

# 低空无人机侦测与反制一体化系统中的干扰资源动态分配策略研究

孙永茂

中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051

DOI:10.61369/ME.2026060016

**摘 要 :** 低空无人机侦测与反制一体化系统, 是一条集成多种先进技术的综合性防御系统, 旨在探测、识别、跟踪并有效处置非法入侵、具有潜在威胁的无人机, 以保护特定空域及地面目标的安全。而干扰资源的动态分配, 则是无人机侦测反制系统效能提升、作用发挥的关键, 既需要依托侦测反制的技术原理以及动态多变的外部环境进行资源调整, 又需要结合无人机技术类型、附带损害风险及处置选择困境等进行技术优化, 从而让干扰资源动态分配方案更具实效性。文章结合低空无人机侦测与反制一体化系统中干扰资源动态分配的原理、问题, 提出科学合理的应对策略。

**关 键 词 :** 低空无人机; 侦测与反制一体化系统; 干扰资源; 动态分配; 策略

## Research on Dynamic Allocation Strategy of Jamming Resources in Integrated Low-Altitude UAV Detection and Countermeasure System

Sun Yongmao

The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051

**Abstract :** The integrated low-altitude UAV detection and countermeasure system is a comprehensive defense system integrating multiple advanced technologies, aiming to detect, identify, track and effectively deal with illegally intruding and potentially threatening UAVs, so as to protect the security of specific airspace and ground targets. The dynamic allocation of jamming resources is the key to improving the effectiveness and performance of the UAV detection and countermeasure system. It not only needs to adjust resources based on the technical principles of detection and countermeasure as well as the dynamically changing external environment, but also needs to carry out technical optimization in combination with UAV technology types, collateral damage risks and disposal selection dilemmas, so as to make the dynamic allocation scheme of jamming resources more effective. This paper proposes scientific and reasonable countermeasures based on the principles and problems of dynamic allocation of jamming resources in the integrated low-altitude UAV detection and countermeasure system.

**Keywords :** low-altitude UAV; integrated detection and countermeasure system; jamming resources; dynamic allocation; strategy

### 引言

近些年, 无人机产业蓬勃发展, 广泛应用于物流配送、农林植保、地理测绘等多个场景中, 发挥出巨大的价值。随着无人机市场规模的攀升, 无人机产业作为低空经济的重要组成部分, 极大地推动了低空经济的发展<sup>[1]</sup>。然而, 无人机技术的快速普及与应用也带来了一系列挑战。部分未经授权的无人机频繁闯入机场净空区、军事管理区等敏感区域, 严重威胁航空、公共及国家安全。制定低空无人机侦测反制一体化系统并优化干扰资源的动态分配策略, 有利于提升低空无人机侦测与反制效果, 提高低空安全防护质量, 为我国社会经济、治理及科技发展提供必要的支撑。

### 一、低空无人机侦测与反制一体化系统中干扰资源动态分配基础

#### (一) 侦测与反制系统搭建及信息交互逻辑

现阶段落地投入应用的低空无人机侦测反制一体化系统, 大

多搭建起涵盖目标捕获探测、多元数据处理、目标威胁评估、干扰资源调度决策、反制指令执行及干扰压制成效回传的作业运行机制, 以实现干扰资源的动态分配及有效调控。目标侦测端集成X波段脉冲多普勒雷达、宽带射频侦测阵列及光电跟踪伺服转台等传感硬件, 实时采集低空空域飞行目标的原始数据<sup>[2]</sup>。多元数

作者信息: 孙永茂 (1989-), 男, 汉族, 河北石家庄人, 工程师, 主要研究方向: 微波射频电路。

据处理模块则依托卡尔曼滤波算法实现多传感器数据的时空配准校正，再借助联合概率数据关联算法实现多目标航迹匹配运算，同步滤除环境杂波带来的目标点迹。威胁评估模块则针对无人机威胁程度，针对性抵消观测数据中的随机噪声干扰。干扰资源调度决策模块，则依托智能优化求解算法实现干扰通道、发射功率等级、干扰波形的自适应匹配配置。执行单元接收调度模块的控制指令，向外输出射频压制、导航信号欺骗等反制信号。此外，效果反馈模块能够根据反制状态，自主启动新一轮的资源重配流程，实现对目标的再次反制。

