



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目： 雷达信号分选发展综述
作者： 王超，孙丽婷，侯伟，黄知涛
收稿日期： 2025-02-21
网络首发日期： 2026-04-21
引用格式： 王超，孙丽婷，侯伟，黄知涛. 雷达信号分选发展综述[J/OL]. 国防科技大学学报. <https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20260421.1059.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11887/j.issn.1001-2486.25020020

雷达信号分选发展综述

王超¹, 孙丽婷², 侯伟³, 黄知涛^{1*}

(1. 国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037; 2. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073; 3. 中国人民解放军 32208 部队, 陕西 榆林 719000)

摘要: 雷达信号分选, 是对电子侦察获得的雷达脉冲描述字去做交错处理, 是识别雷达的基础。常规分选方法中, 关于预分选的研究主要聚焦于聚类算法本身, 常用的算法包括 K-Means、模糊 c 均值、数据场、DBSCAN、图论和自组织神经网络等。主分选的代表性方法包括直方图法、谱变换法、相关匹配法、平面变换法、卡尔曼滤波法和多站时差法等。参数已知情况下的代表性方法为样本图法。智能化分选方法所采用的工具包括有监督神经网络、支持向量机、自动机和马尔可夫链等。有关研究主要集中于有监督神经网络, 其中, 基于序列数据语义分割的分选方法具有较为明显的优势。未来, 常规分选方法在提高聚类适应性和新的主分选理论方向仍有发展空间, 而智能化分选方法可向高效分选神经网络、小样本条件下的分选模型训练、对抗条件下的分选和基于大模型的分选发展, 以识别效果为导向的分选方法也值得探索。

关键词: 雷达信号分选; 聚类; 直方图; 语义分割

中图分类号: TN971; TP391.4

文献标志码: A

A review of the development of radar signal deinterleaving

WANG Chao¹, SUN Liting², HOU Wei³, HUANG Zhitao^{1*}

(1. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China; 2. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. The PLA Unit 32208, Yulin 719000 China)

Abstract: Radar signal deinterleaving is to deinterleave the radar pulse description words obtained by electronic reconnaissance, which is the basis for radar recognition. Among the conventional deinterleaving methods, the research on pre-deinterleaving mainly focuses on the clustering algorithm itself, and the commonly used algorithms include K-Means, fuzzy C-means, data field, DBSCAN, graph theory and self-organizing neural network. The representative methods of main deinterleaving include histogram methods, spectral transform methods, correlation matching methods, plane transform methods, Kalman filter methods and multi-station time difference methods. The representative method for the condition of known parameters is sample graph method. The tools used in the intelligent deinterleaving method include supervised neural networks, support vector machine, automata and Markov chain, etc. The relevant research mainly focuses on methods with supervised neural networks. Among them, the deinterleaving method based on sequence data semantic segmentation has relatively obvious advantages. In the future, the conventional deinterleaving methods still has room for development in the direction of improving the clustering adaptability and the new main deinterleaving theory. The intelligent deinterleaving methods can be developed in the direction of the high-performance deinterleaving neural networks, few-shot deinterleaving model training, the deinterleaving under the condition of anti-intelligence and the deinterleaving based on large model. The recognition effect-oriented deinterleaving method is also worth exploring.

Keywords: radar signal deinterleaving; clustering; histogram; semantic segmentation

电子侦察中, 通过对进入侦察设备的雷达脉冲逐个测量, 可获得每个脉冲的到达时间 (time

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62301575); 国家部委基金资助项目 (2024-JCJQ-JJ-0107)

第一作者: 王超 (1985—), 男, 江西九江人, 讲师, 博士, E-mail: wangchaoben@126.com

* **通信作者:** 黄知涛 (1976—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: huangzhitao@nudt.edu.cn

引用格式: 王超, 孙丽婷, 侯伟, 等. 雷达信号分选发展综述[J]. 国防科技大学学报,

Citation: Wang Chao, Sun Liting, Hou Wei, et al. A review of the development of radar signal deinterleaving[J]. Journal of National University of Defense Technology,

of arrival, TOA)、到达方位 (direction of arrival, DOA)、脉冲宽度 (pulse width, PW)、频率 (radio frequency, RF) 和脉冲幅度 (pulse amplitude, PA) 等参数, 也就是脉冲描述字。按时间顺序输出的雷达脉冲描述字, 就是全脉冲数据。雷达信号分选, 就是对全脉冲数据中属于不同目标的脉冲描述字做去交错处理, 形成属于不同雷达的子脉冲流。

准确的雷达信号分选, 是判断雷达信号特征, 并进一步识别雷达类型、型号和工作模式的前提, 是支撑空天攻防作战和掌握电磁态势的重要手段。雷达信号分选技术与雷达技术的发展密切相关, 随着先进雷达的广泛部署应用和电磁环境的日趋复杂, 分选效果主要受 3 个方面因素的影响: (1) 参数的复杂变化。现代雷达为了实现多样化的功能和提升抗干扰能力, 使得参数呈现出多种复杂变化类型, 并且在不同国家、不同类型和不同型号的雷达之间都呈现出差异。(2) 不同程度的测量误差。测量误差在电子侦察中普遍存在, 且在不同参数间存在明显差异。(3) 高脉冲密度和高脉冲丢失。在复杂电磁环境下, 总体上的高脉冲密度和单个目标的高脉冲丢失并存是常态, 且在不同平台和不同区域呈现明显差异。关于雷达信号分选方法的研究, 长期聚焦于这三个方面以提升分选效果。

1 雷达信号分选方法分类

雷达信号分选方法众多, 可以从不同的角度进行分类。

根据所利用的参数, 雷达信号分选可分为基于脉冲描述字的分选和基于脉内采样数据的分选。由于脉内特征在分选领域不具有可运用的普遍性规律, 且这类方法占用的计算资源较大, 因此不论在实际运用还是理论探索中, 雷达信号分选研究主要集中于前者。所以, 本文主要讨论基于脉冲描述字的分选。

根据采用的技术手段, 雷达信号分选可分为常规分选方法和智能化分选方法。常规分选方法, 主要指传统的聚类预分选、基于脉冲重复间隔 (pulse repetition Interval, PRI) 周期性的主分选和基于先验信息进行匹配的分选。智能化分选方法, 主要指采用了有监督神经网络、支持向量机、自动机和马尔可夫链等智能化技术的分选方法。广义上来说, 聚类也是智能化技术的一种, 但由于其在传统分选中早已得到广泛使用, 且是重要步骤, 因此本文仍然将其放在常规分选方法中进

行讨论。

根据对先验信息的掌握和利用情况, 雷达信号分选可分为有先验信息的分选和无先验信息的分选。有先验信息时, 可将侦察获得的脉冲流数据与先验信息进行匹配, 快速地找到已知目标。无先验信息时, 则需要首先对截获的脉冲数据进行分析, 从中找到潜在目标的有关信息, 再依据这些信息进行分选。

根据信号数据的来源数量, 雷达信号分选可分为基于单站数据的分选和基于多站数据的分选。相比前者, 后者还可利用同一目标信号到达不同侦察设备的时间差这一信息进行分选。

根据分选的时效性, 雷达信号分选可分为在线分选和离线分选。在线分选, 是在每获取一个脉冲后, 立即将其归类。离线分选, 是在获取了一定数量或一定时间跨度的脉冲后, 再一并分选。前者时效性强, 但只能利用当前脉冲之前的信息; 后者时效性略低, 但可利用脉冲流的完整信息。由于被分选的脉冲流时间跨度通常较短, 以及现代条件下良好的算力水平, 即便在时效性要求较高的场合, 离线分选也常常能满足相应要求, 且具有相对更高的准确性, 因此相关研究主要集中于离线分选。

图 1 所示为雷达信号分选方法的分类。本文将从常规分选和智能化分选 2 个角度对雷达信号分选的相关研究进行梳理。

2 常规分选方法

常规分选方法, 可分为参数未知和已知两种情况。

在参数未知的情况下, 根据所利用参数和对参数利用方式的不同, 通常分为两步: 第一步基于 DOA、RF、PW 和 PA 等非 TOA 参数对脉冲进行聚类, 也称为预分选; 第二步基于 TOA 对第一步的聚类结果做进一步分选, 也称为主分选, 如图 2 所示。由于 TOA 与 PRI 相对应, 基于 TOA 的分选也称为基于 PRI 的分选。这样的分选流程, 主要是因为雷达信号的 DOA、RF、PW 和 PA 只描述当前脉冲的状态, 而 TOA 中则隐藏了雷达的 PRI, 即相邻脉冲的时间关系。但对于雷达全脉冲数据而言, 多维数据是耦合的, 现有的分步分选方法, 在一些场景下对参数耦合信息的利用还不够充分, 丢失了大量可用于分选的重要信息。以机械扫描雷达信号为例, 当雷达天线转动时, 在接收设备上雷达 PA 呈现为随时间起伏变化的包络, PA 与 PRI 耦合。但在传统分选步骤中, 由

