

面向超密集组网的无线资源动态分配机制研究

茹栋 管云庆^{通讯作者}

中浙信科技咨询有限公司, 浙江 杭州 310000

摘要: 随着 5G 网络持续演进, 超密集异构网络成为满足未来海量连接与高性能通信的重要架构形式。面对传统用户接入机制和静态资源分配方式在高密度环境下的性能瓶颈, 本文提出一种面向超密集组网的无线资源动态分配机制。机制融合上下行解耦接入方式、多维资源感知建模、自适应资源调度与多基站协同策略, 有效提升用户接入成功率与频谱利用效率。仿真结果表明, 该机制在高密度场景下相较传统方式, 系统吞吐量提高 20%以上, 切换失败率显著下降, 资源调度更加灵活。研究为未来密集网络环境下的无线资源管理提供了有效支撑和工程参考。

关键词: 超密集组网; 无线资源管理; 动态调度; 上下行解耦; 异构网络; 多基站协同; 5G/6G 通信

DOI: 10.63887/fet.2025.1.4.6

引言

随着智能移动设备数量的空前增长, 传统的无线通信已无法满足可预见的未来不断升级的数据需求。因此, 网络规模与频谱资源压力呈指数级上升, 特别是在用户密集地区或热点场景, 传输需求对响应延迟、带宽效率提出了更高要求^[1]。作为 5G 时代的新型网络形态, 超密集异构网络通过密集部署异构化的小基站, 是实现上述需求的重要途径。然而, 这种基站布局带来了网络拓扑的高度复杂性与无线资源协调难题^[2]。

现有的用户接入机制中, 传统的用户接入机制都是基于上行下行关联的原则, 即用户设备在上行和下行被限制接入同一个基站, 这种设计在宏基站主导的网络中较为合理, 却难以适应超密集组网环境。在超密集异构网络中, 由于传输功率和网络拓扑结构高度可变, 该接入机制的性能受到限制。具体表现为频繁的基站切换、高干扰概率、负载不均衡和资源浪费等问题。因此, 迫切需要设计新的无线资源动态分配机制, 兼顾接入灵活性、性能优化与复杂性控制^[3]。

本文从四个主要部分展开研究。首先, 探讨现有接入机制的局限与参数敏感性, 并提出改进思路; 其次, 设计资源感知分配调度策略, 引入小区间协同与功率权衡机制; 再次, 构建轻量分布式协调方案, 以

降低信号交换成本与切换延迟; 最终, 通过仿真验证机制在吞吐量、延迟与用户体验上的优势。整篇以通俗易懂方式衔接理论与实践, 让读者既能理解原理, 也能了解其工程应用价值^[4]。

1 接入机制分析与改进设计

1.1 接入机制现状及问题剖析

在超密集异构网络中, 为简化接入逻辑, 传统方式将用户的上行与下行强制绑定于同一基站。然而, 随着小基站覆盖半径缩短、功率差异显著, 该策略容易导致上下行路径匹配不合理的问题。比如一个用户在边缘区, 虽能接收到下行信号, 但上行链路可能稳定性较差, 无法保证传输质量; 或者在楼宇中, 上下行路径需分别穿墙、穿楼层, 但由于绑定接入, 该机制无法匹配最优基站, 造成信号传输效率下降^[5]。

同时, 超密集组网环境下, 高密度部署造成同一物理空间内存在多个基站, 传统绑定策略还引发负载不均衡和频谱资源碎片化问题。即使在网络拥塞区域, 绑定机制也不能灵活调度用户, 使部分基站超载、部分基站空闲, 资源分配效率低下。此外, 该机制在切换过程中占用信道时间较长, 导致高切换失败率与增加时延开销。综上所述, 传统接入机制阻碍了超密集网络的性能释放, 需要重新审视接入策略, 将上下行

解耦进行灵活配置。

1.2 上下行解耦接入机制设计思路

为应对传统方案的局限，本文提出一种上下行解耦的接入机制。该机制允许用户设备独立选择最优的上行基站和下行基站，并可动态切换以适配环境变化。其实现方式可分为两个关键步骤：第一，根据实时 SINR、路径损耗和背后负载状况，为用户评估上下行的最优基站；第二，按需对用户上下行链路进行绑定或解绑，并通过中心控制器协同管理上下行资源用量和干扰空间，实现联动调整。

这种机制打破了传统“一胃口”策略，通过上行下行的弹性分配，大大提升了资源利用效率。在仿真场景中，用户可通过 SINR 反馈主动切换至上下行质量最佳的基站，避免弱链路产生网络盲区。此外，还减少了上下行错误绑定导致的切换失败率与 Ping 值波动，从而改善用户体验。该机制还可以与负载均衡策略联动，让系统自动调整基站间用户分布，防止热点区域资源过载和频谱浪费，促进网络稳定与高效运转。

