

无人机反制需求分析与技术谱系

向文豪,王栋,刘佳,董方晨,孙文

中国船舶工业系统工程研究院,北京 100036

摘要 随着无人技术的成熟,无人机“黑飞”现象日益频繁,严重影响了正常的社会秩序和国家主权安全。通过对无人机反制技术需求的分析及现有成熟相关技术的梳理,形成了较为完整的无人机反制技术谱系。针对目前典型的无人机,提出无人机反制的初步思路,并分别研究其反制亟需解决的关键技术及目前存在的问题,牵引无人机反制体系的构建。

关键词 无人机反制;黑飞;技术谱系

无人机具有无人员伤亡、操作简单等特点,在军民各领域得到广泛应用。但随着无人机技术发展日新月异,无人机“黑飞”现象严重^[1],国际上频频出现无人机袭扰以及重要人物遇袭事件。为维护国内正常的社会秩序和国家主权安全,亟需开展对无人机反制技术的研究。

1) 无人机技术快速发展亟需未雨绸缪。美国《2013—2038年无人系统一体化路线图》基本上代表了国际上无人机技术发展方向^[2],其中对无人机各项性能划分如图1所示。目前,无人机以多手段侦察为主,兼顾打击能力,在实战应用中发挥了重要作用,其应用任务及相关的技术途径威胁分析见图2。

对最新无人机国际专利的统计(表1)显示,飞行控制技术相关的专利最多,达到3022件;飞行器总体技术的专利申请排名第2(旋翼级、垂直起飞或着陆的飞机、操纵面、机翼、机身等都是关于飞行

总体技术);发射和回收技术排名第3。可以看出,世界各国无人机技术布局和发展趋势主要集中在飞行控制和飞行器总体两个方面。另外,随着隐身、长航时等技术的发展,形成了舰载起降固定翼(TERN计划)、蜂群等的无人机新型应用,无人机的部署更加机动,任务手段更加多样化,对无人机反制提出了更高的要求^[3]。

随着人工智能、复材加工、自主导航、蜂群控制等技术的迅速发展,无人机的技术门槛越来越低、性能越来越高、应用更加多样、更加难以反制。因此,中国亟需紧跟无人机发展趋势,促进相应反制无人机技术发展。

2) 民用无人机“黑飞”现象扰乱社会秩序。从国内角度,民用无人机近年来快速发展,数量和规模呈爆发式增长,而频频发生的无人机违规飞行不仅影响了民航正常运行,而且严重威胁着国家安全和社

收稿日期:2020-04-16;修回日期:2020-07-18

作者简介:向文豪,高级工程师,研究方向为舰载无人机系统、反无人机等技术,电子信箱:xiangwh2018@163.com

引用格式:向文豪,王栋,刘佳,等. 无人机反制需求分析与技术谱系[J]. 科技导报, 2020, 38(21): 150-158; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.21.019

