

雷达辐射源信号分选研究进展

隋金坪^① 刘 振^{*②} 刘 丽^{*③} 黎 湘^②

^①(海军大连舰艇学院作战软件与仿真研究所 大连 116016)

^②(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

^③(国防科技大学系统工程学院 长沙 410073)

摘要: 雷达辐射源信号分选是雷达信号侦察的关键技术之一,同时也是战场态势感知的重要环节。该文系统梳理了雷达辐射源信号分选的主流技术,从基于脉间调制特征、基于脉内调制特征、基于机器学习的雷达辐射源信号分选3个角度阐述了目前雷达辐射源信号分选工作的主要研究方向及进展,并重点阐释了基于深度神经网络、数据流聚类最新分选技术的原理与特点。最后,对现有雷达辐射源信号分选技术的不足进行了总结并对未来趋势进行了预测。

关键词: 雷达辐射源; 脉冲分选; 脉冲流; 机器学习; 深度学习; 数据流聚类

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2022)03-0418-16

DOI: 10.12000/JR21147

引用格式: 隋金坪, 刘振, 刘丽, 等. 雷达辐射源信号分选研究进展[J]. 雷达学报, 2022, 11(3): 418–433. doi: 10.12000/JR21147.

Reference format: SUI Jinping, LIU Zhen, LIU Li, *et al.* Progress in radar emitter signal deinterleaving[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(3): 418–433. doi: 10.12000/JR21147.

Progress in Radar Emitter Signal Deinterleaving

SUI Jinping^① LIU Zhen^{*②} LIU Li^{*③} LI Xiang^②

^①(Operational Software and Simulation Research Institute, Dalian Naval Academy, Dalian 116016, China)

^②(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^③(College of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Radar emitter signal deinterleaving is a key technology for radar signal reconnaissance and an essential part of battlefield situational awareness. This paper systematically sorts out the mainstream technology of radar emitter signal deinterleaving. It summarizes the main research progress in radar emitter signal deinterleaving from three directions: interpulse modulation characteristics-based, intrapulse modulation characteristics-based, and machine learning-based research. Particularly, this paper focuses on explaining the principle and technical characteristics of the latest deinterleaving technology, such as neural network-based and data stream clustering-based techniques. Finally, the shortcomings of the current radar emitter deinterleaving technology are summarized, and the future trend is predicted.

Key words: Radar emitter; Pulse deinterleaving; Pulse stream; Machine learning; Deep learning; Data stream clustering

收稿日期: 2021-10-07; 改回日期: 2021-12-16; 网络出版: 2022-01-07

*通信作者: 刘振 zhen_liu@nudt.edu.cn; 刘丽 lilyliu_nudt@163.com

*Corresponding Authors: LIU Zhen, zhen_liu@nudt.edu.cn; LIU Li, lilyliu_nudt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金(62022091)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62022091)

责任主编: 普运伟 Corresponding Editor: PU Yunwei

1 引言

雷达辐射源信号分选，又称雷达辐射源信号去交错，是指从随机交错的脉冲流中分离出各个雷达脉冲列的过程^[1]。雷达辐射源信号分选是雷达信号侦察处理的关键技术之一，同时也是重要的基础前提，只有从高密度、高混合度的脉冲流中正确分离出各个雷达脉冲信号，才能高质量完成后续的信号处理工作，因此，雷达辐射源信号分选技术直接影响着雷达信号侦察处理，是电子战场态势感知的核心步骤之一，严重影响着后续的决策判断。

然而，随着各类型雷达的广泛采用，电磁环境空前复杂，雷达辐射源信号分选也面临着前所未有的挑战，主要体现在3个方面：一是雷达辐射源数量多，导致脉冲密度激增。当前，典型的信号环境密度已突破每秒百万量级甚至达到千万量级，同时各辐射源脉冲的交叠，非合作源脉冲信号难以截获或稀缺等现实挑战日益凸显；二是雷达信号调制日益复杂且参数多变。传统脉冲(如固定载频、重频以及无调制脉冲)在雷达信号中所占比例减小，伴随而来的是线性、非线性调频，相位、频率编码，复合调制雷达信号的逐渐增多，以及参数捷变甚至随机变化，信号的反侦察，抗干扰的能力极大增强；三是信息战场的瞬息万变对雷达辐射源信号分选与识别的实时性、准确性的需求日益增强。同时，电子战正向多域联合、协同作战发展，快速的雷达信号分选是实现多域信息融合的重要前提。

客观来讲，电磁环境的日益复杂推动着雷达辐射源信号分选技术向前快速发展。从20世纪70年代相关研究兴起开始到今天，雷达辐射源信号分选始终是国内外相关研究的重点研究课题，大批新颖研究成果不断涌现。然而，这些工作比较分散，往往基于某种特定场景或针对特定雷达辐射源分选而展开，缺乏较为系统的梳理与总结。本文系统地介绍了雷达辐射源信号分选技术的特点，全面梳理

了国内外关于雷达辐射源信号分选技术的相关文献，重点对近年来以机器学习、深度学习、数据流处理为技术支撑的雷达辐射源信号分选工作进行了总结分析，并对雷达辐射源信号分选工作尚存问题以及未来发展方向进行了概括与预测。本文结构如下：第2节系统阐述雷达辐射源信号分选的研究进展，重点对最新的基于深度神经网络、数据流聚类的分选技术进行阐释归纳。第3节对目前雷达辐射源信号分选的不足进行概括并对未来可能发展的趋势进行预测。最后，第4节对全文进行总结。

2 雷达辐射源信号分选研究现状与趋势

雷达辐射源信号分选问题的相关研究国际上兴起于20世纪70年代，我国学者的研究始于20世纪80年代^[2,3]。如图1所示，雷达辐射源信号分选是指从随机交错的脉冲流中分离出各个雷达脉冲列的过程，其本质是“匹配”问题。

几十年来，研究者基本都是沿着“匹配”思路解决该类问题：即利用脉间或脉内，不同域内测量或提取的特征参数，或与模板匹配，或彼此匹配，从而将最相似的脉冲视为同一辐射源产生的脉冲序列，否则视为不同辐射源产生的脉冲，来完成脉冲流的去交错。整体上讲，雷达辐射源信号分选的研究工作可以主要分为3个研究方向：即基于脉间调制特征的雷达辐射源分选、基于脉内调制特征的雷达辐射源分选和基于机器学习的雷达辐射源分选，如图2所示。

需要指出的是，传统意义上信号的分选和识别是两个串行的过程。然而，随着电磁环境的持续复杂，同时，随着信号特征提取等处理技术的创新发展，信号的分选与识别已经没有严格意义上的区分，往往在对雷达信号分选的同时就实现了对信号的识别；反之，信号的识别也时常作为信号的主分选手段在分选过程中扮演重要角色，同时，识别结果反馈到分选中，又提高了分选的效率 and 准确率^[4]。因

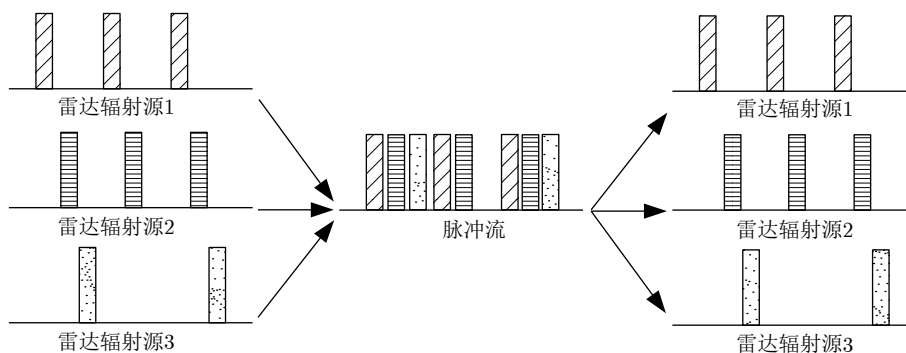


图1 雷达辐射源分选示意图

Fig. 1 Diagram of radar emitter signal deinterleaving

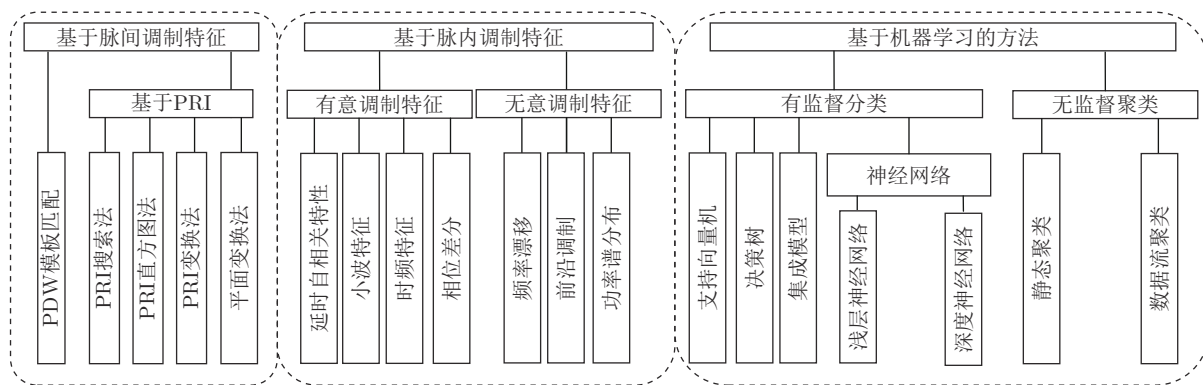


图 2 雷达辐射源信号分选发展脉络

Fig. 2 The development of radar emitter signal deinterleaving

此，分选和识别已经不再是两个独立的过程，也不再是简单的串行关系。目前，已有一大批成果围绕利用脉内调制特征，并结合神经网络等分类器完成信号分选。为了全面梳理分选技术发展，本文在涵盖传统分选技术的同时，也将这些不可忽视的新的分选识别交叉技术考虑在内。本文不再对分选和识别进行特别区分。

