

引用格式: 杨健, 严牧, 赵研, 等. 群体频谱智能理论及架构研究 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(6): 850-865.

YANG J, YAN M, ZHAO Y, et al. Research on theory and architectural framework of swarm spectrum intelligence[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(6): 850-865.

## 群体频谱智能理论及架构研究



杨健<sup>1,2</sup>, 严牧<sup>1,2</sup>, 赵研<sup>3</sup>, 王亚彤<sup>4</sup>, 宋长庆<sup>1,5\*</sup>

(1. 电磁空间认知技术国家级重点实验室, 北京 100089; 2. 北京理工大学网络空间安全学院, 北京 100081;

3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081; 4. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081;

5. 电子科技大学通信抗干扰全国重点实验室, 成都 611731)

**摘要:** 电磁频谱属于战略性资源, 是人类目前较理想的信息传输媒介, 是支撑实数一体、群体生智的桥梁。针对电磁频谱空间环境动态复杂、局部不可观测、群体用户高度异构等核心难题, 未来电磁信息系统需要发展更加高效智能的体系架构, 提出了群体频谱智能的系统概念以及面向群体融合-协商-启发的群体频谱智能认知范式。群体频谱智能面向电磁频谱空间研究域, 将群体智能算法、控制协同技术和服务应用系统统筹起来, 以群愚生智、以量增效、集群涌现效应等为技术理论核心, 解决群体电磁频谱中的感知、利用和控制问题, 实现精准频谱感知、高效频谱利用和动态频谱管控, 支撑万物互联、安全高效的智慧城市建设。

**关键词:** 电磁频谱空间; 群体频谱智能; 频谱感知; 频谱利用; 频谱控制; 融合-协商-启发

中图分类号: TN975

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024185

## Research on theory and architectural framework of swarm spectrum intelligence

YANG Jian<sup>1,2</sup>, YAN Mu<sup>1,2</sup>, ZHAO Yan<sup>3</sup>, WANG Yatong<sup>4</sup>, and SONG Changqing<sup>1,5\*</sup>

(1. Electromagnetic Space Cognition and Intelligent Control Technology Laboratory, Beijing 100089, China;

2. School of Cyberspace Security, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

4. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

5. National Key Laboratory of Wireless Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The electromagnetic spectrum is a strategic resource and currently the most optimal medium for information transmission, serving as the bridge that supports the integration of physical and digital realms thereby fostering swarm intelligence. However, in view of the core challenges such as the dynamic complexity of the electromagnetic spectrum space environment, partial unobservability and high heterogeneity of group users, future electromagnetic information systems need to be more efficient and intelligent. This paper proposes the concept of swarm spectrum intelligence and the swarm spectrum intelligence cognitive paradigm oriented towards group integration, coordination and inspiration. On the one hand, by integrating swarm intelligence algorithms, cooperative control technologies, and service application systems, the swarm spectrum intelligence framework aims to harness the swarm wisdom, the boost efficiency through quantitative measures, and the leverage emergent effects as fundamental technological principles. On the other hand, by addressing issues of perception, utilization, and control within the swarm electromagnetic spectrum, the proposed framework ultimately strives to achieve precise spectrum sensing, efficient spectrum utilization, and dynamic spectrum management. These advancements are poised to lay a solid foundation for the development of interconnected, secure, and efficient smart cities.

**Key words:** electromagnetic spectrum space; swarm spectrum intelligence; spectrum sensing; spectrum utilization; spectrum control; group integration, coordination, and inspiration

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (62401052, 62071094); 中国博士后基金 (2024M754090, GZB20240942, GZC20240217)

作者简介: 杨健, 博士, 研究员, 主要从事群体频谱智能方面的研究。

\*通信作者 E-mail: scq@uestc.edu.cn

信息智能时代,电磁频谱空间是人类社会发展最迅速、活动最频繁的空间之一,是人类已知最理想的信息传输媒介<sup>[1]</sup>,是支撑实数一体、群体生智的桥梁<sup>[2]</sup>。随着人工智能算法与芯片的快速发展普及、5G移动通信的成熟化商用、6G移动通信技术的快速发展<sup>[3]</sup>,大量的自主无人系统、智能化物联网终端<sup>[4]</sup>通过电磁频谱空间实现互联互通和跨域协作,打破电磁个体认知孤岛,实现基于群体认知的电磁感知、利用和控制,逐步构建群体电磁频谱空间理论体系,并成为智慧城市建设的重要引擎。通过认知理解电磁空间环境中的大量个体、高效组织利用同构/异构电磁频谱资源、调控优化电磁空间行为活动和事件,电磁认知能力建设将成为智慧城市建设重要的新质能力,也是支撑城市转型发展的重要推动力量。

随着人类社会对电磁频谱资源需求的爆炸式增长,用于无线通信的大部分频段已通过专用授权的方式分配殆尽,频谱资源稀缺性愈发明显<sup>[5]</sup>,现有的无线频谱运用方式已经不足以支撑终端用户之间的按需分配,频谱利用规则缺乏灵活性,造成了巨大的频谱供需矛盾。

针对电磁频谱空间群体面临的频谱精确感知难、高效利用难、动态管控难、空间认知能力形成缺少核心机理和平台系统支撑等挑战<sup>[6-9]</sup>,需要打破传统电磁理论范式,从知识层面对电磁空间进行解构,深层次剖析电磁理论机理,搭建关键基础平台系统,形成群体频谱智能理论基础和平台能力支撑。

伴随着科技、工业、生活、军事等不同领域对智能差异化需求的逐渐提升,各领域数据快速积累,大数据时代应运而生。随着智能芯片、软件技术的持续突破,计算机软硬件算力水平获得成倍提升,以人脸识别为代表的机器视觉、ChatGPT为代表的自然语言处理、Alpha Go/Zero为代表的人机博弈、波士顿动力机器人为代表的机器人智能等人工智能理论及应用获得重大突破<sup>[10-13]</sup>,人工智能已经进入了以“大数据+群体协作智能+高效能芯片”为标志的发展新阶段,给电磁频谱领域关键技术难题的突破也带来了契机。

群体智能<sup>[14]</sup>的概念起源于科学家对群居性生物特别是群居性昆虫的观察与研究,最早于1989年由Gerardo Beni教授在细胞机器人系统的背景下提出<sup>[15]</sup>,随后蚁群算法创始人Marco Dorigo教授对其进行了进一步的阐述<sup>[16]</sup>:从狭义的现象级

角度,生物群落通过简单通信实现高效协同,表现出协同聚集、目标吸引和避撞排斥等行为特征,能够达成合作共赢的集群效果,这种由群居性生物通过协作表现出的宏观智能行为特征,即为“群体智能”;而从广义的学科研究角度,群体智能则是指由一定规模的同构(具备同质基因属性)或异构(以任务牵引进行分工协同)、单功能或多功能的单体智能节点共同组成的群体,在交感网络的支撑下,利用信息交互与反馈、激励与响应等交感行为,形成群体共智拓扑结构,实现单体智能节点的行为自主决策,群体无人系统节点间行为协同、动态适应环境,最终产生能力涌现等新质能力的智能化。

群体智能赋能电磁频谱空间,需要解决电磁环境动态复杂、频谱空间局部不可观测、群体用户高度异构等难题,并引申出两个层面的含义,一是通过群体智能重新约定电磁空间资源之间的控制协同关系,建立全新的电磁空间组织秩序;二是众多小型化、低成本、高智能自主电磁设备的认知环路通过电磁空间收发行动实现交感,凝聚出群智涌现、功能复杂的群体频谱智能能力。

本文提出了群体频谱智能的概念和理论体系,作为群体智能理论体系的研究对象范畴,群体频谱智能不仅仅是“群体智能”和“电磁频谱”的简单结合,即运用智能手段解决复杂电磁频谱域中的感知、利用、控制等技术难题,还是通过群体以电磁频谱作为信息传输媒介进行融合、协商、启发所产生的新质智能能力。相较于单体频谱智能的处理简单和控制单一,群体频谱智能在感算一体、控制协同和智能演进等方面都表现出远超个体的技术能力特征。此外,群体频谱智能还可以实现效能最优、泛在共享的频谱认知,基于规则和秩序的频谱重构,以及全局、连贯、持续的频谱决策。

## 1 方向探索

围绕群体频谱智能,本文对群体频谱智能架构、群体电磁感知与认知技术、群体电磁决策与管控技术开展研究,搭建了用于验证群体频谱智能理论体系的群体频谱智能认知演进平台。

1) 群体频谱智能架构技术研究。研究群体频谱智能体系架构,探索面向复杂受限场景联通保持的专用语义理解、群体频谱智能的传递学习和进化等方法,研究基于智能算法芯片协同的频谱智能分布式计算和信息推送技术途径,支撑构建具有自

主协同、自主学习演进能力的群体频谱智能原型系统。

2) 群体电磁频谱智能感知与认知技术研究。共识自主性是下一代群体电磁频谱智能的核心引擎,是解决智能电磁行为可信与可解释问题、推动由数据感知智能向电磁认知智能的基础。融合知识驱动方法和数据驱动机器学习算法的各自优势,探索电磁物理知识的内嵌建模和算法设计框架,构建分层物理模型嵌入生成核心中的混合架构,利用知识推理实现对动态频谱行为的共情、复杂电磁目标高维特征发现以及目标间内隐关系识别,提升电磁认知智能的“准确性”“稳健性”和“普适性”。

