

低空具身智能频谱管控技术研究

金立民, 王海超, 谷江春, 徐以涛, 丁国如

(陆军工程大学通信工程学院, 南京 210007)

摘要: 低空智能网络是支撑低空经济发展的基础设施, 而频谱管控是应对低空智能网络中非法用频和恶意攻击问题, 提高频谱资源利用率的关键技术之一。具身智能作为新一代人工智能的重要研究方向, 其物理实体、环境交互和智能成长等特性为低空智能网络频谱管控的发展提供了新的可能性。首先, 从技术框架、研究现状和主要挑战等方面介绍了低空智能网络频谱管控需求。其次, 在概述具身智能的内涵和优势基础上, 分析了低空具身智能频谱管控的概念和意义。进一步, 基于“感知-决策-行动-反馈”的闭环结构, 提出了包含低空具身智能频谱感知、推理与决策、行动与反馈的低空智能网络频谱管控技术, 为实现高效安全的低空智能网络频谱管控提供了可能技术路径。

关键词: 低空经济; 低空智能网络; 频谱资源; 频谱管控; 具身智能

中图分类号: TM15; TP18 **文献标志码:** A

Research on Low-Altitude Embodied Artificial Intelligence-Enabled Spectrum Management and Control Technology

JIN Limin, WANG Haichao, GU Jiangchun, XU Yitao, DING Guoru

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

Abstract: The low-altitude intelligent network (LAIN) serves as a fundamental infrastructure for the development of the low-altitude economy, and spectrum management and control (SMC) is one of the key technologies to address the problems of illegal spectrum use and malicious attacks in LAIN, as well as to improve the utilization rate of spectrum resources. Embodied artificial intelligence (EAI), as a key research direction in the new generation of artificial intelligence, offers new possibilities for the development of SMC for LAIN due to its characteristics of physical embodiment, environmental interaction, and intelligent growth. Firstly, this paper introduces the requirements of SMC for LAIN from the aspects of technical framework, research status, and main challenges. Secondly, by sorting out the connotation and advantages of EAI, the concept and significance of EAI-enabled SMC for LAIN are analyzed. Furthermore, based on the closed-loop structure of “perception-decision-action-feedback”, a technology of SMC for LAIN is proposed, which includes low-altitude embodied spectrum sensing, inferring and decision-making, and action and feedback. This provides a possible technical pathway for achieving efficient and secure SMC for LAIN.

Key words: low-altitude economy; low-altitude intelligent network (LAIN); spectrum resource; spectrum management and control (SMC); embodied artificial intelligence (EAI)

基金项目: 江苏省重点研发计划(产业前瞻与关键技术)(BE2023022, BE2023022-4); 国家自然科学基金(62231027, 62271501, 62301604); 江苏省优秀青年基金(BK20240200)。

收稿日期: 2024-12-31; **修订日期:** 2025-01-20

引言

低空经济是指以低空空域为依托,开展各种有人和无人驾驶的低空飞行活动,以满足多样化社会需要的多领域融合发展的新型经济形态^[1]。低空经济于2024年首次被写入政府工作报告,并作为“新增长引擎”进入新质生产力行列^[2],预计到2030年将形成万亿级的市场规模^[3]。2024年12月,国家发改委低空经济发展司正式挂牌成立^[4],并组织召开推动低空智能网联系统建设专题座谈会^[5],旨在进一步推动我国低空经济发展。低空智能网(Low-altitude intelligent network, LAIN)作为保障低空经济发展的重要基础设施,通过融合数字化、网联化和智能化等技术构建而成,为多样化的低空应用场景提供实时可靠的通信、导航及监管等服务^[6]。

低空智能网中无人机等飞行器的数量以及其带来的信息量呈现出爆炸式的增长^[7],无线数据传输业务的需求也迅猛增长^[8],频谱资源矛盾愈发严峻,频谱使用安全问题频发。2024年12月在福建泉州的烟花秀中,大量无人机疑似受到干扰导致坠海^[9]。因此,为保障低空飞行安全和提高低空空域整体运行效率,如何安全高效地进行频谱管控(Spectrum management and control, SMC)成为了影响低空智能网发展的关键问题之一。

具身智能(Embodied artificial intelligence, EAI)作为新一代人工智能理论与应用突破的一个重要窗口^[10],其具有的实体运动交互、多模态融合感知、自主决策执行以及智能增长进化等能力特性,为解决低空智能网频谱管控问题提供了新的可能。具身智能赋能的低空智能网频谱管控技术能够实现更加实时精准的频谱态势感知、更加快速可靠的频谱管控决策和更加智能自主的频谱管控行动,并且能够实现持续的用频反馈优化,促进低空智能网频谱资源的安全高效利用。

本文介绍了低空智能网频谱管控的技术框架、研究现状和面临的挑战,分析了具身智能的内涵与特性优势,提出了低空具身智能频谱管控的概念和意义,并探讨了低空具身智能频谱管控关键技术。

1 低空智能网电磁频谱管控

1.1 低空智能网频谱管控技术框架

低空智能网电磁频谱管控是在以低空空域为主的背景下,综合运用行政、技术和工程等手段对低空智能网内电磁频谱资源的使用进行智能化管理和控制,从而达到优化频谱资源分配、减少频率冲突干扰、实时监测非法用频行为以及快速处理恶意用频攻击,确保低空智能网通信稳定、可靠和安全的目的,如图1所示。

低空智能网频谱管控主要由以下步骤组成^[11-12]:首先,由低空频谱感知网从地面和低空两个层次感知空间内的用频信号,采集空地频谱数据;其次,将采集到的频谱感知数据通过物理传输链路上传至低空频谱管控中心的低空频谱云,并在云端进行数据的融合、存储、处理和分析,实现对低空频谱态势的认知,进而对低空用频行为进行推理和预测;最后,低空频谱管控中心基于低空频谱云的结果,做出适用于低空复杂多变飞行场景的空地频谱使用决策,智能化分配频谱和带宽,满足低空智能网频谱的高效使用和安全管控等需求。