于 PA 变化范围过大, 基于 PA 的聚类难以实现有效的预分选, 而对耦合信息也未能充分利用。

在参数已知情况下, 通常将已知参数和截获脉冲的参数进行距离匹配。

下面分别从未知参数情况下预分选和主分选方法, 以及已知参数情况下的距离匹配法三个方面来对常规分选有关研究展开论述。

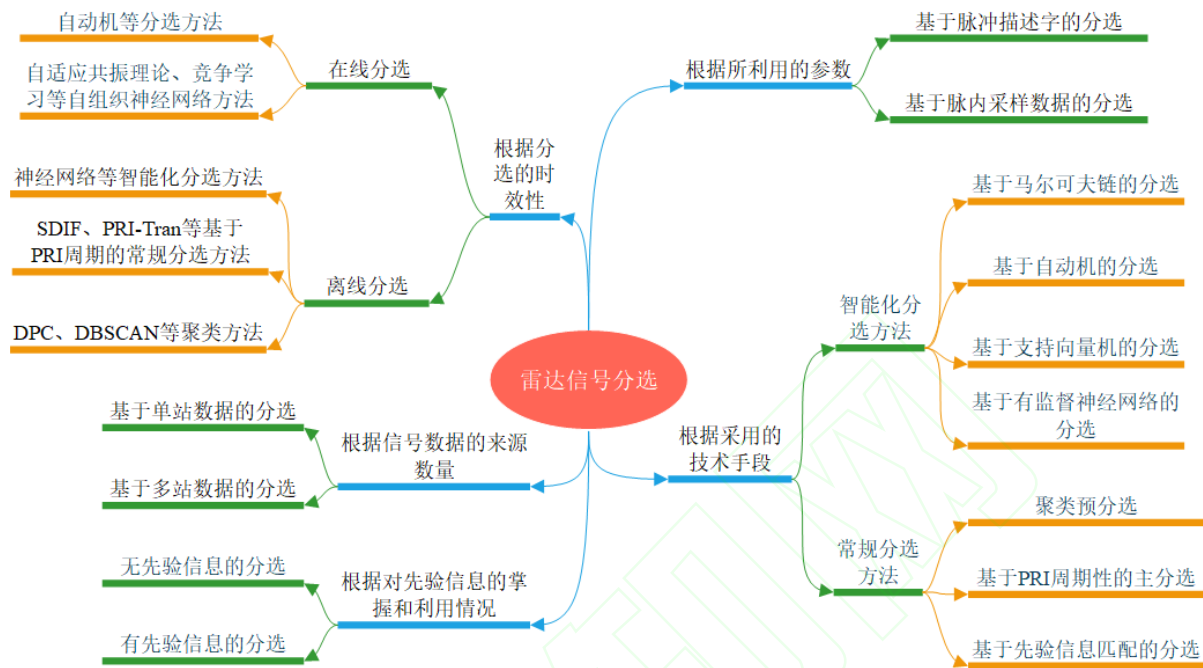


图 1 雷达信号分选方法的分类

Fig. 1 Classification of radar signal deinterleaving methods

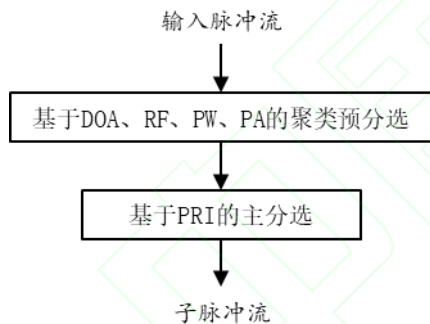


图 2 参数未知情况下常规分选步骤

Fig. 2 Conventional deinterleaving procedure with unknown parameters

2.1 基于到达方位、频率、脉冲宽度和脉冲幅度的预分选方法

基于聚类的预分选, 本质上是基于脉冲参数的距离或相似性将脉冲划分成不同的簇。目前对于聚类预分选的研究, 主要集中于 3 个方面: 聚类算法本身、脉冲描述字的选择和利用方法, 以及对参数变化信号的处理。

在聚类预分选时, 雷达脉冲体现为具有 DOA、RF、PW 和 PA 等 4 个自由度的数据, 一般的聚类算法都可以使用, 研究人员对 K-Means、

DBSCAN 和密度峰值聚类等各种经典聚类算法进行改进, 以期在分选效果和计算复杂度方面得到改善。文献[1]将模糊 c 均值算法应用于雷达信号分选, 并利用使用 W 指数评价聚类结果, 进而获得最佳聚类簇数。文献[2]针对传统 K-Means 聚类算法对初始聚类中心敏感、需要事先确定初始聚类数的缺点, 将数据场引入雷达信号分选并与 K-Means 聚类算法相结合, 提出了一种融合分选算法。文献[3]通过引入自适应滑动窗, 使得 Mean-Shift 算法摆脱了对预设参数的依赖, 提高了收敛速度和准确性。文献[4]将主导集与 DBSCAN 聚类算法相结合, 降低了算法的参数设置的依赖。针对噪声脉冲的干扰问题, 文献[5]通过神经决策树剔除噪声脉冲, 然后使用 DBSCAN 进行聚类。文献[6]将密度峰值聚类算法应用于分选, 该算法可自动确定聚类中心。文献[7]通过对密度峰值聚类算法和数据场的研究, 提出了一种基于势距图的雷达信号预分选算法。文献[8]在点序识别聚类结构算法的基础上, 引入启发式自约束搜索机制, 能根据数据特性自动调整参数, 可在一定程度上适应密度大小不同的数据。

一些与图论相关的聚类方法也被应用到雷达信号分选中。文献[9]利用有限穿透可见图以滑窗

方式对交错雷达脉冲序列进行复杂网络构造，然后基于构造的复杂网络利用标签传播算法将脉冲聚集成多个子类，最后采用密度峰值聚类方法将子类合并，可实现对多个多功能雷达脉冲的分选，在一定程度上缓解了“增批”问题，但对复杂信号环境的适应能力仍然不足。文献[10]在模糊聚类算法的基础上结合 K 近邻搜索，将 λ 邻域范围搜索变为 λ 邻域内 K 近邻搜索，提出了连通 K 近邻聚类，所提算法在分选效果性能相近的情况下时间复杂度大幅下降。文献[11]和文献[12]分别使用复杂网络和正交匹配追踪算法建立邻接矩阵，然后采用谱聚类进行预分选。

自组织神经网络也被应用到雷达信号分选中，特别是在在线分选中得到关注。文献[13]针对聚类需要先验信息的问题，提出了一种两级方法：首先利用改进的自组织特征映射网络对雷达信号进行粗略排序，得到输入数据的近似类数和聚类中心位置；然后在此基础上使用 coyote 优化算法对分选结果进一步优化。文献[14]对 Kohonen 自组织特征映射距离的定义进行了改进，一定程度上提高了对参数变化雷达信号的聚类分选能力。文献[15]在模糊自适应共振理论的基础上进行了改进，实现了警戒阈值的自适应动态调整，提升了对复杂电磁环境的适应能力。

除自组织神经网络外，贝叶斯非参数等方法也被用于在线分选。在文献[16]中，作者使用贝叶

斯非参数来解决动态变化的雷达信号分选问题，并实现了一种基于 RF 和 PW 的高效在线分选算法。文献[17]对基于最小描述长度的模型聚类和基于竞争学习的聚类两种在线分选方法进行了比较，证明前者效果更优，实时性更好，且人为干预少。

一些研究人员在设计分选方法时，也将雷达信号的脉冲描述字之间的特性差异考虑其中。文献[18]基于已有数据，利用变精度粗糙集获取雷达辐射源各属性特征参数的权重，由其权重构成最优特征加权矩阵，进而计算相似度，然后利用 K-Means 方法进行聚类，提高了分选的准确率。文献[19]首先基于 PA 判断不同目标脉冲流交错的程度，然后基于交错程度的不同进行分段聚类。

针对频率捷变信号分选问题，也有文献进行了专门的研究。文献[20]针对相控阵雷达 RF 在毫秒尺度内变化产生的增批问题，基于对实测数据的观察，提出了频率捷变模式挖掘方法，通过长时间的数据关联和变化规律的挖掘，生成可能的频率捷变模式，为信号合批提供先验信息。

表 1 中对比了不同技术路线下具有代表性的预分选方法，其中，文献[18]考虑了不同参数在聚类中的差异化影响，文献[20]针对性研究了参数突变信号的合批问题，而其他方法均未就这 2 个问题展开研究。

