

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2021.05.011

雷达与电子战的认知博弈

曹兰英, 郭明明, 罗美方

(中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所, 江苏无锡 214063)

摘要: 新技术与新型作战样式的不断涌现,使得雷达与电子战的博弈愈演愈烈。具备能够准确感知环境,并能够根据环境动态调整工作方式的认知能力,成为雷达与电子战系统适应未来强博弈作战环境的必然要求。通过分析认知雷达与认知电子战的发展现状,给出认知雷达与认知电子战的系统架构,进一步阐述认知雷达与认知电子战的博弈过程;在此基础上,对射频一体化认知对抗系统展开研究,提出射频一体化认知对抗系统架构,并对调用策略进行详细设计;最后对体系化认知对抗系统的架构及关键技术进行了展望。

关键词: 雷达; 电子战; 认知; 体系

中图分类号:TN957 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2021)05-0552-06

Cognitive Game Between Radar and Electronic Countermeasure

CAO Lanying, GUO Mingming, LUO Meifang

(AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: With the emergence of new technologies and new combat styles, the game between radar and electronic countermeasure becomes more and more intense. The cognitive ability to accurately perceive the environment and dynamically adjust the working mode according to the environment has become an inevitable requirement for radar and electronic countermeasure systems to adapt to the future strong game fighting environment. By analyzing the development status of cognitive radar and cognitive electronic countermeasure, the system architectures of cognitive radar and cognitive electronic warfare are given, and the game process of cognitive radar and cognitive electronic countermeasure is further expounded. On this basis, the RF integrated cognitive countermeasure system is studied, the architecture of the RF integrated cognitive countermeasure system is proposed, and the calling strategy is designed in detail. Finally, the architecture and key technologies of the systematic cognitive confrontation system are prospected.

Key words: radar; electronic countermeasure; cognition; system

0 引言

现代战争面临着复杂的电磁环境、多样化的目标环境以及多变的背景环境,其中复杂电磁环境是战场环境最为突出的特征,给雷达探测和电子战都带来了严峻挑战。

雷达面临的复杂电磁环境主要指敌方电子战设备施放的有源干扰,这些干扰信号作用于空间、时域、频域、能量域,形成的干扰场景越复杂、干扰样式越多、干扰功率越大,对雷达威力、精度、分辨率及目标识别等能力的削弱越明显^[1]。

电子战设备面临的复杂电磁环境主要是指敌

方雷达发射的电磁信号,雷达辐射源数量越多、频带范围越广、功率管理越敏捷、波形调制形式越复杂、抗干扰措施越灵活,电子战设备进行有效干扰的难度越高^[2-3]。

可见,雷达与电子战的对抗是一个动态博弈的过程。

近年来,随着新型干扰样式的不断开发,以及干扰参数的灵活化和智能化演进,雷达面临的干扰信号变得更加密集、复杂,保持或提升抗干扰效果面临着更加严峻的挑战。与此同时,数字阵列雷达技术的发展、雷达空/时/频/极化多维低截获措施的综合运用,以及干扰智能化识别能力的不断提升,也在进一步削弱电子战设备的干扰

效果^[4]。

未来,作战样式的体系化变革,分别对雷达和电子战的反对抗和对抗能力提出了更高要求。体系化作战具备“分布、智能、协同、时变”的特点,具有战场态势实时共享、作战资源综合管控、战术决策自主高效等能力,极大地加快了OODA环的运行速度。相应地,雷达和电子战系统必须具备在更高的信息自由度条件下,合理利用多样化资源,做出更快抗干扰与干扰决策的能力^[5]。

可见,随着新技术的发展和作战样式的变化,雷达与电子战的博弈将会愈演愈烈^[6]。因此,设计一种能够准确感知环境,并能够根据环境变化动态调整工作方式的雷达与电子战系统,是适应未来强博弈作战环境的必然趋势。

具备闭环反馈、全局优化、自适应处理等特点的认知技术为上述系统的实现提供了有效途径。

1 认知雷达与电子战

认知思想最早起源于软件定义无线电技术领域,Mitola于1999年首次提出了基于智能化频谱共享技术的“认知无线电”,随后Haykin教授于2006年提出了“认知雷达”的概念^[8],美军从2008年开始将认知概念引入电子战装备中。自此,认知雷达与认知电子战成为新体制射频技术的研究热点。

