

频谱知识图谱：面向未来频谱管理的智能引擎

孙佳琛, 王金龙, 丁国如, 陈瑾, 龚玉萍

(陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 针对当前频谱管理中表征方式较单一、管理方式对人的经验依赖性较强、管理效率和精准度较低等问题, 面向未来频谱管理的自动化、智能化、精准化需求, 将知识图谱理论与技术引入频谱管理中, 给出了频谱知识图谱的概念和其依赖的频谱知识体系, 以及三元组形式的表示方法, 构建了由图谱层、设备层和场景层构成的基于频谱知识图谱的智能频谱管理框架, 探讨了基于频谱知识图谱的用频推荐、频谱搜索、频谱问答等典型应用。仿真实验表明, 频谱知识图谱能在用频推荐中发挥知识引导的作用。

关键词: 频谱管理; 知识图谱; 认知图谱; 认知无线电; 用频推荐; 频谱搜索; 频谱问答

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021084

Spectrum knowledge graph: an intelligent engine facing future spectrum management

SUN Jiachen, WANG Jinlong, DING Guoru, CHEN Jin, GONG Yuping

College of Communications Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210007, China

Abstract: To solve the issues of simple representations on spectrum situation, much dependence on artificial experience in manual management and low efficiency and accuracy in the current spectrum management, meeting the requirements of automation, precision and real time for future spectrum management, the theory and technology of knowledge graph were introduced into spectrum management. The definition of spectrum knowledge graph, the knowledge schema it depends on and its representation in the form of triples were proposed. The intelligent spectrum management framework based on spectrum knowledge graph, consisting of the graph layer, the equipment layer and the scenario layer, was constructed. Typical applications based on spectrum knowledge graph were discussed, including the recommendation system for spectrum usage, the search engine on spectrum management, and question answering for spectrum management. Experiments demonstrate the spectrum knowledge graph can play a role of guidance by spectrum knowledge in spectrum usage recommendation.

Keywords: spectrum management, knowledge graph, cognitive graph, cognitive radio, recommendation for spectrum usage, search on spectrum management, question answering for spectrum management

1 引言

频谱管理是指综合运用行政、技术和工程等手段对电磁频谱使用进行筹划、组织、协调和控制,

以免用频设备、系统及业务间的相互干扰^[1]。早期的频谱管理主要依靠人工制定频谱政策、用频规则, 通过为用频设备、系统和业务统一划分频段、指配频率来实现, 适用于用频需求有限、电磁环境

收稿日期: 2020-08-19; 修回日期: 2020-11-09

基金项目: 科技创新 2030-“新一代人工智能”重大项目 (No.2018AAA0102303); 国家自然科学基金资助项目 (No.U20B2038, No.61871398, No.61931011); 江苏省自然科学基金杰出青年基金资助项目 (No.BK20190030)

Foundation Items: The Science and Technology Innovation 2030-Key Project of “New Generation Artificial Intelligence” of China (No.2018AAA0102303), The National Natural Science Foundation of China (No.U20B2038, No.61871398, No.61931011), The Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Jiangsu Province (No.BK20190030)

相对简单的情况。这种条块分割的静态管理模式侧重计划分配、被动响应,人工成本高,管理效率较低,时效性较差,难以适应需求爆炸式增长及电磁环境的快速变化,还会导致频谱使用不平衡、频谱利用率较低等问题。

为解决上述问题,可以利用频谱空穴来实现动态频谱接入。认知无线电是实现动态频谱接入的关键技术,它为未授权用户或认知用户提供了以机会的方式与授权用户共享无线频谱资源的能力^[2-3]。在部分频谱已经固定地划分给授权用户的情况下,认知用户可以对电磁环境进行感知,检测未被使用的频谱(即频谱空穴),估计信道状态信息、预测信道容量,从中选择最优可用频率并接入,与授权用户实现频谱共享。在此过程中,认知用户是被赋予了观察、学习、适应、决策等能力以及支持在不同频率上收发信号的可重构性^[4]的智能体。这也为频谱管理的智能化确立了“频谱感知-频谱决策-频谱共享-频谱移动”的主要框架^[5]。

进一步地,人工智能技术的蓬勃发展为频谱管理模式的变革带来了新的机遇^[6],深度学习、群体智能、区块链等新兴技术在频谱数据分析、控制信道分配、防欺骗决策等方面表现出优越性,使频谱机会发现和利用的能力不断提升。具体而言,深度学习能够从原始数据中自动解析出更加复杂的统计模型,如 Yu 等^[7]基于深度学习长短期记忆模型挖掘并利用频谱时间序列数据中的中长期频谱特征,提升了频谱预测的性能。群体智能理论与方法则能使分布式个体独立行动并根据环境反馈自适应地调整自身行为,所有个体互相协调耦合,最终形成自发连贯的系统智能^[8]。Chen 等^[9]提出了一种基于群体智能的信道选择算法,利用邻居定时广播消息作为信息素对认知用户常用信道的质量进行排序,通过仅基于局部信息的节点协作解决了认知无线网络中控制信道资源分配的问题。区块链的去中心化存储、分布式共识等关键技术使私有无线设备参与贡献频谱数据、实现频谱可信安全共享成为可能。杨健等^[10]将区块链技术应用到大规模超密集移动互联网的频谱共享中,将海量个人无线设备联网构成频谱设备网络,定义“频谱币”作为设备采集频谱数据的奖励,并提出由感知节点共识融合、验证节点共识验证、簇头节点共识确认构成的分布式共识机制。

频谱管理正在经历从人工/手动到机器自动化/

自主智能、从静态封闭分配到动态开放共享、从集中统一指派到分布自主协同的转变,但在这一过程中仍面临以下挑战。

1) 频谱空间建模表征方式比较单一,难以适应错综复杂的电磁环境。当前,频谱态势常用频谱图来描绘,建模时主要关注可用频谱资源的时-频-空分布,具体表现为频谱的忙闲状态、辐射功率、接入协议、调制方式等。随着用频设备/系统的数量和数量不断增长,电磁频谱空间日益错综复杂,演变成多主体、多因素、多变量构成的互为输入输出的复杂系统。当前频谱建模和表征方式难以厘清频谱空间内各主体间的多元关系以及主体受因素、变量的深层影响,缺乏系统性频谱知识的精炼。

2) 频谱管理方式对于人的经验依赖性较强,难以实现自动化、智能化的频谱管理效果。静态划分的传统频谱管理模式依赖于人工操作和人员经验。在动态协同的智能频谱管理模式中,虽然频谱感知、频谱预测、频谱决策等各个环节针对各自不同的优化目标都有技术性的解决方法,但各个环节间智能算法的输入输出仍然依赖人工衔接和监督,许多操作技巧和实践经验只能被频管人员掌握,用频设备既无法理解频谱认知环路中流动的数据的语义,也无法在数据计算的基础上结合这些技巧经验进行思考,并未实现自动化的频谱共享。

