

文章编号: 2095-4980(2025)12-1229-10

## 面向高铁车站场景的 GSM-R 网络优化平台

朵 灏<sup>1</sup>, 赵国超<sup>2</sup>, 弓子悦<sup>\*3a,3b</sup>, 蒋 鑫<sup>1</sup>, 高婷婷<sup>4</sup>, 路晓彤<sup>5</sup>, 何文锋<sup>6</sup>

(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. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070; 5. 中国国家铁路集团有限公司工程管理中心, 北京 100844;  
6. 泽高新智造科技有限公司, 广东 佛山 528200)

**摘 要:** 在铁路数字化和智能化转型的建设趋势下, 传统“路测数据采集-专家经验调参-复测检验效果”的铁路窄带移动通信系统(GSM-R)网络优化方案已无法满足铁路移动通信系统高质量、高精度、高效率的优化需求。基于射线追踪(RT)技术构建面向高铁车站场景的 GSM-R 网络优化平台, 并介绍了该平台的技术架构、网络优化流程和结果呈现形式。以渭南北站 GSM-R 接收信号弱覆盖优化为案例, 通过构建的无线网络优化平台进行问题复现和优化仿真。结果表明, 渭南北站出站口基站参数优化后, 高铁站内轨道沿线的接收信号衰落深度降低 5.7 dB, 整体接收信号质量得到改善, 证明了构建的 GSM-R 网络优化平台的有效性。该研究为未来铁路移动通信网络运维提供了更加准确高效的网络优化方案。

**关键词:** 射线跟踪(RT); 铁路窄带移动通信系统(GSM-R); 高铁车站; 无线网络优化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025027

## GSM-R network optimization platform for high-speed railway station scenario

DUO Hao<sup>1</sup>, ZHAO Guochao<sup>2</sup>, GONG Ziyue<sup>\*3a,3b</sup>, JIANG Xin<sup>1</sup>, GAO Tingting<sup>4</sup>, LU Xiaotong<sup>5</sup>, HE Wenfeng<sup>6</sup>

(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.CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China;  
5.Engineering Management Center, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China;  
6.Ze Gao Intelligent Manufacturing Technology Co., Ltd., Foshan Guangdong 528200, China)

**Abstract:** Under the construction trend of digitalization and intelligent transformation of railways, the traditional network optimization solution of "road test data collection-expert experience parameter tuning-retesting to verify the effect" for railway narrowband mobile communication system, Global System for Mobile Communications-Railway(GSM-R), can no longer meet the high-quality, high-precision, and high-efficiency optimization requirements of railway mobile communication systems. A GSM-R network optimization platform for high-speed railway station scenarios based on Ray Tracing(RT) technology has been constructed. The technical architecture, network optimization process, and result presentation form of the platform are introduced. Taking the weak coverage optimization of GSM-R received signals at WeiNanBei Station as a case study, the wireless network optimization platform is employed to reproduce the problem and conduct optimization simulations. The results show that after the

收稿日期: 2025-02-03; 修回日期: 2025-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62341127); 航空科学基金资助项目(2022Z0660M5001); 先进轨道交通自主运行全国重点实验室资助项目(RAO2023ZZ004)

\*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. 面向高铁车站场景的 GSM-R 网络优化平台[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(12):1229-1238. DOI:10.11805/TKYDA2025027.

Citation format: DUO Hao,ZHAO Guochao,GONG Ziyue,et al. GSM-R network optimization platform for high-speed railway station scenario[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(12):1229-1238. DOI:10.11805/TKYDA2025027.

base station parameters at the exit of WeiNanBei Station are optimized, the received signal attenuation depth along the railway tracks inside the high-speed railway station is reduced by 5.7 dB, and the overall received signal quality is improved, which proves the effectiveness of the constructed GSM-R network optimization platform. This research provides a more accurate and efficient network optimization solution for the future maintenance and operation of railway mobile communication networks.

