

轨道交通通信系统中车地通信技术的创新与应用

毛奇生

烽火通信科技股份有限公司 湖北 武汉 430205

摘要: 车地通信是轨道交通通信系统的核心, 承担列车控制、调度指令传输等关键任务, 是轨道交通安全高效运营的重要保障。本文阐述车地通信技术的基础内涵、传统技术局限性及演进趋势, 重点分析无线传输、网络架构与协同、安全与运维三大核心创新方向, 结合地铁、市域铁路等多场景应用实践, 剖析现存问题并提出优化措施, 为车地通信技术创新升级及工程落地提供参考, 助力智慧城轨高质量发展。

关键词: 轨道交通; 通信系统; 车地通信技术; 创新; 应用

引言: 随着城市化进程加快和智慧城轨建设推进, 轨道交通运营对通信系统的带宽、时延、可靠性提出更高要求。车地通信作为列车与地面设备数据交互的核心纽带, 直接影响列车运行安全与运营效率。传统车地通信技术存在带宽不足、兼容性差等瓶颈, 难以适配高清视频回传、自动驾驶等新业务需求, 因此, 开展车地通信技术创新研究与工程应用, 对推动轨道交通智能化升级具有重要现实意义。

1 轨道交通通信系统中车地通信技术基础与演进

1.1 车地通信技术核心内涵与分类

(1) 核心内涵: 车地通信是轨道交通通信系统的核心组成, 核心功能是实现车载设备与地面设备的实时数据交互, 技术边界界定为列车运行过程中各类信息的双向传输, 涵盖控制指令、状态反馈等关键数据。其在信号系统中承担CBTC系统数据传输重任, 保障列车精准定位与安全运行; 在调度系统中作为信息交互枢纽, 支撑调度指令下发与列车运行状态实时反馈, 是轨道交通安全高效运营的核心保障。(2) 技术分类: 按传输介质可分为无线车地通信和有线车地通信。有线车地通信多用于固定路段数据传输, 应用场景有限; 无线车地通信为当前主流, 主要包括LTE-M、WLAN等类型, LTE-M适用于高速列车场景, 支撑列车高速移动下的稳定通信, WLAN则广泛应用于地铁等城市轨道交通, 满足中低速场景下的基础数据传输需求。

1.2 传统车地通信技术及局限性

(1) 主流传统技术: LTE-M基于4GLTE演进, 采用专用频段与抗干扰技术, 可支持高速移动场景, 主要用于列车运行状态监测与简单指令传输; WLAN基于无线局域网技术, 通过热点覆盖实现数据交互, 适配地铁等封闭场景; TETRA为窄带专网技术, 传输时延低, 主要用于语音调度与紧急指令传输。(2) 核心局限性: 传统

技术普遍存在带宽不足、时延偏高的问题, WLAN抗干扰能力弱, TETRA带宽有限, 多系统间接口不统一, 兼容性差。随着智慧城轨发展, 高清视频回传、智能运维等新业务涌现, 传统技术已难以满足其大带宽、低时延、高可靠的需求, 成为技术升级的瓶颈^[1]。

1.3 车地通信技术演进趋势

(1) 技术层面: 正从窄带专网向公网融合、宽带化、智能化演进, 5G-R等新技术逐步应用, 结合边缘计算提升传输效率; 同时打破单一技术局限, 实现多技术协同融合, 弥补单一技术短板, 提升通信可靠性。(2) 应用层面: 从基础的信号与调度指令传输, 向车地协同调度、智能运维、乘客服务多元化延伸, 支撑列车自动驾驶、设备预测性维护及乘客WiFi覆盖等新场景。(3) 标准层面: 行业标准逐步完善, 聚焦系统兼容性、数据安全性、传输实时性三大核心要求, 明确技术规范与接口标准, 持续适配智慧城轨的发展需求, 推动车地通信技术标准化、规范化发展。

2 轨道交通通信系统中车地通信技术的核心创新方向

2.1 无线传输技术创新

(1) 5G-R技术创新: 作为车地通信技术升级的核心方向, 5G-R技术重点优化三大核心性能, 大幅降低传输时延至毫秒级, 满足列车自动驾驶、实时调度等关键业务的时延需求; 显著提升带宽容量, 支撑高清视频回传、车载设备海量数据交互等大带宽业务; 优化移动性管理机制, 适配列车高速移动场景下的无缝通信, 避免信号中断。同时, 推动5G-R实现通感一体创新, 将通信与感知功能深度融合, 可实时感知列车运行状态、轨道环境参数, 实现“一次部署、多重应用”, 全面适配高速移动场景下多业务并发承载的核心需求, 为智慧城轨奠定基础。(2) 5G-A与卫星通信融合创新: 针对轨道交通中偏远区域、长隧道、高架路段等信号覆盖薄弱或盲区问题,

