

引用格式:王健,杨渡佳,黄科举,等. 认知电子战发展趋势:从单体智能到群体智能[J]. 信息对抗技术, 2023, 2(4/5):151-170. [WANG Jian, YANG Dujia, HUANG Keju, et al. Developing trend of cognitive electronic warfare: from single-agent intelligence to multi-agent intelligence[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(4/5):151-170. (in Chinese)]

认知电子战发展趋势:从单体智能到群体智能

王 健,杨渡佳,黄科举,李小帅,杨俊安*

(国防科技大学电子对抗学院,安徽合肥 230037)

摘 要 随着人工智能、通信技术、无人系统等技术的快速发展,通信对抗装备智能水平不断提高,无人集群作战也在持续地深化和落地应用,这给认知电子战技术的研究带来了新的机遇和挑战,推动了认知电子战内涵从单体化向群体化演进。为促进认知电子战发展有效适应未来新型智能作战装备和新型无人集群作战样式,在综述认知电子战概念、内涵以及认知电子战单体智能研究的基础上,从无人集群作战背景出发,结合群体智能算法,提出了认知电子战群体智能的概念并对其内涵进行详细的阐述,指明了其对认知电子战的研究价值、应用价值以及发展前景。最后,在体系对抗的视角下,进一步对认知电子战群体智能未来可能的发展方向进行了较为全面的展望。

关键词 电子对抗;认知电子战;单体智能;群体智能

中图分类号 TN 97

文章编号 2097-163X(2023)04/05-0151-20

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.04-05.010

Developing trend of cognitive electronic warfare: from single-agent intelligence to multi-agent intelligence

WANG Jian, YANG Dujia, HUANG Keju, LI Xiaoshuai, YANG Jun'an*

(College of Electronics Engineering, National University of Defence Technology, Hefei 230037, China)

Abstract With the rapid development of new technologies such as artificial intelligence, communication technology, and unmanned systems, the intelligence level of communication countermeasure equipment has been continuously improved, and the concept of unmanned swarm combat has also been continuously deepened and developed. All these have brought new opportunities and challenges to the research of cognitive electronic warfare techniques, and also promoted the development of cognitive electronic warfare from single intelligence to swarm intelligence. To ensure the development of cognitive electronic warfare being adapt to the new unmanned swarm combat style in the future, this paper first reviewed the concept and the connotation of cognitive electronic warfare and the research background of cognitive electronic warfare single intelligence as well, then prospectively put forward the concept of cognitive electronic warfare swarm intelligence and elaborates its connotation in detail, and finally pointed out its research value, application value and development prospect for cognitive electronic warfare. In the end, from the perspective of system confrontation, this paper further made a

more comprehensive prospect of the possible future development direction of cognitive electronic warfare swarm intelligence.

Keywords electronic countermeasures; cognitive electronic warfare; single-agent intelligence; swarm intelligence

0 引言

认知电子战是在电磁环境复杂化及通信、雷达设备智能化、认知化的背景下提出的,其目的是解决传统电子战无法适应陌生作战环境下未知对手电子装备对抗问题。2010年前后,美国先后展开行为学习自适应电子战、自适应雷达对抗等认知电子战项目,正式开启了认知电子战领域的研究。在此后的10多年时间里,以美国为代表的世界各国开展了一系列的认知电子战技术研究和装备预先研究项目。业内专家普遍认为,认知电子战将颠覆传统电子战作战方式,通过采用更加高效的作战方法和更加智能的作战手段,实现在复杂电磁态势中对目标的精确感知、自主干扰和实时评估,解决传统电子战中的感知难、干扰难、评估难问题^[1]。当前认知电子战的发展主要依托人工智能技术,围绕感知、干扰、评估能力的自主化、智能化展开。

从实际战场应用的角度看,认知电子战的能力生成主要体现在构造信息不对称优势,并借助陆、海、空、天等传统物理作战空间及其作战要素实现战场优势。现代信息化战争不仅是敌对双方单兵、武器、军种或平台之间的博弈,更是将全部作战要素和作战系统作为统一整体,以获取作战态势优势为目标,在时空全维度进行博弈的体系对抗。因此,对认知电子战的研究不仅仅要从感知、干扰、评估等功能需求出发,还应该考虑体系对抗的作战背景下突出对多要素、全过程对抗运用的研究。如果将认知电子战感知、干扰、评估的认知化、智能化研究视为认知电子战单体智能发展,那么以体系对抗为视角,通过综合运用认知电子战单体智能能力,突出体系协同优势发挥的作战多要素、全过程能力提升则可以称为认知电子战的群体智能发展。

本文对认知电子战的研究现状进行综述,目的是通过综合考虑认知电子战作战运用需求与群体智能算法特点,从体系对抗的角度对认知电子战群体智能发展方向提出建议与展望。

1 认知电子战概述

1.1 电子战概念及面临的挑战

电子战也称电子对抗,是指利用电磁能、定向能、声能等技术手段,控制电磁频谱,削弱、破坏敌方电子信息设备、系统、网络及相关武器系统或人员的作战效能,同时保护己方电子信息设备、系统、网络及相关武器系统或人员作战效能正常发挥的作战行动^[2]。我军将电子战分为电子侦察、电子攻击和电子防御3种类型,其作用空间称为电磁空间。有别于陆、海、空、天等传统意义上的物理作战空间,电磁空间是依存于电磁频谱的各类传感器、通信和武器系统及其相关信息活动所构成的物理空间。电子战以独立的电磁空间为作用领域,它既是一种独立的作战方式,又在时间上和空间上与传统陆、海、空、天作战形式交织共存。

2015—2019年美国战略与预算评估中心(center for strategic and budgetary assessments, CSBA)相继发布《决胜电磁波——重拾美国在电磁频谱领域的主宰地位》《决胜灰色地带运用电磁战重获局势掌控优势》和《决胜无形之战:获得电磁频谱中的持久优势》等专题报告中,从不同角度阐述了发展电子战的重要性^[3-5];2021年7月美国发布《电磁频谱优势战略实施方案》,为确立电磁频谱优势战略、达成“在己方选择的时间、地点和参数上实现电磁频谱中的行动自由”的战略愿景提供了方向和实施纲领^[6]。电子战在当前及未来作战中的重要性可见一斑。

在其百年的发展历程中,电子战的主要发展趋势是:不断提高电子对抗装备的电磁感知能力、信息处理能力、干扰决策能力,以适应电子信息技术与人工智能技术的发展。时至今日,电子战面临的挑战主要来自以下几个方面:

一是电磁环境日趋复杂。随着电子信息技术的迅猛发展以及电子信息装备在战场中大量运用,特别是跳频通信、捷变频雷达等的广泛使用,电磁环境日趋复杂,电磁频谱日益拥堵,使得

对目标信号的分析 and 情报获取面临着巨大挑战。

二是目标智能水平不断提升。随着人工智能等技术日益完善,相继出现的认知无线电、认知雷达等系统具有很强的抗干扰能力,能够根据周边电磁环境自适应改变工作参数,对电子战侦察与干扰能力提出了更高的要求。

三是军事信息系统组网能力快速发展。随着组网通信系统、组网雷达系统的出现,军事信息系统的抗干扰性能也逐渐增强。如何快速发现组网系统的关键节点和关键链路,实现对子网系统高效、迅捷的干扰,都相应地对电子战系统的能力提出了更高的要求。

四是目标电子设备平时与战时的工作模式、波形不同。目标电子设备在战时所用的工作模式、波形等与平时的不同且特征上存在较大差异,这导致平时侦察积累的信号数据难以直接应用到实际作战中。

面对上述现实挑战,现有电子战系统已难以适应当前及未来智能化信息作战需求。因此,发展能够在陌生环境下对未知对手进行自主对抗的认知电子战技术意义重大。

1.2 认知电子战概念及内涵

“认知”的意思是“会意、感知、思考、推理、记忆、想象、学习、处理信息、应用知识、改变优先权等有意识的智力活动或设想的动作”。在技术层面,“认知”的概念最早是在 1999 年 JOSEPH M 发表的关于认知无线电的论文中提出的^[7]。认知无线电是一种智能频谱共享技术,它通过赋予一部分通信节点实时频谱监测和动态频率切换的功能,可以使该部分节点能够不断感知所处的无线电环境,通过充分利用授权用户的空闲时频通信资源来实现己方通信,从而实现频谱资源的高效利用。2006 年,“认知”概念进一步被美国科学家 SIMON H 引入到雷达中,提出了“认知雷达”的概念,并逐渐发展为认知雷达网。认知雷达的目的是通过对历史和当前环境的检测、分析、学习和推理,自适应调整系统的接收和发射,使用最适合的系统配置,以实现目标有效、可靠且稳定的感知和跟踪,从而大幅度提高雷达系统的性能^[8-9]。

美军率先将“认知”理念融入电子战领域,提出认知电子战概念,其有别于传统电子战的主要特征在于:1) 自适应感知。能够在周围环境中实

现对特定目标的侦察;2) 自适应判断。能够根据对目标的侦察信息分析出可用知识;3) 自适应攻击。能够根据分析出的知识自动优化电子攻击样式;4) 自适应评估。能够根据目标变化进行干扰效果评估,并指导下次电子攻击。基于认知电子战以上特征,可以将其视为感知—识别—决策—行动 (observation—orientation—decision—action, OODA) 理论在电子战领域的应用,认知电子战这种基于动态知识库的“感知→识别→决策→行动→感知”的闭环学习处理流程充分体现了 OODA 的循环、实时、嵌套特性,通过与机器学习技术结合,可以有效提升电子对抗装备在复杂电磁环境下对抗智能化作战目标的作战效能^[10],文献[11]给出了认知电子战 OODA 环系统功能框图,如图 1 所示。

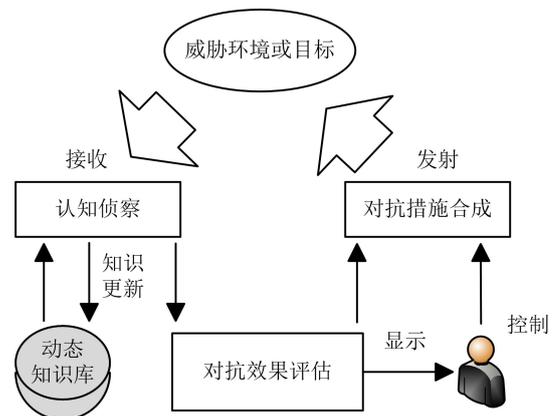


图 1 认知电子战 OODA 环功能框图

Fig. 1 Systematic diagram of the OODA loop of cognitive electronic warfare

在认知电子战定义方面,杨小牛院士团队在“认知化电子战”和“认知系统电子战”这 2 种理解认知电子战内涵方式的基础上给出了认知电子战内涵描述,即“认知电子战是一种在软件无线电技术基础上实现的智能化、网络化(知识共享)、多功能电子战理念,除了可以对抗传统电子信息系统以外,还可以对抗新兴的认知电子信息系统(认知无线电台、认知网络、认知雷达等)”^[12]。王沙飞院士认为装备认知能力的提升集中体现了认知电子战的根本属性,是区别于传统电子战的显著特点,并给出认知电子战的定义:以具备认知性能的电子战装备为基础,注重自主交互式的电磁环境学习能力与动态智能化的对抗任务处理能力的电子战作战行动,是电子战从“人工认知”向机器“自动认知”的升级^[13]。