3) 群体电磁频谱智能利用与管控技术研究。针对智慧城市电磁空间典型应用场景,面向开放问题空间的全局优化和不完备信息博弈,利用智能种群特有的处置经验、跨界联想与决策创新能力,结合机器在受限空间与变量约束条件下极强的自主学习、优化调度、对抗博弈能力,开展基于多智能体博弈的电磁频谱决策与操控问题研究,探索人机混合智能的频谱决策与操控方法,实现受限场景约束条件下决策优化和多维智能操控。

4) 群体频谱智能支撑平台搭建。群体频谱智能支撑平台通过集成频谱感知、利用和控制,以及智能计算、信息通信等基础能力手段,构建了物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂系统,实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化。群体频谱智能认知演进平台不仅是物理世界的模拟镜像,还要接纳物理世界的实时信息,更要反转实时驱动物理世界,进化为电磁空间适应性最强、智能化最高的基础生态位存在。

## 2 群体频谱智能概念内涵

群体频谱智能的定义是:群体以电磁频谱作为信息传输媒介,在传信能力受限条件下,通过融合-协商-启发群体认知范式而保持体系功能宏观运行有效的智能能力,且群体频谱智能认知能力是智能群体基于群智涌现的理论方法,在形成群体共智拓扑结构后产生。

群体频谱智能有两层含义,第一层含义体现在群体共智拓扑结构层面的分析与进展,通过大量对等协同的基础认知体在交感空间中的频繁交感活动,相互作用影响各自认知引擎与智能核心,根据不同环境与任务条件等外部约束,群体共智拓扑结

构变化催生出群体频谱智能认知能力范式,逐层循相递进转换;第二层含义则是体现在群体频谱智能涌现的方法论层面,即如何利用群体频谱智能的方法论支撑起从“融合(Integration)”到“协商(Coordination)”再到“启发(Inspiration)”的“SCI”认知范式智能化系统能力的攀升与智能化水平的持续演进。

围绕群体频谱智能群智涌现机理和群体共智拓扑结构演进过程,后续将从两层含义及三项范式的逻辑关系出发,理清群体频谱智能的核心思想和智能系统的主要逻辑架构,形成一套参考体系规范。

### 2.1 群体频谱智能共智拓扑结构

群体通过不同连接方式所形成的拓扑结构,是群体智能涌现的基础,而不同拓扑结构能够承载的智能能力和需求的技术支撑都是有区别的。随着电磁频谱域加入,群体共智拓扑结构从简单坐标空间域坍缩到以电磁频谱为边界的电磁频谱空间域,拓扑结构的构型也约束为电磁环境中的影响关系等效。融合、协商、启发的拓扑结构可以简要归纳为——融合是结构上有中心、流程上单向赋能,效果上分集增益;协商是结构上无中心、流程上双向,效果上群体共识;启发是结构上无中心、流程上循环迭代,效果上知识迁移生长。

通过对共智拓扑结构分析,可得到不同拓扑结构能够承载的智能能力和各自需求的支撑技术,从而形成一套参考体系规范。

在电磁频谱空间中,群体频谱智能系统的各主要逻辑功能组成可抽象归纳为智能单元个体、内部处理核心、电磁功能学习、电磁任务需求、拓扑组织关系、群体服务功能和功能服务支持等核心要素。

### 2.2 群体频谱智能认知范式演进

传统电磁认知手段多以单节点感知为主,包括典型信号检测<sup>[17]</sup>、信号识别<sup>[18]</sup>、定位跟踪<sup>[19]</sup>、电磁态势推演<sup>[20]</sup>及智能干扰决策<sup>[21]</sup>等。然而,单节点感知缺乏多源信息协同与全局视角,在复杂电磁环境下难以满足高精度认知需求。因此,本文提出的“融合-协商-启发”群体频谱智能架构应运而生。图1给出了电磁空间群体频谱认知闭环体系架构,通过共智拓扑结构将多个节点互联,突破单节点感知局限,实现跨域多维度数据感知融合,有效整合空域、时域、频域等多源异构信息,提升信号检测的准确性和鲁棒性。在认知范式演进层面,群体智能架构引入协商机制,通过电磁用频分簇协商

管控, 可根据不同任务需求和电磁环境动态调整频谱资源分配, 相比传统单节点独立决策, 极大提升了资源利用效率和系统协同能力。学科基础模型的构建, 则为未知目标启发式电磁行为推理提供了理论支撑, 赋予系统自适应学习和动态决策能力, 能够主动识别未知电磁目标特征, 推理其行为模式, 进而优化干扰决策和资源配置。在无人集群协同城市低空频谱管控应用场景中, 传统单节点手段难以应对高密度、多制式的电磁信号干扰, 而所提群体智能架构凭借多节点协同优势, 可快速完成全域电磁态势感知与分析, 精准定位干扰源并制定最优管控策略, 为城市低空复杂电磁环境下的频谱管理提供了有效解决方案。

从单体频谱智能向群体频谱智能的认知演进来看, 单体智能的认知过程是典型的“感知环境 (Observe) - 适应环境 (Orient) - 做出决策 (Decide) - 采取行动 (Act)”的 OODA 闭环回路, 是单体智能进行认知赋能的重要过程。在群体频谱智能理论体系下, 随着“融合、协商、启发”3 种认知范式能力的演进, 个体之间的共智拓扑结构逐步发生变化, 某一个体的认知能力产生是嵌套在其他个体的认知逻辑循环中的, 传统的 OODA 闭环体系已经不再能描述群体之间的认知过程, 更加复杂而奇妙的群体智能现象则逐渐产生和展现出来。

群体频谱智能理论是群体智能理论与电磁频谱领域应用结合的产物, 建立在单智能节点启发认知

与多智能节点之间信息协同的基础上, 如图 2 所示。当群体之间无通信条件时, 单节点启发认知与传统认知方式的区别主要包含认知依据、学习与更新机制、决策与行为导向 3 个层面。

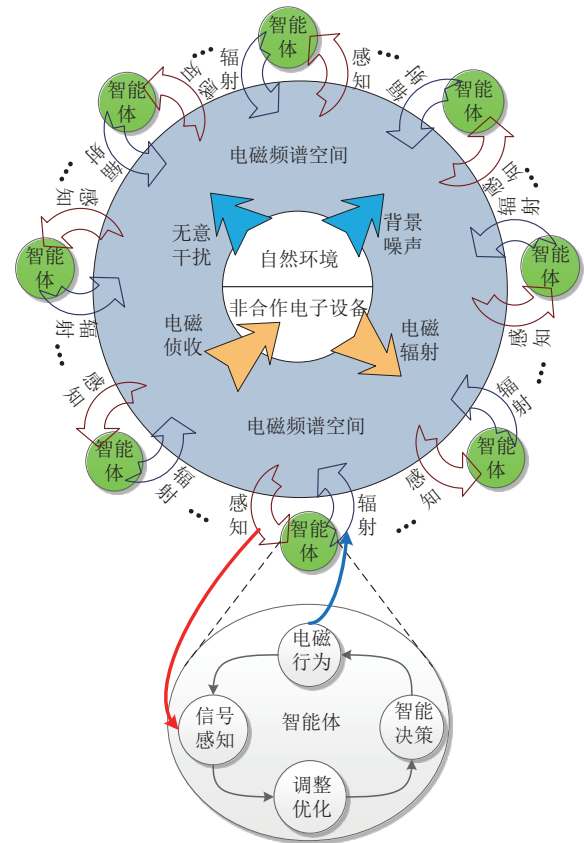


图 1 电磁空间群体频谱认知闭环体系

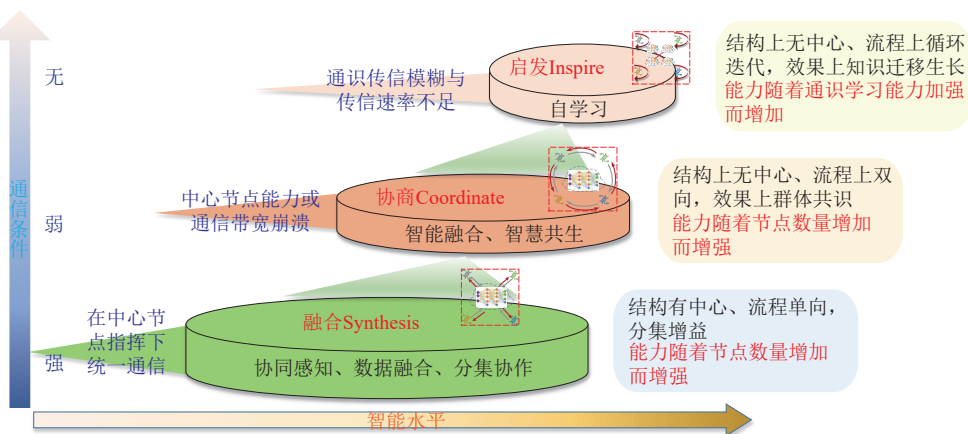


图 2 “SCI” 群体频谱智能认知范式演进体系

1) 认知依据。单节点启发认知方式依赖于节点自身的智能算法、模型以及对局部环境的感知数据, 根据自身收集到的环境信息, 通过内置的算法进行特征提取、模式识别, 进而形成对环境的认知, 这种认知是基于数据驱动和智能模型的。传统

