

文章编号: 2095-4980(2025)12-1250-11

基于射线追踪的 GSM-R 多径干扰网络优化分析

朵 灏¹, 赵国超², 弓子悦^{*3a,3b}, 张 玉⁴, 罗 珊^{3a,3b}, 高婷婷⁵

(1. 中国信息通信研究院泰尔终端实验室, 北京 100191; 2. 中国星网网络应用研究院有限公司, 北京 100001;
3. 北京交通大学, a. 先进轨道交通自主运行全国重点实验室; b. 电子信息工程学院, 北京 100044;
4. 北京乾径科技有限公司, 北京 100076; 5. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘 要: 随着铁路移动通信系统向数字化与智能化加速演进, 传统铁路窄带移动通信系统(GSM-R)多径干扰优化模式已难以适应现代轨道交通对移动通信系统提出的高效精准、智能决策等新型运维需求。本文介绍了 GSM-R 多径干扰发生的原理和场景特点, 并分析了射线追踪(RT)驱动的高铁无线网络优化系统的核心模块和系统架构。以武广高铁山岭隧道场景的语音质差优化为案例, 基于高铁无线网络优化系统确定造成语音质差的问题来源, 给出 3 种网络优化方案并进行仿真分析。结果表明, 通过调整多径干扰区段光纤远端直放站的发射功率和天线下倾角, 语音质差起点处的多径干扰问题得到明显改善, 为 GSM-R 网络多径干扰问题的数字化、高质量优化提供了方案参考和技术积累。

关键词: 射线追踪(RT); 铁路窄带移动通信系统(GSM-R); 多径干扰; 无线网络优化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025128

Analysis of GSM-R multipath interference network optimization based on ray tracing

DUO Hao¹, ZHAO Guochao², GONG Ziyue^{*3a,3b}, ZHANG Yu⁴, LUO Shan^{3a,3b}, GAO Tingting⁵

(1.CTTL-Terminals, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;
2.China Satellite Network Application Institute Co., Ltd., Beijing 100001, China;
3a.State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation; 3b.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4.Beijing MetaRadio Technology Co., Ltd., Beijing 100076, China;
5.CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: As railway mobile communication systems rapidly evolve toward digitization and intelligence, the traditional multipath-interference optimization model of narrowband GSM-R can no longer satisfy modern rail-transport demands for highly efficient, accurate and intelligent operations and maintenance. This paper first explains the mechanism and scenario-specific features of GSM-R multipath interference, and then analyzes the core modules and overall architecture of a ray-tracing-driven high-speed-rail wireless-network optimization system. Taking the voice-quality degradation that occurs inside a mountain tunnel on the Wuhan-Guangzhou high-speed line as an example, the system is employed to pinpoint the root cause of the poor voice quality. Three network-optimization schemes are proposed and simulated. The results show that by adjusting the optical-fiber repeater's transmit power and antenna downtilt in the multipath-interference zone, the interference at the onset of voice-quality degradation is significantly mitigated, providing a reference solution and technical foundation for the

收稿日期: 2025-04-21; 修回日期: 2025-06-10

基金项目: 四电数字孪生设计仿真运维一体化平台研究资助项目(2300-K1240018); 航空科学基金资助项目(2022Z0660M5001)

*通信作者: 弓子悦 email:gongziyue@bjtu.edu.cn

引用格式: 朵灏,赵国超,弓子悦,等. 基于射线追踪的 GSM-R 多径干扰网络优化分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(12):1250-1260.
DOI:10.11805/TKYDA2025128.

Citation format: DUO Hao,ZHAO Guochao,GONG Ziyue,et al. Analysis of GSM-R multipath interference network optimization based on ray tracing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(12):1250-1260. DOI:10.11805/TKYDA2025128.

digital, high-quality optimization of GSM-R multipath-interference problems.

Keywords: Ray Tracing(RT); Global System for Mobile Communications-Railway(GSM-R); multipath interference; wireless network optimization

2020年7月, 国铁集团印发《新时代交通强国铁路先行规划纲要》文件, 指出在贯彻落实交通强国的建设部署中, 铁路建设要当好先行兵, 分两步走, 到2035年率先建成现代化铁路网; 到2050年将我国全面建成高水平现代化铁路强国, 进而全面保障社会主义现代化强国建设^[1]。2023年4月, 中央办公厅发布《加快建设交通强国五年行动计划(2023—2027年)》的解读文件, 明确建设交通强国是新时代做好交通运输工作的总抓手, 强调加快建设交通强国是新时代中国式现代化的开路先锋^[2]。可见, 铁路不仅是服务民生、供给经济的重大基础设施, 也是有效缩短区域间、城市群间、省际间时空距离的交通运输体系核心中枢, 在支撑交通强国建设、助力社会主义现代化强国建设中发挥着不可替代的作用^[3-4]。

铁路移动通信系统是保障铁路运输调度指挥、安全运行以及信息化服务的重要支撑技术。铁路窄带移动通信系统(GSM-R)作为目前国内大铁主要应用的专网通信制式, 承担着列车运行控制、调度通信、紧急呼叫、行车数据传输等多项铁路专用业务, 其稳定性和高效性直接关系到铁路运输的安全和效率^[5]。截至2024年底, 我国铁路运营里程突破16.2万公里, 铁路高质量建设成果显著。但随着综合铁路网的快速扩张, 铁路移动通信场景也日趋多元化和复杂化, 如跨越山川峡谷的川藏铁路, 穿越沙漠戈壁的兰新高铁以及洞穿大量隧道的贵广高铁等特殊复杂的通信场景。

为应对铁路沿线的隧道、山区、深谷等特殊复杂场景中信号覆盖困难、信号质量差等网络问题, 引入光纤直放站作为GSM-R网络的重要扩展手段。但由于光纤直放站与基站发射的是同频信号, 因此会引入同源信号多径传播导致的相互干扰, 该问题在GSM-R网络运维中较难定位解决, 是GSM-R网络优化的难点^[6-7]。文献[8]基于对GSM-R铁路专网频谱特性的剖析, 针对铁路沿线日益复杂的电磁环境, 研究GSM-R专网中的干扰源定位、干扰检测及抗干扰性能, 并提出了相应的抗干扰建议。文献[9]面向铁路线新建过程中需要对已建基站、直放站迁改并建造新基站的现象, 基于综合检测车数据分析沪昆高铁发生无线超时制动问题的原因, 确定为多径干扰问题后, 工程人员通过4次调整相关直放站上行衰减值、滤波器参数等方式解决了杭长段多径干扰问题。文献[10]针对列车通过同源基站直放站共同覆盖路线时多径干扰造成的通信掉话问题, 将GSM-R终端在基站直放站共同覆盖路线划分为3种场景, 面向最可能发生多径干扰的覆盖场景进行建模分析, 量化了同源基站直放站部署间距与导致多径干扰发生的数学关系, 为部署直放站工程设计提供了参考。文献[11]介绍了GSM-R直放站引起多径时延扩展的原理并通过数学推理给出了能避免多径干扰时直放站在基站方向的信号覆盖范围, 基于实际多径干扰案例给出了减小基站和直放站之间预留光缆长度以降低定时提前量(Time Advanced, TA)值和调整直放站天线角度或功率以减小直放站覆盖范围的优化方案。