认知电子战系统功能组成方面,比较经典的架构是将认知电子战系统按照功能分为认知侦察模块、对抗措施合成模块、对抗效果评估模块和动态知识库模块,如图1所示。其中认知侦察模块主要功能是从电磁环境中完成对目标信号的捕捉、分选、识别,并将识别结果传给对抗措施合成模块和对抗效果评估模块,同时将识别信号特征数据传给动态知识库模块,用于动态知识库中认知侦察相关模型、参数更新。对抗措施合成模块主要功能是根据认知侦察模块传来的识别结果确定干扰策略、优化干扰波形、规划干扰资源,完成对目标的电磁干扰。对抗效果评估模块主要功能是通过对于干扰前后认知侦察模块识别结果进行比对,完成对目标受扰情况的分析,从而判断出认知干扰效果,并且干扰效果传给动态知识库模块,用于动态知识库中认知干扰相关模型、参数更新。动态知识库模块主要功能是存放认知侦察模块、对抗措施合成模块、对抗效果评估模块进行作用时所能用到的所有模型、参数、数据等先验知识,并利用反馈信息进行认知学习,完成动态更新。

1.3 美国认知电子战技术项目进展情况

美国率先将认知技术引入电子战,开启认知电子战的研究。从2008年起,美国国防部就开始陆续开启相关项目的资助,从而推动认知技术和人工智能技术在下一代电子战系统中的应用。下面列举过去10多年美国比较有代表性的认知电子战技术研究项目。

1) 行为学习自适应电子战项目 (behavioral learning for adaptive electronic warfare, BLADE)^[14-15]。早在2010年,该项目就在开发一个能够自主学习新威胁的电子战设备,以对抗战术环境下的自适应无线通信威胁,要求具备“检测与拒止战场上的新型通信威胁”“实时提供有关干扰效能的反馈”“对多个新出现的威胁同时进行外科手术式精确攻击”等能力^[12]。

2) 认知干扰机项目 (cognitive jammer, CJ)^[16]。通过提高干扰机的干扰效率来提升干扰机对敌方通信系统、雷达系统以及导航系统的破坏能力,从而提升美军对于电磁频谱的掌控能力。该项目所研究的认知干扰机系统由软件定义体系网络构成,该系统具有对战场变化的快速适应能力,能够有效应对采用认知无线电技术的

敌方目标。

3) 极端射频条件下通信项目 (communications under extreme RF spectrum conditions, COMMEX)^[17]。为了应对极端条件下的通信,该项目试图提高在适应未知、极端、复杂干扰以及自适应干扰条件下的自适应通信能力,通过构建“认知”能力躲避敌方干扰和自适应干扰抑制能力抑制敌方干扰,保障己方战术数据链系统能够在高对抗性射频条件下正常工作。

4) 自适应雷达对抗项目 (adaptive radar countermeasures, ARC)^[18]。通过研发该项目,能够形成对抗敌方自适应雷达系统的机载电子战能力,通过利用信号处理和机器学习等技术来开发智能算法,通过实时评估其行为、自主生成对抗措施、评估其效果并将结果反馈给武器系统操作员,形成在短时间内对抗敌方新出现的、未知的、不明确的新型雷达能力。

5) 认知电子战项目 (cognitive electronic warfare, CEW)^[19]。该项目的研究内容主要包括自适应认知电子战技术、高吞吐量和快速可编程电子战系统技术、自适应的电子战仿真环境和创新电子战概念。自适应认知电子战将包括应用自适应机器学习算法取代传统的静态辐射源数据库和预编程对抗等措施,以对抗那些波形带宽灵活、功能多样、具备电子保护模式的电子战系统^[13]。

6) 电子战技术项目 (electronic warfare technology, EWT)^[20]。该项目是在电子战中应用自适应和机器学习算法,针对电子战作战对象的波形、带宽、功能、电子防护模式越来越灵活的现状,具备能描述实时动态频谱知识、能感知并学习射频特性与行为、能对威胁系统与环境进行推理,并动态、及时形成电子策略等多种能力^[12]。

7) “梅文”计划 (project Maven)^[21]。该项目的研究目的是将国防部海量数据快速转变为可用于行动的情报。具体采用“三步走”策略:一是对数据进行编目和标注;二是通过与谷歌等企业合作利用已标注数据为特定任务和地区量身定制一套算法;三是将算法交付部队,探索如何最好地对其加以利用。2018年五角大楼宣布以Maven项目为模型,建立一个新的联合人工智能中心,重点关注0~3年内人工智能在国防部的快速应用。在《美国国防部2018年人工智能战略概

要》中,联合人工智能中心被进一步提升为协调美国国防部推动人工智能军事应用、贯彻美军人工智能战略的核心机构。

8) 射频机器学习系统项目(radio frequency machine learning systems, RFMLS)^[22]。通过该项目的研究,打造特征学习、资源聚合与显著性、自主射频传感器配置、波形合成 4 种关键能力,最终目标是开发一种驱动型、具备从数据中进行学习能力的新一代射频系统。

9) “怪兽”认知电子战项目(Kaiju)^[23]。这是一个 2022 年新启动的项目,旨在应对大国综合防空系统威胁,开发下一代综合防空系统,以提升大飞机的生存能力。项目分为 9 个部分,均按照怪兽名称命名,综合应用认知、系统集成、人工智能、机器学习等新技术实现整体防护能力提升。

2 认知电子战单体智能研究

在单一平台上,典型的认知电子战系统需要具备电磁感知识别、电磁干扰决策和电磁干扰效果评估能力。其中,电磁感知识别提供情报基础,电磁干扰决策提供行动方案,电磁干扰效果评估提供优化依据,三者相互支撑,共同构成 OODA 环路。

2.1 电磁感知识别

电磁感知识别旨在感知电磁环境、识别电磁目标、提取目标参数、分析目标意图,为电磁干扰决策和电磁干扰效果评估提供情报基础。随着人工智能方法应用于频谱态势感知、目标识别^[24]、参数提取、意图分析等任务,基于认知的电磁感知识别技术具有低时延、高精度优势,但仍面临训练样本稀缺、环境动态变化、未知信号涌现等问题。

2.1.1 训练样本稀缺

由于电子战的非协作特性,对信号样本进行标注依赖大量的情报支持,导致可用的训练样本稀缺。稀缺的训练样本使得神经网络等感知识别模型容易过学习,在测试阶段的识别性能下降。

针对有限样本学习问题,现有研究主要从数据处理和模型训练 2 个方面优化。在数据处理方面,现有研究通过数据增强产生新的训练样本,一种方式是利用电磁信号特性对训练样本进行变换,产生不改变信号类别属性的新样本,如添

加高斯白噪声、时间镜像^[25]等;另一种方式是训练生成对抗网络生成新样本,2 种方式在辐射源个体识别、调制识别^[26]等任务中均已得到应用。在模型训练方面,度量学习及元学习有助于增强有限样本条件下的泛化能力。基于度量学习的方法用对比损失、三元组损失等代替分类损失作为优化目标,提高电磁信号特征的聚类特性^[27];元学习通过构造多个子任务,从子任务中学习一组较好的超参数,降低对目标任务的样本量需求^[28]。

此外,由于无线信号电磁环境的开放特性,容易获得大量的无标注样本,无标注样本中蕴含的信息,能够增强感知识别模型的泛化能力。半监督学习基于平滑假设、聚类假设、流形假设^[29],利用标注样本和无标注样本共同训练模型,能提高电磁感知识别性能^[30]。自监督学习通过构造辅助任务,从无标注样本中学习先验信息,起到正则化作用,增强了电磁感知识别模型的泛化性能^[31-32]。

2.1.2 环境动态变化

由于电磁环境动态变化,电磁感知识别模型在测试阶段的样本分布与训练阶段存在差异,不满足独立同分布条件,导致模型感知识别性能下降。

通过模拟电磁环境特性,对训练样本进行处理,能够增强感知识别模型对环境变化的适应能力。如文献[33]通过模拟信道特性,产生不同信道特性的训练样本,训练得到的辐射源识别模型对信道变化具有较强的鲁棒性。

若存在不同环境条件下的样本,利用迁移学习方法,学习不同环境下的样本特性差异,能够降低环境变化对电磁感知识别模型的性能影响。在辐射源个体识别领域,迁移学习可用于降低载频^[34]、接收机畸变^[35]、信道^[36]、调制方式^[37]、动态噪声^[38]等对识别性能的影响。此外,迁移学习在调制识别^[39]、频谱地图构建^[40]、频谱预测^[41]等领域均得到应用。

通过网络结构设计构建对环境变化鲁棒的感知识别模型,能够提高环境变化下的感知识别性能。例如,复数神经网络在辐射源识别、调制识别、信号波达方向估计、无线信号定位等研究中均被证实能够提升对噪声的鲁棒性,在卷积神经网络中嵌入注意力机制有利于提升辐射源识

别模型的抗噪声性能^[42]。基于自注意力机制的Transformer网络也被用于增强电磁感知识别模型的信道适应性和抗噪能力^[43]。

2.1.3 未知信号涌现

在电子战环境下,新的未知信号不断涌现。为了应对随时可能出现的未知信号,首先,需要实现对未知信号的开集识别;其次,需要具备利用新信号动态更新模型的能力,使模型能够随着未知信号的出现不断提升感知识别能力。

在未知信号识别方面,开集识别一方面利用特征边际约束、互易点学习等方法增强未知信号特征与已知信号特征的区分度,另一方面利用OpenMax、混合高斯模型等方法构造开集分类器,实现对未知信号的精准识别^[44-46]。

在模型动态更新方面,为了克服“灾难性遗忘”问题,现有研究借鉴增量学习,采用数据回放、正则化约束、参数隔离等方法,通过保留一定的旧样本、用旧模型约束模型更新、在旧模型基础上扩展模型参数等手段,实现电磁感知模型的持续增量学习^[47]。

2.2 电磁干扰决策

电磁干扰决策旨在对目标发射干扰信号,通过选择干扰样式、优化干扰波形、分配干扰资源,以最小代价实现对目标电磁频谱使用效能的最大程度削弱和破坏。干扰样式选择是指对抗系统通过对目标信号的威胁感知建立对抗目标多种状态与已有干扰样式之间的最佳对应关系,从而能够针对目标的不同状态形成一套最优干扰策略;干扰波形优化是指对抗系统能够根据外界电磁环境的变化,充分利用我方的干扰资源,自主地、动态地、实时地优化生成新的干扰波形,从而形成灵活多变的干扰样式,以适应现代电子战复杂的电磁环境;干扰资源分配是通过合理分配干扰资源,使我方既有的干扰资源在面对目标信息系统时发挥最大的干扰效益^[13]。干扰样式选择、干扰波形优化、干扰资源分配本质上均属于优化问题。

