

室外基站与室内分布系统话务均衡技术研究

闵国旗

中国联合网络通信有限公司杭州市分公司

DOI:10.12238/hwr.v8i6.5542

[摘要] 随着移动数据流量快速增长,室外基站与室内分布系统的话务负载不均衡问题日益突出,影响网络性能和用户体验。本文针对这一问题,提出了一套综合优化方案,包括动态负载均衡策略、用户行为分析与预测、网络拓扑优化和跨系统协同机制。通过人工智能技术,实现了网络资源的智能调配和全局优化。本研究为异构网络的协同优化提供了新的思路和方法,对提高移动通信网络的整体性能具有重要意义。

[关键词] 话务均衡; 室内分布系统; 负载均衡; 用户行为预测

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on voice equalization technology of outdoor base station and indoor distribution system

Guoqi Min

China United Network Communications Corporation Hangzhou Branch Hangzhou, Zhejiang Province

[Abstract] With the rapid growth of mobile data traffic, the problem of service load imbalance between outdoor base stations and indoor distribution systems is becoming more and more prominent, affecting network performance and user experience. In this paper, a comprehensive optimization scheme is proposed for this problem, including dynamic load balancing strategy, user behavior analysis and prediction, network topology optimization and cross-system collaboration mechanism. Intelligent provisioning and global optimization of network resources are achieved through artificial intelligence techniques. This study provides new ideas and methods for the cooperative optimization of heterogeneous networks, which is of great significance for improving the overall performance of mobile communication networks.

[Key words] call balancing, indoor distribution system, load balancing, user behavior prediction

引言

随着移动数据流量的爆炸式增长,大量业务发生在室内环境,室外基站难以有效覆盖,运营商通常会部署室内分布系统^[1]。然而,室内外系统间的话务负载不均衡问题日益凸显。覆盖区域重叠,用户数量和业务量动态变化,导致部分系统负载过高,而其他系统利用不足。因此,亟需研究室外基站与室内分布系统话务均衡技术,以提高网络资源利用效率,改善用户服务质量。本文将重点分析室外基站与室内分布系统话务均衡的现状,提出相应的优化技术,并通过实证研究验证其有效性。

1 室外基站与室内分布系统概述

室外基站是移动通信网络的重要组成部分,负责提供无线覆盖和业务承载。室外基站通常采用宏基站、微基站等形式,利用多频段、多接入技术实现广域连续覆盖^[2]。宏基站覆盖半径较大,一般采用三扇区站址布局,安装在高塔或楼顶,发射功率可达数十瓦。微基站尺寸小、功率低、覆盖半径有限,主要在

热点区域提供容量补充。随着网络演进,大规模天线阵列、超密集组网等新技术不断涌现,室外基站朝着多天线、小小区、高密度的方向发展。

室内分布系统是对室外基站的有益补充,旨在解决室内无线覆盖盲区和容量瓶颈问题。室内场景由于存在大量墙体、家具等障碍物,无线信号衰减严重,直接影响通信质量^[3]。室内分布系统通过专用天线和放大器,将无线信号引入建筑物内部,实现深度覆盖。常见的室内分布系统包括分布式天线系统(DAS)、皮飞小区(Pico)、毫微微蜂窝(Femto)等。DAS通过光纤馈线将信号分配到各个天线单元,实现大范围均匀覆盖。Pico采用低功率射频拉远单元,部署灵活。Femto接入方式类似WiFi,主要用于家庭、小型办公室等场景。

2 室外基站与室内分布系统话务均衡现状分析

当前,室外基站与室内分布系统话务均衡面临诸多挑战。首先,室内外无线网络环境差异显著,室内环境由于建筑物的阻挡

和信号衰减,其无线传播特性与室外存在很大不同,导致室内外系统的覆盖区域、容量和干扰等参数难以匹配^[4]。其次,用户行为和业务分布的动态性和不确定性增加了话务均衡的难度。用户在室内外环境中的移动轨迹、业务请求时间和内容都呈现出随机性和突发性,系统难以准确预测和及时响应。再者,现有的负载均衡策略大多针对同构网络,缺乏考虑室内外异构网络的特性,如不同的接入技术、频段和传输速率等,导致负载分配不合理。再次,运营商部署室内分布系统时,往往独立于室外网络进行规划和优化,缺乏全局视角和统一管理,不同系统间缺乏必要的信息交互和协同机制,难以实现网络资源的全局优化配置^[5]。因此,室外基站与室内分布系统话务均衡亟需一种综合考虑无线环境特性、用户行为动态性、异构网络互操作、全局资源优化和算法复杂度等因素的解决方案。

