

引用格式:温敬朋,杨健,王沙飞. 电子战装备技术发展现状与展望[J]. 信息对抗技术, 2022, 1(1): 1-10. [WEN Jingpeng, YANG Jian, WANG Shafei. Development status and prospect of electronic warfare equipment technology[J]. Information Countermeasure Technology, 2022, 1(1): 1-10. (in Chinese)]

电子战装备技术发展现状与展望

温敬朋¹, 杨健², 王沙飞^{2*}

(1. 国防科技大学电子对抗学院, 安徽合肥 230037; 2. 中国人民解放军军事科学院系统工程研究院, 北京 100089)

摘要 信息技术的快速发展为电子战装备技术的进步提供了巨大动力, 尤其是随着人工智能等技术的广泛应用, 颠覆性的电子战装备技术不断涌现, 将加速现代战争模式的演变。以具有代表性的军事强国为例, 综述了电子战装备技术的发展战略、主要技术特点和典型前沿技术, 在此基础上, 对电子战装备技术的发展趋势进行了展望。

关键词 信息技术; 电子战; 电子战装备技术; 认知电子战

中图分类号 E 145 **文献标志码** A **文章编号** 2097-163X(2022)01-0001-10

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2022.01.001

Development status and prospect of electronic warfare equipment technology

WEN Jingpeng¹, YANG Jian², WANG Shafei^{2*}

(1. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Institution of Systems Engineering, Academy of Military Science, Beijing 100089, China)

Abstract The rapid development of modern information technology has been a great force to promote the development of electronic warfare (EW) equipment technology. In particular, with the wide application of information technology such as artificial intelligence, some subversive EW equipment technology has been continuously emerging, the final results of which will strongly accelerate the evolution of modern war form. Taking the typical military powers in the world for example, this paper reviewed the development strategy, main characteristics and typical frontier technology of EW equipment technology, on the basis of which the development trend of EW equipment technology was further prospected.

Keywords information technology; electronic warfare; electronic warfare equipment technology; cognitive electronic warfare

0 引言

近20年来,以人工智能、大数据、新型感知等为代表的信息技术革命席卷全球,对人类社会的发展产生了深刻影响^[1]。其中,军事科技尤其是

电子战装备技术与信息技术的发展息息相关^[2-4],每一次信息技术的变革往往会引起电子战装备技术的快速迭代更新。在大国竞争的角力推动下,电子战装备技术已然成为信息技术领域备受关注的研究方向^[5]。

收稿日期:2022-05-09

修回日期:2022-06-04

通信作者:王沙飞, E-mail: rockingsandstorm@163.com

作者简介:温敬朋(1974—),男,博士,讲师,研究方向为电子对抗;杨健(1982—),男,博士,研究员,研究方向为认知电子战;王沙飞(1964—),男,高级工程师,博士研究生导师,中国工程院院士,研究方向为卫星通信信号处理与信息安全

电子战装备技术的发展已经使战争模式发生了根本性转变,也正是由于电子战装备的巨大威力,世界军事强国都不遗余力地利用现代信息技术的前沿成果发展先进的电子战装备技术,以技术优势争夺战争的主导权。作为世界主要军事强国,美、俄一直走在电子战装备技术的最前沿,不仅在宏观层面上进行了中长期的战略规划,对电子战装备技术进行系统布局,而且在微观技术层面上不断追求创新,试图获得具有颠覆性的新技术,以扩大与其他竞争者之间的技术代差^[6-7]。本文主要以这些国家为例对电子战装备技术发展现状进行剖析,并对其未来的发展趋势进行展望。

1 军事强国的电子战发展战略和技术路线图

研究主要军事强国电子战发展战略,是洞悉世界电子战装备技术发展现状与趋势的有效途径^[6]。从美、俄近年来发布的发展战略、发展政策和技术路线图等可以发现一条清晰的电子战装备技术发展主线^[8-10]。

1.1 电子战发展战略

1.1.1 美军电子战发展战略

纵观美军电子战相关发展战略,包括美国国防部《电磁频谱优势战略》(2020)及与之配套的《2020年电磁频谱优势战略实施计划》(2021);各军种颁布的军种级战略文件,如《美国陆军未来司令部作战概念 2028:赛博空间作战与电磁战》(2021)等,从这些文件可以看出,美军谋求获得电磁频谱优势的意图十分明显。对美军电子战装备技术发展影响最为深远的战略文件,莫过于美国国防部2020年颁布的《电磁频谱优势战略》。该文件作为指导美军电磁频谱作战能力发展的顶层规划,是对2013版美国国防部《电磁频谱战略》与《电子战战略》的整合与加强。这一战略文件推出的一个重要背景是“电磁频谱作战”概念。

2020年5月,美军通过《联合电磁频谱作战》条令(JP 3-85)提出了“电磁频谱作战”概念,指出“电磁频谱作战是为利用、攻击、防护和管理电磁环境而实施的协调性军事行动。”将传统电子战内涵由“侦攻防”三位一体向“用攻防管”四位一体、甚至整个电磁频谱领域转型(包括电子战、通信、雷达等传感器)。

