

引用格式: 周长霖, 王春阳, 陈赓, 等. 雷达主瓣反干扰研究进展及展望[J]. 信息对抗技术, 2024, 3(4): 1-16. [ZHOU Changlin, WANG Chunyang, CHEN Geng, et al. Progress and prospects in the study of radar main-lobe anti-jamming[J]. Information Countermeasure Technology, 2024, 3(4): 1-16. (in Chinese)]

雷达主瓣反干扰研究进展及展望

周长霖, 王春阳*, 陈赓, 刘明杰

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安 710051)

摘要 面临日益复杂的电磁环境, 雷达反干扰技术成为了雷达领域重点研究方向之一, 取得了飞速的发展。其中, 雷达主瓣反干扰问题是研究的难点, 吸引了众多学者的关注。先概述了复杂电磁环境中雷达干扰与反干扰的机理, 分析了主瓣干扰难以对抗的原因; 而后, 从干扰感知技术、多域反干扰技术、新体制阵列雷达反干扰技术和智能化雷达反干扰技术4个方面归纳总结了雷达主瓣反干扰技术研究进展; 进而, 结合目前的难题和现实的需求, 对未来雷达主瓣反干扰技术的发展趋势进行了展望。

关键词 复杂电磁环境; 主瓣干扰; 新体制雷达; 智能化雷达

中图分类号 TN 97 **文章编号** 2097-163X(2024)04-0001-16

文献标志码 A **DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2024.04.001

Progress and prospects in the study of radar main-lobe anti-jamming

ZHOU Changlin, WANG Chunyang*, CHEN Geng, LIU Mingjie

(Air Defense and Antimissile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710051, China)

Abstract Facing an increasingly complex electromagnetic environment, radar anti-jamming technology has become one of the key research directions in the radar field and has achieved rapid development. Among them, the main-lobe anti-jamming is a research difficulty that has attracted the attention of many scholars. Firstly, this paper outlined the mechanisms of radar jamming and anti-jamming in a complex electromagnetic environment and analyzed the reasons why main-lobe jamming is difficult to counteract. Then, the research progress of radar main-lobe anti-jamming technology was summarized from four aspects: jamming sensing technology, multi-domain anti-jamming technology, new system array radar anti-jamming technology, and intelligent radar anti-jamming technology. Furthermore, the development trend of future radar main-lobe anti-jamming technology was forecasted according to the current difficulties and the practical needs.

Keywords complex electromagnetic environment; main-lobe jamming; new system radar; intelligent radar

0 引言

随着雷达干扰与反干扰技术的发展, 雷达干

扰与反干扰问题的复杂、激烈程度呈现出螺旋式上升的趋势^[1]。

按照干扰平台与被保护目标的空间位置关

收稿日期: 2023-10-21

修回日期: 2023-11-20

通信作者: 王春阳, E-mail: wangcy1967@aliyun.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62201580); 陕西省自然科学基金资助项目(2023-JC-YB-553)

系,可以分为支援式干扰和自卫式干扰^[2]。支援式干扰的主要目的是压制雷达对目标的探测,掩护目标平台完成任务^[3]。自卫式干扰的主要目的是摆脱雷达的跟踪,保护自身安全^[4-6]。在实际环境中,支援式干扰和自卫式干扰同时分布于雷达空域的主瓣和旁瓣,构成了复杂多源的干扰环境。

按照干扰平台与雷达波束的空间位置关系,可以分为旁瓣干扰和主瓣干扰。旁瓣干扰是指干扰平台位于雷达旁瓣,由于干扰和目标在雷达方向上存在较大的差异,可以利用旁瓣对消、旁瓣匿影和自适应波束零陷等方法进行有效抑制^[7]。主瓣干扰是指干扰平台位于雷达主瓣,此时干扰与目标同时位于雷达主瓣,同时享用雷达增益,能够在多个信息域压制回波信号,现有传统反干扰手段难以有效对抗。

本文假设各个干扰源都是有源干扰,都能够对单部雷达实施干扰。雷达需要采用各种反干扰的方法和策略,对各种干扰进行抑制。后文将从雷达干扰与反干扰的机理出发,分析主瓣反干扰难的原因,并从干扰感知技术、多域(时频域、极化域、空域、调制域和能域等)反干扰技术、新体制阵列雷达反干扰技术和智能化雷达反干扰技术4个方面梳理雷达主瓣反干扰问题的最新研究进展,并对其未来的发展趋势进行了展望。

1 雷达干扰与反干扰机理

1.1 主/旁瓣干扰定义

众所周知,支援式干扰需对一定区域的所有雷达实施有效干扰才能完成任务,因此具有分布范围大、干扰源数量多、干扰信号类型多等特点;自卫式干扰只需对自身威胁程度高的雷达进行可靠干扰即可达到效果,具有干扰方向集中、干扰源数量少、干扰信号精准等特点。根据这些特点,对于防空网节点上的某部雷达而言,为了探测、跟踪攻击编队目标,其天线需要在一定空间上利用主瓣进行搜索或跟踪,这时,空间分布的大量干扰源信号就会从天线的主瓣或旁瓣进入雷达接收机,对雷达探测、跟踪目标形成干扰。其中,干扰源和目标处于雷达同一方向上,干扰信号和目标回波信号一起通过雷达天线主瓣进入雷达接收机,这类干扰称为主瓣干扰;干扰源和目标不在雷达的同一方向上,干扰信号从雷达天线旁瓣进入雷达接收机,这类干扰称为旁瓣干扰。因

此,主瓣干扰和旁瓣干扰的干扰源都可能是多个^[8]。

对于旁瓣干扰,由于目标和干扰源在雷达方向上有较大差异,常用的方法有旁瓣对消、旁瓣匿影和自适应波束零陷等,这些方法可以有效对抗噪声类压制干扰信号和脉冲类欺骗干扰信号,特别是随着有源阵列天线的发展,在多个方向上波束自适应产生零陷的技术越来越成熟,对干扰信号可以进行很好的抑制,并保证主瓣内的目标信号被有效检测^[9]。无论是旁瓣对消、旁瓣匿影还是自适应波束零陷,都是利用目标和干扰源在方向上有较大差异所采取的措施,都可以进行有效对抗。因此,雷达旁瓣反干扰的研究目前较为成熟。

对于主瓣干扰,可以分为单一干扰源和多干扰源。从单一干扰源角度出发,首先,由于干扰信号和目标回波信号一起从雷达天线主瓣进入,在空域不可区分;其次,干扰信号与回波信号一起享用着主瓣的增益,使得单程的干扰信号相对于双程的目标回波信号具有能量优势;与此同时,射频存储器(digital radio frequency memory, DRFM)技术广泛应用于干扰设备,使得干扰信号与目标回波信号相似性可以做到极高,且变化样式多、变化速度快,在时域、频域、调制域等都难以区分。从多干扰源角度出发,由于干扰信号样式不同、多变,且平台不同,运动航迹、姿态不同,使得这些平台释放的干扰信号叠加起来与目标回波信号一起进入雷达,会导致目标回波信号在时域、频域、能域、调制域、极化域等被干扰信号压制,且空域又难以区分,使得防空雷达难以发现和跟踪目标,从而丧失防空作战能力。基于以上原因,普遍认为主瓣干扰难以对抗,研究针对主瓣干扰的有效对抗方法,是防空电子对抗领域面临的一个重要问题^[10]。

1.2 主瓣干扰的信号样式与干扰效果

传统的干扰信号样式主要分为压制干扰和欺骗干扰。压制干扰又可以分为窄带瞄频干扰(narrowband aiming jamming, NAJ)、宽带阻塞干扰、扫频干扰、梳状谱干扰(comb spectrum jamming, CSJ)等。压制干扰信号的目标是通过提高雷达的干信比,增加雷达检测目标的不确定性,使得雷达难以检测出目标。欺骗干扰信号可分为假目标干扰、拖引干扰、示样脉冲转发干扰

和切片转发干扰等,这些欺骗干扰信号通过空域、时域、频域、能域等的设计,可以实现对雷达距离、速度、角度和自动增益控制(automatic gain control, AGC)等性能实施欺骗。欺骗干扰信号目标是通过提高干扰信号与目标信号的相似度,从而使雷达难以识别和跟踪目标或者使已经跟踪的目标摆脱跟踪;从实践来看,欺骗干扰信号在一定条件下对雷达的检测性能有很大影响。

组合干扰和灵巧干扰同时具备压制干扰和欺骗干扰的效果,并被大量应用于干扰设备。组合干扰可分为同时组合和分时组合,包括压制干扰与压制干扰组合、压制干扰与欺骗干扰组合等。灵巧噪声干扰可分为卷积调制干扰和乘积调制干扰,包括噪声卷积调制干扰、间歇采样转发干扰(interrupted sampling repeater jamming, ISRJ)、频谱弥散干扰(smearred spectrum jamming, SMSP)等。因此,雷达遭受的主瓣干扰信号样式纷繁复杂,同时,干扰战术与信号样式的结合使得雷达遭受的主瓣干扰更加动态化和复杂化。