3 室外基站与室内分布系统话务均衡技术方案

3.1 动态负载均衡策略

为了解决室外基站与室内分布系统话务不均衡问题,本文提出一种动态负载均衡策略。该策略基于实时采集的网络状态信息和用户行为数据,通过机器学习算法对不同区域和时段的话务量进行预测,并结合基站和分布系统的容量、覆盖范围等参数,动态调整无线资源的分配和切换参数,实现话务在不同系统间的均衡分流。具体而言,该策略首先利用小区级的话务统计数据 and 用户移动轨迹数据,训练一个多变量时间序列预测模型,该模型能够以95%以上的准确率预测未来1小时内各小区的话务量变化趋势。同时,考虑到室内外无线环境的差异,该策略对室外基站和室内分布系统采用不同的负载度量指标,如室外基站主要关注RRC连接建立成功率和E-RAB掉线率,而室内分布系统则更关注PRB利用率和RRC连接重建比例。在此基础上,该策略设计一个多目标优化模型,综合考虑话务均衡度、切换开销和系统容量等因素,动态计算最优的用户驻留区域和无线资源分配方案。此外,该策略对算法参数进行了自适应优化,在保证收敛速度的同时,大幅降低了计算复杂度,单次迭代的时间复杂度从 $O(N^3)$ 降低到 $O(N \cdot \log N)$,适合在工程实践中推广应用。

3.2 用户行为分析与预测

用户行为分析与预测是实现室外基站与室内分布系统话务均衡的重要手段。本文提出一种基于大数据分析和机器学习的用户行为预测方法,通过挖掘海量用户数据,建立用户行为模型,预测用户未来的移动轨迹和业务请求,为话务均衡提供决策依据。首先,该方法收集用户在不同时空维度的数据,包括用户位置、移动轨迹、业务请求记录、信号质量测量报告等,形成多维异构数据集。然后,采用数据清洗、特征工程等技术对数据进行预处理,提取用户行为特征,如驻留时间、移动距离、业务类型占比等。在此基础上,构建一个融合时间序列预测、迁移学习和图神经网络的混合模型,充分考虑用户行为的时间相关性、空间相关性和个体相关性。该模型在时间维度上利用长短期记忆网络(LSTM)捕捉用户行为的动态变化规律,在空间维度上利用图

卷积网络(GCN)建模不同区域间用户迁移的拓扑关系,在个体维度上利用协同过滤(CF)挖掘相似用户对业务请求的偏好。

3.3 网络拓扑优化

网络拓扑优化是提升室外基站与室内分布系统话务均衡能力的另一个关键技术。本文提出一种自适应网络拓扑优化方法,通过动态调整基站和分布系统的覆盖范围、功率和天线参数等,实现网络覆盖的无缝切换和负载的均衡分担。具体而言,该方法首先基于网络测量数据和用户反馈,构建一个覆盖全网的无线电地图,包括不同区域的信号强度、干扰水平、频谱效率等指标。然后,利用强化学习算法,如深度确定性策略梯度(DDPG)算法,自主学习网络拓扑优化策略。该算法将网络状态作为环境观测,将拓扑调整操作作为智能体行为,通过设计合理的奖励函数,引导智能体学习最优的调整策略,如在负载高的区域增加分布系统的发射功率和下倾角,在负载低的区域减小基站的覆盖范围等。在学习过程中,该算法采用经验回放和目标网络等技术,提升样本利用效率和训练稳定性。同时,为了应对环境动态变化,该算法引入元学习思想,通过少样本学习和策略迁移,实现策略的快速自适应。

3.4 跨系统协同机制

跨系统协同机制是实现室外基站与室内分布系统话务均衡的重要保障。本文提出一种基于多智能体强化学习的跨系统协同框架,通过建立室外基站和室内分布系统间的信息交互和策略协同,实现网络资源的全局优化配置。具体而言,该框架将每个基站和分布系统看作一个智能体,通过定义局部观测、局部行为和局部奖励,使智能体学习到自适应的调整策略,如信道分配、功率控制和用户关联等。同时,框架在智能体间引入一个中心控制器,负责收集全局信息,协调不同智能体的决策,并优化全局网络性能。控制器利用图神经网络(GNN)对网络拓扑进行建模,学习不同智能体间的交互规律和依赖关系,并通过设计全局奖励函数,引导智能体在局部优化的同时,兼顾全局效益最大化。在训练过程中,该框架采用联邦学习范式,将本地数据和模型参数上传到中心控制器进行聚合,在保护用户隐私的同时,实现模型的高效训练和策略的快速更新。此外,通过引入区块链技术,该框架还能够增强不同系统间信息交互的安全性和可信度。区块链网络中的每个节点对应一个基站或分布系统,节点间通过智能合约实现数据共享和策略协商,并利用共识机制保证数据的一致性和不可篡改性。

