

异构网络环境下的资源调度与干扰管理策略

徐伟龙

日海恒联通信技术有限公司 河南 郑州 450000

摘要：随着异构网络在5G及未来无线通信系统中的广泛部署，资源调度与干扰管理成为保障网络性能的关键问题。本文构建了包括宏小区、微/皮小区、卫星通信与边缘计算节点在内的多层异构结构模型，并围绕多接入冲突、多业务QoS需求与系统动态变化等调度难点，引入基于队列模型、大偏差理论及Lyapunov优化的资源调度策略。针对复杂干扰环境，提出包括时域干扰协调、功率控制及频谱规划在内的多维干扰管理机制。结果表明，协同调度与干扰管理策略可显著提升网络吞吐量、频谱利用效率及服务质量，具备良好的实际应用前景。

关键词：异构网络；资源调度；干扰管理；Lyapunov优化

引言

异构网络通过多类型基站协同部署与多层结构集成，有效缓解传统蜂窝系统容量与覆盖能力的瓶颈。然而，随之带来的资源调度与干扰控制问题逐渐成为系统设计中的核心挑战。一方面，多接入节点之间的资源共享冲突、多样化业务的QoS保障需求，以及高度动态的网络状态共同导致调度问题高度复杂化；另一方面，同频部署带来的干扰耦合严重影响系统稳定性与用户体验^[1]。因此，建立适用于异构网络环境的高效调度与干扰管理机制，对于提升系统整体效能、支撑未来移动通信业务的多样化需求具有重要意义。

1 异构网络结构模型及性能指标

1.1 网络体系结构

异构网络通过多种接入节点的协同部署，提高频谱利用率、扩大系统容量，并满足用户对多样化、高可靠性和低延迟服务的需求，其体系结构融合了宏小区、微小区、皮小区、卫星通信层（LEO/GEO）与边缘计算节点，构建出多层次、多维度的通信架构^[2]。具体而言：

宏小区作为基础网络覆盖的骨干，提供大范围信号传输与控制信令承载，通常部署于高塔或建筑物顶端，具备较高的发射功率和较强的抗干扰能力。微小区与皮小区被嵌入于热点区域或覆盖盲区中，作为容量补充节点部署在宏小区之下，其覆盖半径更小但部署更灵活，有效缓解宏小区在高密度区域的负载压力。皮小区功率更低、部署成本更小，主要用于室内或商用楼宇场景。

在传统地面蜂窝结构基础上引入卫星通信层，尤其是低轨道卫星（LEO）系统，为广域覆盖和远程地区提供通信补充。LEO卫星具备低传播延迟和相对较高的吞

吐能力，能够与地面宏小区进行链路补全和资源调度互补。地球同步轨道卫星（GEO）适用于广播类业务，其与地面系统的协同较弱，主要承担基础覆盖和冗余备份任务。

边缘计算节点作为异构网络的重要补充，承担分布式计算与缓存任务，显著降低业务数据的回传负载与响应延迟。通过边缘节点进行本地化决策和内容分发，可实现部分资源调度任务的近端闭环控制，减轻核心网压力并提升用户体验。

1.2 关键性能指标

在多层异构结构的基础上，性能评估指标的选择直接影响网络优化与资源调度策略的设计。

（1）频谱效率是衡量单位带宽内有效数据传输能力的重要参数，反映系统在有限频谱资源下的利用水平^[3]。该指标受限于调制方式、信道条件、干扰控制与频谱复用程度，在多小区重叠部署中往往需要依赖动态调度与协同传输机制提升。

（2）能效是单位能耗所能完成的数据传输量，是衡量网络绿色通信能力的主要指标。尤其在小区密集部署与边缘节点集成环境下，如何在保证性能前提下降低系统能耗，已成为网络演进中的关键技术要求。能效的优化常通过动态功率调整、节能休眠机制与能耗感知调度算法实现。

（3）系统吞吐量反映网络整体的数据处理能力，是多用户调度与多小区资源复用效率的综合体现。在异构环境下，吞吐量表现受到链路质量、干扰水平、资源分配公平性等多因素共同作用。调度策略的目标之一即在最大化系统吞吐量的同时保障用户体验均衡。

（4）公平性是指不同用户或区域在资源获取上的相对均衡程度。高频谱利用率与高系统吞吐量并不必然带

作者简介：徐伟龙（1989.03-），男，汉族，籍贯：河南省新乡市，本科，工程师，研究方向：无线基站

来良好的用户体验，尤其在用户分布不均或边缘用户占比高的场景中，资源分配的不均可能导致服务中断或长时间延迟。引入比例公平性指标或Jain公平性指数，可用于量化调度策略对不同用户群体的保障能力。

