

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

现代电子战技术丛书

杨小牛 主编

*Principle and Technology
of Cognitive Electronic Warfare*

认知电子战原理与技术

王沙飞 李岩 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

现代电子战技术丛书

认知电子战原理与技术

Principle and Technology of Cognitive
Electronic Warfare

王沙飞 李岩 编著
徐迈 朱卫纲

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

认知电子战原理与技术 / 王沙飞等编著. —北京:
国防工业出版社, 2018. 12

(现代电子战技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 11768 - 4

I. ①认… II. ①王… III. ①电子对抗 - 研究 IV.
①E866

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 256847 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市德鑫印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 14 字数 230 千字

2018 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 93.00 元


(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717



“现代电子战技术丛书”编委会

编委会主任 杨小牛

院士顾问 张锡祥 凌永顺 吕跃广 刘泽金 刘永坚

王沙飞 陆军

编委会副主任 刘涛 王大鹏 楼才义

编委会委员

(排名不分先后)

许西安 张友益 张春磊 郭劲 季华益 胡以华

高晓滨 赵国庆 黄知涛 安红 甘荣兵 郭福成

高颖

丛书总策划 王晓光



新时代的电子战与电子战的新时代

广义上讲,电子战领域也是电子信息领域中的一员或者叫一个分支。然而,这种“广义”而言的貌似其实也没有太多意义。如果说电子战想用一首歌来唱响它的旋律的话,那一定是《我们不一样》。

的确,作为需要靠不断博弈、对抗来“吃饭”的领域,电子战有着太多的特殊之处——其中最为明显、最为突出的一点就是,从博弈的基本逻辑上来讲,电子战的发展节奏永远无法超越作战对象的发展节奏。就如同谍战片里面的跟踪镜头一样,再强大的跟踪人员也只能做到近距离跟踪而不被发现,却永远无法做到跑到跟踪目标的前方去跟踪。

换言之,无论是电子战装备还是其技术的预先布局必须基于具体的作战对象的发展现状或者发展趋势、发展规划。即便如此,考虑到对作战对象现状的把握无法做到完备,而作战对象的发展趋势、发展规划又大多存在诸多变数,因此,基于这些考虑的电子战预先布局通常也存在很大的风险。

总之,尽管世界各国对电子战重要性的认识不断提升——甚至电磁频谱都已经被视作一个独立的作战域,电子战(甚至是更为广义的电磁频谱战)作为一种独立作战样式的前景也非常乐观——但电子战的发展模式似乎并未由于所受重视程度的提升而有任何改变。更为严重的问题是,电子战发展模式的这种“惰性”又直接导致了电子战理论与技术方面发展模式的“滞后性”——新理论、新技术为电子战领域带来实质性影响的时间总是滞后于其他电子信息领域,主动性、自发性、仅适用

于本领域的电子战理论与技术创新较之其他电子信息领域也进展缓慢。

凡此种种,不一而足。总的来说,电子战领域有一个确定的过去,有一个相对确定的现在,但没法拥有一个确定的未来。通常我们将电子战领域与其作战对象之间的博弈称作“猫鼠游戏”或者“魔道相长”,乍看这两种说法好像对于博弈双方一视同仁,但殊不知无论“猫鼠”也好,还是“魔道”也好,从逻辑上来讲都是有先后的。作战对象的发展直接能够决定或“引领”电子战的发展方向,而反之则非常困难。也就是说,博弈的起点总是作战对象,博弈的主动权也掌握在作战对象手中,而电子战所能做的就是作战对象所制定规则的“引领下”一次次轮回,无法跳出。

然而,凡事皆有例外。而具体到电子战领域,足以导致“例外”的原因可归纳为如下两方面。

其一,“新时代的电子战”。

电子信息领域新理论新技术层出不穷、飞速发展的当前,总有一些新理论、新技术能够为电子战跳出“轮回”提供可能性。这其中,颇具潜力的理论与技术很多,但大数据分析 with 人工智能无疑会位列其中。

大数据分析为电子战领域带来的革命性影响可归纳为“有望实现电子战领域从精度驱动到数据驱动的变革”。在采用大数据分析之前,电子战理论与技术都可视作是围绕“测量精度”展开的,从信号的发现、测向、定位、识别一直到干扰引导与干扰等诸多环节,无一例外都是在不断提升“测量精度”的过程中实现综合能力提升的。然而,大数据分析为我们提供了另外一种思路——只要能够获得足够多的数据样本(样本的精度高低并不重要),就可以通过各种分析方法来得到远高于“基于精度的”理论与技术的性能(通常是跨数量级的性能提升)。因此,可以看出,大数据分析不仅仅是提升电子战性能的又一种技术,而是有望改变整个电子战领域性能提升思路的顶层理论。从这一点来看,该技术很有可能为电子战领域跳出上面所述之“轮回”提供一种途径。

