



认知电子战体系结构与技术

王沙飞¹, 鲍雁飞¹, 李岩^{2*}

1. 中国人民解放军军事科学院, 北京 100191

2. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081

* 通信作者. E-mail: liyan726@bit.edu.cn

收稿日期: 2018-06-13; 接受日期: 2018-08-01; 网络出版日期: 2018-11-27

摘要 随着认知无线电、软件定义网络、认知网络, 以及雷达通信系统抗干扰、低截获等技术的发展和装备部署应用, 战场电磁频谱环境的复杂程度呈现几何倍数的增加. 如何提高电子战“感知环境 (observe) – 适应环境 (orient) – 做出决策 (decide) – 采取行动 (act)” (OODA) 环路速度, 实现电磁敏捷, 是电子战应对未来复杂战场环境挑战需要解决的关键科学技术问题. 人工智能理论与电子战相结合, 形成具有认知能力的电子战系统, 将极大提高电子战系统对威胁信号的感知、干扰决策和干扰效果评估能力, 缩短对未知威胁的干扰反应时间, 加快电子战 OODA 环路速度, 提升电子战系统的作战能力.

关键词 人工智能, 机器学习, 认知, 电子战

1 概念内涵与研究现状

1.1 电子战概念及面临的挑战

1.1.1 电子战概念

电子战 (electronic warfare, EW) 也称为电子对抗 (electronic countermeasures, ECM), 定义为“是使用电磁能、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^[1,2]”.

作为一种作战行动, 电子战具备以下几个特点: (1) 电子战是敌我双方的一种动态博弈. 电子战包含电子对抗与电子反对抗这两个相互矛盾的方面, 电子战中对抗双方的博弈斗争, 是一个相互识别、相互躲避的动态过程, 取胜的关键在于能否更多地掌握对方的特征, 并在此基础上实施正确的战术. (2) 电子战双方争夺的核心资源是电磁频谱. 电子战的所有行动都是在复杂电磁信号环境中开展的, 谁能够占有和使用更广阔的电磁空间, 谁就能够占有电子战的主动权. (3) 电子战作战范围广泛、作战手段

引用格式: 王沙飞, 鲍雁飞, 李岩. 认知电子战体系结构与技术. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1603–1613, doi: 10.1360/N112018-00153
Wang S F, Bao Y F, Li Y. The architecture and technology of cognitive electronic warfare (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1603–1613, doi: 10.1360/N112018-00153

多样. 电子战具有雷达对抗、通信对抗、光电对抗等众多技术分支, 在手段上包括从被动释放诱饵进行防护到电子反辐射火力打击等一切可用于争夺电磁空间的手段.

1.1.2 传统电子战系统面临的挑战

随着信息技术的不断发展, 战场电磁环境日益复杂, 新型雷达与通信设备中智能技术、网络技术以及抗干扰技术的广泛应用, 给传统电子战系统带来了新的挑战.

(1) 复杂电磁环境下对目标信号的威胁感知难度增大. 在现代战场环境中, 雷达探测、光电探测、电子侦察、电子干扰等各类电子设备的使用, 都极大地加剧了战场电磁环境的复杂性, 一部电子战设备可能同时受到几十部甚至上百部电子设备的电磁辐射, 要从这些海量信号中迅速截获、分选并识别威胁目标, 并对威胁目标实施有效的电子攻击, 对电子对抗系统而言是个极大的挑战.

(2) 智能化电子信息设备自主感知与快速应变能力大大增强. 在人工智能、软件无线电、认知无线电等技术的推动下, 新一代具有认知能力的自适应电子信息设备充分利用其对环境感知的能力, 在发射与接收之间形成一个闭环, 使其可以根据环境 (包括杂波、地理环境、干扰等) 实时对工作模式、发射参数、处理过程等进行调整, 大大提高了系统各方面的性能, 由此逐渐拉开了电子战装备的技术差距. 针对先进的具备认知能力的目标系统, 传统的电子对抗设备的智能化水平与对抗目标存在着严重的不对等, 对抗效果将会被极大地削弱甚至完全失效. 因此, 如何有效对抗智能化的自适应电子信息系统, 是目前电子对抗领域亟待解决的问题.

(3) 对抗组网信息系统难度极大. 雷达、通信等战场信息系统组网化的趋势, 对于发展新型电子对抗装备提出了更为急迫的需求. 例如, 传统的雷达干扰方式只能压制雷达网中的一部或部分雷达, 而整个雷达网可通过多个雷达传感器的信息融合, 消除干扰的影响; 传统通信干扰方式只能干扰压制通信网络中的部分链路, 网络中的节点依靠链路迂回依然可正常通信. 面对组网信息系统, 迫切需要对抗方发展智能对抗技术对组网系统行为进行辨识, 以便可针对性地采取对抗措施, 及时发现并攻击目标组网系统的关键节点与要害分系统.

