

轨道交通专用无线通信技术演变路径探究

齐晓武

广东华之源信息工程有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110006

摘 要 : 轨道交通专用无线通信技术经历了从模拟集群、数字集群、LTE-M到5G-R的演变,信道效率、安全性和数据传输能力持续提升。5G-R以超高带宽、超低时延和网络切片特性支持列车自动驾驶、实时监控等智慧化应用。换乘站互联互通面临接口规范不统一与数据互操作复杂性挑战,基于SDN/NFV融合组网和5G切片技术提供了有效解决方案。通过仿真测试与试点验证,评估技术性能与经济效益,技术正朝6G弹性网络架构与智慧融合方向发展。

关 键 词 : 轨道交通; 无线通信技术; 互联互通; 5G-R; 智慧融合

Exploration of the Evolution Path of Wireless Communication Technology for Rail Transit

Qi Xiaowu

Guangdong Huazhiyuan Information Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The dedicated wireless communication technology for rail transit has undergone evolution from analog trunking, digital trunking, LTE-M to 5G-R, and the channel efficiency, security and data transmission capacity have been continuously improved. 5G-R supports intelligent applications such as autonomous train driving and real-time monitoring with its features of ultra-high bandwidth, ultra-low latency and network slicing. The interconnection and interoperability of transfer stations are confronted with challenges such as non-uniform interface specifications and the complexity of data interoperability. The SDN/NFV converged networking and 5G slicing technology provide effective solutions. Through simulation testing and pilot verification, the technical performance and economic benefits are evaluated. The technology is evolving towards a 6G elastic network architecture and intelligent integration.

Keywords : rail transit; wireless communication technology; interconnection and interoperability; 5G-R; integration of wisdom

引言

随着我国城市轨道交通的快速发展,专用无线通信技术需满足高带宽、低时延和高可靠性的需求。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》(2021)提出推动交通基础设施数字化、网联化,为技术演变提供了政策指引。从模拟集群到5G-R,技术在频谱效率、安全防护和业务支持能力上显著提升。5G-R以网络切片、毫米波和边缘计算等特性支持智慧化场景,但换乘站互联互通仍面临挑战。本文分析技术演变路径,探讨互联互通解决方案,结合仿真与试点测试,展望6G智慧融合趋势。

一、轨道交通专用无线通信技术演变分析

(一) 技术发展历史脉络

轨道交通专用无线技术的发展经历了显著的变革。早期以模拟集群通信为基础,它能实现有限范围内的群组通信,满足列车基本的调度指挥需求,但存在频谱利用率低、通信容量小等局限^[1]。随着数字化浪潮的推进,数字集群通信技术应运而生,它克服了模拟技术的部分缺陷,在频谱效率、语音质量和功能扩展性上都有提升,可提供更多增值业务。然而,随着轨道交通规模扩大和业务多样化,数字集群技术也难以满足需求。于是,LTE-M技术逐渐登上舞台,凭借其高带宽、低时延、高可靠性等

优势,能支持高清视频监控、列车自动驾驶等新型业务,为轨道交通通信带来全新可能,成为当前轨道交通专用无线通信技术的主流发展方向。

(二) 关键技术阶段特征

在轨道交通专用无线通信技术发展历程中,不同阶段呈现出显著特征。FDMA阶段,将总频段划分为若干互不重叠的频道,供不同用户使用,信道效率相对较低,每个频道只能服务一个用户,在安全防护方面,早期技术对干扰和窃听的防范能力有限。TDMA阶段,把时间分割成周期性的帧,每一帧再分割成若干时隙,允许多个用户在不同时隙共享同一频道,大大提高了信道效率。安全防护方面,通过时隙分配和加密算法的优化,能更好

抵御外部干扰与信息窃取。到了 LTE 阶段，采用正交频分复用（OFDM）和多输入多输出（MIMO）等技术，信道效率进一步提升，可同时传输大量数据。安全防护更为完善，拥有更高级别的加密和认证机制，确保数据传输安全^[2]。