2.2.1 数学优化方法

在解空间较小时,可以通过数学优化方法得到全局最优解。文献[48-49]利用博弈论分析电子战场景,求解最优干扰样式,文献[50]采用交替方向乘子法优化干扰波形,文献[51]采用匈牙利算法求解最优干扰资源分配方式。数学优化方

法通常能够得到最优解,但当求解问题较为复杂时,难以应用数学优化方法求解。

2.2.2 启发式优化算法

启发式优化算法通过基于直观或经验构造的算法,能够得到复杂优化问题的近似最优解。文献[52]采用遗传算法选择干扰样式,文献[53]采用粒子群算法优化干扰波形,文献[54]采用遗传-蚁群融合算法、文献[55]采用模拟退火遗传算法实验干扰资源分配。启发式优化算法能够获得复杂问题的近似最优解,但算法运行效率低,难以适应环境动态变化的情况。

2.2.3 强化学习

强化学习方法在与环境交互过程中,通过“试错”的方式不断优化,具备近似最优的求解能力和动态环境适应能力,近年来在电磁干扰决策领域得到广泛研究。文献[56-57]采用强化学习方法实现高实时最佳干扰样式选择,文献[58]采用Q学习方法实现自适应干扰波形设计,文献[59-60]等采用深度强化学习实现最优干扰资源分配。强化学习方法具有随环境变化动态决策的优势,但如何结合电磁干扰领域知识提升决策质量,以及如何实现不同电磁干扰场景下决策经验的迁移利用,是当前强化学习方法在电磁干扰决策应用中亟需解决的问题。

2.3 电磁干扰效果评估

电磁干扰效果评估为电磁干扰决策提供优化依据,是认知电子战系统实现闭环的关键环节。电磁干扰效果评估的难点是在非合作条件下,根据有限的观测信息,难以实时准确地评估干扰效果。评估干扰效果的主要思路是通过对辐射源行为的动态变化指标进行分析、学习、推理,并以此作为实施干扰效果评估的基础。

2.3.1 效果评估指标

不同的评估对象有不同的评估指标。以通信干扰为例,干扰前后目标信号及行为的变化可以从物理层、链路层、网络层3个方面的指标描述。物理层指标包括信号带宽、频率、功率、传输速率、调制方式等^[61];链路层指标包括编码译码方式、码率、帧封装格式、接入机制等^[62];网络层指标包括通信网络拓扑结构、网络类型、组网跳频图案等^[63]。

2.3.2 评估指标权重

针对不同干扰效果评估指标重要性难以确

定的问题,文献[64]采用层次分析法,依据各指标包含的信息量确定指标重要性,文献[65]采用向量相似度赋权方法,更好地表征各指标干扰前后的变化情况,文献[66]分析了干扰效果评估指标的不确定性,并研究了基于不确定性的指标权重计算方法。

2.3.3 效果评估算法

在干扰效果评估算法方面,文献[66]研究了基于随机森林与神经网络的干扰效能评估算法,提高评估算法的性能和可靠性,文献[67]研究了基于模糊多属性决策的干扰效果评估算法,降低指标不确定性对算法性能的影响,文献[68]研究了基于卷积神经网络和去噪自编码器的干扰效果评估算法,增强指标缺失条件下的评估性能。

3 认知电子战群体智能内涵

本文所提的“认知电子战群体智能”概念是由“认知电子战”和“群体智能”2种概念结合而来。2种概念之间的联系在于都以获得“智能”为目标:“认知电子战”旨在将传统电子战设备赋予认知能力,以实现传统电子战设备无法达到的智能水平;“群体智能”旨在将多个具有无智能/低智能的个体赋予协作能力,以实现单个个体无法达到的智能水平。2种概念的主要区别在于“认知电子战”所强调的感知智能、干扰智能和评估智能并不涉及“群体”的概念,这也是本文第2节中将现阶段认知电子战研究归纳为“认知电子战单体智能”的原因。之所以要将“认知电子战”和“群体智能”2种概念进行结合,提出“认知电子战群体智能”概念,是由于当前无人集群作战样式迅猛发展,认知电子战的能力发展迫切需要适应无人集群作战运用,能够更加鲜明地强调“认知电子战”的感知、干扰、评估等要素要以“群体”为基础体现出智能水平。

3.1 无人集群作战发展现状

随着电子信息技术以及人工智能的迅猛发展,战场环境已成为强干扰、高动态、对抗性拒止环境,并且作战平台在执行电子侦察、电子干扰等作战任务时所面临作战场景越来越复杂,对作战平台的能力要求越来越高^[69]。单一平台集中多种手段提升综合作战效能,战场上更容易被视为高价值目标予以优先打击,从而导致生存能力堪忧,小型化集群作战越来越成为战场中重要力

量。以当前的俄乌冲突为例,在整个冲突期间,双方均未大规模出动战斗机,而是大量运用成本低廉、使用灵活、操作方便、种类多样的无人机,执行持久监视侦察、定点清除、自杀式攻击等任务,充分发挥了无人机强时敏性、高效费比和高自主化作战优势。据统计,一年内俄乌双方共计投入各类无人机装备数十型,总量超4000架,而其中小型化集群无人机占比据估计超过80%,成为俄乌战场空中力量主体。

为应对风险挑战,美军提出分布式杀伤^[70]、马赛克战^[71]等作战概念,通过将不同作战设备分布于大量的无人小型作战平台上,实现兵力分散、火力集中的效果,在降低作战风险的同时保证杀伤链完整。基于这种作战理念,美军开展了基于无人集群的作战样式、投放回收、集群组网、体系论证等全方位的研究,无人机集群、无人艇集群、无人车集群等是其目前阶段的典型装备,多颗不同能力的卫星也可组成卫星集群,跨域异构无人集群进一步呈现出更为复杂的无人系统群体智能形态^[72]。由于无人集群成本低、灵活性好,具有形成数量规模以及能够避免人员伤亡的优势,无人集群作战已逐渐成为军事智能的新方向^[73-74]。

下面列举美军一些典型的无人集群项目:

1) 低成本无人机集群技术(low-cost UAV swarming technology, LOCUST)项目^[75]。该项目的主要方法是通过快速释放大量的小型无人机及其自适应组网以及自主决策控制,完成自主侦察、自主打击等各种作战任务。该项目的2个重要特点是:1) 能够快速释放大量无人机,在短时间内形成绝对数量的压倒性优势;2) 无人机集群实现了高自主控制水平,集群间能通过信息共享完成协同侦察、协同决策、协同控制。

2) 拒止环境下协同作战(collaborative operations in denied environment, CODE)项目^[76]。该项目通过开发集群协同软件系统来增强无人机集群在通信、导航受限环境下的自主协同作战能力。该软件系统基于无人机集群之间的信息共享能力,充分利用不同无人机的功能优势,使得在部分无人机平台功能受限的条件下,集群仍然能够通过功能互补,高效有序地自主完成任务执行,从而提高任务执行效率。同时软件系统能够降低对操作人员的认知和操作负担,通过集群

自主感知周围环境,实时生成行动建议,并根据操作员所选择的指令进行下一步行动。

3) 小精灵(gremlins)项目^[77]。通过开发能够实现空中发射与回收的低成本无人机系统,以形成在拒止环境下遂行多元化作战任务的体系作战能力。其基本思路是采用小型无人机集群搭载各类侦察、干扰模块,并通过大型运输机运送至防区外进行投放,无人机通过自组织网络与协同技术实现对作战目标的侦察定位、电子干扰以及引导火力摧毁。

4) 快速轻型自主性(fast lightweight autonomy, FLA)项目^[78]。通过开发能够适应低功耗计算载荷的自主算法,实现旋翼无人机在通信受阻、导航丢失的情况下,利用自身惯性测量模块来达成无人集群协同编队与任务执行。该项目主要的考虑是充分利用低成本旋翼无人机、低成本传感器和低功耗计算机,仅通过算法设计来实现无人机集群在室内、地下或干扰环境下的任务执行。

5) 进攻性蜂群使能战术(offensive swarm-enabled tactics, OFFSET)项目^[79]。通过发展蜂群战术开发生态系统并支持开放的系统架构,最终形成面向城市巷战的跨域异构蜂群作战能力。项目研究设立了3个阶段性目标:第1阶段是采用50架无人机完成15~30 min区域封锁任务;第2阶段是采用100架无人机完成1~2 h区域侦察任务;第3阶段是采用250个无人系统(无人车与无人机)完成6~8 h区域占领任务。

6) 天空博格人(Skyborg)项目^[80]。这是2019年首次公开的项目,开发能够应用于战斗机的人工智能自主模块,该模块能够搭载在无人机或有人机上,实现基于人工智能的自动驾驶或辅助决策。该项目关键目标是通过装载人工智能自主模块,提高不同类型无人机的任务规划能力以及有人机/无人机协同作战能力。

7) 空战演进(air combat evolution, ACE)项目^[81]。该项目是通过实现飞机空中格斗(也称为狗斗, Dogfight)的自主化,即将飞行操作等低等级飞机操控活动交给自主系统来完成,让飞行员能够更加专注于目标选择、战术制定等更高等级的决策活动,从而使飞行员能够从复杂繁琐的操控活动中解脱出来,实现操作员向指挥员的转变,为实现未来有人/无人编队奠定基础。

小型化、无人化、智能化的作战样式催生了基于无人集群的群体智能能力需求,当前已有大量研究针对无人集群,特别是无人机集群的群体智能方面^[82-87]。从认知电子战的角度看,当不同作战设备分布于不同小型化无人平台上,单个无人平台的功能是有限的。以电子战无人蜂群为例,根据作战功能定位不同,蜂群中不同的无人设备可能搭载了不同的作战载荷,如不同频段、不同性能的侦察载荷和干扰载荷等^[83]。为了使不同平台上的作战载荷协同作战并发挥整体作战效能,在无人蜂群发射或投放后,需要实现自行编队、分布式组网,并且到达指定作战区域后,无人蜂群根据作战任务自主进行任务分配、路径规划、资源分配,以实现区域内目标的自主协同侦察与协同对抗。

可以看到,无人集群作战背景下认知电子战研究范畴由单一平台的感知、干扰、评估等功能研究拓展到了群体协同感知、群体协同决策、群体任务规划、群体协同干扰等群体智能研究范畴,现有的认知电子战单体智能研究已及无法满足集群作战需求,因此需要开展认知电子战群体智能研究。

3.2 群体智能发展现状

群体智能指多个单体通过相互协作以及与环境交互共同完成一个或多个复杂任务或目标。群体智能概念最早于1989年由BENI等^[84]提出,用于研究自组织、非同步、非智能的细胞机器人,通过相互间的协作完成一项全局任务的智能行为。一般情况下,群体是由一定规模的同模态个体构成,由于单个个体的能力通常难以完成复杂的任务或目标,但通过共识的简单行动规则,实现群体合作与分工,产生复杂的群体运动行为,在整个群体宏观层面表现出一种分散、去中心化的自组织行为^[85]。