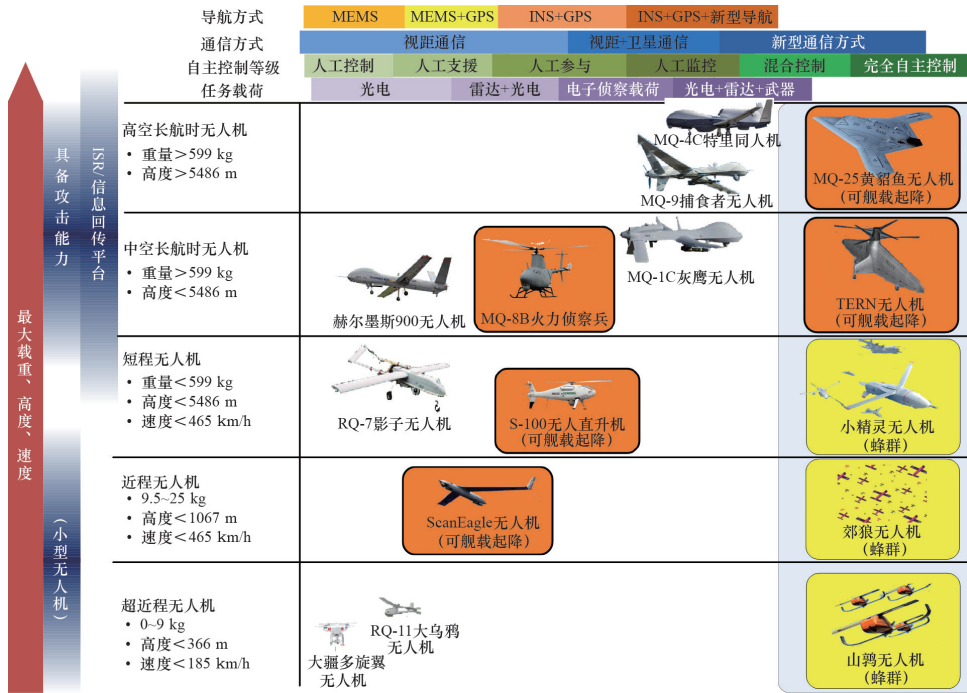


图1 美国 2013—2038 年无人机发展路线

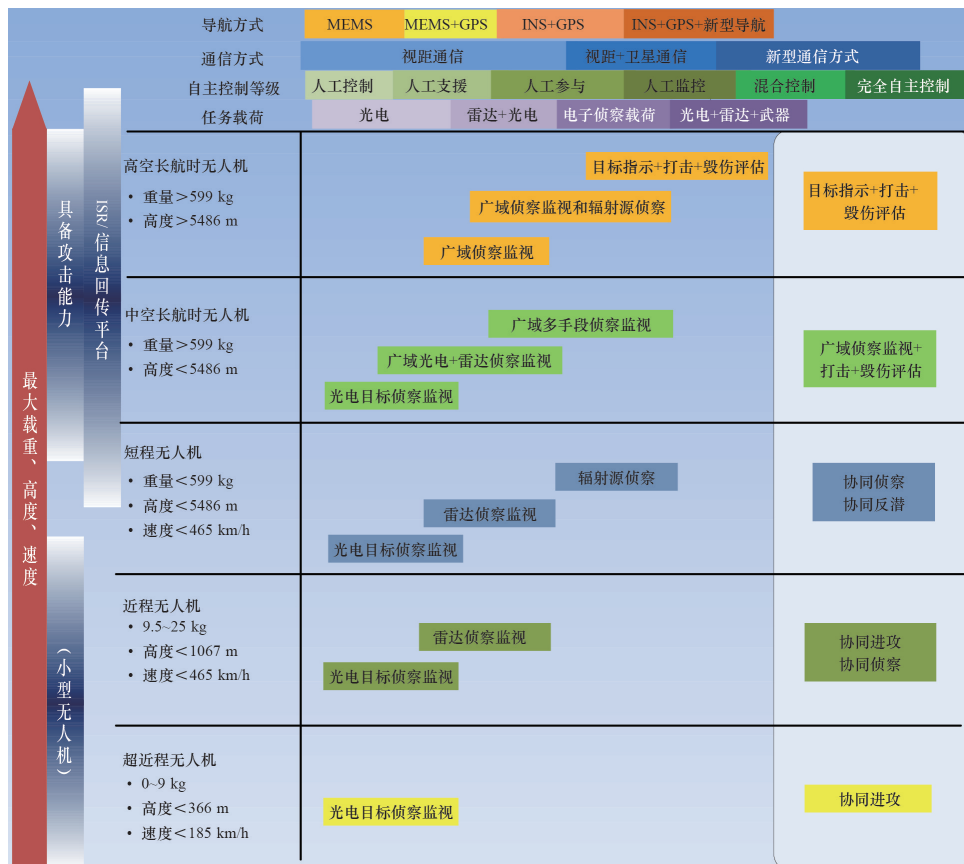


图2 无人机任务及威胁示意

表1 无人机国际专利统计

排名	技术领域	申请量	备注
1	飞行控制	3022	
2	旋翼机	992	飞行器总体
3	发射回收	563	
4	垂直起降无人机	523	飞行器总体
5	操纵面技术	517	飞行器总体
6	导航	496	飞行器总体
7	机翼	467	飞行器总体
8	机身	331	飞行器总体
9	雷达	330	
10	图像处理	306	

