

引用格式:袁硕,拓世英,尚文秀,等.电子侦察脉冲列中重频信息提取与应用综述[J].信息对抗技术,2023,2(6):17-28. [YUAN Shuo, TA Shiying, SHANG Wenxiu, et al. Extraction and application of pulse repetition frequency information in radar pulse trains: a survey [J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(6):17-28. (in Chinese)]

电子侦察脉冲列中重频信息提取与应用综述

袁硕,拓世英,尚文秀,罗政昊,刘章孟*

(国防科技大学电子科学学院,湖南长沙 410073)

摘要 脉冲重复间隔(PRI)或脉冲重复频率(PRF)是雷达辐射源最稳健的特征参数之一,体现了雷达辐射脉冲的时序规律。在功能上,重频既决定了雷达单值测距范围,又影响不模糊测速区域大小。现代雷达常采用多个重频值和多种调制类型以满足不同功能的需求。在非合作机制的电子侦察领域,PRI指2个连续脉冲上升沿的间隔,是重要的脉冲描述字(PDWs)之一。由PRI衍生的雷达重频信息包括典型重频值集、重频调制类型、重频参数时序模式,均需要从复杂的电子侦察脉冲列中提取之后才能应用至分选、识别等数据处理任务。从电子侦察系统中重频信息提取与应用的体制与技术难点出发,综述了3种重频信息提取与应用的研究现状,并对重频信息提取与应用的进一步发展做出了展望。

关键词 雷达侦察;重频信息提取;典型重频值;重频调制类型识别;重频时序模式提取

中图分类号 TN 957

文章编号 2097-163X(2023)06-0017-17

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.06.002

Extraction and application of pulse repetition frequency information in radar pulse trains: a survey

YUAN Shuo, TA Shiying, SHANG Wenxiu, LUO Zhenghao, LIU Zhangmeng*

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Pulse repetition interval (PRI) or pulse repetition frequency (PRF) is one of the most robust parameters of radars, reflecting the temporal pattern of radar pulses. In terms of functionality, PRI not only determines the distance of radar single value ranging, but also affects the size of the non-ambiguous area of speed measurement. Modern radar often uses multiple PRI values and multiple PRI modulation types to meet the requirements of different functions. In the field of non-cooperative electronic reconnaissance, PRI refers to the interval between the rising edges of two consecutive pulses, which is one of important pulse description words (PDWs). PRI information includes typical PRI value sets, PRI modulation types, the PRI pattern, which need to be extracted from complex radar pulse trains before being applied to data processing tasks such as deinterleaving and recognition. This article starts from the system and technical difficulties of extracting and applying PRI information in electronic reconnaissance systems, surveys the research status of three PRI information extraction and application, and makes prospects for further development of PRI information extraction and application.

Keywords radar reconnaissance; extraction of PRI information; typical PRI value; identification of PRI modulation type; PRI pattern extraction

0 引言

电子侦察系统通过截获电磁信号来收集和分析有关对方辐射源的特性、行为意图等信息。随着用频装备和监测站台种类的增加以及各种雷达辐射源的广泛部署,电子侦察系统截获的数据也随之向大数据方向发展。电子侦察数据的处理也由早期人为操作分析转变为由计算机控制、快速分析和反应,以应对高量级的侦察数据和高要求的战场时效性^[1]。

电子侦察系统通过测量将雷达信号数据转变为全脉冲数据,每一个脉冲数据由脉冲到达时间(time of arrival, TOA)、脉宽(pulse width, PW)、载频(radio frequency, RF)以及由 TOA 计算得到的脉冲重复间隔(pulse repetitive interval, PRI)等脉冲描述字(pulse descriptive word, PDW)表达^[2]。其中, PRI 取倒数可表达为脉冲重复频率(pulse repetition frequency, PRF),能够统计表征脉冲时序规律,是对雷达功能具有较高特异性的时序参数,比如,雷达的重频间隔参数决定了雷达的探测距离,而且重复频率在一定程度上反映了雷达执行功能的威胁程度^[3]。

目前,从电子侦察脉冲列中获取的重频信息

包括典型重频值集合、重频调制方式以及重频时序模式等。其中,典型重频值可作为脉冲分选与雷达型号识别的参数。识别出脉冲列中出现的重频调制类型能在一定程度上反映雷达的工作体制和性能。近年来,针对前两者在应用于复杂、重叠的大数据而表现出的不足^[4],有学者提出重频时序模式的概念。重频时序模式表示脉冲列中雷达的最小功能单元,因而在长时间电子侦察脉冲列中重复出现。从电子侦察脉冲列中提取的雷达重频时序模式能清晰地解析复杂的电磁大数据,并且支持实时的脉冲分选与工作模式识别等应用^[5-6]。

1 重频信息提取及技术难点

1.1 重频信息提取与应用体制

电子侦察按照场景可划分为情报侦察和支援侦察。在数据处理方面,情报侦察通过离线处理侦察数据获取辐射源情报;支援侦察在情报侦察成果的辅助下,强调实时收集、处理侦察数据,并报告辐射源威胁等级^[7-9],将典型重频值、重频调制类型识别、重频时序模式代入,两者的关系如图 1 所示,其中 $\text{Inf}(x)$ 表示物理量所包含的信息。

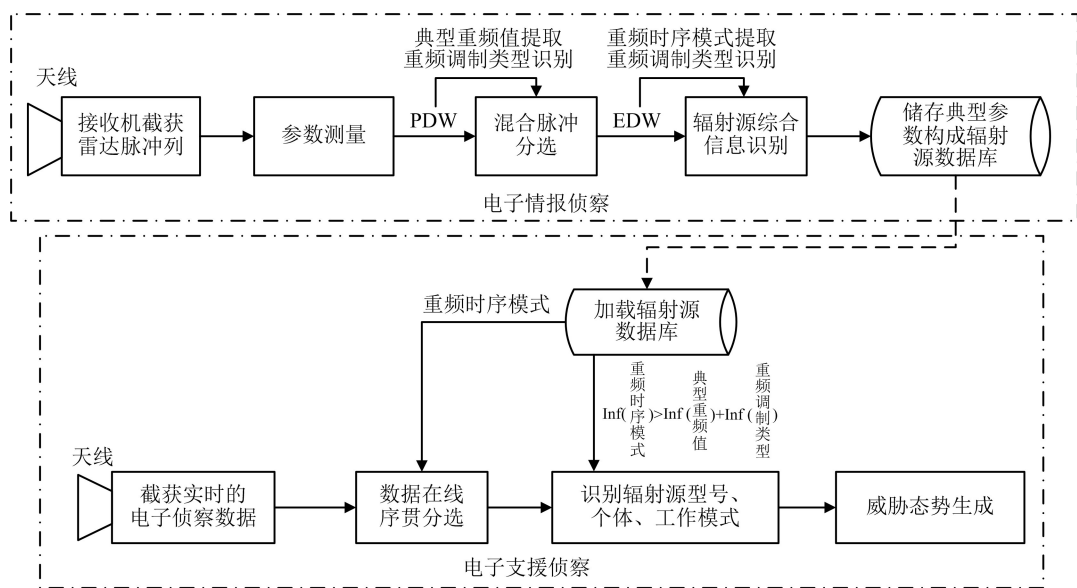


图 1 电子侦察系统数据处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of data processing in electronic reconnaissance system

