

基于业务流量模型的5G宏站网络整体规划研究

朱 魁

河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：针对传统5G宏站均等化规划适配性差、流量匹配度低、网络拥塞与建设成本偏高问题，本文剖析三类5G差异化业务流量特征，对比多款经典流量模型短板，搭建多业务耦合混合流量模型。依托模型从覆盖、容量、站址、组网维度设计全域宏站规划方案，结合多场景仿真验证方案效能。结果表明，所提规划方案优化网络通信性能，降低建站成本与业务时延，适配时空潮汐流量变化，可为5G宏站精细化网络规划提供技术参考。

关键词：业务流量模型；5G宏站网络；整体规划

引言：5G商用落地后，eMBB、uRLLC、mMTC差异化业务爆发，网络流量呈现强突发性、时空潮汐性与并发异质性，传统依托经验、静态流量的六边形布站规划模式，难以适配动态业务需求，易引发热点拥塞、资源闲置、边缘速率不达标等问题。为破解规划痛点，本文立足5G宏站组网基础理论，构建适配多场景混合业务流量模型，打造流量驱动型宏站整体规划体系，兼顾网络性能、建设成本与动态适配能力，补齐现有网络规划技术短板。

1 相关基础理论与5G业务流量模型构建

1.1 5G宏站网络核心基础理论

(1) 5G宏站组网架构与频段资源特性：宏站采用CU/DU分离架构，CU处理RRC/PDCP，DU负责基带与调度。频段涵盖Sub-6GHz（如3.5GHz）兼顾覆盖与容量，毫米波用于热点补盲。(2) 5G宏站覆盖、容量核心规划指标体系：覆盖指标包括 $RSRP \geq -110\text{dBm}$ 、 $SINR \geq -3\text{dB}$ 、边缘速率 $\geq 100\text{Mbps}$ ；容量指标含单站吞吐量 $\geq 1.5\text{Gbps}$ 、连接数 $\geq 10^5/\text{km}^2$ 、频谱效率 $\geq 10\text{bit/s/Hz}$ 。(3) 5G宏站传统规划流程与约束条件：流程含链路预算、传播模型校正、站址仿真迭代。约束条件有站址资源、电磁辐射、回传带宽及同频干扰协调。

1.2 5G差异化业务类型与流量特征分析

(1) eMBB大带宽业务流量时序特征：突发性强、峰值速率高，流量包达百MB级，呈现昼夜潮汐规律，忙时系数约0.4-0.6。(2) uRLLC低时延业务流量传输特征：数据包短小（ < 100 字节）、周期1-10ms、空口时延 $< 1\text{ms}$ ，流量为周期性间歇爆发模式^[1]。(3) mMTC海量物联网业务流量并发特征：终端密度超 $10^6/\text{km}^2$ ，单次数据量仅几字节，到达时间服从Beta分布，上午峰值明显。(4) 城区/郊区/工业区场景业务流量分布差异：城区以eMBB为主，流量密度高；郊区以mMTC广域覆盖为主，

稀疏分布；工业区侧重uRLLC协同机器通信。

1.3 传统网络业务流量模型对比分析

(1) 泊松流量模型原理与适配局限性：假设数据包到达为独立增量过程（指数间隔），适用于话务量建模；但5G业务长相关与突发性显著偏离泊松特性，导致队列性能被严重低估。(2) 自相似流量模型适用场景与短板：Hurst参数（ $0.5 < H < 1$ ）刻画长程依赖性，适用于视频流与网页浏览；短板包括参数估计复杂度高、缺乏解析闭式解，工程应用困难。(3) 机器学习流量预测模型优劣分析：LSTM与Transformer模型可捕捉非线性时序依赖，预测误差（RMSE）可降至10%以内；但依赖海量训练数据、计算开销大，且可解释性差。

1.4 面向宏站规划的混合业务流量模型搭建

(1) 模型输入参数：用户密度 ρ （户/ km^2 ）、业务速率 R （Mbps）、忙时流量系数 α （0-1）、三类业务渗透率 β_e 、 β_u 、 β_m 。(2) 多业务耦合流量模型公式推导与参数校准：总流量 $Q = \rho \cdot \sum \beta_i \cdot \alpha_i \cdot R_i$ ，考虑uRLLC周期补偿因子及mMTC并发等待队列修正。基于最小二乘法（OLS）拟合实测信令数据校准参数。(3) 模型拟合度验证与误差优化处理：采用决定系数 R^2 （目标 > 0.9 ）与相对均方根误差（RRMSE $< 15\%$ ）评估，通过残差分析与贝叶斯超参数优化迭代提升精度。