1.2 低空智能网频谱管控研究现状

随着低空智能网的快速发展,低空频谱资源的管控问题受到了广泛的关注。相较于地面频谱管控,低空频谱具有明显的三维立体性和复杂多变性,管控难度大,因此受到广泛研究。沈锋等^[13-14]提出在频谱异构网络中基于无人机的三维时空频谱感知框架和改进算法,并进一步提出了能更加精准地感知获取频谱态势信息的电磁频谱多维态势压缩测绘技术。Shang等^[15]设计了三维无人机空间频谱共享模型,利用随机几何和强化学习等方法,在保证地面D2D通信网络最小频谱效率的约束下,最大化无人

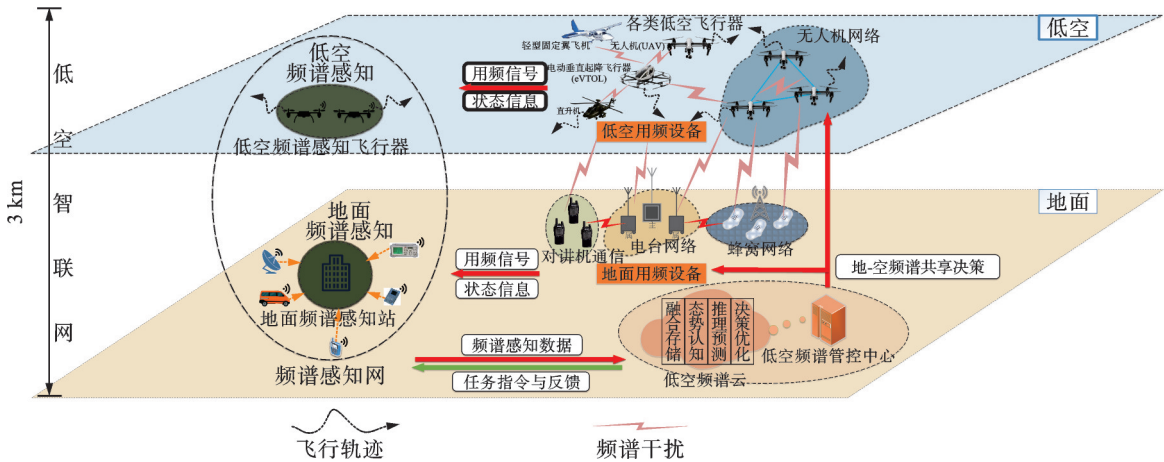


图1 低空物联网电磁频谱管控示意图

Fig.1 Schematic diagram of SMC for LAIN

机网络的区域频谱效率。Zhu等^[16]提出了一种基于无人机的三维频谱实时映射系统,通过数据驱动和模型驱动的方法对数据进行预测、补全和融合,最终构建出可视化的三维频谱地图。Wei等^[17]设计了一种基于无人机路径规划的三维频谱占用测量算法,有力支撑了频谱测量和共享。李泓余等^[18]利用无人机采样获取目标区域内的信号功率数据得到缺损二维、三维频谱态势后,进一步提出一种模型和数据混合驱动的电磁频谱态势测绘方法,从而有效地测绘出完整的频谱态势。

低空无人机网络拓扑结构具有动态多变性,这对低空物联网频谱管控的高效性和准确性提出了更高的要求。吴启晖等^[19]深度讨论了低空物联网组网与控制理论方法,剖析了空地频谱共享以及感传算一体化组网覆盖等关键技术,为低空物联网的未来发展指明了方向。区别于传统的集中式协作频谱感知方式,Wang等^[20]提出基于区块链的分簇式无人机协作频谱感知算法,使频谱感知性能得到了进一步提升。文献[21]将无人机移动引起的动态拓扑结构建模为动态图,把无人机的动态信道选择问题转化为动态图着色问题,利用图形着色策略优化频谱分配。田畅等^[7]针对无人机集群的网络拓扑时变、移动路线复杂化等特征,从频谱等角度梳理了现有的无人机通信资源优化策略和优化方法。Wang等^[12]针对空地一体化网络中状态的不确定性和安全威胁,提出了一个能有效提高频谱利用率的频谱共享框架。

低空物联网中,电磁干扰呈现交叠的状态,干扰条件下的频谱决策也是频谱管控技术的一个重要方向。孙启禄等^[22]提出了干扰协同联合功率控制的网络吞吐量优化方法,实现在多普勒频移和外部干扰影响下网络吞吐量的最大化,并均衡整体的能量效率和频谱效率。邱文静等^[23]研究了干扰威胁下的无人机群频谱决策问题,提出了基于联盟形成博弈的分布式协同用频方法。刘亮君^[24]提出了基于平均场博弈的抗干扰频谱分配模型,能更好体现大规模环境下的资源博弈情况,分析了干扰环境下频谱的最佳分配策略。针对无人机频谱资源稀缺和容易受干扰的情况,文献[25]提出了一种频谱共享和无人机轨迹优化的智能学习框架,显著提高了干扰条件下的频谱共享效率,并具有良好的收敛性。

此外,以强化学习方法为代表的人工智能技术也在低空频谱管控中得到了广泛应用。王伟^[26]将深度学习和强化学习等人工智能的方法融入频谱感知中,有效降低了无人机网络的融合时延,提高了频谱感知的准确率。丁文娇^[27]利用多智能体强化学习对动态频谱聚合与接入技术进行研究,并应用于无人机辅助救援认知网络。卢毛毛等^[28]使用强化学习方法达成无人机在动态航迹下自适应选择最佳频谱资源分配策略的能力。沈高青等^[29]针对低空物联网协同认知干扰决策过程中的干扰资源分配问题,