2 雷达主瓣反干扰技术研究进展

2.1 干扰感知技术

雷达干扰感知的目的是实现干扰信号的精确识别,为选择有效的雷达反干扰方法提供技术支撑。干扰感知一般可以分为2类:基于特征提取的干扰感知技术和基于深度学习的智能干扰感知技术。基于特征提取的干扰感知技术主要提取的是具有实际物理意义的特征,例如:时域矩偏度、瞬时相位标准差、频域矩峰度和频域矩偏度等。基于深度学习的干扰感知技术是通过神经网络将干扰信号映射到高维空间中进行特征提取,提取的分类依据难以与干扰信号的实际物理意义相联系。

2.1.1 基于特征提取的干扰感知技术

基于特征提取的干扰感知将干扰信号变换到时域、频域、时频域等多个变换域,而后在域内分析特征差异性并提取特征参数,最后选择特征存在明显差异的干扰参数构建数据库,当干扰信号到来时,使用预先设计的分类器识别分类干扰信号^[11]。

文献[12]将干扰信号转换到时频域,在时频域中提取了三阶Renyi熵、可分离度等特征,实现了对距离拖引干扰、速度拖引干扰以及距离-速度联合拖引干扰的感知和分类。文献[13]提出了基

于熵理论的有源干扰感知方法,实现了对射频噪声干扰、噪声调频干扰、噪声调幅干扰、距离欺骗干扰、速度欺骗干扰和角度欺骗干扰共6种干扰样式的识别与分类。文献[14]利用时频分析提取了雷达非平稳干扰信号的特征,实现了干扰类型的有效感知。文献[15]通过比较目标回波信号与欺骗干扰的振幅波动、高阶累积量和双谱特征实现了对二者的分类识别。文献[16]提出了一种频域三阶算法,实现了对合成孔径雷达的假目标干扰信号的识别分离。文献[17]通过提取干扰信号的时域峰均比、矩峰度系数、包络起伏和谱相似系数等特征实现了噪声调频干扰、间歇采样转发干扰、噪声卷积干扰和多假目标干扰的分类识别。文献[18]通过在时域、频域、小波域和双谱域内提取干扰信号的多维特征,并基于支持向量机(support vector machine, SVM)实现了距离/速度/角度欺骗干扰、距离-速度联合欺骗干扰和灵巧噪声干扰的分类识别。文献[19]通过提取干扰信号的时域和频域特征,对比分析决策树方法、SVM以及BP神经网络算法对压制干扰和欺骗性干扰的感知识别效果。文献[20]通过提取干扰信号的时频图像特征,基于SVM实现了拖引干扰、密集假目标干扰、间歇采样转发干扰、示样脉冲转发干扰和噪声干扰的感知识别。文献[21]把干扰信号频域上的多尺度相像系数视作能够反映干扰信号能量分布的本质特征,基于该特征使用改进的SVM对距离、速度和噪声3类干扰实现了感知分类。

2.1.2 基于深度学习的干扰感知技术

针对基于特征提取的干扰感知技术中存在的特征提取不全面,参数选择主观影响大的问题,基于深度学习的干扰感知技术具有优异的特征提取和分类识别的能力,在雷达干扰感知中得到了广泛应用,本文按照数据类型的不同,分为一维方法和二维方法。一维方法是指使用的数据为一维数据的方法,二维方法是指使用的数据为图像等二维数据的方法。

在一维方法中,文献[22]提出了一种基于深度孪生网络的一维神经网络方法,在小样本集上展现了对干扰信号良好的分类能力,同时其具有良好的抗噪性。文献[23]提出了结合切片循环神经网络(recurrent neural network, RNN)的时间特征提取能力和卷积神经网络(convolutional

neural network, CNN)的空间特征提取能力的雷达辐射源信号识别方法,在低信噪比情况下对8种常见雷达辐射源信号具有高识别率。文献[24]提出了一种将辐射源信号频谱输入到CNN中的方法,在低信噪比情况下具有较高的识别率。在二维方法中,文献[25]提出了一种基于级联CNN的干扰识别方法,以干扰信号时频图像为训练集,实现了窄带瞄频干扰、宽带阻塞干扰、灵巧噪声干扰、间歇采样转发干扰、距离多假目标干扰、距离拖引干扰、速度拖引干扰、距离-速度联合拖引干扰共计8种干扰样式的感知识别。文献[26]提出了一种利用短时傅里叶变换获取干扰时频图像并构建数据集,而后通过CNN实现干扰感知的方法,在低干噪比条件下实现了9种干扰的分类识别。文献[27]提出了基于AlexNet模型和VGG-16模型进行干扰识别的方法,数据集同样为使用短时傅里叶变换的干扰时频图像,实现了较高的识别概率。文献[28]结合注意力机制提

出了基于双线性EfficientNet-B3网络的干扰识别方法,实现了8种干扰的有效识别。文献[29]提出了一种特征融合网络模型,可以将干扰信号的深层特征与时频特征相结合,实现了较高的分类精度。文献[30]提出了一种结合加权投票和迁移学习的集成CNN模型,实现了小样本训练条件下良好的干扰感知能力。除了以时频图像为训练数据集,文献[31]通过引入非对称卷积模块和残差结构,提出了一种基于功率谱特征的干扰识别网络JRNet,其对压制干扰取得了良好的分类效果。

进一步,文献[32]对干扰感知技术进行了一系列的研究,提出了基于Attention残差网络的小样本干扰识别网络模型SE-ResNet,模型架构如图1所示,有效解决了小样本下的复合干扰识别。在此基础上,为了能实时在小样本下感知战场中新出现的复合干扰样式,文献[33]提出了基于Ghost-YOLO网络的轻量化干扰识别模型,其模型架构如图2所示,复合干扰感知结果示例如图3所示。

