

# 电磁频谱空间态势认知新范式：频谱语义和频谱行为

周 博, 马欣怡, 况婷妍, 李 婕

(南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 南京 211106)

**摘 要:** 面对频谱资源日益紧缺、频谱安全日益严峻以及频谱对抗日益激烈的挑战, 电磁频谱态势研究急需从感知向认知跃升。本文从多层频谱态势认知体系模型与机理、跨域多维电磁特征提取与融合、频谱语义态势高效补全与预测、频谱行为精准推理与意图识别4个方面出发, 综述了频谱态势认知理论与方法的研究现状。面对复杂多域多维电磁频谱环境与多样化任务的挑战, 需要构建从“数据到语义”“语义到行为”“单域到跨域”“单层到多层”的频谱态势认知理论技术体系, 该体系可为提升天地一体信息网络频谱利用效率、维护空中电波安全有序以及夺取电磁频谱制电磁权/电磁频谱战优势奠定频谱态势理论技术基础。

**关键词:** 频谱感知; 电磁特征; 频谱语义态势; 频谱行为

**中图分类号:** TN911      **文献标志码:** A

## New Paradigm of Electromagnetic Spectrum Space Situation Cognition: Spectrum Semantic and Spectrum Behavior

ZHOU Bo, MA Xinyi, KUANG Tingyan, LI Jie

(Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** With the increasing scarcity of spectrum resources, the increasing severity of radio regulations, and the increasing fierceness of electromagnetic warfare, the research of the electromagnetic spectrum situational has to transit from spectrum perception to spectrum cognition. This paper reviews the current research status of the theories and methods for spectrum situational cognition from four aspects: The mathematical models and fundamental mechanisms for a multi-layer spectrum situational cognition system, the extraction and fusion of cross-region multi-dimensional electromagnetic features, the efficient completion and prediction for spectrum situation, and the precise inference and intention judgment for spectrum-related behaviors. To address the complex multi-domain multi-dimensional electromagnetic spectrum environment and diversified tasks, it is critical to develop a framework of spectrum situational cognition from “data to semantics” “semantics to behaviors” “a single region to cross regions” “a single layer to multi layers”. This framework builds up foundations, both theoretically and technically, for efficient spectrum sharing in space-terrestrial integrated information networks, efficient radio regulations, and advantages in the electromagnetic spectrum warfare.

**Key words:** spectrum sensing; electromagnetic features; spectrum semantic situation; spectrum-related behaviors

## 引言

电磁频谱已成为信息时代不可或缺的国家重要战略资源。由此,作为国家战略空间的电磁频谱空间面临着诸多挑战。首先是频谱资源日益紧缺,低轨卫星星座系统(如SpaceX、OneWeb)、5G网络、物联网、低空智联网等浪潮蓬勃发展,不断加剧对频谱资源的需求。据思科公司的统计分析,全球每月移动数据量将从2012年的0.9 EB快速增长到2022年的77 EB<sup>[1]</sup>,而频谱资源供给仅增长约1倍。随着天地一体信息网络快速发展,对频谱资源的需求向空天域延伸,频谱资源态势向立体化方向发展,因此迫切需要实现天地一体信息网络频谱资源的动态共享。其次,频谱安全日益严峻。据2021年发布的《中国无线电管理年度报告》<sup>[2]</sup>,2020年度共查处“黑广播、黑飞、黑船、伪基站”等案件3 800多起,民航、高铁和电网等各行业无线电干扰案件4 500多例。频谱安全向各行业延伸,频谱安全态势呈现复杂化特征。为了维护空中电波安全有序、保障重大活动频谱安全以及关键建筑电磁泄露与防护等,迫切要求无线电管理创新监管模式,提高频谱监管技术水平。最后,频谱对抗也日益激烈。电磁频谱空间成为继陆、海、空、天、网后的第六维作战空间,失去制电磁权,必将失去制海权、制空权。而随着无人系统投入军事应用,以及马赛克战、全域战等新作战概念的提出,大规模无人集群作战开始实战化,电磁频谱不仅是信息传递的载体,也是信息侦察的载体,使得频谱对抗域扩大,向无人系统作战域延伸,导致频谱作战态势多域化。在未来作战中,夺取电磁频谱战与无人系统作战优势,对于维护国家安全至关重要。

为应对电磁频谱空间所面临的频谱资源日益紧缺、频谱安全日益严峻、频谱对抗日益激烈等诸多挑战,电磁频谱态势研究亟待从感知向认知跃升,即需要认知复杂电磁频谱环境与辐射源行为/意图,构建面向决策的频谱态势图,频谱态势认知理论研究与技术突破已成为电磁频谱空间领域攻关的核心问题之一。传统的频谱态势感知注重电磁频谱环境的数字孪生,即以“形似”为目标,在信息空间精确复现电磁频谱环境。然而,随着频谱感知能力的多域多维化,频谱感知数据呈指数级增长,无线网络传输容量严重制约着“端-边-云”网络架构中“边-云”的高精度感知数据获取。设备的存储容量和计算能力同样严重制约着以精确复现为目的的频谱态势生成。同时,精确复现电磁频谱环境的频谱态势并不能为决策提供直接信息,难以适应频谱资源管控对于速度的需求。以“神似”为目标的频谱态势认知为解决以上问题提供了新的解决思路。

