

引用格式:方愚渊,魏嵩,何超,等.雷达对抗技术研究综述与智能反干扰展望[J].信息对抗技术,2024,3(2):5-26. [FANG Yuyuan, WEI Song, HE Chao, et al. An overview of radar anti-jamming technology and prospect on intelligent jamming-countermeasure game[J]. Information Countermeasure Technology, 2024, 3(2):5-26. (in Chinese)]

雷达对抗技术研究综述与智能反干扰展望

方愚渊¹,魏嵩¹,何超¹,孙一心¹,张磊^{1*},王明宇²

(1. 中山大学电子与通信工程学院,广东深圳 518000; 2. 空军工程大学防空反导学院,陕西西安 710051)

摘要 电磁频谱的争夺是未来信息化战场至关重要的博弈对抗,为了应对更加灵巧和智能化的电子干扰,雷达也必须要发展智能化的反干扰技术。围绕当前雷达反干扰技术发展现状,将雷达反干扰技术框架分解为被动干扰抑制、主动干扰抑制和认知反干扰3个主要模块,从基础原理、实现逻辑、性能表现等方面对近几年的代表性文献进行了归纳总结。在此基础上,引入了干扰记忆诱导的智能化反干扰概念,丰富了雷达反干扰智能化内涵。并进一步分析了未来该领域的技术需求、应对场景以及发展趋势,为后续的反干扰技术智能化发展提供参考和依据。

关键词 雷达反干扰;电子对抗;认知电子战;干扰感知

中图分类号 TN 973

文章编号 2097-163X(2024)02-0005-22

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2024.02.002

An overview of radar anti-jamming technology and prospect on intelligent jamming-countermeasure game

FANG Yuyuan¹, WEI Song¹, HE Chao¹, SUN Yixin¹, ZHANG Lei^{1*}, WANG Mingyu²

(1. School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518000, China;
2. College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract The contest and confrontation of electromagnetic spectrum plays an essential role in the future information battlefield. Radar should also develop intelligent anti-jamming techniques to countermeasure the emerging agile and intelligent interference techniques. In this paper, the recent development of radar anti-jamming technology was decomposed into three parts: passive antagonism, active antagonism and cognitive antagonism. The representative literature was summarized and reviewed in terms of principles, implementation, and performance. Then, the concept of our ongoing research project——inducing and memorizing jammer was introduced, enriching the connotation of intelligent radar anti-jamming. Finally, the future technical requirements, battlefield scenarios and the development trends in this field were analyzed, which could inspire the future development of intelligent anti-jamming technology.

Keywords radar anti-jamming; electromagnetic countermeasure; cognitive electronic warfare; jamming perception

0 引言

雷达在战场上扮演着极为关键的角色,利用雷达实时侦测目标、分析并预测目标行为,能够为战略指挥与战术决策提供关键的情报支持。为了削弱对方雷达的作用效能,电子对抗(electronic counter measures, ECM)技术应运而生^[1]。ECM的本质是在时域、频域、时频域等多域上削弱对方电磁频谱的有效使用,从而压制其雷达的探测性能或引导其雷达形成欺骗式的假目标。随着ECM技术的迅速发展,雷达面临的生存挑战愈发严峻。雷达系统的反干扰能力直接决定了雷达能否在复杂电磁环境中保持高效的探测侦察性能,进而影响作战效能,甚至左右局部战场的胜负。因此,如何有效对抗干扰逐渐成为电子战重要研究课题,反电子对抗(electronic counter-counter measures, ECCM)技术受到了前所未有的关注^[2]。

针对无源干扰的ECCM技术研究历史悠久,从极化特性、距离像、时频特性等方面出发,该方向已有大量研究成果。在有源干扰中,对抗副瓣干扰的ECCM技术目前较为成熟,包括超低副瓣天线、旁瓣匿影、旁瓣相消技术等^[3]。而与副瓣干扰不同,主瓣干扰信号从雷达天线主瓣或近主瓣进入,干扰信号不仅具有雷达目标回波相同的天线增益,其来向更是与目标空域难以区分。因此,相较于副瓣干扰,主瓣干扰更具威胁性。目前,对抗主瓣干扰的ECCM技术是国内外的研究热点,也是制约雷达发展的一个瓶颈。

ECM技术与ECCM技术恰如一对矛和盾,两者相互影响、互相迭代,在激烈的辩证与对抗中螺旋上升^[4]。随着对雷达方工作模式理解的不断深入,主瓣干扰也相应地发展出了多种技术手段,典型的干扰样式包括压制干扰、欺骗干扰以及灵巧干扰等。此外,作为另一种高效低成本的ECM技术路线,以美军“小精灵”项目为代表的集群式干扰也在蓬勃发展之中。随着硬件水平的提升以及深度学习和先进信号处理技术的发展,雷达对干扰波形的被动截获与分析处理能力显著提升^[5]。不仅如此,雷达的主动发射技术也在不断迭代中迅速成长,配套的信号处理方式也日益成熟,该技术通过在时域、频域和调制域等多域上捷变波形的参数或样式,能够有效规避干扰

功率的注入。同时,基于无源定位^[6]和组网对抗体制^[7]的ECCM技术逐渐起步并发展起来。

随着雷达方和干扰方双方多种技术的进一步发展,ECM和ECCM之间的对抗呈现出复杂化、智能化和体系化的发展态势,这进一步加剧了彼此之间的竞争,以智胜敌和体系作战已成为不可避免的发展趋势^[8]。在未来战场中,集成了态势感知、自主学习、自主推理及决策能力的雷达和干扰机将展开智能化决策^[9-10],不断试探、诱导和压制对方,形成多轮迭代交互的激烈博弈^[11]。这意味着在电磁战场上将更加依赖于智能化决策和综合作战能力,以确保在复杂多变的环境中保持优势地位。

本文旨在全面梳理雷达反主瓣干扰的技术路线,对干扰方手段以及相应的雷达对抗手段进行总结和剖析。在电子战快速发展的今天,本文着眼于未来认知电子战在智能对抗领域的发展趋势,并提出了构想的主动电侦概念蓝图——干扰记忆诱导,以促进相关研究的深入探讨。

1 典型雷达干扰样式

随着电磁技术的不断演进,雷达在其探测过程中所面临的潜在威胁也逐渐升级。这是因为需要确保某些敏感区域或设备免受雷达侦测的威胁,因此研究人员不断提出了各种干扰手段。按照干扰信号的到达方向分类,干扰方式主要可以划分为旁瓣干扰和主瓣干扰^[12]。旁瓣干扰是指干扰从雷达波束的副瓣进入而对雷达目标检测造成影响的干扰。这类干扰可以通过降低雷达旁瓣增益的超低副瓣天线技术来实现干扰抑制,也可以利用旁瓣对消、旁瓣消隐等信号处理技术来实现干扰抑制。主瓣干扰则是指从雷达的波束主瓣方向进入的干扰,这类干扰能量增益较大且与真实目标混叠在一起难以区分,是当前雷达反干扰的主要困难所在。在主瓣干扰中,按照干扰的能量来源分,又可分为无源干扰和有源干扰2大类。无源干扰是指使用本身不发射电磁波的器材反射或吸收对方发射的电磁波而形成的电子干扰。通常情况下,这类干扰源指的是探测目标所释放的箔条云,它们的电磁波散射效应强,可以轻松迷惑雷达,达到保护自身目标的目的。有源干扰则是指通过发射或转发电磁信号对对方电子设备进行压制或欺骗的电子干扰。

有意的主动有源干扰是指位于探测目标附近的电子干扰设备发射的电磁干扰信号。这些信号通过压制或欺骗性手段对雷达进行干扰,具有强烈的对抗性和博弈特性。本文主要针对雷达与主动有源干扰之间的对抗进行研究和阐述。

1.1 阻塞式干扰

阻塞式干扰主要是通过调制并发射大功率的噪声信号,当这种干扰注入雷达电子系统时,接收机就会发生饱和与过载,从而使得雷达丧失目标检测能力。按照噪声的调制方式可分为射频噪声干扰、噪声调幅干扰和噪声调频干扰 3 种主要类型。这 3 类干扰的统一数学表达式^[13]可写为:

$$J(t) = U(t) \exp \left[\omega_j t + 2\pi K \int_0^t u(\tau) d\tau + \varphi(t) \right] \quad (1)$$

式中, $U(t)$ 表示噪声的幅度调制函数, ω_j 为干扰的中心角频率, $K \int_0^t u(\tau) d\tau$ 为干扰的频率调制函数, K 为调频斜率, $\varphi(t)$ 为干扰的相位调制函数。

射频噪声干扰的相位调制函数 $\varphi(t)$ 为时变函数,幅度调制函数为常数,频率调制函数为 0;噪声调幅干扰的幅度调制函数 $U(t)$ 为时变函数,频率调制函数为 0,相位调制函数为常数。噪声调频干扰的频率调制函数 $K \int_0^t u(\tau) d\tau$ 为时变函数,幅度调制函数和相位调制函数为常数。

1.2 欺骗性干扰

欺骗性干扰主要是干扰机通过发射与雷达波形相参的干扰信号,迷惑雷达的目标检测识别系统,让雷达将假目标误判为真实目标。一般来说,欺骗干扰可分为假目标干扰和拖引干扰,其中,假目标干扰包括距离欺骗、速度欺骗和角度欺骗 3 种欺骗类型^[12],而拖引干扰会逐步利用假

目标拖引雷达的跟踪过程,从而导致雷达的错误跟踪和目标丢失。这 3 种不同假目标干扰的欺骗过程是类似的,只是在不同的回波参数域上进行的,在后续文中将以最常见的距离欺骗干扰为例,对欺骗性干扰及对抗方法进行介绍说明。

随着硬件设备的不断发展,数字射频存储器(digital radio frequency memory, DRFM)^[14-15]的出现让欺骗性干扰的对抗能力上了一个台阶。DRFM 能够快速地对雷达发射波形的存储与转发,由于干扰机所反馈的信号为雷达发射信号的一部分,具有极强的相参性,因此能够在雷达脉冲压缩处理过程中形成较强的增益,以生成更加逼真的假目标来欺骗雷达。DRFM 的基本工作原理如图 1 所示。

不同的 DRFM 工作时序会导致不同的干扰类型和结果,包括间歇采样直接转发干扰(interrupted-sampling and direct repeater jamming, ISDJ)、间歇采样重复转发干扰(interrupted-sampling repeater jamming, ISRJ)、间歇采样循环重复转发干扰(interrupted-sampling and cyclic repeater jamming, ISCJ),如图 2 所示。其他类似的转发类干扰还包括频谱弥撒(smear spectrum, SMS)干扰。ISRJ、ISCJ 会形成若干尖峰,被检测判决当成多个虚假目标或底噪,对目标检测造成极大的困难。

1.3 灵巧干扰

灵巧干扰(smart jamming, SJ)是一种兼备了阻塞式干扰和欺骗性干扰特点的新型干扰^[16]。在 DRFM 采样存储的基础上,通过对存储信号片段进行调制,可控制受匹配滤波增益的假目标群的位置、时延、频移,实现欺骗的同时极大地抬高了目标附近的底噪;或者,直接将存储片段与压制噪声进行调制,使其获得匹配增益,形成灵巧噪声干扰(smart noise jamming, SNJ)。