（三）5G-R 技术的突破与应用

5G-R 技术通过新空口（NR）实现高吞吐量和超低时延，显著提升轨道交通专用无线通信性能。网络切片技术为不同业务分配专用资源，如为列车控制提供低时延切片，为高清视频监控提供高带宽切片，确保服务质量（QoS）的高效满足。边缘计算优化基站间切换和数据处理，降低时延并提升可靠性。广州地铁 5G-R 试点表明，列车控制时延降至 0.8ms，准点率提升 5%，支持实时高清视频传输和列车自动驾驶功能，有效提高运营效率与安全性 [6]。此外，5G-R 通过 AI 驱动的资源分配和毫米波技术，适应复杂多变的轨道交通场景，为大规模设备连接和动态业务需求提供支持。其灵活性和智能化特性为智慧轨道交通奠定坚实基础。面向未来，5G-R 的架构设计具备良好的扩展性，可平滑过渡至 6G 弹性网络架构，后者将引入太赫兹波通信和全域感知能力，进一步满足轨道交通对高速、稳定和智能通信的需求，推动行业向更高水平的智能化发展^[3]。

二、换乘站通信互联的技术挑战

（一）多系统互联挑战

换乘站涉及多线路、多制式通信系统，接口参数、信号格式和传输速率的差异导致协议转换复杂^[4]。不同线路可能采用不同技术标准，例如 A 线路使用 5G-R 的 Sub-6GHz 频段，而 B 线路仍基于 LTE-M 的调制方式，需设计复杂的适配机制以实现兼容。缺乏统一的接口规范标准导致各线路在建设时独立设计接口，增加设备采购和系统集成的成本，同时降低通信稳定性和可靠性。数据互操作面临编码格式不一致的难题，例如列车位置信息在 A 线路采用二进制编码，B 线路可能使用十六进制编码，需进行格式转换和解析，增加技术难度。列车跨线运行要求实时共享速度、位置和运行状态等关键数据，以保障调度效率和运行安全，对通信系统的实时性提出严格要求，切换时需控制在 50ms 以内。当前，部分换乘站因缺乏标准化协议，数据交互效率低下，切换失败率较高，影响列车运行连续性和乘客体验。解决多系统互联的挑战需通过统一标准和智能化技术优化协议转换与数据交互，确保轨道交通通信网络的高效协同与稳定运行，为智慧化应用提供可靠支持。

（二）解决方案设计

1. SDN/NFV 融合组网

软件定义网络（SDN）和网络功能虚拟化（NFV）技术通过统一承载多制式网络，解决换乘站互联互通的复杂性^[5]。SDN 通过集中式控制平面实现网络资源的动态分配，灵活适配列车控制、视频监控等业务的差异化需求，确保资源高效利用。NFV 将核心网元功能虚拟化，部署于通用服务器，降低硬件依赖并提升系统扩展性。5G 网络切片技术为不同业务场景分配专用资源，低时延切片保障列车控制指令的实时传输，目标时延低于 1ms；高带宽切片支持高清视频监控的稳定传输，满足大规模数据需求。广州地铁 5G-R 试点表明，SDN/NFV 融合组网将网络资源利用率

提升 15%，显著降低建设和运维成本。这种架构通过统一承载不同制式网络，打破系统间壁垒，实现跨线路通信的高效协同。虚拟化网元和切片技术的结合优化了服务质量（QoS），为轨道交通提供稳定可靠的通信支持，为智慧化应用场景奠定基础。

2. 异构网络切换机制

异构网络切换机制通过多参数评估模型和 5G-R 双连接切换算法，确保列车跨基站切换的通信连续性^[6]。评估模型综合分析信号强度、网络负载、时延等关键指标，实时监测网络状态，为切换决策提供依据。5G-R 双连接切换算法在源基站与目标基站间建立双向通信链路，保障列车在移动过程中通信不中断，切换时延控制在 50ms 以内。边缘计算技术部署于基站附近，优化数据处理和切换决策，降低端到端时延，提升系统响应速度。广州地铁试点显示，5G-R 切换成功率达 99.5%，有效减少通信中断对列车运行的影响。该机制通过动态调整网络资源分配，适应轨道交通复杂多变的运行环境，如隧道、高峰客流等场景。模型的智能化分析结合边缘计算的支持，显著提高切换的稳定性和效率，为跨线路运行提供可靠保障。

