



复杂环境下电磁目标信号认知处理 架构与应用研究

张伟^{1,2}, 李想^{3*}, 翟志凯¹, 张谦², 邵怀宗^{1,3}, 孟建²

(1. 电子科技大学 电磁认知与应用研究中心, 成都 611731; 2. 电子信息控制重点实验室, 成都 610036;

3. 电磁空间认知与智能控制技术实验室, 北京 100089)

摘要 针对现代电磁频谱设备或终端具有网络化、捷变性、多功能、自适应、种类复杂多样和使用环境复杂多变等特性给认知电磁频谱战系统的信号分析与处理带来的巨大挑战的问题, 提出了一种结合人工智能、适合复杂电磁环境下电磁目标信号认知处理与分析的架构。在该架构下电磁目标信号分析与处理被分为目标信号参数估计、目标信号类型分类、辐射源个体识别和目标信号的特征建库与知识图谱^[1-3]的构建等 4 个层次, 可以很好适应闭集和开集电磁目标信号的分析与处理; 此外, 在此架构下提出了未知辐射源辨识、跨模态辐射源智能识别和电磁辐射源的个体识别的算法框架, 在实测数据集上的验证实验表明, 该算法在闭集和开集电磁信号分析中有效可行。

关键词 电磁频谱战; 认知处理架构; 电磁目标知识图谱与推理; 辐射源个体识别

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI 10.12178/1001-0548.2022400

Research on Cognitive Processing Architecture and Application of Electromagnetic Signal in Complex Environment

ZHANG Wei^{1,2}, LI Xiang^{3*}, ZHAI Zhikai¹, ZHANG Qian², SHAO Huaizong^{1,3}, and MENG Jian²

(1. Research Center of Electromagnetic Cognition and Application, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China;

3. Laboratory of Electromagnetic Space Cognition and Intelligent Control, Beijing 100089, China)

Abstract In view of the challenges that the modern electromagnetic spectrum equipment or terminals has such characteristics as network, agility, multi-function, adaptive, complex variety of types and working in complex environments, etc., in this paper, main research is focused on the structure of electromagnetic signal processing and analysis in complex electromagnetic environments. A new architecture is proposed, which combines artificial intelligence and is suitable for cognitive processing and analysis of electromagnetic signals in complex electromagnetic environments. In this framework, electromagnetic signal analysis and processing are divided into four levels: signal parameter estimation, signal type classification, radiation source identification, signal feature database and knowledge map construction^[1-3]. The framework can be used to analyze and process closed electromagnetic signal set and open electromagnetic signal set; In addition, the identification of unknown emitter, the intelligent identification of cross-modal emitter and the individual identification of electromagnetic emitter are proposed in this framework. The verification test on the measured data set shows that these algorithms are effective and feasible in closed set and open set electromagnetic signal analysis.

Key words electromagnetic spectrum war; cognitive processing architecture; knowledge map and reasoning of electromagnetic target; individual recognition of radiation source

美国战略与预算评估中心 (CSBA) 先后制定了 3 份电磁频谱作战领域的重要报告^[4-5]和 MOSAIC 战^[6], 企图重新稳固其在电磁谱战领域的优势地位, 而获取电磁频谱优势的关键是对电磁目标信号的分析与处理。

现在和未来的战争都是在对复杂的电磁环境进行战场的态势感知与认知分析的前提下, 利用先进的海、陆、空、天作战集群进行的。这些作战集群依托于通信、数据链等无线手段将天基、空基、海基和陆基通信、雷达、导航定位设备、武器系统、

收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2023-02-21

基金项目: 国家自然科学基金 (U19B2028, U20B2070)

作者简介: 张伟, 博士, 高级工程师, 主要从事电磁空间智能感知方面的研究。

*通信作者 E-mail: 1062508897@qq.com

作战平台、后勤保障系统链接起来, 建立完善的预警探测、指挥控制、情报传输、干扰保护和火力交战网络、后勤保障网络, 有效提高单机、单舰和各个单一的武器系统或平台的联合态势感知、火力打击和协同控制与优化的能力。这些使信息系统支撑下的体系作战效能得到显著增强的前提是信息系统具有强大的认知信号处理与分析能力。但是在现代和未来的战场中, 电磁频谱设备或终端具有网络化、捷变性、多功能、自适应、频段覆盖范围宽、种类复杂多样和使用环境复杂多变等特性, 给认知电磁频谱战系统的信号分析与处理带来巨大挑战; 同时, 随着人工智能在认知电子战中的广泛应用, 特别是深度学习算法在电磁态势感知、信号的智能分析与处理方面发挥着越来越重要的作用, 但其不可解释性在军事应用中具有明显的局限性, 给指挥员的参考和指导作用有限; 基于电磁目标的知识库和知识图谱系统需要适应开集信号处理, 即如何通过有效的认知信号分析与处理架构来进行未知目标的检测、辨识与分析, 知识库如何通过信号处理与分析算法来达到知识库的自增长, 如何通过知识库和知识图谱进行电磁态势的预测与目标行为的推理等也是认知电子中的关键技术和亟待解决的难题^[7-8]。

