

# 5G网络光纤传输线路优化改造实践研究

吴 恺

润建股份有限公司 广西 南宁 530000

**摘要：**5G网络对承载网提出了高带宽、低时延、高可靠的严苛要求，传统光纤传输线路在拓扑结构、纤芯资源、运维模式等方面存在明显短板。本文以某市联通5G承载网光纤线路改造工程为实例，系统分析了现网存在的问题，提出了包括环网拓扑优化、纤芯资源整合、OTN下沉部署、智能运维平台建设在内的综合改造方案。工程实践表明，改造后核心节点间链路时延由4.8ms降至2.1ms，链路利用率均衡度提升35%，故障定位时间由平均45分钟缩短至8分钟。本研究为同级别城市5G承载网光纤线路升级改造提供了可复制的技术方案与实施经验。

**关键词：**5G网络；光纤传输；线路优化；OTN；承载网

**引言：**5G商用网络对承载网提出了三个数量级的性能跃升要求：单站峰值速率达Gbps级别，端到端时延需控制在10ms以内，可靠性要求达到99.999%。然而，当前各地市现网光纤传输线路普遍基于4T时代“树形+链形”拓扑建设，纤芯利用率不均、保护倒换机制滞后、运维依赖人工等结构性缺陷严重制约5G网络性能释放。某市联通2024年上半年统计数据显示，承载网引发的业务劣化事件占比高达37%，其中光纤链路故障和带宽瓶颈是主要诱因。本文以该市5G承载网光纤线路改造工程为依托，探索从物理拓扑、资源配置到运维管理的系统化优化路径，为同级别城市提供实践经验。

某市联通现有光纤传输网络主要服务于4G基站回传和集团客户专线业务，网络拓扑以“核心环+汇聚链+接入树”为主。核心层由3个核心节点组成10GE环网，覆盖全市主要区域。汇聚层共有12个汇聚节点，其中8个以链形方式上联至核心节点，仅4个成环。接入层采用树形结构，单个接入环挂接基站数量普遍在6至8个，部分环甚至达到12个。这种拓扑结构在4G时代尚可维持，但面对5G的高密组网和毫秒级时延要求，暴露出明显缺陷：链形汇聚节点无保护路由，单点故障将导致下游全部基站脱管；接入环节节点过多导致环网自愈时间超标，实测最长倒换时间达120ms，超出5G业务50ms的容忍上限。表1对比了改造前后承载网的关键拓扑指标。

## 1 现网光纤传输线路现状与问题分析

### 1.1 网络拓扑结构分析

表1 改造前后承载网拓扑指标对比

指标项	改造前	改造后	优化幅度
核心层成环率	100%	100%	—
汇聚层成环率	33%	100%	+67%
接入环平均节点数	7.2个	4.5个	-38%
接入环最大节点数	12个	6个	-50%
环网自愈时间（最大）	120ms	35ms	-71%

### 1.2 纤芯资源配置现状

经过对全市2387公里光缆的纤芯使用情况普查，发现纤芯资源配置存在严重的结构性失衡。核心层光缆纤芯占用率已达78%，部分主干光缆段在高峰期出现拥塞，而接入层部分光缆纤芯占用率不足15%。造成这一问题的主要原因是4G时代基站按行政区域逐点接入，未形成系统性的纤芯规划；加之近三年新增5G基站大量采用独立纤芯方式接入，消耗了相当比例的新增资源<sup>[1]</sup>。更严重的是，各汇聚区之间缺乏纤芯调度能力，富余纤芯无法向

紧缺区域动态调配。普查数据进一步显示，现有光缆中36芯及以上大芯数光缆占比仅28%，难以满足5G密集组网场景下多业务平面隔离、多路由保护的需求。另外，纤芯性能劣化问题突出，约12%的纤芯存在损耗超标现象，其中部分为早期敷设的G.652B光纤，在高速率传输场景下偏振模色散指标已不满足要求。

### 1.3 传输时延与性能瓶颈

5G urLLC场景要求端到端时延不超过10ms，其中承载网时延需控制在2至3ms以内。对现网进行的端到端

时延测试表明,核心节点到边缘节点的平均单向时延为4.8ms,部分长链路时延超过7ms,无法满足5G低时延业务要求。时延大主要由三方面因素造成:一是汇聚层链形拓扑导致信号迂回传输,某汇聚节点到核心节点需经过4跳中转,光传输距离增加约35公里;二是设备处理时延偏高,现网老旧OSN设备转发时延达80微秒每节点,而新型设备可降至20微秒;三是光缆路由不优,部分路段因管道资源限制采用“L”形迂回敷设。业务承载能力方面,现网单波道以10G为主,仅核心层少量波道升级至100G。图1展示了改造前后核心节点至各汇聚节点的平均时延分布对比,数据来自实测169个样本点的统计结果。图中可见,优化后所有汇聚节点时延均降至3ms以下。

