

外军先进战斗机与无人机雷达发展综述

邹 冉

中国电子科技集团公司第十四研究所 江苏南京 210039

摘 要：外军先进战斗机雷达在探测性能上不断强化，苏-35 的“雪豹-E”、F-22 的 AN/APG-77 等雷达性能突出，同时积极探索新体制、推进多功能集成与小型化集成化。无人机雷达在探测性能、新体制应用、多功能拓展及小型化集成化方面也有显著进阶，“鹰眼”等雷达表现亮眼。此外，外军通过构建高速稳定的数据链路、精准协调雷达频段、设计适配的任务规划及推进软硬件深度融合，实现战斗机与无人机雷达的高效协同，形成完整发展体系。

关键词：外军；战斗机雷达；无人机雷达；协同技术；发展体系

引言

雷达作为现代空战体系的核心感知装备，其技术水平直接影响作战平台的态势掌控与任务执行能力。随着战场环境日趋复杂，单一作战平台的雷达系统已难以满足全域作战需求，先进战斗机与无人机的协同作战成为提升作战效能的关键方向。外军在这一领域持续深耕，推动战斗机雷达向高性能、新体制、多功能方向突破，同时加速无人机雷达的性能跃升与应用拓展，并通过技术衔接构建高效协同体系，形成了一系列具有实战价值的发展成果。

1. 外军先进战斗机雷达技术的核心发展方向

1.1 探测性能的持续强化

外军在提升战斗机雷达探测性能方面投入诸多努力。在作用距离上，以俄罗斯苏-35 战机装备的“雪豹-E”相控阵雷达为例，其最大功率达 20 千瓦，采用有源相控阵体制，对雷达反射截面 3 平方米、位于 10000 米高空目标的最远探测距离可达 400 千米，迎头截获距离至少为 350-400 千米，可同时跟踪 30 个空中目标并引导导弹攻击其中 8 个。美国 F-22 战机的 AN/APG-77 雷达，凭借先进的信号处理算法和高功率发射组件，采用有源相控阵设计，有效探测距离同样处于世界领先水平，对典型空中目标的探测距离超过 200 千米。在精度层面，新一代雷达采用更窄的波束宽度和精确的测距测角算法。例如，欧洲部分先进战斗机雷达的角度测量精度可达 0.1° 以内，距离测量精度在米级范围，这使得战机能够更精准地锁定目标，为武器的精确打击提供有力支持。

1.2 新体制雷达的探索应用

有源相控阵雷达已成为外军先进战斗机的主流配置。如

美国 F-35 战机装备的 AN/APG-81 有源相控阵雷达，其天线由数千个收发组件（T/R 组件）构成，每个组件功率约 10 瓦，都能独立发射和接收信号。通过调整各组件发射信号的相位，实现波束在空间的快速扫描，扫描速度极快，比机械扫描雷达快数百倍，能在短时间内完成对不同方向目标的搜索与跟踪，且工作带宽可达 4 吉赫水平，极大增强了抗干扰能力^[1]。此外，量子雷达等新兴体制雷达也在外军研发视野中。俄罗斯已制成使用量子无线电分立组件的雷达样机，并在测试中对小型无人机进行了跟踪。量子雷达利用光学系统处理超宽频带信号，相比传统雷达，尺寸更小、可靠性更高、分辨率更强，还能绘制目标 3D 图像以辅助目标类型判断，未来有望应用于第六代战机。

1.3 多功能集成的发展趋势

现代外军战斗机雷达不再局限于单纯的目标探测，而是朝着多功能集成方向发展。除具备对空、对地、对海目标的搜索与跟踪功能外，还融合了电子战、通信等功能。英国“台风”战斗机换装的“欧洲通用雷达系统”（ECRS）Mk2 有源电子扫描阵列雷达，采用开放式架构设计，不仅拥有传统的搜索和瞄准能力，还赋予战机电子干扰能力，可攻击敌方雷达使其失效，同时具备高速通信能力，实现高带宽通信。美国 F-16C Block30 战斗机换装的 AN/APG-83 有源相控阵雷达，具备电子攻击能力，能利用高度聚焦的电磁波干扰甚至损坏敌方飞机、导弹等系统内的电子设备，在非合作目标识别方面也有重大升级，可将获取的信号特征与数据库比对，实现对各类空中目标的识别和分类，识别响应时间缩短至秒级。如图 1 所示：