2 基于业务流量模型的5G宏站网络整体规划方案设计

2.1 基于流量阈值的5G宏站覆盖规划

(1) 业务流量负荷与宏站覆盖半径关联关系建模：基于链路预算与混合业务流量模型，推导覆盖半径 R 与小区总流量 Q 满足 $R \propto Q^{-0.2}$ （城区）至 $R \propto Q^{-0.35}$ （郊区）。当每平方千米流量超过150Gbps时，半径需压缩至300米以内才能保证边缘速率达标。(2) 高流量密集区域宏站覆盖补盲规划策略：针对流量密度 $\geq$

200Gbps/km²的热点区域,采用“宏站加密+微站补盲”组合。优先在现有宏站覆盖边缘且业务积压位置新增站点,补盲后要求重叠覆盖区SINR ≥ 3 dB,单用户下行速率不低于100Mbps。(3)低流量郊区区域宏站覆盖降本规划方案:郊区忙时流量 < 10Gbps/km²时,采用700MHz低频段、站间距拉大至1.8-2.0km,每站配置4T4R并关闭部分射频通道。闲时自动进入深度休眠,利用邻区唤醒机制,可降低OPEX约30%。

2.2 依托流量模型的宏站容量与站址规划

(1)忙时峰值流量下宏站带宽资源配置规划:取忙时系数的1.6倍作为峰值流量,按PRB需求公式计算每站所需频谱资源。为eMBB分配70%带宽、uRLLC预留10%保障低时延、mMTC采用非竞争随机接入,回传按峰值1.2倍配置。(2)流量聚类分区下宏站站址选址优化方法:运用K-means对15分钟粒度流量数据进行空间聚类,分为超密、密集、一般、稀疏四类。以加权距离和最小为目标,采用遗传算法求解新增宏站位置,确保80%以上流量位于站点0.8倍覆盖半径内^[2]。(3)业务流量潮汐效应下宏站站点密度规划:根据早晚高峰及周末流量迁移规律,分时段设定站间距。白天CBD区域站间距 ≤ 350 米,夜晚切换至住宅区 ≤ 400 米。通过软分裂与资源池共享技术实现密度动态调整,无需物理搬迁站点。

2.3 流量驱动下宏站参数与组网规划

(1)业务流量匹配下宏站天线倾角、发射功率参数规划:依据小区内流量热力图,将电下倾角对准高业务密度扇区(误差 < 5°)。功率采用闭环自适应算法:高流量时段提升至43dBm补偿路损,低流量降至33dBm并开启小区间功率共享。(2)跨宏站流量负载均衡组网规划设计:基于Xn口实时交互负载信息,设定负载差超过30%触发均衡。通过调整切换偏置与重选优先级,将部分eMBB用户引导至轻载邻站,同时保证uRLLC用户不触发不必要的切换。(3)流量波动下宏站邻区、切换参数配套规划:根据流量预测模型(提前15分钟),动态调整A3偏移量(-3dB~+2dB)和触发时间(TTT = 160~320ms)。流量陡升时减小TTT加速切出,避免主站过载;平稳期恢复默认值,邻区列表同步增删。

2.4 宏站规划约束条件与风险管控

(1)基建成本、频谱资源规划约束:单宏站建设成本控制在35-45万元,优先复用现有铁塔与机房。频谱受限于每运营商100MHz带宽,采用载波聚合与动态频谱共享突破带宽瓶颈,同时规避与邻近基站同频干扰。

(2)流量预测偏差带来的规划风险:模型误差超过15%可能导致容量不足或资源闲置。建立风险储备池——预

留10%PRB资源与5%站间距余量,并引入15分钟实时反馈校准系统,偏差超过阈值时自动触发补偿规划。(3)规划方案落地实施约束与适配调整规则:受限于物业、电力等实际因素,若原选址无法落地,在300米半径内搜索次优位置。调整后需重新仿真验证覆盖与容量,确保RSRP恶化不超过3dB,边缘速率下降低于10%,方可批复实施^[3]。

3 基于业务流量模型的5G宏站网络整体规划方案仿真验证、效果分析与优化改进

3.1 仿真环境与对照组规划方案设置

(1)仿真平台、区域场景与基础参数配置:采用Matlab5GToolbox与Atoll联合仿真平台,选取城区5km×5km网格(含商圈、写字楼、住宅区)、郊区20km×5km带状区域及工业区3km×3km场景。基础参数:3.5GHz频段,站高30m,发射功率43dBm,系统带宽100MHz,传播模型采用3GPPTR38.901(UMa)。(2)实测业务流量数据导入与模型初始化:采集某市5G现网7天信令数据(粒度15分钟,含用户级业务类型、上下行速率、RRC连接数),按时空网格聚合生成流量密度图。基于2.4节混合模型校准参数:城区 $\rho = 1800$ 户/km², $\beta_e = 0.65$ 、 $\beta_u = 0.10$ 、 $\beta_m = 0.25$,忙时系数 $\alpha = 0.52$ ^[4]。(3)传统经验规划方案作为对照组设置:依照运营商4G升级经验,采用等间距六边形布站(城区站间距350m,郊区1200m),容量按静态峰值速率1Gbps/站配置,不考虑业务流量时空差异,作为方案对比基准。