3) 频谱管理效率较低,难以满足精准化、实时性的频谱管理要求。现有频谱管理方法主要是从频谱数据中建立统计模型,挖掘统计规律来进行频谱预测、频谱决策,这些模型驱动的方法存在模型复杂度、精准度、可解析性等难以调和的内在矛盾。并且,针对不同的频谱管理场景,由于缺乏系统性的频谱知识,现有模型的泛化能力欠佳。此外,对于频谱管理中的大量优化计算,多样化频谱数据的格式难以统一,频谱管理的计算能力受到限制,频谱预测、频谱决策的结果常常滞后,时效性较差。

综上所述,为推动频谱管理从静态、低效的以人工为主模式向动态、精准的智能模式转变,探索一种新的频谱管理模式是目前亟待解决的难题。为此,本文将知识图谱理论与技术应用到频谱管理中,主要贡献概括如下。

1) 提出“频谱知识图谱”的概念、体系和表示方法。

2) 面向未来频谱管理场景,构建了基于频谱知识图谱的智能频谱管理框架。

3) 探讨了基于频谱知识图谱的智能用频推荐案例, 展望了基于频谱知识图谱的智能频谱管理交互应用。

2 知识图谱与频谱管理

2.1 知识图谱概述

知识图谱是一种用图模型来描述知识和建模世界万物之间关联关系的技术方法^[11]。它利用图模型中的节点和节点间的边来表示复杂的人类知识, 其中节点代表实体, 可以是具体的事物或者抽象的概念; 边代表实体间的关系或者实体的属性。这种图模型的表达通常描述为三元组的形式。知识图谱中的实体和关系具有明确的语义, 可以由计算机进行形式化解释、推理和判断, 用自然语言描述的人类知识由此被映射为机器可以计算和理解的信息。

知识图谱在 2012 年由谷歌公司提出, 用于优化搜索引擎服务^[12]。但实际上, 它并非一项突然出现的新技术, 而是由历史上很多相关概念互相影响和继承发展而来^[11], 例如专家系统^[13]、语义网络、本体、语义网等。表 1 列出了这些相关概念与知识图谱间的联系和区别。知识图谱常被称为语义网的知识库, 谷歌公司提出的知识图谱搜索引擎服务就是以语义网 Freebase 作为数据基础改造的, 现代知识图谱通常沿用语义网中的资源描述框架 (RDF, resource description framework) 进行简单实用的知识表示, 从这点来看, 知识图谱与语义网是十分相似的。但语义网中以符号逻辑为基础的知识表示方法只善于刻画显式、离散的知识, 难以描述隐性知识、过程知识^[13]。知识图谱则可将每一个实体和关

系都映射到低维向量空间中获得它们的向量表示, 通过数值计算实现隐含关系的推理。这种自动化的知识图谱嵌入技术^[17]也使知识图谱的规模得到空前的扩展。传统的专家系统常依赖人工定义语义关系、获取知识, 知识库的规模十分有限, 而现代知识图谱与其最显著的差别就是知识图谱的规模巨大及其构建过程自动化。同时, 逐渐成熟的自然语言处理技术更是与知识图谱互为支撑、互相促进, 自然语言处理的众多算法已在实体抽取、关系抽取、知识融合等知识图谱构建环节中发挥关键作用。

根据知识图谱中包含的知识类型进行分类, 可以将知识图谱分为通用知识图谱和领域知识图谱。关于通用知识图谱, 国内外已有较成熟的项目。国外的代表性项目包括早期影响范围较广的由 Cycorp 公司开发的 Cyc^[18]、普林斯顿大学开发的 WordNet^[19]、麻省理工学院创建的 ConceptNet^[20]、MetaWeb 公司构建的 Freebase、维基构建的 WikiData 等。国内的代表性项目如下。复旦大学知识工场实验室研发并维护的 CN-DBpedia^[21], 是国内较早推出的也是目前规模较大的开放百科中文知识图谱。清华大学研发的 XLORE 通过从异构的跨语言在线百科中抽取结构化信息, 形成中英文知识规模较平衡的多语言知识图谱, 为构建任意双语知识平衡的大规模知识图谱提供了新的方式。浙江大学、东南大学、同济大学等多个研究团队共同研发的 OpenKG 是一个面向中文域开放知识图谱的社区项目, 旨在促进中文领域知识图谱数据的开放互联, 同时还收集整理了重要的知识图谱开源工

表 1 相关概念与知识图谱的联系和区别

概念	含义	与知识图谱的联系	与知识图谱的区别
专家系统 ^[14]	一个具有大量的专门知识与经验的程序系统, 由知识库和推理机两部分组成	对领域知识进行知识表示并形成知识库/集合	专家系统的知识库依靠专家手动获取知识, 知识图谱则支持自动化构建
语义网络	一个带标识的有向图。图中节点表示各种事物、概念、情况、状态等, 节点与节点间连接表示各种语义联系、动作 ^[15]	图结构化的知识表示方法	语义网络缺乏形式化的语法规则和形式化的语义标准, 概念与实体之间没有明显的区分, 节点与边难以进行更加丰富的定义
本体	定义了某一领域内的专业词汇以及它们之间的关系, 是对概念化的精确描述	提供了一种人、机器等不同主体间交流的语义基础	本体侧重于描述概念类别和通用关系, 较体系化; 知识图谱包含更多具体实例, 反映的是本体基础知识的具体表现结果
语义网	将 Web 中数据以 RDF 与互联网本体语言 (OWL, ontology Web language) 来表示, 建立网络数据之间的语义关系, 使处理数据的机器能够像人一样理解网络上的信息, 从而提供更好的网络服务 ^[16]	常采用基础数据模型 RDF	语义网的表示对象主要是万维网上的文档, 如超文本标记语言 (HTML, hypertext markup language) 文档、可扩展标记语言 (XML, extensive markup language) 文档; 知识图谱中实体的含义和类型更丰富

具。就领域知识图谱而言, 电商、金融、医疗、企业管理等众多领域的知识图谱应用逐渐落地生根。例如, 医学知识图谱用于表达、组织、管理及利用海量异构动态的医疗大数据, 在临床决策支持系统、医疗智能语义搜索引擎、医疗问答系统等系统中得到了广泛应用^[22]。金融知识图谱可对大量金融数据进行标准化和可视化, 用于监管企业的发展趋势, 调查隐藏的财务关系等^[23]。

此外, 在知识图谱管理方面, 以 Jena 和 RDF4J 等为代表的关系数据库系统和以 Neo4j 为代表的图数据管理系统常用来支持大规模知识图谱的存储、检索和分析。

知识图谱在诸多领域的广泛应用得益于其对以二元一阶谓词逻辑为主的简单知识的成功表示。而对于某些三元关系甚至多元高阶谓词逻辑的复杂表达, 现有知识图谱尚无法胜任, 且面临链接困难、关系冗余、组合爆炸等难题^[24]。Ding 等^[25]针对网络文档的多跳问答推理难题, 受双过程理论启发, 在知识图谱的基础上提出了认知图谱。认知图谱被解释为“基于原始文本数据, 针对特定问题情境, 使用强大的机器学习模型动态构建的, 节点带有上下文语义信息的知识图谱”, 可以减少图谱构建时的信息损失, 将信息处理压力转移给检索和自然语言理解算法, 同时保留图结构以进行可解释关系推理^[24]。

