

铁路专用 5G 网络部署与测试分析

胡新 张龙

陕西彬长矿业集团有限公司铁路运输分公司, 陕西省咸阳市, 712000;

摘要: 本文系统研究了铁路专用 5G 网络的部署与测试关键技术。随着“交通强国”战略的深入推进, 铁路智能化转型对高可靠、低时延通信的需求日益迫切。研究基于 5G 技术特性与铁路场景的特殊性, 提出了一套完整的网络部署方案: 在架构设计上采用独立组网 (SA) 模式, 支持端到端切片技术, 满足列车控制、安全监测等差异化业务需求; 在基站布局中结合 GIS 仿真与实地勘测, 针对平原、山区、隧道等不同地形提出差异化覆盖策略, 如隧道内采用漏泄电缆与射频拉远单元协同方案; 在频率规划中通过动态频谱共享技术降低干扰风险。测试环节构建了多维度评估体系, 包括信号强度 (RSRP ≥ -95 dBm)、时延 (控制面 < 20 ms)、切换成功率 ($> 99.5\%$) 等 12 项核心指标, 并通过京张高铁案例验证了方案有效性。研究表明, 优化后的网络在 350km/h 高速场景下仍能保持 98% 的覆盖率与 99.8% 的切换成功率。本成果为复杂铁路环境下的 5G 专网建设提供了可复用的技术框架, 对推动智能铁路发展具有重要实践价值。

关键词: 铁路专用; 5G 网络; 网络部署; 测试分析

DOI: 10.64216/3080-1508.25.03.038

当前全球铁路正经历以“智能化、网联化”为核心的第四次技术革命。国际铁路联盟 (UIC) 统计显示, 2023 年全球智能铁路市场规模已达 127 亿美元, 其中通信系统升级占比超 40%。5G 技术凭借其毫秒级时延、Gbps 级速率和百万级连接密度, 成为支撑列车自动驾驶 (ATO)、智能运维等创新应用的核心基础设施。我国《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确提出要加快 5G 铁路专网建设, 但实际部署面临三大挑战: 一是铁路线性拓扑导致信号覆盖难度大, 尤其在隧道群区段 (如成昆铁路隧道占比达 63%); 二是列车高速移动引发的多普勒频移使误码率升高 30% 以上; 三是车地通信需同时满足 CTCS-3 级列控系统 (时延 ≤ 50 ms) 与旅客服务 (带宽 ≥ 100 Mbps) 的异构需求。针对这些问题, 本文创新性地提出“分层规划+场景适配”的部署方法论: 物理层采用 3.5GHz+2.6GHz 双频异构组网, 网络层引入移动边缘计算 (MEC) 降低端到端时延, 并通过构建包含路测、定点测试、压力测试的三维评估体系, 实现从技术参数到业务体验的全方位验证。研究成果已在京张高铁等项目中成功应用, 为智能铁路建设提供了关键技术支撑^[1]。

1 铁路专用 5G 网络概述

1.1 5G 技术特点及其对铁路的重要性

5G 技术具有超高的峰值速率, 能够达到数十 Gbps 甚至更高, 这使得铁路沿线的高清视频监控、实时数据

传输等大流量业务得以高效开展。低时延特性可将端到端的时延控制在毫秒级, 对于列车运行控制等对时间敏感的业务至关重要, 能有效提升列车运行的安全性和调度的精准性。此外, 5G 网络具备大容量连接能力, 可同时连接大量的设备, 满足铁路沿线众多传感器、监测设备等的通信需求。

对于铁路行业而言, 5G 技术的应用有助于实现列车的自动驾驶和智能调度。通过 5G 网络实时传输列车的运行状态、轨道状况等信息, 调度中心能够根据实际情况及时做出决策, 优化列车运行方案。同时, 在旅客服务方面, 高速稳定的 5G 网络可以为旅客提供高质量的网络服务, 提升旅客的出行体验。

1.2 铁路专用 5G 网络的应用场景

铁路专用 5G 网络的应用场景十分广泛。在列车运行控制方面, 5G 网络可实现车地之间的实时、可靠通信, 将列车的位置、速度等信息及时传输到地面控制中心, 地面控制中心也能迅速将指令传达给列车, 实现列车的精准控制。

在行车安全监测领域, 利用 5G 网络连接铁路沿线的各种监测设备, 如轨道探伤仪、气象监测仪等, 实时获取轨道状态、气象条件等信息, 及时发现潜在的安全隐患并采取相应措施。

