

轨道交通CBTC系统车地无线通信性能优化

王骥鹏 李 阳 张 晗

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要：基于通信的列车控制（CBTC, Communication-Based Train Control）系统作为现代城市轨道交通的核心技术，其安全、高效运行高度依赖于稳定、可靠的车地无线通信链路。车地通信的性能直接决定了系统的可用性、安全性与运营效率。然而，在复杂的隧道、高架等城市轨道交通环境中，车地无线通信面临着多径衰落、同频/邻频干扰、切换时延、设备老化等多重挑战，严重制约了CBTC系统的性能上限。本文首先阐述了CBTC系统的基本架构及其对车地通信的关键性能指标（KPIs）要求；其次，深入剖析了当前主流车地通信技术（WLAN与LTE-M）在实际部署中所遭遇的典型性能瓶颈；进而，提出了一套系统性的、多维度的性能优化策略体系，涵盖精细化网络规划、主动式干扰抑制、高可用性冗余架构、智能化运维以及面向5G-R的平滑演进路径。研究表明，通过综合运用多种优化手段，可显著提升CBTC车地通信的可靠性、实时性与鲁棒性，为城市轨道交通的安全、高效、智能化运营提供坚实的技术保障。

关键词：CBTC；车地无线通信；性能优化；WLAN；LTE-M；干扰管理

引言

CBTC系统对车地通信提出了极为严苛的要求。国际标准（如IEEE 1474.1、IEC 62280）明确规定，车地通信必须满足高可用性（通常要求99.999%以上）、低时延（端到端时延通常要求小于500ms，部分场景甚至要求<100ms）、高可靠性（丢包率极低）以及强安全性（需具备完善的信息安全机制）。任何通信中断、时延抖动或数据丢失都可能导致列车紧急制动（EB），造成运营中断，严重影响乘客体验和线路运能。目前，业界主要采用两种无线技术构建CBTC车地通信网络：基于IEEE 802.11标准的无线局域网（WLAN）和基于3GPP标准的长期演进-铁路（LTE-M, Long Term Evolution for Metro）。WLAN凭借其部署成本低、技术成熟度高的优势，在早期CBTC项目中被广泛应用。然而，随着线路密度增加、列车运行速度提升以及商用Wi-Fi设备的普及，WLAN系统暴露出严重的同频干扰、切换性能不稳定等问题。LTE-M则以其天然的QoS保障、更强的抗干扰能力和更优的切换性能，逐渐成为新建线路的主流选择。但即便如此，LTE-M在复杂的地下隧道环境中，依然面临着覆盖不均、切换边界模糊、核心网配置不当等挑战。因此，如何系统性地诊断、分析并优化CBTC车地无线通信的性能，已成为保障城轨安全高效运营的一项关键技术课题。

1 CBTC系统架构与车地通信性能需求

1.1 CBTC系统基本架构

一个典型的CBTC系统由以下核心子系统构成：

（1）车载子系统（VOBC）：安装在列车上，负责列车定位、测速、速度曲线计算、超速防护及与地面系统的通信。（2）区域控制器（ZC）：负责管辖区域内所有列车的移动授权计算，是实现移动闭塞的核心逻辑单元。（3）联锁子系统（CI）：负责道岔、信号机等轨旁设备的安全控制。（4）列车自动监控系统（ATS）：负责全线列车的运行调度、时刻表管理及人机交互。（5）数据通信子系统（DCS）：即车地通信网络，是连接上述所有子系统的“神经系统”。其中，DCS通常采用双网冗余架构（A/B网），以确保单点故障不会导致整个系统失效^[1]。DCS内部又可分为有线骨干网和无线接入网两部分。无线接入网负责列车与轨旁接入点（AP，对于WLAN）或基站（eNodeB，对于LTE-M）之间的最后一公里连接。

1.2 车地通信关键性能指标（KPIs）

CBTC应用对DCS的性能要求远高于普通商业通信，其核心KPIs包括：（1）可用性：指通信链路在规定时间内处于正常工作状态的概率。CBTC系统通常要求可用性达到“五个九”（99.999%），即全年中断时间不超过5.26分钟。这要求网络具备极高的健壮性和快速的故障恢复能力。（2）端到端时延：指从车载设备发出一个数据包到地面控制器成功接收并处理该数据包所需的总时间。过长的时延会直接影响列车的制动距离计算和移动授权更新频率，威胁行车安全。标准要求通常为<500ms，而先进的CBTC系统正朝着<100ms的目标迈进。（3）丢包率：指在传输过程中丢失的数据包占总发