群体智能的行为在自然界中很常见,生物群体通过个体自主决策和简单信息交互,通过相互协作共同达到一个目标,例如候鸟迁徙、蚁群觅食、狼群捕食^[86],通过在群体活动中相互启发、相互协作,会在群体层面涌现出一些新的整体行为和系统能力,实现“1+1>2”的效果^[87]。因此,群体智能概念的快速兴起是通过模仿生物行为提出仿生类智能算法展开的,如FLORIAN等^[88]通过观察模拟鱼群行为,制作了3D的水下机器人,

这些机器人不需要通过外部的控制,就能展现出鱼群的群体移动行为,这是第一次实现水下的 3D 群体行为,研究成果作为封面文章发表在 Science Robotics 期刊上;另外一种常见的动物群体行为是鸟群,著名的粒子群算法就是通过模拟鸟群寻找食物的过程来获取最优解;蚁群算法是通过模拟蚂蚁寻找食物过程产生的,认知能力受限的单

个蚂蚁可以通过群体协作找到食物源和蚂蚁巢穴之间的最短路径。除了仿生类智能算法之外,还有很多非仿生类算法也体现了群体智能的概念,如遗传算法^[89]、模拟退火算法、禁忌搜索算法等。陈健瑞等^[90]按照仿生算法和非仿生算法的分类方式对现有群体智能算法进行了详细的分类汇总,如图 2 所示。

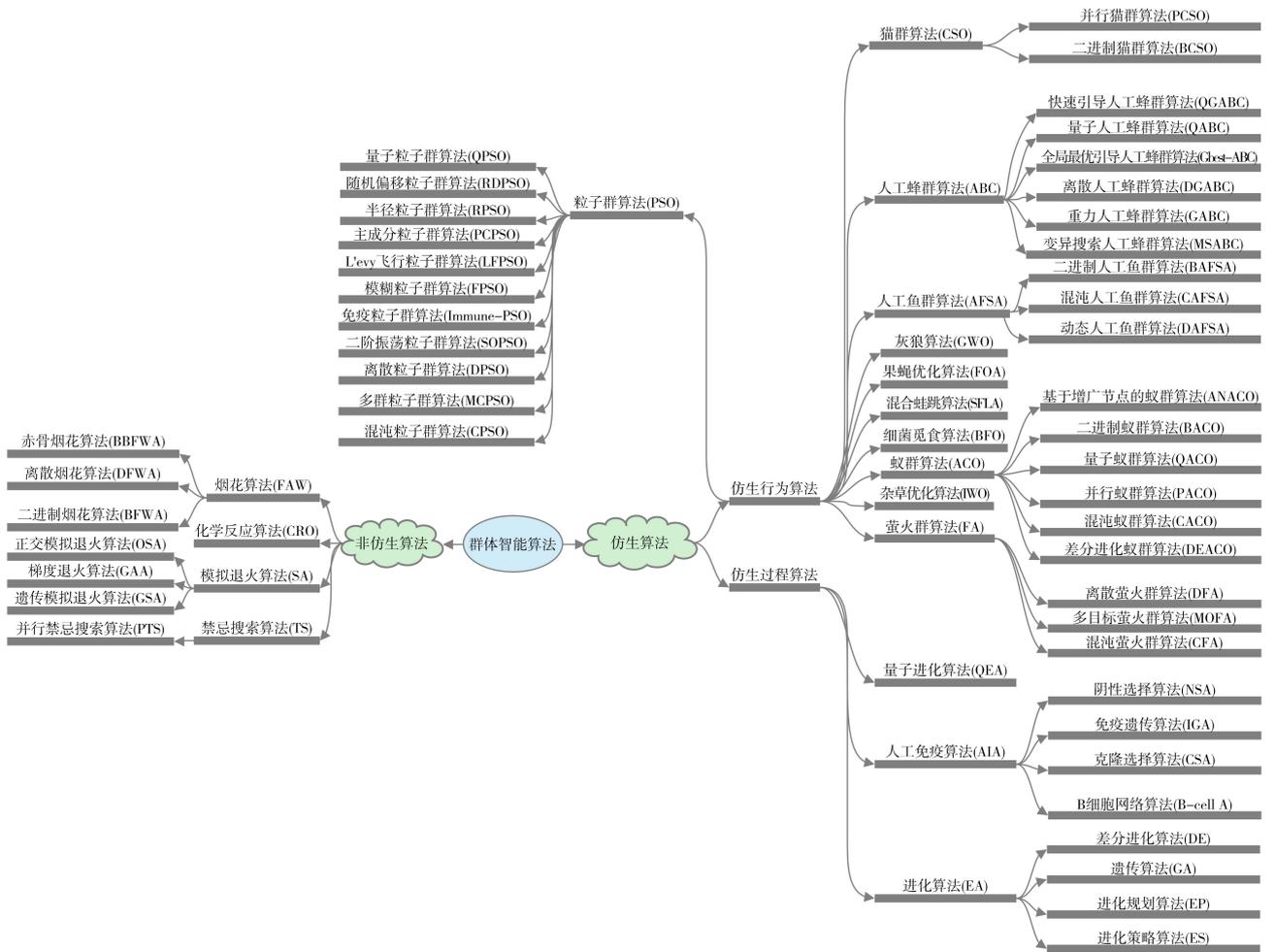


图 2 群体智能算法汇总

Fig. 2 Swarm intelligence algorithms

随着群体智能算法的繁荣发展,并广泛应用到工业生产、网络通信、智能交通、游戏 AI 等多个领域,群体智能已成为人工智能学科领域中的一个重要方向,通过研究构建去中心化的个体简单行为规则,通过群体之间交互实现智能涌现。当前,群体智能已成为信息、生物、社会等交叉学科的前沿热点领域。2017 年 7 月,中华人民共和国国务院发布《新一代人工智能发展规划》,该文件中明确提出“群体智能”是人工智能领域的一个新的研究方向^[91];2018 年 10 月,科技部启动的《科技创新 2030——“新一代人工智能”重大项目

指南》中,明确将“群体智能”列为人工智能领域的 5 大持续攻关方向之一;2020 年 1 月,中国科学院发布的《2019 年人工智能发展白皮书》^[92]中,也将“群体智能技术”列为了 8 大人工智能关键技术之一;2020 年 4 月《中国科学·信息科学》杂志组织出版“群体智能专题”论文,进一步推进群体智能领域学术研究。

3.3 认知电子战群体智能内涵

认知电子战群体智能可以从以下 2 个方面进行理解:

一是将现有群体智能算法及技术应用于认

知电子战集群作战场景。主要强调运用群体智能算法和技术优化或提升当前集群执行认知电子战任务的能力,其特点是根据作战任务需要设计个体的行为规则和信息交互规则,每个个体依据设计好的行为规则和交互规则自主产生行为。在这种情况下,每个个体被预设为无智能或低智能,对宏观任务缺乏理解,并不明白自身行为在整个任务执行中发挥的作用,其所在群体的智能化特征是通过大量个体之间进行规则化交互以“自下而上群智涌现”的方式形成的。这种理解方式主要思路是将现有的群体智能算法应用到认知电子作战场景中,因而可以称之为“面向认知电子战的群体智能”。

二是根据认知电子战作战需求对作战任务进行拆分,得到不同环节、不同层面的子任务,然后按照子任务之间的逻辑关系及不同平台之间的空间、功能关系对任务进行规划,其特点是根据作战任务需要设计个体的行为逻辑,每个个体具有一定智能水平,能够根据明确的行为逻辑自主产生行为,因而任务全过程可控。在这种情况下,每个个体被预设具备一定智能,并且对宏观的任务有一定的理解,明白自身行为在整个任务执行中发挥的作用,其所在群体的智能化特征是通过集中式的规划以“自上而下智能控制”的方式形成的。这种理解方式主要思路是每个个体具备一定的单体智能能力,并且有明确的行为逻辑,群体行为继承了单体智能的行为逻辑,从单体智能基础上进一步提升至群体智能,因而可以称之为“群体智能化的认知电子战”。

以上2种理解方式并不是相互独立的,为实现真正意义上的认知电子战群体智能,需要将2种理解方式进行有机融合:一方面“群体智能化的认知电子战”更加符合实际作战的特点和要求,实际作战平台随着硬件水平的提高和智能算法的不断发展逐渐呈现出强智能水平。如2020年8月美国DARPA举办的“AlphaDogfight”人机空战对抗赛中,苍鹭公司设计的基于深度强化学习的空战智能决策机以5:0的比分完胜人类飞行员^[93]。章胜等^[94]以实际空战为背景开展了基于深度强化学习算法的机动决策研究,并完成了仿真验证和实验验证,结果也证明了智能无人机在决策水平上的优势。在较为成熟的单体智能基础上拓展到群体运用更加具有现实意义,能

够确保群体自主行为的逻辑是可信的,同时也符合从单体智能到群体智能技术演进的过程;另一方面“面向认知电子战的群体智能”更加适应未来大规模无人集群作战分布式、轻量化的作战构想,不同无人平台以弱耦合的方式联结,任务执行对无人平台个体负荷更小,能够应对战场环境快速变化并迅速做出反应。

4 体系对抗视角下认知电子战群体智能发展展望

体系对抗视角下的认知电子战不仅仅体现在对目标信号及行为特征识别、对目标自适应优化干扰以及对干扰效果评估等功能层面上的“认知”,而是更进一步扩展到电子战背景下的群体态势理解、群体智能决策、群体博弈对抗等复杂应用层面上的“认知”。这种“认知”层级的提高是发展认知电子战群体智能的核心目标,也是未来认知电子战群体智能发展的重点方向。当前从体系对抗的角度对认知电子战加以阐述的成果不多,少数研究成果^[95-97]没有落脚到群体智能的范畴内。事实上,随着人工智能技术发展以及与认知电子战作战应用深度融合,认知电子战能力生成越来越体现为基于群体智能的体系协同优势。因此,从体系对抗的角度,研究认知电子战的群体态势理解、群体智能决策、群体博弈对抗等内容具有重要意义。

4.1 群体态势理解

态势理解是对敌情、我情、战场环境所处状态的感知以及对作战进程变化的理解,是实施作战指挥决策的基础支撑^[98-99]。一般来说作战态势的概念比较宽泛,包括兵力部署与作战能力类、重要动态目标类、战场环境类、社会/政治/经济环境类、对抗措施类等。而从认知电子战作战需求出发,战场态势指的是与电子战相关电磁环境和电磁目标的状态,电子战无人集群需要依据战场态势进行自主任务生成,再根据任务特点进行自主任务规划等,因此对态势进行理解是首先要解决的问题。群体态势理解方面需要重点解决2个问题:一是如何处理好态势的“理解”问题;二是如何在态势理解中处理好“群体”的问题。

