

认知电子战关键技术与发展分析

刘佳琪

(试验物理和计算数学国家重点实验室, 北京, 100076)

摘要: 随着认知技术在军事领域的广泛应用, 认知电子战已成为未来军事战争发展的必然趋势。针对电子战作战对象向认知方向发展导致传统电子战作战效能下降的问题, 围绕认知电子战的认知侦察、认知干扰、干扰评估、动态知识库等关键技术进行了深入探析。通过分析传统电子战面临的诸多挑战, 梳理认知电子战的基本概念, 研究认知电子战系统架构及其组成, 总结认知电子战的关键技术, 从而依据认知电子战的特点对其发展方向进行展望。

关键词: 认知电子战; 认知侦察; 认知干扰; 干扰评估; 动态知识库

中图分类号: V443

文献标识码: A

Key Technologies and Situation Analysis of Cognitive Electronic Warfare

LIU Jiaqi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics and Numerical Mathematics, Beijing, 100076)

Abstract: With the wide application of cognitive technology in the military field, cognitive Electronic Warfare (EW) has become the inevitable trend of future military war. Given the development of EW combat object in the cognitive direction leading to a decline in the operational effectiveness of traditional EW, an in-depth exploration and analysis of key technologies in cognitive electronic warfare are conducted, including cognitive reconnaissance, cognitive jamming, jamming evaluation, and dynamic knowledge base. Moreover, the basic concepts of cognitive EW are sorted out, by analyzing the numerous challenges to traditional EW. Then, the system architecture and composition of cognitive EW are studied. On this foundation, the key technologies of cognitive EW are summarized. Finally, based on the characteristics of cognitive EW, the development direction of cognitive EW has been prospected.

Keywords: cognitive electronic warfare; cognitive reconnaissance; cognitive jamming; jamming evaluation; dynamic knowledge base

0 引言

电子战是指在电磁频谱领域军事作战双方为降低或削弱敌方战斗力并保持或增强己方战斗力, 所采取的各种电子战术措施和军事行动。要想赢得现代战争的主动权, 就必须有效控制与利用电磁频谱, 占领电磁频谱领域的制高点, 因此电子战作战手段的快速升级成为了军事战争技术变革亟须解决的问题。

随着科学技术的不断发展, 军事装备向着数字化、智能化、认知化方向快速跨步, 各种新型、未知的电磁威胁辐射源不断涌现, 导致战场电磁环境日益复杂多变, 传统电子战所具有的作战效能正逐渐下降, 面临着诸多亟须解决的问题: a) 战场电磁环境

日趋复杂, 未知信号、复杂波形层出不穷, 加之频谱拥堵以及海量数据的影响, 对电子战获取威胁目标的侦察信息与数据处理提出了新的挑战; b) 在人工智能、集成电路等技术的推动下, 作战对象智能化水平不断提升, 其自适应侦察能力与灵巧应变能力也随之增强, 对电子战的快速应变、资源调度与自适应干扰等能力提出了更高的要求; c) 传统电子战装备基于简单准则和程序化处理模式, 采用大量的战前评估和预置干扰实施对抗, 然而随着作战对象参数捷变、随动能力的加强以及隐蔽能力的不断提升, 电子战对实时评估与推理分析能力提出了迫切需求; d) 随着新体制雷达的不断发展, 传统电子战固定匹配库的数据量发生了巨变, 使得固定知识库架构装订信息量变得

庞大, 这些海量复杂大数据的处理、整合、分析与利用面临着巨大的考验。

随着人工智能技术的快速更迭, 认知理论被迅速应用到众多非生命系统领域, 其在信息科学领域大放异彩。从认知无线电到认知雷达, 雷达系统感知环境实时做出有效调整, 从而适应战场变化, 大幅度提高系统的可靠性。传统电子战已无法对其进行快速有效侦察和实时精准干扰, 为了应对新的挑战, 具备认知对抗能力的电子战系统成为了一种重要解决方案。认知电子战是一种采用基于认知知识库的“感知→识别→决策→行动→感知”闭环学习处理流程, 其融合认知科学与电子战技术, 对周边复杂作战环境实时感知、学习与自适应, 对威胁辐射源进行智能干扰与精准评估, 实现智能化、网络化、模块化与可重构化的多功能电子战理念。因此, 本文分析传统电子战面临的诸多挑战, 研究认知电子战的架构及其组成, 探究认知电子战的关键技术和发展趋势, 对于提升电子战装备研制水平具有重要意义。

1 认知电子战系统架构分析

认知电子战是一种采用基于动态知识库的“感知→识别→决策→行动→感知”闭环学习处理流程, 能够通过感知与推理获取环境中的信息, 经过学习和判断不断增强性能, 智能地选择最佳干扰策略, 对作战对象自适应实施干扰。认知电子战系统组成如图1所示, 它包括1个技术支撑和3个重要环节, 技术支撑指动态知识库技术, 重要环节包括认知侦察环节、认知干扰环节和干扰评估环节。具体工作流程为: 认知侦察环节通过不断感知周围的环境, 为认知干扰环节和干扰评估环节提供数据支撑, 同时为动态知识库中的特征描述库传递数据以进行样本积累与更新; 认知干扰环节在此基础上结合动态知识库中的对抗策略库和对抗案例库, 进行干扰样式决策和干扰任务分配以实施电子干扰; 干扰评估环节根据实施电子干扰前后威胁辐射源信息变化定量地分析对抗效果, 计算干扰措施的效能评估值, 辅助干扰决策, 进而提升认知对抗技战术水平。

1.1 认知侦察

认知侦察是现代认知电子战中的关键环节, 该过程主要目的是通过实时分析电磁环境, 获取并处理敌方雷达信号, 从而准确识别敌方雷达系统, 核心技术主要包括信号检测与参数测量、波形识别、信号分

选、工作模式识别等。近年来, 随着人工智能和大数据技术的快速发展, 雷达系统的复杂性和多样性显著增加, 传统侦察方法缺乏灵活性, 对复杂电磁环境的感知能力有限, 动态环境适应能力差, 需要向认知侦察方向演进, 认知侦察策略应朝着更智能、更灵活的方向发展。

