

雷达有源干扰识别算法综述

周红平, 王子伟, 郭忠义

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘要: 在当代电子战中, 电子干扰与抗干扰的较量愈演愈烈。开展针对雷达有源干扰的识别算法已经成为雷达对抗领域研究的热点, 具有重大的战略意义。本文针对雷达有源干扰识别算法进行整体分析, 总结了目前国内外干扰识别手段的一般流程。首先对常见雷达干扰的种类进行划分, 详细介绍目前常见的雷达有源干扰信号的干扰机理和信号模型, 然后从特征提取手段和分类器的设计两个角度出发全面地梳理干扰识别算法流程。最后针对雷达有源干扰识别算法未来的发展方向做出了展望。

关键词: 雷达有源干扰; 欺骗干扰; 干扰识别; 特征提取; 分类器设计

中图分类号: TN974 **文献标志码:** A

Overview on Recognition Algorithms of Radar Active Jamming

ZHOU Hongping, WANG Ziwei, GUO Zhongyi

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In modern electronic warfare, the competition between electronic interference and anti-interference is becoming more and more fierce, which has become a hotspot in the radar countermeasure field to develop the identification algorithms for radar active jamming. This paper analyzes the radar active jamming recognition algorithm in details, and summarizes the general process of jamming identification methods in the world. Firstly, the types of common radar jamming are divided, and the jamming mechanism and the signal model of current common radar active jamming signal are introduced in details. Then from the feature-extraction means and the design of the classifiers, the flow of the jamming identification algorithm are analyzed comprehensively. Finally, the future development directions of the radar active jamming identification algorithms are prospected.

Key words: radar active jamming; deceptive jamming; jamming recognition; feature extraction; classifier design

引言

随着现代电子技术的高速发展, 电子干扰与抗干扰的较量愈演愈烈^[1-4]。雷达作为现代电子战中不可或缺的探测设备, 从诞生之日起就在军事领域发挥着至关重要的作用^[5-10]。雷达利用电磁波探测未知目标物体, 通过接收反射回波测得目标物的距离、速度、方位、高度以及目标的类别等信息, 对于掌握制空制海权有着巨大的影响, 是现代战争中取得优势的重要保证^[11-12]。而随着数字射频存储器(Digital radio frequency memory, DRFM)技术的不断发展与成熟^[13-17], 快速有效的有源干扰手段层出不穷。DRFM干扰机可以快速地捕获雷达发射信号, 高保真地恢复雷达发射信号并调制转发, 其产生的有源

欺骗干扰能够精确模拟雷达回波信号,致使雷达无法有效检测出真实目标及参数,这直接导致雷达面临着严重的电磁干扰威胁^[18-20]。随着电子对抗措施(Electronic countermeasure, ECM)技术的不断发展,更多具有特定干扰效果的雷达有源欺骗干扰样式被不断提出^[21-23],复杂电磁环境下的目标与干扰识别技术面临着新的挑战。只有及时准确地识别出干扰样式,才能采取相应有效的反制措施。而传统的基于经验的干扰识别方法已不能满足现代电子战争的需求,在复杂电磁环境下寻找自主、高效、快速的识别方法已成为近些年来雷达电子对抗发展的重要研究方向。

鉴于雷达有源干扰在雷达对抗中发挥着越来越重要的作用,雷达领域科研工作者为了扭转雷达在对抗中的被动局势,一直致力于研究和发​​展雷达的抗干扰技术。本文围绕复杂电磁环境下雷达信号环境特性认知需求,对雷达目标回波信号与各类干扰信号进行特征提取以及识别分类方法进行了系统介绍,为推动雷达抗干扰方法提供理论基础及技术途径。本文介绍的雷达有源干扰识别主要针对脉冲多普勒雷达(Pulse doppler, PD)发射的线性调频信号(Linear frequency modulation, LFM),而对于其他波形信号如:相位编码信号、正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)信号的适用情况还有待考证,本文针对线性调频信号的有源干扰识别算法进行阐述。

1 干扰识别的一般流程

当雷达进行有源干扰信号处理时,如何有效地进行干扰识别是能否实现干扰抑制的重要前提,只有确定了具体干扰类型才能采取相应合理的抗干扰措施。对干扰信号进行分类的依据主要存在于各种干扰信号中的细节部分,这些细节差异一般来自干扰机产生干扰时内部电子器件的影响,或是它们信号本身在时频域、变换域存在的细微差异。目前国内外的有源干扰识别算法都可以归结为模式识别的问题,主要是针对不同干扰信号所具有的细微信号特性差异,通过提取有效的特征和选取高效的分类器进行分类。

图1为干扰识别的一般流程。首先对雷达接收到的信号进行预处理,达到去噪和减轻多径效应的效果,以此来削弱噪声和多径效应对系统的影响。然后对处理后的信号在时频域、变换域进行特征参数的提取,所提取的特征参数可以更加凸显不同种类干扰信号的差异,有助于后续识别分类。特征提取受干噪比影响较大,在低干噪比时噪声会淹没干扰信号,难以提取有效的特征来完成分类。因此寻找抗噪声性能强的特征,是特征提取的关键。当然,特征提取可能会引入大规模的数据,在特征提取后可以使用一些适当的特征选择方法来进行数据降维。最后选择合适的分类器对特征参数进行处理,从而识别干扰信号类型,得到分类结果。

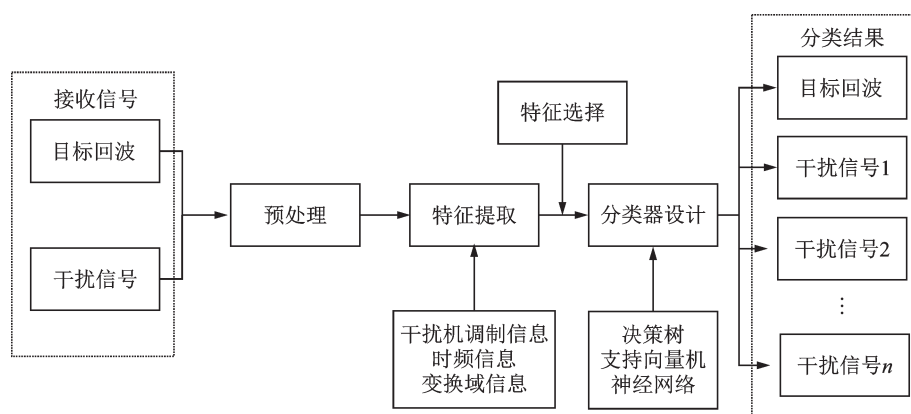


图1 干扰识别的一般流程

Fig.1 Flow of jamming recognition

2 干扰种类

随着数字射频存储器技术的日益发展和完善,该技术在有源欺骗干扰中获得了广泛的运用,正因为它具有能形成高逼真度欺骗干扰信号的优点,不断推动着有源欺骗干扰技术的进步,并极大地扩展和充实了干扰技术,使干扰手段变得更为灵活多样。DRFM干扰机的原理框图如图2所示。

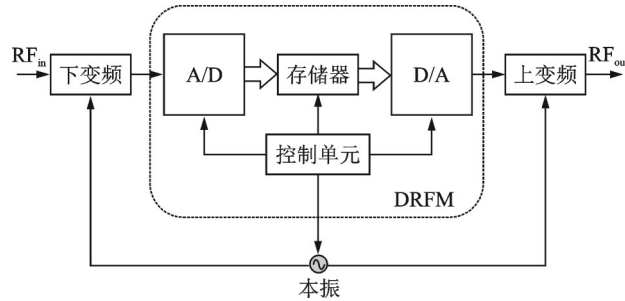


图2 DRFM干扰机原理框图
Fig.2 Block diagram of DRFM jammer

数字射频存储器首先将截获到的雷达发射信号进行下变频操作并储存,随后再对所储存的信息进行延时和移频等运算,并通过转发产生干扰信号。数字射频存储器转发的干扰信号通常与真实目标回波信号高度相干,能够经过匹配滤波器而达到和真实目标回波信号相同的增益效应,从而实现欺骗干扰的效果。同时由于DRFM干扰机所形成的转发干扰相干性较强,因此可以轻松实现种类多样的干扰手段而且十分有效,严重扰乱雷达的正常探测工作,使其无法获取真实的目标参数信息。

雷达干扰的划分方法多种多样,根据干扰的产生是否来自人为可以划分为有意干扰和无意干扰,其中有意干扰的分类如图3所示。根据干扰能量的来源可以分为有源(Active)干扰和无源(Passive)干扰。当干扰能量来自于雷达照射信号的散射,定义为无源干扰;当干扰能量来自于干扰机等电磁辐射源发射的电磁信号,则定义为有源干扰。目前,国内外的雷达干扰识别大多针对有源干扰信号进行识别和分类。雷达有源干扰按照干扰信号的作用机理,又可以分为压制性干扰(或称

