Coverage Optimization and Interference Suppression Technology of Rail Transit Vehicle-to-Station Wireless Communication System

Yirao Zhang Nan Sheng

Changchun Rail Transit Group Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

Abstract

As rail transit systems advance toward intelligent and high-speed operations, the vehicle-to-ground (V2G) wireless communication system serves as a critical infrastructure for ensuring train safety and operational efficiency, with coverage performance and interference resistance being paramount. This paper first examines the challenges of incomplete coverage and signal interference in V2G systems, then analyzes coverage optimization and interference suppression technologies. Coverage optimization focuses on network planning, topology optimization, implementation of key technologies, and performance evaluation methods. Interference suppression delves into interference source identification, practical anti-interference techniques, and system coordination optimization strategies. The study aims to provide theoretical references and practical guidance for enhancing the reliability, real-time performance, and capacity of V2G communication systems.

Keywords

rail transit; vehicle-to-ground wireless communication; coverage optimization; interference suppression; network planning; anti-interference technology

轨道交通车地无线通信系统的覆盖优化与干扰抑制技术

张艺饶 盛楠

长春市轨道交通集团有限公司，中国·吉林 长春 130000

摘　要

随着轨道交通朝智能化、高速化方向迈进，车地无线通信系统是保障列车安全、高效运行的关键依托，其覆盖性能、抗干扰能力至关关键。本文首先梳理轨道交通车地无线通信系统存在的覆盖不全与信号干扰问题，随后围绕覆盖优化技术和干扰抑制技术2个层面展开分析。在覆盖优化上，重点研究网络规划和拓扑优化、关键技术落实及性能评估手段；在干扰抑制工作上，细究干扰源识别和分类、抗干扰技术实践及系统协同优化方案。本文聚焦为提升车地无线通信系统的可靠性、实时性和容量提供理论参考与实践指导。

关键词

轨道交通；车地无线通信；覆盖优化；干扰抑制；网络规划；抗干扰技术

1 引言

车地无线通信系统作为支撑轨道交通运营的“神经网络”，保障列车控制指令、实时状态监测和乘客信息服务等关键业务数据的可靠传送。随着轨道交通网络规模不断扩张、列车运行速度稳步提高，外加车载多媒体、智能运维等新兴业务需求快速攀升，复杂隧道、高架区间及密集枢纽等场景，给系统带来信号覆盖不均、传播损耗严重、多径衰落效应突出、同频邻频干扰加剧等挑战，直接阻滞通信实时性和稳定性，甚至给行车安全埋下隐患。因此，怎么构建高效、连续、稳定的网络覆盖体系，并有效甄别和抑制各类干扰，已是轨道交通通信范畴亟待攻克的核心问题。本文紧扣覆盖优化和干扰抑制 2 大核心模块，全面梳理相关技术原理，分析典型技法与工程应用方案，为系统的规划设计、部署实施与运营维护提供全面参考和实操路径。

【作者简介】张艺饶（1981–），男，中国吉林长春人，本科，高级工程师，从事通信工程研究。

2 轨道交通车地无线通信覆盖优化技术

优化车地无线通信系统覆盖，目的是保障沿线无线信号连续稳定，适配高速移动场景的通信需求。核心目标为在复杂隧道、高架、弯道等特殊环境消除盲区、均衡信号强度、提升容量。

2.1 网络规划与拓扑结构优化

科学的网络规划是轨道交通无线通信覆盖优化的核心

基础。设计人员需统筹兼顾线路沿途的地理环境特征、隧道和高架等不同场景的电波传播特性，贴合列车控制、乘客信息系统等业务的差异化需求，同时合理安置基站（AP）或泄漏同轴电缆。在实际执行中，直线区间一般采用较大站间距，曲线区间必须加密站点，突破弯道遮挡限制；在封闭隧洞中，使用漏缆实现连续均匀覆盖，且在洞口等关键位置增设定向天线补信号；在高架类开阔路段，能借助多天线分集接收技术对抗信号衰落，稳固可靠性。

构建更可靠高效的覆盖网络，要从系统拓扑层面创新，用蜂窝组网结构实现频率复用和无缝切换，或在大型站场采用多层网络，外加部署分布式天线系统，扩大覆盖规模，平抑话务负载。先进拓扑结构可显著优化全网覆盖的均匀性与整体鲁棒性，为后续技术应用和优化夯实可靠物理基础，保障高速移动环境下各类业务连接连续且稳定 [1]。

2.2 关键覆盖增强技术应用

在复杂轨道交通环境里，需要依靠一系列先进覆盖增强技术应对专项挑战。处理高速移动引发的多普勒频移、频繁切换及车体穿透损耗等问题，可大规模铺开 MIMO 技术，借助空间分集和复用强化信道容量与抗干扰能力；采用智能天线和波束赋形算法，动态引导信号能量聚焦列车行驶方向，显著提升目标区域的信号强度并消减干扰。在长隧道、大型地下车站等信号达不到的区域，可灵活采用射频拉远单元或有源 / 无源中继设备，可省钱高效拓宽覆盖范围，消除盲区。

