 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i6.10807

Research on Multi-Agent Collaborative Empowerment for Short-Wave Spectrum Perception and Channel Optimization

Hui Wu

Unit 31305, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Shortwave communication offers numerous advantages, including long coverage range, flexible networking capabilities, and strong resilience against damage, making it widely applicable in both civilian and military domains. However, its spectrum environment is significantly influenced by factors such as ionospheric variations, solar activity, geographical location, time-of-day differences, and human interference, resulting in channel quality that exhibits strong time-varying, non-stationary, and uncertain characteristics. Traditional spectrum monitoring and channel selection methods predominantly rely on fixed rules or single-node observations, rendering them ill-suited for complex dynamic environments. Multi-agent collaborative approaches leverage distributed sensing, information sharing, and joint decision-making to enhance shortwave spectrum utilization efficiency and link reliability. This paper investigates how multi-agent collaboration enables advanced shortwave spectrum sensing and channel optimization, analyzing its technical rationale, implementation challenges, and optimization pathways, with the aim of providing valuable insights for developing intelligent shortwave communication systems.

Keywords

multi-agent; shortwave communication; spectrum sensing; channel selection; collaborative optimization

多智能体协同赋能短波频谱感知及信道优选优化研究

吴辉

31305 部队，中国 · 四川 成都 610000

摘　要

短波通信具备覆盖距离远、组网灵活、抗毁性强等诸多优势在民用和军事领域有着广泛应。然而，其频谱环境受到电离层变化、太阳活动、地理位置、时段差异、人为干扰等因素的显著影响，信道质量呈现出强时变、非平稳、不确定的特性。传统频谱监测和信道选择大多依赖固定规则或者单节点观测，很难适应复杂动态环境。多智能体协同方法能够借助分布式感知、信息共享、联合决策，提高短波频谱利用效率、链路可靠性。本文围绕多智能体协同赋能短波频谱感知、信道优选展开研究，剖析其技术逻辑、应用难点、优化路径，期望能为智能短波通信系统建设提供一定参考。

关键词

多智能体；短波通信；频谱感知；信道优选；协同优化

1 引言

短波通信在应急通信、海洋通信、远距离指挥、复杂地形通信当中依然具备着重要价值。和超短波、卫星通信等方式相比较而言，短波通信不依赖固定的基础设施，而是能够凭借电离层反射达成远距离传输。不过，短波信道受到自然环境、频谱拥塞的影响比较显著，通信频点能否使用、信道是否稳定、干扰是否严重，常常会随着时间与空间迅速变化。要是依旧采用人工扫频、经验选频或者单站感知的方式，就容易出现选频滞后、链路中断、频谱资源浪费等情况。将多智能体协同机制予以引入，能够促使多个监测节点、通信节点、决策节点在统一目标之下达成频谱感知、状态判断、信道优选，进而提高短波通信的智能化水准。

【作者简介】吴辉（1981–），男，中国湖北钟祥人，本科，工程师，从事短波通信研究。

2 多智能体协同赋能短波频谱感知的理论基础

2.1 短波频谱环境具有复杂动态特征

短波频段的传播条件并非始终保持固定不变，其可用频率会受到电离层高度、电子密度、昼夜变化、季节交替、太阳活动等多种因素的影响。同一频点在不同时间、不同距离、不同方向上进行传播时，其效果有可能存在显著差异，在白天的时候，较高频率的传播条件相对较好，而在夜间，低频段的稳定性或许会有所增强。除了自然传播变化之外，短波频谱还会面临广播信号、工业噪声、突发干扰、同频占用等方面的影响，进而致使信道质量在短时间内出现波动。传统的单点监测仅仅能够反映局部状态，很难掌握区域频谱

趋势。要是某个监测节点处于噪声较强或者地形遮挡的区域，那么其判断结果可能会偏离实际链路需求。所以说，短波频谱感知需要从单站观测转变为多点协同，从静态检测转变为动态跟踪，从简单的能量判断转变为综合趋势认知。

2.2 多智能体协同适应分布式感知需求

多智能模式统是由众多具有感知、通信、学习和决策方面能力的节点所构成的，很适合短波频谱分布式感知的需求。不一样的智能体能够被部署在不同的地域、不一样的高度或者不同的通信方向上，各自去采集像是频谱占用、信号强度、噪声水平、误码率、信噪比、链路连通状态等相关信息。和集中式监测比较而言，多智能体协同可使得感知范围得以扩大，降低单节点失效出现的风险，并且通过数据融合来修正局部观测的偏差。一旦某一个节点察觉到干扰增强，其他节点能够一起判断这是属于局部异常还是区域性占用，以此来提高频谱趋势判断的可靠性。