人工智能的核心难题之一是研究怎样用计算机易于处理的方式表示、学习和处理各种各样的知识。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, 拥有思考、理解、判断、分析的能力, 成为实现认知智能不可或缺的重要技术之一^[11]。

2.2 知识图谱引入频谱管理的意义

据调研, 知识图谱目前在无线通信、信号检测、网络管理方面的研究刚刚开始。张育瑜等^[26]针对无线电监测数据未规范化的问题, 提出了基于知识图谱的海量无线电监测数据的分析思路, 利用盲信号识别等方式, 构建了结构化无线电监测数据知识库。胡航宇等^[27]提出一种基于流知识图谱的网络流行为分析模型——网络流连接图, 网络流连接图能够充分利用网络流行为测量数据中的可用信息, 刻画网络应用流连接关系的固有特征, 检测与识别网络异常行为, 适合多种图挖掘算法的应用。Aumayr 等^[28]针对复杂动态电信网络系统管理的自动化需求, 从网络当前状态中收集上下文信息, 并将其与

网络提供商和运营商领域的现有电信知识文档中的有用信息相关联, 构建了一个面向网络自动管理的知识图谱。该知识图谱可针对各种突发的网络事件, 自动推荐 workflows, 辅助网络故障诊断和排除, 提高网络管理的效率, 改善客户体验。上述研究是将知识图谱应用到通信领域的有益尝试, 但尚没有系统地涉及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, 尤其是在频谱管理中, 知识图谱的应用目前仍未见报道。

结合知识图谱的特点和频谱管理面临的严峻挑战, 本文考虑在频谱管理中引入知识图谱, 主要如下。

1) 知识图谱能够表征频谱领域的复杂语义。知识图谱将频谱管理中蕴含的复杂关系和事实映射于不同的实体和实体间的关系上, 且这些实体和关系都具有明确的含义, 如用频设备、频谱资源表示通信、干扰或使用资源等关系, 这种映射方式可以表征频谱领域的语义, 使机器理解频谱管理中的各种信息。同时, 知识图谱本质上是一种图模型的数据库, 实体和关系对应图中的节点和边, 还能通过图数据计算进一步发掘隐含的深层关系和事实。

2) 知识图谱能够支撑频谱管理的自动化。通过为频谱管理提供多域关联的频谱知识参考, 知识图谱可以将频谱管理中各个零散的工作环节串联起来, 自动进行多步查询推理, 从而减少频谱管理对人工操作的依赖。

3) 知识图谱能够增强频谱管理的知识引导。知识图谱能将人类积累的频管经验和实践技巧转化为机器能够理解和处理的频谱知识, 并融入频谱管理中发挥频谱知识的引导作用, 使频谱管理从单纯的数据驱动转变为数据与经验知识混合驱动。

4) 知识图谱能够提升频谱管理的规模化。频谱知识图谱的向量表示将用频设备、频谱资源等实体及其之间的关系映射到连续向量空间, 向量表示的具体过程采用深度学习模型进行自动训练, 使知识图谱的规模得到极大拓展。

5) 知识图谱能够提升频谱管理的可解释性。知识图谱相当于大脑中的知识库, 使智能算法的输入、输出行为以及它们之间的内在因果关系或关联关系可以被理解, 有利于提升频谱管理的透明度、可信度、推广泛化能力。

综上所述, 在频谱管理中引入知识图谱有助于高效融合频谱监测数据、用频设备信息、频谱管理

日志等多源数据，挖掘频谱管理中各实体之间在时间/频率/空间等多元维度上的隐藏关系，实现频谱数据与模型/专家经验混合驱动的频谱智能管理，提升复杂环境下频谱管理的智能化水平，更加接近人类的认知思维，便于实现人工智能与人类智能的协同增效。知识图谱将成为频谱智能管理领域强有力的新概念、新工具。

3 频谱知识图谱的构建

3.1 频谱知识图谱的概念

频谱知识图谱是表征频谱管理领域复杂知识的新概念，本文给出频谱知识图谱的初步定义：频谱知识图谱是一种领域知识图谱，它通过整合多源异构的频谱数据，表示频谱资源、用频设备等频谱空间内概念、实体间的复杂关系，实现频谱知识的表征、提取、存储、推理，服务于未来频谱管理的自动化、智能化、精准化需求。下面将结合知识图谱的生命周期和构建过程具体阐释频谱知识图谱的定义。如图 1(a)所示，频谱知识图谱的生命周期主要包括知识体系构建、知识获取、知识融合、知识存储与查询、知识推理、知识应用 6 个环节^[29]。其中，知识体系构建是频谱知识图谱的实现基础，知识建模和本体构建明确了频谱知识图谱将包含

的各种概念、实体以及具有的属性和它们之间的关系；知识获取主要是指从数据中抽取频谱知识；知识融合是对不同来源、不同结构的知识进行融合的过程；知识存储与查询关注的是知识图谱的数据模型、存储方式及查询语言；知识推理是针对知识图谱的缺失链接进行补全，挖掘实体隐含的内在关系，同时将为频管搜索、频管问答、用频推荐等知识图谱下游应用提供支撑。

根据图谱生命周期，频谱知识图谱构建过程如图 1(b)所示。首先，对来源广泛、类型多样的非结构化频谱数据进行知识获取，数据来源包括专业频谱管理人员的实践经验、文本化的频谱管理政策和用频设备信息、格式化的频谱管理日志和频谱监测数据报表，甚至频谱态势图像等。在此过程中，频谱知识体系将为知识获取提供依据和参考，即由模式层创建实例层，其中模式层存储的是精炼的概念或实体以及它们之间的关系类型，而实例层对应的则是从实际数据中抽取的具体实例对象及其关系。然后，抽取得到的频谱知识将与结构化频谱数据进行知识融合，形成统一的频谱知识表示。对频谱知识进行存储，即形成可用的频谱知识图谱。通过知识推理可以对已构建的频谱知识图谱中缺失的知识链接进行补全完善，最后服务于具体应用。