2.1 基于脉间调制特征的雷达辐射源信号分选

雷达侦察系统接收到脉冲信号后，参数检测与测量模块首先对脉冲的到达时间(Time of Arrival, TOA)，载波频率(Radio Frequency, RF)，脉冲宽度(Pulse Width, PW)，脉冲幅度(Pulse Amplitude, PA)以及到达方向(Direction of Arrival, DOA)等主要参数进行测量。上述的TOA, RF, PW, PA和DOA是脉冲描述字(Pulse Descriptive Word, PDW)最典型的5个瞬时参数，即经测量可直接获得的参数。除了瞬时参数，经多次测量或通过计算可得到的参数为二次参数，最主要的代表是脉冲重复间隔(Pulse Repetitive Interval, PRI)。无论是瞬时参数，还是二次参数，它们的本质都属于脉间调制特征，PDW各参数的物理意义如图3所示。经典的雷达辐射源分选就是基于这些脉间调制特征展开的，具体可分为模板匹配法和基于PRI两个研究方向。

2.1.1 模板匹配法

20世纪70年代，电磁环境比较简单，辐射源数量稀少且种类相对固定。在此背景下，模板匹配法应运而生，该方法由Saperstein等人^[5]提出。模板匹配方法的思路比较简单，即预先建立雷达辐射源主要特征参数数据库，然后通过接收信号的PDW参数进行量测并与数据库中的参数信息进行比对，从而对参数相同或相近的脉冲进行分选。这种方法操作相对简单，适用于辐射源较少的场景。然而，随着雷达信号发射技术的迅猛发展，雷达体制极大丰富，该方法在数据库建立的完备性方面遭遇重大

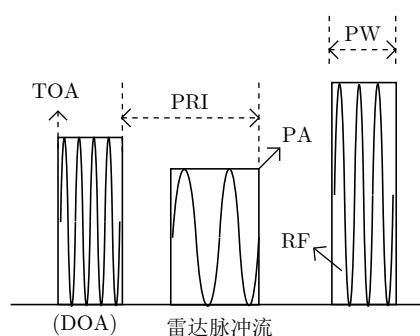


图 3 脉冲描述字各参数的物理意义

Fig. 3 The physical meaning of each parameter of PDW

挑战：首先是对复杂多变的雷达信号，如参数捷变信号、参数随机信号，难以建立完备的字典；其次是对广泛存在的非合作辐射源，其信号参数等先验信息难以获取，因此难以预先在字典中建立相应模板；最后随着脉内调制技术的发展成熟，单纯依靠PDW参数的分选呈现出分选力匮乏的现象。

2.1.2 基于PRI的雷达辐射源信号分选

在PDW常规的脉冲描述字中，TOA参数比其他参数容易测，而且对于一个脉冲序列而言，一般其PRI是相对比较稳定的。同时，PRI参数是TOA参数的一级差，因此，雷达辐射源信号分选的另一个庞大研究分支是基于PRI的分选。典型的方法包括PRI搜索法、PRI直方图、PRI变换、平面变换法^[6]，总体来说，这些方法基本围绕如何在交叠脉冲流中，估计、提取出比较合理的PRI的问题上展开的。

2.1.2.1 PRI搜索法(试探法)

又称动态关联法^[7]。该方法的处理流程一般是选择两个脉冲分别作基准脉冲与参考脉冲(例如前两个脉冲)，假设基准脉冲与参考脉冲的到达时间可分别表示为 TOA_{base} 和 TOA_{ref} ($TOA_{ref} > TOA_{base}$)，则计算二者之间的差值 $DTOA = TOA_{ref} - TOA_{base}$ ， $DTOA$ 若处于合理区间，则将 $DTOA$ 视为一个准

PRI。随后,按照准PRI以一定的PRI容差(考虑实际测量等误差)进行试探性的扩展搜索,逐一将符合准则的脉冲挑选出来,直到搜索出符合预设个数的脉冲。挑选出来的脉冲序列视为一个雷达的脉冲串,将此脉冲串进行后续处理,若无法挑选出符合的雷达脉冲串或已经挑选出某准PRI下的脉冲串,则重新选取参考脉冲,重复此过程。PRI搜索法的关键点之一在于PRI容差的选择。

PRI搜索法在辐射源类型少、PRI参数固定的简单电磁环境中可以达到不错的分选效果,比较容易实现。但其存在不可忽略的缺点,该方法每一次只挑选一部雷达脉冲列,且要对脉冲流不断筛选,这造成该方法的计算成本高。同时,该方法对复杂电磁环境很难适应。特别是当面对信号密集、信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)低或者信号本身具有PRI捷变、随机调制等复杂情况时,该方法的准确率下降明显。

2.1.2.2 PRI直方图法

PRI搜索法若想取得较高的准确度,关键在于如何确定合理的PRI。前述的PRI搜索法显然是比较耗时的,因此相关学者围绕如何在交叠的脉冲流中提取出最可能的准PRI值开展了大量的工作,PRI直方图法成为基于脉间调制特征的雷达信号分选中的主流研究方法,比较成熟的方法包括TOA差值直方图、积累差直方图(Cumulative Difference Histogram, CDIF)^[8]以及时序差直方图(Sequential Difference Histogram, SDIF)^[9]。

整体上,这些PRI直方图的基本原理是基于各个脉冲的TOA信息,计算不同级TOA差值,并通过统计得到不同级的PRI直方图,通过设置一定的合理阈值从直方图提取出比较合理的PRI值,再通过搜索法进行分选。PRI直方图法的3种典型算法(即TOA差值直方图、CDIF、SDIF)的不同之处主要体现在如何用直方图对准PRI的提取上。需要指出的是,从20世纪90年代CDIF(1989年)以及SDIF(1992年)被提出至今的30年间,相关科研人员围绕PRI直方图进行脉冲分选开展了很丰富的工作。这些工作基本上是以CDIF或SDIF为基础,结合具体实际问题,在如门限函数选择、预处理进行脉冲稀释等方面做了主要改进。尽管这些方法从一定程度提升了分选的准确率,但均是基于直方图分析展开的。

2.1.2.3 PRI变换法

与PRI直方图方法同一时期,Nelson^[10]从谱变换角度对脉冲流可能的PRI进行提取。具体地,该方法将脉冲流的各脉冲TOA建模为冲击函数的和,即

$$g(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - t_n) \quad (1)$$

将式(1)进行如下变换可得到一种PRI谱图,即

$$D(\tau) = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=0}^{n-1} \delta(\tau - t_n + t_m) \exp[2\pi i t_n / (t_n - t_m)] \quad (2)$$

其中, $\tau > 0$,这种变换称为PRI变换,由式(2)分析可知,这种变换类似于自相关函数,同时引入了因子 $\exp[2\pi i t_n / (t_n - t_m)]$,称为相位因子。自相关函数挖掘了脉冲序列的相关性,使得在真实PRI及其整数倍处会出现峰值,即出现谐波,而相位因子的引入很大程度上抑制了谐波的影响,代价是增加了运算开支,PRI变换法比PRI直方图法在运算量上加大了很多。PRI变换法依靠自相关函数提取PRI值,因此当雷达发射脉冲信号PRI具有非恒定特性时(如PRI参差、PRI抖动等),PRI变换法的效果将大幅下降。针对此问题,相关学者从不同角度对该方法进行了改进^[11-14],一定程度扩展了PRI变换法向具有非恒定PRI特性的脉冲流的应用,但应该指出的是,无论PRI变换法还是改进方法都很难适应PRI复杂变化的雷达信号分选,这是自相关方法的天然“缺陷”所决定的。

2.1.2.4 平面变换法

与前述方法同一时期,以国内胡来招为代表的学者陆续提出了平面变换法^[15-17]。该方法的本质是基于脉冲流的TOA信息将全脉冲以一定方式映射到二维平面,然后对平面宽度进行一定的调整,通过观察或自动提取获得重频规律,从而完成脉冲重复分选。文献^[15]通过将信号分段截取再逐行排列,得到平面矩阵,通过调整变化得到信号累积特征曲线。而文献^[16]提出了周期性对称调制模式的自动搜索算法,避免了人工观察提取变换特征曲线带来的准确率低,以及效率慢等缺点。文献^[17]在平面变换法的基础上提出提取脉冲瞬时PRI算法,该算法不需要调节平面显示宽度,具有一定的可操作性。但本质上平面变换法都是假定同一雷达信号脉冲的PRI的变化不剧烈,因此平面变换法很难适应复杂电磁环境,而且很难对具有复杂调制的脉冲进行分选。

综上所述,基于PRI分选的方法本质是利用了TOA信息,对脉冲流中各脉冲的TOA信息进行分析,如统计分析、谱分析、变换分析等,试图挖掘隐藏在TOA信息之下的各脉冲序列的PRI。但这种方式仅适用于脉冲密度小、辐射源少且PRI参数比较固定的场景中。当前,随着雷达信号调制技术的

不断升级, PRI捷变、随机调制已经成熟^[18,19], 而且脉冲密度持续增加, 基于PRI分选的方法已经难以适应复杂电磁环境, 处理性能也大幅下降。

无论模板匹配还是基于PRI的方法本质都是利用了脉间调制特征进行分选。然而, 脉间调制特征在当今电磁环境中, 对各辐射源的脉冲区分能力已经十分有限。因此, 越来越多的学者将研究重点从脉间调制特征转移到脉内调制特征的提取上, 试图通过挖掘区分度更高的脉内调制特征来完成对交叠脉冲流的分选。