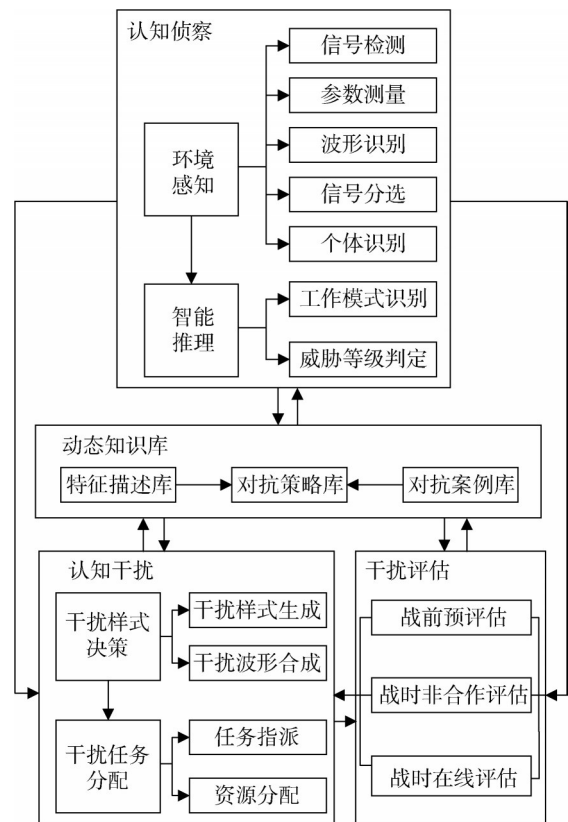


图1 认知电子战组成

Fig.1 Composition of cognitive Electronic Warfare

1.1.1 信号检测与参数测量

信号检测与参数测量是通过数字信道化技术检测并测量雷达信号的脉冲到达角、载频、脉冲到达时间、脉冲宽度和脉冲幅度等参数, 为认知侦察后续环节提供数据依据。数字信道化技术通过将宽带信号分解为多个窄带子信道, 使目标信号通过子信道被检测出来。为了更好地提升信号检测概率, 优化信道化结构是至关重要的举措。常用的数字信道化结构有基于多相滤波结构^[1]、基于加权叠接相加结构^[2]、基于短时傅里叶变换结构^[3]、基于快速傅里叶变换结构^[4]等, 这些新型的数字信道化接收设备有着较强的感知能力及灵活性。

基于多相滤波结构的数字信道化接收机通过将传统的数字滤波器分解为多个具有不同相位的子滤

波器,降低每个子滤波器的阶数,从而减少了计算量。基于加权叠接相加结构的数字信道化接收机,通过叠接和相加操作能够高效地处理信号,对滤波器进行加权处理从而增加灵活性。基于短时傅里叶变换结构的数字信道化接收机能够同时提供时域和频域信息,适用于非平稳信号的分析。基于快速傅里叶变换结构的数字信道化接收机利用快速傅里叶变换对宽带信号进行频域分解,将整个频段划分为多个独立的窄带子信道,从而实现并行信号处理。上述结构普遍面临着实现复杂度较高、资源占用较大以及对特定应用场景适应性受限等不足。面对复杂的信号环境和敌方的伪装措施,仍需不断采用新技术和新方法来提高信号检测与参数测量的准确性和效率。

1.1.2 信号调制识别

雷达信号调制识别通过对接收的雷达信号进行特征分析,准确识别其调制类型,为后续信号分选提供数据支撑,是认知侦察系统的重要组成部分。在当下电子战环境中,雷达技术飞速发展使得信号呈现复杂性和多样性,对识别技术的准确性和泛化性提出了更高要求。为满足上述需求,目前雷达信号调制识别领域的研究聚焦于3个核心任务:基于闭集识别的雷达调制信号识别、基于开集识别的雷达调制信号辨识和基于无监督的未知雷达调制信号识别。

a) 基于闭集识别的雷达调制信号识别。

基于闭集识别的雷达信号调制识别是在先验信息完备情况下,通过构建接收信号特征与已知调制类别库之间的映射关系,实现已知类型准确识别。早期的雷达信号较为单一,传统识别方法依赖专家经验获取时频域特征^[5]或高阶统计量^[6]等信息,并通过阈值判决实现分类。然而电磁环境愈加复杂,信号数量逐渐增加,仅靠传统方法很难满足当下的侦察需求。文献[7]和文献[8]分别提取信号时域特征和循环谱特征,利用支持向量机对所提取特征进行有效分类,从而实现雷达调制信号识别。随着深度学习技术的发展,雷达信号调制识别逐步转到智能特征学习方向。文献[9]搭建一维残差神经网络,对时序雷达信号数据进行特征提取和识别。文献[10]以时频图像作为网络的输入信息,利用注意力机制自适应聚焦关键特征区域,进而增强对雷达信号特征的提取能力。文献[11]利用深度神经网络学习双谱切片特征,实现调制类型的准确识别。上述基于深度学习的识别算法

以强大的特征提取能力,自主挖掘信号复杂特征,能够更好地满足雷达信号调制识别在实际场景下的应用需求。

b) 基于开集识别的雷达调制信号辨识。

基于开集识别的雷达调制信号辨识算法,考虑到实际环境中存在已知调制类别库未涵盖的类别信号,利用开集识别方法,有效区分未知调制类型信号,并实现各已知类信号的准确识别。目前主流的开集识别算法可分为两类。

第1类是基于生成模型的开集识别算法。该类算法借助生成模型学习已知数据分布,通过计算重构前后样本差异等方法,区分开放集中的未知样本,并利用统计决策机制实现已知类别的分类。文献[12]提出基于生成对抗网络的重构判别模型,通过对抗训练学习已知调制信号分布,并利用重构误差与判别门限之间的关系实现开集识别;文献[13]构建编码器—解码器模型,学习训练样本低维度特征并对其进行重构,通过重构误差检测未知样本,结合分类器区分各已知类别;文献[14]采用自编码器模型压缩重建信号,利用判别网络对压缩后数据进行特征提取并拟合极值分布,结合极值理论实现开集识别。

第2类是基于判别模型的开集识别算法。该类算法通过神经网络对已知类别数据进行特征提取,利用特征距离度量等判别准则,实现开放集识别。文献[15]在神经网络提取高维特征向量后,计算特征向量与互易点之间的空间距离,依据距离判别实现已知信号分类和未知信号判别;文献[16]利用单类支持向量机学习神经网络提取的特征,并构建以不同调制方式为核心的超球体,通过计算测试样本特征距各超球体的判别距离,实现开集识别。

c) 基于无监督的未知雷达调制信号识别。

基于开集识别的雷达信号辨识算法虽然能够成功划分出未知类别信号,但在缺乏信号类别标签等信息的情况下,无法深入挖掘不同未知信号之间的差异。基于无监督的未知雷达信号识别算法,利用聚类方法挖掘信号潜在特征,并依据样本间相似度度量,对未知雷达信号进行合理分簇,从而实现对未知信号的有效识别。目前针对未知雷达信号识别的研究尚处于发展阶段,公开的研究成果较少。鉴于雷达信号时频域在特征表现形式上与自然图像存在一定相似性,可将其处理方法拓展至自然图像处理领域。目前无监督聚

类算法可分为基于相似性度量的传统聚类^[17-19]和基于深度表征学习的深度聚类^[20-22],前者利用距离度量方法实现特征空间划分,后者通过端到端学习架构实现深度特征与聚类目标的共同优化。将上述方法应用至未知雷达调制信号识别领域,可推动该领域研究取得新进展。

1.1.3 信号分选

信号分选是指在复杂的电磁环境中,从密集的脉冲流中分离出多部雷达的脉冲序列,将不同雷达的信号区分开来,以便进一步处理和分析。分选方法包括预分选和主分选两个阶段。预分选是对接收到的雷达信号进行初步分类和筛选的过程,以减少数据量并稀疏脉冲流,实现信号去交错处理,为后续的主分选奠定基础。主分选是对预分选后的脉冲数据进行精细处理,进一步分离每部雷达的脉冲序列,最终实现不同雷达信号的区分。目前常采用聚类与数学理论、智能算法、深度学习相结合的方法进行预分选,采用累积差值直方图(Cumulative Difference Histogram, CDIF)、序列差值直方图(Successive Difference Histogram, SDIF)、PRI变换法、深度学习等方法进行主分选。