**Keywords:** Ray Tracing(RT); Global System for Mobile Communications-Railway(GSM-R); high-speed railway station; wireless network optimization

铁路运输作为交通运输体系的核心, 不仅承担着保障区域人口与资源高效流通的重任, 其有效运转也为铁路沿线地区经济发展注入了源源不断的动力<sup>[1]</sup>。在新时代国家迈向交通强国的征程中, 铁路客货运建设是重要的战略着力点和推进总抓手, 其发展水平不仅关乎我国综合立体交通网络的完善程度, 更与国家整体交通面貌呈现、民生福祉提升紧密相连, 是实现交通现代化、推动社会高质量发展的核心驱动力之一<sup>[2]</sup>。

随着我国铁路运输工程建设的不断推进, 对铁路移动通信系统的要求也随之提高<sup>[3]</sup>。自 2000 年我国确定将铁路窄带移动通信系统(GSM-R)体制作为铁路数字移动通信系统的建设方向至今已有 20 余年, 其作为目前列车与沿线地面基础设施之间数据传输的主要通信制式, 承载着列车调度指挥、无线车次号校核信息、区间维护作业信息等大量铁路移动通信业务的数据交互。因此, GSM-R 系统的稳定高效运转, 不仅是提升铁路运输效率的重要一环, 还是确保列车行车安全的坚实保障。尽管 GSM-R 系统已在我国铁路移动通信领域运转多年, 但由于技术架构老化、线路站点增多导致的运维繁杂以及沿线电磁传播环境的复杂化, 铁路业界对 GSM-R 网络的优化仍任重道远<sup>[4]</sup>。自 GSM-R 应用以来, 学术界和产业界一直针对各个铁路场景的 GSM-R 网络优化进行探索和研究<sup>[5-11]</sup>。通过对现有 GSM-R 网络优化方案的调研可知, 目前主流的铁路专网优化思路可概括为“路测数据采集-专家经验调参-复测检验效果”三步走策略。但传统网络优化方案带来的痛点问题比较突出, 不仅存在信号采集难度大、成本高、迭代检验周期长等弊端, 而且难以确保网络优化的效果, 其网络优化启动的滞后性更是该方案难以避免的固有特性。针对此类痛点问题, 有学者采用仿真建模、部署智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)等方法在连续广域铁路正线、复杂交叉并线等铁路场景进行研究, 但面向物理环境散射体种类多、数量大、电磁传播环境复杂的高铁车站场景的铁路专网优化工作还有进一步探索的空间。

针对上述痛点问题和未来铁路数字化转型的趋势<sup>[12]</sup>, 本文基于我国自主研发的高性能射线追踪(RT)技术<sup>[13-14]</sup>, 研制 GSM-R 无线网络优化平台, 并针对高铁车站场景会在特定位置或特定条件下出现室外宏站信号快速衰落导致车地通信中断的状况, 以渭南北站弱场强覆盖优化为实际案例, 论证 GSM-R 网络优化平台的有效性, 并给出基于该系统的无线网络覆盖优化方案。

## 1 基于 RT 的 GSM-R 无线网络优化平台

无线信道建模作为移动通信系统规划、建设、优化的关键底层技术, 不仅是移动通信系统设计和建设的理论根基, 更是推动未来 5G、6G 等前沿通信技术创新发展的强劲引擎。通过对电磁波传播中的大、小尺度信道特性的获取分析, 捕捉电波无线传播过程中的路径损耗、阴影衰落、多径传播路径等无线传播行为, 从而调整移动通信系统的相关参数, 达到指导移动通信系统规划优化的目标。

传统的统计性信道建模方法需在特定的环境场景、频率应用范围以及特定发射机、移动台高度区间下进行大量的信道测量, 基于测量数据分析总结对应场景下的经验性模型曲线。但铁路移动通信的电波传播环境复杂且具有场景独特性, 其中包含有车站站台、轨旁信号灯、电力牵引架、隔音屏等一系列铁路运行场景中的特殊构造物。在这样的环境下, 电波的传播机制以及无线信道特性与公网通信场景截然不同, 致使电波展现出独具特色的损耗与衰落态势, 不但在空间分布上呈现出较强的不均衡性, 而且对频率有着很强的依赖性。因此, 传统的经验性信道模型难以精准描述铁路移动通信场景的电波传播特性, 需研制能响应铁路移动通信网络高质量、高精度、高效率优化需求, 顺应未来铁路数字化转型趋势的铁路无线网络优化平台。