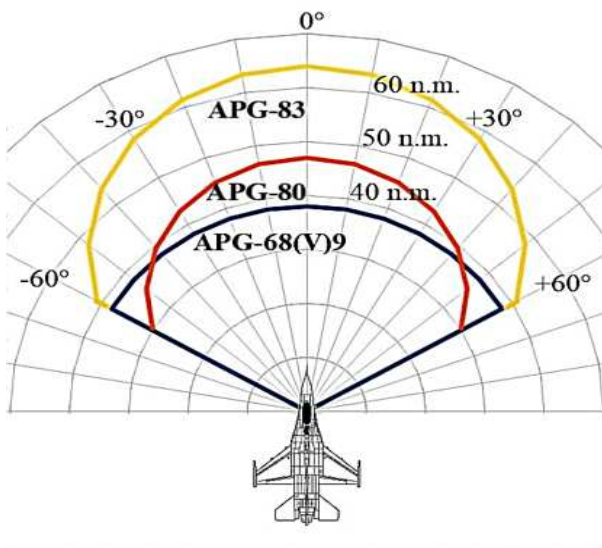


图 1 所示：F-16 雷达探测距离对比

1.4 小型化与集成化设计

为适应战斗机有限的空间和载重限制，外军致力于雷达的小型化与集成化设计。美国一家公司研发的紧凑型机载有源相控阵雷达，采用氮化镓（GaN）技术，重量仅约 50 千克，体积小，却具备较高性能，探测距离可达数百千米，有望安装在多种飞行器上，包括无人机和直升机。在集成化方面，将雷达系统与战机其他航电设备深度融合。例如，通过 1553B 数据总线和统一的处理架构，使雷达获取的数据能快速传输至其他系统进行综合处理与分析，提升战机整体作战效能。同时，减少雷达独立组件数量，提高系统的可靠性和维护性，降低战机的后勤保障压力。

2 外军无人机雷达系统的性能提升与应用拓展

2.1 探测性能的进阶发展

外军致力于提升无人机雷达的探测性能。在探测距离上，美国通用原子公司为陆军 MQ-1C “灰鹰” 无人机生产的“鹰眼”多模态雷达，探测范围相比前代雷达实现数倍增长，该雷达工作在 X 频段，峰值功率达数千瓦，能在复杂气象条件下，如穿透云层、雨水、灰尘、烟雾和雾气，对目标进行远距离探测。其改进型“鹰眼”雷达换装相控阵天线后，通过增加 T/R 组件数量提升发射功率，探测距离更是提升至先前的 2 倍多，可对超视距范围内的装甲车辆、舰船等目标进行稳定跟踪。在精度方面，现代无人机雷达采用先进算法与技术，如脉冲压缩、合成孔径等，实现高精度探测^[2]。例如，部分外军无人机雷达通过精确的信号处理，可实现对

目标的高精度定位，在对地面小型目标的探测中，测距精度可达米级，角度测量精度能控制在 0.1 度以内，从而为后续的情报分析与作战行动提供精准数据支撑。

2.2 新体制雷达的创新应用

有源相控阵雷达在外军无人机中逐渐得到广泛应用。以美国“灰鹰”25M 无人机计划搭载的“鹰眼”雷达升级方案为例（如图 2 所示），其采用的有源相控阵天线包含数千个独立 T/R 组件，利用固态全电子发射器替代传统机械控制碟形天线，扫描速度提升至毫秒级，不仅提高了雷达的可修复性和可靠性，还极大增强了雷达性能。该雷达通过电子扫描方式实现波束快速灵活指向，波束捷变能力显著增强，能在短时间内对不同方向目标进行搜索与跟踪，工作带宽拓展至数吉赫兹，有效提升了抗干扰能力。此外，诸如量子雷达等前沿体制雷达也在外军无人机雷达研发范畴内。俄罗斯已开展相关样机研制，其量子雷达利用光子纠缠特性实现目标探测，理论上可突破传统雷达物理极限，未来若应用于无人机，将为无人机在复杂电磁环境下执行任务提供全新技术路径。