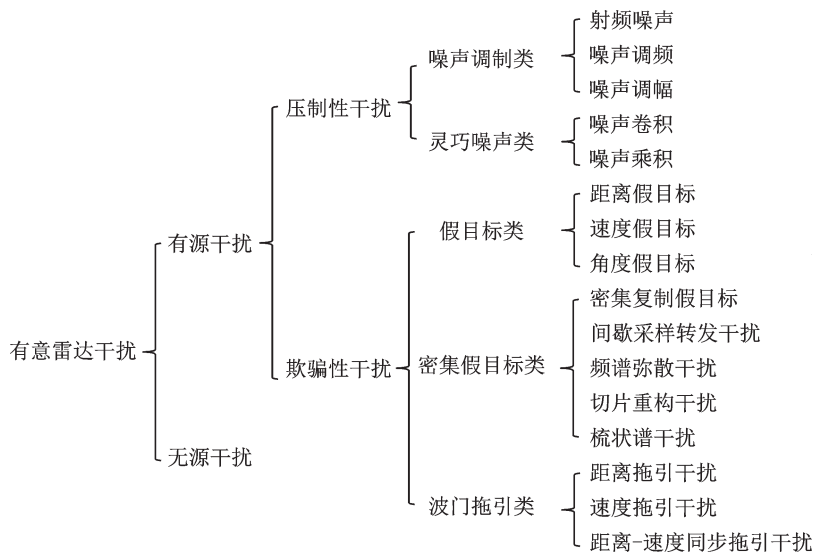


图3 雷达干扰的分类
Fig.3 Classification of radar jamming

遮盖性干扰)和欺骗性干扰。本节将根据干扰信号的作用原理,介绍常见的有源干扰的种类,并给出其数学模型。

2.1 压制性干扰

压制性干扰主要是通过噪声或近似噪声的干扰信号遮盖或压制目标的真实回波信号,阻止雷达检测目标的信息。常见的压制性干扰可以分为噪声调制类干扰和灵巧噪声类干扰。

2.1.1 噪声调制类

噪声调制类干扰是将高斯白噪声调制到雷达的线性调频信号上^[24-25],通过利用大能量的调制噪声对雷达信号形成压制效果,以影响接收端对信号的检测,一般的调制方式包括射频(Radio frequency, RF)噪声、噪声调幅(Amplitude modulation, AM)和噪声调频(Frequency modulation, FM)等。雷达采用LFM信号为

$$S(t) = \exp(\varphi(t) + \varphi_0) \quad t \in [-\tau/2, \tau/2] \quad (1)$$

式中: $\varphi(t) = j\pi(2f_0t + kt^2)$; f_0 为载频频率; k 为调制斜率; φ_0 为信号的初相位; τ 为信号的脉冲宽度。

噪声调制类的干扰表达式^[26]为

$$J_{1\sim 3}(t) = [U_0 + J_A U_J(t)] \cdot \exp[2\pi f_0 t + J_B 2\pi K_{FM} \int_0^t u(t') dt' + \varphi(t)] \quad (2)$$

式中: U_0 为发射信号幅值; $U_J(t)$ 为干扰的幅度; J_A 与 J_B 为调制的参数,取值为 $\{1, 0\}$ 。给出射频噪声 $J_1(t)$ 、噪声调频 $J_2(t)$ 、噪声调幅 $J_3(t)$ 三种干扰信号的具体模型设置如表1所示。

表1 噪声调制类干扰模型特征

Table 1 Characteristics of noise-modulation jamming models

干扰	J_A	J_B	$\varphi(t)$	参数说明	特点
射频噪声	1	0	服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布	$U_J(t) \sim$ 瑞利分布, 载频远大于带宽	有限频带噪声信号
噪声调频	0	1	服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布	K_{FM} 为调频斜率 $u(t')$ 为调制噪声	载波信号的振幅不变, 瞬时频率受噪声调制
噪声调幅	1	0	服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布	$U_J(t) \sim N(0, \sigma_n^2)$	信号的幅度受噪声所调制

2.1.2 灵巧噪声类

常见的灵巧噪声干扰^[27-28]包含卷积调制类和乘积调制类。噪声卷积(Noise convolution, NC)干扰通过将雷达延时信号与高斯噪声信号进行卷积,可以在时域和频域上对真实目标信号形成压制效果,表达式为

$$J_4(t) = S(t - \tau_0) \otimes n(t) \quad (3)$$

式中: $S(t)$ 为雷达发射信号; $n(t)$ 为高斯白噪声; τ_0 为回波时延; \otimes 为卷积运算。

与噪声卷积干扰不同的是,噪声乘积(Noise product, NP)干扰是通过将雷达信号延时后与噪声进行乘积处理,并且通过大于信比输出达到淹没压制真实目标信号的目的,其表达式为

$$J_5(t) = S(t - \tau_0) \cdot n(t) \quad (4)$$

2.2 欺骗性干扰

欺骗性干扰则是干扰机通过截获雷达的发射信号后,基于某种算法进行调制、转发与目标回波相似的信号,从而干扰我方雷达正常识别目标参数,图4为雷达被干扰的场景

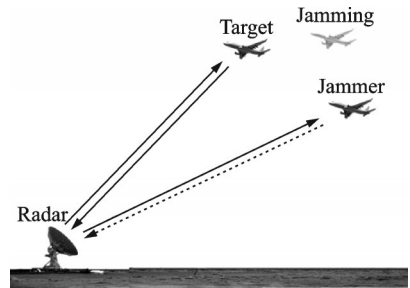


图4 雷达被干扰的场景图

Fig.4 Scene diagram of radar being jammed

图,雷达发射电磁波,接触到目标物(Target)后反射回波,部分电磁波被干扰机(Jammer)截获,紧接着干扰机发射欺骗信号,在场景内产生一个假目标(Jamming)。常见的欺骗性干扰又可以分为假目标干扰、密集假目标干扰和波门拖引类干扰。

2.2.1 假目标类干扰

假目标干扰通常是指干扰机发射的虚假目标与真实目标间的参数差异超出了雷达的分辨力,雷达可以区分真实回波信号和假目标信号为2个不同的目标,但可能会将假目标当作真实目标来探测与跟踪,或依靠强功率的假目标抑制雷达对真实目标的检测。

距离假目标(Range deception jamming, RDJ)、速度假目标(Velocity deception jamming, VDJ)与角度假目标(Angle deception jamming, ADJ)的干扰表达式为

$$J_{6\sim 8}(t) = K_d \exp [(2\pi f_0 + \Delta\omega_j(t)) \times (t - \Delta\tau_j(t)) + \varphi + \Delta\varphi_j(t) + j\pi k(t - \Delta\tau_j(t))^2] \quad (5)$$

式中: K_d 为功率放大系数; φ 为干扰信号的初始相位; $\Delta\tau_j(t) = at^2$; $\Delta\omega_j(t) = at$; $\Delta\varphi_j(t) = at$ 分别为距离假目标、速度假目标和角度假目标的干扰调制函数, a 为常数, k 为信号的调制斜率。如果单独做其中某种干扰调制时,只需要将另外2个干扰项置零。

2.2.2 密集假目标类干扰

密集假目标干扰是干扰机对雷达发射的信号进行延时、调制、转发而形成的多假目标干扰,通过制造大量的虚假目标来淹没真实目标,因此密集假目标往往也会产生压制的效果。常见的密集假目标干扰包括:密集复制假目标(Multi-false-target, MT)干扰、间歇采样转发干扰(Interrupted sampling and repeater jamming, ISRJ)、频谱弥散(Smeared spectrum, SMSP)干扰、切片重构(Chopping and interleaving, C&I)干扰以及梳状(COMB)谱干扰等。

(1) 密集复制假目标干扰

密集复制假目标干扰是在假目标干扰的基础上发展起来的。DRFM干扰机通过对雷达发射的信号进行多次复制转发,从而产生高密度的虚假目标,以达到欺骗的效果,其数学表达式为

$$J_9(t) = \sum_{i=1}^n k_i S(t - \tau_i) \quad (6)$$

式中: n 为虚假目标个数; k_i 为子信号的幅度调制系数; τ_i 为干扰子脉冲之间的时延间隔。

(2) 间歇采样转发干扰

间歇采样转发干扰是DRFM干扰机通过对雷达发射的信号进行间歇性的采样转发得到的距离假目标干扰^[29]。在一个采样周期内对雷达发射信号多次转发,就会得到多段与雷达发射信号相似的子信号,可以短时间内在雷达接收端形成多个假目标,从而达到欺骗的效果,其数学表达式为

$$J_{10}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\tau^i}} \text{rect}\left(\frac{t - \frac{\tau^i}{2} - (i-1)T_s}{\tau}\right) \exp(\varphi(t)) \quad (7)$$

式中: n 为虚假目标个数; τ^i 为间歇采样的脉冲宽度; T_s 为采样周期; τ 为雷达LFM信号的脉宽; $\text{rect}(\cdot)$ 是矩形函数。

(3) 频谱弥散干扰

频谱弥散干扰是由多个子脉冲组成,每个子脉冲都是对雷达信号进行间隔采样时产生的,因此可在雷达接收端产生虚假目标,严重影响真实目标的检测,其数学表达式为

$$J_{11}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} j_{11}^i(t - iT_a) \quad (8)$$

式中: T_a 为子脉冲的重复时间;干扰子脉冲 $j_{11}^i(t)$ 是对LFM信号的 n 倍采样,其信号表达式为

$$j_{11}^i(t) = A_i \exp\left\{j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k' t^2\right)\right\} \quad 0 \leq t \leq \tau/n \quad (9)$$

式中: A_i 为第 i 个子脉冲的幅度; k' 为 n 倍的 k , 即子脉冲的调制斜率是雷达发射信号调制斜率的 n 倍。

(4) 切片重构干扰

切片重构干扰也是调制产生多个子脉冲, 以此对脉冲压缩雷达产生密集距离假目标干扰, 其信号表达式为

$$J_{12}(t) = \sum_{k=1}^{n'} p\left(t - \frac{k\tau}{m'n'}\right) \quad (10)$$

$$p(t) = s(t) \left[\text{rect}\left(\frac{t - \tau_a}{\tau_a}\right) \sum_{i=0}^{m'-1} \delta(t - iT_b) \right] \quad (11)$$

式中: m' 表示矩形脉冲串的个数; n' 表示填充的时隙个数; τ_a 表示矩形脉冲串脉宽; $\delta(\cdot)$ 为冲激函数; T_b 表示矩形脉冲串基波周期。频谱弥散和切片重构干扰是 Sparrow 等提出的两种欺骗性干扰信号^[22], 当子脉冲串个数足够多时, 不仅会产生大量假目标干扰, 还会产生类似压制的效果。切片重构干扰的每个子脉冲都是对雷达发射信号的复制, 但是与频谱弥散干扰不同的是, 切片重构干扰并没有对斜率进行调制, 即其与雷达接收机中的匹配滤波器是匹配的。