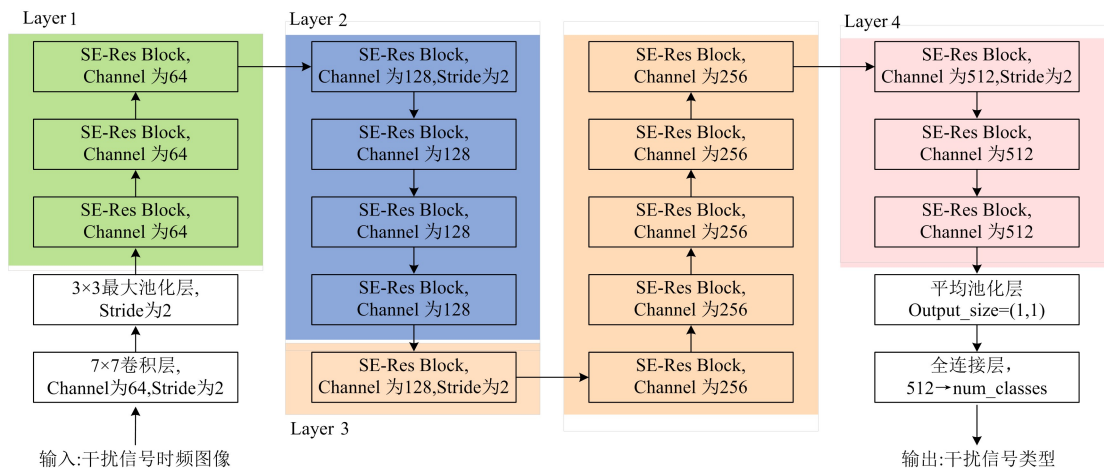


图1 SE-ResNet网络模型

Fig. 1 SE-ResNet network model

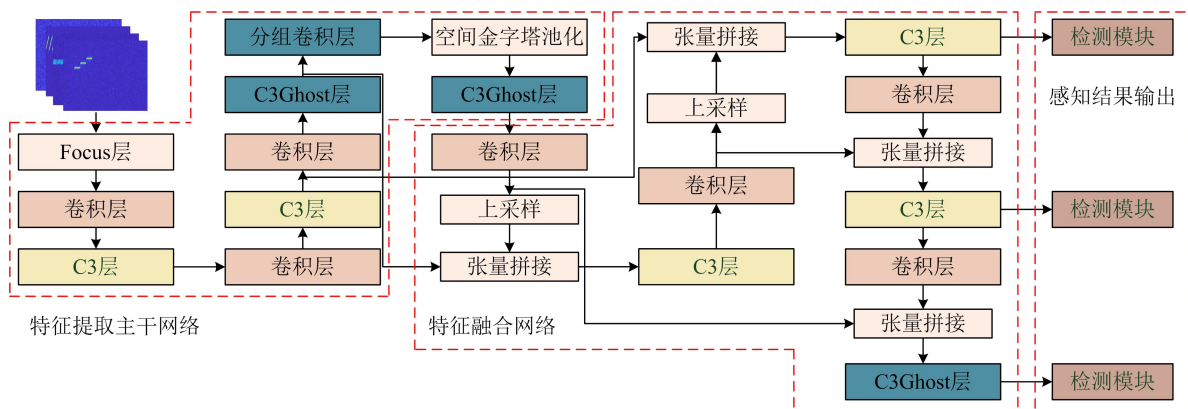


图2 基于Ghost-YOLO网络的轻量化干扰识别模型

Fig. 2 Lightweight jamming recognition model based on Ghost-YOLO network

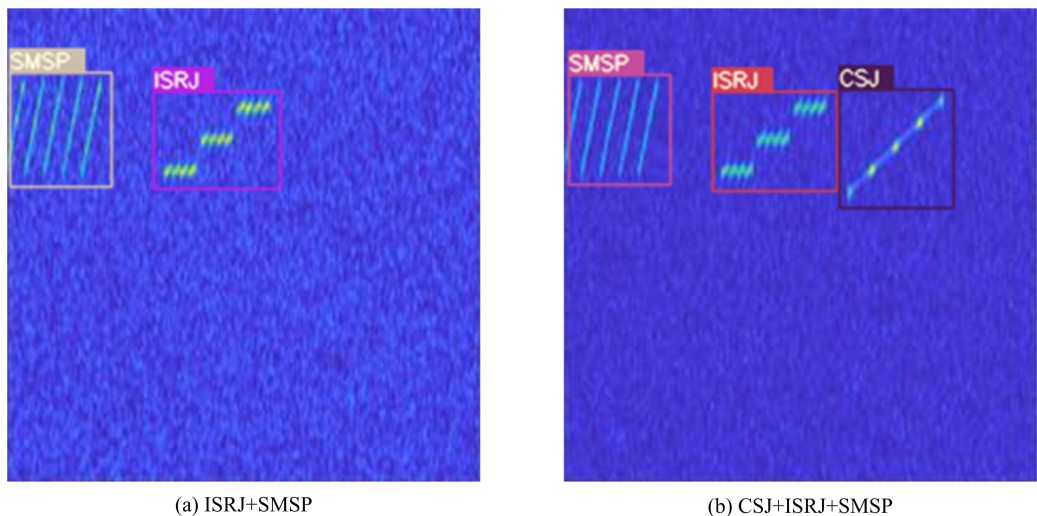


图 3 复合干扰感知结果示例

Fig. 3 Example of composite jamming perception results

2.2 多域反干扰技术

2.2.1 时频域反干扰技术

雷达在时频域上的反干扰方法主要从雷达发射信号和数据处理的灵活性上对干扰进行抑制,本质上是利用干扰信号与目标回波信号在时域、频域和时频域上的差异,在发射端发射能与干扰信号形成显著差异的信号或者发射不能被干扰机接收机所截获的信号,在接收端构造时频滤波器,其典型方法有雷达频率捷变、低截获概率(low probability of intercept, LPI)信号设计、信号前沿跟踪、时域和频域联合分析等。

频率捷变雷达日常不启用捷变频率,只有在关键时刻采取频率捷变,获得波形低截获性能^[34]。低截获概率雷达通过设计编码波形,可以在完成任务的同时最大限度保护自身的真实信息,避免自身成为敌方的打击目标^[35-36]。前沿跟

踪类方法可以实现对于拖引类干扰的有效对抗^[37]。以间歇采样转发干扰、频谱弥散干扰和梳状谱干扰为代表的干扰信号,与目标信号在时域或频域存在差异,因此可以通过构造时频滤波器进行干扰抑制^[38-39]。

李欣等^[40-43]针对干扰在时频域与目标信号的差异,提出了一系列的反干扰方法。针对频谱弥散干扰,根据干扰原理和子脉冲的周期特性,通过估计子脉冲周期确定子脉冲的调频斜率和子脉冲个数,利用单元平均的方法确定干扰信号的初始相位,并以峭度最大作为目标函数,通过搜索得到干扰抑制因子,实现干扰抑制,同时对相位估计的精度要求不高^[40]。根据移频干扰(shift-frequency jamming, SFJ)和频谱弥散干扰的能量特性,提出了基于时频滤波的干扰抑制方法^[41-42],干扰抑制后的时频图如图 4 所示。

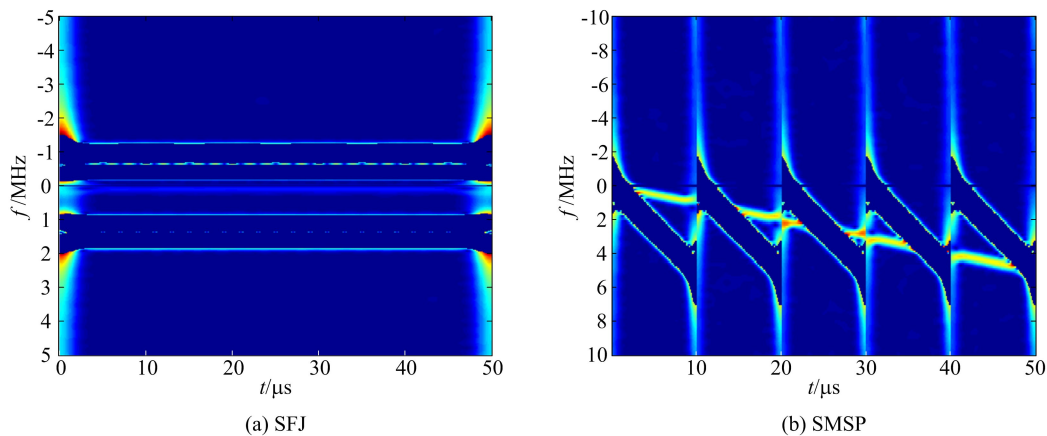


图 4 2 类频域干扰抑制结果

Fig. 4 Results of two types of frequency domain jamming suppression

针对间歇采样转发干扰的时域间断特性和去斜处理后的瞬时频率特性,文献[43]提出了基于 Partial FFT 干扰抑制方法。针对 Partial FFT

方法不能完全滤除干扰的缺陷,文献[41]提出了基于时域选通和压缩感知重构的间歇采样转发干扰抑制方法,干扰抑制流程如图 5 所示。

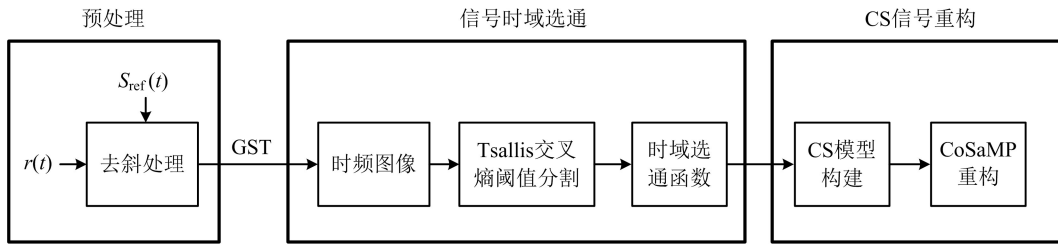


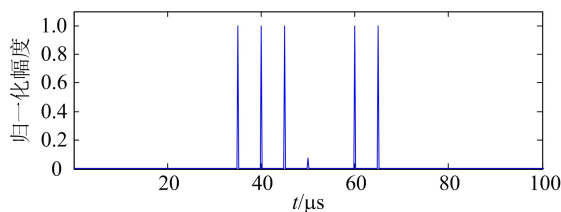
图 5 间歇采样转发干扰抑制算法流程图

Fig. 5 Flowchart of interrupted sampling repeater jamming suppression algorithm

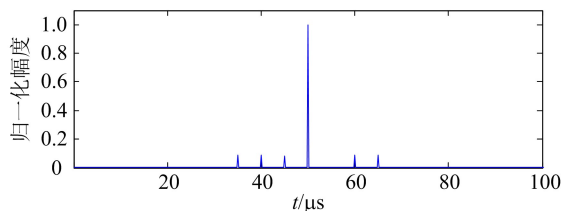
2.2.2 极化域反干扰技术

极化域反干扰主要是利用雷达信号与干扰信号在极化域的差异,通过构造极化域滤波器,实现对干扰的抑制^[44-45]。针对极化滤波方法,目前主要研究都将干扰假设为单一极化方式,当干扰为变极化信号时,现有极化域反干扰方法效果会大大降低^[46]。文献[47]提出了一种基于极化滤波技术的反干扰方法,将干扰信号进行极化分解、极化状态估计等预先处理,然后优化设计极化滤波器。

针对极化域反干扰方法,李欣^[41]提出了基于极化通道扩展和盲源分离的干扰抑制方法,干扰抑制结果如图 6 所示。在此基础上,进一步提出了基于最大信噪比盲源分离算法的混合极化干扰抑制方法^[48]。对于干扰极化的估计可能存在误差,提出了无须估计干扰极化的基于主辅通道比函数和盲提取的干扰抑制方法^[41]。



(a) 分离结果I的脉冲压缩输出



(b) 分离结果II的脉冲压缩输出

图 6 移频干扰抑制结果

Fig. 6 Shift-frequency jamming suppression results

针对单脉冲雷达多源主瓣干扰,文献[49]提出了基于极化滤波的干扰抑制与多点源分辨技术来抑制目标与干扰极化状态变化所导致的角度估计方差起伏,以提高角度跟踪性能,还提出了空域极化控制技术来主动制造显著的空域极化变化,使多点源在空域和极化域上产生信息耦合,利用这种耦合关系,雷达能够对主瓣变极化干扰与相干多点源干扰取得独特的反干扰效果。