文献[23]提出了一种基于改进谱聚类联合数据场理论的聚类分选算法,通过对数据场势值分析去除噪声干扰,利用网格密度划分选取合理地标,并结合稀疏谱聚类实现信号分选,解决了雷达信号分选中辐射源数目不确定、对噪声影响敏感等问题。文献[24]提出了一种基于天牛须优化的K-Means分选算法,在不需要雷达信号先验知识的情况下,融合蚁群聚类、天牛须搜索(Beetle Antennae Search, BAS)和K-Means聚类算法,准确地将复杂雷达信号进行分类,解决了分选未知数目雷达信号准确率不高且依赖先验知识的问题。文献[25]提出了一种基于改进CAE的嵌入式深度聚类算法,结合了深度学习和聚类算法,能够在复杂的图像数据中挖掘出更精准、更具语义的聚类信息,提升聚类结果的准确性,可将该方法拓展至雷达信号预分选领域,解决传统聚类算法聚类精度以及聚类结果稳定性不足的问题。文献[26]提出了一种改进CDIF分选门限设置的方法,通过构建混叠辐射源脉冲到达时间概率模型,推导脉冲间时差最低统计频次,将其作为噪声门限以降低虚警概率,解决了传统的CDIF分选门限设置容易造成较高虚警概率的问题。文献[27]提出一种以SDIF算法辅助修正PRI变换法

的改进方法,融合PRI时频域特征优势,通过SDIF算法和修正PRI变换法检测并抑制子谐波,加权累积提升谱峰高度,显著提升了复杂电磁环境下的雷达信号分选性能。文献[28]提出一种基于Transformer的雷达信号分选方法,通过输入脉冲描述字参数到Transformer网络,利用位置编码和多头注意力机制加强特征学习,最终通过归一化指数函数实现分选,解决了传统方法在复杂电磁环境下效果不佳、适应性差的问题。信号分选通过不断的技术创新和升级,将为认知电子战系统提供更加精准、高效和智能的技术支撑。

1.1.4 工作模式识别

雷达工作模式识别是指截获并分析雷达脉冲信号的关键参数及其时序行为特征,结合先验知识库,利用数据驱动模型,判断雷达当前执行工作状态的技术。其核心目的在于解析雷达脉冲信号组与行为意图的映射关系,为评估威胁等级、制定干扰决策和评估干扰效果提供数据基础与信息支撑。雷达工作模式识别的主要途径有两种:基于数据匹配的雷达工作模式识别方法与基于推理模型的雷达工作模式识别方法。

a) 基于数据匹配的雷达工作模式识别方法。

基于数据匹配的雷达工作模式识别方法以数据分析为主导,通过对接收信号的脉内及脉间参数统计分析,结合雷达知识库,实现雷达模式识别,该方法包括综合识别方法与雷达知识库匹配法。文献[29]提出建立相控阵雷达知识库,利用截获的脉冲信号参数,匹配已知雷达模式参数范围,完成对工作模式的分析和识别。文献[30]提取雷达脉冲序列中重复间隔的变化规律,将雷达脉冲序列与活动雷达库中的记录进行关联,实现了雷达工作模式识别。文献[31]将不同雷达脉冲信号特征参数与雷达先验知识库进行匹配,实现了对于多功能相控阵雷达的工作模式识别。上述方法在低复杂度电磁环境及单一调制条件下具有高效性,但随着电磁环境日益复杂,基于数据分析方法难以达到较高的模式识别准确率。

b) 基于推理模型的雷达工作模式识别方法。

面对日益复杂的电磁环境,学者们尝试将推理模型的方法引入雷达工作模式识别研究,通过先验信息和当前观测数据,利用贝叶斯模型与D-S证据理论推断雷达的工作模式。文献[32]—[34]引入贝叶斯推理模型,结合神经网络或模糊匹配识别方法,利用

当前观测雷达脉冲数据与模型的先验概率计算后验概率,选择最高后验概率表征雷达工作模式识别结果。上述研究中,如果能够观测到足够多雷达脉冲信号的先验信息,基于贝叶斯推理的工作模式识别方法能够达到较准确的识别效果。但其局限性在于贝叶斯推理模型依赖已经观测到的数据,在非合作对抗条件下识别能力不稳定。文献[35]—[36]引入D-S证据理论,结合神经网络或灰度关联分析方法,提取并融合雷达脉冲信号多维度证据,计算多维度证据信任测度,并通过最大信任度准则或阈值判决推理雷达工作模式。该类方法融合多维度证据,降低模型对先验信息的依赖性,有效提高了雷达工作模式识别的准确率。

受深度学习领域的启发,目前有些学者逐渐将该类方法引入雷达工作模式识别研究,利用大量标注或未标注的雷达数据,通过特征提取算法和少样本学习算法自主学习不同工作模式下雷达脉冲的内在特征,从而提高识别准确性和结果实时性,减少人工特征提取的工作量和主观性,同时还能适应复杂多变的电磁环境。文献[37]利用脉冲描述字特征构造图像矩阵,通过提取方向梯度直方图特征训练CNN网络,达到较高的识别率。文献[38]充分利用深度学习网络的自适应特征学习能力,采用CGRU编码器提取并生成原始信号的分类特征向量,最后将特征向量输入SVM分类器中,实现多功能雷达工作模式识别。上述识别方法需要大量标注的雷达数据来训练网络,但在实际战场情况下,可能难以获取大量样本支持网络模型的训练。文献[39]提出基于知识原型网络的小样本多功能雷达工作模式识别方法,将雷达工作模式先验知识进行编码映射,并融入原型网络训练,实现知识在网络模型中的内嵌,获得更好的识别性能。若能提取更加丰富的样本特征,工作模式的识别性能将进一步提升。

1.2 认知干扰

认知干扰是现代认知电子战中的重要一环,其核心目标是通过干扰任务指派、干扰波形优化以及生成干扰决策,结合侦察获取的雷达信息,实时输出干扰信号,削弱、破坏敌方雷达的作战效能。近年来,随着人工智能和大数据技术的进步,不断涌现出各种新型、未知雷达,推动认知电子战进一步发展。因此,认知干扰应向更动态、更自适应的方向发展。