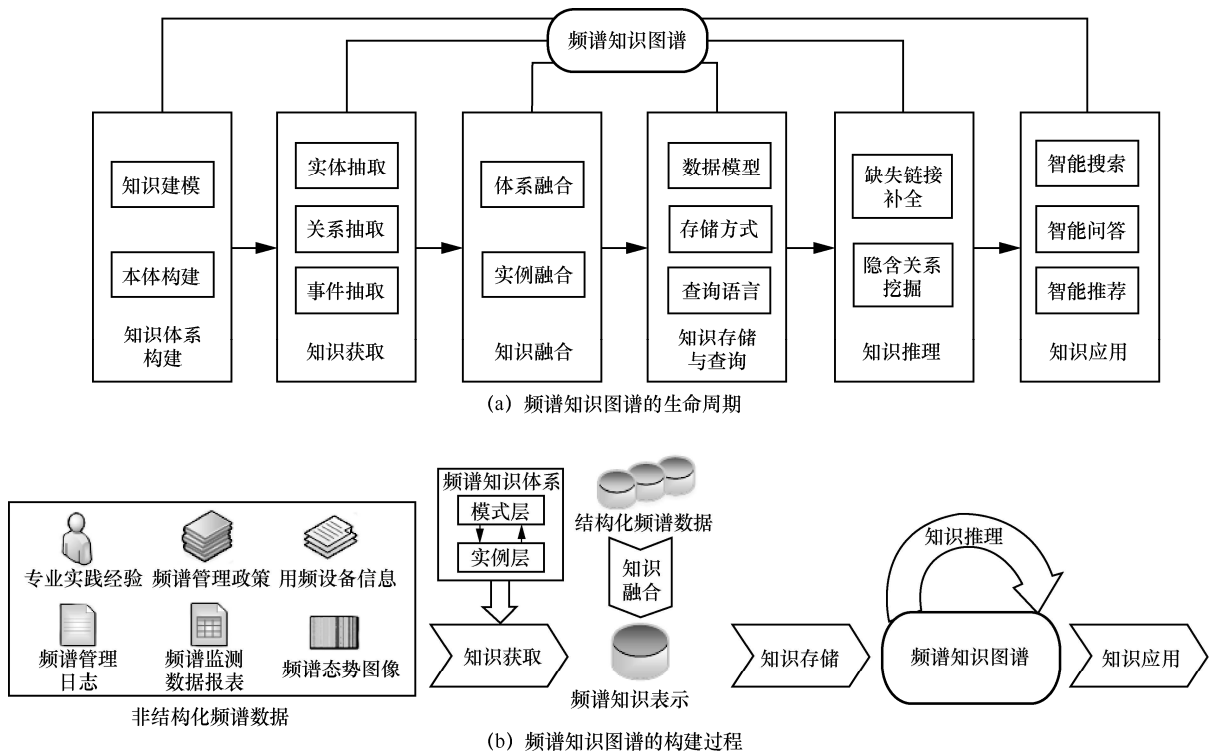


图 1 频谱知识图谱的概念

由于知识获取和知识融合都属于自然语言处理中的重点研究内容,目前均有众多较可行的方法,参考实体识别^[30-31]、实体消歧^[32-33]、关系抽取^[34-35]、事件抽取^[36]、联合抽取^[37]等,因此本文不再赘述。本文将知识图谱应用于频谱管理,旨在突出频谱知识图谱对频谱管理自动化、智能化、精准化水平的提升作用,而知识体系是否合理完备将直接影响频谱知识图谱的应用效果,因此本文在第 3 节详细阐述频谱知识图谱知识体系的具体内容,在第 5 节着重探讨频谱知识图谱的应用场景。

3.2 频谱知识图谱的知识体系

频谱知识目前尚未有公认的或被广泛接受的定义。Zhang 等^[38]将频谱知识形式化地定义为用于推理或预测频谱机会可用性及占用率的可延伸的可量化的信息,频谱知识的形式可以是频谱预测模型、频谱管理范式和频谱接入策略等。结合知识的定义,本文认为在频谱管理实践中积累的经验、制定的规则或频谱管理中出现的各种事实、信息,都属于频谱知识的范畴。而在表征具体的频谱知识前,首先要建立合理的知识体系,知识体系对领域内的知识具有高度概括性和抽象性,确定了描述知识的基本框架,具体包括概念的分类、概念属性的描述和概念之间相互关系的定义 3 个方面的内容^[29]。面向频谱管理的应用需求,本文采用自顶向下的方式,尝试构建了频谱知识体系。一方面受篇幅限制,表 2 中只列出了频谱知识体系的主要条目。另一方面,本文认为频谱知识图谱是基于开放世界的设定,人们所掌握的频谱知识将随着技术发展和研究深入而逐步丰富,因此频谱知识体系尚不完备,可根据具体应用情况进行调整和扩展。

具体地,从管理对象而言,频谱管理是围绕重要稀缺的频谱资源和类型多样的用频设备展开的;从管理内容而言,频谱管理的场景配置和各场景下具体任务各不相同;从管理手段而言,频谱管理涉及众多面向不同任务目标的智能算法。基于此,频谱知识体系中的主要概念分类、实体及其属性如表 2 所示,其中,“类”代表概念类别,缩进表示概念、实体间的上下位关系,实体后的方括号内列举了实体的部分属性。实体间关系的类型和关系的作用范围如表 3 所示。

3.3 频谱知识图谱的表示

在频谱知识体系的框架下,频谱知识图谱采用三元组的形式描述实例知识,即(头实体,关系,尾

表 2 频谱知识体系示例

概念类别	实体及其属性
资源类	频段[频率范围、业务类型]
	信道[带宽、中心频率、占空比]
设备类	通信设备[名称、工作频段、所处位置、发射功率、调制方式]
	电台[工作方式]
	雷达设备[名称、工作频段、所处位置、发射功率]
	雷达[信号形式、天线类型、扫描方式、角跟踪方式]
	导航设备[名称、工作频段、发射功率]
场景类	卫星[轨道高度、是否同步、轨道偏心率,近地点幅角]
	电抗设备[名称、身份、工作频段、发射功率]
	干扰武器[搭载平台、干扰模式]
	频谱秩序管理
	黑广播检测
	窃听器检测
	频谱对抗管理
	电磁欺骗
	电磁干扰
	频谱共享管理
空地频谱共享	
技术类	通信雷达频谱共享
	频谱感知
	频谱预测
	频谱决策

表 3 实体间关系的类型和作用范围

关系类型	头实体类型	尾实体类型
属于	—	—
通信	设备类	设备类
干扰	设备类	设备类
使用	设备类	资源类

实体),记为 (h,r,t) 。其中,头实体 h 一般为知识体系中的概念或实体;尾实体 t 既可以是概念或实体,也可以是实体的属性值字段;相应地,关系 r 可以为连接头、尾实体的谓词或上下位关系,也可以描述实体对象与其属性值字段之间的属性关系。一个完整的三元组被称为一个事实,记作 $F=(h,r,t)$ 。从图模型的角度,频谱知识图谱中的所有实体和字段均对应图中的节点,实体间的关系或实体的属性对应图中的边,形成网状的图数据模型,将分散的频谱知识紧密地组织在一起。

空地频谱共享的知识图谱局部示意如图 2 所示。在设备-资源层面上，每一个椭圆形节点即为资源或者设备类别中的概念的一个实例，如频谱共享管理、空地频谱共享、频谱感知、无人用户 A、干扰站、信道 1 等；每一个矩形节点是描述属性值的字段，如单维频谱预测、直接序列扩频、2.432 GHz 等。实体间的关系或实体的属性用节点间的有向边表示，如表示概念层级间包含或包括关系的有向边、设备与资源间使用关系的有向边、表示信道的中心频率属性的有向边等。场景-技术层面与设备-资源层面通过场景任务中包含设备、资源联系起来。此外，将知识图谱的节点设置为实体或字段是可以根据实际情况灵活调整的。如图 2 中的直接序列扩频节点，若仅用于描述设备发射信号的调制方式属性，可将其设置为字段；若图谱中还涉及该调制方式的具体属性参数，如扩频码长度、码速率等，则将其设置为实体。