大部分情况下,重频值的提取是在脉冲分选之前,而重频时序模式的提取则是在脉冲分选之

后。在电子侦察数据处理环节中,重频信息提取属于情报侦察,无时效性要求,可以从历史侦察数据中提取得到需要的重频参数,并结合其他参数信息分析雷达的工作模式,以形成参数与辐射源的对应关系,补充辐射源信息库。而在进行支援侦察时,对实时接收的脉冲列,基于已经提取得到的重频参数进行匹配识别,可以支持实时的信号分选和雷达型号及工作模式识别^[10]。由于重频时序模式涵括了其余 2 种重频信息,因此在应用时具有更好的效果。

1.2 现阶段重频信息提取与应用的难点

电子侦察截获信号的条件是接收机波束与雷达波束在时域、频域、空域、能域上对准,然而要做到完全对准却极其困难,因此,电子侦察脉冲列与雷达辐射脉冲列相比,存在各种数据噪声,导致电子侦察脉冲列中的重频信息难以提取与应用^[11]。

以现阶段主流的多功能雷达(multi-function radar, MFR)为例,雷达按照特定规律辐射脉冲组合以执行目标搜索、跟踪等任务。为了对 MFR 信号的过程有效建模,VISNEVSKI^[12]首先提出了 MFR 雷达信号的层次化模型,用雷达字、雷达短语、雷达句子 3 个层次描述多功能雷达信号,如图 2 所示,其中雷达字是雷达功能实现的最小构成单元,其重频信息即是本文所指的重频时序模式。

现阶段,各种型号雷达广泛部署,其中不乏具备先进技术体制和灵活多样工作模式的认知雷达^[13-15]。经过空间传播,电子侦察接收机在复杂的电磁环境中截获到密集的脉冲信号。对于单部雷达,接收机只能截获到部分对准波束的脉冲信号,而且这部分波束信号中仍然存在大量数据失真问题,比如:接收机灵敏度过高导致的干扰脉冲、因传播损耗而丢失的部分脉冲信号^[4],以及多辐射源信号混叠^[16]和少数脉冲分裂等。电子侦察接收机的真实截获信号则是多辐射源信号经传播损耗叠加的结果,如图 3 所示,其中,RS_i(radiation source)表示第 *i* 个辐射源,RS_i-Mode_j表示该辐射源的第 *j* 种工作模式。由图 3 可以看出,雷达知识的重频信息已经湮没在混乱复杂的电子侦察脉冲列中,且侦收条件越差,越难以提取与应用重频信息。

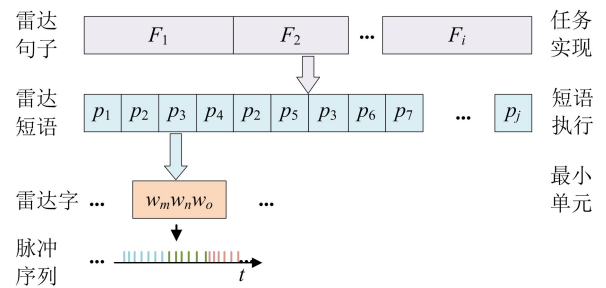


图 2 多功能雷达辐射脉冲列的层次化模型
Fig. 2 Hierarchical model of MFR pulse trains

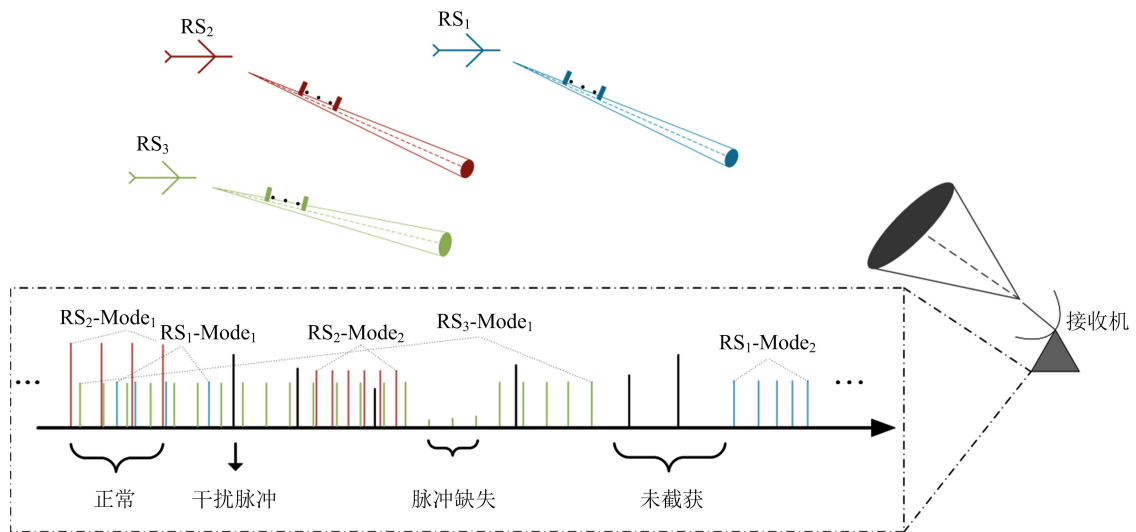


图 3 电子侦察截获脉冲列示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the interception pulse train