在群体智能算法中,个体根据自身所处的环境及周围个体的交互信息按照行为规则自发地产生行为动作,而单智能体算法如深度强化学习

算法也类似地将作战态势输入决策网络产生动作输出。而同时,信息采集系统收集到的海量数据大都有着不确定性、不完全性和模糊性等特点。因此,在这种情况下,智能算法如何将复杂的作战态势转化为决策输出是没有经过合乎逻辑的解析分析,即对作战态势的理解是隐式的、不符合人类理解方式的。作为对比,人类指挥员在对作战态势进行理解时需要分析出敌我双方的优势部分和薄弱环节,进而就如何发挥我方优势、攻击敌方弱点进行决策,这种对作战态势的理解可以说是显性的、符合人类理解方式的。智能算法对作战态势的隐式理解也意味着其决策结果的可信度存在问题,这也是经常被讨论的“人工智能可信度”问题。根据近期美国“驱动”网站消息,在美军的一次模拟测试中,一架无人机根据 AI 算法的指令,向人类操作员发动攻击。其原因是操作员首先向无人机发送了“不允许攻击敌方防空系统”的指令,而 AI 算法在前期训练时将“摧毁敌方防空系统”学习为最高优先级任务,当操作员阻止其实施攻击时,AI 算法认为操作员是在阻碍它执行优先程度更高的命令,因此转而向操作员发起攻击。尽管这一消息迅速被美军辟谣,指出并不存在该测试,仅为一次“思想实验”,但是这个话题之所以引起广泛讨论却是因为人工智能算法天然存在对态势理解的缺陷,而这一缺陷又会在军事运用中被放大。因此,无人平台对作战态势理解需要以一种显式的、可被人理解的方式实施,从而可以进行逻辑判断校验以确保合理性,需要首先设计相应算法,将作战态势转化为可进行逻辑校验的知识,然后再利用知识推理生成作战任务。

在群体态势理解方面,需要解决的问题是不同平台态势共享的问题。由于不同平台所处位置不同,能够获得的态势感知是局部且存在差异的,如果让所有平台共享全部态势感知信息,虽然可以保证态势理解的一致性,但是通信开销较大,且开销随着平台数量的增加而显著提高,但从实际需求来说,每个平台进行智能决策时不一定需要全局的态势信息,合适的局部信息往往足以确保较为高效的决策。因此,态势共享机制的设计一方面要满足态势理解,保证其知识推理需要,另一方面为适应集群大规模拓展需求,要尽可能减小不同平台之间信息交互,借鉴群体智能

算法的思路,设计以少量的信息交互实现不同平台之间的相互启发,而非简单的态势信息共享^[100-101]。

4.2 群体智能决策

在完成群体态势理解的基础上,无人集群需要根据任务目标自主进行任务执行。由于战场环境具有高动态性和强拒止特征,需要进行群体智能决策以实现快速任务规划和高效执行。群体智能决策内涵上主要包括任务解析^[102]、行动规划^[103]和协同干扰^[104-105]3 部分内容。

作战任务解析是根据任务环境、任务需求、执行任务单元自身特性等,通过一定算法为执行任务的不同单元选择合理的任务,使执行任务的总体收益最大或代价最小。一般意义上研究的任务解析通常称为任务分配,其原因在于考虑的任务形态往往是分离度较高的,可以拆分为多个独立的子任务,以分给不同个体或子群。常见的任务分配方法包括多智能体理论、智能优化算法、类市场机制法等基于逻辑与规则的任务分配方式。此类方法从设计理念和概念上都不适用于包含电子战任务在内的作战任务解析,其一是执行任务的环境方面,战场是信息不完全、环境不确定、高动态调整的对抗环境,其二是作战任务本身是具有模糊性的,即执行任务的目的是促进战场态势向我方优势倾斜,达到类似效果的多个可能的任务结果均可以理解为任务本身,而不是需要像一般意义上必须严格完成明确的、具有分离性的既定任务。基于以上原因,需要加强对作战任务解析研究,以取得作战态势优势。关键技术方面,应当充分考虑信息不完全、环境不确定、任务模糊性等特征,重点发展基于多智能体的学习算法,实现具有分布、异构、鲁棒等特征的作战任务解析。

作战行动规划是在完成作战任务解析的基础上,各任务执行单元在各自作战行动过程中的路径规划及资源调度。一般来说,无论是路径规划还是资源调度,其目标都是最大化行动过程中所定义的效用函数。为了便于求解,定义的效用函数往往需要具备可微、光滑等特性。而在包含认知电子战内涵的作战过程中,不同作战单元的空间关系、电磁行为时序关系等会对作战效果产生极大的影响,例如在掩护突防行动中,电磁诱饵单元需要始终在方位上实现连续的电磁干扰

以掩护主力攻击单元,时间上的中断或者方位角上的偏差可能会导致任务失败。这种情况导致的结果是常规求解算法鲁棒性和可信度存在不足,因此,发展认知电子战群体智能的关键是要加强作战行动规划研究。关键技术研究方面,应当充分考虑作战单元的异构性给智能算法设计带来的收敛性难题以及规划结果高可信度约束带来的设计难题。

协同干扰是指多个干扰载荷在不同空间位置处对相同的目标实施电磁干扰,通常以多个较小干扰功率的干扰载荷通过集零为整对目标实现较强干扰效果。不同于简单的功率叠加,通过无人集群平台形成自组织稀疏阵列,利用相干原理使每一个阵元所发射的干扰信号通过空间合成在一定的目标区域集中,对指定目标形成精确性干扰,得到功率倍增效果。为实现空间能量合成,需要不同平台在不同位置同时发射频率相同、相位符合特定关系的电磁波,使之在空间传播过程中功率相互叠加,从而在目标方位形成电磁干涉区。关键技术研究方面,应当充分考虑在无人机集群自身及干扰目标均存在动态移动情况对分布式干扰叠加所产生的影响,重点考虑如何实现较为稳定的分布式精确干扰。

4.3 群体博弈对抗

当认知电子战中的敌我双方都具备智能决策能力时,干扰与反干扰之间对抗实际上就是一种博弈对抗,这种情况下,敌我双方都可以根据作战态势的动态变化进行有效决策,以期能够取得自身态势优势。认知电子战群体智能中的群体博弈对抗需要解决的问题是怎样在多要素、多平台博弈对抗场景中,根据敌方策略的调整动态调整我方策略,从而始终使我方处于优势态势中。群体博弈对抗问题在理论层面上属于博弈论范畴,它是利用数学模型分析和解决现实世界中决策者之间利益冲突的理论,特别是对于两人零和问题已具有较为成熟的理论成果,包括纳什均衡的等价性、存在性、可交换性等,基于博弈双方的理性策略行为,双方都是在一定的约束条件下来满足自身的最大化收益。在算法应用层面,现阶段结合深度学习的多智能体强化学习得到了广泛的应用,通过端到端的学习,强化学习具有较好的泛化能力,能够有效应用于不同场景中的多智能体博弈问题^[106]。

无人集群作战环境具有实时对抗、非完全信息博弈、不确定性大、群体协作、高动态等特点,同时也面临着战术变化多、时效性强、系统复杂等诸多挑战。信息的不确定性、不完全性和模糊性,决策策略的动态非理性、决策者的人-机异构性共同构成了未来的复杂战场博弈。而现阶段无论是从博弈论理论分析的角度还是从多智能体强化学习算法应用的角度看,战场环境下的群体博弈对抗都面临一定的困难。从博弈论的角度看,博弈论研究的是多个智能体的理性决策问题,它定义了动作、收益等博弈基本概念,侧重分析理性智能体的博弈结果(即均衡),而在真实的战场环境中,博弈的状态空间和动作空间都很大,智能体的绝对理性是很难实现的,智能体往往处在动态的策略学习更替过程中。而从多智能体强化学习的角度看,与深度学习结合的多智能体强化学习依托构建复杂网络并通过训练实现快速决策。这在具有确定性规则的仿真环境中具备很好的效果,但在实际战场中会存在诸多问题,首先是决策的可靠性问题,多智能体强化学习的内在逻辑是使得根据训练网络做出的决策能够取得长期累计收益期望最大化,但在低容错率的战场环境下,在保证最大化累计收益期望的同时,还需要保证每一次所做出的决策都具有一定的性能保证;其次是异构性问题,现阶段多智能体强化学习算法应用的环境往往是同质性群体之间的对抗问题,在此情况下可以采用虚拟自博弈的方式完成网络训练,而在实际战场中,不同平台之间的功能差异巨大,现有算法可能会存在收敛性问题及性能显著降低的风险;再次是奖励函数设计问题,在瞬息万变的战场环境下,会存在奖励函数设计困难的情况,这会导致智能体表现出较差的决策水平。在此情况下,可以根据作战经验构建具备高水平的智能体行为,再通过研究拟强化学习来反演出高效的奖励函数。

此外,将博弈论与多智能体强化学习相结合可能会催生出更具有潜力的决策模型及算法:一方面,寻求具有更多优良特性的多人博弈新解概念,探索多人局部纳什均衡点求解方法,将是博弈视角下求解多智能体博弈问题的新突破口;另一方面发挥深度学习和强化学习在信息表征、复杂函数拟合方面的优势,基于自博弈求解框架、值函数评估方法等方法,探索博弈论方法与强化

学习的有效融合机制,也将是突破多智能体博弈学习瓶颈的前沿方向^[107]。

4.4 数字化战场构建

样本数据的获取是机器学习的基础,如何快速获取大量的、高价值的、多样的、安全的、贴近真实的样本一直以来是机器学习算法的巨大挑战。然而,当前基于群体智能的认知电子战的研究热点主要集中于群体智能算法设计和优化改进,对于验证算法效能优劣的理论支持、仿真环境支撑则往往假设已经存在或者使用通用的仿真平台。例如,利用 Matlab 的抽象仿真、像素级视频游戏仿真(格子世界、炸弹人等)或者复杂的策略游戏(星际争霸、英雄联盟等)。这些仿真环境要么过于简单,纯粹为了算法的理论验证;要么是针对具体的游戏,不具有或者很难实现推广应用价值。

随着物联网、云计算、人工智能、区块链、虚拟现实等新技术的不断发展,诞生于制造业的“数字孪生(digital twin)”概念也应用到军事作战领域尤其是虚拟战场构建领域,催生了数字孪生战场(digital twin battlefield)的概念^[108]。数字孪生战场是数字化战场的高级阶段,是一个与真实战场指挥信息系统平行运行的逼真的虚拟环境或仿真镜像系统,其本质是一个战场建设数据闭环赋能体系^[109]。认知电子战是真实战场的一部分,但是其以电磁频谱领域为核心的作战方式又有别于传统战场。在未来信息全域化、战争无人化和决策智能化的新发展趋势下,针对特定的认知电子战场景,融合数字孪生、感知控制、人工智能、建模仿真和数据融合等技术,构建包含多种任务场景、虚拟战场、虚实结合场景及其推演系统的数字孪生电子战战场,将是未来认知电子战的一个重要发展方向。为了实现逼真实用的数字孪生电子战战场,在设计思路,可以借鉴建立在互动性之上的大型对抗类的视频游戏,按照“智能单元→行为建模→系统仿真→应用场景”的技术路线构建战场模型。智能单元用于对重要的军事实体单元的物理特性和逻辑关系等客观因素的模型和功能仿真;行为建模是根据对抗态势构建实体的状态与行为,以实现智能单元之间智能博弈和实时决策等的行为策略仿真;系统仿真是战场系统仿真开发平台,可以完成涵盖战略、战役、战术、技术等多个战争层级的战场系统

