

# 机载雷达多模式融合技术及其在飞行监控中的应用

刘骏源 刘 涛

中航工业陕飞公司 陕西 汉中 723000

**摘 要:** 本文聚焦于机载雷达多模式融合技术及其在飞行监控领域的应用。首先阐述了机载雷达多模式融合技术的基本概念与原理,分析了其相较于传统单一模式雷达的优势。接着详细探讨了多模式融合技术中涉及的关键算法与技术手段,包括信号处理、数据融合算法等。剖析了该技术在飞行监控中的多种应用场景,如目标检测与跟踪、气象探测、地形跟随与避障等。同时,也讨论了当前技术面临的挑战,如数据融合的复杂性、实时性要求等,并对未来发展趋势进行了展望,旨在为机载雷达多模式融合技术在飞行监控领域的进一步发展与应用提供理论参考与实践指导。

**关键词:** 机载雷达; 多模式融合技术; 飞行监控; 目标跟踪; 气象探测

## 1 引言

随着航空技术的飞速发展,飞行器的性能与任务复杂度不断提高,对飞行监控的精度、可靠性和全面性提出了更高要求。机载雷达作为飞行监控系统中的关键设备,承担着目标探测、环境感知等重要任务。传统的单一模式机载雷达在面对复杂多变的飞行环境时,往往存在局限性,难以满足现代飞行监控的需求。机载雷达多模式融合技术的出现,为解决这一问题提供了有效途径。该技术通过整合多种不同工作模式的雷达信息,充分发挥各模式的优势,实现优势互补,从而显著提升机载雷达在飞行监控中的性能,为飞行安全与高效运行提供有力保障。

## 2 机载雷达多模式融合技术概述

### 2.1 基本概念与原理

机载雷达多模式融合技术是指将机载雷达在不同工作模式下获取的目标信息、环境信息等进行综合处理与分析的技术。机载雷达通常具备多种工作模式,如搜索模式、跟踪模式、气象模式、地形测绘模式等。每种模式针对特定的探测任务进行优化,具有不同的信号波形、工作频率、波束指向等参数设置。多模式融合技术的核心在于,通过先进的信号处理算法和数据融合算法,将来自不同模式的数据进行关联、匹配、整合,从而获得比单一模式更准确、更全面、更可靠的信息。

### 2.2 相较于单一模式雷达的优势

(1) 提高目标检测概率: 单一模式雷达可能因目标特性(如雷达散射截面积小、多径效应等)或环境干扰(如杂波、噪声)而漏检目标。多模式融合技术结合多种模式的探测结果,利用不同模式对目标的敏感特性差异,能够有效提高目标检测概率,降低漏检率。

(2) 增强目标跟踪精度: 在目标跟踪过程中,不同

模式雷达可以提供目标的不同特征信息,如位置、速度、加速度、尺寸等<sup>[1]</sup>。多模式融合技术将这些信息进行融合处理,可以更精确地估计目标状态,提高跟踪精度和稳定性,减少跟踪误差和目标丢失的可能性。

(3) 提升环境感知能力: 单一模式雷达在面对复杂环境时,如恶劣气象条件、复杂地形等,其探测能力可能受到限制。多模式融合技术通过整合气象模式和地形测绘模式等信息,能够更全面地感知飞行环境,为飞行员提供更准确的环境态势信息,有助于提前做出决策,避免潜在危险。

(4) 适应多样化任务需求: 现代飞行任务日益多样化,包括军事侦察、民用运输、航空测绘等。不同任务对雷达功能的要求各异,多模式融合技术可以根据具体任务需求灵活切换和融合不同模式,使机载雷达具备更强的任务适应性和通用性。

## 3 机载雷达多模式融合的关键技术

### 3.1 信号处理技术

(1) 多模式信号预处理: 不同模式的雷达信号在频率、带宽、调制方式等方面存在差异,因此在进行融合处理之前,需要对各模式信号进行预处理,以统一信号格式,便于后续处理。预处理过程包括滤波、去噪、增益控制、时频分析等操作,旨在提高信号质量,提取有效特征。

(2) 特征提取与选择: 从预处理后的信号中提取能够表征目标或环境特性的特征是关键环节。对于目标探测,特征可能包括目标的距离、方位、多普勒频率、幅度等;对于气象探测,特征可能涉及回波强度、频谱宽度等。通过特征选择算法,筛选出最具代表性和区分度的特征,降低数据维度,提高融合处理效率。

### 3.2 数据融合算法

(1) 数据关联算法: 数据关联是多模式融合的基础, 其目的是将不同模式探测到的目标或信息进行匹配, 确定它们是否对应同一实体。常见的数据关联算法包括最近邻算法(NN)、概率数据关联算法(PDA)、联合概率数据关联算法(JPDA)等。这些算法根据目标状态估计、测量误差等信息, 计算不同测量数据之间的关联概率, 实现数据的有效关联。