认知方式多基于过往的经验、惯例、已有的知识体系或简单的规则, 这些知识相对较为固定和模式化。

2) 学习与更新机制。单节点启发认知方式具有较强的自我学习和更新能力, 通过不断接收新的数据, 利用智能算法对模型进行训练和优化, 从而

不断更新自己的认知；这种学习是主动的、基于数据和算法的自适应过程。传统认知方式学习和更新相对缓慢且被动，通常是在经历了大量重复的实践后，才会逐渐对传统认知进行修正或更新。

3) 决策与行为导向。单节点启发认知方式倾向于基于数据分析和模型预测来做出决策和导向行为，会综合考虑各种因素和可能性，通过智能算法计算出最优或较优的行动方案。传统认知方式的决策和行为更多地依赖于习惯、直觉以及过去的成功经验，在一些熟悉的场景中能够快速做出决策，但在面对复杂多变或全新的情况时不够准确和有效。

总结而言，个体之间的“融合”是实现群体频谱智能的前提，通过整合大量独立个体的认知结果，实现群体协同认知效应远大于个体感知能力相加之和的效果，“融合”认知贯穿于 3 个范式中，并不断演进发展。个体之间的“信息协商”是群体频谱智能过程中的核心，基于大量个体的认知结果，通过“协商”的方式达成群体共识，形成群体统一或协调配合的活动策略，“协商”结果直接决定整个群体在行动上的智能化程度。群体和个体的认知“启发”是群体频谱智能的结果，通过对外部环境的“感知”和个体之间的相互“协商”形成群

体智慧，群体对陌生环境和目标的“启发”式应对水平，是群体智能化程度的体现。

### 2.3 群体频谱智能学科基础模型

群体频谱智能是典型的跨专业多学科交叉性前沿应用科学，国内外尚未有明确共识或完备成熟的科学理论，而其涉及的相关基础理论十分广泛，包含人工智能、认知神经学、自动化控制论、复杂系统理论、电磁行为学和组织动力学等经典学科门类。交叉应用学科理论体系研究需要立足已有相关理论的最新进展，借鉴各学科专业发展之长，综合多学科优势交叉互补，从浅入深由表及里地推测，逐步建立理论与核心模型，创新理论与试验佐证结合。群体频谱智能理论的发展进步是人工智能与电磁频谱深度结合应用的重要成果，如图 3 所示。

群体频谱智能理论构建由 3 项基础理论支撑。在个体独立智能处理层面，其核心技术基础是人工智能的认知科学理论，即以“OODA”环为核心的自主认知学习能力；在大量群体相互联系层面，其核心技术基础是基于微波电磁场理论、电磁行为学和通信信息论的电磁传信分析理论；在系统应用任务服务层面，其核心技术基础是基于传统控制理论的群体动力学、复杂系统混沌理论。

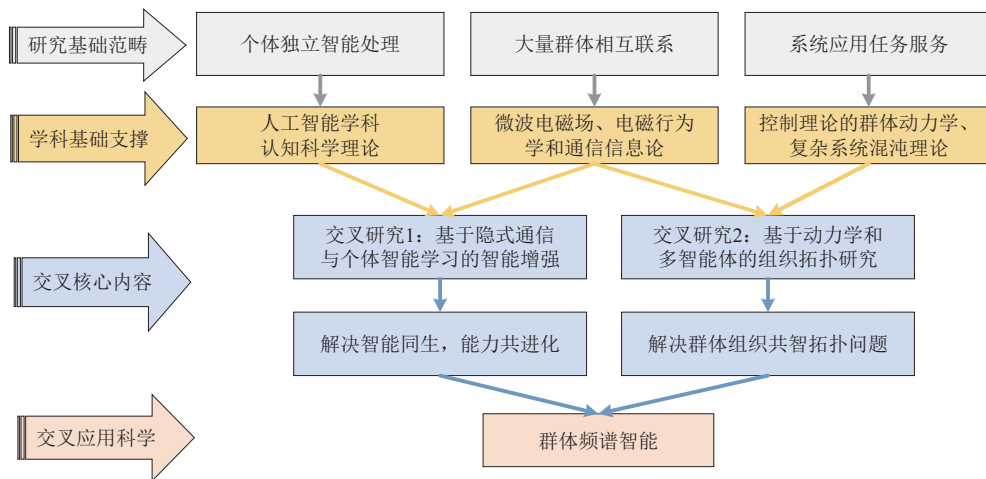


图 3 群体频谱智能学科基础研究关系图

#### 2.3.1 融合范式

##### 1) 融合范式的核心本质

群体频谱智能融合范式是群体频谱智能系统的核心概念之一，旨在通过多维数据的集成智能处理来实现频谱资源的最优利用<sup>[22-24]</sup>。本质上，它将电磁频谱的物理特性转化为可用的信息资源，以智能化方式估计和优化系统性能。其核心特征包括：数

据空间的全面定义、多源数据的分集成、推理函数构造和反馈迭代闭环 4 个环节，在此基础上，对信息空间进行高层次的抽象和映射。此 4 个环节的核心特征与本质要求表现如下。

① 数据空间的全面定义：这一环节要求准确界定和描述所处理的数据的维度和边界。它是融合过程的基础，确保了数据集成的准确性和完整性，

为后续的智能处理奠定了基础。

② 多源数据的分集合成:在这个环节中,来自不同源头的数据通过特定的分集操作符进行合成。分集合成既增强了数据的多样性和代表性,还提高了系统对噪声和异常值的鲁棒性,使得融合数据更加可靠和全面。

③ 推理函数构造:利用构造的推理函数,系统能够对融合后的数据进行高层次的抽象和分析。推理函数是理解和转化数据的工具,它将复杂的数据关系转换为清晰的信息结构,为决策提供了直接的支持。

④ 反馈迭代闭环:通过一个闭环的反馈迭代机制,系统不断自我优化和调整。这一环节是智能化的体现,它确保系统能够根据之前的行为和外部的反馈进行学习和适应,以达到持续改进的目的。

整体而言,这些环节共同作用,使得频谱智能融合范式能够将电磁频谱的物理属性智能地转化为有用的信息,以支持系统性能的评估和优化。这一过程不仅依赖于先进的算法和模型,还需要一个动态学习和适应的机制,以确保在变化的环境中保持高效和精确。

从系统的拓扑组织结构上看,其具有以下特征。

① 群体有中心,数据信息向中心汇聚,有明确且稳定的通信指挥能力;

② 群体有分集合成特征能力,利用此特征最大化目标数据空间;

③ 群体中心利用智能算法实现目标数据空间向任务目的空间的处理映射;

④ 群体运行流程认知循环,性能持续提升。

## 2) 融合范式的基本数学模型构建

基于前文对于群体频谱智能融合范式概念、特征等分析总结,本文利用抽象代数方式对融合范式运用数学语言工具进行描述界定。

① 数据空间  $D$  的形式化。设  $D$  为由所有电磁场数据向量构成的多维向量空间。如果系统有  $m$  个数据源,每个数据源可以表示为  $D$  中的向量  $\mathbf{d}_i$ 。 $\mathbf{d}_i$  代表第  $i$  个数据源的数据集,其特征可描述数据源的每个维度。

② 分集增益的量化  $G$ 。使用信息熵来定义引入的分集增益  $G$ ,表达式为:

$$G(\mathbf{d}) = H(\oplus_{i=1}^m \mathbf{d}_i) - \sum_{i=1}^m H(\mathbf{d}_i) \quad (1)$$

式中,  $H$  表示信息熵,即在群体频谱交感处理空间

中,通过多维度感知获取的多模态电磁场数据所蕴含的信息量,其定量刻画了电磁频谱空间中数据分布的不确定程度,值越大表明从不同维度感知到的电磁信号所包含的有效信息量越丰富; $\oplus$ 表示分集操作。

③ 融合函数  $F$  的具体化。融合函数  $F$  可以表示为一个优化问题,即最大化目标函数  $G$ 。设  $\mathbf{d}_f$  为融合后的数据向量,其集合为  $\{\mathbf{d}_f\}$ ,则:

$$\mathbf{d}_f = \arg \max_{\mathbf{d} \in D} G(\mathbf{d}) \quad (2)$$

④ 推理算子  $R$  的算法实现。 $R$  表示由原始数据映射到目标信息的推理函数,它将融合后的数据集  $\{\mathbf{d}_f\}$  映射到任务目的空间  $I$  中(其具体任务目的变化,如侦察感知任务的目标信息空间、指挥决策的对抗策略行动空间、干扰压制的波形特征空间等)。此映射可包含或代表了一系列复杂的计算、推导、转移和替换等操作步骤,是典型抽象函数概念,如采用主成分分析来提取重要信息特征:

$$I = R(\mathbf{d}_f) \quad (3)$$

式中,  $I$  表示最终的信息结果;以雷达领域为例,函数  $R(\cdot)$  表示从回波接收数据中推理得到目标数量、距离、角度、速度等信息。

⑤ 认知反馈迭代  $C$  的具体化。通过引入反馈迭代机制  $C$ ,群体可以根据输出信息  $I$  的质量调整  $F$  和  $R$  中的控制参数。设  $I$  为从  $\mathbf{d}_f$  中通过  $R$  提取的信息,则:

$$(\mathbf{d}'_f, I') = C(\mathbf{d}_f, I, \{\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_m\}) \quad (4)$$

在具体应用中,参数  $F$  和  $R$  可以通过梯度下降等方法进行优化设计。

综上所述,可得群体频谱智能“融合”范式的基本数学模型为:

$$I', \mathbf{d}'_f = C(R(\arg \max_{\mathbf{d} \in D} G(\mathbf{d})), I, \{\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_m\}) \quad (5)$$

