

无人机集群作战中的电子对抗技术应用与防御策略研究

刘鑫磊¹ 王捷²

1.中国人民解放军 61769 部队 山西 吕梁 032100

2.陆军航空兵学院 北京 101116

【摘要】：无人机集群作为信息化与智能化战争时代的重要作战力量，其协同能力、信息传递效率及目标打击精度均远超传统单机作战模式。然而，其对通信链路、导航系统及感知网络的高度依赖，使其在高强度对抗环境中极易受到电子对抗手段的干扰。电子压制、电子防护与电子支援等综合技术已成为影响集群作战效果的关键变量。本文基于无人机集群作战体系结构与电子对抗原理，分析集群在复杂电磁环境中的脆弱环节与易受干扰点，并探讨电子干扰、诱骗、压制与反制技术在集群作战中的具体应用。此外，本文还以系统性视角构建集群防御策略框架，包括抗干扰通信架构构建、自适应导航体系部署、频谱管理策略优化及智能协同抗毁决策机制设计。研究结果显示，电子对抗技术的有效嵌入不仅能破坏敌方集群作战链路，还能提升己方集群的生存能力与任务完成度，对未来无人化智能作战体系构建具有重要参考价值。

【关键词】：无人机集群；电子对抗；电磁压制；抗干扰通信；作战防御策略

DOI:10.12417/3083-5526.25.04.019

引言

近年来，随着人工智能、无线通信、智能控制、大数据技术的不断融合，无人机集群在军事领域的应用范围与作战价值不断提升。集群作战以多平台自主协作、分布式感知与智能化控制为核心，能够在侦察、打击、封锁、预警与战场支援等任务中发挥高效优势。然而，集群体系的运行高度依赖通信链路、导航系统、数据融合模块与集群控制算法，使其不可避免地成为电子对抗的重点攻击对象。面对现代战争中日益复杂的电磁环境敌情，无人机集群的通信中断、导航欺骗、数据链路压制与传感器干扰均可能导致群体行为失控甚至整体作战任务失败。因此，系统分析集群作战中电子对抗技术的作用机制、攻击方式、脆弱环节，以及在此基础上提出集群防御体系，是构建安全、可靠、高效无人作战系统的关键。本文围绕“干扰—破坏”“压制—反制”“欺骗—抗欺骗”三条逻辑链展开，提出无人机集群电子对抗技术应用模型与防御策略体系，旨在为未来智能作战力量建设提供理论与技术参考。

1 无人机集群作战体系与电子对抗面临的关键挑战

1.1 集群作战体系的结构依赖与脆弱性分析

无人机集群依靠多智能体感知、决策、执行体系协作运行，其结构通常包括集群控制中枢、通信链路、定位导航模块、传感器网络及任务调度机制。高度网络化使集群具备良好的灵活性与扩展性，但其依赖无线电、卫星导航、视觉传感器及数据链路的特点也使其暴露于电磁威胁之下。当通信链路遭受干扰时，集群节点间的协同机会被破坏；当导航系统受到欺骗时，集群轨迹将发生偏移；当传感器被压制时，目标识别精度将显著下降。因此，其作战能力高度依赖电磁环境的稳定与通信链路的安全。

1.2 复杂电磁环境下的集群通信与导航瓶颈

在高强度电子压制条件下，集群所依赖的无线电通信带宽受到挤压，节点间的信息交换将严重滞后。此外，集群往往使用卫星导航或地基信号进行定位，而这些信号极易受到干扰器、诱骗发射源或地面反射信号的影响。集群通信协议通常基于网状拓扑结构，一旦部分节点失效，可能迅速导致全网性能下降。因此，在电子对抗背景下，通信拥塞、链路断裂、延迟增加与节点丢失是集群面临的重要瓶颈。

1.3 敌我博弈环境中的多目标干扰模式

现代电子战强调综合打击，即亚稳态干扰、欺骗压制、多源协同干扰与自适应干扰等方法并存。无人机集群面对的干扰类型包括宽带噪声压制、窄带自适应干扰、伪基站诱骗、假目标注入、脉冲式压制等。敌方往往会对不同链路实施不同形式干扰，如对导航链路进行欺骗，对数据链路实施压制，对传感器进行闪扰，使集群难以通过单一抗干扰手段实现有效防御。这种多维度、多频段、多模式的干扰模式提升了集群应对难度。