1.1 认知雷达

2006年,加拿大Haykin对认知雷达的结构设计、信号处理方式等进行了描述。2010年,Guerci和Wicks从不同的视角讨论了认知雷达基本结构和关键技术^[9-10]。2014年,Guerci提出了具有认知功能的全自适应雷达(CoFAR)^[11],融合了雷达自适应处理和动态环境场景特征,是具有代表性的具有智能化思想的雷达,其架构组成如图1所示。

总结来说,认知雷达具有认知能力和重构能力两个基本特征,包含以下三种要素^[12-13]:对环境信息进行感知学习与智能处理、根据处理结果对发射进行反馈与调整、对场景与目标信息进行保存与学习。

因此,认知雷达系统的核心应该包含匹配发

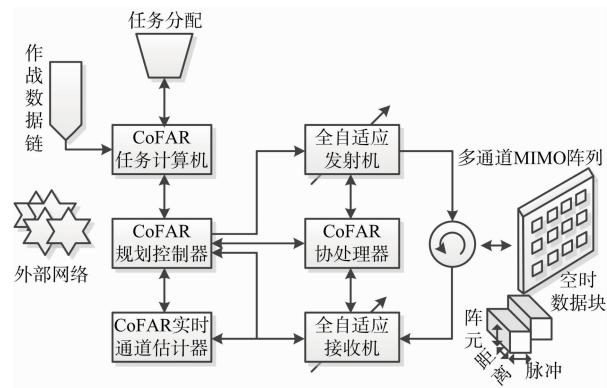


图1 CoFAR框图

射、自适应接收与处理、全局反馈优化、知识记忆与学习四个部分,如图2所示。其中匹配发射是指认知雷达根据电磁环境、杂波场景、目标特征,在发射端自主调整工作模式,进行波束自适应形成、波形优化设计、极化自适应调整等处理;自适应接收与处理是指在接收端自主选择信号处理和数据处理方法,学习场景特征,并做出决策;全局反馈优化是指系统内部形成闭环,将处理端的决策反馈到发射端;知识记忆与学习是指在上述工作过程中,不断进行知识提取与存储,更新先验知识库。