因此, 目前认知电子战学界迫切需要建立合理的信号分析与处理架构来有效解决上述限制带来的

不利影响。面对复杂电磁环境中的上述问题, 本文展开基于人工智能的复杂电磁环境下目标信号分析与处理架构的研究, 以期给出合理、高效的认知电磁目标信号分析与处理架构, 为电子战系统的信号分析与处理给出合理的统一解决方案, 为高效、可靠实现认知 OODA 环路提供技术支撑, 为认知电子战系统在复杂电磁环境下的电磁目标信号处理与分析提供解决问题的思路。

1 电磁目标信号的认知处理与分析架构

本文提出了可以应用于认知电子战系统的总体电磁目标信号认知处理的架构, 如图 1 所示。面对复杂的电磁环境, 电磁组合传感器组件的功能是对复杂环境中的电磁信号进行检测、拾取、采集并用于后续分析处理; 在该架构中, 信号处理与分析模块对组合传感器拾取的信号分别做预处理、信号的特征估计与信号类型分类、辐射源个体识别和目标信号的特征建库与知识图谱的构建等 4 个层次处理。前 3 个处理层次又伴随着相应的电磁目标信号的知识产生, 第四层次将这些目标与目标信号的知识采用知识图谱的方式构建成认知电子战中电磁目标的知识库, 该知识库可以结合相应的电磁目标信号分析处理算法而具有知识自增长的功能。

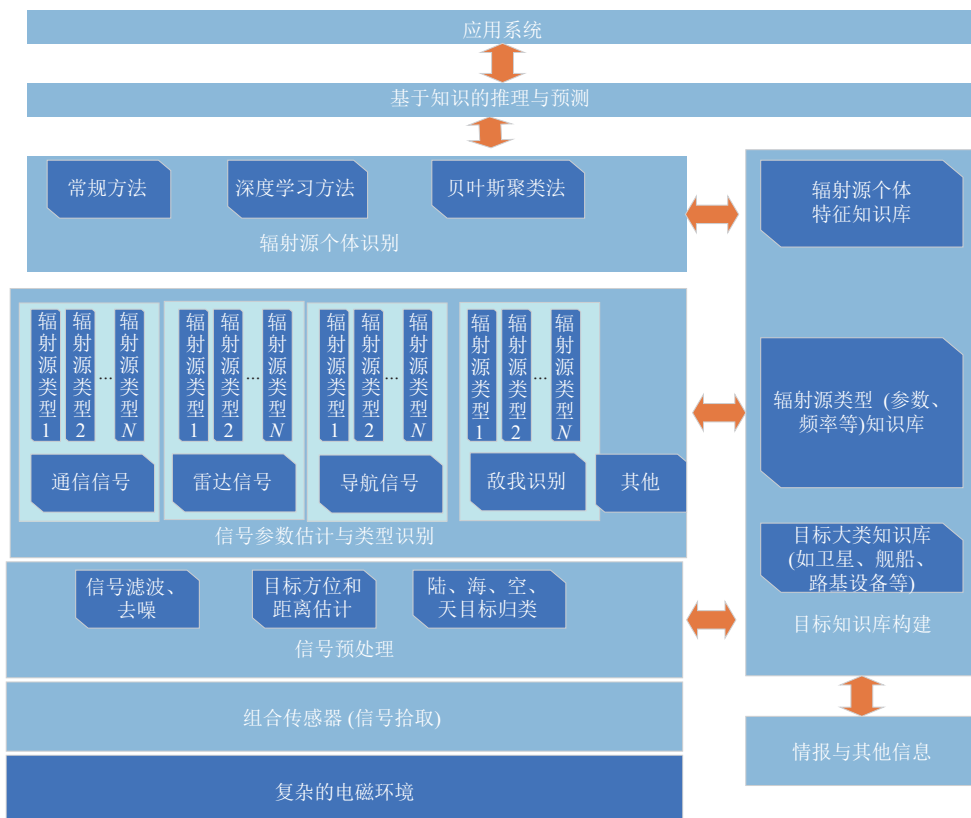


图 1 电磁目标信号认知处理架构

1.1 信号的预处理

在信号预处理中,可以在抑制噪声后,依据传感器(如相控阵天线)的特性来获取信号源的来波方向,也可以用多个传感器对同一辐射源的信号进行处理,如用干涉仪法、比幅比相、时差定位等方法来获得辐射源的方位与距离。然后根据拾取信号的方向和空间位置,对被感知目标信号进行分类,把目标源分类为来自天空、天基、陆基还是海面 4 大类。如果判定该电磁目标信号来自天空,则目标可以是飞机、无人机或低空导弹等,如来自空基,则目标可以是卫星、导弹或航天器等,当判定目标信号来自海上时,则目标可以是各类舰船等。在信号预处理中涉及的关键技术是 DOA 估计和目标距离估计等技术,而基于人工智能的目标距离估计与 DOA 估计是目前在目标智能感知和电磁态势的智能生成研究领域的研究热点^[9-10]。