为强化“电磁频谱作战”能力建设,《电磁频谱优势战略》的内容涵盖发展总体目标(文件表述为“愿景”)、指导原则、具体目标(文件表述为“战略目标”)、实施保障等多个方面。其中,第一个“战略目标”——“开发卓越的电磁频谱作战能力”,指明了美军电子战装备技术发展的方向。主要包括:一是改进技术,提升系统在复杂电磁作战环境中的感知、评估、共享、机动和生存能力;二是运用综合集成、开放架构、快速灵活的方法获取电磁频谱作战能力;三是利用商用技术,保持与最新技术的同步;四是建立强大的电磁战斗管理能力,加强电磁频谱作战的组织管理;五是部署具有破坏性的电磁频谱作战能力,给对手造成难以挽回的实质性打击。值得关注的是:《2020年电磁频谱优势战略实施计划》(2021),对于电磁频谱技术发展路径有更为清晰的描述,但美方并没有对外公开。

《美国陆军未来司令部作战概念 2028:赛博空间作战与电磁战》于2021年颁布,是美军军种电子战发展规划的典型代表。该文件相较于2018年颁布的《美国陆军网络空间作战与电子战概念手册:2025—2040》,在电子战装备技术发展需求的方面表述更为详细,具体将美军应该发展的网电技术分为3类:第一类是基础研究类,包括大数据分析、人工智能和机器学习、软硬件融合多功能系统、电磁防护与伪装等;第二类是先进技术与研究类,包括自主认知射频、量子数据处理(如里德堡传感器)和极端射频条件下的通信等;第三类则是突破性科学发现与创新类,包括灵活射频探测传感器和自动检测算法,可重构天线、收发信机、数字信号处理器与智能算法,支持分布式传感器与通信的非易失性随机存取存储器,低检测概率和保密通信模式硬件和协议,降级、断连及受限环境中连续数据传输,高保真建模仿真和模拟技术,纠缠态的创建维护和分发,以及认知电磁攻击算法等。

1.1.2 俄军电子战发展战略

与美军和北约相比,在整体实力相对较弱的大形势下,俄军剑走偏锋,大力发展电子战能力作为对付北约的非对称制衡手段。西方国家军方普遍认为,俄军电子战装备建设在2010年左右出现了一个“高潮”,一些美方专家甚至认为俄军电子战装备已领先美军20年。在2014年收复克

里米亚、支持乌东独立,以及随后展开的叙利亚军事行动中,俄军展示了强大的电子战能力,而这正得益于其提前制订并不断调整的电子战战略规划。

俄军以10年为周期制定电子战发展规划,目前已制订了3个10年规划。2002年,俄总统普京曾主持制定了《2010年及以后俄罗斯联邦电子战系统发展的基本政策》。2012年2月,俄总统梅德韦杰夫签署了《2020年及以后俄罗斯联邦电子战系统发展的基本政策》。俄罗斯电子战装备的发展,无疑这2份文件起到了重要的指导作用。根据俄总参电子战兵种负责人透露的信息,俄军电子战将朝5个方向发展:①加强全国电子战装备研发生产的宏观管理;②将电子战与对国家安全具有重要意义的其他领域整合(发展战略性电子战装备);③利用研发成果采购新一代电子战系统(提高电子战装备的技术含量);④进一步发展电子战教育科研体系;⑤扩大军事技术合作,加强电子战装备出口。出于保密的考虑,更进一步的细节并没发布。瑞典防务研究所(FOI)2018年发布的报告《电子战在俄罗斯武装部队中的地位和作用》,对俄军电子战装备技术的发展进行了进一步研判,认为俄军主要发展以下技术:一是破坏性电子战手段,比如定向能武器等;二是电磁防护技术,对抗西方的高能武器;三是对抗西方反导系统的电子战技术,加强对西方部署在罗马尼亚、瑞典等地区的反导系统雷达和天基侦察系统的对抗;四是发展反无人机电子战系统;五是发展以巡航导弹与空空导弹为载体的弹载电子战系统。

1.2 主要技术发展方向

综合分析军事强国电子战发展战略,可以凝练出电子战装备的几个主要技术发展方向。

一是颠覆性技术。美军认为,颠覆性技术是一种打破对手间军力平衡的技术或技术群,一旦应用,将改变战争游戏规则,使武器装备发展途径和作战样式发生根本性变化。从美军涉及电子战装备技术发展的战略文件不难发现,美军反复强调应发展具备“颠覆性”特点的电子战装备技术,保持对敌手构成威慑的绝对优势。美国国防部《电磁频谱优势战略》强调,应当重点发展革命性的、跨越式的技术和能力。2010年左右,俄军电子战装备虽数量众多,但技术上并不先进,

为此俄军在新一版规划强调了最新技术的应用,新研发装备技术含量明显增加,动辄出现的各类“汽车场”也随之减少。

二是顽存性技术。美军判断,未来大国竞争中的电子战系统,必须能够适应各种严酷的战场环境,有效抗敌硬摧毁,能在各种情况下特别是关键时刻,确保能力不丧失。《电磁频谱优势战略》指出,电磁频谱系统在设计时除完成预期功能外,还必须通过功能和物理性能的生存测试。系统的电磁防护功能必须具有足够的适应性,可以调整运行参数以优化性能、应对威胁,同时要防止有意或无意的电磁干扰或破坏。系统必须尽量减少电磁频谱的用频痕迹,降低被检测概率,并能够抵御基于射频的网络攻击。