2.2 基于脉内调制特征的雷达辐射源信号分选

随着雷达体制的日益丰富, 常规脉冲雷达信号在电磁环境中的比重逐渐降低, 线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)、非线性调频(Non-Linear Frequency Modulation, NLFM)、相位编码等各类调制信号增加。日益复杂的电磁环境不断地给基于脉间调制特征的雷达辐射源信号分选方法带来诸多严峻的考验, 相关研究者开始着力于提取更稳定、更细微、参数交叠更少、区分度更高的脉内调制特征来解决这一问题^[20]。因此, 脉内调制特征提取成为雷达辐射源信号分选研究的一个庞大研究分支。

雷达脉内调制特征, 按照调制方式的有意与否, 一般可分为有意调制特征(Intentional Modulation on Pulse, IMOP)和无意调制特征(Unintentional Modulation on Pulse, UMOP)。

2.2.1 基于有意调制特征的雷达辐射源信号分选

有意调制特征是由于雷达波形设计者为了满足某些特别的功能, 人为地对信号进行相应调制, 包括幅度、频率、相位调制及两种或两种以上的混合调制等, 从而使雷达信号在信号包络、频率分布、相位分布、幅度分布、能量分布等呈现的特征。通过对这些能够反映雷达信号本质信息的脉内调制特征进行分析研究, 对于有效识别雷达调制信号类型和掌握敌方雷达态势具有重要意义。因此, 基于有意调制特征的雷达辐射源信号分选是目前雷达信号分选研究领域的主要研究方向之一, 每年围绕该方向有大量的研究成果问世。概括说来, 其主要核心研究思路是: 通过研究高效的脉内特征提取手段, 尽可能地提取一些区分度高、分选力强的特征来完成信号分选。因此, 如何提取特征、提取何种特征成为该方向两个关键研究问题。

早期由于计算机硬件水平有限以及信号调制类型普遍比较简单, 研究者主要在时域、频域对信号特征进行提取, 比较典型的特征提取方法有时域自相关法、相位差分法、调制域分析法、谱相关法和

数字中频法等^[21]。例如, 文献^[22]利用调制域分析法分析信号相邻两个上升零点之间的相位差, 一定程度实现了信号分选。但该方法对器件提出严格的要求, 且受信噪比影响比较大。应该指出, 这些方法尽管原理简单, 但适用范围较小, 抗噪性较差, 难以完成信号分选任务。

随后, 研究者相继提出以时频域为主要代表的其他变换域内的特征提取方法, 主要包括时频分析法、模糊函数法和高阶统计量法等。

2.2.1.1 时频分析法

时频分析即时频联合域分析, 是十分有效的研究时变非平稳信号的方法, 能够清晰地描述信号频率随时间变化的关系, 是目前雷达信号特征提取的主要手段。典型的时频分析方法包括短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)、小波变换(Wavelet Transform, WT)^[22,23]、Hilbert-Huang 变换、魏格纳-威利分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)等。研究者依托这些时频分析手段对信号的时频分布、包络特征^[24]、小波脊特征^[25,26]、高阶统计特征^[27]、小波系数的聚敛性^[27]等特征进行分析与提取, 实现对不同调制信号进行识别。

2.2.1.2 模糊函数法

模糊函数(Ambiguity Function, AF)是对雷达信号进行分析和波束形成设计的有效工具, 模糊函数能够反映信号在时间与相位上的相关程度, 提供信号与本身经过时延与频移后的相似性程度^[28], 因此部分学者利用模糊函数刻画雷达信号特征。典型的特征包括AF主脊特征, 如主脊方向、惯性半径及切面重心等特征^[29,30]。普运伟先后利用穷举法、三维图提取等手段构建了AF主脊特征。不过, 这一类方法计算量普遍较大, 该方向目前主要研究课题为如何加速主脊搜索精度和速度。

2.2.1.3 高阶统计量法

高阶统计量, 又称为高阶累积量或高阶谱, 典型的如三阶谱, 即双谱(Bispectra)。高阶统计量具有尺度不变性、时移不变性和抑制高斯噪声等特性, 能够较好地保留信号的相位信息, 因此在雷达信号特征提取中广泛采用。代表性的工作如文献^[31]通过非参数化直接估计法得到雷达辐射源信号的双谱幅度谱, 并从双谱二维切片中提取了盒维数和信息维数等复杂度特征。文献^[32]采用直接法得到雷达信号的双谱估计, 再通过基于广义维数方法从双谱对角切片中提取出3个区分度大的特征 q 值作为特征参数用于信号的分选识别。

总之, 基于有意调制特征的雷达辐射源信号分

选的主要研究思路是通过各种信号分析手段不断放大不同调制信号的差异程度,但需要指出的是,目前这些方法主要存在3个共性问题:一是这些方法在抗噪性方面普遍表现较差,无法适应低信噪比的复杂电磁环境;二是大部分方法主要是对雷达信号的调制类型进行区分,而对同一调制类型信号的区分能力比较差;三是从整体上看,目前的基于脉内调制特征的雷达信号分选识别工作比较分散,研究者运用不同方法提取了种类繁多的特征,但这些特征的泛化性十分有限,往往只对某几种特定调制类型信号具有一定的区分度,且稳定性不强,这就造成了目前特征比较多,但具有强泛化性的特征十分稀少的局面。

上述共性问题已经得到研究者的重点关注,这些共性问题可从以下两个方面予以研究解决。其一是不断地寻求区分力、鲁棒性更强的变换空间以及研究特征提取、融合新手段来增强分选能力^[33];其二是在利用迁移学习来增强算法的泛化性。近年来,基于迁移学习的雷达信号分选识别正成为一个新兴研究领域^[34]。

2.2.2 基于无意调制特征的雷达辐射源信号分选

无意调制特征又称为指纹特征^[35],一般是发射机内部非理想原因引入的附加在信号的特征。无意调制特征常常随着雷达个体不同而不同,且人为难以修改,因此基于无意调制特征的雷达信号分选也称为雷达辐射源个体识别(Specific Emitter Identification, SEI)。随着战场信号环境的持续复杂,雷达调制方式的逐渐多变,基于有意调制特征的雷达信号分选的性能不断下降,而SEI技术理论上可捕捉到辐射源最难以修改的固有特征,甚至可实现对同一型号、同一批次的不同雷达进行区分,这种高分辨力使得SEI研究成为近年来雷达信号分选识别的主要研究方向之一。

本质上,无意调制是一种寄生调制,主要是由于雷达发射机的频率源相位噪声及放大链路非线性效应等引起的,是雷达辐射源信号的固有特征之一。然而,现实中,这种特征极其细微,在实际中通常比较难以提取。无意调制特征可大致分为两类,即附带调幅和附带调相,其中附带调相相对附带调幅而言更加稳定。多年来,国内外研究者围绕无意调制特征提取展开了大量的研究,主要包括以下几个方面:(1)杂散输出特征,这主要是由于辐射源器件个体差异、频率源不稳定以及众多器件的非线性特性所导致的谐波、寄生、互调产生及变频产物等杂散输出。不同的辐射源杂散不同,研究者提取了信号包络的高阶特征,如J值特征^[36]、R值

特征,高阶谱特征、时频特征^[37]等;(2)相位噪声特征,这主要是由于不同发射机存在着不同的相位噪声,代表性工作如文献^[22,38],可实现在高信噪比条件下的雷达辐射源信号分选;(3)信号包络特征,不同的辐射源的脉冲信号具有不同的信号包络。典型的工作有提取包络的上升或下降沿特征^[39,40],如文献^[41]利用包络的上升、下降时间,上升、下降角度及倾斜时间等特征进行分选;(4)调制参数特征,不同的辐射源对信号的调制参数存在偏差,这些偏差为辐射源分选识别提供了可能,如提取调幅、调频特征^[38];(5)频率稳定度特征,不同的辐射源因振荡器差异导致了绝对频率偏差和相对频率偏差存在差异,因此可提取频率稳定度特征作为辐射源分选的依据,如文献^[42]提取了FSK信号码元持续时间内短时频率稳定度特征,实现了对FSK信号电台的个体识别。

综上所述,尽管目前理论上供分选的无意调制特征较多,应该指出的是,这些特征在现实中通常差异微弱,且在低信噪比、信号污染等环境条件下无法实现精准提取,但随着信号特征提取分析手段的不断增强,基于无意调制特征的信号分选正逐渐成为可能,并蕴含广阔的研究前景。

2.3 基于机器学习的雷达辐射源信号分选

机器学习(Machine Learning, ML)^[43]可以实现从样本数据中获得规律并利用规律对未知数据进行预测,是近年来最受关注的研究课题之一。机器学习目前已经广泛应用于数据分析与挖掘、图像识别与处理、语音识别与处理等相关领域。实际上,越来越多的学者已经开始尝试在ML的框架下实现对雷达辐射源信号的分选,这成为雷达辐射源信号分选识别的新的发展趋势。目前,基于机器学习的雷达辐射源分选识别算法包括以下几个主要研究方向。

2.3.1 基于有监督模型的雷达辐射源信号分选

2.3.1.1 基于传统有监督分类的雷达辐射源信号分选

有监督分类模型是目前机器学习的主要研究方向之一。由于雷达辐射源信号分选问题与分类问题相类似,因此相当一部分学者在有监督分类的框架下研究雷达辐射源信号分选识别问题。这其中除有少部分学者选用决策树^[44]作为分选模型之外,其余绝大部分工作是结合支持向量机(Support Vector Machine, SVM)展开的。SVM^[45]是机器学习最经典的算法之一,以高效率、高准确率在机器学习中长期占据核心地位。其主要思想是将低维线性不可分的特征空间向高维进行映射,在线性可分的高维空间内构建分类器。需要指出的是,现有基于有监督