1.2 信号的参数估计与类型分类

对接收到电磁目标信号进行参数估计,是对目标信号认识和分析的基础,通过对目标信号参数如信号中心频率、信号带宽、信号的信噪比、信号时域瞬时特征、频域瞬时特征、各类统计特性等参数的估计,可以对信号的功能进行分类,如该信号是属于通信、雷达还是导航信号等,然后再根据信号属别进行进一步分析,对于通信信号又可以根据参数和信号的中心频率与带宽(瞬时带宽和综合带宽)、定频或跳频、调制方式^[11]等采用聚类法或支持向量机、深度学习等方法将其分为 I 型电台、II 型电台、III 型电台等,如果是雷达信号,可以根据信号的特征和参数采用人工智能的方法分类成不同型号的雷达信号。当然,这种分类是根据信号参数和特性来进一步细分的,其整个过程如图 2 所示,对同一类型的信号则进一步关心其辐射源的个体特征。

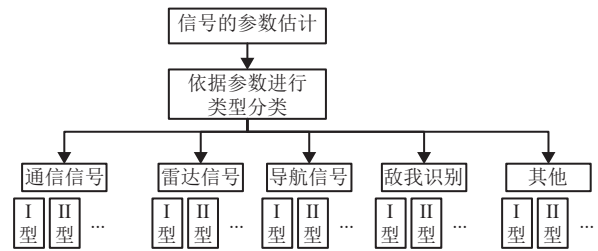


图 2 依据信号参数对目标信号进行分类

1.3 辐射源个体识别

辐射源个体识别(SEI)是在复杂的电磁环境中,面对种类繁多,目标网络化、认知化、威胁电磁目标信号稀缺的情况下有效辨识未知信号和具有威胁的电磁目标的有效方法之一^[12-14]。也就是说,在对接收的目标信号进行分类后,还需要知道该信号是哪一个具体的辐射源发射的信号,并结合该信号参数和特性知识拟确保准确识别该信号是常规(熟悉的)目标发射的还是未出现或具有强力威胁目标发射的,这就需要进行辐射源个体识别的研究。如通信信号分类后, I 类通信信号可以是同一批次、同一厂家、同一批器件和同一批工人生产出来的同类型通信电台产生的通信信号,这些相同类型的电台产生的信号具有相同的参数,发射的信号波形具有相同的统计特性。此时,上述的分类处理没有办法具体到是哪一个具体的电台产生的信号。辐射源识别方法^[15]通常有常规的参数测量法和基于人工智能的方法。下面以战术网络中电台的个体识别为例说明通信电台的个体识别的具体流程和方法,如图 3 所示。传感器接收到电磁目标信号后,首先进行预处理,如滤波去噪等处理,然后将信号分成两个支路,上支路进行信号的特征提取用于网台的分选和辐射源类别分类;接着结合网台分选结果和辐射源类别识别结果和原始信号进行同网台同类型辐射源的筛选;最后对同类型辐射源进行辐射源识别的预处理与特征提取,如果是确知的则进行标注,用于训练。用训练后的网络对测试输入的信号进行辐射源个体判决,并输出识别结果^[16]。

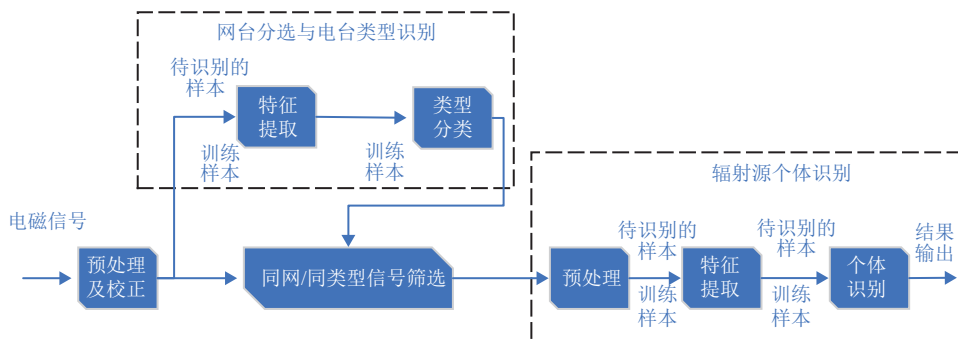


图 3 战术网络中电台的个体识别过程

1.4 电磁目标的认知知识库的构建

电磁目标的认知知识库的构建是认知电子对抗中信号处理的核心部分, 是系统进行决策、行动、波形合成、任务规划和系统资源管理的基础, 其关键特征是具有知识的自生长能力^[17]。本文提出的认知电磁目标信号处理架构中目标信号的知识库的构建过程如图 4 所示。当接收到目标信号后, 首先对目标信号进行预处理, 获取其目标方位、地理位置和出现时间等信息, 并基于方位和位置对目标进行分类; 然后通过对信号的参数估计并基于估计的参数和波形特征对目标信号类型进行识别, 获取目标的波形参数和目标类型等知识; 接着对所属同类别(波形参数相同和类别相同)目标进行个体识别, 即辐射源个体识别(可以使用常规特征提取的方法, 也可以使用人工智能的方法^[18-19], 如对深度神经网络的 Softmax 层数据进行 PCA 分析降维的矢量作为辐射源个体的特征知识), 来获得该目标信号的个体特征知识; 最后结合情报知识库中的信息采用统一的知识构建方法如知识图谱和统一的知识构建平台完成电磁目标的知识库的构建, 为认知电子