(5) 干扰抑制程度则体现了系统在多用户、多节点、高密度部署背景下的信号抗干扰能力。在异构网络中，干扰不仅来源于相邻小区之间的同频复用，还包括宏-微协同之间的上行/下行干扰、边缘覆盖重叠区域的竞争信号等。该指标需综合考虑信干噪比、协同调度策略、频谱分配机制等多种干扰缓解手段。

2 异构网络中的资源调度策略

异构网络结构的复杂性要求资源调度机制能够兼顾系统性能、用户体验与干扰控制。在高密度、多接入、多业务的环境中，传统静态分配或局部最优策略已难以适应动态变化的网络状态。当前主流的资源调度方法逐步从规则式调度过渡到模型驱动与优化驱动范式，逐步引入排队理论、随机优化和联合调控模型，以提升调度的弹性与自适应能力^[4]。

2.1 基于队列模型的调度控制

排队系统为异构网络中多业务、多用户的服务动态提供了数学建模基础。各类型流量在系统中可建模为独立服务队列，不同用户或业务类型拥有不同的排队规则与调度优先级。在此框架下，系统稳定性是资源调度的基本约束条件。为了保障服务质量，需要避免队列长度爆炸，即需控制队列溢出概率。基于大偏差理论可构建上溢概率的指数界估计，从而在调度策略设计中引入概率约束，保障高优先级业务在高负载情况下仍具稳定可达的服务性能。例如，在机器类型通信中，大规模低时延数据包接入容易引发突发排队积压。通过构建基于服务等级的队列簇，并计算每类簇的溢出概率，可以对资源进行周期性分配调整，实现对大流量接入的可控调度。

2.2 随机优化方法

随机优化方法通过构建虚拟队列映射非排队型约束（如延迟容忍、能耗限制）为队列动态变量，实现多维资源调度约束的统一处理。在调度过程中，系统通过最小化Lyapunov漂移与性能惩罚函数之和，在不牺牲队列稳定性的前提下优化网络效用，如吞吐量或能效。

异构网络中的双时间尺度问题可通过该框架分解为快时域的无线资源分配与慢时域的配置调整。例如，在视频业务中，码率控制可作为慢时间尺度变量，依据较长周期内的网络反馈进行配置；资源块分配根据当前信道状态与流量负载在短时域内动态调整。

2.3 视频码率与无线资源联合调度

高清视频流与增强现实业务对带宽波动与时延变化极为敏感，单一维度的调度优化往往难以保障其端到端服务体验。在可伸缩视频编码框架下，视频被划分为多个编码层，不同层对应不同码率与清晰度等级，支持根据网络状况动态选择传输层数。

在异构网络中，信道质量因多路径传播、节点干扰等因素波动剧烈，基站需根据当前信道信息决定每个用户的最优视频层数及相应的资源块分配。联合调度策略通常基于可用信道速率、用户缓存状态、预估中断风险等指标构建状态空间，再采用贪婪匹配、动态规划或强化学习等手段在有限时间内做出最优层级选择与资源分配。系统需在避免频繁层切换造成用户体验下降的同时，保证视频连续性与画面质量。在边缘计算节点参与调度的场景下，部分决策可迁移至边缘侧执行，实现本地缓存调度与传输层控制的协同，从而降低核心网负担并提升视频传输的实时性与稳定性。

3 异构网络干扰管理策略

在异构网络中，由于多种基站类型同频部署，用户密度不均与业务负载动态变化，系统面临比传统蜂窝网络更为复杂的干扰环境。干扰不仅降低了信道质量、吞吐率和频谱利用效率，还会引发服务中断与调度失败^[5]。为了保障整体系统效能与用户体验，干扰管理必须作为资源调度系统的核心组成部分加以设计。

3.1 干扰类型与成因分析

异构网络的干扰可按来源分为跨层干扰和同频干扰两类。跨层干扰主要指宏基站与低功率小区（微小区、皮小区、femtocell）之间因发射功率差异、覆盖区域重叠而引发的干扰。在上行方向，低功率小区用户的信号在宏站接收范围内形成干扰；在下行方向，宏站高功率广播可能覆盖并干扰小区内部用户信道，特别是在小区边缘区域。