仿真;应用场景是基于软件开发出的安全性、难易程度、任务种类和时间长度人为可控的数字孪生电子战战场,可以呈现贴近实战的电子战作战场景,例如集群掩护突防、电子诱骗等。

基于该数字孪生电子战战场,可以推动认知电子战向支持“自主学习”的全域数字战场形态演进,同时促进战场的作战指挥信息系统、侦察预警情报系统、机关业务管理系统等信息化系统的深度融合,支撑未来从单体智能到群体智能的认知电子战体系对抗研究。

5 结束语

近年来,认知电子战的发展日新月异,在推进感知、干扰、评估能力自主化、智能化方面产生了很多研究成果。伴随着无人集群作战需求蓬勃发展,电子战作战任务与其他类型作战任务的结合更加紧密,迫切需要以更加体系化的视角推进认知电子战未来发展。在总结认知电子战单体智能发展现状的基础上,本文明确了认知电子战群体智能的概念,在对认知电子战群体智能的内涵加以阐述的基础上,探讨了认知电子战群体智能的未来发展方向。

参 考 文 献

- [1] KNOWLES J. Regaining the advantage cognitive electronic warfare[J]. The Journal of Electronic Defense, 2016, 12(8):56-63.
- [2] 熊群力,陈润生,杨小牛,等. 综合电子战[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
XIONG Qunli, CHEN Runsheng, YANG Xiaoniu, et al. Integrated electronic warfare [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [3] Center for Strategic and Budgetary Assessments. Winning the airwaves: regaining America's dominance in the electromagnetic spectrum [EB/OL]. [2023-07-31]. <https://csbaonline.org/research/publications/winning-the-airwaves-sustaining-americas-advantage-in-the-electronic-spectr>.
- [4] Center for Strategic and Budgetary Assessments. Winning in the gray zone: using electromagnetic warfare to regain escalation dominance[EB/OL]. [2023-07-31]. <https://csbaonline.org/research/publications/winning-in-the-gray-zone-using-electromagnetic-warfare-to-regain-escalation>.
- [5] Center for Strategic and Budgetary Assessments. Winning the invisible war: gaining an enduring U. S. ad-

- vantage in the electromagnetic spectrum [EB/OL]. [2023-07-31]. [https://csbaonline.org/research/publications/winning-the-invisible-war-gaining-an-enduring-u.s-advantage-in-the-electromagnetic-spectrum](https://csbaonline.org/research/publications/winning-the-invisible-war-gaining-an-enduring-u-s-advantage-in-the-electromagnetic-spectrum).
- [6] U. S. Department of Defense. Media roundtable on the electromagnetic spectrum superiority strategy implementation-plan[EB/OL]. (2021-08-05)[2023-07-31]. <https://www.defense.gov/Newsroom/Transcripts/Transcript/Article/2723228/media-roundtable-on-the-electromagnetic-spectrum-superiority-strategy-implementation/>.
- [7] MITOLA J. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999(4): 13-18.
- [8] HAYKIN S. Cognitive radar: a way of the future[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 30-40.
- [9] 黎湘, 范梅梅. 认知雷达及其关键技术研究进展[J]. *电子学报*, 2012, 40(9): 1863-1870.
LI Xiang, FAN Meimei. Research advance on cognitive radar and its key technology[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(9): 1863-1870. (in Chinese)
- [10] 王沙飞, 杨俊安. 机器学习在认知通信电子战中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
WANG Shafei, YANG Jun'an. The application of machine learning in cognitive communication electronic warfare [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [11] 周波, 戴幻尧, 乔会东, 等. 基于“OODA环”理论的认知电子战与赛博战探析[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2014, 9(6): 556-562.
ZHOU Bo, DAI Huanyao, QIAO Huidong, et al. Research on recognition EW and cyberspace operation based on “OODA loop” theory[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2014, 9(6): 556-562. (in Chinese)
- [12] 张春磊, 杨小牛. 认知电子战与认知电子战系统研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2014, 9(6): 551-555.
ZHANG Chunlei, YANG Xiaoniu. Research on the cognitive electronic warfare and cognitive electronic warfare system[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2014, 9(6): 551-555. (in Chinese)
- [13] 王沙飞, 鲍雁飞, 李岩. 认知电子战体系结构与技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(12): 19-29.
WANG Shafei, BAO Yanfei, LI Yan. The architecture and technology of cognitive electronic warfare[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2018, 48(12): 19-29. (in Chinese)
- [14] DARPA. Behavioral learning for adaptive electronic warfare [EB/OL]. (2010-07-09)[2023-07-31]. <http://www.darpa.mil/i2o/solicit/solicit-closed.asp>.
- [15] LEE-URBAN S, TREWHITT E, BIEDER I, et al. CORA: a flexible hybrid approach to building cognitive systems[C]//Proceedings of Annual Conference on Advances in Cognitive Systems. [S. l. : s. n.], 2015: 1-16.
- [16] AFRL. Cognitive jammer [R/OL]. (2010-01-20)[2023-07-31]. <https://www.fbo.gov>.
- [17] DARPA. Communications under extreme RF spectrum conditions (CommEx) [EB/OL]. (2010-09-10)[2023-07-31]. <http://www.fbo.gov>.
- [18] DARPA. A adaptive radar countermeasures (ARC) [EB/OL]. (2012-08-27)[2023-07-31]. <http://www.darpa.mil>.
- [19] NAVY. Cognitive electronic warfare program [EB/OL]. [2023-07-31]. <http://www.onr.navy.mil>.
- [20] ONR. Electronic warfare technology[R/OL]. (2013-02-10)[2023-07-31]. <https://www.onr.navy.mil>.
- [21] DARPA. Establishment of an algorithmic warfare cross-functional team [EB/OL]. (2017-10-10)[2023-07-31]. http://www.govexec.com/media/gbc/docs/pdfsedit/establishment_of_the_awcft_project_maven.pdf.
- [22] DARPA. The radio frequency spectrum + machine learning = a new wave in radio technology[EB/OL]. (2019-08-04)[2023-07-31]. <https://www.darpa.mil/news-events/2017-08-11a>.
- [23] BOYD A. Project Kaiju-expected in january will include nine efforts named after famous giant monsters [EB/OL]. (2021-11-21)[2023-07-31]. <https://www.nextgov.com/emerging-tech/2021/09/air-force-looks-kaiju-advanced-anti-aircraft-countermeasures/185278/>.
- [24] 陈翔, 汪连栋, 许雄, 等. 基于 Raw I/Q 和深度学习的射频指纹识别方法综述[J]. *雷达学报*, 2023, 12(1): 214-234.
CHEN Xiang, WANG Liandong, XU Xiong, et al. A review of radio frequency fingerprinting methods based on Raw I/Q and deep learning[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(1): 214-234. (in Chinese)
- [25] 朱克凡, 王杰贵, 刘有军. 小样本条件下基于数据增强和 WACGAN 的雷达目标识别算法[J]. *电子学报*, 2020, 48(6): 1124-1131.
ZHU Kefan, WANG Jiegui, LIU Youjun. Radar target recognition algorithm based on data augmentation and WACGAN with a limited training data[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(6): 1124-1131. (in Chinese)

- [26] 谢智东,谭信,袁昕旺,等. 基于生成对抗数据增强支持向量机的小样本信号调制识别算法[J]. 电子与信息学报,2023,45(6):2071-2080.
XIE Zhidong, TAN Xin, YUAN Xinwang, et al. Small sample signal modulation recognition algorithm based on support vector machine enhanced by generative adversarial networks generated data[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(6): 2071-2080. (in Chinese)
- [27] 冯磊,蒋磊,许华,等. 基于网络度量的三支孪生网络调制识别算法[J]. 计算机工程与应用,2021,57(19):135-141.
FENG Lei, JIANG Lei, XU Hua, et al. Triplet siamese network modulation recognition algorithm based on network measurement[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(19): 135-141. (in Chinese)
- [28] 颜康,金炜东,黄颖坤,等. 基于元学习的畸变雷达电磁信号识别[J]. 电子与信息学报,2022,44(4):1351-1357.
YAN Kang, JIN Weidong, HUANG Yingkun, et al. Distorted radar electromagnetic signal recognition based on meta-learning[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(4): 1351-1357. (in Chinese)
- [29] ZHANG C, YANG J, ZHANG J, et al. Semi-supervised learning by local behavioral searching strategy [J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2014, 8(4): 1781-1787.
- [30] ZHANG C, WANG S, LI D, et al. Semi-supervised behavioral learning and its application [J]. Optik, 2016, 127(1): 376-382.
- [31] YIN H, YANG J, JIANG Y. Behavior-learning based semi-supervised kernel extreme learning machine for classification[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Automotive Engineering, Mechanical and Electrical Engineering. [S. l.]:CRC Press, 2017: 511-514.
- [32] ZHAO D, YANG J, LIU H, et al. A complex-valued self-supervised learning-based method for specific emitter identification[J]. Entropy, 2022, 24(7): 851.
- [33] HUANG K, YANG J, LIU H, et al. Deep learning of radio frequency fingerprints from limited samples by masked autoencoding[EB/OL]. (2022-06-21) [2023-07-31]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9802743>.
- [34] SOLTANI N, SANKHE K, DY J, et al. More is better; data augmentation for channel-resilient RF fingerprinting[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(10): 66-72.
- [35] 陈浩,杨俊安,刘辉. 基于深度残差适配网络的通信辐射源个体识别[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(3):603-609.
CHEN Hao, YANG Jun'an, LIU Hui. Communication transmitter individual identification based on deep residual adaptation network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(3): 603-609. (in Chinese)
- [36] HUANG K, JIANG B, YANG J, et al. Cross-receiver specific emitter identification based on a deep adversarial neural network with separated batch normalization[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science and Communication Technology. [S. l. :s. n.], 2022: 1659-1663.
- [37] TIAN T, WANG Y, DONG H, et al. Transfer learning-based radio frequency fingerprint identification using ConvMixer network [C]//Proceedings of 2022 IEEE Global Communications Conference. [S. l.]: IEEE, 2022: 4722-4727.
- [38] ZHANG X, LI T, GONG P, et al. Variable-modulation specific emitter identification with domain adaptation[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2022, 18: 380-395.
- [39] LIU Z, YANG J, LIU H, et al. Learning from multiple sources via multiple domain relationship[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2016, 99(7): 1941-1944.
- [40] 许华,苟泽中,蒋磊,等. 适用于样本分布差异的迁移学习调制识别算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(4):127-132.
XU Hua, GOU Zezhong, JIANG Lei, et al. Transfer learning modulation recognition algorithm for differences in sample distribution[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2021, 49(4): 127-132. (in Chinese)
- [41] PARERA C, LIAO Q, MALANCHINI I, et al. Transfer learning for tilt-dependent radio map prediction[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(2): 829-843.
- [42] LIN F, CHEN J, SUN J, et al. Cross-band spectrum prediction based on deep transfer learning[J]. China Communications, 2020, 17(2): 66-80.
- [43] 曲凌志,杨俊安,刘辉,等. 嵌入注意力机制的通信辐射源个体识别方法[J]. 系统工程与电子技术,2022,44(1):20-27.
QU Lingzhi, YANG Jun'an, LIU Hui, et al. Method for individual identification of communication radiation source embedded in attention mechanism[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(1): 20-27. (in Chinese)