对抗中的闭集目标分析与预测推理提供信息支撑和基础知识。该知识库构建完成后结合未知目标的辨识和随着该未知目标特性的认知完成, 并将构建该未知电磁目标的知识通过算法添加到知识库中, 实现知识库中知识的自我更新和自增长功能, 其过程如图 5 所示, 从而保证知识库可以有效地容纳认识清楚的未知目标的知识入库。

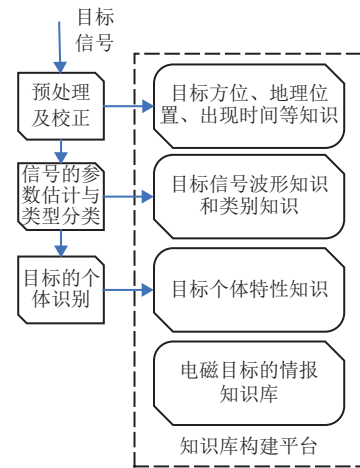


图 4 电磁目标知识库的构建

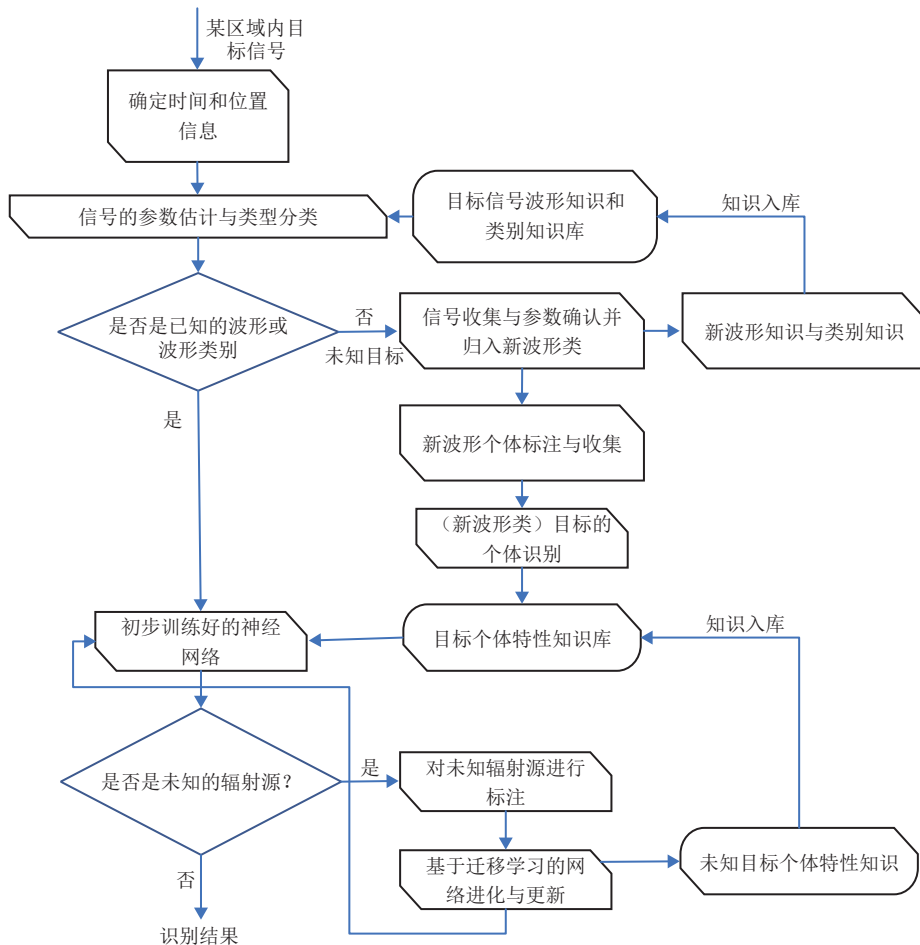


图 5 未知电磁目标辨识与知识库自生长流程

2 认知处理与分析架构的应用

现代军事电子信息系统具有数字化、可编程、敏捷性、网络化和智能化的特点,使得战场电磁频谱呈现动态、多变、密集、复杂等特征,这些给在认知电子战未知目标的识别、干扰策略的生成、干扰效能的评估等方面带来了巨大挑战。下面就如何使用本文的信号处理架构解决未知目标识别、跨模态目标识别和基于电磁知识图谱的目标关联和推理等方面的应用给出初步的解决方案。

2.1 未知电磁目标的辨识应用

未知目标辨识是未知威胁目标判断的基础。通常在某个空间区域内接收到相应的电磁目标信号进行预处理后,对其参数和类别进行识别^[20]。如果是未知的波形或未知的类别,则判定为该波形未知的电磁目标发射的,同时对这类波形参数进行进一步确认,形成新波形的知识并将波形参数和特征构建其相应的知识,同时对新波形的辐射源个体进行目标信号收集和标注,使用深度神经网络进行个体识别并形成波形新类别个体特征知识,并更新个体特征知识库;如果是已知的波形和类型,则直接进入个体识别环节,先将波形送入训练好的用于目标个体识别神经网络中,来判定是否是已知闭集中的那个辐射源发射的波形,如果是则直接输出个体识别结果,如果不是,则判定为未知的辐射源个体。同时对这个个体的辐射源信号进行标注和样本收集,当该辐射源样本收集足够多后,通过迁移学习^[21-22]对现有的神经网络进行进化,并对进化后的网络进行训练,用训练完成的网络提取辐射源的个体知识,同时对个体知识库进行更新。利用大量已标注的电磁目标信号训练面向信号波形分类和电磁目标个体识别的深度神经网络,可以采用深度卷积神经网络 CNN、长短期记忆网络 LSTM 等,而波形分类网络也可采用聚类的方法和支持向量机的方法。