同频干扰普遍存在于邻接小区之间，尤其是在密集部署场景中更为严重。为提高频谱利用效率，3GPP推动小区间频谱共享，造成同一频段被多个相邻小区同时使用，若调度不协调，则会在边缘用户区域形成信道重叠，严重影响通信质量。同频干扰的显著特征是空间局部性强，时间变化快，对动态调度系统提出实时响应要求。干扰的程度受限于基站功率配置、资源块分配策略、子帧调度时序以及用户分布等多因素的交叉影响。因此，有效的干扰管理策略必须能够实现跨层信息感知、多维参数调控与实时反馈机制。

3.2 时域干扰协调机制

为缓解下行干扰问题，3GPP在LTE-A标准中引入

时域干扰协调机制,通过控制宏站和小区的子帧使用模式,实现干扰规避,其中,“几乎空白子帧”(Almost Blank Subframe, ABS)策略是当前最常用的方法之一。

在ABS机制下,宏站定期在某些子帧中停止数据传输,仅保留信令控制,从而为邻近小区用户留出干扰空闲的调度窗口。Pico基站可在这些ABS子帧中对边缘用户进行资源调度,从而显著提升服务质量。针对宏站资源利用率下降的问题,后续提出“低功率ABS”策略,即宏站在ABS子帧中仍保持小功率发射,以兼顾资源利用与干扰控制。ABS方案需与小区范围扩展(Cell Range Expansion, CRE)策略协同使用。CRE通过人为提高微/皮小区的接入信号强度偏置,引导更多用户接入小区。但被扩展接入的用户更易受宏站干扰影响,因此必须通过ABS协调其服务时隙,形成“高干扰区-静默保护”机制。子帧调度与业务QoS之间存在紧耦合关系。实时业务需保障连续帧传输,而非实时业务可容忍部分延迟。因此,ABS调度策略应根据业务类型动态调整时间粒度与使用比例,实现更细粒度的时域干扰管理。

3.3 功率控制与频谱规划

基站发射功率的动态调整不仅影响自身覆盖范围,还决定了对邻接小区的干扰程度。在异构网络中,需设计区域感知的功率自适应控制机制,根据小区边缘用户的反馈动态收敛至最优发射水平。

宏基站在部署密集小区的区域内应降低边缘发射功率,以减少对Pico基站服务区的干扰;Pico基站需依据服务用户密度与信道质量分布动态增减功率,以维持QoS约束。在功率控制策略中,引入干扰价格模型可为调度决策提供量化参考,使资源分配过程考虑到干扰成本的外部性影响。在频谱维度,载波聚合(CA)和频域软分离能够辅助缓解干扰,将高干扰小区与低干扰小区分别调度于不同频段,或在部分资源块上设置保护频带,从而有效降低同频干扰影响。频谱分配应根据邻小区负载、

业务类型与干扰强度联合建模,并形成动态频域调度算法。CRE偏置优化是控制用户接入决策、间接调控干扰的关键手段。合理设置偏置值可在确保负载均衡的同时,避免过度引导导致的干扰集中。部分研究已引入强化学习方法,通过基站与环境的交互更新策略,在动态环境中自适应优化CRE偏置与ABS配置组合。

4 结语

综上,本文围绕异构网络环境下的资源调度与干扰管理策略展开系统研究,首先构建了多层次协同的异构结构模型,并明确了频谱效率、能效、吞吐量、公平性与干扰抑制等关键性能指标。在此基础上,深入分析了多接入冲突、多QoS协调与系统状态波动等资源调度难点,提出基于队列建模、随机优化与视频层级联合控制的调度策略。随后针对异构环境下干扰来源复杂的问题,设计了包括ABS时域协调、功率自适应控制及CRE偏置优化在内的多维干扰管理方案。研究表明,协同优化的调度与干扰控制机制可有效提升系统性能,降低资源冲突风险,具备良好的扩展性与应用价值。

参考文献

- [1]魏建帅.高动态异构车联网络资源联合鲁棒优化分配研究[D].河北:燕山大学,2024.
- [2]赵晶,柳罡,雷璟,等.天地异构网络资源融合管理与智能调度技术[J].电讯技术,2024,64(4):546-552.
- [3]杨立伟,贾博宇,王芳,等.可见光通信与WiFi异构网络资源管理算法[J].计算机工程,2023,49(3):203-210,220.
- [4]张美蓉,镐梦婷,王闯,等.高低轨卫星异构网络资源管控策略与技术研究[J].天地一体化信息网络,2021,2(4):66-74.
- [5]胡志英.基于改进遗传算法的异构网络资源块分配方法[J].南京工程学院学报(自然科学版),2021,19(2):30-35.