(5) 梳状谱干扰

梳状谱干扰的信号表达式为

$$J_{13}(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \sum_{i=1}^n k_i \exp\left\{j2\pi\left[(f_0 + f_i)t + \frac{k}{2} t^2\right]\right\} \quad (12)$$

式中: f_i 对应每个锯齿出现的频率点; k_i 为相应第 i 个频率点处的幅度。梳状谱干扰有宽带和窄带两种类型。窄带梳状谱干扰把自身的能量集中分布在较窄的频段内, 从而达到压制目标信号的目的; 宽带梳状谱干扰则是形成多个假目标, 常用于产生欺骗干扰。

2.2.3 波门拖引类干扰

拖引干扰是指周期性地将干扰信号从真实目标参数下逐渐脱离的欺骗性干扰信号, 典型的拖引干扰一般包含 3 个时期: 停拖期、拖引期和关闭期, 表达式为

$$\|T_i - T^*\| = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_1, \text{停拖期} \\ 0 \rightarrow \delta V_{\max} & t_1 \leq t < t_2, \text{拖引期} \\ T_i \text{消失} & t_2 \leq t < T, \text{关闭期} \end{cases} \quad (13)$$

在停拖期, 假目标 T_i 与真实目标 T^* 的参数基本一致, 雷达一般无法分清两者的区别。在拖引阶段, 假目标的参数将会逐渐脱离真实目标, 且拖引的速度在雷达的跟踪范围之内, 因此雷达的跟踪系统能接收到假目标参数改变的完整过程, 直到参数偏差达到预期峰值 δV_{\max} , 进入关闭阶段。在关闭阶段, 欺骗干扰信号消失, 雷达跟踪系统中断。距离拖引干扰(Range gate pull off, RGPO)、速度拖引干扰(Velocity gate pull off, VGPO)和距离-速度同步拖引干扰(Range-velocity gate pull off, R-VGPO)是常见的 3 种主要的波门拖引类干扰技术, 其干扰形式为

$$\begin{aligned} J_{14}(t) &= A_R \exp(\varphi(t - t_0 - \Delta t_j - \Delta t_j(t)) + \varphi_j) \\ J_{15}(t) &= A_V \exp(\varphi(t - t_0 - \Delta t_j) + \varphi_j) \cdot \exp(j2\pi\Delta f_{\text{dr}}(t)t) \\ J_{16}(t) &= A_{R-V} \exp(\varphi(t - t_0 - \Delta t_j - \Delta t_j(t)) + \varphi_j) \cdot \exp(j2\pi\Delta f_{\text{dr}}(t)t) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: A_R 、 A_V 、 A_{R-V} 分别为 RGPO、VGPO、R-VGPO 的干扰信号幅度; $\varphi(t) = j\pi(2f_0 t + kt^2)$; f_0 为信号的中频频率; k 为调制斜率; Δt_j 为干扰机对雷达信号进行接收、处理和转发所需的时间延迟; $\Delta t_j(t)$ 为干扰的调制时延; $\Delta f_{\text{dr}}(t)$ 为干扰机调制的多普勒频移; φ_j 为干扰机调制下干扰信号初相位。

3 干扰信号特征提取

无论是压制性的干扰还是欺骗性的干扰,与真实回波之间都会有某些方面的差异。这些差异反映在干扰信号自身携带的调制信息中,一般源自干扰机在进行干扰调制时相位量化或幅度量化保留下来的指纹特征,或是干扰信号与真实回波在时域、频域、时频域或其他变换域中体现出来的差异。基于这些细微的差异,可以在各域内提取一些有效的特征来实现干扰信号的识别。信噪比和干噪比的大小对特征提取进而进行分类的结果有很大的影响,因此寻找抗噪声性能较好的特征,是本领域研究者主要探索的方向。

3.1 干扰机调制信息

大部分的有源干扰都是在干扰机获取雷达发射信号后进行一系列的调制,这必然会导致发射的干扰信号中存在一些调制信息,体现在时延离散特性、幅度量化特性、相位量化特性及功率放大特性等方面,一些学者以此作为分类的线索。文献[30-31]从相位量化的角度给出了干扰信号频谱的精确表达式,分析了干扰机由于相位量化引入的延时量化效应。文献[32]通过利用这种效应,采用分数阶傅里叶变换检测接收信号的调频率,对比干扰信号与真实回波之间的差异来实现欺骗干扰的识别。文献[33]则是希望利用经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)算法分离出干扰信号中存在的谐波分量,利用干扰信号和真实的回波信号在时频域能量分布的不同进行干扰信号的识别检测,该方法具有恒虚警特性。文献[34]通过基于广义似然比检测的自适应匹配滤波完成噪声与信号的分类,再通过真实回波和干扰信号导引矢量间的差异设计检测器,完成回波和干扰的分类。这些方法都是基于DRFM干扰机相位量化带来的谐波寄生,也有学者基于DRFM干扰机采用的数控移相器的步进阶跃调相带来的谐波寄生来进行干扰信号的识别分类,文献[35]提出了基于奇异谱分析的DRFM速度欺骗干扰识别算法,利用这种谐波分量体现在真实回波与干扰信号奇异值分布上的差异,通过获取接收信号奇异谱分析(Singular spectrum analysis, SSA)分解得到的奇异值统计直方图,提取相关特征进行识别分类。不过这些识别方法受干扰机的量化位数影响较大,随着干扰机相位量化位数的增加,干扰识别率会有明显的下降。文献[36]给出了干扰机功率放大特性下的欺骗干扰模型,借助真实回波与干扰信号在分段自相关最大值方差与奇异谱熵中体现的差异来识别有源欺骗干扰。

3.2 时频信息

基于时频信息的干扰识别手段一般都是从干扰信号的时域、频域、时频域出发,提取一些特征来完成与真实回波的识别和分类。

(1) 时域

部分学者利用真实回波和干扰信号时域信息的差异,从接收信号的时域序列提取一些特征来完成干扰识别与分类。文献[37]从射频噪声信号和距离欺骗干扰信号按多种方式复合形成的复合干扰信号的时域序列出发,提取时域盒维数与L-Z复杂度特征,做2维特征分布图来完成3种复合信号的识别分类。联合慢时域的特征提取也是常见的干扰识别手段之一,文献[38]将一个相参处理时间内的脉冲回波经过相干解调后的数据排列为一个2维矩阵,由于调制方式的不同,不同类型的干扰在快时域的频谱或慢时域的多普勒谱上存在很大的差异。该算法通过对样本矩阵在快时域和慢时域分别做切片处理,计算样本的左右相似度,最后根据模板匹配分类器对干扰的种类进行识别。文献[39]提出了一种基于乘积谱矩阵的欺骗干扰识别算法。计算不同脉冲重复间隔(Pulse repetition interval, PRI)下的乘积谱,按慢时域排列成2维矩阵,用非负矩阵分解(Non-negative matrix factorization, NMF)提取多维特征,选取最优特征进行欺骗干扰的识别。文献[40]则利用局部二值模式对积谱矩阵提取灰度图像特征,将图像处理的手段结合到欺骗干扰识别的领域。文献[41]将雷达的时间序列转换成可见度图,从

中提取平均度、平均聚类系数、纽曼分类系数和归一化网络结构熵这4维特征,放入随机森林分类器中进行几种常规的有源干扰信号的识别分类。

(2) 频域

频域分析也是常用的分析手段,在干扰信号的识别中也发挥着很重要的作用。一些学者尝试提取信号频域的一些特征,通过快速傅里叶变换(Fast Fourier transformation, FFT)得到信号的频谱或功率谱,在频域上完成干扰信号的识别分类。文献[42]通过提取3种不同转发方式的间歇采样转发干扰的频域关联维数作为特征参数,放入支持向量机(Support vector machines, SVM)中进行分类识别。文献[43]通过提取了它们的分形盒维数作为特征参数放入分类器中进行分类识别,得到3种干扰和真实回波的分类结果。

(3) 时频域

与单独的时域或频域相比,时频分析能得到信号能量分布与时间和频率的关系,具有更直观的物理意义。文献[44]通过平滑伪魏格纳-维尔分布(Smooth pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD)得到接收信号的时频图像,利用图像局部二值模式算法提取图像的纹理特征,做出了频谱弥散干扰和切片组合干扰2种干扰的识别分类。文献[45]也是利用了平滑伪魏格纳-维尔分布得到的时频图像,通过Zernike矩特征来进行识别分类,利用低阶矩和高阶矩能分别反映图像的整体信息和细节信息的特点,来完成3种拖引干扰的分类。文献[46]对SPWVD时频图像提取时频域可分离度和三阶Renyi熵这2维特征,选取合适的阈值实现3种拖引干扰和目标回波的分类。文献[47]通过Choi-Williams分布得到不同干扰信号的Choi-Williams时频2维分布图,对其灰度图像进行滤波、消噪、裁剪等处理后做奇异值分解,提取2~9位的奇异值作为特征参数,最后放入支持向量机实现干扰类型的识别。可以发现,时频变换结合图像处理的手段提取特征也是十分有效的干扰识别方式。