人工智能为电子战领域带来的革命性影响可归纳为“有望实现电子战领域从功能固化到自我提升的变革”。人工智能用于电子战领域则催生出认知电子战这一新理念,而认知电子战理念的重要性在于,它不仅仅让电子战具备思考、推理、记忆、想象、学习等能力,而且还有望让认知电子战与其他认知化电子信息系统一起,催生出一一种新的战法,即,



“智能战”。因此,可以看出,人工智能有望改变整个电子战领域的作战模式。从这一点来看,该技术也有可能为电子战领域跳出上面所述之“轮回”提供一种备选途径。

总之,电子信息领域理论与技术发展的新时代也为电子战领域带来无限的可能性。

其二,“电子战的新时代”。

自1905年诞生以来,电子战领域发展到现在已经有100多年历史,这一历史远超雷达、敌我识别、导航等领域的发展历史。在这么长的发展历史中,尽管电子战领域一直未能跳出“猫鼠游戏”的怪圈,但也形成了很多本领域专有的、与具体作战对象关系不那么密切的理论与技术积淀,而这些理论与技术的发展相对成体系、有脉络。近年来,这些理论与技术已经突破或即将突破一些“瓶颈”,有望将电子战领域带入一个新的时代。

这些理论与技术大致可分为两类:一类是符合电子战发展脉络且与电子战发展历史一脉相承的理论与技术,例如,网络化电子战理论与技术(网络中心电子战理论与技术)、软件化电子战理论与技术、无人化电子战理论与技术等;另一类是基础性电子战技术,例如,信号盲源分离理论与技术、电子战能力评估理论与技术、电磁环境仿真与模拟技术、测向与定位技术等。

总之,电子战领域100多年的理论与技术积淀终于在当前厚积薄发,有望将电子战带入一个新的时代。

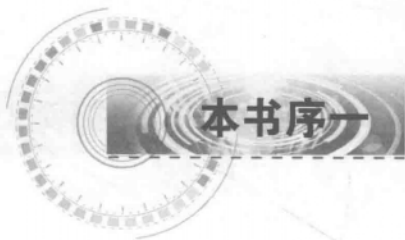
本套丛书即是在上述背景下组织撰写的,尽管无法一次性完备地覆盖电子战所有理论与技术,但组织撰写这套丛书本身至少可以表明这样一个事实——有一群志同道合之士,已经发愿让电子战领域有一个确定且美好的未来。

一愿生,则万缘相随。

愿心到处,必有所获。

杨小牛

2018年6月



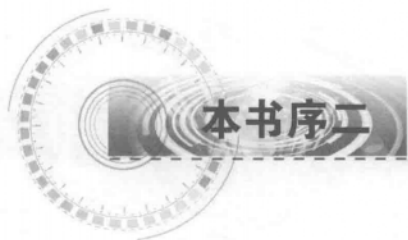
本书序一

随着军事电子信息技术的快速发展,战场电磁频谱呈现动态、多变、密集、复杂等特征,基于可重构射频和软件定义接收机/激励器等先进技术的雷达、通信系统,其信号波形呈现数字化、可编程、敏捷性、网络化、自适应等特点,给传统电子战带来了前所未有的挑战。人工智能作为一种使能技术,与电子战创新地“联姻”,催生了认知电子战的新概念,使电子战变得更加聪明。它颠覆了传统电子战需要从战场上带回威胁信号,在实验室花数月研究出对抗措施,然后应用到电子战系统的能力生成模式。它使电子战在应对未知威胁和先进可编程电磁目标时,不仅能够自适应地选择对抗措施进行响应,还能通过机器学习技术,“学习”电磁威胁的行为、在线生成响应并评估对抗效果,极大提高了电子战系统的战场适应能力,缩短了反应时间。