该模型以理论概念为根基,构建了兼具数学模型框架与代数表达结构的形式体系,为实际算法设计与优化策略制定提供指引。在具体应用场景中,需依据具体数据特性与处理目标,对模型各环节进行针对性调整与精细化优化,以适配多样化的应用需求。此外,模型的验证评估环节至关重要,其通过系统性的实验验证与性能分析,不仅可量化模型在实际场景中的有效性,更能为模型的迭代改进明确方向,确保理论架构与工程实践的深度融合与协同演进。

### 2.3.2 协商范式

#### 1) 协商范式的核心本质特征

群体频谱智能协商范式是群体频谱智能系统的核心概念之一,旨在通过部分对等协同节点间的受限交互和基于先天通识的多维数据联想补充,完成数据空间的融合丰富,再利用群体分布式智能处理来实现频谱资源的最优利用<sup>[25-27]</sup>。本质上,它将电磁频谱的物理特性抽象化为私有最简传信模式,以分布式智能机制保障估计和优化系统性能。其核心特征包括:数据空间的不完全定义、代理间隐式通信、基于通识的多源数据联想式融合、基于对等协同的群体意识塑造和信息持续交流共享 5 个环节,在此基础上,对信息空间进行高层次的抽象和映射。此 5 个环节的核心特征与本质要求表现如下。

① 数据空间的不完全定义。与融合智能范式的全面定义数据空间不同,协商范式允许数据空间部分定义,这鼓励了更加灵活和适应性强的数据处理方法。这种不完全定义的方式可能会导致对数据的局部理解,但通过协商可以达到更全面的理解。

② 代理间隐式通信。在协商范式中,代理之间不通过显式的、详细的信息交换进行通信,而是依赖于隐式信号和行为模式来推断和同步信息。这种通信方式减少了信息传输的负担,同时促进了基于行为的协同。

③ 基于通识的多源数据联想式融合。这一特征指的是利用先天的或通用的知识来引导从多源数据中进行联想和融合。这种方法促进了数据之间的相互补充,通过联想来弥补数据空间的不完全性。

④ 基于对等协同的群体意识塑造。协商范式倡导在对等节点之间形成群体意识,这种意识是通过持续的互动和协作而形成的。它强调群体协作的重要性,以及在决策和优化中考虑整个群体的意见和福祉。

⑤ 信息持续交流共享。持续的信息交流和共享是协商范式的另一核心特征,确保了整个群体都能够访问和利用最新的信息。这个过程支持了知识的累积和智能的集体进化。

在协商范式中,将电磁频谱的物理特性抽象化为私有最简传信模式,意味着每个节点都有能力以最有效的方式处理和传输信息,而分布式智能机制则保证了整个系统性能的估计和优化。通过这种方式,群体频谱智能协商范式不仅优化了频谱资源的

利用,也促进了群体协同和智能的演化,最终实现了信息空间的高层次抽象和映射。

从系统的拓扑组织结构上看,其具有以下特征。

① 群体无中心,无严格组织结构,数据信息动态向虚拟任务中心汇聚,通信指挥能力明显受限。

② 群体代理节点有基于通识的联想能力,并利用此特征最大化目标数据空间。

③ 群体各代理节点利用群体主体意识表达和智能算法实现目标数据空间向任务目的空间的处理映射。

④ 群体运行流程交互循环,性能持续提升。

#### 2) 协商范式下典型群体智能算法

上节明确了群体频谱智能协商范式最为核心和关键的特征,它们也将是区别其他智能范式,判断某智能算法归属于哪一种智能范式的重要评价标准。为了更好地理解和运用“协商”智能范式及其对应智能算法,下面将结合典型群体智能算法进行分析说明。

鸟群算法,通常指的是粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO),是一种模拟鸟类群体行为的优化算法。在 PSO 中,每个粒子代表潜在解决方案的一个点,粒子通过跟踪个体历史最优位置和群体中的全局最优位置来更新自己的位置和速度。粒子群算法的这些特性与群体协商智能范式的概念要求有着密切的联系,通过对其算法结构和关键信息的梳理总结,可以看出该算法有以下基本特征符合“融合”智能范式概念要求。

① 种群结构灵活。鸟群结构灵活多变,没有绝对的身份和不变的职责,群体内也是层次化多级结构,其相互关系完全会随着情况的变化而变化。

② 数据空间的不完全定义。在 PSO 中,粒子的初始位置和速度可以随机设定,这反映了数据空间不完全定义的特征。粒子的搜索行为允许探索解空间的未知区域,这也符合协商范式中数据空间的理解。

③ 代理间隐式通信。粒子通过跟踪全局最优和个体最优的方式进行隐式通信,不需要显式信息交换。这类似协商范式中强调的基于行为模式的隐式信息共享。

④ 基于通识的多源数据联想式融合。尽管 PSO 不直接进行数据联想,但每个粒子的行为是基于群体和个体历史经验的一种形式的数据联想,粒子通过这些信息来引导自己的搜索。

⑤ 基于对等协同的群体意识塑造。粒子群优化算法本质上就是一种群体协作过程,粒子共享信息以找到最佳解,这体现了群体意识的形成。

⑥ 信息持续交流共享。在 PSO 中,群体持续地交流信息(通过粒子的位置和速度更新),以达到共同的目标,即找到优化问题的最佳解。这符合协商范式中的信息交流共享特征。

### 3) 协商范式的基本数学模型构建

基于前文对于群体频谱智能协商范式概念、特征等分析总结,本文利用抽象代数方式对协商范式运用数学语言工具进行描述界定。针对群体频谱智能的协商范式,建立一个数学模型,这个模型需要考虑节点之间的受限交互、基于先天通识的数据联想补充以及通过群体分布式智能处理来实现频谱资源的最优利用。以下是协商范式的数学建模过程。

① 定义受限数据空间。设  $S$  表示整个可用的频谱数据空间。设每个节点  $n_i$  只能访问  $S$  的一个局部子空间  $s_i \subset S$ , 这模拟了部分对等协同节点间的受限交互。

② 建立隐式通信与信息交流模型。定义一个隐式通信函数  $T(n_i, n_j, k_{ij})$ , 其中  $k_{ij}$  是节点  $n_i$  和  $n_j$  之间的隐式通信能力, 包括通识背景知识  $A$  和受限的信息传输能力。这个函数不仅反映了节点间的通信强度, 还包括了通信的效率和质量。如在通信领域, 隐式通信包含了语义通信技术, 旨在突破传统通信仅关注比特传输的局限, 以实现更高效、智能且抗干扰的信息交互。在手段上, 它借助人工智能技术, 如自然语言处理、深度学习算法, 对原始信息进行处理; 其原理为: 发送端先从原始数据(语音、图像、文本等)中提取关键语义特征, 将其编码成紧凑的语义符号或向量, 减少数据量后通过通信信道传输, 接收端再依据预定义规则或模型, 将接收到的语义符号重构为有意义的信息, 即便部分数据丢失, 也能凭借语义逻辑还原内容含义, 从而实现精准且高效的语义级信息传递。

③ 基于通识的数据联想融合机制。针对数据完整性不足与维度表征不充分的核心挑战, 引入联想函数  $A(s_i, K, T)$  构建数据增强机制。该机制依托通识知识库  $K$  的先验知识支撑与通信策略  $T$  的动态信息交互, 通过跨模态特征映射与语义关联推理, 实现对不完整数据集  $s_i$  的语义补充与维度扩展, 为后续高维特征空间中的智能处理提供完整化的数据基底。

④ 对等协同的群体意识模型。引入群体意识函数  $G(\{s_1, s_2, \dots, s_n\}, T, A)$ , 整合各节点的数据流、通信协议以及联想融合结果(如基于投票的共识机制), 实现对分布式信息的聚合以形成统一的决策策略。

⑤ 信息交流共享机制。模型中考虑信息共享策略  $Z$ , 被纳入通信策略  $T(t, Z)$  中, 因此  $T$  不仅定义了节点间如何交流, 还定义了信息如何在群体中传播和共享。

⑥ 高层次的信息空间映射。通过映射函数  $M(G)$  将群体意识  $G$  转化为信息空间  $I$ 。

综合上述步骤, 得到一个改进后的协商范式的完整数学模型:

$$I = M(G(\{s_1, s_2, \dots, s_n\}, T(t, Z), A(s_i, K, T(t, Z)))) \quad (6)$$

在这个模型中,  $T$  和  $A$  现在是相互关联的, 它们共同定义了如何在节点之间进行有效的通信和信息交流。通过这种方式,  $G$  可以充分考虑所有节点数据和交流策略, 而  $I$  则代表了基于这些交流的决策和频谱资源分配。该模型更准确地描述了群体协商智能范式的核心要素, 特别是反映了如何通过群体内的协商和共享信息来优化决策过程。在实际应用中, 每个函数的具体形式和参数仍然需要根据具体的系统和环境来设计和调整。

下面针对在宽频段内时频捷变信号的群体自适应跟踪需求, 设计典型协商范式算法模型—电磁 Vicsek 集群算法, 核心概念如下。

① 群体各节点在频谱上以正或负两个方向来选择未来频谱轴上的运动方向;

② 各节点独立感知电磁信号强度并在时间、频率两维速率下跟踪信号源捷变;