推动5G-A与卫星通信深度融合,构建天地一体化车地通信网络。通过卫星通信实现偏远区域的广域覆盖,弥补地面无线通信的覆盖短板;利用5G-A的高带宽、低时延优势,承载核心业务数据传输,二者协同互补,实现全线路、全场景无死角覆盖,彻底解决极端场景下的信号中断难题,保障列车运行全程通信稳定可靠^[2]。(3) TSN技术创新:基于以太网的时间敏感网络(TSN)是车地通信多网融合的关键支撑技术,其核心创新在于实现不同安全等级业务的确切性传输。通过精准的时间同步机制和流量调度算法,为列车控制、信号传输等安全关键业务分配专属传输通道,保障数据传输的实时性和可靠性;同时,打破不同网络的技术壁垒,实现车地通信网、信号网、运维网等多网融合,简化网络架构,降低网络部署与维护成本,推动轨道交通通信系统向扁平化、一体化发展。

2.2 网络架构与协同技术创新

(1) 车地通信云化架构创新:依托智慧城轨建设需求,构建车地通信云光网一体化架构,将车载设备、地面基站、调度中心的计算与网络资源纳入统一云平台,实现资源的集中管理与协同调度。通过云化部署简化传统复杂的网络层级,减少地面设备部署数量,降低硬件投入与运维成本;同时,具备灵活的资源扩容能力,可根据业务需求动态分配计算、带宽资源,适配多业务迭代升级,提升车地通信系统的灵活性与可扩展性。(2) 多技术协同组网创新:打破单一通信技术的应用局限,推动LTE-M与5G-R融合组网,充分发挥LTE-M技术成熟、覆盖稳定的优势,承担基础数据传输业务,同时利用5G-R的高带宽、低时延特性,承载高端智能业务,实现优势互补;创新公专融合组网模式,整合公共通信网络与轨道交通专用通信网络资源,在保障专用业务安全隔离的前提下,利用公网资源补充覆盖,提升网络的可靠性与灵活性,降低专用网络建设成本^[3]。(3) 智能切换与冗余技术创新:针对高速列车运行过程中网络切换频繁、易出现信号中断的问题,优化网络切换机制,通过AI算法精准预测切换时机,缩短切换时延,实现高速移动场景下的无缝切换。同时,完善硬件与网络层面的冗余设计,部署双链路、双基站备份机制,当主链路或主设备出现故障时,可快速切换至备用链路或设备,保障车地通信不中断,进一步提升网络的可靠性与抗故障能力。

2.3 安全与运维技术创新

(1) 通信安全技术创新:面对轨道交通车地通信数据量激增、攻击风险提升的问题,创新通信安全防护技术,采用高强度加密算法对传输数据进行端到端加密,

防止数据被窃取、篡改;引入数字身份认证机制,对车载设备、地面设备、终端用户进行身份校验,杜绝非法设备接入网络;构建全方位网络安全防护体系,实现攻击检测、风险预警、应急处置的全流程管控,保障车地通信系统的安全稳定运行^[4]。(2) 智能运维技术创新:融合AI、大数据、物联网等技术,构建车地通信智能运维体系,通过车载传感器、地面监测设备实时采集网络运行数据、设备状态数据,利用大数据分析实现故障隐患提前预警;借助AI算法对故障进行精准诊断,定位故障节点与原因,为运维人员提供针对性处置方案,大幅降低运维复杂度与人工成本,实现从“被动维修”向“主动运维、预测性维护”转变。(3) 标准化接口创新:针对当前不同厂商设备接口不统一、通信协议差异大,导致系统兼容性差、互联互通困难的问题,推动车地通信标准化接口创新,统一设备接口规范与通信协议标准,实现不同厂商设备的无缝对接与互联互通;同时,完善行业标准体系,明确接口技术要求与测试规范,推动车地通信技术向标准化、规范化发展,降低系统集成成本,提升行业整体发展水平。

3 轨道交通通信系统中车地通信创新技术的工程应用实践

3.1 地铁场景车地通信创新应用

(1) 案例分析:长沙地铁LTE-M项目聚焦城轨运营刚需,全面部署LTE-M专用通信系统,优化移动性管理与抗干扰设计,覆盖全线路隧道、车站及区间,解决传统通信在高密度客流、高速移动场景下的信号不稳定问题,实现列车运行数据的实时传输,应用后列车调度响应效率显著提升。上海地铁5G专网项目依托5G-R技术,构建专用通信网络,结合TSN时间敏感网络实现多业务确定性传输,部署无线AI智能板优化网络性能,覆盖多条核心线路,支撑列车自动驾驶、高清视频监控等业务,成为国内地铁5G车地通信的标杆实践。(2) 应用成效:两大项目均有效提升列控系统可靠性,列车运行故障发生率大幅降低,信号传输中断时长缩短80%以上;实现车载高清视频回传、站台与列车的智能调度协同,调度人员可实时掌握列车内部及沿线状态,提升运营效率;通过技术优化简化网络架构,减少设备部署与维护工作量,降低运营与运维成本,长沙地铁相关项目运维成本年均节约15%以上,上海地铁则实现多业务融合承载,减少重复建设投入。

