拿大Accipiter雷达^[58]和荷兰Robin雷达^[59](图10)。近年来,随着我国机场对鸟情观测新技术需求的日益增长,中国民航科学技术研究院(以下简称“航科院”)、中国民用航空总局第二研究所

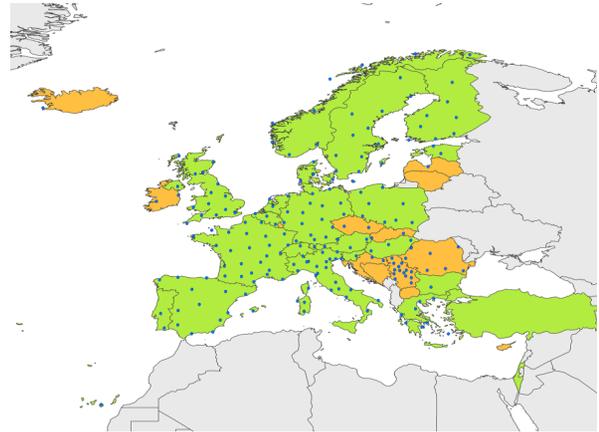


图9 欧洲OPERA气象雷达网
 Fig.9 The OPERA Meteorological Radar Network in Europe

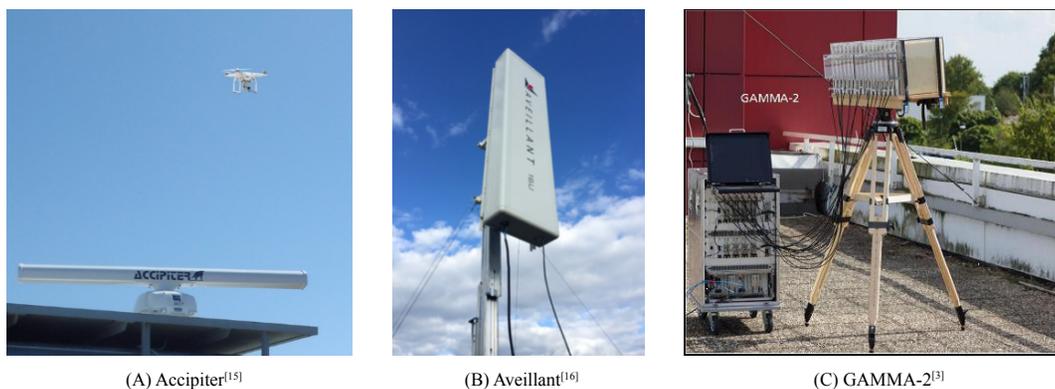
(以下简称“民航二所”)、北京理工雷科电子信息技术有限公司(以下简称“理工雷科”)、中山大学、中国人民解放军海军航空大学(以下简称“海军航空大学”)等国内科研院所、企业及高校相继开展了雷达探鸟技术的研发,极大推动了该领域的技术进步^[60-62]。目前,国内多个机场已部署了探鸟雷达系统,此外,由航科院牵头编制的《机场探鸟雷达系统技术要求》(T/CIE 176-2023)已于2023年5月发布,规范了探鸟雷达的技术标准和应用^[63]。

4.2 无人机反制

近年来,无人机干扰航行事件频发,已引起了广泛的社会关注,而这进一步推动了无人机探测雷达技术的研究。由航科院主导编制的《机场净空区非合作无人机目标探测系统通用技术要求》(T/CIE 252-2024)已于2024年8月发布^[64]。国内外大量科研机构和企业采用有源相控阵、MIMO、全息、外辐射源等先进的雷达技术开展了一系列无人机探测技术相关研究。图11分别展示了加拿大Accipiter雷达^[65]、英国Aveillant全息雷



图10 国外典型探鸟雷达
 Fig.10 Typical International Bird Detection Radars



(A) Accipiter^[15]

(B) Aveillant^[16]

(C) GAMMA-2^[3]

图11 国外典型无人机探测雷达
Fig.11 Typical International UAV Detection Radar

达^[66]、德国GAMMA-2多通道外辐射源雷达。近年来，随着雷达硬件性能的提升以及通信、无线网络和广播电视等可用外部辐射源的进步，外辐射源雷达的应用得到了进一步拓展。海军航空大学与武汉大学合作，基于外辐射源雷达开展了一系列关于飞鸟与无人机目标探测的技术研究，并通过数字地面多媒体广播系统，构建了适用于海上和城市复杂环境的外辐射源雷达“低慢小”目标探测系统^[52,67](图12)。

5 雷达低空目标探测展望

随着无人机技术的不断发展，“低慢小”目标的尺寸越来越小、回波越来越微弱、运动特性和编队构成越来越复杂，给雷达目标检测、目标特征提取、目标跟踪和目标识别带来了极大挑战。未来，低空目标探测雷达体制将不断发展，智能化、小型化、分布式、主被动融合、通感一体、多功能成为发展趋势。数字阵列体制、外辐射源雷达、全息雷达、MIMO雷达、软件化雷达、智能化雷达等新的雷达体制，扩展了可利用的信号维度，为雷达目

标探测精细化、探测识别一体化处理提供了灵活的软件框架。

5.1 低空目标探测新手段

5.1.1 分布式雷达探测

分布式雷达系统由多个雷达站点组成，各雷达站点之间相互配合、协同工作，实现对目标的高精度、全方位监测和跟踪^[68](图13)。分布式雷达系统中的每个雷达站点都具有独立的收发功能，可以独立对目标进行探测和跟踪。为了保证系统整体的一致性与协同性，各雷达站点依托统一的时间与频率基准设备实现时频同步；同时，控制中心通过下发控制指令对各雷达节点的工作状态进行协调与管理。在具体运行过程中，各雷达站点首先独立对目标进行观测与数据采集，随后将本地观测结果传输至控制中心。控制中心对来自不同站点的观测数据进行多源信息融合与联合处理，以综合获得目标的统一检测结果及融合参数，实现对整个监测区域内多个目标的精确定位与动态跟踪。