(2) 状态估计与融合算法: 在完成数据关联后, 需要利用关联后的数据对目标状态进行估计和融合。常用的状态估计方法有卡尔曼滤波(KF)及其扩展算法, 如扩展卡尔曼滤波(EKF)、无迹卡尔曼滤波(UKF)等。这些算法通过建立目标状态方程和测量方程, 对目标状态进行递推估计。在多模式融合中, 可以采用集中式融合、分布式融合或混合式融合架构, 将各模式的状态估计结果进行融合, 得到更准确的目标状态信息。

(3) 决策级融合算法: 决策级融合是在更高层次上对各模式处理结果进行综合判断。它根据不同模式的决策结果(如目标类型判断、威胁评估等), 结合一定的决策规则, 做出最终的决策。常见的决策级融合方法包括贝叶斯推理、D-S证据理论、模糊逻辑等<sup>[2]</sup>。这些方法能够综合考虑各模式的可靠性和不确定性, 提高决策的准确性和鲁棒性。

#### 4 机载雷达多模式融合技术在飞行监控中的应用场景

##### 4.1 目标检测与跟踪

(1) 空中目标探测: 在军事航空领域, 机载雷达多模式融合技术对于探测空中目标至关重要。通过融合搜索模式和跟踪模式的数据, 搜索模式提供大范围的搜索能力, 快速发现潜在目标; 跟踪模式则对已发现的目标进行高精度跟踪。例如, 在复杂电子对抗环境下, 单一模式雷达可能受到干扰, 而多模式融合技术可以利用不同模式雷达的抗干扰特性, 提高目标检测的可靠性和跟踪的稳定性, 为作战决策提供准确的目标信息。

(2) 地面目标识别: 在民用航空和军事侦察中, 对地面目标的识别需求日益增加。机载雷达结合地形测绘模式和合成孔径雷达(SAR)模式等多模式信息, 可以获取地面目标的高分辨率图像和地形地貌信息。通过数据融合技术, 对这些信息进行综合分析, 能够更准确地识别地面目标类型, 如建筑物、车辆、桥梁等, 为航空测绘、军事侦察和救援行动提供有力支持。

##### 4.2 气象探测

(1) 恶劣气象预警: 气象条件对飞行安全影响巨大, 准确的气象探测能够为飞行员提供及时的预警信息。机载雷达的气象模式可以探测前方的降水、湍流、

冰晶等气象现象。多模式融合技术将气象模式数据与其他模式(如搜索模式)数据进行融合, 可以更全面地了解气象环境与周围空域目标的关系。例如, 在探测到前方有强降水区域时, 结合搜索模式数据可以判断该区域是否存在其他飞行器, 从而为飞行员提供更准确的避让建议, 提高飞行安全性。

(2) 微下击暴流等危险气象现象探测: 微下击暴流是一种极具危险性的气象现象, 对飞行安全构成严重威胁。机载雷达多模式融合技术通过整合气象模式、多普勒模式等信息, 能够更精确地探测微下击暴流的位置、强度和发展趋势。多普勒模式可以提供气象回波的速度信息, 结合气象模式的强度信息, 通过数据融合算法可以更准确地识别微下击暴流特征, 为飞行员提供足够的预警时间, 采取有效措施避免进入危险区域。

##### 4.3 地形跟随与避障

(1) 低空飞行地形跟随: 在低空飞行任务中, 如地对地攻击、航空测绘等, 机载雷达需要实时感知地形信息, 实现地形跟随飞行, 确保飞行安全。地形测绘模式可以获取高精度的地形数据, 而搜索模式可以探测前方障碍物。多模式融合技术将这两种模式的数据进行融合, 构建更准确的三维地形模型和障碍物分布图<sup>[3]</sup>。通过实时更新这些信息, 飞行控制系统可以根据地形和障碍物情况自动调整飞行高度和航向, 实现安全、高效的地形跟随飞行。

(2) 障碍物避让: 在飞行过程中, 可能会遇到各种突发障碍物, 如山峰、建筑物、鸟类群等。机载雷达多模式融合技术通过综合利用不同模式的探测信息, 能够快速、准确地检测到障碍物, 并估计其位置、速度和尺寸。结合飞行器的飞行状态信息, 通过决策算法及时发出避障指令, 指导飞行器采取机动动作避开障碍物, 保障飞行安全。

#### 5 案例分析

以F-35战斗机搭载的AN/APG-81雷达为例, 其多模式融合技术通过动态重构雷达工作模式, 实现了从目标搜索到精确制导的全流程无缝衔接。在作战初期, 雷达采用稀疏阵列技术优化天线孔径效率, 在60rpm转速下实现 $\pm 60^\circ$ 空域的快速扫描。与传统机械扫描雷达相比, 该技术通过子阵级波束合成将扫描效率提升3倍, 同时利用数字波束形成(DBF)技术将发射能量集中于目标方向, 使雷达在强杂波背景下仍能保持90%以上的目标发现概率。