频谱态势认知是超越频谱态势感知的更高层次研究,不仅是传统频谱态势感知所追求的电磁频谱环境数字孪生,更是“数据到语义”“语义到行为”“单域到跨域”和“单层到多层”的跃升。与频谱感知不同,频谱认知主要是针对频谱语义和频谱行为这两方面的。目前尚没有权威的定义,本文从数据语义和行为的概念本源出发给出频谱认知的定义。频谱语义是指电磁频谱在特定场景下的含义,包括电磁信号语义(如信号类别、调制方式和通信协议)、目标特性语义(如目标散射特性、数目和点航迹)、网络通联语义(网络拓扑、关键节点/链路)等。频谱行为是指频谱直接行为(如用频行为模式、抗干扰方式)和频谱间接行为(如集群目标的行为意图和威胁评估)。通过构建面向决策的语义和行为频谱态势图、面向“端-边-云”的多层频谱态势图、面向无线电域与雷达域的跨域频谱态势图,将为动态频谱效率提升、恶意用户检测、行为意图识别准确率提升和频谱对抗能力提升提供理论基础与直接支撑。

面向未来天地一体信息网络动态共享、无线电秩序管理和电磁频谱战需求,本文首先围绕频谱态势感知体系模型、多维电磁特征提取与融合、广域频谱态势生成和频谱行为推理与意图判别这4个方面进行国内外研究现状的介绍和分析。接着针对传统频谱态势感知体系模型存在的未能直接为决策服务、未考虑无线网络容量制约、未能实时为终端服务等问题,构建“多层”频谱态势认知体系模型与机理,并从“跨域”电磁特征提取与融合、频谱“语义”态势补全与预测、频谱“行为”推理与判别3个层面讨论分析关键技术,以实现从“数据到语义”“语义到行为”“单域到跨域”和“单层到多层”的跃升。最后对频谱态势认知理论与方法的相关研究方向进行总结。本文中的关键性名词释义见表1。

表1 术语定义表

Table 1 Glossary of term definitions

名词	释义
频谱态势	电磁环境的当前状态、综合形势和发展趋势
电磁特征	通信辐射源(星座特征、时-频特征等)和雷达辐射源(高阶累积量特征、熵特征等)等多种辐射源电磁特征
频谱语义	电磁频谱在特定场景下的含义包括电磁信号语义、目标特性语义和网络通联语义等
频谱行为	频谱直接行为(如用频行为模式)和频谱间接行为(如集群目标的行为意图)
频谱感知	针对电磁频谱的数字孪生,在信息空间精确复现电磁频谱环境
频谱认知	包括频谱语义和频谱行为
多层	“端-边-云”的3层频谱态势认知体系
跨域	无线电域和雷达域

## 1 国内外研究现状

频谱态势感知体系架构是实现支撑频谱感知的基础,该领域的国内外相关研究工作较为丰富。文献[3]提出了分层、分布式的认知网络架构来高效管理5G蜂窝网络中信道和基站资源。文献[4]研究了分布式协同频谱感知的架构并提出基于神经网络和强化学习的感知模型。文献[5]研究了空地一体化网络中鲁棒性频谱共享架构。文献[6]提出了增加辅助节点的认知环结构并设计了多阶段的机器学习模型以实现协同认知。在频谱感知评估模型方面,广泛采用频谱检测概率、漏检概率和虚警概率。文献[7]推导了平均检测概率的闭环表达式并对频谱感知性能进行全面评估。在频谱态势感知机理方面,已有研究涉及频谱采样重构、感知信息融合和学习赋能等。随着近年来人工智能的快速兴起,关于学习赋能无线网络的研究开始大量出现,其中较为典型的是通过引入元学习应对网络流量预测<sup>[8]</sup>、MI-MO信号检测<sup>[9]</sup>中无线环境的高动态性和不确定性。

多维电磁特征提取与融合是实现频谱数据到频谱语义之间的关键步骤,其主要目标是分析与挖掘感知数据在不同维度的电磁特征,为频谱语义映射中的目标语义提取、辐射源个体识别等任务提供理论依据。面向辐射源个体识别的特征提取是电磁特征挖掘的重要研究方向,受到了国内外广泛关注。面向雷达辐射源,脉内细微特征提取技术不断发展,主要包括脉内有意调制特征提取<sup>[10-11]</sup>(如转换域、相关函数、相干检波和复制谱)和脉内无意调制特征提取<sup>[12-13]</sup>(如波形参数特征、高维变换域和频谱)。此外,面向通信辐射源,其特征提取方法主要包括3种:信号变换域统计特征<sup>[14]</sup>、信号参数统计特征<sup>[15]</sup>和器件非线性模型特征<sup>[16]</sup>。多维电磁特征的融合是分析和挖掘感知数据内在关联的关键步骤,主要分为集中式融合和分布式融合。集中式融合指直接在中心站融合所有雷达站点电磁特征,当通信条件理想时,可在最小均方误差准则下达到最优融合<sup>[17]</sup>。而当考虑实际通信容量受限时,分布式融合更受青睐。文献[18]比较了非线性雷达测量模型下,全局预测分布式卡尔曼滤波和松弛分布式卡尔曼滤波的融合性能。

广域频谱态势生成是实现频谱资源管控与预先决策的基础,关键在于对缺失或不完备的频谱态势进行补充,并对未来频谱态势进行预测。频谱态势补充是广域频谱态势生成的基础。受限于监测频段、时间段以及空间部署等因素,海量频谱感知数据往往是不完备、不准确且离散化的,因此需要对缺失空间频谱态势进行补充。面向无线电域的频谱态势补充的方法主要有:(1)基于数据驱动的空间插值法包括反距离加权法<sup>[19]</sup>和克里金内插法<sup>[20]</sup>;(2)基于模型驱动的频谱态势补充算法<sup>[21]</sup>。除了上述基于无线电域的频谱态势补充研究外,面向雷达域的频谱态势补充在目标特性补充方面也有许多工作,例如基于线性预测编码的移动目标点迹补充方法<sup>[22]</sup>、基于2D持续跟踪分割辅助的点迹补充算法<sup>[23]</sup>。

