

无人机蜂群城市防御作战运用模式研究



何兴秀¹, 崔玉伟², 杨祖强¹, 万童洲¹

1. 中国航空研究院, 北京 100029

2. 航空工业西安飞行自动控制研究所 飞行控制航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要:如何科学构建和合理运用多维度的防御力量体系是城市防御作战研究的重点问题,具备异构、对抗、自组织特性的无人机蜂群有助于通过不同作战功能的优势互补实现综合防御能力的提升。本文围绕城市防御作战场景中无人机蜂群的运用,梳理了国内外无人机蜂群技术的研究及其在作战中的应用现状,分析了城市作战中无人机蜂群的使命任务和协同作战模式,并进行无人机蜂群城市防御作战效用分析,最终得到城市防御作战场景下的无人机蜂群能力需求、作战流程、任务模式与载荷配置。研究表明,在城市防御作战任务中运用无人机蜂群可带来作战得益的显著提升,并在典型无人机蜂群作战流程的基础上提炼出蜂群能力需求,为未来城市防御作战思路拓展和解决方案的设计提供支持。

关键词:无人机蜂群; 城市作战; 作战构想; 能力需求; 效能分析

中图分类号: V219

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.01.009

随着世界城市化步伐的加快,城市的军事地位逐渐凸显,已成为未来军事斗争的主要战场之一^[1]。城市防御作战是为保卫城市或利用城市抗击敌军进攻而进行的战役,其难点主要体现在目标固定,地幅有限,易遭围困和兵力、火力的封锁。无人机具有体积小、成本低、能深入危险区域作战等特征,其在城市防御作战中可以替代作战人员完成侦察监视、定点攻击、通信中继等任务。然而,单架无人机易被摧毁、任务执行可靠性低;可为低成本、分布式的无人机赋予自主、协同能力,构建异构、对抗、自组织的系统簇群,在完成复杂城市防御作战任务时,具有以下优势和特征^[2]:(1)对于可以分解的作战任务,无人机蜂群可以携带不同载荷,形成组成、功能异构的无人机蜂群,并行地完成抵进侦察、电磁干扰、攻防对抗等不同的防御子任务,比单机依次完成所有的子任务序列具有更高的效率和灵活性;(2)无人机蜂群与单机相比,能够根据作战态势的变化进行防御作战样式重构,灵活地提供更多的解决方案,在城市作战中对敌作战目标形成对抗比较性优势,无人机蜂群系统中成员之间的协作还能提高解决方案的鲁棒性;(3)无人机蜂群系统的成员之间可以通过局部链路交互信息,自组织

地完成作战任务,使得系统更有效和精确地进行协同,降低对集群指挥员操控和通信链路的依赖,对于未知非结构化环境下的城市防御作战尤其重要。综上所述,在城市防御作战中运用无人机蜂群可以突破单机在感知、决策和行为能力方面的限制,具有更强的生存能力、更宽广的任务范围、更高的观测精度以及更好的任务鲁棒性,可为城市防御整体作战效能带来提升。

本文对国内外无人机蜂群城市作战研究现状进行分析梳理,针对城市防御作战这一目前研究较少涉及的应用场景,研究具备“异构、对抗、自组织”能力的无人机蜂群在其中的使命任务、运用模式和作战效用,并凝练典型作战场景下对无人机蜂群的能力需求、任务模式、载荷配置。研究表明,在感知、防御、攻击等典型城市防御作战任务中运用无人机蜂群可带来作战得益的显著提升,并在典型无人机蜂群作战流程的基础上提炼出蜂群能力需求,为未来城市防御作战思路拓展和解决方案设计提供支持。

1 研究现状

国内外均高度重视智能无人装备在城市作战中的应

收稿日期: 2024-04-23; 退修日期: 2024-08-26; 录用日期: 2024-10-31

基金项目: 航空科学基金(20220007004001)

引用格式: He Xingxiu, Cui Yuwei, Yang Zuqiang, et al. Research on UAV swarm application mode in urban defense combat scenarios[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(01): 75-85. 何兴秀, 崔玉伟, 杨祖强, 等. 无人机蜂群城市防御作战运用模式研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(01): 75-85.

用。美军在积极探索无人机蜂群城市作战应用的同时,大力推进关键技术攻关和集成验证,从顶层设计、项目规划、理论研究、技术攻关、演示验证等方面启动多项相关项目^[9],如图1所示。

美国国防先进研究计划局(DARPA)着重对城市作战的无人机蜂群自主、协同、交互等关键技术开展研究工作。2017年启动的“进攻性集群使能战术”(OFFSET)项目^[4-5]旨在开发先进的感知和自主算法,使小型无人机在无遥控和GPS信号的情况下,借助机载传感器在城市环境中自主飞行,如图1(a)所示,目前已完成最后一次外场试验,将蜂群算法和蜂群管理交互技术推向实战水平。其他项目还包括2014年启动的“快速轻量自主”(FLA)项目(见图1(b))、2015年启动的“X班”项目(见图1(c))等。

美国相关军种所组织的研究则着重基于蜂群的新型战术验证。美陆军于2022年举办了第二届“验证试验网关演习”(EDGE),如图1(d)所示,此次试验的交互式无人机集群依托“空射效应”(ALE)项目实施,按批次组成了多组蜂群执行不同任务以验证交互式狼群新战术。美海军于2005年启动了“近战隐蔽自主无人一次性飞机”(CICADA)项目,如图1(e)^[6-7]所示,旨在设计体积小、成本低、可大规模空中布撒的侦察型无人机,并于2015年启动了“低成本无人机蜂群技术”(LOCUST)项目,如图1(f)^[8]所示,旨在研制快速发射低成本蜂群无人机,通过自主协同,对敌形成不对称优势。

