

# 边缘计算赋能的宏基站与室内分布系统协同优化研究

廖海华

中国铁塔股份有限公司广西壮族自治区分公司 广西 南宁 530000

**摘要:** 随着5G通信时代到来,室内数据业务占比激增,对网络容量和时延提出严苛要求。传统宏基站与室内分布系统独立组网模式存在负载不均衡、资源利用率低及跨域干扰等问题。本文提出边缘计算赋能的协同优化架构,将MEC平台部署于网络边缘,实时感知宏站与室分系统状态信息,通过智能算法对用户接入、资源分配及干扰管理进行联合优化。研究设计了基于MEC的协同管控模型,提出了面向负载均衡和能效优化的资源调度算法,为提升异构网络整体效能提供理论支撑。

**关键词:** 边缘计算;宏基站;室内分布系统;协同优化

**引言:** 移动数据业务持续爆发式增长,室内场景已占据流量主导地位。宏基站提供广域覆盖但穿透损耗大,室内分布系统保障深度覆盖但容量有限,二者独立组网导致负载不均衡、干扰严重、资源利用率低下等问题。边缘计算将计算存储能力下沉至网络边缘,为实时感知网络状态、智能协同调度提供了使能技术。如何利用边缘计算优势,实现宏基站与室内分布系统的深度协同,成为提升网络效能的关键课题。本文立足协同理论基础,分析现存问题,设计基于边缘计算的协同优化架构,并探讨关键算法模型,旨在为异构网络优化提供新思路。

## 1 边缘计算与无线网络协同理论基础

### 1.1 边缘计算核心特性

边缘计算是将计算、存储和网络资源部署于数据源或用户侧的新型计算范式,核心特性突出。低时延特性通过边缘本地化处理数据,避免核心网往返传输,端到端时延降至毫秒级,满足自动驾驶、工业控制等时延敏感业务需求;带宽节省特性依托数据本地聚合分析,仅上传必要结果,大幅减轻回传网络压力;位置感知能力可获取用户精准位置与网络上下文,支撑位置相关业务优化;环境感知能力实时监测网络状态、资源利用率及业务负载,为动态决策提供输入。这些特性使边缘计算成为宏基站与室内分布系统协同优化的理想支撑,实现异构网络资源的统一调度与智能管控。

### 1.2 宏基站与室内分布系统协同机制

宏基站与室内分布系统的协同机制是异构网络融合优化的核心。覆盖层面,宏基站负责广域连续覆盖保障基本接入,室内分布系统聚焦热点深度覆盖提供高速体验,二者协同形成立体网络,消除盲区、提升边缘用户服务质量;容量层面,二者共享频谱资源,需动态协调避免干扰,同时根据负载分流用户实现均衡;干扰协调

层面,需通过功率控制和资源块分配,缓解宏基站与室分系统间的相互干扰;移动性管理层面,需共享状态信息、协同决策切换时机,保障用户室内外无缝切换。协同核心在于信息共享与联合决策,传统独立组网的信息壁垒制约协同,边缘计算为打破壁垒提供了技术支撑<sup>[1]</sup>。

### 1.3 边缘计算赋能的协同优化框架

边缘计算赋能的协同优化框架以MEC平台为核心,实现宏基站与室内分布系统统一管控,采用中心云、边缘云、接入网分层架构。中心云负责非实时全局优化、大数据分析及AI模型训练下发;边缘云部署于基站侧,聚合管理多类节点,实时采集网络状态并执行优化算法;接入层承担用户接入与业务承载,上报测量信息。MEC平台核心功能含信息感知(收集网络负载、干扰、用户QoS及算力状态)、资源管理(联合调度频谱、功率、计算资源)、决策执行(下发优化操作指令)三大模块。框架需解决异构网络信息模型统一、实时性与计算复杂度平衡、信令开销控制等关键问题,打破传统独立管理模式,为深度协同提供架构支撑。

## 2 宏基站与室内分布系统协同现状及存在的问题分析

### 2.1 宏基站与室内分布系统协同应用现状

当前宏基站与室内分布系统协同尚处于初级阶段,以静态配置和简单联动为主。覆盖协同上,运营商通过规划划分室外宏站与室内热点区域室分系统的覆盖边界,避免过度重叠;容量协同采用粗放的负荷阈值分流策略,宏站负荷超限时引导部分用户至室分系统,未充分考虑业务类型与信道质量;干扰协调依赖静态频率规划,通过分频段或配置不同PCI模组减少干扰;移动性管理虽有3GPP标准切换流程,但参数多固定配置,难适配动态业务与用户移动模式。部分领先运营商试点基于MR数据的协同优化,定期调整参数。总体而言,现有协同以离线