3.2 市域铁路与高铁场景车地通信创新应用

(1) 场景适配:针对市域铁路中速移动(120~160km/h)、站间距大、地下高架共存的特点,优化车地通信技

术参数,采用5G公网切片结合RB资源预留与QoS优先保障模式,调整时隙比提升上行带宽,适配市域铁路上行业务为主的流量需求;针对高铁高速移动(350km/h及以上)特点,优化5G-R技术的移动性管理与信号切换机制,强化基站覆盖密度,采用专用频段独立组网,保障高速移动下的低时延、高可靠传输。(2)应用实践:在中老铁路等偏远路段,借鉴“老挝一号”卫星应用经验,部署VSAT卫星小站,通过卫星通信弥补地面网络覆盖盲区,保障偏远施工标段及运营路段的通信稳定,解决山地区传统通信建设成本高、覆盖难的问题。在国内高铁干线,5G-R技术广泛应用于智能调度与故障预警,依托其毫秒级时延优势,实现调度指令精准下发,结合沿线传感器实时采集设备状态数据,通过5G-R传输至后台,实现故障提前预警,大幅提升高铁运营安全性^[5]。

3.3 智能轨道交通场景创新应用

(1)全自动运行场景:车地通信创新技术是列车自动驾驶(ATO)的核心支撑,5G-R与TSN技术融合,实现列车与地面调度中心的实时双向数据交互,精准传输速度、位置、制动等控制指令,支撑列车自动发车、精准停车、区间自动驾驶等功能,同时实现远程控制,调度人员可在后台对列车运行状态进行实时监控,及时处理突发情况,目前国内多个地铁线路已通过该技术实现全自动运行。(2)智慧运维场景:基于车地通信网络,整合AI、大数据技术,构建智能运维体系,车载传感器与地面监测设备实时采集通信设备、列车部件的运行数据,通过5G-R高带宽传输至大数据分析平台,实现设备状态的实时监测与故障隐患精准诊断,为运维人员提供针对性处置方案,推动运维模式从“被动维修”向“主动运维”转变,降低运维复杂度与人工成本,提升运维效率。

3.4 应用过程中的问题与优化措施

(1)现存问题:当前车地通信创新技术工程应用中仍存在诸多瓶颈,核心元器件如车规级光模块、光芯片等成本偏高,是传统方案的数倍,增加项目建设投入;部

分长隧道、偏远山区等场景仍存在信号覆盖不足的问题,影响通信稳定性;不同厂商设备接口、通信协议不统一,导致多系统协同不畅,兼容性较差;同时缺乏专业的技术运维人才,制约技术应用效果。(2)优化措施:优化组网方案,采用公专融合、多技术协同组网模式,共享网络资源,降低建设成本;推进技术国产化,聚焦核心元器件攻关,设立专项研发计划,降低对进口设备的依赖,逐步降低技术成本;完善行业标准体系,统一设备接口与通信协议,推动技术标准化、规范化发展;加强人才培养,开展校企合作与技术培训,打造专业的技术研发与运维团队,提升技术应用与运维能力,保障创新技术持续发挥实效。

结束语

车地通信技术的创新与应用,是破解传统通信瓶颈、支撑智慧城轨发展的关键抓手。本文梳理的5G-R、TSN等创新技术及多场景应用实践,已初步彰显技术优势,有效提升了轨道交通运营效率与安全性。尽管目前仍存在成本偏高、人才短缺等问题,但随着技术国产化推进与行业标准完善,车地通信技术将向更智能、更可靠、更经济方向发展,为轨道交通高质量发展注入持久动力。

参考文献

- [1]王旗.轨道交通通信传输系统在轨道交通中的运用[J].轨道交通技术,2025,15(2):34-40.
- [2]张桂源.城市轨道交通通信中无线通信技术的应用探讨[J].时代汽车,2024,9(18):97-99.
- [3]王建邦.5G通信系统在城市轨道交通车车通信中的应用探究[J].中国新通信,2023,25(23):64-66.
- [4]范永华,李聪.基于车车通信的列车运行控制系统在城市轨道交通中的应用方案[J].城市轨道交通研究,2022,25(11):129-133.
- [5]李叶,周欣玥.城市轨道交通车车通信系统室内确认测试方案研究[J].科技创新与应用,2024,14(19):151-154.