③ 当节点在时频窗口检测到信号源后会紧跟信号源状态, 还会将对信号捷变的 3 个参数的估计结果相互分享, 通过协商统计的方式给出建议值更新这些节点的工作参数。

图 4 给出了有无协商范式 Vicsek 集群算法性能仿真结果, 可以发现该算法体现了协商范式特征, 通过利用无人感知节点的群体行为, 以及通过动态通信和协同决策来增强监测和干扰能力, 提出了一个敏捷高效处理复杂电磁环境的解决方案。协商范式具有高适应性、增强的决策能力、强鲁棒性等优势, 但它也存在增强节点间的通信与数据共享机制、实施机器学习算法、大规模模拟测试等方面的潜在需求与挑战。

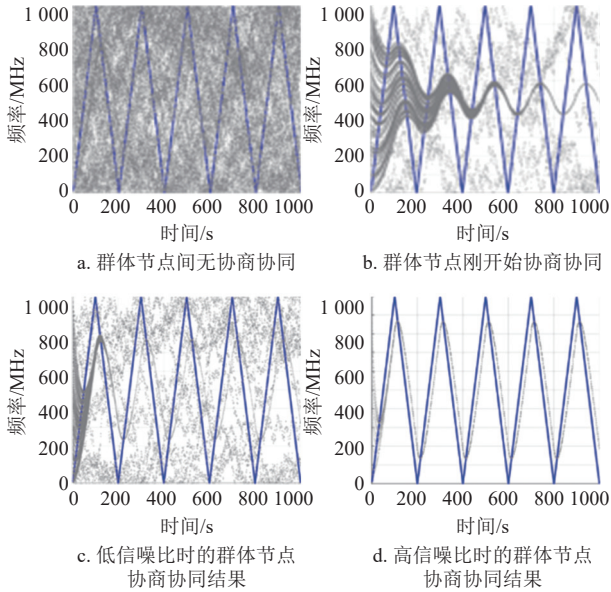


图 4 协商范式 Vicsek 集群算法性能仿真

### 2.3.3 启发范式

#### 1) 启发范式的核心本质特征

群体频谱智能启发范式是群体频谱智能系统的核心概念之一，旨在针对动态智能对抗的多维数据，利用群体博弈和智能演进的方式实现频谱资源的最优利用<sup>[28-30]</sup>。本质上，它将未来智能对抗扩展到了电磁频谱物理空间，并转化为可用的信息资源，以智能博弈方式估计和优化系统性能。其核心特征包括：数字智能平行战场、数据空间的动态角逐变化、网络化隐式语言生成、基于文化知识的数据公理化体系、博弈策略函数构造和智能反思迭代闭环 6 个环节，在此基础上，对信息空间进行高层次的抽象和映射。此 6 个环节的核心特征与本质要求表现如下。

① 数字智能平行战场支持。在这个环节中，智能体将整个战场电磁频谱抽象为一个数字化智能对抗的虚拟作战空间，通过对战场数字孪生和虚实联动模仿节点之间的作战互动和战术联合进行博弈优化，该平行战场能够容纳和模拟双方多智能体之间的竞争和协作。

② 数据空间的动态角逐变化。启发范式强调数据空间不是静态的，而是不断变化的，甚至信息是有误、虚假的。这种变化反映了智能对抗的动态本质，需要算法能够适应这种不断变化的环境。

③ 网络化隐式语言生成。在智能对抗中，节点在智能的加持下通过网络化隐式通信，将向共用语言沟通方式不断进化。这意味着信息交换将更加隐晦而高效，利用行为、模式或信号的细微变化来

隐喻地表达。

④ 基于文化知识的数据公理化体系。启发范式使用文化知识构建数据的公理化体系，这涉及将背景知识和群体的共同经验转化为数据处理和决策制定的规则。

⑤ 博弈策略函数构造。考虑智能对抗的本质，构造博弈策略函数是必要的。这个函数用于模拟智能体之间的策略互动，如何在频谱利用中制定和执行最优策略。

⑥ 智能反思迭代闭环。智能体通过智能反思迭代闭环不断评估和调整自己的行为。这种自我反思的过程允许智能体从过去的行为中学习，并根据反思的结果优化未来的策略。

在此基础上，对信息空间进行高层次的抽象和映射，意味着将复杂的电磁频谱物理属性和智能对抗的结果转化为有用的信息资源，为系统性能的评估和优化提供支持。启发范式的核心在于不断地适应与演进，通过群体智能和博弈理论的应用推动频谱资源管理的进步。

从系统的拓扑组织结构上看，其具有以下特征。

① 群体无中心，无严格组织结构，作战对象也具有智能化特征，表现为博弈过程。

② 群体代理节点有基于文化知识的数据公理化体系能力，其背景是共用的文化基础和隐式生成语言通信能力，并利用此特征最大化目标数据空间。

③ 群体各代理节点利用基于数字智能战场的博弈对抗现场应变能力实现智能算法和目标数据空间向任务目的空间的映射。

④ 群体运行流程具有平行战场的评估反思，博弈性能持续提升。

#### 2) 启发范式的基本数学模型构建

基于前文对群体频谱智能启发范式概念、特征等分析总结，本文利用抽象代数方式对协商范式运用数学语言工具进行描述界定。针对群体频谱智能的启发范式，建立一个数学模型。启发范式的数学建模过程如下。

① 数字智能平行战场评估。定义并行计算行函数  $P_{\text{eval}}(X, B, E, R)$  包含所有智能体决策变量集合  $X$ 、战场背景信息  $B$ 、敌我装备模型  $E$  和交战规则  $R$ 。对抗模拟器  $\text{Sim}(A, E, R)$  使用智能体行动  $A$  和战场现场计算引擎  $C$  来评估行动效果和提供作战控制决策。输出为  $X_{\text{opt}}$ ，代表最优决策变量集合：

$$X_{\text{opt}}^{(N)} = \arg \max_X [P_{\text{eval}}^{(t)}(X, B, E, R) | \text{Sim}(A, E, R)] \quad (7)$$

式中,  $N$  代表智能体的数量;  $t$  代表评估的迭代次数。

② 博弈策略函数构造。设定博弈策略函数  $G(X_{\text{opt}}, B, C)$ , 其中  $B$  代表基于宽度、深度搜索的决策参数,  $C$  代表当前战场状态。该函数借鉴了 AlphaGo 的决策结构, 执行并行分析和优选, 寻求最优博弈策略。输出为  $S_{\text{game}}$ , 代表智能体应采取的博弈策略集合:

$$S_{\text{game}}^O = \arg \max_S G^s(X_{\text{opt}}, B, C) \quad (8)$$

式中,  $O$  代表博弈策略的可能组合数量;  $S$  代表策略搜索过程中的步长。

③ 网络化隐式语言生成。语言生成函数  $L(H, I_{\text{curr}})$ , 其中  $H$  代表历史交互信息,  $I_{\text{curr}}$  代表当前可用交互方式。这个函数考虑历史数据和当前环境变量, 通过最优化过程产生适应当前战场需求的隐式语言。输出为  $L_{\text{evol}}$ , 代表演化而来的最优交互语言:

$$L_{\text{evol}}^{(H)} = \arg \max_L L^{(i)}(H, I_{\text{curr}}) \quad (9)$$

式中,  $H$  代表历史交互数据量;  $i$  代表当前交互方式的复杂度。

④ 基于文化知识的数据公理体系化。公理化函数  $Ax(L_{\text{evol}}, C_{\text{culture}})$ , 考虑了文化背景知识  $C_{\text{culture}}$  和演化语言  $L_{\text{evol}}$ 。输出  $Aximos$ , 为基于文化知识的数据公理化推演决策集:

$$Aximos^{(K)} = Ax(L_{\text{evol}}, C_{\text{culture}}) \quad (10)$$

⑤ 整合并优化信息空间映射。映射函数  $M(S_{\text{game}}, Aximos, X_{\text{opt}})$  将博弈策略、数据公理化决策和最优决策变量整合, 映射到信息空间。输出  $I_{\text{mapped}}$  为高层次信息空间的抽象表示, 可用于进一步的分析和决策, 上标表示映射计算的规模:

$$I_{\text{mapped}}^{(j)} = M(S_{\text{game}}, Aximos, X_{\text{opt}}) \quad (11)$$

整合所有步骤, 得到以下启发范式的数学模型:

$$\begin{cases} I_{\text{mapped}}^{(j)} = M(S_{\text{game}}^{(C)}, X_{\text{opt}}^{(N)}) \\ S_{\text{game}}^{(C)} = \arg \max_{S^{(C)}} G^{(s)}(Aximos^{(K)}, B, C) \\ X_{\text{opt}}^{(N)} = \arg \max_X P_{\text{eval}}^{(t)}(X, B, E, R) | \text{Sim}(A, E, R) \\ Aximos^{(K)} = Ax(L_{\text{evol}}^{(H)}, C_{\text{culture}}) \\ L_{\text{evol}}^{(H)} = \arg \max_L L^{(i)}(H, I_{\text{curr}}) \end{cases} \quad (12)$$

启发范式的数学模型在结构和功能上都要比融合和协商模型更为复杂和先进, 主要原因在于其设

计理念、计算方法和目标优化方面的高级特性。首先, 它调动了并行计算处理执行复杂问题的最优化操作, 从而在多个解空间可以同步并发搜索。其次, 利用如深度-宽度遍历决策等经典深度学习模型结构补充和丰富处理算法。再次, 生成型隐式语言通信在常规通信基础能力受限条件下, 不断提升信息交流的速度和效率, 突破香农定理约束。最后, 基于文化知识公理化与智能数字战场的的数据信息演绎, 复杂问题信息生成与模型进化的需求得以实现。