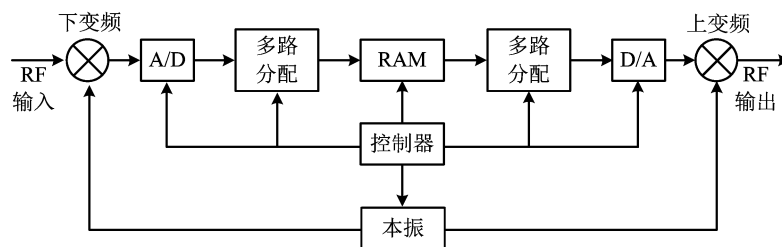


图 1 DRFM 工作机制示意图

Fig. 1 The schematic diagram of DRFM working mechanism

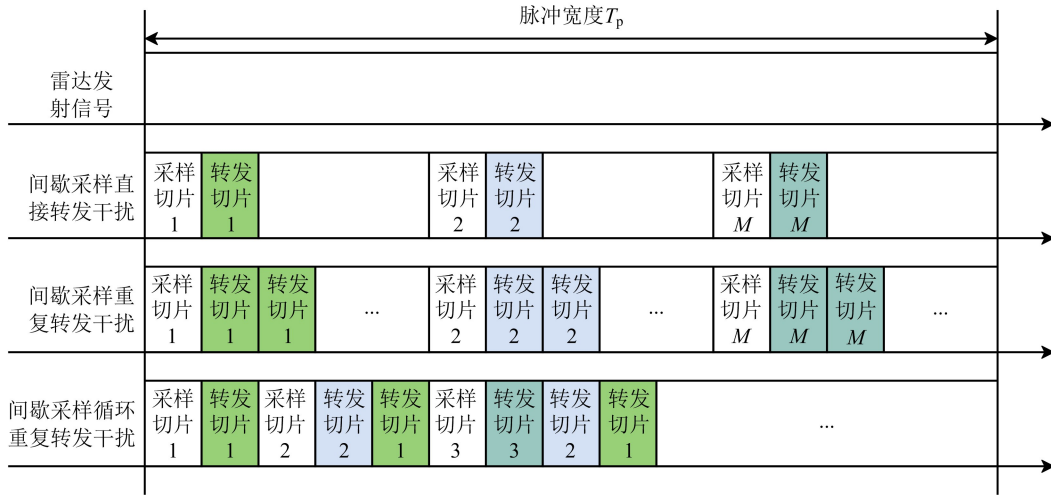


图 2 基于 DRFM 的典型欺骗干扰

Fig. 2 The deception jamming types based on DRFM

整体而言,卷积调制类灵巧干扰信号模型^[17]可以表示为:

$$J(t) = \left(\sum_{n=1}^N A_n f_n(t - \delta t_n) \right) \cdot s(t) \quad (2)$$

式中, $J(t)$ 表示干扰信号, $s(t)$ 表示 DRFM 的截取信号。括号表达式为 DRFM 对截取信号的调制函数,该函数可以由 N 个调制分量叠加而得到,其中, A_n 、 $f_n(\cdot)$ 、 δt_n 分别代表第 n 个调制分量的幅度、波形形式、时延。当 $N=1$, $f_n(t)$ 为 DRFM 视频噪声时, $J(t)$ 为灵巧卷积噪声干扰,时域脉压的结果可看作是噪声获得与信号相同的匹配滤波增益的同时在时域上进行了卷积搬移。当 $N>1$, $f_n(t)$ 为矩形窄脉冲或者冲击函数时, $J(t)$ 表现为时移可控的距离密集假目标干扰。

乘积调制类灵巧干扰模型可以表示为:

$$J(t) = \left(\sum_{n=1}^N A_n f_n(t - \delta t_n) \right) \cdot s(t) \quad (3)$$

式中,符号定义同式(2)。当 $N=1$, $f_n(t)$ 为 DRFM 视频噪声时, $J(t)$ 为灵巧卷积乘积干扰,脉压的结果可看作是噪声获得匹配滤波增益的同时在频域上进行了卷积搬移。当 $f_n(t)$ 为单频信号时, $J(t)$ 表现为移频干扰。

由于灵巧干扰能获得匹配滤波增益,同时调制函数形式复杂多变,因此对雷达的干扰抑制信号处理造成了较大的困难。

2 被动干扰抑制

针对当前的主流干扰技术,逐渐发展出了多种相应的对抗手段,以实现雷达目标检测、成像、

识别等功能的有效反干扰。雷达的抗干扰手段主要分为被动干扰抑制和主动干扰抑制 2 个方面。被动干扰抑制是最早也是最常用的干扰抑制手段。被动干扰抑制是一种干扰信号已经进入雷达接收机并影响了雷达的处理结果,而后通过一定的技术手段对干扰分量进行提取与抑制,从而准确保证雷达性能的技术手段。可见,在被动干扰抑制中,干扰分量的检测和提取性能会明显影响到后续的干扰抑制效果。被动干扰抑制流程图如图 3 所示。

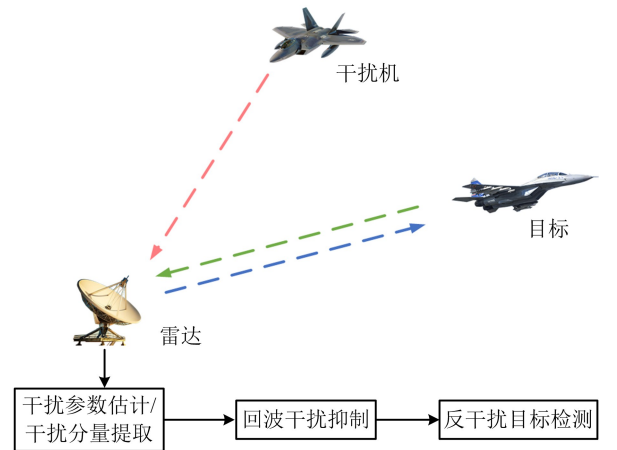


图 3 被动干扰抑制流程图

Fig. 3 The flow chart of passive interference suppression

2.1 干扰样式识别

伴随着干扰的注入,接收信号的统计特征相比纯净的回波会发生一定的改变。因此,传统的有源干扰样式识别主要是通过对接收回波信号的统计特征量分析而实现的,其中,时域的矩偏度、矩峰度及频域的矩偏度、矩峰度是最为常用

的统计特征区分量^[18-20]。除此之外,为了增强特征区分能力,包络起伏度、归一化幅度标准偏差、加性高斯白噪声因子等诸多参数也被拿来用于区分不同的有源干扰样式。将以上接收回波信号的统计特征量进行处理,送入一个判别分类器,就可以得到干扰样式的识别结果。目前,常用的判别分类器有决策树、支持向量机(support vector machine, SVM)和误差反向传播(back propagation, BP)神经网络。决策树模型具有结构简单、易于实现的优势,然而其判决门限大多依赖于人工设定,当判决逻辑过多时,该分类器模型性能将会受门限设定影响严重。SVM能够通过数据训练拟合找到区分 2 类数据的最优间隔,通过联合多个 SVM 子分类器即可实现多种干扰样式的识别。由于受限于 SVM 的分类特性,这种分类器在面对多种样式分类时会产生较为复杂的分类结构,会产生类似于决策树机制的弊端。而 BP 神经网络则能够在一个网络下完成多类型干扰的识别,具有更强和更稳健的处理能力。然而 SVM 和 BP 神经网络这类算法均依赖于大量的数据训练模型,这对实际应用提出了较高的要求。

随着时频分析技术^[21-29]的逐渐成熟,出现了基于时频分析的干扰样式识别方法。时频分析能够很好地展示信号中的频率分量随时间变化的关系,是一种更加全面的信号描述维度。鲍大祥^[19]提出在时频域上提取尺度重心、中心距和方差作为新的统计特征,结合常规的统计特征增加特征描述维度,实现了更加稳健的干扰样式识别。目前的主流技术则是利用时频分析方法如短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)、魏格纳-维利分布(Wigner-Ville distribution, WVD)等获取受干扰回波的时频图像,以图像为基础,引入机器学习算法,对图像进行处理,从而实现干扰检测识别的目的。其中,SHAO 等^[30]分别利用 1D-CNN 和 2D-CNN 提取不同的受干扰回波的特征进行图像训练,最终实现了噪声干扰、瞄频干扰、距离欺骗干扰等多达 12 种干扰类型的识别。LIU 等^[31]在图像上进行了聚焦切割,增强了干扰特征,利用 CNN 实现了多种干扰样式的识别。LIN 等^[32]则引入递归图和 CNN 联合的方式,增强了在低干噪比条件下的干扰样式调制识别性能。

对于压制类干扰来说,识别出目标干扰机的干扰样式后,就可以通过一定的干扰抑制手段或调整发射策略以规避或者抑制干扰。而对于欺骗类干扰来说,为了提高干扰抑制效果,需对干扰成分进行准确识别和提取,以便针对性地进行抑制处理,保证后续雷达的目标探测能力。在干扰分量检测与提取上,时频分析依旧是一项强有力的实用工具,周超等^[33]、孙正阳等^[34]相继研究了 ISRJ 在脉压结果上的时频特征,并给出了相应的干扰分量检测手段,能够有效地应用于后续的 ISRJ 的干扰抑制。CHEN 等^[35]对受干扰回波 Dechirp 后的时频分析结果上的干扰分量进行了特征建模,实现了干扰分量的检测和抑制。时频分析虽然能够直观反映出干扰分量和真实回波的时频分布差异,但是这种算法要求将一维的时域数据转换为二维的时频分布矩阵,对实际应用中的硬件设备要求较高,因此还有一些学者对不需要这类数据扩张的干扰分量检测算法展开了研究。DUAN 等^[36]提出了一种半参数化的稀疏分解算法来检测和提取干扰分量,相比于传统的时频分析算法,降低了数据的存储要求,更符合实际应用的实时性要求。另外,基于欺骗式干扰的转发机制,又有许多学者从不同的角度开展了研究。根据干扰机收发分时的特性,WU 等^[37]提出了一种积分分解的方式,在脉压域上对干扰分量产生的虚假目标实现了准确识别。根据干扰机的相位量化特性,GRECO 等^[38]定义了一种由 DRFM 引起的测量误差干扰信号误差角(jamming signal error angle, JSEA),并利用信号锥实现了目标信号和干扰分量之间的检测。

随着雷达硬件设备的迭代发展和信号处理技术的不断成熟,对于雷达干扰的识别能力也在逐渐提升,但是不论利用怎样的技术或者模型,其最终的目的都是为了服务于后续的干扰抑制手段,更强的干扰识别能力也是为了后续更高的干扰抑制性能。

2.2 干扰抑制

被动式的干扰抑制主要是指在不改变雷达发射策略以及硬件设备的前提下,对雷达接收的回波中的干扰进行抑制,以实现最优探测的技术手段。当目标和干扰机在主瓣内可近似分辨时,可在空域对干扰进行抑制^[39-40]。然而,随着目标和干扰空域可分性变差,空域抑制方法性能随之

下降。此时,使用信号处理被动抑制的方法主要为干扰重构对消和干扰分量检测抑制。

面对非相参的压制类干扰,目前普遍采用干扰重构对消的方式进行干扰抑制。由于这类干扰调制方式相对简单,基本都遵从式(1)的数学表达式,且干扰功率远大于真实回波功率。因此,在已识别到干扰样式的基础上,通过对接收的数据进行参数估计即可便捷地对干扰进行重构,利用重构后的结果与接收回波进行相消处理实现有效的干扰抑制^[41-43]。而在面对具有相参特性的灵巧噪声干扰来说,传统的干扰重构相消算法性能将大打折扣。这是由于干扰中还包含了与发射信号相参的分量,做重构相消处理的时候也可能会抑制真实回波。对此,部分学者开展了例如自相关滤波、分数阶傅里叶变换^[44]的抑制方法研究,并且取得了一定的成效。

不同于压制类的干扰,欺骗性干扰具有很强的迷惑性,这类干扰在多个维度上如频率、时间、角度、波形调制等与真实回波相同,抑制也更加困难,因此吸引了更多的学者对其展开研究。在欺骗性干扰抑制上,应用最广泛的是基于时频分析的干扰分量检测的抑制方法。在前面的干扰样式识别中,已有诸多学者研究了如何提取回波中的干扰分量,并给出了相应的抑制方法。周超等^[33]、孙正阳等^[34]在时频分析的结果上对回波中的干扰分量进行检测,并根据检测结果构建了对应的时频滤波器,实现了对 ISRJ 的抑制,这类方法简便直观。CHEN 等^[35]在 Dechirp 信号的时频域上实现干扰的检测后,采取了二次搜索以及更加平滑的滤波器,达到了更好的抑制效果。但是在时频域设计滤波器对于当前雷达硬件设备来说要求较高,在实际应用中略有不便。CHEN 等^[44]后续又在脉压时频域提取干扰分量,并提出了一种迭代自适应的方法对干扰分量进行抑制,避免了时频二维滤波器的展开。为了提高干扰检测与抑制的自适应性,也有一些学者开展了利用神经网络的干扰抑制研究。CHEN 等^[45]提出了一种堆叠双向门控递归网络和无限训练的反欺骗干扰算法,基于这个网络构建一个时序分类器并做无限训练以获取不带干扰的 Dechirp 分量,然后依据该无干扰污染的分量设计生成的一个带通滤波器以抑制 ISRJ 分量,保证了算法在多种信噪比 (signal-to-noise ratio,