目前, 铁路业界和相关专业的学术界已使用确定性信道建模^[12-14]、智能反射表面^[15-16]、低空轨道卫星^[17]、人工智能模型^[18-20]等技术手段赋能铁路专网的功率覆盖增强、MIMO天线设计、融合网络架构设计等应用领域, 但面向GSM-R多径干扰难题, 仍需进一步探索和研究, 为铁路业界提供前瞻、准确、高效的优化思路。

通过对现有GSM-R网络中的多径干扰优化调研可知, 目前各路局针对多径干扰问题的解决流程为: 首先, 基于收到铁路运营区段的通信业务故障反馈, 采用综合检测车获取对应区段的Abis口测量报告, 经过对测量数据的分析处理定位网络故障问题; 然后, 在列车运行天窗期对相关基站直放站参数进行调整或减少工程设计中预留的光缆长度; 最后, 通过持续观察通信业务故障区段优化调整后的列车通信业务质量来评估多径干扰优化效果。但这种多径干扰优化方案在实际应用中存在3个痛点问题: a) 列车通信业务安全风险系数高; b) 资源消耗大且优化带有主观性; c) 迭代检验优化效果周期长。

针对上述痛点问题结合未来数字铁路建设战略布局的趋势^[21], 本文论述了铁路移动通信系统中多径干扰产生的技术原理, 并依托我国自主研发的射线追踪云平台CloudRT^[22], 以武广高铁多径干扰为案例场景, 给出基于射线追踪仿真的多径干扰优化分析。

1 GSM-R 多径干扰

1.1 多径干扰场景

图1为铁路移动通信场景中基站(Base Station, BS)与直放站共同覆盖列车运行区段的示意图, 其中光纤直放站的设置是为了增强信号覆盖、改善通信质量以及解决复杂铁路场景中的信号盲区问题。光纤直放站的主要工作流程包括信号的接收、传输、放大和重新发射。光纤直放站近端单元(Main Unit, MU)通过施主天线接收来自

GSM-R 基站的信号, 接收到的射频信号经过滤波、下变频、电光转换等一系列信号处理, 转换为适合在光纤中远距离低损耗传输的光信号。光纤线路将光信号传输至直放站的远端单元(Remote Unit, RU)并进行光电转换、上变频、功率放大等信号处理还原射频信号, 最后由光纤远端直放站发射信号覆盖复杂铁路场景中信号盲区。

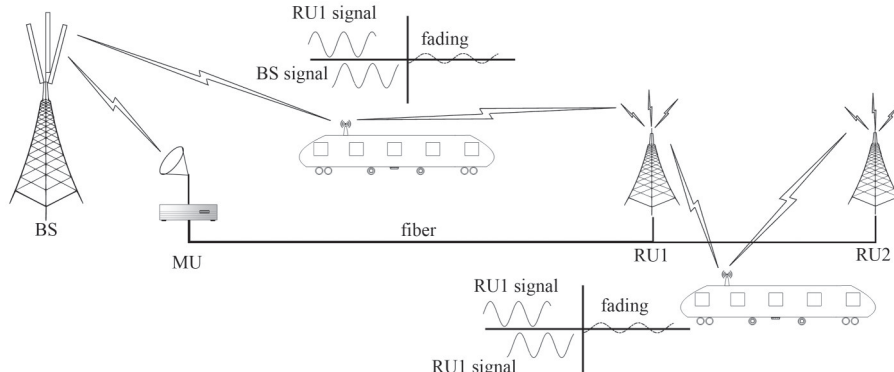


Fig.1 Schematic diagram of joint coverage of base station and optical fiber repeater
图1 基站与光纤直放站共同覆盖示意图

1.2 多径干扰原理

电磁波是连接铁路移动通信系统发射端和接收端信息传输的载体, 由于列车具有高速移动特性, 故其通信场景也会随之快速切换。GSM-R 作为铁路现网专用移动通信系统, 其承载的专网通信业务信号以铁路沿线为中心在一定空间范围内进行传播。而铁路沿线地形地貌多样, 电磁环境复杂多变, 因此无线电波在传播过程中也会频繁遭遇各类散射体, 使电波传播的路径多样化, 这种接收端接到不同传播路径的无线电波现象就是多径传播。当同频信号经过多径传播到达 GSM-R 移动台时, 会造成不同信号分量的时间色散, 导致码间串扰。

当多径传播引起的时间色散差小于 4 个 TA(公式中以 T_A 表示)时, GSM-R 移动台通常可采用均衡器补偿多径时间色散引起的干扰。根据铁路数字移动通信系统设计规范关于干扰保护比的说明, 同频信号之间的干扰保护比不应小于 12 dB^[23]。因此, 铁路移动通信中多径干扰的形成条件为:

$$\begin{cases} \Delta T_A \geq 4, T_A \approx 3.7 \mu\text{s} \\ P_s - P_i \leq 12 \text{ dB} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_s 为有用信号接收功率; P_i 为同频干扰信号功率。

图 1 为列车行驶中常见的信号覆盖情形, GSM-R 移动台可能同时收到基站和光纤远端直放站 1 的同频信号或同时收到光纤远端直放站 1 和光纤远端直放站 2 的同频信号, 当满足式(1)条件时, 就会产生多径干扰现象, 导致铁路通信业务服务质量下降。

2 射线追踪驱动的高铁无线网络优化系统

在高速铁路移动通信场景中, 牵引机车、路堑边坡、站台设施、桥梁构件及隧道结构等异质化场景结构群会使铁路沿线形成复杂独特的电磁环境, 导致电波传播呈现显著的多径衰落效应。此外, 铁路移动通信场景下信号衰减呈现空间非均匀分布特征, 并伴随显著的频域相关性。因此, 现有基于大数据经验统计的传播模型在表征此类时变信道特性时存在建模精确度不足的问题, 难以满足新一代高铁通信系统的运维优化要求。