2 典型重频值提取与应用研究现状

对雷达脉冲列典型重频值的提取是基于 PRI

信息实现交错脉冲列分选的一个重要环节^[17]。目前,典型重频值提取的方法主要包含直方图法、变换法和深度神经网络提取法等。

PRI 直方图法是基于电子侦察脉冲列的 TOA 序列计算多级差值并统计得到不同级的 PRI 直方图,通过设置一定阈值从直方图中直接提取脉冲列中出现的典型重频值。目前经典的方法包括:TOA 差值直方图法^[18]、积累差值直方图法(cumulative difference histogram, CDIF)^[19]和序贯差值直方图法(sequential difference histogram, SDIF)^[20]。其中,TOA 差值直方图法对所有到达时间差(differential time of arrival, DTOA)进行统计能够一次性提取多个 PRI;CDIF 从一阶差值开始,逐阶计算差值直方图,每计算一阶就与之前阶得到的差值直方图进行积累并通过门限检测 PRI 值;SDIF 不再积累差值直方图,而是将每一阶差值直方图直接与门限比较以提高计算效率和性能。国内外学者在经典的直方图法的基础上又提出了许多改进算法,文献[21]提出了一种基于聚类和 PRI 变换的改进 SDIF 算法,能够适应抖动范围更大的重频类型和丢失脉冲更多的电子侦察脉冲列。文献[22]基于小波变换改进了直方图法门限的选取。由于对 TOA 序列做多级差值,直方图法能够对侦察脉冲列中的干扰脉冲具有一定适应能力。然而,在直方图上,高阶 PRI 谐波的直方图统计值也可能较大,导致真实 PRI 值难以确定。

变换法主要是指 PRI 变换法和平面变换法。1993 年, NELSON^[23]提出来的 PRI 变换法通过计算时间差值的自相关序列,并引入相位因子将其变换至频谱中,检测谱峰即可提取真实的 PRI 值,变换的表达式为:

$$D(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=0}^{n-1} \delta(\tau - t_n + t_m) \exp\left(\frac{2\pi j t_n}{t_n - t_m}\right) \quad (1)$$

式中, N 为序列长度, t 为脉冲到达时间, $\tau > 0$ 。自相关函数仍然出现高次谐波,而添加相位因子 $\exp[2\pi j t_n / (t_n - t_m)]$ 能够有效降低谐波影响。然而,相比于直方图法,变换法的计算量更大。

之后,为了提高 PRI 变换法对抖动重频的估计,文献[24]提出使用具有时间位移的重叠时间仓做 PRI 变换,但对于参差、滑变重频, PRI 变换法无法直接提取其重频值^[25-26]。近年来,为了提高 PRI 变换方法的计算速度并方便其工程应用,文献[27]提出短时 PRI 变换法,以实时查看辐射源脉冲列中重频变化。文献[28]结合 PRI 变换

原理和运算复杂度模型,抑制 PRI 高阶谱并压缩分辨率,降低了运算成本。与 PRI 变换法提出的同一时期,以胡来招为代表的我国学者提出平面变换法以实现重频信息变化的可视化,进而提取重频值^[29-34]。其原理是分段截取脉冲 TOA 序列,并以一定方式显示在二维平面上,从而可自动提取或观察出雷达的重频规律及重频值。但该方法计算量过大且难以较好适应 PRI 剧烈变化的情况,工程实践的难度也较大。

近年来随着深度学习的兴起,深度神经网络也被引入对典型重频值进行提取。2019 年, LIU 等^[35]在进行脉冲分选时,使用循环神经网络(recurrent neural network, RNN)学习电子侦察脉冲列中的重频信息,并能给出对 PRI 预测估计值。基于此,文献[36]用改进的长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络实现对 PRI 的更稳定提取。文献[37]用 LSTM transformer 深度挖掘电子侦察脉冲列中的时间序列特征并估计辐射源的重频参数。然而,深度神经网络方法对训练数据有较高要求,难以满足数据量较少和数据条件较差场景下的应用需求。

以上研究多是从电子侦察脉冲列中提取出辐射源的典型重频值或者周期值用于分选多辐射源混合脉冲列。事实上,典型重频值还被作为辐射源的典型参数用于匹配识别雷达类型与功能,是目前一线人工分析电子侦察数据的重要参数。另外,通过对脉间重频值进行精确提取,还有可能实现同型辐射源不同个体之间的相互区分^[3,38]。

3 重频调制类型识别与应用研究现状

重频调制类型识别是指从分选后的电子侦察脉冲列中提取时序特征并构建分类器以判断固定重频、参差重频、滑变重频、抖动重频等重频类型^[7],目前主要方法是神经网络与其他机器学习分类算法。

为了识别雷达脉冲列的重频调制类型, NOONE^[39]在 20 世纪 90 年代对脉冲到达时间序列做二次差分后,通过多层线性感知神经网络分类器以及线性预测自适应神经元滤波器,实现了对复杂重频类型的识别。2018 年,文献[40]利用卷积神经网络(convolutional neural networks,

CNN)的局部滤波和最大池化所产生的小位移不变性来生成分类器,无需提取特征,直接输入脉冲间隔序列,能够对存在较多丢失脉冲和干扰脉冲的脉冲列中的 7 种重频调制类型进行识别。2019 年,文献[41]采用深度卷积神经网络,并提出了一种新的带有减法中值的单位最大值归一化方法,提供了更快的训练和更低的训练误差。文献[42]在 CNN 之后加入 LSTM 网络来分析 PRI 序列的时间结构,取得了较好的识别效果。2020 年,文献[43]建议用循环神经网络和注意力机制解决 PRI 调制类型识别问题,并搭建了基于 GRU 单元的网络结构,能够识别 6 种具有高丢失脉冲率和干扰脉冲比例的重频调制类型。文献[44]用较为完整的深度神经网络方法实现了电子侦察脉冲列的重频调制类型识别,提高了识别效率和准确率。近年来,很多学者希望结合图像识别技术识别重频调制类型。文献[45]为了提高低信噪比情况下重频类型识别准确率,将 6 种重频类型的自相关函数转换为图像,构造一种压缩和激励网络,以识别不同重频类型的图像。而文献[46]构造了脉冲序列的递归图并用 YOLO 神经网络识别不同的重频调制类型。