2.3 智能决策为信道优选提供新支撑

短波信道优选并非仅仅取决于频点是否空闲，还需要综合考虑传播可达性、干扰水平、业务优先级、传输速率、链路稳定性、切换代价等诸多因素。在多智能体协同框架之中，各个节点能够结合历史通信质量、实时感知结果，对候选信道展开动态评估，并且借助强化学习、博弈决策、分布式优化等方法来修正选频策略。智能体在持续的交互过程中积累环境经验，进而能够识别特定时段、地域、业务场景下的传播规律，提前对较优信道范围进行预测，减少盲目扫描的情况，提高选频速度、链路保持能力。

3 短波频谱感知与信道优选面临的现实难点

3.1 感知数据质量不稳定影响判断精度

多智能体协同需要持续且准确的频谱数据作为支撑，然而短波感知得到的结果很容易受到环境噪声、设备性能、天线条件、采样参数等方面的影响。不同节点在接收灵敏度、滤波能力、安装环境等方面存在差异，这有可能致使同一频点的观测结果出现不一致的情况。在强干扰场景当中容易出现虚警现象，而在弱信号条件下则又有可能发生漏检问题。短波传播过程中存在的衰落、多径、远近效应，同样会使单一能量检测的可靠性有所削弱。要是数据在没有经过校准、清洗、可信度评估的情况下便进入协同决策环节，那么误差有可能会被放大，从而影响到全网选频的效果。

3.2 智能体协同通信存在时延与开销矛盾

多智能模式协同中，节点之间需要交换频谱状态、链路质量、决策信息。然而短波通信存在带宽有限、稳定性不足的问题，这使得其难以承担高频率、大规模原始数据的传输任务。要是各节点频繁上传完整的感知数据，那么通信开销会增加，系统时延也会加大，甚至会挤占业务传输资源，要是信息共享过少，协同判断能力就会被削弱，智能体就会一直处于局部决策状态。随着节点规模的扩大，融合中心、协同链路也有可能形成瓶颈。

3.3 信道优选目标之间存在复杂权衡

短波信道的优选工作并非只是单纯地挑选空闲频点，而是需要全面考量诸如信噪比、占用率、传播稳定性、误码率、业务优先级、切换代价等一系列因素。比如说，有某个频点当前的质量看起来还不错，然而却有可能被其他业务所占用，又有某一信道相对比较空闲，可是其传播持续性却有所欠缺。不同的业务对于信道的要求也不尽相同，像语音通信就比较看重连续性，数据传输主要关注传输速率、误码率，则更加强调可靠性、低切换风险。在多智能体协同的场景当中，还需要防止多链路争抢同一个优质频点。

4 多智能体协同优化短波频谱感知的技术路径

4.1 构建分层分布式感知架构

短波频谱感知系统能够采用分层分布式架构，这种架构会把智能体划分成前端感知层、区域协同层、全局决策层。前端感知层是由监测节点、通信终端、移动平台共同构成的，其职责是采集本地频谱占用情况、信号强度、噪声背景还有链路质量等方面的数据。区域协同层会对相邻或者同任务节点的观测结果做初步融合，进而形成局部频谱趋势。全局决策层会综合不同区域的数据，生成候选信道集、优选策略。分层结构可以减少原始数据长距离传输时产生的压力，同时也方便依据任务需求来调整协同范围。

4.2 强化频谱数据融合与可信评估

多源感知数据融合对提高短波频谱判断的准确性起着关键作用。系统需要对不同智能体上传的数据进行时间同步、尺度统一、异常剔除，以此防止因采样差异而造成误判。针对每个感知节点而言，可以依据历史准确率、设备状态、地理位置、当前信噪环境赋予其不同的可信权重。要是某一节点长时间出现偏差或者处于恶劣噪声环境中，那么其数据权重应该适当降低，要是多个节点在不同位置都检测到同一频点被占用，系统就能够提高判断置信度。数据融合方法不应该仅仅局限于简单平均，还可以结合证据理论、聚类识别、深度学习模型，从而综合判断频点空闲概率、干扰类型、传播可用性。可信评估在决策反馈环节也应该贯穿始终，要是实际通信效果与预测结果偏差比较大，系统就需要反向修正相关节点权重、模型参数。

4.3 引入协同学习提升环境自适应能力

短波频谱环境长期规律与短期扰动同时存在的特性，仅仅凭借预设规则很难覆盖全部场景。多个智能体能够借助协同学习持续积累选频经验，进而提高系统对于复杂环境的适应能力。强化学习适宜处理动态决策问题，智能体可以把信道选择当作动作，将通信成功率、传输误码率、链路保持时间、切换成本当作奖励，经过不断反复交互形成比较优化的策略。多智能体强化学习还能够处理节点之间的合作和竞争关系，促使不同链路在有限频谱资源的情况下达成协调分配。鉴于短波环境中训练数据比较分散并且通信开销受到限制，可以采用联邦学习方式，让各个节点在本地训练模型，