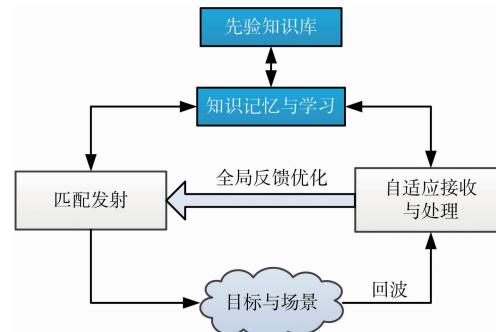


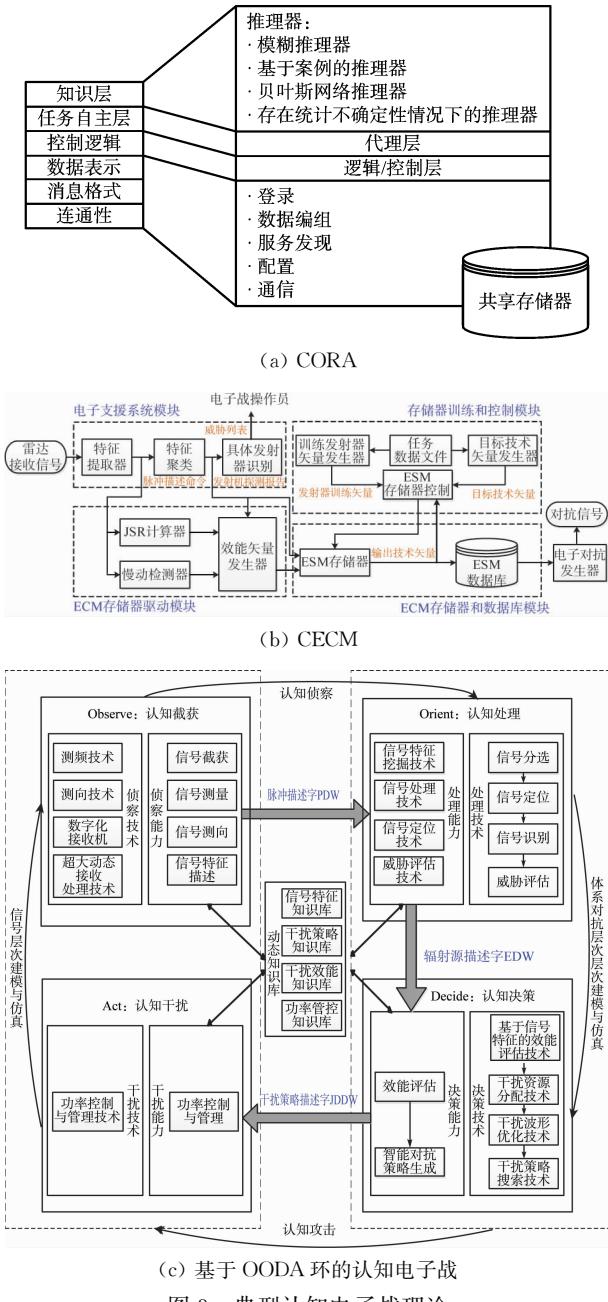
图2 认知雷达基本结构

可见,认知雷达与传统雷达最显著的区别在于雷达本身形成了一个闭环,发射端能够根据处理结果和反馈信息实时调整,以便与外界环境达到最佳匹配^[14],从而提高雷达的目标探测和抗干扰能力。

1.2 认知电子战

从2008年开始,美军先后开展了“行为学习型自适应电子战”和“自适应电子战”项目,正式为认知电子战拉开序幕。目前提出的典型认知电子战理论有美国乔治亚技术研究所(GTRI)开展的

CORA 项目、土耳其下一代无线通信实验室于 2015 年提出的认知电子对抗系统架构(CECM)以及基于 OODA 作战环的认知电子战等,具体如图 3 所示^[15]。



同样地,认知电子战也具有认知能力和重构能力两个基本特征,包含以下四种要素^[16]:对复杂电磁环境中的辐射源信号进行学习和威胁等级分析、根据辐射源信号特征及威胁等级对干扰发射进行反馈与调整、对场景与目标信息进行保存与学习、对干扰效果进行动态评估。

因此,认知电子战系统的核心主要包含侦察、智能决策和干扰三个部分,如图 4 所示。其中,侦察单元能够进行辐射源接收、检测、测量和信号特征分析,通过信号分选识别、信号定位,对个体属性及个体行为特征进行威胁等级评估;智能决策单元是认知电子战的核心,根据威胁等级评估和干扰效果评估结果选择最佳干扰波形和最佳干扰能量分配方法,预评估干扰效果。

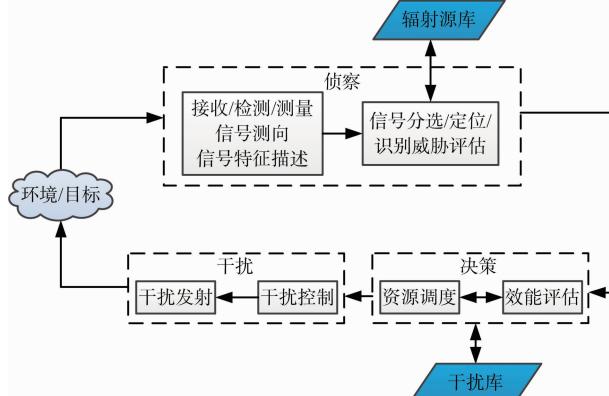


图 4 认知电子战基本结构

可见,认知电子战与传统电子战的最大区别也在于电子战本身形成了一个闭环,能够根据对外部环境的感知结果,优化资源分配方式和控制策略,根据获得的信息自适应决定干扰波形,提高电子战的实时干扰能力。

1.3 雷达和电子战的认知博弈

认知雷达通过对不同干扰类型的认知,实现干扰分类和识别,并根据干扰的变化采用不同的抑制手段进行对抗。但是,认知电子战系统装订的干扰样式种类繁多,并且能够根据需求灵活变换和组合干扰样式,使得雷达总存在被干扰的可能。

认知电子战系统能够学习环境和目标信息,动态评估干扰效果,在线优化干扰策略。但是,当遇到能够自适应调整发射波形、自主设计抗干扰措施的认知雷达时,其干扰效果也会大打折扣。