三是开放性技术。美军强调,电磁频谱装备必须能够在复杂电磁作战环境中作战,并可灵活调整,以保持与其他系统之间的互操作性;能快速进行软硬件升级,以应对实力相当对手的威胁。这些要求必须在定义系统需求时予以考虑,并在设计和开发中加以实施,其重点是模块化、开放系统设计。美国国防部强调必须通过典型环境中的建模、仿真和测试完成对战役和战术级场景的评估。

四是破坏性技术。美军提出,破坏性能力是在己方预设的时间和地点,以对手无法预测的方式,拒止或欺骗对手。要开发具有破坏性的电磁战装备,需要国防部采用最先进的技术,利用人工智能和光子学等尖端技术,将自主能力、认知能力和非对称能力融合起来,以构建包含定向能、射频网络以及能敏捷组网的多功能电磁频谱系统。

2 推动电子战装备转型发展的几项关键技术

从信息技术的发展现状和趋势来看,推动电子战装备转型发展的关键技术包括认知电子战^[1]、集群电子战、可重构电子战、电磁战斗管理及反智能无人电子战。

2.1 让装备学会“思考”的认知电子战技术

将人工智能技术应用于电子战装备,相当于为电子战系统加上一个“智慧大脑”,实现“敌变我变”,可以从各个侧面对电子战装备性能产生深刻影响,因此能赋予电子战装备技术的巨大创

新空间,如表 1 所示。

表 1 使用不同人工智能技术的雷达电子战性能
Tab. 1 Performance accuracy of some radar EW after
the use of different AI techniques

| 应用 AI 技术的雷达 电子战研究方向 | 作战方式 | 相关性能指 标(准确率)(%) |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------|
| 基于卷积神经网络的雷达 脉冲调制识别 ^[12] | 电子支援 | 96.1 |
| 基于卷积神经网络和堆栈 自编码器的雷达信号 识别 ^[13] | 电子支援 | 99.8 |
| 基于深层卷积神经网络和 卷积去噪自编码器的雷达 信号脉内调制识别 ^[14] | 电子支援/ 电子对抗 | 95 |
| 用于雷达天线扫描参数识 别的 AI 算法(包括人工神 经网络、支持向量机、深层 神经网络) ^[15] | 电子支援 | 90 |
| 基于概率神经网络和 Ward 聚类方法的雷达辐 射源信号识别与分类 ^[16] | 电子支援 | 100 |
| 用于威胁检测、分类及对 抗方式选择的机器学习算 法(包括朴素贝叶斯分类 器和神经网络) ^[17] | 电子支援/ 电子对抗 | 96 |
| 用于雷达天线扫描周期估 计和扫描类型识别的 AI 算法(包括朴素贝叶斯、决 策树、人工神经网络和支 持向量机等) ^[18] | 电子支援 | 97 |

2.1.1 认知电子战技术的机理

传统电子战主要基于先验的威胁目标特征库来识别威胁,进而采取预先编程的对抗措施来对抗威胁,但这种方法难以在复杂的电磁环境中有效对抗未知雷达、通信等新威胁。电子战必须变得更加智能,才能适应环境的变化和威胁的发展^[19]。美军从 2010 年开始提出了认知电子战的概念,指出“认知电子战系统”是具有通过先验知识及自主交互学习来感知并改变周围局部电磁环境能力的智能、动态的闭环系统,可在实时感知电磁环境的基础上,高效自主地调整干扰发射机与接收机,能够实时感知电磁环境,并基于电磁环境的变化快速高效地调整干扰发射与接收,

从而提高系统对环境变化的响应速度,同时增强系统的可靠性。

与传统电子战系统相比,认知电子战系统具有特别的能力要求,主要体现在一下几个方面:第一,自主学习能力。系统能够在电磁环境中不断训练,不断积累并建立目标状态参数和对抗措施信息数据库。第二,自主判断能力。系统能够对作战效能进行判断,比如在电子干扰过程中能够实现从发现目标、实施干扰、效果评估的行动闭环。第三,自适应对抗能力。系统能够在复杂电磁环境下实时感知目标的威胁,自觉地进行对抗,并实现智能化对抗策略生成及资源分配。

总之,从现状来看,认知电子战可以实现三个重要转变:一是从点、链等分散目标向联网目标对抗的转变;二是从对已知目标到未知目标对抗的转变;三是从人工为主向人机交互、智能决策对抗的转变。实现这些转变的技术包括:认知侦察技术、认知建模技术、智能化干扰技术以及自适应电子攻击技术等。

2.1.2 认知电子战技术研究现状

迄今为止,美国在认知电子战的理论研究、新技术开发、系统研制诸方面一直走在世界的前列,已经开展了自适应雷达对抗、自适应电子战行为学习及认知干扰机等认知电子战装备的研制,正逐步进入从技术向能力转化。

美国海军通过对 EA-18G 的电子攻击单元(EAU)进行软件和硬件升级,将“反应式电子攻击措施”(REAM)项目的技术研究成果应用于 EA-18G 平台,从而使 EA-18G 具备认知电子战能力。2019 年,美国海军已在硬件开发、软件开发、集成和作战测试等方面授出多份合同,合同总额超过 9 200 万美元。美国海军于 2016 年启动的 REAM 项目继承了 DARPA“自适应雷达对抗”等项目的研究成果。按照计划,美国海军的 EA-18G Block II 改进型将最早具备认知电子战能力。