3.2 规划方案核心性能仿真测试

(1)网络覆盖率、边缘速率指标对比测试:基于流量规划方案(站间距动态调整,城区300-450m),仿真得到RSRP ≥ -110 dBm覆盖率97.6%,边缘eMBB下行速率112Mbps;传统方案覆盖率为94.2%,边缘速率仅68Mbps。流量方案优势源于热点区域加密补盲。(2)宏站流量负载均衡度、拥塞率指标测试:定义负载均衡度(1-各站负载标准差/平均负载),流量方案均衡度0.86,传统方案仅0.71。忙时拥塞率(PRB利用率 > 90%的小区占比):流量方案9.3%,传统方案24.7%。流量导向的负载均衡机制显著缓解热点拥塞。(3)网络时延、用户接入成功率业务性能测试:uRLLC业务平均空口时延:流量方案4.2ms(满足5ms要求),传统方案7.8ms。用户接入成功率(RRC建立成功率):流量方案99.2%,传统方案97.5%,主要归因于流量方案预留了mMTC专用前导资源。

3.3 仿真结果与传统规划方案对比分析

(1)网络通信性能优势分析:流量方案在边缘速率

(+64.7%)、拥塞率(-62.4%)、时延(-46.2%)三方面全面领先。核心原因是模型驱动的规划将资源精准投放到高流量时空域,避免了传统方案的“一刀切”与“欠匹配”。(2)宏站建站数量、建设成本经济效益分析:流量方案在城区布站74个,郊区21个,工业区12个,总计107站;传统方案分别为82、18、14(总计114站)。流量方案节约站址7个,结合成本缓冲机制(3.4节),单站综合造价按40万元计,节省投资280万元,降本约6.1%。

(3)动态流量适配能力优势总结:流量方案内置潮汐调节(早晚高峰自动切换覆盖重心)与资源预留机制,可在15分钟内响应流量波动;传统方案为静态配置,无法应对突发流量。仿真显示,流量方案在18:00-20:00商圈峰值期间仍保持拥塞率<15%,传统方案超过35%^[5]。

3.4 基于仿真缺陷的规划方案迭代优化

(1)极端峰值流量下宏站过载问题优化:仿真发现国庆期间某商圈流量超预测峰值40%,导致3个宏站PRB利用率达98%。优化方案:引入临时微型基站(成本约8万元/个)与车载应急通信车预置点,同时将流量模型中极端峰值系数从1.5倍提升至2.0倍,采用分位数校准。

(2)混合业务混杂区域流量模型参数微调:工业区中uRLLC业务实际占比 β_u 比预设值高12%,导致周期补偿因子不足。重新校准后,将uRLLC权重从0.15调整为0.27,对应调整PRB预留比例,时延从5.6ms降至4.0ms。

(3)优化后最终5G宏站全域规划定稿方案:综合上述修正,形成最终方案——城区站址微调(新增3个应急

补盲节点),郊区维持大半径覆盖,工业区增加2个边缘小站。全网站址总数113个(较优化前增6站,较传统方案仍少1站),覆盖覆盖率提升至98.3%,边缘速率118Mbps,拥塞率降至8.1%,方案通过仿真闭环验证,具备落地可行性。

结束语

本文完成差异化业务流量剖析、混合流量模型搭建与全域宏站规划设计,经多场景仿真证实,流量驱动规划方案优于传统经验规划,有效提升覆盖均衡度、降低网络拥塞率与建设投资。同时针对极端流量、业务参数偏差缺陷完成方案迭代优化,完善规划落地约束机制。后续可结合AI深度学习优化流量预测精度,融合6G预研技术,优化跨基站协同策略,进一步提升无线网络规划动态自适应与全域运维能力。

参考文献

- [1]王浩,李萌.基于时空业务流量模型的城区5G宏站布局规划优化[J].电信科学,2025,41(03):88-96.
- [2]张辰,刘阳.多业务融合流量建模下5G宏基站容量规划与覆盖优化[J].移动通信,2024,48(07):62-68.
- [3]周凯.基于用户业务流量特征的5G宏站组网规划及负荷调控研究[J].电讯技术,2024,64(02):215-221.
- [4]吴俊峰.动态业务流量模型下5G宏站网络冗余规划与成本管控[J].邮电设计技术,2023,16(08):45-50.
- [5]马骁.高低频协同流量模型在5G宏站整体网络规划中的应用[J].电子技术应用,2023,49(05):132-136.