除美国外,俄罗斯、欧洲及其他地区国家也十分重视无人机蜂群的发展与运用,如俄罗斯在2021年首次曝光的新型“闪电”无人机蜂群项目,欧洲防务局于2016年启动的“欧洲蜂群”项目,印度在2020年启动的“战斗空中协作系统”项目等^[9]。

我国也在无人机蜂群领域积极布局相关研究工作。2017年6月,中国电子科技集团完成了119架固定翼无人机协同弹射起飞、空中集结、多目标分组、编队合围等试验^[10],如图2所示;2018年12月珠海航展上,中国电子科技集团展示了“微型侦察集群无人机系统”,该系统采用完全分布式模式,携带可见光/红外载荷,支持不少于20架小型无人机自主协同完成编队飞行、区域搜索、目标跟踪、抵近侦察、定点回收等功能,可在城市作战信息侦察中发挥重要作用;2020年5月,浙江大学推出“独立思考”蜂群飞行



(a) “进攻性集群使能战术”(OFFSET)项目



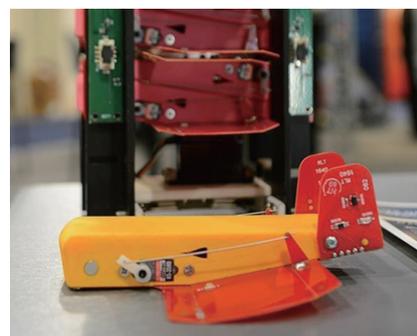
(b) “快速轻量自主”(FLA)项目



(c) “X班”项目



(d) “验证试验网关演习”(EDGE)



(e) “近战隐蔽自主无人一次性飞机”(CICADA)



(f) “低成本无人机蜂群技术”(LOCUST)项目

图1 美国启动多项无人机蜂群技术研究

Fig.1 The United States launches multiple UAV swarm technology research projects



图2 中国电子科技集团无人机蜂群起飞场景

Fig.2 CETC UAV swarm take-off scene

机器人,采用了多目标空间-时间轨迹联合优化策略,并将蜜蜂的飞行行为与无人机技术相结合,形成了一种高度智能、具有自主协作能力的无人机集群系统^[11];2024年,南京航空航天大学研发出一种分体式无人机,这种组合型无人机在起飞时以整体形态升空,但在接近目标区域时,能够迅速分裂成数架小型无人机,每架小型无人机均可独立飞行和执行任务,形成高效能、高机动、长时间的作战群体。

近年来,国内外相关研究逐渐走出概念和理论研究阶段,向实质性的验证试验发展,一些无人机蜂群演示、小规模集群应用系统、集群管理平台等产生。尤其是美国,近年来专门设立多个无人机蜂群城市作战相关的重点项目,涵盖了从作战概念到实质验证的无人机群的各项关键技术,涉及多种级别的无人机,取得了大量突破性成果,稳步向实战化迈进。但是,目前无人机蜂群城市作战运用研究仍需在以下方面进一步加强,以逐步完善蜂群城市作战体系,满足不断变化的军事需求^[12]。

(1) 进一步加强无人机蜂群的城市防御作战场景研究

目前的相关研究工作主要集中于单项技术或城市进攻、建筑/阵地夺取等作战,对防御作战研究较少。亟须针对城市防御作战场景开展作战能力需求分析、作战运用模式等相关研究,从而形成完整的无人机蜂群进攻/防御城市作战体系。

(2) 进一步加强无人机蜂群在城市作战中的顶层能力需求分析

目前针对无人机蜂群的城市作战顶层研究工作中,多数停留在作战构想分析,对于无人机蜂群具体的能力需求未进行充分研究。亟须根据典型作战场景和作战模式,分析对无人机平台本身及蜂群协同的能力需求,并具体分析无人机蜂群在执行不同任务类别和任务模式时的不同载荷配置需求。

因此,本文选取城市防御作战场景,对无人机蜂群的地位作用、协同作战效能、能力需求、任务载荷配置等进行综合分析研究,以期完善无人机蜂群城市作战总体设计,催生全新城市作战样式。

2 城市防御作战无人机蜂群运用研究

城市防御作战包括敌方进攻阻击、城市及其重要目标保护、敌方作战资源消耗、态势稳定和攻防转换等主要作战任务。本节基于城市防御作战对空基平台的能力需求,分析推导无人机蜂群在城市防御作战中的使命任务和运用模式,并对其协同作战得益进行分析。

2.1 城市防御作战空基平台能力需求

城市防御作战存在对敌侦察受限、敌方进攻态势获取困难,通信指挥受限、装备操纵和协同困难,战场环境复杂、对地阻击和反攻困难等难点,因而对空基平台的能力需求主要体现在以下方面^[13]:

(1) 持续、可靠的侦察感知能力

城市防御作战中,需要采用定点侦察、跟踪侦察、巡飞侦察、抵近侦察等方式,对敌进攻兵力、电子设备工作频段、后勤补给路线等重要情报信息实施空中侦察,也需要进入城市建筑内部、地下管廊等实施侦察。对侦察信息需进行不同时间、不同位置、不同侦察维度的融合,从而实现全时立体侦察与监视,准确获取敌方进攻作战信息,为防御作战态势分析和决策提供可靠情报支撑。

(2) 多维度、多样式作战能力

空基平台不仅应具备对空、对面攻击能力,还应具备单目标多批次攻击,多目标进行同时/序贯精准打击,在电磁空间中进行电子侦察、目标探测、电子干扰等作战能力,实现多维度、多样式的协同作战,以消耗敌进攻力量,加速瘫痪敌进攻体系。

(3) 智能决策和快速反应能力

空基平台在发现敏感目标、威胁或遭受袭击时,在没有人干预的情况下,能够自主进行智能决策,采取最优的威胁规避动作,随后采取适当的防御/反击行动;同时,该平台可将威胁或袭击详细信息快速分享至其他指挥和作战节点,为对敌反击决策提供依据。