1.2.1 干扰任务指派

干扰任务指派是根据认知侦察环节获得的雷达信息,通过合理分配干扰资源,提高资源利用率,完成干扰任务指派,以最大程度干扰敌方雷达系统正常运行,从而获得总干扰效益最大化的技术。干扰任务指派在电子对抗中有着举足轻重的作用,合理的干扰任务指派方案可以降低敌方雷达的威胁,是后续电子攻击等战斗任务顺利进行的重要保障。实现干扰任务指派主要有两种方法,基于群智能算法的干扰资源分配方法和基于强化学习的干扰资源分配方法。根据不同的场景和任务,需要设计不同的适应度函数或约束条件来寻找最优的干扰任务指派结果。文献[40]提出了一种多机协同对抗雷达组网的干扰资源分配方法,使用遗传算法来进行任务指派,以突防飞机生存概率作为目标函数,在突防飞机生存率尽可能高的情况下合理分配干扰资源,提高干扰机协同干扰能力。文献[41]对遗传算法进行改进,提出了一种基于改进遗传算法的干扰资源分配方法,通过对算法种群行为进行改进,减少了迭代次数。以干扰总效能最大化为原则,构建目标效能函数,能够较好地解决分布式协同干扰资源优化分配问题。基于群智能算法的任务指派方法在任务执行中无法实现动态调整,且随着雷达与干扰机数目的增多,其求解速度减慢,难以满足干扰任务快速响应的要求。考虑到人工智能算法具有线下训练、线上快速应用的特点,学者们提出利用深度强化学习算法进行干扰任务指派。文献[42]提出一种基于预训练模型TD3的干扰目标分配方法,以多对多干扰目标分配场景为研究对象,利用预训练的深度神经网络初始化TD3算法中的动作网络和评价网络,加速模型收敛,实现了干扰任务的快速指派和干扰资源的分配。文献[43]提出一种基于SANER-PPO算法的无人机集群干扰资源分配方法,将优势标准化机制和熵正则化机制引入更新阶段,在干扰资源有限的条件下,有效地提升了压制干扰成功率。

1.2.2 干扰波形优化

干扰波形优化是通过利用参数设计的方法生成灵活多变的新型干扰样式,解决传统干扰样式失效等问题。通过对干扰波形进行优化能够有效应对复杂、动态、多变的电磁威胁。该技术可结合多指标因子,融合传统干扰样式,利用群智能算法或深度强化学习算法对相关参数进行寻优,得到最优干扰波形。文献[44]提出基于粒子群优化算法的相位编码雷达干

扰波形优化方法,对间歇采样脉冲进行相位序列调制并利用PSO算法进行优化,改变干扰信号脉压后的假目标统计特性,解决了传统干扰易失效的问题,达到优化干扰效果的目的。文献[45]利用多相序列调制法并结合PSO算法,有效解决了密集假目标干扰经过延迟叠加或离散混频多普勒调制后,产生信号存在峰均比过高的问题,优化了密集假目标干扰信号波形,提高了干扰性能。文献[46]提出了一种基于非均匀间歇采样重复转发的探测干扰一体化信号波形,根据距离、速度分辨率以及一体化信号脉压后幅度均值与标准差之比建立了目标函数,利用DQN算法进行求解,设计出最优的一体化信号波形,使发射的干扰信号具有探测的效果。文献[47]提出基于双层强化学习的干扰策略与干扰波形优化设计方法,对干扰策略和相干干扰波形的人工智能进行联合优化设计,使干扰信号能够自主适应敌方雷达工作模式的变化,实现了干扰策略和干扰波形的联合决策,达到优化干扰效果的目的。

1.2.3 干扰决策生成

干扰决策是根据干扰机侦收的雷达信息,选择对应有有效的干扰样式来对雷达进行干扰。在干扰决策领域,常利用机器搜索或数据驱动的方法来完成干扰决策。

a) 基于机器搜索的干扰决策。

干扰决策问题本质上是输出最优干扰决策,基于机器搜索的方法常用于解决此类寻找并输出最优解问题。传统的干扰决策方法利用已知的专家规则或先验知识,在已有的干扰决策库中寻找并输出最优干扰。这种方法简单快速,但随着干扰机与雷达数量的增加,传统的干扰决策方法缺乏针对性,难以解决复杂的干扰决策问题。群智能算法具备快速求解复杂干扰决策问题的能力,干扰方可利用群智能算法结合认知侦察环节获取到的先验知识进行寻优,输出最优干扰决策^[48]。群智能算法在认知电子战中面临通信资源短缺、实时性要求高以及全局性差等一系列挑战。文献[49]将棕鸟迁徙算法运用于干扰决策中,设计了分布式多节点次优决策与部分集中式最优解优化决策结合的决策结构,减少干扰机通信信息量的同时仍能保证较好的干扰决策效果,解决了通信资源短缺的问题。文献[50]结合混沌映射对人工蜂群算法进行改进,提高算法初始种群多样化,加快了算法的收敛速度。将改进后的算法运用于干扰决策中,解决了群智能算法干扰决策速度慢、实时性差的问题。文献

[51]改进了鱼群算法,加入迁徙行为,优化干扰资源配置,使干扰效果达到最优,解决了群智能算法全局性差的问题。但上述基于机器搜索的干扰决策方法均需要大量的先验信息与规则,现代认知电子战中雷达种类繁多,电磁环境复杂,无法保证通过侦察手段获取所有的先验信息,因此对现代认知干扰决策方法提出了更高的要求。

b) 基于数据驱动的干扰决策。

基于数据驱动的干扰决策方法利用数据进行训练得到模型,用模型来进行干扰决策。该方法能够解决基于机器搜索方法的干扰决策需要大量先验信息的问题。强化学习是一种机器学习方法,其系统在环境中执行某些动作,并根据环境反应学习做出提供最大回报的决策。强化学习方法可以解决决策中的实时行为问题^[52],这与认知干扰决策流程不谋而合。基于深度强化学习的干扰决策方法在认知电子战中面临训练收敛速度慢、针对时序性信号的有效性差以及训练效果不佳的问题。文献[53]引入基线和决斗网络,对A2C算法进行改进,提升了算法的收敛速度。文献[54]提出在深度强化学习训练中结合部分先验知识,加快模型收敛。上述方法解决了基于深度强化学习的干扰决策方法在训练中收敛速度慢的问题。文献[55]提出一种基于先验知识嵌入LSTM-PPO模型的智能干扰决策算法,捕捉回波数据的动态特征以有效刻画雷达的工作状态,提升了决策的有效性,解决了基于深度强化学习的干扰决策方法针对时序性信号干扰效果差的问题。文献[56]提出一种基于威胁机制双重深度Q网络的认知干扰决策方法,通过设计威胁网络和经验回放两种机制,避免强化学习模型在训练中重复执行错误决策,解决了基于深度强化学习的干扰决策方法训练效果不佳的问题。此外,还有部分学者结合博弈论的思想来解决干扰决策问题。文献[57]结合博弈论思想,综合考虑电子战系统、作战因素,通过作战双方的不完全信息的动态博弈解决了通信电子战行动决策中的干扰样式选择问题。

1.3 干扰评估

认知干扰评估是利用复杂电磁环境中干扰交互数据,结合电子对抗理论,采用人工智能技术,对雷达系统进行实时感知与分析,判断其在相应干扰样式下干扰成功与否的过程。干扰评估的核心目的是将电子干扰前后的雷达信息,以干扰效能值的形式进行定性或定量分析,进而评测干扰效能,推进认知干扰生成

更具针对性的对抗策略,提升干扰效果,降低资源消耗。认知干扰评估主要途径有两类方式:战时非合作干扰评估与合作干扰评估。近年来,随着人工智能和大数据的深入应用,雷达系统在目标检测、跟踪和识别等方面实现了智能化和高效能处理。然而,传统评估方法因缺乏智能性,难以适应复杂多变的作战环境,因此,认知干扰评估应该朝着具有智能决策特点的方向发展。