除了用神经网络作为分类器,其他机器学习方法或者直接分类方法也具有较好的重频调制类型识别效果。普遍的思路是先提取脉冲列数据中的信号特征,然后构建分类器对重频调制类型分类。2006 年,文献[47]从雷达脉冲列中构建了信号的二维特征向量,然后通过支持向量机设计分类器,进而实现 PRI 类型识别,并在简化分类器的同时提高了识别性能。2007 年,文献[48]提取固定、抖动、参差、滑变、重频分组 5 种重频类型的特征作为贝叶斯网络的输入节点,实现重频类型的识别。2009 年,文献[49]在分析 PRI 序列自相关函数形状特征的基础上,对 PRI 进行层次聚类,实现了对固定、参差、抖动、滑变、正弦调制及驻留与切换 6 种 PRI 调制类型的分类识别。2010 年,KAUPPI 等^[50]针对多功能雷达动态变化的重频调制类型,基于小波变换构建了稳定的特征集,并利用特征集以分层方式对电子侦察脉冲列分类,实现对重频调制类型的准确识别^[51]。同年,文献[52]将雷达信号到达时间序列符号化,通过从符号序列中提取多个关键特征参数来区分每种重频调制类型。2016 年,文献[53]提出一

种基于小波分解的重频调制类型特征集并构建了分层分类器,特征集中的 3 个小波特征覆盖了常见重频调制类型,尤其对抖动、参差等重频类型识别十分有效。2019 年,文献[54]提出使用决策树选择信息特征并识别电子侦察脉冲列中的重频调制类型的方法。

重频调制类型与雷达的工作模式和雷达类型密切相关,比如,机载多普勒雷达和火控雷达会用不同数值范围的固定重频脉冲搜索不同距离的目标,用参差、抖动的重频来解模糊或者反侦察抗干扰^[55-56]。提取电子侦察脉冲列中出现的重频调制类型能够计算雷达的探测距离,并进一步判断雷达类型和所执行的功能,以确定辐射源的威胁等级、辅助计划下一步行动。

4 重频时序模式提取与应用研究现状

现阶段,电子侦察数据处理面临许多新型雷达,这些雷达能够用相同重频类型但不同重频数值的脉冲组合执行不同的功能,而且不同功能脉冲组合的参数可能存在重叠^[57]。面对复杂的侦察数据,仅获取离散典型重频值和单一的重频类型已经无法满足电子支援侦察(electronic support measure, ESM)系统的应用要求。近年部分学者用可靠性更强的、比重频典型值与重频调制类型信息维度更高的重频时序模式作为雷达描述参数^[4,58]。然而由于电子侦察脉冲列中存在大量数据噪声,因此提取高维度的重频时序模式具有更大的困难。下面介绍现阶段重频时序模式提取与应用的研究过程与成果。

4.1 重频时序模式的提取

2005 年,VISNEVSKI 等^[12,59]率先研究、建立了多功能雷达信号的分层模型,并提出了一个句法模型来详细分析多功能雷达的脉冲列,吸引了大量学者对脉冲列中存在的结构信息进行研究。然而,该研究基于已知的多功能雷达脉组剖析脉冲列中分层结构,并不是从没有先验信息的电子侦察角度进行脉冲序列的被动分析,而且只能适合简单的脉冲多普勒体制雷达重频类型。2017 年,欧健^[60]基于多功能雷达的层次化模型,将雷达字替换成脉冲样本图,以适应更多先进的雷达重频类型,开展对雷达的行为表征、建模、辨识和预测研究,但他仍没有关注已知脉组结构的来源问题。2018 年,宗士强等^[58]通过对 PRI 值

的离散化聚簇分析得到 PRI 特征值的频繁项集,然后通过对 PRI 特征的关联挖掘,提取出辐射源的重频时序模式。近年,国防科技大学刘章孟团队在雷达重频结构分析领域取得了一些新的研究成果^[4],针对常规体制雷达的电子侦察脉冲列,该团队提出了基于脉冲列频繁项提取与扩展的重频时序模式提取方法,从电子侦察脉冲列中反演、重建了雷达的高维重频时序模式,在简单参差重频且数据噪声较小的脉冲列中有较高的分析准确率。之后,文献^[61]进一步引入 IS 量度,在频繁项提取与扩展方法基础上,提出新的重频时序模式解析过程终止准则,实现了在不进行分选情况下,提取出交错脉冲列中各辐射源的重频时序模式。但是以上 2 种方法在分析过程中存在门限等主观参数的设置,而且需要截获较多的脉冲,不是一种广泛适用的方法。针对多功能雷达脉冲列,刘章孟团队引入信息论与编码理论,提出用语义编码分析多功能雷达脉冲列中的时序模式,提取得到脉冲列中的脉组结构^[62]。该成果具有较强的理论性,但其模型中没有考虑实际电子侦察脉冲列中的干扰脉冲和漏脉冲等实际因素,因此不能直接应用于实际雷达侦察场景。在此基础上,文献^[63]针对常规重频体制雷达,提出了能够适应较高丢失脉冲率和干扰脉冲比例的基于语义编码的重频时序模式提取方法。之后,文献^[6]针对两层结构的多功能雷达,改进语义编码模型,实现对脉组重频时序模式的提取。2022 年,文献^[64]从另一个角度实现了重频时序模式的提取。文献^[65]在基于分步变门限孤立森林的电子侦察脉冲列分段的基础上,对脉冲段分类并基于相似的波形单元重构了辐射源的重频时序模式。

除上述常规方法之外,深度学习也在重频时序模式提取中取得了新的成果。尽管很多深度学习方法并没有直接针对雷达重频时序模式进行提取,但其在脉冲分选、工作模式识别等脉冲序列处理问题中恰恰是学习了脉冲列中雷达的重频时序模式。文献^[35]较早使用循环神经网络挖掘和提取脉冲列中的长期时序模式,通过大量脉冲列数据训练搭建好的循环神经网络以学习数据中的重频规律,可以对脉冲列进行预测,进而达到脉冲列分选、去噪的目的。文献^[66]提出了一种基于去噪自编码器的分选方

法,该方法通过去噪自编码器学习脉冲列中感兴趣的模式从而生成输出序列,尤其在高数据噪声的环境下,分选性能相较于传统分选方法具有较大优势。针对多功能雷达的脉冲容易被分选为不同雷达脉冲的问题,2021 年,文献^[67]建立了一个层次化深度学习模型来描述多功能雷达脉冲列,并在此基础上,提出一种脉冲迭代分选方法和一种并行分选方法,该方法对数据噪声具有较强的鲁棒性。文献^[68]将每个辐射源的时序结构进行数学表达,并将脉冲分选问题抽象为成本函数的最小化,通过一个训练好的机器翻译神经网络使代价函数最小化,从而实现脉冲分选。2022 年,文献^[69]用 GRU 搭建循环神经网络自监督学习框架,学习电子侦察脉冲列中的多功能雷达重频时序模式,并且用脉冲序列预测的方式将神经网络提取得到的重频时序模式解析化。