因此,在认知雷达与认知电子战系统的博弈中,双方拥有的招数是对等的,任何一方都不可能长期占据压倒性优势,双方将在对抗中不断发展。

2 射频一体化认知对抗

随着新技术的发展,战场环境越来越复杂,对

射频系统的综合能力要求也愈来愈高,各自独立的电子设备逐渐不再满足现代战场快速、多变、高效、实时的作战要求。

考虑到在雷达和电子战系统的工作过程中,己方电子战设备对敌方干扰信号的认知结果能够对雷达的抗干扰决策起到很好的辅助作用,同样地,己方雷达对敌方目标的测量结果也能够对电子战设备的干扰决策起到很好的辅助作用。因此,探索通过共用射频孔径的方式对雷达与电子战进行一体化设计,实现探测资源与电子战资源的共享,以提升装备的综合作战效能。

在雷达与电子战一体化认知对抗系统中,系统架构设计与调用策略设计是两大关键技术。

2.1 系统架构设计

雷达与电子战一体化认知对抗系统架构主要包含综合孔径、综合射频、一体化信号处理、综合数据处理、任务管理、发射激励生成等模块,各模块间通过认知反馈实现互联互通^[17]。具体结构如图5所示。

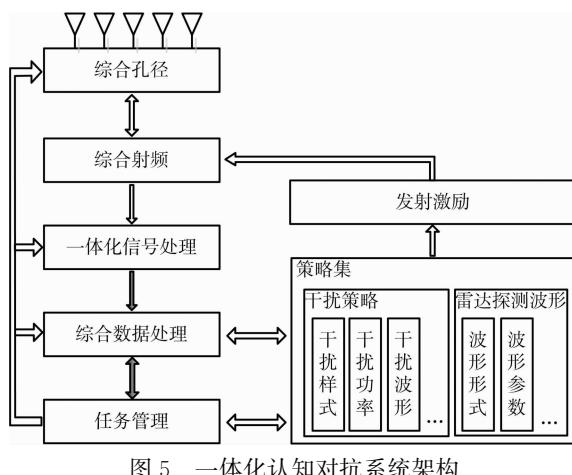


图5 一体化认知对抗系统架构

其中,综合孔径模块是实现射频一体化认知对抗的核心,通过接收任务管理模块的指令,进行孔径资源配置与波束自适应形成,需要具备灵活的重构与资源配置能力,以满足不同工作模式的需求。

综合射频模块负责射频信号的发射与接收,想要实现真正的射频一体化,需要采用统一的通道设计,但是目前的器件发展水平还不够,未来有望在微波光子学等技术发展成熟后得以实现。

一体化信号处理模块、综合数据处理模块负责计算与数据处理,任务管理模块根据数据处理

结果做出系统决策,包括发射激励、孔径配置、信号与数据处理方式等。

2.2 调用策略设计

针对调用策略设计,需要完成一体化对抗系统的工作模式设计,以及不同工作模式下雷达与电子战的资源分配策略设计。一体化对抗系统的工作模式主要涵盖探测模式、干扰模式与协同工作模式^[18]。

探测模式下,系统主要完成目标探测和无源侦收,雷达与电子战功能可同时实现,即在每个扫描波位上,交替进行有源探测和无源侦收,实现雷达探测和威胁告警。该模式下,天线扫描波位的控制,以及不同波位上有源探测、无源侦收的时间分配,是需要解决的重点问题。在一体化认知架构中,通过场景特征提取与分析,完成系统对态势的精确感知;通过知识辅助与决策技术,完成基于态势感知结果的波位控制与时间分配;通过知识学习与记忆,完成知识的积累与更新;通过全局反馈技术,实现系统的在线优化与改进。

干扰模式下,系统主要完成无源探测以及对敌方雷达的有源干扰。该模式下,无源探测与有源干扰的优化调度、无源探测算法与有源干扰策略的优化设计是需要解决的重点问题。在一体化认知架构中,认知决策技术辅助系统实现无源探测与有源干扰的优化调度;认知截获与认知处理技术辅助系统实现对电磁环境的全面、准确感知,认知决策与认知干扰技术辅助系统实现干扰策略的优化选择以及对目标的精准干扰。