3.3 变换域信息

目前常见的手段还包含通过一些变换手段,得到一些其他域的特征参数来进行干扰信号的识别,其中最典型的包括双谱变换、小波变换和分数阶傅里叶变换等。

(1) 双谱域

双谱^[48-49]可以有效地抑制高斯噪声干扰,同时保留信号的幅值和相位信息,在干扰信号的分析处理上也有广泛的应用,如表2所示。文献[50]提出了基于双谱的距离欺骗干扰、速度欺骗干扰和角度欺骗干扰的识别算法,通过对3种干扰做双谱估计,取它们双谱分布对角切片的方差和信息熵作为特征参量来完成3种干扰的分类,LFM信号的3维双谱图及其对角切片如图5所示。文献[51]通过对真实目标回波和3种拖引干扰进行双谱变换,经过Y轴垂直投影的降维手段和归一化处理后,提取Renyi熵、指数熵和盒维数组成特征集放入v-SVC分类器中进行识别。文献[52]通过FFT变换提取频域的平稳度,基于双谱变换提取双谱域的凸度,构建了2维特征向量,结合设计的GA-BP神经网络完成了对3种欺骗干扰信号的识别。这种多域联合的手段,可以获得信号在不同维度的信息,有利于提升算法的鲁棒性。文献[53]也利用双谱分析的方法做出了频谱弥散干扰和切片组合干扰的识别分类,它通过对接收信号做双谱变换,并沿Y轴投影进行降维处理,联合盒维数和信息维数两维特征参数实现了频谱弥散干扰和切片组合干扰的检测识别。文献[54]对接收信号的时变三阶累积量做对角切片,再针对对角切片做傅里叶变换得到信号的1.5维谱,获取1.5维谱图的盒维数、信息熵与信号聚散度这3维特征进行干扰的分类。文献[55]提取了双谱域的9维特征,通过将贝叶斯决策理论应用在雷达欺骗干扰识别的信号处理上,做出了基于贝叶斯决策理论的雷达欺骗干扰识别特征融合。文献[56]首先通过变分模态分解(Variational mode decomposition, VMD)将接收信号分解为一组有限带宽的本征模态函数(Intrinsic mode function, IMF),通过对各IMF做矩形积分双谱并提取Renyi熵作为特征参数,放入随机森林分类

表2 双谱域干扰识别方法汇总

Table 2 Summary of jamming recognition methods in bispectrum domain

干扰信号[文献]	分类手段	分类器	识别率效果
RDJ、VDJ、ADJ [50]	对角切片方差、 信息熵	SVM	JNR=-6 dB时达到83% JNR=1 dB时达到90%
RGPO、VGPO、R-VGPO [51]	盒维数、Renyi熵和指数熵	SVM	SNR=0 dB时达到85% SNR=6 dB时达到100%
RDJ、VDJ、ADJ [52]	凸度、平稳度	GA-BP神经网络	JNR=-6 dB时达到85% JNR=-2 dB时达到90%
SMSp、C&I [53]	盒维数、信息维数	SVM	SNR=-1 dB时达到90% SNR=7 dB时达到100%
RDJ、VDJ、ADJ [54]	盒维数、信息熵和信号聚散度	RBF神经网络	JNR=-6 dB时达到40% JNR=3 dB时达到80%
RGPO、VGPO、R-VGPO [55]	均值、方差、盒维数、峰值因子和波形因子等	贝叶斯	JNR=0 dB时达到92% JNR=6 dB时达到100%
RF、AM、FM、RDJ、 VDJ、RDJ & VDJ、MT、 RGPO、VGPO、R-VGPO [56]	Renyi熵	随机森林	SNR=6 dB时达到100%

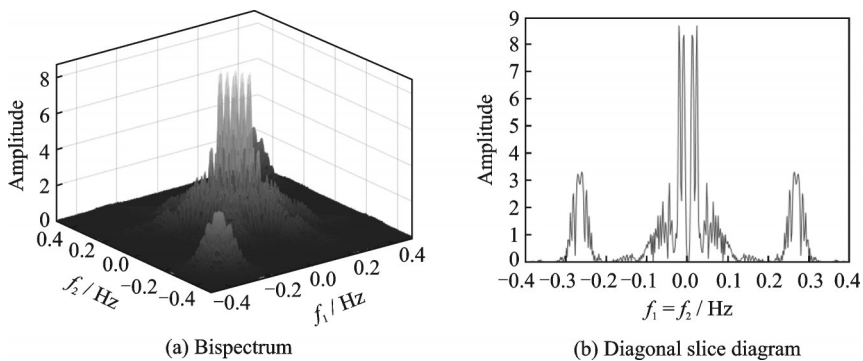


图5 LFM信号的双谱图及其对角切片

Fig.5 Bispectrum and its diagonal slice diagram of LFM signal

器中进行干扰种类的识别。

(2) 小波域

小波分解^[57-58]也在干扰识别领域得到了广泛的运用,如表3所示。主要利用小波分解得到各频段的信号分量,通过真实回波和各种干扰信号在不同频段上的细节差异来完成干扰的分类,图6所示为3层小波分解示意图,其中A和D分别表示小波分解后的低频分量和高频分量。文献[59]选取了Morlet小波基对雷达接收信号进行6层小波分解,得到6阶高频分量,计算相邻两阶小波系数谱的能量比作为特征参数,完成3种拖引干扰的分类。文献[60]通过对速度欺骗干扰、距离欺骗干扰和角度欺骗干扰这3种欺骗干扰信号进行小波分解并提取小波熵,然后将小波熵送入径向基函数(Radial basis function, RBF)神经网络进行自动分类。文献[61]通过小波分解,提取了接收信号能量分布的多尺度相像系数作为特征参数;放入最小二乘支持向量机来识别干扰类型。文献[62]对3种欺骗干扰

信号做小波分解,分别提取其中高频分量和低频分量的归一化能量比作为识别的特征参数,同时该作者还提出了基于经验模态分解的干扰识别算法,由EMD将原始信号分解为多个IMF,利用各IMF展现的类似不同频段的局部细节信息,结合频域矩偏度、峰度和噪声因子等5维特征来进行干扰的识别分类。无论是基于小波分解的干扰识别算法,基于经验模态分解的干扰识别算法还是基于变分模态分解的干扰识别算法^[56],都体现了多尺度分析的基本思想,通过提取各个分量的特征,得到信号的局部信息。

表3 小波域干扰识别方法汇总

Table 3 Summary of jamming recognition methods in wavelet domain

干扰信号[文献]	分类手段	分类器	识别效果
RGPO、VGPO、R-VGPO [59]	分解能量比	决策树	JNR=5 dB时达到90% JNR=8 dB时达到100%
RDJ、VDJ、ADJ [60]	小波熵	RBF神经网络	JNR=0 dB时达到45% JNR=6 dB时达到85%
RGPO、VGPO、Noise [61]	多尺度相像系数	最小二乘支持向量机	二分类器中达到92% 三分类器中达到87.50% JNR=0 dB时达到65%
RGPO、VGPO、R-VGPO [62]	高频分量和低频分量的归一化能量比	K最近邻分类法	JNR=15 dB时达到100% (32回波识别结果)

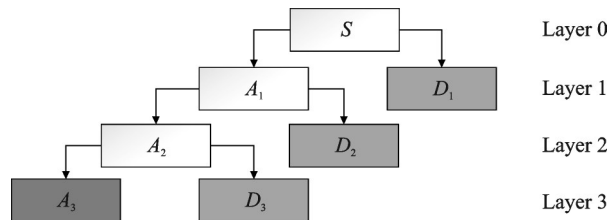


图6 3层小波分解示意图

Fig.6 Schematic diagram of three-layer wavelet decomposition

(3) 分数阶傅里叶变换域

分数阶傅里叶变换^[63-65]较传统傅里叶变换的应用场合更加灵活,在干扰识别领域也有着很好的应用,如表4所示。

表4 FRFT域干扰识别方法汇总

Table 4 Summary of jamming recognition methods in FRFT domain

干扰信号[文献]	分类手段	分类器	识别率效果
AM、FM [66]	最大阶次和最小阶次的归一化方差之比	决策树	JNR=4 dB时达到85%
SMSP、ISDJ、ISPJ、ISCJ [67]	调频参数矩峰度系数 频谱半带宽方差比系数	决策树	SNR=-10 dB时达到98%

对LFM信号做遍历旋转角度的FRFT分析,将阶数 p 在区间 $[0, 2]$ 进行递增取值结果如图7所示。文献[66]通过不同干扰在FRFT域能量分布的差异,提取了最大阶次和最小阶次的归一化方差之比,定义差值门限,来实现对噪声调幅和噪声调频两种干扰的识别分类。文献[67]分别从自相关幅度谱、

匹配滤波幅度谱和频谱提取相关特征,联合FRFT域的调频参数组成特征向量,来完成对频谱弥散、间歇采样直接转发(Interrupted sampling and direct repeater jamming, ISDJ)、间歇采样重复转发(Interrupted sampling and periodic repeater jamming, ISPJ)以及间歇采样循环转发(Interrupted sampling and cyclic repeater jamming, ISCJ)的分类识别,仿真结果显示,结合多域特征参数的特征向量有很好的抗噪声性能。

4 干扰识别分类器设计

特征提取是特征分类的基础。目前特征提取的方向很宽广,再加上结合多域特征可以得到更多维度信息,因此特征提取常常会引入大规模的数据,这将大大增加算法的数据处理时间,甚至会导致维数灾难。因此筛除数据集中冗余的数据量,也是目前一些学者的研究方向,常见的方式有特征选择和降维。特征选择方法是希望在已有的特征维数里择优搜寻子集,这一般需要一定的评价标准来衡量特征参数的重要性,常见的方式有基于K-W检验(Kruskal-Wallis test)的特征选择、基于类内类间距离比的特征选择、基于Fisher判决率的特征选择^[68]等。降维方法则希望将高维空间的数据映射到低维空间,降低数据量的同时不损失关键信息^[26,39],可以选择的方式有主成分分析(Principal component analysis, PCA)、线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)、非负矩阵分解、多维尺度分析(Multidimensional scaling, MDS)等。

在经过筛选后就可以放入分类器中进行识别分类。分类器的种类较多,选取合适的分类器有助于提高干扰的识别率。常见的分类器有:决策树^[26,59,68-70]、支持向量机^[71-79]、卷积神经网络^[80-89]等,本文主要介绍在干扰识别领域常见的这3种类型。