分类模型的雷达信号分选识别工作绝大部分都是沿着“信号截获—特征提取—特征选择—信号分选识别”这一路线展开的^[46]。尽管这些研究相比于传统的统计方法取得了一定的效果,然而,实际中,在复杂电磁环境下这些方法的效果并不理想,主要原因有:首先现有工作主要是基于有监督模型展开,这些模型为了获得较好的泛化能力,需要预先获取大量的、有标记的待识别辐射源样本对分类器进行训练。然而,实际中,预先获取非合作辐射源的信号样本是极其不现实的,且数以百万计的样本的标记需要大量的人力和时间,这些严重影响了信号分选识别效率。其次是这些分类器对符合训练数据分布的数据具有比较好的分类效果,但处理不同分布的数据时模型泛化能力较差,模型分选识别的准确度大幅下降。

2.3.1.2 基于神经网络的雷达信号分选

神经网络是人工神经网络的简称,是一种模仿生物神经网络结构和功能的数学模型或计算模型,用于对函数进行估计或近似。典型的神经网络结构包括输入层、输出层和一个或多个隐藏层。依据隐藏层数的多少,通常可将神经网络区分为浅层神经网络和深层神经网络。神经网络对数据集分布无须任何限制,且具有强大的分类能力,因此广泛用于雷达辐射源信号分选任务中。

(1) 基于浅层神经网络的雷达辐射源信号分选

20世纪80年代,学者首次将神经网络应用到雷达辐射源信号分选,自此学者陆续将反向传播神经网络^[47]、自组织概率神经网络^[48]、Kohonen神经网络^[49]、RBF神经网络^[50]、自组织特征映射(Self-organizing Feature Mapping, SOFM)神经网络^[51]等应用在雷达辐射源分选识别中,尽管取得了一定的效果,然而需要注意的是,大部分神经网络需要一定的先验知识或预训练才可以获得良好的分类效果,这与雷达脉冲流中常常包含非合作源信号相矛盾,因此在现实场景中的效果不是非常好。

(2) 基于深度神经网络的雷达辐射源信号分选

上述的浅层神经网络方法囿于浅层结构而对样本缺乏强大的拟合能力,因此往往在实际分选中效果不理想,模型泛化能力较差。部分学者开始尝试利用以深度神经网络为代表的深度学习(Deep Learning, DL)算法来解决雷达辐射源信号分选问题。考虑到循环神经网络(Recurrent Neural Networks, RNN)相比其他深度神经网络在处理序列数据具有一定优势,因此目前主要工作集中在将RNN及其优化版本——长短时记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)用于解决雷达信号分选问题。国

防科技大学的Liu等人^[52]使用RNN对雷达辐射源进行分选。其利用RNN挖掘了辐射源的高层次特征,实现了对脉冲流的分选,并具有一定的抗噪性。Notaro等人^[53]在此基础上优化了归一化方法,并利用LSTM实现了17个辐射源的识别。另一个较常见的用于雷达辐射源信号分选的神经网络是卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)及其改进结构。Cain等人利用脉冲宽度、载频和脉冲重复间隔组成的特征空间的三维图像,并利用CNN成功实现了对58个独立雷达发射源的分选。Li等人^[54-58]在此方向上也做了较多的工作,针对常规脉冲分选问题,提出基于迭代卷积神经网络(Iterative Convolutional Neural Networks, ICNN)的分选新结构。仿真实验表明,在同样的参数设置下,ICNN比传统方法具有更高的分选准确性和对误差更强的适应性。针对高比例丢失脉冲和虚假脉冲等复杂条件问题,其提出基于卷积神经网络的重频类型识别方法CNN-PRIR (Convolutional Neural Networks based Pulse Repetitive Interval Recognition)^[54],该方法利用深度学习强大的表示能力建立辐射源脉冲与重频类型之间的映射关系进行识别。针对复杂场景下的雷达辐射源型号识别问题,包括低截获概率技术和雷达周期旋转导致的观测信息不均匀,以及多功能体制雷达和复杂模式雷达部分模式相同或相似的情况,提出基于注意力机制的多循环神经网络(Attention-based Multi-RNNs, ABMR)^[56]信号识别方法。

总体来说,目前围绕基于深度学习的雷达脉冲分选的研究工作还不多见,不过可以预见的是,随着深度学习的再次兴起与诸多理论的完善发展,这必将是一个具有较大潜力的研究方向。但应该指出,这一类方法在训练样本获取、算法实时性上面临较大的挑战:在战场上,很难获得大量的训练样本,特别是很难获得非合作辐射源的信号样本供模型进行驱动,同时模型需要不容忽视的训练时间才能达到收敛效果,很难满足未来战场对实时性的要求。

2.3.1.3 基于粗糙集理论的雷达信号分选

粗糙集(Rough Set)理论是波兰数学家Pawlak于1982年提出的一种刻画不完整性和不确定性知识的数学工具。粗糙集理论最大的优势是在无需先验知识的情况下,仅仅充分利用数据本身的内部知识,对冗余数据或特征进行约简,挖掘内部规则。目前,在数据挖掘、机器学习、决策支持系统和模式识别等众多领域,粗糙集理论均具有广泛应用。

由于雷达辐射源信号也具有不完整性和不确定性,因此使用粗糙集理论进行分类识别具有一

定的合理性。近年来，国内研究者提出了许多基于粗糙集理论的辐射源识别方法，这些方法在粗糙集理论框架下，将雷达辐射源识别看成是一个分类问题，其对粗糙集理论的具体运用可大概分为两个方面：其一是直接利用粗糙集理论构造分类器，利用约简得到的规则的分类功能来识别新的辐射源，代表性工作如文献[59,60]。其二是利用粗糙集理论对数据进行预处理，识别和删除无助于给定训练数据分类的属性，提炼出重要的属性和约简属性集，再进一步结合其他智能算法如神经网络、支持向量机、遗传算法等，从而提高分类的准确率、收敛速度等。相较于前者，利用粗糙集与其他智能算法相结合的分选方法研究更加广泛，代表性工作包括文献[61-63]。值得注意的是，粗糙集理论在离散化过程中对噪声是非常敏感的，若离散化不当，其分类准确性会大幅下降，同时，粗糙集理论在处理大样本时，对存储空间的需求也比较大，这些都一定程度制约了这一类方法的实际应用。

2.3.2 基于无监督模型的雷达辐射源信号分选

在实际中，待分选的辐射源样本基本上是没有先验信息的，同时辐射源个数也应该是未知的，因此从雷达辐射源信号分选的任务来讲，其本质更贴近无监督聚类模型。几十年来，相当一部分成果是围绕无监督模型展开的。

按照待分选数据的收集方式，一般可将无监督聚类任务分为静态聚类和数据流聚类。静态聚类是传统的聚类，是指在一个完整的数据集中进行聚类。而在相当一部分领域，数据的收集往往是动态的，即数据是逐个流入的，这类数据一般称为数据流(Data Stream)^[64]，典型的数据流有传感器数据、网上购物数据、社交媒体数据等。对于数据流而言，不可能等到收集所有点之后再处理，因此只能以一种在线或增量的方式进行处理，这一类方式称为数据流聚类(Data Stream Clustering)。

由于静态聚类是经典传统的聚类方式，而数据流聚类是近年来刚刚兴起的研究领域，因此围绕静态聚类而展开雷达辐射源信号分选的研究比较多，但本质上，雷达辐射源信号是一种特殊的数据流(脉冲流)，而对雷达辐射源信号的在线分选，就是对这种数据流进行在线聚类的过程。雷达辐射源信号以一种在线方式进行分选，更加符合实际需求，因此这一类方法蕴含着较大的研究价值，目前是雷达辐射源信号分选领域最新的研究方向之一。

2.3.2.1 基于静态聚类的雷达辐射源信号分选

静态聚类主要指传统的聚类，如K-Means等，

是按照批量方式将数据划分成若干个子集，也称簇(Cluster)，使得同一子集内的点尽量相似，而不同子集内的点尽量不相似。由于同一部雷达发射的脉冲之间彼此具有天然的相似性，而这种相似性比不同雷达辐射源的脉冲的相似性普遍要高。自20世纪90年代开始，相关研究者陆续尝试运用聚类对雷达辐射源信号进行分选识别。其中典型的工作主要可分为以下几个类别：

(1) 基于划分聚类的分选方法

基于划分聚类的分选方法通常利用K-Means、模糊C均值等典型的划分聚类方法对辐射源信号进行分选^[65-68]。但划分聚类算法由于是采用到类中心的距离来对数据点进行划分，因此不能处理任意形状类簇，这从一定程度上限制了该类方法的适用范围。

(2) 基于层次聚类的分选方法

层次聚类是聚类算法的一种，通过计算不同类别的相似度创建一个有层次的嵌套的树。部分学者运用层次聚类方法完成雷达辐射源分选与识别^[69-71]。然而，尽管层次聚类对类的形状没有严格要求，但在计算量上比较大。

(3) 基于网格聚类的分选方法

基于网格聚类的方法采用空间驱动的方法，把嵌入空间划分成独立于输入对象分布的单元，形成了网格结构，基于该结构完成聚类。和基于划分及层次聚类的分选方法相比，基于网格聚类的信号分选方法能够识别呈非凸面形状分布的簇^[72,73]。然而，此类方法的性能对网格步长、密度阈值两个参数的选择十分敏感，在对未知雷达辐射源信号分选时，易出现“漏批”的情况。

(4) 基于密度聚类的分选方法

基于密度聚类算法假设聚类结构能通过样本分布的紧密程度确定，理论上可以发现任意形状的簇，是应用十分广泛的聚类方法，因此，很多学者提出了基于密度聚类的信号分选方法^[74,75]，然而，这些方法也依赖预先定义邻域半径等先验知识，且计算复杂度比较高。