表 1 不同技术路线下的代表性预分选方法

Tab. 1 Representative pre-deinterleaving methods under different technical routes

方法	技术路线	主要优势	主要局限
文献[2]	K-Means, 数据场	参数依赖性小	只适应球形簇
文献[5]	DBSCAN, 神经决策树	排除噪声脉冲干扰	不适应参数突变
文献[7]	密度峰值聚类, 数据场	参数依赖性小	不适应参数突变
文献[12]	正交匹配追踪, 谱聚类	参数依赖性小	计算复杂度高
文献[15]	模糊自适应共振理论	在线分选	准确率受限
文献[18]	K-Means, 变精度粗糙集	考虑不同参数差异	只适应球形簇
文献[20]	Apriori 算法, 模式挖掘	对频率捷信号合批	需要先验信息

在现有关于预分选的研究中，对于聚类算法本身的研究仍然是最多的。其中，对于离线分选方法，图论类方法相比基于 K-Means 等经典理论的方法更为复杂。离线分选方法虽然在时效性上具有一定的优势，但在复杂信号环境下效果会显著下降，鲁棒性较差。预分选研究主要的进步体现在减少参数设置和降低计算复杂度方面，仍然主要适用于类内构成单一、不同参数分布特性差

异小、目标边界清晰的场景。

然而，参数变化、测量误差、高脉冲密度和高脉冲丢失，使得类内出现子类、不同参数的分布特性产生差异、目标间的边界模糊，现有预分选方法面临明显困境。

1) 对类内包含子类的雷达信号适应性不足。具有多个典型值的参数变化形式，如频率脉间捷变和脉组捷变、脉冲宽度组变等，使得类内包含

多个子类,导致基于聚类的预分选方法出现增批。尽管文献[20]针对频率捷变信号的合批问题进行了深入研究,但其适用范围有限,仅针对特定类型的信号。文献[1,21]利用 RF、PW 对参数变化的雷达信号进行聚类,但是要求参数的类内距离显著小于类间距离。

2) 对不同参数的分布差异考虑较少。参数抖动和测量误差,使得参数分布范围显著增大,在不同维度呈现不同的分布尺度和不同的分布特性。在预分选中,参数抖动主要指频率抖动,它使得不同目标在频率分布范围、分布函数上都存在明显差异。测量误差在电子侦察中普遍存在,且在不同参数间存在明显差异。DOA 测量误差一般在 1-2 度,大于 2 度可以直接认为是不同目标,对于需要进一步分选的脉冲流而言,不同目标的脉冲集中于 2 度的 DOA 范围内,且存在由于测量误差而带来的重叠。PA 作为体现能量的相对量,受到诸多因素的影响,对同一目标而言,即便信号强度较大且照射方向没有明显变化,也可能跨度 20-30dB,这就使得不同目标的 PA 取值常常重叠。RF 和 PW 都是雷达工作参数,除脉内有 RF 调制且脉冲不完整外,当接收机性能可靠时,RF 都能以相对较小而且稳定的误差测得。PW 受信号强度的影响明显,当信号强度低于一定值,PW 的测量误差会显著增大。现有预方法多数将 DOA、RF、PW 和 PA 等脉冲描述字做等价考虑,仅仅是分布于不同的维度。然而,不同参数的分布差异对分选效果具有显著影响。尽管目前也有少量文献在预分选时对参数差异进行了考虑,但研究仍不深入且适应场景十分有限,如文献[18]在有训练集支撑条件下考虑了不同参数在聚类中的权重,文献[19]则仅仅将 PA 和其他参数做了分阶段的利用。

3) 在多个目标边界模糊的场景下效果不够理想。参数变化、测量误差、高脉冲密度和高脉冲丢失增大了单个目标的类内距离,减小了多个目标的类间距离,使得不同目标之间的边界趋于模糊,难以形成明显的簇。当多个目标在 DOA、RF、PW 和 PA 等各个维度都边界模糊时,就难以基于距离进行有效的聚类预分选。

2.2 基于脉冲重复间隔的主分选方法

主分选分为基于单站数据和基于多站数据两种情况。基于单站数据的分选方法,核心是利用雷达信号 PRI 的周期性,也就是信号 TOA 的线性进行分选,包括基于“确定 PRI—搜索脉冲”机

制的分选方法、平面变换法和卡尔曼滤波法。基于多站数据采用多站时差法。

2.2.1 基于“确定 PRI—搜索脉冲”机制的分选方法

一个常见的思路是首先从脉冲流的 TOA 中找到雷达 PRI 或 PRI 周期,然后利用找到的 PRI 或 PRI 周期从脉冲流中搜索对应的脉冲,即其工作机制为“确定 PRI—搜索脉冲”,如图 3 所示。其中最典型的是直方图法和谱变换法。

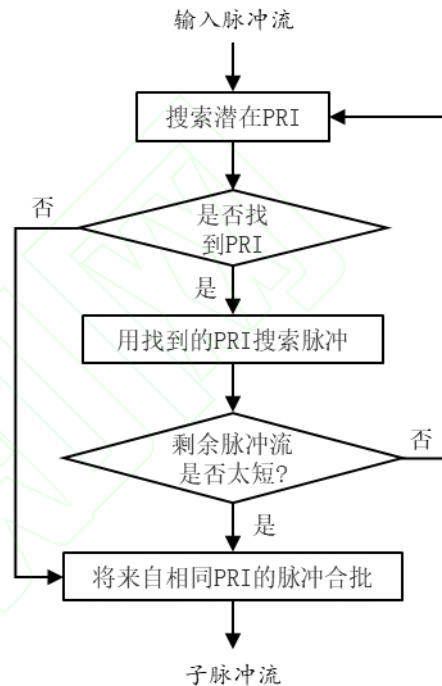


图 3 基于“确定 PRI—搜索脉冲”机制的分选方法

Fig. 3 Deinterleaving methods based on the "Determining PRI--Searching Pulses" mechanism

(1) 直方图法。直方图法是泛指对脉冲 TOA 间的差值进行统计,并基于统计结果的数学规律获取潜在 PRI 的方法,由于 TOA 差值统计常常以直方图的形式呈现,因此称为直方图法,最具代表性的是累积差直方图法^[22] (cumulant difference histogram, CDIF) 和序列差直方图法^[23-24] (sequential difference histogram, SDIF)。CDIF 方法对 TOA 差值个数进行逐级累加统计,以脉冲流的时间跨度除以 TOA 差值再乘以一定的系数作为门限,如果某个 TOA 差值对应的统计结果超过了这一门限,则将这一差值作为潜在 PRI。SDIF 方法将脉冲流视为泊松过程,依据脉冲流密度来推导 TOA 差值的概率密度函数,再乘以当前级别的差值总数和一定的系数作为门限。SDIF 与 CDIF 相比,进一步降低了计算成本,在实践

中得到了广泛应用。CDIF 方法是基于真实 PRI 的统计规律来确定门限的, 而 SDIF 方法是基于随机的 TOA 差值来确定门限的。从检测的角度来看, 如果将真实 PRI 的看作信号, 随机的 TOA 差值看作噪声, 统计结果看作信号强度, 那么 CDIF 方法是基于信号来确定门限的, 而 SDIF 方法则是基于噪声来确定门限。

文献[25]为了解决传统的 CDIF 分选门限设置容易造成较高的虚警概率的问题, 提出了一种改进的基于噪声的门限设置方法。文献[26]通过将直方图的统计宽度增大, 使得 SDIF 方法具备了一定的发现抖动 PRI 的能力。文献[27]将脉冲对的 DOA、RF、PW 以及 TOA 的差值经过转换后, 都作为聚类的对象, 一定程度上利用了雷达 PRI 和其他参数的耦合关系。

(2) 谱变换法。一些研究通过将 TOA 进行变换得到关于 PRI 的谱, 然后提取真实的 PRI。文献[28]利用同一雷达 TOA 的周期性, 将脉冲流 TOA 进行延时, 与原始 TOA 进行相关运算, 当延时位于雷达 PRI 位置时, 就能得到对应的谱峰, 这一思路原理简单, 但其不足在于存在严重的谐波问题。PRI 变换法 (PRI Transform, PRI-Tran) 通过引入相位进而获得了优良的谐波抑制性能, 改进后的 PRI-Tran 算法比原始版本的算法更能适应 PRI 抖动^[29]雷达信号。文献[30]将滑动时间窗引入到 PRI 变换方法, 削弱观测时窗长度与单部雷达脉冲列持续时长失配的影响。文献[31]将聚类用于 SDIF 方法的直方图统计, 并将 SDIF 与 PRI 变换法相结合, 在减小计算量的同时保证了对 PRI 抖动信号的检测能力。针对 PRI-Tran 方法对于参差信号帧周期过多抑制的缺陷, 文献[32]提出了一种基于脉冲间隔分布矩阵的直方图算法。针对 PRI 组变的雷达信号, 文献[33]将直方图与 PRI-Tran 相结合提高子周期检测概率, 通过霍夫变换结合迭代自组织聚类判断信号是否属于驻留转换雷达, 依据排列熵指标将多个脉冲序列合批, 但仅适应较为理想的信号环境, 且算法过于复杂。以上方法均以相关运算为基础, 要将待搜索的 PRI 区间进行分段数字化, 这就带来了几个方面的缺陷: (a) 所得的 PRI 不够精确; (b) 计算量随着待搜索的 PRI 区间增大而增大; (c) 鲁棒性降低。