4.1 决策树

可以发现大量的干扰识别算法都依赖于决策树的分类算法,通过提取区别性较大的特征,设定特征阈值,从而对干扰信号进行逐层分类。样本的特征参数进入分类树后,经由一个个的分支节点,在节点处进行二分类的特征判别,直至将每种干扰信号都归到正确的类别。决策树的分类算法流程图如图8所示^[69]。文献[26]提取了时域、频域和其他域的共19维特征,通过PCA压缩到了9维,最后采用决策树分类器进行识别分类,对比降维前后的干扰识别率曲线,发现降维后的识别率基本不变,验证了降维的有效性。文献[59]借助提取的5维高阶分量能量比的特征参数,选取合适的阈值进行2轮二分类,得到3种拖引干扰和真实回波的分类结果。文献[68]首先按照不同调制类型的接收信号选取不同的特征参数,通过提取接收信号的特征参数集 P_1 完成真实回波、拖引干扰和假目标干扰的分类任务,再基于特征参数集 P_2 完成3种拖引干扰的识别分类。文献[69]首先选择区分度较高的偏度特征作为决策树的第1个根节点,将接收信号分为4类,再由包络起伏参数、峰度、瞬时幅频最大值以及频率平稳度等特征设置阈值来进行进一步的识别分类。文献[70]对7种干扰进行建模,从时域、频域、时频域提取了一组特征,利用决策树分类器实现分类识别。并与支持向量机分类器进行识别率的对比,仿真结果表明,决策树对噪声调频干扰与灵巧噪声干扰的识别准确率更高,而支持向量机对于纯噪声环境和距离欺骗干扰的识别准确率更高。可以看出,基于决策树的干扰识别分类方法实现简单、便于理解,但分类节点普遍使用单一特征参数,未能结合多特征的优势,因此特征参数及其分类门限的选择对分类结果有着很大的影响。

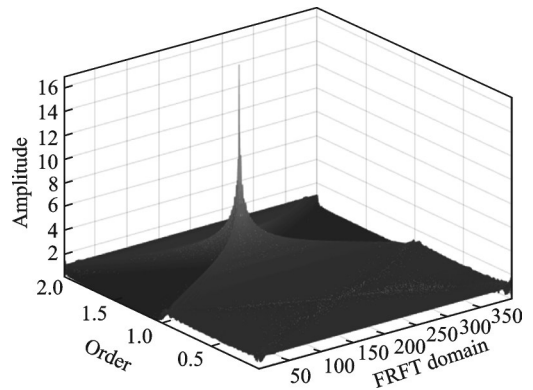


图7 LFM信号的遍历旋转角度FRFT分析
Fig.7 FRFT analysis of ergodic rotation angle of LFM signal

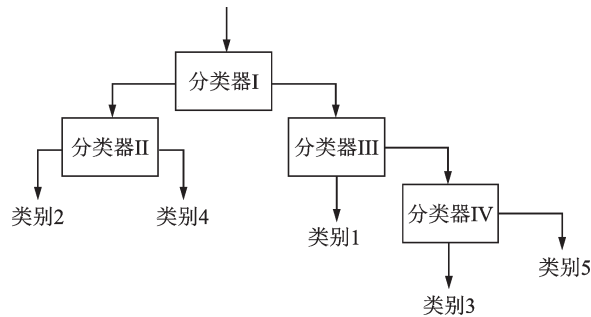


图8 分类树算法流程图

Fig.8 Flow chart of classification tree algorithm

4.2 支持向量机

支持向量机^[71-72]是机器学习理论中重要的一部分,它可以通过训练数据集求解最大间隔超平面,尽可能地保证同类样本不会被误分,如图9所示。对于线性不可分的情况,也可以通过利用核方法将低维不可分的输入映射到高维特征空间使其线性可分。它在干扰识别的领域也有很多应用。

文献[73]针对频谱弥散和切片重构2种干扰,分别提取了时域盒维数和频域指数2维特征作为特征参数,采用基于二叉树结构的支持向量机来完成2种干扰的识别分类。文献[74]通过提取包络起伏参数、相位门限内概率和盒维数等多维特征,采用了支持向量机分类器实现对灵巧噪声干扰和真实回波的分类识别。文献[75]通过围线积分双谱和辅对角线积分双谱对接收信号的双谱阵列做降维处理,又结合了信息熵和基于Fisher准则的特征选择算法选取特征参数,保留分类能力强的特征参数以获取最好的分类效果和最低的分类器计算复杂度,最后输入SVM中进行匀速拖引与匀加速拖引2类距离-速度同步拖引干扰的分类。文献[76]通过对接收信号做奇异谱分解,引入峭度准则作为衡量分解分量的信息特征是否明显的依据,对最佳分解分量的包络做1.5维谱的估计,最后通过支持向量机进行识别分类。文献[77]利用干扰信号与真实回波频谱之间的差异,提取了频谱稀疏度作为特征参数,最后放入支持向量机中进行噪声卷积、间歇采样转发和数字多时延等3种干扰的分类识别。文献[78]首先对接收信号进行双正交傅里叶变换,提取峰值斜率并设定阈值,将频谱弥散干扰、切片重构干扰、噪声乘积干扰、噪声卷积干扰、间歇采样转发干扰与真实回波分成3组,再提取频谱熵和互相关系数等5维特征,放入训练好的支持向量机中来完成识别分类。文献[79]提取了时域、频域、变换域的10维特征,通过它们之间的关联度选取抗噪声性能较好的特征来完成对射频噪声、噪声调幅和距离欺骗等多种有源干扰的识别;同时文章还对比了BP神经网络、统计判决树和支持向量机这3种分类器的识别效果,发现在低信噪比下,基于支持向量机的识别方法在低干噪比时有着更好的分类效果。与决策树分类器相比,支持向量机分类器只需提取干扰的特征而无需人工设定特征参数的分类门限,节省了大量的人力资源。

4.3 神经网络

深度学习的代表网络模型之一是卷积神经网络(Convolutional neural networks, CNN)。类比生物的视知觉机制,CNN通过卷积和池化等操作,自动筛选输入数据的深层特征点进行输出,其隐含层内的

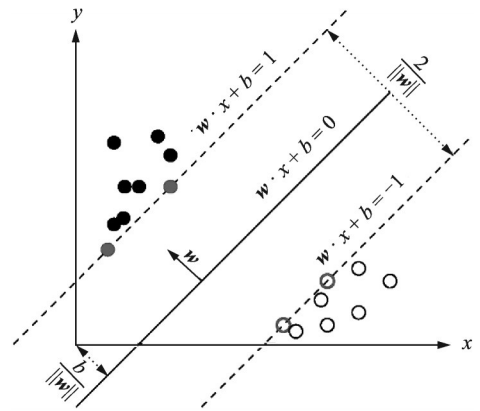


图9 支持向量与最大间隔

Fig.9 Support vector and maximum margin

卷积核参数共享和层间连接的稀疏性使得卷积神经网络可以通过少量的计算实现格点化特征的学习。CNN的这种监督式学习有着相当稳定的效率,而且不需要人为地特征提取和处理,甚至还能够解决更复杂的非线性问题^[80]。正是由于卷积神经网络具有强大的数据分析及有效特征提取的能力,近几年也被广泛应用在干扰识别的领域中,如表5所示。

表5 深度学习干扰识别方法汇总

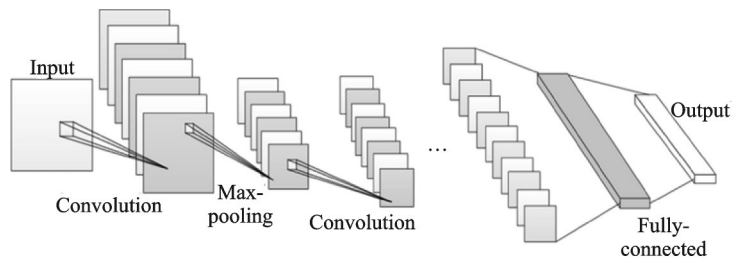
Table 5 Summary of deep learning based jamming recognition methods

干扰信号[文献]	分类手段	网络模型	识别效果
BJ,MT,NP [81]	STFT时频图	CNN	MT的准确率可达99.86%,另外2个准确率达到100%
Clutter,SJ,PM,FM,SF [82]	一维雷达回波数据	LeNet	综合准确率达到99.7%
PB,ST,MT,LFM,AM,FM [83]	STFT时频图	VGGNet-16	综合准确率达到97.7%,低信噪比下超过93%
AM,FM,CN,CP,SMSP,C&I,MT,ISRJ,COMB [84]	STFT时频图、OS-CFAR	CNN	综合准确率达到98.667%
Noise,ISRJ,AJ,BJ,SJ,RDJ,DFTJ,SNJ,CJ,CJ&ISRJ,RDJ& Sweep,DFTJ& SNJ [85]	信号实部、虚部	1D-CNN、S-CNN	JNR=5 dB时所有干扰信号识别准确率超过80%
Noise,ISRJ,AJ,BJ,SJ,RDJ,DFTJ,SNJ,CJ,CJ&ISRJ,RDJ& Sweep,DFTJ& SNJ [86]	STFT时频图、软标签平滑算法	1D-CNN、2D-CNN、DNN	不同S值下综合准确率超过96%
RF,ISRJ,MT,SMSP,C&I,AM,FM,SNJ [87]	递归图	2D-CNN	综合准确率超过99%
RF,AM,FM,RGPO,VGPO [88]	CWD时频图	AlexNet	综合准确率达到99.25%,JNR=0 dB时接近100%
RGPO& AM,VGPO& AM,R-VGPO& AM,RGPO& FM,VGPO& FM,R-VGPO& FM [89]	SPWVD时频图	改进的AlexNet	JNR=0 dB时所有干扰信号识别准确率超过90%

注:BJ: Blanket jamming; NP: Narrow pulse jamming; SJ: Sweep jamming; SF: Single-frequency interference; PB: Partial band interference; ST: Single tone interference; MT: Multi-tone interference; AJ: Aiming Jamming; BJ: Block Jamming; DFTJ: Dense false target Jamming; SNJ: Smart noise Jamming; CJ: Chaff Jamming; A & B: Additive compound jamming of A and B.