(5) 基于模糊聚类的分选方法

模糊聚类算法是模糊理论与聚类分析相结合的产物，其扩展了数据隶属度的取值范围，尤其是对类与类之间有交叉的数据样本集能够进行有效的聚类。部分学者将模糊聚类方法用于解决信号分选问题，其中比较有代表性的有基于模糊C-均值的信号分选方法^[76-78]，但值得注意的是，模糊聚类方法的计算复杂度较高，不适用于大数据量的情况。

尽管将信号分选视为聚类问题理论上取得一定

的效果,但不可忽视的是静态聚类方法对数据的分布通常具有一定的限制,同时待分选的信号通常数量巨大,静态聚类方法在计算任意两点相似度时耗费大量的计算资源,因此在实时性方面不尽理想。

2.3.2.2 基于数据流聚类的雷达辐射源信号在线分选

数据流是指大量连续到达的、潜在无限的数据有序序列,数据流聚类是数据挖掘领域的重要手段,本质上,雷达辐射源信号是一种特殊的数据流(脉冲流),而对雷达辐射源信号的在线分选,就是对这种数据流进行在线聚类的过程。从此意义上讲,雷达辐射源信号在线分选完全可抽象为一个特殊的数据流聚类问题。

近年来,作者及所在团队率先成功将数据流聚类思想引入到雷达辐射源信号分选领域,并且较为完整地构建了基于数据流聚类思想的雷达辐射源在线分选理论统一框架,取得了一系列具有一定开创性的代表性成果^[79-82],实现了雷达辐射源信号的在线式、非监督式分选。

本团队首先针对基于数据流聚类的雷达辐射源信号在线分选问题进行了数学建模与分析,并从数据流聚类角度出发,提出了基于数据流聚类的雷达辐射源在线分选处理的统一框架(如图4),奠定了基于数据流聚类的雷达辐射源信号在线分选实现的基础。从该框架可以看到,框架可分为两个阶段,即静态学习和动态聚类。数据流相应分为两个部分,用于静态学习阶段的数据称为支撑点(Supporting Points),而用于动态聚类的数据称为流入点(Streaming Points)。首先选用某种静态聚类方法对支撑点进行处理,所得的静态结果作为初始化结果保存在聚类概要中。此后,整个数据流聚类的过程本质上是对该聚类概要的在线维护过程。具体地,对于流入点而言需要依据某种判决判断其为在群点(Inlier)还是离群点(Outlier)。在群点表示该点可以由当前聚类概要所代表的模式所概括,而离群点则相反。对于在群点,直接将其更新到聚类概要

中,而对于离群点要暂存在离群点储存池中。针对辐射源的演化行为,该框架设计了类演化判断部分来实时监测各类(辐射源)的行为,确保及时发现与适应数据流中存在的演化形式。传统的分选方法对信号采用批量处理方式,忽略了脉冲流中蕴含的时间信息。基于数据流聚类的雷达辐射源信号在线分选可挖掘脉冲流的动态特性。

本团队针对低维特征空间下的雷达辐射源信号在线分选问题,提出I-STRAP (Improved-STReam Affinity Propagation)算法^[79],详细分析并定义了雷达辐射源的动态特性所对应的演化形式,针对辐射源出现、消失、复现3种演化形式设计了检测方法,取得了不错的分选效果。

考虑到目前用于分选的特征维度普遍较高,传统的基于距离相似度度量的聚类方法在高维空间中不再有效的问题,本团队提出EDSSC (Evolutionary Dynamic Sparse Subspace Clustering)算法,并实现了高维空间的辐射源个数自估计,通过提出平均稀疏凝聚指数ASCI (Average Sparsity Concentration Index)替代了传统的基于距离度量的相似度计算,实现了高维空间下的雷达辐射源信号在线分选^[80,81]。

实际中,由于各个辐射源的功能、工作时间差异较大,同时一些非合作辐射源的脉冲通常比较难以获取,这往往造成在收集到的脉冲流中,各辐射源的脉冲数量彼此不均衡,甚至差异巨大。这种数据量不平衡现象对于基于有监督模型的分选方法以及基于传统聚类的分选方法均会造成较大影响。针对此问题,本团队创新提出DI-ESC (Dynamic Improved Exemplar-based Subspace Clustering)算法^[82]。DI-ESC通过一种二次采样机制,削弱了原本数据之间的不平衡度,再通过计算数据之间的ASCI,完成高维空间的数据在线聚类,从而实现了非均衡演化数据流的辐射源在线分选。

文献^[79-82]系统验证了在数据流聚类框架下解决雷达辐射源在线分选问题的可行性和先进性,是雷达辐射源在线分选的新的发展趋势之一,应该指出的是,这一方向尚处于发展研究阶段,还有一些问题尚需要进一步研究与解决,比如如何在高脉冲丢失率、高脉冲交叠等更复杂的电磁环境下实现在线分选,但不可否认的是,这一思路使得雷达辐射源在线分选工作更贴近实际,效率也更高,因此该方向蕴含较大的发展潜力。

3 雷达辐射源信号分选尚存问题及未来方向

长期以来,雷达辐射源分选始终是电子侦察领域的重点研究问题。尽管目前围绕雷达辐射源信号

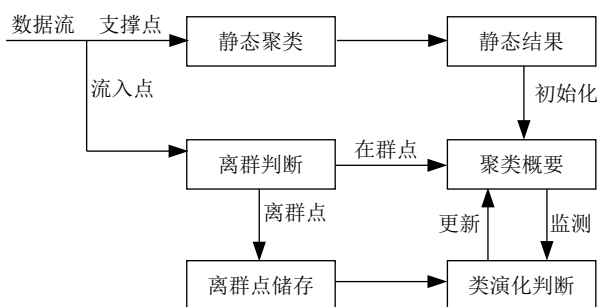


图 4 基于数据流聚类的雷达辐射源在线分选处理统一框架

Fig. 4 A unified framework for online radar emitter deinterleaving based on data stream clustering

分选研究成果层出不穷，但整体来看，雷达辐射源信号分选工作尚存在不足之处，需要突破现有瓶颈，才能满足日益复杂的电磁环境的需求。

3.1 雷达辐射源信号分选尚存问题

现有的各算法普遍成熟度不够，实际应用范围有限，主要体现在以下几个方面：

(1) 对高密度、脉冲交叠严重等非理想情况考虑普遍不充分

现有方法普遍基于比较理想的假设，即脉冲信号已被完整侦收，信噪比保持在较高水平，然而，实际战场情况远非如此，非理想情况普遍存在，一方面受电磁干扰影响，信噪比通常较低；另一方面，电磁环境拥堵严重，高密度雷达脉冲极易导致侦收端脉冲交叠率高、脉冲丢失严重等情况。这些非理想情况导致现有模型实测能力远远低于理论分选能力，极大程度限制了众多模型的实际应用范围。

(2) 模型泛化能力普遍不强

整体来看，现有方法的另一个普遍问题是各模型的泛化能力不足。归结起来主要有两点原因，其一是由于目前所提取的脉内特征对信号的分选能力还不强，通常仅能在特定情况下区分几种单一调制方式信号，且通常无法分选复合调制信号，从而导致一种方法只能分选某几种调制方式的信号，这种对信号流中预先假定仅存在几种调制方式的强假设严重影响了模型的泛化能力；其二是由于分类器需要大量样本进行训练，造成分类器在训练样本存在过拟合现象，导致了分类器对信号数据的分布高度敏感，很难进行面向具有其他分布信号数据的推广。

(3) 实时响应普遍较差

除基于数据流聚类的雷达辐射源信号在线分选方法外，目前众多方法均采用的是批量处理方式，即统一收集再处理，这种方式本身就on不能满足雷达信号分选实际任务的快速响应的需求。同时，由于目前众多方法采用有监督分类器、神经网络甚至是深度神经网络方法完成信号分类，势必会面临不可忽视的训练时间长、模型复杂度高问题，这些严重消耗了计算资源和影响了模型响应时间。以基于深度学习的雷达辐射源信号分选为例，模型需要大量有标签样本进行模型训练，这些样本的收集、贴标签等工作本身便需要消耗相当大的时间和人力，再加上不可忽视的模型训练时长才能保证模型性能达到收敛，导致这些方法在实时响应方面性能不尽理想。

(4) 缺乏对雷达辐射源脉冲流动态特性的挖掘
现有方法对雷达辐射源的动态特性考虑不足，

导致模型在开发设计时便缺少对辐射源脉冲流动态特性处理能力。众所周知，雷达辐射源在战场上具有很强的动态特性，部分雷达辐射源具有多功能特点，常常会根据执行任务的变化而发生变化，这些动态特性往往蕴含更大的态势信息，预示着态势的变化。目前大部分方法仅在调制方式层面对辐射源进行了分选，而无法完成针对同一辐射源的不同调制信号的分选，对辐射源脉冲流动态特性缺乏实时处理能力。

3.2 雷达辐射源信号分选未来方向

基于上述针对现有雷达辐射源信号分选众多方法模型的分析与研究，对雷达辐射源信号分选未来的发展趋势判断如下：

(1) 实现非理想情况下的模型升级研究

雷达辐射源信号分选工作在未来必然要从理论转向实际，因此围绕这一目标，目前方法将完成面向非理想情况的模型升级，这要求模型具备在高密度脉冲流中完成分选的能力，同时能够应对实测数据中可能出现的脉冲交叠、脉冲丢失以及同时低信噪比等非理想情况。