从上述城市防御作战对空基平台能力的需求出发,结合无人机蜂群自身的优势特征,可分析明确无人机蜂群在城市防御作战中的主要使命任务和作战模式,如图3所示。

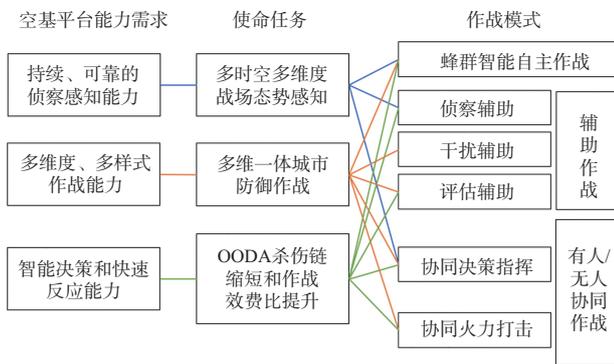


图3 无人机蜂群作战运用

Fig.3 UAV swarm combat application

2.2 使命任务分析

基于城市防御作战对空基平台的能力需求和无人机蜂群的优势特征,归纳无人机蜂群在城市防御作战中的使命任务主要包含以下方面。

2.2.1 多时空多维度战场态势感知

小型或微型无人机体型小、飞行机动灵活,具有悬停能力以及无GPS情况下的自主飞行能力,能够在城市狭小室内、多障碍物空间下进行立体机动。同时,以该类型无人机编组形成蜂群,电磁信号弱、飞行噪声低,难以被探测器发现,具有较强的隐蔽性和突防能力。因此,采用无人机蜂群,携带多种感知载荷,可深入城市战场空间进行不间断感知,采集不同时间、空间、维度的战场数据,并进行数据情报共享和融合,对全面感知战场态势、明晰敌方来袭兵力部署、推理敌方作战意图具有不可替代的作用。

2.2.2 多维一体城市防御作战

用于组成蜂群的无人机装备成本低廉,具备数量优势。如美军的“小精灵”无人机造价仅70万美元,远低于其他高性能空中单装备的价格,且可重复使用多达20次。通过低成本无人机的大量使用,既可以实施短时集中的饱和攻击,大量消耗敌方进攻作战资源;又可以分批次进行持久频繁的骚扰,迫使敌人长期处于高度戒备和紧张的状态,从而达到扩展城市作战时间范围、消耗敌人的目的。

进而,利用无人机蜂群多节点灵活搭载对空、对面、电磁空间等多类型载荷,实施多功能的网络化协同防御作战,可完成态势侦察、目标跟踪、电子诱饵、电子攻击、目标打击、通信中继、补给运送等任务,可有效拓展无人机蜂群的作战空间和频率范围,从而实现多维一体的城市综合防御作战^[4]。

2.2.3 观察-判断-决策-行动(OODA)杀伤链缩短和作战效费比提升

无人机蜂群将侦察、干扰、打击等异构节点通过信息共享和自主协同组成统一整体,可协同完成情报获取、态势综合、意图推理、目标提取、协同决策、目标攻击等作战任务,完成OODA杀伤链多功能的闭环。

通过无人机蜂群的大规模应用,可以从多个视角深入战场,对多无人机信息共享、协同作战对态势感知、作战打击能力都有较大提升;大量无人机的参与可有效地减少伤亡,极大地提升防御作战的效费比。此外,无人机蜂群还可以在作战结束后第一时间评估效果,并且可以立即发动第二轮攻击,这样就大大加快了战场杀伤链的运转速度,使得战斗变得更加迅猛、灵活^[15]。

2.3 作战模式分析

无人机蜂群可通过多种模式参与城市防御作战,按蜂群在作战中的参与程度和自主能力由低到高,可分为蜂群辅助作战、有人/无人机协同作战、蜂群自主作战三种模式^[16]。

2.3.1 无人机蜂群辅助作战

蜂群辅助作战体现的是人-机协同,由指挥员使用无人机蜂群辅助主力作战装备完成作战任务。

(1) 侦察辅助

由于无人机蜂群的体积较小,难以被侦察到,它们能够接近前线进行低空状态感知,收集空中的电磁、气象等环境数据,对目标空域进行精确的状态感知。

(2) 干扰辅助

无人机蜂群能够装载各种电子发射设备,对敌方的雷达系统进行干预和压制;同时,它们也可以被用作有源智能诱饵来迷惑敌方的防空系统^[17]。

(3) 评估辅助

无人机蜂群有能力深入潜在的战斗区域,实时监控敌军的来袭作战部队布局,评估敌军武器系统的战斗性能,同时也能够对毁伤程度做出辅助性的评估。

2.3.2 有人/无人机编组协同作战

有人/无人机编组协同作战是机-机协同与人-机协同的综合,可充分发挥指挥员指挥决策、有人装备火力效能,以及无人机诱饵伴飞、集群智能、分布式打击的优势,实现作战效益最大化。

(1) 协同决策指挥

无人机蜂群可以实现广域的侦察,并对周围环境做出敏锐的反应。此外,它们还具备迅速的态势感知、数据处理和分析等功能,为指挥决策提供了强大的支持。然而,由于

蜂群难以对真伪、敌我等情况做出精确的判定,因此仍然依赖于有人机的协作指挥^[18-19]。根据美军的一项针对有人/无人协同试验结果,任务成功率提升了35%,作战效率提升了25%,生存力提升了25%,作战时间缩短了50%^[20]。

(2) 协同火力打击

通过有/无人协同火力打击,可以有效地摧毁多种不同类型的目标,包括临时掩体、大型装甲以及快速机动的目标,同时也可以利用无人机蜂群携带的高爆炸药,对来袭的敌方人员、慢速移动的目标、轻装甲以及分散的目标进行有效的攻击,从而达到最佳的火力效果^[21]。