美国陆军在 2020 年 8 月 11 日至 9 月 18 日的“2020 融合”计划演习中利用人工智能技术实现了目标规划流程的快速运转。

美国空军虽然曾在一段时期内因专注于隐身技术的发展而放慢了电子战技术的推进,但随着认知电子战技术的发展,其研究重心迅速转变。在利用认知电子战装备为战机提供保护方

面,美国空军热情较高。继在 F-15 战机电子战系统中使用认知电子战技术后,又于 2022 年 1 月启动了“怪兽”(Kaiju)项目,计划将人工智能及机器学习等认知电子战技术应用到其他战机电子战系统升级中。该项目研发的系统能够帮助飞机穿透由多频谱传感器、导弹及其他防空力量组成的敌下一代综合防空系统。系统基于开放系统标准建设,能够便利地移植到已列装系统上。

2.2 可分布协同组网施效的集群电子战技术

随着精确自动控制、小型任务载荷集成等技术的快速发展,近年来基于无人平台的分布式集群系统在电子战领域得到广泛应用,将对未来作战方式产生深远影响。

2.2.1 集群电子战技术的机理

集群化电子战技术建立在电子战装备小型化及集群技术基础上,是未来电子战技术发展的重要方向。采用集群化电子战技术的大量小型电子战装备,能够通过分布式、协同式作战方式完成电子侦察、电子欺骗与电子干扰等行动。最为典型的集群化电子战装备,就是电子战无人机蜂群。分布于不同区域的小型电子战无人机,既可独立完成任务,也能够整体目标的驱动下,在共用体系架构及通信网络的支撑下,协作执行任务。

利用无人机实施电子战具有很多优势,不仅能够增强战场态势感知能力,而且能够通过抵近干扰和协同干扰增强干扰效能。无人机蜂群作战具有快捷灵活、分布抵近、行动隐蔽、效费比高以及人员伤亡风险小等优势^[20-21]。同时,无人机电子战也面临多方面的技术挑战。蜂群式无人机之间的协同与数据共享、无人机的智能与自主性、有人平台与无人平台的协作与编队作战都是无人机蜂群作战中需要解决的问题。同时,对无人机指控链路的防护也是需要重点关注的方面。

2.2.2 集群电子战技术的研究现状

美国在集群电子战研究方面进行了大量投入,开展了一系列项目研究,如:小精灵(Germ-lins)、进攻性蜂群使能战术(OFFSET)、动态网络自适应(DyNAMO)、低成本无人机集群技术(LOCUST)、拒止环境下的协同作战(CODE)等。这些项目在实时通信网络与系统架构建设、小型化电子战无人机部署、自主工作与网络协同工作、态势感知与威胁规避等方面取得进展。一些

项目的研究成果已经达到实战要求。其中,最典型的是小精灵项目^[22],该项目的作战场景是携带侦察或电子攻击载荷的无人机在没有可靠陆基或海基着陆点时,于敌方防区外通过运输机等空中平台发射,组成内部信息可共享、作战行动可协同的集群来突破敌方防御。任务完成后,系统可回收仍能使用的无人机。

典型的海上集群电子战项目是美国海军的“复仇女神”项目。2014 年 9 月,美国海军研究办公室(ONR)颠覆性技术主管在国防工业协会第十五届年度“科学与工程”会议上作的报告中,公布了“复仇女神”项目的部分信息。针对综合传感器的多要素特征网络化模拟,“复仇女神”项目致力于开发一种新的电子战体系,旨在通过电磁手段和声学手段投射出由虚假的飞机、舰船和潜艇目标组成的“幽灵舰队”。“复仇女神”的网络化协同电子战概念能够将逼真的虚假特征和诱饵无缝地投放到敌方分布于水面上和水面下的传感器上,可以在战斗中实现前所未有的欺骗性和迷惑性,而不只是简单地扰乱对手。

美陆军还展开了“空射效应”(ALE)蜂群无人机的研究。该种无人机可由“未来先进武装攻击侦察直升机”、突击运输直升机或“灰鹰”大型无人机从空中发射,通过自身携带的电子战载荷对敌方防空系统开展侦察与攻击,并通过战术网络将侦察和目标数据向有人驾驶平台、其他无人机和地面部队进行反馈。在 2022 年的美陆军 EDGE 22 演习中,对相关作战概念进行了演示,并取得了成功。

除美军开展的相应项目外,其他军事强国也开展了类似研究工作。比如英军 Alvinia 无人机蜂群项目专注于对敌防空压制,目前正在伊丽莎白号航空母舰上不断进行测试。该蜂群中的每架无人机都可单独进行干扰,整个蜂群能够协同工作,给敌防空系统造成更大的破坏。