### 1.1 无线网络优化平台架构

图 1 为基于射线追踪的 GSM-R 网络优化平台架构。仿真数据库为无线网络优化平台提供仿真物料基础, 其中的 Planet 电子地图、移动散射体模型、复杂固定模型是将铁路移动通信环境中的海拔信息、地物类型信息、各种建筑物分类及矢量轮廓信息、常见典型移动散射体、显著影响电波传播的结构体转换为数字空间的数据文件, 为射线追踪仿真中多径传播的几何路径的准确提供可靠性保障; 基于天线水平面、垂直面增益文件插值转化生

成的天线模型和准确的材料电磁参数数据库为射线仿真中的多径传播电磁计算提供可靠性保障。

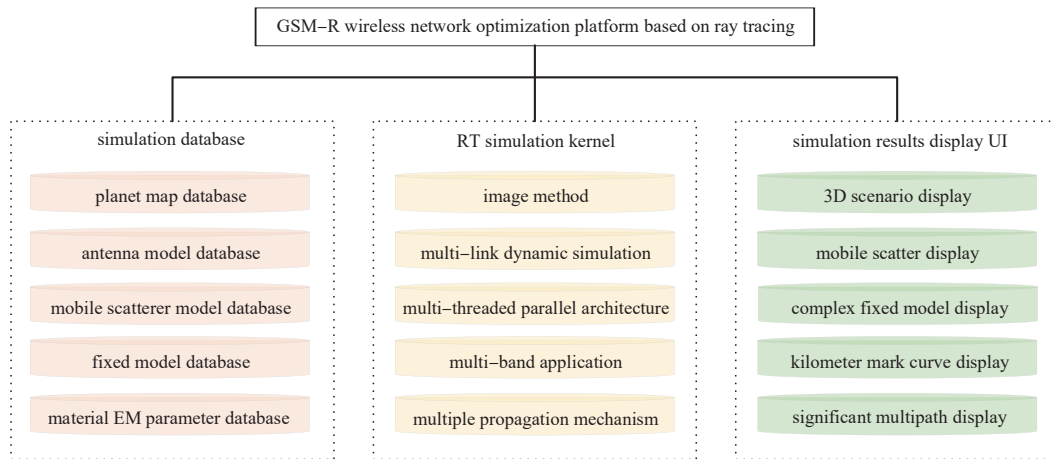


Fig.1 GSM-R network optimization platform architecture based on ray tracing  
图 1 基于射线追踪的 GSM-R 网络优化平台架构

射线追踪仿真内核是网络优化平台的核心中枢, 基于几何光学、电波传播原理、麦克斯韦方程组的高频近似解等理论, 确定性地还原计算发射机到接收机的电波传播路径并精确描述传播信道的多维度大、小尺度特性。本文采用的射线追踪内核基于镜像法可进行多频段、多传播机理模型耦合下的动态链路仿真, 并支持多线程并行计算架构, 在确保射线追踪确定性信道建模结果准确的同时有效节约计算机算力成本, 助力缩短铁路网络优化周期。在 GSM-R 网优平台的射线追踪内核计算中, 某一特定位置的射线跟踪仿真可定义为一个快照, 基站发射天线和车载接收天线的射线追踪链路可由仿真区域内不同位置上的仿真快照组成。每个快照的信道传递函数为:

$$H(f) = \sum_{n=1}^{N_{\text{Rays}}} G_{\text{Tx}}(\varphi_D, \theta_D) G_{\text{Rx}}(\varphi_A, \theta_A) a_n(f) e^{j\varphi_n(f)} \quad (1)$$