文献[34]将 TOA 序列转换为相位, 再进行离散傅里叶变换, 但对于 PRI 参差信号, 该方法并不准确。

(3) 相关匹配法。文献[35]在酉正交拉马努

金子空间基础上提出了相关匹配方法, 对 PRI 参差和脉冲丢失具有较强的适应性, 但对 PRI 抖动比较敏感。文献[36]则将相关匹配方法与改进的 PRI 变换法相结合, 同时增强了对 PRI 参差和抖动的处理能力。这类方法较为复杂且在高脉冲丢失和高脉冲密度条件下不够鲁棒。

上述基于“确定 PRI—搜索脉冲”机制的方法通常存在几个方面缺点。首先, 在搜索潜在 PRI 和目标脉冲时, 需要根据经验设置阈值和容差, 而经验依赖使得分选效果容易出现较大波动。其次, 当属于不同目标的脉冲靠近时, 在搜索脉冲时难以准确区分。第三, 这些方法需要反复迭代输入和输出数据来寻找新的 PRI 和搜索脉冲, 这增加了算法的复杂性, 需要更多的时间。特别是当一个周期内的脉冲数量较大时, 对 PRI 或 PRI 周期和脉冲进行多轮搜索的过程, 会使时效性明显下降。第四, 在高脉冲密度和高脉冲丢失条件下鲁棒性不够好, 容易找不到 PRI 或者找到错误的 PRI。

2.2.2 平面变换法

对于 PRI 具有周期性的雷达信号, 当将其 TOA 信息变换到二维平面上显示时, 对于人眼会更加直观, 容易发现, 因此早期主要运用于视频分选。文献[37]的方法为首先确定一个时间宽度, 然后用脉冲的 TOA 除以时间宽度, 得到倍数和余数, 将倍数和余数分别对应为平面中的 2 个坐标, 使得同一雷达的脉冲规律能够得到直观的显示。这一方法相当于对 TOA 进行了折叠, 因此又称为 TOA 折叠法。文献[38-39]对这一方法^[37]中谐波产生的原因进行了分析并提出了识别方法。文献[40]对 PRI 较大或 PRI 调制幅度较大导致变换后不直观的问题进行了讨论并提出了进行压缩显示的方法。以上方法都主要应用于人在回路的可视化分选, 尚不能完全由计算机完成。

文献[41]提出了自动搜索 PRI 周期性对称调制雷达信号的算法, 文献[42]则具备一定的对抖动信号的搜索能力, 文献[43]提出矩阵匹配法来搜索平面变换后的脉冲。文献[44-45]将 Hough 变换用于平面变换后的特征曲线检测, 实现脉冲自动提取。

文献[46-47]提出了另一种平面变换方法: 指定待搜索的 PRI 区间, 计算脉冲流中任意脉冲对的 TOA 差, 如果差值在区间范围内, 则将其展示在平面内, 平面的横坐标为脉冲对前一个或后一个脉冲的 TOA, 纵坐标为脉冲对 TOA 差的绝对

值, PRI 具有周期性的雷达信号则能够在平面上得到非常直观的展示, 可以进行视频分选。这种变换方法同样存在谐波问题, 且平面上的点更多, 增加了识别难度。

基于平面变换思想的分选方法, 将一维的 TOA 数据, 转换到二维平面, 使雷达信号特征更加直观, 当有人介入时, 十分有利于发挥人的辨识能力。但在向完全自动化发展时, 在脉冲搜索的准确性方面效果仍然不足。

2.2.3 卡尔曼滤波法

文献[48-51]将具有周期性 PRI 的雷达脉冲流建模为线性动态模型, 并使用卡尔曼滤波进行分

选。文献[49]提出了一种利用扩展卡尔曼滤波进行分选并估计 PRI 的方法, 这一方法的优点是计算成本更低。文献[50]则提出了一种计算量更低的方法来估计 PRI 和相位, 以满足扩展卡尔曼滤波方法进行分选的需要。文献[51]在利用卡尔曼滤波的基础上, 提出了多假设跟踪方法来对脉冲流进行分选。

这些算法的缺点在于应用于实践时相对复杂, 并且在丢脉冲和密集信号环境下的鲁棒性不够好。

表 2 中对比了不同技术路线下具有代表性的主分选方法, 其中文献[26]和文献[29]具有相对较好的鲁棒性和较广泛的应用, 表中方法都不具备对 PRI 组变信号的合批能力。

表 2 不同技术路线下的代表性主分选方法

Tab. 2 Representative main deinterleaving methods under different technical routes

方法	技术路线	主要优势	主要局限
文献[26]	SDIF 的改进	计算量小, 有一定 PRI 抖动信号分选能力	PRI 组变信号不能合批
文献[29]	PRI-Tran 的改进	谐波抑制好, 有一定 PRI 抖动信号分选能力	计算量和鲁棒性互斥
文献[43]	平面变换	人在回路时直观	自动化搜索鲁棒性不佳
文献[51]	多假设跟踪, 卡尔曼滤波	对参差信号可并行分选	鲁棒性不佳

2.2.4 多站时差法

当同一目标发射的信号可由在不同位置的多个侦测设备接收到时, 由于脉冲到达多个设备的时间差固定, 可利用脉冲流的相关性来进行分选。文献[52]定义了相关系数来表征相关程度, 通过对配对时差序列相关矩阵的分析, 减少虚假配对。文献[53]针对高重频信号的虚假聚类 and 超低重频的脉冲累积数少的问题, 提出了基于递归扩展直方图的时差分选方法。文献[54]针对脉冲数极少信号的分选问题, 提出了多站时差与多参数联合分选的方法。文献[55]针对目标数目未知、参数相近的问题, 首先利用目标位置信息场定位法初步确定目标数目和位置, 然后利用真实时差进行分选。文献[56]对于三站电子侦察系统, 提出了一种基于时差和多参数的分选方法, 改善了高重频信号的模糊问题和超低重频信号分选难的问题, 同时提高了时效性。文献[57]基于偏联系数集对势进行聚类, 在此基础上通过多站到达时间差对聚类结果进行融合, 无需先验参数, 且改善了对参数变化雷达的分选能力。文献[58]将多站时差与自适应流聚类结合, 实现对预分选增批簇的自适应合并和流聚类阈值设置, 提高了信号分选算法的准确性与可靠性。

多站时差类方法原理简单, 结果可靠, 但对

设备数量、时间同步和布站位置选择等硬件条件要求高。

总体上, 关于参数未知条件下的主分选, 多站时差法不受信号样式限制, 技术已经比较成熟, 在条件允许的场合作为首选方法, 但在现实中会受硬件条件限制。基于单站数据的分选方法, 对于 PRI 固定的信号, 在数据质量理想的情况下可取得较好的效果, 相对而言, 基于“确定 PRI—搜索脉冲”机制的方法, 原理简单, 其中的直方图法和 PRI-Tran 法鲁棒性较好, 得到了较为广泛的应用。

然而, 对于基于单站数据的主分选方法, 其鲁棒性先天受到挑战: 如果信号的周期性不能得到保证, 分选效果就会下降。(1) PRI 组变, 使得主分选出现增批, 当脉冲组过短时, 甚至无法检测出 PRI。(2) TOA 测量误差、PRI 抖动和脉冲丢失造成脉冲的时间周期性受损, 降低了 PRI 检测时信号的强度, 并提高了搜索脉冲的难度。

(3) 高脉冲密度则抬高了 PRI 检测时噪声的强度, 并提高了搜索脉冲的难度。

鉴于常规分选方法的局限性, 就需要寻找其他信息来提高分选效果。在雷达脉冲流数据中, 参数的变化规律如 PRI 和 RF 变化规律, 不同参数的耦合信息如 PRI 和 PA、PRI 和 PW 的耦合信