在感知并补全当前频谱态势的基础上,预测频谱态势的未来发展趋势,进而揭示出频谱态势的演化规律,更好地为预先决策服务,是广域频谱态势生成的关键。文献[24]提出了一个基于交替方向乘子法的在线鲁棒频谱态势预测算法,提高了频谱预测的准确性和稳健性。文献[25]提出了一种基于卷积神经网络和双向长短期记忆的频谱预测方法。

频谱行为推理与意图判别是电磁频谱态势认知的关键内容之一,主要是构建实时动态的频谱行为知识图谱、利用从采集频谱数据中提取的语义与知识对频谱行为进行精准推理和意图判别。知识图谱的概念于2012年被谷歌公司首次提出<sup>[26]</sup>。由于不断发展和完善的知识图谱将使机器能模仿人的思维过程,知识图谱已成为实现认知智能不可或缺的重要技术之一。文献[27]综合考虑无线通信中用频设备/系统/业务之间以及与其使用的频谱资源之间的关系,构建了基于频谱知识图谱的智能频谱管理框架。文献[28]率先提出了知识驱动的机器学习模型,证明了知识可以在无线通信的机器学习任务中发挥重要作用。频谱行为推理于2018年被提出,可以解决频谱占用、异常用频行为发现、非法和恶意用户干扰<sup>[29]</sup>等问题。在频谱行为知识图谱与行为推理的基础上,研究频谱行为意图判别,进而揭示单个体到群体、单域用频到多域用频的电磁频谱用频行为演化规律,更好地为预先决策服务,是加深电磁频谱态势认知的关键部分<sup>[30]</sup>。尽管意图判别在船舶安全、医疗和口语对话系统等领域已经得到应用,但如何将意图判别应用于无线电领域的频谱行为至今尚未有相关研究。

综上所述,虽然目前对于频谱态势感知体系模型、多维特征提取以及频谱态势生成等方面的研究内容较为丰富,但还没有从感知层面跃升到认知层面,并且缺乏面向目标散射特性以及环境特征的多维电磁特征提取与融合方法,缺乏面向无线电域和雷达域主被动感知结合的跨域频谱态势生成研究。与此同时,频谱行为推理和意图判别的研究较少,缺乏利用信息与知识来提升跨域频谱复杂电磁环境下跨域频谱行为推理和意图判别能力。

## 2 多层频谱态势认知体系模型与机理

电磁频谱空间与陆、海、空、天、网等五维空间紧密的交织在一起,同时无线电域、雷达域等又具有不同电磁特征与独特特性,构成了一个复杂多域多维的电磁频谱环境。随着频谱感知设备的广泛使用以及感知内容的多域多维化,频谱感知数据量呈指数增长,无线网络传输容量对于以精确复现为目标的频谱态势感知与态势图构建有严重的制约作用。同时,面向数字孪生的频谱态势图不能为决策系统提供直接的语义信息且“云”端频谱态势也难以实时为终端服务。为了更好地优化频谱资源、管理频谱秩序、夺得制电磁权,需要构建“端-边-云”多层频谱语义态势体系模型。本节将从认知体系架构、认知评估模型和语义认知机理3个方面展开对频谱认知体系模型与机理的分析。

首先,从无线电和雷达的主被动感知出发,融合脑认知科学观察-判断-决策-执行(Observe-orient-decide-act, OODA)认知环、感传算一体化架构、“端-边-云”层次化结构,本文构建如图1所示的多层频谱态势认知体系架构。认知体系架构是面向频谱域及相关域快速精准认知决策任务需求的。该体系架构具有3个特点:(1)体系化设计“感-传-存-算”一体终端模块,并融合雷达的主动探测与无线电的被动感知对无线电环境进行频谱感知、数据处理与存储以及数据与语义传输;(2)面向不同层次任务需求和资源供给能力,设计“端-边-云”的3层频谱态势认知体系架构;(3)根据不同的整体需求和综合资源能力,建立多层嵌套、同层协同OODA环,实现分层自主频谱协同认知与多粒度频谱决策的融合。该体系架构利用脑认知科学、多智能体等理论与技术,研究分层异构、融入频谱态势的OODA环之间的连接关系、信息传递关系以及与环境之间的关联关系,从而实现对频谱态势的深度认知,为最终决策提供关键支撑。

其次,以认知信息理论与语义信息理论为基础,围绕多层频谱态势认知体系架构,建立多层频谱认知评估模型,研究语义层面的语义认知失真度。具体而言,首先从频谱数据空间出发,定义语义空间,融合认知的正确性度量,突破信息熵非负的假设,从而建立频谱语义认知效能评估模型。接着,基于任