4.2 重频时序模式应用

尽管脉冲重频时序模式提取处于初步兴起阶段,但作为能够区别雷达及其工作模式的高维特征,重频时序模式在许多研究中展现出很好的应用潜力。很多文献在假设重频时序模式已知的情况下开展其应用研究,且多集中在序贯脉冲分选和多功能雷达脉组识别方面。

在分选方面,重频时序模式可以代替以往的 PRI 典型值集合并开发分选算法以适应更复杂重频调制类型的脉冲列,提升分选的可靠性。LIU^[5]通过对雷达脉冲列的高阶重频时序模式进行精细建模,建立自动机模型实现了对交错脉冲列的在线、并行分选,分选性能有了较大提升,时效性问题得到解决。

利用先验的多功能雷达脉组时序信息可以在电子侦察脉冲列中对脉组进行识别(也称为雷达字识别),这是实现多功能雷达工作模式在线识别的基础。VISNEVSKI 等^[70]在建立了多功能雷达信号层次化模型之后,用“雷达字”(即有限数目脉冲的固定排列)来描述辐射源特征并提出了 2 种雷达字识别方法:第一种是通过建立雷达字的隐藏马尔可夫(hidden Markov model, HMM)模板,并利用改进的 Viterbi 算法,将脉冲与雷达字模板匹配,从受数据噪声污染的脉冲序列中识别雷达字;第二种是对第一种方法的简化,即事件驱动方法(event-driven)^[12],通过定义

匹配、滑动、遗漏和虚假4种事件,根据雷达字模板的量化编码序列与脉冲TOA序列的关系,依次确定脉冲列中事件的类型,并计算雷达字得分,最后得分最高的雷达字作为识别结果。这2种方法对于静态参数的雷达字得到了较好的结果。然而,这些方法依赖于经验参数且识别结果很不稳定。2010年,刘海军^[71]在其博士论文中提出一种数据库级、脉冲级和编码序列级联合匹配的雷达字识别方法,解决了测量参数是范围区间或存在缺失等情况下的雷达字识别问题,在包含漏脉冲和干扰脉冲的数据环境下仍有较好的效果。2019年,王勇军^[72]提出改进的事件驱动算法,通过对量化编码方法进行改进,并融合脉宽信息,实现了更为准确的雷达字识别。文献[6]将提取得到的脉组结构作为自动机的状态转移函数,建立了脉组结构自动机模型,提出了基于脉组结构自动机的脉冲列中脉组片段分析算法,实现了脉冲列中脉组片段的序贯识别。

5 总结与展望

5.1 重频信息提取与应用研究总结

重频信息是反映雷达辐射源状态的一种稳健参数,从电子侦察大数据中提取典型重频值、重频调制类型和重频时序模式并加以应用是电子对抗领域一项意义重大的课题。经过20多年的发展,重频信息挖掘已经融合了大数据、机器学习、统计学等多门学科,取得了许多重要成果。大体可以分为传统方法和深度学习的方法。

传统方法是将雷达脉冲数据本身所具有的特征结合现有的数据分析工具而提出的,在重频信息提取与应用中更具有普适性,出现了直方图法^[19-20]、PRI变换法^[23]、自相关法^[49]、自动机方法^[6]等经典重频信息提取与应用方法。深度学习方法对大数据处理具有明显的优势,能够挖掘人工无法得到的特征^[73]。目前,深度学习在重频信息提取中应用仍受限,其主要原因一是所建立的训练模型只能执行特定任务,而且数据必须针对模型进行特定的预处理,对数据和任务背景适用性较差;二是电子侦察类任务是无源被动的,难以给出深度神经网络训练所需要的数据标签;三是深度学习挖掘数据特征不具有解释性,在重频

时序模式提取任务中给出的结果难以进行脉冲粒度的人工验证。

5.2 研究展望

雷达技术与侦察技术一直在相互斗争中前进与发展^[74]。随着雷达辐射源的更新换代和雷达工作模式的日益复杂,重频信息提取与应用方面还有待深入研究。

5.2.1 重频信息提取的普适方法

目前,各种重频信息提取方法多种多样,不同重频类型的脉冲列需要采用不同方法加以分析,因而需要在重频信息提取之前事先判断脉冲列的重频类型,进而选择合适的重频信息提取方法。这一分析处理模式显著增大了重频信息提取的难度,所以亟需研究一种对各种重频类型均适用的重频信息提取方法。

5.2.2 利用重频信息对电子侦察历史数据、高密度数据的迭代分析

每天数亿条电子侦察数据的积累给数据存储和处理带来了很大压力^[75]。重频信息作为电子侦察脉冲列的时序信息,反映着数据的结构以及时序模式中隐含的雷达功能,能够为历史侦察数据的压缩提供重要的数据结构信息^[76]。另一方面,直接对高密度的数据进行分选与分析对算力要求大,且准确性无法保证^[77]。利用重频信息所表达的结构可以对高密度数据进行历史辐射源数据分选,进一步对未知辐射源数据进行分析。基于重频信息对电子侦察历史数据和密集数据进行压缩和迭代分析,也是一个值得探索的课题。

5.2.3 未知辐射源重频信息的在线提取

为了提高电子情报的时效性,必须深入研究电子侦察脉冲列的在线和实时处理问题。目前在线处理是将已提取的辐射源参数应用至电子支援系统,对未知辐射源和工作模式只能实现重频调制类型的简单识别,而更重要的重频时序模式在线提取还需要进一步研究。

5.2.4 重频信息的融合提取

电子侦察数据中存在的显著数据噪声是影响重频信息提取准确性的主要因素。通常而言,电子侦察接收机对雷达辐射源执行目标跟踪、制导等高威胁工作模式的脉冲数据的截获概率很低,仅利用单部或单一平台接收机截获的数据很难完整、全面捕获和分析辐射源的重频信息。通