2017年期间,国内各地民航机场的无人机违规飞行干扰民航运行事件呈现数量级增长,数百个航班延误,上万名旅客出行受到影响,给社会造成巨大的经济损失。在国外,诸如政府所在地、机场等敏感地区多次出现有意或无意的无人机非法飞行事件,类似于委内瑞拉总统演习遭遇无人机袭击等恶性事件层出不穷。

目前,由于无人机采购和运营成本低,飞行器

来源复杂,型号种类众多,性能指标各异^[5],导致无人机种类较多;无明确的限制性法规和标准的监管审批流程,导致无人机监管手段空白;无人机飞行速度慢、体积小,侦察难度大,导致无人机的发现难度大;缺乏无人机处置手段,硬杀伤附带毁伤较大,处置效果难以评估。

3) 开展无人机反制技术发展具有重要的意义。随着技术进步,无人机应用将更加多样化,性能将更为先进,用途将更加广泛(图2),中国未来面临的无人机监管等问题也将更加严峻。因此,发展无人机反制技术是保证在未来拥有反制无人机能力的重要基础。另外,发展无人机反制技术对空域安全和管理同样具有重要的意义。

1 无人机反制技术需求分析

1.1 按无人机反制阶段划分的需求分析

典型无人机反制包括预警探测、警戒识别、处置决策、防御实施和效能评估5个阶段(图3),通过各阶段的能力需求分析,可以捕获到无人机反制

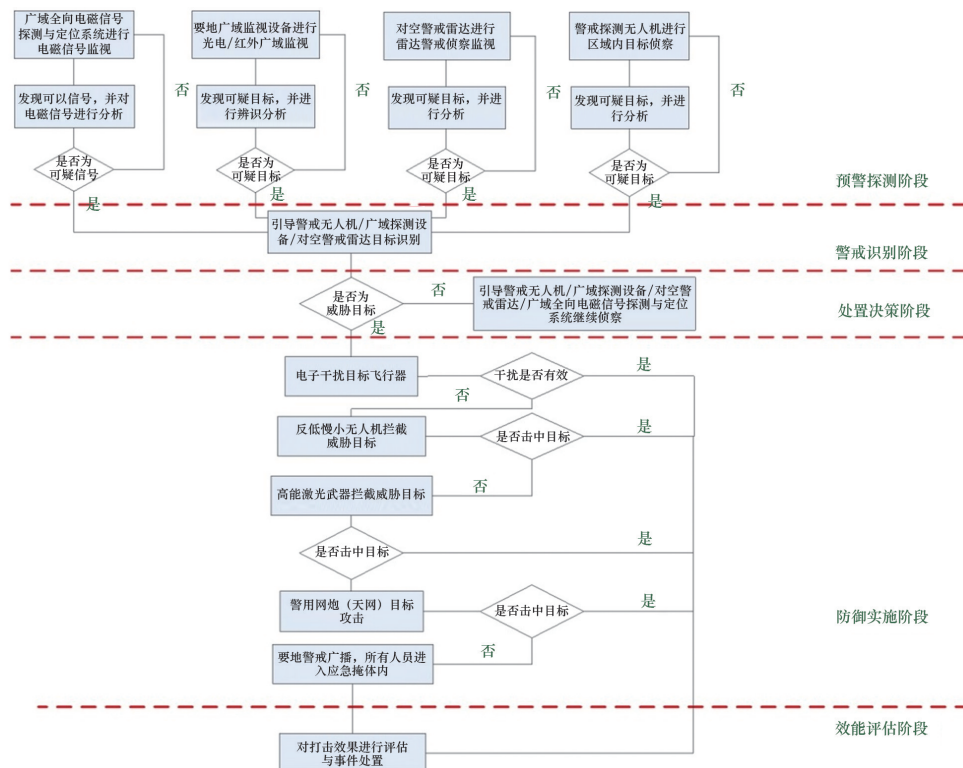


图3 典型无人机反制阶段划分

T0级的技术要求(顶层技术要求)。

1) 预警探测阶段。具有低慢小目标发现的能力;对弱辐射源信息侦察和定位的能力;对目标声音发现的能力;前期情报获取能力。

2) 警戒识别阶段。具有低慢小目标辨识的能力;对弱辐射源定位和情报生成能力;对目标声音的识别能力;光电、雷达目标的关联能力。

3) 处置决策阶段。具有无人机反制指挥控制能力;目标自动发送能力;无人机反制人工智能辅助决策能力。