2.2.3 空域反干扰技术

对于主瓣干扰,常规自适应波束形成在抑制干扰的同时也抑制目标信号^[50],并且自适应波束方向图会出现旁瓣电平升高和主瓣严重变形的缺陷,在实际运用中自适应波束形成抑制主瓣干扰并不是最佳的方法^[51]。因此,众多学者提出了对角加载法、罚函数法、阻塞矩阵法、子空间法、和差通道法、协方差矩阵分解或重构法、辅助阵列法和稀布阵技术等。

文献[52-54]提出了利用对角加载方法提高波束形成的鲁棒性,通过在高斯白噪声协方差矩阵上叠加单位矩阵能够极大提高干扰加噪声协方差矩阵的收敛性。为了解决旁瓣电平增高的问题,文献[55]提出一种基于罚函数的波束保形算法,但是雷达波束主瓣仍然会发生形变。为解决这一问题,文献[56]提出在已知主瓣干扰方向时,先设计阻塞矩阵对主瓣干扰进行阻塞,然后再进行波束形成抑制旁瓣干扰。文献[57]基于斜投影滤波理论,提出了将主瓣干扰子空间斜投影到旁瓣干扰子空间上,然后通过波束形成抑制干扰的方法,与文献[56]相似,其在使用干扰抑制算法前也需要知道主瓣干扰的方向。文献[58]基于自适应波束形成方法和主瓣干扰抵消方法的级

联,提出了能在抑制主旁瓣干扰的同时完成单脉冲测角的框架。文献[59-60]基于干扰加噪声协方差矩阵的特征分解,提出了修正后的干扰加噪声协方差矩阵,最终实现主瓣干扰抑制。文献[61]结合子空间投影的思想,提出了先基于正交投影进行主瓣干扰抑制,干扰抑制后再完成波束形成的方法。文献[62]提出了基于大口径辅助阵列的主瓣反干扰方法,其最终目的是通过增大阵列孔径将多源主瓣干扰问题转化为主副瓣干扰问题。文献[63]提出了稀布阵主副瓣联合反干扰算法,通过稀布阵技术增大阵列孔径将多源主瓣干扰问题转为主副瓣干扰问题。文献[64]提出了稀布阵与 FDA、MIMO 体制结合技术,对目标和干扰源在距离维可分、角度维接近条件下,实现了保持主瓣增益的同时对干扰区域雷达增益置零的效果。文献[65-66]分析了基于多通道处理的自适应信号检测技术,实现了干扰状态下的目标检测。文献[67]基于干扰与目标空域的差异性,分析了存在主瓣欺骗干扰情况下的目标跟踪问题,实现了不需要先验信息情况下的干扰抑制和目标识别与跟踪。文献[68]提出了雷达在遭受压制干扰时动态分配跟踪任务和发射功率的优化方法。

2.2.4 调制域反干扰技术

由于各种干扰信号的调制方式不同,其波形的能量分布也是不同的。噪声调频干扰、噪声调幅干扰和噪声卷积干扰能量分布分散,而多假目标转发干扰、频谱弥散干扰和间歇采样转发干扰的能量更加集中。

为了描述干扰这一调制特性,引入了波形熵^[68]的概念。波形熵描述了波形空间能量分布集散的征。波形熵作为干扰信号的一个显著标签,首先,可以作为主成分分析方法中的一个重要参数输入 SVM 中,实现对干扰的分类^[69]。更重要的是,波形熵为雷达在调制域抑制干扰方面提供了新思路^[70]。

对于目标信号,能量主要集中在几个分辨单元内,波形熵较小;而一些波形能量分散的干扰信号,各个分辨单元复制具有随机性,波形熵较大。因此,文献[71]提出了对各个分辨单元比较波形熵,选取最小波形熵完成目标检测的方法,其处理流程如图 7 所示。

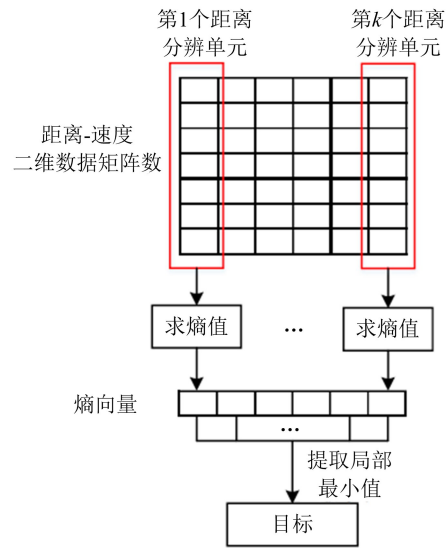


图 7 基于最小波形熵的目标检测流程

Fig. 7 Target detection process based on minimum waveform entropy

2.3 新体制阵列雷达反干扰技术

为了应对越来越复杂的电磁环境,雷达系统的可控自由度在不断拓展,其通过增加自身自由度,提升自身主瓣反干扰的能力。本文根据发射信号调制方式不同,将从频率分集阵列(frequency diverse array, FDA)和时间分集阵列(time diverse array, TDA)2 种体制论述新体制雷达在主瓣反干扰中的优势。

2.3.1 频率分集阵列

t 时刻在空间远场距离 R 、角度 θ 处的 FDA 发射信号^[72]可以表示为:

$$F_{\text{FDA}}(t; R, \theta) = \sum_{m=1}^M \varphi_m(t) e^{j2\pi(f_0 + \Delta f(m)) \left(t - \frac{R}{c} - \frac{d \sin \theta}{c} \right)} \quad (1)$$

式中, f_0 表示载频, Δf 表示频率增量, $\varphi_m(t)$ 表示第 m 个发射阵元发射的基带波形, d 表示阵元间距, c 表示光速。

从式(1)可以看出, FDA 发射信号的距离、角度相互耦合,其仅仅通过引入阵元间的微小频偏,便提供了距离维的自由度,仿真结果如图 8 所示^[73],方向图主瓣弯曲,具有主瓣反干扰的潜力。

文献[74]对 FDA 雷达在反干扰中的应用潜力进行了系统的论述,阐明了 FDA 雷达具有的主瓣反干扰的能力。文献[75]将 FDA 与空时自适应处理(space-time adaptive processing, STAP)技术相结合提出了 FDA-STAP 雷达系统,分析了其距离模糊杂波抑制性能。文献[76]

提出了具有抗杂波干扰和主瓣保形能力的稳健波束形成算法。文献[77]从模糊函数分析入手,提出了抑制非期望位置干扰的方法。文献[78-79]基于干扰和目标在发射-接收二维空间频率域分布的不同,提出了欺骗干扰抑制方法。文献[80]通过优化权值,提出了距离维零陷控制方法。文献[81-82]提出了基于相干 FDA 的空时滤波器设计,其在主瓣反干扰方面有很大应用潜力。文献[83]根据真假目标在发射-接收频率域分布不同的特点,在合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像中实现了基于 FDA 雷达的主瓣欺骗干扰抑制。与此同时,文献[84]实现了逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)体制下的 FDA 雷达主瓣干扰抑制方法分析。

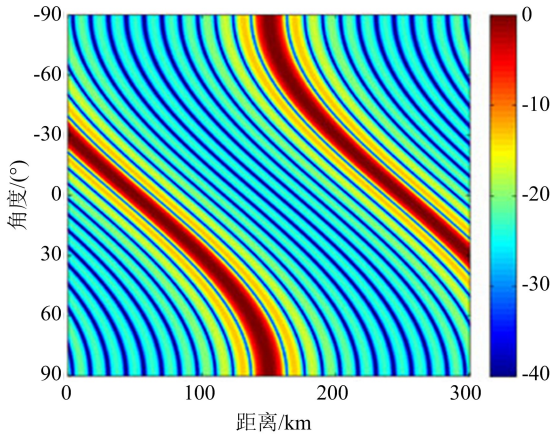


图 8 FDA 雷达方向图

Fig. 8 FDA radar direction diagram

针对空域反干扰方面,文献[85]对基于 FDA 雷达的反干扰技术进行了系列研究,分析了 FDA 雷达的时变问题并对时不变理论进行了修正,得出了波束指向的角度随脉冲内时间指数的变化而变化的结论,仿真结果如图 9 所示。在此基础上,首先,针对传统结构下 FDA 雷达的时变问题和距离依赖特性失效问题,分析了 FDA-MIMO 雷达的工作原理,并通过采用接收端多匹配滤波器处理的方法,产生了距离-角度依赖且时不变的虚拟波束,提出了一种新的方案,能够实现产生距离-角度去耦合且具有更低旁瓣的波束;接着,研究了距离-角度二维自适应波束形成的方法,并通过仿真验证了其通过距离-角度二维联合对抗平台外干扰的应用优势;进而,研究了 FDA-MIMO 雷达自卫式欺骗干扰模型,并提出了有效的

距离维单脉冲反干扰方法^[73];最后,为了对抗一种针对 FDA 的新的欺骗干扰,提出了一种距离维单脉冲对抗欺骗式干扰的方法,仿真结果表明该方法能够在欺骗干扰环境下准确地估计出目标的距离参数^[86]。