3. 多模终端与射频优化

多模终端与射频前端优化通过软件无线电技术和宽频带可重构天线，解决多制式兼容和信号干扰问题。软件无线电技术支持动态协议栈加载，使终端适配 5G-R、LTE-M 等多种制式，列车在不同线路交界处可快速切换协议栈，实现无缝通信。宽频带可重构天线通过自动识别当前通信频段，动态调整滤波器参数，支持 5G 毫米波和 Sub-6GHz 频段，减少信号干扰，提升传输效率。广州地铁 5G-R 试点表明，优化后的射频前端将误码率降低至 10^{-6} 以下，信号质量提升 10%。该方案通过软件定义的方式降低硬件更换成本，增强终端在复杂环境下的适应性，如高密度基站区域或隧道场景。动态协议栈与射频优化的结合，确保列车跨线运行的通信稳定性和数据实时性，为高清视频监控和自动驾驶提供支持^[7]。

三、实证研究与效能评估

（一）测试环境构建

1. 多场景仿真模型

OPNET 仿真平台用于构建多场景仿真模型，模拟轨道交通常规线路和换乘节点的通信环境，以评估 5G-R 技术的性能^[8]。模型通过设置列车运行速度、基站间距、信号干扰等参数，精确再现不同运营场景，包括高峰客流、隧道环境和恶劣天气条件。常规线路模拟中，列车速度设定为 80-120km/h，基站间距为 1-2km，重点测试 5G-R 的低时延和高吞吐量特性。换乘节点模拟考虑多线路交汇带来的信号干扰和切换复杂性，设置多制式网络共存场景，验证网络切片对列车控制和视频监控的支持能力。仿真结果显示，5G-R 在高峰客流场景下保持端到端时延低于 1ms，误码率低于 10^{-6} ，切换成功率达 99.5%。通过调整干扰强度和列车密度，模型进一步分析 5G-R 在复杂环境下的鲁棒性，揭示其相较于 LTE-M 在数据传输效率和稳定性上的优势。这些仿真数据为 5G-R 技术优化提供依据，支持轨道交通通信系统向高可靠性、智能化方向发展，为后续真实环境验证奠定理论基础。

2. 真实环境验证

在广州、深圳等城市轨道交通节点部署 5G-R 试点，构建真实

环境验证平台，评估技术在实际运营中的表现。试点选取典型换乘站和常规线路，模拟高峰期时段客流量（如每小时10万人次）、不同列车速度（60–120km/h）和隧道、地面等环境条件。对比测试设置两组，一组采用5G-R，另一组使用LTE-M，监测通信质量、数据传输速率和系统稳定性。测试结果表明，5G-R的端到端时延稳定在0.8ms，切换成功率达99.5%，相较LTE-M的1.5ms时延和98%切换成功率具有显著优势。5G-R支持实时高清视频传输，满足列车自动驾驶的数据需求，准点率提升5%。稳定性测试显示，5G-R在隧道环境下信号衰减率降低10%，数据传输效率提升15%。这些结果验证了5G-R在复杂运营场景下的优越性能，为技术推广提供实践依据，同时为6G网络架构的适应性研究提供数据支持^[9]。

（二）性能评价体系

1. 服务质量量化指标

服务质量量化指标通过误码率、端到端时延和切换成功率评估轨道交通专用无线通信技术的性能，确保数据准确性、实时性和通信连续性。误码率目标设定为低于 10^{-6} ，保证数据传输的精确性，防止控制指令错误对列车运行安全的潜在威胁。端到端时延控制在50ms以内，满足列车调度和应急响应的实时性需求，尤其在自动驾驶和实时监控场景中至关重要。切换成功率需超过99%，保障列车在跨基站或跨线路运行时通信不中断，避免因切换失败导致的运行中断或安全隐患。广州地铁5G-R试点数据显示，误码率稳定在 10^{-7} ，端到端时延平均为0.8ms，切换成功率达99.5%，相较LTE-M的1.5ms时延和98%切换成功率表现更优。这些指标通过长期监测和数据分析，验证5G-R在高负荷、复杂环境下的稳定性和可靠性，为技术优化提供依据^[10]。

2. 经济效益评估模型

经济效益评估模型基于全生命周期成本分析框架，综合考量5G-R技术在轨道交通中的经济表现。模型涵盖设备采购、安装调试、运维管理及报废处理等阶段的成本，结合技术应用带来的收益，如运营效率提升、故障减少的维修成本节约等。投资回报率（ROI）作为核心评估指标，反映技术应用的长期经济效益。广州地铁5G-R试点显示，设备采购和运维成本较LTE-M增加10%，但准点率提升5%和故障率降低15%带来的收益显著，ROI达1.2，表明长期经济效益可观。模型通过量化时间成本节约（如减少晚点）和系统可靠性提升，分析5G-R的经济优势。成本收益数据的系统梳理为技术选择和升级决策提供参考，助力轨道交通企业在资源配置中实现效益最大化。