《认知电子战原理与技术》较全面地阐述了认知电子战的概念和内涵、原理、系统架构、实现方法和技术,论述了认知电子战中的电子支援、电子干扰、效果评估的理论方法和技术,以及动态数据库的构建方法,并从雷达电子战和通信电子战两个方面,分别介绍认知电子战系统的仿真,具有较强的系统性、理论性。相信该书的出版为关心该领域技术的广大读者提供了一本有重要参考价值的专著,对促进电子战领域的技术发展具有积极的意义。

杨学军

2018年8月



本书序二

继陆、海、空、天、网之后,电磁空间正成为独立的作战空间和作战域。电子战作为赢得未来电磁频谱战的核心手段,正朝着智能化、多功能、网络化等趋势发展,其中,人工智能与电子战的结合,为电子战的侦察、干扰提供了智能引擎,使电磁空间博弈具有了认知、学习和自主对抗的能力。

认知电子战需要解决以下三个主要问题:一是如何构建认知电子战体系架构,也就是用认知引擎如何实现电子侦察、电子攻击和效果评估,并形成闭环;二是如何创新地运用人工智能理论方法,解决传统电子战没有解决的关键技术难题,如频谱行为感知、未知威胁对抗等;三是干扰效果的在线评估。

该书是国内第一本较全面、系统地介绍认知电子战原理、关键技术和应用的书籍。书中提出了认知电子战的概念和内涵,对认知电子战体系架构与关键技术,以及应用前景进行了分析。该书的出版对国内从事电子战技术研究的科研人员、在校学生具有重要的参考价值,对电子战技术发展将起到积极的推动作用。

吕跃广

2018年8月

吕跃广,中国工程院院士。



PREFACE

前言

随着人工智能理论、技术的快速发展,以及功能更强大的机器学习芯片不断推出,人工智能技术与电子信息技术的跨域结合,催生了具有认知能力的电子战技术,也就是认知电子战技术。认知电子战在原先传统电子战——电子支援、电子进攻、电子防护——的内涵上增加了智能的引擎,焕发了新的战斗精神,使之具有频谱智能感知与威胁自主识别、自适应干扰决策与波形优化,以及干扰效果评估等功能,提高了电子战系统在复杂电磁环境下对未知目标威胁信号以及网络化目标的自主感知、智能干扰决策和干扰效果在线评估能力,提升电子战观察—判断—决策—行动(OODA)环路的自适应能力和智能化水平,并缩短反应时间,实现由开环的、以人为主向闭环的、基于自主决策作战模式的转变。

第1章是绪论,介绍电子战的概念及传统电子战系统面临的挑战,及认知理论在无线电领域的应用,提出认知电子战的概念和内涵,并对其国内外研究现状、系统组成、关键技术及应用前景进行了分析。

第2章对人工智能理论进行概述,重点对监督学习、无监督学习以及强化学习三类机器学习方法进行介绍,最后介绍近年来受到广泛关注的深度学习模型。

第3章主要介绍认知电子战中的电子支援方法,即目标信号威胁感知,它是实现认知对抗首要环节。本章重点介绍基于人工智能理论的威胁感知方法,包括目标状态识别、目标行为意图推理、目标威胁等级评估等;最后以雷达对抗为例介绍认知电子战中威胁感知的具体应用。

第4章主要介绍认知电子战中的电子攻击方法——基于认知的干扰策略优

化,主要介绍三个方面的内容,针对目标多种状态的智能化干扰样式决策、针对未知威胁目标或目标未知状态的干扰波形优化以及“多对多”对抗中的自适应干扰资源调度。

第5章主要介绍认知电子战中的干扰效果评估方法,在实际作战中,由于被干扰对象不具有配合的属性,干扰方无法直接从被干扰对象处获取实际干扰效果,导致电子战无法形成 OODA 闭环。本章介绍基于频谱学习推理的干扰效果在线评估的思路、流程、指标体系与评估方法。

第6章主要介绍认知电子战中的数据库构建方法,本章针对传统电子战数据库静态固化的不足,介绍了面向认知电子战的动态威胁库与干扰库的构建方法,提出了动态威胁库与干扰库的基本组成框架。

第7章主要从雷达电子战和通信电子战两个方面,分别介绍认知电子战系统的仿真实例,对本书之前几章阐述的关键技术和算法进行仿真验证。

本书是作者团队近年来相关研究工作的提炼和总结,得到了高梅国教授、王祖林教授、贾鑫教授的大力支持并提出宝贵意见,杨健、鲍雁飞、房珊瑶等同志在本书编写过程中进行了大量的资料收集、仿真计算等工作,杨学军院士、吕跃广院士、杨小牛院士提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢!