4) 防御实施阶段。具有无人机硬武器打击能力;无人机电子干扰软打击能力;无人机任务载荷伪装欺骗能力。

5) 效能评估阶段。具有无人机反制后多维度毁伤效果显示能力。

1.2 按无人机反制利益攸关方划分的需求分析

无人机反制相关的交互部门、热点区域、相关

设备等均为其利益攸关者,如图4所示。针对3个主要利益攸关者的要求,分析其对无人机反制的能力需求,捕获能力需求如表2所示。

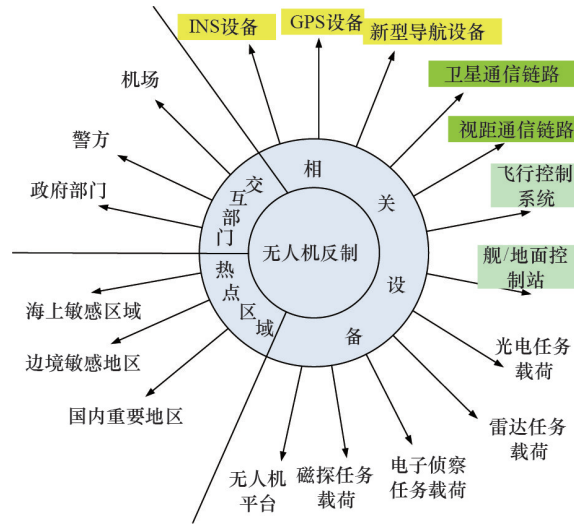


图4 无人机反制利益攸关方示意

表2 无人机反制利益攸关方需求分析

能力需求	交互部门			热点区域		
	民航机场	警方	政府	海上敏感区域	边境敏感地区	国内重要地区
预警探测能力	具有多目标探测能力	具有低小慢目标探测能力	无	具有多目标探测能力	具有多目标探测能力	具有多目标探测能力
警戒识别能力	具有多目标识别跟踪能力	具有低小慢目标识别跟踪能力	无	具有多目标识别跟踪能力	具有多目标识别跟踪能力	具有多目标识别跟踪能力
处置决策能力	根据探测识别情报,指挥反制行动	根据探测识别情报,指挥反制行动	无	根据探测识别情报,指挥反制行动	根据探测识别情报,指挥反制行动	根据探测识别情报,指挥反制行动
防御实施能力	硬打击、软打击、欺骗、捕获等多种手段	软打击、捕获等手段;定位操控者能力;避免二次伤害	无	硬打击、软打击、欺骗、捕获等多种手段	软打击、欺骗等手段,驱离威胁目标	硬打击、软打击、欺骗、捕获等多种手段
毁伤评估能力	能够对反制手段效果进行评估判断	无	无	能够对反制手段效果进行评估判断	无	能够对反制手段效果进行评估判断
政策制度需求	相关政策的制定实施	相关政策的制定实施	政策实施	相关政策的制定实施	相关政策的制定实施	相关政策的制定实施