2 无线资源感知与分配机制优化

2.1 多维感知建模与资源状态识别

在超密集异构网络中，网络状态与资源变化具有强烈的时空动态性，因此仅依靠静态参数制定调度策略难以应对实际环境的不确定性。为了提升分配策略的响应效率与准确性，本文提出了一种基于多维感知的数据驱动资源状态建模方法。该方法综合考虑信道状态信息 (CSI)、基站负载水平、用户服务等级 (QoS 需求)、干扰强度、传输速率与历史切换行为等指标，构建用户-资源之间的动态感知图谱。通过融合这类多维信息，系统能够在短周期内感知资源占用情况及网络瓶颈位置，为下一步分配策略提供高质量依据。

感知模型采用加权动态贝叶斯网络结构，实时分析各用户与基站间的潜在连接质量，并预测未来一段时间内的负载趋势和链路衰减风险。该模型在仿真平台中通过历史数据训练后具备一定预测能力，可提前识别网络中的异常传输区域（如频繁切换区域、干扰热点区域）并作出调整预警。对比传统仅基于瞬时 RSSI 的方式，本方法在处理用户密集时段与移动性剧烈场

景中展现出更高的稳定性与精度，同时减少了系统对频繁测量与报告的依赖，降低了调度开销。

2.2 资源动态调度策略与权重分配方法

基于多维感知输出的资源状态图，本文进一步提出了一种“分层感知—自适应分配—干扰校正”的三阶段调度机制。在分配初始阶段，系统首先根据各用户 QoS 等级与信道状态，进行资源优先级打分，建立候选资源池；随后进入资源竞争阶段，用户与基站通过“软投票机制”协商获取资源，并引入公平性控制函数避免资源向少数用户集中；最后在调度确认阶段，考虑邻近小区间的干扰重叠情况，对部分资源使用方式进行校正与动态重规划，提升频谱复用效率。

权重分配方法上，结合用户类型 (eMBB、URLLC、mMTC)、服务优先级与基站拥塞度，采用多目标优化策略对可用资源块进行排序。系统调度目标不仅包括吞吐量最大化，还需兼顾公平性、时延控制与能耗开销。本文在仿真实验中采用遗传算法 (GA) 进行资源块调度规划，与传统最大速率优先策略相比，资源利用率提升 14%，高优先级用户完成任务率提升 19%，有效缓解了网络压力，尤其在突发大规模接入情况下依旧保持稳定。

更关键的是，该策略具备良好的异构性适配能力。面对宏基站、小基站、Wi-Fi 接入点等多种接入节点混合部署环境，系统通过信道测量反馈与负载动态估算，对各类资源做出差异化管理。结合接入机制的上下行解耦方案，可针对每一条链路分别选择最合适的资源路径与节点，形成端到端最优分配链，提高整体通信质量，增强网络鲁棒性。

3 网络协同机制与负载均衡策略设计

3.1 多基站协同机制与信道资源共享

在超密集异构组网架构下，多个小基站在同一物理区域内高度重叠部署，这虽增强了网络容量，但也显著提高了协同调度与资源隔离的复杂度。若多个基站单独运行，各自制定资源策略，将不可避免地引发干扰叠加、资源浪费与接入冲突等问题。因此，建立跨基站的协同机制是实现有效资源动态分配的关键。本文提出一种基于逻辑集中控制、物理分布执行的“控

制平面集中+数据面自治”协同架构，由区域控制节点统一收集各基站的资源状态，并协调资源调度策略下发，实现全局资源优化。

该机制中，控制器定期汇总基站状态信息，如链路质量、负载指数、用户移动趋势等，并通过最小干扰匹配算法确定用户-基站映射关系。在数据面，基站仍保有调度灵活性，可根据实时 SINR 变化、干扰检测情况和用户反馈信息对接入状态微调。这种“集中指导+本地优化”的模式兼顾了策略一致性与运行效率。同时，系统引入了边缘缓存机制，将常用资源映射与调度决策存储于各小基站中，减少中心控制负荷，提升资源响应速度。

3.2 负载均衡策略与服务迁移机制

在用户密度大幅提升的背景下，负载均衡成为提升网络整体性能和资源利用率的关键环节。由于用户分布不均、业务类型复杂，个别基站可能长期处于过载状态，而周边节点则闲置大量资源，造成整体资源使用效率下降。本文设计了一套基于多参数引导的负载均衡策略，综合考虑用户接入数量、业务类型、信道利用率和干扰强度等多因素，通过动态评估负载指数，将过载用户引导迁移至负载较低的邻近基站。迁移机制中嵌入“延迟感知”权重函数，避免频繁切换对实时业务造成影响。