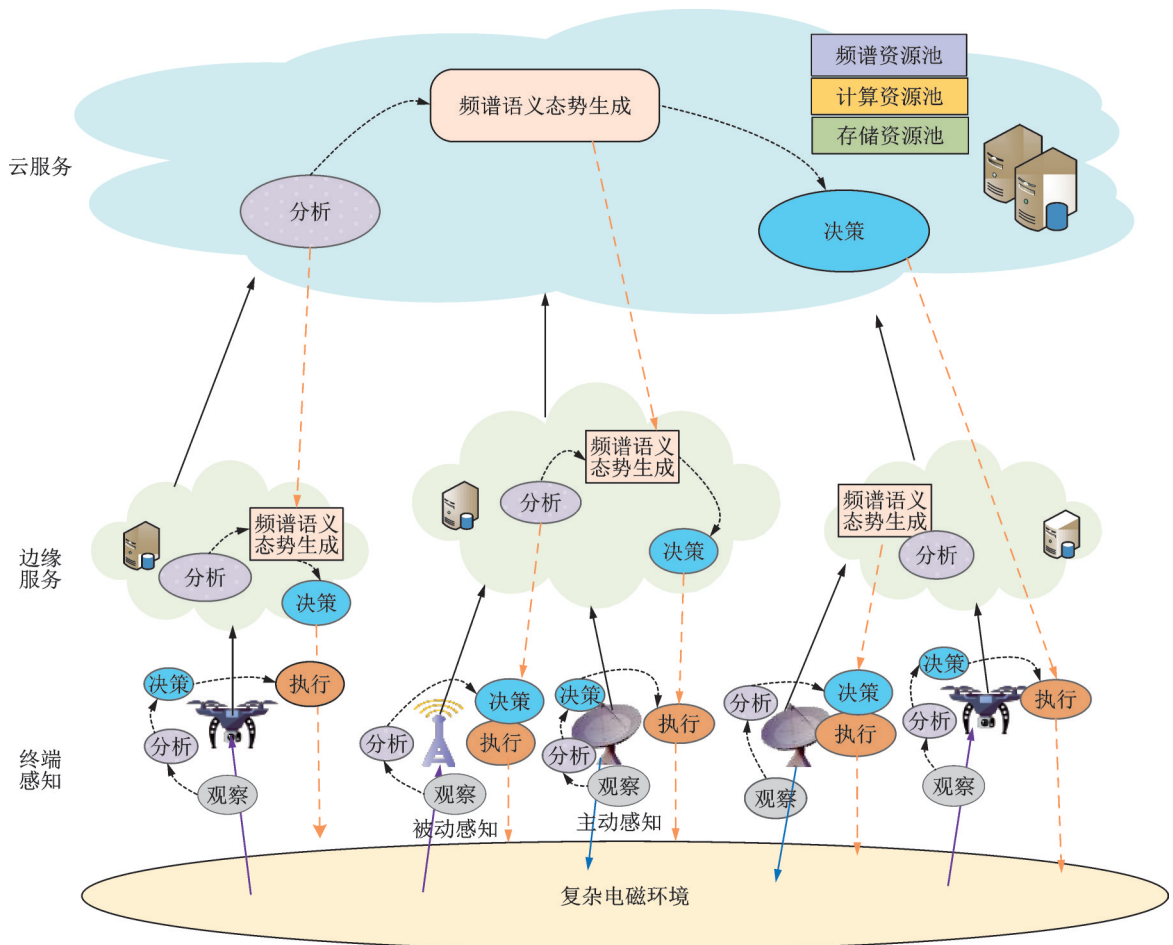


图1 多层频谱态势认知体系架构

Fig.1 Architecture of multi-layer spectrum situational cognition system

务导向的频谱态势无失真压缩理论,建立频谱语义压缩效能评估模型,以实现频谱态势认知从数据级向特征级及语义级跨越的压缩性能极限。最后基于跨域信息失真压缩理论,建立频谱语义融合效能评估模型,实现跨域感知信息和语义信息融合的性能极限。

面向多层频谱态势认知体系架构,以认知信息论为基础,研究多层次频谱空间采样机理、频谱态势跨域融合机理以及认知学习赋能机理。通过发掘数据级、特征级和语义级频谱态势的稀疏表示,建立语义空间与物理空间的映射关系,从而构建多级频谱态势的统一空间采样理论框架。通过从空间采样与特征融合中补充提取语义特征以构建多层次频谱态势知识库与认知学习算法库,揭示知识与学习赋能机理,提升频谱语义态势生成精度与速度。

### 3 频谱态势认知关键技术

本文以多层频谱态势认知体系模型与机理总体设计思想为指导,研究跨域多维电磁特征提取与融合、频谱语义态势高效补充与预测、频谱行为精准推理与意图识别3大关键技术。

#### 3.1 跨域多维电磁特征提取与融合

为实现频谱态势认知从“数据到语义”的跨越,需要从频谱感知数据中获取有效的电磁特征。随着各

类设备用频方式日渐多样,感知目标隐蔽性能日渐提升,作为从“数据到语义”之间的桥梁,电磁特征的提取与融合面临着辐射源发射低功率化、目标射频隐身化、有用信号稀疏化等诸多挑战以及跨域多维表征、弱信号检测与稀疏信号快速搜索、跨域异构融合等难题。电磁频谱环境的复杂性造成了电磁特征表征体系的复杂性,迫切需要研究跨域多维电磁特征表征、提取与融合,实现从“单域到跨域”的跃升。

跨域多维电磁特征联合表征是电磁特征提取与融合研究中的首要环节。首先从雷达辐射源、通信辐射源等多种辐射源电磁特征出发,构建统一的跨域多维电磁特征联合表征模型,如,  $\mathbf{X} = \{ \mathbf{X}^{(v)} \}_{v=1}^V = \{ \mathbf{X}_T^{(v)}, \mathbf{X}_F^{(v)}, \mathbf{X}_S^{(v)}, \dots \}_{v=1}^V$  表示包含  $V$  个电磁特征子集的联合表征模型,其中  $\mathbf{X}_T^{(v)}$ 、 $\mathbf{X}_F^{(v)}$ 、 $\mathbf{X}_S^{(v)}$  分别为时、频、空等多维电磁特征。进一步,从电磁频谱数据获取方式出发,无线电域被动感知和雷达域主动感知相结合,辐射源特征与目标特性相结合,构建如图 2 所示基于跨域电磁特征之间的关联性与异构异质性的“跨域多维电磁特征交叉树”联合表征模型。