### （二）干扰资源类别划分及工程部署约束条件

结合低空侦测反制一体化系统的布设工况，我们可以按照电磁信号的作用机理，将干扰划分为全球卫星导航系统类干扰、GNSS导航欺骗类干扰、无人机遥控上行通信链路压制、航拍图像下行传输链路压制、飞行器飞控通信协议劫持干扰等。但无论哪种干扰资源，均遵循以下约束条件。首先是频谱合规管控。设备对外发射电磁信号的工作频段，不得侵占民航测距仪 DME 频段、机场塔台 VHF 甚高频指挥调度频段及民用移动通信频段范围。其次，硬件发射能力。单台干扰设备的射频通道相互独立，难以实现跨目标复用，整机对外发射总功率存在上限，运行过程中不允许超出额定阈值<sup>[3]</sup>。最后，空间电磁兼容约束。多台设备同步工作时，设备间必须达到规范规定的电磁兼容指标，高灵敏度侦测传感器还需配备波束零陷抑制方案，防止设备自扰带来的侦测功能失效现象。此外是系统时延响应。从系统完成目标识别确认，到干扰配置参数下发至射频发射终端，全流程总处理延迟不得超过 300ms 限值。

### （三）动态干扰资源分配的基础数学建模

围绕干扰资源动态分配这一目标搭建标准化优化模型。即选取任意运行时刻  $t$ ，将所有威胁无人机整合为目标集合  $T=\{T_1, T_2, \dots, T_i\}$ 。系统可调用的干扰资源构成集合  $R=\{R_1, R_2, \dots, R_j\}$ 。设备干扰波形组成波形集合  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ 。设置二元决策变量  $x_{ijk} \in \{0, 1\}$ ，变量取值为 1 时，代表将第  $j$  台干扰设备的第  $k$  路射频通道分配至第  $i$  个入侵目标；变量取值为 0 时，则代表该路射频通道不会针对目标发射干扰信号<sup>[4]</sup>。同时，模型选取三项核心指标构建优化求解目标函数，即提升对低空无人机的干扰压制效果，降低干扰信号对周边电磁设备的附带干扰，减少反制设备连续运行产生的能耗。此外，模型约束条件完整覆盖射频通道独占使用规则、设备发射功率上限及频谱合规使用规范等限制条件，能够帮助人们构建出多维度、多约束的 NP-hard 组合优化数学模型，为后续算法迭代、资源调度策略设计提供支撑。

## 二、低空无人机侦测与反制一体化系统中干扰资源动态分配问题

### （一）多约束协同优化引发计算规模爆炸，求解实时性难以达标

各类干扰设备动态分配调度的数学模型，本质归属于二维匹配类组合优化范畴。系统可选可行调度方案总数会随来袭目标

数量、可用干扰通道规模同步上升，整体增长趋势呈指数级放大<sup>[5]</sup>。当目标数目  $I$  不低于 8 时，同步启动的干扰单元数量  $J$  达到 4 及以上时，该优化模型完整解空间体量将突破  $10^{15}$  量级。依靠传统穷举算法以及通用线性规划求解工具运算速度优先，难以满足毫秒级决策的硬性要求。与此同时，模型叠加单通道资源独占、空域隔离管控、频段禁用区间等约束条件后，原本连通的可行解集会被切分为大量互不连通、零散分布的离散子空间。当前广泛应用的通用智能寻优算法并未结合低空防御作战的约束条件实现针对性改造，算法迭代寻优环节经常出现收敛速度缓慢、最优解搜寻偏离有效可行域等短板，难以满足实践场景对决策响应延迟的要求。