2.3 下一代干扰机可重构电子战技术

现有电子战飞机的任务系统基于 20 世纪技术打造,其技术能力已严重滞后于新威胁的发展。基于新兴技术打造新一代电子战飞机,成为军事强国的当务之急^[23]。

2.3.1 可重构电子战技术概念

2009 年开始,EA-18G 电子战飞机接替 EA-6B 成为美军唯一可用于伴随支援干扰的电

子战飞机。该机 AN/ALQ-99 战术干扰吊舱为 20 世纪 60 年代后期研制,随着时间的推移,其技术已经落后,难以应对潜在对手的新威胁。美国海军认为,与其花费大量时间和资金升级一个已服役 40 多年的旧系统,不如开发具备开放式结构、软件定义、可扩展、高性能等特点的新一代可重构电子战装备。这种采用新技术的电子战装备于 2010 年 4 月正式立项,被称为“下一代干扰机”(NGJ)。下一代干扰机是美军未来空中电子攻击的主要工具和手段,其设计目标包括:干扰功率大、作用视场广(360°)、信号样式多、方向校准易、频谱覆盖广、干扰输出准、系统互动灵、体积重量小,以及操作简单、维护便利、升级快速等。为达成以上目标,下一代干扰机将采用宽带有源相控阵天线、捷变波束形成、氮化镓、数字干扰源、极化控制与智能干扰、数字射频存储等新技术实现装备架构和性能的可重构。

宽带有源相控阵/电扫阵列和波束形成技术是下一代干扰机设计的核心部分,其技术优势包括:一是增强干扰信号的等效辐射功率;二是增强多目标对抗能力;三是功率损耗小;四是抗反辐射攻击能力强。宽带、大功率、高占空比的需求给电子战阵列的设计带来了巨大的挑战,为此在下一代干扰机设计中,厂商采用氮化镓技术解决了功率和带宽问题,使用先进的热管理技术解决了散热问题,而波束形成技术则满足了多目标干扰需要。此外,下一代干扰机的干扰源可以通过超宽带直接数字合成和数字射频存储器 2 种方式来生成干扰信号。干扰源的功能可以通过软件定义,提高了持续对抗新威胁的能力。

2.3.2 下一代干扰机研究现状

美海军下一代干扰机由低、中、高波段干扰吊舱组成,分为 3 个增量阶段开发。在已经完成的中波段吊舱和即将完成的低波段吊舱中,有源相控阵、氮化镓等技术已得到有效运用。

增量一阶段开发中波段(NGJ-MB)的电子攻击能力,研发能够干扰现役以及未来预计服役的大部分陆海空基监视雷达和火控雷达的干扰吊舱。这个频段存在大量的射频威胁,故设定为下一代干扰机能力开发的优先频段,美海军 2013 年授予雷神公司中波段干扰吊舱研发合同,2020 年样机开始集成至 EA-18G,目前,该型吊舱已经具备初始作战能力。

增量二阶段开发低波段(NGJ-LB)的电子攻击能力,研发具有更广泛扫描区域,可干扰敌方反隐身雷达的干扰吊舱。美海军 2018 年 10 月授予 L3 公司和诺斯罗普·格鲁曼公司合同,开发低波段干扰吊舱样机,计划在 2022 年部署,2023 年形成初始作战能力。

增量三阶段开发高波段(NGJ-HB)的电子攻击能力,研发可用于对抗毫米波制导雷达的干扰吊舱,目前尚未确定承包商,计划在 2024 年部署,2025 年或 2026 年形成初始作战能力。

2.4 电磁战斗管理技术

随着美军《联合电磁频谱作战》(JP 3-85)条令的推出,电磁战斗管理概念及其相关技术迅速成为美军电子战领域新的研究热点。

2.4.1 电磁战斗管理的概念

美军认为,电磁战斗管理是对联合电磁频谱作战的动态监控、评估、计划和指导,目的是为行动方案的实施提供支持。更进一步说,电磁战斗管理就是联合电磁频谱作战的态势感知、决策支持、指挥控制和训练支持。为了实现这些功能,就必须要有相应的技术来支撑。比如,实时电磁态势的获取显示、行动方案自动生成与集成、智能决策支持、传感器与电子战系统的自动控制、频谱数据库管理、数据与指令的分发等。

2.4.2 电磁战斗管理系统研究现状

美军计划建立一套可供电磁频谱作战指挥及相关人员使用的电磁战斗管理系统,并将其视为推动电磁频谱作战落地的抓手,由国防信息系统局组织相关供应方进行验证^[24]。根据计划安排,美军电磁战斗管理系统的态势感知部分将于 2022 年上半年开展验证,并于 9 月达到初始能力,完整系统将于 2024 年交付。美军各军种共用的电磁战斗管理系统之所以能够迅速开展验证,是因为前期各军种已经开展了相应的预研工作。其中,美国陆军组织开发的电子战规划与管理工具(EWPMT)就是最为重要的成果之一,美国国防部有可能将其作为联合部队电磁频谱作战的首选指挥工具。

电子战规划与管理工具(EWPMT)由雷神公司研发,能够将美国陆军各级部队使用的不同类型电子攻击、电子防护及电子支援装备进行整合,并为电子战指挥人员提供可视化电磁态势。系统从 2014 年开始研发,目前已完成 3 个功能模