SNR)和干噪比(jam-to-noise ratio, JNR)下的稳健性。LYU 等^[46]提出了一种自动目标检测的深度神经网络,借助于时频分析和 YOLO 单阶段检测器对受干扰的回波进行定位检测后,构建一种基于 CNN 的分类识别模型,实现在 ISRJ 环境下的准确目标检测。

另外,还有一些其他的干扰抑制思路,例如干扰重构对消。LU 等^[47]提出了一种利用伪随机编码连续波来估计干扰参数并对干扰进行重构对消的干扰抑制方法,这类方法对波形和干扰分量的特征参数估计精度要求较高,相关的研究内容目前较少。丁黎明^[48]提出利用稀疏恢复的思想来对抗欺骗类干扰,针对不同的干扰类型分别在时域、二维平面空时域以及三维空间空时域进行了干扰抑制或反干扰方法研究。ZHAO 等^[49]则提出了一种动态孔径的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 欺骗干扰抑制技术,通过引入动态孔径重构观测矩阵,将干扰抑制问题转化为目标重构最优化问题,获得了良好的干扰抑制性能。卢云龙^[50]根据 DRFM 的延时量化产生干扰信号的中心频率偏移与谐波分量寄生,提出了一种基于奇异谱分析的抗 DRFM 有源欺骗干扰方法,获得了良好的干扰抑制性能;进一步地,他还提出了一种基于联合时频分布和压缩感知的算法用于对抗由 DRFM 产生的能够生成大量假目标的 SMSP 干扰,这种方法首先利用分数阶傅里叶变换 (fractional Fourier transform, FrFT) 滤除干扰分量,然后利用时频分析进一步滤除干扰和信号重叠部分以消除绝大多数干扰分量,最终以压缩感知对原回波信号进行重构,实现有效的干扰抑制。

此外,一些新型雷达体制由于独特的优势,在干扰抑制上开始崭露头角。频控阵多输入多输出 (frequency diversity array-MIMO, FDA-MIMO) 雷达具备距离-角度的二维相关特性,可以用于实现距离维度的主瓣欺骗式干扰抑制。这一特性逐渐引起了学术界的广泛关注^[51-54]。

当前,已有诸多学者对被动式的干扰抑制手段展开了深入的研究,并取得了良好的效果。然而,被动式的干扰抑制始终是在雷达已被干扰机注入对应干扰后执行的。尽管干扰得到了抑制,但是雷达的工作性能还是会不可避免地受到损失,并且在特殊情况下抑制后的干扰残余分量仍

有可能会影响到雷达的正常工作。为了避免雷达直接地受到干扰的影响,通过调整雷达发射策略来规避干扰的主动反干扰技术也成为了当前反干扰技术研究的热点。

3 主动干扰抑制

被动反干扰的方法将雷达信号暴露在干扰信号之下,这可能导致在处理前的原始回波信号已经遭受了不可承受的损失。相比之下,主动反干扰通过主动调整雷达发射信号参数,以降低干扰信号对雷达的影响。设雷达在一个 CPI 内共发射 N 个脉冲信号,第 n 个脉冲发射信号可以表示为:

$$z_n(t) = A_n \exp(j\theta_n) s_n(t - t_n; T, B) \cdot \exp(j2\pi f_n t) \quad (4)$$

式中, A_n 、 θ_n 、 t_n 、 s_n 、 f_n 分别代表第 n 个脉冲的幅度、初相、脉冲起始时间、波形形式、载频, T 和 B 分别代表信号的时宽和带宽。主动反干扰的内涵在于,通过对式(4)中的参数进行优化或者捷变,主要达到以下目的:1) 优化波形,增大回波与干扰在某域上的区分度,提高干扰抑制性能;2) 通过初相捷变或者波形捷变使得慢转发干扰难以积累或抑制程度提高;3) 降低干扰机对波形的截获能力,或者针对其截获方式进行诱骗;4) 通过主动捷变减少干扰能量的对准注入,提高干信比。

3.1 时域调制

主动波形是指针对干扰可能的特性在波形上进行巧妙的设计,使得干扰效能大幅度降低,或者反干扰处理效果提升的雷达发射波形。

时域掩护是一种简单有效的主动波形,通过在干扰机的侦收时段投放掩护脉冲,使干扰机后续的干扰发射针对的是掩护信号,达到主动诱导欺骗的目的。文献[51]梳理了雷达射频掩护信号的范式,并探讨了干扰方对应的对抗方法。文献[55]通过掩护波形和探测波形 2 部分的反馈,提出了基于预设逻辑的雷达射频掩护时频域的抗干扰调度策略。文献[56]利用简单的程序逻辑实现了雷达射频掩护的频点优化,并通过了外场实装对抗试验。其中,文献[55-56]均采用了“掩护信号+被掩护信号”和“掩护信号+被掩护信号+掩护信号”的时域掩护形式,并在掩护信号与信号之间设置了较大频率间隔(大于干扰机的瞬

时工作带宽,大约为 1 GHz),使得干扰机难以截取到探测信号。文献[57]提出了针对密集假目标干扰和间歇采样转发干扰的射频掩护时域波形设计准则,在掩护时段内投放正交波形,并采用分段脉压进行反干扰处理,最后在内场与外场进行了硬件测试验证。

在频域掩护方面,余显祥等^[58]提出一种“宽发窄收”的探测波形频域掩护方法。具体地,利用 2 个发射节点分别将窄带与宽带信号进行协同发射,窄带信号作为探测信号处于宽带信号频域凹口处,实现了频域掩护,使得干扰机无法频域对准探测信号。通过所提基于 MM 原理的近端乘法(majorization-minimization-based proximal method of multipliers, MM-PMM)优化算法,在恒模约束下优化了窄带信号自相关峰值旁瓣电平,优化了宽带信号频谱包络形状。

在干扰参数固定的情况下,部分研究开展了波形优化的方案设计来对抗切片转发干扰。ZHOU 等^[59]在估计干扰参数后,利用遗传算法对相位编码信号进行自适应优化,使得干扰信号与目标回波正交,从而实现了对干扰的抑制。WEI 等^[60]首先通过时频分析估计切片转发干扰参数,包括采样间隔、采样持续时间和转发次数等,然后自适应地调整脉内频率编码信号参数,使得匹配滤波后的 ISRJ 信号仅形成单个假目标,最后通过带通滤波器或信号剪切拼接抑制干扰。周畅等^[61]针对其多普勒频移干扰的特点,设计并优化了一种具有一定的多普勒不敏感和低副瓣特性的脉内正交线性调频-相位编码波形,通过多子信号滤波通道对干扰进行了识别和抑制。GE 等^[62-63]提出了一个干扰感知、波形优化的自适应框架。对干扰信息测量后,在干扰抑制、恒模和 SNR 等约束下,对相位编码信号序列以及失配接收滤波器进行了联合优化,实现了对转发类干扰的抑制,并证明所提解耦交替方向惩罚法相较于传统交替方向乘法算法保障了收敛性。文献[64]针对 DRFM 的干扰回波延迟特性,对雷达不同脉冲信号通过波形数字水印技术添加不同的调制,从而根据回波信息差异鉴别真假回波,最终实现对干扰进行抑制处理。

3.2 波形捷变

波形捷变通过对一个脉冲积累时间内的波形进行捷变或者初相捷变达到干扰增益变低的

目的。

传统的线性调频(linear frequency modulation, LFM)、相位编码信号、顺序步进频率信号等波形在脉内采用单一调制方式,形式简单,容易受到转发干扰的欺骗。AKHTAR^[65]提出通过变动波形参数或发射正交信号,使干扰机延时转发的信号在雷达接收机处无法得到增益,从而完成对欺骗式干扰的对抗。波形捷变的优势在于不依赖复杂的信号处理手段,只要发射波形适应于当前的干扰环境,即可有效对抗干扰。

部分研究开展了对正交捷变波形的设计,以保证信号自相关函数的低旁瓣性质并压低各信号之间的互相关副瓣。文献[66]通过改进的 Logistic-Map 混沌序列生成算法,优化了相位和频率编码波形,提升了距离域的分辨率并有效地抑制了转发干扰。文献[67]分析了 LFM 信号捷变、非线性调频(nonlinear frequency modulation, NLFM)信号捷变、正交相位编码信号捷变及 NLFM-正交相位编码信号联合捷变的反干扰性能以及自相关旁瓣,然后通过时变脉压完成对距离欺骗干扰的抑制。张劲东等^[68]提出了一种基于波形分集技术的雷达反欺骗式干扰方法,该方法采用 Alamouti 空时码的思想,构造一组满足频域正交性的发射波形,放宽了波形互相关的要求,并实现了距离波门拖引干扰下假目标的对消。ZHANG 等^[69]在恒模约束条件下,基于奇异值分解和循环算法在距离-多普勒平面的预定区域构造具有期望最小旁瓣的单模序列集。

部分研究针对速度欺骗干扰特性开展了认知初相捷变波形的设计。文献[70]提出了一种优化脉冲初始相位的波形设计方法,通过在感知目标和干扰的多普勒信息后控制假目标回波频谱,在单个真实目标回波的多普勒谱一定范围内形成零陷,以抑制跨脉冲转发式速度欺骗干扰。文献[71]在此基础上,提出了基于脉间相位捷变的恒模离散相位波形设计方法。文献[72]采用不同 PRF 处理延迟的多通道处理技巧来估计真目标和假目标的参数,并调整雷达回波的多普勒频谱抑制阻带内的干扰功率。文献[73]针对多目标下的速度欺骗干扰,分析了真目标和假目标的不同频谱特征,制定了目标函数并提出改进牛顿法进行优化,变换脉间的发射脉冲初始相位,使得假目标在频域中围绕真实目标形成凹口。

3.3 频率捷变

频域内频率捷变能有效地规避大部分窄带瞄准式干扰、转发式假目标前拖欺骗干扰和跨脉冲重复周期欺骗式假目标干扰等,相较于脉间波形捷变具有更好的正交性。然而,频率捷变体制在相参处理和杂波抑制方面面临一定的困难,并且需要更高的系统硬件要求,因此在早期并未受到重视。然而,随着雷达全相参频率捷变硬件水平的提升以及电子对抗态势的不断升级,频率捷变信号由于其低截获性能和反干扰能力正在逐渐受到重视,近年来相关研究发展迅猛,呈现出日益增长的趋势^[74-75]。

部分学者开展了频率捷变雷达的信号处理研究。在相参处理上,可分为传统信号处理和基于压缩感知(compressed sensing, CS)^[76]的处理方法。就传统信号处理方式而言,针对频率捷变与距离及速度的耦合项,文献[77]利用参差脉冲重复间隔法及基于代价函数优化进行相位补偿,实现有效相参积累。文献[78]应用 Radon 变换、相位补偿函数、chirp-z 变换和离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)实现目标相参积累。文献[79]针对频率捷变雷达回波相位的去相关效应和长时间积分中的距离单元偏移问题,提出了基于 Radon 变换来实现频率捷变长时间相参积累。文献[80]针对脉组捷变体制下的高速目标弱检测问题,应用 Keystone 变换校正每个脉组中的距离徙动,然后构造缩放变换去除捷变载波频率与慢时间的残余耦合项,使得运动目标在频率-速度域中得到聚焦。在稀疏的场景下,稀疏恢复重构方法可以有效降低高分辨像的旁瓣。文献[81]分析了随机步进频体制下 CS 算法的稀疏恢复特性,给出了 l_0 范数和 l_1 范数优化条件下可稳健恢复目标数量的界限。文献[82]结合相变理论,建立了相变曲线解析表达式,进一步定量描述了捷变频雷达稀疏重建的成功率与系统参数、目标参数之间的关系。文献[83]在频率捷变体制下提出了一种基于相干处理区间内的运动目标检测方法,利用稀疏重构来估计目标速度。文献[84]在单 bit 雷达体制下,改进 Ada-ISTA 展开网络^[85],提出了 1-bit 块稀疏重构网络,显著提高了收敛速度和目标参数恢复质量。在频率捷变体制下,传统基于多普勒的杂波抑制方法失去了效果,因此一些研究对捷变频雷达体制下的杂