协同模式下,系统需要同时具备目标探测、无源侦收和有源干扰能力。由于上述任务均需占用雷达天线阵面,且适用频率也可能会存在冲突,因此需要更加细化与智能的时间管理与频率管理。在一体化认知架构中,基于认知处理结果,通过认知决策对探测、侦收和干扰功能进行时间和频率管理。在干扰阶段,系统根据侦收信号的认知处理结果,进行频点、干扰波形、干扰功率等干扰策略选择,对目标进行认知干扰;在探测阶段,根据雷达回波的认知处理结果,进行扫描波位、频点、发射波形、处理策略等选择,甚至可根据需求,选择探/干一体化波形,同时实现探测与干扰。

3 体系化认知对抗

分布式作战、网络中心战等新型作战概念的提出,极大地推动了雷达与电子战的协同化、网络化发展。因此,在开展射频一体化认知系统研究的同时,应同步开展体系化认知对抗技术研究,充分利用认知技术,采用协同、分布式、开放的体系架构,发展多功能、网络化、多源融合的认知对抗能力,实现多种射频对抗系统的协同工作^[19]。

3.1 体系架构设计

体系化认知对抗是指将作战能力部署到多个平台上,平台间通过信息共享、任务综合、资源优化和自主协同,形成具有强敏捷性和韧性的作战系统^[20],实现对抗效能最大化,通用化体系架构如图 6 所示。

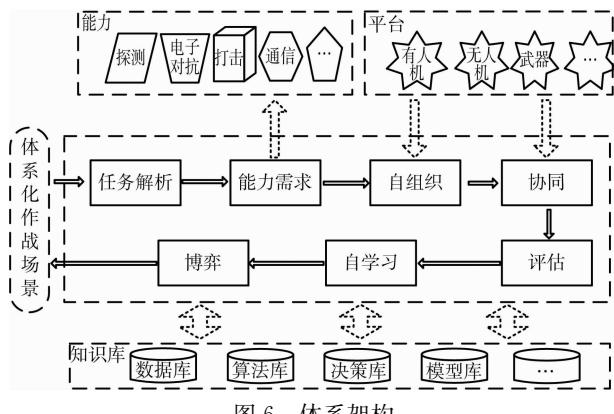


图 6 体系架构

因此,体系化认知对抗系统应具备跨域分布、高效协同、自主智能等特点。

- 跨域分布

体系内的作战单元,分布在空、陆、海、天、电磁、赛博等不同的作战域,根据任务需求进行自适应跨域组合,形成具有自适应调整能力的作战体系。

- 高效协同

作战单元以完成同一作战任务为目标,依托网络技术在时间、空间上相互配合,实现多种功能的有机组合;通过多层次、多维度信息融合,实现各作战单元间探测资源、干扰资源、打击资源的共享与优化配置,形成“1+1>2”的效果。

- 自主智能

智能化技术的发展,不断提升作战平台、信息

系统以及决策系统的智能化水平,使作战系统具备在对抗环境中自我进化的能力。该能力主要包括体系架构的自主调整,平台任务的自主分配,以及作战单元的自主感知、自主干扰、自主攻击等。

3.2 关键技术

体系化认知对抗涉及飞控、制导、探测感知、电子对抗、效能评估等多个方面,本文主要针对探测感知与电子对抗,分析体系化认知对抗系统的关键技术。

- 战场态势感知与认知

态势感知是体系作战中任务规划的前提,利用信息处理、信息融合、知识挖掘等技术处理各平台获取的探测信息,实现对战场环境态势的认知与理解,并通过态势评估,发掘指挥决策所需要的信息^[21-22]。其中,异构传感器信息融合、多源信息知识挖掘与表示、态势评估与辅助决策等技术是战场态势感知与认知的关键技术。

- 体系化认知电子对抗

电子对抗主要涉及作战体系中的电磁情报侦察、信息对抗、系统协同。电磁情报侦察是指对威胁辐射源信号的侦察、分析与辨识;信息对抗是指通过情报侦察结果采取相应的对抗措施,包括电子攻击、电子支援、电子防护等;系统协同是指电子战系统之间、电子战系统与雷达、通信、火力打击等其他系统之间的协同。其中,电磁环境综合认知、对抗效果实时评估与反馈、对抗资源动态优化配置等是体系化认知电子对抗的关键技术。