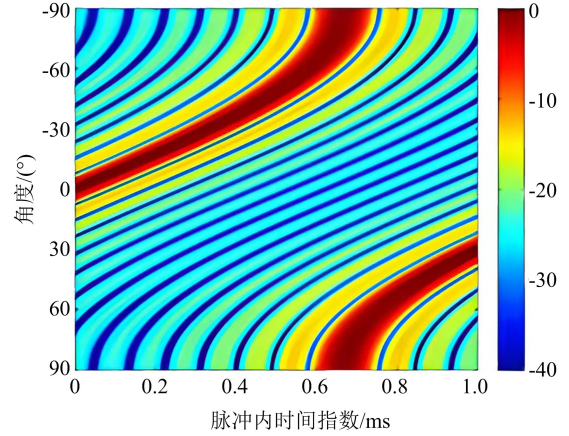


图 9 时间参数为脉冲内时间指数时的 FDA 时间-角度天线方向图

Fig. 9 FDA time-angle antenna pattern as the time index within the pulse

2.3.2 时间分集阵列

TDA 通过不同阵元间发射信号在时间上的正交,仅需一种波形便可以实现全空域覆盖。时间分集阵列第 m 个阵元的发射信号^[87]可以表示为:

$$x_m(t) = \varphi(t - (m-1)\Delta t) e^{j2\pi f_0 t} \quad (2)$$

式中, f_0 表示载频, Δt 表示时间增量, $\varphi(t)$ 表示基带波形。

其远场信号^[87]可以表示为:

$$F_{\text{TDA}}(t; R, \theta) = \sum_{m=1}^M \varphi\left(t - (m-1)\Delta t - \frac{R}{c}\right) e^{j2\pi f_0 \left(t - \frac{R}{c} - \frac{d \sin \theta}{c} (m-1)\right)} \quad (3)$$

式中, f_0 , Δt , $\varphi(t)$ 同式(2); t , r , θ , d 同式(1)。

从式(3)可以看出, TDA 发射信号与 FDA 发射信号相似,存在距离-角度相互耦合的现象,其仅仅通过发射端各个阵元发射时间不同,便提供了距离维的自由度,使得方向图主瓣弯曲,具有主瓣反干扰的潜力,各阵元激励时间如图 10 所示。

TDA 最早由 LE CHEVALIER 团队在 2013 年提出^[88]。文献[89]研究了 TDA 发射 M 码信号、线性调频信号和非线性调频信号的角度维和

距离维特性,体现了其主瓣反干扰的潜力。TDA 与 FDA 类似,二者都是通过调制发射分集的信号,使得传统意义上的雷达主瓣变形,从而产生了相较于传统相控阵列的主瓣反干扰的优势。

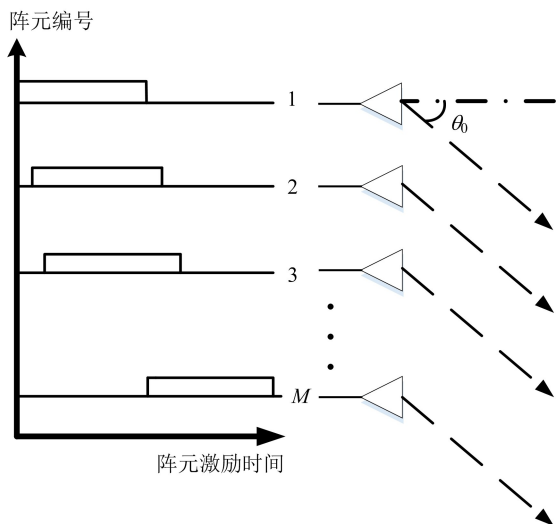


图 10 TDA 示意图

Fig. 10 Schematic diagram of TDA

2.4 智能化雷达反干扰技术

智能化雷达反干扰方法是应对雷达干扰的必然方向,早期的雷达与干扰机的智能水平都较低,一种干扰和反干扰方法被提出来后,往往需要一段较长的时间才有针对性的对抗方法被提出来^[90]。随着深度学习^[91]、强化学习^[92]和博弈论等理论的发展,雷达和干扰机都将形成“自主感知—自主学习—自主决策—自主行动”的反馈闭环。在雷达和干扰机的高强度的智能对抗中,二者的对抗策略、优化方法是相互依赖、相互耦合的,二者的对抗环境可以看作形成观察—判断—决策—行动 (observe, orient, decide, and act, OODA) 闭环^[93],二者之间的数学问题可以建模为非合作的动态博弈问题^[94]。

智能化雷达反干扰主要分为 2 个方面,一是干扰策略感知,二是反干扰策略学习。干扰策略是指干扰机发射干扰信号时,其确定干扰类型和参数的依据,是区别于传统干扰感知技术的感知干扰信号参数的方法。雷达如果知道干扰机策略,对反干扰效率将会有很大提高。目前,干扰策略感知的研究还较少,文献^[95]基于模仿学习,将干扰策略的学习问题转化为专家策略的学习

问题,从而较为准确地实现了干扰策略的感知。反干扰策略是指针对智能化的干扰机,雷达通过发射信号策略的设计,通过优化时域、频域、空域和极化域等多域,实现雷达主动地对干扰信号的抑制^[96]。对于不能实时更新干扰策略的干扰机,雷达与其构成的电磁环境是稳定的,因此雷达只需要利用强化学习的方法就可以建模求解。对于实时更新策略的干扰机,雷达与干扰机构成的电磁环境是实时变化的,呈现出非平稳的特点,因此需要引入博弈论的思想,而基于 OODA 的闭环反馈优化,控制论的方法也十分重要。因此,我们认为智能雷达与智能干扰机的动态对抗过程应当结合强化学习、博弈论和控制论的方法进行建模求解。

在基于强化学习的电磁环境建模中,回报函数的设计直接影响强化学习算法的收敛速度和性能表现。文献^[97]对频率捷变雷达是否成功躲避干扰进行赋值并作为回报函数,文献^[98]将信干噪比作为回报函数,文献^[99]将检测概率作为回报函数。目前,包括频率捷变雷达智能反干扰在内,基于强化学习的反干扰方法多将研究集中在频域范围内。文献^[100]提出了一种基于强化学习的反干扰方法,利用 Q 学习和 Sarsa 算法进行值函数迭代,从而实现策略的更新和优化。文献^[101]建立了 FDA-MIMO 雷达与干扰机的博弈模型,提出了基于强化学习的发射功率分配优化方法。在充分学习先验知识的基础上,文献^[102]提出了基于强化学习的雷达对抗复合干扰方法。

针对主动、智能化的雷达反干扰方法,也已经有研究者展开了初步研究。文献^[41]对基于 MPPSK 调制波形的雷达波形水印技术及相应的反干扰方法进行了探索性研究,分析了调制参数对 MPPSK 信号时域波形和频谱的影响,提出了利用 MPPSK 已调波形作为中频载波的雷达波形水印反干扰技术。基于 FDA 雷达的相位特性,文献^[103]提出了主动欺骗干扰机侦察测向的自适应加权方案,自适应加权前后,相位中心的比较如图 11 所示,实现了对干扰机的相位中心诱骗。前期的工作主要围绕主动反干扰进行,后续将结合智能化技术,实现主动、智能的雷达反干扰。

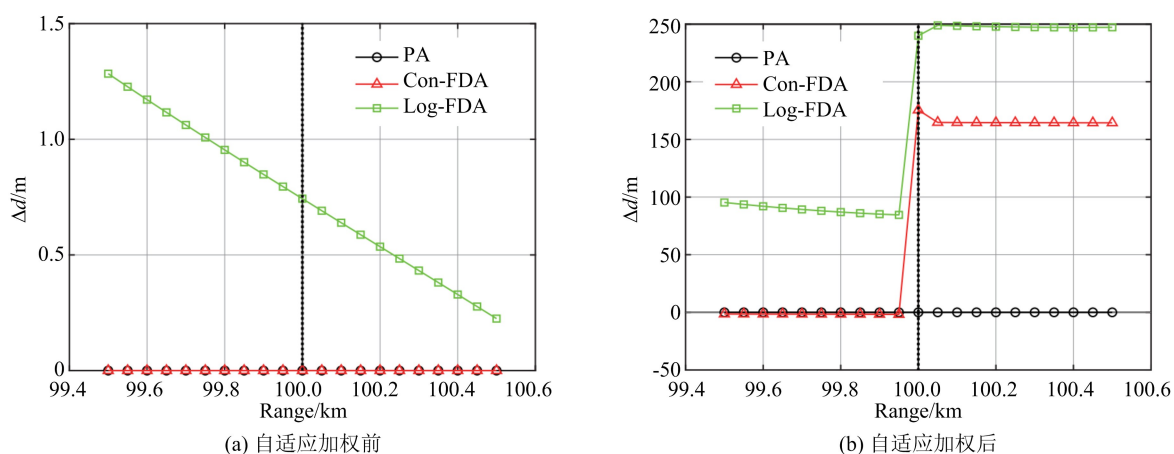


图 11 相位中心对比

Fig. 11 Comparison of phase centers

3 雷达主瓣反干扰技术发展趋势

随着干扰装备技术和运用方式的不断发展,从公开的文献来看,目前仍未有令人信服的完全解决雷达主瓣反干扰问题的技术框架或者方法。现阶段的雷达主瓣反干扰研究仍处于初级阶段,主要表现为电磁环境建模较为简化和反干扰方法不具有通用性和鲁棒性。因此,从问题和需求出发,本文认为有以下几个发展趋势:

1) 干扰识别。现有的反干扰方法均基于已知的信号模型,需要干扰感知提供先验信息,而战场环境中可能存在多种多样的干扰样式,这就急需先进的干扰感知技术使之能够快速识别出足够多的、变化的干扰样式。

2) 多种干扰同时对抗。目前的研究多针对单一干扰信号样式或者单一干扰源提出可行的反干扰措施及算法,随着电磁环境的日益复杂,多种干扰并存,这就急需先进的反干扰理论作为支撑,以寻求具有更强鲁棒性的反干扰方法,能够最大程度地对抗各种干扰信号。

3) 智能波形设计。实际应用场景趋于多样和复杂化,线下波形库储存的波形很难做到能适合所有的应用场景,因此,如何针对不同的场景快速自适应设计波形,从而使敌方干扰机无法及时跟随己方波形实施有效的干扰措施。

4) 优化雷达体制。雷达体制的优化带来了雷达可控自由度的提升,目前 FDA 雷达、TDA 雷达、阵元-脉冲编码雷达、天波雷达和无源雷达等各种体制雷达被众多学者探索研究,不断创新改变的雷达体制,其目的是为了增加雷达区分目标

和干扰的能力,使雷达方可控自由度大于干扰方。

5) 多域联合反干扰。干扰方可以实现在 1 个或多个域对目标的压制和欺骗,但是干扰机受自身性能和作战目的的限制不可能与目标在所有域上都相似。因此,雷达应当实现空域、时频域、能域、极化域等多域融合处理,达到最大程度地抑制干扰、提取目标信息的目的。

6) 雷达与干扰机实时动态博弈研究。认知电子战主要体现在电子战的双方都是智能的,雷达和干扰机都能根据接收的电磁信号,来实时调整下一阶段的发射信号。干扰机需要在侦收雷达信号后才能发射针对性的干扰信号,雷达可以利用干扰机的这一特性并结合自身在 OODA 闭环中具有的先发优势,优化自身发射信号,下好博弈的“先手棋”。目前有关电磁环境实时变化的智能化雷达反干扰的文献还较少,更复杂的环境更能贴近实战也将更加实用。因此,本文认为,在动态变化的电磁环境中实现智能化反干扰,主要还是应当结合强化学习、博弈论和控制论。

4 结束语

只要雷达存在,雷达干扰与反干扰问题就会存在,具有永恒性,但不同时代装备技术水平不同,装备的运用方式不同,雷达干扰与雷达反干扰问题又具有不同的时代特征。

即使对抗双方在空袭体系和防空体系健全、网络化作战情况下,对于大规模作战背景,处于网络节点上的雷达仍然面临主瓣有多个干扰源的问题。因此,健硕网络节点是强大体系网络化

作战的基本需求,仍然需要雷达主瓣反干扰技术研究。从这个意义上说,网络化、无人化、分布式、智能化是这个时代标志性的技术特征,造就了雷达主瓣反干扰这个时代难题,也是雷达干扰与反干扰问题对雷达从业人员的时代要求,需要相关人员从混合信号、对抗设备到作战体系多维角度和空域、时频域、能域、极化域、调制域等多域联合思路,运用雷达系统与现代博弈、智能算法技术相结合的手段,来解决这个时代难题。

参 考 文 献

- [1] 原慧. 雷达主瓣有源复合干扰对抗方法研究[D]. 西安:空军工程大学,2017.
YUAN Hui. Research on countermeasures of radar main-lobe active complex jamming[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [2] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社,2012.
ZHAO Guoqing. Principle of radar countermeasure[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [3] 张永顺,童宁宁,赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
ZHANG Yongshun, TONG Ningning, ZHAO Guoqing. Principles of radar electronic warfare[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [4] 陈津津,付孝龙. 机载自卫式电子干扰对抗技术研究[J]. 飞航导弹,2016(6): 50-54.
CHEN Jinjin, FU Xiaolong. Research on airborne self-defense electronic jamming countermeasures[J]. Airborne Missile Journal, 2016(6): 50-54. (in Chinese)
- [5] 刘明杰,王春阳,谭铭,等. 隐身飞机自适应功率自卫式干扰[J]. 探测与控制学报,2021,43(3):57-63.
LIU Mingjie, WANG Chunyang, TAN Ming, et al. Stealth aircraft adaptive power self-defense jamming[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(3): 57-63. (in Chinese)
- [6] 胡宝洁,刘广建,毋晓鹤,等. 机载自卫干扰对抗跟踪制导雷达策略研究[J]. 现代防御技术,2017,45(5): 131-135.
HU Baojie, LIU Guangjian, WU Xiaohe, et al. Jamming tactics of airborne self-protection jamming against tracking and guiding radar[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(5): 131-135. (in Chinese)
- [7] 王磊. 相控阵雷达波束形成与旁瓣干扰抑制研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
WANG Lei. Research on beam forming and sidelobe suppression of phased array radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [8] 宫健,赵强,原慧. 雷达主瓣有源复合干扰建模及效果仿真分析[J]. 舰船电子对抗,2019,42(1):19-22.
GONG Jian, ZHAO Qiang, YUAN Hui. Modeling and effect simulation analysis of active compound jamming for radar main lobe[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019, 42(1): 19-22. (in Chinese)
- [9] 杨阳. 多站雷达协同目标检测方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.
YANG Yang. Study on collaborative target detection in multistatic radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [10] 宫健,赵强,付国庆,等. 雷达主瓣多假目标干扰能量特征分析及仿真[J]. 舰船电子对抗,2019,42(5):56-58.
GONG Jian, ZHAO Qiang, FU Guoqing, et al. Analysis and simulation of energy characteristics of radar main lobe multiple false targets jamming[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019, 42(5): 56-58. (in Chinese)
- [11] 唐斌,赵源,蔡天一,等. 雷达抗有源干扰技术现状与展望[J]. 数据采集与处理,2016,31(4): 623-639.
TANG Bin, ZHAO Yuan, CAI Tianyi, et al. Advances and perspectives in radar ECCM techniques of active jamming[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(4): 623-639. (in Chinese)
- [12] 杨少奇,田波,李欣,等. 基于时频图像特征提取的LFM雷达有源欺骗干扰识别[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2016,17(1): 56-59.
YANG Shaoqi, TIAN Bo, LI Xin, et al. Arecognition method of LFM radar active deception jamming based on SPWVD figure[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2016, 17(1): 56-59. (in Chinese)
- [13] 李紫航,宋万杰. 有源干扰感知的熵理论方法[J]. 信号处理,2017,33(12): 1652-1656.
LI Zihang, SONG Wanjie. Entropy theory method for active jamming perception[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(12): 1652-1656. (in Chinese)
- [14] LU L, YANG J, WANG H, et al. The analysis and feature extraction of nonstationary random characteristics of radar jammer signal[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l. :s. n.], 2002:660-663.
- [15] LI J X, SHEN Q, YAN H. Signal feature analysis and experimental verification of radar deception jamming[C]//Proceedings of the 6th IEEE CIE International Conference on Radar. [S.l. :s. n.], 2011: 230-233.