块的开发,正在对功能模块四进行验证。模块一是电子战参谋业务工具,能够完成电子战的计划拟制、目标规划、仿真评估等工作;模块二增加了频谱管理功能;模块三增加了在断连情况下通过接收其他传感器数据继续运行的能力;模块四则是通过自动化、机器学习、人工智能技术,生成能够显示信号强度及战场干扰的实时态势图,并将各个模块有机融合。

与美军的想法不谋而合,俄罗斯开发了一个全自动化的电子战指挥控制平台——拜利那系统(Bylina)。该系统能够自动开展态势分析、目标识别及命令发布等工作。拜利那项目的采购从 2018 年开始,2025 年将是该项目的一个里程碑节点。俄罗斯将拜利那项目和电子战看作是与美国在信息战领域竞争的一个优先项目。

2.5 反智能无人电子战技术

无人机力量是“穷国的空军”,自 2013 年开始,无人机在局部军事冲突中发挥了越来越重要的作用。2020 年 9 月 27 日爆发的阿塞拜疆和亚美尼亚纳卡冲突中,无人机更是实现了从“打辅助”到“唱主角”的华丽转身。面对日益增长的无人机威胁,世界各国开始高度重视反无人机手段建设。在各类反无人机手段中,反智能的电子战手段当仁不让地成为核心。

2.5.1 反智能无人电子战技术的机理

反智能无人电子战技术从机理上可分为软杀伤和硬杀伤两类。

软杀伤是针对无人机上的不同信息系统实施电子压制或欺骗干扰,以达到无人机与地面控制站断开链接、无人机致盲、无人机系统失效或导航信号欺骗等目的。综合来看,软杀伤主要针对的是无人机的卫星导航信号、通信信号、通信链路、无线网络或其他传感器。目前,利用无线电通信和导航技术可以实现对无人机的控制,例如:通过信号干扰就能够使无人机迫降或返航,通 GPS 对无人机进行欺骗等。

硬杀伤是采用火力打击和电子毁伤等方式,对无人机造成物理损伤。目前,针对无人机的电子毁伤方式主要是定向能攻击。定向能攻击,指利用定向发射的高能激光束、电磁波束、高能粒子束等直接攻击目标,目前发展较为成熟的是高能激光技术和高功率微波技术。20 世纪 70 年代起,高功率微波技术进入主要军事强国视野,现

正处于由实验室走向实战的关键阶段,主要用于对目标平台包括指挥控制系统等上面的电子元件实施干扰乃至损毁,威力巨大。自本世纪初,美军就着力推动包括高功率微波武器在内的定向能技术的开发与应用。与现有电子干扰手段相比,定向能攻击的毁伤力更强,可对敌关键作战平台或信息节点造成不可逆转的毁伤效果,具有“定点清除”能力;与传统火力打击手段相比,定向能攻击效费比更高、附带毁伤更小、溯源难度更大,能够“选择性”毁伤电子元器件,使目标丧失关键能力而非完全摧毁。定向能攻击技术正在向更高功率、更高精度、更强适应性的方向发展,下一步将集成在车辆、舰艇、飞机甚至卫星等作战平台上,进入实装、用于实战。

2.5.2 反智能无人电子战技术研究现状

软杀伤反无人机电子战方面,以色列、美国、俄罗斯等国军队处于前列。比如,以色列著名军工厂商拉斐尔公司于 2015 年推出了无人机穹(dronedome)系统,该系统由 RADA 公司开发的 RPS-42 战术空中监视雷达、MEOS 光电传感器以及 1 个 C-Guard 宽频信号干扰器等部件组成,能够 360°探测,并对探测到的目标进行跟踪和分类,综合分析所有数据后,对目标无人机发出攻击。

硬杀伤反无人机电子战方面,美国开发了一系列定向能武器^[25]。高功率微波武器能够一次打击一定范围内的多架无人机,且成本低,是对抗无人机集群的最有效手段。美国试图将高功率微波武器用于陆、海、空、天各个领域。例如,美军陆基高功率微波武器有主动拒止系统(ADS)、警惕鹰系统、反爆炸物装置、Phaser 反无人机系统等;在海基高功率微波武器方面,包括使用舰载雷达天线改装的电子设备杀伤系统和舰载高功率微波近程防御系统等;在空基高功率微波武器中,美军最引人注目的项目是反电子高功率微波先进导弹(CHAMP),CHAMP 是一种集成于巡航导弹中的空基高功率微波(HPM)系统,它借助巡航导弹精度高、射程远、突防能力强的有利条件,实现在巡航途中对经过区域实施微波打击;在天基高功率微波武器方面,美国已经开展技术试验验证^[26-27]。

针对各类反无人机系统的局限性,各国还积极研制综合反制类的反无人机系统,以实现反无

人机作战效能的最大化,如俄罗斯“蔷薇”电子战系统等。

3 电子战装备技术发展趋势

综合研判信息技术发展方向及世界强国电子战发展战略,我们认为,未来电子战装备技术发展将呈现出更加智能、敏捷、开放与强韧化等趋势。

3.1 智能化决策

未来各国将推进电子战技术更加注重认知、自适应能力建设,研发能有效先于敌方决策与方法选择的能力,以实现更高层次智能化目标。一是加强深度学习能力,包括信号的表示方式,运用神经网络技术实施分类识别,以及深度学习架构、无监督机器学习算法的进一步开发等。二是完善测试仿真和评价手段建设,包括认知电子战仿真系统的构建,模拟电磁战斗环境,开发认知电子战系统认知评价方法等。三是推进认知电子战技术的装备应用。硬件架构可以随着处理任务动态调整,自适应地调整系统参数,以应对复杂多变的电磁环境和未知目标。