大型单基地雷达在探测低空和超低空飞行目标时

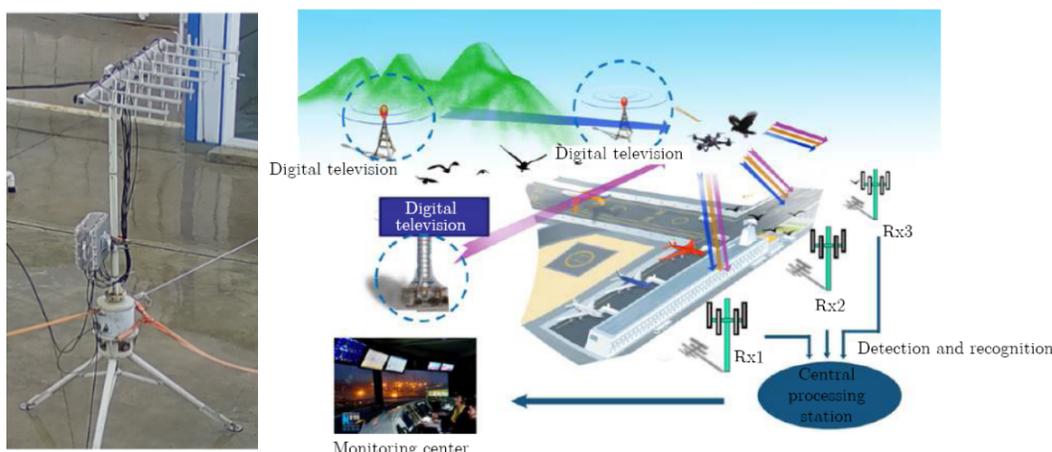


图12 外辐射源雷达“低慢小”探测系统^[52,67]
Fig.12 Passive Radar System for Low-slow-small (LSS) Target Detection^[52,67]

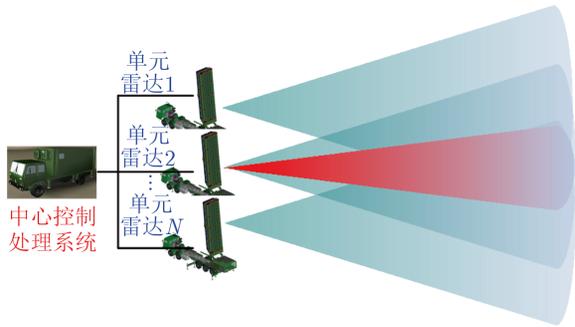


图13 分布式雷达示意图

Fig.13 Schematic Diagram of a Distributed Radar System

存在一定局限性,对于“低慢小”目标,单一的大型雷达系统难以有效进行探测和跟踪。而分布式雷达系统由于发射功率较小、站点数量多,主要用于监测较近范围的目标。通过对其部署位置进行合理的安排,可以获得很强的低空、超低空突防能力。主要的关键技术包括^[69,70]:(1)检测融合算法提升探测性能;(2)基站式小型无人机分布式探测系统解决遮挡覆盖、功率限制、成本高等问题;(3)时间同步、相位同步以及频率同步。图14给出了分布式相参雷达信号处理框架^[71],全相参融合可获得9 dB信噪比增益提高,极大提高对“低慢小”目标的检测能力。程子扬等^[72]则基于MIMO雷达的空间分集特性,分析了不同站点在非相参条件下协同工作的检测能力。首先建立了两种典型的非相参分布式MIMO雷达模型:一类为相位随机分布的MIMO雷达,另一类为幅相随机分布的MIMO雷达。随后通过仿真结果得出结论:随着发射端与接收端数量的增加,分布式非相参MIMO雷达的检测概率在相同虚警率条件下显著提高。

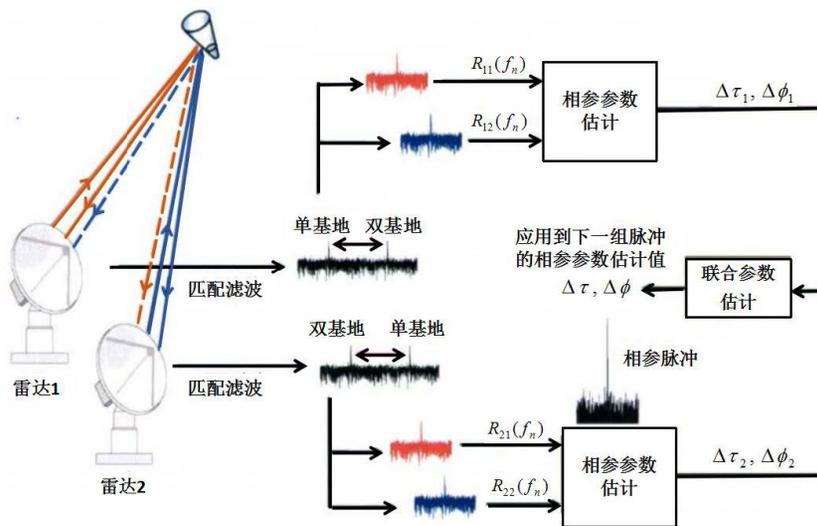


图14 分布式相参雷达信号处理框架

Fig.14 Signal Processing Framework for Distributed Coherent Radar

5.1.2 通感一体探测

现有5G通信基站在传统通信能力上叠加雷达探测功能^[73],成本优势显著(图15):一是大规模数字相控阵。通感基站采用更大规模的数字相控阵技术,在有源天线单元(Active Antenna Unit,AAU)内集成大规模天线阵列,天线阵子数量通常超过192。通信上可实现更好的覆盖和更大的容量,感知上可提升角度分辨。二是大视场角(Field of View,FOV)张角。通感基站俯仰FOV角度可达到60°,在兼顾通信服务的同时,满足低空600米高度的无人机探测。三是快速收发通道切换。通感基站收发通道间的切换速度可达到微秒级,可完成通信与感知信号间的微秒切换,同时也可以满足感知信号收发通道间的微秒级切换要求。四是宽带技术。低频单载波支持100 MHz,高频单载波支持800 MHz,通信上宽带可实现5G高速率,感知上可提升距离分辨率。

