

基于5G技术的轨道交通车地通信系统优化研究

钟 森

厦门地铁运营有限公司 福建 厦门 361000

摘要: 随着城市轨道交通向智能化、自动化方向加速演进,车地通信系统作为连接列车与地面控制中心的核心纽带,其性能直接决定了轨道交通系统的安全性与运行效率。传统车地通信技术(如WLAN、LTE-M)在带宽、时延、抗干扰能力等方面已难以满足新一代轨道交通需求。5G技术凭借其超高速率、超低时延、海量连接及高可靠性等特性,为车地通信系统优化提供了突破性解决方案。本文从技术原理、应用场景、系统架构及实践案例等维度,系统探讨5G技术对轨道交通车地通信系统的优化路径,并提出未来发展方向与挑战应对策略。

关键词: 5G技术; 轨道交通; 车地通信; 系统优化; 智能调度

1 引言

1.1 传统车地通信技术的局限性

当前城市轨道交通车地通信主要依赖WLAN(802.11 ac/ax)和LTE-M(1.8GHz专用频段)技术。WLAN虽具备成本低、易部署的优势,但在列车高速移动(时速 $\geq 80\text{km/h}$)场景下,存在带宽不足、切换频繁、易受电磁干扰等问题,导致数据丢包率高达5%-10%,严重影响列车控制信号的实时性。LTE-M虽通过专用频段优化解决了部分干扰问题,但其峰值速率仅100Mbps,难以支撑高清视频监控、乘客信息系统(PIS)等高带宽业务需求。此外,传统技术缺乏动态资源分配能力,无法根据列车运行状态(如速度、位置、载客量)实时调整通信参数,导致资源利用率不足60%。

1.2 5G技术的核心优势与轨道交通适配性

5G技术通过四大核心特性实现车地通信的质变升级:(1)超高速率,峰值速率达10Gbps,是4G的100倍,可满足4K/8K视频监控、列车状态大数据实时传输等需求。(2)超低时延,端到端时延 $\leq 1\text{ms}$,较LTE-M(20-50ms)提升1-2个数量级,确保列车控制指令的毫秒级响应^[1]。(3)海量连接,每平方公里支持100万台设备接入,可实现列车、轨道、信号灯、乘客终端等多系统无缝互联。(4)高可靠性,通过物理层安全机制、多安全域通信(MCC)及网络切片技术,确保99.999%的传输可靠性,满足轨道交通安全苛求场景。

2 5G技术优化车地通信系统的关键路径

2.1 网络架构优化:边缘计算与切片技术的融合应用

传统车地通信采用“核心网-基站-终端”三级架构,数据需经核心网转发,导致时延增加。5G引入的移动边缘计算(MEC)技术,将计算资源下沉至基站侧,实现了数据本地处理。以南京地铁为例,其在列车上部署了

4×4MIMO天线及5G终端设备,通过MEC节点直接传输列车状态数据至轨旁服务器,减少了核心网传输环节。这一改变使时延从50ms降至10ms以内,满足了CBTC(基于通信的列车控制)系统对时延 $\leq 100\text{ms}$ 、丢包率 $\leq 1\%$ 的严苛要求。网络切片技术则通过逻辑隔离实现资源定制化分配。轨道交通可划分专用切片,如eMBB切片用于高清视频传输,URLLC切片用于列车控制。每个切片独立配置QoS参数,如时延、带宽、优先级。宁句城际线测试中,CBTC业务切片时延稳定在3ms,信号大数据运维切片上行速率达180Mbps,有效避免了多业务混跑导致的资源竞争,提升了系统整体性能。

2.2 动态资源分配:基于列车状态的智能调度

5G支持动态Bearer分配技术,能够根据列车运行状态实时调整信号传输资源。在高速场景下,当列车时速超过120km/h时,系统会自动切换至毫米波频段(24.25-52.6GHz)。毫米波频段具有高方向性,可减少多径效应干扰,确保信号稳定传输。在高密度场景,如车站区域,通过波束成形技术聚焦信号能量,提升终端接收灵敏度,确保200米范围内设备稳定接入。这一技术有效解决了车站区域设备密集接入导致的信号干扰问题^[2]。在低功耗场景下,针对乘客终端设备(如手机、智能手表),采用D2D(设备到设备)通信模式,减少基站负载并降低终端功耗30%以上。南京地铁试车线测试显示,5G网络在列车时速160km/h时仍能保持100Mbps以上传输速率,较WLAN技术(时速80km/h时速率骤降至10Mbps)提升显著,充分体现了动态资源分配技术的优势。