3.2 网络化协同

从美国等军事强国集群电子战技术发展来看,“蜂群”电子战即将从概念演示逐步走向战场。蜂群可以采取的攻击行动包括致盲敌方雷达、对敌方防空火力自杀式攻击以及使用爆破弹药或电子战载荷攻击防空阵地等。下一步,世界各国将重点在以下几个方面加紧推进“蜂群”电子战技术开发:一是开展“蜂群”电子战智能化研究,通过开发以人工智能为中心的概念和方法,使大量无人机能够识别防空系统的特征,使无人机蜂群实现全自主防空压制作战;二是增强电子战“蜂群”与有人驾驶飞机、直升机及其他类型无人机的协同能力,并加强对发射平台的保护;三是加强通信保密,并增强蜂群内实时信息分配能力,尤其是在区域拒止场景下。

3.3 敏捷化响应

“兵贵神速”始终是战场上颠扑不破的真理,在电磁战场上也同样如此。电子战中的“快”主要体现在“观察—判断—决策—行动”的每一个环节中都要尽可能地“快”,达成先发式、主动式响应效果,阻止或破坏对手发现、识别、跟踪、目标化己方部队并实施交战的能力。为实施敏捷

化响应,未来电子战系统的硬件配置上将使用超宽带高效率低剖面天线、可重构电磁阵列、可重构射频;软件配置上,各种基于领域知识的机器学习算法将得以广泛使用。

3.4 全频谱机动

电磁频谱包含了人为的和自然生成的所有电磁辐射,包括无线电波、微波、毫米波、红外、可见光、紫外、X射线和 γ 射线。近年来,随着毫米波技术和光电技术的发展和信息处理技术能力不断更新,军用电子信息系统的工作频率不断向更高频段发展,也就为电子战装备向高频段发展打开了空间。美国国防部电子战投资战略指出,应发展宽带、多谱组件与系统,研发射频、光电、红外发射机与接收机,覆盖尽可能宽的电磁频谱。美军提出下一代干扰机工作频率范围应能够覆盖在未来半个世纪可能出现的所有的传统与非传统射频威胁。

3.5 模块化开放/可定义架构

包括电子战系统在内的武器装备研发采办周期冗长,跟不上威胁发展速度,始终是制约各国军队电子战能力提升的一个瓶颈。为了解决这一难题,美国国防部推出了模块化开放式系统架构标准,并在武器装备研发中大力加以推广。开放式系统结构标准已在各型电子战系统改进和研发中取得了很好的效果,美国陆军地面层系统、空中大型多功能电子战系统等均采取了这一标准。2019年初,美国各军种“十分罕见”地发布了一份联合备忘录,要求遵守开放标准。在未来电子战装备技术发展中,必然要建立模块化、开放化、可重构架构,发展软件定义、无限波形、标准接口系统,增强互操作与兼容能力,针对快速变化的环境,及时部署或插入先进的电子战能力,使其对己方能力的影响最小化。

3.6 低零功率对抗

相较持续多年的低烈度反恐电子战,未来大国博弈电磁战场的斗争将更加激烈,发展先进电子防护方法与技术,在日益拥塞的电磁频谱环境中,对己方或敌方用频活动进行防护,保障己方行动不受影响成为必然要求。为实现这一目标,世界各国将大力发展无源探测、隐身突防等“低至零功率”电子战技术。无源探测系统因其本身不辐射信号,大幅降低了被发现和截获的概率,大大提高了自身的生存能力。发展多信号无源

探测系统,并加强其与电子支援系统的协同是未来战场生存的有效途径。有统计公司预测,到 2023 年非协同无源探测系统的市场规模将达到 100 亿美元,平均年递增率将达到 36%。

4 结束语

经过近二三十年的发展,信息技术正以不可阻挡之势加速迭代更新,作为以先进信息技术为载体的电子对抗装备必然在信息技术发展中充分受益;另一方面,在大国博弈的背景下,电子战装备技术必然成为大国之间剧烈角力的重要领域,从而构成了对电子战装备技术发展的巨大推动力;再一方面,随着人工智能、大数据、新型感知等技术的广泛应用,以及电磁频谱与网络空间的深度融合和各种新型信息技术的叠加耦合产生的放大溢出效应,电子战装备技术将具有广阔的发展前景。