波抑制进行了新的探索^[86-88]。上述方法都基于频率捷变信号已完全避开干扰的假设,因此接收到的回波信号基本不包含干扰信号。然而,若回波信号中的某些频点存在较强的干扰,则算法性能将会大幅下降。因此,频率捷变体制下的干扰抑制算法的研究也开始引起了重视。

在捷变频体制下,密集转发干扰在距离压缩-方位时域会呈现出距离向密集排列,而方位向稀疏分布的特性,从而方便了干扰的识别和抑制。文献[89]先用 Hough 变换将脉冲压缩后的数据转换到参数空间,通过峰值提取得到目标的运动轨迹并抑制干扰,再使用逆 Hough 变换将数据逆映射回数据空间,进行二维高分辨稀疏重构,得到距离-速度重构图。文献[90]设计人工特征在距离压缩-方位时域平面上用 SVM 实现了对密集转发干扰的识别和抑制。文献[91]针对距离压缩-方位时域中干扰的数学形态特性对干扰进行了提取和抑制,文献[92]在此基础上,利用波形熵对干扰进行了辨别,并改用局部离群因子算法对较强的干扰旁瓣进行了剔除。

针对脉内瞬时转发的干扰样式,传统的波形捷变和脉间波形捷变反干扰技术将无法有效应对,因此部分学者对脉内频率捷变技术进行了探索。张建申等^[93]针对 ISRJ 干扰提出了脉内步进 LFM 波形,该方法通过对信号进行多滤波器分段输出,将被干扰频段舍弃,并对剩余的子脉冲进行分段脉压处理。由于脉内信号片段之间正交,当干扰信号经过多滤波器处理后,频带外的干扰信号得到了滤除,同时剩余频段重合的干扰也被舍弃,从而实现了对于干扰的抑制。接着,张建申等^[94]提出了一种使用 Costas 序列改进的 LFM 子脉冲频率顺序步进编码方式。该波形不影响宽带 LFM 的分辨率,并避免了距离-多普勒耦合,使得采样子脉冲与相邻子脉冲脉压后的残余信号无法积累,从而抑制了干扰并降低了谐波的影响。

脉间-脉内联合捷变技术具备反瞄准干扰、密集转发干扰等复合慢转发干扰,同时也可增加 ISRJ 干扰下雷达信号与干扰信号的区分度。同时,ISRJ 在短时傅里叶变换后由频谱分辨率泄露的旁瓣会与信号时频重叠,而脉内频率捷变可有效增加信号与干扰在时频域上的区分度^[95],故脉间-脉内联合捷变逐渐引起了研究人员的广泛关

注。文献[96]在脉间-脉内联合捷变体制下,针对干扰频段功率大而信号频段功率小的特点,利用模糊 C 均值聚类对分段滤波后的干扰频段进行识别,最终利用压缩感知实现距离-多普勒重构。文献[97]通过 FrFT 的方式增大了干扰与目标信号的区分度,更好地抑制了与目标信号幅度相近的干扰旁瓣,最终通过分段脉压对信号进行了积累。文献[98]设计了一种脉内脉冲串频率-时延联合捷变的主动波形,通过分段滤波和时频滤波等方式对干扰进行了抑制。该方法可在低信噪比和高干信比情况下有效抑制干扰,在不同的采样延迟下均有较好的干扰抑制效果,然而信号处理流程比较复杂,旁瓣的抑制也有一定的困难。

3.4 PRF 调制

PRF 非均匀调制可破坏对方干扰机的分选逻辑,同时可使干扰在时域上难以对准雷达信号,大幅度降低干扰的效能。鉴于干扰机分选逻辑的薄弱,PRF 调制可能会产生意想不到的杀伤效果。

PRF 非均匀调制使得传统的基于 FFT 的慢时间域处理手段不再适用,故学者们对其体制下信号处理手段开展了研究。吴耀君等^[87,98]推导了频率捷变联合 PRF 抖动下发射体制下的信号模型,结合压缩感知理论进行距离-多普勒重构,实现了对目标距离速度的测量。崔国龙等^[99]在脉冲初始相位和 PRI 等脉间参数非均匀捷变情况下,提出了一种基于距离门对齐的伪随机参数相参处理方法,以及发射-接收滤波器联合优化设计的强杂波处理方法。经过分析,脉间参数伪随机跳变波形因其脉间 PRI 和初相的不确定性,使干扰能量被白化至整个距离-速度平面内,无法形成有效的欺骗干扰,同时能保证真实目标能量被有效积累。FAN 等^[100]针对非均匀 PRI 体制提出了一种序列贪婪优化算法,旨在通过对机载雷达的发射波形和接收滤波器进行联合设计,实现在恒定模下最大化 SNR,从而有效抑制杂波干扰。文献[101]研究了随机 PRF 和载频的模糊函数,推导了模糊函数期望值和方差的解析表达式,给出了模糊函数的关键指标与波形参数之间的直接关系,并得出结论:增大积累脉冲数、优化捷变概率分布和增宽捷变范围有助于提高旁瓣抑制和模糊度衰减的性能。

3.5 极化捷变

极化捷变可提升回波与干扰的极化区分度,增加敌方侦察的困难。文献[102]对极化捷变进行编码,通过测量水平与垂直极化的相位差对回波信号进行匹配,相较于静止极化方式提升了反干扰性能。文献[103-104]提出用多极化捷变技术提高雷达的低截获性能,同时获得的极化信息能为后续目标检测提供信息支撑。

4 认知反干扰

2006年,HAYKIN^[105]首次引入了认知雷达的概念,该雷达采用了闭环发射、接收和处理的架构。与传统雷达相比,认知雷达具备了自适应调整发射波形和接收处理方法的能力,使其能够智能化适应外部环境的变化,从而有效地应对更加复杂的战场电磁环境。传统的主动发射技术在一定程度上减小了干扰的影响,然而他们是静态的,设计时并未充分考虑干扰问题,同时也会伴随一定程度的探测性能损失。这使得面对未知且多样的干扰机时,传统主动发射技术无法动态地发挥雷达在主瓣干扰下的探测潜力。因此,主动发射技术需要与认知雷达的动态自适应能

力相结合,以根据主瓣干扰的特征和场景需求,灵活地调整雷达的发射波形、接收处理方法和工作模式。这样,认知雷达结合主动反干扰技术,能够实现更加智能化、自适应的干扰抑制效果。

同样地,随着电磁设备的成熟,干扰方也朝着认知智能化方向发展^[106]。美军针对认知电子战开展了一系列研究项目,包括认知干扰机(AFRL,2010),自适应雷达对抗(美海军,2012),认知通信电子战(CCEW,2012),下一代电子技术(美海军,2016),认知电子战系统(DARPA,2016)等项目^[107-108],旨在开发一套功能多样、干扰样式灵活的认知干扰机,自动生成有效对策去对抗新的、未知的、自适应和具有认知能力的雷达。因此,新一代干扰机十分重视干扰策略研究,不仅可以针对威胁目标的工作模式选择单一针对干扰,并能够通过信号侦察历史结合内置逻辑实施复杂交错的组合干扰。

因此,未来的电子对抗领域必然朝着智能化的方向发展。如图4所示,在雷达和干扰机之间的高强度、高智能化的电子对抗中,双方的工作模式和策略需要在短时间内不断调整和升级,以实现相互之间的对抗。

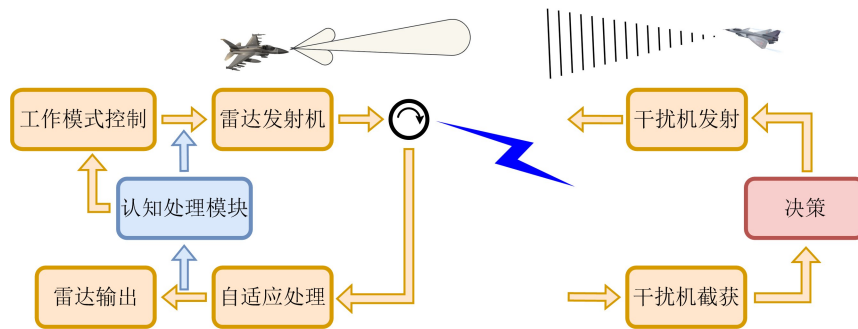


图4 认知闭环雷达对抗认知闭环干扰机

Fig. 4 The closed-loop cognitive radar combats the open-loop cognitive jammer

在这种雷达和干扰之间的电子对抗中,双方的策略存在着相互耦合和克制的关系,可以看作一个非合作动态博弈问题。然而,在具体问题分析时,这个博弈问题又是非典型的。雷达方在认知上具有一定的优势,主要体现在以下4个方面:1) 雷达方掌握了发射的主动权,可以在空间、时间、频率、能量和极化等多个维度上设计发射策略,而干扰方只能被动地跟随雷达的变化而做出改变;2) 雷达方的优势在于其认知闭环,而干扰方则处于开环状态;3) 干扰方由于收发分时的限制,导致了一种“睁着眼看,闭着眼打”的盲目干

扰模式,这为雷达方实施躲避、诱骗等发射策略提供了可能;4) 干扰方在脉冲分选方面存在着无法避免的逻辑薄弱点。因此,发展认知博弈技术是未来的趋势,它能够使雷达在电子对抗领域取得先机。通过充分利用雷达的认知优势,雷达可更好地应对复杂多变的电磁环境,并取得战场上的优势地位。

在前述章节中,已经有部分工作采用了涉及对干扰参数进行估计,并对相应的波形进行优化,然而假设的干扰机样式和模式相对单一。一旦干扰引入了参数随机性或智能决策,情况将变

得更加复杂。在本节中,重点梳理雷达与动态干扰机之间的时序博弈,最后对本课题组研究的干扰记忆诱导框架概念进行介绍。

4.1 认知捷变技术

认知捷变技术的核心思想是通过与干扰机进行交互,以实现雷达发射参数和时序的自适应优化。与传统的自适应信号处理方法不同,认知捷变技术强调采用一种试错学习的方式,在有限的先验知识基础上,通过在环境和干扰机的交互过程中不断感知和高效学习对手的行为,从而自主选择最优的抗干扰策略。由于认知捷变技术具有广阔的应用前景,因此正逐渐成为研究的热点。

部分认知反干扰研究基于强化学习(reinforcement learning, RL),尤其是深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)而展开。LI 等^[109]在子脉冲频率捷变体制下通过深度循环 Q 值网络(deep recurrent Q-network, DRQN)^[110]训练雷达与 4 种不同间断观察时序的干扰机进行对抗,然后将 4 种策略蒸馏到单策略网络上。经过训练,雷达能在干扰机侦收时发射欺骗子脉冲,在干扰机发射时将发射脉冲躲避到 RCS 最高的子频带上。WANG 等^[111]在基于 CS 的频率捷变雷达体系下,将频率捷变问题建模为部分可观测马尔可夫决策过程(partially observable Markov decision process, POMDP),提出了基于双深度 Q 网络(double deep Q-network, DDQN)^[112]的跳频方法来适应有源干扰环境,实现更好的反干扰性能,并强调该方法独立于环境知识,因此适用于非合作目标。针对离线训练场景和实际博弈由硬件约束以及博弈过程随机性导致的训练环境和测试环境不匹配问题,LI 等^[113]提出了一种基于鲁棒 DQN 的反干扰策略学习方法。针对汽车行进过程中雷达相互干扰的问题,LIU 等^[114]提出了一种基于 DRQN 的去中心化的频谱分配方法,让汽车雷达能够综合当前和过去的观测数据进行学习并最终得到可行的跳频行为,相较于短视的感知躲避(sense-and-avoid, SAA)和随机跳频等策略,其算法有一定的优越性。