(2) 模型泛化能力提升研究

雷达辐射源信号分选研究的另一个趋势将是提高模型泛化能力。这将从两方面入手，其一是引入新的特征提取方法，在更多的变换域内提取分选力、抗噪性强的特征；其二是结合以迁移学习、不平衡学习、小样本学习、零样本学习为代表的新兴的人工智能技术，着重研究实现非监督或半监督条件下的分选，拓展模型在不同数据集的泛化能力。

(3) 在线分选方法研究

战场瞬息万变，对雷达辐射源信号分选的实时性要求也持续加大，因此在线分选方法将是未来主要研究趋势之一。以数据流聚类为代表的在线学习、增量学习方式势必将得到广泛关注并与雷达辐射源信号分选任务继续融合。

(4) 辐射源脉冲流动态特性研究

雷达辐射源信号是以脉冲流的形式存在并被接受的，其本身蕴含着重要的时间维度信息，然而目前对脉冲流随时间变化信息的挖掘能力依然不足，但其实这些信息不可忽视。这些信息揭示着雷达辐射源的动态行为变化，代表着战场态势的改变，具有十分重要的价值。因此，这一信息的挖掘必将成为另一个重要研究方向，即提高分选算法对脉冲流动态特性的研究，着重发现变化时刻并掌握变化规律，结合在线挖掘及异常检测技术，挖掘更强的特征手段以及演化检测机制，实现更准确地对脉冲流动态特性挖掘。

4 结 论

雷达辐射源信号分选是战场侦察系统的关键技术之一,是战场态势感知的重要基础,因此雷达辐射源信号分选技术始终得到广泛关注与研究。然而,对雷达辐射源信号分选技术仍缺乏系统与全面的梳理。本文系统阐述了雷达辐射源信号分选的研究进展,特别对基于深度神经网络、数据流聚类等新型分选技术进行了阐释,还分析了目前分选技术所面临的严峻挑战以及未来可能的发展趋势。作者认为随着雷达技术的迅猛发展,电磁环境的持续复杂,雷达辐射源信号分选将面临更严峻的挑战。因此,雷达辐射源信号分选技术需要不断解决非理想、无监督或半监督、辐射源具备高动态特性条件下的分选问题,提高分选技术的实时性与泛化性,不断推动分选技术迎合战场实际需要。

参 考 文 献

- [1] 何明浩, 韩俊. 现代雷达辐射源信号分选与识别[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
HE Minghao and HAN Jun. Signal Sorting and Recognition of Modern Radar Emitter[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 陈韬伟. 基于脉内特征的雷达辐射源信号分选技术研究[D]. [博士学位论文], 成都: 西南交通大学, 2010. doi: 10.7666/d.y1689195.
CHEN Taowei. Deinterleaving technology for Radar emitter signals based on the intra-pulse features[D]. [Ph. D. dissertation], Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. doi: 10.7666/d.y1689195.
- [3] 朱斌. 雷达辐射源信号特征提取与评价方法研究[D]. [博士学位论文], 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHU Bin. Study on feature extraction and evaluation method of Radar emitter signals[D]. [Ph. D. dissertation], Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [4] 刘锋, 黄宇, 王泽众, 等. 复杂调制信号截获、分选与识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 5-6.
LIU Feng, HUANG Yu, WANG Zezhong, et al. The Interception, Sorting and Recognition of the Complex Modulation Signals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 5-6.
- [5] SAPERSTEIN S and CAMPBELL J W. Signal recognition in a complex radar environment[J]. *Electronic*, 1977, 3: 8.
- [6] 沙作金. 数据场聚类与平面变换雷达信号分选算法研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
SHA Zuojin. Research on data field clustering and planar transform radar signal sorting algorithm[D]. [Master dissertation], Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [7] 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, 120. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2006.02.009.
WANG Jiegui and JIN Xueming. Survey on deinterleaving technique for modern radar signal[J]. *Radar Science and Technology*, 2006, 4(2): 104-108, 120. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2006.02.009.
- [8] MARDIA H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1989, 136(4): 149-154. doi: 10.1049/ip-f-2.1989.0025.
- [9] MILOJEVIĆ D J and POPOVIĆ B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1992, 139(1): 98-104. doi: 10.1049/ip-f-2.1992.0012.
- [10] NELSON D. Special purpose correlation functions for improved signal detection and parameter estimation[C]. 1993 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Minneapolis, USA, 1993: 73-76. doi: 10.1109/ICASSP.1993.319597.
- [11] 张怡霄, 郭文普, 康凯, 等. 基于数据场联合PRI变换与聚类的雷达信号分选[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(7): 1509-1515. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2019.07.11.
ZHANG Yixiao, GUO Wenpu, KANG Kai, et al. Radar signal sorting method based on data field combined PRI transform and clustering[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(7): 1509-1515. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2019.07.11.
- [12] 曹俊青. 脉冲信号分选技术研究[D]. [硕士学位论文], 成都: 电子科技大学, 2016.
CAO Junqing. Research on technology of pulse signal deinterleaving[D]. [Master dissertation], Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [13] 关欣, 朱杭平. 基于序列时延相关性的PRI变换改进算法[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(1): 49-54. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2018.01.008.
GUAN Xin and ZHU Hangping. An improved algorithm for PRI transform based on coherence of time delay sequence[J]. *Radar Science and Technology*, 2018, 16(1): 49-54. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2018.01.008.
- [14] 朱文贵, 刘凯, 韩嘉宾. 基于PRI变换的混叠LFM雷达信号分选[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(6): 630-634. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2016.06.013.
ZHU Wengui, LIU Kai, and HAN Jiabin. Sorting of the aliasing LFM radar signals based on PRI transform[J]. *Radar Science and Technology*, 2016, 14(6): 630-634. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2016.06.013.
- [15] 赵仁健, 熊平, 倪明. 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, and NI Ming. 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.
- [16] 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. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2005.07.026](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2005.07.026).
FAN Fuhua, ZHANG Wanjun, and 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. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2005.07.026](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2005.07.026).
- [17] 孟建, 胡来招. 用于信号处理的重复周期变换[J]. *电子对抗技术*, 1998, 13(1): 1–7.
MENG Jian and HU Laizhao. Repetitive cycle transform for signal processing[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 1998, 13(1): 1–7.
- [18] 秦鑫. 雷达辐射源脉内特征分析与识别关键技术研究[D]. [硕士学位论文], 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2020.
QIN Xin. Research on key technology of radar emitter intra-pulse features analysis and recognition[D]. [Master dissertation], Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2020.
- [19] 王晓戈, 陈辉, 倪萌钰, 等. 基于相位调制的雷达抗假目标干扰方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(9): 2476–2483. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.09.14](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.09.14).
WANG Xiaoge, CHEN Hui, NI Mengyu, et al. Radar anti-false target jamming method based on phase modulation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(9): 2476–2483. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.09.14](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.09.14).
- [20] 闵博. 基于小波变换的雷达脉内调制特征分选识别[D]. [硕士学位论文], 成都: 电子科技大学, 2020.
MIN Bo. Feature classification and recognition of radar pulse modulation based on wavelet transform[D]. [Master dissertation], Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [21] 王功明. 雷达信号脉内特征分析与识别关键技术研究[D]. [硕士学位论文], 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2019.
WANG Gongming. Research on key technology of radar signal intra-pulse features analysis and recognition[D]. [Master dissertation], Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2019.
- [22] 张国柱. 雷达辐射源识别技术研究[D]. [博士学位论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
ZHANG Guozhu. Research on emitter identification[D]. [Ph. D. dissertation], Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [23] 韩国成, 吴顺君. 雷达信号脉内调制特征的时频分析[J]. *航天电子对抗*, 2004(3): 34–47. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2004.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2004.03.008).
HAN Guocheng and WU Shunjun. Time-frequency analysis for intrapulse modulation characteristics of radar signal[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2004(3): 34–47. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2004.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2004.03.008).
- [24] 张葛祥, 荣海娜, 金炜东. 基于小波包变换和特征选择的雷达辐射源信号识别[J]. *电路与系统学报*, 2006, 11(6): 45–49, 55. doi: [10.3969/j.issn.1007-0249.2006.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-0249.2006.06.009).
ZHANG Gexiang, RONG Haina, and JIN Weidong. Radar emitter signal recognition based on wavelet packet transform and feature selection[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2006, 11(6): 45–49, 55. doi: [10.3969/j.issn.1007-0249.2006.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-0249.2006.06.009).
- [25] 易丽, 何怡刚, 方葛丰, 等. 基于 Morlet 小波在雷达信号脉内特征提取中的应用[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(1): 172–175. doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.044](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.044).
YI Li, HE Yigang, FANG Gefeng, et al. Application of modified Morlet wavelet in feature extraction of radar signal to intra-pulse[J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(1): 172–175. doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.044](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.044).
- [26] 余志斌, 金炜东, 陈春霞. 基于小波脊频级联特征的雷达辐射源信号识别[J]. *西南交通大学学报*, 2010, 45(2): 290–295. doi: [10.3969/j.issn.0258-2724.2010.02.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.2010.02.022).
YU Zhibin, JIN Weidong, and CHEN Chunxia. Radar emitter signal recognition based on WRFCCF[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(2): 290–295. doi: [10.3969/j.issn.0258-2724.2010.02.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.2010.02.022).
- [27] ŚWIERCZ E. Automatic classification of LFM signals for radar emitter recognition using wavelet decomposition and LVQ classifier[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2011, 119(4): 488–494. doi: [10.12693/APhysPolA.119.488](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.119.488).
- [28] 李咏晋. 基于模糊函数的雷达脉内特征提取与分类器设计[D]. [硕士学位论文], 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2017.
LI Yongjin. Research of specific radar emitter identification based on characteristics of unintentional modulation on pulse[D]. [Master dissertation], Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2017.
- [29] 普运伟, 侯文太, 郭媛蒲, 等. 基于模糊函数三维特征的雷达辐射源信号分选方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(10): 2178–2184. doi: [10.13195/j.kzyjc.2018.0144](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0144).
PU Yunwei, HOU Wentai, GUO Yuanpu, et al. A sorting method of radar emitter signal based on three dimensional feature of ambiguity function[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(10): 2178–2184. doi: [10.13195/j.kzyjc.2018.0144](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0144).
- [30] 普运伟, 金炜东, 朱明, 等. 雷达辐射源信号模糊函数主脊切面特征提取方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(2): 133–137. doi: [10.3321/j.issn:1001-9014.2008.02.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-9014.2008.02.012).
PU Yunwei, JIN Weidong, ZHU Ming, et al. Extracting the main ridge slice characteristics of ambiguity function for radar emitter signals[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(2): 133–137. doi: [10.3321/j.issn:1001-9014.2008.02.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-9014.2008.02.012).
- [31] 韩俊, 陈晋汶, 孙茹. 复杂体制雷达辐射源信号识别新方法[J].