通过对任务场景和利益攸关者的能力需求捕获,将无人机反制进行自顶向下的能力分解,建立能力需求树,如图5所示,主要包含6类18项T0级功能,适用于指导后续研究。

2 无人机反制技术谱系

通过对预警探测能力、警戒识别能力、处置决策能力、防御实施能力、毁伤评估能力和政策制度

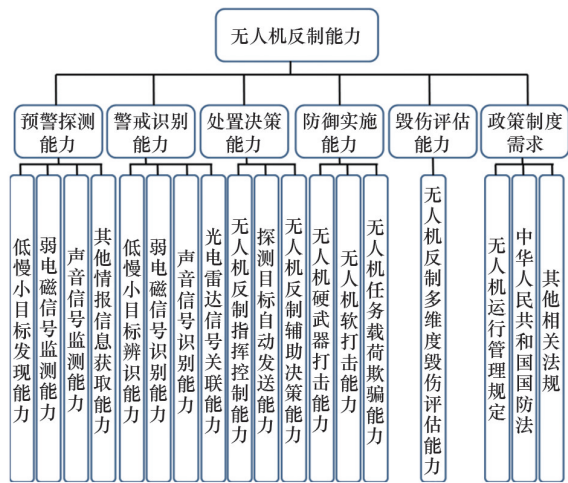
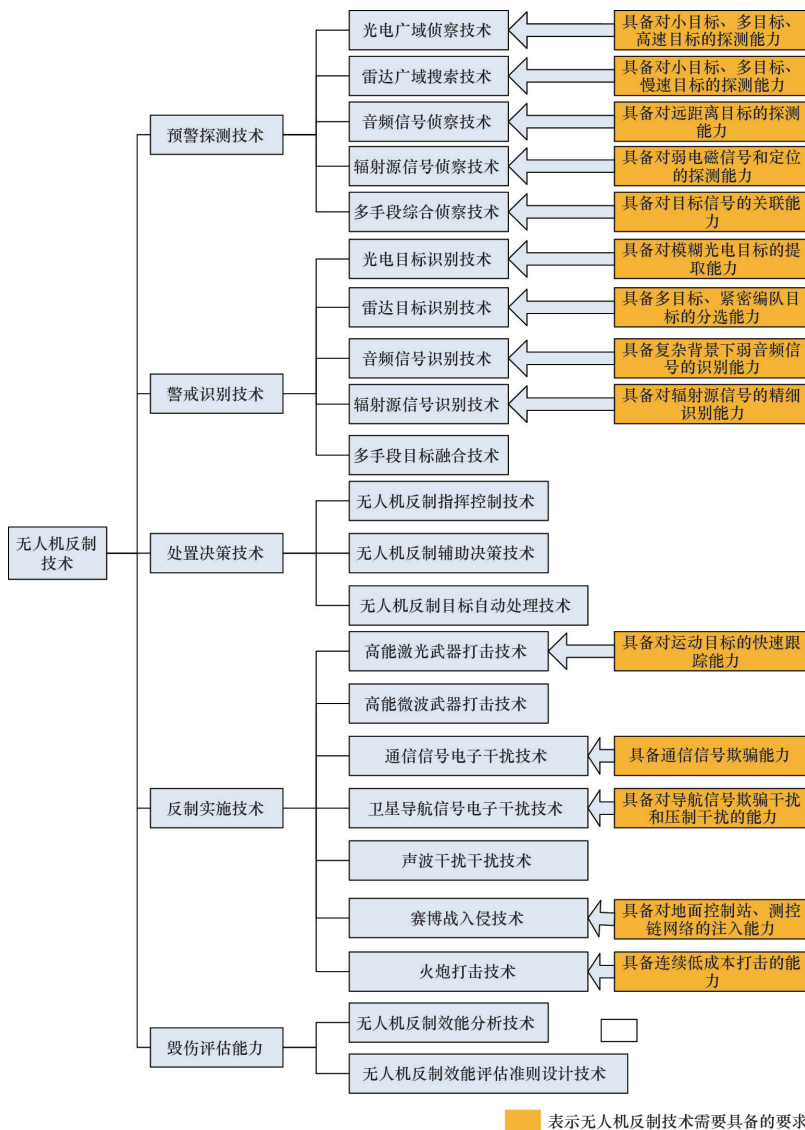


图5 无人机反制能力需求树

需求的总结分析,得出图6所示技术谱系,并经过与无人机反制能力需求树对比,得出无人机反制关键技术研究方向。

在预警探测方面,主要包括无人机平台的探测和测控链路的侦测。其中,无人机平台的探测技术包括海上低慢小目标雷达探测技术、低红外辐射小目标光电探测技术、声光结合目标探测技术;测控链路的侦测技术包括海上弱辐射信号的检测技术、电磁辐射信号测向定位技术等。