鉴于干扰机的智能化发展趋势,部分研究人员结合博弈论和多智能体的思想开展了研究。JIANG 等^[115]提出了一种基于多智能体深度强化学习的认知雷达对抗性反干扰决策网络。首先,

将环境模型具体构建为 POMDP。然后,设计了一个基于确定性深度确定性策略梯度^[116]算法的决策网络,以探索认知雷达和智能干扰机之间的竞争。为了克服环境的非平稳性,在一个特殊的多智能体强化框架中对决策网络进行了训练和测试,证明了所提方法能提高双方的决策能力和良好表现。LI 等^[117]将雷达与干扰的子脉冲多回合交互过程看作博弈树的展开形式,采用一种结合 DRL 和博弈论(game theory)的虚拟自我对局(neural fictitious self-play, NFSP)算法得到大规模博弈树的近似纳什均衡策略(Nash equilibrium, NE)。GENG 等^[118]在子脉冲频率捷变的雷达体制上,将收发分时干扰机进一步扩展到了具有智能动态功率分配能力,然后通过 NFSP 求解 NE 策略,并与 DQN 进行了比较。特别地,LIU 等^[119]提出了一种基于博弈论的认知时域掩护方案,他们研究了具备射频掩护能力的雷达与具备动态瞬时测频能力的智能干扰机之间的博弈,提出了 FSP-AC(fictitious self play-actor critic)算法,近似求解了纳什均衡策略来分配射频掩护时长。

鉴于干扰机作为一种非合作对手,离线训练的仿真干扰机与实机存在不可避免的差异,因此一些研究开始探索抗干扰发射策略的在线学习方法。文献^[120]提出了一种基于模型的在线学习框架,结合在线凸优化学习预测模型,并在不确定干扰环境中选择最佳频率信道,以此结构化地实现了联合雷达通信系统中雷达频段选择的高效在线学习算法。THORNTON 等^[121]将雷达在滑动窗口中的历史交互编码为上下文向量,然后,建立了上下文老虎机(contextual bandit)模型来选择波形,并采用时变约束来减轻脉冲捷变波形序列对相干处理雷达的有害影响,以此实现了波形的带宽载频选择的在线决策。AILIYA 等^[122]设置了干扰机扫描截获频带、瞄频干扰、随机干扰共存的场景,以此说明雷达无法完全获知干扰环境以及干扰机内部机制,在该场景下,他们提出通过 Q-learning 对不同脉宽的雷达脉冲在一个频带上最大驻留次数进行在线优化。FANG 等^[123]在雷达单脉冲检测的工作模式下提出了一种基于非稳态组合老虎机(non-stationary combinatorial bandit)的跳频策略来对抗压制干扰,以及一个有约束的版本来对抗简单的瞄频干扰,该

算法抓住了目标 RCS 在频带上剧烈的差异以及不断缓变的特性,利用老虎机有理论保证的最优利用-探索(exploration-exploitation)机制,使得雷达几乎始终在目标 RCS 最大的频带上进行发射,以零成本的代价显著地提高了雷达检测性能。

4.2 干扰记忆诱导

对于干扰机发射规律的认知是雷达成功对抗干扰的关键途径,雷达借助于一定的发射策略能够诱导抓取目标干扰机的工作特性^[124-126],以此

来服务于己方雷达后续的反干扰处理,本文称之为干扰记忆诱导,在此对该概念进行物理化描述。该研究通过深入分析干扰机的工作模式,以不确定性为准则,主动地发射诱导信号以揭示干扰机内部策略逻辑,以此构建可迁移的干扰智能体库,从而消除了战场上干扰机的未知性,为各类雷达发射决策提供了有力支持。其整体流程如图 5 所示。其中,主动诱导是后续智能体库构建和抗干扰策略生成的核心,为整个构想的实现提供了必要前提条件。

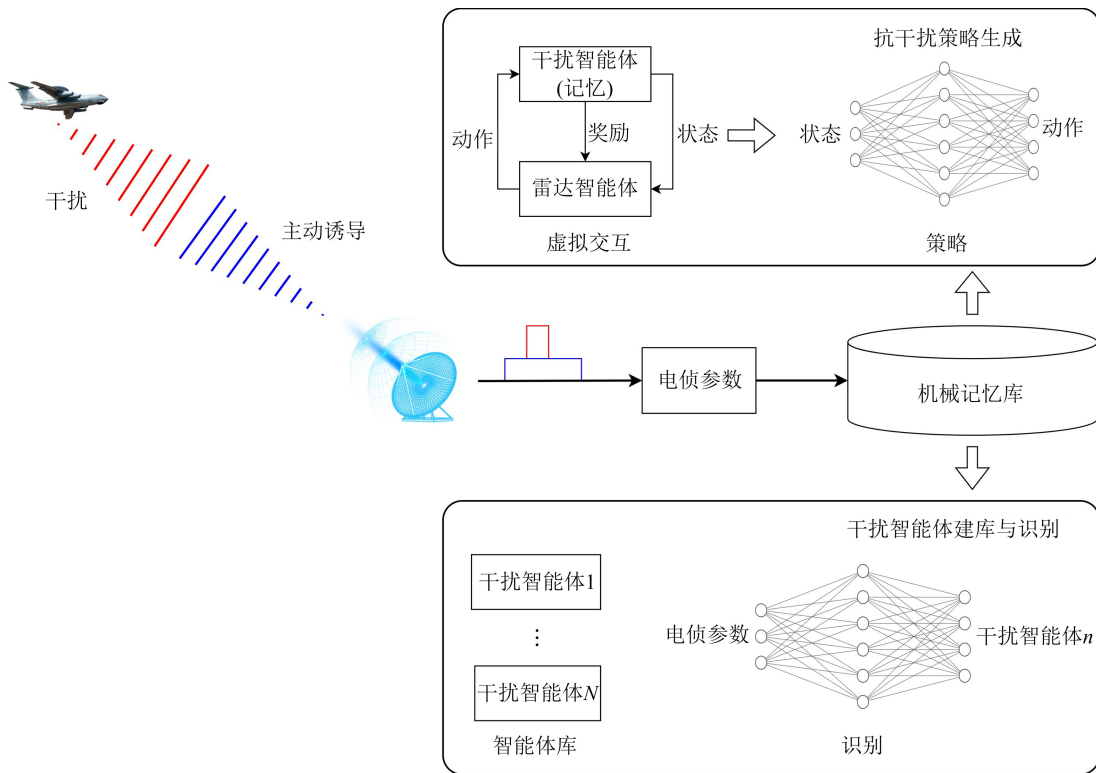


图 5 干扰记忆诱导构想

Fig. 5 The concept of inducing and memory jammer

对抗干扰机时,通过电侦手段对单帧脉冲受到的干扰样式与干扰特征参数进行准确识别和提取。图 6 以瞄频干扰与 ISRJ 为例说明如何通过参数向量描述干扰单帧波形,这些参数可为后续波形优化和干扰机型号分类提供依据。

为了避免互调干扰,干扰机通常采取收发分时的形式。具体而言,干扰机在连续释放干扰的同时,会以不到 1/10 的时间比例进行间断观察,并根据观察结果调整后续的干扰策略。这种工作方式可以形象地描述为“睁着眼看,闭着眼打”,图 7 对干扰机的工作模式进行了进一步勾

画。图 7(a)展示了干扰机和雷达之间的时序博弈过程,干扰机只有在间断观察期间才能对雷达此刻的波形参数进行完整测量,并通过内部决策机制来判断下一时间段的干扰发射序列。图 7(b)列举了一个简单的基于决策树的干扰内部决策机制,该决策机制包含了不同分支的发射序列,这些序列可以是固定的,也可以是概率触发的。此外,发射序列可以是单一干扰或混合干扰,并且长度可以各不相同。通过这样的决策机制,干扰机能够根据当前观察结果和内部判定,选择最优的干扰策略,以有效地干扰目标系统。

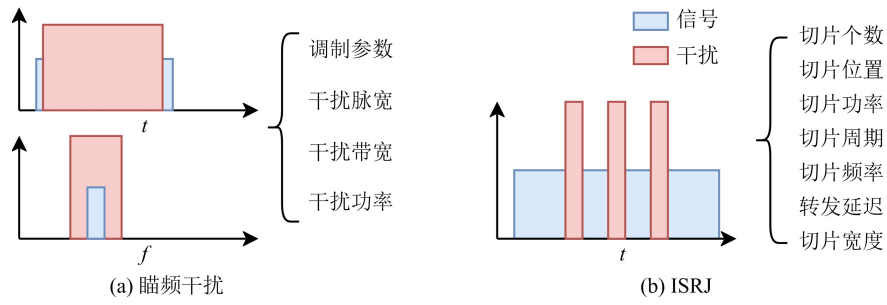
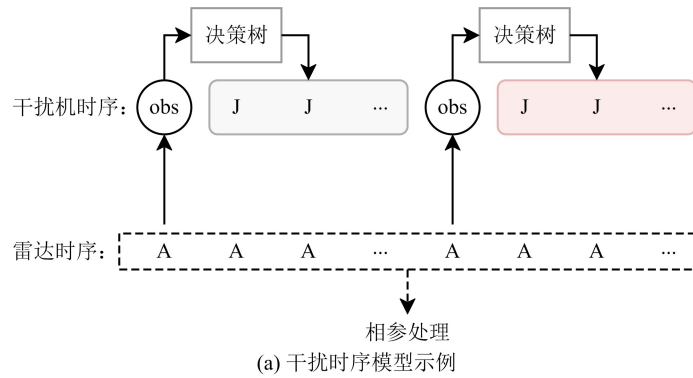
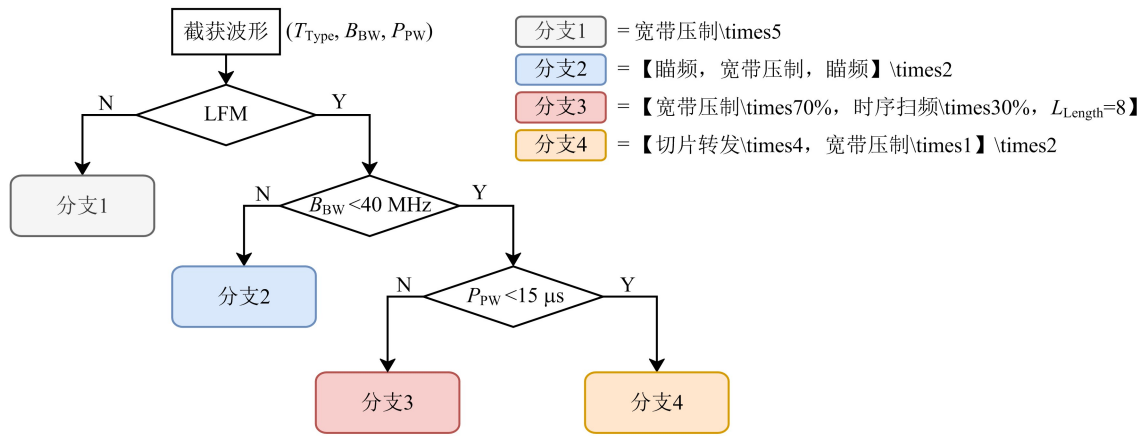