通信感知一体化系统基于感知的信息,可提供定位、成像、环境重构等能力,同时这些能力还可以用于通信自身性能提升。通信感知一体化系统将更好地服务于未来智慧生活、产业升级、社会治理等方面,形成全新的通信感知一体化应用。低空无人机探测作为5G通感重要的应用场景,可以很好地提供低空无人机空中交通通感的基础设施。3GPP标准协议也明确了无人机航迹跟踪的精度要求。利用5G组网的优势,在传统单基地雷达A发A收的基础上,结合A发B收感知工作模式,有效提升感知交叠区的检测性能。

(1) A发A收感知模式

A发A收(基站自发自收感知,如图16所示):基站AAU使用自己传输的通信信号的反射/衍射信号进行感

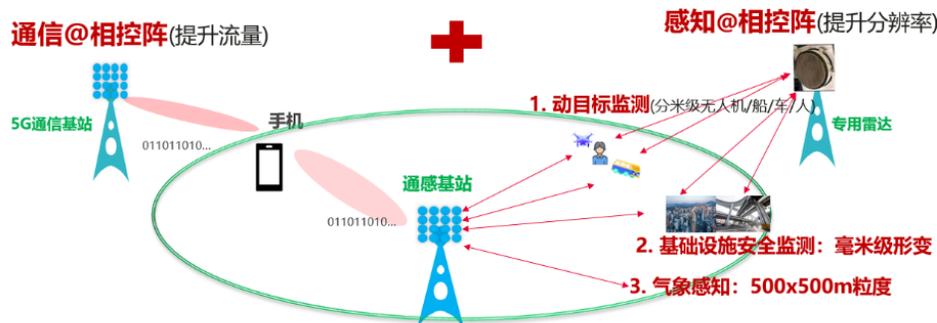


图15 基于5G通信基站的雷达探测应用场景

Fig.15 Application Scenario of Radar Detection Based on a 5G Communication Base Station



图16 A发A收示意图

Fig.16 Schematic of the Monostatic Mode

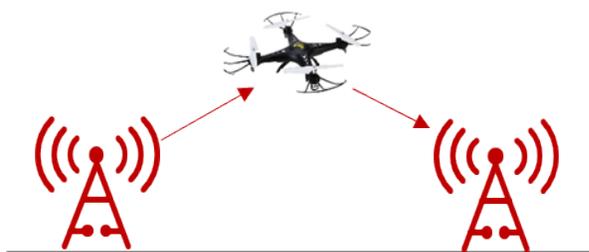


图17 A发B收示意图

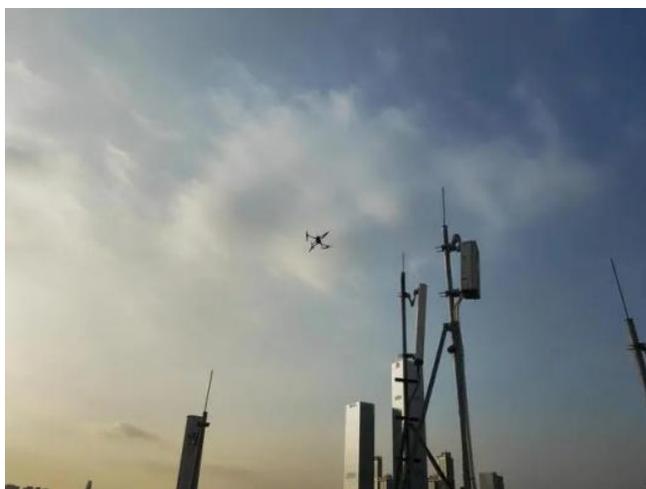
Fig.17 Schematic of the Bistatic Mode

知。由于发射器和接收器在同一个平台上,可以很容易地在时钟层面上同步,而且感知结果可以由该单基站节点清楚地解析,而不需要外部设备的协助。研究中同时定义了俯仰角达到60°的新一代通感一体AAU。

(2)A发B收感知模式

A发B收(基站间收发感知,如图17所示):基站间收发感知是指一个AAU发送感知信号,其他AAU接收的接收感知信号处理的工作模式。这相当于双基地和多基地雷达的设置,可有效提高交叠区的检测性能,需要收发基站间更高精度的时钟同步能力。

5G-A基站通过融合感知与通信技术,不仅具备强大的通信能力,还能够对非合作无人机进行高效的感知与跟踪。通过多普勒效应、信号到达时间差、信号强度与角度信息等技术,5G-A基站能够实时感知并定位无人机,为未来的智能城市、机场安防、边境管控等应用提供重要支持。图18展示了5G-A基站及依托5G-A网络开展的无人机探测验证实验^[74]。目前,5G-A通感一体技术



(A) 5G-A基站



(B) 无人机探测能力验证

图18 中国移动5G-A通感一体无人机探测系统

Fig.18 China Mobile's 5G-A Integrated Sensing and Communication System for UAV Detection

尚不具备飞鸟探测功能,相关研究仍在不断推进中。

5.2 低空目标探测新技术

5.2.1 波形设计

雷达在进行低空探测“低慢小”目标时,目标回波信号中不可避免地会引入地面或海面杂波,鉴于其回波较弱,极可能被淹没在杂波中。波形设计的目的是在尽量减小杂波强度的同时将目标波形与杂波区分开,在保证目标探测威力的情况下,最大限度提升探测“低慢小”目标的性能。根据雷达应用场景和性能指标要求,可以选择一个或多个以上波形类型进行组合使用,以实现最佳的波形设计^[75](图19)。相比于传统雷达通常使用固定的波形,认知雷达能够基于实时的环境反馈,动态设计和调整自适应波形,以最大化目标探测能力。自适应波形设计能够获得更高的回波信杂噪比,改善雷达探测目标的性能^[76]。

(1)波形设计考虑的因素

1)高距离分辨率:低空探测雷达的距离分辨率需保持较高水平,以区分地面上密集分布的目标。采用脉冲压缩波形和相参码波形等技术,可以显著提高雷达的距离分辨率。

2)多径效应抑制:“低慢小”目标由于飞行高度低,在探测目标时会出现严重的多路径干涉效应,使雷达回波强度起伏剧烈,会因为多路径效应形成探测盲区。低空探测雷达波形需要考虑到多径效应,设计将多径干扰最小化的波形,以减少误检率。