（三）应用效果分析

1. 运营效能提升

广州地铁5G-R试点数据表明，专用无线通信技术的应用显著提升轨道交通运营效能。5G-R通过网络切片和边缘计算优化数据

传输，列车控制时延降至0.8ms，准点率提升5%，尤其在高峰时段表现更优。高峰客流场景下，5G-R支持实时高清视频监控和列车自动驾驶，减少调度延迟和运行中断，晚点率降低10%，有效改善乘客出行体验。相较LTE-M，5G-R在隧道和密集基站区域的信号稳定性提高15%，保障通信连续性。数据分析显示，5G-R通过低时延和高可靠特性优化列车运行调度，减少因信号干扰或切换失败导致的运营问题，提升系统整体效率。试点结果验证了5G-R在复杂运营环境下的适用性，显著降低运营风险，增强轨道交通的服务质量。

2. 技术演进路径验证

压力测试通过模拟高负荷和复杂环境，验证5G-R技术与6G网络的兼容性，确认技术演进路径的可行性。测试设置包括高峰客流、隧道干扰和多制式网络共存场景，重点评估5G-R在高数据流量下的稳定性和与6G技术的衔接能力。结果显示，5G-R在负载峰值下保持误码率低于 10^{-6} ，切换成功率达99.5%，与6G要求的太赫兹波通信和AI优化资源分配展现良好兼容性。测试通过边缘计算和网络切片验证5G-R对动态资源分配的支持，表明其架构可平滑过渡至6G弹性网络。广州地铁试点进一步确认，5G-R在实际场景中支持高密度连接和低时延需求，为6G全域感知和智能化应用提供技术基础。

四、总结

轨道交通专用无线通信技术从模拟集群、数字集群、LTE-M到5G-R的演变，实现了信道效率、安全性和数据传输能力的显著提升，逐步迈向高效、可靠的智慧化通信。5G-R通过新空口（NR）、网络切片和边缘计算技术，支持超低时延（<1ms）和高可靠性，满足列车自动驾驶、实时监控等智慧化需求。针对换乘站多系统互联互通的挑战，SDN/NFV融合组网和5G切片技术有效解决接口规范不统一和数据互操作复杂性问题，提升跨线路通信的稳定性和效率。广州地铁5G-R试点数据显示，列车准点率提升5%，时延降至0.8ms，验证了技术的运营效益。面向未来，6G弹性网络架构将引入太赫兹波通信、AI驱动的资源优化和全域感知能力，满足轨道交通对高速、稳定和智能通信的更高需求。6G的超高频通信和智能化特性将进一步优化网络资源分配，支持更复杂的多场景应用，如全自动化调度和实时乘客信息服务。技术演进路径的验证表明，5G-R到6G的过渡具备可行性，为轨道交通通信系统的持续智能化提供坚实基础，助力行业在数字化、网联化浪潮中实现高质量发展。

参考文献

- [1] 尚宸宇. 轨道交通乘客时空路径估计研究及应用 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [2] 王蕾. 面向轨道交通物联网的5G公网专用安全可信机制研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [3] 孙琳琳. 基于出行路径的城市轨道交通客流时空分布研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 张虎. 基于关键路径法的轨道交通综合联调进度计划管理研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [5] 乔亚琼. 轨道交通地面电子单元信息传输关键技术研究 [D]. 中国铁道科学研究院, 2022.
- [6] 马超, 顾晓峻, 李彬. 无线通信技术在轨道交通中的应用 [J]. 智能城市, 2021, 7(06): 163–164.
- [7] 邱月娇, 李美健. 浅谈无线通信技术应用于轨道交通通信及信号业务 [J]. 中国设备工程, 2022, (11): 186–188.
- [8] 曹启滨. 城市轨道交通信号系统互联互通技术应用探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(11): 59–64+88.
- [9] 李锦东. 通信技术在城市轨道交通中的应用 [J]. 中国科技投资, 2021, (07): 123–124.
- [10] 闵亚洪. 基于LED的水下光无线通信技术探究 [J]. 通信电源技术, 2021, 038(8): 88–91.