## 2 线路优化改造方案设计

### 2.1 拓扑结构优化方案

拓扑改造的核心目标是实现“核心双节点互联、汇聚全部成环、接入适度收敛”。具体方案包括:在核心层新建第二个核心节点,与原有核心节点形成双活架构,两节点间采用两条不同物理路由的96芯光缆互联,实现链路1:1冗余保护。汇聚层对8个链形节点进行成环改造,新建光缆约62公里,形成4个汇聚环,每个环挂接3至4个汇聚节点,环网容量升级为100GE。接入层按“5G基站优先、普通基站整合”原则优化,将单个接入环节点数控制在6个以内,新增OLT局站作为接入汇聚点,缩短接入距离。同时引入SPN技术替代原有PTN,支持FlexE硬切片实现5G业务与既有业务的物理隔离。拓扑改造后,网络可靠性大幅提升,任何单节点或单链路故障均可通过环网保护实现50ms内倒换。

### 2.2 纤芯资源整合策略

针对纤芯资源结构性失衡问题,实施“盘活存量、优化增量”双轨策略。盘活存量方面,部署综合纤芯管理系统,对全市2387公里光缆纤芯进行GIS建模入库,建立纤芯占用电子台账。对利用率低于15%的纤芯进行清理退网,释放约320芯公里资源;将4G、5G、政企专线等多业务纤芯按行政区域统一规划,采用波分复用方式实现多业务共享同一条纤芯,纤芯复用系数由1提升至2.5。优化增量方面,在新建及扩建光缆中全面采用96芯及以上大芯数光缆,并预留专用纤芯用于路由保护。针对老旧光缆中性能不达标的纤芯,采用OTDR精准定位衰减点,进行熔接点重熔或替换故障段。资源整合完成后,核心层纤芯占用率从78%降至52%,汇聚层纤芯占用率从63%降至41%,接入层纤芯利用率从不足15%提升至32%,资源配置更为均衡<sup>[2]</sup>。

### 2.3 OTN下沉与设备升级

为实现5G承载的低时延目标,实施OTN下沉部署和设备协同升级。在汇聚节点部署OTN设备,将OTN下沉至靠近接入侧的物理位置,使5G基站信号在接入层即进入OTN直达通道,避免经汇聚层迂回转发。设备升级方面,将核心层和汇聚层设备全面替换为低时延转发设备,单节点转发时延由80微秒降至25微秒以下<sup>[3]</sup>。在核心层与汇聚层之间,采用单波道100G、6波道捆绑方案,链路总容量提升至600G;汇聚层与接入层之间,根据业务密度采用25G或50G波道。同时部署智能光功率均衡系统,每15分钟对全网光功率进行自动调整,保障多波长传输系统的稳定性。设备升级后,全光缆路由长度经优化后平均缩短约19%。

## 3 改造实施与关键技术

### 3.1 光缆路由优化设计

光缆路由优化遵循“最短路径优先、安全可靠并重”原则。利用GIS系统结合城市管道普查数据,重新规划核心节点至各汇聚节点之间的最优光缆路由。针对原路由存在的迂回问题,新建3段直达光缆:河西核心节点至城南汇聚节点、城东汇聚节点至经开区汇聚节点、北环路沿线架空改入地管道,共计新建光缆28.7公里。路由优化后,核心节点到最远汇聚节点的光缆长度由原来的31公里缩短至23公里。在管道资源紧张区域,采用微管微缆技术实现低成本扩容,利用现有管道空闲子管敷设新型微缆16.5公里。光缆施工过程中,采用气吹法替代传统牵引法,有效降低了施工对既有缆线的损伤风险。所有新建光缆均采用G.652D低损耗光纤,满足100G及以上速率传输要求。