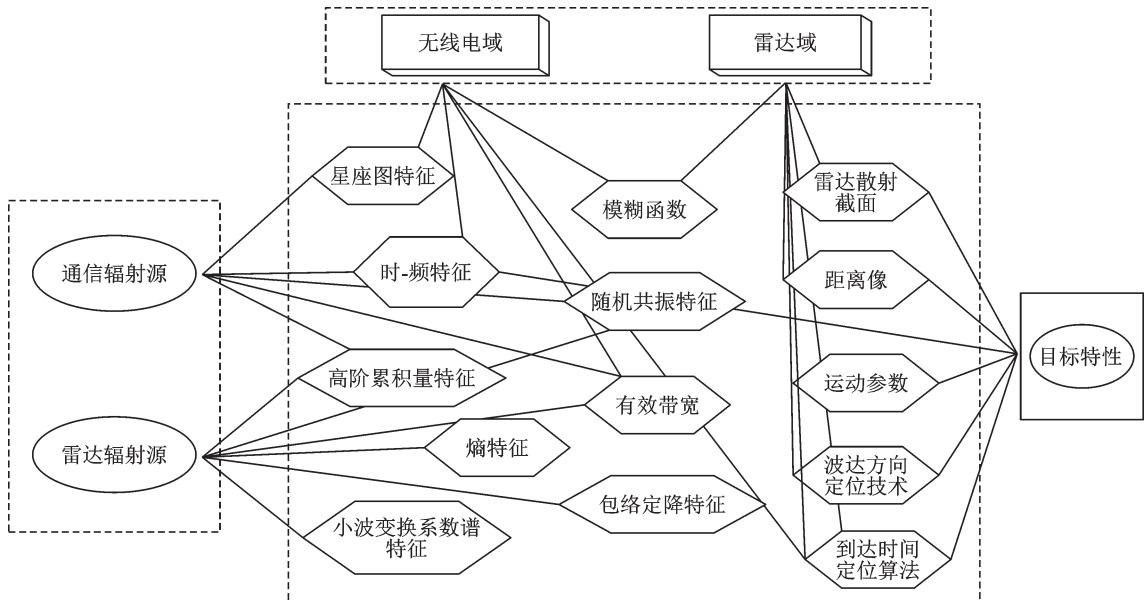


图 2 跨域多维电磁特征交叉树

Fig.2 Cross-tree of cross-domain multi-dimensional electromagnetic features

面向辐射源发射低功率化、目标射频隐身化带来的挑战,需要考虑实际电磁环境中杂波、噪声、多径和干扰等影响,围绕辐射源细微特征提取、多维稀疏特征提取以及弱信号特征提取等 3 方面展开研究。最后,研究无线电域、雷达域相结合的跨域电磁特征融合方法。面对同一域内、不同感知设备间的特征估计不一致性,设计特征融合方法,有效融合域内多传感器电磁特征;面对跨域、多维电磁特征的异构异质性,构建多粒度特征学习与融合模型;面对特征缺失的情况,研究特征共性与关联性,实现分层无损融合。

### 3.2 频谱语义态势高效补全与预测

频谱态势补全与预测是实现频谱资源管控、无线电秩序管理决策与预先决策的基础。传统频谱态势补全与预测直接利用频谱感知数据实现。然而,随着多域多维频谱感知数据的极速增长,受无线网络传输容量制约,“云-边”难以获得所有的频谱感知数据,往往接受来自“端”的频谱语义信息,因此必须在频谱语义层进行态势补全和预测。然而,频谱语义态势补全与预测却面临着多域多维特征和语义的

复杂映射、高动态复杂电磁环境、数据-特征-语义提炼中的信息损失等诸多挑战。为此,亟需研究频谱态势语义表征与映射、补全与预测。

利用电磁特征来表征频谱语义态势,并建立从电磁特征到频谱语义的映射关系是频谱语义态势生成的基础。首先,针对复杂电磁频谱环境,跨域多维频谱态势语义空间,分析基于电磁特征的语义态势表征方法;接着,研究从电磁特征到电磁语义的映射方法,准确认知频谱环境语义、目标特性语义和网络通联语义等频谱态势;最后,研究频谱语义态势的时效性、相关性和重要性等因素如何影响预先决策的相关效用指标,如图3所示。