1.2 认知电子战概念内涵及解决的主要问题

电子战中对抗双方博弈斗争是一个相互识别、相互躲避的动态过程, 电子战装备只有具备“边对抗边学习”的能力, 通过对手反馈状态的辨识及时调整己方的应对策略, 才能掌握未来电子战中的主动权. 为此, 国内外提出了具有学习能力的认知电子战系统的概念.

认知电子战系统是一种具有通过先验知识以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以适应电磁环境的变化, 提高干扰的快速反应能力与可靠性^[3].

进一步可将认知电子战定义为: 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. 其中, 装备认知能力的提升集中体现了认知电子战的根本属性, 并作为显著特点区别于传统电子战.

认知电子战的基本特征包括: 感知环境, 适应新威胁, 波形多变, 具备学习能力. 其认知的过程是一种感知环境 (observe) → 适应环境 (orient) → 做出决策 (decide) → 采取行动 (act) 的 OODA 循环. 学习能力在循环过程的每个环节中都发挥着作用, 是认知电子战最重要的能力要求.

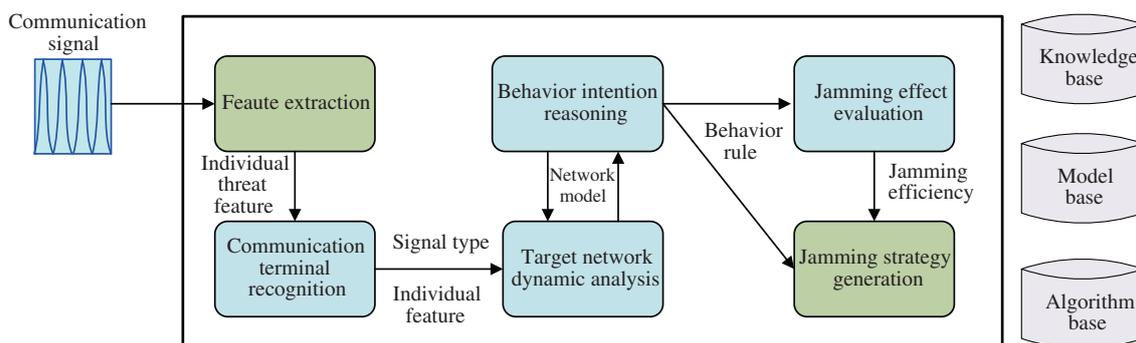


图 1 (网络版彩图) 面向通信对抗的认知体系架构

Figure 1 (Color online) Cognitive architecture for communication countermeasure

1.3 国外研究现状

美国最先意识到认知技术给电子战发展带来的机遇,从 2010 年起,美军以提高装备认知能力为核心,陆续开展了认知电子战技术研究,启动了自适应电子战行为学习、自适应雷达对抗、认知干扰机,以及认知电子战计划等项目.

1.3.1 自适应电子战行为学习项目

2010 年,美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 发布了“自适应电子战行为学习项目 (behavioral learning for adaptive electronic warfare, BLADE)”公告^[4],旨在对已知、未知的无线通信系统进行检测、描述、分类并生成对抗措施,项目将开发一种组网式的电子攻击系统,能实时检测、分析无线通信威胁,对战场新出现的无线通信威胁进行自动干扰.

文献 [5] 中给出了 BLADE 项目中采用的基于案例学习的学习与推理器的结构,其可以将对新型目标的干扰评估信息反馈给推理器,以告知其所选的干扰措施是否有效,在实际环境中不断扩大和更新案例库,提高系统的适应能力.

进一步地,本文给出面向通信对抗的认知体系架构,如图 1 所示,在侦察接收机侦收到通信信号后,经过一系列预处理,送入特征提取模块,通过一些特征变换、信号处理的方法得到通信目标的个体威胁特征;然后进行通信终端识别(包括战场通信对抗终端和卫星通信对抗终端),得到信号类别和个体特征;进一步针对通信网络进行网络化目标动态分析和行为意图推理,得到网络模型;推理结果分别送入干扰效果评估、干扰策略生成模块,最终配置生成干扰策略.

1.3.2 自适应雷达对抗

2012 年, DARPA 启动了“自适应雷达对抗 (adaptive radar countermeasures, ARC)”研究项目^[6],寻求研发能够对抗敌方自适应雷达系统的机载电子战能力.项目要求在战术相关时间范围内,基于可观测信号对自适应雷达威胁的对抗能力.自适应雷达威胁是指具有新型、未知或不确定波形和行为的敌方雷达,尤其是多功能地空和空空相控阵雷达,这些雷达具有监视、截获、跟踪、非协同目标识别、导弹跟踪等多种功能,并在波束控制、波形、相干处理周期特征上高度捷变.