理论设计加仿真验证，是保障技术方案精准落地的关键步骤。需采用依托射线跟踪理论或确定性电波传播模型的专业仿真工具，结合精准的三维地理信息系统数据，实施全线无线信号场强预测与覆盖模拟。通过反复仿真和参数调整，能预先排查潜在弱覆盖区、越区干扰等问题，借此优化天线选型、布点位置、参数配置，达成从经验驱动到模型驱动的精准网络规划及优化，减少后期整改成本，提升网络建设效率和质量。

2.3 覆盖性能评估与动态调整

网络覆盖优化是凭借测量和反馈的持续闭环流程。在工程验收与日常运维环节，必须通过车载测试设备沿全线实地采集接收信号强度、信噪比、误码率、切换成功率等关键性能指标，同步采用网络管理系统侧的统计数据，诸如话务量、拥塞率、掉线率，就覆盖效果进行全面客观定量评估。这种“路测 + 网管”结合方案，可精准锁定覆盖空洞、弱覆盖区、切换失败区和外界干扰源，为后续优化找准精准定位。

凭借评估结果，静态参数调整赶不上动态变化的高铁运营环境需求，应引入更智能的自适应调参机制。该机制可依据实时采集的网络负载状况、列车实时位置和速度信息，依托集中式控制器或分布式算法，动态调整对应基站或接入点的发射功率、天线电子下倾角、切换门限等参数。这类动态优化可实时抵消环境变化（如天气、季节植被变化）引发的覆盖波动，还能在网络话务分布不均时主动实施容量均衡，持续实现网络覆盖性能和资源利用效率的最优水平，保障乘客、运营业务的高质量无线体验 [2]。

3 轨道交通车地无线通信干扰抑制技术

3.1 干扰源识别与特征分析

为了有效抑制无线通信干扰，必须精准识别干扰的类型和来源。在轨道交通体系内，第一环节需采用便携式频谱分析仪、固定监测站及网络侧性能数据，持续监测干扰信号，实施深度分析。按照信号特征，干扰一般可划分为同频干扰、邻频干扰、互调干扰及外部脉冲噪声等主要类型。聚焦该场景，需特别留意牵引供电系统产生的宽频谐谐波干扰、列车集电弓和接触网滑动摩擦引发的瞬态火花噪声，以及沿线公众移动通信、工业设备可能带来的频段重叠干扰。通过现场测试与数据分析，精准定位干扰的物理源头是制定并实施有效应对策略的核心基础。

为开展针对性抑制，须对已识别干扰实施量化建模和特征分析。这囊括捕捉时域上的突发性、周期性或连续性特点，针对频域测量中心频率、带宽、功率谱密度及谐波分布，按空间维度梳理传播路径和方向性。牵引谐波干扰通常呈现出与电网工频存在关联的离散频谱特性，火花噪声则体现为在时域内的随机尖锐脉冲。通过制作详细干扰特征模型，可为后续选定滤波、规避或抵消等抑制策略提供关键理论支撑，助力干扰管理工作从经验判断转为科学决策。

3.2 抗干扰关键技术应用

针对各类干扰，需要在信号传输和接收环节采用多项关键技术。比如采用直接序列扩频或跳频技术，用扩展信号频谱或让它在多个频点快速跳变的方式，借此降低干扰功率密度，提升信号的隐蔽性与抗干扰容限。针对空域处理，可以设置智能天线阵列并采用自适应波束成形算法，实现实时调整天线方向图，让主波束精准瞄准目标用户，同时在干扰方向生成辐射零陷，靠空间维度有效压制干扰信号 [3]。

在频域和信号处理层面，可通过认知无线电技术探测频谱环境，动态选择干净频段接入，主动躲开干扰强的信道。用高阶调制和强纠错编码技术强化信号自身鲁棒性，并采纳自适应滤波器和干扰抵消算法，直接估计接收信号中的干扰成分并减去。针对突发脉冲噪声，把比特流按时域维度交织分散，再结合前向纠错码，可把其影响转化为随机零星错误，由此得到有效修正。综合应用此类技术，能从各维度提升接收端的信干噪比，维持通信链路可靠状态。

3.3 系统级协同抗干扰策略

应对轨道交通沿线动态变化的复杂电磁环境，仅靠单一技术，抗干扰效果有限，需立足通信系统全局推进顶层设计与协同优化。在实施网络规划进程时，需敲定严格的频率规划及复用方案，并配足保护带，从根源上降低系统内部同

频和邻频的干扰风险。在数据链路层，构建带有强抗冲突能力的媒体接入控制协议，采用预约或防碰撞机制，降低多用户抢占信道引发的数据包碰撞频次，这类碰撞是系统内部的 1 种干扰。