- 雷达科学与技术, 2016, 14(1): 80–84. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2016.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2016.01.013).
- HAN Jun, CHEN Jinwen, and SUN Ru. New method for recognizing complicated radar emitter signal[J]. *Radar Science and Technology*, 2016, 14(1): 80–84. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2016.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2016.01.013).
- [32] 王星, 冯鹏程, 田元荣, 等. 基于BDS-GD的低截获概率雷达信号识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(3): 583–592. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0146](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0146).
- WANG Xing, GUO Pengcheng, TIAN Yuanrong, *et al.* LPI radar signal recognition based on BDS-GD[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(3): 583–592. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0146](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0146).
- [33] 金银波. 基于脉内多特征融合的雷达信号分选[D]. [硕士学位论文], 镇江: 江苏科技大学, 2015.
- JIN Yinbo. Radar signal sorting based on multi-feature fusion in pulse[D]. [Master dissertation], Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.
- [34] 王功明, 陈世文, 黄洁, 等. 基于迁移深度学习的雷达信号分选识别[J]. 计算机科学与应用, 2019, 9(9): 1761–1778. doi: [10.12677/CSA.2019.99198](https://doi.org/10.12677/CSA.2019.99198).
- WANG Gongming, CHEN Shiwen, HUANG Jie, *et al.* Radar signal sorting and recognition based on transferred deep learning[J]. *Computer Science and Application*, 2019, 9(9): 1761–1778. doi: [10.12677/CSA.2019.99198](https://doi.org/10.12677/CSA.2019.99198).
- [35] 秦鑫, 黄洁, 王建涛, 等. 基于无意调相特性的雷达辐射源个体识别[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 104–111. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020084](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020084).
- QIN Xin, HUANG Jie, WANG Jiantao, *et al.* Radar emitter identification based on unintentional phase modulation on pulse characteristic[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(5): 104–111. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020084](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020084).
- [36] 蔡权伟. 多分量信号的信号分量分离技术研究[D]. [博士学位论文], 成都: 电子科技大学, 2006. doi: [10.7666/d.Y850691](https://doi.org/10.7666/d.Y850691).
- CAI Quanwei. Research on separation of signal components of multicomponent signal[D]. [Ph. D. dissertation], Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. doi: [10.7666/d.Y850691](https://doi.org/10.7666/d.Y850691).
- [37] 张玉, 李天琪, 张进, 等. 基于集成固有尺度分解的IFF辐射源个体识别算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(2): 430–437. doi: [10.11999/JEIT190085](https://doi.org/10.11999/JEIT190085).
- ZHANG Yu, LI Tianqi, ZHANG Jin, *et al.* Individual recognition algorithm of IFF radiation sources based on ensemble intrinsic time-scale decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 430–437. doi: [10.11999/JEIT190085](https://doi.org/10.11999/JEIT190085).
- [38] 陈昌孝, 何明浩, 朱元清, 等. 基于双谱分析的雷达辐射源个体特征提取[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(6): 1046–1049. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.06.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.06.011).
- CHEN Changxiao, HE Minghao, ZHU Yuanqing, *et al.* Specific emitter features extraction based on bispectrum and Walsh transform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(6): 1046–1049. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2008.06.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2008.06.011).
- [39] 杨亚芝. 基于已知信号样本和信号知识的快速分选识别技术研究[D]. [硕士学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- YANG Yazhi. Research on fast sorting recognition technology based on known signal samples and signal knowledge[D]. [Master dissertation], Xi'an: Xidian University, 2019.
- [40] 章艳. 基于包络相关法的特定辐射源识别[J]. 现代雷达, 2016, 38(10): 39–41. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.010](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.010).
- ZHANG Yan. Specific radar emitter recognition based on correlation coefficient of the envelope methods[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(10): 39–41. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.010](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.010).
- [41] KAWALEC A and OWCZAREK R. Specific emitter identification using intrapulse data[C]. First European Radar Conference, Amsterdam, Netherlands, 2004: 249–252.
- [42] 汪勇, 段田东, 刘瑞东, 等. 短时频率稳定度特征分析的FSK信号个体识别[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 880–885, 890.
- WANG Yong, DUAN Tiandong, LIU Ruidong, *et al.* Individual identification of FSK signals based on stability of transient carrier frequency[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(6): 880–885, 890.
- [43] ALPAYDIN E. Introduction to Machine Learning[M]. Cambridge: MIT Press, 2020.
- [44] 李春旭. 基于机器学习的未知辐射源信号分选与识别算法研究[D]. [硕士学位论文], 长春: 吉林大学, 2019. doi: [10.27162/d.cnki.gjlin.2019.000917](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2019.000917).
- LI Chunxu. Machine learning-based signal sorting and recognition algorithm of unknown radiation source[D]. [Master dissertation], Changchun: Jilin University, 2019. doi: [10.27162/d.cnki.gjlin.2019.000917](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2019.000917).
- [45] PISNER D A and SCHNYER D M. Chapter 6 - Support Vector Machine[M]. MECHELLI A and VIEIRA S. Machine Learning: Methods and Applications to Brain Disorders. London: Academic Press, 2020: 101–121.
- [46] YING Fu and XING Wang. Radar signal recognition based on modified semi-supervised SVM algorithm[C]. 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2017: 2336–2340. doi: [10.1109/IAEAC.2017.8054439](https://doi.org/10.1109/IAEAC.2017.8054439).
- [47] 白宁. 基于神经网络的雷达信号分选[D]. [硕士学位论文], 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- BAI Ning. Radar signal sorting method based on neural network[D]. [Master dissertation], Xi'an: Xidian University, 2019.

- [48] 万建伟, 宋小全, 皇甫堪, 等. 神经网络在雷达信号分选中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(7): 29–35. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.1996.07.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.1996.07.005).
WAN Jianwei, SONG Xiaoquan, HUANGFU Kan, *et al.* The application of neural network for sorting signal in Radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1996, 18(7): 29–35. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.1996.07.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.1996.07.005).
- [49] 郭杰, 陈军文. 一种处理未知雷达信号的聚类分选方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6): 853–856, 863. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2006.06.019](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2006.06.019).
GUO Jie and CHEN Junwen. Clustering approach for deinterleaving unknown radar signals[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(6): 853–856, 863. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2006.06.019](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2006.06.019).
- [50] 刘扬, 刘璘, 杨波. 基于多二维RBF神经网络的航空雷达信号分选[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(1): 182–184, 187. doi: [10.16208/j.issn1000-7024.2009.01.073](https://doi.org/10.16208/j.issn1000-7024.2009.01.073).
LIU Yang, LIU Lin, and YANG Bo. Aviation radar signal sorting based on multi 2-dimension RBF neural network[J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(1): 182–184, 187. doi: [10.16208/j.issn1000-7024.2009.01.073](https://doi.org/10.16208/j.issn1000-7024.2009.01.073).
- [51] 陈恒, 张友益, 王玉梅. 基于融合算法的多参数雷达信号分选[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(9): 66–70. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2018.09.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2018.09.017).
CHEN Heng, ZHANG Youyi, and WANG Yumei. Multi-parameter radar signal sorting based on fusion algorithm[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2018, 38(9): 66–70. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2018.09.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2018.09.017).
- [52] LIU Zhangmeng and YU P S. Classification, denoising, and deinterleaving of pulse streams with recurrent neural networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(4): 1624–1639. doi: [10.1109/TAES.2018.2874139](https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2874139).
- [53] NOTARO P, PASCHALI M, HOPKE C, *et al.* Radar emitter classification with attribute-specific recurrent neural networks[J]. arXiv: 1911.07683, 2019.
- [54] LI Xueqiong, HUANG Zhitao, WANG Fenghua, *et al.* Toward convolutional neural networks on pulse repetition interval modulation recognition[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(11): 2286–2289. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2864725](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2864725).
- [55] LI Xueqiong, LIU Zhangmeng, and HUANG Zhitao. Attention-based radar PRI modulation recognition with recurrent neural networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 57426–57436. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2982654](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982654).
- [56] LI Xueqiong, LIU Zhangmeng, HUANG Zhitao, *et al.* Radar emitter classification with attention-based multi-RNNs[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(9): 2000–2004. doi: [10.1109/LCOMM.2020.2995842](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2995842).
- [57] LI Xueqiong, LIU Zhangmeng, and HUANG Zhitao. Deinterleaving of pulse streams with denoising autoencoders[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(6): 4767–4778. doi: [10.1109/TAES.2020.3004208](https://doi.org/10.1109/TAES.2020.3004208).
- [58] LI Xueqiong, LIU Zhangmeng, and HUANG Zhitao. Denoising of radar pulse streams with autoencoders[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(4): 797–801. doi: [10.1109/LCOMM.2020.2967365](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2967365).
- [59] 张政超, 关欣, 何友. 粗糙集在雷达辐射源识别中的应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(4): 412–416. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2009.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2009.04.017).
ZHANG Zhengchao, GUAN Xin, and HE You. The application of rough sets in radar emitter recognition[J]. *Journal of CAEIT*, 2009, 4(4): 412–416. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2009.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2009.04.017).
- [60] 关欣, 衣晓, 孙迎丰, 等. 变精度粗糙集模型及其在辐射源识别中的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(1): 28–31. doi: [10.3321/j.issn:1000-0054.2007.01.009](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0054.2007.01.009).
GUAN Xin, YI Xiao, ZHANG Yingfeng, *et al.* Variable precision rough set model with applications to emitter recognition[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(1): 28–31. doi: [10.3321/j.issn:1000-0054.2007.01.009](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0054.2007.01.009).
- [61] 袁泽恒, 田润澜, 张旭洲. 改进加权SVC的雷达信号分选新方法[J]. 现代防御技术, 2018, 46(3): 86–92. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2018.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2018.03.013).
YUAN Zeheng, TIAN Runlan, and ZHANG Xuzhou. New method of radar signals sorting based on improved weighted SVC[J]. *Modern Defence Technology*, 2018, 46(3): 86–92. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2018.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2018.03.013).
- [62] 张强, 王红卫, 王玉冰, 等. 一种改进的雷达信号快速聚类分选方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2016, 17(3): 57–62. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.011).
ZHANG Qiang, WANG Hongwei, WANG Yubing, *et al.* A method of fast clustering sorting radar signals[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2016, 17(3): 57–62. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.011).
- [63] 关欣, 潘丽娜, 张政超, 等. 基于粗糙集理论的雷达辐射源信号识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
GUAN Xin, PAN Li'na, ZHANG Zhengchao, *et al.* Radar Emitter Signal Recognition based on Rough Sets Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [64] ZUBAROĞLU A and ATALAY V. Data stream clustering: A review[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2021, 54(2): 1201–1236. doi: [10.1007/s10462-020-09874-x](https://doi.org/10.1007/s10462-020-09874-x).
- [65] 孙鑫, 侯慧群, 杨承志. 基于改进K-均值算法的未知雷达信号分选[J]. 现代电子技术, 2010, 33(17): 91–93, 96. doi: [10.3969/j.issn.1004-373X.2010.17.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-373X.2010.17.028).
SUN Xin, HOU Huiqun, and YANG Chengzhi. Unknown