文献 [5] 给出了一种对抗新型雷达波形的认知电子战体系结构:第一步是信号分类与特征描述;第二步是干扰措施合成.聚类模块将雷达信号生成“脉冲描述字 (pulse description word, PDW)”,然

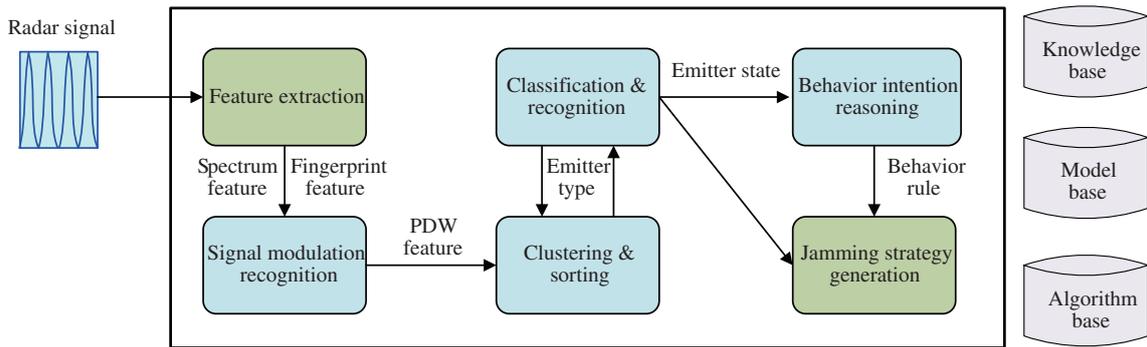


图 2 (网络版彩图) 面向雷达对抗的认知体系架构

Figure 2 (Color online) Cognitive architecture for radar countermeasure

后将其送入特征提取器; 接下来, 将提取的特征传输给基于案例的推理模块和 Bayes 网络模块, 二者分别输出对抗措施类别和辐射源类型、工作模式、行为意图; 最后通过模糊推理模块完成对抗措施的合成.

进一步地, 本文给出面向雷达对抗的认知体系架构. 如图 2 所示, 在侦察接收机侦收到雷达信号后, 经过一系列预处理, 送入特征提取模块, 通过一些特征变换、信号处理的方法得到雷达信号的频谱特征 (一维或二维) 和指纹特征; 然后进行信号调制类型识别, 并进一步得到 PDW 特征; 聚类分选模块基于无监督的聚类算法将多个交叠的 PDW 进行分选识别, 得到辐射源类别, 并进一步进行辐射源工作状态的分类识别; 识别结果分别送入行为意图推理、干扰策略生成模块, 最后根据行为意图推理的结果配置干扰策略.

1.3.3 美国空军认知干扰机项目

2010 年 1 月, 美国空军研究实验室发布“认知干扰机”项目公告 [7], 旨在开发一套多功能、灵活的第一代认知干扰机体系结构, 以对付那些采用了动态频谱接入的软件无线电或认知无线电电台. 认知干扰机的目的是通过改善干扰效果同时使自扰最小化来提高频谱优势, 最终将“感知、学习、适应、行动”的时间从“数天到数月”缩短到“数秒到数分钟”. 认知干扰机项目强调学习的效率以及动态调整策略, 是一种高效的、具备环境学习能力和动态智能调整能力的电子对抗技术.

1.3.4 美国海军认知电子战计划

美国海军 2013 年发布了“认知电子战研究”计划 [8], 主要任务包括自适应认知电子战技术、高吞吐量 and 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. 主要研究领域包括频谱知识感知与积累、频谱学习、频谱推理、频谱攻击等.