过融合陆基、空基、天基、海基等多平台接收机所截获的电子侦察脉冲列,能够有效弥补单一类型传感器的侦察能力局限^[78],提升重频信息提取的完整性。

6 结束语

重频信息提取与应用是电子侦察数据分析的重要内容。本文从重频信息提取与应用的体系结构出发,根据重频信息样式的不同特点,剖析了典型重频值、重频调制类型和重频时序模式等不同信息的提取与应用研究现状。从现状来看,典型重频值的提取主要依赖经典方法;深度神经网络在重频调制类型分析与识别问题中正在逐渐成为主流方法;重频时序模式提取最难但价值更高。未来重频信息的提取将向多平台融合、高实时性和强适应性等方向发展,重频信息也将进一步应用在历史数据的压缩和实时侦察数据分析中。

参 考 文 献

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
ZHAO Guoqing. Principles of radar countermeasures [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 何颢, 严建钢, 于超. 舰艇编队电子侦察的大数据应用分析[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(9): 76-79.
HE Xie, YAN Jiangang, YU Chao. Application analysis of big data in the field of naval fleet's electronic reconnaissance[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(9): 76-79. (in Chinese)
- [3] 王聪, 宋新超, 王星宇. 基于最小二乘法的固定脉冲重复间隔精确估计方法[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(5): 87-89.
WANG Cong, SONG Xinchao, WANG Xingyu. Accurate estimation method for fixed PRI based on least square method[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2017, 40(5): 87-89. (in Chinese)
- [4] LIU Z M, KANG S Q, CHAI X M. Automatic pulse repetition pattern reconstruction of conventional radars [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2021, 15(5): 500-509.
- [5] LIU Z M. Online pulse deinterleaving with finite automata[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(2): 1139-1147.
- [6] YUAN S, XU T, ZHANG M, et al. Extraction and sequential recognition of MFR pulse groups in intercepted pulse trains [J]. IEEE Access, 2022, 10: 106988-106998.
- [7] 周一宇, 安玮, 郭福成, 等. 电子对抗原理与技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
ZHOU Yiyu, AN Wei, GUO Fucheng, et al. Principles and technology of electronic countermeasures [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [8] 阿达米. 电子战原理与应用[M]. 王燕, 朱松, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017.
DAVID A. Principles and applications of electronic warfare[M]. Translated by WANG Yan, ZHU Song. Beijing: Electronic Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [9] 刘培国. 电磁环境基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
LIU Peigu. Fundamentals of electromagnetic environment[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 马蓝宇. 基于先验信息库的多源混合雷达信号快速识别模型[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
MA Lanyu. Fast recognition model of multi-source mixed radar signal based on prior information database [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 李翰林. 电子情报侦察系统仿真与评估[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
LI Hanlin. Simulation and evaluation of electronic intelligence system[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [12] VISNEVSKI N. Syntactic modeling of multi-function radars[D]. Hamilton: McMaster University, 2005.
- [13] HAYKIN S. Cognitive radar: a way of the future[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1): 30-40.
- [14] GURBUZ S Z, GRIFFITHS H D, CHARLISH A, et al. An overview of cognitive radar: past, present, and future[J]. IEEE Aerospace Electronic Systems Magazine, 2019, 34(12): 6-18.
- [15] SHAGHAGHI M, ADVE R S, DING Z. Multifunction cognitive radar task scheduling using Monte Carlo tree search and policy networks [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(12): 1437-1447.
- [16] 吴阳勇, 李文海, 孙伟超, 等. 支援侦察吊舱接收机重叠脉冲数据提取与处理[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(3): 660-666.
WU Yangyong, LI Wenhai, SUN Weichao, et al. Extraction and processing of overlapping pulse data for reconnaissance pod receiver[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50(3): 660-666. (in Chinese)

- [17] 王慧娟, 苏焕程, 张君, 等. 一种针对高脉冲丢失率的 PRI 估计方法[J]. 航天电子对抗, 2021, 37(2): 29-32.
WANG Huijuan, SU Huancheng, ZHANG Jun, et al. A PRI estimation method for high pulse missing rates[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 37(2): 29-32. (in Chinese)
- [18] 王杰贵, 靳学明. 现代雷达信号分选技术综述[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(2): 104-108.
WANG Jiegui, JIN Xueming. Survey on deinterleaving technique for modern radar signal[J]. Radar Science and Technology, 2006, 4(2): 104-108. (in Chinese)
- [19] MARDIA H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. IEE Proceedings, F. Radar and Signal Processing, 1989, 136(4): 149-154.
- [20] MILOJEVIC D J, POPOVIC B M, et al. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. IEE Proceedings, F. Radar and Signal Processing, 1992, 139(1): 98-104.
- [21] LIU Y C, ZHANG Q Y. Improved method for deinterleaving radar signals and estimating PRI values[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(5): 506-514.
- [22] 赵长虹, 赵国庆. 一种新的重频分选检测门限选择算法[J]. 现代雷达, 2003, 25(8): 30-33.
ZHAO Changhong, ZHAO Guoqing. New algorithm for selecting the detect on threshold in deinterleaving pulse trains problem[J]. Modern Radar, 2003, 25(8): 30-33. (in Chinese)
- [23] NELSON D. Special purpose correlation functions for improved signal detection and parameter estimation [C]//Proceedings of 1993 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. [S.l.]: IEEE, 1993: 73-76.
- [24] NISHIGUCHI K, KOBAYASHI M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 407-421.
- [25] 王兴颖, 杨绍全. 基于脉冲重复间隔变换的脉冲重复间隔估计[J]. 西安电子科技大学学报, 2002, 29(3): 355-359.
WANG Xingying, YANG Shaoquan. Estimation of pulse repetition intervals based on PRI transform[J]. Journal of Xidian University, 2002, 29(3): 355-359. (in Chinese)
- [26] 周斌. 基于 PRI 的脉冲序列去交错方法[J]. 电子对抗技术, 2002, 17(6): 24-27.
ZHOU Bin. PRI-based algorithms for deinterleaving of radar pulses [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2002, 17(6): 24-27. (in Chinese)
- [27] 奚银, 夏新凡, 吴迎春, 等. 基于短时 PRI 变换的多目标分选和识别算法[J]. 制导与引信, 2020, 41(4): 27-32.
XI Yin, XIA Xinfan, WU Yingchun, et al. A novel algorithm for multi-signal deinterleaving and recognition based on short-time PRI transform[J]. Guidance & Fuze, 2020, 41(4): 27-32. (in Chinese)
- [28] 李斌, 李杨, 彭平. 基于 PRI 变换快速雷达信号分选方法[J]. 电子信息对抗技术, 2023, 38(2): 42-50.
LI Bin, LI Yang, PENG Ping. A fast radar signal sorting method based on PRI transform[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2023, 38(2): 42-50. (in Chinese)
- [29] 胡来招. 雷达侦察接收机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
HU Laizhao. Design of radar reconnaissance receiver [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [30] 赵仁健, 龙德浩, 熊平. 密集信号分选的平面变换技术[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 77-82.
ZHAO Renjian, LONG Dehao, XIONG Ping. Plane transformation for signal deinterleaving in dense signal environment [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(1): 77-82. (in Chinese)
- [31] 赵仁健, 熊平. 大脉冲重复周期调幅信号的压缩平面变换技术[J]. 四川大学学报(自然科学版), 1997, 34(2): 172-176.
ZHAO Renjian, XIONG Ping. The compression plane transformation technique of amplitude modulation signal with large pulse repeat period [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 1997, 34(2): 172-176. (in Chinese)
- [32] 樊甫华, 张万军, 谭营. 基于累积变换的周期性对称调制模式的快速自动搜索算法[J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1266-1270.
FAN Fuhua, ZHANG Wanjun, TAN Ying. A fast and automatic searching algorithm of periodic and symmetric patterns based on accumulative transformation technique [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1266-1270. (in Chinese)
- [33] 刘鑫, 司锡才. 基于平面变换的雷达脉冲信号分选算法[J]. 应用科技, 2008, 35(10): 12-16.
LIU Xin, SI Xicai. An algorithm for deinterleaving of radar pulse signals through plane transformation [J]. Applied Science and Technology, 2008, 35(10): 12-16. (in Chinese)
- [34] 孟建. 用于信号处理的重复周期变换[J]. 电子信息对