2.3.3 无人机蜂群智能自主作战

蜂群自主作战系统则体现了机-机自主协同。该模式主要依赖于集群内各类功能平台的无人机蜂群,利用其间的信息交流和协同能力带来的集群智能优势,可构建融合侦察、控制、打击、评估等多种功能的自主作战系统,实现了对环境的自我感知、理解、分析、规划、决策以及执行。

而指挥员作为蜂群系统的管理者,主要负责系统维护管理、资源配置、任务下达和战术指导,以及必要时实行人工干预,确保协同任务的完成。

2.4 无人机蜂群城市防御作战得益分析

2.4.1 协同感知得益

战场态势感知是无人机蜂群城市作战的主要任务之一。相对于单无人机独立感知,蜂群协同感知优势体现在以下几个方面。

(1) 感知范围变广

无人机蜂群电磁空间协同探测示意图如图4所示,4架无人机独立作业感知范围 S_{total} 可按式(1)计算

$$S_{total} = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \quad (1)$$

若4架无人机开展多节点信号级协同,其协同探测威力得到增加,获得协同涌现感知范围如图4深蓝色部分所示^[22],则无人机蜂群的协同感知范围 S_{swarm} 计算如式(2)所示

$$S_{swarm} = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_a \quad (2)$$

式中, $S_1 \sim S_4$ 分别为各无人机单机的感知范围, S_a 为集群协同涌现感知范围。无人机蜂群的协同感知范围大于各单机的感知范围之和。此外,无人机蜂群可通过多架无人机动态轮班,保持长时间的探测覆盖。

(2) 目标搜索和检测能力提升

单无人机在面积为 S_w 的区域内对敌方目标进行“扫描线”式搜索,单机单位时间搜索面积为 S_v ,单架无人机目标识别成功率为 P_r ,在时间 t 内搜索并识别目标的概率为

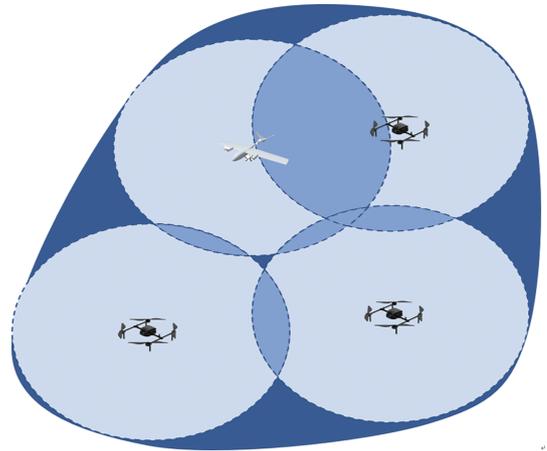


图4 无人机蜂群电磁空间协同探测

Fig.4 UAV swarm collaborative perception in electromagnetic space

$$P_{single} = P_r S_v t / S_w \quad (3)$$

而 n 架无人机构成的集群在时间 t 内协同搜索并识别目标的概率为

$$P_{swarm} = n P_r S_v t / S_w \quad (4)$$

从而实现了目标识别概率的倍增。

如多无人机通过多节点感知信息的协同处理,提升目标识别成功率,使 $P_{rswarm} > P_{rsingle}$,则搜索识别目标能力可得到进一步提升。

综上所述,针对城市中的不同环境特征,多型无人机、多种感知载荷对环境的适应性更强,且对同一区域的不同探测角度能够提供更丰富的探测信息,通过信息共享进行态势感知融合,能够提高综合感知范围、探测概率、探测精度和信息维度。

2.4.2 多功能协同防御作战得益

无人机蜂群中 n 个不同功能的编队组成的协同作战系统能力可由式(5)描述。

$$Q = \sum_{i=1}^n k_i \left[\sum_{j=1}^{m_i} (1 + b_j) E_j \right] \quad (5)$$

式中, k_i 为协同作战任务中各无人机梯队执行任务的权重且满足 $\sum_{i=1}^n k_i = 1$; m_i 代表编队 i 中无人机的数量; E_j 为无人机的单机作战效能; b_j 表示编队多节点、多功能协同增效参数,代表其他编队或本编队内其他成员对本机提供的辅助,包括信息共享辅助、攻击配合辅助等。由式(5)可知,当 $b_j > 0$,该系统能力将优于多无人机独立执行任务的能力。系统协同作战能力除了随着协同编队的数量规模而上升外,编队间进一步的协同会带来 b_j 协同增效参数的提升,从而进

一步提升协同作战系统能力,远超单机作战能力之和。

2.4.3 协同作战效费比提升得益

在对敌火力攻击场景中,设单架无人机对目标打击后的生存概率为 P_s ,则其打击该目标后的损耗为 $1-P_s$ 。考虑由 m 架无人机组成的蜂群攻击同一目标,无人机蜂群借其数量优势进行饱和式打击时,打击目标通常不具备能同时反击所有无人机的能力,设其能同时反击的无人机数量最多为 n 并满足 $n < m$,则每架无人机的平均生存概率可由式(6)计算。

$$P'_s = 1 - \frac{n}{m}(1 - P_s) > 1 - (1 - P_s) = P_s \quad (6)$$

根据式(6),无人机蜂群的无人机平均生存概率相较于单机得到了提升,又结合式(5)可知打击效率高于单机。上述计算仅考虑了任务直接指派的方式,实际作战中无人机蜂群可根据不同无人机对不同目标的生存概率、打击效率进行任务的优化分配,从而进一步提升效费比。

3 城市防御作战无人机蜂群能力需求分析

3.1 能力需求

在复杂城市环境中的防御作战行动是一项复杂的系统工程。随着信息化技术的发展,城市作战模式逐渐向强对抗、智能化、多维化方向发展,不仅要求无人机平台具有带载多样、机动灵活、智能自主等能力,更对蜂群协同能力提出了更高要求^[23-24]。