由于作者视野和水平有限,书中难免存在不系统、不深刻,甚至错误之处,恳请从事人工智能和电子战领域的同行们批评指正。

作者
2018年7月

CONTENTS

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电子战简介	1
1.1.1 电子战的基本概念	1
1.1.2 电子战的分类	2
1.1.3 传统电子战系统存在的不足及其面临的挑战	4
1.2 认知理论及其在无线电领域的应用	5
1.2.1 认知的概念和内涵	5
1.2.2 认知无线电	6
1.2.3 认知雷达	8
1.3 认知电子战	10
1.3.1 认知电子战的概念和内涵	10
1.3.2 认知电子战的研究现状	11
1.3.3 认知电子战的系统组成	15
1.3.4 认知电子战的关键技术	16
1.3.5 认知电子战的应用前景	23
参考文献	25
第 2 章 人工智能理论	27
2.1 人工智能概述	27
2.1.1 人工智能起源	27



2.1.2	人工智能发展	28
2.2	优化方法	30
2.2.1	问题描述	30
2.2.2	无约束优化算法	31
2.2.3	约束优化算法	33
2.2.4	实例	34
2.3	机器学习	35
2.3.1	机器学习简述	35
2.3.2	监督学习	36
2.3.3	无监督学习	46
2.3.4	强化学习	47
2.3.5	深度学习	49
2.3.6	深度强化学习	53
2.4	本章小结	57
	参考文献	58
第3章	目标信号的威胁感知	61
3.1	目标侦察信号处理	61
3.1.1	目标侦察信号处理的主要任务	61
3.1.2	信号分选	62
3.1.3	辐射源识别	64
3.1.4	传统信号侦察处理的局限	65
3.2	基于机器学习的目标状态识别	66
3.2.1	已知目标状态识别	66
3.2.2	未知目标状态识别	73
3.3	基于概率图模型的目标行为辨识	78
3.4	基于目标状态特征的威胁等级评估	81
3.5	雷达(网)的行为特征分析与识别	83
3.5.1	雷达行为特征规律分析	83
3.5.2	时/频/空域自适应雷达行为识别仿真及分析	84
3.5.3	雷达网的工作模式感知与识别	92
3.6	本章小结	98
	参考文献	98



■ 第4章 基于认知的干扰策略优化	102
4.1 干扰波形生成技术	102
4.1.1 数字射频存储技术	103
4.1.2 数字干扰合成技术	103
4.1.3 传统干扰波形生成技术的局限	105
4.2 基于强化学习的干扰样式决策	106
4.2.1 强化学习算法	107
4.2.2 算法学习效率的优化	110
4.2.3 应用举例	114
4.3 自适应的干扰波形优化	117
4.3.1 智能优化算法	118
4.3.2 算法在波形优化设计中的应用	123
4.3.3 举例仿真	124
4.4 干扰资源调度技术及其在认知电子战中的应用	126
4.4.1 差额法的概念和原理	127
4.4.2 “一对一”干扰资源调度算法	127
4.4.3 “多对多”干扰资源调度算法	130
4.4.4 差额法在认知电子战中的应用	132
4.5 本章小结	135
参考文献	135
■ 第5章 干扰效果的在线评估	138
5.1 干扰效果在线评估的基本思路	139
5.2 干扰效果在线评估的基本流程	140
5.3 干扰效果在线评估的指标体系	141
5.4 干扰效果综合评估方法	144
5.4.1 层次分析法	144
5.4.2 灰色层次分析法	150
5.4.3 灰色聚类评估法	154
5.4.4 ADC 评估法	156
5.4.5 基于机器学习的综合评估法	158
5.5 本章小结	159
参考文献	159

■ 第6章 动态数据库构建	161
6.1 动态数据库的构建思路	161
6.2 动态威胁库的构建	163
6.2.1 动态威胁库的组成要素和结构体系	163
6.2.2 动态威胁库的更新规则与方法	164
6.3 干扰规则库的构建	165
6.3.1 干扰规则库的组成要素和结构体系	166
6.3.2 干扰规则库的更新规则与方法	168
6.3.3 动态威胁库和干扰规则库的相互关联性	168
6.4 本章小结	170
参考文献	171
■ 第7章 认知电子战仿真实例介绍	172
7.1 认知雷达对抗仿真实例	172
7.1.1 仿真软件简介	172
7.1.2 仿真结果及分析	175
7.2 认知通信对抗仿真实例	179
7.2.1 仿真软件简介	179
7.2.2 关键算法	180
7.2.3 仿真结果及分析	182
参考文献	190
■ 缩略语	191