射线追踪(RT)作为一种确定性信道建模方法, 其理论框架建立在几何光学、一致性绕射、方向性散射等理论基础上。基于这些确定性的计算方法理论, 射线追踪技术可有效模拟电磁波在收发节点间的传播过程, 可精确表征无线信道中多径分量的路径损耗、时延、幅度及极化等特性。相较于传统经验模型, RT 算法突破了系统参数(如通信制式、测试环境、频段选择及带宽配置)的适应性限制, 同时克服了标准信道模型中传播参数不完备的固有缺陷, 为复杂电磁场景下的通信系统设计提供理论支撑。因此本文的 GSM-R 多径干扰问题分析与优化采用射线追踪驱动的高铁无线网络优化系统^[24]。

如图 2 所示, 高铁无线网络优化系统共由 3 个子模块构成, 分别是多源异构数据融合模块、高性能射线追踪仿真模块以及高铁无线网络优化系统前端模块。

1) 多源异构数据融合模块: 可将物理空间中铁路移动通信场景的地表地物类型、环境地形起势、建筑物分布及主要轮廓等信息映射为数字空间中的地物数据、海拔数据、建筑物数据及结构体模型数据, 并融合生成高

铁无线网络优化系统的仿真场景底座, 为射线追踪仿真中的射线几何路径计算提供准确、有效性保障。

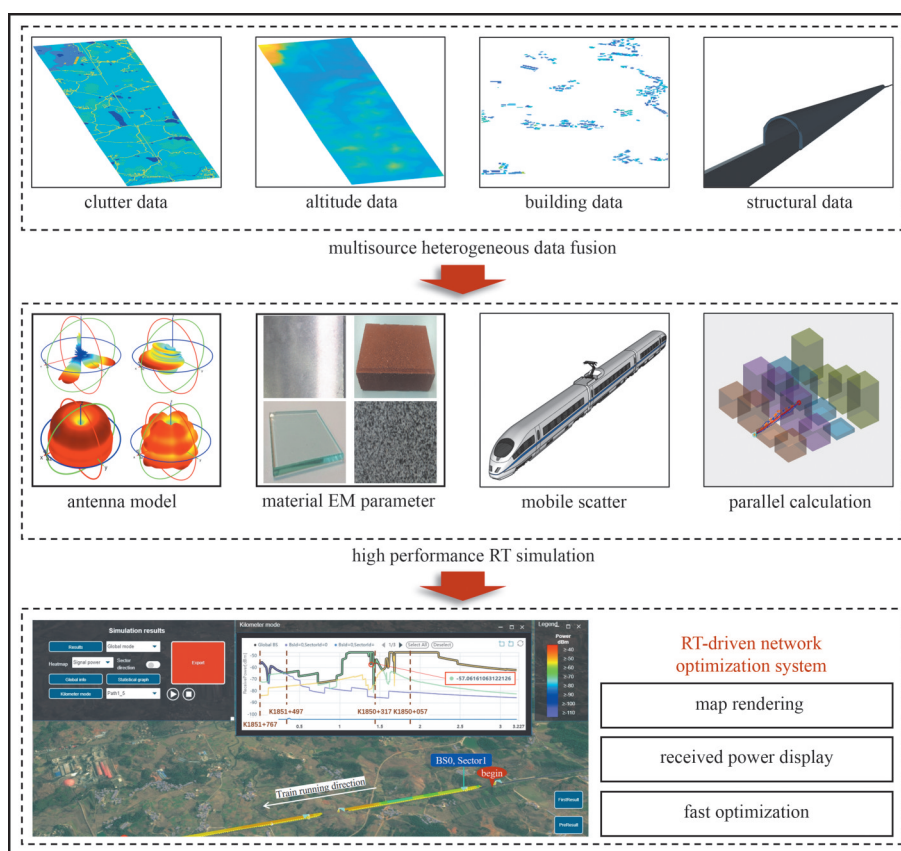


Fig.2 Ray tracing driven high-speed railway wireless network optimization system architecture
图2 射线追踪驱动的高铁无线网络优化系统架构

2) 高性能射线追踪仿真模块: 通过输入铁路沿线基站端发射天线模型、列车车载端接收天线模型、仿真环境场景模型表面的材料电磁参数、主要的移动散射体模型等仿真物料并对目标频段、传播机制、收发端天线移动轨迹等参数进行配置, 触发多线程并行射线追踪仿真计算, 生成铁路移动通信场景的高精确度信道特性数据。射线追踪模块计算接收功率的表达式为:

$$P_{Rx} = -10 \lg \left\{ \sum_{i=1}^{N_{FP}} \mathcal{F}^{-1} \left(\sum_{n=1}^{N_{Rays}} G_{Tx}(\varphi_D, \theta_D) G_{Rx}(\varphi_A, \theta_A) a_n(f) e^{j\varphi_n(t)} \right) \right\}^2 + P_{Tx} - L_{system} \quad (2)$$

式中: N_{FP} 为仿真频点数量总和; \mathcal{F}^{-1} 为傅里叶逆变换; N_{Rays} 为多径数量; G_{Tx} 、 G_{Rx} 分别为基站发射天线增益和车载接收天线增益; φ_D 、 θ_D 分别为电波相对于基站发射天线的天顶离开角和水平离开角; φ_A 、 θ_A 分别为电波相对于车载接收天线的天顶到达角和水平到达角; a 为电波幅值; f 为网优平台仿真的中心频率; φ 为电波相位; P_{Tx} 为发射功率; L_{system} 为系统的馈线损耗。

3) 高铁无线网络优化系统前端模块: 通过融合 Planet 电子地图、卫星影像、道路底图等数据并基于地理信息系统精确还原导入高铁无线网络优化系统的环境场景, 并将高性能射线追踪仿真模块生成的扇区级接收信号功率热图、列车运行中相对于初始位置的行驶公里数(公里标)曲线等信道特性通过系统前端界面的形式呈现, 方便铁路网优工作者直观评估分析目标铁路移动通信场景的接收信号覆盖态势, 并快速做出网络优化决策。

3 GSM-R 无线网络多径干扰网络问题分析

基于对各路局因多径干扰造成的语音质差问题调研, 以武广客运专线发生的实际通话质差为案例, 进行 GSM-R 专网直放站多径干扰问题的分析。图 3 为武广高铁某山岭隧道区段的基站和直放站部署示意图, 图 4 为通过高铁无线网络优化系统复现多径干扰问题发生区段的列车运行场景, 并将高铁列车移动轨迹的沿途轨旁光远直放站叠加呈现在仿真地图上。