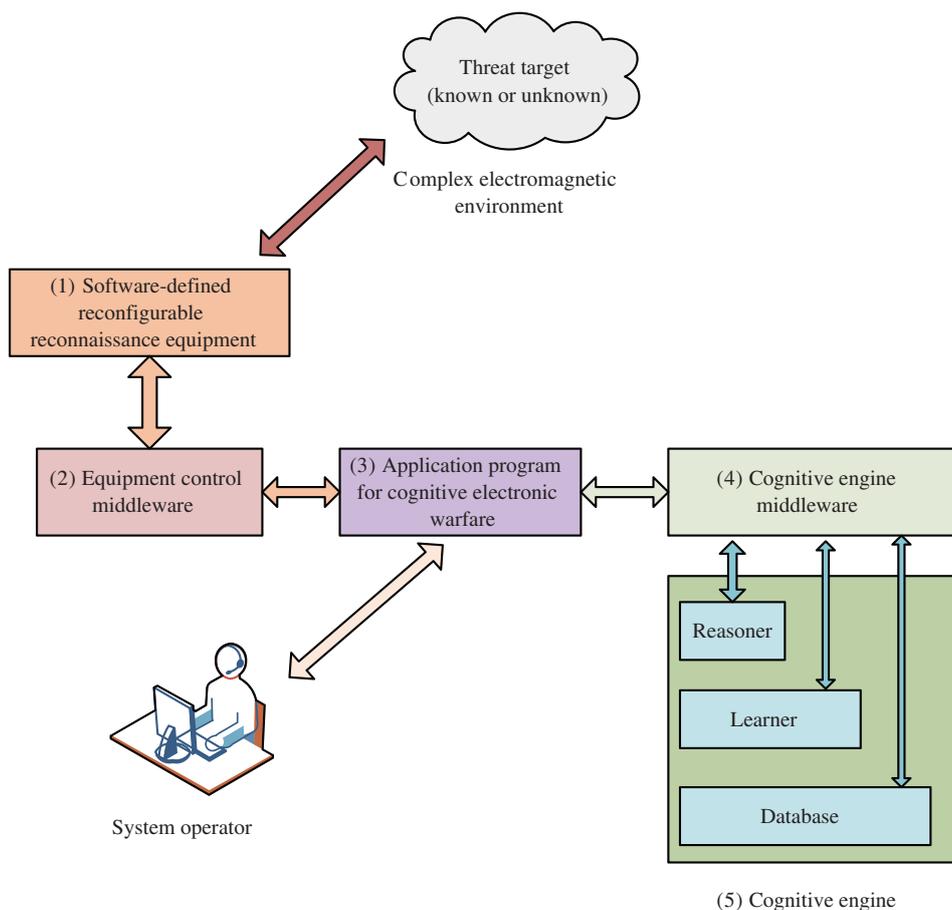


图 3 (网络版彩图) 通用的认知电子战系统体系架构

Figure 3 (Color online) General architecture of cognitive electronic warfare system

2 认知电子战体系结构

为了提高认知电子战系统的灵活性、通用性和电磁环境适应能力,受文献 [9~11] 启发,本文将认知电子战系统体系架构设计为由软件定义可重构侦察干扰设备、设备控制中间层、认知电子战应用程序、认知引擎中间层和认知引擎 5 部分组成,如图 3 所示。

其中,软件定义可重构侦察干扰设备是认知电子战系统适应电磁环境、对抗未知威胁目标的硬件基础,其可以根据认知引擎学习推理的结果对侦察干扰设备的功能和参数进行在线软件定义和重构。设备控制中间层是对侦察干扰设备的软件控制接口,使认知电子战应用程序可以不依赖于硬件平台的类型和具体实现的细节。认知电子战应用程序可以根据不同的应用平台(机载/舰载/车载)、不同的对抗目标(雷达/通信/光电)、不同的应用场景(电子对抗侦察、电子对抗支援干扰、电子对抗随队干扰、电子对抗分布式干扰)等灵活部署。认知引擎中间层是对认知引擎的控制接口,实现认知电子战应用程序和认知引擎之间的松耦合,提升系统的灵活性。认知引擎是认知电子战系统的核心,也是认知电子战系统与传统电子战系统的最大区别。认知引擎具体由推理机、学习机和知识库 3 大部分组成,三者之间为紧耦合关系。推理机可以采用基于案例的推理、基于 Bayes 网络的推理以及模糊推理等方式,

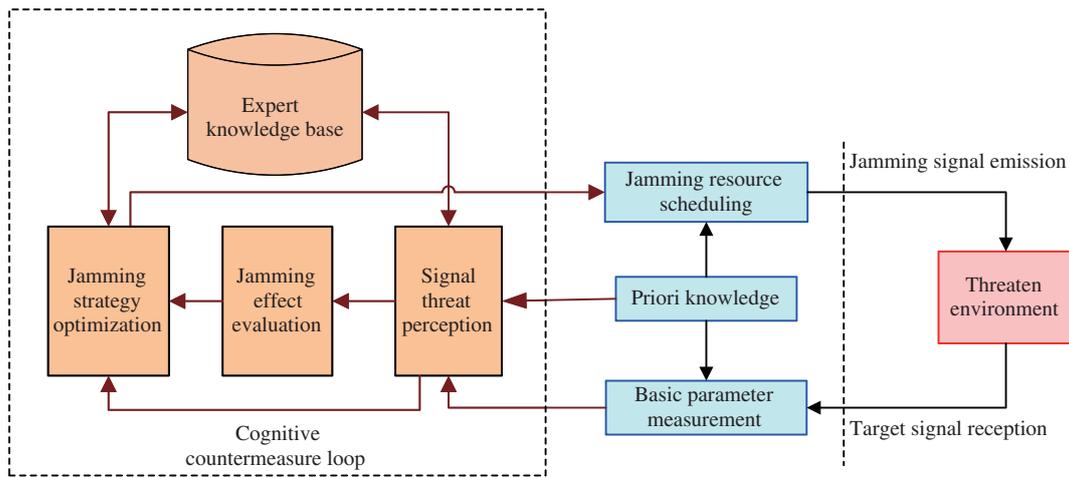


图 4 (网络版彩图) 认知电子战干扰作战流程图

Figure 4 (Color online) Operational flowchart of cognitive electronic warfare

根据来自侦察设备感知的数据对威胁进行识别和推断. 学习机基于推理机输出的结果、知识库中预先加载的先验知识进行初步决策判断支持行动, 并根据行动反馈结果, 采用迁移学习、强化学习等方式, 形成新的知识并不断对知识库进行扩充.