送数据包的比例。关键的控制指令（如紧急制动命令）必须保证零丢失，而常规的状态报告也要求极低的丢包率（通常 < 1%）。高丢包率会触发列车降级或紧急制动。（4）吞吐量：虽然CBTC业务本身对带宽的需求不高（通常几十kbps到几百kbps），但随着视频监控（PIS/CCTV）等非安全业务共用同一无线网络，对总吞吐量的要求日益增加。网络需具备足够的容量裕度。（5）切换性能：列车在高速运行中会频繁穿越不同的无线小区（AP或基站覆盖区），切换过程必须快速、平滑、无感知。切换失败或时延过大会直接导致通信中断，是引发“假EB”的最常见原因之一。这些KPIs相互关联、相互制约，共同构成了评估和优化CBTC车地通信性能完整体系。

2 主流车地通信技术面临的性能瓶颈分析

2.1 WLAN方案的典型瓶颈

尽管WLAN部署灵活、成本低廉，但在高密度、高速移动的城轨场景下，其固有缺陷被急剧放大：（1）同频干扰（Co-Channel Interference, CCI）：为了保证无缝覆盖，相邻AP通常使用相同或重叠的信道。当列车经过AP覆盖交界处时，会同时接收到多个AP的强信号，导致严重的CCI，信噪比（SNR）急剧恶化，从而引发高丢包率和通信中断。尤其是在站台区域，商用Wi-Fi热点、乘客手机热点等外部干扰源进一步加剧了这一问题。（2）切换性能不可控：WLAN的切换（漫游）决策主要由车载终端（STA）根据信号强度（RSSI）自主完成，缺乏网络侧的集中控制和优化。这导致切换时机难以预测，容易出现“乒乓效应”（在两个AP间反复切换）或切换滞后（信号已很弱才切换），造成通信中断^[2]。（3）协议开销大、效率低：802.11协议中的CSMA/CA（载波侦听多路访问/冲突避免）机制在高并发场景下效率低下，大量的管理帧和重传机制占用了宝贵的空口资源，降低了有效吞吐量。

2.2 LTE-M方案的潜在挑战

LTE-M虽然在架构上优于WLAN，但并非完美无缺：（1）覆盖与切换边界模糊：在长直隧道中，由于波导效应，LTE信号可以传播很远，导致小区覆盖范围远超预期。这使得小区间的切换边界变得模糊不清，列车可能长时间驻留在一个非最优的小区内，或者在边界处发生频繁切换，影响稳定性。（2）核心网配置复杂：LTE-M是一个完整的蜂窝网络，其性能高度依赖于核心网（EPC）的参数配置，如TAU（Tracking Area Update）周期、切换门限、QoS策略等。不合理的配置会引入额外的信令开销和时延。（3）设备兼容性与维护：不同厂商

的eNodeB、核心网设备和车载终端（CPE）之间可能存在兼容性问题。此外，专用频段（如1.8GHz）的设备成本较高，且需要专业的无线网络优化团队进行维护。

无论是WLAN还是LTE-M，其性能都会受到物理环境（隧道弯曲、站台结构、金属屏蔽）、设备老化（天线驻波比升高、功放性能下降）以及外部电磁环境变化的影响，呈现出动态、非线性的特征，给性能保障带来了巨大挑战。

3 CBTC车地无线通信性能优化策略体系

针对上述瓶颈，本文提出一个“规划-抑制-冗余-运维-演进”五位一体的综合优化策略体系。

3.1 精细化网络规划与仿真

这是性能优化的基石。在设计阶段，应摒弃经验主义，采用专业的射线追踪（Ray Tracing）仿真工具，结合精确的隧道、站台三维模型，对无线信号的传播进行建模。通过仿真，可以：精确定位AP/eNodeB的最佳布放位置、间距和天线倾角，确保覆盖均匀，避免过覆盖或欠覆盖。科学规划频率/PCI（Physical Cell Identity）复用方案，最大化频率复用距离，从源头上规避同频和邻频干扰^[3]。预判切换区域，并据此优化切换参数（如WLAN的RSSI阈值，LTE的A3事件偏移量），使切换发生在信号质量最佳的位置。