3)强抗干扰能力:采用相参码波形、频率分集波形以及高度波束管理波形等技术可以提高雷达的抗杂波干扰能力,实现对低空目标在复杂地形环境中的有效探测。

4)自适应调整:针对不同的任务和条件,低空雷达可以自适应地调整发射信号的参数,提高探测性能。为实现对目标检测概率及虚警率的优化,可以通过合理设计雷达波形,实现目标检测概率和虚警率的权

衡。例如,采用长脉冲宽度可以提高目标检测概率,而短脉冲宽度有利于降低虚警率。

(2)常用波形及设计方法

1)线性调频脉(Linear Frequency Modulated Pulse, LFM)波形:它在时间与带宽之间取得一定的折中,以达到良好的距离和速度分辨率。然而,LFM波形的主瓣杂散可能导致相邻目标的探测性能下降。

2)非线性调频脉冲压缩波形:相对线性调频波形来说能够得到更低的杂散水平,从而提高低空雷达对近距离目标的探测性能。

3)时频交织波形:采用不同频率和时间的交织波形,以减小地面回波和多径影响,提高系统信噪比和抗干扰能力。

4)波形优选和自适应方法:根据所处的环境和任务需求,实时调整波形参数,以优化雷达性能。

通过对低空探测雷达进行合理的波形设计,可以显著提高低空探测雷达探测“低慢小”目标的性能,有效提高检测能力、抗干扰能力以及适应性,使其能够更准确、高效地探测低空目标,满足实际的应用需求。Zhang等^[77]在海杂波复合高斯建模下提出了一种基于纹理估计的自适应波形优化方法,能够在抑制杂波的同时保证旁瓣控制,从而提升海面弱小目标的检测能力。Yilmaz等^[78]将自适应波形设计与多径利用结合,通过优化频谱结构来增强低RCS目标在海面闪烁背景下的可检测性。这些工作表明,认知波形能够有效改善低信噪比条件下的目标检测性能,MIMO波形设计进一步拓展了雷达在空间—时间上的自由度。通过联合优化发射波形协方差矩阵,可以在接收端形成有利于目标与杂波分离的空时响应。Bolhasani等^[79]在此基础上引入鲁棒优化,针对杂波统计特性存在不确定性的情况,保证了波形设计的稳健性;Tang等^[80]提出了一种基于STAP的波形协方差设计方法,使系统在强杂波背景下依然能够保持较高的检测性能。综上,面向低空“低慢小”目标的波形设计已逐渐从传统固定调制模式,发展到基于认知、MIMO协同与频域多样性的综合优化方向。

5.2.2 智能处理

智能处理是雷达目标探测和识别的重要发展方向之一,通过先进的算法和智能决策系统,系统能够提高目标探测、跟踪和分类的准确性^[81]。低空探测雷达中智能处理技术可以提高雷达系统对电磁干扰和噪声的抗干扰能力,也使得雷达系统能够自主决策,具备快速响应和实时处理能力,同时智能处理允许雷达系统与其他传感器进行信息融合,获得更全面的信息。它包括自适应处理算法,使雷达系统能够根据环境的动态变化调

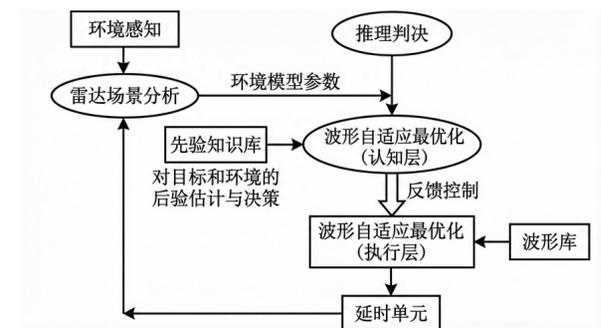


图19 认知雷达波形设计结构

Fig.19 Cognitive Radar Waveform Design Structure

整参数,以适应不同的工作场景。相比于传统的雷达信号处理方法,深度学习模型通过其多层神经网络结构,能够从原始回波信号中自动提取“低慢小”目标在时域、频域、空域中的不同维度的特征,且随着网络层次的加深,能够学到更加复杂的信号模式,具有更强的环境适应能力和检测鲁棒性^[82,83]。在信号表示与特征学习层面,端到端的数据驱动方法能够自动从原始回波或其时—频表示中学习判别性特征,而无需完全依赖人工设计的统计量。Chu等^[84]提出一种基于SE-ResNet34的深度特征提取方法,利用通道注意力机制有效捕获雷达回波信号中的微小变化,从而实现对LSS目标的智能检测。Wang等^[85]提出LSSDNet模型,采用三维U-Net架构将统计特征与深度特征相结合,抑制背景杂波,实现对“低慢小”目标的高效检测。针对LSS目标的复杂性,研究者提出了多模态特征融合的策略。海军航空大学团队^[33]提出了一种深度学习时频表示网络,并用于“低慢小”目标微多普勒特征的提取和识别,采用可变卷积核替换传统时频分析方法固定基函数,实现多种类型微动信号的高分辨分析。

智能处理技术在雷达中的应用为低空探测系统带来了显著的进步,提高了目标检测与识别的准确性、系统的自适应性和多传感器融合的效率。尽管已经取得显著成果,但智能处理在雷达中的应用仍然面临一些挑战,如数据难以获取、模型解释性等。未来的研究方向包括数据集的扩充与标注、深度学习模型的优化以及更加智能化的决策系统的设计。

6 结语

低空“低慢小”目标的精准探测与识别是保障国防安全、要地防护及民航运营的核心能力,但其面临强杂波干扰、目标特征微弱、复杂电磁对抗、地形遮蔽及地球曲率限制等多重技术挑战。本文系统总结了雷达低空目标探测技术发展,详细阐述了长时积累检测技术、多特征融合检测技术以及基于RCS、微多普勒和运动特征的目标识别技术。在此基础上,介绍了数字阵雷达、外辐射源被动雷达、气象雷达等几种低空目标探测雷达系统,并从应用场景出发,阐述低空探测在机场鸟击防范、无人机反制等领域的应用。未来发展趋势聚焦于分布式雷达协同探测、通感一体化及智能处理等,以破解超低空目标探测难题,为低空经济安全发展提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 陈小龙,关键,黄勇,等. 雷达低可观测目标探测技术. 科技导报, 2017,35(11):30—38.