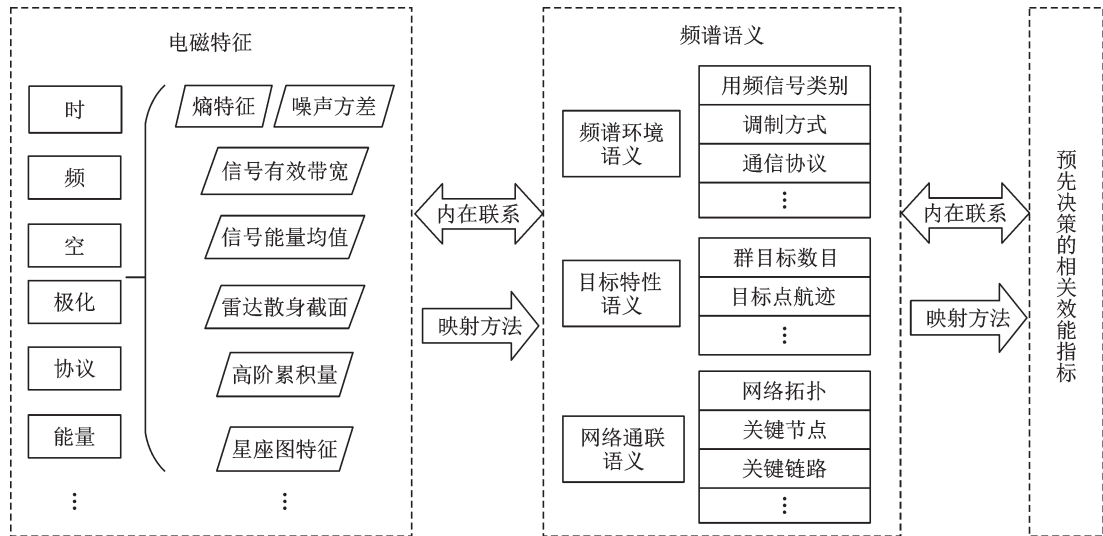


图3 跨域多层频谱态势语义表征与映射

Fig.3 Semantic representation and mapping of cross-domain multilayer spectrum situation

频谱语义态势补全是语义态势生成中的重要环节,需要挖掘跨域多维频谱态势中的语义信息。从跨域多维频谱语义态势的内在相关性、跨域多域语义态势的不一致性和跨层语义态势的不完备性出发,建立频谱语义信息与频谱数据、电磁特征在多域空间的数学模型,实现跨域多层的频谱态势高精度补全。尤其需要研究如何消除语义信息的不一致性,实现认知一致的态势补全方法;需要设计联合感知数据、特征和语义的跨层信息融合方法以提高态势认知的精细度。

基于当前频谱语义态势,准确预测出未来频谱语义态势的趋势是支撑预先决策的关键。首先通过分析多类频谱语义在单域内多维空间和跨域之间的特点和规律,构建跨域多维语义预测模型。接着,为减少不完整、不准确的感知数据给语义态势预测的影响,需要研究基于跨域多层信息融合的语义态势预测技术,提升预测的稳健性。此外,面向多层认知体系中语义态势预测的差异化需求,还需研究多粒度多尺度的分层频谱语义态势预测,实现面向任务需求的自适应预测。

### 3.3 频谱行为精准推理与意图识别

频谱行为精准推理与意图识别是从频谱态势感知跃升到频谱态势认知的核心之一。传统电磁频谱态势感知主要关注频段是否占用、信号能量强弱及调制方式种类等信号级特征,未能对频谱直接行为(如频谱接入方式、抗干扰模式等)、间接行为(如目标轨迹规划、网络拓扑构建和群体编队等)及相应的意图进行推理与判别。随着各类电磁用频设备和系统的数量爆炸式增长,电磁环境日益复杂,个人行为不断向群体行为发展(如无人集群作战),频谱行为与意图日益复杂且种类不断丰富,导致频谱行为和意图的认知难度加大。频谱行为推理和意图判别的准确性与时效性这一矛盾在复杂动态电磁环

境下更加凸显。基于知识图谱的认知智能可利用不同层级、不同领域和不同类型知识,为实现频谱行为的精准推理和意图高效判别提供了重要途径,但存在频谱行为知识图谱如何构建、频谱行为知识如何用于频谱行为推理和意图识别等难题。因此,迫切需要研究频谱行为知识图谱构建,基于语义和知识双驱动的频谱行为精准推理,基于认知智能的分层意图判别,以实现从“语义到行为”的跃升。

首先需要构建包含无线通信域、雷达域以及混合域等多域频谱行为知识图谱。频谱行为知识图谱是一种包含了不同层级、不同领域和不同类型的频谱行为知识组织形式,是基于知识图谱的认知智能的核心。需要从结果化、半结构化和非结构化的异构文本信息中完备、高效且自动地完成知识抽取,并对不同来源抽取到的知识碎片实现知识融合,形成完备统一的知识图谱。进一步考虑到动态复杂电磁环境下的频谱行为随时间实时变化,还需要快速捕捉到频谱行为的变化,实现实时高效的频谱知识图谱更新。图4为一种面向动态复杂电磁环境的超大规模频谱知识图谱构建方法,以应对复杂电磁环境下的全谱化、频谱空间化、碎片化和网络异构化的问题。