有些知识图谱表示还考虑了事实的其他维度。例如，赵泽亚^[39]针对传统的知识网络模型无法充分描述复杂多元异构信息的问题，提出了一种开放知识网络八元组模型，网络中的节点和边都带有时间、空间等信息，便于信息的深度挖掘。而在频谱管理中，某些频谱知识描述的语义实际上也隐含着

重要的时空信息，如“某信道在某时段的占比比为 57%”，仅描述信道的占比比属性值就会丢失时间信息，因此在频谱知识图谱中也可以根据实际情况增加关系的时空描述信息。

4 基于频谱知识图谱的智能频谱管理框架

频谱知识图谱将频谱管理领域内各个层面的知识有效紧密地联结在一起，本节将构建基于频谱知识图谱的智能频谱管理框架。

图 3 给出了基于频谱知识图谱的智能频谱管理框架，从左至右依次为图谱层、设备层和场景层。在此框架中，未来频谱管理被认为是集中控制与分布自主相结合的模式，频谱管理中心是具备存储、计算、理解、思考等能力的智能控制中心，用频设备是具备感知、理解、记忆、思考等能力的智能体，频谱知识图谱则是频谱管理中心和用频设备“大脑”中的知识库。在频谱知识图谱的引导下，智能频管中心可以根据所处的场景，确定频谱管理目标，选择合适的智能方法，并为场景中的智能用频设备下发频管任务；智能用频设备可以根据接收到的频管任务及其在场景中的角色，自动调用智能算法，实现既定的频谱管理目标，同时向智能频管中心上报信息。智能用频设备在完成频管任务的过程

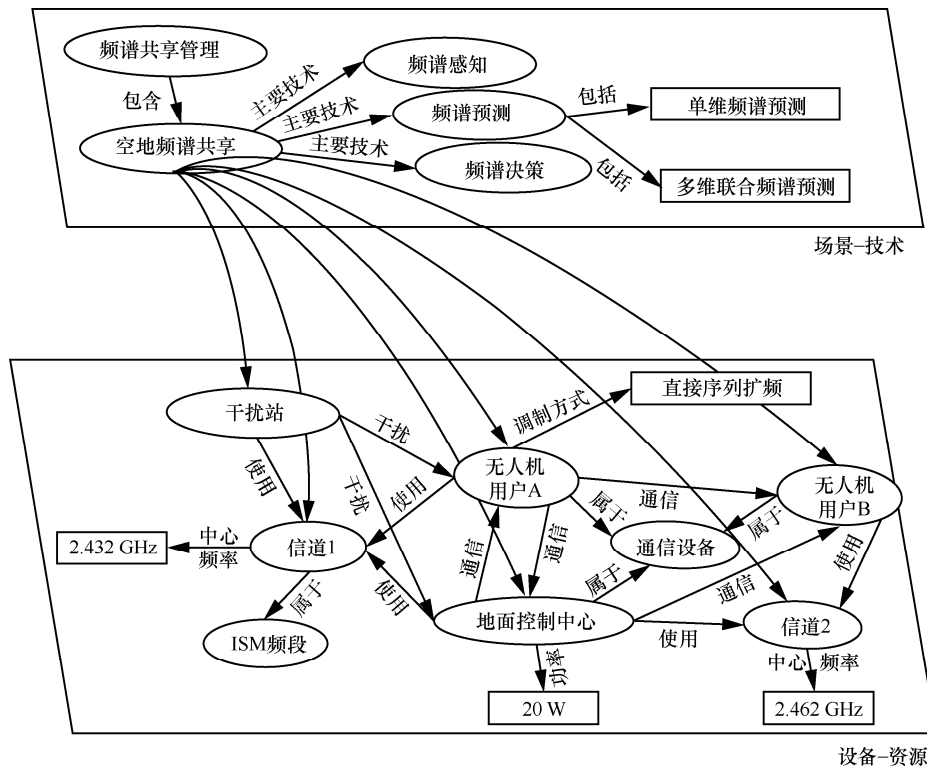


图 2 空地频谱共享知识图谱示意

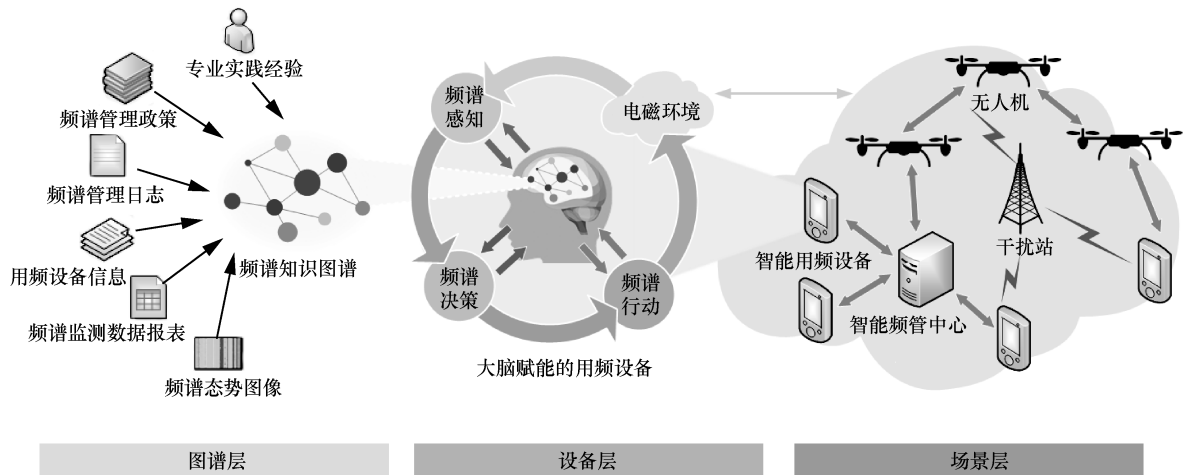


图 3 基于频谱知识图谱的智能频谱管理框架

中将通过频谱感知、频谱决策、频谱行动等对频谱知识图谱进行查询、检索、推理、更新；智能频管中心也将根据多样化的场景和任务，对频谱知识图谱进行扩充和完善。下面将具体阐释智能频谱管理框架各个层面的具体内容。

图谱层是智能频谱管理框架的驱动内核，即多域关联的频谱知识图谱。构建频谱知识图谱的原始数据来源如第 3 节所述，其中频谱管理政策、专家经验以及部分历史频谱管理日志、历史频谱监测数据等用于频谱知识图谱的初始构建，而用频设备后续通过频谱感知、决策、行动得到的监测数据、图像信息和管理日志将作为新的输入数据用于更新频谱知识图谱。频谱知识图谱使异构频谱数据与模型/专家经验得以有效融合，汇聚成用频设备的知识库。