4 结束语

认知技术为新体制雷达和新体制电子战装备的研制提供了新的设计思路,其闭环反馈、全局优化、自适应处理等特点,能够为雷达与电子战系统的智能化发展、射频系统的一体化发展提供技术支撑,也是未来射频装备进行体系化作战的必备能力。本文在介绍认知雷达与认知电子战发展现状的基础上,深入分析了射频一体化认知对抗系统的发展需求,提出了通用化的认知架构,并对未来体系化认知对抗进行了展望,为未来射频系统的发展方向提供思路借鉴。

参考文献:

- [1] 胡进. 复杂电磁环境下雷达探测能力的定量描述[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(1): 32-35.
- [2] 伊志勇. 复杂电磁环境下雷达有源干扰技术研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [3] 曾洪祥. 雷达电子战系统建模仿真技术和作战效能评估的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2000.
- [4] 陈翼, 王宁, 孟晋丽, 等. 认知电子战体系研究[J]. 现代雷达, 2017, 39(9): 81-85.
- [5] 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.
- [6] 束坤, 盛九朝. ESM 系统与低截获概率雷达之争[J]. 舰船电子对抗, 2005, 28(3): 11-13.
- [7] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [8] HAYKIN S. Cognitive Radar: A Way of the Future [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1): 30-40.
- [9] WICKS M. Cognitive Radar: A Way Forward[C]// 2011 IEEE Radar Conference, Kansas City, MO, USA: IEEE, 2011: 1147.
- [10] GUERCI J R. Cognitive Radar: the Knowledge-Aided Fully Adaptive Approach[C]// 2010 IEEE Radar Conference, Washington DC: IEEE, 2010: 1365-1370.
- [11] GUERCI J R, GUERCI R M, RANAGASWAMY M, et al. CoFAR: Cognitive Fully Adaptive Radar [C]// 2014 IEEE Radar Conference, Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2014: 984-989.
- [12] 孙俊. 智能化认知雷达中的关键技术[J]. 现代雷达, 2014, 36(10): 14-19.
- [13] STECK M, NEUMANN C, BOCKMAIR M. Cognitive Radar Principles and Application to Interference Reduction[C]// 2018 19th International Radar Symposium, Bonn, Germany: IEEE, 2018: 1-10.
- [14] KARIMI V, MOHSENI R, SAMADI S. Adaptive OFDM Waveform Design for Cognitive Radar in Signal-Dependent Clutter[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 14(3): 3630-3640.
- [15] 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.
- [16] 苏抗, 朱伟强. 网电空间认知电子战技术[J]. 航天电子对抗, 2014, 30(2): 27-36.
- [17] 胡元奎, 斯学明, 范忠亮. 多功能综合射频系统技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(3): 233-239.
- [18] 程远. 机载平台雷达电子战综合一体化系统设计研究[C]// 第六届中国航空学会青年科技论坛, 沈阳: 中国航空学会, 2014.
- [19] 范忠亮, 朱耿尚, 胡元奎. 认知电子战概述[J]. 电子信息对抗技术, 2015, 30(1): 33-38.
- [20] ENGSTROM J. Systems Confrontation and System Destruction Warfare: How the Chinese People's Liberation Army Seeks to Wage Modern Warfare[R]. CA: RAND Corporation, 2018.
- [21] 唐胜景, 史松伟, 张尧, 等. 智能化分布式协同作战体系发展综述[J]. 空天防御, 2019, 2(1): 6-13.
- [22] 肖圣龙, 石章松, 吴中红. 现代信息条件下的战场态势感知概念与技术[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(11): 13-15.

作者简介:



曹兰英 女, 1970 年生, 江苏盐城人, 副总工程师, 主要研究方向为雷达与电子战。

(上接第 551 页)

Biography:



Haixia Bi was born in Shandong province in November 1982. She received the Ph. D. degree in computer science and technology from Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, in 2018. She is currently a Post-Doctoral Research Fellow with the University of Bristol, Bristol, UK. Her current research interest lies in machine learning, remote sensing image processing, and big data.



Zhiqiang Wei was born in Anhui province in December 1974. He received the Ph. D. degree in electronic engineering from Fudan University, Shanghai, China, in 2008. He is currently a Research Professor with Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an, China. His research interests include radar system engineering, image processing, and terahertz technique.