认知电子战系统应用于干扰时的典型工作过程为: 首先从威胁环境中侦察、分选出目标信号, 然后通过对干扰目标的参数测量和状态辨识, 掌握当前所用干扰信号的反馈情况和干扰目标不同状态的转换情况, 对干扰效能进行评估, 经过干扰策略优化后可对后续的干扰资源调度进行引导, 从而使得干扰更具有主动性和针对性. 相应的认知电子战作战流程图如图 4 所示.

相比于传统电子战, 流程图中新增的认知对抗环是支撑系统认知对抗能力的核心.

3 主要关键技术

3.1 电磁行为智能感知与威胁自主识别

3.1.1 技术内涵

电磁行为智能感知与威胁自主识别是指对抗系统对目标信号进行检测、处理, 然后对目标状态及其行为特征进行辨识, 进而估计目标威胁程度、判断威胁等级的过程. 其中, 目标状态是描述目标辐射源特征的一系列参数的综合表征, 如波束指向、工作模式、发射信号参数等, 不同的参数表征了辐射源的不同状态, 而目标状态的一些有规律的转变即是目标的行为特征. 目标行为是指目标辐射源在工作过程中受到外界电磁环境 (包括干扰、杂波等) 的影响或者系统内部需要而使目标状态发生的一种转变, 这种转变是有规律的, 不是随机的.

3.1.2 需要解决的问题

(1) 目标信号的多层次特征提取. 为了对目标状态及其行为进行识别, 需要将分选得到的目标发射信号表征为某种特征向量. 因此, 需要首先从对抗方的角度对目标信号特征参数进行定义, 然后研究多维度、多层次的特征提取技术, 在此基础上形成目标状态及行为的建模表征.

(2) 目标状态识别. 这是目标信号威胁感知的核心内容. 目标状态识别的研究, 需要通过对目标系统各维特征的深入分析研究, 按照自底向上方式构建多层次威胁识别体系和具体识别方法, 解决复杂环境下对新型或未知目标状态的准确识别和自适应感知问题. 对抗系统可以根据目标状态识别的结果进一步分析对抗过程中目标状态的变化规律, 从而分析目标的行为特征.

(3) 目标状态威胁程度分析. 根据目标状态及行为特征分析的结果, 从对抗方的角度建立威胁评估指标体系, 对各个目标状态的威胁程度进行评估, 形成不同目标状态的威胁等级, 这是信号威胁感知的最终结果.

3.1.3 基本方法及难点

目标信号的侦察与分选与传统电子对抗系统相同, 已经形成了比较成熟的技术. 但随着电子对抗环境的日益复杂, 可能存在多种有源、无源信号, 包括敌方发射信号、友方信号、杂波、噪声信号等, 这对目标信号的侦收与分选造成了一定的难度.

目标信号特征提取可首先基于专家知识库从对抗方的角度对目标信号特征参数进行定义, 然后研究机器学习理论中特征降维的相关算法, 从而对对抗系统所检测到的目标信号进行多层次特征提取, 选择对状态识别最有效的特征, 以提升后续目标状态及行为特征的识别精度和运行效率.

目标状态识别的本质是模式分类问题, 因此可通过机器学习理论中的分类算法解决, 主要包括有监督学习、半监督学习和无监督学习 3 类方法.

认知电子战中的目标状态识别的难点体现在以下 3 个方面:

(1) 认知电子对抗中的目标信号威胁感知所面临的是一种“小样本空间”. 常规的人工智能算法大多需要足够的训练样本保证算法性能, 而受战术使用和技术条件限制, 认知电子战系统在短时间内仅能截获对抗目标的少量样本信息. 尤其是对于未知威胁辐射源, 其信号样本只能在对抗过程中在线侦察获得.

(2) 认知电子对抗中的目标信号威胁感知是“增量式”的识别方法^[12~14]. 一方面, 在认知电子对抗中, 对抗系统不断发出干扰信号与外界环境进行交互, 同时也不断接收到目标的发射信号, 这就形成了“增量式”的信号“数据流”; 另一方面, 在没有对抗交互的情况下, 对抗目标的一些工作模式或抗干扰措施可能会被“隐藏”, 这就要求对抗系统能够适应和判别目标可能出现的新状态, 甚至之前从未见过的新目标.