第 1 章



绪 论

●●●●●●●●

本章首先介绍电子战的概念、分类以及传统电子战系统存在的不足和面临的挑战;然后通过介绍认知理论的概念和内涵,引出其在无线电领域的应用,包括认知无线电和认知雷达;最后将认知理论应用于电子战中,提出认知电子战的概念和内涵,并对其国内外研究现状、系统组成、关键技术及应用前景进行分析。

1.1 电子战简介

1.1.1 电子战的基本概念

电子战(EW)也称为电子对抗(ECM),其内涵是随着电子技术的发展和在军事上的应用不断深化和完善的。关于电子战,国际上存在着多种不同的定义方式。美国学者 David Adamy 给出了一种较为简洁且易于理解的定义:“电子战是为确保我方使用电磁频谱,同时阻止敌方使用电磁频谱所采取的战术与技术。”^[1]国内对电子战较为完善的定义是:“利用电磁能、定向能、水声能等的技术手段,确定、扰乱、削弱、破坏、摧毁敌方电子信息系统、电子设备等,同时保护我方电子信息系统、电子设备的正常使用而采取的各种战术措施和行动。”^[2]

电子战初登历史舞台可以追溯到第一次世界大战时期,之后,随着战争形态的变化和科学技术进步的推动,电子战大致经历了初创、形成和发展三个阶段。时至今日,电子战已经成为现代化战争中的主要作战手段,属于敌我双方在电磁频谱领域的斗争^[3]。

综合国内外的多种定义方式,本书将现代电子战的特点总结如下:

1) 电子战是敌我双方的一种动态博弈

电子战总是包含电子对抗与电子反对抗(ECCM)这两个相互矛盾的方面。电子对抗与电子反对抗之间的对峙永无止境,没有永恒的胜者。电子战中对抗双方

的博弈斗争,必然是一个相互识别、相互躲避的动态过程,没有绝对的优势和劣势,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。这也恰恰体现了发展认知电子战的必要性。

2) 现代电子战往往在复杂电磁信号环境中进行

电子战的所有行动都是在电磁空间上起作用的,谁能够占有更广阔的电磁空间,谁就能够占有电子战的主动权。狭义的电磁空间可以理解为电磁频谱,一切无线电的传播和处理都需要占用电磁频谱,因此电磁频谱就是电子战双方争夺的核心资源^[4]。现代电子战所面临的电磁环境日趋复杂,辐射源数量多、信号密度大、电磁信号复杂多变,电磁频谱的争夺日趋激烈,这就迫切需要探索新的技术以占得电子战的先机。

3) 电子战的作战范围广泛、作战手段多样

电子战具有许多技术分支,而且是一个多学科综合技术,包括射频对抗、光电对抗、声电对抗等。另外,电子战可以使用从电子干扰到火力打击等一切可用于争夺电磁空间的手段,并且随着战术与战法的不断创新,电子战的作战手段还将愈加丰富。



1.1.2 电子战的分类

按照不同的原则,电子战有多种不同的分类方式,本书主要从电子战的任务目的和对抗目标两方面进行介绍。

1.1.2.1 根据任务目的进行分类

按照任务目的,一般将电子战分为电子支援(ES)、电子攻击(EA)以及电子防护(EP)3类。

电子支援是指提供情报支援的各种电子战行动,包括搜索、截获、定位、识别与分析敌方电子设备辐射的电磁能量,其目的是为我方实施其他作战行动如威胁告警、目标截获和寻的等提供所需的电子战信息。电子支援的措施主要包括两个部分:一是电子侦察,即截获电磁空间中的感兴趣信号并测量其参数;二是测向与定位,即估计辐射源的空间方位。

电子攻击是为了削弱或破坏敌方电子设备效能而采取的电子技术措施。其中,电子干扰是最常用也是最经典的电子攻击方式。电子干扰是为使敌方电子设备和系统丧失或降低效能所采取的电波扰乱措施,大体上可分为压制性干扰和欺骗性干扰两大类。压制性干扰又称为遮盖性干扰,通过发射功率较大的干扰信号使得对方接收到的回波信号淹没在干扰信号中,难以从中检测目标是否存在,从而降低检测概率。欺骗性干扰通过模仿有用信号向敌方接收端传递虚假信息,使其