文献[81]设计了一种基于干扰信号时频图的干扰识别算法,在提取3种典型的雷达有源干扰和目标回波信号的时频谱图后,将其放入设计好的卷积神经网络中进行迭代训练从而实现识别分类,其网络模型如图10所示。

文献[82]设计了一种基于改进LeNet-CNN网络的干扰识别算法,该算法通过提取一维雷达接收

图10 卷积神经网络模型图^[73]Fig.10 Schematic of CNN model^[73]

信号,调整网络结构参数使得网络达到最佳性能,实现对干扰信号的识别分类。文献[83]通过短时傅里叶变换得到干扰信号的时频谱图,结合改进的VGGNet-16网络模型进行特征学习和训练,来完成6种常见干扰的识别分类;同时还测试了算法对加性复合干扰的识别效果,仿真验证了该算法对6种混合干扰的识别依然有效。文献[84]也是在提取干扰信号的时频图基础上,增加了自适应剪裁算法以裁剪时频图像的大部分冗余信息,保留干扰信号的完整信息放入卷积神经网络进行训练,最终实现对9种干扰信号的识别分类,识别准确率高且网络迭代速度快。文献[85]提出了一种基于1维CNN的雷达干扰信号分类模型,通过将干扰信号的实部和虚部放入并联网络训练,实现了对12种典型干扰信号的识别分类。同时,为了解决雷达干扰信号样本不足的实际问题,提出了一种改进的S-CNN(Siamese convolutional neural networks)模型,且通过仿真实验验证了其有效性。文献[86]在此基础上做出了改进,提出了一种基于CNN的深度融合方法。该方法包含3个子网络,首先由1维CNN提取原始雷达干扰信号深度特征,2维CNN提取时频特征,然后通过融合网络对2个CNN子网络提取的特征进行深度融合,Softmax用于完成雷达干扰信号分类任务。此外,为了缓解过拟合问题,利用软标签平滑方法提高模型的泛化能力。文献[87]不同于传统的提取干扰信号时频图像作为网络数据集的深度学习算法,该算法首先提取干扰信号的递归图像,然后将其放入2维CNN中对8种干扰信号进行识别分类,最终平均识别率达到99%以上。文献[88]基于AlexNet网络对5种雷达有源干扰信号进行识别分类,算法识别效果良好,不过网络运算量较大。文献[89]利用SPWVD提取雷达干扰信号的时频图像放入改进的AlexNet网络进行训练,实现了对雷达复合干扰信号的识别分类,算法识别率高且迭代速度快。可以看出,近几年基于深度学习的干扰识别算法在不断地涌现,摆脱了人为提取特征的过程,淡化了人为因素带来的影响,更加符合本领域对识别算法自主性、智能化的追求。

5 干扰识别算法性能对比分析

本文以3种拖引干扰(RGPO, VGPO, R-VGPO)为例,选取不同域的特征和不同分类器下的算法的识别效果进行对比,如表6所示。从表中可见,文献[39,46,59]都使用了决策树的分类器方法,通过

表6 不同算法识别效果对比

Table 6 Comparison of recognition performance of different algorithms

文献	特征域	分类手段	分类器	识别效果	优点
[39]	时域	中心距、方差与均值平方比、稀疏性(积谱矩阵)	决策树	SNR=6 dB时识别率达到90%	直接从时域提取特征,算法速度快
[45]	时频域	低阶矩、高阶矩(Zernike矩)	支持向量机(v-SVC)	SNR=4 dB时识别率达到90%	运用数字图像处理技术进行预处理以去噪和去冗余
[46]		3阶Renyi熵、可分离度	决策树	SNR=8 dB时识别率达到90%	特征提取快,算法运算量低
[51]		盒维数、Renyi熵、指数熵	支持向量机(v-SVC)	SNR=4 dB时识别率达到90%	双谱可以有效地降噪
[55]	双谱域	均值、方差、盒维数、峰值因子、波形因子等	贝叶斯	JNR=0 dB时识别率达到90%	给出了基于贝叶斯理论的特征融合算法,可以更好地提高识别率
[56]		Renyi熵(各IMF的矩形积分双谱)	随机森林	SNR=2 dB时识别率达到90%	对各IMF提取特征,可以反映信号在各个分量上的局部信息
[59]	小波域	高频分量能量比	决策树	JNR=5 dB时识别率达到90%	通过小波分解可以获取不同频段的细节信息

人工的选取阈值,逐层分类得到识别结果,但是阈值的选择对分类结果有很大的影响,因此在低信噪比时很难获得较高的识别率。而文献[55]与文献[56]在低信噪比下有更好的识别效果。文献[55]提取了双谱域的多维特征,通过多维不同特征在双谱域体现的差异,结合特征融合算法达到了很好的分类效果,不同的特征值可以反映不同种类的信息,在一定范围内增加特征的维数可以有效地提升干扰的识别率。文献[56]既结合了变分模态分解得到各IMF的多尺度信息,又通过矩形双谱达到抑制噪声的效果,以此获得更高的识别率。到目前为止,还少见直接针对3种拖引干扰的深度学习识别算法的报道,3种拖引干扰的时频图像具有很高的相似性,深度学习算法一般要求所提取的时频图像信息间存在明显的差异,所以针对这种相似性较强的干扰信号难以得到很好的分类效果,而压制类干扰和密集假目标类干扰信号的时频图差异较大,更容易进行分类和识别。针对特定的干扰,通过分析其干扰机理和特点,选取合适的特征域与分类器,才能得到良好的分类效果。此外,结合多域信息或多特征参数,联合信号处理手段进行多尺度的分析,都是提高干扰识别准确率的有效手段。

6 总结和展望

雷达有源欺骗干扰技术是雷达干扰的主要手段,严重影响雷达的目标检测工作,开展雷达有源干扰识别的研究,有助于复杂电磁环境下的目标识别,也是实现雷达抗干扰的前提和基础。本文从雷达有源干扰识别的一般流程出发,给出了目前常见的16种有源干扰的模型和作用机理,从特征提取和分类器设计2个方面概括了有源干扰识别技术的研究进展。可以看出,国内外学者针对有源干扰识别方法做了大量的探究,但是现有的研究还存在着较大的局限性,未来的干扰识别技术应考虑以下几个研究方向:

(1)目前干扰信号的文献都是针对少数几种特定的干扰类型的研究,缺少一个整体的、全面的干扰识别手段,未来可以从干扰形式或干扰机理的宏观角度出发,解决多类型的有源干扰识别分类问题。

(2)目前所给的干扰信号的建模大多是针对单一参数下的干扰信号,难以保证干扰识别算法在真实干扰环境下稳定的识别效果,未来应考虑多参数下的干扰信号识别,保证识别算法的稳定性。

(3)目前常见的干扰识别主要在于单一干扰信号的识别和分类,而少有考虑多种欺骗干扰通过加性、乘积和卷积形成的复合欺骗干扰,未来需要从干扰的现实场景出发,解决复合干扰信号的识别问题。

(4)随着已知的有源干扰的识别手段被不断提出,一些新型的干扰技术也在不断涌现,比如频控阵干扰^[90-92]、改进的非整数阶次的频谱扩展-压缩(Spectrum spread and compression, SSC)盲移频干扰^[93-95]等,目前针对这些新型有源干扰的识别还相对缺乏,属于亟待发展的研究领域。

参考文献:

- [1] 周一宇. 电子对抗原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
ZHOU Yiyu. Principle of electronic warfare[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [2] 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. Principle of radar countermeasure[M]. Xi'an:Xidian University Press, 2012.
- [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. Principle of radar electronic warfare[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2006.
- [4] 张锡祥,肖开奇,顾杰. 新体制雷达对抗导论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2010.
ZHANG Xixiang, XIAO Kaiqi, GU Jie. Introduction to new system radar countermeasures[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010.
- [5] 王国玉,汪连栋,王国良,等. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.

