

电磁频谱适应性管控体系架构及演化规则研究

刘 威

中国电波传播研究所 山东 青岛 266107

【摘要】：随着新一代信息技术与多域应用场景的深度融合，电磁频谱作为关键战略资源的管控需求日益复杂，传统静态管理模式难以适应动态频谱环境与跨域协同要求。基于此，本文从理论与实践需求出发，分析了频谱资源稀缺性、动态分配机制及跨域融合等核心挑战，提出了包含物理层、网络层、中间件层与应用层的分层架构，设计了态势感知、智能决策、动态执行与协同共享四大功能模块，并构建了基于威胁感知的演化触发机制、多阶段演化路径模型及三层评估维度，以期为实现频谱资源的高效配置与安全保障提供系统性解决方案，推动频谱治理向主动适应与智能优化方向发展。

【关键词】：电磁频谱；适应性管控；体系架构；演化规则

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.050

引言

电磁频谱作为现代信息社会的核心战略资源，是连接物理世界与数字空间的关键纽带，其高效利用与安全管控直接关系到国家安全、经济发展和科技创新。随着新一代通信技术、人工智能、低空经济等新兴领域的快速发展，电磁频谱的应用场景不断拓展，频谱资源的稀缺性与需求增长之间的矛盾日益突出。同时，电磁空间作为独立作战域的地位持续凸显，跨域融合与协同管控成为技术发展的必然趋势。在此背景下，电磁频谱管理需要构建具备自主演化能力的适应性管控体系，才能在复杂电磁环境下实现资源优化配置与安全保障，推动频谱治理从被动响应向主动适应的范式转变。

1 电磁频谱适应性管控的需求分析

1.1 理论需求

首先，资源稀缺性与需求爆发性增长的矛盾，5G 基站密度较 4G 显著提升，6G 研发推动太赫兹频段开发，低轨卫星星座部署使近地轨道频谱资源争夺白热化。德国罗德与施瓦茨公司的太赫兹监测技术虽大幅提升频率分辨率，但全球可用频谱资源消耗速度持续加快。其次，静态分配机制与动态应用场景的不匹配，传统固定频段划分导致 3.5GHz 等黄金频段利用率长期处于较低水平，而美国 FCC 通过 CBRS 系统实现的动态共享模式证明，频谱利用率可得到显著提高。最后，单一域管控与跨域融合需求的冲突，电磁空间已与陆海空天网形成作战域交织，美军《联合电磁频谱作战手册》明确将电磁频谱列为独立作战域，要求理论体系突破传统电子战范畴。

1.2 实践需求

在民用领域，英国伦敦帝国理工学院开发的“频谱链”区块链平台，通过智能合约实现频谱动态租用，显著提升物流企业通信覆盖率并降低运营成本[1]；韩国三星电子的智能小基站技术在城市中心实现快速频段切换，有效降低 5G 干扰。军事应用更凸显技术对抗性，俄罗斯“克拉苏哈-4”系统采用波束成形技术，具备远距离干扰能力；以色列“频谱卫士”系统通

过 AI 算法区分军用、民用与非法信号，在边境管控中实现定向压制。此外，量子技术正重塑管控范式，日本东京大学的量子传感频谱分析仪具备极高频率分辨率，欧盟“量子频谱链路”项目实现跨国加密传输。大量实践表明，未来管控体系需同时满足民用共享效率、军事对抗精度与量子安全保障的复合需求。

2 电磁频谱适应性管控体系的架构设计

2.1 体系架构总体设计

电磁频谱适应性管控体系架构设计需构建“感知-决策-执行-反馈”的动态闭环系统，通过分层解耦实现功能模块化与技术兼容性。架构设计以物理层为基础，网络层为纽带，中间件层为核心，应用层为接口，形成具备自调节能力的技术框架。

物理层部署全域感知网络，采用固定监测站、移动监测车、便携设备与无人机/卫星平台协同组网。固定监测站按城市网格与边境线布设，覆盖 30MHz-6GHz 主流频段；移动监测车配置超宽带接收阵列，实现城区复杂环境下的信号追踪；无人机搭载轻量化频谱传感器，对山区、海洋等盲区进行补充监测；低轨卫星载荷负责广域频谱普查，形成空天地一体化感知网络[2]。各类设备需满足频率覆盖 1Hz-1THz、时间分辨率不低于 1ms、空间定位精度优于 10 米的技术指标。

网络层构建加密传输体系，采用 VPN 与 SSL 混合加密协议保障数据传输安全。设计分布式节点通信协议，支持监测数据的实时汇聚与边缘计算。针对高优先级指令传输，建立量子密钥分发信道，通过单光子偏振态编码实现指令防窃听。网络带宽需满足单节点 100Mbps 实时数据回传需求，端到端延迟控制在 50ms 以内。

中间件层开发异构数据融合引擎，整合频谱监测数据、设备台账信息、地理空间数据等多源数据。采用 Hadoop 分布式计算框架处理 TB 级频谱数据，通过 Spark Streaming 实现秒级实时分析。构建基于知识图谱的频谱知识库，收录信号特征、设备参数、干扰模式等结构化数据，为决策系统提供支撑。