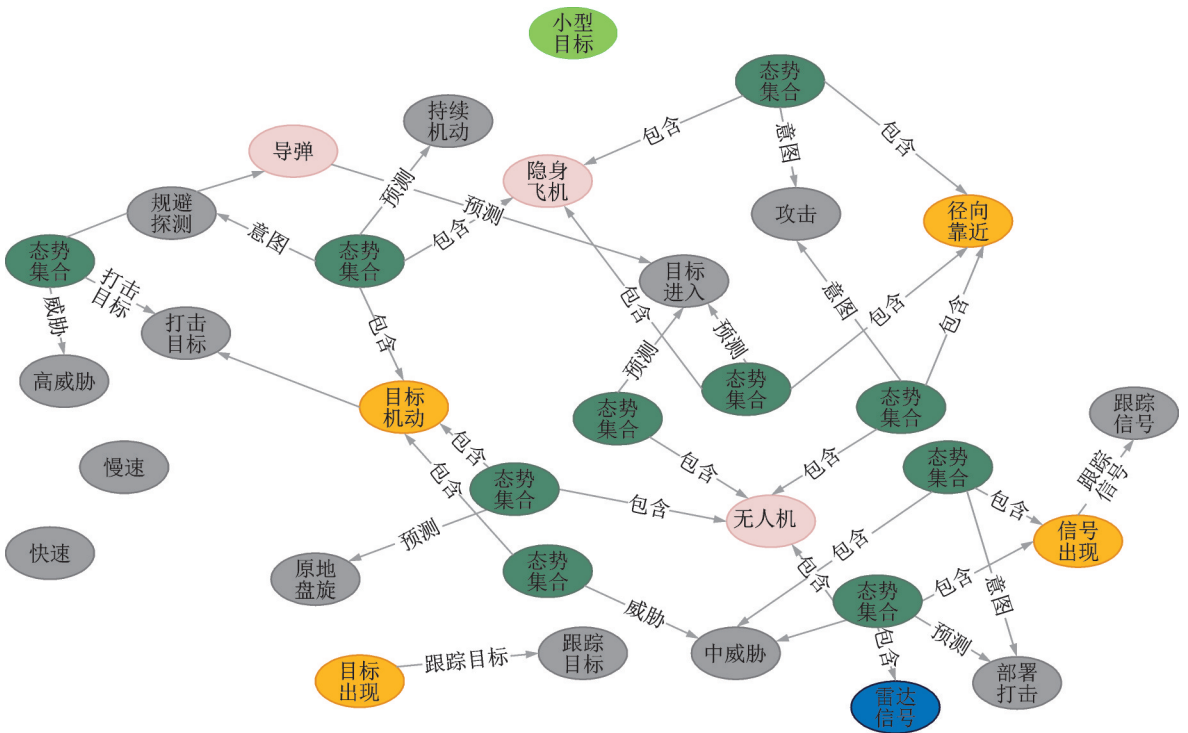


图4 部分电磁频谱知识图谱示例

Fig.4 Example of electromagnetic spectrum knowledge graph

为实现先验信息匮乏或不完备下的频谱行为精准推理,以频谱行为知识图谱为基础,通过不同层级、不同类型和不同域知识的高效表征,设计知识与数据双驱动的频谱行为推理引擎,并从无线电、雷达等域挖掘电磁时空特性、演化特性出发,综合利用无线电、雷达等跨域知识与联合特征,研究基于语义与知识双驱动的频谱行为精准推理方法提升单域和跨域频谱行为推理精度与时效。在频谱行为精准推理的基础上,为了提升对复杂动态电磁环境的认知深度,充分利用无线电域、雷达域等跨域行为、群目标特征、群目标意图知识,研究基于知识图谱的群目标意图判别,实现意图分层高效和可解释性判别。

#### 4 结束语

未来频谱态势认知的发展将围绕多层频谱态势认知体系模型与机理、跨域多维电磁特征提取与融



合、频谱语义态势高效补全与预测以及频谱行为精准推理与意图识别等方面展开,充分体现超越频谱态势感知的频谱态势认知特点,实现从“数据到语义”“语义到行为”“单域到跨域”“单层到多层”的跃升。为实现频谱态势认知,当前研究需要重点突破在电磁特征异构异质且不完整的条件下,实现跨域多维电磁特征的无损融合的难题;频谱语义信息不确定性条件下,实现多粒度频谱语义态势精准预测的难题;频谱行为与意图动态变化和跨域耦合条件下,频谱行为与意图快速准确推理的难题。未来,电磁频谱语义态势认知的研究成果可应用于低空智联网络频谱资源共享、重大活动电磁频谱保障任务、反无人机群袭扰和关键建筑电磁泄露与防护等典型场景,为未来天地一体信息网络中动态频谱效率提升、无线电秩序管理中恶意用户检测率与识别率提升、对抗条件下频谱效能比与行为意图识别增强等提供理论与技术支撑。

### 参考文献:

- [1] CISCO. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update (2017—2022)[EB/OL]. (2019-02-01)[2022-11-01]. <http://media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf>.
- [2] 工业和信息化部无线电管理局. 中国无线电管理年度报告(2020年)[EB/OL]. (2021-06-11)[2022-11-03]. <http://www.srrc.org.cn/article26666.aspx>.  
Radio Administration of Ministry of Industry and Information Technology. Annual report on radio management in China (2020) [EB/OL]. (2021-06-11)[2022-11-03]. <http://www.srrc.org.cn/article26666.aspx>.
- [3] WANG Dan, SONG Bin, CHEN Dong, et al. Intelligent cognitive radio in 5G: AI-based hierarchical cognitive cellular networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(3): 54-61.
- [4] HE Haibo, JIANG He. Deep learning based energy efficiency optimization for distributed cooperative spectrum sensing[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(3): 32-39.
- [5] WANG Haichao, WANG Jinlong, DING Guoru, et al. Robust spectrum sharing in air-ground integrated networks: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(3): 148-155.
- [6] KHALEK N A, HAMOUDA W. From cognitive to intelligent secondary cooperative networks for the future internet: Design, advances, and challenges[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(3): 168-175.
- [7] SONI B, PATEL D K, DING Zhiguo, et al. On sensing performance of multi-antenna mobile cognitive radio conditioned on primary user activity statistics[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 21(5): 3381-3394.
- [8] HE Qing, MOAYYEDI A, DÁN G, et al. A meta-learning scheme for adaptive short-term network traffic prediction[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(10): 2271-2283.
- [9] ZHANG Jing, HE Yunfeng, LI Yuwen, et al. Meta learning-based MIMO detectors: Design, simulation, and experimental test[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(2): 1122-1137.
- [10] JI Hao, WAN Tao, XIONG Wanan, et al. A method for specific emitter identification based on surrounding-line bispectrum and convolutional neural network[C]//Proceedings of 2020 IEEE 3rd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering. Shenyang, China: IEEE, 2020: 11.
- [11] 巫胜洪, 雷达脉内特征提取方法的研究[J]. *舰船电子对抗*, 2020, 25(1): 25-28.  
WU Shenghong. Research on radar pulse feature extraction method[J]. *Ship Electronic Countermeasures*, 2020, 25(1): 25-28.
- [12] 周志文, 黄高明, 高俊, 等. 一种深度学习的雷达辐射源识别算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2017, 44(3): 77-82.  
ZHOU Zhiwen, HUANG Gaoming, GAO Jun, et al. A deep learning radar emitter recognition algorithm[J]. *Journal of Xidian University*, 2017, 44(3): 77-82.
- [13] ZHANG Jingwen, WANG Fanggang, ZHONG Zhangdui, et al. Novel Hilbert spectrum-based specific emitter identification for single-hop and relaying scenarios[C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference. San Diego, CA, USA: IEEE, 2015.
- [14] 丁敏. 通信辐射源个体识别技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.  
DING Min. Research on individual identification technology of communication radiation source[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [15] SOLTANIEH N, NOROUZI Y, YANG Yang, et al. A review of radio frequency fingerprinting techniques[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2020, 4(3): 222-233.
- [16] JAIN A, AWAN A A, ANTHONY Q, et al. Performance characterization of DNN training using tensorflow and pytorch on