- WANG Guoyu, WANG Liandong, WANG Guoliang, et al. Mathematical simulation and evaluation of radar electronic warfare system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [6] WILEY R G, EBRARY I. ELINT: The Interception and analysis of radar signals[M]. Boston: Artech House, 2006.
- [7] FARINA A. Electronic counter measure [M]. New York: McGraw Hill, 2008.
- [8] GRAHAM A. Communications, radar and electronic warfare [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [9] 司建伟, 曲志昱, 赵忠凯, 等. 现代电子对抗导论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
SI Jianwei, QU Zhiyu, ZHAO Zhongkai, et al. Introduction to modern electronic countermeasures[M]. Beijing: Beihang University Press, 2016.
- [10] 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.
- [11] TAIT P. Introduction to radar target recognition[M]. London: IET Digital Library, 2005.
- [12] MARTINO A D. Introduction to modern EW systems[M]. USA: Artech House, 2012.
- [13] 刘忠. 基于DRFM的线性调频脉冲压缩雷达干扰新技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
LIU Zhong. Jamming technique for countering LFM pulse compression radar based on digital radio frequency memory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [14] 王小漠, 张光义. 雷达探测-信息化战争的火眼金睛[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2008.
WANG Xiaomo, ZHANG Guangyi. Radar and detection: The fire eye of information warfare [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [15] OLIVIER K, CILLIERS J E, DU PLESSIS M. Design and performance of wideband DRFM for radar test and evaluation [J]. Electronics Letters, 2011, 47(14): 824-825.
- [16] 曹旭源. 基于DRFM的雷达干扰技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
CAO Xuyuan. Research on jamming against radar based on digital radio frequency memory [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [17] 吴永刚. 基于DRFM的有源雷达干扰技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
WU Yonggang. Study on active radar jamming technology based on DRFM [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [18] ELSWORTH A T. Electronic warfare [M]. New York: Nova Science Publishers Inc, 2009.
- [19] 孙闽红, 唐斌. 距离-速度同步拖引欺骗干扰的频谱特征分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 83-85.
SUN Minhong, TANG Bin. Analysis of the frequency spectrum of a simultaneous range-gate-pull-off and velocity-gate-pull-off jamming signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(1): 83-85.
- [20] YANG J, GUO X X, LI Y J. Design of a novel DRFM jamming system based on AFB-SFB[C]// Proceedings of IET International Radar Conference. London: IET, 2013: 1-5.
- [21] 郭雷, 李宏, 李青山. 相参雷达间歇采样灵巧干扰方法[J]. 现代防御技术, 2013, 41(3): 111-116.
GUO Lei, LI Hong, LI Qingshan. Interrupted sampling smart jamming method for coherent radar[J]. Modern Defense Technology, 2013, 41(3): 111-116.
- [22] SPARROW M J, CIKALO J. ECM techniques to counter pulse compression radar: US, US7081846 B1[P]. 2006.
- [23] 刘巧玲, 李文臣, 张文明, 等. 间歇采样移频转发干扰效果仿真分析[J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(1): 48-50, 65.
LIU Qiaoling, LI Wenchen, ZHANG Wenming, et al. Analysis on interrupted-sampling and repeater jamming based on shift-frequency[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2009, 24(1): 48-50, 65.
- [24] NOVIKOV A V, OSIPOV M V. Impulse noise rejection method in LFM radars[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2019, 64(4): 394-398.
- [25] 李昊, 魏永峰, 季玉双, 等. 雷达线性调频信号产生与去啁啾方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 143-153.
LI Hao, WEI Yongfeng, JI Yushuang, et al. Generation and dechirping of linear frequency modulation signals [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2021, 58(3): 143-153.
- [26] 罗彬冲, 刘利民, 刘璟麒, 等. 噪声调制类有源干扰信号识别技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(6): 597-602.
LUO Binshen, LIU Limin, LIU Jingqi, et al. Research on noise modulated active jamming signal recognition technology[J]. Radar Science and Technology, 2019, 17(6): 597-602.
- [27] 汤礼建, 黄建冲. 对线性调频脉冲压缩雷达的灵巧噪声干扰研究[J]. 电子对抗, 2008(1): 14-17.
TANG Lijian, HUANG Jianchong. Research on smart noise jamming to LFM pulse compression radar[J]. Electronic Warfare, 2008(1): 14-17.

- [28] 宁勇,陆汝瑶,林斌. 灵巧噪声干扰与雷达SLB和SLC的对抗分析[J]. 航天电子对抗, 2007(5): 29-31,35.
NING Yong, LU Ruyao, LIN Bin. Analysis of smart noise jamming against radar SLB and SLC[J]. Aerospace Electronic Countermeasures, 2007(5): 29-31, 35.
- [29] 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E辑:信息科学, 2006, 36(8): 891-901.
WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, et al. Mathematical principle of intermittent sampling and forwarding interference [J]. Science in China: Science of Technology, 2006, 36(8): 891-901.
- [30] GRECO M, GINI F, FARINA A, et al. Effect of phase and range gate pull-off delay quantisation on jammer signal[J]. IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation, 2006, 153(5): 454-459.
- [31] 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.
- [32] 卢云龙,李明,闫琐. 利用调频率匹配的DRFM欺骗干扰检测方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(5): 67-73.
LU Yunlong, LI Ming, YAN Suo. Method for detecting DRFM deception jamming based on LFM rate matching [J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(5): 67-73.
- [33] 卢云龙,李明,陈洪猛,等. 基于熵特征的DRFM有源欺骗干扰CFAR检测[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(4): 732-738.
LU Yunlong, LI Ming, CHEN Hongmeng, et al. CFAR detection of DRFM deception jamming based on entropy feature [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(4): 732-738.
- [34] 刘兴华,罗景青,王文涛. 相位量化DRFM欺骗干扰的自适应检测[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(6): 1302-1309.
LIU Xinghua, LUO Jingqing, WANG Wentao. Adaptive detection of phase quantization DRFM Deception Jamming [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(6): 1302-1309.
- [35] 定少浒,汤建龙. 基于SSA的DRFM速度欺骗干扰识别[J]. 雷达科学与技术, 2020. DOI: CNKI:SUN:LDKJ.0.2020-01-009.
DING Shaohu, TANG Jianlong. DRFM velocity deception jamming recognition based on singular spectrum analysis [J]. Radar Science and Technology, 2020. DOI: CNKI:SUN:LDKJ.0.2020-01-009.
- [36] 唐娟,冉智,赵源,等. 基于干扰机功率放大器特性的有源欺骗干扰识别方法[J]. 数据采集与处理, 2017, 32(4): 762-768.
TANG Juan, RAN Zhi, ZHAO Yuan, et al. Active deceptive jamming identification based on jammer's power amplifier character [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2017, 32(4): 762-768.
- [37] 熊英,刘旻,唐斌,等. 基于盒维数与L-Z复杂度的雷达复合干扰特征提取方法[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(6): 663-667.
XIONG Ying, LIU Min, TANG Bin, et al. Feature-extracting method for radar compound jamming signal based on box dimension and L-Z complexity [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2008, 23(6): 663-667.
- [38] DU Congju, ZHAO Yuan, WANG Lu, et al. Deceptive multiple false targets jamming recognition for linear frequency modulation radars[J]. The Journal of Engineering, 2019(21). DOI: 10.1049/joe.2019.0766.
- [39] TIAN X, TANG B, GUI G. Product spectrum matrix feature extraction and recognition of radar deception jamming [J]. International Journal of Electronics, 2013, 100(12): 1621-1629.
- [40] 李艳莉,田晓. 基于积谱矩阵局部二值模式的欺骗干扰识别[J]. 电讯技术, 2015, 55(4): 441-446.
LI Yanli, TIAN Xiao. Active deception jamming recognition based on local binary pattern of product spectrum matrix [J]. Telecommunications technology, 2015, 55(4): 441-446.
- [41] DU C, TANG B. Novel unconventional-active-jamming recognition method for wideband radars based on visibility graphs[J]. Sensors, 2019, 19(10): 2344.
- [42] 蒋莹,何明浩,郁春来,等. 一种对间歇采样转发干扰的识别新方法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(7): 152-156.
JIANG Ying, HE Minghao, YU Chunlai, et al. A novel method of interrupted-sampling repeater jamming recognition based on correlation dimension [J]. Fire and Command and Control, 2016, 41(7): 152-156.
- [43] 蒋莹,何明浩,郁春来,等. 基于盒维数的间歇采样转发干扰识别方法[J]. 现代防御技术, 2016, 44(2): 157-164.
JIANG Ying, HE Minghao, YU Chunlai, et al. Method of Interrupted-sampling repeater jamming recognition based on box dimension [J]. Modern defense technology, 2016, 44(2): 157-164.
- [44] 杨兴宇,阮怀林. 基于局部二值模式特征的新型干扰识别算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(7): 285-290, 296.
YANG Xingyu, RUAN Huailin. New jamming identification algorithm based on local binary pattern feature[J]. Computer Engineering, 2018, 44(7): 285-290, 296.
- [45] 杨兴宇,阮怀林. 基于时频图像Zernike矩特征的欺骗干扰识别[J]. 现代雷达, 2018, 40(2): 91-95.
YANG Xingyu, RUAN Huailin. A recognition method of deception jamming based on image Zernike moment feature of time-

- frequency distribution [J]. *Modern radar*, 2018, 40(2): 91-95.
- [46] 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. A recognition 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.
- [47] 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.
- [48] 皇甫堪, 陈建文, 楼生强. 现代数字信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
HUANG Fukan, CHEN Jianwen, LOU Shengqiang. *Modern digital signal processing* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.
- [49] 肖扬, 张颖康. 多维信号处理与多维系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
XIAO Yang, ZHANG Yingkang. *Multidimensional signal processing and multidimensional systems* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.
- [50] 李建勋, 唐斌, 吕强. 双谱特征提取在欺骗式干扰方式识别中的应用[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(3): 329-332.
LI Jianxun, TANG Bin, LV Qiang. Bispectrum feature extraction used in deceptive jamming modes recognition [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(3): 329-332.
- [51] 杨兴宇, 阮怀林. 基于双谱分析的雷达有源欺骗干扰识别[J]. *探测与控制学报*, 2018, 40(2): 122-127.
YANG Xingyu, RUAN Huailin. Active deception jamming identification method based on bispectrum analysis [J]. *Journal of Detection & Control*, 2018, 40(2): 122-127.
- [52] 史忠亚, 吴华, 沈文迪, 等. 基于双域特征的雷达欺骗干扰样式识别方法[J]. *火力与指挥控制*, 2018, 43(1): 136-140.
SHI Zhonya, WU Hua, SHEN Wwendi, et al. Method of radar deceptive jamming modes recognition based on two domains features [J]. *Fire and command and control*, 2018, 43(1): 136-140.
- [53] 杨少奇, 田波, 周瑞钊. 应用双谱分析和分形维数的雷达欺骗干扰识别[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(12): 128-135.
YANG Shaoqi, TIAN Bin, ZHOU Ruizhao. A jamming identification method against radar deception based on bispectrum analysis and fractal dimension[J]. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2016, 50(12): 128-135.
- [54] 彭荣硕, 董鹏曙, 孟藏珍. 基于 1.5 维谱的欺骗干扰识别方法[J]. *空军预警学院学报*, 2019, 33(5): 349-352.
PENG Rongshuo, DONG Pengshu, MENG Cangzhen. Spoofing jamming recognition method based on 1.5-dimensional spectrum [J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2019, 33(5): 349-352.
- [55] ZHOU Hongping, DONG Chengheng, WU Ruowu, et al. Feature fusion based on bayesian decision theory for radar deception jamming recognition [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 16296-16304.
- [56] 刘明骞, 高晓腾, 张俊林. 多类型的雷达有源干扰感知新方法[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(10): 103-108, 121.
LIU Mingqian, GAO Xiaoteng, ZHANG Junlin. A novel sensing method for multi-types of radar active jamming [J]. *Journal of Xi'an Jiao Tong University*, 2019, 53(10): 103-108, 121.
- [57] ARFAOUI S, MABROUK A B, CATTANI C. *Wavelet analysis: Basic concepts and applications* [M]. USA: CRC Press, 2021.
- [58] DAUBECHIES I. *Ten lectures on wavelets* [M]. USA: the Acoustical Society of America, 1993.
- [59] 田晓, 唐斌. 基于归一化小波分解能量比的雷达有源欺骗干扰识别[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(4): 416-420.
TIAN Xiao, TANG Bin. Active deception jamming recognition of radar based on normalized wavelet decomposition power ratio [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(4): 416-420.
- [60] PENG R, DONG P, MENG C. Deceptive jamming recognition based on wavelet entropy and RBF neural network [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1486(2): 022003.
- [61] 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 types base on multi-scale resemblance coefficient [J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(3): 19-22.
- [62] 施昉. 雷达有源欺骗干扰多尺度特征级识别技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
SHI Fang. A study on multi-scale feature-level identification of active deception jamming [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [63] 安莎, 鲁秋. 基于 FRFT 与盲分离的扩频通信 LFM 干扰抑制仿真[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(9): 150-154.
AN Sha, LU Qiu. Simulation of LFM Interference suppression in spread spectrum communication based on FRFT and blind