在警戒识别方面,主要包括探测信息处理和目标属性识别。通常采用的技术包括光电图像增强技术、光电/雷达多传感器目标融合技术等。



表示无人机反制技术需要具备的要求

图6 无人机反制技术谱系示意

在处置决策方面,主要包括无人机反制指挥控制流程设计、无人机反制人工智能辅助决策等关键技术等^[6]。

在反制实施方面,主要包括硬打击毁伤技术、软杀伤干扰技术和伪装欺骗技术。硬打击毁伤技术主要是针对无人机平台毁伤的反无人机导弹、反无人机激光武器、反无人机微波武器、格斗型无人机、常规火力毁伤武器等^[7]。软杀伤干扰技术主要是针对测控链路和卫星导航设备的控制信息干扰技术、数据链干扰技术和卫星导航干扰技术等。伪装欺骗技术主要是针对大型无人机任务载荷的光学伪装欺骗、热红外伪装欺骗、声学伪装欺骗和电子伪装欺骗等技术,使其接收虚假的目标信息,迫使其结束任务。

在毁伤评估方面,主要包括无人机反制效能分析技术、无人机反制效能评估准则等关键技术。

3 典型机型的反制思路

针对高空长航时、中空长航时、低慢小无人机的情况,通过分析无人机的技术特点^[8],结合无人机反制技术体系,形成如下无人机反制思路。

3.1 高空长航时无人机

高空长航时无人机通常为战略侦察型(或察打型)无人机,飞行高度通常在 8000~2 万 m 高空,通信方式以视距微波通信和超视距卫星通信为主,导航采用惯性导航+GPS(军码)+辅助手段的组合导航方式,具有较强的抗干扰性。

目前,长航时无人机通常为大展弦比设计,通常不采用隐身设计,可采用对空雷达等方式及时捕获目标。针对隐身无人机,则需要进一步提高对抗雷达的性能。

由于该类无人机为高价值飞行器,导航方式采用了惯性导航+GPS(军码)+辅助手段的组合导航方式,并有一定的抗干扰策略,通过 GPS 欺骗的方式对导航设备进行干扰存在一定难度。无人机飞离本场后采用卫星通信方式(通常为 Ku 或 Ka 波段,波束比较窄),由于平时考虑外交因素,无法干扰卫星上行链路,若需要干扰卫星下行链路,则干

扰设备需要高于无人机的飞行高度。

因此,针对远程无人机的反制多采用伴随干扰的方式,对无人机搭载的任务载荷进行伪装欺骗,迫使其结束任务;通过开展赛博应用等方式,侵入其测控链路和地面站,直接控制飞机等。

3.2 中空长航时无人机

中空长航时无人机大部分不采用隐身设计,飞行速度较快,通过对空雷达等方式可以及时捕获目标。同时,由于该无人机全程采用微波通信的方式,在先期收集电磁信息的前提下,通过电子侦察的方式进行目标截获。导航方式采用了惯性导航+卫星导航的组合导航方式,并有一定的抗干扰策略,可尝试采用卫星导航压制的方式对其导航设备进行干扰,或采用欺骗干扰的方式对无人机进行诱降。该无人机全程采用视距微波通信的方式,在获取通信模式之后,可采用压制或欺骗干扰的方式切断其通信链路,迫使其返航,或获取该通信链路的通信协议,发送控制指令,使其降落至本场。

3.3 低慢小无人机

低慢小无人机多采用非金属材料,几何尺寸小,飞行速度较慢,对空警戒雷达在远距离很难及时捕获目标^[9]。但由于该无人机全程采用微波通信的方式,在先期收集电磁信息的前提下,可通过电子侦察的方式进行目标截获,或近距离通过光电(红外)或声波等方式进行目标截获。姿态控制多采用惯性导航+卫星导航的组合导航方式,并有一定的抗干扰策略,可尝试采用卫星导航压制的方式对其导航设备进行干扰,或采用欺骗干扰的方式对无人机进行诱降^[10]。该无人机全程采用视距微波通信的方式,在获取通信模式之后,可采用压制干扰的方式切断其通信链路,迫使其返航,或获取该通信链路的通信协议,发送控制指令,使其降落至本场。

4 无人机编队反制思路

随着无人机应用范围的日益扩大,应用难度和任务复杂程度日益加强。单架无人机在执行任务时容易出现一些问题,例如单架无人机的观察角度

限制遗漏,可能造成不能够全方位地监测侦察或者攻击目标。单架无人机在飞行途中一旦出现问题,会严重影响应用任务进度,甚至可能影响战局走势。由于载荷效能受无人机载体限制,单架无人机无法满足应用需求。由于这些原因,无人机编队协同应用越来越受到国内外的广泛关注^[11]。