### 3 群体频谱智能支撑平台

群体频谱智能支撑平台是对系统软硬件的高度整合, 依托泛在传感器要素, 促进感知、决策、控制等信息资源跨域融合与协同运用, 通过信息高效融合、快速流动、交互共享达成信息增值, 实现信息能力转化为决策能力。支撑平台的总体架构如图 4 所示, 其主要包含 3 个部分, 分别是群体频谱智能软件可定义架构、群体频谱智能硬件可重构架构以及群体频谱智能博弈引擎。

#### 3.1 群体频谱智能硬件架构

群体频谱智能支撑平台中各设备均采用硬件模块化、通用化和标准化技术, 其射频、基带和信息处理硬件均采用先进可重构、在线加载技术, 可以按需实时推送功能算法程序和关键参数数据等, 能很好地实现各种不同的功能需要, 主要由群体频谱智能数字芯片、智能收发硬件以及群体频谱智能博弈引擎组成, 如图 5 所示。

群体频谱智能芯片主要包括 CPU 核、支持高密度信号处理和复杂神经网络硬件加速的智能处理核 (IASP)、高速互连总线以及通用 DMA, 以及 DDR、PCIE、GMAC 等接口, 具有小平台大算力的特点, 具备深度智能运算和群体规模智能演进能力, 可以实现面向群体频谱智能计算的复杂高密度信号处理算法、多神经网络协同算法的异构融合计算和在线增量学习, 实现极快响应、极高能效和精准识别。功能上利用智能算法对感知结果进行在线训练, 给出群体频谱利用决策, 并生成相应的控制算法。某自研芯片采用在线增量学习 AI 内核+高性能异构融合处理架构 (4 个 DSP 核+4 个加速核+通用 CPU 内部) 可支持 LSTM、CNN 和 RNN 等神经网络算法, SVM 和 K-means 机器学习算法, 硬件加速 FFT/FIR 等信号处理算法, 运行典型深度神经网络速度和准确率已经达到商业高性能计算工

作站同等指标水平等级，完全具备深度智能运算和群体规模智能演进能力，如图 6 所示。

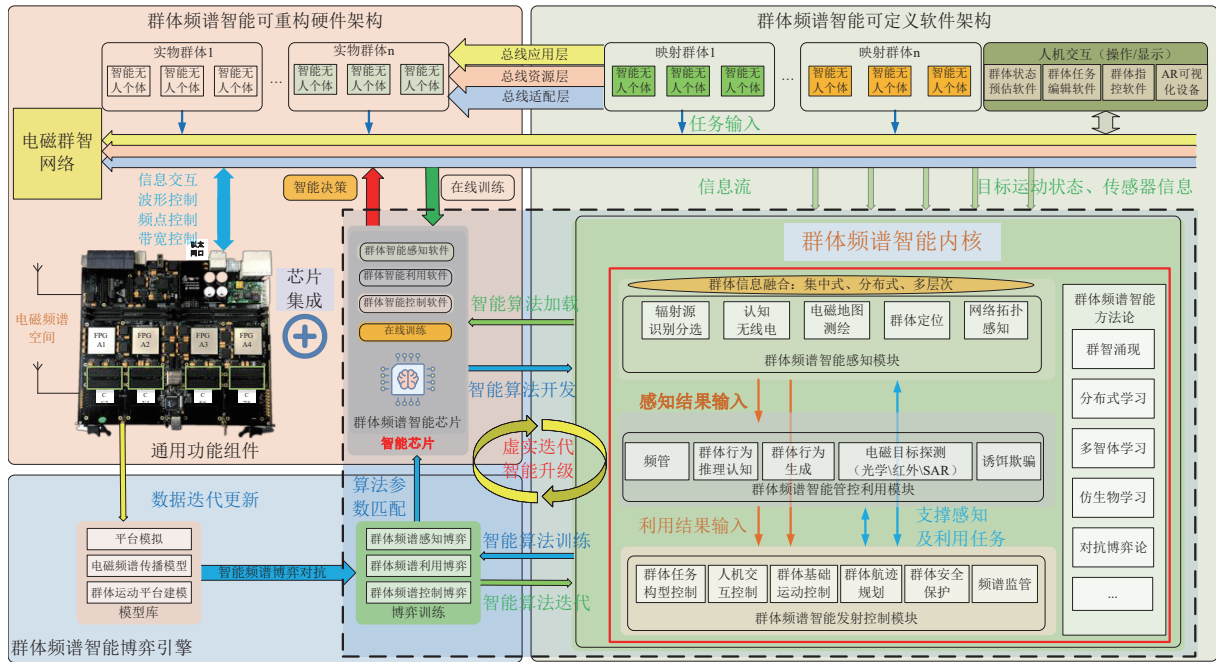


图 5 群体频谱智能支撑平台架构

6种网络部署实际性能			
网络种类	网络类型	性能@单核1 GHz	准确率
卷积神经网络	Lenet-5	≥313FPS	准确率≥95%
	JY-1D	≥272个测试样本/s	准确率≥95%
循环神经网络	Yolov 3-Tiny (实时视频目标检测)	20类目标 ≥60% ≥30FPS	“percon”类识别率 mAP≥45%
	RNN (imdb任务)	≥316个测试样本/s	准确率≥80%
	LSTM (CoLA任务)	≥296个测试样本/s	准确率≥60%
	JY-LSTM	≥63个测试样本/s	准确率≥90%
不同平台部署Yolov3-Tiny网络帧率比较			
平台	网络执行速度 (帧率)		
Intel core i 7 CPU (3.4 GHz)+GTX1080	141 FPS		
认知处理芯片@1 GHz	101 FPS		
ZYNQ Ultrascale+MPSOC (1.5 GHz)	30 FPS		
Jetson Nano 嵌入式平台 (1 GHz)	12 FPS		
Intel core i 5 CPU (3.1 GHz)	5 FPS		

图 6 某自研 AI 芯片计算能力对比

### 3.2 群体频谱智能软件架构

在载荷硬件资源数字化、标准化基础上，系统软件采用软件可定义系统的开放性设计框架。在系统软件中，专门设立控制平面和数据平面解耦群体与个体、软件和硬件，软件功能则涵盖了数字信号处理、平台控制、信息现场计算和任务筹划等多个层级软件重定位设计，可根据服务变化和实际需要动态调整功能效果并及时更新前端无人系统。利用

软件应用化设计实现虚拟化、灵活、多样和定制化的功能，对于具体用户提供客户化的专用智能化服务，实现服务应用程序和硬件的深度融合。通过 API 设计解除软硬件之间的耦合关系，推动“硬件资源虚拟化、系统软件平台化、应用程序多样化”。

群体频谱智能算法内核是群体频谱智能软件可定义架构的核心。围绕利用群体频谱智能解决电磁频谱域的复杂问题，遵循“群体频谱智能=群体共

智拓扑结构+个体智能算法/典型处理模型”新范式,提出了群体频谱感知、利用、控制等关键技术算法,聚焦于解决群体电磁频谱域中的高密度信息处理、高动态调度决策、高水平自主控制等问题。

群体频谱智能算法包括感知、利用和控制3个方面内容。其中,群体频谱智能感知模块通过对物理域模型输入的环境信息感知完成电磁目标的感知识别分选、认知无线电、电磁地图测绘、群体定位以及网络拓扑感知等,然后再利用感知收集的数据搭建电磁目标样本库;群体频谱智能利用模块通过接受软件输入的感知结果,完成通信资源调度、群体频谱行为推理认知、电磁目标探测等;群体频谱智能控制模块完成对频谱的管控以及群体的平台控制,具体包括群体任务构型控制、人机交互控制、群体基础运动控制、群体航迹规划等功能。

群体频谱智能感知是利用群体频谱智能理论在开放的电磁空间内,掌握辐射源群体的频谱行为、状态,以及整体的电磁空间活动态势;并对辐射源群体的行为进行分析、推理,识别其意图动向,从而对终端频谱行为进行分析预测,优化频谱效能、传输效能,实现面向群体的频谱智能最优决策,典型关键技术包括辐射源射频指纹识别<sup>[31]</sup>、无人机分布式态势感知融合技术<sup>[32]</sup>等。

群体频谱智能利用包括群体频谱资源利用和群体频谱平台智能化利用两个方面,其中,群体频谱资源利用是指群体利用电磁频谱作为信息载体实现通信资源的动态调度、冲突协调以及分布式探测等技术;群体频谱平台利用是指利用频谱感知的结果和群体平台的优势,将各功能简单的单一电磁设备通过分布式协同整合为一个功能强大的分布式电磁系统,激发个体认知智慧,汇聚群体频谱智能,从而提升电磁频谱的利用效率以及电磁频谱作用能力。目前对于群体频谱智能利用相关关键技术探索,主要包含基于频谱认知的资源分配技术<sup>[33]</sup>和分布式智能通信增强技术<sup>[34]</sup>等。

群体频谱控制包含群体电磁域运动控制和群体频谱管控,是支撑群体频谱感知和利用的关键技术。其中,群体电磁域运动控制是指如何在复杂、动态、不确定的电磁频谱环境下,对群体用户的编队整形、协同覆盖、连通保持以及轨迹规划等进行控制,以充分发挥群体相对于个体的规模优势,完成更加复杂的任务,并使无人群体能够更好地适应电磁频谱环境,使其具有更好的鲁棒性、更强的生