- separation [J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(9): 150-154.
- [64] 王晓君,薛琳博,王彦朋. 基于STFRFT的脉冲干扰抑制方法研究[J]. *河北科技大学学报*, 2021, 42(1): 15-21.
WANG Xiaojun, XUE Linbo, WANG Yanpeng. Research on impulse interference suppression method Based on short time fractional Fourier transform [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2021, 42(1): 15-21.
- [65] ANH P K, CASTRO L P, THAO P T, et al. New sampling theorem and multiplicative filtering in the FRFT domain[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2019, 13(5): 951-958.
- [66] 彭荣硕,董鹏曙,孟藏珍. 基于FRFT域归一化方差比的压制干扰识别方法[J]. *空军预警学院学报*, 2019, 33(3): 195-198.
PENG Rongshuo, DONG Pengshu, MENG Cangzhen. Method of active blanket jamming recognition based on FRFT domain normalized variance ratio [J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2019, 33(3): 195-198.
- [67] 余康林,匡华星,王超宇. 基于多维特征的密集转发式干扰识别方法[J]. *雷达科学与技术*, 2021, 19(4): 448-454, 466.
YU Kanglin, KUANG Huaxing, WANG Chaoyu. A recognition method of dense repeater jamming based on multiple features [J]. *Radar Science and Technology*, 2021, 19(4): 448-454, 466.
- [68] 毕金亮. 雷达有源欺骗干扰高效识别算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
BI Jinliang. Study of high probability recognition methods for radar active deception jamming [D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [69] 许畅. 复杂电磁环境下干扰的仿真与识别[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
XU Chang. Simulation and identification of jamming in complex electromagnetic environment [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2020.
- [70] XU C, YU L, WEI Y, et al. Research on active jamming recognition in complex electromagnetic environment [C]// *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP)*. USA: IEEE, 2019.
- [71] MANGASARIAN O L, MUSICANT D R. *Data discrimination via nonlinear generalized support vector machines*[M]. US: Springer, 1970.
- [72] 周志华. 机器学习 [M]. 北京:清华大学出版社, 2016.
ZHOU Zhihua. *Machine learning* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [73] 杨少奇,田波. 频谱弥散和切片组合欺骗式干扰的识别算法[J]. *探测与控制学报*, 2016, 38(6): 62-67.
YANG Shaoqi, TIAN Bo. Identification algorithms of SMSP and C & I [J]. *Journal of Detection & Control*, 2016, 38(6): 62-67.
- [74] 闫琰,李明,卢云龙. 基于多特征联合处理的灵巧噪声干扰识别[J]. *雷达科学与技术*, 2013, 11(5): 455-461.
YAN Yan, LI Ming, LU Yunlong. Multi-feature-based identification of smart noise jamming [J]. *Radar Science and Technology*, 2013, 11(5): 455-461.
- [75] 袁功霖,侯静,陈义,等. 基于双谱综合特征提取的距离-速度同步拖引干扰识别方法研究[J]. *上海航天*, 2017, 34(6): 109-114.
YUAN Gonglin, HOU Jing, CHEN Yi, et al. Identification of range-velocity gate pull off jamming based on integrated feature extraction of bispectrum [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(6): 109-114.
- [76] 张忠民,王雨鑫. 基于自适应的SSD算法和1.5维谱的新型雷达干扰识别[J]. *应用科技*, 2021, 48(5): 54-59.
ZHANG Zhongmin, WANG Yuxin. New radar jamming recognition based on adaptive SSD algorithm and 1.5-dimensional spectrum [J]. *Applied Science and Technology*, 2021, 48(5): 54-59.
- [77] 李杰然. 基于频谱稀疏度的灵巧噪声干扰识别方法[J]. *无线电工程*, 2021, 51(05): 373-376.
LI Jieran. Method of smart noise jamming recognition based on sparsity in frequency domain[J]. *Radio Engineering*, 2021, 51(5): 373-376.
- [78] 李思文,张亮,张翔宇,等. 基于脉内特征的灵巧类干扰分组识别[J]. *舰船电子工程*, 2021, 41(5): 68-71, 118.
LI Siwen, ZHANG Liang, ZHANG Xiangyu, et al. Group recognition of smart noise jamming based on pulse internal features [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(5): 68-71, 118.
- [79] 范伟. 雷达有源干扰信号特征分析与识别算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2007.
FAN Wei. Research on feature analysis and recognition algorithm of radar active jamming signal[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2007.
- [80] BENGIO Y, AARON C, PASCAL V. Representation learning: A review and new perspectives [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(8): 1798-1828.
- [81] WANG Y, SUN B, WANG N. Recognition of radar active-jamming through convolutional neural networks [J]. *The Journal of*

Engineering, 2019, 2019(21): 7695-7697.

- [82] ZHAO Q, LIU Y, CAI L, et al. Research on electronic jamming identification based on CNN [C]//Proceeding of 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). USA: IEEE, 2019.
- [83] LI M, REN Q, WU J. Interference classification and identification of TDCS based on improved convolutional neural network [J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1651: 012155.
- [84] LIU Q, ZHANG W. Deep learning and recognition of radar jamming based on CNN [C]//Proceeding of 2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). Hangzhou, China: [s.n.], 2019: 208-212.
- [85] SHAO G, CHEN Y, WEI Y. Convolutional neural network-based radar jamming signal classification with sufficient and limited samples [J]. IEEE Access, 2020(8): 80588-80598.
- [86] SHAO G, CHEN Y, WEI Y. Deep fusion for radar jamming signal classification based on CNN [J]. IEEE Access, 2020(8): 117236-117244.
- [87] LIN J, FAN X. Radar active jamming recognition based on recurrence plot and convolutional neural network [C]//Proceeding of 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). USA: IEEE, 2021: 1511-1515.
- [88] 郭治锐, 鲁军, 刘磊, 等. 基于 AlexNet 的雷达干扰识别方法研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(9): 49-53.
GUO Zhirui, LU Jun, LIU Lei, et al. Research on radar interference recognition method based on AlexNet [J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(9): 49-53.
- [89] 尚东东, 张劲东, 杜盈, 等. 基于 SPWVD 和改进 AlexNet 的复合干扰识别[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(3): 577-586.
SHANG Dongdong, ZHANG Jindong, DU Ying, et al. Composite jamming recognition based on SPWVD and improved AlexNet [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2021, 36(3): 577-586.
- [90] MAO W, WANG H, ZHANG S, et al. A novel deceptive jamming method via frequency diverse array [C]//Proceeding of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. USA: IEEE, 2019: 2369-2372.
- [91] 明靖鸥. 基于频控阵的雷达干扰技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
MING Jingou. Study of radar jamming technology based on frequency diverse array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [92] 王文钦, 邵怀宗, 陈慧. 频控阵雷达: 概念、原理与应用[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 1000-1011.
WANG Wenqin, SHAO Huaizong, CHEN Hui. Frequency diverse array radar: Concept, principle and application [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(4): 1000-1011.
- [93] 王玉军, 赵国庆, 胡曦明. 基于延迟不变的 LFM 雷达移频干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1861-1863.
WANG Yujun, ZHAO Guoqing, HU Ximing. Method of shift-frequency jamming to LFM radar based on delay invariance [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8): 1861-1863.
- [94] 王玉军, 赵国庆. 对 LFM 雷达的 N 阶 SSC 盲移频干扰算法[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(4): 70-74.
WANG Yujun, ZHAO Guoqing. Blind N -th-order SSC shift-frequency jamming to LFM radar [J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(4): 70-74.
- [95] 赵忠凯, 周文彬, 李虎. 基于非整数阶 SSC 盲移频的 LFM 雷达干扰技术[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2824-2831.
ZHAO Zhongkai, ZHOU Wenbin, LI Hu. LFM radar jamming technology based on non-integer order SSC blind frequency shift [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(10): 2824-2831.

作者简介:



周红平(1975-),女,副研究员,研究方向:雷达信号处理、干扰识别,E-mail:cian-gela@hfut.edu.cn。



王子伟(1998-),男,硕士研究生,研究方向:干扰识别。



郭忠义(1981-),通信作者,男,教授,博士生导师,研究方向:涡旋雷达系统及应用、复杂电磁环境等,E-mail:guozhongyi@hfut.edu.cn。

(编辑:张黄群)