目前,蜂群无人机编队飞行主要有3种形式。

1) 航迹一致性方法。该方法是目前无人机编队最低的形式,由地面站统一进行飞行路径规划。无人机之间没有信息交互,地面站为每架飞机规划方向相同、间隔紧密的航线,无人机按照各自的航线自主飞行完成任务^[12]。由于无人机各自航线相邻较近,形成编队规模。地面站可根据图案需求事先规划好航路,通过数传模块随时切换。

2) 忠诚僚机(Loyal Wingman)编队方法。该方法是目前无人机编队最常用的方法之一。长机跟踪一个预先给定的轨迹,僚机和长机保持一定构型跟随长机飞行。长机可看作整个编队的中心,僚机可通过视觉或红外测距雷达等方式跟随长机,并实现非GPS(global positioning system)定位的编队飞行。

3) 基于行为法。受生物群体社会行为的启发,越来越多的团队通过分析生物群体,如蚁群、蜂群、鸽群的行为规律研究无人机编队飞行。单架无人机映射蜜蜂,无人机机群映射蜂群。由单架机通过自主智能决策产生的任务响应,并将信息素通过空中无人机自组织网络传递给其他无人机,使具备有限自主能力的多架无人机在没有集中指挥控制的情况下,通过相互信息交互产生整体效应,实现较高级别的自主协作,从而能在尽量少的人员干预下完成预期的、单架无人机无法实现的任务目标。这种方式没有中心,每架机在集群中权重相同,是多智能体自主决策的集群无人机。

无人机编队平台目前多种多样。例如,美国空军技术学院在“捕食者”和“全球鹰”无人侦察机基础上进行了无人机系统侦察任务规范化研究。美军“山鹑”无人机长不足0.3 m,重不足1 kg,使用3D打印技术制造,可通过战机干扰弹投放,飞往低

空侦察。

所以基于目前编队形式、平台的多样化特点,反制无人机编队手段也各自不同。

1) 对于采用航迹一致方法的无人机编队的反制。采用航迹一致编队方法的无人机多使用低慢小平台。这类无人机大多使用GPS定位,MEMS(micro-electro-mechanical system)导航设备,采用大功率Wi-Fi(wireless fidelity)或点对点数据传输。

反制这种编队飞机,软打击方式可采用区域电子干扰,采用欺骗或压制等手段,干扰无人机数据链、干扰GPS信号,伪装诱骗无人机编队,或者通过Wi-Fi注入等赛博攻击方式控制无人机编队^[13]。

由于飞机飞行速率较低,可采用防空炮进行摧毁,也可使用声波武器击落无人机,或者使用微波武器摧毁无人机电子设备。

2) 对于忠诚僚机编队方法的无人机编队的反制。针对该类无人机编队,在通过雷达探测目标后,判断长机并对其进行针对性干扰;在进入火力打击范围内对其进行攻击或捕获。也可以通过电子干扰干扰僚机,削弱无人机编队力量。

3) 对于基于行为方式的无人机编队的反制。基于蚁群、蜂群、鸽群等行为方式的无人机编队的特点是依靠群体智能,分布式自组织的、无中心的无人机集群。只要飞机数量足够多,即可源源不断地飞向应用对象。反制这种无人机编队形式,软打击手段是进行伪装欺骗,使无人机探测不到任务特征,单体无法做出决策。同时使用声波、微波等方式对区域内无人机进行干扰、破坏。

5 无人机反制存在的问题

1) 无人机反制缺乏顶层规划和系统化设计。对于应用而言,无人机反制主要针对国外研制的无人机。国外无人机研制厂商数量多、种类差异大,决定了无人机反制的艰巨性和复杂性。

目前从国内看,无人机反制问题缺乏自上而下紧密衔接的组织领导机构,不能统筹协调各方面力量。在总体规划上,缺乏无人机反制的规划和阶段

性目标;在战略上,缺乏对于战争可能使用的无人机型号、性能等的研究;在技术标准上,无人机反制技术规范与标准缺乏;在制度机制上,欠缺相应机制、制度和规范,没有专门研究机构广泛吸收借鉴国内外、军内外无人机反制成功经验、做法与成熟技术,而且无人机反制相关政策、机制的制定还没有起步。