只上传模型参数或者梯度信息，从而减少原始数据传输。通过协同学习，系统能够从“被动检测”逐渐转变为“主动预测”、“提前选频”。

5 短波信道优选优化的实践对策

5.1 建立多指标综合评价模型

短波信道优选需从单纯依据可用性判断转变为进行多指标综合评价。评价模型所涵盖的指标有频点占用率、接收信号强度、信噪比、误码率、传播稳定性、干扰风险、业务匹配度、切换代价等。在不同场景之中，指标权重应当灵活予以调整。像应急指挥场景，就需要提高可靠性与稳定性的权重，远程数据传输场景，则要更加关注速率、误码表现；动中通信，还得重视信道持续可用时间。进行模型设计时，要防止因指标过多致使计算变得复杂，同时也不能过度简化从而造成判断失真。比较可行的办法是，先借助感知数据筛选出候选信道，接着运用综合评分模型进行排序，最终结合业务优先级、频谱占用规则来确定实际使用的信道。多指标评价可让优选结果更符合通信任务的需求。

5.2 完善动态切换与冲突协调机制

在短波通信进行过程当中，所优选的信道并不是一旦确定下来之后就会长时间保持不变，而是需要依据环境的变化来进行动态调整。系统需要设定出合理的切换阈值，如此一来，才能够避免出现因为频繁切换而导致链路不稳定的情况，同时也要防止当信道质量明显变差的时候却长时间不进行切换。多智能体协同能够提前对备用信道队列加以维护，在主用信道出现干扰增强或者误码率升高的状况时，系统就可以迅速切换到备选信道，进而减少通信中断所持续的时间。对于多链路并行运行的场景而言，还需要建立冲突协调机制，以此来避免多个智能体同时抢占同一个优质频点。可以采用优先级分配协商博弈等方式，按照业务的重要程度、链路质量的需求、频谱占用的状态来展开协调。只有将动态切换与冲突管理结合在一起，才能够让信道优选从单点最优转变为全局可用。

5.3 加强工程化部署与安全保障

要想多智能体短波频谱感知及信道优选切实发挥功效，还得考量工程部署的具体条件。感知节点需要拥有一定的抵抗恶劣环境的能力，像天线布设、供电方式、时间同步、设备校准等方面，都应当被纳入系统设计的范畴之内。软件平台应当具备可视化频谱展示、模型更新、故障报警、人工干预等功能，不能完全依靠自动决策。鉴于短波通信常常作为后手被应用于，系统也需要着重关注安全防护工作，避免虚假感知数据、恶意干扰、模型污染对信道选择造成影响。对于智能体之间交换的信息，要进行身份认证、完整性校验、权限控制等操作。工程化部署还需要预留出人工经验与智能算法相结合的空间，当模型置信度不足或者环境异常恶劣的时候，由人员参与决策过程。

6 结语

多智能体协同给短波频谱感知、信道优选带来了全新的技术途径。针对短波信道具有时变性强、干扰复杂、单点感知不足等状况，多节点分布式观测、数据融合、协同学习联合决策能够提高频谱认知能力。在实际应用中，相关研究不能仅仅看重算法复杂度，还应当关注数据质量、通信开销、业务需求、工程可部署性。未来的短波通信系统需要建立分层协同架构，完善多指标评价模型，优化动态切换机制，强化安全防护与人工可控设计。借助技术与管理协同推进，短波通信会拥有更强的选频能力和链路保障能力，更出色地服务应急保障、远程通信复杂环境下的信息传输任务。

参考文献

[1] 王汉生,李晓,徐坤,等.基于电磁频谱感知技术的下一代短波通信发展[C]//中国指挥与控制学会（Chinese Institute of Command and Control）.第十一届中国指挥控制大会论文集.国防科技大学信息通信学院;海南宝通实业公司;,2023:727-732.

[2] 饶伟.频谱感知技术在短波通信中的运用研究[J].科技展望,2016,26(25):13.

[3] 钱枫.短波信道下认知无线电频谱感知技术研究[D].桂林电子科技大学,2011.

[4] 侯瑞倩,余心乐,徐伟掌.短波通信中的频谱感知算法研究[J].中国新通信,2016,18(23):19-21.

[5] 常虹,仇洪冰.基于高阶累积量的短波信道频谱感知技术[J].桂林电子科技大学学报,2012,32(04):277-280+297.