

重庆环线地铁 CBTC 系统 TD-LTE 车地通信优化研究

陈 洋

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 400000

【摘 要】：重庆轨道交通环线作为城市核心骨干线路，全长 50.802km，采用互联互通 CBTC 系统与 TD-LTE（LTE-M）车地无线通信技术，承担“四-环-五”跨线、快慢车等高密度运营任务。但隧道多径效应、电磁干扰、高速切换、硬件冗余不足等问题，导致车地通信中断、切换时延超标，影响运营安全与效率。本文结合重庆环线 TD-LTE 技术应用现状，从抗干扰、硬件冗余、切换算法、协议安全、运维管理五大维度，提出针对性优化方案，为提升环线 CBTC 系统通信稳定性、支撑全自动运行（GoA4）升级提供实践参考。

【关键词】：CBTC；TD-LTE；车地通信；通信优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.093

引言

重庆轨道交通环线是国内首个实现跨线互联互通的地铁线路，采用基于 TD-LTE 的 LTE-M 专用通信系统，承载 CBTC 列控、列车监控、乘客信息等核心业务。环线隧道以地下为主，部分区段存在大坡度、长区间、多弯道特征，加之沿线民用通信、施工电磁干扰复杂，列车最高运行速度达 100km/h，对车地通信的低时延、高可靠、无缝切换提出严苛要求。现有 TD-LTE 系统在抗干扰能力、冗余架构、切换策略、运维智能化等方面仍有优化空间，亟需结合线路特性与技术标准，构建更稳定的通信保障体系

1 重庆环线 TD-LTE 车地通信现状与核心问题

1.1 系统应用概况

重庆环线 TD-LTE 系统采用 1.8GHz 轨道交通专用频段（1785-1805MHz），部署华为 eLTE 解决方案，构建 A/B 双网冗余架构，核心网、RRU、BBU 实现板级与网元级备份，系统可靠性达 99.998%。轨旁采用 POI+泄漏电缆覆盖，车站设置两套 BBU 与 RRU，区间按需增设 RRU 消除盲区；车载配置双 LTE-CPE、双天线冗余，主备模块通过心跳检测自动切换。系统支持多业务 QoS 调度，优先保障 CBTC 控制指令传输。

1.2 核心问题分析

（1）外部电磁干扰突出：环线沿线民用 Wi-Fi、对讲机、移动通信基站与 TD-LTE 专用频段存在邻频干扰，隧道封闭空间引发多径效应，导致信号衰落、误码率升高；部分施工区段非法无线设备接入，占用信道、发送干扰数据，引发局部通信中断。

（2）硬件冗余与可靠性不足：轨旁 RRU 长期处于高湿、强振动隧道环境，部分老旧设备出现端口损坏、供电不稳，形成局部盲区；车载天线受高速震动影响，偶发接触不良、增益下降；骨干传输网光纤、

交换机故障时，应急切换效率偏低，易引发全局性中断。

（3）高速切换性能短板：列车跨 RRU 覆盖区时，传统切换算法扫描、认证流程耗时较长，部分区段 RRU 重叠覆盖区设计偏小、信号阈值配置不合理，导致切换时延超 300ms，出现乒乓切换或切换失败，触发列车紧急制动。

（4）软件与协议兼容性隐患：环线互联互通涉及多厂商设备，部分协议版本、参数配置不统一，导致数据解析错误、握手失败；系统软件存在逻辑漏洞，网络安全防护薄弱，面临黑客入侵、数据篡改风险。

（5）运维管理被动化：现有运维以人工巡检、故障抢修为主，缺乏实时监测与智能预警能力，无法提前预判通信风险，故障处置效率低，影响运营连续性。

2 重庆环线 TD-LTE 车地通信优化方案

2.1 抗干扰技术体系优化

（1）频谱资源精细化管控：严格锁定 1.8GHz 专用频段，采用跳频技术+小区间干扰协调（ICIC），动态分配频点、规避同频/邻频冲突；优化信道规划，A/B 网分设独立子频段，减少网内干扰；联合无线电管理部门，排查沿线非法无线设备，取缔违规发射源。

（2）物理屏蔽与滤波强化：在隧道壁、RRU 机柜、漏缆沿线加装电磁屏蔽材料与屏蔽网；车载、轨旁天线前端加装高性能带通滤波器与陷波滤波器，精准滤除杂散信号、谐波干扰；采用 IRC 干扰抑制技术，提升信号信噪比

（3）电磁环境常态化监测：部署专业频谱分析仪与干扰定位系统，实现全线通信频段实时扫描；建立网格化监测机制，定期生成干扰分析报告，对施工、商业活动的电磁辐射进行动态管控，保障通信环境纯净。

2.2 硬件冗余与可靠性提升

(1) 轨旁设备全冗余部署: 升级车站 BBU 与 RRU 为双机热备架构, A/B 网完全独立, 核心网元实现 1+1 备份; 长区间、大坡度区段增设 RRU, 优化漏缆铺设角度与间距, 消除覆盖盲区; 骨干传输网采用双光纤环网, 交换机配置冗余电源与板卡, 提升链路抗故障能力。