Chen XL,Guan J,Huang Y,et al. Radar low observable target detection technology. *Science & Technology Review*,2017,35(11): 30—38. (in Chinese)

[2] 陈小龙,陈唯实,饶云华,等. 飞鸟与无人机目标雷达探测与识别技术进展与展望. *雷达学报*,2020,9(5):803—827.
Chen XL,Chen WS,Rao YH,et al. Progress and prospects of radar target detection and recognition technology for flying birds and unmanned aerial vehicles. *Journal of Radars*,2020,9(5):803—827. (in Chinese)

[3] Chen WS,Chen XL,Liu J,et al. Detection and recognition of UA targets with multiple sensors. *The Aeronautical Journal*,2023,127(1308):167—192.

[4] 陈唯实,黄毅峰,陈小龙,等. 机场探鸟雷达技术发展与应用综述. *航空学报*,2022,43(1):176—196.
Chen WS,Huang YF,Chen XL,et al. Development and applications of airport avian radar:Review. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2022,43(1):176—196. (in Chinese)

[5] 徐世友,戴婷,陈曾平. 基于多维特征的全息雷达“低慢小”目标识别. *现代雷达*,2022,44(11):1—9.
Xu SY,Dai T,Chen ZP. “Low-Slow-Small” target recognition for holographic radar based on multi-dimensional features. *Modern Radar*, 2022,44(11):1—9. (in Chinese)

[6] 邓振华,陈小龙,薛伟,等. 海空背景下低慢小目标泛探雷达多域多维特征建模与分析. *信号处理*,2024,40(5):801—814.
Deng ZH,Chen XL,Xue W,et al. Multi-domain and multi-dimensional feature modeling and analysis of low,slow,and small targets via ubiquitous radar under sea and air background. *Journal of Signal Processing*,2024,40(5):801—814. (in Chinese)

[7] 柳超,王月基. 对海探测雷达多目标跟踪技术综述. *雷达学报*,2021, 10(1):100—115.
Liu C,Wang YJ. Review of multi-target tracking technology for marine radar. *Journal of Radars*,2021,10(1):100—115. (in Chinese)

[8] Carlson BD,Evans ED,Wilson SL. Search radar detection and track with the Hough transform. I. System concept. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*,1994,30(1):102—108.

[9] 安政帅,刘志国. 基于动态规划的多站雷达协同探测信号级融合算法. *火控雷达技术*,2020,49(4):1—9.
An ZS,Liu ZG. A signal-level fusion algorithm for multi-static radar cooperative detection based on dynamic programming. *Fire Control Radar Technology*,2020,49(4):1—9. (in Chinese)

[10] 杨亚波,夏永红,匡华星,等. 雷达微弱目标检测前跟踪技术研究综述. *雷达与对抗*,2015,35(2):22—28.
Yang YB,Xia YH,Kuang HX,et al. A review of radar dim target track-before-detect techniques. *Radar & Ecm*,2015,35(2):22—28. (in Chinese)

[11] 杨文彬,李旦,张建秋. 随机有限集推理动目标轨迹的相干累积检测法. *系统工程与电子技术*,2023,45(12):3781—3791.
Yang WB,Li D,Zhang JQ. Coherent integration with random finite set inferred trajectories for detecting maneuvering targets. *Systems Engineering and Electronics*,2023,45(12):3781—3791. (in Chinese)

[12] Kirkland D. Imaging moving targets using the second-order keystone transform. *IET Radar, Sonar & Navigation*,2011,5(8):902—910.

[13] 王娟,赵永波. Keystone变换实现方法研究. *火控雷达技术*,2011(1): 45—51.