息等,理论上都可应用于分选以提升效果。然而,在常规分选方法中,不论是基于参数相似性的预分选方法,还是基于 PRI 周期性的主分选方法,都难以对这些信息进行有效利用。智能化方法特别是基于有监督神经网络的方法在学习利用这些特征方面具有较好的优势,在近年的研究中得到重视,将在下一节进行介绍。

2.3 距离匹配法

如果已经掌握了目标雷达信号的参数,可将已知参数与截获的脉冲流参数进行距离匹配,实现快速分选。文献[59]将雷达信号的一个变化周期作为样本图,可完整体现雷达信号的工作参数和变化规律,为参数匹配分选提供新的研究方向。然而,样本图作为匹配法的一个工具,其使用前提是具有先验信息。为了获得样本图,文献[60]提出了通过加权系数对每一个特征参数的加权得到合成的特征参数,进而获得样本图的方法,但是对于变化复杂的信号不适用;文献[61]提出了通过移位计算自相关函数的获得样本图的方法,但是对于测量误差较大的信号不适用且计算效率较低。获取样本图的过程与 3.1、3.2 小节中获取未知信号参数本质上是一样的,且这些方法^[60-61]并无明显优势。

总体上,在已知雷达信号参数的情况下,以样本图为代表的距离匹配法在脉冲密度较高、数据变化复杂且质量不高的情况下也能取得较好的效果,但依赖于充足的先验信息来支撑。

3 智能化分选方法

研究人员很早就尝试将各种智能化技术应用到雷达信号分选中,鉴于基于有监督神经网络的分选方法在各种智能化分选方法中得到相对更多的在研究,下面将智能化分选方法分为非神经网络的分选方法和基于有监督神经网络的分选方法两类,并从这两个方面进行论述。

3.1 非神经网络的分选方法

智能化技术如支持向量机、自动机和马尔可夫链等均被研究人员尝试用于雷达信号分选。这些方法仅适用于特定的场景,在应用中具有较大的局限性。文献[62]首先基于 RF 和 PRI 对脉冲进行聚类,然后采用支持向量机对具有相同 PA 变化趋势的脉冲簇进行合批,仅适用于目标间频率区分度很高,且脉冲无丢失的场景。在文献[63]中,作者引入有限自动机,将分选问题视为符号串识别问题,该研究主要用于简单信号的在线分选。

文献[64-65]将隐马尔可夫模型应用于雷达信号分选。文献[66]证明基于马尔可夫链的分选等效于利用残差栅栏网络分选,并提出了用于优化计算结果的改进 Viterbi 算法。基于有限自动机和隐马尔可夫模型的方法都需要充足的先验信息,并且对 PRI 调制样式有要求。

3.2 基于有监督神经网络的分选方法

根据分选机制和对神经网络利用方式的不同,基于有监督神经网络的分选方法总体上可以分为 5 类:利用神经网络基于单个脉冲的参数进行分类的分选方法、利用神经网络搜索 PRI 的分选方法、利用多个神经网络迭代的分选方法、基于图像数据语义分割的分选方法和基于序列数据语义分割的分选方法。

(1) 基于单个脉冲的参数进行分类的分选方法

这类方法首先利用神经网络学习已知的信号参数,然后对输入的脉冲进行分类,本质上是利用神经网络来实现参数匹配。文献[67]对信号参数进行预处理后再输入神经网络分类。文献[68]采用注意力机制实现雷达信号的分选。文献[69]同时将脉间和脉内参数作为信号分选特征,使用深度全连接神经网络作为分类器实现对已知雷达信号的分选,并且引入了置信度神经元来感知未知雷达信号并进行剔除。文献[70]将循环编码与解码相结合,可以实现递归分选并判断脉冲流中目标的数量。这一类分选方法本质上仍然是匹配,相比传统基于距离的匹配并无明显优势。

(2) 利用神经网络搜索 PRI 的分选方法

这类方法首先利用经过训练的神经网络搜索雷达信号 PRI,然后利用 PRI 从脉冲流中搜索脉冲。文献[71]在 PRI-Tran 方法的基础上,提出一种基于 PRI 多级箱与深度森林的雷达信号单参数分选算法,将智能化方法用于提升对 PRI 预测的精度。文献[72]利用 PRI-Tran 方法生成二维图像,然后利用 U-Net 从图像中识别潜在 PRI,进而实现雷达信号的分选。这一类方法本质上是 PRI-Tran 方法的扩展,因此仍然存在 PRI-Tran 方法的一般问题:需要将 PRI 进行数字化处理,降低了 PRI 精度;在搜索脉冲时仍然需要根据经验设置门限。

(3) 利用多个神经网络迭代的分选方法

文献[73]使用长短时记忆网络对脉冲 TOA 进行预测,实现对脉冲流的分选,要求完全掌握雷达信号的 PRI。文献[74]中引入门控循环单元,将

分选问题视为一个预测问题。上述两种方法^[73-74]仅利用了脉冲序列的单向信息来判断每个脉冲的类别，对脉冲流信息利用不充分。文献^[75]利用自动编码器减少脉冲流中的随机噪声脉冲，但无法对脉冲进行完全彻底的分选。文献^[76]可使用自动编码器分选出目标脉冲，但需要关于目标参数的准确先验信息。上述方法^[73-76]需要为每一类雷达信号训练一个网络，每次输出只能实现对一个目标的分选，如图 4 所示。也就是说，这些方法在每次输出时只完成了一个二分类任务，因此需要反复迭代输入输出数据，导致时效性不理想。

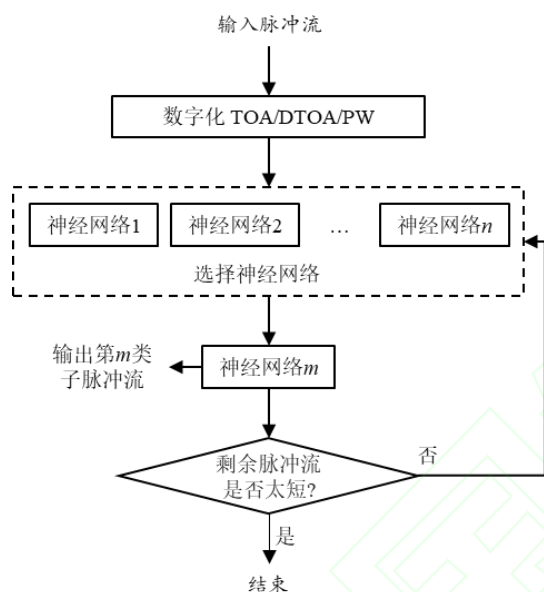


图 4 利用多个神经网络迭代分选的工作流程^[74]

Fig. 4 Procedure for iterative deinterleaving methods with multiple neural networks^[74]

(4) 基于图像数据语义分割的分选方法

近年来，关于图像分割的研究发展迅速^[77-78]，一些研究人员借鉴图像语义分割对同一样本中不同数据点进行分类的思想，从全新的视角来看待雷达信号分选，即将其也处理为语义分割问题。目前，这类方法也可以分为 2 类：基于图像数据语义分割的分选方法和基于序列数据语义分割的分选方法。

鉴于深度神经网络在图像语义分割中的良好效果，一些研究人员尝试将雷达信号分选问题转化为图像语义分割问题，借助神经网络来实现雷达信号的分选。文献^[79-80]借鉴图像语义分割思想，首先将全脉冲数据中的 TOA、RF 和 PW 等信息映射成图像，然后利用神经网络对脉冲序列图像进行分割获得像素点分类结果，前者采用了 U-Net，后者采用了 U-SegNet。文献^[73]将雷达脉冲流投影到 RF-PW 平面上，使用 Faster RCNN 对

雷达信号进行预分选，其要求信号参数已知，且无法适应复杂的信号环境。但由于数据预处理时丢失过多的信息，这些方法只能适应比较单一的信号环境。

以上基于神经网络的方法中，利用多个神经网络迭代分选的方法^[73-76]和基于图像数据语义分割的分选方法^[73,79-83]，都需要对 TOA、RF 和 PW 等参数进行数字化预处理，但这也意味着的信息的丢失。图 5 展示了文献^[74-76]对 TOA 进行数字化处理的过程，即将时间划分为长度相等的小单元，将有脉冲的单元标记为 1，没有脉冲的单元标记为 0。这一处理引入了三个问题，本文统一称为“分辨率问题”：第一，引入了误差，降低了信息的精度；第二，当一个参数单位中有多个脉冲时，这一处理只能显示一个脉冲，其他脉冲的信息则被遮盖；第三，增加了计算量。

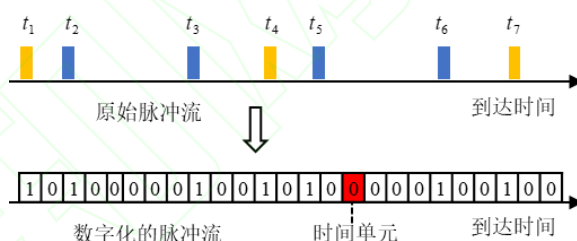


图 5 TOA 数字化^[74-76]