- modern cluster[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Cluster Computing. Albuquerque, NM, USA: IEEE, 2019: 9.
- [17] TIAN Xin, BAR-SHALOM Y. Exact algorithms for four track-to-track fusion configurations: All you wanted to know but were afraid to ask[C]//Proceedings of International Conference on Information Fusion, Seattle, WA, USA: [s.n.], 2009: 7.
- [18] CHEN Zhaoxi, LI Gao, FIORANELLI F, et al. Dynamic hand gesture classification based on multistatic radar micro-Doppler signatures using convolutional neural network[C]//Proceedings of 2019 IEEE Radar Conference. Boston, MA, USA: IEEE, 2019: 4.
- [19] DENKOVSKI D, ATANASOVSKI V, GAVRILOVSKA L, et al. Reliability of a radio environment map: Case of spatial interpolation techniques[C]//Proceedings of 2012 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). Stockholm, Sweden: [s.n.], 2012: 6.
- [20] HU Yidan, ZHANG Rui. Differentially-private incentive mechanism for crowdsourced radio environment map construction [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2019—IEEE Conference on Computer Communications. [S.l.]: IEEE, 2019: 5.
- [21] YILMAZ H B, TUGCU T. Location estimation-based radio environment map construction in fading channels[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2015, 15(3): 561-570.
- [22] DING Yipeng, YU Xiali, ZHANG Juan, et al. Application of linear predictive coding and data fusion process for target tracking by Doppler through-wall radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(3): 1244-1254.
- [23] RAGHU J, SRIHARI P, THARMARASA R, et al. Comprehensive track segment association for improved track continuity [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(5): 2463-2480.
- [24] LI Xi, WANG Xin, SONG Tiecheng, et al. Robust online prediction of spectrum map with incomplete and corrupted observations[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 21(12): 4583-4594.
- [25] DING Xiaojin, FENG Lijie, ZOU Yulong, et al. Deep learning aided spectrum prediction for satellite communication systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 16314-16319.
- [26] CHOI W, LEE S, CHUNG C. On-road object collision point estimation by radar sensor data fusion[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(9): 14753-14763.
- [27] 孙佳琛,王金龙,丁国如,等. 频谱知识图谱:面向未来频谱管理的智能引擎[J]. 通信学报, 2021, 42(5): 1-12.  
SUN Jiachen, WANG Jinlong, DING Guoru, et al. Spectrum knowledge graph: Intelligent engine for future spectrum management[J]. Journal of Communications, 2021, 42(5): 1-12.
- [28] LI Daofeng, XU Yamei, ZHAO Ming, et al. Knowledge-driven machine learning and applications in wireless communications [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 8(2): 454-467.
- [29] DING Guoru, JIAO Yutao, WANG Jinlong, et al. Spectrum inference in cognitive radio networks: Algorithms and applications [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2018, 20(1): 150-182.
- [30] 王金龙,徐煜华,陈瑾. 无线通信网络智能频谱协同与对抗[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1767-1778.  
WANG Jinlong, XU Yuhua, CHEN Jin. Intelligent spectrum cooperation and antagonism in wireless communication networks [J]. Science China: Information Science, 2020, 50: 1767-1778.

## 作者简介:



周博(1991-),男,博士,教授,研究方向:电磁频谱态势认知、信息新鲜度, E-mail: b.zhou@nuaa.edu.cn。



马欣怡(1999-),通信作者,女,硕士研究生,研究方向:无人机轨迹规划、信息年龄, E-mail: maxinyi@nuaa.edu.cn。



况婷妍(1997-),女,硕士研究生,研究方向:无线通信、时频分析、异常信号识别, E-mail: kuangtingyan@nuaa.edu.cn。



李婕(1991-),博士,副研究员,研究方向:频谱认知、雷达通信一体化设计、智能信号处理、阵列信号处理等, E-mail: lijie\_evelyn@nuaa.edu.cn。