- Wang J,Zhao YB. Research on implementation methods of keystone transform. *Fire Control Radar Technology*,2011(1):45—51. (in Chinese)
- [14] 陈远征,朱永锋,赵宏钟,等. 基于包络插值移位补偿的高速运动目标的积累检测算法研究. *信号处理*,2004,20(4):387—390.
Chen YZ,Zhu YF,Zhao HZ,et al. Detection algorithm research of high velocity moving target based on the envelope interpolation. *Journal of Signal Processing*,2004,20(4):387—390. (in Chinese)
- [15] 吴孙勇,廖桂生,朱圣棋,等. 提高雷达机动目标检测性能的二维频率域匹配方法. *电子学报*,2012,40(12):2415—2420.
Wu SY,Liao GS,Zhu SQ,et al. A two-dimensional frequency-domain matching method for improving the detection performance of radar maneuvering targets. *Acta Electronica Sinica*,2012,40(12):2415—2420. (in Chinese)
- [16] 张月,邹江威,陈曾平. 远探雷达长时间相参积累目标检测方法研究. *国防科技大学学报*,2010,32(6):15—20.
Zhang Y,Zou JW,Chen ZP. Long-time coherent integration targets detection method for ubiquitous radar. *Journal of National University of Defense Technology*,2010,32(6):15—20. (in Chinese)
- [17] Xia XG. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*,2000,48(11):3122—3133.
- [18] 陈小龙,刘宁波,黄勇,等. 雷达目标检测分数域理论及应用. 北京:科学出版社,2022.
Chen XL,Liu NB,Huang Y,et al. Theory and Application of Radar Target Detection in Score Domain. Beijing:Science Press,2022. (in Chinese)
- [19] Lv XL,Bi GA,Wan CR,et al. Lv's distribution:Principle,implementation,properties,and performance. *IEEE Transactions on Signal Processing*,2011,59(8):3576—3591.
- [20] 陈小龙,黄勇,关键,等. MIMO雷达微弱目标长时积累技术综述. *信号处理*,2020(12):1947—1964.
Chen XL,Huang Y,Guan J,et al. Summary of long-time integration techniques for weak targets of MIMO radar. *Journal of Signal Processing*,2020(12):1947—1964. (in Chinese)
- [21] Xu J,Yu J,Peng YN,et al. Radon-Fourier transform for radar target detection,I:Generalized Doppler filter bank. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*,2011,47(2):1186—1202.
- [22] Chen XL,Guan J,Liu NB,et al. Maneuvering target detection via radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration. *IEEE Transactions on Signal Processing*,2014,62(4):939—953.
- [23] 吴兆平,符渭波,苏涛,等. 基于快速Radon-Fourier变换的雷达高速目标检测. *电子与信息学报*,2012,34(8):1866—1871.
Wu ZP,Fu WB,Su T,et al. High speed radar target detection based on fast Radon-Fourier transform. *Journal of Electronics & Information Technology*,2012,34(8):1866—1871. (in Chinese)
- [24] Yu J,Xu J,Peng YN,et al. Radon-Fourier transform for radar target detection (III):Optimality and fast implementations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*,2012,48(2):991—1004.
- [25] 汪翔,汪育苗,陈星宇,等. 基于深度学习的多特征融合海面目标检测方法. *雷达学报*,2024,13(3):554—564.
Wang X,Wang YM,Chen XY,et al. Deep learning-based marine target detection method with multiple feature fusion. *Journal of Radars*,2024,13(3):554—564. (in Chinese)
- [26] 王治飞,于俊朋,杨子昊,等. 基于帧间多维特征的深度学习雷达目标检测技术. *现代雷达*,2022,44(12):48—54.
Wang ZF,Yu JP,Yang YH,et al. Deep learning-based radar target detection technology using inter-frame multi-dimensional features. *Modern Radar*,2022,44(12):48—54. (in Chinese)
- [27] He XY,Chen XL,Du XL,et al. Maritime target radar detection and tracking via DTNet transfer learning using multi-frame images. *Remote Sensing*,2025,17(5):836.
- [28] Patel JS,Fioranelli F,Anderson D. Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVs or drones. *IET Radar, Sonar & Navigation*,2018,12(9):911—919.
- [29] 张梦晨,赵志坚,刘佳,等. 气象雷达鸟群目标多维特征建模与特性分析. *信号处理*,2025,41(5):829—839.
Zhang MC,Zhao ZJ,Liu J,et al. Multidimensional feature modeling and characteristic analysis of bird flock targets in weather radar. *Journal of Signal Processing*,2025,41(5):829—839. (in Chinese)
- [30] 田鹤,王吉儿,殷红成,等. 基于RCS特性统计分布的编队无人机群目标运动状态识别. *信号处理*,2025,41(5):949—957.
Tian H,Wang JE,Yin HC,et al. Recognition of drone formation motions based on radar cross section statistical characteristics. *Journal of Signal Processing*,2025,41(5):949—957. (in Chinese)
- [31] Torvik B,Olsen KE,Griffiths H. Classification of birds and UAVs based on radar polarimetry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,2016,13(9):1305—1309.
- [32] Rojhani N,Sadeghi Bakhi M,Passafiume M,et al. Application of PCA and unsupervised deep learning in bird and drone discrimination based on FMCW radar measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,2024,21:3510805.
- [33] Wang JH,Chen XL,Guan J,et al. A time-frequency representation method based on ETF-MDNet for radar target micro-motion features. *Chinese Journal of Electronics*,2025,34(4):1199—1208.
- [34] Molchanov P,Egiazarian K,Astola J,et al. Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures. 2013 European Radar Conference. Nuremberg,Germany. IEEE,2013:172—175.
- [35] Narayanan RM,Tsang B,Bharadwaj R. Classification and discrimination of birds and small drones using radar micro-Doppler spectrogram images. *Signals*,2023,4(2):337—358.
- [36] White D,Jahangir M,Baker CJ,et al. Urban bird-drone classification with synthetic micro-Doppler spectrograms. *IEEE Transactions on Radar Systems*,2023,2:167—179.
- [37] Kumawat HC,Chakraborty M,Bazil Raj AA,et al. DIAT- μ SAT:Small aerial targets' micro-Doppler signatures and their classification using CNN. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,2021,19:6004005.
- [38] White D,Jahangir M,Kumar Mishra A,et al. Latent variable and classification performance analysis of bird-drone spectrograms with elementary autoencoder. *IEEE Transactions on Radar Systems*,2024,3:115—123.
- [39] Mandal P,Roy LP,Das SK. Flying objects classification based on micro-Doppler signature data from UAV borne radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,2024,21:3501605.
- [40] 陈唯实,黄毅峰,卢贤锋,等. 基于探鸟雷达的机场周边鸟类目标数量估计. *北京航空航天大学学报*,2021,47(8):1533—1542.
Chen WS,Huang YF,Lu XF,et al. Bird abundance estimation around