(3) 认知电子对抗中的目标信号威胁感知呈现多种“不确定性”. 由于电磁环境的复杂性以及侦察系统难以避免的测量误差, 有时无法获得辐射源信号参数的精确数值甚至无法得到完整的信号参数向量, 即电磁信号样本可能会呈现区间型或缺缺型等不确定性特征参数, 需要研究能够适应这些不确定性信息的模型或算法.

3.2 基于认知的干扰策略优化

3.2.1 技术内涵

基于认知的干扰策略优化是认知电子战系统进行自适应对抗的体现, 也是认知电子战技术的核心优势.

认知电子战中的干扰策略优化具体包括 3 方面的内容: 干扰样式决策、干扰波形优化以及干扰资源调度. 其中, 干扰样式决策是指对抗系统能够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; 干扰策略

优化是指对抗系统能够根据外界电磁环境的变化, 充分利用己方的干扰资源, 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; 干扰资源调度则是在“多对多”对抗的条件下, 合理分配干扰资源, 使得对抗系统能够使己方既有的干扰资源在面对目标组网信息系统时发挥最大的作战效益。

3.2.2 需要解决的问题

(1) 针对目标多种状态的自适应干扰样式决策. 认知电子战中的对抗目标往往具有多种工作状态, 工作状态在对抗过程中可以快速切换, 因此, 需要对抗系统能够通过自适应的干扰样式决策建立目标状态与已有干扰样式之间的最佳对应关系, 从而能够针对灵活变化的目标进行快速干扰响应。

(2) 针对未知威胁目标或目标未知状态的干扰波形优化. 当对抗过程中出现未知威胁目标或目标未知状态时, 已有的干扰样式可能无法达到最佳的干扰效果, 这时就需要对抗系统根据侦收、感知到的未知状态的信号特征, 动态地调整干扰参数、优化干扰波形, 从而生成新的干扰样式。

(3) “多对多”对抗中的自适应干扰资源调度. 在完成“一对一”对抗中干扰波形优化的基础上, 进一步研究“多对多”对抗中的干扰资源调度问题. 基于认知理论, 研究对抗资源分配、调度的实现机制, 尽可能减少系统对人和先验知识的依赖, 最大限度地提高对抗系统的资源利用效率。

3.2.3 基本方法及难点

(1) 自适应的干扰样式决策可通过强化学习技术解决. 强化学习是人工智能领域中一类重要的学习方法^[15], 它通过“试错”来学习如何最佳地匹配状态和动作, 以期获得最大的回报. 强化学习具有自主学习的能力, 它不依赖先验知识, 仅通过不断与环境交互来获得知识, 自主地进行动作选择, 使得得到奖励的行为被“强化”而受到惩罚的行为被“弱化”. 常用的强化学习算法包括: 动态规划、时序差分学习、Monte Carlo 方法、Q-学习等。

(2) 可采用智能优化算法进行干扰波形优化. 已有的智能优化方法主要包括遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、差分进化算法、快速多层多极子算法等. 认知电子战条件下优化过程需要考虑目标的威胁程度、匹配干扰策略及干扰实施参数等诸多因素, 对传统算法的改进并实现数学模型化是算法开发的关键内容。

(3) 干扰资源调度方面, 已有算法包括匈牙利算法、动态规划算法、模糊多属性动态规划算法等. 认知电子对抗系统对干扰资源调度的智能化实现提出了更高的要求, 需要研究新算法或对已有算法进行改进推广, 以适应复杂的现代战场环境. 如随着对抗目标数量增多乃至组网, 干扰机也大多具有干扰多个目标的能力, 可以对结合自主学习知识库和预装专家系统的干扰调度算法进行研究, 使其能够适用于“多对多”对抗的现代复杂战场环境。

认知对抗对干扰系统的实时性要求很高, 如何使得对抗系统快速进行基于认知的干扰策略优化是技术实现中的难点, 必须研究对传统智能算法学习效率的改进策略. 一方面, 为提升算法的收敛能力, 可探索直接强化学习与间接强化学习相结合的方式进行自适应的干扰样式决策; 另一方面, 在“多对多”对抗环境下, 可以通过干扰资源预分配, 使得强化学习算法具备一定的先验信息, 提高算法的学习效率。

3.3 频谱学习推理的干扰效果评估

3.3.1 技术内涵

效能评估, 又称有效性度量, 包含有效性度量方法和准则两部分内容. 评估方法、准则和评估的目的有密切关系. 不同的实验目的, 其方法也是不同的. 在电子对抗领域, 干扰效果是指电子对抗装备实施电子干扰后, 对被干扰对象 (例如雷达、通信设备等) 所产生的干扰、损伤或破坏效应.