提出了一种基于数字孪生和深度强化学习的认知干扰决策方法,能够有效提升复杂动态环境下的干扰效能。

1.3 低空互联网频谱管控主要挑战

低空互联网频谱管控相对于地面频谱管控,主要面临以下挑战:

(1)三维立体的复杂频谱环境。低空互联网运行于三维立体空间中,与地面网络相比,其空间结构更加立体化,频谱辐射呈现由低空空域向多方向立体扩展的特征。用频设备爆炸性的增长导致大量多维电磁信号在低空环境中交叠,低空频谱环境由此变得异常复杂,这给频谱的准确感知、预测及共享带来了巨大挑战。

(2)动态多变的飞行用频需求。低空飞行器数量的迅猛增长加剧了用频需求与有限频谱资源之间的矛盾。低空飞行器的飞行区域、高度、速度以及目标任务都处在动态变化中,这导致用频行为和组网拓扑具有多变性特征,因此对频谱资源的快速分配和共享提出了更高的要求。此外,在大规模异构环境中,低空飞行器集群用频规划和协同认知需求方面,也存在频谱利用率低及协同困难等问题。

(3)形势严峻的低空用频安全。低空电磁频谱空间的开放性特征和低空用频设备数量的暴增将不可避免地导致未经登记和审批的非法用频现象频发,破坏正常的低空用频秩序;在低空复杂电磁环境中,干扰可能是多维度多方向多设备共同造成的,排除干扰的难度急剧增大;低空非法用频和自扰互扰等问题很可能引发低空飞行器坠落、低空航管混乱和飞行系统瘫痪,威胁人民生命和财产安全,因此低空用频面临严峻的安全形势。

(4)参差不齐的低空基础设施。以无线通信基站和频谱态势感知站为主的基础设施是进行低空互联网频谱管控的重要依托。当前,低空空域沿航线的基础设施建设参差不齐,且相较于高空飞行器受譬如高山、荒漠和水面等自然地理条件约束较大,可能会出现频谱态势感知粗糙及飞行器失联失控等问题,无法达到理想的频谱管控效果。

2 具身智能赋能的低空互联网频谱管控

人工智能技术蓬勃发展,强化学习、知识图谱、群体智能及区块链等新兴技术在频谱数据分析和频谱智能决策等方面都取得了理想的效果。而具身智能作为人工智能发展的最前沿方向之一,其具有物理实体、环境交互和智能成长等特性,为解决低空互联网频谱管控面临的挑战带来了新的解决方案。

2.1 具身智能的内涵和特性优势

具身智能是指智能体通过物理实体与环境进行感知和交互来自主学习、自主决策和自主执行任务,并能够从经验反馈中实现智能增长和行动自适应^[10,30-31]。具身智能强调智能体不仅仅是进行符号处理和抽象思考,还要通过其身体的结构、感知和运动能力与环境进行交互和学习,从而获得知识和实现智能的增长。

中国信息通信研究院等联合发布的《具身智能发展报告(2024年)》指出,具身智能同时需要具备“本体、环境、智能”三要素^[32]。具身智能,字面意思是“具身”+“智能”,因此区别于其他智能最首要的就是拥有物理实体,即“三要素”中的“本体”。具身智能的物理实体具有两个突出特点:一是物理实体可以被设计成各种形态去完成特定应用场景中的任务^[33],简单形态如机械臂、轮式、履带式、无人机型机器人,复杂形态如人形机器人和仿生学机器人等;二是物理实体需具有环境感知、通信与运动、操作与执行等能力,以便于具身智能实体在环境中交互和完成目标任务^[34]。其次是环境,具身智能需要在与环境的交互中学习、适应和进化,形成类似人类一样的逻辑思维能力^[35],进而通过交互影响环境。最后是智能,具身智能的核心就是具有成长进化能力的智能,不仅体现在通过强化学习^[36]和大模型^[37-38]

等算法实现智能,还包括通过本体与环境进行交互得到知识、经验和技能从而实现智能的增长,并反过来在交互中通过智能影响环境。

具身智能的优势主要体现在以下3个方面。(1)多模态融合的泛化感知和精准认知能力。具身智能拥有更为丰富的多模态融合的传感器系统,通过视觉、听觉、嗅觉、触觉及定位等传感设备能够更加准确实时地感知环境和自身状态,利用大模型实现多模态感知泛化,并结合核心智能系统进行精准认知与分析,为后续针对目标任务做出更可靠的决策和行动提供有力支撑。(2)拟人化思维的智能决策和自主行动能力。具身智能通过大模型算法模拟人类的逻辑思维和推理能力,在复杂多变环境下依然能够对目标任务进行智能化精准决策,进而自主行动去完成目标任务。(3)高度自适应的主动学习和智能进化能力。具身智能通过主动与环境进行交互和学习,能够自动实现经验积累、知识迁移和泛化应用,形成闭环优化,以便于更加快速灵活地适应各种不同的复杂场景和任务,具有高度的自适应能力和智能进化能力。

2.2 低空具身智能频谱管控的概念和意义

低空具身智能频谱管控指在低空空域的特定场景下,运用具身智能技术实施精准频谱环境感知、多维频谱态势生成、动态频谱推理预测、可靠频谱管控决策、自主频谱方案执行以及持续频谱反馈优化等一系列频谱管控行为,实现低空智联网频谱资源的高效利用和安全共享。具身智能与低空智联网具有如下内生的相互增效作用:

(1)在技术架构上,具身智能与低空智联网频谱管控高度耦合。具身智能与低空智联网频谱管控都具有类似“感知-决策-行动-反馈”的闭环技术结构,如图2所示。二者在技术框架上的高度耦合性,意味着具身智能可以赋能到频谱管控的全过程和各方面,真正实现技术融合和方法创新,优化频谱管控的工作流程,助力解决低空频谱管控的复杂问题,提升频谱管控系统的整体性能和效率。

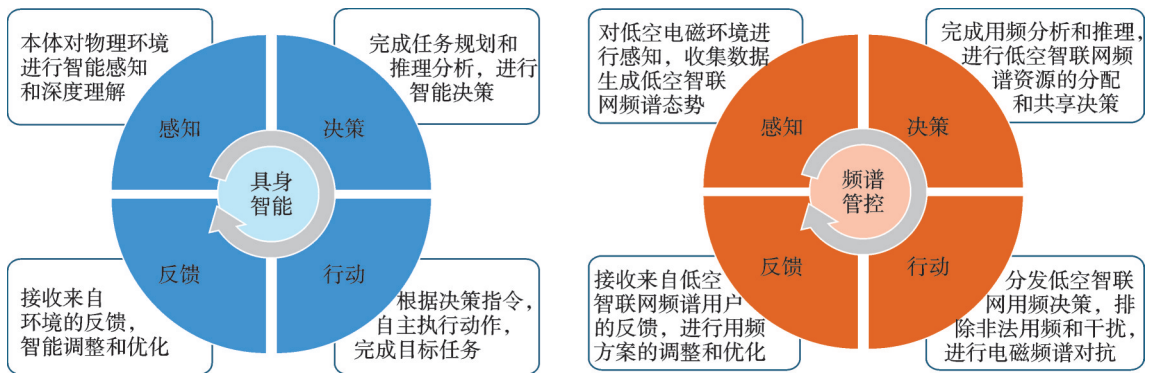


图2 具身智能与低空智联网频谱管控技术对比

Fig.2 Comparison of EAI and LAIN SMC technology

(2)在场景应用上,具身智能为低空智联网频谱管控高效赋能。具身智能拥有的多模态融合感知能力,能够在低空立体复杂的电磁环境中对频谱态势进行精准感知;具身智能拥有的自适应和泛化能力,可以助力解决低空飞行器在不同时间、不同空间可能拥有不同用频需求的矛盾问题;具身智能的智能自主能力能够在无人参与的条件下进行快速用频决策和动态频谱共享;具身智能可以实现智能增长,在通过与低空频谱环境的不断交互中得到反馈经验,进而不断调整和优化频谱分配策略,得到最佳的频谱分配方案;具身智能的物理实体具有运动能力,可以根据需要在运动中进行感知,实现更快更精准地查找非法用频设备和干扰源,保障低空智联网频谱环境的安全稳定。

(3)在实现方式上,具身智能令低空智联网频谱管控创新变革。①管控方式变革。由依靠静态规划、预先分配的方式向依靠具身智能实现动态频谱共享的方式变革,以适应动态多变的低空用频需求。②管控主体变革。由依靠人工或半人工的方式进行低空频谱决策和行动向依靠具身智能的自主智能决策和行动变革,真正实现无人化条件下低空智联网频谱资源的精准可控。③管控时效变革。能够进行分布式协同工作的具身智能频谱管控方法大大缩短了频谱管控的响应时间,不需要再耗费大量时间逐步去走完一个频谱管控的工作流程。④管控设施变革。从“地面固定位置的频谱管控站+有人驾驶的车载监测站”的管控设施向“低空智联网频谱管控云+无人分布式具身智能频谱感知站”的管控设施转变,在提升管控能力的同时避免高昂开销,实现频谱管控设施形态的颠覆性变革。

具身智能中物理实体需具有环境感知、通信与运动、操作与执行等能力,以便于具身智能实体在环境中交互和完成目标任务。因此,低空智联网频谱管控也为实现具身智能提供了通信支撑。

3 低空具身智能频谱管控关键技术

基于“感知-决策-行动-反馈”的闭环结构,本文重点探析低空具身智能频谱感知、推理与决策、行动与反馈等关键技术。

3.1 低空具身智能频谱感知——精准频谱环境感知与多维频谱态势生成

低空具身智能频谱感知需要对以低空空域为主的频谱环境进行实时精准的感知,为实现频谱决策的可靠性、频谱行动的有效性以及反馈调整优化提供有力支撑,如图3所示。

针对低空频谱环境具有三维立体、复杂交叠的特点,具身智能物理实体以空中无人机形态为主,以地面无人车、机器狗和水面无人艇等多种形态为辅,采用多具身分布式立体协同感知的方式,凭借物理实体的运动能力和地形自适应能力,结合智能算法自主运动至最佳的感知位置,使用多模态融合传感设备进行感知,特别是对低空目标区域的频谱相关数据进行实时采集。随后,将多模态频谱感知数据上传至多层级的具身智能云端实现高效融合和处理,进而对频谱环境从时域、频域、空域以及能量域等多角度进行建模,形成实时精准的低空空域多维频谱态势,为后续频谱预测决策提供基础信息。