对于辐射源闭集中辐射源个体知识提取的一种简单的方法如图 6 所示。从图 6 中可知,对于总计为 M 个辐射源个体构成的闭集,收集闭集元素中个体的足够样本,并用这些样本对构建好的神经网络进行训练,对于测试的识别准确度达到工程应用的需求后界定为网络已经训练完成;然后对闭集中每个元素的多个样本送入该训练好的网络中,如第 m 个元素的 N 个样本送入训练好的网络,每个输入神经网络的 softmax 层都可以得到一个向量, N 次平均后的向量可作为第 m 个元素的特

征知识向量;在工程中为了降低案例匹配的运算量,也可以将上述得到的向量进一步采用 PCA 降维,得到较低维度的第 m 个元素的特征知识向量。试验验证结果表明:结合知识的闭集辐射源识别,当 M 为 9 时实测无线电台的辐射源个体识别准确率超过 95%。

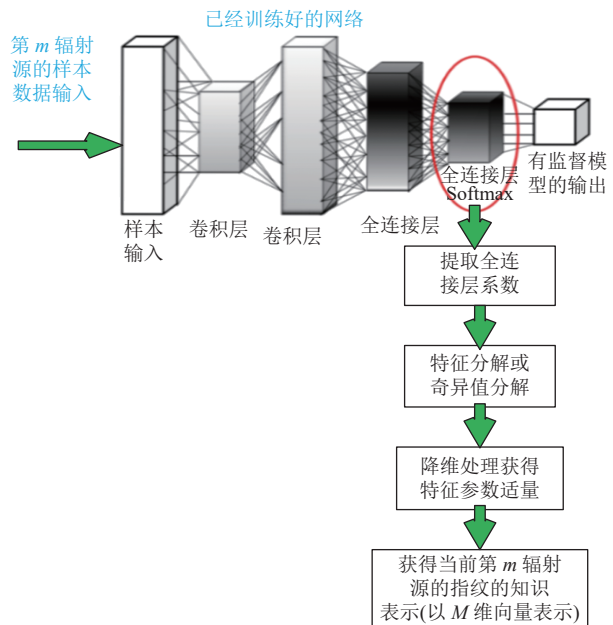


图 6 闭集辐射源个体特征知识向量的提取过程

在开集的情况下,即在闭集的基础上有未知的辐射源进入系统,拟深度神经网络处理为例来说明对未知目标的判定、未知目标的样本收集后对进化的网络进行重新训练并进行相应新辐射源的个体特征知识的提取和知识库的自我更新的过程,如图 7 所示。采集的电台数据试验结果表明:未知电磁目标识别准确率超过 80%。

需要注意的是,在使用分析架构进行辐射源个体识别的应用中还存在以下没有解决的问题:1) 目前架构下还没有算法可以解决单个未知目标进入的标注问题;2) 多个未知目标批入时还没有合适的算法来进行有效处理;3) 基于神经网络的未知目标识别在目标增量很大时,网络进化问题还需要进一步研究。

2.2 跨模态电磁目标个体识别的应用

随着认知无线电技术的发展,同一辐射源个体可以工作在不同的模式状态下,如跳频电台,虽然发射的窄带信号,但其中心频率是跳变的,不同的中心频率其辐射源的个体特性表现是有差异的;还有一种 SINGARS 电台,不仅有单兵手

持的, 还有车载的, 车载台具有单兵手持的功能, 可以与单兵用的手持电台组网, 其工作频率和带宽与单兵手持的电台相同, 同时车载台还有另一种工作模式, 可以与营团级组成另一网络,