1.3.1 战时非合作干扰评估

战时非合作干扰评估是指结合先验信息,分析战时干扰实际交互数据,依据效率准则、功率准则和概率准则等不同评估准则,设计并确立评估指标,计算相应干扰样式下的干扰效能结果,进一步推进最优干扰策略的形成。

文献[58]将雷达回波脉冲数据、干扰脉冲数据,以及干扰方侦察信息,送入基于时域数据帧驱动的干扰效果评估模型,获得非合作条件下相应干扰的效能结果。文献[59]利用雷达接收信号参数变化,结合TOPSIS算法,生成信息熵作为评估指标,判定干扰效果。文献[60]提出了PSO-LSSVM算法进行雷达干扰在线评估,该方法使用LSSVM模型学习通信功率、通信模式、调频速率等6类抗干扰行为参数与干扰程度之间的关系,并利用粒子群优化算法优化LSSVM模型参数,通过LSSVM模型预测的干扰效果等级,评估雷达干扰效果。文献[61]根据实施干扰前后目标信号参数的变化来识别目标工作状态,并结合层次分析法和模糊综合评估模型,定量地分析对抗效果,得到当前干扰样式的评估结果,识别出目标系统的薄弱环节,指导干扰决策单元优选或生成干扰样式,更符合实际战场需求。

1.3.2 合作干扰评估

合作干扰评估是指对抗双方信息全部已知,通过敌我双方的力量对比,对有一定干扰效果的干扰样式进行效能评估,进而制定可行的干扰样式决策方案的过程。

文献[62]利用干扰方无法获取的雷达改善因子、雷达截面积及环境参数,结合GA-BP神经网络干扰效果评估模型,通过计算雷达受干扰前后探测距离的变化,评估干扰效果。文献[63]利用干扰前后雷达特征的变化率、熵差、交叉熵、相似度等合作信息,计算加权平均值,综合评估干扰效能。文献[64]将有效压制概率作为干扰效果评估指标,结合环境参数,利用合作条件下干信比与干扰压制

系数的力量对比,获取干扰效能评估结果。文献[65]在合作条件下,利用雷达的天线增益、发射机功率,以及传播环境等参数,计算到达雷达端的干扰功率,将其与目标回波功率进行比较,从而评估干扰性能。合作干扰评估可为战前制定最优干扰策略提供参考,也可为战后干扰策略的修正及优化提供有效方案。

1.4 动态知识库

为节省作战时间和资源,应结合认知电子战作战流程中认知侦察环节获取的雷达信息与生成的认知干扰决策,共同建立自主更新的动态知识库。动态知识库是认知电子战作战重要环节,包括特征描述库、对抗策略库和对抗案例库。其中,特征描述库存储着在认知侦察过程中所获得的雷达相关信息,随着认知电子战的进行实时更新。对抗策略库存储着已知干扰样式及关键参数,包括认知干扰过程中波形优化环节产生的新型干扰波形。对抗案例库存储着实时的雷达信息和与其对应的干扰决策,当认知侦察环节侦察到雷达信息后,将相关信息与对抗案例库中的雷达信息进行匹配,通过库索引的方式输出干扰决策,完成干扰任务。在干扰结束后,结合认知侦察环节获取的雷达信息与认知干扰决策,对对抗策略库和对抗案例库进行更新、补充,用以指导下次干扰。动态知识库的建立可通过将数据库技术与人工智能技术相结合的方法完成。数据库技术通过收集整理雷达信息数据和干扰信息数据,将其存储在特征描述库、对抗策略库和对抗案例库中,实现相关数据的检索、读写和更改等过程。人工智能技术具备判断和逻辑推理能力,该技术与数据库技术的结合使得动态知识库具备在线自主更新能力,可实现对数据的智能分析、推理、不断积累与完善。

2 认知电子战发展趋势

通过分析传统电子战面临的挑战,研究认知电子战架构及其组成,可以看出在未来战场中认知电子战仍是重要的作战手段,本文对认知电子战的发展趋势作以下展望。

2.1 可重构化

面对现代化战争中日益复杂的电磁作战环境,彼此独立、功能单一的传统电子战装备已无法适应当前作战需求,电子战装备的可重构化已经成为了未来认知电子战作战装备的重点发展方向。可重构化体现在电子战装备系统的模块通用化和功能一体化。未来电

子战装备将趋向采用通用化模块结构,即不同装备之间尽可能使用通用化电子模块,实现模块通用化,使其能够根据不同作战对象快速重构成具备不同功能的电子战装备系统。未来电子战装备系统将趋向由可重构模块且相互关联的若干装备组成,实现功能一体化,进而简化系统、共享资源,提高电子战装备的综合作战能力。

2.2 协同化

面对高度不确定、抗干扰、动态复杂多变的作战环境,认知电子战系统作战理念趋向分布式和网络化作战,作战样式由单平台作战向多平台联合作战转变,以增强作战灵活性和有效性。因此,也迫使认知电子战系统的作战能力趋向协同化发展,具备协同化作战能力的认知电子战系统也成为了当下及未来电子战技术研究的重要方向之一。一方面,针对认知电子战系统内部而言,在面对多个作战目标时,系统需要对己方多个干扰机等电子作战设备进行合理资源安排,以发挥最大作战效能,即己方电子战作战设备之间的工作应趋向协同化发展。作战设备个体之间的协同化体现在不同个体之间的信息充分融合共享,为系统决策提供信息支持;每个个体既能够自行决策又能够与系统中其他个体相互配合,共同完成作战任务。另一方面,针对电子战系统与其他军种作战系统协作而言,推动着认知电子战系统与其他军种作战系统之间的协同化合作,形成云协同作战,即在系统层面进行多源情报融合和实时共享、总体作战资源的分配和调度,以及作战效果评估等,发展分布式与网络化多军种作战系统的协同作战能力。

2.3 智能化

目前认知电子战处于弱人工智能阶段,其作战装备结合相关算法,具备一定学习和推理能力,但尚未真正具备自主性,还未实现真正的人工智能。未来认知电子战将向更高层次的强人工智能方向发展,深度结合人工智能,提升基于自主意识的学习和推理能力,实现电子战作战水平高质量发展。电子战将智能化渗透于作战流程的各环节中,推进侦察技术向智能化发展,提升在未来战场中对战场情报的态势感知能力,增强信号检测与参数测量、信号调制识别、信号分选、工作模式识别等过程的自主化;推进干扰技术向智能化发展,基于深度强化学习实现干扰决策和优化以及干扰资源合理调度,促使干扰精准化、智能化;推进评估技术向智能化发展,基于智能学习和推

理对干扰效果进行反馈,进一步指导干扰策略以取得更好的干扰效果。随着电子战趋向网络化与智能化的体系作战,结合云计算、大数据以及人工智能等新兴技术,电子战系统将具备智能化协同作战能力。推动电子战协同作战智能化,使得系统能够自主学习和推理,以实现在高威胁环境下具备自主决策控制、智能实时任务调整和规划能力,快速且有效响应作战环境和作战目标的动态变化,提升系统应对新型未知威胁的战场应变能力和生存力,增强系统的作战效能和鲁棒性。