3.1.1 无人机平台能力

(1) 携带多载荷的能力

无人机蜂群在城市防御作战中需要完成态势侦察、目标跟踪、电子诱饵、电子攻击、目标打击、通信中继、补给运送等任务,因此,要求无人机平台具备搭载不少于5种载荷的能力,包括但不限于光电、红外侦察设备、电子侦察和干扰设备、战斗部、通信中继设备、物资投送吊舱等,以根据作战需要灵活生成对应作战能力。

(2) 立体机动能力

城市防御作战既需要居高临下,获取城市完整信息或实施攻击,又需要避开建筑遮挡或深入内部抵近侦察;因此要求蜂群包含能力异构的无人机,如固定翼和旋翼,从而适应不同环境的机动要求,要求具备在狭小、逼仄区域(如楼宇缝隙、建筑物内部、地下空间等环境)中自主飞行的机动能力。

(3) 高精度飞行和定点投送能力

城市防御作战中的精准打击、物资定点投送等任务要

求无人机具备高精度飞行能力,实时动态载波相位差分(RTK)技术定位正常工作时水平、垂直悬停精度 $\leq \pm 10\text{m}$,可严格按照到达时间按指定速度精确飞抵目标点,要求协同打击时间误差 $> 1\text{s}$,从而支持蜂群各节点的时-空同步,如协同目标跟踪、多方位协同打击、补给物资运输和精准投送等。

(4) 区域拒止条件下飞行能力

城市环境电磁信号复杂,且电磁/信息对抗是城市防御作战的重要手段,易形成区域拒止环境。因此要求组成蜂群的无人机具备在无卫星导航定位和通信条件下完成飞行任务的能力,包括在建筑物内、地下空间、密闭空间飞行的能力^[25],区域拒止条件下飞行任务完成率不低于90%。

(5) 冲突检测与障碍规避能力

要求无人机具备对其他无人机和城市障碍的精准探测和识别能力。对成功率要求99.99%的重点目标攻击任务,在有100个主体(己方蜂群和其他装备、敌方已知固定目标)参与的情况下,识别误检率应小于 10^{-4} ,方可实现可靠的协同作战。对存在碰撞冲突的障碍,采用空间维度消解、时间维度消解、时空协同消解等方式规避可能发生的碰撞冲突,保证无人机的飞行安全。

3.1.2 蜂群协同能力

(1) 自组网通信能力

无人机蜂群协同作战、人-群协同作战能力的实现均需通信网络的支撑,因而要求无人机蜂群具备良好的自组网通信能力,支持异构作战单元间的通信,使蜂群中的无人机能够仅依赖当前或一段时间内从邻居无人机获取的信息,评估自身作战行为决策对整个蜂群的影响。

(2) 多源战场态势感知与信息利用能力

要求无人机蜂群携带红外/光学侦察、电子侦察、通信侦察等不少于三种感知载荷,并具备高效的信息共享能力和多源态势信息融合处理能力,使无人机蜂群通过有限的通信带宽,达到满足协同作战需要的战场态势感知和利用能力。

(3) 群体智能协同作战能力

群体智能是无人机蜂群的核心特征。要求无人机蜂群具有智能自主决策系统以完成战术博弈对抗决策、实时自主协同任务规划,从而满足“蜂群战术”所需的作战能力随遇生成和作战行动临机性需求^[26-27]。

(4) 人-群高效协同作战能力

未来城市作战是体系化协同作战。要求无人机蜂群需要具备与指挥节点(指挥员、有人机或承担蜂群指挥功能的

其他有人/无人系统)之间的协同配合能力。

(5)多域协同作战能力

在作战中,携带不同载荷的无人机能够自主协同、共同完成作战目标是无人机蜂群的重要优势。要求无人机蜂群支持不少于三类作战任务的协同进行,执行不同任务的各无人机编队间能够协同共享战斗数据和任务策略规划,从而实现多域融合和优势互补,提升作战成功率和效费比。

3.2 典型无人机蜂群作战流程

面向城市防御作战的典型无人机蜂群通常由多架携带不同作战载荷的无人机、信息支持网络、指挥测控系统以及作战任务所需的其他元素组成。其中,无人机负责城市防御作战具体任务的执行;信息支持网络为蜂群的信息共享提供通信链路;指挥测控系统负责战场态势综合、进行战术决策,并对无人机蜂群的飞行任务进行调度和管理,其可以是战斗机等人单元、无人集群地面指挥测控站,也可以是其他自主性单元^[28];其他元素包括辅助战场信息感知、作战决策、作战行动的各类人员、设备、物资等。

面向城市防御作战场景,无人机蜂群的作战流程如图5所示。无人机蜂群首先自指挥测控系统处明确防御作战目标和整体作战任务,随后通过信息支持网络从其他战场感知设备获取敌方和全方位战场状态的先验信息。进而,指挥测控系统围绕防御作战任务和作战目标对无人机的装备形态、能力形态、作战任务进行整体规划,包括战场态势感知和威胁分析、任务分解和分配、梯队划分和载荷匹配、作战效果预测。

感知和威胁分析、作战任务分解和分配、无人机梯队划分和作战载荷匹配、作战效果预测等。相关任务通过信息支持网络共享至各无人机蜂群梯队中的作战单元。

随后,无人机蜂群以梯队形式飞至敌方来袭区域,执行防御作战场景所需的侦察、电子干扰、穿插、定点攻击、空中遮蔽等作战任务。完成防御作战任务后,携带侦察载荷的蜂群梯队负责对作战情况进行感知,指挥测控系统对本次蜂群防御作战效能进行评估,并根据战场态势的变化更新作战目标、调配蜂群和飞行任务,在下一作战窗口实施,直至防御作战目标达成^[29]。