设备层是智能频谱管理框架的执行单元，主要是指配置频谱知识图谱的智能用频设备。除传统认知无线电技术中用频设备的认知能力和可重构性，智能频谱管理框架中的用频设备还需具备理解、记忆、思考的能力，频谱知识图谱则在其中充当用频设备大脑的角色。借助设备-资源层面的频谱知识图谱，用频设备能够对多源异构频谱数据中包含的信息进行提取、加工和存储，把握频谱态势演化的规律和方向，处理自身与其他设备间的关系，成为大脑赋能的智能体。智能用频设备主要完成三项任务：知识图谱赋能的频谱感知、知识图谱赋能的频谱决策和知识图谱赋能的频谱行动，其中知识图谱赋能体现在频谱感知、频谱决策、频谱行动中的频谱知识图谱应用。

1) 知识图谱赋能的频谱感知。感知得到的数据

信息经过提取、加工形成新的频谱知识，将被存储在频谱知识图谱中，而频谱知识图谱中已有的知识可以作为先验信息，辅助用频设备进行基于注意力机制的知识抽取。

2) 知识图谱赋能的频谱决策。用频设备可以查询频谱知识图谱以获得实体间的关系事实，频谱知识图谱也可以用于实体间关系或事实的推理以辅助决策。

3) 知识图谱赋能的频谱行动。频谱共享或移动的事实将进一步更新频谱知识图谱，基于频谱知识图谱的推理也可以对频谱行动的效果进行评估。

场景层是智能频谱管理框架的应用呈现。面向频谱秩序管理、频谱对抗管理、频谱共享管理等多样化应用场景，智能频管中心首先在频谱知识图谱中蕴含的场景知识引导下确定频谱管理的目标，如图 3 中的场景层所示，无人机网络及智能用频设备的通信受到干扰站干扰，频谱管理的目标是要实现频谱安全共享。智能频管中心将根据频谱知识图谱中的“场景-技术”知识，选择合适的技术方法，并向智能用频设备下发频管任务。智能用频设备通过分布协作的方式完成频管任务，并向智能频管中心上报信息。

5 频谱知识图谱的应用

知识图谱的典型应用包括智能问答、智能搜索、智能推荐等。作为一种领域知识图谱，频谱知识图谱的应用将以这些典型应用为基础，在频谱管理领域进行实践和创新。本节将重点讨论基于频谱知识图谱的智能用频推荐案例，并进一步展望基于频谱知识图谱的智能频谱管理交互应用。

5.1 基于频谱知识图谱的智能用频推荐案例

推荐系统的核心目标是通过分析用户行为、兴趣、需求等信息，在海量数据中挖掘用户感兴趣的信息^[40]。推荐方法依赖的数据基础通常是用户与物品之间的大量交互数据。将知识图谱技术应用到推荐系统可以解决传统推荐方法难以胜任的用户-物品行为关系数据稀疏问题、对新用户或新物品进行推荐的冷启动问题等，提升推荐的解释性^[40]。本节展示了频谱知识图谱在用频推荐中的具体应用。

频谱管理中的用频推荐是将用频设备看作用户，将频谱资源看作物品，通过挖掘频谱资源的演化特性，分析用频设备的用频需求、行为模式，从而为用频设备推荐可用、好用的频谱资源。用频推荐有助于突破感知能力限制、降低感知时间开销，弥补频谱可用性模型在复杂度、精准性、可解释性等方面的不足，为频谱决策提供主动型、预测型、增强型信息支撑，协助频管人员优化频谱管理政策，提高频谱管理效率。

在通信中，用户与物品间的交互数据可以表现为用频设备对频谱资源传输质量的评价。例如，在短波通信系统中，由于反射短波信号的电离层是一种典型的时变传输媒介，电离层对不同频率电波的反射和吸收能力不同，其特性还受日夜交替、季节更替、太阳黑子周期和地理位置等多因素影响变化，且信道受干扰严重，因此通信极不稳定。短波用频设备通常先对预置频率集进行链路质量分析，再根据链路质量评价结果，自适应地选择通信频率^[41]。由此，容易联想到利用链路质量评价等交互数据进行短波用频推荐。

然而，一方面，短波用频设备通过探测信道获得链路质量时，可能受到干扰或噪声的影响而导致探测失败；另一方面，用频设备的探测能力有限，在实际系统中，用频设备主要在其常用频率附近进行探测。因此，链路质量矩阵是不完整的，上述短波用频推荐也面临交互数据稀疏的问题。本节将利用频谱知识图谱对链路质量矩阵进行补全，服务于短波用频推荐。

对于频谱管理专业人员而言，链路质量受哪些主要因素影响，总体上呈现何种时变趋势，这些实践经验都属于频谱知识，可以通过频谱知识图谱表征，发挥频谱知识在智能频谱管理中的引导作用，实现数据与经验知识混合驱动的用频推荐。具体地，本节在第 3 节的基础上进一步细化频谱知识图

谱中资源类实体，将链路质量建模为实体。首先，考虑知识 1，链路质量主要受频率、时间、传输距离等因素影响，则将链路质量的数值、所对应的时刻、频率、链路起点和链路终点等建模为实体的属性。如图 4 所示，对于链路质量矩阵中任一已知元素，上述图谱建模方式已形成 $(q_{i,j}, \text{ValueIs}, 23)$ 、 $(q_{i,j}, \text{TimeIs}, 06/01_08)$ 、 $(q_{i,j}, \text{FrequencyIs}, f_2)$ 、 $(q_{i,j}, \text{TrLocationIs}, \text{A地})$ 等多个三元组；对于链路质量矩阵中的缺失元素，由于元素在矩阵中的位置是明确的，即时刻、频率、链路起点和链路终点等信息已知，此时仅形成 $(q_{m,n}, \text{TimeIs}, 06/01_03)$ 、 $(q_{m,n}, \text{FrequencyIs}, f_5)$ 、 $(q_{m,n}, \text{TrLocationIs}, \text{A地})$ 等部分三元组，链路质量矩阵补全问题即转化为对表示链路质量数值的三元组 $(q_{m,n}, \text{ValueIs}, ?)$ 的链接预测问题。在此基础上，可以进一步考虑“知识 2”，链路质量受日夜更替影响较大，对于同一条链路，不同天的相同时刻的链路质量应具有相似性，则可以增加 $(06/01_07, \text{TimeSimilar}, 06/11_07)$ 等三元组作为已知信息。