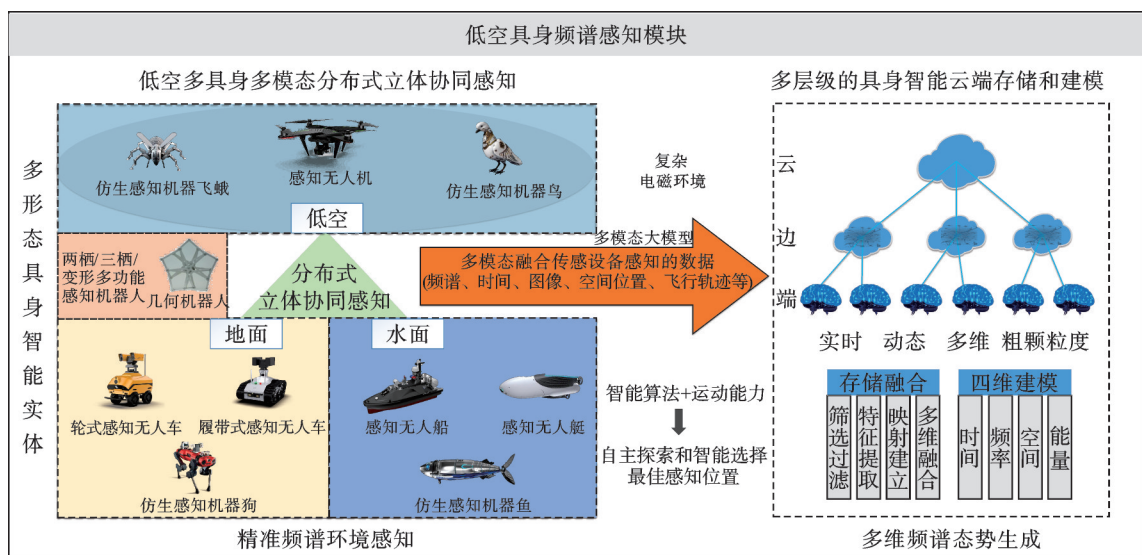


图3 低空具身频谱感知示意图

Fig.3 Schematic diagram of low-altitude EAI spectrum sensing

低空具身智能频谱感知主要有以下突出优势:(1)具身智能的物理实体具有多模态融合的传感设备,可使用多模态模型处理多维传感数据,对低空频谱环境进行全方位感知,准确采集频谱相关数据以及低空飞行器的图像、位置和轨迹等相关数据;(2)具身智能的物理实体具有运动能力,并且具有多形态的具身实体以适应不同的地理环境,再结合智能算法可以灵活调整至最佳频谱感知位置;(3)具身智能可以实施多具身分布式协同感知的方法,提高感知效率并减小感知误差,最大化实现感知的精准高效;(4)具身智能可以根据任务需求将感知数据逐层上传至具身智能本体(端),部署在各通信基站的具身智能边缘服务器(边)或部署在数据中心的具身智能频谱云(云)进行处理,节约带宽资源并减少处理时延,同时注重使用大模型和世界模型等算法进行计算与处理,提高对环境的感知泛化能力。

频谱感知的准确性受到多种因素的影响。考虑经典的有无通信/信号行为二元假设问题,当采用能量检测方式时,虚警和正确检测的概率分别为^[39]

$$P_f(\gamma) = \Pr(Y > \gamma | H_0) = Q\left(\frac{\gamma - M\sigma^2}{\sigma^2\sqrt{2M}}\right)$$

$$P_d(\gamma) = \Pr(Y > \gamma | H_1) = Q\left(\frac{\gamma - M(\sigma^2 + |H|^2)}{\sigma^2\sqrt{2M(\sigma^2 + 2|H|^2)}}\right)$$

式中: γ 为设定的阈值; M 为取样数; Y 为累积能量值; σ^2 为噪声功率; H 为信道响应; H_0 和 H_1 分别为信号不存在和存在的假设。显然,检测性能与信道响应相关,而信道响应又受到辐射源与检测点的空间位置影响。在此背景下,利用具身智能物理实体的移动能力,结合智能算法调整优化频谱感知位置,采集频谱相关数据以及低空飞行器的图像、位置和轨迹等相关数据,实现高性能频谱感知。

3.2 低空具身智能频谱推理与决策——动态频谱推理预测与可靠频谱管控决策

结合感知生成的低空频谱态势,对低空目标空域进行智能用频推理和预测,通过多具身智能体分层协同决策的方法,快速生成低空频谱管控方案,提高频谱利用率,维护低空用频秩序,如图4所示。

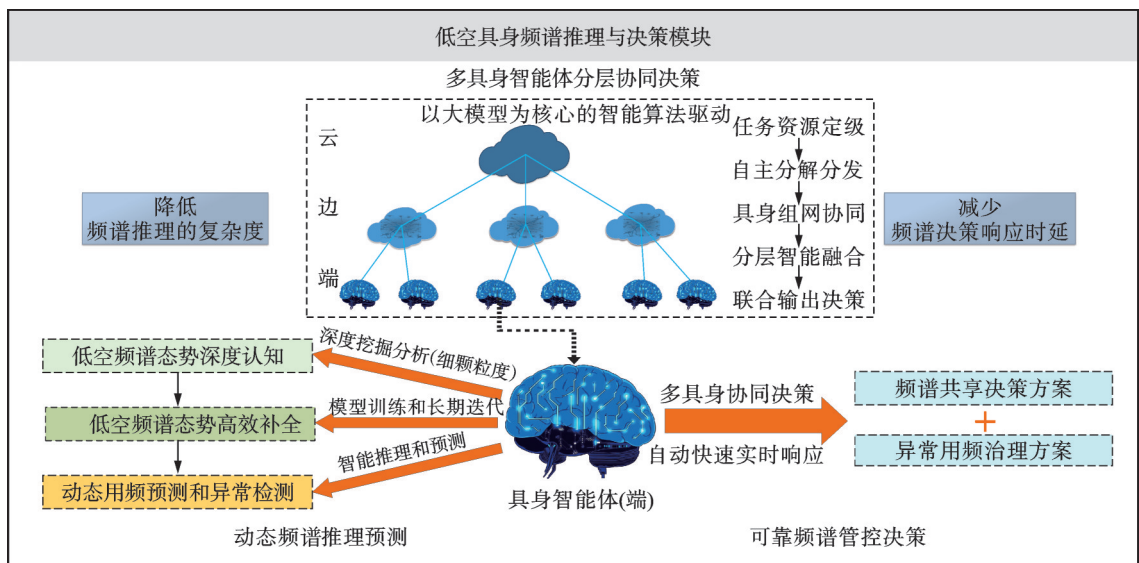


图4 低空具身智能频谱推理与决策示意图

Fig.4 Schematic diagram of low-altitude EAI spectrum inferring and decision-making