3.3 任务模式与载荷配置

根据无人机蜂群作战模式、典型作战场景与城市作战能力需求分析,在典型作战场景中,无人机蜂群通常由多梯队组成,各梯队飞机有不同任务模式,携带不同载荷,根据指挥或自主协同完成整体作战任务。梳理提炼无人机蜂群的任务模式及所需载荷配置见表1。

在无人机蜂群城市防御作战中,需协同完成侦察监视、目标定位、毁伤评估、侦察干扰、目标攻击、补给运输等任务类型,所携带的载荷主要可分为如下类别。

(1)光电/红外载荷

光电/红外载荷是无人机最常携带的载荷,可实时获取图像视频,清晰识别地面精确目标和运动目标。光电/红外载荷应具备多波段复合模式,在1km高度对地目标定位精

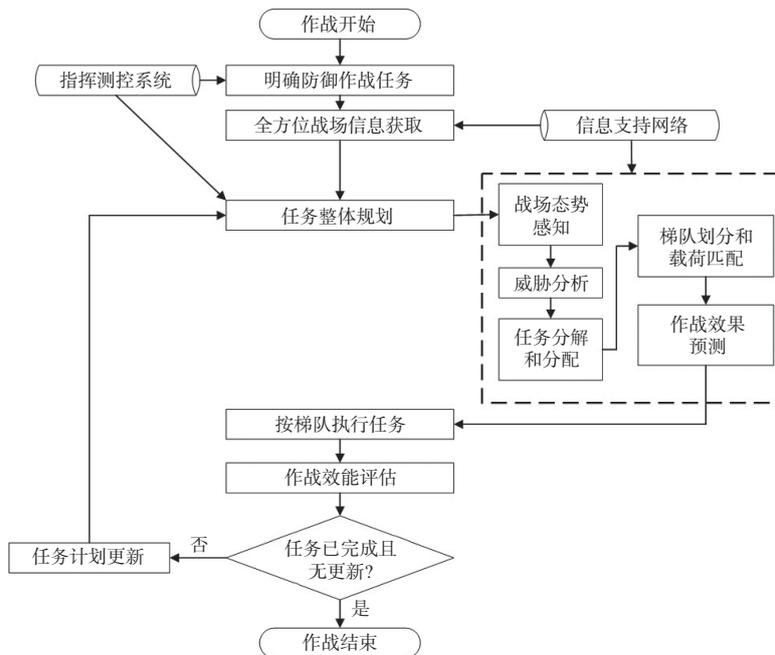


图5 无人机蜂群城市防御作战流程

Fig.5 UAV swarm combat process in urban deferse

表1 无人机蜂群任务模式及所需载荷配置

Table 1 UAV swarm mission mode and payload configuration

任务类别	任务模式	载荷配置
战场态势感知	侦察监视	光电/红外吊舱
		合成孔径雷达
	目标定位	光电/红外吊舱
	目标跟踪	光电/红外吊舱
战场毁伤评估		光电/红外吊舱
		合成孔径雷达
电磁空间作战	电子侦察	无源侦察阵列
	电子干扰	电子干扰机/诱饵
		箔条
		电磁脉冲武器
对空/对面攻击	攻击有人机/无人机	有源探测阵列
		光电/红外吊舱
		空-空导弹
		光电/红外吊舱
	空袭地面运动目标	精确制导炸弹
		空-地导弹
		战斗部
		光电/红外吊舱
	火力支援	精确制导炸弹
		航空炸弹
		战斗部
		机载枪械
辅助作战	引导校射	光电/红外吊舱
	空中掩护	光电/红外吊舱
		精确制导炸弹
		航空炸弹
		战斗部
	机载枪械	
战场支援	补给运输	补给物资投送吊舱
	通信中继	应急通信保障吊舱
		自组网基站
		近场通信链路
		卫星通信链路

度不低于0.05m;载荷应具备光学连续变焦功能,满足大视场搜索与小视场目标识别的需求;同时,载荷应当具备不少于二轴稳定云台,实现广域扫描搜索和持续目标跟踪。

(2)有源探测载荷

有源探测载荷通过主动发射电磁波的方式对目标进行探测,获取信息,用于空中目标探测、照射式引导、战场环境探测等场景。无人机通常携带的有源探测载荷包括小型有源电子探测阵列、合成孔径雷达等。探测载荷应具备小型化、低功耗、自主化特征,典型激光雷达重量应小于4kg,功耗不高于20W,测量精度 $\leq 3\text{cm}$,最大测距距离不低于200m。

(3)侦察干扰载荷

侦察干扰载荷主要通过侦收敌方电子设备信号,对敌方雷达和电子设备频段、制式等进行识别并进行定位,采用箔条抛撒等致盲压制干扰或目标欺骗干扰等,制造虚假空情、保护我方飞机或武器。

(4)目标打击载荷

目标打击载荷用于直接摧毁防御作战中的目标,根据所针对目标的不同,包括航空炸弹、精确制导炸弹、空-空导弹、空-地导弹、机载枪械系统,以及无人机自杀式攻击所携带的战斗部。

(5)通信中继载荷

通信中继载荷用于为战场各作战节点提供信息支持网络,实现战场作战装备的组网协同、信息超视距传递等能力,包括指挥通信保障、自组网基站、近场通信、超视距通信等载荷。

4 结论

本文对无人机蜂群城市防御作战这一特定场景开展作战运用模式研究,分析了无人机蜂群在城市防御作战中的使命任务、作战模式和协同作战得益,进而基于典型无人机蜂群防御作战流程分析得出无人机平台和蜂群协同能力需求。无人机蜂群通过异构、对抗、自组织协同作战,对提升城市防御作战能力具有重要作用。