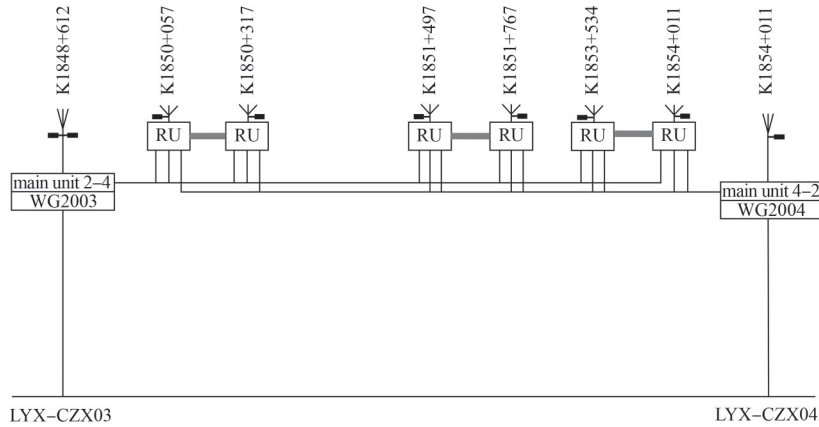


Fig.3 Schematic diagram of BTS location in Wuhan—Guangzhou high-speed railway mountains and tunnels section
图3 武广高铁山岭隧道区段基站部署示意图

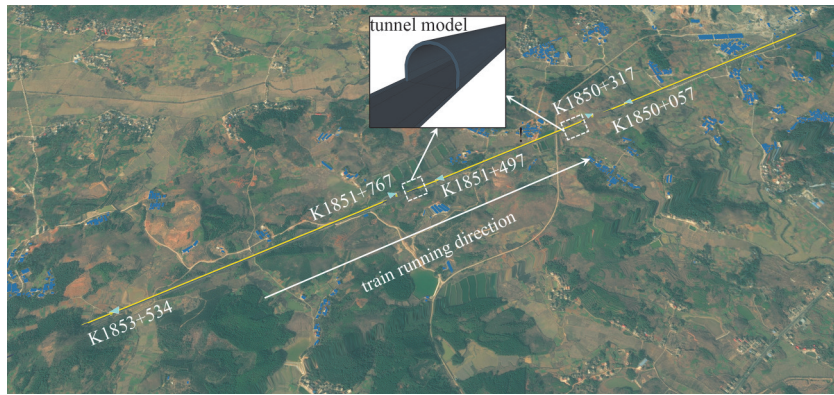


Fig.4 3D simulation scenario diagram of Wuhan—Guangzhou high-speed railway mountains and tunnels section
图4 武广高铁山岭隧道区段三维仿真场景图

表1为武广高铁山岭隧道场景多径干扰区段小区切换到各光纤远端直放站信号传播定时提前量的动检车检测数据，结合图3所示的基站分布图可知，列车在运行过程中经历了从LYX-CZX04向LYX-CZX03小区切换的过程，其中切换点的公里标为K1850+867，发生小区切换后，检测结果显示列车选择接入了距离LYX-CZX03较远处的光纤远端直放站K1851+497。表2所示的检测数据显示，列车运行到公里标为K1850+363时出现了语音质差现象。由于列车接收语音质差起始点到接入的光纤远端直放站K1851+497的TA值与光纤远端直放站K1850+317、K850+057之间的TA值之差分别为5.46和5.63，故考虑造成此场景的高铁接收语音质差的原因为直放站之间的多径干扰。

表1 小区切换到各光纤远端直放站信号传播定时提前量检测数据

Table1 TA detection data from cell switch point to each optical fiber remote unit

optical fiber main unit	switch point	optical fiber remote unit	TA of leakage cable	TA of optical fiber	TA(total)
K1848+612	K1850+867	K1850+057	1.67	5.16	6.83
		K1850+317	1.14	5.87	7.01
		K1851+497	1.30	9.09	10.39
		K1851+767	1.86	9.82	11.68
		K1853+534	5.51	14.64	20.15
		K1854+011	6.50	15.94	22.44

表2 语音质差起始点到各光纤远端直放站信号传播定时提前量检测数据

Table2 TA detection data from signal low quality start point to each optical fiber remote unit

optical fiber main unit	low quality start point	optical fiber remote unit	TA of leakage cable	TA of optical fiber	TA(total)
K1848+612	K1850+363	K1850+057	0.63	5.16	5.79
		K1850+317	0.10	5.87	5.97
		K1851+497	2.34	9.09	11.43
		K1851+767	2.90	9.82	12.72
		K1853+534	6.55	14.64	21.19
		K1854+011	7.54	15.94	23.48

4 基于高铁无线网络优化系统的多径干扰优化案例

根据上述对武广高铁山岭隧道场景的动检车检测数据分析可知, 列车运行中出现语音质差时接入的光纤远端直放站与干扰信号光纤远端直放站的 TA 值之差均大于 4, 则当干扰信号与有用信号之间的强度差小于等于 12 dB 时, 可判定是多径干扰导致的质差。为更好地通过数字化手段快速仿真模拟各个直放站在 GSM-R 无线网络问题区段的接收功率曲线, 从而支撑网络优化工程师更加精准高效地锁定语音质差的问题来源, 制定具有靶向性质的网络优化方案, 采用射线追踪驱动的高铁无线网络优化系统对武广高铁山岭隧道场景的 GSM-R 语音质差问题进行分析与优化。

4.1 高铁无线网络优化系统配置

高铁无线网络优化系统效能的关键保障在于高精度射线追踪仿真技术的实现, 其核心要素涉及收发天线辐射特性建模、动态散射体几何结构表征以及环境介质材料电磁特性数据库的构建^[25]。这些参数模型的准确有效与高度还原物理空间铁路移动通信系统的中心频率、带宽、频道间隔等参数共同构成射线追踪驱动的高铁网络优化方案, 具备可采纳价值的基础支撑体系。

4.1.1 天线模型

基于铁路行业设备参数调研可知武广高铁山岭隧道区段光纤远端直放站采用的发射天线是室外单极化板状天线, 工作频率为 860~960 MHz; 高铁列车采用的车载接收天线为 KATHREIN 多频天线, 工作频率为 790~2 700 MHz。如图 5 所示, 通过对天线厂商提供的水平及垂直方向天线辐射增益参量进行插值三维重构, 建立符合高铁无线网络优化系统射线追踪全波电磁仿真兼容性要求的天线辐射模型。