应用层设计开放式业务接口, 提供频谱规划、干扰治理、应急保障等标准化服务。采用微服务架构实现功能模块的独立部署与弹性扩展, 支持第三方应用接入。用户界面需具备多维度可视化能力, 通过 GIS 地图动态展示频谱占用热力图、干扰源分布轨迹及设备工作状态。

2.2 功能模块划分

功能模块按业务流程划分为态势感知、智能决策、动态执行、协同共享四大核心模块, 各模块通过标准化接口实现数据交互与功能联动。

其一, 态势感知模块负责全域频谱数据采集与预处理。部署软件定义无线电设备实现宽频段信号接收, 通过数字中频处理技术提取信号的频率、功率、调制方式等特征参数。开发自适应滤波算法消除多径干扰, 采用小波变换技术检测短时突发信号。建立信号特征库, 通过模板匹配与机器学习分类算法, 实现合法信号与干扰信号的实时识别, 识别准确率需达到 98% 以上。

其二, 智能决策模块构建多层次决策模型。基础层采用规则推理实现常规频谱分配, 基于预设策略完成固定频段的划分与指配; 中间层运用强化学习算法优化动态频谱共享, 通过 Q-learning 方法求解频谱分配最优解, 使频段利用率提升至 80% 以上; 高层级引入博弈论模型处理跨域频谱冲突, 建立民用与军用频谱的优先级调度机制[3]。决策系统需具备自学习能力, 通过持续积累历史数据优化决策模型, 决策响应时间控制在 1 秒以内。

其三, 动态执行模块实现频谱管控指令的自动下发与设备控制。开发指令生成器将决策结果转化为标准化控制命令, 通过专用接口协议控制基站、干扰设备等执行单元。设计分级执行机制, 常规调整通过远程软件配置完成, 紧急情况下可触发硬件级频率切换。建立执行效果反馈通道, 实时采集设备状态数据, 形成决策-执行-反馈的闭环控制。

其四, 协同共享模块构建跨部门频谱资源池。采用区块链技术建立分布式频谱账本, 通过智能合约自动执行频谱租用、归还等交易流程。设计基于角色的访问控制机制, 实现频谱数据的分级共享, 保障军事频谱数据的安全隔离。开发跨国频谱协同接口, 遵循 ITU 频谱管理规范, 支持国际频谱监测数据的交互与验证。

2.3 关键技术支撑

关键技术支撑体系涵盖认知无线电、人工智能、量子通信、区块链等前沿技术, 这些技术的融合应用, 使电磁频谱适应性管控体系具备环境感知、自主决策、动态执行和安全共享的核心能力, 能够应对复杂电磁环境下的多样化用频需求。

其一, 认知无线电技术实现频谱空穴智能感知。开发宽频段可重构射频前端, 支持 1MHz-100GHz 频段的动态扫描。采

用循环谱检测算法识别频谱空洞, 检测时间不超过 100ms。设计自适应调制解调机制, 根据信道质量动态调整通信参数, 实现干扰规避与频谱高效利用。认知引擎需具备环境学习能力, 通过持续监测积累频谱使用规律, 预测准确率达到 90% 以上。

其二, 人工智能技术赋能智能决策与干扰治理。采用卷积神经网络处理频谱瀑布图, 实现干扰类型的自动分类, 分类精度不低于 95%。开发基于长短时记忆网络的频谱预测模型, 提前 1 小时预测重点频段的占用趋势, 预测误差控制在 5% 以内[4]。构建深度强化学习模型优化频谱分配策略, 在多用户竞争场景下实现频谱利用率与用户满意度的多目标优化。

其三, 量子技术提升监测精度与信息安全。部署量子传感频谱分析仪, 利用原子自旋态敏感特性实现 1mHz 频率分辨率, 可捕捉微弱信号的微小频率偏移。建立量子密钥分发网络, 为管控指令传输提供无条件安全保障。开发量子随机数发生器, 为加密算法提供不可预测的密钥源, 增强系统抗破解能力。

其四, 区块链技术构建可信频谱交易体系。设计联盟链架构实现多节点共识, 采用实用拜占庭容错算法保障交易一致性。开发智能合约模板, 支持频谱长期租赁、临时共享等多样化交易模式。建立频谱使用溯源机制, 通过链式存储确保频谱使用记录的不可篡改, 为纠纷仲裁提供可信证据。

3 电磁频谱适应性管控体系的演化规则

3.1 演化动因分析

演化动因分析需建立多维度触发机制, 从技术、需求、环境三个层面构建动因识别体系。

技术层面聚焦关键技术迭代速度, 定期扫描认知无线电、量子通信等领域的技术成熟度, 当核心技术突破达到预设阈值 (如 AI 算法准确率提升 20%) 时启动演化评估。