图 6 干扰参数估计

Fig. 6 Interference parameter estimation



(a) 干扰时序模型示例



(b) 干扰决策机制示例

图 7 智能干扰机时序模型

Fig. 7 Intelligent jammer model

因此,对于干扰机的时序建模需要将雷达发射过程考虑在内,此时雷达的认知诱导发射方式成为核心问题。主动诱导的任务目标可以被理解为:在短暂的交互成本中,如何尽可能揭示干扰机的工作逻辑,并以尽可能少的时间成本来重构干扰机发射的时序模型。该问题可视为时序模型的主动学习问题。主动学习即在每一轮次选择最优标注价值的样本进行标注,从而以较少标注成本得到性能较优的模型。对应地,雷达的诱导行为在每一步应以最小化时序预测模型的不

确定性为准则,选取最有价值的动作来诱导干扰机行为。

图 8 展示了一种基于集成模型的不一致性进行不确定性建模的方式,其表达式如下阐述。用 LSTM 作为时序预测模型,记为 $f(\cdot; \theta)$,将雷达和干扰的交互历史记为:

$$H_t^L = \{a_{t-L+1}, j_{t-L+1}, \dots, a_t, j_t\} \quad (5)$$

式中, a 为雷达动作, j 为干扰动作, t 为时刻, L 为历史长度。结合上 $L-1$ 帧历史和当前雷达动作预测干扰动作,可以表示为:

$$\hat{P}(j_t; a_t) = f(a_t, H_{t-1}^{L-1}; \theta) \quad (6)$$

设共有 N 个模型, N 个模型的集成预测可以表示为:

$$\begin{aligned} \bar{P}(j_t; a_t) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{P}_n(j_t; a_t) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(a_t, H_{t-1}^{L-1}; \theta_n) \end{aligned} \quad (7)$$

则 N 个模型的预测不一致性可以表示为:

$$d(a_t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N D_{\text{KL}}(\bar{P}(j_t; a_t) \| \hat{P}_n(j_t; a_t)) \quad (8)$$

式中, $D_{\text{KL}}(\cdot)$ 为 KL 散度。故诱导动作 a_t 的发射准则为:

$$a_t = \underset{a_t}{\operatorname{argmax}} d(a_t) \quad (9)$$

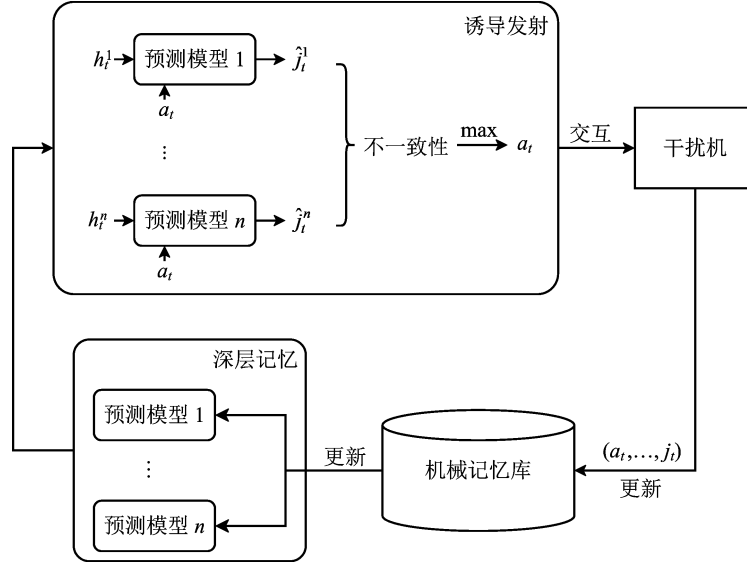


图8 干扰诱导记忆闭环

Fig. 8 The closed loop of inducing and memorying jammer

LSTM 的集成模型通过随机初始化、随机 mini-batch 进行训练, 保证训练得到参数 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 去相关。这样, 集成模型在数据点较密的地方一致性较强, 而在数据点稀疏的地方分歧较大。根据给定的上下文历史, 如果动作已经被多次发射, 那么集成模型的预测一致性较高。相反, 如果动作的发射频次较少, 那么集成模型的分歧较大。基于式(9)选择出试探动作可以迅速降低时序模型的不确定性, 深入挖掘未涉及的干扰机决策机制。随着干扰机和雷达的交互记录以描述字的形式不断扩充着机械记忆库, 集成 LSTM 模型不断进行在线更新, 最终以较少的交互样本完成训练。

获得干扰机发射时序模型后, 可以应用强化学习, 包括 DQN、A3C、PPO^[127-129] 等强化学习算法求解雷达的最优时序发射策略。此时, 时序模型的隐状态已经满足马尔可夫特性, 为马尔可夫决策过程 (Markov decision process, MDP) 的建立提供了理论基础。此时, 雷达仅需结合自身发射能力与记忆中的智能体进行交互。最终雷达

不仅能在干扰机盲发射时针对性地采取对抗波形, 并且可以做到预测干扰机间断观察时间段并诱导其进入对雷达方最有利的决策分支。

干扰记忆诱导旨在使雷达在与干扰机的交互中获取干扰方信息, 并形成可迁移的知识库, 从而为全局的战场对抗提供信息辅助支持。相较于其他认知发射理论的研究, 干扰记忆诱导具有可扩充、可迁移、黑盒变白的特点。通过不断累积的诱导交互, 深入剖析干扰机的工作模式, 反演干扰机的干扰效能, 雷达方能制定更精准和有效的对策, 并为战略级的作战布置提供推演依据。

5 结束语

伴随着雷达干扰技术灵活化、相参化、智能化的飞速发展, 雷达实际应用性能面临了巨大的挑战和威胁。为了在日趋激烈的战场电磁环境下保证雷达探测的有效性和可靠性, 相应的雷达反干扰技术的研究也得到了长足的发展。从目前公开发表的文献来看, 雷达的反干扰技术已从传统的检测干扰并做抑制处理的被动式反干扰模式逐步发展到通过主动调整雷达自身动作规

避干扰的主动反干扰模式,并正朝着智能化、认知化的反干扰模式发展。区别于传统的被动式反干扰和主动式反干扰,具有认知能力的智能雷达反干扰技术能够深入挖掘干扰机的工作特征,自适应地调整自身的工作逻辑,选取最优的对抗策略,是未来电子战的制胜法宝。立足于当前技术发展形势和未来作战应用需求,智能雷达对抗技术主要有以下4点发展趋势。

5.1 高样本效率的交互学习决策是从智能化迈向认知化的先决基础

当前,大多数研究工作采用智能化思想,主要包括对历史信息的综合分析以及未来行为的预测。然而,随着干扰技术的智能化、博弈性和集群化发展,电磁环境通常处于不断变化的非稳态状态。因此,对环境信号的高效认知、实时处理和在线决策成为不可或缺的发展趋势。因此,样本高效的主动智能学习是智能雷达对抗领域未来重要的研究方向。

5.2 多维多域的干扰特征认知能力是未来智能干扰对抗的重要手段

智能化的雷达反干扰技术依赖于雷达对干扰机的认知结果,当前绝大多数的干扰认知都只停留在个别维度,例如时域或频域。随着干扰复杂调制技术的逐渐成熟和多样化,单一维度的干扰认知结果势必会造成对干扰认知的缺失或模糊,这对实施针对性的智能反干扰是不利的。因此,只有从多个维度联合地去认知干扰特征才能够抓取到干扰的完整特性,例如同时获取干扰的时域、频域和能量域的变化特征,并联合干扰的空域波达方向,建立多维多域的干扰特征描述向量,为后续实施有针对性的干扰反制措施提供完备的基础。

5.3 多智能体的动态交互博弈是未来雷达智能反干扰的应用场景

在未来战场环境下,雷达是可调节的自适应系统,能够根据不同的干扰类型通过离线训练或在线尝试的方式实现最优策略的选取,达到智能反干扰的目的。而干扰技术也不是一成不变的,未来的干扰机也会是具有一定智能特性的系统,且在战场环境下极有可能是一台雷达在探测过程中面对多个不同区域的干扰机。在这种情况下,雷达和干扰机的对抗就变成了多个智能体的动态交互博弈过程,这是未来战场的趋势,也对

雷达的性能提出了挑战。为了保证雷达能够有效应对不同的干扰机智能体,可以建立针对不同干扰机的记忆系统,将雷达“一对多”的博弈对抗问题转化成时序“一对一”的博弈对抗问题,降低雷达干扰对抗的复杂度以及提高雷达利用历史信息解决问题的能力,在复杂战场环境下以最小的资源消耗和最快的速度获取最优的反干扰策略。

5.4 雷达组网多域联合的智能反干扰模式是未来对抗的发展趋势

在战场复杂电磁环境下,单一雷达面对多个干扰机时将会存在雷达资源不足、自由度受限等问题,未来的信息化战争必然是体系与体系之间的对抗,多雷达之间的协同交互、资源共享、信息共享等能够为雷达反干扰提供极大的便利,有效提高雷达的反干扰效能。

参 考 文 献

- [1] DE MARTINO A. Introduction to modern EW systems[M]. Norwood: Artech House Inc., 2012.
- [2] JOHNSON S L. Radar electronic counter-countermeasures[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980(1): 109-117.
- [3] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
ZHAO Guoqing. Principles of radar countermeasure [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [4] LI N J, ZHANG Y T. A survey of radar ECM and ECCM[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995(3): 1110-1120.
- [5] 胡德秀. 雷达辐射源信号分析与处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
HU Dexiu. Signal analysis and processing of radar emitter[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020. (in Chinese)
- [6] 田中成. 无源定位技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
TIAN Zhongcheng. Passive location technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [7] 丁建江. 雷达组网技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
DING Jianjiang. The technology of netted radar system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2018. (in Chinese)
- [8] 杨小牛. 从软件无线电到认知无线电, 走向终极无线电: 无线通信发展展望[J]. 中国电子科学研究院学

- 报, 2008(1): 1-7.
- YANG Xiaoni. Software radio, cognitive radio and ultimate radio: a prospect of wireless communication [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008(1): 1-7. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 王明宇. 基于博弈思维的雷达智能探测概念与研究思路[J]. 现代雷达, 2019, 41(10): 1-7.
- WANG Mingyu. Radar intelligent measure based on game theory: conception and methods [J]. Modern Radar, 2019, 41(10): 1-7. (in Chinese)
- [12] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- CHEN Boxiao. Modern radar system analysis and design[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [13] 刘振, 隋金坪, 魏玺章, 等. 雷达有源干扰识别技术研究现状与发展趋势[J]. 信号处理, 2017, 33(12): 1593-1601.
- LIU Zhen, SUI Jinping, WEI Xizhang, et al. The development and prospect of radar active jamming recognition [J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(12): 1593-1601. (in Chinese)
- [14] 王雪松, 刘建成, 张文明, 等. 间歇采样转发干扰的数学原理[J]. 中国科学: 信息科学, 2006(8): 891-901.
- WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, et al. Mathematical principles of interrupted-sampling and repeater jamming recognition[J]. Scientia Sinica Informationis, 2006(8): 891-901. (in Chinese)
- [15] LEWIS G K, BAHL I J, GRIFFIN E L, et al. GaAs MMIC's for digital radio frequency memory (DRFM) subsystems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1987, 35(12): 1477-1485.
- [16] 金珊珊, 王春阳, 李欣. 灵巧干扰及其对抗技术综述[J]. 现代防御技术, 2014, 42(4): 131-135.
- JIN Shanshan, WANG Chunyang, LI Xin. Overview on smart noise jamming and countermeasures [J]. Modern Defense Technology, 2014, 42(4): 131-135. (in Chinese)
- [17] 李欣, 王春阳, 原慧, 等. 雷达灵巧干扰样式建模及仿真研究[J]. 航天电子对抗, 2015, 31(5): 38-41.
- LI Xin, WANG Chunyang, YUAN Hui, et al. The modeling and simulation of radar smart jamming types [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2015, 31(5): 38-41. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 鲍大祥. 雷达干扰分类判别方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- BAO Daxiang. A study of radar jamming type discrimination[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [20] 刘建洋. 基于时频域分析的电子干扰识别方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- LIU Jianyang. Research on electronic jamming identification method based on time frequency domain analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [21] COHEN L. Time-frequency distributions: a review [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(7): 941-981.
- [22] STANKOVIC L, STANKOVIC S, DAKOVIC M. From the STFT to the Wigner distribution[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(3): 163-174.
- [23] BARBAROSSA S, SCAGLIONE A. Parameter estimation of spread spectrum frequency-hopping signals using time-frequency distributions[C]//Proceedings of the 1st IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. [S. l.]: IEEE, 1997: 213-216.
- [24] CHEN T C. Joint signal parameter estimation of frequency-hopping communications[J]. IET Communications, 2012, 6(4): 381-389.
- [25] LEI Y K, ZHONG Z F, WU Y H. A parameter estimation algorithm for high-speed frequency-hopping signals based on RSPWVD[C]//Proceedings of Intelligent Signal Processing and Communication Systems. [S. l.]: IEEE, 2007: 392-395.
- [26] FLANDRIN P, ESCUDIÉ B. An interpretation of the pseudo-Wigner-Ville distribution[J]. Signal Processing, 1984, 6(1): 27-36.
- [27] LI T, TANG Y H, LYU J. Parameter estimation of FH signals based on STFT and music algorithm[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling. [S. l.]:

- IEEE, 2010: 232-236.
- [28] IVANOVIC V, DAKOVIC M, DJUROVIC I, et al. Instantaneous frequency estimation by using time-frequency distributions[C]//Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. [S. l.]: IEEE, 2001: 3521-3524.
- [29] KOOTSOKOS P J, LOVELL B C. A unified approach to the STFT, TFDs, and instantaneous frequency[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(8): 1971-1982.
- [30] 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.
- [31] 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.]: IEEE, 2019: 208-212.
- [32] LIN J J, FAN X L. Radar active jamming recognition based on recurrence plot and convolutional neural network[C]//Proceedings of the 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference. [S. l.]: IEEE, 2021: 1511-1515.
- [33] 周超, 刘泉华, 胡程. 间歇采样转发式干扰的时频域辨识与抑制[J]. 雷达学报, 2019, 8(1): 100-106.
ZHOU Chao, LIU Quanhua, HU Cheng. Time-frequency analysis techniques for recognition and suppression of interrupted sampling repeater jamming[J]. Journal of Radars, 2019, 8(1): 100-106. (in Chinese)
- [34] 孙正阳, 董玫, 陈伯孝. 时频分析联合带通滤波抑制间歇采样转发干扰[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(2): 139-146.
SUN Zhengyang, Dong Mei, CHEN Boxiao. Interrupted sampling repeater jamming suppression based on time-frequency analysis and band-pass filtering[J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(2): 139-146. (in Chinese)
- [35] CHEN J, WU W Z, XU S Y, et al. Band pass filter design against interrupted-sampling repeater jamming based on time-frequency analysis[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(10): 1646-1654.
- [36] DUAN J, ZHANG L, WU Y F, et al. Interrupted-sampling repeater jamming suppression with one-dimensional semi-parametric signal decomposition[J]. Digital Signal Processing, 2022, 127: 103546.
- [37] WU W Z, ZOU J W, CHEN J, et al. False-target recognition against interrupted-sampling repeater jamming based on integration decomposition[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(5): 2979-2991.
- [38] GRECO M, GINI F, FARINA A. Radar detection and classification of jamming signals belonging to a cone class[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(5): 1984-1993.
- [39] 苏保伟, 王永良, 李荣峰. 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. Main-lobe interference cancelling method via block matrix[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(11): 1830-1832. (in Chinese)
- [40] 梁雪妮. 阵列雷达抗主瓣干扰方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
LIANG Xueni. Research on mainlobe interference suppression in array radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [41] 任家琪. 线性调频雷达典型有源干扰抑制技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
REN Jiaqi. Jamming suppression technology in LFM radars[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [42] 高娜. 雷达抗干扰技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
GAO Na. Research on radar anti-jamming technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [43] 盛俊翔. 有源压制干扰对抗方法研究及仿真系统验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
SHENG Junxiang. Research on interference countermeasures for active blanket jamming and simulation system verification[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [44] CHEN J, CHEN X L, ZHANG H G, et al. Suppression method for main-lobe interrupted sampling repeater jamming in distributed radar[J]. IEEE Access, 2020, 8: 139255-139265.
- [45] CHEN J, XU S Y, ZOU J W, et al. Interrupted-sampling repeater jamming suppression based on stacked bidirectional gated recurrent unit network and infinite training[J]. IEEE Access, 2019, 7: 107428-107437.
- [46] LYU Q Z, QUAN Y H, SHA M H, et al. Deep neural network-based interrupted sampling deceptive jamming countermeasure method[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 9073-9085.
- [47] LU L, GAO M G. An improved sliding matched filter method for interrupted sampling repeater jamming

- suppression based on jamming reconstruction [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(10): 9675-9684.
- [48] 丁黎明. 基于稀疏恢复的雷达抗主瓣欺骗干扰方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
DING Liming. Research on countering radar mainlobe deceptive jamming based on sparse recovery[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [49] ZHAO B, HUANG L, ZHANG J. Single channel SAR deception jamming suppression via dynamic aperture processing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(13): 4225-4230.
- [50] 卢云龙. 雷达对抗有源欺骗干扰若干方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
LU Yunlong. Study of radar anti-jamming for active deception jamming[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [51] 周伟江, 王培强, 张进, 等. 雷达射频掩护信号分析及对抗方法研究[J]. *航天电子对抗*, 2013, 29(5): 47-50.
ZHOU Weijiang, WANG Peiqiang, ZHANG Jin, et al. Analysis and countermeasures of radar radio frequency-screen signal[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2013, 29(5): 47-50. (in Chinese)
- [52] 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.
- [53] 陈阳, 田波, 王春阳. FDA-MIMO 抗干扰技术进展及前景展望[J]. *电光与控制*, 2022, 29(8): 65-72.
CHEN Yang, TIAN Bo, WANG Chunyang. Progress and prospect of FDA-MIMO anti-jamming technology [J]. *Electronics Optics & Control*, 2022, 29(8): 65-72. (in Chinese)
- [54] 万福海, 许京伟, 张振荣. FDA-MIMO 雷达稳健抗主瓣距离欺骗式干扰技术[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(9): 2809-2816.
WAN Fuhai, XU Jingwei, ZHANG Zhenrong. Robust anti-main lobe range deceptive jamming technology with FDA-MIMO radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(9): 2809-2816. (in Chinese)
- [55] 杨娟. 雷达射频掩护的认知抗干扰技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
YANG Juan. Research on the cognitive anti-jamming technology of radar radio frequency-screen[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [56] 翟颖. 舰载火控雷达动态抗干扰策略规划研究[J]. *火控雷达技术*, 2022, 51(1): 77-80.
ZHAI Ying. Research on dynamic anti-jamming strategy for shipborne fire control radar[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2022, 51(1): 77-80. (in Chinese)
- [57] 李尔康. 基于干扰认知的雷达反干扰波形设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
LI Erkang. Design and implementation of radar anti-jamming waveform based on jamming cognition[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [58] 余显祥, 路晴辉, 杨婧, 等. 短基线收发分置频域协同波形设计方法[J]. *雷达学报*, 2022, 11(2): 227-239.
YU Xianxiang, LU Qinghui, YANG Jing, et al. Frequency domain cooperative waveform design method for short baseline transceiver[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(2): 227-239. (in Chinese)
- [59] ZHOU C, LIU F F, LIU Q H. An adaptive transmitting scheme for interrupted sampling repeater jamming suppression[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2480.
- [60] WEI Z, LIU Z, PENG B, et al. ECCM scheme against interrupted sampling repeater jammer based on parameter-adjusted waveform design [J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1141.
- [61] 周畅, 汤子跃, 余方利, 等. 基于脉内正交的抗间歇采样转发干扰方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(2): 269-276.
ZHOU Chang, TANG Ziyue, YU Fangli, et al. Anti intermittent sampling repeater jamming method based on intrapulse orthogonality[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(2): 269-276. (in Chinese)
- [62] GE M M, YU X X, YAN Z X, et al. Joint cognitive optimization of transmit waveform and receive filter against deceptive interference[J]. *Signal Processing*, 2021, 185: 108084.
- [63] 葛萌萌. 认知雷达多维联合抗主瓣干扰研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
GE Mengmeng. Cognitive radar mainlobe jamming suppression methods via multidimensional signal design and processing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [64] 张荣文, 李彦鹏, 教亚飞. 基于脉冲分集理论的雷达波形数字水印抗 DRFM 干扰技术[J]. *信号处理*, 2015, 31(12): 1649-1653.
ZHANG Rongwen, LI Yanpeng, JIAO Yafei. Approach of radar waveform digital watermark against DRFM jamming based on waveform pulse diversity theory[J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(12): 1649-1653. (in Chinese)
- [65] AKHTAR J. Orthogonal block coded ECCM schemes

- against repeat radar jammers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(3): 1218-1226.
- [66] WANG H, YANG X, LI Y. Radar anti-retransmitted jamming technology based on agility waveforms[C]// *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing*. [S. l.]: IEEE, 2019: 1-6.
- [67] 徐乃清. 基于捷变波形的雷达抗干扰技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
XU Naiqing. Research on radar anti-jamming technique based on agile waveform[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [68] 张劲东, 李彧晟, 朱晓华. 基于波形分集的雷达抗欺骗干扰[J]. *数据采集与处理*, 2010, 25(2): 138-142.
ZHANG Jindong, LI Yusheng, ZHU Xiaohua. Approach of radar against deception jamming based on waveform diversity[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2010, 25(2): 138-142. (in Chinese)
- [69] ZHANG J D, XU N Q, SONG H, et al. Sequence set design for waveform-agile coherent radar systems[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2020, 2020: 1-17.
- [70] ZHANG J D, ZHU D Y, ZHANG G. New antiveloc-ity deception jamming technique using pulses with adaptive initial phases[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 1290-1300.
- [71] 卜祎. 机载雷达认知抗干扰波形设计与处理方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
BU Yi. Design and processing of cognitive anti-jamming waveforms for airborne radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [72] XIONG W, WANG X H, ZHANG G. Cognitive waveform design for anti-velocity deception jamming with adaptive initial phases[C]// *Proceedings of 2016 IEEE Radar Conference*. [S. l.]: IEEE, 2016: 1255-1259.
- [73] YANG Y, WU J, CUI G L, et al. Optimized phase-coded waveform design against velocity deception [C]// *Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference*. [S. l.]: IEEE, 2015: 400-404.
- [74] 全英汇, 方文, 沙明辉, 等. 频率捷变雷达波形对抗技术现状与展望[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(11): 3126-3136.
QUAN Yinghui, FANG Wen, SHA Minghui, et al. Present situation and prospects of frequency agility ra-
dar waveform countermeasures[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(11): 3126-3136. (in Chinese)
- [75] 全英汇, 方文, 高霞, 等. 捷变频雷达导引头技术现状与发展趋势[J]. *航空兵器*, 2021, 28(3): 1-9.
QUAN Yinghui, FANG Wen, GAO Xia, et al. Re-view on frequency agile radar seeker[J]. *Aero Weaponry*, 2021, 28(3): 1-9. (in Chinese)
- [76] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [77] 陈超, 郑远, 胡仕友, 等. 频率捷变反舰导弹导引头相参积累技术研究[J]. *宇航学报*, 2011, 32(8): 1819-1825.
CHEN Chao, ZHENG Yuan, HU Shiyu, et al. A study of coherent technique of frequency-agile radar for antiship missile[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(8): 1819-1825. (in Chinese)
- [78] TIAN R Q, LIN C Y, BAO Q L, et al. Coherent integration method of high-speed target for frequency agile radar[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 18984-18993.
- [79] WANG D H, BAO Q L, NIU Z D, et al. Long time coherent integration method for frequency agile radar [C]// *Proceedings of the 44th European Microwave Conference*. [S. l.]: IEEE, 2014: 1856-1859.
- [80] HUANG P H, DONG S S, LIU X Z, et al. A coherent integration method for moving target detection using frequency agile radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 16(2): 206-210.
- [81] HUANG T Y, LIU Y M, XU X Y, et al. Analysis of frequency agile radar via compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(23): 6228-6240.
- [82] 黄天耀, 李宇涵, 王磊, 等. 相参频率捷变雷达目标稀疏重建性能边界综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(7): 1729-1736.
HUANG Tianyao, LI Yuhan, WANG Lei, et al. Re-view of performance bounds on sparse target recovery using coherent frequency agile radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(7): 1729-1736. (in Chinese)
- [83] QUAN Y H, LI Y C, WU Y J, et al. Moving target detection for frequency agility radar by sparse reconstruction[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(9): 094703.
- [84] 付蓉, 黄天耀, 刘一民. 基于深度学习的捷变相参雷达 1-bit 块稀疏重构[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(1): 70-75.
FU Rong, HUANG Tianyao, LIU Yimin. DNN