Fig. 5 Digitalization of TOA^[74-76]

(5) 基于序列数据语义分割的分选方法

雷达脉冲流数据是序列数据，要使得不丢失信息，就应尽可能不改变数据维度。本团队从这一点出发，提出了基于序列数据语义分割的雷达信号分选方法，即保持脉冲流数据的维度不变，输出时直接在对应位置标记脉冲的类别，如图 6 所示。研究根据雷达信号特点，从基于 PRI 语义分割^[84]和基于多参数语义分割^[85-87]的雷达信号分选 2 个层次展开研究，系统地阐述了分选中语义的概念和内容、数据预处理方法以及不同神经网络的效果差异等问题，是近年来智能化雷达信号分选方法的代表性研究。研究所提出的雷达信号语义包括参数分布、变化形式和不同参数间的耦合关系等。文献^[88]将残差网络与门控循环单元结合，虽然也采用了对序列数据分割的思路，但对 PRI 和 PW 的数字化处理造成了信息丢失。

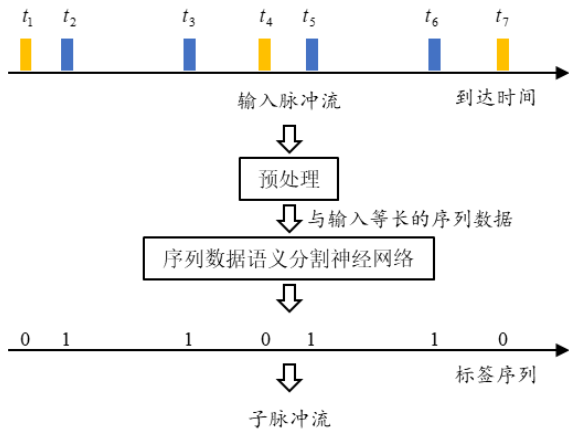


图 6 基于序列数据语义分割的分选示意^[84-87]

Fig. 6 Schematic diagram of the deinterleaving methods based on semantic segmentation of sequence data^[84-87]

表 3 对比了和表 4 对比了代表性常规方法和智能化方法的分选准确率，其中，智能化方法在表 3 中基于 PRI 分选，在表 4 中基于多参数分选。

表 3 常规方法和基于 PRI 的智能化方法效果对比

Tab. 3 Comparison between conventional methods and intelligent methods based on PRI

方法	技术路线	实验条件	准确率/(%)
文献[26]	SDIF 的改进		98.2
文献[32]	PRI-Tran 的改进	4 个 PRI	93.0
文献[84]	序列数据 语义分割	固定雷达	89.6

表 4 常规方法和基于多参数的智能化方法效果对比

Tab. 4 Comparison between conventional methods and intelligent method based on multi-parameter

方法	技术路线	实验条件	准确率/(%)
文献[26]	SDIF 的改进		63.01
文献[32]	PRI-Tran 的 改进	3 个 PRI 组 变、PW 组	62.94
文献[85]	序列数据 语义分割	变雷达， 各自占空	99.54
文献[79]	图像数据 语义分割	比不同	32.65

可以看出，多种智能化技术都可应用于雷达信号分选。其中，基于序列数据语义分割的雷达信号分选方法，利用神经网络挖掘多种特征，不存在信息丢失问题，在数据质量较低且脉冲密度较高的情况下也具有较好的分选效果。

但是智能化分选方法的效果也受到几个因素的制约：(1) 受模型结构的制约。尽管基于序列数据语义分割的分选方法已经为有监督智能化分

选确立了较好的范式，但不同网络结构在性能上却存在差异，分选效果还受到网络结构的影响。

(2) 受训练样本制约。一些目标由于时间、空间和能量等多方面因素的限制，难以获得足够的真实数据作为训练样本，这成为制约智能化分选的另一因素。(3) 受模型脆弱性制约。智能化技术一方面带来了优异的分选效果，另一方面也带来了模型的脆弱性，而这可能成为敌方的攻击方向，这同样对分选效果构成制约。

4. 雷达信号分选未来发展方向

常规分选方法和智能化分选方法各自有其优势，前者对算力和先验信息要求低，但对于复杂场景的适应能力不如后者；后者则反之。未来，这两类方法都有利用价值和发展空间。对于一些特殊信号和场景，需要突破传统分选思路，根据识别目的发展新的分选方法。

着眼于提升雷达信号分选效果和解决电子侦察中目标识别这一根本问题，从以下 3 个方向展开进一步探索，有望提升对分选问题的研究水平，使其在电子侦察领域发挥更大的作用。

1) 常规分选方法发展方向

一是发展适应性更强的预分选方法。发展新的聚类算法，提升在信号参数变化、不同参数分布特性存在差异和类边界模糊等条件下的分选效果；优化聚类参数设置方法，提升在脉冲密度变化条件下分选方法的自适应性。二是发展新的基于单站数据的主分选方法。针对一些 PRI 典型变化规律，发展针对性分选方法，提升对 PRI 复杂变化信号的分选能力；发展新的“确定 PRI—搜索脉冲”方法，增强在测量误差、PRI 抖动、高脉冲密度和高脉冲丢失等条件下的效果，提升算法效率。

2) 智能分选方法发展方向

一是进一步探索优秀的分选神经网络。寻找在全脉冲数据处理中效果更优、更易于训练、泛化性能更好的模型将一直是智能化分选值得探索的方向。二是研究小样本条件下的智能化分选。对于一些难以获得的信号，特别是高价值目标信号，研究小样本条件下的分选模型训练问题，可扩大智能化分选技术的应用范围，充分发挥智能化分选的作用。三是探索对抗条件下的雷达信号分选问题。研究模型的脆弱性及对应的攻击和防御方法，一方面提高智能化分选方法的稳健性，另一方面提升雷达系统的反侦察能力。四是研究基于大模型的雷达信号分选方法。由于大模型已

经表现出深度思考和逻辑推理能力,这使得其可能理解分选的本质,进而具备在复杂环境、小样本甚至零样本条件下对复杂信号的分选能力。

3) 探索以识别效果为导向的分选方法

传统思路按照单个目标单个模式分选再逐一识别,对复杂信号常常分选效果不佳,进而导致识别效果不理想。着眼于识别这一根本目的,按识别效果发展新分选方法,有利于克服雷达信号的复杂性对分选理论的限制,实现更加理想的识别效果。比如,对于一些参数复杂变化的雷达,如果同一区域内存在多个同类型目标,往往难以确定哪些脉冲属于同一个雷达。这就需要放弃按单个目标进行分选的思路,只要分选结果能够证明该区域内有几个此类型目标即可。又比如,对于一些先进雷达,不同工作模式的脉冲相互交错,难以按时间段进行分选。这就需要突破一般的分选思路,将不同工作模式的脉冲作为整体进行分选,将工作模式识别转换为工作模式组识别。

参考文献(References)

- [1] MAZINAN A H. On cluster validity indices with its application to interleaved radar pulse separation through fuzzy-based representation[J]. *Evolving Systems*, 2016, 7(4): 243-254.
- [2] 周兰兰, 仇洪冰, 周隼, 等. 基于数据场聚类与时差的雷达信号分选方法[J]. *桂林电子科技大学学报*, 2021, 41(2): 92-98.
ZHOU L L, QIU H B, ZHOU Z, et al. Radar signal sorting method based on data field clustering and TDOA[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2021, 41(2): 92-98. (in Chinese)
- [3] 郭立民, 陈昊翔, 于飒宁. 基于自适应滑动窗均值偏移算法的雷达信号分选[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(11): 2266-2273.
GUO L M, CHEN H X, YU S N. Radar signal sorting based on an auto-mean-shift algorithm[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(11): 2266-2273. (in Chinese)
- [4] 刘鲁涛, 王璐璐, 李品, 等. DSets-DBSCAN 无参数聚类的雷达信号分选算法[J]. *国防科技大学学报*, 2022, 44(4): 158-163.
LIU L T, WANG L L, LI P, et al. Radar signal sorting algorithm for DSets-DBSCAN without parameter clustering[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2022, 44(4): 158-163. (in Chinese)
- [5] 苏显康, 张大维, 叶方. 基于层次聚类和谱适应的雷达信号分选方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2025, 47(1): 101-108.
SU X K, ZHANG D W, YE F. Radar signal sorting method based on hierarchical clustering and spectral adaptation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2025, 47(1): 101-108. (in Chinese)
- [6] LI H B, ZHAO J, ZHANG Y. Signals deinterleaving for ES systems using improved CFSFDP algorithm[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2019: 1-5.
- [7] 李明松. 基于机器学习的雷达信号脉间参数分选研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
LI M S. Research on interpulse parameter sorting of radar signal based on machine learning[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. (in Chinese)
- [8] 嵇志康, 周子楠, 李焯鹏. 面向雷达信号分选的自约束搜索密度聚类算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2024, 47(1): 62-69.
JI Z K, ZHOU Z N, LI X P. Self-constrained search density clustering algorithm for radar signal sorting[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, 47(1): 62-69. (in Chinese)
- [9] CHI K, SHEN J H, LI Y, et al. Multi-function radar signal sorting based on complex network[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 91-95.
- [10] 司徒建, 张悦, 邓志安. 用于雷达信号分选的连通 k 近邻聚类算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(8): 2463-2470.
SI W J, ZHANG Y, DENG Z A. Connected k - nearest neighbor clustering algorithm for radar signal sorting [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45 (8): 2463 - 2470 (in Chinese) .
- [11] GUO Q, HUANG S, QI L G, et al. A radar signal deinterleaving method based on complex network and Laplacian graph clustering[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2024, 31: 2580-2584.
- [12] GUO Q, HUANG S, LIU L C, et al. A radar signal deinterleaving method based on enhanced sparse subspace clustering[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 61(2): 2956-2972.
- [13] CUI Z D, FU X J, LANG P, et al. Radar signal