随着人工智能和电子信息技术等不断在军事领域渗透融合,以及面对不断涌现的种种威胁和新型未知挑战,在未来信息化战场中,掌握可重构化电子作战装备、具备智能作战和协同作战能力的作战方将会在复杂作战环境占据作战主动权。因此,未来电子作战装备将不断与人工智能等技术深度结合,向可重构化、协同化、智能化等趋势发展。

3 结束语

电磁频谱瞬息万变,领域斗争逐渐成为未来军事战争战略制高点,增强电磁频谱控制的作战方将会在未来电子战中占据更多战略优势。为确保在信息化战场中具备更全面掌握军事信息、更快实现有效决策和更精准打击作战目标等战略优势,应当积极面对不断涌现的新威胁和新挑战。因此,本文梳理认知电子战发展遇到的问题,论证了开展认知电子战研究的必要性,分析认知电子战系统架构,探究认知电子战关键技术,深入探讨其相应的发展方向,以期从事该领域的研究者提供参考,提升电子对抗作战效能,为有效对抗未来导弹防御系统奠定坚实的技术基础。

参 考 文 献

- [1] 戴健,李斌,王征炬,等.一种宽带数字信道化接收及发射系统[J].电子信息对抗技术,2022,37(4):13-16+47.
DAI Jian, LI Bin, WANG Zhengju, et al. A wideband digital channelized receiving and transmitting system[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2022, 37(4): 13-16+47.
- [2] CHENG W, ZHANG Q, LU W, et al. An efficient digital channelized receiver for low SNR and wideband chirp signals detection[J]. Applied Sciences, 2023, 13(5): 3080.
- [3] 李琳,苏生,王林.一种数字信道化自相关接收机的测频校正方法[J].舰船科学技术,2023,45(17):145-148.
LI Lin, SU Sheng, WANG Lin. A frequency measurement correction

- method for digital channelized autocorrelation receivers[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(17): 145-148.
- [4] TIAN Q, JIANG A, BI B. Design and FPGA implementation of a digital channelized receiver[C]. *Chongqing: 2nd IEEE International Conference on Information Communication and Software Engineering*, 2022.
- [5] 康乃馨, 何明浩, 韩俊, 等. 时频域综合分析的雷达信号识别方法[J]. *现代防御技术*, 2017, 45(5): 162-169.
- KANG Naixin, HE Minghao, HAN Jun, et al. Radar signal recognition method via synthetic analysis in time-frequency domain [J]. *Modern Defense Technology*, 2017, 45(5): 162-169.
- [6] 王国涛, 姜秋喜, 刘方正, 等. 基于频谱和瞬时自相关的雷达信号调制识别[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(1): 200-205.
- WANG Guotao, JIANG Qiuxi, LIU Fangzheng, et al. Radar signal modulation recognition based on spectrum and instantaneous autocorrelation[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(1): 200-205.
- [7] 李世通, 全大英, 唐泽雨, 等. 基于时频图像和高次频谱特征的雷达信号识别[J]. *电信科学*, 2022, 38(2): 84-91.
- LI Shitong, QUAN Daying, TANG Zeyu, et al. Time-frequency image and high-order spectrum characteristics based radar signal recognition[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(2): 84-91.
- [8] 刘腾飞, 李贺, 孙浩原, 等. 基于自相关积分循环谱的复合调制雷达信号识别方法[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2023, 18(10): 889-895.
- LIU Tengfei, LI He, SUN Haoyuan, et al. Intrapulse composite radar signal recognition method based on autocorrelation integral cyclic spectrum[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2023, 18(10): 889-895.
- [9] 徐卓君, 杨雯婷, 杨承志, 等. 雷达脉内调制识别的改进残差神经网络算法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(4): 1454-1460.
- XU Zhuojun, YANG Wenting, YANG Chengzhi, et al. Improved residual neural network algorithm for radar intrapulse modulation classification[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(4): 1454-1460.
- [10] 吴礼洋, 芮鹏程, 刘超, 等. 基于注意力机制增强残差网络的雷达信号调制类型识别[J]. *兵工学报*, 2023, 44(8): 2310-2318.
- WU Liyang, GUO Pengcheng, LIU Chao, et al. Radar signal modulation type recognition based on attention mechanism enhanced residual networks[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(8): 2310-2318.
- [11] 李楠. 双谱特征和深度学习在信号调制识别中的应用[J]. *弹箭与制导学报*, 2019, 39(5): 81-84+88.
- LI Nan. Application of bi-spectral feature and depth learning in signal modulation recognition[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(5): 81-84+88.
- [12] 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.
- [13] YUAN S, LI P, WU B. Radar emitter signal intra-pulse modulation open set recognition based on deep neural network[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(1): 108.
- [14] 秦博伟, 蒋磊, 许华, 等. 基于RE-GAN的调制信号开集识别算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(10): 3321-3328.
- QIN Bowei, JIANG Lei, XU Hua, et al. Open-set recognition algorithm for modulation signal based on RE-GAN[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(10): 3321-3328.
- [15] 刘志林, 王晋东, 李银龙, 等. MobileNetV3与互易点损失函数相结合的雷达波形开集识别[J]. *信息工程大学学报*, 2024, 25(6): 631-638.
- LIU Zhilin, WANG Jindong, LI Yinlong, et al. Radar waveform open-set recognition based on MobileNetV3 and reciprocal point loss[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2024, 25(6): 631-638.
- [16] 肖易寒, 李航, 于祥祯, 等. 基于MobileNetV3-SVDD的雷达信号调制方式开集识别[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(8): 1178-1185.
- XIAO Yihan, LI Hang, YU Xiangzhen, et al. Open-set recognition of radar signal modulation based on MobileNetV3-SVDD[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(8): 1178-1185.
- [17] 郭昕刚, 王佳, 程超. 层次聚类算法和基于图的分割算法相融合的图像分割算法[J]. *国防科技大学学报*, 2022, 44(3): 194-200.
- GUO Xingang, WANG Jia, CHENG Chao. Image segmentation algorithm combining hierarchical clustering algorithm and graph-based segmentation algorithm[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2022, 44(3): 194-200.
- [18] 孙林, 刘梦含. 基于自适应布谷鸟优化特征选择的K-means聚类[J]. *计算机应用*, 2024, 44(3): 831-841.
- SUN Lin, LIU Menghan. K-means clustering based on adaptive cuckoo optimization feature selection[J]. *Journal of Computer Applications*, 2024, 44(3): 831-841.
- [19] 薛财文, 刘通, 邓立宝, 等. 基于主成分分析的DBSCAN分类差分进化算法改进[J]. *现代电子技术*, 2024, 47(16): 171-179.
- XUE Caiwen, LIU Tong, DENG Libao, et al. Improved differential evolution algorithm based on PCA-DBSCAN classification[J]. *Modern Electronic Technique*, 2024, 47(16): 171-179.
- [20] ZHAI Y, ZHOU W, SUN B, et al. Weakly contrastive learning via batch instance discrimination and feature clustering for small sample SAR ATR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022(60): 1-17.
- [21] 吴小丹, 黄朝围, 王剑, 等. 基于双视角协同聚类和特征谱的雷达辐射源分类[J]. *上海航天(中英文)*, 2025, 42(1): 186-196.
- WU Xiaodan, HUANG Chaowei, WANG Jian, et al. Radar radiation