### （二）多维度目标威胁量化划分边界模糊、评估体系存在固有偏差

实现干扰资源差异化分配的基础，是精准区分各无人机目标的威胁程度。传统威胁评估仅依靠探测环节采集目标的飞行距离、移动速度等表层参数完成等级划分，并未纳入载荷任务载荷类型、行动情景及飞行器抗干扰耐受能力等影响因素。多数评估指标难以借助探测传感器直接输出精准量化数据，数据采集过程持续伴随随机观测噪声及设备测量偏差。传统层次分析法采用规定权重打分机制，其遵循的误差浮动范围较小，极易出现目标危险等级误判的现象。而威胁分级出现偏差会导致干扰资源分配失衡，即高风险目标分配的干扰信道、发射功率储备不足，低风险无人机反而占用大量稀缺电子对抗资源，进而导致低空无人机侦测反制成效不高。

### （三）静态单向资源调配缺少闭环修正机制，动态对抗中压制效果衰减

主流干扰资源分配策略均属于静态单向规划框架，尚未构建基于反馈修正调度参数的调控逻辑。现阶段，量产工业无人机、FPV 突击无人机普遍集成调频扩频通信、惯性导航、视觉自主规避等抗干扰模块，若全程沿用固定干扰波形、恒定发射功率参数开展反制，电磁干扰效果会明显下降。在多次目标连续突防、单目标威胁程度剧变、多类电磁对抗场景同步耦合的复杂条件下，现有的调度策略缺少分级处置逻辑及资源动态重组机制，容易出现多条调度指令相互冲突、干扰功率无效损耗、目标拦截失效等问题，严重影响侦测反制一体化系统的价值彰显及功能发挥。

## 三、低空无人机侦测与反制一体化系统中干扰资源动态分配策略

### （一）融合模糊贝叶斯修正机制的多维度威胁量化评估模型

当前主流威胁度计算模型难以处理空域中各类不确定扰动因素，模型自身的容错能力与抗干扰性能存在短板。为此，我们需要构建一套融合多维度特征参数的模糊贝叶斯威胁量化评估分析框架。研究筛选五项能直观体现来袭目标危险程度的评价指标，分别为目标距离防护区域的直线间距、目标径向逼近速率、瞬时飞行海拔、无人机机型类别及机身挂载的外挂负荷等。随后针对

各项指标构建统一标准化特征映射函数，依托层次分析法完成各指标初始权重的赋值，同步配套一致性检验环节，避免权重分配失衡导致评估结果出现偏差。对于载荷类型、入侵意图等难以依靠传感器识别、量化的模糊特征，需采用模糊推理算法完成指标模糊化转换，再借助贝叶斯概率迭代更新思路，动态调整各维度的威胁权重，从而缓解传感器测量误差、目标特征信息缺失等外部干扰给评估结果带来的数值偏移。模型最终输出归一化威胁量化数值（ $\omega_i$ ），数值取值范围固定为 [0,1]，结合区间范围划定三级风险判定标准。即当  $\omega_i > 0.7$  时判定为高威胁目标；当  $0.3 \leq \omega_i \leq 0.7$  时，判定目标为中等威胁；当  $\omega_i < 0.3$  时，统一归类为低威胁目标，而该分级结果可直接作为干扰资源分配优先级的判定依据，提高侦测反制一体化系统的应用效能。