为了引入集中式的网络协同机制，应把先进干扰协调与无线资源管理功能部署到核心网或集中控制器侧，依托全网干扰测量报告，动态统筹多个基站或接入点的发射功率、频率和时隙资源。在实施小区间干扰的协同管理与抑制时，应把抗干扰性能作为核心指标纳入系统整体设计框架和设备选型标准，其要求关键设备配有干扰抑制能力，诸如高性能滤波器、高线性度功放等。采用这种贯穿规划、协议、管理和硬件全链条的系统级策略，才能从源头和体系层面大幅强化轨道交通无线通信系统的整体鲁棒性。

4 覆盖优化与干扰抑制的协同与展望

4.1 覆盖与干扰的耦合关系分析

弱覆盖区域的出现，多因信号传播受阻或基站布点不足，其直接关乎通信的连续与可靠。在补足覆盖漏洞中，惯用手段是提升特定小区发射功率或新增补点站，不过这可能引发信号越区覆盖，为邻近小区造成严重同频或邻频干扰，从而降低整体信干噪比和用户速率。网络中出现强干扰区域——比如多小区信号重叠或外部电磁干扰——会让终端接收信号质量降低，有效服务范围缩减，形成实际存在的“覆盖空洞”。覆盖和干扰互相制约、互相转化的耦合关系，代表仅开展单一优化覆盖或干扰往往事倍功半，甚至引发网络性能震荡。在网络规划与优化时，要从系统性、联合优化的角度，把覆盖控制与干扰管理归入同一框架分析，同步调整功率、天线、频率、小区参数等多个维度指标，在满足全域覆盖要求的同步阶段，将干扰维持合理水平，从整体上提升系统容量和用户体验，把网络效能拉满 [4]。

4.2 一体化协同优化框架

聚焦复杂高密度的现代移动通信网络，亟需搭建覆盖与干扰一体化协同优化框架，大数据和人工智能是这个框架的核心动力源。通过实时采集终端测量报告、网络性能计数器、信令跟踪等多源海量数据，以机器学习算法自动定位网络症结，能够精准识别覆盖弱区、过覆盖区域及干扰冲突点。借着这个基础，系统可制定并落实协同优化策略：采用 SON（自组织网络）技术动态调整小区发射功率、天线倾角、切换参数等，保证覆盖无间断的同时，遏制不必要的同频干扰；从更宽维度上，依靠云化集中管控架构，完成跨基站、跨频段甚至跨制式的协同资源调度与干扰协调，涉及小区间干扰协调、协同波束成形、动态频谱共享等机制。此框架支持实时或准实时闭环优化，还可实施长期趋势分析和策略仿真，赋予网络自适应、自优化能力，进而在动态变化的环境里长久保持覆盖与干扰的最佳平衡。

4.3 面向未来的技术演进方向

在轨道交通等场景开始应用 5G/6G、毫米波、太赫兹通信等前沿技术，覆盖和干扰管理面临新挑战和新机遇。高频段通信虽可实现大带宽，但传播损耗高、绕射能力差，覆盖易受限，需借助智能超表面、中继增强、分布式 MassiveMIMO 等新型覆盖延伸技术，实现灵活、智能的信号增强与导引。超密集组网、多层异构网络将成为常规模式，随着小区间干扰复杂程度升级，带动了干扰协调技术从传统静态配置迈向动态智能协同。比如依据用户位置的动态小区聚类与干扰消除，空天地一体化网络把卫星、高空平台和地面网络深度融合，增加覆盖层面。通感一体化依托通信与感知能力的结合，实现环境感知及干扰预测。这类新型架构有效强化系统覆盖能力和抗干扰潜力，但也给网络全局协同设计、资源一体化调度及跨域管理划定更高标准，推进覆盖与干扰优化朝全域智能、多维融合方向稳步前进 [5]。

5 结语

做好轨道交通车地无线通信系统的覆盖优化和干扰抑制，是支撑它高效可靠运行的两大技术支撑。本文全面论述覆盖优化涉及的规划、技术与评估方法，以及干扰抑制相关的识别、技术与协同策略，并着重说明两者的内在联系与协同要求。覆盖优化聚焦构建连续、均衡的信号环境，干扰抑制聚焦净化通信链路、提升信号质量。随着轨道交通智能化水平提升和新技术引入，覆盖与干扰问题将愈发复杂，必须在理论创新、技术融合和系统集成上不断突破，构建更智能、更可靠、更高效的车地无线通信系统，为轨道交通安全、准点和舒适运营打下扎实根基。

参考文献

[1] 李德麟.城市轨道交通专用无线通信系统制式分析[J].智能建筑与智慧城市,2025,(12):164-167.

[2] 兰蒙,徐中伟,黄新林.面向轨道交通车地无线通信系统的零现场测试[J].铁道学报,2025,47(10):103-113.

[3] 王霁晨,李海粟,刘嘉宇,张永恒.城市轨道交通无线通信系统的共线运营研究[J].铁道通信信号,2024,60(05):67-76.

[4] 林鹏程,陈志超.城市轨道交通CBTC信号系统中的无线通信抗干扰技术分析[J].集成电路应用,2023,40(12):306-307.

[5] 黄骏,汤伟涵.城市轨道交通5G车地无线通信系统可实施性研究及智能应用探索[J].现代城市轨道交通,2023,(08):26-29.