在此种工作模式下其通信信号的带宽和工作频率与单兵工作模式完全不同, 车载台在同一工作时段可以选择任何一种模式工作, 也可以两种模式同时工作。

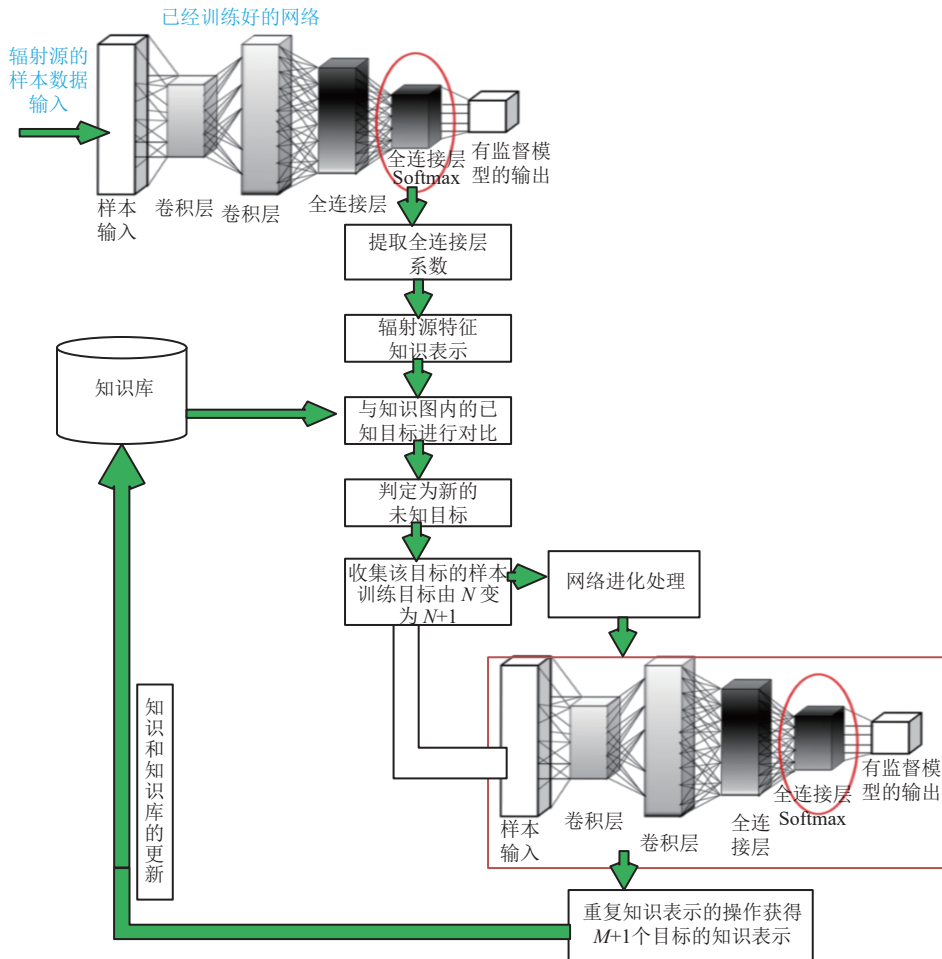


图 7 开集中未知辐射源个体特征知识的更新过程

这两类情况在进行辐射源识别处理时, 可以采取不同的方式进行^[23]。对跳频电台, 在使用深度网络对这些辐射源进行个体识别的一种简单的方法就是获取足够多的电台在每个跳频点的样本, 对网络进行训练, 但是跳频集很大, 或跳频集不固定时, 要采集或收集到足够多频点和足够大的样本很难实现。此时一种简单的方法就是根据收集到样本, 获得样本的知识表征, 由于频率点不同, 同一辐射源不同工作频率点对应的个体知识特征也不相同, 根据物理器件的性质, 采用迁移学习的方法对辐射源工作在两个频率点之间的信号处理时采用迁移学习的方法进行处理。具体过程如图 8 所示, 在图 8 中, 跳频频点 f_k 位于 f_0 和 f_n 之间, f_j 是位于 f_n 和 f_m 之间的频点, 通过知识迁移的方法来对特征知识进行

表征, 然后使用聚类和其他人工智能的方法就可以进行辐射源的识别处理了。实验验证表明, 采用知识迁移的方法进行跨模态辐射源识别比不用知识的方法识别准确率提高超过 4%。

对于 SINGARS 电台的不同模式的工作下的辐射源个体识别可以使用如图 9 所示的方法, 即可将这两种工作模式分别处理成两种辐射源, 由于这两种模式工作时, 信号带宽、工作频率都有很大的差异, 因此信号波形差异也很大, 波形参数和波形特征知识有明显不同, 其辐射源个体特征知识也差别较大。因此, 此时可以使用基于地理信息和情报信息或其他知识将两种或多种模式关联在一个辐射源个体上, 则可以达到辐射源个体识别的效果^[24]。