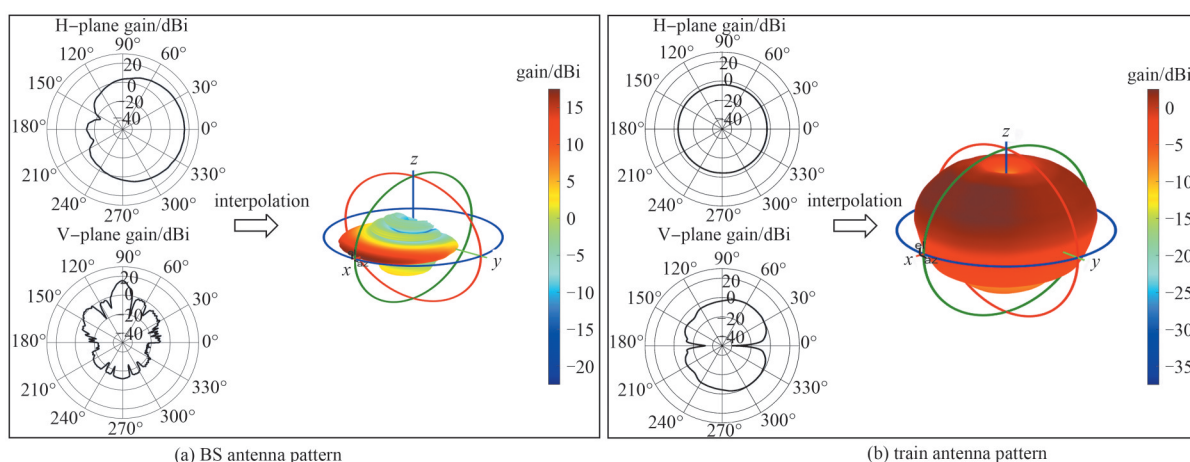


Fig.5 3D pattern of BS/train antenna

图5 基站端/车载端天线三维模型

4.1.2 动态散射体几何特征建模

完成对直放站发射天线和高铁车载端接收天线的辐射模型构建后, 需进一步考虑铁路移动通信场景中的动态散射体对电波传播路径的时变影响。因此, 有必要针对铁路移动通信场景中的典型动态散射体进行建模。高铁列车作为铁路通信环境中最具代表性的动态散射体, 其准确建模对射线追踪仿真的射线几何路径计算十分重要。图 6 是以我国和谐号高铁为原型, 分别建立的列车精细模型和列车简化模型, 以分别应对不同的计算硬件算力要求。

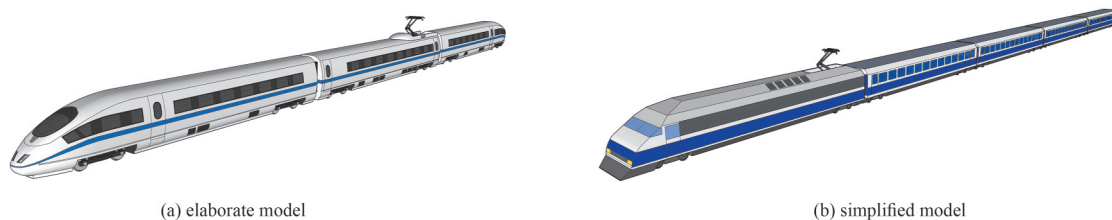


Fig.6 3D model of train scatterer

图6 列车散射体三维模型

4.1.3 仿真配置

本文采用的高铁无线网络优化系统的核心模块是射线追踪仿真, 该模块作为一种精确的电磁波传播确定性计算手段, 其参数设置的合理性直接决定了仿真结果的可信度和应用价值。在铁路移动通信场景中, 仿真参数必须与现实物理空间中的通信系统参数保持高度一致, 才能真实反映电波传播特性, 为铁路移动通信系统的设计和优化提供可靠依据。因此, 仿真参数配置不仅是仿真的基础, 更是连接 RT 理论模型与实际应用的桥梁。如表 3 所示, 根据武广高铁山岭隧道场景 GSM-R 系统实际情况, 对高铁无线网络优化系统仿真参数进行配置。表 4 给出了仿真场景中散射体表面介质的主要电磁参数。

表 3 高铁无线网络优化系统仿真参数

Table 3 Simulation parameters of high-speed railway wireless network optimization system

parameter	value
frequency band/MHz	930~934
bandwidth/MHz	4
propagation mechanism	direct, 1-order reflection, 1-order scattering, transmission ^[12]
BS antenna power/dBm	43
BS antenna gain/dBi	17
train antenna gain/dBi	0
cable loss/dB	16

表 4 仿真场景材料电磁参数

Table 4 Electromagnetic parameters of simulation scenario material

material	real permittivity	loss tangent	directive s	directive(α)
brick	5.67	0.44	0.71	7.02
organic glass	2.60	0.20	0.93	6.26
concrete	4.62	0.05	0.21	5.34
water	81.04	0.06	0.93	5.13
building	3.72	0.14	0.47	7.26
green land	15.03	0.05	0.12	2.33
urban open area	14.89	0.52	0.21	4.93
metal	1.00	1.00×10^7	0.23	2.00

4.2 基于高铁无线网络优化系统的仿真分析

图 7 为武广高铁山岭隧道场景列车行进途中的整体接收功率实际测量结果, 根据 3GPP TS 45.008 规定的 GSM 终端测量上报接收功率的范围, 在动检车采集接收信号强度时设置了接收功率上限阈值为 -47 dBm, 即当动检车检测到的接收信号功率大于此上限阈值时, 将统一按照 -47 dBm 的上限阈值记录^[26]。

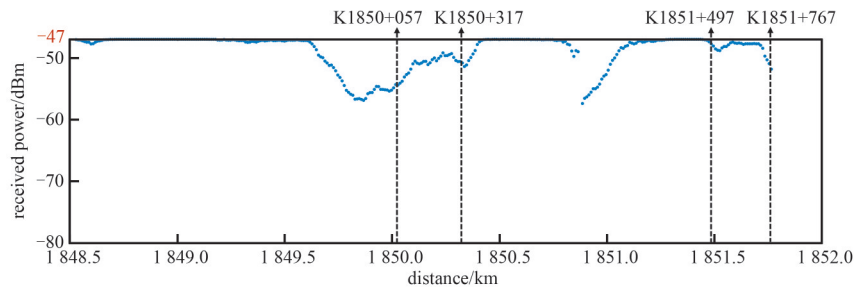


Fig.7 Received power measurement diagram of the mountainous and tunnels section of the Wuhan—Guangzhou high-speed railway