2) 无人机反制技术储备不足,设备低端重复率高。从发现跟踪上看,现代无人机的机体结构广泛选用复合材料等透波性能良好的材料制造,一些无人机具备雷达隐身能力。以电动机、活塞式发动机为动力装置的无人机,红外信息特征极弱,很难被雷达和声学、光学、红外探测器发现。

无人机在使用时,还可以刻意规避敌方固定的雷达站和防空阵地,反击和预警难;从攻击上看,美军已经试验成功部分型号的超高空、超高速无人机。而对于那些将其伪装成低空慢速的空中小目标的无人机,反制和打击更难。

3) 无人机技术综合,无人机反制缺少相应的人员和技术手段。从目前情况看,许多国家成立了专门的无人机人员或无人应用系统人员,配备了较多型号的无人系统装备,以提高其应用能力。而无人机反制的专门人员未见报道,理论缺乏,装备研发几乎没有。

6 结论

无人机作为全新的发展领域,涉及气动、结构、动力、通信等多种学科,机型种类繁多,目前已经形成庞大的无人机体系。为实现对无人机的反制,需要顶层规划、长远考虑、体系应对。只有通过构建开放、通用的体系架构,开展相关标准的制定,有针对性地开展核心技术和核心设备的研制,并逐步开展和完善无人机反制数据的收集工作,才能支撑起无人机反制技术未来的发展。

参考文献 (References)

- [1] 孙非, 何昌见, 曲一, 等. “低慢小”无人飞行器反制技术综述[J]. 中国安全防范技术与应用, 2018(6): 54-57.
- [2] 刘丽, 魏雁飞, 张宇涵. 美军反无人机技术装备发展解析[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(1): 60-64.
- [3] 谢谔. 美国陆军发布反无人机技术手册(上)[J]. 现代军事, 2017(7): 91-100.
- [4] 黄伟. 无人机健康发展亟需综合施策[EB/OL]. (2017-05-19) [2019-01-02]. http://www.caacnews.com.cn/zk/zj/huangwei/201705/t20170519_1214778.html.
- [5] 柏如玉. 国内外反无人机技术发展分析[J]. 中国安防, 2016(9): 31-34.
- [6] Müller W, Reinert F, Pallmer D. Open architecture of a counter UAV system[C]//Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2018. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2018: 1065106.
- [7] 蔡亚梅, 姜宇航, 赵霜. 国外反无人机系统发展动态与趋势分析[J]. 航天电子对抗, 2017(2): 59-64.
- [8] 刘玉文, 廖小兵. 反无人机技术体系基本框架构建[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(10): 18-20.
- [9] Sander J, Kuwertz A, Mühlenberg D, et al. High-level data fusion component for drone classification and decision support in counter UAV[C]//Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2018. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2018: 106510F.
- [10] Kim B H, Khan D, Choi W, et al. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar[C]//Laser Radar Technology and Applications XXIV. Bellingham International Society for Optics and Photonics, 2019: 110050C.
- [11] 焦士俊, 刘剑豪. 反无人机蜂群应用运用探析[J]. 飞航导弹, 2019(2): 50-53.
- [12] Zhang W, Zhang L, Yang B, et al. The development of counter-unmanned aerial vehicle technologies[C]//Global Intelligence Industry Conference (GIIC 2018). Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2018: 1083510.
- [13] 高博, 张乃千, 范旭. 反无人机电子战发展[J]. 国防科技, 2019, 40(1): 35-39.

UAV-counter requirements analysis and technical pedigree

XIANG Wenhao, WANG Dong, LIU Jia, DONG Fangchen, SUN Wen

System Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100036, China

Abstract With the maturity of unmanned technology, the phenomenon of black flight of unmanned aerial vehicle (UAV) is more frequent in China, which has seriously affected normal social order and national sovereignty security. Through the analysis requirement of UAV countermeasures and existing mature and related technologies, a relatively complete technical pedigree has been formed. For typical UAV, the paper proposes a preliminary thinking of countermeasures, then investigates the key technologies for UAV countermeasures and existing problems, so as to guide the counter system construction for black flight UAV.

Keywords UAV-counter; black-flight; technical pedigree ●



(责任编辑 王志敏)