- sorting based on adaptive SOFM and coyote optimization[C]//Proceedings of the 2022 7th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), 2022: 157-161.
- [14] ZHAO C, ZHAO Y J. Application of improved kohonen SOFM neural network to radar signal sorting[C]// Proceedings of the Neural Information Processing, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 553-559.
- [15] 马志峰, 张越, 董健, 等. 基于改进 Fuzzy ART 的自适应雷达信号分选[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(9): 990-996.
MA Z F, ZHANG Y, DONG J, et al. Adaptive radar signal sorting based on improved fuzzy ART[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(9): 990-996. (in Chinese)
- [16] SCHERREIK M, RIGLING B. Clustering radar pulses with Bayesian nonparametrics: a case for online processing[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR), 2020: 1052-1057.
- [17] LIU J, LEE J P Y, LI L J, et al. Online clustering algorithms for radar emitter classification[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8): 1185-1196.
- [18] 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.
ZHANG Q, WANG H W, WANG Y B, 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. (in Chinese)
- [19] YU Z B, WANG Y X, CHEN C X. Radar emitter signal sorting method based on density clustering algorithm of signal aliasing degree judgment[C]//Proceedings of the 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2020: 1027-1031.
- [20] TIAN T, JIA J C, JIA R, et al. A batching method for complex emitters based on frequency agility pattern mining[C]//Proceedings of the 2022 Tenth International Conference on Advanced Cloud and Big Data (CBD), 2022: 178-183.
- [21] MOTTIER M, CHARDON G, PASCAL F. Deinterleaving and clustering unknown RADAR pulses[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21), 2021: 1-6.
- [22] MARDIA H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. IEE Proceedings F: Radar and Signal Processing, 1989, 136(4): 149-154.
- [23] MILOJEVIĆ D J, POPOVIC B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. IEE Proceedings F: Radar and Signal Processing, 1992, 139(1): 98-104.
- [24] 贾金伟, 刘利民, 韩壮志, 等. 基于压缩感知的抗 SDIF 分选射频隐身信号设计及回波信号处理[J]. 航空学报, 2023, 44(13): 327934.
JIA J W, LIU L M, HAN Z Z, et al. Design of anti-SDIF radio frequency stealth signal and echo signal processing technology based on compressed sensing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(13): 327934. (in Chinese)
- [25] 陈鸿杰, 李利民, 邓志安, 等. 基于改进门限 CDIF 的雷达信号分选方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(11): 1094-1101, 1118.
CHEN H J, LI L M, DENG Z A, et al. A method of radar signal sorting base on improved threshold CDIF[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(11): 1094-1101, 1118. (in Chinese)
- [26] BAGHERI M, SEDAAGHI M H. A new method for detecting jittered PRI in histogram-based methods[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2018, 26(3): 1214-1224.
- [27] NUHOGLU M A, ALI CIRPAN H. Radar signal deinterleaving in electronic warfare systems: a combined approach[J]. IEEE Access, 2023, 11: 142043-142061.
- [28] 杨翔, 顾洪宇. 基于到达时间差直方图的信号分选算法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2762-2768.
YANG X, GU H Y. A signal sorting algorithm based on time difference of Arrival.Histogram[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2762-2768. (in Chinese)
- [29] NISHIGUCHI K, KOBAYASHI M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and

- Electronic Systems, 2000, 36(2): 407-421.
- [30] 刘严, 郭福成. 基于滑动时间窗的雷达脉冲列分选方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(11): 3900-3909.
LIU Y, GUO F C. Deinterleaving radar pulse trains with sliding time windows[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(11): 3900-3909. (in Chinese)
- [31] 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.
- [32] 王俊岭, 黄琰璟. 基于序列关联的参差信号分选算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(4): 1145-1153.
WANG J L, HUANG Y J. Stagger pulse repetition interval pulse train deinterleaving algorithm based on sequence association[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(4): 1145-1153. (in Chinese)
- [33] 张春杰, 青松, 邓志安, 等. 一种针对驻留转换雷达的信号分选算法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(6): 1925-1934.
ZHANG C J, QING S, DENG Z A, et al. Signal deinterleaving algorithm for dwell and switch radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(6): 1925-1934. (in Chinese)
- [34] ORSI R J, MOORE J B, MAHONY R E. Spectrum estimation of interleaved pulse trains[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(6): 1646-1653.
- [35] TAO J W, YANG C Z, XU C W. Estimation of PRI stagger in case of missing observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(11): 7982-8001.
- [36] CHENG W H, ZHANG Q Y, DONG J M, et al. An enhanced algorithm for deinterleaving mixed radar signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2021, 57(6): 3927-3940.
- [37] 赵仁健, 龙德浩, 熊平, 等. 密集信号分选的平面变换技术[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 77-82.
ZHAO R J, LONG D H, XIONG P, et al. Plane transformation for signal deinterleaving in dense signal environment[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(1): 77-82. (in Chinese)
- [38] 赵仁健, 熊平, 倪明. 密集信号分选平面变换技术的多义性分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 1997, 34(2): 177-182.
ZHAO R J, XIONG P, NI M. The multi-meaning analysing of plane transformation in concentrated signals separation[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 1997, 34(2): 177-182. (in Chinese)
- [39] 赵仁健, 熊平, 陈元亨, 等. 信号平面变换中伪特征曲线的产生原理及解决途径[J]. 电子学报, 1997, 25(4): 28-32.
ZHAO R J, XIONG P, CHEN Y H, et al. Principle and settlement of the fake characteristic curve in signal plane transformation[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(4): 28-32. (in Chinese)
- [40] 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 R J, XIONG P, NI M. 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)
- [41] 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 F H, ZHANG W J, TAN Y. 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)
- [42] WEI P Z, WU H C, QIU L. The sorting of radar pulse signal based on plane transformation[C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012), 2012: 326-328.
- [43] 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 X, SI X C. An algorithm for deinterleaving of radar pulse signals through plane transformation[J]. Applied Science and Technology, 2008, 35(10): 12-16. (in Chinese)
- [44] PERKINS J, COAT I. Pulse train deinterleaving via the Hough transform[C]//Proceedings of the Proceedings of ICASSP '94 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1994.