- airports based on bird detection radar. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(8): 1533—1542. (in Chinese)
- [41] 刘佳,陈唯实,陈小龙,等. 鸟类活跃度量化建模与预测方法研究. *信号处理*, 2025, 41(5): 840—852.
Liu J, Chen WS, Chen XL, et al. Bird activity quantification and prediction methods. *Journal of Signal Processing*, 2025, 41(5): 840—852. (in Chinese)
- [42] Mohajerin N, Histon J, Dizaji R, et al. Feature extraction and radar track classification for detecting UAVs in civilian airspace. 2014 IEEE Radar Conference. Cincinnati, OH, USA. IEEE, 2014: 674—679.
- [43] Liu J, Xu QY, Chen WS. Classification of bird and drone targets based on motion characteristics and random forest model using surveillance radar data. *IEEE Access*, 2021, 9: 160135—160144.
- [44] 史孟鑫,姜琦,李卫东,等. 基于高分辨相控阵雷达的低空无人机群目标数据集. *信号处理*, 2025, 41(5): 821—828.
Shi MX, Jiang Q, Li WD, et al. Low-altitude UAV swarm target dataset based on high-resolution phased array radar. *Journal of Signal Processing*, 2025, 41(5): 821—828. (in Chinese)
- [45] 程永强,邹润明,陈嘉宜,等. 地杂波背景下雷达低慢小无人机探测数据集(LSS-Ku-1.0). *信号处理*, 2025, 41(5): 807—820.
Cheng YQ, Zou RM, Chen JY, et al. Radar detection dataset of low-slow-small UAV under ground clutter (LSS-Ku-1.0). *Journal of Signal Processing*, 2025, 41(5): 807—820. (in Chinese)
- [46] Yuan W, Chen XL, Du XL, et al. A low slow small target classification network model based on K-band radar dynamic multifeature data fusion. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(1): 1656—1668.
- [47] Wu Q, Chen J, Lu Y, et al. A complete automatic target recognition system of low altitude, small RCS and slow speed (LSS) targets based on multi-dimensional feature fusion. *Sensors*, 2019, 19(22): 5048.
- [48] Jiang W, Liu Z, Wang YP, et al. Realizing small UAV targets recognition via multi-dimensional feature fusion of high-resolution radar. *Remote Sensing*, 2024, 16(15): 2710.
- [49] Meng H, Peng YX, Wang WB, et al. Spatio-temporal-frequency graph attention convolutional network for aircraft recognition based on heterogeneous radar network. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(6): 5548—5559.
- [50] Guan J, Mu XQ, Huang Y, et al. Space-time-waveform joint adaptive detection for MIMO radar. *IEEE Signal Processing Letters*, 2023, 30: 1807—1811.
- [51] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势. *雷达学报*, 2012, 1(2): 109—123.
Wan XR. An overview on development of passive radar based on the lowfrequency band digital broadcasting and TV signals. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 109—123. (in Chinese)
- [52] 陈小龙,饶桂林,关键,等. 被动雷达低慢小探测数据集(LSS-PR-1.0)及多域特征提取和分析方法. *雷达学报(中英文)*, 2025, 14(2): 249—268.
Chen XL, Rao GL, Guan J, et al. Passive radar low slow small detection dataset (LSS-PR-1.0) and multi-domain feature extraction and analysis methods. *Journal of Radars*, 2025, 14(2): 249—268. (in Chinese)
- [53] 陈唯实,刘佳,王青斌,等. 气象雷达探鸟技术综述. *航空学报*, 2023, 44(5): 21—39.
Chen WS, Liu J, Wang QB, et al. Review on technology of bird detection with weather radar. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2023, 44(5): 21—39. (in Chinese)
- [54] 胡程,崔铠,王锐,等. 天气雷达空中生态监测. *信号处理*, 2024, 40(1): 94—113.
Hu C, Cui K, Wang R, et al. Review of weather radar aerocology monitoring. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(1): 94—113. (in Chinese)
- [55] Huuskonen A, Saltikoff E, Holleman I. The operational weather radar network in Europe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(6): 897—907.
- [56] Stepanian PM, Horton KG, Melnikov VM, et al. Dual-polarization radar products for biological applications. *Ecosphere*, 2016, 7(11): e01539.
- [57] Detect. Merlin bird and bat tracking radar technologies. (2025-07-25)/[2025-07-25]. <https://detect-inc.com/avian-bat-radar-systems/>.
- [58] Weber P, Nohara TJ, Gauthreaux S Jr. Affordable, real-time, 3-D avian radar networks for centralized North American bird advisory systems. *Bird Strike Committee Proceedings*, 2005.
- [59] Hoffmann F, Ritchie M, Fioranelli F, et al. Micro-Doppler based detection and tracking of UAVs with multistatic radar. 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf). Philadelphia, PA, USA. IEEE, 2016: 1—6.
- [60] 陈唯实,万健,李敬. 基于机场探鸟雷达数据的鸟击风险评估. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(11): 1431—1436.
Chen WS, Wan J, Li J. Bird strike risk assessment based on airport bird detection radar data. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(11): 1431—1436. (in Chinese)
- [61] Chen WS. Spatial and temporal features selection for low-altitude target detection. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 40: 171—180.
- [62] 宋强,彭翔宇,黄仕林,等. 基于序贯特征提取的无人机与飞鸟目标分类. *信号处理*, 2024, 40(5): 839—852.
Song Q, Peng XY, Huang SL, et al. Classification of UAVs and birds using sequential feature extraction. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(5): 839—852. (in Chinese)
- [63] 中国电子学会. 机场探鸟雷达系统技术要求:T/CIE 176—2023. 北京:中国标准出版社, 2023.05.29.
- [64] 中国电子学会. 机场净空区非合作无人机目标探测系统通用技术要求:T/CIE 252—2024. 北京:中国标准出版社, 2024.08.09.
- [65] Accipiter. Aviation safety & security. (2025-07-25)/[2024-07-31]. <https://www.accipiterradar.com/products/safety/>.
- [66] Jahangir M, Baker CJ, Oswald GA. Doppler characteristics of micro-drones with L-Band multibeam staring radar. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). Seattle, WA, USA. IEEE, 2017: 1052—1057.
- [67] 万显荣,武冰倩,易建新,等. 面向外辐射源雷达发射站定位的合作无人机航迹规划方法研究. *电子与信息学报*, 2024, 46(5): 2057—2064.
Wan XR, Wu BQ, Yi JX, et al. UAV path planning method for passive radar transmitter localization. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(5): 2057—2064. (in Chinese)
- [68] 刘泉华,张凯翔,梁振楠,等. 地基分布式相参雷达技术研究综述. *信号处理*, 2022, 38(12): 2443—2459.
Liu QH, Zhang KX, Liang ZN, et al. Research overview of ground-based distributed coherent aperture radar. *Journal of Signal Processing*,