图 7 武广高铁山岭隧道区段接收功率测量图

将与动检车检测时相同的链路配置导入高铁无线网络优化系统, 图 8(a)~(b)分别为武广高铁山岭隧道场景整体接收功率仿真结果以及 K1850+057、K1850+317、K1851+497、K1851+767 四个光纤远端直放站的基站级接收功率仿真结果。

对比图 7 与图 8(a)可知, 高铁无线网络优化系统可通过射线追踪仿真复现武广高铁山岭隧道区段直放站在列车线路上的信号覆盖情况, 且仿真实接收功率与实测接收功率一致性较好, 可采用高铁无线网络优化系统对该场景的信号进行仿真模拟并给出网络优化指导方案。由图 8(b)可知, 列车行进到 K1850+363 时, 接收信号出现质差, 此时列车分别接收到来自光纤远端直放站 K1850+317 强度为 -58.7 dBm 的信号和来自光纤远端直放站 K1851+497 强度为 -69.9 dBm 的信号, 二者强度差为 11.2 dB。此外, 由表 2 可知, 在质差起点处, 光纤远端直放站 K1850+317 与 K1851+497 的 TA 值之差为 5.46 。因此, 可判定武广高铁山岭隧道场景出现语音质差问题由光纤远端直放站 K1850+317 与 K1851+497 之间的多径干扰形成。

由于铁路移动通信系统中的光纤、漏缆等设备铺设后的长度较难衡量和重新修正, 因此考虑到网络优化工程实施的便利性, 在优化直放站之间多径干扰引发的网络问题时, 优先考虑通过关闭直放站, 调整相互干扰的

直放站上行发射功率或天线参数, 使列车在多径干扰区段接收不同直放站的信号强度差大于 12 dB^[27]。针对上述对武广高铁山岭隧道场景多径干扰区段的问题分析, 采用射线追踪驱动的高铁无线网络优化系统进行仿真优化, 提出关闭光纤远端直放站 K1851+497、K1851+497 上行加衰减以及调整光纤远端直放站 K1851+497 扇区天线倾角 3 种网络优化方案。

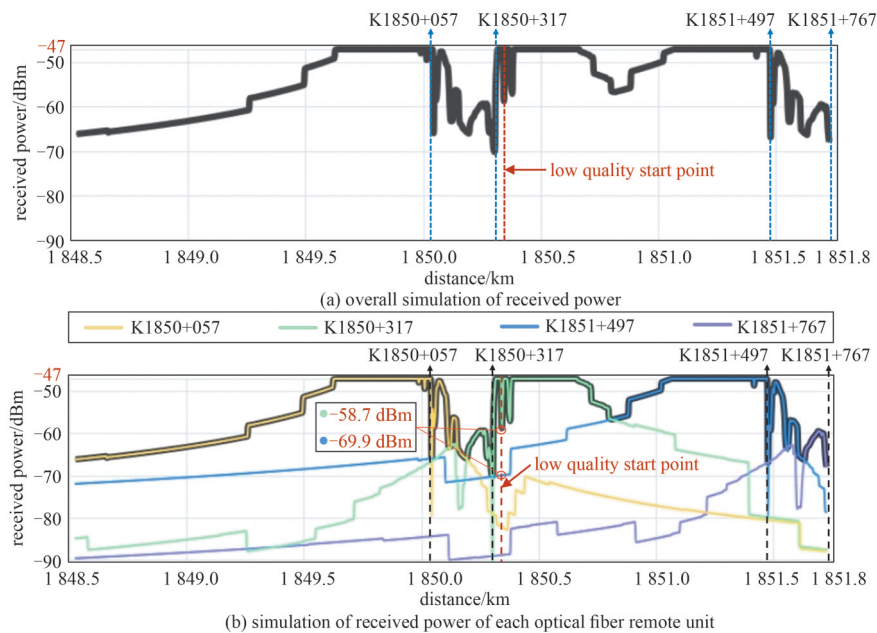


Fig.8 Received power simulation results of high speed railway wireless network optimization system
图 8 高铁无线网络优化系统接收功率仿真结果

1) 在高铁无线网络优化系统仿真中关闭光纤远端直放站 K1851+497, 仿真结果如图 9 所示。由图可知, 关闭光纤远端直放站 K1851+497 后, 列车行驶到原语音质差起点 K1850+363 处时, 收到光纤远端直放站 K1851+497 与 K1850+317 的信号强度差远大于 12 dB, 可解除多径干扰发生的风险。但直接关闭光纤远端直放站 K1851+497 后, 会导致列车行驶到 K1851 至 K1851+350 区间时, 接收信号强度快速降低, 可能引发其他语音质差问题, 因此不推荐使用该方案进行网络优化。

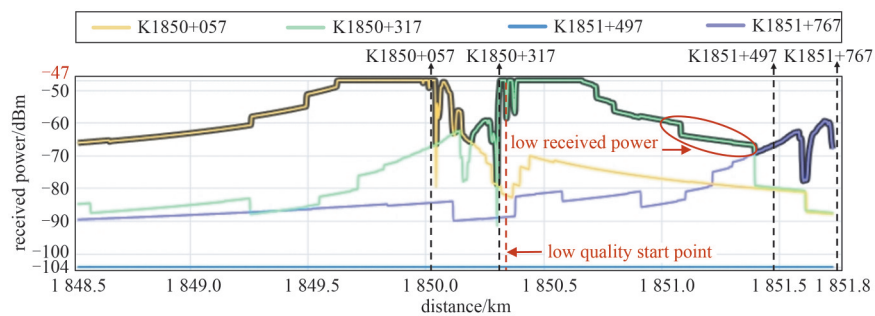


Fig.9 Received power simulation results when optical fiber remote unit K1851+497 is turned off
图 9 关闭光纤远端直放站 K1851+497 的接收功率仿真结果

2) 在高铁无线网络优化系统仿真中对光纤远端直放站 K1851+497 上行发射功率加 6 dB 衰减, 仿真结果如图 10 所示。由图可知, 列车行驶到原语音质差起点 K1850+363 处时, 收到光纤远端直放站 K1851+497 与 K1850+317 的信号强度差为 17.2 dB, 可解除多径干扰发生的风险, 且不影响其他列车行驶区段的信号接收质量。

3) 在高铁无线网络优化系统仿真中将光纤远端直放站 K1851+497 的天线下倾角下压 3°, 仿真结果可知, 列车行驶到原语音质差起点 K1850+363 处时, 收到光纤远端直放站 K1851+497 与 K1850+317 的信号强度差为 26.6 dB。这是由于调整光纤远端直放站 K1851+497 的天线下倾角后, 可集中直放站能量, 缩小其覆盖范围, 使该直放站在 K1850+363 附近的信号强度下降较明显, 可解除多径干扰发生的风险, 同时引起其他网络问题风险较低。