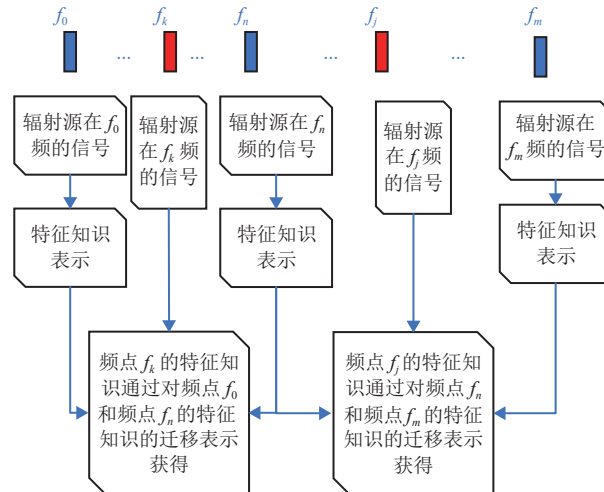


图 8 基于迁移学习的跳频电台多模式识别方法

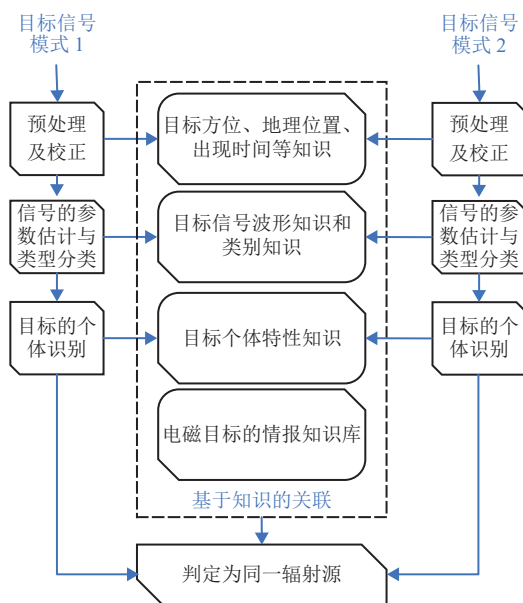


图 9 基于知识关联的大差异工作模式的辐射源识别方法

2.3 基于知识图谱的目标关联与意图推理

在现代认知战争中，通过信息系统相互连接的武器平台是基础，是承载认知电子对抗的载体，也是认知电子战中对抗的核心，认知电子侦察的主要目的就是要分辨敌方的哪些武器平台是关键核心。因此，在认知电子战中，构建以敌我双方的武器平台为基础的电磁目标知识图谱至关重要，这为认知 OODA 实时侦查、推理、精准的决策和及时处置提供了依据。如图 10 所示，是一个以电磁目标为基础构建的知识图谱示意图，而对于电子战系统而言，构建以武器平台为基础的电磁知识图谱可以更好地适应复杂电磁环境下的

认知电子系统作战。如对于一艘航空母舰而言，在这样的武器平台上，集成了多种通信、雷达、导航等电子设备，可以通过前面的技术方法将该平台上的各类通信、雷达和导航设备的发射信号的个体特征知识通过一定的手段提取出来并构成知识库，并将这些知识通过知识图谱的方式把它们关联到这一武器平台上，这样就可以进行如下推理与预测处理了，如在某区域常有敌方 A、B、C、D 共 4 艘航母活动，当发现海上有一个活动目标时，可以通过分析其发射的信号，首先确定是哪一类的舰船，如果是航母，则需要确定是哪个编号的航母，只要航母的型号和编号确定，就可以进一步推测它的意图和行为，并借助与这艘航母相关的知识为我方后续的行动提供预测方案，如根据其他通信设备准备相应的对抗方案，根据其上的雷达设备可以预先设置好雷达对抗的策略^[25]。

在认知电子战中另一种应用就是电磁目标的航迹预测。针对在密集杂波条件目标间歇性不等时间间隔发射电磁信号时，电磁目标的航迹估计与预测的方案如图 11 所示。通过对接收的电磁目标信号分析在 t_0 时刻发现目标在 A 位置， t_1 时刻发现目标在 B 位置，依次类推。这里目标的唯一身份认证是通过目标发射的电磁信号进行分析与辐射源识别方法来确定，辐射源在某一具体时刻的位置通过测量的方位和距离来确定，获得不同时刻目标的位置坐标，这样就可以结合卡尔曼滤波模型和深度学习算法来对目标的航迹进行预测^[26]，从而达到航迹预测的目的。