2.3 安全机制强化:物理层加密与多域隔离

轨道交通对通信安全要求极高,5G通过多种技术实现立体化防护。物理层安全方面,采用波束成形技术将信号定向传输至目标终端,降低信号泄露风险。结合

AI算法动态调整波束方向，可防范电磁脉冲（EMP）攻击，确保信号传输的安全性。多安全域通信（MCC）将网络划分为控制域（CBTC）、管理域（PIS）、乘客域（Wi-Fi）等多个安全域，各域间通过防火墙隔离，避免数据交叉感染。例如，列车控制信号与乘客上网数据分别在不同安全域传输，即使乘客域受到攻击，也不会影响控制域的正常运行。端到端加密则基于TLS/TRACE协议对传输数据加密，结合公钥基础设施（PKI）实现终端身份认证，确保数据在传输过程中不被篡改。宁句城际线安全测试表明，5G网络在遭受DDoS攻击时，可通过切片隔离快速恢复CBTC业务通信，系统恢复时间（MTTR）从LTE-M的5分钟缩短至10秒以内，显著提升了系统的安全性和可靠性。

3 5G 车地通信系统的典型应用场景

3.1 智能列车调度与控制

5G技术推动了列车调度从“集中式”向“分布式”的演进。通过在列车、轨道、信号灯等设备部署5G终端，构建车-车（V2V）、车-路（V2I）、车-云（V2C）协同通信网络。在动态路径规划方面，系统实时采集列车位置、速度及前方轨道状态数据，通过5G网络快速传输至调度中心。结合AI算法，调度中心可生成最优运行路径，减少列车等待时间15%以上。例如，当前方轨道出现临时施工时，系统能迅速调整后续列车的运行路径，避免拥堵。协同避障功能则通过V2V通信实现。当检测到前方轨道异物时，系统向后续列车发送预警信息，后续列车在100ms内启动紧急制动，避免追尾事故。在能效优化方面，系统根据列车载客量、运行区间及电网负荷数据，动态调整牵引功率，降低能耗10%-20%。上海地铁18号线试点中，5G支持的智能调度系统使列车准点率提升至99.9%，较传统系统提高0.5个百分点，显著提升了运营效率。

3.2 高清视频监控与应急响应

5G的大带宽特性为车厢内外部署4K/8K高清摄像头提供了可能，实现了全场景实时监控。在客流分析方面，通过AI视频分析技术统计车厢内乘客密度。当密度超过阈值时，系统自动调整列车发车间隔或引导乘客分流，提升乘客舒适度。例如，在高峰时段，系统可增加列车发车频率，缓解客流压力。异常行为识别功能结合深度学习算法，检测乘客打架、晕倒等异常行为，触发实时报警并推送至车站控制中心^[1]。车站工作人员可迅速赶到现场处理，保障乘客安全。在应急指挥方面，5G网络支持100路以上高清视频流同时传输。在火灾、地震等突发事件中，指挥中心可获得全景态势感知，缩短应

急响应时间50%以上。广州地铁21号线应用5G视频监控后，客伤事件发现时间从5分钟缩短至30秒，处置效率提升90%，有效提升了应急处理能力。

3.3 乘客信息服务与个性化体验

5G网络为乘客提供了“无感化”信息服务。实时信息推送功能通过车厢内5G微基站向乘客终端推送列车到站时间、换乘指引、车厢拥挤度等信息，推送延迟 $\leq 50\text{ms}$ 。乘客可提前做好出行准备，避免错过列车或走错换乘通道。AR导航功能让乘客通过手机AR功能扫描车站标识，系统叠加虚拟路径指引，帮助快速找到出口或换乘通道。这一功能尤其适用于大型换乘站，提升了乘客的出行效率。个性化服务则结合乘客历史出行数据，提供定制化服务。例如，为经常出差的乘客推荐周边酒店，为带小孩的乘客预约无障碍设施等，提升乘客满意度。北京地铁大兴机场线试点中，5G支持的乘客信息系统使乘客问询量减少40%，投诉率下降25%，显著改善了乘客体验。

4 实践案例：南京地铁宁句城际线的5G车地通信创新

4.1 项目背景与目标

宁句城际线是南京首条跨市域轨道交通线路，全长43.6公里，设13座车站，设计时速100km/h。随着轨道交通的快速发展，传统车地通信技术在高速、高密度场景下的性能瓶颈日益凸显。项目旨在通过5G技术解决这些问题，实现列车控制、视频监控、乘客服务等业务的统一承载，提升轨道交通系统的安全性、效率和乘客体验。