图 2：美国“灰鹰”25M 无人机

2.3 多功能应用的广泛拓展

外军无人机雷达不再局限于单纯目标探测，而是朝着多功能方向发展。除具备对空、对地、对海目标搜索跟踪能力外，还融合了多种其他功能。美国“鹰眼”雷达具备海上广域搜索（MWAS）模式，可在数分钟内完成上万平方米海域扫描，以及专门用于追踪水面舰艇目标的海上移动目标指示模式，能够有效支持美国陆军的多模式行动（MDO）任务集。同时，一些外军无人机雷达集成了电子战功能，通过生成特定频段的干扰信号，可对敌方雷达和通信系统进行压制性干扰，甚至具备一定的通信中继能力，利用雷达天线兼作通信天线，实现无人机与其他作战单元之间的数据高速传输与共享，增强了无人机在复杂作战环境中的协同作战能力。

2.4 小型化集成化的显著趋势

为适配无人机有限的载荷与空间,外军大力推进无人机雷达的小型化与集成化。一方面,通过采用先进的芯片制造工艺和新型材料,如氮化镓(GaN)半导体器件和轻质复合材料,减小雷达组件尺寸与重量。例如,部分紧凑型雷达重量仅为传统雷达的几分之一,整体重量可控制在20公斤以内,功耗降低30%以上,却仍能保持较高性能,可安装在多种小型无人机平台上^[3]。另一方面,加强雷达系统与无人机其他航电设备的集成。将雷达获取的数据与无人机的导航、通信、数据处理等系统深度融合,通过1553B或以太网等军用数据总线和统一处理架构,实现信息快速交互与综合处理,提升无人机整体作战效能。这种集成化设计减少了系统复杂度,使设备故障率降低50%以上,提高了可靠性与维护性,使无人机能够更高效地执行各类任务。

3. 外军战斗机与无人机雷达协同工作的技术衔接与体系构建

3.1 数据链路的高速稳定构建

外军在推动战斗机与无人机雷达协同工作进程中,极为重视数据链路的打造。以美军正在研发的“有人/无人混编战术接口”技术为例,其致力于为有人/无人混合编队赋予态势感知能力,该技术通过专用协议实现雷达数据的标准化封装,确保不同平台雷达信息格式统一。该技术采用先进的加密算法与高效调制解调技术,加密层级达到军事级标准,可抵御多种常见的电磁窃听与破解手段,确保数据在传输过程中的安全性与准确性。在复杂电磁环境下,通过自适应跳频、扩频等抗干扰手段,跳频速率可达每秒数千次,扩频增益超过20分贝,能有效规避敌方电子干扰,维持数据链路的畅通。数据传输速率可达每秒数百兆比特甚至更高,能够快速传输雷达探测的海量数据,涵盖目标的距离、方位、速度、雷达反射截面积等关键信息,同时支持多节点并发传输,使战斗机与无人机基于共享数据实时调整作战策略,实现高效协同。

3.2 雷达频段的精准协调管理

为避免战斗机与无人机雷达在工作时相互干扰,外军着力于雷达频段的协调。一方面,对现有雷达频段进行精细划分与分配,建立动态频段分配数据库,实时更新各平台雷达工作频段占用情况。例如,在特定作战场景下,规定战斗机雷达主要工作在X频段8-12GHz的特定子频段,该频段