- 2022,38(12):2443—2459. (in Chinese)
- [69] 杨诗兴,张国鑫,梁云飞,等. 动平台分布式雷达系统动目标低比特数据检测算法. 雷达学报,2024,13(3):584—600.
Yang SX,Zhang GX,Liang YF,et al. Moving targets detection with low-bit quantization in distributed radar on moving platforms. *Journal of Radars*,2024,13(3):584—600. (in Chinese)
- [70] 龙锦荣,吴建新,梁毅. 分布式相参雷达自适应和差波束测角方法. 系统工程与电子技术,2025,47(3):779—787.
Long JR,Wu JX,Liang Y. Angle measurement method for distributed coherent radar based on adaptive sum and difference beamforming. *Systems Engineering and Electronics*,2025,47(3):779—787. (in Chinese)
- [71] 余佳佳. 基于分布式组网的复杂环境微弱目标探测方法研究. 上海:上海交通大学,2018.
- [72] 程子扬,何子述,王智磊,等. 分布式MIMO雷达目标检测性能分析. 雷达学报,2017,6(1):81—89.
Cheng ZY,He ZS,Wang ZL,et al. Detection performance analysis for distributed mimo radar. *Journal of Radars*,2017,6(1):81—89. (in Chinese)
- [73] 刘斌越,杨建强,徐波,等. 5G-A通感一体基站组网低空感知关键技术. 信号处理,2025,41(5):787—806.
Liu BY,Yang JQ,Xu B,et al. Key technologies for low-altitude sensing in 5G-A integrated communication and sensing networks. *Journal of Signal Processing*,2025,41(5):787—806. (in Chinese)
- [74] 中兴通讯. 中国移动联合中兴通讯完成5G-A通感一体低空场景能力验证. (2024-04-12)/[2024-07-31]. <https://www.zte.com.cn/china/about/news/20240412c4.html>.
- [75] 余若峰,杨威,付耀文,等. 面向不同雷达任务的认知波形优化综述. 电子学报,2022,50(3):726—752.
Yu RF,Yang W,Fu YW,et al. A review of cognitive waveform optimization for different radar tasks. *Acta Electronica Sinica*,2022,50(3):726—752. (in Chinese)
- [76] 杨雪亚,沈显照,王贤翔. 低空反无雷达的高精度测速方法及波形设计. 火控雷达技术,2022,51(3):36—39.
Yang XY,Shen XZ,Wang XX. A high-precision velocity measurement method and waveform design for low-altitude anti-UAV radar. *Fire Control Radar Technology*,2022,51(3):36—39. (in Chinese)
- [77] Zhang LK,Wei N,Du XH. Waveform design for improved detection of extended targets in sea clutter. *Sensors*,2019,19(18):3957.
- [78] Yilmaz SHG,Zarro C,Hayvaci HT,et al. Adaptive waveform design with multipath exploitation radar in heterogeneous environments. *Remote Sensing*,2021,13(9):1628.
- [79] Bolhasani M,Mehrshahi E,Ali Ghorashi S. Waveform covariance matrix design for robust signal-dependent interference suppression in colocated MIMO radars. *Signal Processing*,2018,152:311—319.
- [80] Tang B,Li J,Zhang Y,et al. Design of MIMO radar waveform covariance matrix for Clutter and Jamming suppression based on space time adaptive processing. *Signal Processing*,2016,121:60—69.
- [81] 陈小龍,何肖阳,邓振华,等. 雷达微弱目标智能化处理技术与应用. 雷达学报(中英文),2024,13(3):501—524.
Chen XL,He XY,Deng ZH,et al. Radar intelligent processing technology and application for weak target. *Journal of Radars*,2024,13(3):501—524. (in Chinese)
- [82] Rahman S,Robertson DA. Classification of drones and birds using convolutional neural networks applied to radar micro-Doppler spectrogram images. *IET Radar, Sonar & Navigation*,2020,14(5):653—661.
- [83] Chen XL,Zhang H,Song J,et al. Micro-motion classification of flying bird and rotor drones *via* data augmentation and modified multi-scale CNN. *Remote Sensing*,2022,14(5):1107.
- [84] Chu TW,Zhou HJ,Ren ZZ,et al. Intelligent detection of low-slow-small targets based on passive radar. *Remote Sensing*,2025,17(6):961.
- [85] Wang QX,Wei XY,Gao MG. LSSDNet:A low-slow-small target detection method based on centimeter wave radar in the urban environment. *IEEE Sensors Journal*,2025,25(12):22118—22137.

Radar Low Altitude Target Detection and Prevention: Progress and Prospects

Xiaolong Chen^{1*} Weishi Chen^{2*} Siwei Chen³ Yue Zhang⁴ Jian Guan¹

1. *Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China*

2. *Airport Research Institute, China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, China*

3. *College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

4. *School of Electronics and Communication Engineering, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China*

Abstract With the rapid development of the low-altitude economy, low-altitude targets such as unmanned aerial vehicles (UAVs) have been widely applied in fields like logistics, agricultural plant protection, and emergency rescue. These targets are characterized by low flight altitude, slow movement speed, and small size (commonly known as “low-slow-small”), which put extremely high demands on surveillance systems. As a core detection method, radar is in urgent need of enhancing its ability to accurately detect and classify low-altitude targets such as birds and UAVs in complex backgrounds. This paper makes a comparative analysis of major low-altitude detection means, systematically reviews the progress of radar detection and recognition technologies for birds and UAVs, and focuses on the applications of typical systems based on digital array pan-search radar, external radiation source radar, and meteorological radar. It expounds on the key role of radar low-altitude detection in scenarios such as airport bird strike prevention and UAV countermeasures, and discusses emerging

* Corresponding Authors, Email: cxlx11209@163.com; chenwsh@mail.castc.org.cn

technical directions like distributed radar and integrated communication-sensing detection. Finally, it looks ahead to future developments in waveform optimization design, intelligent information processing, and other aspects.

Keywords radar target detection; low-altitude targets; UAV countermeasures; bird strike prevention; deep learning

陈小龙 中国人民解放军海军航空大学教授。主要从事雷达低慢小目标检测、海上目标检测与识别、雷达智能信号处理等研究。主持国家自然科学基金青年科学基金项目(B类)、山东省自然科学基金青年科学基金项目(A类)。

陈唯实 中国民航科学技术研究院研究员。主要从事机场运行安全、鸟击防范、无人机反制等研究,主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金民航联合研究基金重点支持项目、博士后科学基金等。

(责任编辑 王磊 张强)