在此策略下，系统采用“软指派+硬切换”双阶段模式。初期系统通过广播负载指数调整UE的接入倾向，引导新用户优先接入空闲基站；在过载持续超过阈值时，则触发强制服务迁移机制，由中心控制节点协调目标小区资源预留与切换调度。实验结果显示，该机制可使平均基站利用率差异控制在 $\pm 10\%$ 范围内，热点区域丢包率下降 18%，整体 QoS 保持度提升 22%。更重要的是，结合上下行解耦策略后，部分用户的上下行可分别迁移至不同节点，进一步提升迁移灵活性和链路质量。

4 系统性能评估与工程应用价值分析

4.1 多场景仿真测试与性能指标对比

为验证所提接入机制与资源分配策略的可行性与优势，本文基于 NS-3 和 MATLAB 平台联合搭建超密

集异构网络仿真环境，模拟三种典型场景：城市住宅小区、地铁换乘枢纽和高密集办公区。测试维度包括用户接入成功率、频谱利用率、切换失败率、平均吞吐量与系统能效等关键指标，分别对比传统绑定接入机制、最优信道选择机制以及本文提出的上下行解耦+动态资源分配联合机制。

仿真结果表明，本文提出的机制在多项指标上具有显著优势。在接入成功率方面，传统机制在高密度区域出现明显拥堵，平均接入率约为 81.3%，而新机制提升至 96.7%；在系统总吞吐量方面提升约 20%，频谱利用率提升 17%。此外，得益于上下行链路独立调度与负载均衡策略，切换失败率降低 40%以上，特别在地铁环境中表现更为稳定。能效测试也显示，资源调度更均衡使基站功耗降低 12%，为绿色通信提供一定支撑。

4.2 工程应用潜力与未来发展方向

本文提出的无线资源动态分配机制，在工程落地方面具备良好的适应性。首先，其分布式部署结构可直接嵌入现有 5G NR 网络架构，无需大规模改造，便于运营商逐步替换传统调度模块；其次，该机制对计算资源要求适中，控制逻辑具备可配置性，便于集成至现有边缘计算节点或小基站硬件中实现本地智能调度。在实际试点项目中，该机制已在某高校园区与高层写字楼中进行初步部署测试，结果显示平均用户体验速率提升 21%，网络拥塞状况显著缓解。

同时，随着未来 6G 的提出，网络密度将进一步提升，资源粒度将更细，服务类型更丰富。本文机制的灵活架构为未来多维异构融合网络提供了通用适配框架。在后续研究中，一方面可将 AI 算法嵌入感知与调度环节，如通过强化学习优化资源选择路径，提高自适应性；另一方面应拓展该机制在 D2D 通信、车联网（V2X）、工业物联网等垂直行业场景中的可移植性。此外，为进一步提升系统鲁棒性与安全性，可融合区块链进行边缘资源认证与授权管理，探索“可信资源调度”新模式。

综上，面向超密集组网的无线资源动态分配机制，不仅能够当前 5G 系统中提升性能，更为未来通信网络的智能演进提供了方法储备与理论支撑。结论部分

将对全文进行系统性归纳与展望。

结论

本文围绕“面向超密集组网的无线资源动态分配机制研究”这一主题，结合 5G 及未来 6G 网络发展趋势，针对传统接入与分配机制在高密度异构网络中的性能瓶颈，提出了一套以上下行解耦、多维资源感知、动态调度与多基站协同为核心的资源分配机制。通过理论分析、机制设计与仿真验证，系统展示了该机制在用户接入率、频谱利用率、网络能效与负载均衡方

面的优势。

研究表明，在超密集异构组网环境下，该机制能显著缓解资源冲突与信道干扰，提高系统整体性能与用户体验，并具备较好的可移植性与工程落地价值。未来可进一步引入智能算法、自适应学习模型与安全认证机制，拓展其在垂直行业网络中的应用潜力，为下一代通信系统提供关键支撑。本文的研究为高密度无线接入网络资源管理提供了可行的优化路径与理论基础。

参考文献

- [1] 李丹, 江霞, 柳琳, 等. 基于自适应学习率 CNN 的物联网网络资源分配方法研究[J]. 智能物联技术, 2025, 57(01): 26-29.
- [2] 胡翔. 基于 LSTM-RNN 的网络资源传输效率优化调控方法[J]. 信息技术与信息化, 2025, (01): 74-78.
- [3] 刘元媛, 李伟, 肖鑫, 等. 基于认知无线电的分步式博弈低轨卫星频谱共享策略研究[J/OL]. 无线电通信技术, 1-15[2025-06-28].
- [4] 段照辉. 基于融合分簇算法的车联网认知频谱分配方法研究[D]. 西安理工大学, 2024.
- [5] 王鹏. 基于交通密度的 C-V2X 模式 4 性能分析及优化[D]. 兰州交通大学, 2024.