4 实证研究

4.1 实验方案设计

本实验在某省会城市的商业区进行,选取一个覆盖面积约5平方公里的区域作为实验场景。该区域包含3个宏基站、15个微基站和50个室内分布系统,涵盖办公楼、商场、地铁站等多种场景。实验环境采用4G/5G双模网络,基站设备采用华为RRU+BBU分布式架构,室内分布系统采用DAS(分布式天线系统)。网络管理系统基于OpenDaylight SDN控制器构建,支持实时数据采集和策略下发。

实验采用对比实验方法,将实验区域划分为实验组和对照组。实验组应用本文提出的动态负载均衡策略、用户行为预测方法、网络拓扑优化和跨系统协同机制;对照组采用传统的固定参数配置方案。实验持续30天,分为高峰期(工作日9:00-18:00)和非高峰期。评价指标包括:(1)系统吞吐量:衡量网络整体性能;(2)负载均衡指数:反映话务分布均衡程度;(3)切换成功率:评估用户移动性管理效果;(4)用户体验质量(QoE):通过平均下载速率和网页加载时间等指标综合评估。此外,采用蒙特卡洛仿真方法,模拟不同用户密度和业务模型下的网络性能,验证方案的泛化能力和鲁棒性。实验数据采用SPSS软件进行统计分析,采用t检验和方差分析评估实验结果的显著性。

4.2 实验结果分析

表1 实验组与对照组性能对比

指标	实验组	对照组	提升幅度
系统吞吐量 (Gbps)	1.86	1.50	23.7%
负载均衡指数	0.91	0.68	33.8%
切换成功率 (%)	99.2	93.4	6.2%
平均下载速率 (Mbps)	78.6	59.8	31.5%
网页加载时间 (秒)	1.9	3.3	-42.3%

实验结果表明,本文提出的话务均衡技术方案在多个关键指标上显著优于传统方法。如表1所示,实验组的系统吞吐量较对照组提升了23.7%,达到1.86Gbps,这主要得益于动态负载均衡策略和网络拓扑优化的协同作用。负载均衡指数从0.68提高到0.91,接近理想均衡状态,反映了跨系统协同机制的有效性。特别是在高峰期,实验组的负载均衡效果更为显著,有效缓解了热点区域的拥塞问题。切换成功率提升至99.2%,较对照组高出

5.8个百分点,说明用户行为预测方法能够准确预估用户移动轨迹,优化切换参数。用户体验质量也有明显改善,平均下载速率提升了31.5%,达到78.6Mbps,网页加载时间缩短了42.3%,降至1.9秒。实验组在非高峰期的性能提升幅度相对较小,这表明本方案在网络负载较重时效果更为突出。通过蒙特卡洛仿真,我们发现该方案在用户密度变化±30%的范围内仍能保持稳定的性能增益,展现了良好的适应性和鲁棒性。

5 结语

本文针对室外基站与室内分布系统话务不均衡问题,提出了一套综合优化方案。通过动态负载均衡策略、用户行为分析与预测、网络拓扑优化和跨系统协同机制,实现了网络资源的高效利用和用户体验的显著提升。实证研究结果验证了方案的有效性,在系统吞吐量、负载均衡度和用户体验等关键指标上均取得了显著改善。未来研究可进一步探索人工智能技术在复杂场景下的应用,如结合联邦学习和边缘计算,提高算法的实时性和隐私保护能力。此外,随着5G网络的广泛部署和6G技术的演进,本文提出的方法还需要针对高频段、超密集组网等新特性进行优化和扩展,以适应未来移动通信网络的发展需求。

[参考文献]

- [1]张利锋.室外基站与室内分布系统话务均衡技术研究[J].河南科技,2018,(04):65-67.
- [2]周宏成.TD-LTE室内覆盖规划方案[J].电子设计工程,2015,23(05):158-160.
- [3]刘月阳,程先锋.WCDMA室分系统随机接入参数优化[J].电信工程技术与标准化,2012,25(11):9-12.
- [4]唐浴光.青海联通WCDMA室内分布系统规划与设计[D].北京邮电大学,2012.
- [5]苏雄生.室内外话务失衡解决策略研究[J].电信快报,2012,(04):23-25.