

超密集异构网络下5G小基站节能部署与资源分配

曹汉哲

河北广电网络集团秦皇岛有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘要: 超密集异构网络中 5G 小基站的密集部署虽提升了网络容量与覆盖,但能耗问题突出。本文围绕 5G 小基站节能部署与资源分配展开研究,分析了网络架构复杂化及业务时空差异性带来的能耗挑战。通过识别业务特征,将场景分类并提出动态节能部署策略,还从频谱共享、干扰管理等方面优化资源分配,兼顾能效、绿色化与用户公平性。研究为超密集异构网络下 5G 小基站节能运营提供了有效策略,对提升网络能效意义重大。

关键词: 超密集异构网络下; 5G小基站; 节能部署; 资源分配

引言: 在 5G 通信技术向高带宽、低时延、广连接演进的过程中,超密集异构网络凭借小基站的灵活部署,成为满足海量用户与多样化业务需求的核心架构。然而,小基站的高密度部署不仅加剧了网络架构的复杂性,导致干扰管理、回传链路及移动性管理的能耗显著上升,还因业务流量的时空分布不均,引发资源闲置、覆盖冗余与能效失衡等问题,制约了网络的绿色可持续发展。当前,如何在保障通信质量的前提下实现小基站的节能部署与高效资源分配,已成为行业研究的关键课题。基于业务特征识别与场景分类,构建动态节能部署策略,结合频谱共享、干扰协同等技术优化资源分配,旨在为解决超密集异构网络的能耗难题提供新思路,推动 5G 网络向高能效、低成本方向演进。

1 超密集异构网络概述

超密集异构网络(Ultra-Dense Heterogeneous Networks, UDN)是 5G 及未来通信网络中为应对海量连接与超高流量需求而提出的新型网络架构,其核心特征是在宏基站覆盖范围内,密集部署微基站、皮基站、飞基站等不同类型的小基站,形成多层次、多制式的异构通信环境。该架构通过缩短用户与基站的距离,显著提升频谱效率与网络容量,可满足千倍级流量增长与毫秒级时延要求,广泛适配智慧城市、工业物联网、车联网等场景。与传统宏基站网络相比,UDN 具有部署灵活、覆盖精准、成本可控等优势,但同时呈现出“宏微协同、疏密结合”的复杂拓扑,涉及宏基站与小基站的层级协作、跨制式设备的兼容互通,以及多频段资源的融合调度。此外,UDN 的动态性更为突出,用户移动性与业务负载的时空波动,要求网络具备实时感知、自适应调整能力,这也为其节能优化与资源管理带来了独特挑战^[1]。

2 超密集异构网络下 5G 小基站部署的能耗挑战

2.1 网络架构复杂化导致的能耗激增

2.1.1 干扰管理能耗

小基站的密集部署使同频、邻频干扰问题加剧,为保障通信质量,需通过持续的干扰检测、功率调整与信号过滤维持网络稳定性。实时干扰监测需基站保持高频次信号采样与计算,动态功率控制则增加了射频模块的能耗波动,而抗干扰算法的复杂运算进一步占用基站算力资源,导致额外能耗,尤其在多基站重叠覆盖区域,干扰管理能耗可占单站总能耗的 30% 以上。

2.1.2 回传链路能耗

超密集异构网络中,小基站需通过有线或无线回传链路接入核心网,高密度部署使回传节点数量呈数量级增长。无线回传(如毫米波、微波)需维持高功率信号传输以对抗路径损耗,有线回传则因光纤/电缆的部署规模扩大,配套传输设备(如光模块、交换机)的待机与运行能耗显著上升,且回传链路的冗余备份设计进一步加剧了能源浪费。

2.1.3 移动性管理能耗

用户在宏基站与小基站间的频繁切换,以及小基站覆盖范围内的跨站移动,使移动性管理复杂度骤升。网络需实时更新用户位置信息、切换上下文与资源预留状态,触发大量信令交互与数据同步。尤其在高速移动场景中,切换判决、重配置与连接重建的高频次操作,导致基站信令处理能耗与用户设备功耗同步增加。

2.2 业务时空差异性对能耗的影响

2.2.1 资源闲置

业务流量的时间分布不均表现为明显的峰谷差异,如工作日早晚高峰的通勤场景与夜间的低负载状态。小基站若保持全天满功率运行,在流量低谷时段,大量频谱、计算及功率资源处于闲置状态,却仍消耗基础能耗。例如,商场小基站在闭店后,90% 以上的资源未被