式中:  $f$  为网优平台仿真的中心频率;  $N_{\text{Rays}}$  为一个快照的多径数量总和;  $G_{\text{Tx}}$  和  $G_{\text{Rx}}$  分别为基站发射天线增益和车载接收天线增益;  $\varphi_D$  和  $\theta_D$  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;  $\varphi_A$  和  $\theta_A$  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;  $\varphi$  为电波相位。

得到射线追踪仿真生成的信道传输函数后, 通过式(2)计算每个快照处的接收信号功率:

$$P_r = -10 \lg \left( \left| \sum \mathcal{F}^{-1} [H(f)] \right|^2 \right) + P_t - L_{\text{system}} \quad (2)$$

式中:  $\mathcal{F}^{-1}$  为傅里叶逆变换运算;  $P_t$  为基站发射信号功率;  $L_{\text{system}}$  为系统馈线损耗。

仿真结果显示界面是连接工程人员与无线网络优化平台后端的纽带, 是无线网络优化平台业务流的上层具象化呈现。显示界面融合 Planet 电子地图、固定结构体模型、移动散射体模型、原始卫星影像、行政道路底图等数据并基于地理信息系统精确还原现实环境场景, 并以此为底座具象化地呈现场强公里标(列车相对于出发点的行驶公里数)曲线、显著多径动态回放、散射体移动效果等。

### 1.2 基于 RT 的无线网络优化流程

图 2 为基于射线追踪的 GSM-R 无线网络优化流程。首先进行面向铁路移动通信的多源异构跨场景生成, 旨在实现场景地图、散射体模型、天线模型与数据的格式转换、空间匹配以及材料适配, 以此达成数据的导入、互通与整合, 进而催生出目标优化场景的整体基础数据。而针对特殊的铁路车站站内场强弱覆盖场景网络优化则需要基于点云扫描数据进行结构体内部精细建模。

特定的无线网络优化工程对时间、空间以及尺度维度均存有特定要求, 因此需要以基础场景数据为基底展开精准裁剪, 动态生成适配任务需求的场景数据并同步对场景模型予以优化。此环节旨在为射线追踪仿真的几何计算和电磁计算提供数据基础, 并在保证仿真结果准确性的前提下, 降低仿真算力负荷, 助推仿真效率提升。

基于多源异构跨域场景生成所需的场景架构, 并进行射线追踪仿真。通过将散射中心稀疏化策略与多线程并行计算结合, 构建了适用于多终端、全场景的多径并行计算体系。依托该仿真计算体系, 无线网络优化平台能够深度挖掘铁路移动通信的传播信道内在规律并进行显著性特性筛选, 对主要电波传播机理的多维度信道特

性参数展开精确高效的仿真，进而实现在数字空间对物理空间中的电波传播形态、通信链路状态进行精细还原、深入剖析以及前瞻性预测。仿真完成后，无线网络优化平台将射线追踪仿真结果具象化地呈现在用户界面上，工程人员通过调整基站参数，调用射线追踪仿真内核快速进行电磁计算，得到调参后的路径损耗、公里标覆盖曲线等重要参数，结合网优工程的特定需求进行基站站参调整并快速联动显示刷新结果，实现 GSM-R 网络覆盖前瞻、准确、高效的优化。