(1)在敌方进攻阻击、城市及其重要目标保护、敌方资源消耗、态势稳定和攻防转换等主要城市防御作战任务中,无人机蜂群可通过辅助作战、有人/无人机编组协同作战、智能自主作战等模式,达成多维战场态势感知、多维一体城市防御作战、缩短OODA杀伤链和提升作战效费比等作战使命。

(2)蜂群中各无人机节点可以通过安装不同载荷灵活构成能力异构的作战单元,通过多节点、多功能的灵活组合、功能互补和机间高效协同,聚合完成战场态势感知、电磁空间作战、对空/对面攻击、辅助作战和战场支援等多种蜂群作战任务,使城市防御作战战术更加灵活。

(3)在城市防御作战中,无人机蜂群由不同任务模式、携带不同载荷的多梯队组成,具备群体智能协同作战、人-群高效协同作战、多域协同作战能力,通过人-群和群内各节点的高效协同,可实现感知范围、目标搜索检测能力、系统协同作战能力、生存能力的显著提升,能极大提升作战资源利用效率,提升效费比。

通过上述研究,可为未来城市防御作战提供新的思路

和解决方案;不仅可以有效地满足军事需求,还可以为提升无人机群体的作战能力提供场景和需求引导,助力催生新质作战能力。

AST

参考文献

- [1] 熊武一,周家法.军事大辞海(下)[M].北京:长城出版社,2000.
Xiong Wuyi, Zhou Jiafa. Military encyclopedia(part 2) [M]. Beijing: Great Wall Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [2] 郭继峰,郑红星,贾涛,等.异构无人系统协同作战关键技术综述[J].宇航学报,2020,41(6):686-696.
Guo Jifeng, Zheng Hongxing, Jia Tao, et al. Summary of key technologies for heterogeneous unmanned system cooperative operations[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 686-696. (in Chinese)
- [3] 董宇,高敏,张悦,等.美军蜂群无人机研究进展及发展趋势[J].飞航导弹,2020(9):37-42.
Dong Yu, Gao Min, Zhang Yue, et al. Research progress and development trends of U. S. military swarm drones[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(9): 37-42. (in Chinese)
- [4] 李洪兴. DARPA 启动攻击性“蜂群”能力战术计划[J].现代军事,2017(2):20.
Li Hongxing. DARPA launches tactical plan for offensive “swarm” capabilities[J]. Modern Military, 2017(2): 20. (in Chinese)
- [5] 王彤,李磊,蒋琪.“进攻性蜂群使能战术”项目推进无人蜂群能力发展分析[J].战术导弹技术,2020(1):33-38.
Wang Tong, Li Lei, Jiang Qi. Offensive swarm-enabled tactics program promotes the development of unmanned swarm capability[J]. Tactical Missile Technology, 2020(1): 33-38. (in Chinese)
- [6] 胡杰,陈桦,付宇,等.无人机蜂群技术现状及反蜂群应对策略[J].飞航导弹,2020(9):32-36.
Hu Jie, Chen Hua, Fu Yu, et al. Current status of drone swarm technology and anti-swarming strategies[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(9): 32-36. (in Chinese)
- [7] 杨中英,王毓龙,赖传龙.无人机蜂群作战发展现状及趋势研究[J].飞航导弹,2019(5):34-38.
Yang Zhongying, Wang Yulong, Lai Chuanlong. Research on the development status and trends of UAV swarm operations [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(5): 34-38. (in Chinese)
- [8] 吕震华,高亢.美国无人集群城市作战应用发展综述[J].中国电子科学研究院学报,2020,15(8):738-745.
Lyu Zhenhua, Gao Kang. Review of the development of drone swarm urban combat applications in the USA[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(8): 738-745. (in Chinese)
- [9] 王瑞杰,王得朝,丰璐,等.国外无人机蜂群作战样式进展及反蜂群策略研究[J].现代防御技术,2023,51(4):1-9.
Wang Ruijie, Wang Dechao, Feng Lu, et al. Research progress and countermeasures against UAV swarm operations abroad[J]. Modern Defense Technology, 2023, 51(4): 1-9. (in Chinese)
- [10] 刘鹏,岳源,孟繁霄,等.多无人机协同搜索的程序研究[J].装备制造技术,2021(10):115-119.
Liu Peng, Yue Yuan, Meng Fanxiao, et al. Multi-drone co-searching simulation program studies[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(10): 115-119. (in Chinese)
- [11] 王清龙,严平,赵军峰.直升机与无人机蜂群协同作战研究[J].直升机技术,2022(3):47-54.
Wang Qinglong, Yan Ping, Zhao Junfeng. Analysis of cooperative combat between helicopter and un-manned aerial vehicle swarm[J]. Helicopter Technique, 2022(3): 47-54. (in Chinese)
- [12] 丁玉坤,叶艾.外国陆军城市作战无人系统发展与运用分析[J].舰船电子工程,2022,42(5):7-9.
Ding Yukun, Ye Ai. Analysis on the development and application of foreign army urban combat unmanned system[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(5): 7-9. (in Chinese)
- [13] 王宁.沿海城市反无人机蜂群袭扰研究[J].中国军转民,2022(19):75-77.
Wang Ning. Research on anti-drone swarm intrusion in coastal cities [J]. Defence Industry Conversion in China, 2022(19): 75-77. (in Chinese)
- [14] 张洪碧,孟凡松,翟东航.某局部冲突中无人机作战运用及启示[J].指挥控制与仿真,2022,44(4):16-20.
Zhang Hongbi, Meng Fansong, Zhai Donghang. UAV operational application and its enlightenment in a certain regional conflict[J]. Command Control and Simulation, 2022, 44(4): 16-20. (in Chinese)
- [15] 冯杨,蒋超,崔玉伟.俄乌冲突中无人机作战运用及启示[J].