根据实时生成的低空空域频谱态势信息,具身智能的推理与决策运用以大模型为核心的智能算法对实时频谱数据进行深度挖掘和分析,结合低空智能网的用频规划完成频谱态势的深度认知和高效补全,进而实施快速决策,智能生成可靠的频谱共享决策方案和异常用频治理方案。同时,为更好地解决低空飞行器因高速移动和组网改变等带来的快速“频谱重分配”需求,可以采用多具身智能体分层协同决策的方法,实现自动快速的实时响应,迅速地调整频谱共享策略,从而降低频谱推理的复杂度和减少新决策响应的时延,便于及时生成并分发频谱共享方案。具身智能体(端)先对该频谱管控任务所需计算资源进行定级,将需求信息上传至低空具身智能频谱云进行分解后分发,所需层级和资源进行组网协同计算,最终进行结果融合输出决策。

低空具身智能频谱推理与决策主要有以下突出优势:(1)主要是依靠以大模型为核心算法的智能决策,能够完成动态复杂频谱态势的高效补全和精确预测,自适应能力和泛化能力更加健壮;(2)具身智能具有拟人化的自主学习和智能进化能力,不仅可以完成复杂的低空频谱管控任务决策,也可以在动态预测和决策的反馈经验中不断学习和促进智能的进化,使具身智能预测和决策更可靠高效;(3)具身智能可以通过多具身智能分层协同决策的方法,大幅度缩小预测和决策时间,实现低空频谱需求的快速响应。

3.3 低空具身智能频谱行动与反馈——自主频谱方案执行与持续频谱反馈优化

低空具身智能频谱行动与反馈能够自主执行决策模块生成的频谱共享决策方案和异常用频治理方案,提高频谱利用率,排除非法用频和干扰,规范低空用频行为,维护低空智能网用频环境的安全稳定;同时,具身智能体通过与低空频谱环境的持续交互获得反馈经验,并对各模块进行调整优化形成良性闭环,提高自适应能力和智能化水平,实现低空智能网频谱管控的高效运行,如图5所示。

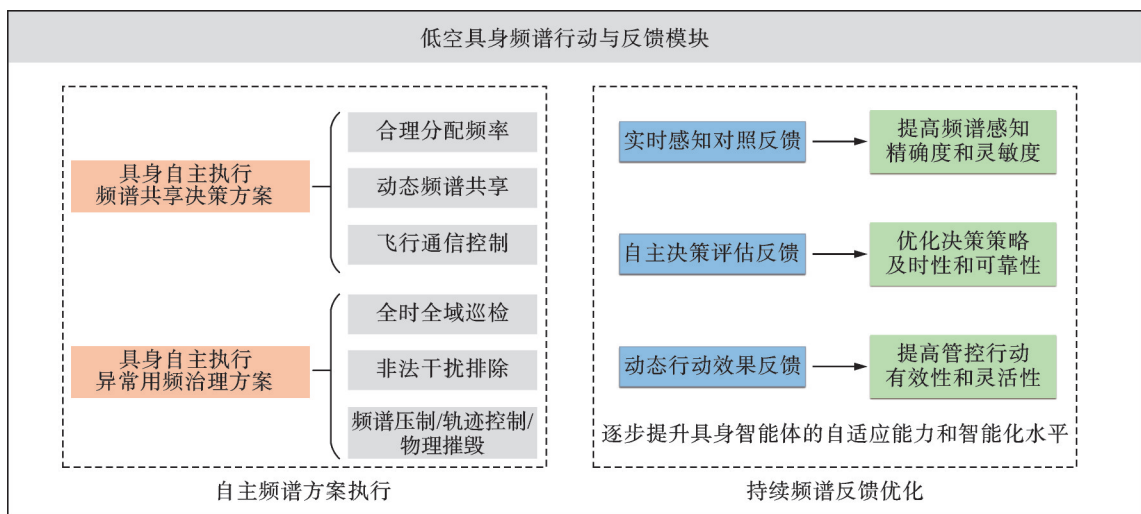


图5 低空具身智能频谱行动与反馈示意图

Fig.5 Schematic diagram of low-altitude EAI spectrum action and feedback

在行动方面,具身智能能够自主执行决策方案,实现低空飞行器之间的频谱资源共享和调度,控制低空飞行器飞行轨迹和组网方式降低电磁干扰,以满足低空智能网日益增长和动态多变的飞行任务需求。同时,以无人机为主的频管具身实体要全时开展对低空全域的频谱秩序巡检,并根据异常用频治理方案,及时排除非法用频和干扰源,防止频谱资源被非法占用。多具身智能实体能够自动搜索发现、协同测向和跟踪定位异常用频目标,并自主选择合适时机抵近进行近距离电磁频谱压制,及时消除威胁。

在反馈方面,通过与低空环境的不断交互,具身智能体可以持续接收反馈信息,并基于大模型的持续学习能力对低空频谱管控全过程进行调整优化。对于感知环节,具身实体与低空频谱环境进行实时交互,能够持续获得最新感知数据对照反馈,从而细致地把握频谱环境变化,增强感知模块的精确度和灵敏度;对于推理和决策环节,具身智能能够根据反馈对决策方案进行智能评估,不断优化决策策略,提高决策的及时性和可靠性;对于行动环节,具身智能可以通过行动效果的持续反馈,灵活调整管控行为,提高低空频谱管控行动的有效性和灵活性;对于具身智能体本身,通过持续学习反馈经验,可以逐步提高对动态复杂低空环境的自适应能力和智能化水平。