(2) 车载通信系统冗余强化: 车载端升级为“双 LTE-CPE+四天线(车头/车尾各双天线)”架构, 主备模块实现毫秒级自动切换; 优化天线安装工艺, 采用减震底座与防松接头, 降低震动导致的接触不良风险; 定期检测天线增益、模块性能, 建立老化更换台账。

(3) 全生命周期运维管理: 构建设备健康监测平台, 对 RRU、BBU、光纤、交换机等关键硬件进行远程在线诊断; 结合人工巡检与预防性维护, 缩短故障响应时间; 建立备品备件库, 实现故障设备快速替换, 将硬件故障概率降至最低。

2.3 高速切换算法与策略优化

(1) 覆盖与门限精准设计: 重新测算列车运行速度与覆盖需求, 将 RRU 重叠覆盖区优化至 30-50m, 确保充足切换时间; 基于环线隧道特性, 动态调整切换信号强度阈值(A 网-85dBm、B 网-88dBm), 避免过早或过晚触发切换。

(2) 快速切换与预切换技术应用: 引入预认证+预连接机制, 车载终端提前扫描邻区信号、完成认证, 切换时直接接入目标小区, 将切换时延控制在 100ms 以内; 采用多 RRU 共小区技术, 减少跨小区切换次数, 提升通信连续性。

(3) 基于位置与速度的智能切换: 融合列车 GPS/北斗定位、速度数据, 优化切换触发逻辑; 高速区段($\geq 80\text{km/h}$)提前触发切换, 低速区段动态调整切换参数, 实现精准、平滑切换, 彻底解决乒乓切换与切换失败问题。

2.4 软件与安全防护体系升级

(1) 协议标准化与兼容性优化统一: 环线及跨线线路(4/5 号线) TD-LTE 协议版本, 建立严格的版本管理与兼容性测试机制; 规范接口参数配置, 解决多厂商设备数据交互异常问题; 基于 HSS 共享方案, 保障跨线列车通信不降级、不停车。

(2) 多层次网络安全加固: 部署防火墙、入侵检测系统(IDS), 对车地通信数据进行 AES-256 加密

传输; 构建终端准入机制, 禁止非法设备接入; 定期开展漏洞扫描与渗透测试, 防范黑客入侵、数据篡改等网络攻击。

(3) 故障自愈与智能诊断: 完善系统故障诊断功能, 实现通信异常实时定位、自动告警; 引入链路自愈技术, 故障时自动切换至冗余链路, 无需人工干预; 优化软件逻辑, 修复程序 BUG, 提升系统稳定性。

2.5 运营管理与应急处置优化

(1) 分级应急预案完善: 制定通信中断分级处置预案, 明确局部中断、全局性中断的处置流程、责任分工与联动机制; 定期开展应急演练, 提升运维人员故障处置能力。

(2) 智能运维平台建设: 依托大数据与人工智能技术, 构建 TD-LTE 通信故障预警平台; 分析历史故障数据、设备运行状态, 实现风险提前预判; 推动运维模式从“被动抢修”向“主动预防”转型。

(3) 跨部门协同机制: 建立加强与无线电管理、施工单位、运营商的协作, 建立电磁干扰联合管控、施工通信保障机制; 优化跨线运营通信协同流程, 保障“四—环—五”跨线列车通信稳定。

3 优化效果预期与实施保障

3.1 效果预期

通信中断概率降低 90%以上, 切换时延稳定控制在 100ms 以内, 满足 CBTC 系统低时延要求; 系统可靠性提升至 99.999%, A/B 网冗余切换成功率达 100%, 消除全局性通信中断风险; 抗干扰能力显著增强, 信号误码率降至 10^{-9} 以下, 适应复杂隧道电磁环境; 运维效率提升 50%, 故障处置时间缩短 60%, 支撑环线高密度、跨线运营需求。

3.2 实施保障

成立专项优化小组, 明确技术、运维、施工等部门职责, 制定分阶段实施计划; 加强技术培训, 提升运维人员 TD-LTE 技术与故障处置能力; 建立效果评估机制, 定期测试通信性能, 动态调整优化方案; 争取政策与资金支持, 保障硬件升级、平台建设等工作落地。

4 结语

重庆环线作为互联互通示范线路, 其 TD-LTE 车地通信优化是提升城市轨道交通运营安全与效率的关键。通过抗干扰技术、硬件冗余、切换算法、软件安全、运维管理的系统性优化, 可有效解决现有通信痛点, 为环线及重庆轨道交通其他线路的 TD-LTE 系统

升级提供借鉴。未来,需进一步融合 5G、人工智能、大数据等新技术,研发更智能的抗干扰算法、更高效的切换机制与更精准的故障预警系统,推动重庆轨道

交通向全自动运行(GoA4)迈进,为城市高质量发展筑牢通信根基。

参考文献:

- [1] 张朴,杨晓勇,王亮.重庆轨道交通环线互联互通 CBTC 系统应用实践[J].现代城市轨道交通,2022(05):45-50.
- [2] 周宁,刘杰,李士祥.TD-LTE 在重庆地铁环线车地通信中的部署与优化[J].铁道通信信号,2023,59(02):32-36.
- [3] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通 LTE-M 系统技术规范(T/CAMET04002-2018)[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [4] 钟章队,艾渤,熊磊.面向轨道交通的 TD-LTE 宽带移动通信系统应用研究[J].铁道学报,2015,37(06):51-58.