- 中国军转民, 2022, 23(1): 35-40.
- Feng Yang, Jiang Chao, Cui Yuwei. The application and enlightenment of drone combat in the Russia-Ukraine conflict [J]. Defence Industry Conversion in China, 2022, 23(1): 35-40. (in Chinese)
- [16] 罗海龙, 武剑, 许乾坤. 无人机蜂群作战运用探析[J]. 军民两用技术与产品, 2020(7): 20-23.
- Luo Hailong, Wu Jian, Xu Qiankun. Analysis on the application of drone swarm operations [J]. Dual Use Technologies & Products, 2020(7): 20-23. (in Chinese)
- [17] 王宇, 郭兴旺. 无人系统集群海上作战应用研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(12): 21-25.
- Wang Yu, Guo Xingwang. Research on the application of unmanned system cluster in marine combat applications[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(12): 21-25. (in Chinese)
- [18] 学喆, 张岳, 陈军. 无人-有人机混合主动式交互决策研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(5): 44-52.
- Xue Zhe, Zhang Yue, Chen Jun. Research on UAV-MAV mixed-initiative interactive decision[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(5): 44-52. (in Chinese)
- [19] 谢越帆, 王颖. 无人机蜂群作战综合探究[J]. 机电信息, 2022 (6): 37-39+43.
- Xie Yuefan, Wang Ying. Comprehensive study on drone swarm operations[J]. Mechanical Electrical Information, 2022(6): 37-39+43. (in Chinese)
- [20] 黄汉桥, 白俊强, 周欢, 等. 智能空战体系下无人协同作战发展现状及关键技术[J]. 导航与控制, 2019, 18(1): 10-18.
- Huang Hanqiao, Bai Junqiang, Zhou Huan, et al. Present situation and key technologies of unmanned cooperative operation under intelligent air combat system[J]. Navigation and Control, 2019, 18(1): 10-18. (in Chinese)
- [21] 彭正忠, 欧清华. 无人机蜂群作战及其关键技术研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(1): 1-4.
- Peng Zhengzhong, Ou Qinghua. Research on drone swarm operations and its key technologies[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(1): 1-4. (in Chinese)
- [22] 黄晨, 祁建清, 刘方正. 网络雷达对抗系统涌现性建模[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1357-1367.
- Huang Chen, Qi Jianqing, Liu Fangzheng. Modeling emergence of network radar countermeasure system[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1357-1367. (in Chinese)
- [23] 潘兴翱, 曾杨智. 无人集群遂行城市突击的能力需求分析[J]. 飞航导弹, 2020(11): 63-67+76.
- Pan Xing' ao, Zeng Yangzhi. Analysis of capability requirements for unmanned swarms to carry out urban assault[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(11): 63-67+76. (in Chinese)
- [24] 丁玉坤, 叶艾. 城市进攻作战无人机蜂群发展设想与运用探析[J]. 指挥控制与仿真, 2021, 43(4): 13-16.
- Ding Yukun, Ye Ai. Probe into the development and application of uavs in urban offensive operation[J]. Command Control and Simulation, 2021, 43(4): 13-16. (in Chinese)
- [25] 刘莉, 董欣心, 葛佳昊, 等. 拒止环境下无人系统作战模式及关键技术[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 167-174.
- Liu Li, Dong Xinxin, Ge Jiahao, et al. Operation mode and key technologies of unmanned system in denied environment[J]. Tactical Missile Technology, 2020(4): 167-174. (in Chinese)
- [26] 王凯. 智能化背景下美军无人机作战发展研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(4): 14-16+48.
- Wang Kai. Research on U.S. Army UAV combat development under the background of intelligentization[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(4): 14-16+48. (in Chinese)
- [27] 李淮, 黄诗怡, 刘宏明, 等. 无人机集群对抗决策算法研究综述[J]. 航空科学技术, 2024, 35(4): 9-17.
- Li Wei, Huang Shiyi, Liu Hongming, et al. Review of UAV swarm air-combat decision-making algorithms[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(4): 9-17. (in Chinese)
- [28] 罗德林, 徐扬, 张金鹏. 无人机集群对抗技术新进展[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 26-31.
- Luo Delin, Xu Yang, Zhang Jinpeng. New progresses on UAV swarm confrontation[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(7): 26-31. (in Chinese)
- [29] 杨丽娜, 曹泽阳, 李勇祥. 无人机蜂群作战构成及作战概念研究[J]. 现代防御技术, 2020, 48(4): 44-51.
- Yang Li'na, Cao Zeyang, Li Yongxiang. Research on the operational structure and concept of unmanned aerial swarm [J]. Modern Defense Technology, 2020, 48(4): 44-51. (in Chinese)

Research on UAV Swarm Application Mode in Urban Defense Combat Scenarios

He Xingxiu¹, Cui Yuwei², Yang Zuqiang¹, Wan Tongzhou¹

1. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China

2. Key Laboratory of Flight Control Aviation Technology, AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract: The way to scientifically establish and apply a multi-dimensional military defense system is a key issue in the urban defense combat scenarios research. With the features of heterogeneity, confrontation and self-organization, the unmanned aerial vehicle (UAV) swarm is helpful to achieve the enhancement of comprehensive defense capabilities by the complementarity of individual combat functions. Focused on the applications of UAV swarm in urban defense scenarios, this paper firstly reviews the research and applications of UAV swarm technology. Then the role and collaborative combat modes of UAV swarm are analyzed, and an analysis on the combat effectiveness is conducted. Finally, the capability requirements, combat process, mission mode and payload configuration of UAV swarm in typical defense combat scenarios are derived. The research results show that the applications of UAV swarm in urban defense can bring significant improvement in combat benefits, and the requirements of UAV swarm are proposed based on the urban defense combat process, which can provide support for the military plan design of future urban defense operations.

Key Words: UAV swarm; urban operations; operational concept; capability requirements; performance analysis

Received: 2024-04-23; **Revised:** 2024-08-26; **Accepted:** 2024-10-31

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20220007004001)