- [45] 杨文华, 高梅国. 基于平面变换技术的脉冲信号分选[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(2): 151-154.
YANG W H, GAO M G. The deinterleaving of pulse signal based on plane transformation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(2): 151-154. (in Chinese)
- [46] 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 J, HU L Z. Repetitive periodic transformation for signal processing[J]. Electronic Information Warfare Technology, 1998, 13(1): 1-7. (in Chinese)
- [47] MENG J, HU L Z. A new transform method for pulse train parameter estimation[C]//Proceedings of the ICSP '98.1998 Fourth International Conference on Signal Processing (Cat. No.98TH8344), 1998: 1562-1565.
- [48] MOORE J B, KRISHNAMURTHY V. Deinterleaving pulse trains using discrete-time stochastic dynamic-linear models[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(11): 3092-3103.
- [49] CONROY T, MOORE J B. The limits of extended Kalman filtering for pulse train deinterleaving[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(12): 3326-3332.
- [50] CONROY T L, MOORE J B. On the estimation of interleaved pulse train phases[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 48(12): 3420-3425.
- [51] LIU J Y, MENG H D, LIU Y M, et al. Deinterleaving pulse trains in unconventional circumstances using multiple hypothesis tracking algorithm[J]. Signal Processing, 2010, 90(8): 2581-2593.
- [52] 任文娟, 胡东辉, 丁赤飏. 一种新的利用时差相关性的时差分选配对方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(6): 89-96.
REN W J, HU D H, DING C B. New method for TDOA sorting and pairing using TDOAs' correlation[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(6): 89-96. (in Chinese)
- [53] 马爽, 吴海斌, 柳征, 等. 基于递归扩展直方图的辐射源时差分选方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(5): 83-89.
MA S, WU H B, LIU Z, et al. Method for emitter TDOA sorting based on recursive extended histogram[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(5): 83-89. (in Chinese)
- [54] 马贤同, 罗景青, 吴世龙. 多站时差与多参数联合分选定位方法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(6): 78-83.
MA X T, LUO J Q, WU S L. Joint sorting and location method using TDOA and multi-parameter of multi-station[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(6): 78-83. (in Chinese)
- [55] 马贤同, 罗景青, 孟祥豪. 基于时差的同类辐射源信号分选定位方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10): 2363-2368.
MA X T, LUO J Q, MENG X H. Signal sorting and positioning method for similar radiation sources based on time difference of arrival[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(10): 2363-2368. (in Chinese)
- [56] 姜宏志, 赵闯, 胡德秀, 等. 基于时差多参的单脉冲信号实时配对分选[J]. 电子学报, 2021, 49(3): 566-572.
JIANG H Z, ZHAO C, HU D X, et al. Real-time deinterleaving algorithm for single pulse signal based on TDOAs and multi-parameter information[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(3): 566-572. (in Chinese)
- [57] 刘鲁涛, 李金凯, 李品. 偏联系数集对势的雷达信号多站融合分选算法[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(6): 159-165.
LIU L T, LI J K, LI P. Multi-station fusion sorting algorithm for radar signals based on partial connection number trend[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(6): 159-165. (in Chinese)
- [58] 李松炜, 杨松岩, 邓志安, 等. 基于自适应流聚类的多站时差协同信号分选方法[J]. 信号处理, 2024, 40(4): 682-694.
LI S W, YANG S Y, DENG Z A, et al. Cooperative signal sorting method based on multi-station TDOA and adaptive stream clustering[J]. Journal of Signal Processing, 2024, 40(4): 682-694. (in Chinese)
- [59] 罗景青, 王杰贵. 探讨一种新的雷达信号描述

- 方式和识别技术[J]. 电子对抗, 2009(6): 7-12.
- Luo J Q, Wang J G. Study on new description of radar signal and recognition algorithm[J]. *Electronic Warfare*, 2009(6): 7-12. (in Chinese),
- [60] 孟祥豪, 罗景青. 基于合成特征参数和脉冲样本图的雷达信号分选[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(9): 50-54.
- MENG X H, LUO J Q. Radar signal sorting based on compositive characteristic parameter and pulse pattern[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(9): 50-54. (in Chinese)
- [61] 刘凯, 王杰贵, 孟祥豪. 基于自提取样本图的雷达辐射源识别新方法[J]. 电光与控制, 2013, 20(12): 73-76, 87.
- LIU K, WANG J G, MENG X H. A new method for identifying radar emitter based on self-distilled pulse sequence pattern[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(12): 73-76, 87. (in Chinese)
- [62] MU H, GU J, ZHAO Y D. A deinterleaving method for mixed pulse signals in complex electromagnetic environment[C]//*Proceedings of the 2019 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, 2019: 1-4.
- [63] LIU Z M. Online pulse deinterleaving with finite automata[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(2): 1139-1147.
- [64] LOGOTHETIS A, KRISHNAMURTHY V. An interval-amplitude algorithm for deinterleaving stochastic pulse train sources[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(5): 1344-1350.
- [65] VISNEVSKI N, HAYKIN S, KRISHNAMURTHY V, et al. Hidden Markov models for radar pulse train analysis in electronic warfare[C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2005: v/597-v/600.
- [66] XIE M, HUANG J, ZHAO C, et al. Radar signal deinterleaving based on hidden Markov chains and residual fence networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024: 1-14.
- [67] PETROV N, JORDANOV I, ROE J. Radar emitter signals recognition and classification with feedforward networks[J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 22: 1192-1200.
- [68] 郭立民, 聂新文, 陈涛, 等. 基于注意力机制的雷达信号分选算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(7): 690-700.
- GUO L M, NIE X W, CHEN T, et al. Radar signal sorting algorithms based on attention mechanisms[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2022, 55(7): 690-700. (in Chinese)
- [69] 刘峻臣, 胡进. 基于神经网络与时域校验的信号分选方法[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(1): 86-91, 98.
- LIU J C, HU J. A method of radar signal sorting based on neural network and time domain verification[J]. *Radar Science and Technology*, 2021, 19(1): 86-91, 98. (in Chinese)
- [70] XIANG H R, SHEN F R, ZHAO J. Deep ToA mask based recursive radar pulse deinterleaving[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(2): 1-19.
- [71] 张春杰, 刘俞辰, 司伟建. 基于多级箱与深度森林的雷达信号分选算法[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1351-1358.
- ZHANG C J, LIU Y C, SI W J. The radar signal deinterleaving algorithm based on multi-level Bin and deep forest[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(6): 1351-1358. (in Chinese)
- [72] NUHOGLU M A, ALP Y K, ULUSOY M E C, et al. Image segmentation for radar signal deinterleaving using deep learning[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2023, 59(1): 541-554.
- [73] 白宁. 基于神经网络的雷达信号分选[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- BAI N. Radar signal sorting based on neural network[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [74] LIU Z M, YU P S. Classification, denoising, and deinterleaving of pulse streams with recurrent neural networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2019, 55(4): 1624-1639.
- [75] LI X Q, LIU Z M, HUANG Z T. Denoising of radar pulse streams with autoencoders[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(4): 797-801.
- [76] LI X Q, LIU Z M, HUANG Z T. Deinterleaving of pulse streams with denoising autoencoders[J].

- IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2020, 56(6): 4767-4778.
- [77] XIE X K, CHEN H L, YANG J G. ACANet: across-scale context attention network for real-time semantic segmentation[C]//Proceedings of the International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Communication (EIECC 2021), 2022: 121720A-1-121720A-8.
- [78] XU Z Z, WU D Y, YU C Q, et al. SCTNet: single-branch CNN with transformer semantic information for real-time segmentation[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2024, 38(6): 6378-6386.
- [79] 陈涛, 刘福悦, 李金鑫, 等. 基于深度分割的端到端雷达信号分选[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(5): 1351-1358.
CHEN T, LIU F Y, LI J X, et al. 基于深度分割的端到端雷达信号分选[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023: 1351-1358. (in Chinese)
- [80] 张旭威, 黎仁刚, 王一鸣. 基于深度网络的雷达信号分选[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(6): 73-77.
ZHANG X W, LI R G, WANG Y M. Radar signal sorting based on deep network[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44(6): 73-77. (in Chinese)
- [81] 郑贺. 一种基于 U-Net 图像语义分割技术的雷达信号分选方法[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
ZHENG H. A radar signal sorting method based on U-Net image semantic segmentation technology[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [82] 刘玉伟. 一种基于图像语义分割的雷达信号分选方法[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
LIU Y W. A radar signal sorting method based on image semantic segmentation[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [83] LIU Y F, XIE J, TAO M L, et al. Stagger PRI radar signal deinterleaving based on image semantic segmentation[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), 2022: 599-602.
- [84] WANG C, SUN L T, LIU Z M, et al. A radar signal deinterleaving method based on semantic segmentation with neural network[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2022, 70: 5806-5821.
- [85] WANG C, WANG Y, LI X Q, et al. A deinterleaving method for mechanical-scanning radar signals based on deep learning[C]//Proceedings of the 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), 2022: 138-143.
- [86] 王超, 孙丽婷, 王翔, 等. 基于脉内线性调频的雷达脉冲分裂信号分选与参数估计[J]. 信号处理, 2023, 39(7): 1222-1232.
WANG C, SUN L T, WANG X, et al. Deinterleaving and parameter estimation methods of radar signal with pulse splitting based on intra-pulse linear frequency modulation[J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(7): 1222-1232. (in Chinese)
- [87] WANG C, LIU W S, LI X Q, et al. A new radar signal multiparameter-based deinterleaving method[J]. (2022-08-21)[2025-02-01]. <https://arxiv.org/abs/2208.09786>
- [88] AL-MALAH A, FARHAN A, FENG H C, et al. An intelligent radar signal classification and deinterleaving method with unified residual recurrent neural network[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2023, 17(8): 1259-1276.