认知的本质是具有“激励-反馈-修正”的闭环过程. 认知对抗中的干扰方需要判别干扰对象在对应的干扰措施作用下, 是否从工作参数、工作模式等方面向干扰方期望的方向进行变化. 这些干扰效果的结果直接反映了电子对抗系统所采取的干扰措施的好坏, 也是认知电子对抗环中实现干扰样式决策与波形优化的依据.

3.3.2 需要解决的问题

认知电子对抗中的干扰效果评估技术通过实时完成目标状态识别, 判断实施干扰前后对抗目标的状态变化情况, 结合干扰方已获取的其他先验知识, 对干扰效果进行在线评估, 并进而制定和调整对雷达的最优干扰策略, 实现干扰过程的自反馈, 最终降低系统反应时间, 提高综合干扰能力.

该项关键技术要解决的问题包括:

- (1) 基于目标信号分析的干扰效果评估指标体系设计;
- (2) 基于侦察模型的干扰效果评估模型建立;
- (3) 干扰效果评估方法的研究和改进.

3.3.3 基本方法及难点

针对干扰效果评估, 国内外开展了大量的研究工作, 并根据干扰样式和被干扰对象种类, 提出了各种干扰效果评估准则, 如功率准则、概率准则、效率准则等^[16~18]. 但是这些评估准则基本上都是站在合作方, 即被干扰系统本身来考虑的. 这种情况下充分已知被干扰系统的各种参数以及工作流程, 在干扰到来后, 引发其内部资源的耗费以及工作指标的变化都是可观测的, 可以比较好地评估出干扰效果或者抗干扰的能力.

在实际作战环境下, 干扰方不可能直接从敌对目标上获取这些评估值. 认知电子对抗系统要求从干扰方的角度对干扰效果进行评估, 以便更加适用于电子战的需要. 具体地讲, 认知电子对抗系统可通过被干扰目标在干扰前后态势的变化, 从干扰方可侦察、检测到的信号信息出发, 结合目标状态威胁等级分析, 完成在线干扰效果评估.

认知电子系统的干扰效果评估技术同样对处理时间要求较高, 评估算法必须能够满足干扰对环境 and 对抗目标状态变化的快速适应. 可以探索在干扰效果评估中引入人工神经网络等算法, 得到某一环境下的干扰策略和干扰效能值之间的函数关系, 那么在此环境下进行干扰效果评估时只需要将干扰策略代入函数关系便可以得到相应的干扰效能值, 提高认知电子对抗中干扰效果评估的效率.

4 小结

随着人工智能理论和电子技术的发展, 更加先进的机器学习算法和技术将会不断出现, 认知电子战技术将逐渐成熟并进入应用, 将提高电子战系统对威胁信号的感知、干扰决策和干扰效果评估能力,

缩短对未知威胁的干扰反应时间, 加快电子战感知环境 – 适应环境 – 做出决策 – 采取行动 (OODA) 环路速度, 提升电子战的敏捷性, 极大地提升电子战系统的作战能力.

参考文献

- 1 熊群力. 综合电子战 – 信息化战争的杀手锏. 北京: 国防工业出版社, 2008
- 2 Wu L M, Wang M X, Chen G, et al. Introduction to cognitive radio and communication electronic warfare. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015 [吴利民, 王满喜, 陈功. 认知无线电与通信电子战概论. 北京: 电子工业出版社, 2015]
- 3 Zhang K, Zhang X, Jin J C. Preliminary exploration of cognitive electronic warfare. *Aero Elec Warfare*, 2013, 29: 53–56 [张珂, 张璇, 金家才. 认知电子战初探. *航天电子对抗*, 2013, 29: 53–56]
- 4 DARPA. Behavioral learning for adaptive electronic warfare (BLADE) broad agency announcement (BAA). DARPA-BAA-10-79, 2010-07-09. <http://www.darpa.mil/i2o/solicit/solicit-closed.asp>
- 5 Lee-Urban S, Trewhitt E, Bieder I, et al. CORA: a flexible hybrid approach to building cognitive systems. In: *Proceedings of Annual Conference on Advances in Cognitive Systems*, 2015. 1–16
- 6 DARPA. Adaptive radar countermeasures (ARC) broad agency announcement (BAA). DARPA-BAA-12-54, 2012-08-27. <http://www.darpa.mil>
- 7 AFRL. Cognitive jammer. RFI-PKS-0001-2010, 2010. <http://www.fbo.gov.2010>
- 8 NAVY. Cognitive electronic warfare program. ONRBAA13-005, 2013. <http://www.onr.navy.mil/Contracts-Grants/Funding-Opportunities/Broad-Agency-Announcements.aspx>
- 9 Ni C Y, Huang H. Research into the composition and crucial technologies of cognitive electronic warfare system. *Shipboard Elec Countermeasure*, 2013, 36: 32–35 [倪从云, 黄华. 认知电子战系统组成及其关键技术研究. *舰船电子对抗*, 2013, 36: 32–35]
- 10 Fan Z L, Zhu G S, Hu Y K. An overview of cognitive electronic warfare. *Elec Inf Warfare Tech*, 2015, 30: 33–38 [范忠亮, 朱耿尚, 胡元奎. 认知电子战概述. *电子信息对抗技术*, 2015, 30: 33–38]
- 11 Gavrilovska L, Atanasovski V, Macaluso I, et al. Learning and reasoning in cognitive radio networks. *IEEE Commun Surv Tut*, 2013, 15: 1761–1777
- 12 Lau K W, Wu Q H. Online training of support vector classifier. *Pattern Recogn*, 2003, 36: 1913–1920
- 13 Masud M M, Chen Q, Khan L, et al. Classification and adaptive novel class detection of feature-evolving data streams. *IEEE Trans Knowl Data Eng*, 2013, 25: 1484–1497
- 14 Mu X, Zhu F, Du J, et al. Streaming classification with emerging new class by class matrix sketching. In: *Proceedings of the 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence*, San Francisco, 2017. 2373–2379
- 15 Sutton R S, Barto A G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge: MIT Press, 1998
- 16 Liu C F, Zhao Z Y. Method of evaluating countermeasure effectiveness for an adaptive nulling antenna based on the analytic hierarchy process. *J Xidian Univ (Nat Sci)*, 2015, 42: 25–31 [刘聪锋, 赵梓越. 自适应调零天线对抗效能层次分析评估方法. *西安电子科技大学大学学报 (自然科学版)*, 2015, 42: 25–31]
- 17 张剑. 军事装备系统效能分析、优化与仿真. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 18 张杰儒. 电子对抗系统干扰效果估计. *航空与航天*, 1997, 3: 12–17