- [16] LIU Y C, WANG W, PAN X Y, et al. A frequency-domain three-stage algorithm for active deception jamming against synthetic aperture radar[J]. *IET Radar Sonar & Navigation*, 2014, 8(6): 639-646.
- [17] SU D T, GAO M G. Research on jamming recognition technology based on characteristic parameters[C]// *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Signal and Image Processing*. [S. l. : s. n.], 2020: 303-307.
- [18] 闫琰. 基于多维特征处理的雷达有源干扰识别技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.
YAN Yan. Multi-feature-based identification of active jamming[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [19] 李娜. 雷达有源干扰分类与识别方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
LI Na. Study on classification and recognition technique of radar active jamming[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [20] 郝万兵, 马若飞, 洪伟. 基于时频特征提取的雷达有源干扰识别[J]. *火控雷达技术*, 2017, 46(4): 11-15.
HAO Wanbing, MA Ruofei, HONG Wei. Radar active jamming identification based on time-frequency characteristic extraction[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2017, 46(4): 11-15. (in Chinese)
- [21] 熊伟, 曹兰英, 郝志梅. 基于多尺度相像系数的雷达干扰类型频域识别[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(3): 19-22.
XIONG Wei, CAO Lanying, HAO Zhimei. Frequency recognition of radar jamming type based on multi-scale resemblance coefficient[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(3): 19-22. (in Chinese)
- [22] SHAO G Q, CHEN Y S, WEI Y S. Convolutional neural network-based radar jamming signal classification with sufficient and limited samples[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 80588-80598.
- [23] 高诗颺, 董会旭, 田润澜, 等. 基于 SRNN+Attention+CNN 的雷达辐射源信号识别方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(12): 3502-3509.
GAO Shiyang, DONG Huixu, TIAN Runlan, et al. Radar emitter signal recognition method based on SRNN+Attention+CNN[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(12): 3502-3509. (in Chinese)
- [24] 井博军. 基于深度学习的雷达辐射源识别技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
JING Bojun. Research on recognition of radar emitter based on deep learning[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [25] 刘国满, 聂旭娜. 一种基于卷积神经网络的雷达干扰识别算法[J]. *北京理工大学学报*, 2021, 41(9): 990-998.
LIU Guoman, NIE Xuna. A radar jamming recognition algorithm based on convolutional neural network[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(9): 990-998. (in Chinese)
- [26] LIU Q, ZHANG W. Deep learning and recognition of radar jamming based on CNN[C]// *Proceedings of the 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design*. [S. l. : s. n.], 2019: 208-212.
- [27] QIAN J X, TENG X Y, QIU Z Y. Recognition of radar deception jamming based on convolutional neural network[C]// *Proceedings of IET International Radar Conference*. [S. l. : s. n.], 2020: 1454-1460.
- [28] XIAO Y H, ZHOU J Y, YU Y Z, et al. Active jamming recognition based on bilinear EfficientNet and attention mechanism[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, 15(9): 957-968.
- [29] SHAO G Q, CHEN Y S, WEI Y S. Deep fusion for radar jamming signal classification based on CNN[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 117236-117244.
- [30] LYU Q Z, QUAN Y H, FENG W, et al. Radar deception jamming recognition based on weighted ensemble CNN with transfer learning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5107511.
- [31] QU Q Z, WEI S J, LIU S, et al. JRNet: jamming recognition networks for radar compound suppression jamming signals[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15035-15045.
- [32] 郎彬, 宫健, 陈赓. 基于融合 Attention 机制的残差神经网络雷达干扰感知方法[J]. *电光与控制*, 2022, 29(9): 53-57.
LANG Bin, GONG Jian, CHEN Geng. A radar jamming perception method based on residual neural network and attention mechanism[J]. *Electronics Optics & Control*, 2022, 29(9): 53-57. (in Chinese)
- [33] 郎彬, 王欢, 宫健. 一种小样本数据驱动的雷达复合干扰轻量化感知网络[EB/OL]. (2022-06-24)[2023-11-19]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0343>.
LANG Bin, WANG Huan, GONG Jian. A small sample data-driven radar compound jamming lightweight perception network [EB/OL]. (2022-06-24) [2023-11-19]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0343>. (in Chinese)
- [34] 茅于海. 频率捷变雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
MAO Yuhai. Frequency agility radar[M]. Beijing:

- National Defense Industry Press, 1981. (in Chinese)
- [35] 丁宁. 低截获概率雷达波形设计与检测方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.
DING Ning. Research on low intercept probability radar waveform design and detection method [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [36] 万涛. 空战场低截获概率雷达信号感知理论与方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
WAN Tao. Research on sensing theory and method for low probability of intercept radar signal in air battle-field[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [37] 钱升起. 距离门拖引干扰与雷达抗干扰[D]. 北京:北京理工大学,2016.
QIAN Shengqi. Range gate pull off jamming and radar anti-jamming[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [38] 李永平,唐斌. 基于分段解线条的 SMSP 干扰抑制方法[J]. 电子信息对抗技术,2012,27(1):41-45.
LI Yongping, TANG Bin. Suppression of SMSP jamming based on subsection de-chirp[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2012, 27(1): 41-45. (in Chinese)
- [39] 栗嘉,陶海红,宋大伟,等. 基于 WD 和时频滑窗掩膜的 SAR 干扰抑制算法[J]. 电子学报,2015,43(12):2345-2351.
SU Jia, TAO Haihong, SONG Dawei, et al. Interference suppression algorithm for SAR based on WD and sliding window masking technique in time-frequency domain[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(12): 2345-2351. (in Chinese)
- [40] 李欣,王春阳,原慧,等. 基于干扰重构和峭度最大化的 SMSP 干扰抑制方法[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(6):1176-1184.
LI Xin, WANG Chunyang, YUAN Hui, et al. SMSP jamming suppression method based on jamming reconstruction and kurtosis maximum[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(6):1176-1184. (in Chinese)
- [41] 李欣. LFM 雷达主瓣有源多假目标干扰对抗方法研究[D]. 西安:空军工程大学,2018.
LI Xin. Research on countermeasures of main lobe active multiple false targets for LFM radar[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [42] 周长霖,王春阳,宫健,等. 基于最大熵法和遗传算法的 SMSP 干扰对抗方法[J]. 北京航空航天大学学报,2022,48(3):447-453.
ZHOU Changlin, WANG Chunyang, GONG Jian, et al. SMSP jamming countermeasure method based on maximum entropy method and genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022,48(3):447-453. (in Chinese)
- [43] 李欣,王春阳,包磊,等. 基于 Partial FFT 的间歇采样转发干扰抑制方法[J]. 探测与控制学报,2018,40(6):43-49.
LI Xin, WANG Chunyang, BAO Lei, et al. Interrupted sampling repeater jamming suppression method based on partial FFT[J]. Journal of Detection & Control, 2018,40(6):43-49. (in Chinese)
- [44] 王峰,雷志勇,李婧. 一种自适应正交虚拟极化抗主瓣干扰方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2013,8(1):53-55.
WANG Feng, LEI Zhiyong, LI Jing. Mainlobe jamming suppression using orthogonal virtual polarization [J]. Journal of CAEIT, 2013,8(1):53-55. (in Chinese)
- [45] 宁立跃,杨小鹏. 多基地极化雷达主瓣干扰抑制算法[J]. 信号处理,2017,33(12):1571-1577.
NING Liyue, YANG Xiaopeng. Multi-base polarization radar main-lobe interference suppression algorithm [J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(12): 1571-1577. (in Chinese)
- [46] MA J Z, SHI L F, LI Y Z, et al. Angle estimation of extended targets in main-lobe interference with polarization filtering [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017,53(1):169-189.
- [47] DAI Huanyao, WANG Xuesong, LIU Yong, et al. Novel research on main-lobe jamming polarization suppression technology[J]. Science China Information Sciences,2012,55(2):368-376. (in Chinese)
- [48] 周长霖,王春阳,宫健,等. 基于干扰重构和盲源分离的混合极化抗 SMSP 干扰[J]. 北京航空航天大学学报,2021,47(9):1841-1848.
ZHOU Changlin, WANG Chunyang, GONG Jian, et al. Hybrid polarization anti-SMSP jamming based on jamming reconstruction and blind source separation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021,47(9):1841-1848. (in Chinese)
- [49] 马佳智. 极化雷达导引头多点源参数估计与抗干扰技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2017.
MA Jiazhi. Research on multi-point source parameter estimation and anti-jamming technology of polarized radar seeker [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [50] THEIL A. On combining adaptive nullsteering with high resolution angle estimation under main lobe interference conditions[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 1990,5(11):16-18.

- [51] 项喆. 极化频率分集 MIMO 雷达抗主瓣有源干扰若干问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
XIANG Zhe. Study on some issues of mainlobe interference suppression for polarimetric frequency diverse MIMO radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [52] JABLON N K. Adaptive beamforming with the generalized sidelobe canceller in the presence of array imperfections [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(8): 996-1012.
- [53] CARLSON B D. Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, 24(4):397-401.
- [54] WU R B, BAO Z, MA Y L. Control of peak sidelobe level in adaptive arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44(10):1341-1347.
- [55] HUGHES D T, MCWHIRTER J G. Using the penalty function method to cope with mainbeam jammers [C]//*Proceedings of the 3rd International Conference on Signal Processing*. [S. l.]:IEEE,1996:461-464.
- [56] 苏保伟,王永良,李荣峰,等. 阻塞矩阵方法对消主瓣干扰[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(11): 1830-1832.
SU Baowei, WANG Yongliang, LI Rongfeng, et al. Mainlobe interference cancelling method via block matrix[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(11):1830-1832. (in Chinese)
- [57] 陈伯孝,项喆,王睿智,等. 基于斜投影预处理的自适应波束形成方法[J]. *制导与引信*, 2017, 38(2):18-24.
CHEN Boxiao, XIANG Zhe, WANG Ruizhi, et al. An adaptive beamforming method based on oblique-projection preprocessing[J]. *Guidance & Fuze*, 2017, 38(2):18-24. (in Chinese)
- [58] YU K B, MURROW D J. Adaptive digital beamforming for angle estimation in jamming [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2):508-523.
- [59] COX H, PITRE R. Robust DMR and multi-rate adaptive beamforming[C]//*Proceedings of the 31st Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*. [S. l.]:IEEE,1997: 920-924.
- [60] 李荣峰,王永良,万山虎. 主瓣干扰下自适应方向图保形方法的研究[J]. *现代雷达*, 2002(3):50-53.
LI Rongfeng, WANG Yongliang, WAN Shanhu. Research of reshaping adapted pattern under mainlobe interference conditions[J]. *Modern Radar*, 2002(3):50-53. (in Chinese)
- [61] YANG X P, ZHANG Z A, ZENG T, et al. Mainlobe interference suppression based on eigen-projection processing and covariance matrix reconstruction[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13:1369-1372.
- [62] YANG X P, YIN P L, ZENG T, et al. Applying auxiliary array to suppress mainlobe interference for ground-based radar [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12:433-436.
- [63] 薛凌坤. 用于稀布阵的主副瓣联合抗干扰算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2022.
XUE Lingkun. Research on joint anti-jamming algorithm of main and side lobe for sparse array [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
- [64] 王博,陈楚舒,马学亮,等. 基于对数稀布阵的 FDA-MIMO 干扰抑制[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(5):37-42.
WANG Bo, CHEN Chushu, MA Xueliang, et al. Research on FDA-MIMO interference suppression based on logarithmic sparse array[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2021, 22(5):37-42. (in Chinese)
- [65] LIU W J, LIU J, LIU T, et al. Detector design and performance analysis for target detection in subspace interference [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2023, 30: 618-622.
- [66] LIU W J, LIU J, HAO C P, et al. Multichannel adaptive signal detection: basic theory and literature review [J]. *Science China Information Sciences*, 2022, 65(2):121301.
- [67] YANG B, ZHU S Q, HE X P, et al. Cognitive FDA-MIMO radar network for target discrimination and tracking with main-lobe deceptive trajectory interference[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(4):4207-4222.
- [68] LI Z J, XIE J W, LIU W J, et al. Resource optimization strategy in phased array radar network for multiple target tracking when against active oppressive interference[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(3): 3539-3550.
- [69] 王雨鑫. 新型雷达干扰识别方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
WANG Yuxin. Research on new radar jamming identification method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
- [70] 全英汇,陈侠达,阮锋,等. 一种捷变频联合 Hough 变换的抗密集假目标干扰算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(11):2639-2645.
QUAN Yinghui, CHEN Xiada, RUAN Feng, et al. An anti-dense false target jamming algorithm based on