波束窄、精度高,负责对远距离、高威胁目标的探测与跟踪;无人机雷达则工作在Ku频段12-18GHz的部分子频段,该频段穿透性较强,侧重于对中近距离、小型目标的侦察^[4]。另一方面,开发智能变频技术,集成多频段收发组件,使雷达能依据战场电磁环境变化自动调整工作频段,切换响应时间控制在毫秒级。当检测到某一频段存在较强干扰时,雷达迅速切换至备用频段,备用频段数量可达10个以上,保障探测任务的持续进行,确保两者在协同作战中充分发挥各自雷达性能优势,提升整体探测效能。

3.3 任务规划的协同适配设计

外军在构建战斗机与无人机协同作战体系时,精心设计任务规划的协同适配机制,依托专用的协同任务规划系统实现雷达资源的动态调度。在对空打击行动规划中,考虑到战斗机雷达探测精度高、无人机雷达可长时间大范围搜索的特点,规划无人机利用其雷达先行对大面积空域进行广域搜索,搜索扇面可覆盖360度全向范围,扫描更新周期不超过10秒,将初步探测到的目标信息快速传递给战斗机。战斗机再凭借自身雷达对重点目标进行精准定位与跟踪,跟踪精度可达0.1度以内,引导武器实施打击,同时可向无人机下达二次侦察指令,确认目标状态变化。在对陆、对海打击任务规划方面,无人机雷达可在低空或远距离对目标区域进行成像侦察,成像分辨率可达0.5米级,获取目标分布、地形地貌等信息,为战斗机制定精确打击航线与选择合适武器提供依据,通过紧密协同的任务规划,实现作战效能最大化。

3.4 硬件软件的深度集成融合

为实现战斗机与无人机雷达协同工作,外军积极推进硬件与软件的深度融合。硬件上,采用模块化、标准化设计理念,雷达核心组件如T/R模块、信号处理器等均遵循军用标准接口规范,使战斗机与无人机的雷达组件具备一定通用性与互换性。例如,部分外军研发的紧凑型雷达模块,重量控制在50公斤以内,功耗低于300瓦,既能安装在战斗机上,经适当调整也可适配无人机平台,降低后勤保障难度,同时支持热插拔更换,维护时间缩短至小时级^[5]。软件层面,开发统一的雷达控制与数据处理软件架构,采用分布式计算框架,可根据任务需求动态分配计算资源。通过该架构,战斗机与无人机的雷达可共享数据处理算法与控制指令集,算法库包含数十种目标识别与跟踪算法,实现对雷达工作模式、参数设置等的统一管理与协同控制,极大提升了两者在协同

作战中的互操作性与整体作战效能。

4 结语

外军在先进战斗机与无人机雷达领域的发展脉络清晰可见,从战斗机雷达的性能强化、体制革新到无人机雷达的技术进阶、功能拓展,再到两者协同体系的构建,形成了完整的技术发展链条。各项技术的突破与应用,推动着空战感知能力不断提升,为复杂环境下的作战行动提供了坚实支撑。这些发展成果既体现了技术迭代的必然趋势,也为后续相关领域的探索与实践奠定了重要基础,持续影响着空中作战体系的演进方向。

参考文献:

[1] 高环,马方晨,冯理成.外军地面无人装备发展现状

与趋势研究[J].现代导航,2022,13(04):292-296+302.

[2] 朱虹,戴钰超.2022 年外军指挥控制领域发展综述[J].中国电子科学研究院学报,2023,18(02):113-118.

[3] 魏艳艳.2022 年外军定位导航与授时领域发展综述[J].中国电子科学研究院学报,2023,18(03):264-269.

[4] 司炳山,董志明.外军无人系统自主行为决策技术发展研究[J].舰船电子工程,2022,42(12):8-11+52.

[5] 张瑞.外军无人平台射频对抗技术发展趋势研究[J].电子质量,2022,(08):210-213.

作者简介: 邹冉(1992—),男,汉族,安徽省蚌埠市,工程师,硕士研究生,就职于中国电子科技集团公司第十四研究所,研究方向:科研项目管理。