当目标进入跟踪阶段后, 雷达系统自动切换至窄波束高精度跟踪模式。此时, AESA天线通过相位加权形成

笔形波束,测角精度达到 $0.1^\circ$ ,测距误差小于1m。为进一步提升目标识别能力,系统引入极化特征提取算法,通过分析HH、HV、VH、VV四种极化通道的散射特性差异,构建目标电磁散射特征库。实验数据显示,该技术对战斗机、轰炸机及巡航导弹的识别正确率高达98%,较传统基于RCS测量的方法提升40%。

在导弹制导阶段,雷达切换至连续波照射模式,通过抗主瓣干扰技术在强电磁干扰环境下维持制导链路稳定。该技术通过自适应零陷形成算法,在干扰方向图上生成深度达60dB的零陷,同时利用多普勒滤波器组抑制虚假目标。实战验证表明,APG-81雷达在160km距离上仍能为AIM-120导弹提供精确的照射信号,且制导精度较传统雷达提升2倍,使导弹圆概率误差(CEP)压缩至3m以内。

## 6 当前技术面临的挑战

### 6.1 数据融合的复杂性

机载雷达多模式融合涉及多种不同类型的数据,包括来自不同传感器、不同工作模式的数据。这些数据在格式、精度、时间同步等方面存在差异,数据融合过程需要考虑众多因素,如数据关联的准确性、不同模式数据的权重分配等,导致数据融合算法复杂度较高,实现难度较大。

### 6.2 实时性要求

飞行监控对实时性要求极高,机载雷达多模式融合系统需要在短时间内完成大量数据的处理、分析和融合,并及时将结果反馈给飞行控制系统。然而,复杂的数据融合算法和大量的计算任务可能导致系统延迟,无法满足实时性要求,从而影响飞行监控的效果和飞行安全。

### 6.3 传感器可靠性与故障处理

机载雷达作为飞行监控的关键设备,其可靠性至关重要。在多模式融合系统中,多个传感器同时工作,任何一个传感器出现故障都可能影响整个系统的性能<sup>[4]</sup>。因此,需要有效的传感器故障检测、诊断和容错处理机制,以确保在部分传感器故障时,系统仍能正常工作并提供可靠的信息。

### 6.4 算法适应性与可扩展性

随着飞行任务的不断变化和雷达技术的不断发展,机载雷达多模式融合算法需要具备良好的适应性和可扩展性。能够适应不同的飞行环境、目标特性和任务需求,并且方便集成新的传感器模式和算法,以满足未来飞行监控的更高要求。

## 7 未来发展趋势展望

### 7.1 智能化融合技术

随着人工智能技术的快速发展,将人工智能算法应用于机载雷达多模式融合技术是未来的重要发展方向。例如,利用深度学习算法进行数据关联、目标识别和状态估计,通过大量的数据训练,使系统能够自动学习和适应复杂的飞行环境和目标特性,提高融合处理的准确性和效率。

### 7.2 多传感器深度融合

未来机载雷达将与其他机载传感器(如红外传感器、激光雷达、电子战传感器等)进行更深入的融合,形成多传感器综合感知系统。通过整合多种传感器的信息,充分发挥各传感器的优势,实现全方位、多层次的环境感知和目标探测,进一步提升飞行监控的能力。

### 7.3 网络化融合与协同探测

随着航空网络技术的发展,机载雷达多模式融合技术将向网络化方向发展。通过机间数据链和地空数据链,实现多架飞行器之间的信息共享和协同探测。不同飞行器上的机载雷达可以相互补充探测范围和信

## 结语

机载雷达多模式融合技术作为一项具有重要意义的创新技术,在飞行监控领域展现出了巨大的应用潜力和优势。通过整合多种不同工作模式的雷达信息,该技术显著提高了目标检测概率、跟踪精度和环境感知能力,有效提升了飞行安全性和效率。然而,我们也应清醒地认识到,当前机载雷达多模式融合技术仍面临诸多挑战,如数据融合的复杂性、实时性要求等。未来,随着智能化技术、多传感器融合技术、网络化技术等的不断发展,机载雷达多模式融合技术将不断创新和完善,朝着智能化、深度融合、网络化协同等方向发展。

## 参考文献

- [1]蔡育炜.基于飞机编队的机载雷达多目标跟踪方法研究[D].哈尔滨工业大学,2023.
- [2]殷浩然.基于多雷达探测的飞机尾涡识别研究[D].中国民用航空飞行学院,2022.
- [3]刘赣,田应伟,文必洋,等.单站高频雷达飞机目标探测的相关研究[J/OL].太赫兹科学与电子信息学报,1-7[2025-04-27].
- [4]魏志强,吕振海.基于激光雷达探测的飞机尾流融合预测方法[J].激光与红外,2024,54(03):355-363.