- agile frequency joint hough transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(11): 2639-2645. (in Chinese)
- [71] 陈侠达. 雷达抗有源干扰方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020.
- CHEN Xiada. Research on methods of anti-active jamming in radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [72] 许京伟. 频率分集阵列雷达运动目标检测方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015.
- XU Jingwei. Study on moving target detection with frequency diverse array radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [73] 谭铭. 频率分集阵列 MIMO 雷达波束形成及抗干扰方法研究[D]. 西安:空军工程大学, 2020.
- TAN Ming. Research on beamforming and anti-jamming methods of frequency-diversity array MIMO radar[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [74] ABDALLA A, ABDALLA H, RAMADAN M, et al. Overview of frequency diverse array in radar ECCM applications [C]//*Proceedings of 2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering*. [S.l.]:IEEE, 2017: 1-9.
- [75] XU J W, ZHU S Q, LIAO G S. Range ambiguous clutter suppression for airborne FDA-STAP radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(8): 1620-1631.
- [76] XU J W, LIAO G S, HUANG L, et al. Robust adaptive beamforming for fast-moving target detection with FDA-STAP radar [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(4): 973-984.
- [77] WANG W Q, DAI M M, ZHENG Z. FDA radar ambiguity function characteristics analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1368-1380.
- [78] XU J W, LIAO G S, ZHU S Q, et al. Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar [J]. *Signal Processing*, 2015, 113: 9-17.
- [79] LAN L, LIAO G S, XU J W, et al. Suppression approach to main-beam deceptive jamming in FDA-MIMO radar using nonhomogeneous sample detection [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 34582-34597.
- [80] LIAO Y, CHEN X L, WANG W Q, et al. Antenna beam-pattern with range null control using weighted frequency diverse array[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 50107-50117.
- [81] WANG H K, LIAO G S, XU J W, et al. Space-time matched filter design for interference suppression in coherent frequency diverse array[J]. *IET Signal Processing*, 2020, 14(3): 175-181.
- [82] 郭心彤. 相干频率分集阵列雷达抗主瓣干扰方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2022.
- GUO Xintong. Study on mainlobe interference suppression with coherent frequency diversity array radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
- [83] LIN C C, HUANG P M, LI Y, et al. Two-dimensional deceptive jamming mitigation algorithm for SAR imaging using frequency diverse array[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(21): 8022-8026.
- [84] LIU Z D, LI K M, LUO Y, et al. An anti-jamming method against frequency diverse array for ISAR by spatial location feature recognition[C]//*Proceedings of the 11th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*. [S.l.]:s.n., 2020: 1-4.
- [85] TAN M, WANG C Y, LI Z H. Correction analysis of frequency diverse array radar about time [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(2): 834-847.
- [86] 赵英健, 田波, 王春阳, 等. 认知频控阵雷达对随队假目标的动态零陷形成研究[J]. *信号处理*, 2021, 37(10): 1977-1985.
- ZHAO Yingjian, TIAN Bo, WANG Chunyang, et al. Research on the dynamic nulling formation of cognitive FDA radar for the accompanying false targets [J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(10): 1977-1985. (in Chinese)
- [87] 朱圣棋, 余昆, 许京伟, 等. 波形分集阵列新体制雷达研究进展与展望[J]. *雷达学报*, 2021, 10(6): 795-810.
- ZHU Shengqi, YU Kun, XU Jingwei, et al. Research progress and prospect for the novel waveform diverse array radar[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(6): 795-810. (in Chinese)
- [88] BABUR G, AUBRY P, LE CHEVALIER F. Space-time radar waveforms: circulating codes[J]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2013, 2013: 1-8.
- [89] BABUR G, AUBRY P, LE CHEVALIER F. Simple transmit diversity technique for phased array radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1046-1056.
- [90] 崔国龙, 余显祥, 魏文强, 等. 认知智能雷达抗干扰技术综述与展望[J]. *雷达学报*, 2022, 11(6): 974-1002.
- CUI Guolong, YU Xianxiang, WEI Wenqiang, et al. An overview of antijamming methods and future works on cognitive intelligent radar[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 974-1002. (in Chinese)
- [91] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning

- [J]. Nature, 2015, 521(7553):436-444.
- [92] SUTTON R S, BARTO A G. Reinforcement learning: an introduction[M]. Cambridge: MIT Press, 2018.
- [93] 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):1603-1613.
WANG Shafei, BAO Yanfei, LI Yan. The architecture and technology of cognitive electronic warfare[J]. Scientia Sinica Informationis, 2018, 48(12):1603-1613. (in Chinese)
- [94] 李康, 纠博, 赵宇, 等. 雷达智能博弈抗干扰技术综述与展望[J]. 现代雷达, 2023, 45(5):15-26.
LI Kang, JIU Bo, ZHAO Yu, et al. Overview and prospects of radar intelligent game-based anti-jamming technology[J]. Modern Radar, 2023, 45(5):15-26. (in Chinese)
- [95] FAN Y L, JIU B, PU W Q, et al. A probabilistic jamming strategy model for frequency agility radar anti-jamming problem[C]//Proceedings of 2021 CIE International Conference on Radar. [S. l.]: IEEE, 2021: 1131-1135.
- [96] LI K, JIU B, WANG P H, et al. Radar active antagonism through deep reinforcement learning: a way to address the challenge of mainlobe jamming[J]. Signal Processing, 2021, 186:108130.
- [97] WANG S F, LIU Z, XIE R, et al. Reinforcement learning for compressed-sensing based frequency agile radar in the presence of active interference[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4):968.
- [98] LI K, JIU B, LIU H W, et al. Reinforcement learning based anti-jamming frequency hopping strategies design for cognitive radar [C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. [S. l.]: IEEE, 2018: 1-5.
- [99] LI K, JIU B, LIU H W. Deep Q-network based anti-jamming strategy design for frequency agile radar [C]//Proceedings of 2019 International Radar Conference. [S. l.]: IEEE, 2019:1-5.
- [100] 汪浩, 王峰. 强化学习算法在雷达智能抗干扰中的应用[J]. 现代雷达, 2020, 42(3):40-44.
WANG Hao, WANG Feng. Application of reinforcement learning algorithms in anti-jamming of intelligent radar[J]. Modern Radar, 2020, 42(3):40-44. (in Chinese).
- [101] 丁梓航, 谢军伟, 齐钺. 基于强化学习的频控阵-多输入多输出雷达发射功率分配方法[J]. 电子与信息学

报, 2023, 45(2):550-557.

- DING Zihang, XIE Junwei, QI Cheng. Transmit power allocation method of frequency diverse array-multi input and multi output radar based on reinforcement learning[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2):550-557. (in Chinese).
- [102] 许佰涛, 刘冬利, 侯建强, 等. 基于强化学习的雷达抗复合干扰[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(10):83-86.
XU Baitao, LIU Dongli, HOU Jianqiang, et al. Anti-composite jamming technology based on reinforcement learning[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(10):83-86. (in Chinese)
- [103] LIU Y B, WANG C Y, ZHENG G M, et al. An active anti-jamming approach for frequency diverse array radar with adaptive weights[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2021, 30(4):403-411.

作者简介

周长霖

男, 1997年生, 博士研究生, 研究方向为雷达对抗

E-mail: Zcl1997@aliyun.com



王春阳

男, 1967年生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电子对抗理论与技术

E-mail: wangcy1967@aliyun.com



陈康

男, 1997年生, 博士研究生, 研究方向为雷达对抗

E-mail: gengchen1997@163.com



刘明杰

男, 1997年生, 博士研究生, 研究方向为雷达对抗

E-mail: Lmjie09@aliyun.com



责任编辑 殷文卓