低空具身智能频谱行动与反馈主要有以下突出优势:(1)具身智能具有类似人的自主执行能力,能够在接收频谱决策方案后快速进行自主响应,不需要人类的参与;(2)具身智能能够结合反馈信息自动调整优化算法和策略,提高自适应性和泛化能力,实现智能的自我成长;(3)具身智能在定位非法用频用户和干扰源后,能够凭借物理实体的运动能力抵近目标,视情采取轨迹控制和频谱压制等行动,甚至可以进行物理摧毁。

4 结束语

随着低空经济的飞速发展,低空用频矛盾日益突出,实现低空智联网有限频谱资源的高效共享与安全控制的难度愈发增大。本文针对低空智联网频谱管控面临的复杂技术挑战,结合具身智能的特性优势,探索了低空具身智能频谱管控的可能技术路径,为实现精准的频谱态势感知、快速可靠的动态频谱决策和高效灵活的频谱管控行动提供支撑。然而,目前低空具身智能频谱管控在很多技术的实现上还不成熟,要实现真正意义上的具身智能频谱管控还有很长的路要走。

参考文献:

- [1] 《学术前沿》编者.低空经济的未来布局[J].人民论坛·学术前沿,2024(15): 14.
- [2] 李强.政府工作报告——2024年3月5日在第十四届全国人民代表大会第二次会议上[J].中华人民共和国国务院公报,2024(9): 2-16.
- [3] 新华网.工信部等四部门联合印发《通用航空装备创新应用实施方案(2024-2030年)》[J].环境技术,2024, 42(3): 1-2.
- [4] 低空经济发展司.司局致辞[EB/OL].(2024-12-27). <https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dks/>.
- [5] 低空经济发展司.低空经济发展司召开推动低空智能网联系统建设专题座谈会[EB/OL].(2024-12-27). https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dks/zygz/202412/t20241227_1395297.html.
- [6] 低空产业联盟.低空智能网联体系参考架构[EB/OL].(2024-11-11). https://www.miit-eidc.org.cn/art/2024/11/11/art_1644_11070.html.
- [7] 田畅,贾倩,陈润丰,等.无人机集群网络资源优化综述[J].数据采集与处理,2023,38(3): 506-524.
TIAN Chang, JIA Qian, CHEN Runfeng, et al. Review on optimization of resources in UAV swarm networks[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2023, 38(3): 506-524.
- [8] 董超,经宇骞,屈毓铤,等.面向低空智联网频谱认知与决策的云边端融合体系架构[J].通信学报,2023,44(11): 1-12.
DONG Chao, JING Yuqian, QU Yuben, et al. Cloud-edge-device fusion architecture oriented to spectrum cognition and decision in low altitude intelligence network[J]. Journal on Communications, 2023, 44(11): 1-12.
- [9] 张志峰,周远方.泉州大量无人机表演中失控坠海,安全问题引关注[EB/OL].(2024-12-10). https://m.guancha.cn/economy/2024_12_10_758281.shtml.
- [10] 刘华平,郭迪,孙富春,等.基于形态的具身智能研究:历史回顾与前沿进展[J].自动化学报,2023,49(6): 1131-1154.
LIU Huaping, GUO Di, SUN Fuchun, et al. Morphology-based embodied intelligence: Historical retrospect and research progress[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(6): 1131-1154.
- [11] 丁国如,孙佳琛,王海超,等.复杂电磁环境下频谱智能管控技术探讨[J].航空学报,2021,42(4): 200-212.
DING Guoru, SUN Jiachen, WANG Haichao, et al. Discussion on technologies of intelligent spectrum management and

- control under complex electromagnetic environments[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(4): 200-212.
- [12] WANG H C, WANG J L, DING G R, et al. Robust spectrum sharing in air-ground integrated networks: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(3): 148-155.
- [13] SHEN F, DING G R, WANG Z, et al. UAV-based 3D spectrum sensing in spectrum-heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 5711-5722.
- [14] 沈锋, 丁国如, 李婕, 等. 电磁频谱多维态势压缩测绘技术研究进展[J]. *通信学报*, 2023, 44(11): 25-42.
SHEN Feng, DING Guoru, LI Jie, et al. Research progress on electromagnetic spectrum multidimensional situation compressed mapping technology[J]. *Journal on Communications*, 2023, 44(11): 25-42.
- [15] SHANG B D, LIU L J, RAO R M, et al. 3D spectrum sharing for hybrid D2D and UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5375-5389.
- [16] ZHU Q, ZHAO Y, HUANG Y, et al. DEMO abstract: An UAV-based 3D spectrum real-time mapping system[C]// *Proceedings of IEEE INFOCOM 2022—IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. New York, NY, USA: IEEE, 2022: 1-2.
- [17] WEI Z, YAO R, KANG J, et al. Three-dimensional spectrum occupancy measurement using UAV: Performance analysis and algorithm design[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(9): 9146-9157.
- [18] 李泓余, 沈锋, 韩路, 等. 一种模型和数据混合驱动的电磁频谱态势测绘方法[J]. *数据采集与处理*, 2022, 37(2): 321-335.
LI Hongyu, SHEN Feng, HAN Lu, et al. A method of electromagnetic spectrum situation mapping driven by model and data [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2022, 37(2): 321-335.
- [19] 吴启晖, 董超, 贾子晔, 等. 低空智能网联网与控制理论方法[J]. *航空学报*, 2024, 45(3): 6-23.
WU Qihui, DONG Chao, JIA Ziyue, et al. Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(3): 6-23.
- [20] WANG Z, ZHANG F, YU Q, et al. Blockchain-envisioned unmanned aerial vehicle communications in space-air-ground integrated network: A review[J]. *Intelligent and Converged Networks*, 2021, 2(4): 277-294.
- [21] WANG B, SUN Y, ZHAO N, et al. Learn to coloring: Fast response to perturbation in UAV-assisted disaster relief networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(3): 3505-3509.
- [22] 孙启祿, 王桂胜, 王叶群, 等. 频谱能量均衡的低空智能网联无人系统信道干扰协同管理[J]. *计算机应用研究*, 2024, 41(12): 3801-3806.
SUN Qilu, WANG Guisheng, Wang Yequn, et al. Spectrum energy balance coordinated for unmanned systems by channel interference in low-altitude intelligent network[J]. *Application Research of Computers*, 2024, 41(12): 3801-3806.
- [23] 邱文静, 韩晨, 刘爱军. 干扰环境下无人机群动态频谱决策方法[J]. *计算机科学*, 2022, 49(12): 326-331.
QIU Wenjing, HAN Chen, LIU Aijun. Dynamic spectrum decision-making method for UAV swarms in jamming environment [J]. *Computer Science*, 2022, 49(12): 326-331.
- [24] 刘亮君. 面向无人机集群的频谱接入认证与抗干扰分配模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
LIU Liangjun. Research on spectrum access authentication and anti-jamming allocation model for UAV swarm[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [25] DING R, ZHOU F, WU Q, et al. From external interaction to internal inference: An intelligent learning framework for spectrum sharing and UAV trajectory optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(9): 12099-12114.
- [26] 王伟. 无人机网络中的频谱感知策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
WANG Wei. Research on spectrum sensing strategy in UAV networks[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [27] 丁文娇. 基于多智能体强化学习的应急通信网络动态频谱聚合与接入技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
DING Wenjiao. Research on dynamic spectrum aggregation and access technologies for emergency communication networks based on multi-agent reinforcement learning[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [28] 卢毛毛, 刘春辉, 董赞亮. 面向区域覆盖的多无人机动态通信资源分配方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(9): 2939-2950.
LU Maomao, LIU Chunhui, DONG Zanliang. Dynamic communication resource allocation for multi-UAV area coverage[J].