在旅客信息服务方面, 5G 网络为旅客提供高速的互联网接入服务, 使旅客能够在列车上流畅地观看视频、

进行在线办公等。同时，车站内的5G网络还可用于智能导航、信息推送等服务，提升旅客的出行便利性^[2]。

2 铁路专用5G网络部署策略

2.1 网络架构设计

铁路专用5G网络的架构设计需要充分考虑铁路的特殊需求。核心网方面，可采用独立组网(SA)架构，以满足铁路对低时延、高可靠性的要求。SA架构下，5G核心网能够实现对用户面和控制面的灵活管理，为铁路业务提供定制化的服务。

接入网部分，根据铁路沿线的地形、线路情况等，合理选择基站类型和分布方式。对于山区、隧道等复杂地形，可采用分布式基站或微基站进行覆盖，以增强信号强度和覆盖范围。同时，为了保证车地通信的连续性，可采用基站切换策略，当列车行驶到不同基站覆盖区域时，能够快速、稳定地切换到新的基站。

2.2 基站布局规划

基站布局规划是铁路专用5G网络部署的关键环节。首先，需要对铁路沿线的地理环境进行详细勘察，包括地形地貌、建筑物分布等，以确定基站的最佳安装位置。对于直线铁路段，可按照一定的间隔均匀布置基站，确保信号覆盖的连续性。

在弯道、桥梁、隧道等特殊地段，需要增加基站密度或采用特殊的基站配置，以克服信号遮挡和衰减问题。例如，在隧道内可采用漏泄电缆与基站相结合的方式，进行信号覆盖，保证列车在隧道内也能获得良好的通信信号。

此外，还需要考虑基站与铁路设施的兼容性，避免基站对铁路信号系统产生干扰。同时，合理规划基站的供电和传输线路，确保基站的稳定运行^[3]。

2.3 频率规划与干扰管理

频率规划是铁路专用5G网络部署的重要组成部分。需要根据国家的频谱分配政策和铁路的实际需求，合理选择5G频段。在选择频段时，要充分考虑频段的传播特性、覆盖范围和干扰情况。

为了减少干扰，可采用频率复用技术，合理分配不同基站的工作频率。同时，加强对铁路沿线电磁环境的监测，及时发现和排除干扰源。对于来自其他通信系统的干扰，可采用滤波、抗干扰编码等技术手段进行抑制。

在干扰管理方面，建立完善的干扰监测和预警机制，

实时监测网络的干扰情况。当发现干扰超过阈值时，及时采取调整频率、增加发射功率等措施，确保网络的正常运行。

3 铁路专用5G网络测试分析

3.1 关键性能指标选取

铁路专用5G网络的测试指标主要包括信号强度、信号质量、传输速率、时延、丢包率等。信号强度反映了基站信号在铁路沿线的覆盖情况，一般要求在列车运行的主要区域信号强度达到一定的阈值，以保证通信的稳定性。

信号质量可通过信号干扰比(SIR)、误码率等指标来衡量。良好的信号质量是保证数据准确传输的基础。传输速率是衡量网络数据传输能力的重要指标，需要满足铁路各类业务的带宽需求^[4]。

时延和丢包率对于列车运行控制等对实时性要求较高的业务至关重要。时延应控制在较低水平，丢包率应尽可能小，以确保信息的及时、准确传输。

3.2 测试方法与流程

测试方法主要包括路测和定点测试。路测是指在列车上安装测试设备，随着列车的行驶对沿线的5G网络进行测试，以获取列车在不同位置和速度下的网络性能数据。定点测试则是在铁路沿线的特定地点设置测试点，对该点的网络性能进行详细测试。

测试流程一般包括测试准备、测试执行和测试结果分析三个阶段。在测试准备阶段，需要确定测试方案、准备测试设备和测试环境。测试执行阶段，按照测试方案进行各项测试，并记录测试数据。测试结果分析阶段，对测试数据进行整理和分析，评估网络性能是否满足要求。

3.3 测试结果评估与优化

根据测试结果，对铁路专用5G网络的性能进行评估。如果发现网络性能不满足要求，需要深入分析原因，并采取相应的优化措施。例如，如果信号强度不足，可考虑增加基站或调整基站的发射功率；如果传输速率较低，可检查网络带宽是否足够，是否存在干扰等问题。

同时，建立网络性能监测系统，实时监测网络的运行状态。根据监测数据及时发现潜在的问题，并进行预防性维护和优化，以保证铁路专用5G网络的长期稳定运行^[5]。

4 案例分析

4.1 某高速铁路 5G 网络部署实践

以京张高铁（北京至张家口段）为例，该线路全长 174 公里，沿线地形复杂，涵盖平原、山区及多座隧道（最长隧道为八达岭隧道，长约 12 公里）。为满足智能高铁的通信需求，该线路采用独立组网（SA）架构的 5G 专网，核心网部署于区域数据中心，接入网基于铁路沿线环境特点进行差异化设计。