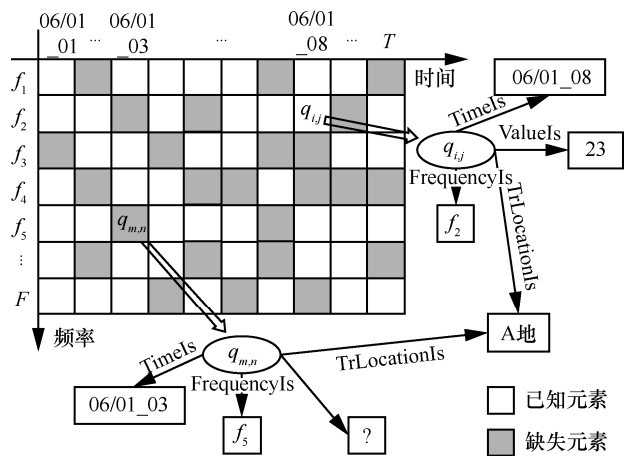


图 4 链路质量矩阵与频谱知识图谱

由于上述频谱知识图谱存在大量多对一关系 (N -to-1)，考虑采用 TransR 模型^[42]对频谱知识图谱进行表示学习，学习图谱中所有实体、关系以及相应映射矩阵的向量表示。然后，针对链接预测问题 $(q_{m,n}, \text{ValueIs}, ?)$ ，对每一个待预测三元组中缺失的尾实体，将知识图谱中对应类别下的所有实体作为候选项计算得分函数，可以得到这些候选尾实体的得分排名，以得分排名最高的实体作为预测结果，即链路质量矩阵中缺失元素的值。

实验数据来自短波中长期预报软件 VOACAP

的仿真数据。数据集 1 模拟由南京至厦门的短波通信链路的接收信噪比（假设链路质量指标以接收信噪比为主），记录时间为 2020 年 6 月至 8 月的每旬第一天（共 9 天）的全时段的链路质量，每小时记录一次链路质量，链路频率设置为短波频段内均匀分布的 9 个频点，信噪比数值经预处理后进行 5 级均匀量化，因此完整的链路质量矩阵应为 9×216 的数值矩阵。数据集 2 模拟由南京至海口的短波通信链路的接收信噪比，记录时间为 2015 年每月 15 日的全时段的链路质量，每小时记录一次链路质量，链路频率设置为 9 个频点，对信噪比数值进行 5 级量化，则数据集 2 的完整链路质量矩阵应为 9×288 的数值矩阵。对上述 2 个数据集设置链路质量矩阵中缺失元素的比例均为 80%。本文采用清华大学 OpenKE toolkits 工具包^[43]中的 TransR 模型，对所构建的频谱知识图谱进行向量表示学习，其中实体向量、关系向量和映射矩阵的维度分别设置为 100、100 和 100×100 ，随机梯度下降算法的学习率设置为 0.02、边际参数设置为 4，每一批次训练数据的规模设置为 5 000，训练次数设置为 5 000。实验结果如表 4 所示，预测结果的均方根误差 (RMSE, root mean square error) 随知识的增多而减少，说明频谱知识图谱能在用频推荐中起到知识引导的作用，增加知识能提升链路质量矩阵补全的性能。

表 4 链路质量矩阵补全的准确性

数据集	RMSE/dB	
	知识 1	知识 1+知识 2
数据集 1	-3.944 4	-4.059 9
数据集 2	0.460 4	0.447 9

5.2 基于频谱知识图谱的智能频谱管理交互应用

知识图谱为机器理解人类语言提供了新的思路。结合自然语言处理技术，频谱知识图谱可以支撑人机协作交互的众多下游应用，满足管理人员直接用人类自然语言进行与频谱管理相关的智能搜索、人机问答的需求，减少频谱管理人力成本和对频管专家的依赖。

1) 频谱管理智能搜索系统。频谱知识图谱以统一的知识表示形式存储了大量频谱知识，可以针对搜索关键词迅速返回丰富全面的表单式信息，提升了信息检索的效率。

2) 频谱管理智能问答系统。支持使用自然语言输入与频谱管理相关的事实型、是非型、原因型等

类型的问题进行提问，如“某设备使用的频段是什么”“某频段在明天 8 时是否可用”“某设备切换频率的原因是什么”等，系统经过自然语言理解、知识图谱查询和推理，直接返回问题答案。

6 结束语

针对频谱管理面临的严峻挑战，本文将知识图谱技术引入频谱管理中，提出了频谱知识图谱的概念、知识体系和表示，构建了基于频谱知识图谱的智能频谱管理框架，重点探讨了基于频谱知识图谱的智能用频推荐案例，并对基于频谱知识图谱的智能频谱管理交互应用进行了展望。下一步将搭建频谱知识图谱演示应用平台，继续深入探索频谱知识图谱应用，进一步评估验证频谱知识图谱对频谱管理自动化、智能化、精准化的提升效果。频谱管理与知识图谱技术的结合将是一个很有意义的研究领域，未来将产生众多富有成效的研究成果，为智能频谱管理领域带来颠覆性的技术变革。本文关于频谱知识图谱的研究和讨论只触及了其中的冰山一角，希望能够激发更多的研究兴趣。

参考文献:

- [1] 王先义, 陈丹俊, 刘斌, 等. 复杂电磁环境战场频谱管理[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(4): 338-344.
WANG X Y, CHEN D J, LIU B, et al. Battlefield spectrum management in complex electromagnetic environment[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008, 3(4): 338-344.
- [2] 王金龙, 吴启晖, 龚玉萍. 认知无线网络[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
WANG J L, WU Q H, GONG Y P. Cognitive wireless network[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [3] SONG M, XIN C S, ZHAO Y X, et al. Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(1): 23-29.
- [4] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [5] AKYILDIZ I F, LEE W Y, VURAN M C, et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 40-48.
- [6] 梁应敞, 谭俊杰, Dusit Niyato. 智能无线通信技术研究概况[J]. 通信学报, 2020, 41(7): 1-17.
LIANG Y C, TAN J J, NIYATO D. Overview on intelligent wireless communication technology[J]. Journal on Communications, 2020, 41(7): 1-17.