参 考 文 献

- [1] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning [J]. *Nature*, 2015, 521: 436-444.
- [2] LAZAROV L. Perspectives and trends for the development of electronic warfare systems[C]// *Proceedings of CREBUS*. [S.l. :s. n.], 2019: 1-3.
- [3] YOU S, DIAO M, GAO L. Deep reinforcement learning for target searching in cognitive electronic warfare[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 37432-37447.
- [4] GECGEL S, GOZTEPE C, KURT G K. Jammer detection based on artificial neural networks: a measurement study[C]// *Proceedings of ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning*. [S.l. :s. n.], 2019: 43-48.
- [5] PURABI S, KANDARPA K S, NIKOSE, et al. Artificial intelligence aided electronic warfare systems- recent trends and evolving applications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 224761-224780.
- [6] 徐弘良. 美国《电磁频谱优势战略》报告解析[J]. *中国无线电*, 2021(1):3-9.
XU Hongliang. Analysis of the US "Electromagnetic Spectrum Dominance Strategy" report[J]. *China Radio*, 2021(1): 3-9. (in Chinese)
- [7] 成飞, 王文. 美军 NEMESIS 电子战项目发展及启示[J]. *空军指挥学院学报*, 2020(4):72-75.
- [8] 姜福涛, 赵禄达. 美军电磁频谱战发展及现状[J]. *航天电子对抗*, 2021, 37(4):60-63.
JIANG Futao, ZHAO Luda. Development and current situation of electromagnetic spectrum warfare in US army[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2021, 37(4): 60-63. (in Chinese)
- [9] 常壮, 刘涛, 夏兴宇. 美军电磁频谱战发展探究[J]. *军事文摘*, 2020(13):52-56.
CHANG Zhuang, LIU Tao, XIAXingyu. Research on the development of electromagnetic spectrum warfare of US army[J]. *Military Digest*, 2020(13): 52-56. (in Chinese)
- [10] 李文清, 宋志峰. 美军联合电磁频谱作战发展动向[J]. *军事文摘*, 2021(5):5-10.
LI Wenqing, SONG Zhifeng. The development of joint electromagnetic spectrum operations in the US army [J]. *Military Digest*, 2021(5): 5-10. (in Chinese)
- [11] 王沙飞, 李岩. 认知电子战原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018:10-25.
Wang Shafei, LI Yan. Principle and technology of cognitive electronic warfare[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 10-25. (in Chinese)
- [12] LI X, HUANG Z, WANG F, et al. Toward convolutional neural networks on pulse repetition interval modulation recognition [J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(11): 2286-2289.
- [13] GAO J, LU Y, QI J, et al. A radar signal recognition system based on non-negative matrix factorization network and improved artificial bee colony algorithm[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 117612-117626.
- [14] QU Z, WANG W, HOU C, et al. Radar signal intrapulse modulation recognition based on convolutional denoising autoencoder and deep convolutional neural network[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 112339-112347.
- [15] WAN T, FU X, JIANG K, et al. Radar antenna scan pattern intelligent recognition using visibility graph [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 175628-175641.
- [16] LIAO X, LI B, YANG B. A novel classification and identification scheme of emitter signals based on ward's clustering and probabilistic neural networks with correlation analysis [J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2018(5): 1458962.
- [17] NOH S, JEONG U. Intelligent command and control agent in electronic warfare settings[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, 25(6): 514-528.
- [18] Barshan B, Eravci B. Automatic radar antenna scan type recognition in electronic warfare[J]. *IEEE Trans. on Aerosp. Electron. Syst.*, 2012, 48(4): 2908-2931.
- [19] 王沙飞. 人工智能与电磁频谱战[J]. *网信军民融合*, 2018(1):25-27.

- WangShafei. Artificial intelligence and electromagnetic spectrum warfare[J]. Civil Military Integration on Cyberspace, 2018(1): 25-27. (in Chinese)
- [20] 胡利平, 黄晓阳, 梁晓龙, 等. 美军无人机蜂群作战研究动态及应对策略[J]. 国防科技, 2021(4): 21-29.
HU Liping, HUANG Xiaoyang, LIANG Xiaolong, et al. Developmental trends in and countermeasures against UAV swarm operations by the US[J]. National Defense Technology, 2021(4): 21-29. (in Chinese)
- [21] 冯远博, 王冰切, 赵上. 电子对抗无人机蜂群组构建构想[J]. 飞航导弹, 2021(10): 55-59.
- [22] 徐辉, 辛乃军, 张荣胜. 应对美军“小精灵”无人机项目浅析[J]. 空军军事学术, 2018(6): 13-17.
- [23] 薛炳迪. 美军下一代干扰机对防空预警系统的影响及对策[J]. 空军工程大学学报(军事科学版), 2019(4): 112-114.
- [24] 唐建强, 李昊. 美军电磁战斗管理发展分析[J]. 电子信息对抗技术, 2020(2): 41-45.
TANG Jianqiang, LI Hao. The Analysis of electro-
- magnetic battle management in US[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2020(2): 41-45. (in Chinese)
- [25] 高博, 张乃千, 范旭. 反无人机电子战发展[J]. 国防科技, 2019(1): 40-44.
GAO Bo, ZHANG Naiqian, FAN Xu. Analysis on the development and application of anti-UAV electronic warfare[J]. National Defense Technology, 2019(1): 40-44. (in Chinese)
- [26] 陈杰生, 王文正, 王政. 高功率微波武器抗击无人机作战使用研究[J]. 空军军事学术, 2018(3): 28-30.
- [27] 禹化龙, 伍尚慧. 美军定向能武器反无人机技术进展[J]. 国防科技, 2019(6): 42-47.
YU Hualong, WU Shanghui. Progress and development trend analysis on US directed energy weapons against unmanned aerial vehicles[J]. National Defense Technology, 2019(6): 42-47. (in Chinese)

责任编辑 安 蓓