- source classification based on dual-view collaborative clustering and feature spectra[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2025, 42(1): 186-196.
- [22] 刘合兵, 孔玉杰, 席磊, 等. 融合注意力机制的解耦对比聚类[J]. 计算机工程与科学, 2024, 46(12): 2261-2270.
LIU Hebin, KONG Yujie, XI Lei, et al. A decoupled contrastive clustering integrating attention mechanism[J]. Computer Engineering and Science, 2024, 46(12): 2261-2270.
- [23] 王易丽, 杨宇明. 一种基于改进谱聚类的雷达信号分选算法[J]. 电讯技术, 2023, 63(9): 1348-1354.
WANG Yili, YANG Yuming. A radar signal sorting algorithm based on improved spectral clustering[J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(9): 1348-1354.
- [24] 赵贵喜, 郑洪涛, 张冀. 基于天牛须优化的K-Means算法在雷达信号分选中的应用[J]. 舰船电子对抗, 2024, 47(6): 92-95.
ZHAO Guixi, ZHENG Hongtao, ZHANG Ji. Application of K-Means algorithm based on beetle antennae optimization to radar signal sorting[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2024, 47(6): 92-95.
- [25] 李天雨, 赵超超, 何鑫, 等. 基于改进CAE的嵌入式深度聚类算法[J]. 现代计算机, 2024, 30(15): 1-9.
LI Tianyu, ZHAO Chaochao, HE Xin, et al. Embedded deep clustering algorithm based on improved CAE[J]. Modern Computer, 2024, 30(15): 1-9.
- [26] 陈鸿杰, 李利民, 邓志安, 等. 基于改进门限CDIF的雷达信号分选方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(11): 1094-1101+1118.
CHEN Hongjie, LI Limin, DENG Zhian, et al. A method of radar signal sorting base on improved threshold CDIF[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(11): 1094-1101+1118.
- [27] 王星斗, 坤娅. 基于脉冲重复间隔的信号分选方法研究[J]. 航空计算技术, 2024, 54(6): 55-59.
WANG Xingdou, KUN Ya. Research on signal sorting method based on pulse repetition interval[J]. Aeronautical Computing Technique, 2024, 54(6): 55-59.
- [28] 张旭威, 徐鹏涛, 管振辉. 基于Transformer的雷达信号分选方法[J]. 舰船电子对抗, 2023, 46(5): 84-87.
ZHANG Xuwei, XU Pengtao, GUAN Zhenhui, et al. Radar signal sorting method based on Transformer[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2023, 46(5): 84-87.
- [29] 王岩, 刘璘, 陈彬. 相控阵雷达识别专家系统的知识库建造[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(5): 78-80.
WANG Yan, LIU Lin, CHEN Bin. Establishment of knowledge library of expert system for phased array radar identification[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(5): 78-80.
- [30] 关一夫, 张国毅, 王晓峰. 基于脉冲重复间隔的活动雷达库关联算法[J]. 现代雷达, 2015, 37(7): 76-79.
GUAN Yifu, ZHANG Guoyi, WANG Xiaofeng. Association algorithm for active radar database based on pulse repetition interval [J]. Modern Radar, 2015, 37(7): 76-79.
- [31] 张小飞, 徐大专. 基于知识库的雷达辐射源识别专家系统[J]. 现代雷达, 2003(10): 1-4.
ZHANG Xiaofei, XU Dazhuan. Expert system of radar radiating-source recognizing based on knowledge library[J]. Modern Radar, 2003(10): 1-4.
- [32] 孟伟, 王宝树, 赵健. 基于神经网络与主观Bayes理论的雷达识别研究[J]. 计算机工程, 2002(7): 156-158.
MENG Wei, WANG Baoshu, ZHAO Jian. Study on radar type classification based on the combination of ANN and subjective Bayesian[J]. Computer Engineering, 2002(7): 156-158.
- [33] 朱晓亮, 蔡群, 周明亮. 基于BP神经网络和贝叶斯推理的雷达辐射源识别[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(4): 15-18.
ZHU Xiaoliang, CAI Qun, ZHOU Mingliang. Radar radiation source identification based on BP neural net and Bayes reasoning[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(4): 15-18.
- [34] 余银, 丁怀, 赵俊杰. 基于Bayes网络的机载多功能雷达工作模式识别[J]. 电子信息对抗技术, 2020, 35(1): 11-15.
YU Yin, DING Huai, ZHAO Junjie. Airborne multifunction radars recognition using Bayes network[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2020, 35(1): 11-15.
- [35] 马珂, 毕大平. 机载火控雷达空空工作状态识别研究[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(6): 697-703+708.
MA Ke, BI Daping. Research on air-to-air working state recognition of airborne fire control radar[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(6): 697-703+708.
- [36] 王星, 王志鹏, 吕鹏程, 等. 应用D-S证据理论的雷达工作模式特征层融合识别[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(4): 35-40.
WANG Xing, WANG Zhipeng, GUO Pengcheng, et al. A feature-level fusion recognition algorithm of radar operation mode based on D-S evidence theory[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2016, 17(4): 35-40.
- [37] 贾邦玲, 时艳玲, 姜磊. 基于卷积神经网络的雷达工作模式识别[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(22): 15-18.
JIA Bangling, SHI Yanling, JIANG Lei. Radar operating mode recognition based on convolutional neural network[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(22): 15-18.
- [38] 贺俊, 张雅声, 尹灿斌, 等. 基于CGRU-SVM的星载SAR工作模式识别方法[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(3): 99-105.
HE Jun, ZHANG Yasheng, YIN Canbin, et al. Operating modes of space-borne SAR recognition method based on CGRU-SVM[J]. Command Control & Simulation, 2022, 44(3): 99-105.
- [39] 利强, 张伟, 金秋园, 等. 基于知识原型网络的小样本多功能雷达工作模式识别[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1344-1350.