2 电子对抗在无人机集群作战中的应用机制

2.1 电子干扰技术在集群通信破坏中的具体作用

电子干扰技术主要通过高功率噪声信号、调制干扰波形或带宽占用方式压制集群的通信链路。宽带噪声干扰可造成集群整体通信质量下降，而窄带干扰会精准攻击关键频道，使集群信息分发网络出现瓶颈，进一步影响节点同步性。时间间断式干扰则可间歇性破坏链路稳定性，使集群难以识别干扰模式而无法采取有效避让策略。通信干扰的核心目标在于削弱集群协同能力，使其从“多机协作”退化为“单机分散行动”，大幅降低任务完成效率。

2.2 导航欺骗技术在集群控制链中的破坏方式

导航欺骗通常通过构造伪卫星信号、虚假地基信号或偏移

式导航数据,将集群定位系统引入误区,使其产生错误航迹。不同于简单干扰,导航欺骗具有隐蔽性强、扰动微小但结果严重的特点。集群在任务执行过程中若出现全体航迹偏移,将对协同行为空间结构、飞行姿态及区域覆盖产生系统性影响。由于集群定位常依赖共享导航数据,一个误导节点可能通过数据共享机制影响其他节点,形成“连锁式偏移”。

2.3 传感器压制与假目标注入在集群作战中的运用

传感器压制通过强光照射、激光闪扰、红外压制或雷达噪声,使无人机无法正确识别目标或环境。此外,假目标注入利用信号仿真技术构造虚假地物或敌方位置,使集群决策算法输出偏差。当假目标数量足够大时,集群的多源感知融合系统将难以区分真伪,从而导致集群整体行为出现严重偏差。

3 无人机集群的电子防护体系构建

3.1 抗干扰通信体系的优化路径

构建抗干扰通信体系是集群电子防护的重要基础。首先,应采用多频点跳频策略,使链路频率在短时间内快速切换,降低干扰信号对链路的锁定能力。其次,建立冗余通信链路,通过卫星通信、地基微波、中继无人机等多源链路并行,增强通信稳健性。此外,可采用智能频谱感知技术,使集群能在干扰环境中选择最优频段。最终,通过分布式通信协议优化节点间信息流,使集群在通信受限环境中仍能保持局部协同期望。

3.2 导航抗欺骗技术体系的防护机制

针对导航欺骗,需要建立多源融合定位体系,如将高精度视觉定位、惯性导航、地图匹配与北斗/GPS融合使用。多源融合能够使单一来源受到欺骗时集群仍能保持定位稳定。此外,应提升导航数据的加密等级,提高伪基站信号的识别精度,并通过信息滤波算法识别导航异常。当集群节点发现导航偏移时,可通过交换导航数据进行一致性校验,以避免误导信息扩散。

3.3 传感器防扰与自适应感知机制设计

为了抵御传感器干扰,应构建多模态感知系统,使集群依赖多个感知源实现冗余感知。自适应感知机制使集群能够自动识别传感器异常并切换至安全感知模式。此外,通过引入异常识别算法,可自动剔除假目标数据,使感知系统具备较高鲁棒性。未来还可通过强化学习方法提升传感器系统在干扰条件下的自主修正能力。

4 电子对抗情景下集群协同机制的保持

4.1 分布式自主协同在通信受限条件下的含义

当通信受限时,集群需从集中式控制转向分布式自治,使各节点在缺乏全局指令时仍能保持一定程度的协同行动。此时,局部行为规则、邻域感知、结构保持算法与基于目标区域的自适应分布策略将成为关键。通过节点间局部交换或单向信

息广播,可在通信低带宽条件下维持群体几何结构稳定。

4.2 任务调度体系在电子压制环境中的自修复能力

在电子压制环境中,通信链路的不稳定会引发信息延迟甚至丢失,直接影响任务协同与执行效率。为保障集群持续作战能力,系统需要具备完善的自修复机制,在信息不完整或节点失联的情况下实现自主调整。集群可基于当前可获取的数据,对局部路径进行重新规划,避免依赖失效链路,并根据任务重要性动态分配权重,使关键目标优先得到保障。节点角色调整机制能够根据剩余节点的功能状态和位置条件,重新分配侦察、通信或打击任务,维持整体结构稳定。优先级重排与区域覆盖重建相结合,使集群在能力受限时仍能保持必要的空间控制和信息获取能力。通过这些自修复策略的协同运作,集群能够在通信受损条件下保持基本战斗力和任务连续性,提升在复杂对抗环境中的韧性与可靠性。