利用,但设备仍需维持待机与信号覆盖,造成能源的无效消耗。

2.2.2 覆盖冗余

业务空间分布的不均衡使热点区域与非热点区域形成鲜明对比。为覆盖潜在业务需求,小基站常按峰值负载规划部署,导致非热点区域出现覆盖重叠。例如,郊区与城区边缘的小基站覆盖范围重叠度可达40%以上,重叠区域的信号叠加不仅未提升服务质量,反而因多基站同时运行,增加了不必要的能耗开销。

2.2.3 能效失衡

不同业务类型的能耗需求与资源消耗存在显著差异,而统一的资源分配模式无法适配这种差异性。高带宽业务(如高清视频)与低速率业务(如物联网传感)共享基站资源时,为满足高优先级业务的性能要求,基站常以满功率运行,导致低负载业务的单位比特能耗激增。同时,用户分布的空间不均使部分基站长期处于轻负载状态,而核心区域基站则高负荷运行,形成全网能效的严重失衡。

3 基于业务特征识别的5G小基站节能部署策略

3.1 业务特征识别与场景分类

3.1.1 离散小型热点(HotSpot)

离散小型热点通常分布在小型商场、社区便利店周边、街角公园等地方。这类场景的用户数量时多时少,高峰时段往往出现在人们休闲或短暂停留的时刻,比如傍晚下班后、周末上午。用户主要进行即时通讯、浏览资讯等操作,对数据流量的需求处于中等水平,而且每次使用的时间不会太长。用户在这些区域的移动较为频繁,不会长时间停留在同一个位置。由于周围建筑的分布较为零散,信号容易被遮挡,所以需要小基站能够根据实际情况灵活地安装和投入使用^[2]。

3.1.2 连续街道热点(HotLine)

连续街道热点多沿着城市里的商业街、交通主干道分布。其服务的对象主要是在路上行走的行人、骑行的非机动车用户以及行驶速度较慢的车辆里的人员,这些用户的移动方向相对固定,大多是沿着街道往返。业务流量在工作日的早晚出行高峰期会明显增加,用户主要使用地图导航、实时语音通话、在线支付等业务,这些业务对信号的持续稳定性要求很高,一旦信号中断可能会影响用户体验。

3.1.3 大型空间热点(HotZone)

大型空间热点包括体育场馆、会展中心、城市中心广场等面积较大的区域。在举办大型活动的时候,这些地方会聚集大量的人群,用户密度极高,而且这种高

峰状态会随着活动的开始而出现,随着活动的结束而消退,持续时间一般与活动时长相当。用户在此场景下多进行高清视频录制与上传、大型文件实时共享等操作,这些业务对网络的传输带宽和数据处理速度要求很高,不允许有明显的延迟。虽然用户在活动期间不会进行长距离的移动,但活动范围会覆盖整个大型空间,需要多个小基站协同工作,才能确保每个角落都有良好的信号覆盖。

3.1.4 室内场景

室内场景涵盖办公楼、大型商场、居民住宅区等封闭的空间环境。由于墙壁、楼板等建筑结构的阻挡,信号在室内的传播会受到很大影响,信号强度衰减明显。用户数量会随时间呈现出规律性的变化,例如办公楼在工作日的白天人员密集,到了夜晚则变得空旷;商场在周末和节假日的客流量会大幅增加,工作日相对较少。用户在室内主要开展办公协作、视频会议、在线购物等业务,这些业务对网络的稳定性要求较高,需要持续稳定的流量支持,用户在室内的移动范围相对较小,停留时间较长。

3.2 动态节能部署策略

3.2.1 离散小型热点场景

针对离散小型热点场景,采用“潮汐式”运行机制。在非高峰时段,仅保留少量小基站处于低功率运行状态,维持基础信号覆盖,其余基站进入休眠模式以节省能耗。当监测到用户逐渐聚集,即将进入高峰时段时,提前唤醒周边休眠的基站,并根据用户分布情况适当调整基站的发射功率,确保覆盖范围内信号稳定。高峰过后,随着用户逐渐离开,再逐步减少激活的基站数量,使基站运行状态与用户流量变化同步,有效降低非必要能耗。

3.2.2 连续街道热点场景

连续街道热点场景实施“链式协同+动态功率”策略。沿街道部署的小基站形成协同网络,实时共享用户移动方向和流量分布信息。在用户流量较少的时段,减少激活基站的数量,通过提高部分基站的发射功率来扩大覆盖范围,保证街道沿线的信号连续性。当进入高峰时段,增加激活基站的数量,同时降低各基站的发射功率,减少基站间的信号干扰,在满足用户对信号稳定性要求的同时,避免功率浪费,实现节能与通信质量的平衡。