存能力。群体频谱管控则是指通过对电磁频谱空间进行监测,并对非法用频终端设备进行管制处置。对于群体频谱智能控制相关关键技术研究,有基于连通保持的无人机群体覆盖控制技术<sup>[35]</sup>、基于认知的无人机精准管控技术。

## 4 无人集群协同城市低空频谱智能应用

群体频谱智能采用“融合、协商、启发”的群体频谱智能认知范式,将群体智能算法、控制协同技术和应用系统相结合,通过融合不同的技术和方法,包括但不限于群体智能算法、机器学习、博弈论等,以处理复杂的电磁频谱环境。通过协商的机制,各个节点可以进行信息交换和协同决策,提高当前频谱利用效率。群体频谱智能还利用启发式方法,通过学习和适应,不断优化频谱资源的利用和分配策略。通过群体智能的集群涌现效应,整个系统可以实现更精准的频谱感知、更高效的频谱利用以及更动态的频谱管控。群体频谱智能的研究旨在提高频谱资源的利用效率,实现频谱共享和协同,推动无线通信网络的智能化和自主演进,提高网络的可靠性和鲁棒性。这将促进各行各业的创新和发展,实现智能社会的构建。

### 4.1 跨域多维度数据感知融合

城市电磁环境面临多径效应明显和目标定位精度低等问题,并且电磁用频设备体积小、隐蔽性高,导致传统的识别定位方式失效,给管控非法电磁用频设备带来难度。因此,考虑通过灵活运用群体频谱智能融合范式,挖掘各传感器单元在空间域、时间域、频谱域上的感知融合增益,进行节点间信号级融合处理和多手段的信息级匹配融合,降低城市环境的影响,提升群体定位精度。实现对感知目标全息立体描绘与表征,提高目标识别置信度。

首先在空间上,根据目标的空间分布及各个空间栅格中的目标稠密程度,通过各任务节点之间的空间协同分工,调度相应的感知节点到达相应区域执行感知任务,通过群体频谱智能“融合”覆盖对目标的大范围侦察监视;其次在频域上,根据各相关任务节点的频率感知范围、感知能力、处理性能等条件,对需要控守的频点向各任务节点进行协同分工,保证各目标频点均有相关的任务节点进行控守,通过群体频谱智能“融合”拼接实现对全频段目标的感知;最后在时域上,利用群体数量优势,通过轮守接力对重点区域进行连续感知。

### 4.2 电磁用频分簇协商管控

为实现对城市复杂电磁频谱环境的管控治理，可通过群体频谱智能协商范式结构实现群体分簇协同下的电磁频谱感知、探测、通信、评估能力，如图 7 所示。群体无人系统通过双向信息流程，组建“动态无中心”群体，单节点通过携带的感知传感器载荷对电磁环境、邻近节点策略进行感知计算，对等协作推理确定自身策略（从有限策略集中选取最优），从而建立动态分簇协作群并确立群体策略共识，逐渐形成对复杂频谱环境和目标状态变化的连续决策与群体博弈能力。

### 4.3 未知目标启发式电磁行为推理

城市环境下，未知电磁辐射源目标层出不穷，群体频谱智能系统需要基于原有知识储备逐步进化出具备知识启发、增量式发展进化的能力，从而实现对未知目标的快速反应和处置能力。群体频谱启发智能形成的过程首先源于一定的单体智能基础，通过短期博弈积累经验知识，依托在线可编程与智能学习系统架构，对辐射源波形、状态和行为规律

以及对通信信号、链路和连通关系进行智能分析和效能评估，优化短期博弈策略，实现效能提升，并与群内节点反复循环交互，开展群体多源数据深入挖掘、经验知识迁移生长，持续改进对目标行为意图、工作机制，以及通信组网状态、网络性能的认识理解，以达到持续适应目标变化和处置能力自主增强的目的，如图 8 所示。

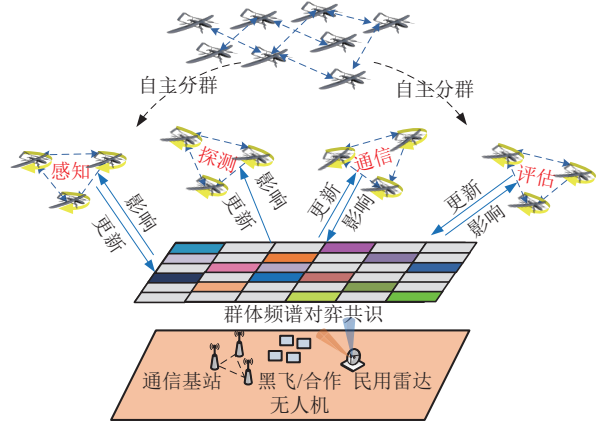


图 7 复杂城市环境下群体频谱分簇协同

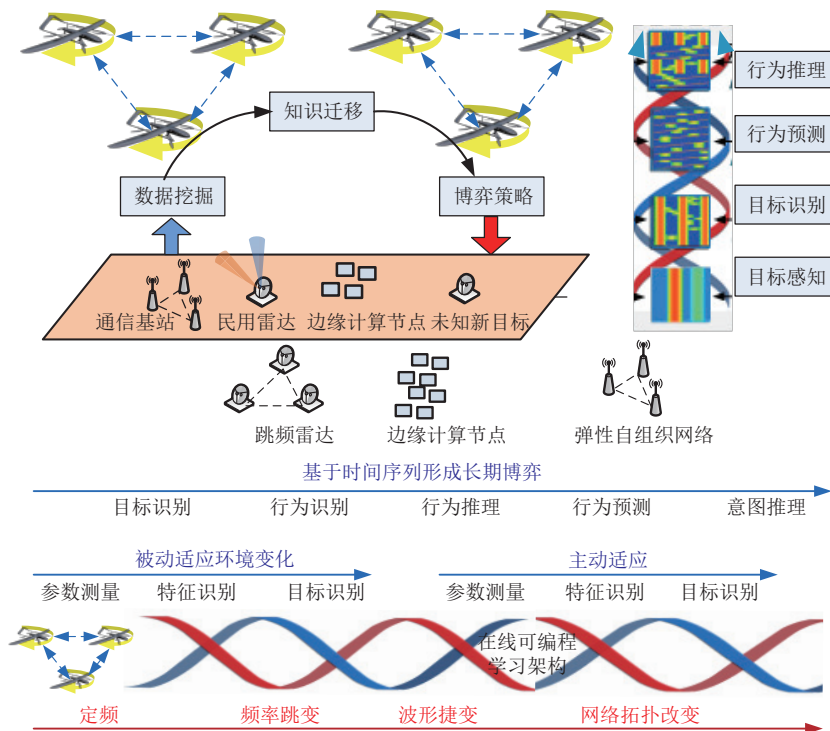


图 8 未知目标启发式电磁行为推理过程

## 5 群体频谱智能理论及技术发展愿景

群体频谱智能的智赋新能集中表现为：对于同构电磁服务群体可实现经典处理应用在实际场景下

的理论极限性能逼近（利用智能克服非理想、非线性误差干扰）；对异构电磁服务群体可实现单项性能能力的系统性继承与跨维衍生进化（利用智能克

服短板效应,具备跨维学习能力)等新质能力。

群体频谱智能未来发展需要从基础理论研究、智能芯片设计、共智结构应用和电磁群智网络开发创新4个方面并行研究突破,其中理论是灵魂,芯片是核心,应用是驱动,网络是骨骼。

1) 智能芯片:突破众和并行、样本内生、异构协同等强算力技术和智能加速单元动态可重构技术,发展强算力、可重构、全自主云端训练芯片。

2) 基础理论:突破群体频谱智能多学科前沿交叉性理论研究,发展创新群体共智拓扑结构思想,解决群体智能同生,能力共进化等核心问题。

3) 服务应用:突破定制化电磁服务链、智能资源协同整合、快速服务自适应调整等技术,解决群体频谱智能服务环路闭合、快速响应、动态演进等问题。

4) 网络开发:突破通用可重构智能硬件架构、智能软件可定义框架、系统智能能力在线可升级等技术,打造自主可控电磁群体智能综合服务基础支撑系统。

针对未来城市低空网运用场景以及军事领域发展需求,以群体频谱智能融合协商启发认知能力范式为基准,提出未来群体频谱智能理论及技术发展愿景。

1) 具备更加灵活快速的OODA决策闭环建链回路,支撑毫秒量级闭环决策效率生成

单智能节点执行感知、利用、控制等任务往往遵循固定规则的观测(Observe)-推理(Orient)-决策(Decision)-执行(Action)环路,在群体频谱智能体系架构中,某一个体的认知能力产生是嵌套在其他个体的认知逻辑循环中的,各节点通过融合协商启发实现面向观测协同、推理协同、决策协同以及执行协同的分布式异构OODA决策环路,提高OODA建链效率,实现从个体线性叠加到复杂群智涌现,从缓慢单一变化到快速多模态的能力突变。

2) 具备一点感知、全网计算的群体频谱感知计算能力,支撑实现单体局部观测、群体全局寻优能力

单体频谱智能采用集中式计算架构,单一个体完成电磁频谱感知,由中心节点进行集中处理。群体频谱智能采用分布式计算架构,单个节点具备感算一体能力,在单体计算资源触底时,通过群体之间计算资源的统一调度,在多个节点上分别完成数据处理和信息提取,实现一点感知、全网计算的信