- based 1-bit block sparse recovery in frequency agile coherent radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(1): 70-75. (in Chinese)
- [85] ABERDAM A, GOLTS A, ELAD M. Ada-LISTA: learned solvers adaptive to varying models[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44(12): 9222-9235.
- [86] 张晨路, 公绪华, 刘一民. 相参捷变频雷达接收机及动目标处理技术[J]. *现代雷达*, 2015, 37(12): 74-77. ZHANG Chenlu, GONG Xuhua, LIU Yimin. Frequency-agile coherent radar receiver design and MTI method[J]. *Modern Radar*, 2015, 37(12): 74-77. (in Chinese)
- [87] 吴耀君. 脉间频率捷变雷达抗干扰研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018. WU Yaojun. Research on anti-jamming performance of frequency agility radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [88] 王勇. 频率捷变雷达抗海杂波性能分析[J]. *战术导弹技术*, 2016(4): 98-103. WANG Yong. Sea clutter resistance performance analysis of FAR[J]. *Tactical Missile Technology*, 2016(4): 98-103. (in Chinese)
- [89] 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)
- [90] 杜思予, 刘智星, 吴耀君, 等. 基于 SVM 的捷变频雷达密集转发干扰智能抑制方法[J]. *雷达学报*, 2023, 12(1): 173-185. DU Siyu, LIU Zhixing, WU Yaojun, et al. Dense-repeated jamming suppression algorithm based on the support vector machine for frequency agility radar[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(1): 173-185. (in Chinese)
- [91] 董淑仙, 全英汇, 陈侠达, 等. 基于捷变频联合数学形态学的干扰抑制算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(7): 1491-1498. DONG Shuxian, QUAN Yinghui, CHEN Xiada, et al. Interference suppression algorithm based on frequency agility combined with mathematical morphology[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(7): 1491-1498. (in Chinese)
- [92] 方文, 全英汇, 沙明辉, 等. 捷变频联合波形熵的密集假目标干扰抑制算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(6): 1506-1514. FANG Wen, QUAN Yinghui, SHA Minghui, et al. Dense false targets jamming suppression algorithm based on frequency agility and waveform entropy[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(6): 1506-1514. (in Chinese)
- [93] 张建中, 穆贺强, 文树梁, 等. 基于脉内步进 LFM 波形的抗间歇采样转发干扰方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(5): 1013-1020. ZHANG Jianzhong, MU Heqiang, WEN Shuliang, et al. Anti interrupted-sampling repeater jamming method based on stepped LFM waveform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(5): 1013-1020. (in Chinese)
- [94] 张建中, 穆贺强, 文树梁, 等. 基于脉内 LFM-Costas 频率步进的抗间歇采样干扰方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(10): 2170-2177. ZHANG Jianzhong, MU Heqiang, WEN Shuliang, et al. Anti-intermittent sampling jamming method based on intra-pulse LFM-Costas frequency stepping [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(10): 2170-2177. (in Chinese)
- [95] 刘智星, 杜思予, 吴耀君, 等. 脉间-脉内捷变频雷达抗间歇采样干扰方法[J]. *雷达学报*, 2022, 11(2): 301-312. LIU Zhixing, DU Siyu, WU Yaojun, et al. Anti-interrupted sampling repeater jamming method for inter-pulse and intrapulse frequency-agile radar[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(2): 301-312. (in Chinese)
- [96] 董淑仙, 吴耀君, 方文, 等. 频率捷变雷达联合模糊 C 均值抗间歇采样干扰[J]. *雷达学报*, 2022, 11(2): 289-300. DONG Shuxian, WU Yaojun, FANG Wen, et al. Anti-interrupted sampling repeater jamming method based on frequency-agile radar joint fuzzy C-means[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(2): 289-300. (in Chinese)
- [97] 牛闯, 林强, 段敏, 等. 脉内频率-时延捷变雷达抗间歇采样转发干扰方法[EB/OL]. (2023-05-04)[2023-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20230504.1038.014.html>. NIU Chuang, LIN Qiang, DUAN Min, et al. Anti-interrupted sampling and repeater jamming method for intra-pulse frequency and time delay agile radar[EB/OL]. (2023-05-04)[2023-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20230504.1038.014.html>. (in Chinese)
- [98] QUAN Y H, WU Y J, LI Y C, et al. Range-Doppler reconstruction for frequency agile and PRF-jittering radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12

- (3): 348-352.
- [99] 崔国龙,樊涛,孔昱凯,等. 机载雷达脉间波形参数伪随机跳变技术[J]. 雷达学报, 2022, 11(2): 213-226.
CUI Guolong, FAN Tao, KONG Yukai, et al. Pseudo-random agility technology for interpulse waveform parameters in airborne radar[J]. Journal of Radars, 2022, 11(2): 213-226. (in Chinese)
- [100] FAN T, YU X X, GAN N, et al. Transmit-receive design for airborne radar with nonuniform pulse repetition intervals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(6): 4067-4084.
- [101] LONG X W, LI K, TIAN J, et al. Ambiguity function analysis of random frequency and PRI agile signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(1): 382-396.
- [102] 陈歆炜,赵建中,吴文. 基于极化捷变编码技术的雷达抗欺骗干扰研究[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(5): 642-645.
CHEN Xinwei, ZHAO Jianzhong, WU Wen. Radar anti-deception based on polarization agile coding technology[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(5): 642-645. (in Chinese)
- [103] 宋立众,吴群. 一种极化和频率捷变主动雷达信号处理技术[J]. 南京理工大学学报, 2010, 34(5): 668-674.
SONG Lizhong, WU Qun. Signal processing technique for active radar with polarization and frequency agility[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2010, 34(5): 668-674. (in Chinese)
- [104] 商龙,王红卫,郭俊杰. 导引头极化和频率联合捷变抗压制性干扰技术[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(10): 141-144.
SHANG Long, WANG Hongwei, GUO Junjie. Research on radar seekers polarization and frequency combine agility to resist oppressive jamming technology[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(10): 141-144. (in Chinese)
- [105] HAYKIN S. Cognitive radar: a way of the future [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1): 30-40.
- [106] 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)
- [107] 周华吉,张春磊. 认知电子战系统组成及实现途径探究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(5): 448-451.
ZHOU Huaji, ZHANG Chunlei. Research on the composition and realization of cognitive electronic warfare system [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2017, 12(5): 448-451. (in Chinese)
- [108] MANZ B. Cognition: EW gets brainy[J]. The Journal of Electronic Defense, 2012, 35(10): 32-39.
- [109] 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.
- [110] HAUSKNECHT M, STONE P. Deep recurrent Q-learning for partially observable MDPs[C]//Proceedings of Association for the Advancement of Artificial Intelligence Symposium. [S. l.: s. n.]: 2015: 29-37.
- [111] WANG S S, 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.
- [112] VAN HASSELT H, GUEZ A, SILVER D. Deep reinforcement learning with double Q-learning [C]//Proceedings of the 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence. [S. l.: s. n.]: 2016: 2094-2100.
- [113] LI K, JIU B, LIU H, et al. Robust antijamming strategy design for frequency-agile radar against mainlobe jamming[J]. Remote Sensing, 2021, 13(15): 3043.
- [114] LIU P F, LIU Y M, HUANG T Y, et al. Decentralized automotive radar spectrum allocation to avoid mutual interference using reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 57(1): 190-205.
- [115] JIANG W, REN Y H, WANG Y P. Improving anti-jamming decision-making strategies for cognitive radar via multi-agent deep reinforcement learning[J]. Digital Signal Processing, 2023, 135: 103952.
- [116] LILLICRAP T P, HUNT J J, PRITZEL A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning: JP2018523386[P]. 2016-07-22.
- [117] LI K, JIU B, PU W Q, et al. Neural fictitious self-play for radar antijamming dynamic game with imperfect information[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(6): 5533-5547.
- [118] GENG J, JIU B, LI K, et al. Radar and jammer intelligent game under jamming power dynamic allocation[J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 581.
- [119] LIU P F, WANG L, SHAN Z, et al. A dynamic

- game strategy for radar screening pulsewidth allocation against jamming using reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(5): 6059-6072.
- [120] PULKKINEN P, KOIVUNEN V. Model-based online learning for resource sharing in joint radar-communication systems [C]//*Proceedings of the 47th IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. [S. l.]: IEEE, 2022: 4103-4107.
- [121] THORNTON C E, BUEHRER R M, MARTONE A F. Constrained contextual bandit learning for adaptive radar waveform selection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(2): 1133-1148.
- [122] AILIYA, WEI Y, VARSHNEY P K. Adaptation of frequency hopping interval for radar anti-jamming based on reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(12): 12434-12449.
- [123] FANG Y Y, ZHANG L, WEI S P, et al. Online frequency-agile strategy for radar detection based on constrained combinatorial nonstationary bandit[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(2): 1693-1706.
- [124] 陶明亮, 唐舒婷, 王伶. 面向智能调制识别的电磁信号灵巧诱骗方法[J]. *信号处理*, 2022, 38(12): 2496-2506.
TAO Mingliang, TANG Shuting, WANG Ling. Radio signal smart deception method for intelligent modulation classification[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(12): 2496-2506. (in Chinese)
- [125] 张世文, 王明宇, 田海林. 抗 ARM 定向诱偏系统设计与分析[J]. *现代雷达*, 2010, 32(12): 11-13.
ZHANG Shiwen, WANG Mingyu, TIAN Hailin. Design and analysis of counter-ARM system based on directional decoy[J]. *Modern Radar*, 2010, 32(12): 11-13. (in Chinese)
- [126] 万鹏飞, 王明宇, 王馨. 组网反隐身技术探讨[J]. *飞航导弹*, 2015(9): 69-72.
WAN Pengfei, WANG Mingyu, WANG Xin. Discussion on networking anti-stealth technology [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2015(9): 69-72. (in Chinese)
- [127] MNIH V, KAVUKCUOGLU K, SILVER D, et al. Human-level control through deep reinforcement learning[J]. *Nature*, 2015, 518: 529-533.
- [128] MNIH V, BADIA A P, MIRZA M, et al. Asynchronous methods for deep reinforcement learning[C]//*Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning*. [S. l. : s. n.], 2016: 1928-1937.
- [129] SCHULMAN J, WOLSKI F, DHARIWAL P, et al. Proximal policy optimization algorithms [EB/OL]. (2017-08-28)[2023-10-15]. <https://arxiv.org/abs/1707.06347>.

作者简介

方愚渊

男,1994 年生,博士研究生,研究方向为雷达技术

E-mail:fangyy27@mail2.sysu.edu.cn



魏嵩

男,1993 年生,博士研究生,研究方向为信号处理与雷达技术

E-mail:weis3@mail2.sysu.edu.cn



何超

男,2000 年生,硕士研究生,研究方向为雷达技术

E-mail:hech53@mail2.sysu.edu.cn



孙一心

女,2001 年生,硕士研究生,研究方向为电子信息感知技术

E-mail:sunyx53@mail2.sysu.edu.cn



张磊

男,1984 年生,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为新体制雷达、雷达成像与识别感知

E-mail:zhanglei57@mail.sysu.edu.cn



王明宇

男,1968 年生,博士,教授,研究方向为信息系统总体技术、人工智能技术

E-mail:C483@163.com