- 抗技术, 1998, 13(1): 1-7.
- MENG Jian. PRI transformation for signal processing [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 1998, 13(1): 1-7. (in Chinese)
- [35] LIU Z M, PHILIP S Y. Classification, denoising and deinterleaving of pulse streams with recurrent neural networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(4): 1624-1639.
- [36] 姜在阳, 孙思月, 李华旺, 等. 一种基于 JANET 模型的雷达信号分选方法[J]. *中国科学院大学学报*, 2021, 38(6): 825-831.
- JIANG Zaiyang, SUN Siyue, LI Huawang, et al. A method for deinterleaving based on JANET[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 38(6): 825-831. (in Chinese)
- [37] ZHANG Z W, ZHU M T, LI Y J, et al. Joint recognition and parameter estimation of cognitive radar work modes with LSTM-transformer[J]. *Digital Signal Processing*, 2023, 140: 104081.
- [38] 叶浩欢, 柳征, 姜文利. 基于自适应谱峰搜索的脉冲重复间隔最大似然估计[J]. *宇航学报*, 2012, 33(5): 635-641.
- YE Haohuan, LIU Zheng, JIANG Wenli. Maximum-likelihood pulse repetition interval estimation based on adaptive periodogram peak searching[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(5): 635-641. (in Chinese)
- [39] NOONE G P. A neural approach to tracking radar pulse trains with complex pulse repetition interval modulations[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Neural Information Processing*. [S. l. : s. n.], 1999: 1075-1080.
- [40] LI X Q, HUANG Z T, WANG F H, et al. Toward convolutional neural networks on pulse repetition interval modulation recognition[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(11): 2286-2289.
- [41] HEKRDLA M, HERMÁNEK A. Deep convolutional neural network classifier of pulse repetition interval modulations[C]//*Proceedings of 2019 International Radar Conference*. [S. l. : s. n.], 2019: 1-4.
- [42] NUHOĞLU M A. Classification of radar signal features in electronic warfare with convolutional long-short time memory[C]//*Proceedings of the 26th Signal Processing and Communications Applications Conference*. [S. l. : s. n.], 2018: 1-4.
- [43] LI X Q, LIU Z M, HUANG Z T. Attention-based radar PRI modulation recognition with recurrent neural networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 57426-57436.
- [44] AZHDARI S M H, MAHMOODZADEH A, KHISHE M, et al. Pulse repetition interval modulation recognition using deep CNN evolved by extreme learning machines and IP-based BBO algorithm[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 123: 1-17.
- [45] WEI S Q, QU Q Z, WU Y T, et al. PRI modulation recognition based on squeeze-and-excitation networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(5): 1047-1051.
- [46] WANG P C, LIU W S, LIU Z. Recognition of dynamically varying PRI modulation via deep learning and recurrence plot[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2023, 34(4): 815-826.
- [47] RONG H N, JIN W D, ZHANG C F. Application of support vector machines to pulse repetition interval modulation recognition[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications*. [S. l. : s. n.], 2006:1187-1190.
- [48] 王健鹏, 初翠强, 吴京, 等. 一种基于贝叶斯网络的雷达重频模式识别方法[J]. *电子信息对抗技术*, 2007, 22(2): 14-17.
- WANG Jianpeng, CHU Cuiqiang, WU Jing, et al. Approach to radar pulse repetition intervals modulation recognition based on Bayesian networks[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2007, 22(2): 14-17. (in Chinese)
- [49] AHMADI M, MOHAMEDPOUR K. A new method for recognizing pulse repetition interval modulation [C]//*Proceedings of 2009 International Conference on Signal Processing Systems*. [S. l. : s. n.], 2009: 142-147.
- [50] KAUPPI J P, MARTIKAINEN K S. An efficient set of features for pulse repetition interval modulation recognition[C]//*Proceedings of 2007 IET International Conference on Radar Systems*. [S. l. : s. n.], 2007: 319-323.
- [51] KAUPPI J P, MARTIKAINEN K, RUOTSALAINEN U. Hierarchical classification of dynamically varying radar pulse repetition interval modulation patterns[J]. *Neural Networks*, 2010, 23(10): 1226-1237.
- [52] SONG K H, LEE D W, HAN J W, et al. Pulse repetition interval modulation recognition using symbolization[C]//*Proceedings of 2010 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*. [S. l. : s. n.], 2010:540-545.
- [53] GENOL K, NURAY A, KARA A, et al. A wavelet-based feature set for recognizing pulse repetition interval modulation patterns[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2016, 24(4): 3078-3090.