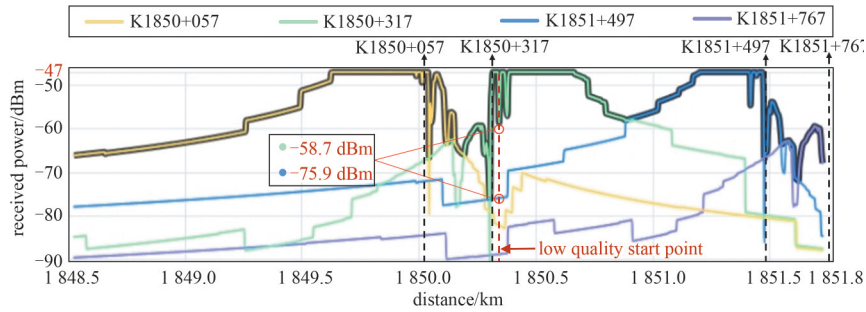


Fig.10 Received power simulation results when optical fiber remote unit K1851+497 adds 6 dB attenuation
图 10 光纤远端直放站 K1851+497 加 6 dB 衰减的接收功率仿真结果

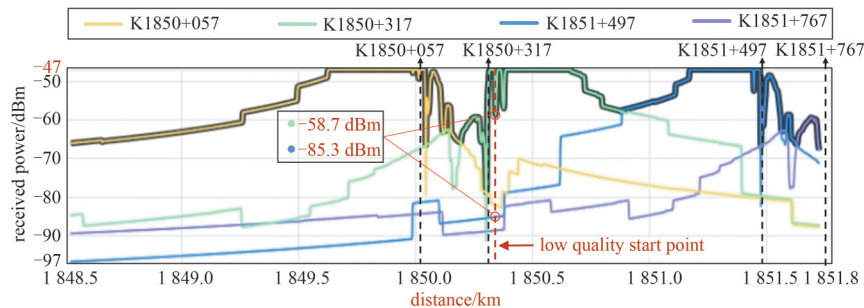


Fig.11 Received power simulation results when adjusting the downtilt angle of the optical fiber remote unit K1851+497 antenna
图 11 调整光纤远端直放站 K1851+497 天线 下倾角的接收功率仿真结果

5 结论

本文首先研究总结了目前铁路移动通信现网对多径干扰问题的优化方案并析出传统网络优化方案具有影响列车通信业务安全、资源消耗量大和检验优化效果周期长的痛点问题。然后，介绍了 GSM-R 多径干扰问题发生的场景和原理，针对现有网络优化方案存在的痛点问题，引入射线追踪驱动的高铁无线网络优化系统，并详细阐述其核心模块和系统架构。最后，以武广高铁山岭隧道场景的多径干扰优化为案例，基于射线追踪驱动的高铁无线网络优化系统给出关闭光纤远端直放站 K1851+497、光纤远端直放站 K1851+497 上行加衰减以及调整光纤远端直放站 K1851+497 扇区天线 下倾角 3 种网络优化方案并分析每种网络优化方案的可行性和有效性，完成了武广高铁山岭隧道场景的多径干扰问题优化。本文研究为铁路移动通信系统的精准优化与智能运维提供了技术沉淀与实践验证基础，未来还可面向新一代铁路 5G 专网开展基站站址规划、天线参数设计、传输容量优化等方面的研究。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国国家铁路集团. 新时代交通强国铁路先行规划纲要[EB/OL]. (2020-08). http://www.china-railway.com.cn/xwzx/rdzt/ghgy/gyqw/202008/t20200812_107636.html. (China State Railway Group Co., Ltd. Outline of powerful nation railway advance planning in the new era[EB/OL]. (2020-08). http://www.china-railway.com.cn/xwzx/rdzt/ghgy/gyqw/202008/t20200812_107636.html.)
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 《加快建设交通强国五年行动计划(2023—2027年)解读》[EB/OL]. (2023-04-23). https://www.gov.cn/zhengce/2023-04/23/content_5752770.htm. (Central People's Government of the People's Republic of China. Interpretation of the five year action plan for accelerating the construction of a strong transportation nation(2023—2027)[EB/OL]. (2023-04-23). https://www.gov.cn/zhengce/2023-04/23/content_5752770.htm.)
- [3] 梁雅楠,刘昌瑞,石雪涛. 面向列车自主运行的边缘智能系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024,22(8):893-900. (LIANG Yanan,LIU Changrui,SHI Xuetao. Edge intelligent system for autonomous train operation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024,22(8):893-900.) DOI:10.11805/TKYDA2023071.
- [4] 丁建文,王蕾,孙宵芳,等. 新基建背景下铁路 5G 技术应用研究[J]. 中国铁路, 2022(9):54-61. (DING Jianwen,WANG Lei,SUN Xiaofang,et al. Research on railway 5G technology application under the background of new infrastructure construction[J]. China Railway, 2022(9):54-61.) DOI:10.19549/j.issn.1001-683x.2022.04.17.002.
- [5] 钟章队,官科,陈为,等. 铁路新一代移动通信的挑战与思考[J]. 中兴通讯技术, 2021,27(4):44-50. (ZHONG Zhangdui,GUAN