- [7] YU L, CHEN J, DING G R, et al. Spectrum prediction based on Taguchi method in deep learning with long short-term memory[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 45923-45933.
- [8] 孙佳琛, 王金龙, 陈瑾, 等. 群体智能协同通信: 愿景、模型和关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(3): 307-317.
SUN J C, WANG J L, CHEN J, et al. Cooperative communication based on swarm intelligence: vision, model, and key technology[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(3): 307-317.
- [9] CHEN T, ZHANG H G, KATZ M D, et al. Swarm intelligence based dynamic control channel assignment in CogMesh[C]//*ICC Workshops - 2008 IEEE International Conference on Communications Workshops*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 123-128.
- [10] 杨健, 陈曦, 丁国如, 等. 基于区块链的频谱设备网络中防御拜占庭攻击的分布式共识机制[J]. *通信学报*, 2020, 41(3): 1-16.
YANG J, CHEN X, DING G R, et al. Blockchain-driven distributed consensus mechanism in defending Byzantine attack for the Internet of spectrum device[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(3): 1-16.
- [11] 王昊奋, 漆桂林, 陈华钧. 知识图谱: 方法、实践与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
WANG H F, QI G L, CHEN H J. Knowledge graph: methods, practices and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [12] KEJRIWAL M. Domain-specific knowledge graph construction[M]. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [13] 肖仰华. 知识图谱: 概念与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
XIAO Y H. Knowledge graph: concept and technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [14] 张煜东, 吴乐南, 王水花. 专家系统发展综述[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(19): 43-47.
ZHANG Y D, WU L N, WANG S H. Survey on development of expert system[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(19): 43-47.
- [15] COLLINS A M, QUILLIAN M R. Retrieval time from semantic memory[J]. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 1969, 8(2): 240-247.
- [16] BERNERS-LEE T. Semantic Web roadmap[R]. (1998-10-14) [2020-08-19].
- [17] WANG Q, MAO Z D, WANG B, et al. Knowledge graph embedding: a survey of approaches and applications[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2017, 29(12): 2724-2743.
- [18] SOWA J F. Building large knowledge-based systems: representation and inference in the Cyc project[J]. *Artificial Intelligence*, 1993, 61(1): 95-104.
- [19] MILLER G A. WordNet: a lexical database for English[J]. *Communications of the ACM*, 1995, 38(11): 39-41.
- [20] LIU H, SINGH P. ConceptNet—a practical commonsense reasoning tool-kit[J]. *BT Technology Journal*, 2004, 22(4): 211-226.
- [21] XU B, XU Y, LIANG J, et al. CN-DBpedia: a never-ending chinese knowledge extraction system[C]// *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*, Springer, 2017: 428-438.
- [22] 侯梦薇, 卫荣, 陆亮, 等. 知识图谱研究综述及其在医疗领域的应用[J]. *计算机研究与发展*, 2018, 55(12): 2587-2599.
HOU M W, WEI R, LU L, et al. Research review of knowledge graph and its application in medical domain[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2018, 55(12): 2587-2599.
- [23] MIAO R, ZHANG X, YAN H F, et al. A dynamic financial knowledge graph based on reinforcement learning and transfer learning[C]//2019 *IEEE International Conference on Big Data*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 5370-5378.
- [24] 丁铭, 唐杰. 从知识图谱到认知图谱: 历史、发展与展望[J]. *中国计算机学会通讯*, 2020, 16(8): 11-18.
DING M, TANG J. From knowledge graph to cognitive graph: history, development and vision[J]. *Communications of the CCF*, 2020, 16(8): 11-18.
- [25] DING M, ZHOU C, CHEN Q B, et al. Cognitive graph for multi-hop reading comprehension at scale[C]//*Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2019: 2694-2703.
- [26] 张育瑜, 赵磊, 郭文彬, 等. 基于知识图谱的无线电监测及盲信号识别[J]. *无线电工程*, 2020, 50(3): 187-192.
ZHANG Y Y, ZHAO L, GUO W B, et al. Radio monitoring and blind signal recognition based on knowledge graph[J]. *Radio Engineering*, 2020, 50(3): 187-192.
- [27] 胡航宇, 翟学萌, 胡光岷. 基于流知识图谱的通信网络流连接行为分析[J]. *计算机工程*, 2019, 45(11): 234-242.
HU H Y, ZHAI X M, HU G M. Analysis of communication network flow connection behavior based on flow knowledge graph[J]. *Computer Engineering*, 2019, 45(11): 234-242.
- [28] AUMAYR E, WANG M X, BOSNEAG A M. Probabilistic knowledge-graph based workflow recommender for network management automation[C]//2019 *IEEE 20th International Symposium on*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [29] 赵军, 刘康, 何世柱. 知识图谱[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
ZHAO J, LIU K, HE S Z, et al. Knowledge graph[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [30] LAMPLE G, BALLESTEROS M, SUBRAMANIAN S, et al. Neural architectures for named entity recognition[C]//*Proceedings of the 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2016: arXiv Preprint, arXiv:1603.01360, 2016.
- [31] DERNONCOURT F, LEE J Y, SZOLOVITS P. NeuroNER: an easy-to-use program for named-entity recognition based on neural networks[C]//*Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2017: arXiv Preprint, arXiv:1705.05487, 2017.
- [32] HUANG H, HECK L, JI H. Leveraging deep neural networks and knowledge graphs for entity disambiguation[J]. arXiv Preprint, arXiv:1504.07678, 2015.
- [33] FRANCIS-LANDAU M, DURRETT G, KLEIN D. Capturing semantic similarity for entity linking with convolutional neural networks[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1604.00734, 2016.
- [34] ZENG D J, LIU K, CHEN Y B, et al. Distant supervision for relation

extraction via piecewise convolutional neural networks[C]// Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2015: 1753-1762.

- [35] LIN Y K, SHEN S Q, LIU Z Y, et al. Neural relation extraction with selective attention over instances[C]//Proceedings of the 54th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2016: 2124-2133.
- [36] CHEN Y B, XU L H, LIU K, et al. Event extraction via dynamic multi-pooling convolutional neural networks[C]//Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2015: 167-176.
- [37] 李涛, 郭渊博, 琚安康. 融合对抗主动学习的网络安全知识三元组抽取[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 80-91.
LI T, GUO Y B, JU A K. Knowledge triple extraction in cybersecurity with adversarial active learning[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 80-91.
- [38] ZHANG J Z, CHEN Y, LIU Y X, et al. Spectrum knowledge and real-time observing enabled smart spectrum management[J]. IEEE Access, 2020, 8: 44153-44162.
- [39] 赵泽亚. 基于开放知识网络的关系推断技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2015.
ZHAO Z Y. Research on relation inference in the open knowledge network[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2015.
- [40] 秦川, 祝恒书, 庄福振, 等. 基于知识图谱的推荐系统研究综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(7): 937-956.
QIN C, ZHU H S, ZHUANG F Z, et al. A survey on knowledge graph-based recommender systems[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(7): 937-956.
- [41] 任国春. 短波通信原理与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
REN G C. Principle and technology of high frequency communication[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [42] LIN Y K, LIU Z Y, SUN M S, et al. Learning entity and relation embeddings for knowledge graph completion[C]//Proceedings of AAAI. Palo Alto: AAAI Press, 2015: 2181-2187.
- [43] HAN X, CAO S L, LV X, et al. OpenKE: an open toolkit for knowledge embedding[C]//Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2018: 1-6.

[作者简介]



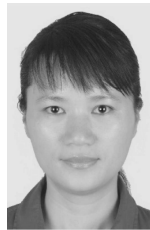
孙佳琛 (1994-), 女, 江苏南通人, 陆军工程大学博士生, 主要研究方向为频谱数据分析、无线通信、认知无线网络。



王金龙 (1963-), 男, 河北沧州人, 博士, 中国科学院院士, 陆军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为短波通信、数字通信、数字信号处理、移动通信、软件无线电与认知无线电等。



丁国如 (1986-), 男, 河南新乡人, 博士, 陆军工程大学教授, 主要研究方向为认知无线网络、大规模 MIMO、机器学习、大数据分析等。



陈瑾 (1971-), 女, 福建仙游人, 博士, 陆军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知无线网络、分布式优化、数字信号处理等。



龚玉萍 (1978-), 女, 安徽庐江人, 陆军工程大学教授, 主要研究方向为短波通信、认知无线电等。