### （二）引入电磁兼容约束条件的自适应并行遗传算法

如果将传统并行遗传算法应用于低空无人机侦测反制一体化系统中，会出现电磁约束匹配度不足、最优解求解精度偏低、迭代收敛速度缓慢等现实问题。为此，我们以标准并行遗传算法为基础，结合低空反制场景设计可自适应调整约束条件的遗传运算方案，实现多重电磁限制条件下最优干预分配方案的快速求解。首先，自定义染色体编码结构并增设约束前置初始化规则。构建由目标编号、干扰通道序列号、干扰工作模式、实时发射功率档位四项参数组成的染色体编码结构。种群初始化环节直接嵌入频谱禁用频段、设备最大发射功率、通道独占使用规范等硬性约束。其次，对遗传算子进行自适应重构优化。设计能跟随迭代轮次、种群内违规个体占比自动调整的交叉、变异概率参数。迭代前期适当放大两项参数取值，拓宽全局侦测覆盖范围。迭代后期下调参数数值，聚焦局部空间完成精细化寻优。新增电磁兼容约束修正算子，针对迭代过程中出现频谱重叠挤占、发射功率超限、多设备通道抢占冲突的个体完成参数修正，相较于传统仅通过惩罚系数约束违规个体的处理方式，能有效提升最优分配方案在种群中的生成比例。最后搭建环形孤岛并行进化架构。选用环形拓扑搭建孤岛并行进化系统，各子种群独立完成迭代运算，按照固定周期交换种群内部最优个体，同时兼顾全局大范围侦测与局部巡游两类需求。搭配精英个体留存策略，避免迭代过程中已

获得的最优分配方案丢失，算法性能衰退，确保全迭代周期内算法运行稳定。

### （三）基于动态权重势博弈的分布式协同资源分配模型

集中式资源调度算法运行过程高度依赖中心控制节点，中心设备一旦出现单点故障，调度体系便会陷入瘫痪。多节点间海量数据交互极易造成通信信道拥堵。为此，我们需要搭建分布式势博弈协同调度框架，适配多台干扰发射设备阵列协同作业的调度需求。一方面将单台干扰发射设备作为博弈参与主体，重新设计改进型势函数，函数内部嵌入可动态更新的目标威胁权重、电磁附带损伤惩罚项、干扰硬件资源占用约束三类变量，摒弃传统博弈模型势函数权重恒定不变的设计思路。完整数学推导结果证明，本文优化后的势函数具备最佳响应收敛性，算法迭代流程能稳定收敛至纯策略纳什均衡状态，解决原有博弈模型收敛曲线震荡、威胁优先级匹配效果不佳等缺陷。另一方面，整体调度流程无需中心节点统一下发控制指令。各干扰设备仅依靠自身采集数据、周边设备资源占用状态、当前干扰压制效果反馈三类信息，持续迭代优化调度策略。整体流程仅需完成 10-15 轮轻量化广播交互迭代，多台设备便可形成全域协同调度统一方案，有效降低设备间数据传输时延，从底层架构维度，规避单点失效引发调度体系崩溃的风险。此外，配套设计自适应空域零陷调控机制。针对民航通信频段、公共移动通信网络等需重点防护的传输方位，自适应生成波束零深不低于 30dB 的信号抑制区域，从信号发射层减少干扰设备引发的额外电磁附带损伤。

## 四、结语

“黑飞”无人机是影响公共安全、国家安全以及社会治理的新挑战，低空无人机侦测与反制一体化系统的建设能有效应对动态场景下、多技术形态的无人机“黑飞”困境，及时响应、快速反制、有效降低无人机黑飞所带来的各类风险，而在干扰资源的动态配置下，又能充分应对各类环境挑战，提高无人机反制效能。随着时代发展，相信越来越多技术将融入无人机侦测反制一体化系统中，成为干扰资源动态分配的有力支撑。

## 参考文献

- [1] 金海佳, 袁伟杰, 伍军. GNSS 拒止下低空无人机导航与资源分配优化 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32 (2): 36-42.
- [2] 易晓俊, 杜翠凤, 张欢. 面向低空无人机通信感知场景的基站动态波束赋形方法研究 [J]. 广东通信技术, 2026, 46 (3): 50-56.
- [3] 夏昊, 林粤伟, 颜军, 等. 通信感知一体化低空无人机关键技术研究综述 [J]. 电讯技术, 2025, 65 (6): 838-847.
- [4] 赵川斌, 张腾宇, 冯源, 等. 面向低空无人机的通感一体化关键技术及原型验证研究 [J]. 物联网学报, 2025, 9 (2): 27-38.
- [5] 王明波. 低空无人机组网的 5G 通信算法优化 [J]. 中国宽带, 2023, 19 (11): 115-117.