规划和静态配置为主，缺乏实时动态协同能力，难以充分发挥异构网络融合优势。

## 2.2 协同优化存在的主要问题

宏基站与室内分布系统协同优化面临多重难题。资源竞争与干扰管理突出，二者共享频谱相互干扰，静态频率规划无法应对业务动态变化，高层建筑场景中信号外泄形成复杂干扰场，影响用户体验；业务潮汐效应与静态配置矛盾显著，现有协同机制缺乏实时感知与快速响应能力，资源利用率低下；跨域信息壁垒制约协同深度，不同网管系统导致关键信息难以实时共享，协同决策粒度较粗；联合优化算法存在复杂度与部署可行性的平衡难题，难以实时运行；室内外切换时延大，失败率和掉话率偏高，业务连续性保障不足；未充分联合调度边缘计算节点的算力与通信资源，未能发挥MEC平台赋能潜力<sup>[2]</sup>。这些问题需从架构、算法和机制层面系统性创新解决。

## 3 边缘计算赋能的协同优化架构设计

针对上述宏基站与室内分布系统协同优化中存在的信息壁垒、实时性不足、资源调度不合理等核心问题，结合边缘计算低时延、位置感知、资源下沉的核心优势，本章设计边缘计算赋能的协同优化架构，通过架构创新打破传统独立管理模式，为后续算法与模型设计提供支撑，实现各类问题的针对性解决。

### 3.1 总体架构

边缘计算赋能的协同优化架构采用“中心管控层—边缘协同层—接入执行层”三层一体设计，实现全链路协同管控。中心管控层部署于核心网侧或大型数据中心，承担全局策略制定、AI模型训练及跨域数据汇聚功能，输出全局优化协同策略模板与预训练AI模型；边缘协同层为架构核心，由网络边缘的MEC平台构成，每个MEC节点管理特定地理范围的宏基站与室内分布系统，形成协同域，实时采集接入节点状态信息、运行协同优化算法并下发实时决策指令；接入执行层含宏基站与室内分布系统，负责执行优化指令并上报测量数据及状态信息。三层通过标准化接口交互：N1接口连接中心与边缘，用于模型下发和策略更新；N2接口连接边缘与接入层，用于状态上报和指令下发。架构强调接口开放性与标准化，支持多厂商设备接入；采用控制与承载分离设计，协同控制信令通过专用通道传输，不影响用户业务数据转发，保障协同优化的可靠性与安全性。

### 3.2 功能模块划分

边缘协同层MEC平台内部设六个核心功能模块，闭环协同实现优化。状态感知模块通过轻量级采集协议，

实时采集宏基站与室分系统的小区负荷、用户连接数、干扰水平、信道质量、业务QoS需求及MEC节点CPU、内存利用率，最小化对现网影响；数据分析模块对数据进行清洗、特征提取和异常检测，提炼关键特征供决策使用；资源管理模块作为核心，负责频谱、功率、计算资源联合调度，通过优化算法确定资源分配方案与用户接入策略；移动性管理模块聚焦室内外切换优化，动态调整切换参数、预测切换时机，降低切换时延与掉话率；干扰协调模块采用集中式策略，分析干扰矩阵，通过功率控制和资源块避让抑制跨层干扰；能力开放模块以API形式向第三方开放协同优化能力，支撑业务创新。各模块通过事件驱动机制协同，网络状态变化触发数据分析，结果驱动资源管理与干扰协调模块重新计算，形成闭环优化。模块化设计保障可扩展性，可按需新增能效优化、业务识别等模块。

### 3.3 关键技术实现

架构落地需多项关键技术支撑。统一信息模型技术对宏基站与室分系统测量数据标准化建模，屏蔽厂商差异，提供统一数据视图；轻量级实时通信协议采用改进MQTT协议，在保障传输可靠性的同时降低控制信令开销，适配边缘与接入节点频繁交互需求；分布式数据融合技术在MEC节点本地完成多源数据汇聚，仅上传融合后特征数据，减少回传带宽占用；容器化部署技术将功能模块封装为微服务，实现资源隔离与弹性伸缩，动态调整MEC平台计算资源分配；时间同步技术通过IEEE 1588v2协议实现MEC与接入节点高精度时间同步，保障协同决策时序一致性；安全机制采用双向认证与加密传输保护控制信令，防范恶意篡改风险。北向接口采用RESTful风格，便于中心管控层调用MEC能力；南向接口适配主流厂商设备北向接口，实现跨厂商兼容。技术实现中平衡性能与复杂度，优先保障协同实时性，计算密集型功能采用分层处理，部分复杂算法在中心管控层离线运行，边缘节点执行轻量级在线推理<sup>[3]</sup>。