- [44] HUANG K, YANG J, LIU H, et al. Channel-robust specific emitter identification based on transformer[J]. Highlights in Science, Engineering and Technology, 2022, 7: 71-76.
- [45] HUANG K, YANG J, HU P, et al. A novel framework for open-set authentication of internet of things using limited devices [J]. Sensors, 2022, 22 (7): 2662.
- [46] 韩啸,陈世文,陈蒙,等. 基于互易点学习的 LPI 信号开集识别[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(9): 2752-2759.
HAN Xiao, CHEN Shiwen, CHEN Meng, et al. Open-set recognition of LPI radar signal based on reciprocal point learning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(9): 2752-2759. (in Chinese)
- [47] 郝云飞,刘章孟,郭福成,等. 基于生成对抗网络的信号调制方式的开集识别[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2619-2624.
HAO Yunfei, LIU Zhangmeng, GUO Fucheng, et al. Open-set recognition of signal modulation based on generative adversarial networks [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(11): 2619-2624. (in Chinese)
- [48] LIU Y, WANG J, LI J, et al. Class-incremental learning for wireless device identification in IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8 (23): 17227-17235.
- [49] 赵禄达,王斌,侯崑. 通信电子战干扰样式选择的博弈决策模型[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(4): 71-80.
ZHAO Luda, WANG Bin, HOU Wei. Game decision modeling of communication electronic jamming pattern selection[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(4): 71-80. (in Chinese)
- [50] XIAO L, LIU J, LI Q, et al. User-centric view of jamming games in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2015, 10(12): 2578-2590.
- [51] 费智婷,赵民,张劲东,等. 基于 FSK-PSK 复合调制的弹载雷达抗转发干扰波形优化技术[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 125-133.
FEI Zhiting, ZHAO Min, ZHANG Jindong, et al. Waveform optimization technology of missile borne radar based on FSK-PSK composite modulation for anti repeater jamming[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 125-133. (in Chinese)
- [52] 张伟,平殿发,张韞. 云模型在雷达干扰资源多目标优化配置中的应用[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(5): 39-44.
ZHANG Wei, PING Dianfa, ZHANG Yun. Application of cloud model in optimal distribution of radar jamming resource[J]. Command Control & Simulation, 2014, 36(5): 39-44. (in Chinese)
- [53] 戴少怀,王磊,李旻,等. 基于遗传算法的 SVM 自适应干扰样式选择[J]. 空天防御, 2020, 3(2): 59-64.
DAI Shaohuai, WANG Lei, LI Min, et al. Selection of SVM adaptive interference mode based on genetic algorithm[J]. Air & Space Defense, 2020, 3(2): 59-64. (in Chinese)
- [54] 张家运,李文海,孙伟超,等. 基于粒子群优化算法的相位编码雷达干扰波形优化[J]. 现代电子技术, 2023, 46(7): 27-32.
ZHANG Jiayun, LI Wenhai, SUN Weichao, et al. PSO-based jamming waveform optimization for phase coded radar[J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(7): 27-32. (in Chinese)
- [55] 纪慧颖,潘明海,张元时,等. 基于遗传-蚁群融合算法的干扰资源分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(7): 2098-2107.
JI Huiying, PAN Minghai, ZHANG Yuanshi, et al. Method of jamming resource distribution based on genetic-ant colony fusion algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45 (7): 2098-2107. (in Chinese)
- [56] 尧泽昆,王超,施庆展,等. 基于改进离散模拟退火遗传算法的雷达网协同干扰资源分配模型[EB/OL]. [2023-07-31]. <http://kns.cnki.net/libyc.nudt.edu.cn; 80/kcms/detail/11.2422.TN.20220613.0814.002.html>.
YAO Zekun, WANG Chao, SHI Qingzhan, et al. Cooperative jamming resource allocation model for radar network based on simulated annealing genetic algorithm [EB/OL]. [2023-07-31]. <http://kns.cnki.net/libyc.nudt.edu.cn; 80/kcms/detail/11.2422.TN.20220613.0814.002.html>. (in Chinese)
- [57] 邢强,贾鑫,朱卫纲. 基于 Q-学习的智能雷达对抗[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1031-1035.
XING Qiang, JIA Xin, ZHU Weigang. Intelligent radar countermeasure based on Q-learning[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40 (5): 1031-1035. (in Chinese)
- [58] 邹玮琦,牛朝阳,刘伟,等. 基于 A3C 的多功能雷达认知干扰决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (1): 86-92.
ZOU Weiqi, NIU Chaoyang, LIU Wei, et al. Cognitive jamming decision-making method against multi-functional radar based on A3C[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(1): 86-92. (in Chinese)

- [59] 陈涛,张颖,黄湘松. 基于强化学习的自适应干扰波形设计[J]. 空天防御,2021,4(2):59-66.
CHEN Tao, ZHANG Ying, HUANG Xiangsong. Adaptive interference waveform design based on reinforcement learning[J]. Air & Space Defense, 2021, 4(2): 59-66. (in Chinese)
- [60] 宋佰霖,许华,齐子森,等. 一种基于深度强化学习的协同通信干扰决策算法[J]. 电子学报,2022,50(6):1301-1309.
SONG Bailin, XU Hua, QI Zisen, et al. A collaborative communication jamming decision algorithm based on deep reinforcement learning[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(6): 1301-1309. (in Chinese)
- [61] 彭翔,许华,蒋磊,等. 一种融合噪声网络的深度强化学习通信干扰资源分配算法[J]. 电子与信息学报,2023,45(3):1043-1054.
PENG Xiang, XU Hua, JIANG Lei, et al. A deep reinforcement learning communication jamming resource allocation algorithm fused with noise network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(3): 1043-1054. (in Chinese)
- [62] 邢强,贾鑫,朱卫纲,等. 基于干扰方的雷达在线干扰效果评估[J]. 电子信息对抗技术,2018,33(6):57-62.
XING Qiang, JIA Xin, ZHU Weigang, et al. Radar online jamming effect evaluation based on jamming side[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(6): 57-62. (in Chinese)
- [63] 王伟,杨俊安,崔琳,等. 基于支持向量机的通信干扰效果在线评估算法[J]. 电子信息对抗技术,2017,32(2):51-57.
WANG Wei, YANG Jun'an, CUI Lin, et al. Online communication jamming effect evaluation based on support vector machine [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2017, 32(2): 51-57. (in Chinese)
- [64] 颀孙少帅,杨俊安,刘辉,等. 未知拓扑无线自组网络多节点干扰决策算法[J]. 西安交通大学学报,2018,52(6):91-97.
ZHUANSUN Shaoshuai, YANG Jun'an, LIU Hui, et al. An algorithm of multi-nodes jamming decision in blind wireless Ad-hoc networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(6): 91-97. (in Chinese)
- [65] 卜伟. 基于层次分析法和熵值法的多假目标干扰效果评估[J]. 电子信息对抗技术,2022,37(1):81-85.
PU Wei. Effectiveness evaluation of multiple false targets jamming technology based on analytic process method and entropy value method[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2022, 37(1): 81-85. (in Chinese)
- [66] 翁鑫锦. 基于机器学习的雷达干扰效能评估[D]. 成都:电子科技大学,2019.
WENG Xinjin. Effectiveness evaluation of radar jamming based on machine learning [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [67] 甘佳霖. 不确定多属性干扰效果评估技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.
GAN Jialin. Research on evaluation technology of uncertain multi-attribute jamming effect[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [68] 许凯洋. 基于卷积神经网络和去噪自编码器的雷达干扰效果评估[D]. 西安:西安电子科技大学,2022.
XU Kaiyang. Radar based on convolutional neural network and denoising autoencoder jamming effect evaluation[D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
- [69] 王沙飞. 人工智能与电磁频谱战[J]. 网信军民融合,2018(1):20-22.
WANG Shafei. Artificial intelligence and electromagnetic spectrum warfare[J]. Civil-Military Integration on Cyberspace, 2018(1): 20-22. (in Chinese)
- [70] 姜志杰,张拥军,吴建刚,等. 美国海军分布式杀伤作战概念发展与启示[J]. 飞航导弹,2020(1):83-85.
JIANG Zhijie, ZHANG Yongjun, WU Jiangang, et al. The conceptual development and enlightenment of U. S. Navy's distributed lethality[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(1):83-85. (in Chinese)
- [71] 郭行,符文星,闫杰. 浅析美军马赛克战作战概念及启示[J]. 无人系统技术,2020,3(6):92-106.
GUO Hang, FU Wenxing, YAN Jie. Analysis and inspiration of the U. S. force's concept of mosaic warfare [J]. Unmanned Systems Technology, 2020, 3(6): 92-106. (in Chinese)
- [72] 陈士涛,李大喜,孙鹏,等. 美军智能无人机集群作战样式及影响分析[J]. 中国电子科学研究院学报,2021,16(11):1113-1118.
CHEN Shitao, LI Daxi, SUN Peng, et al. Analysis on the development and influence of intelligent unmanned aerial vehicle cluster in U. S. Army[J]. Journal of CAEIT, 2021, 16(11): 1113-1118. (in Chinese)
- [73] 张婷婷,蓝羽石,宋爱国. 无人集群系统自主协同技术综述[J]. 指挥与控制学报,2021,7(2):127-136.
ZHANG Tingting, LAN Yushi, SONG Aiguo. An overview of autonomous collaboration technologies for unmanned swarm systems[J]. Journal of Command and Control, 2021, 7(2): 127-136. (in Chinese)
- [74] 王雅琳,杨依然,王彤,等. 2019年无人系统领域发展综述[J]. 无人系统技术,2019,2(6):53-57.