参考文献

- [1] MO C, WANG Y, JIA Y, et al. Survey on temporal knowledge graph[C]//The 2021 IEEE 6th International Conference on Data Science in Cyberspace. Shenzhen: IEEE, 2021: 294-300.
- [2] HU H, CHEN Y. Progress and analysis of multimodal knowledge graphs[C]//The 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing. Xi'an: IEEE, 2022: 1097-1101.
- [3] 马昂, 于艳华, 杨胜利, 等. 基于强化学习的知识图谱综述[J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(8): 1694-1722.
- MA A, YU Y H, YANG S L, et al. Survey of knowledge graph based on reinforcement learning[J]. Journal of Computer Research and Development, 2022, 59(8): 1694-1722.
- [4] CLARK B, MCNAMARA W M, WALTON T A. Winning the invisible war: gaining an enduring U. S. advantage in the electromagnetic spectrum[EB/OL]. (2019-11-21). <https://csbaonline.org/research/publications/winning-the-invisible-war-gaining-an-enduring-u.s-advantage-in-the-electromagnetic-spectrum>.
- [5] 骆超, 段洪涛, 吴曦. 电磁频谱战中的无线电监测——《电波制胜: 重拾美国在电磁频谱领域霸主地位》报告启示[J]. 中国无线电, 2016, 16(3): 58-59.
- LUO C, DUAN H T, WU X. Radio monitoring in electromagnetic spectrum warfare—inspiration from the report “Winning by Radio: Regaining U. S. Dominance in the Electromagnetic Spectrum” [J]. China Radio, 2016, 16(3): 58-59.
- [6] CLARK B, PATTERN D, SCHRAMM H. MOSAIC warfare exploiting artificial intelligence and autonomous system to implement descision-centric operation[EB/OL]. (2020-02-11). https://csbaonline.org/uploads/documents/Mosaic_Warfare_Web.pdf.
- [7] 夏爱军, 张旭昕, 李高云. 复杂电磁环境对体系作战能力生成影响分析初探[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 32(3): 23-27.
- XIA A J, ZHANG X X, LI G Y. Preliminary impact on the generation capacity under complicated electromagnetic environment[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2017, 32(3): 23-27.
- [8] 李高云, 旷生玉, 江果, 等. 智能化电子战装备发展路径探讨[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(1): 7-11.
- LI G Y, KUANG S Y, JIANG G, et al. Development path of intelligent electronic warfare equipment[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(1): 7-11.
- [9] AHMED A M, EISSA O, SEZGIN A. Deep autoencoders for doa estimation of coherent sources using imperfect antenna array[C]//The 2020 3rd International Workshop on Mobile Terahertz Systems. Essen: IEEE, 2020: 1-5.
- [10] ZHANG W, LI J, DING C Z, et al. Small sample identification for specific emitter based on adversarial embedded network[C]//The 2021 International Conference on Image and Graphics. Wuhan: IEEE, 2020: 27-28.
- [11] 李润东, 李立忠, 李少谦, 等. 基于稀疏滤波神经网络的智能调制识别[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(2): 161-167.
- LI R D, LI L Z, LI S Q, et al. Intelligent modulation recognition based on neural networks with sparse filtering[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019, 48(2): 161-167.
- [12] 唐泽宇, 邹小虎, 李鹏飞, 等. 基于迁移学习的小样本 OFDM 目标增强识别方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(12): 1666-1674.
- TANG Z Y, ZOU X H, LI P F, et al. A few-shots OFDM target augmented identification method based on transfer learning[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(12): 1666-1674.
- [13] 蒋季宏, 方宇轩, 张伟, 等. 小样本情景下基于特征融合的辐射源个体识别[J]. 电子信息对抗技术, 2022, 37(3): 20-25.
- JIANG J H, FANG Y X, ZHANG W, et al. Specific emitter identification based on feature fusion in few-shot scene[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2022, 37(3): 20-25.
- [14] 陈维高, 朱卫纲, 唐晓婧, 等. 不完整数据集的 MFR 辐射源识别方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2019, 48(1): 39-45.
- CHEN W G, ZHU W G, TANG X J, et al. Research on MFR emitter identification method for incomplete data[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2019, 48(1): 39-45.
- [15] 汤鹏, 徐以涛, 李京华, 等. 非合作辐射源识别技术发展动态分析[J]. 数据采集与处理, 2020, 35(6): 1033-1048.
- TANG P, XU Y T, LI J H, et al. Analysis of development of non-cooperative emitter identification technology[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2020, 35(6): 1033-1048.
- [16] 张谦, 王吉, 唐泽宇, 等. 基于深度学习的通信电台个体识别技术[J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(2): 36-40.
- ZHANG Q, WANG J, TANG Z Y, et al. Individual identification technique of communication transmitters based on deep learning[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2021, 36(2): 36-40.
- [17] 费华莲. 人工智能在电子战领域的应用[J]. 飞航导弹, 2020, 20(4): 41-45.
- FEI H L. Application of artificial intelligence in the field of electronic warfare[J]. Aerospace Technology, 2020, 20(4): 41-45.
- [18] ZONG L, XU C, YUAN H L, et al. A RF fingerprint recognition method based on deeply convolutional neural network[C]//The 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference. Chongqing: IEEE, 2020: 1778-1781.
- [19] GU H, WANG Y, GUI G, et al. Radio frequency fingerprinting driven drone identification based on complex-valued CNN[C]//The 13th EAI International Conference on Mobile Multimedia Communications.

- Harbin: IEEE, 2020: 27-28.
- [20] 利强, 张伟, 金秋园, 等. 基于知识原型网络的小样本多功能雷达工作模式识别[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1344-1350.
- LI Q, ZHANG W, JIN Q Y, et al. Multi-function radar working mode recognition with few samples based on knowledge embedded prototype network[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(6): 1344-1350.
- [21] 王天池, 俞璐. 迁移学习及其在通信辐射源个体识别中的应用[J]. 通信技术, 2022, 55(3): 265-273.
- WANG T C, YU L. Transfer learning and its application in communication emitter identification[J]. Communications Technology, 2022, 55(3): 265-273.
- [22] PENG Y G, ZHANG Y F, CHEN C X, et al. Radar emitter identification based on co-clustering and transfer learning[C]//The 2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications. Chengdu: IEEE, 2021: 1685-1690.
- [23] 张伟, 王沙飞, 林静然, 等. 基于孪生网络的电磁目标跨模式识别算法[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1281-1290.
- ZHANG W, WANG S F, LIN J R, et al. Cross-modal recognition algorithm of electromagnetic targets via siamese network[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(6): 1281-1290.
- [24] ZHONG Y, ZHANG L, PU W. Multimodal deep learning model for specific emitter identification[C]//The 2021 IEEE 6th International Conference on Signal and Image Processing. Nanjing: IEEE, 2021: 857-860.
- [25] KONG F X, LI Q, SHAO H Z. Jamming strategy generation for hidden communication modes via graph convolution networks[C]//The 2021 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Toronto: IEEE, 2021: 4960-4964.
- [26] 邢文革, 桂佑林, 顾万里. 多传感器系统误差特性匹配的动态估计与补偿算法[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(2): 186-192.
- XING W G, GUI Y L, GU W L. A dynamic estimation and compensation algorithm for matching the error characteristics of multi-sensor system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2021, 50(2): 186-192.

编辑 税红