- LI Qiang, ZHANG Wei, JIN Qiuyuan, et al. Multi-function radar working mode recognition with few samples based on knowledge embedded prototype network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(6): 1344-1350.
- [40] 陈思南. 多机协同对抗雷达组网的干扰资源分配研究[J]. *现代雷达*, 2024, 46(9): 98-102.
- CHEN Sinan. A study on resource allocation in multi-aircraft cooperative jamming for netted radar[J]. *Modern Radar*, 2024, 46(9): 98-102.
- [41] 郝万兵, 张军, 张昕. 基于改进遗传算法的干扰资源分配方法研究[J]. *火控雷达技术*, 2023, 52(2): 56-60.
- HAO Wanbing, ZHANG Jun, ZHANG Xin. Research on jamming resource allocation based on the improved genetic algorithm[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2023, 52(2): 56-60.
- [42] 余晨, 唐建强, 杨益川, 等. 基于预训练模型TD3的干扰目标分配方法[J]. *电子信息对抗技术*, 2024, 39(4): 1-7.
- YU Chen, TANG Jianqiang, YANG Yichuan, et al. A method of jamming target allocation based on pre-trained TD3[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2024, 39(4): 1-7.
- [43] 刘旖菲, 李小帅, 杨俊安, 等. 基于SANER-PPO算法的无人机集群干扰资源分配方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 3937-3945.
- LIU Yifei, LI Xiaoshuai, YANG Junan, et al. SANER-PPO algorithm-based jamming resource allocation for UAV swarm[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(12): 3937-3945.
- [44] 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.
- [45] 熊波, 杨峰, 张大琳, 等. 密集假目标干扰峰均比优化方法分析[J]. *电子信息对抗技术*, 2024, 39(3): 8-13.
- XIONG Bo, YANG Feng, ZHANG Dalin, et al. Optimization method for peak-to-average power ratio of dense false target jamming[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2024, 39(3): 8-13.
- [46] 陈涛, 张颖, 胡学晶, 等. 基于DQN的探测干扰一体化波形优化设计[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(3): 638-646.
- CHEN Tao, ZHANG Ying, HU Xuejing, et al. Integrated waveform optimization design of detection and jamming based on DQN[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(3): 638-646.
- [47] 辛祺, 辛增献, 马亮, 等. 基于双层强化学习的干扰策略与干扰波形优化设计[J]. *制导与引信*, 2023, 44(4): 35-41.
- XIN Qi, XIN Zengxian, MA Liang, et al. Optimization design of interference strategy and interference waveform based on two-layer reinforcement learning[J]. *Guidance & Fuze*, 2023, 44(4): 35-41.
- [48] 阎潇, 王青平, 胡卫东, 等. 基于遗传-群体智能融合算法的干扰决策方法[J/OL]. *电讯技术*, 1-11[2025-02-19]. <https://link.cnki.net/doi/10.20079/j.issn.1001-893x.240314001>.
- YAN Xiao, WANG Qingping, HU Weidong, et al. An interference decision-making method based on genetic-population intelligent fusion algorithm[J/OL]. *Telecommunication Engineering*, 1-11[2025-02-19]. <https://link.cnki.net/doi/10.20079/j.issn.1001-893x.240314001>
- [49] 阎潇, 王青平, 胡卫东, 等. 基于棕鸟迁徙的干扰资源动态分配方法[J/OL]. *系统工程与电子技术*, 1-14[2025-02-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2422.TN.20241205.1744.006>.
- YAN Xiao, WANG Qingping, HU Weidong, et al. Dynamic interference resource allocation method based on starling migration [J/OL]. *Telecommunication Engineering*, 1-14[2025-02-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2422.TN.20241205.1744.006>.
- [50] 裴立冠, 刘华军, 刘可. 一种基于人工蜂群算法的干扰方案决策方法[J]. *火力与指挥控制*, 2024, 49(7): 70-74+79.
- PEI Liguan, LIU Huajun, LIU Ke. A jamming scheme decision-making method based on artificial bee colony algorithm[J]. *Fire Control & Command Control*, 2024, 49(7): 70-74+79.
- [51] 柳始良, 高晓腾, 刘冀川, 等. 基于改进鱼群算法的群体化协同侦察干扰方法[J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(8): 87-95.
- LIU Shiliang, GAO Xiaoteng, LIU Jichuan, et al. Method of swarm cooperative reconnaissance and jamming based on the improved fish swam algorithm[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(8): 87-95.
- [52] AKANKSHA E, JYOTI, SHARMA N, et al. Review on reinforcement learning, research evolution and scope of application[C]. Xi'an: the 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), 2021.
- [53] ZHANG C, YANG B, WANG L, et al. A cognitive jamming decision-making method based on heuristic improved A2C algorithm[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(2): 2871-2883.
- [54] 梁猛, 王卫, 余波, 等. 基于优势行动-评论的雷达自主干扰决策方法[J]. *航天电子对抗*, 2023, 39(5): 17-21.
- LIANG Meng, WANG Wei, YU Bo, et al. Adaptive radar jamming decision-making method based on A2C algorithm[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2023, 39(5): 17-21.
- [55] 张静克, 杨凯, 李超, 等. 基于先验知识嵌入LSTM-PPO模型的智能干扰决策算法[J]. *通信学报*, 2024, 45(12): 227-239.
- ZHANG Jingke, YANG Kai, LI Chao, et al. Intelligent interference decision algorithm with prior knowledge embedded LSTM-PPO model[J]. *Journal on Communications*, 2024, 45(12): 227-239.
- [56] 黄湘松, 查力根, 潘大鹏. 基于威胁机制-双重深度Q网络的多功能雷达认知干扰决策[J]. *应用科技*, 2024, 51(4): 145-153.
- HUANG Xiangsong, CHA Ligen, PAN Dapeng. Cognitive jamming decision making method of multi-functional radar based on DDQN with threat warning mechanism[J]. *Applied Science and Technology*, 2024, 51(4): 145-153.

- [57] 赵禄达, 王斌, 侯嵬. 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.
- [58] 胡泽辉, 丁锁辉, 王秀锦. 雷达有源对抗干扰效果在线辅助评估技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2024, 47(5): 32-37.
HU Zehui, DING Suohui, WANG Xiujin. Research into online assistant evaluation technology of jamming effect of active radar countermeasure[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2024, 47(5): 32-37.
- [59] ZHU W, LIU S, XIE H, et al. An online evaluation method based on entropy-topsis radar interference effect[C]. Beijing: 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 2020.
- [60] WANG G, LONG H, KANG Y, et al. Jamming effect evaluation algorithm based on PSO-LSSVM[C]. Xi'an: the 8th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), 2023.
- [61] 汤广富, 安红, 焦志. 基于层次分析法的协同干扰效能评估[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(4): 58-62.
TANG Guangfu, AN Hong, JIAO Zhi. Cooperative jamming effectiveness evaluation based on analytic hierarchy process[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2016, 31(4): 58-62.
- [62] 崔文竣吉, 陈旗, 龚辉. 基于GA-BP神经网络的雷达干扰效能评估方法[J]. 信息对抗技术, 2023, 2(6): 85-96.
CUI Wenjunji, CHEN Qi, GONG Hui. Effectiveness evaluation method of radar jamming based on GA-BP neural network[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(6): 85-96.
- [63] 孙文磊, 顾荣军, 王在立, 等. 基于GPU的ISAR实时干扰效果评估[J]. 雷达与对抗, 2023, 43(4): 4-8.
SUN Wenlei, GU Rongjun, WANG Zaili, et al. Real-time interference effect evaluation of ISAR based on GPU[J]. Radar & ECM, 2023, 43(4): 4-8.
- [64] 魏昱, 王广学, 何缓, 等. 一种基于目标RCS起伏模型的雷达干扰效果评估方法[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(5): 76-79.
WEI Yu, WANG Guangxue, HE Huan, et al. A method of radar jamming effect evaluation based on RCS fluctuation model[J]. Ship Electronic Engineering, 2024, 44(5): 76-79.
- [65] 陈永森, 宋广, 杨蕾. 基于等效RCS的有源干扰性能评估方法[J]. 电子信息对抗技术, 2023, 38(4): 1-4.
CHEN Yongsen, SONG Guang, YANG Lei. Evaluation method of active jamming performance based on equivalent RCS[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2023, 38(4): 1-4.

作者简介

刘佳琪 (1963—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器设计、空间电磁频谱对抗等技术。