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(9): 2939-2950.

- [29] 沈高青, 蔡圣所, 雷磊, 等. 基于数字孪生和强化学习的低空物联网协同认知干扰[J]. 数据采集与处理, 2024, 39(1): 15-30. SHEN Gaoqing, CAI Shengsu, LEI Lei, et al. Cooperative cognitive jamming in low-altitude intelligent network based on digital twin and reinforcement learning[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2024, 39(1): 15-30.
- [30] REN L, DONG J, LIU S, et al. Embodied intelligence toward future smart manufacturing in the era of AI foundation model[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024. DOI: 10.1109/TMECH.2024.3456250.
- [31] DUAN J, YU S, TAN H L, et al. A survey of embodied AI: From simulators to research tasks[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2022, 6(2): 230-244.
- [32] 中国信息通信研究院, 北京人形机器人创新中心有限公司. 具身智能发展报告(2024年)[EB/OL]. (2024-08-27). <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202408/P020240830312499650772.pdf>.
- [33] 孙长银, 袁心, 王远大, 等. 具身智能自主无人系统技术[J/OL]. 自动化学报, 1-15[2024-12-29]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240456>. SUN Changyin, YUAN Xin, WANG Yuanda, et al. Embodied intelligence autonomous unmanned systems technology[J/OL]. Acta Automatica Sinica, 1-15[2024-12-29]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240456>.
- [34] 沈甜雨, 陶子锐, 王亚东, 等. 具身智能研究的关键问题: 自主感知、行动与进化[J]. 自动化学报, 2025, 51(1): 43-71. SHEN Tianyu, TAO Zirui, WANG Yadong, et al. Key problems of embodied intelligence research: Autonomous perception, action, and evolution[J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(1): 43-71.
- [35] 张昌盛. 从具身智能到具身智能体[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2024, 24(6): 154-165. ZHANG Changsheng. From embodied intelligence to embodied intelligent agents[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2024, 24(6): 154-165.
- [36] 杨玉琪, 王梦云, 刘运卓, 等. 具身智能及其在自主无人系统的应用研究[J]. 无人系统技术, 2024, 7(5): 99-110. YANG Yuqi, WANG Mengyun, LIU Yunzhuo, et al. Embodied intelligence and its application in autonomous unmanned systems[J]. Unmanned Systems Technology, 2024, 7(5): 99-110.
- [37] 王文晟, 谭宁, 黄凯, 等. 基于大模型的具身智能系统综述[J]. 自动化学报, 2025, 51(1): 1-19. WANG Wensheng, TAN Ning, HUANG Kai, et al. Embodied intelligence systems based on large models: A survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(1): 1-19.
- [38] 白辰甲, 许华哲, 李学龙. 大模型驱动的具身智能: 发展与挑战[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(9): 2035-2082. BAI Chenjia, XU Huazhe, LI Xuelong. Embodied-AI with large models: Research and challenges[J]. Scientia Sinica Informationis, 2024, 54(9): 2035-2082.
- [39] QUAN Z, CUI S G, SAYED A H, et al. Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(3): 1128-1140.

作者简介:



金立民(1996-),男,硕士研究生,研究方向:智能电磁频谱管控, E-mail: jlm829288@163.com。



王海超(1991-),通信作者,男,副教授,研究方向:无人机通信、异构无线网络传输技术, E-mail: whc-w10919@sina.com。



谷江春(1995-),男,博士,研究方向:通信与干扰一体化, E-mail: gujiangchun-gjc@sina.com。



徐以涛(1971-),男,教授,研究方向:无线通信、数字信号处理技术, E-mail: yitaoxu@126.com。



丁国如(1986-),男,教授,研究方向:电磁频谱深度感知及高效利用理论、方法与应用, E-mail: guoru_ding@yeah.net。

(编辑:张黄群)