息共享利用,同时支撑实现基于单节点局部观测的全局能力寻优。

3) 具备平台与算力、硬件与软件解耦体系架构,支撑实现资源池化可共享的资源高效利用能力

单体频谱智能一般采用面向任务的分别控制,即载荷系统、平台系统独立进行控制,在任务层面进行频段、空间或者时间维度上的协同。在群体频谱智能技术体系中,电磁频谱、无人平台、业务载荷3个维度都离散化为资源,依据服务需求在更高层次、更细粒度实现智能体之间的协同、跨域要素之间的协同以及探通导控等电磁空间用频之间的协同。

4) 具备模型参数在线增量式迭代能力,适应对未知场景、未知目标的任务需求

当前阶段,在通用人工智能尚未完全突破的情况下,单体频谱智能一般通过大量数据进行离线学习训练,实现智能能力的升级与更新,周期相对较长。群体频谱智能在大量个体的独立观测和信息处理的基础上,通过“融合、协商、启发”共智拓扑结构自主内部相互协调,最终达成群体共识,并利用系统软件可定义、硬件可重构和在线可升级能力特征,进行群体资源能力统一协调配合,将大模型、大算力拆分到时域维度,在线不断适应变化并持续演进发展。

## 6 结束语

围绕电磁频谱空间,提出了群体频谱智能的概念,即通过群体以电磁频谱作为信息传输媒介进行融合、协商、启发而产生的新质智能能力。并且,基于“融合-协商-启发”的群体频谱智能概念,针对传统各种“有群无智”现象进行了深度剖析与解读,通过深入分析核心理念与基本科学理论,提出了群体共智拓扑结构核心思想,解决了“无人电磁应用群体中各单元间组织联系和信息流转”的核心问题。其次,针对电磁空间分布异构、电磁频谱决策捷变以及电磁频谱冲突多发等问题,提出了群体频谱感知、利用、控制等关键技术,以及面向融合协商启发的场景应用。最后,围绕城市低空网及军事领域发展需求对群体频谱智能的理论及技术发展进行了展望。

## 参考文献

[1] 崔铁军. 加强电磁空间信息资源认知与利用研究前瞻布

- 局[J]. 中国科学基金, 2021, 35(5): 681.
- CUI T J. A forward-looking layout for strengthening research on the cognition and utilization of information resources in electromagnetic space[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(5): 681.
- [2] 王雪松, 李健兵, 徐丰, 等. 电磁空间信息资源的认知与利用[J]. 中国科学基金, 2021, 35(5): 682-687.
- WANG X S, LI J B, XU F, et al. Cognition and utilization of electromagnetic space information resources[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(5): 682-687.
- [3] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
- ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: Vision, challenges, and key technologies[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2019, 49(8): 963-987.
- [4] 王海涛. 自主无人系统: 概念、体系架构和设计要素[J]. 电信快报, 2021(5): 6-9.
- WANG H T. Autonomous unmanned system: Concept, architecture and design elements[J]. *Telecommunications Information*, 2021(5): 6-9.
- [5] 宋长庆. 频谱共生环境中的跳频通信关键技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- SONG C Q. Key technology of frequency-hopping communication in spectrum symbiosis environments[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [6] 张蔚敏, 蒋阿芳, 纪学毅. 人工智能芯片产业现状[J]. 电信网技术, 2018, 2(16): 67-71.
- ZHANG W M, JIANG A F, JI X Y. The current status of artificial chip industry[J]. *Telecommunications Network Technology*, 2018, 2(16): 67-71.
- [7] 郭静原. 国内首款云端人工智能芯片发布达世界先进水平[J]. 仪器仪表用户, 2018, 25(7): 62-62.
- GUO J Y. China's first cloud artificial intelligence chip has reached the world's advanced level[J]. *Instrument Users*, 2018, 25(7): 62-62.
- [8] 李钢, 李繁荣, 程健. 应用场景需求: 驱动人工智能芯片设计发展[J]. 前沿科学, 2018, 12(4): 37-40.
- LI G, LI F R, CHENG J. Application scenario requirements: Drive the development of artificial intelligence chip design[J]. *Frontier Science*, 2018, 12(4): 37-40.
- [9] 杨鸿珍, 王云焱, 吴建伟, 等. 基于人工智能的高可信嵌入式操作系统设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(16): 153-155.
- YANG H Z, WANG Y Y, WU J W, et al. Design of high-credibility embedded operating system based on artificial intelligence[J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(16): 153-155.
- [10] MILAN S. Image processing, analysis, and machine vision[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2014, DOI:10.1007/978-1-4899-3216-7.
- [11] OUYANG L, WU J, JIANG X, et al. Training language models to follow instructions with human feedback[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2022, 35: 69.
- [12] TAMM U. Claude Shannon in chess review[C]// *Proceedings of the Information Theory and Applications Workshop*. San Diego, CA: IEEE, 2017: 1-3.
- [13] ACKERMAN E. A robot for the worst job in the warehouse: Boston dynamics' stretch can move 800 heavy boxes per hour[J]. *IEEE Spectrum*, 2022, 59(1): 50-51.
- [14] 王玫, 朱云龙, 何小贤. 群体智能研究综述[J]. 计算机工程, 2005, 31(22): 3.
- WANG M, ZHU Y L, HE X X. A survey of swarm intelligence[J]. *Computer Engineering*, 2005, 31(22): 3.
- [15] JING W, BENI G. Swarm intelligence in cellular robotic systems[C]// *In Proceed of the Meeting of the Robotics Society of Japan*. [S.l.]: Springer, 1993: 703-712.
- [16] BLUM C, DORIGO M, BIRATTARI M. Ants-ant colony optimization and swarm intelligence[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, 49(8): 767-771.
- [17] MA J, ZHAO G D, LI Y. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(11): 4502-4507.
- [18] WANG Y, LIU M, YANG J, et al. Data-driven deep learning for automatic modulation recognition in cognitive radios[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 4074-4077.
- [19] 李永生, 董光焰, 陈凯, 等. 基于卡尔曼滤波的无源定位精度分析[J]. 火箭与制导学报, 2022, 42(4): 43-46.
- LI Y S, DONG G Y, CHEN K, et al. Accuracy analysis of passive location based on Kalman filter[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2022, 42(4): 43-46.
- [20] 李泓余, 韩路, 李婕, 等. 电磁空间态势研究现状综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(4): 549-555.
- LI H Y, HAN L, LI J, et al. A summary of the present situation of electromagnetic space situation research[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021, 19(4): 549-555.
- [21] ZHANG W X, ZHAO T, ZHAO Z K, et al. An intelligent strategy decision method for collaborative jamming based on hierarchical multi-agent reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 10(4): 1467-1480.
- [22] 夏心江. 大规模分布式 MIMO 系统的波束成形技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- XIA X J. Research on beamforming technology for large-scale distributed MIMO systems[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [23] 鞠涛, 黄高明, 满欣. 任意分散布阵通信干扰机空间功率合成方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(8): 57-61.
- JU T, HUANG G M, MAN X. A spatial power synthetic method for random distributed array communication jammers[J]. *Fire Control & Command Control*, 2020, 45(8): 57-61.
- [24] EJAZ W, HATTAB G, CHERIF N, et al. Cooperative spectrum sensing with heterogeneous devices: Hard combining versus soft combining[J]. *IEEE Systems Journal*, 12(1): 981-992.

- [25] 闫明松,魏旭鸿.海上编队舰载雷达协同探测技术研究[J].舰船电子对抗,2021,44(4):7-11.  
YAN M S, WEI X H. Research into the cooperative detection technology of shipborne radar for sea formation[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44(4): 7-11.
- [26] CHANG H H, SONG H, YI Y, et al. Distributive dynamic spectrum access through deep reinforcement learning: A reservoir computing-based approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 6(2): 1938-1948.
- [27] NASIR Y S, GUO D N. Multi-agent deep reinforcement learning for dynamic power allocation in wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 37(10): 2239-2250.
- [28] 张辉,王梦琦,任挺,等.新型作战模式下的通信对抗及其效能评估发展探索[J].通信技术,2021,54(10):2391-2397.  
ZHANG H, WANG M Q, REN T, et al. Development exploration of communication confrontation and its effectiveness evaluation under new combat mode[J]. Communications Technology, 2021, 54(10): 2391-2397.
- [29] LI L S, JIANG H, HE H B. Deep transfer cooperative sensing in cognitive radio[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 10(6): 1354-1358.
- [30] KOUSSHIK A M, HU F, KUMAR S. Intelligent spectrum management based on transfer actor-critic learning for rateless transmissions in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 17(5): 1204-1215.
- [31] 俞佳宝,胡爱群,朱长明,等.无线通信设备的射频指纹提取与识别方法[J].密码学报,2016,3(5):433-446.  
YU J B, HU A Q, ZHU C M, et al. RF fingerprinting extraction and identification of wireless communication devices[J]. Journal of Cryptologic Research, 2016, 3(5): 433-446.
- [32] 高杨,李东生,程泽新.无人机分布式集群态势感知模型研究[J].电子与信息学报,2018,40(6):1271-1278.  
GAO Y, LI D S, CHENG Z X. UAV distributed swarm situation awareness model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(6): 1271-1278.
- [33] 唐玉洁.基于机器学习的认知无线电频谱感知[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
TANG Y J. Cognitive Radio Spectrum Perception Based on Machine Learning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [34] HAYKIN S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 23(2): 201-220.
- [35] 贾高伟,王建峰.无人机集群任务规划方法研究综述[J].系统工程与电子技术,2021,43(1):99-111.  
JIA G W, WANG J F. Research review of UAV swarm mission planning method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 99-111.

编辑 税红