4.2 系统架构与关键技术

在网络部署方面，采用“5G+MEC+基站共享”模式。隧道内敷设3.5-3.6GHz频段漏缆，确保信号在隧道内的稳定覆盖。车站区域部署AAU（有源天线单元），实现覆盖增强，满足车站内高密度设备接入的需求。切片配置是该项目的关键技术之一。划分了3个专用切片：CBTC切片优先级QoS=3，时延 $\leq 5\text{ms}$ ，保障列车控制信号实时传输；视频监控切片优先级QoS=6，带宽 $\geq 200\text{Mbps}$ ，支持20路4K视频流并发；乘客Wi-Fi切片优先级QoS=7，带宽 $\geq 50\text{Mbps}$ ，满足500名乘客同时上网需求。边缘计算方面，在车辆段部署MEC节点，集成列车状态监测、视频分析、乘客服务等功能。通过MEC节点实现数据本地处理，减少核心网传输时延，提升系统响应速度。

4.3 应用成效与数据验证

在传输性能方面，实测下行速率134Mbps、上行速率50Mbps，时延25ms，较LTE-M系统提升3倍以上。在

20MHz带宽下, CBTC业务零丢包率, 满足业务需求。资源利用率方面, 通过动态Bearer分配, 网络资源利用率从60%提升至85%, 减少了基站建设成本20%。安全防护方面, 在模拟DDoS攻击测试中, 系统通过切片隔离快速恢复CBTC业务通信, MTTR从5分钟缩短至10秒, 显著提升了系统的安全性和可靠性。经济效益方面, 项目采用“公网共享”模式, 较独立建网节省投资30%, 运维成本降低15%, 实现了经济效益和社会效益的双赢。

5 挑战与未来发展方向

5.1 当前挑战

尽管5G技术在轨道交通车地通信中取得了显著成效, 但仍面临一些挑战。频谱资源紧张是首要问题, 5G毫米波频段(24.25-52.6GHz)在城市环境中易受建筑物遮挡, 导致信号覆盖不均。虽然结合Sub-6GHz频段可实现互补覆盖, 但频谱资源的合理分配和利用仍需进一步研究。设备兼容性也是一个难题, 既有列车需改造以支持5G终端接入, 改造周期长、成本高。不同厂家设备的兼容性问题也增加了系统集成的难度。安全标准缺失同样不容忽视, 5G与轨道交通深度融合的安全标准尚未完善, 缺乏统一的规范和指导, 给系统的安全运行带来一定隐患。

5.2 未来发展方向

未来, 轨道交通车地通信系统将朝着更高水平发展。6G技术预研是重要方向之一, 6G将支持太赫兹(THz)频段通信, 峰值速率达1Tbps, 时延降至0.1ms。这将实现列车全息投影监控、脑机接口控制等前沿应用, 进一步提升轨道交通的智能化水平。AI驱动的网络自治也是发展趋势, 通过AI算法实现网络资源动态分配、故障自愈及安全威胁预测, 降低人工运维成本50%以

上, 提高系统的可靠性和稳定性^[4]。绿色通信技术将得到广泛应用, 采用液冷基站、智能休眠等技术降低能耗, 结合光伏发电实现基站“零碳”运行, 符合可持续发展的要求。跨行业融合将为轨道交通带来新的机遇, 与卫星通信、量子通信等技术融合, 构建“空天地海”一体化轨道交通通信网络, 提升系统冗余度, 确保在各种极端情况下通信的畅通。

结语

5G技术凭借其超高速率、超低时延、海量连接及高可靠性等特性, 为轨道交通车地通信系统优化提供了颠覆性解决方案。从网络架构重构到动态资源分配, 从安全机制强化到典型场景应用, 5G已深度融入轨道交通智能化、自动化进程。南京地铁宁句城际线的实践证明, 5G可显著提升车地通信性能, 降低运维成本, 增强系统安全性。未来, 随着6G、AI、绿色通信等技术的融合发展, 轨道交通车地通信系统将迈向更高水平的智能化、网联化与可持续化, 为构建“人-车-路-云”协同的智慧交通体系奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 刘晓舟. 5G移动通信技术在城市轨道交通车地无线通信系统中的应用探讨[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(09): 57-59.
- [2] 蒲豫园. 城市轨道交通车地无线专用通信系统5G技术应用探讨[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(01): 107-113.
- [3] 黄洛宁. 5G无线通信技术的概念及其在城市轨道交通系统中的应用[J]. 科学咨询, 2023, (05): 106-109.
- [4] 李思捷. 5G移动通信技术在城市轨道交通PIS系统中的应用[J]. 现代传输, 2024, (02): 33-36.