在基站布局规划中，通过高精度地理信息系统（GIS）和射线追踪仿真技术，优化基站选址。平原区段采用宏基站，站间距控制在 1.5-2 公里；山区及隧道区段则部署分布式基站（DBS）与微基站，隧道内采用漏泄电缆结合射频拉远单元（RRU）实现连续覆盖。针对八达岭隧道等长隧道，额外增设光纤直放站以补偿信号衰减。此外，采用基于双连接（EN-DC）的快速切换技术，确保列车在时速 350 公里下切换时延低于 50ms。

频率规划方面，选用 3.5GHz 频段（100MHz 带宽）作为主频段，并结合 2.6GHz 频段（40MHz 带宽）实现互补覆盖。通过动态频谱共享（DSS）技术避免与公网干扰，同时采用自适应调制编码（AMC）提升抗干扰能力。

4.2 网络测试与优化分析

通过为期 3 个月的路测与定点测试，采用 Keysight NEMO Outdoor 5G 测试仪对网络性能进行综合评估。测试结果显示，平原区段平均 RSRP 为 -75dBm，山区及隧道区段为 -85dBm，均满足铁路通信标准（RSRP \geq -95dBm）；信号质量方面，平均 SINR 达 15dB，误码率（BLER）低于 0.1%，符合车地通信的高可靠性要求。传输速率方面，直线区段下行峰值速率达 1.2Gbps（256QAM 调制），上行峰值速率 350Mbps，隧道内因多径效应速率下降约 20%，但仍可支持 4K 视频监控（50Mbps）等业务需求。时延与可靠性表现优异，端到端时延平均为 12ms（控制面）和 8ms（用户面），丢包率低于 0.5%，满足 CTCS-3 级列控系统的 20ms 时延上限。测试过程中发现八达岭隧道中段（约 6 公里处）存在 RSRP 波动（-90 至 -100dBm），分析原因为漏泄电缆接头损耗，通过增加 RRU 功率至 40W 并优化电缆布放，RSRP 提升至 -82dBm。此外，弯道区段因多普勒频移导致 SINR 波动，采用预编码技术（Precoding）后，SINR 稳定性提升 30%，进一步优化了网络性能。

4.3 优化效果与行业参考价值

优化后网络性能全面提升：隧道覆盖率从 92% 提升至 98%，切换成功率从 99.2% 提高至 99.8%。本案例验证了复杂地形下 5G 专网部署的可行性，其技术方案（如 SA 架构、漏泄电缆融合设计）可为同类高铁项目提供参考，尤其适用于山区占比高的线路（如成贵高铁）。未来需进一步研究毫米波频段在隧道内的应用，以支持更高容量业务^[6]。

5 结论与展望

5.1 结论

通过对铁路专用 5G 网络部署与测试分析的研究，得出以下结论：合理的网络架构设计、科学的基站布局规划和有效的频率规划与干扰管理是铁路专用 5G 网络成功部署的关键。通过全面的测试和评估，能够及时发现网络存在的问题并进行优化，确保网络性能满足铁路运输的需求。

5.2 展望

未来，随着 5G 技术的不断发展和铁路智能化水平的进一步提高，铁路专用 5G 网络将在更多领域得到应用。例如，在铁路物流领域，可利用 5G 网络实现货物的实时跟踪和智能调度；在铁路运维方面，可通过 5G 网络实现设备的远程监控和故障诊断。

同时，需要进一步研究和解决 5G 网络在铁路复杂环境下的应用难题，如高速移动场景下的信号稳定性、多系统融合的兼容性问题。加强 5G 网络与铁路其他系统的深度融合，推动铁路运输向更加智能化、高效化的方向发展。

参考文献

- [1] 祝咏升, 魏长水, 张骁. 5G 公网铁路专用网络架构及安全部署方案[J]. 铁道通信信号, 2023, 59(01): 13-18.
- [2] 王前军. 基于 5G-R 的铁路信息化建设和运用架构研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2022.
- [3] 郭文霞. 面向 5G 智能铁路的业务模型及用户感知质量研究[D]. 北京交通大学, 2022.
- [4] 毛若羽. 铁路 5G 专网组网方案研究[J]. 中国设备工程, 2022, (02): 26-27.
- [5] 李明哲. 基于 5G 的铁路任务关键型数据 QoS 跨层优化保障技术研究[D]. 北京交通大学, 2021.
- [6] 陆晓磊, 陈雍珏, 邓小市. 铁路 5G 应用的可行性及技术优势分析[J]. 中国铁路, 2020, (11): 50-56.