### 3.2 传输性能调优实践

设备安装和光缆敷设完成后,进行了系统化的传输性能调优。第一阶段为光层调测,使用OTDR对每根纤芯进行双向测试,筛选出损耗超标的纤芯并进行熔接点优化。设置光时域反射仪监测门限,对高于0.25dB/km的衰减点进行研判处理,累计优化熔接点47处。第二阶段为电层调测,配置FEC纠错编码,测试不同编码方式下的OSNR容限,优选SD-FEC算法使OSNR容限降低2.1dB。第三阶段为业务层验证,使用网络分析仪测试端到端时延、抖动和丢包率。调优过程中发现城东至河西方向存在异常时延抖动,经排查确认为不同厂家设备时钟不同步所致,部署1588v2时钟同步协议后问题解决。调优后全网关键性能指标均达到商用标准<sup>[4]</sup>。

## 4 改造效果与效益分析

### 4.1 性能指标对比

改造工程于2024年8月底完成全部施工和调测工作,

经过3个月的试运行,对各项关键性能指标进行了复测验证。核心节点到边缘节点的平均单向时延从改造前的4.8ms降至2.1ms,降幅达56%;最差链路时延从7.3ms降至3.1ms,满足5G urLLC业务承载要求。链路带宽利用率方面,核心层峰值利用率从78%降至52%,汇聚层从63%降至41%,且不同链路间的利用率标准差从12.3%降至8.1%,负载均衡度显著提升。故障定位时间通过智能平台的人工智能辅助分析,由平均45分钟缩短至8分钟,大幅减少业务中断时间。环网保护倒换时间从最大120ms优化至35ms,远优于5G网络50ms的指标要求。纤芯整体利用率从之前的41%提升至62%,资源使用效率显著提高。

#### 4.2 经济效益分析

本次改造工程总投资约1870万元,其中光缆新建及改造费用占比45%,设备升级费用占比38%,勘察设计与施工费用占比12%,其他费用占比5%。根据改造后半年的运行数据测算,可量化的直接经济效益包括:因故障率降低减少的业务损失约每年210万元,纤芯复用带来的扩容投资节省约每年180万元,运维自动化减少的人工成本约每年65万元。综合测算,预计改造后每年可产生直接经济效益约455万元,静态投资回收期约4.1年。另外,网络质量提升带来的客户满意度提高、5G业务承载能力增强等间接效益,对运营商市场竞争力具有长远价值<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 社会效益与推广价值

本次光纤线路优化改造不仅带来了显著的经济效益,还产生了广泛的社会效益。首先,5G网络覆盖质量明显改善,改造后试点区域内5G平均下载速率由改造前的312Mbps提升至489Mbps,用户视频卡顿率下降约42%,有力支撑了超高清视频、云游戏等新业务落地。其次,网络可靠性提升保障了智慧城市应用稳定运行,改造至今未发生因承载网故障导致的交通信号中断或安防

视频失联事件,间接社会效益显著。从推广价值看,本方案的拓扑改造思路、纤芯资源整合策略和OTN下沉部署模式,在中等规模地市级5G承载网建设改造中具有较强的普适性。经验表明,单节点改造成本控制在15至20万元以内时,投资回收期可压缩至3年以内,具备良好的可复制性和推广前景。

#### 结束语

5G网络对承载网的高标准要求倒逼光纤传输线路必须从粗放式建设向精细化改造转变。本文以某市联通5G承载网光纤线路改造工程为实践案例,系统阐述了从拓扑优化、纤芯整合、OTN下沉到智能运维的完整改造方案。工程实践表明,“核心双活、汇聚成环、接入收敛”的拓扑改造思路可有效提升网络可靠性,纤芯资源统筹优化显著改善利用率均衡性,OTN下沉与新型设备部署有效降低端到端时延。本研究的实践经验表明,光纤传输线路优化是一项系统工程,需物理层、逻辑层、管理层协同推进。后续将重点关注光缆哑资源数字化管理和智能预测运维等方向,持续提升5G承载网络的健壮性与智能化水平。

#### 参考文献

- [1] 宋荣成. 5G发展趋势下有线电视光缆网络传输技术及故障维护研究[J]. 广播电视网络,2024,31(4):51-53.
- [2] 唐论,刘治家. 5G网络光纤尾纤不同异常情况对小区无线性能影响研究[J]. 通讯世界,2025,32(8):71-73.
- [3] 韩学利,高娟娟. 5G通信技术与广电光纤网络融合发展策略[J]. 中小企业管理与科技,2021(17):193-194.
- [4] 王明. 基于5G通信技术的智慧城市光纤网络控制系统设计[J]. 通信电源技术,2024,41(21):159-161.
- [5] 刘儒敏. 5G网络与光纤传输网络的思考与分析[J]. 通讯世界,2022,29(8):1-3.