- [54] CHIROV D S, KANDAUROVA E O. Synthesis of informative features for recognition of the type of pulse repetition interval modulation of signals from radars [C]//Proceedings of 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. [S.l. :s. n.], 2019:1-6.
- [55] RICHARDS M A, SCHEER J, HOLM W A. Principles of modern radar: basic principles [M]. New York: Scitech, 2013.
- [56] MELVIN W L, SCHEER J A. Principles of modern radar: advanced techniques [M]. Rijeka: Scitech, 2013.
- [57] GRECO M S, GINI F, STINCO P, et al. Cognitive radars: on the road to reality; progress thus far and possibilities for the future[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(4): 112-125.
- [58] 宗士强, 张桂林. 基于频繁项集挖掘的雷达 PRI 模式提取方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2018, 9(2): 34-38.
ZONG Shiqiang, ZHANG Guilin. Radar PRI pattern extraction method based on frequent itemset mining [J]. Command Information System and Technology, 2018, 9(2): 34-38. (in Chinese)
- [59] VISNEVSKI N, KRISHNAMURTHY V, HAYKIN S, et al. Multi-function radar emitter modelling: a stochastic discrete event system approach[C]//Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. [S.l.]:IEEE, 2003: 6295-6300.
- [60] 欧健. 多功能雷达行为辨识与预测技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2017.
OU Jian. Research on behavior recognition and prediction techniques against multi-function radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [61] 康仕乾, 刘章孟. 常规体制雷达交错脉冲列中的重频模式自动解析 [J]. 信号处理, 2021, 37(11): 2069-2076.
KANG Shiqian, LIU Zhangmeng. Automatic reconstruction of regular radar pulse repetition patterns based on interleaved pluse train[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(11): 2069-2076. (in Chinese)
- [62] 刘章孟, 袁硕, 康仕乾. 多功能雷达脉冲列的语义编码与模型重建[J]. 雷达学报, 2021, 10(4): 559-570.
LIU Zhangmeng, YUAN Shuo, KANG Shiqian. Semantic coding and model reconstruction of multifunction radar pulse train[J]. Journal of Radars, 2021, 10(4): 559-570. (in Chinese)
- [63] YUAN S, KANG S Q, SHANG W X, et al. Reconstruction of radar pulse repetition pattern via semantic coding of intercepted pulse trains[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(1): 394-403.
- [64] 蒋能, 张红敏, 李一鸣. 基于分步变门限孤立森林的 MFR 波形单元无监督提取[J]. 信息对抗技术, 2022, 1(3): 76-85.
JIANG Neng, ZHANG Hongmin, LI Yiming. Unsupervised extraction of MFR waveform units based on step-by-step variable threshold isolated forests[J]. Information Countermeasure Technology, 2022, 1(3): 76-85. (in Chinese)
- [65] JIANG N, ZHANG H M. Classification and model reconstruction method of non-cooperative multifunctional radar waveform unit[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2023, 17(3): 408-421.
- [66] LI X Q, LIU Z M, HUANG Z T. Deinterleaving of pulse streams with denoising autoencoders[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(6): 4767-4778.
- [67] LIU Z M. Pulse deinterleaving for multifunction radars with hierarchical deep neural networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(6), 3585-3599.
- [68] ZHU M T, WANG S F, LI Y J. Model-based representation and deinterleaving of mixed radar pulse sequences with neural machine translation network[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(3): 1733-1752.
- [69] YUAN S, LIU Z M. Temporal feature learning and pulse prediction for radars with variable parameters [J]. Remote Sensing, 2022, 14(21): 5439.
- [70] VISNEVSKI N, HAYKIN S, KRISHNAMURTHY V, et al. Hidden Markov models for radar pulse train analysis in electronic warfare[C]//Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [S.l.]:IEEE, 2005: 597-600.
- [71] 刘海军. 雷达辐射源识别关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
LIU Haijun. Researches on identification key technology for radar emitter[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [72] 王勇军. 一种改进的事件驱动的 MFR 雷达字提取方法[J]. 现代雷达, 2019, 41(3): 17-20.
WANG Yongjun. Novel approach of radar word extraction for MFRs based on event-driven method[J]. Modern Radar, 2019, 41(3): 17-20. (in Chinese)
- [73] 陈伟宏, 安吉尧, 李仁发, 等. 深度学习认知计算综述 [J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 1886-1897.
CHEN Weihong, AN Jiyao, LI Renfa, et al. Review

on deep-learning-based cognitive computing[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43 (11): 1886-1897. (in Chinese)

- [74] 张明友. 雷达系统[M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2018.

ZHANG Mingyou. Radar systems[M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2018. (in Chinese)

- [75] 刘康, 何明浩, 韩俊, 等. 基于多传感器的雷达对抗侦察数据融合算法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (1): 101-107.

LIU Kang, HE Minghao, HAN Jun, et al. Data fusion algorithm for radar countermeasures and reconnaissance based on multi-sensor[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45 (1): 101-107. (in Chinese)

- [76] 陈亚坤, 王泉. 电子对抗侦察历史数据分析方法[J]. 电子信息对抗技术, 2019, 34(6): 23-26.

CHEN Yakun, WANG Xiao. Electronic countermeasure reconnaissance historical data analysis[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2019, 34(6): 23-26. (in Chinese)

- [77] 吕新正, 张敏. 高密度环境下的脉冲分选技术研究[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(1): 50-53.

LYU Xinzheng, ZHANG Min. The technology research of pulse sorting based on high density environment[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2020, 36 (1): 50-53.

- [78] 何欢, 李高云, 旷生玉, 等. 基于 HBase 的电磁侦察大数据存储设计[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(3): 22-26.

HE Huan, LI Gaoyun, KUANG Shengyu, et al. Electromagnetic reconnaissance big data storage design based on HBase[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022, 38(3): 22-26. (in Chinese)

作者简介

袁 硕

男, 1997 年生, 博士研究生, 研究方向为电磁大数据分析

E-mail: ysyuanshuo@126.com



拓世英

男, 1984 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为智能感知与电磁信息处理

E-mail: tashiying@nudt.edu.cn



尚文秀

男, 1998 年生, 硕士研究生, 研究方向为电磁大数据分析

E-mail: 851506204@qq.com



罗政昊

男, 2001 年生, 硕士研究生, 研究方向为电磁大数据分析

E-mail: luozhenghao18@nudt.edu.cn



刘章孟

男, 1984 年生, 博士, 研究员, 研究方向为电磁大数据分析与智能电子对抗

E-mail: liuzhangmeng@nudt.edu.cn



责任编辑 董 莉