- Ke, CHEN Wei, et al. Challenges and perspective of new generation of railway mobile communications[J]. ZTE Technology Journal, 2021,27(4):44–50.) DOI:10.12142/ZTETJ.202104009.
- [6] 鲍节尔. 沪昆高铁 GSM-R 直放站多径干扰优化简析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019,16(1):37–41. (BAO Jieer. Optimizing GSM-R repeater multipath interference of Shanghai—Kunming high-speed railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019,16(1):37–41.) DOI:10.3969/j.issn.1673–4440.2019.01.009.
- [7] 华伟旻,孟令云,栾晓洁,等. 面向高速铁路列车运行图弹性提升的冗余时间分配方法[J]. 北京交通大学学报, 2024,48(3):64–73. (HUA Yimin, MENG Lingyun, LUAN Xiaojie, et al. Improving timetable resilience for high-speed railways through time supplement allocation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024,48(3):64–73.) DOI:10.11860/j.issn.1673–0291.20230073.
- [8] 王东,李华夏,高兴昌. 基于 GSM-R 的铁路移动通信频谱特性及干扰分析[J]. 中国新通信, 2024,26(5):7–9. (WANG Dong, LI Huaxia, GAO Xingchang. Spectrum characteristics and interference analysis of railway mobile communication based on GSM-R[J]. China New Telecommunications, 2024,26(5):7–9.) DOI:10.3969/j.issn.1673–4866.2024.05.004.
- [9] 艾武. 基站迁改后引起 GSM-R 直放站多径问题简析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022,19(8):40–44. (AI Wu. Analysis of multipath problem of GSM-R repeater caused by base station relocation[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022,19(8):40–44.) DOI:10.3969/j.issn.1673–4440.2022.08.009.
- [10] 杨帆. GSM-R 网络基站直放站共同覆盖区多径干扰问题研究[J]. 中国铁路, 2018(4):55–59. (YANG Fan. The study on multipath interference of the common coverage area of GSM-R network base station and repeater[J]. China Railway, 2018(4): 55–59.) DOI:10.19549/j.issn.1001–683x.2018.04.055.
- [11] 邢小琴. GSM-R 直放站引起的多径时延扩展问题分析与解决[J]. 中国铁路, 2017(2):51–54. (XING Xiaoqin. On multipath-delay-spread problem caused by GSM-R optical fiber repeaters & its solutions[J]. China Railway, 2017(2):51–54.) DOI:10.19549/j.issn.1001–683x.2017.02.051.
- [12] 曾成胜. 基于高性能射线跟踪的高铁车站场景 5G-R 网络优化技术[J]. 北京交通大学学报, 2023,47(2):13–22. (ZENG Chengsheng. 5G-R network optimization technology for high-speed railway station scenes based on high-performance ray tracing[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023,47(2):13–22.) DOI:10.11860/j.issn.1673–0291.20220110.
- [13] 刘立海,弓子悦,李津汉,等. 5G-R 高铁车站场景 MIMO 天线阵列结构与传输性能研究[J]. 铁道通信信号, 2024,60(4):49–58. (LIU Lihai, GONG Ziyue, LI Jinhan, et al. Research on MIMO antenna array structure and transmission performance for 5G-R in high-speed railway station scenarios[J]. Railway Signaling & Communication, 2024, 60(4):49–58.) DOI:10.13879/j.issn.1000–7458.2024–04.23276.
- [14] GUAN Ke, HE Danping, RUPP Markus, et al. Challenges and future research trends of window glass for smart rail vehicles: from the perspective of wireless propagation[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2023, 7(3): 10–15. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0004.2200024.
- [15] LIU Changzhu, HE Ruisi, NIU Yong, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted high-speed train communications: coverage performance analysis and placement optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024,73(3):3750–3766. DOI: 10.1109/TVT.2023.3325627.
- [16] 单馨漪,何丹萍,费丹,等. 智能反射面辅助的 5G 高铁车站覆盖增强技术研究[J]. 电波科学学报, 2023,38(1):63–70. (SHAN Xinyi, HE Danping, FEI Dan, et al. Intelligent reflecting surface-assisted 5G high-speed railway station coverage enhancement technology[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023,38(1):63–70.) DOI:10.12265/j.cjors.2022153.
- [17] 韩紫杰,赵连奎,高媛,等. 低轨卫星与 5G-R 融合网络架构设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024,22(5):467–475,484. (HAN Zijie, ZHAO Liankui, GAO Yuan, et al. Design of low earth orbit satellite and 5G-R fusion network architecture[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024,22(5):467–475,484.) DOI:10.11805/TKYDA2022232.
- [18] 魏兴光,刘静,陈嘉君,等. AI 在无线通信系统中的应用[J]. 中兴通讯技术, 2024,30(4):26–31. (WEI Xingguang, LIU Jing, CHEN Jiajun, et al. Applications of AI in wireless communication systems[J]. ZTE Technology Journal, 2024,30(4):26–31.) DOI: 10.12142/ZTETJ.202404005.
- [19] HE Danping, GUAN Ke, YAN Dong, et al. Physics and AI-based digital twin of multi-spectrum propagation characteristics for communication and sensing in 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023,41(11):3461–3473. DOI:10.1109/JSAC.2023.3310108.
- [20] 邬贺铨. 对 AI 加持网络重构的思考[J]. 中兴通讯技术, 2025,31(1):1–3. (WU Hequan. Reflections on AI-empowered network reconstruction[J]. ZTE Technology Journal, 2025,31(1):1–3.) DOI:10.12142/ZTETJ.202501001.
- [21] 官科,张美文,何丹萍,等. 无线信道数字孪生关键技术现状及展望[J]. 电波科学学报, 2025,40(5):1–11. (GUAN Ke, ZHANG Meiwen, HE Danping, et al. The current situation and prospects of the critical digital twin technology for wireless channels[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2025,40(5):1–11.) DOI:10.12265/j.cjors.20241781.

- [22] HE Danping, AI Bo, GUAN Ke, et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019,21(1):10-27. DOI:10.1109/COMST.2018.2865724.
- [23] 中华人民共和国国家铁路局. TB 10088—2015 铁路数字移动通信系统(GSM-R)设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2015. (State Railway Administration of the People's Republic of China. TB 10088—2015 Code for design of Mobile Communications-Railway(GSM-R)[S]. Beijing:China Railway Press, 2015.)
- [24] 赵喆,单馨漪,李昌振. 基于多源异构数据融合与RT的高铁网络优化系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(5):620-627. (ZHAO Zhe, SHAN Xinyi, LI Changzhen. High-speed railway network optimization system based on multi-source heterogeneous data fusion and Ray Tracing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(5): 620-627.) DOI:10.11805/TKYDA2022232.
- [25] GUO Lantu, GUAN Ke, LIU Ting, et al. Obtaining electromagnetic properties of multi-type media in realistic environments: state-of-the-art and prospects[J]. China Communications, 2025,22(1):25-40. DOI:10.23919/JCC.fa.2024-0056.202501.
- [26] 3GPP. GSM/EDGE radio subsystem link control:TS 45.008 Release 18[S]. Valbonne, 2024.
- [27] 全楠楠,孟景辉,张玉铮. GSM-R 通信网多径干扰解决案例[J]. 铁道通信信号, 2018,54(11):53-55. (QUAN Nannan, MENG Jinghui, ZHANG Yuzheng. GSM-R communication network multipath interference solution case[J]. Railway Signalling & Communication, 2018,54(11):53-55.) DOI:10.13879/j.issn1000-7458.2018-11.18402.

作者简介:

朵 灏(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为移动通信 .email:007350@crfsdi.com.

赵国超(1985-), 男, 学士, 主要研究方向为通信技术.

弓子悦(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

张 玉(2000-), 女, 学士, 工程师, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

罗 珊(2001-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

高婷婷(1983-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为铁路无线通信系统.