需求层面建立用频需求预测模型, 整合 5G 基站部署量、低轨卫星发射计划、无人机注册数量等实时数据, 通过趋势外推算法识别需求拐点, 当特定频段利用率连续三个月超过 85% 时触发资源重分配流程。

环境层面监测电磁空间对抗强度, 通过分析干扰事件频次、新型干扰技术出现速度等指标, 建立威胁等级评估矩阵, 当军事对抗场景下干扰识别率低于 90% 时启动防护机制升级。

3.2 演化路径模型构建

基础阶段重点建设全域感知能力, 通过部署空天地一体化监测网络实现 1Hz-1THz 频段全覆盖。该网络由低轨卫星星座、高空长航时无人机及地面固定监测站构成协同感知体系, 形成立体交叉监测网络。同步构建动态更新的频谱知识库, 整合军用标准信号库、民用通信协议库及新型干扰信号样本库。此阶段需完成三项核心任务: 开发基于小波变换的自适应滤波算法, 消除多径干扰导致的信号失真 (信噪比提升 $\geq 15\text{dB}$); 建

立分布式节点通信协议，采用时分多址（TDMA）机制实现监测数据的冲突-free 传输；部署边缘预处理单元，通过 FPGA 加速数据压缩与特征提取。

过渡阶段实施动态协同机制，引入深度强化学习优化频谱分配策略。采用双智能体训练框架，以频谱利用率最大化为目标函数，通过马尔可夫决策过程（MDP）建模频段占用状态转移概率，在保证军用优先级的前提下，开发基于区块链的频谱交易系统[5]。该系统通过智能合约自动执行频谱租用流程：民用用户提交频段使用申请后，系统实时核验用户资质与频段可用性，生成包含使用时段、功率限制、干扰规避条款的智能合约，完成去中心化频谱授权。

成熟阶段达成自主演化能力，构建电磁频谱大模型实现端到端智能管控。该模型采用 Transformer 架构，通过多模态数据融合（频谱波形、空间位置、时间序列特征）实现干扰类型自动分类、频谱态势预测、对抗策略生成等三大核心功能。此阶段需突破跨域协同瓶颈，建立军地联合频谱资源池，采用“物理隔离-逻辑互联”架构：军方保留核心频段的最高控制权，通过联邦学习实现多机构数据共享——参与方仅上传模型梯度参数，原始数据本地存储，经加密聚合后更新全局模型。同步开发智能资源调度引擎，基于实时频谱需求与干扰风险，动态调整军民用频段分配比例，在重大活动保障期间可实现短时间内完成应急频谱重分配。

3.3 演化评估机制设计

一方面，要设计三层评估维度。效能层包含频谱利用率（目

标 $\geq 82\%$ ）、干扰响应时间（要求 < 1 秒）、跨域协同效率（指标提升 30%）；安全层涵盖密钥破解难度（量子加密强度）、非法接入拦截率（标准 $\geq 99.9\%$ ）、数据篡改检测能力（实时性要求）；适应性层评估技术迭代速度（年均 ≥ 2 次核心算法更新）、需求匹配精度（误差 $\leq 8\%$ ）、环境鲁棒性（极端条件下系统可用性 $> 95\%$ ）。

另一方面，评估实施采用双周期机制。月度快速评估通过自动化脚本采集关键指标，生成趋势曲线；季度深度评估组织专家委员会开展攻防演练，模拟新型干扰场景测试系统应变能力。评估结果直接驱动演化决策，当连续两次月度评估某项指标不达标时，自动触发对应模块的优化流程，如调整 AI 模型训练样本或升级监测硬件固件。建立评估结果与资源投入的联动机制，按效能提升幅度动态分配研发预算，优先保障关键瓶颈技术突破。

4 结语

电磁频谱适应性管控体系的构建是应对复杂频谱环境与多域应用需求的必然选择，其核心价值在于通过动态架构与演化规则实现资源利用与安全保障的协同优化。文章提出的分层架构与功能模块设计，为破解频谱稀缺性、动态分配与跨域融合等难题提供了系统性思路，而演化规则的建立则确保了体系能够持续适应技术迭代与环境变化。放眼今后。随着人工智能、量子通信等技术的深度渗透，电磁频谱管控将向更智能、更自主的方向发展，推动形成军地协同、全域感知、动态优化的新型治理模式。

参考文献：

- [1] 谢春茂,张川,黄明,等.电磁频谱空间应用及发展趋势综述[J].电子科技大学学报,2024,53(02):161-173.
- [2] 张有志.基于深度学习的频谱智能管控技术发展思考[J].移动通信,2024,48(08):129-136.
- [3] 李娟,王刚,周静.电磁频谱适应性管控体系架构及演化规则[J].军事运筹与评估,2024,39(06):75-80.
- [4] 孙正波,周晓光,义余江.高轨电磁频谱监测载荷应用及资源管控[J].空间科学学报,2025,45(06):1607-1616.
- [5] 罗文君,蔡明卓,张戈力.基于认知无线电的联合行动电磁频谱接入和分配探析[J].网络安全与数据治理,2025,44(S1):320-325.