3.2 主动式干扰检测与抑制

建立常态化的干扰监测机制至关重要。可在轨旁和车载侧部署频谱分析仪或利用设备内置的频谱感知功能，实时采集空口频谱数据。通过大数据分析，可以：识别并定位干扰源（如非法AP、微波炉、其他无线系统），采取物理隔离、频点调整或法律手段予以清除。动态调整无线参数，例如，在WLAN系统中，可根据实时干扰情况，动态调整AP的发射功率和工作信道；在LTE-M系统中，可启用ICIC（小区间干扰协调）或eICIC（增强型小区间干扰协调）技术，通过时域或频域的资源协调来抑制小区边缘的干扰。

3.3 高可用性冗余与无缝切换架构

双网热备与负载分担：维持A/B双网独立运行，并通过智能路由协议（如HSRP/VRRP）实现主备切换。更进一步，可探索A/B网的负载分担模式，将不同类型的业务分流到不同网络，提升整体资源利用率。（1）优化切换算法：对于WLAN，可引入网络辅助的切换机制，由轨旁控制器收集各AP的负载和信号质量信息，主动引导车载终端进行更优的切换决策。对于LTE-M，应精细调优切换参数（如TimeToTrigger, Hysteresis），并考虑引入基于业务感知的切换策略，确保关键CBTC业务的优

先级^[4]。(2) 车载多链路聚合: 在车载终端侧集成多个无线模块(如双LTE CPE), 通过链路聚合技术(如MP-TCP), 在一条链路质量劣化时, 自动将业务无缝迁移到另一条链路上, 极大提升通信的鲁棒性。

3.4 智能化运维与预测性维护

将AI和大数据技术引入DCS运维, 变被动响应为主动预防。(1) 构建DCS数字孪生: 整合网络拓扑、设备状态、性能KPI、告警日志等多源数据, 构建车地通信网络的虚拟镜像。(2) KPI异常根因分析: 利用机器学习算法(如聚类、分类、关联规则挖掘), 对历史性能数据进行分析, 自动识别导致丢包、高时延等问题的根本原因(是干扰? 设备故障? 还是配置错误?)。(3) 预测性维护: 通过对设备关键指标(如驻波比、温度、误码率)的长期监测和趋势分析, 预测设备潜在的故障风险, 在其失效前进行预防性更换或维修, 防患于未然。

3.5 面向未来的平滑演进路径

当前, 5G-R作为下一代铁路移动通信标准, 以其uRLLC(超高可靠低时延通信)和mMTC(海量机器类通信)特性, 为CBTC乃至更高级别的全自动运行(FAO)提供了理想的承载平台。在进行现有网络优化的同时, 应前瞻性地规划向5G-R的演进:(1) 保护既有投资: 新建设备应支持软件升级到5G-NR, 核心网应采用云原生、服务化架构(SBA), 便于未来功能扩展。(2) 探索网络切片: 利用5G网络切片技术, 为CBTC安全业务、PIS/CCTV业务、乘客上网业务分别创建逻辑隔离、性能保障的专用网络切片, 实现一网多用、安全隔离。

4 结语

本文提出的“规划-抑制-冗余-运维-演进”五位一体的综合优化策略体系, 为提升CBTC车地通信性能提供了一套系统性的方法论。通过精细化的前期规划、主动式的干扰管理、高可用的冗余架构、智能化的运维手段以及前瞻性的演进布局, 可以有效克服WLAN和LTE-M等现有技术的固有缺陷, 显著提升通信链路的可靠性、实时性和鲁棒性。展望未来, 随着5G-R技术的成熟与商用, CBTC车地通信将迎来革命性的变革。5G-R的uRLLC能力将从根本上解决时延和可靠性问题, 网络切片技术将实现业务的安全隔离与差异化保障, 而MEC(多接入边缘计算)的引入则有望将部分控制逻辑下沉至网络边缘, 进一步缩短控制闭环时延。然而, 新技术的引入也伴随着新的挑战, 如更高的建设成本、更复杂的网络安全威胁以及跨代际的兼容性问题。因此, 持续的研究、严谨的测试和稳健的演进策略, 将是确保下一代CBTC系统成功落地的关键。

参考文献

- [1]张翠红.城市轨道交通信号CBTC系统的应用研究[J].数字通信世界,2023,(08):145-147.
- [2]陈娟.CBTC系统在城市轨道交通中的信号控制精度与可靠性分析[J].人民公交,2025,(24):48-50.
- [3]陈泓锦.城市轨道交通信号CBTC系统的应用与优化[J].科技资讯,2024,22(07):5-7.
- [4]谢树庆.城市轨道交通CBTC系统运行能力优化研究[J].自动化仪表,2022,43(08):137-140.