3.2.3 大型空间热点场景

大型空间热点场景采取“分区分管+弹性调度”策略。将整个区域划分为多个独立的子区,每个子区配备相应的小基站组。在无大型活动的非高峰时段,所有

子区仅保留核心位置的小基站低功率运行，维持基本覆盖。当有大型活动即将举行时，根据活动规模和用户分布预测，分阶段激活各子区的基站组，并通过子区间的协同调度，均衡各基站的负载。活动期间，实时监测各子区的用户密度变化，灵活调整基站的运行状态；活动结束后，迅速缩减激活的基站数量，恢复低能耗运行模式，最大限度减少能源消耗。

4 超密集异构网络下 5G 小基站资源分配优化

4.1 动态频谱共享与子载波分配优化

在超密集异构网络中，5G 小基站的密集部署使得频谱资源的稀缺性愈发凸显，动态频谱共享成为提升频谱利用率的核心手段。这一机制打破了传统静态频谱划分的局限，通过实时感知周边基站的频谱使用状态，实现授权频段与非授权频段的灵活切换。例如，当某一区域的授权频段负载过高时，小基站可自动接入非授权频段承载部分数据业务，待负载缓解后再切换回授权频段，确保关键业务的连续性。子载波分配优化则聚焦于正交频分复用（OFDM）系统的精细化调度。基于用户的信道质量、业务类型及时延需求，子载波被动态分配给最适合的用户。

4.2 干扰管理与协同资源分配

超密集部署下，小基站与宏基站、小基站之间的干扰问题成为制约网络性能的关键瓶颈，干扰管理需从“被动规避”转向“主动协同”。通过构建干扰感知网络，各基站实时共享干扰源信息，动态调整发射功率与资源占用策略：当检测到相邻小区的信号干扰超过阈值时，可自动降低本小区的发射功率，或切换至干扰较小的频段，实现干扰的精准抑制。协同资源分配则强调多基站间的协同决策。通过组建动态协同簇，小基站可联合分配时间、频率与功率资源，避免资源冲突。

4.3 能量效率与绿色资源分配

随着小基站数量的激增，能耗问题日益突出，绿色资源分配成为实现网络可持续发展的核心目标。能量效率优化需在资源分配中融入节能逻辑，通过动态关断与休眠机制减少无效能耗：当某一区域的用户负载低于阈值时，部分小基站可进入休眠状态，其覆盖区域的业务由相邻基站接管，待负载回升后再唤醒，在不影响服务

质量的前提下降低整体能耗。资源分配策略还需平衡传输性能与能耗成本。同时，结合可再生能源供电（如太阳能、风能）的小基站，可根据能源供应状态调整资源分配权重，在能源充足时承担更多业务，能源短缺时则优先保障核心业务，形成“负载-能源”动态适配的绿色网络架构。

4.4 业务差异化与用户公平性保障

5G 网络承载的业务类型日趋多元，从增强移动宽带（eMBB）到超可靠低时延通信（uRLLC），不同业务的 QoS 需求差异显著，业务差异化资源分配成为必然要求。通过构建多优先级资源调度机制，网络可对业务类型进行分级：对于自动驾驶、工业控制等 uRLLC 业务，预留专用资源块并赋予最高调度优先级，确保毫秒级时延与近 100% 的可靠性；对于视频点播等 eMBB 业务，则侧重带宽保障，灵活分配子载波以适配高清数据流需求。用户公平性保障则致力于消除“边缘用户”与“中心用户”的服务差距。在资源分配中引入公平性算法，如比例公平准则，既避免少数用户独占资源，又确保每个用户获得与自身需求匹配的资源份额^[3]。

结束语

超密集异构网络中 5G 小基站的节能部署与资源分配，是平衡网络性能、能耗与公平性的关键课题。从动态频谱共享的高效利用，到协同干扰管理的精准调控，从绿色资源分配的可持续发展，到业务差异化与公平性的兼顾，每一环都在推动网络向高效、低碳、公平演进。未来，随着 AI 与网络感知技术的深度融合，小基站将实现更智能的资源调度与节能策略，在满足多元化业务需求的同时，为 5G 网络的可持续发展注入持久动力，最终构建起性能卓越、绿色环保且公平普惠的通信生态。

参考文献

- [1]尹龙.5G基站间干扰控制与信号质量优化策略分析[J].电子技术(上海),2025,54(2):382-383.
- [2]刘晓健.探讨物联网形势下的5G通信技术应用[J].中国科技期刊数据库 工业A,2020(11):176-178.
- [3]罗新军,林天华.基于微小基站的城中村深度覆盖解决方案[J].电信快报(网络与通信),2022(2):112-113