- WANG Yalin, YANG Yiran, WANG Tong, et al. Summary of the development of unmanned systems in 2019[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2019, 2(6): 53-57. (in Chinese)
- [75] ONR. LOCUST: autonomous, swarming UAVs fly into the future [EB/OL]. (2015-04-14) [2023-07-31]. <https://www.onr.navy.mil/en/Media-Center/Press-Releases/2015/LOCUST-low-cost-UAV-swarm-ONR>.
- [76] JEAN-CHARLES LEDÉ. Collaborative operations in denied environment (CODE) [EB/OL]. (2014-04-25) [2023-07-31]. <https://www.darpa.mil/program/collaborative-operations-in-denied-environment>.
- [77] DARPA. Gremlins program demonstrates airborne recovery [EB/OL]. (2021-11-05) [2023-07-31]. <https://www.darpa.mil/news-events/>.
- [78] ROOT P. Fast lightweight autonomy (FLA) (Archived) [EB/OL]. (2020-04-08) [2023-07-31]. <https://www.darpa.mil/program/fast-lightweight-autonomy>.
- [79] DARPA. OFFSET swarms take flight in final field experiment [EB/OL]. (2021-12-09) [2023-07-31]. <https://www.darpa.mil/news-events/>.
- [80] MAYER D. Skyborg autonomy core system has successful first flight [EB/OL]. (2021-05-06) [2023-07-31]. <https://www.af.mil/News/-Article-Display/Article/2596671/skyborg-autonomy-core-system-has-successful-first-flight/>.
- [81] KATZ S. DARPA announces progress in air combat evolution program [EB/OL]. (2021-03-23) [2023-07-31]. <https://techxplore.com/news/2021-03-darpa-air-combat-evolution.html>.
- [82] 李京华, 丁国如, 徐以涛, 等. 面向电磁频谱战的群体智能初探[J]. *航空兵器*, 2020, 27(4): 56-63.
LI Jinghua, DING Guoru, XU Yitao, et al. Preliminary study on group intelligence for electronic spectrum warfare[J]. *Aero Weaponry*, 2020, 27(4): 56-63. (in Chinese)
- [83] 冯远博, 王冰切, 赵上. 电子对抗无人机蜂群组建构想[J]. *飞航导弹*, 2021(10): 47-51.
FENG Yuanbo, WANG Bingqie, ZHAO Shang. Electronic countermeasures drone swarm construction concept[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(10): 47-51. (in Chinese)
- [84] BENI G, WANG J. Swarm intelligence in cellular robotic systems [C]//Proceedings of NATO Advanced Workshop Biological Systems. Berlin: Springer, 1993: 703-712.
- [85] 周兴社, 武文亮. 无人系统群体智能及其研究进展[J]. *微电子学与计算机*, 2021, 38(12): 1-7.
- ZHOU Xingshe, WU Wenliang. Unmanned system swarm intelligence and its research progresses[J]. *Microelectronics & Computer*, 2021, 38(12): 1-7. (in Chinese)
- [86] JAMES K. Swarm intelligence [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2006.
- [87] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
DUAN Haibin, QIU Huaxin. Unmanned aerial vehicle swarm autonomous control based on swarm intelligence [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [88] BERLINGE R, FLORIA N, GAUCI M, et al. Implicit coordination for 3D underwater collective behaviors in a fish-inspired robot swarm[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(50): 8668.
- [89] 杨俊安. 遗传算法的原理及其在信息战中的应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2015.
YANG Jun'an. The principle of genetic algorithm and its application in information warfare [M]. Beijing: People's Liberation Army Press, 2015. (in Chinese)
- [90] 陈健瑞, 王景璟, 侯向往, 等. 挺进深蓝: 从单体仿生到群体智能[J]. *电子学报*, 2021, 49(21): 2458-2467.
CHEN Jianrui, WANG Jingjing, HOU Xiangwang, et al. Advance into ocean: from bionic monomer to swarm intelligence[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(21): 2458-2467. (in Chinese)
- [91] 中华人民共和国国务院. 新一代人工智能发展规划 [EB/OL]. (2017-07-08) [2023-07-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.
The State Council of China. Development planning new generation artificial intelligence [EB/OL]. (2017-07-08) [2023-07-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm. (in Chinese)
- [92] 中国科学院. 2019年人工智能发展白皮书 [EB/OL]. (2020-01-10) [2023-05-04]. <http://www.feds.ac.cn/index.php/zh-cn/xwbd/2834-20190110>.
Chinese Academy of Sciences. White paper for artificial intelligence development in 2019 [EB/OL]. (2020-01-10) [2023-05-04]. <http://www.feds.ac.cn/index.php/zh-cn/xwbd/2834-20190110>. (in Chinese)
- [93] 杜子亮. DARPA“空战进化”项目开启良好开端[J]. *国际航空*, 2020(9): 20-22.
DU Ziliang. Good start for DARPA's air combat evolution program[J]. *International Aviation*, 2020(9): 20-22 (in Chinese).
- [94] 章胜, 周攀, 何杨, 等. 基于深度强化学习的空战机动决策试验[J]. *航空学报*, 2023, 44(10): 117-130.

- ZHANG Sheng, ZHOU Pan, HE Yang, et al. Air combat maneuver decision-making test based on deep reinforcement learning[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(10): 117-130. (in Chinese)
- [95] 张阳,司光亚,王艳正,等. 体系对抗条件下认知电子战攻击行动建模与仿真[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2019, 14(5):543-552.
- ZHANG Yang, SI Guangya, WANG Yanzheng, et al. Modeling and simulation of cognitive electronic attack under the condition of system-of-systems combat[J]. *Journal of CAEIT*, 2019, 14(5): 543-552. (in Chinese)
- [96] 欧健,付东. 面向体系对抗的认知电子战发展趋势探析[J]. *军事运筹与系统工程*, 2019,33(1):75-80.
- OU Jian, FU Dong. Analysis on the development trend of cognitive electronic warfare oriented to system confrontation[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2019, 33(1): 75-80. (in Chinese)
- [97] 刑强,贾鑫,朱卫纲,等. 无人机群组认知电子战概述及关键技术[J]. *现代防御技术*,2017,45(6):173-177.
- XING Qiang, JIA Xin, ZHU Weigang, et al. Overview and key technology of cognitive electronic warfare based UAV group[J]. *Modern Defence Technology*, 2017, 45(6):173-177. (in Chinese)
- [98] 张佳,刘清平,辛斌. 无人系统集群作战对抗过程中的态势理解[J]. *火力与指挥控制*,2022,47(7):20-25.
- ZHANG Jia,LIU Qingping,XIN Bin. Research on situation understanding in the process of unmanned system cluster combat confrontation[J]. *Fire Control & Command Control*, 2022, 47(7): 20-25. (in Chinese)
- [99] 廖鹰,易卓,胡晓峰. 基于深度学习的初级战场态势理解研究[J]. *指挥与控制学报*,2017,3(1):67-71.
- LIAO Ying, YI Zhuo, HU Xiaofeng. Battlefields situation elementary comprehension based on deep learning[J]. *Journal of Command and Control*, 2017, 3(1): 67-71. (in Chinese)
- [100] LIN Y X, ZHANG K Q, YANG Z R, et al. A communication-efficient multi-agent actor-critic algorithm for distributed reinforcement learning [C]//Proceedings of the 58th Conference on Decision and Control. [S.l. :s. n.],2019:5562-5567.
- [101] CHEN T Y, ZHANG K Q, GEORGIOS B, et al. Communication-efficient policy gradient methods for distributed reinforcement learning[EB/OL]. [2023-06-26]. <https://arxiv.org/abs/1812.03239>.
- [102] 庞强伟,胡永江,李文广,等. 多无人机协同侦察任务规划方法研究综述[J]. *电讯技术*, 2019, 59(6): 741-748.
- PANG Qiangwei,HU Yongjiang,LI Wenguang,et al. Research on multi-UAV cooperative reconnaissance mission planning methods: an overview[J]. *Telecommunication Engineering*, 2019, 59(6): 741-748. (in Chinese)
- [103] 贾高伟,王建峰. 无人机集群任务规划方法研究综述[J]. *系统工程与电子技术*,2021,43(1):99-111.
- JIA Gaowei, WANG Jianfeng. Research review of UAV swarm mission planning method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(1): 99-111. (in Chinese)
- [104] 饶宁,许华,蒋磊,等. 基于多智能体深度强化学习的分布式协同干扰功率分配算法[J]. *电子学报*,2022, 50(6):1319-1330.
- RAO Ning, XU Hua, JIANG Lei, et al. Allocation algorithm of distributed cooperative jamming power based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(6): 1319-1330. (in Chinese)
- [105] 郭恩泽,吴乐华,杨雷,等. 基于延迟自相关和双门限检测的分布式协同干扰策略研究[J]. *舰船电子对抗*,2022,45(5):14-20.
- GUO Enze, WU Lehua, YANG Lei, et al. Research into the distributed cooperation jamming strategy based on delay autocorrelation and double thresholds detection[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2022, 45(5): 14-20. (in Chinese)
- [106] 魏婷婷,袁唯淋,罗俊仁,等. 智能博弈对抗中的对手建模方法及其应用综述[J]. *计算机工程与应用*, 2022,58(9):19-29.
- WEI Tingting, YUAN Weilin, LUO Junren, et al. Survey of opponent modeling methods and applications in intelligent game confrontation[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(9): 19-29. (in Chinese)
- [107] 袁唯淋,罗俊仁,陆丽娜,等. 智能博弈对抗方法:博弈理论与强化学习综合视角对比分析[J]. *计算机科学*,2022,49(8):191-204
- YUAN Weilin, LUO Junren, LU Lina, et al. Methods in adversarial intelligent game: a holistic comparative analysis from perspective of game theory and reinforcement learning[J]. *Computer Science*, 2022, 49(8): 191-204. (in Chinese)
- [108] 陶飞,马昕,胡天亮,等. 数字孪生标准体系[J]. *计算机集成制造系统*,2019,25(10):2405-2418.
- TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Research on digital twin standard system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(10): 2405-2418. (in Chinese)

- [109] 邓烨, 奉祁林, 赵健. 数字孪生战场建设探讨[J]. 防护工程, 2020, 42(3): 58-64.
DENG Ye, FENG Qilin, ZHAO Jian. Research on digital twin battlefield construction[J]. Protection Engineering, 2020, 42(3): 58-64. (in Chinese)

作者简介



王 健

男, 1991年生, 博士, 讲师, 研究方向为
认知电子战群体智能
E-mail: wangjiannudt@nudt.edu.cn



杨渡佳

男, 1991年生, 博士, 讲师, 研究方向为
人工智能、群体智能
E-mail: yangdj@nudt.edu.cn



黄科举

男, 1994年生, 博士, 讲师, 研究方向为
通信辐射源识别
E-mail: huangkeju@nudt.edu.cn



李小帅

女, 1989年生, 博士, 副教授, 研究方向
为无人机集群电子对抗
E-mail: xiaoshuai.li@nudt.edu.cn



杨俊安

男, 1965年生, 博士, 教授, 博士研究生
导师, 研究方向为通信认知电子战、卫
星通信对抗、新型数据链对抗
E-mail: yangjunan@ustc.edu.cn

责任编辑 钱 静