## 4 协同优化关键算法与模型

基于上述边缘计算赋能的协同优化架构，结合宏基站与室内分布系统协同存在的负载不均衡、干扰严重、能效不足等问题，本章设计针对性的协同优化算法与模型，实现资源高效调度、干扰有效抑制、能效持续提升，破解前文提出的各类协同难题。

### 4.1 动态资源分配算法

动态资源分配算法是宏基站与室内分布系统协同优化的核心，其依据实时业务需求与网络状态，动态调整频谱和功率分配。该算法以最大化系统吞吐量、保证用

户 QoS 为双目标,采用分层架构:上层是域间协调器,负责不同 MEC 协同域的频谱协调,避免边缘区域域间干扰;下层为域内分配器,负责本协同域内宏站与室分系统的资源分配。算法输入涵盖小区负荷、用户业务类型及 QoS 需求、CQI、干扰矩阵等信息。分配策略上,频谱分配采用基于图论的资源块分配法,将宏站与室分系统建模为干扰图,避免为相连节点分配相同资源块;功率控制采用基于博弈论的分布式算法,宏基站与室分系统作为参与者,通过迭代收敛至纳什均衡以抑制干扰。同时,引入预测机制,利用历史数据预测短时业务流量,提前调整资源预留。算法复杂度在多项式时间内可解,支持秒级调度,满足实际部署需求。仿真显示,相比静态配置,该算法可提升系统吞吐量 15% - 20%,边缘用户速率超 30%。

#### 4.2 AI驱动的智能决策模型

AI驱动的智能决策模型借助机器学习提升协同优化智能化程度。该模型体系涵盖预测、分类和决策三类模型。预测模型运用长短期记忆网络(LSTM)和Transformer架构。LSTM擅长捕捉时间序列长程依赖,输入历史24小时小区流量数据,可输出未来15分钟业务量预测;Transformer利用自注意力机制捕捉多小区空间相关性,能预测业务热点迁移趋势。分类模型采用卷积神经网络(CNN)和图神经网络(GNN)。CNN用于识别用户业务类型,区分eMBB、uRLLC、mMTC等,为差异化服务提供依据;GNN可对网络拓扑建模,识别干扰类型与异常模式。决策模型采用深度强化学习(DRL),将协同优化建模为马尔可夫决策过程。定义状态空间包含各小区负载、干扰、用户QoS满意度,动作空间为资源分配方案与切换参数调整,奖励函数是系统吞吐量、用户满意度和能效的加权和。采用多智能体深度确定性策略梯度(MADDPG)算法,将宏基站和室内分布系统视为多个智能体,集中训练分布式执行学习协同策略<sup>[4]</sup>。AI模型在中心管控层离线训练,下发至边缘MEC节点在线推理,推理时延毫秒级,且会定期更新,采用增量学习技术减少重训练开销。

#### 4.3 能效优化策略

能效优化策略以“保障用户体验、最小化系统能耗”为核心,是绿色通信关键,从设备、站点、网络三级分层设计。设备级针对基站硬件,依业务负载动态调整功放状态,低负荷时用符号关断、通道关断技术,关闭部分发射通道或让设备深度睡眠。站点级依据业务潮汐规律,夜间或低业务时让部分室内分布系统、宏基站休眠,由相邻站点承接业务,休眠决策结合覆盖与唤醒能耗,采用门限与动态预测结合方式。网络级通过资源分配与负载均衡提升能效,优先将业务集中到高效能基站。算法上,建立以“系统吞吐量与总功耗之比”为目标函数的模型,经分式规划转化求解,还引入可再生能源利用因子。该策略与动态资源分配算法协同,在满足业务需求下实现能效最优。实测表明,综合应用后基站总功耗可降低 20% - 30%,降低运营成本与碳排放。

#### 结束语

边缘计算为宏基站与室内分布系统协同优化提供新的技术路径。本文系统分析了边缘计算核心特性和异构网络协同机制,构建了基于MEC的三层协同优化架构,设计了状态感知、资源管理、干扰协调等功能模块,探讨动态资源分配算法、AI智能决策模型和能效优化策略。未来研究应进一步探索联邦学习在跨域协同中的应用、数字孪生网络与协同优化的融合,以及通感算一体化架构下的深度协同机制,推动无线网络向更智能、更高效的方向演进。

#### 参考文献

- [1]刘冰婷,符新.5G宏基站造价控制要素分析[J].数字通信世界,2024(10):90-92.
- [2]于渤,岳宇昂,陈东旭,等.通信宏基站能效现状及分级评价方法研究[J].电信工程技术与标准化,2024,37(6):72-75.
- [3]梁思秋,孙海亮.基于规划满足度的5G宏基站建设精准度评估体系的研究[J].中国新通信,2023,25(17):1-4,85.
- [4]刘熙.国际机场基于5G的室内分布系统建设策略[J].中国宽带,2025,21(9):183-185.