4.3 集群智能决策系统的抗毁性能提升

智能决策系统在高对抗环境中必须具备可靠的抗毁能力,即使部分节点遭受干扰或被摧毁,整体系统仍能够维持基本运行和任务执行。通过引入图论方法构建集群拓扑鲁棒性增强模型,可以从结构层面提升系统的稳定性。冗余边连接为信息传输提供多条可选路径,降低关键节点失效带来的连锁影响。动态拓扑结构调整机制使集群能够根据节点状态变化重构连接关系,保持信息网络的连通性。节点角色替换策略则允许功能受限或损毁节点被快速替代,确保核心能力不中断。

5 无人机集群电子进攻与反制的协同体系构建

5.1 电子进攻体系的构建与作战协调

电子进攻的核心目标在于削弱或切断敌方信息链路,使其感知、通信与指挥能力受到持续干扰,从而导致集群运行失序甚至整体失控。无人机集群通过搭载多类型干扰与欺骗载荷,在空域中形成分布式电子进攻网络,能够以协同方式实施稠密干扰、精确压制与虚假信号注入等多样化作战手段。进攻体系强调多节点间的高度配合,通过精细的相位控制与功率调节,集中能量作用于关键频段与核心节点,提升干扰效果的稳定性与针对性。不同无人机根据位置与任务分工承担覆盖、补盲或重点压制角色,使进攻范围在空间和频谱维度上得到有效扩展。协同进攻模式不仅增强了对复杂目标的压制深度,也提高了系统在动态对抗环境中的持续作战能力,使电子进攻呈现出更强的体系化和智能化特征。

5.2 反制体系中的多层防御机制

反制体系的构建已不再局限于通信、导航和传感器等单一环节的被动防护,而是逐步发展为涵盖感知、决策与执行的综合防护机制。系统通过电磁规避技术降低暴露概率,并借助可重构通信协议在受扰环境中保持信息传输的连续性与可靠性。动态任务调度机制使各单元能够根据风险变化灵活调整角色

分工，避免关键节点在高威胁区域长期停留。智能行为调整能力则通过实时分析外部攻击特征，修正运动轨迹、通信方式和协同策略，使系统整体具备更强的适应性。多层防御结构在遭遇攻击时能够快速完成由规避到缓冲再到功能恢复的连续响应过程，降低单点失效带来的连锁影响。这种闭环式反制体系通过各防护层级的协同运作，提高了系统在复杂对抗环境中的稳定性与持续运行能力，为高强度电磁对抗条件下的安全执行任务提供坚实保障。

5.3 攻防一体化视角下的系统优化

未来无人机集群的电子战能力将由分散、单一的攻防功能，演进为高度协同的攻防一体化体系。依托统一的电磁资源管理平台，集群可对战场电磁环境进行持续感知与综合研判，形成清晰、动态的电子态势图谱。平台在此基础上对干扰资源进行集中调度与精细分配，使不同节点在合适时机承担探测、压制、防护或诱导等角色，避免资源浪费与能力冲突。抗干扰能力评估与策略推演被纳入同一决策链路，使集群能够根据对

手行为和环境变化进行快速自适应调整。进攻与防护能力在协同框架下相互支撑，既提升对目标系统的电磁压制效果，也增强自身在复杂电磁环境中的生存与持续作战能力。通过对多维电磁资源的统一规划与优化配置，无人机集群电子战将呈现出更高层次的智能化、体系化与整体效能。

结论

无人机集群作为未来战场中的重要智能作战力量，其协同作战体系在复杂电磁环境中不可避免地受到电子对抗威胁。本文从电子干扰、导航欺骗、传感器压制等角度深入分析了电子对抗技术对集群作战的影响机制，并构建了抗干扰通信体系、自适应导航防御体系、多模态感知防护体系及在受限电磁条件下集群协同能力保持的系统框架。研究表明，攻防一体化电子战体系的构建将成为未来集群作战体系增强关键。未来研究可进一步从人工智能驱动自演化集群防护体系、多场景异构集群协同抗毁机制等角度展开，以实现更高水平的集群作战智能化。

参考文献:

- [1] 张海军, 李志强. 无人机蜂群作战体系结构与协同机制研究[J]. 国防科技, 2020, 41(3): 15-22.
- [2] 王建民. 电子对抗技术在无人装备中的应用分析[J]. 电子信息对抗技术, 2019, 34(2): 44-50.
- [3] 刘俊浩. 复杂电磁环境下无人系统抗干扰技术研究[J]. 指挥与控制学报, 2021, 7(4): 60-68.
- [4] 陈晓东. 多智能体协同决策在无人机集群中的应用[J]. 系统工程, 2020, 38(6): 112-120.
- [5] 赵立新. 无人机集群通信与导航安全研究[J]. 通信技术, 2018, 51(12): 1583-1589.