The architecture and technology of cognitive electronic warfare

Shafei WANG¹, Yanfei BAO¹ & Yan LI^{2*}

1. *Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100191, China;*

2. *School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

* Corresponding author. E-mail: liyan726@bit.edu.cn

Abstract Development and applications of technologies of cognitive radio, software-defined network, cognitive network as well as anti-jamming and low intercept probability in radar and other communication systems have led to an exponential increase in the complexity of the electromagnetic environment. When confronted with the challenges in the future complicated battlefield environment, how to speed up the loop of “observe-orient-decide-act (OODA)” and realize electromagnetic agility is the key problem for electronic warfare system. To make the system more cognitive, we combine the theory of artificial intelligence with electronic warfare, which can significantly enhance the ability to sense a threat signal, make a jamming decision, and evaluate the jamming effect. Moreover, this will shorten the reaction time to unknown threats, speed up the OODA loop, and strengthen the operational capability of the system.

Keywords artificial intelligence, machine learning, cognition, electronic warfare



Shafei WANG was born in 1964. He obtained his master's degree from Beijing Institute of Technology, Beijing, China, in 1991. He is currently working as a senior engineer at the Academy of Military Sciences PLA, China. His research interests include non-cooperative communication signal processing and cognitive electronic countermeasure.



Yanfei BAO was born in 1977. He obtained his master's degree in 2001. He is currently working as a senior engineer at the Academy of Military Sciences PLA, China, and his research interests include non-cooperative communication signal processing and cognitive electronic countermeasure.



Yan LI was born in 1987. He obtained his Ph.D. degree in signal and information processing from Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, China, in 2014. Currently, he is a lecturer at School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, China. His research interests include artificial intelligence theory, machine learning, and cognitive electronic countermeasure.

王沙飞院士简介



主要经历

王沙飞, 男, 1964年生, 1991年毕业于北京理工大学, 获硕士学位, 2017年当选中国工程院院士。现任中国人民解放军军事科学院高级工程师, 电子科技大学、北京理工大学兼职教授、博士生导师, 军委科技委需求、体系设计与规划领域专家委员会委员, 军委科技委基础加强重点项目首席科学家。曾任国家“863计划”军口重大项目专家组组长、原总装备部科学技术委员会兼职委员。长期从事卫星通信信号处理与信息安全领域的技术研究和工程实践, 先后主持完成了多个重大项目的工程研制, 在推动领域技术进步方面取得了系列创新成果, 做出了突出贡献。先后获国家科技进步二等奖4项, 军队科技进步一等奖8项, 授权国家发明专利30项, 出版专著3部, 发表论文30多篇, 入选国家百千万人才工程, 被授予国家“有突出贡献中青年专家”和“全国优秀科技工作者”称号。

代表性论文著作

- 1 王沙飞, 温志津. 空间通信信号处理技术. 北京: 国防工业出版社, 2015
- 2 王沙飞, 杨俊安, 温志津. 压缩感知非凸优化超宽带信道估计方法研究. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 1628-1638
- 3 王沙飞, 杨俊安, 温志津. 基于局部行为搜索策略的半监督学习算法及其应用研究. 信号处理, 2014, 30: 1443-1449