- radar signals deinterleaving based on improved K-means algorithm[J]. *Modern Electronics Technique*, 2010, 33(17): 91–93, 96. doi: [10.3969/j.issn.1004-373X.2010.17.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-373X.2010.17.028).
- [66] 张冉, 夏厚培. 一种新的k-means聚类雷达信号分选算法[J]. 现代防御技术, 2015, 43(6): 136–141. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2015.06.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2015.06.023).
- ZHANG Ran and XIA Houpei. Radar signal sorting algorithm of a new k-means clustering[J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(6): 136–141. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2015.06.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2015.06.023).
- [67] 张什永, 张海黎, 胡泽宾, 等. 基于聚类分析的雷达信号分选研究[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(1): 49–52. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2013.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2013.01.014).
- ZHANG Shenyong, ZHANG Haili, HU Zebin, *et al.* Research on clustering-based radar signal sorting[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2013, 29(1): 49–52. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2013.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2013.01.014).
- [68] 赵贵喜, 骆鲁秦, 陈彬. 基于蚁群算法的K-Means聚类雷达信号分选算法[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(2): 142–146. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.014).
- ZHAO Guixi, LUO Luqin, and CHEN Bin. Radar signal sorting based on ant colony and K-Means clustering[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(2): 142–146. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.02.014).
- [69] JIAN Wan and SONG Wenming. A new radar signal sorting method based on data field[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 610: 401–406. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.610.401](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.610.401).
- [70] 国强, 宋文明, 南普龙, 等. 基于数据场与云模型的多模雷达信号分选算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(11): 76–81. doi: [10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.013](https://doi.org/10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.013).
- GUO Qiang, SONG Wenming, NAN Pulong, *et al.* The research of sorting method for multimode radar signal based on data field and cloud model[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(11): 76–81. doi: [10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.013](https://doi.org/10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.013).
- [71] 何佩佩, 唐霜天, 匡华星. 一种基于层次划分聚类的雷达信号分选算法[J]. 现代防御技术, 2016, 44(4): 51–55. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2016.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2016.04.009).
- HE Peipei, TANG Shuangtian, and KUANG Huaxing. A radar signal sorting algorithm based on hierarchical clustering[J]. *Modern Defence Technology*, 2016, 44(4): 51–55. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2016.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2016.04.009).
- [72] 陈维高, 张国毅. 基于改进网格聚类的动态雷达信号分选算法[J]. 雷达与对抗, 2012, 32(4): 30–34, 46. doi: [10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2012.04.009](https://doi.org/10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2012.04.009).
- CHEN Weigao and ZHANG Guoyi. A dynamic radar signal sorting algorithm based on improved grid clustering[J]. *Radar & Ecm*, 2012, 32(4): 30–34, 46. doi: [10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2012.04.009](https://doi.org/10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2012.04.009).
- [73] 王军, 张冰. 基于动态网格密度聚类的雷达信号分选算法[J]. 现代电子技术, 2013, 36(21): 1–4. doi: [10.3969/j.issn.1004-373X.2013.21.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-373X.2013.21.001).
- WANG Jun and ZHANG Bing. A radar signal sorting algorithm based on dynamic grid density clustering[J]. *Modern Electronics Technique*, 2013, 36(21): 1–4. doi: [10.3969/j.issn.1004-373X.2013.21.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-373X.2013.21.001).
- [74] 刘丽明, 陈正宁, 姚啸. 基于DBSCAN算法的PDW数据二次分选方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(2): 80–83. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2019.02.017](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2019.02.017).
- LIU Liming, CHEN Zhengning, and YAO Xiao. Research into second sorting method of pdw data based on dbscan algorithm[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2019, 42(2): 80–83. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2019.02.017](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2019.02.017).
- [75] 王晓峰, 张国毅, 王然. 一种新的未知雷达信号快速分选方法[J]. 电子信息对抗技术, 2011, 26(5): 19–22, 51. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2011.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2011.05.005).
- WANG Xiaofeng, ZHANG Guoyi, and WANG Ran. A new method of unknown radar signals sorting[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2011, 26(5): 19–22, 51. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2011.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2011.05.005).
- [76] 王勇刚. 基于模糊聚类的雷达信号分选方法[J]. 电子对抗, 2007(2): 9–12.
- WANG Yonggang. Radar signal sorting method based on fuzzy clustering[J]. *Electronic Warfare*, 2007(2): 9–12.
- [77] 贺宏洲, 景占荣, 徐振华. 雷达信号的模糊聚类分选方法[J]. 航空计算技术, 2008, 38(5): 21–24. doi: [10.3969/j.issn.1671-654X.2008.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-654X.2008.05.007).
- HE Hongzhou, JING Zhanrong, and XU Zhenhua. Fuzzy cluster sorting method of radar signals[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2008, 38(5): 21–24. doi: [10.3969/j.issn.1671-654X.2008.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-654X.2008.05.007).
- [78] 尹亮, 潘继飞, 姜秋喜. 基于模糊聚类的雷达信号分选[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(2): 52–54, 57. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2014.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2014.02.014).
- YIN Liang, PAN Jifei, and JIANG Qiuxi. A study on sorting of Radar-signals based on fuzzy clustering[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(2): 52–54, 57. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2014.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2014.02.014).
- [79] SUI Jinping, LIU Zhen, JUNG A, *et al.* Dynamic clustering scheme for evolving data streams based on improved STRAP[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 46157–46166. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2864553](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2864553).
- [80] SUI Jinping, LIU Zhen, LIU Li, *et al.* Dynamic sparse subspace clustering for evolving high-dimensional data streams[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*. doi: [10.1109/TCYB.2020.3023973](https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3023973).
- [81] SUI Jinping, LIU Zhen, LIU Li, *et al.* Sparse subspace clustering for evolving data streams[C]. 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal

Processing (ICASSP), Brighton, UK, 2019: 7455–7459. doi: [10.1109/ICASSP.2019.8683205](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683205).

[82] SUI Jinping, LIU Zhen, LIU Li, *et al.* Online non-

cooperative radar emitter classification from evolving and imbalanced pulse streams[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(14): 7721–7730. doi: [10.1109/JSEN.2020.2981976](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2981976).

作者简介



隋金坪(1990–), 男, 博士, 2020年12月获国防科技大学信息与通信工程博士学位, 2017–2019年曾作为联合培养博士生赴芬兰阿尔托大学计算机科学系从事大数据处理、机器学习等研究工作。现为海军大连舰艇学院作战软件与仿真研究所助理研究员。主要研究方向为雷达目标识别与对抗、智能态势感知与认知。



刘 振(1983–), 男, 国防科技大学电子科学学院教授, 学校领军人才培养对象, 国家自然科学基金优秀青年科学基金获得者。研究方向为雷达目标识别与对抗, 主要涉及雷达成像与识别、雷达有源对抗、模式识别与机器学习等。



刘 丽(1982–), 女, 国防科技大学系统工程学院研究员。主要研究方向为计算机视觉与机器学习。



黎 湘(1967–), 男, 中国科学院院士, 国防科技大学教授。研究方向为雷达目标识别, 主要涉及雷达目标特性、雷达目标成像与识别、雷达识别对抗等。

(责任编辑: 于青)