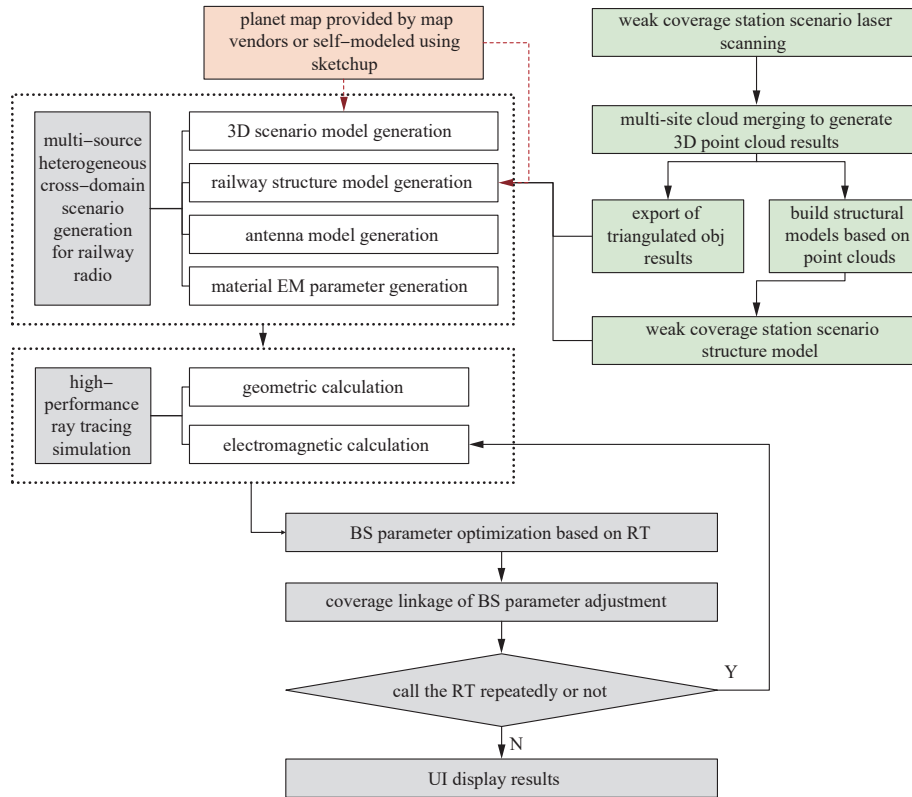


Fig.2 GSM-R wireless network optimization process based on ray tracing  
图2 基于射线追踪的GSM-R无线网络优化流程

## 2 高铁车站场景的 GSM-R 网络问题分析

基于对高铁车站 GSM-R 网络优化需求的行业调研，以中国第一座采用正线下式站房设计的渭南北站为场景，进行站内 GSM-R 专网接收功率场强弱覆盖网络问题的分析优化。图 3 为渭南北站的卫星图像，位于车站东侧较近的基站名称为 WeiNanBei，其广播控制信道(Broadcast Control Channel, BCCH)频点编号为 1011；位于车站西侧较远的基站名称为 WNB-LTD01，其 BCCH 频点编号为 1009；采集站内测量数据时列车的行驶方向为自东向西，先接入 WeiNanBei 基站，再切换至 WNB-LTD01 基站。



Fig.3 Satellite map of WeiNanBei Station and distribution of base stations  
图3 渭南北站卫星图及基站分布情况

图 4 为列车自东向西驶入车站时的信号采集报告，由测量数据分析可知，列车在进入车站后行驶至公里标为

K1010+48 位置处时, 接入基站提前切换至 WNB-LTD01。当列车行驶至公里标为 K1010+58 位置处时, 接收信号出现衰落深陷, 服务小区接收电平在 -57~-64 dBm 之间, 通话质量较差。

	time	cell	KM mark	BCCH		RxLevelDown	BCCH1009	BCCH1011
40	2023-05-04 20:06:51 203854	WeaNanBei	K1010+33	1011	access BS switching	-55	-56	-55
41	2023-05-04 20:06:51 672249	WeaNanBei	K1010+33	1011		-54	-56	-54
42	2023-05-04 20:06:52 164545	WeaNanBei	K1010+48	1011		-57	-51	-57
43	2023-05-04 20:06:52 633403	WeaNanBei	K1010+48	1011		-56	-47	-56
44	2023-05-04 20:06:53 125468	WeaNanBei	K1010+48	1011		-56	-47	-56
45	2023-05-04 20:06:53 594095	WeaNanBei	K1010+48	1011		-58	-47	-58
46	2023-05-04 20:06:55 158551	WNB-LTD01	K1010+48	1009		-47	-47	
47	2023-05-04 20:06:55 626949	WNB-LTD01	K1010+48	1009		-47	-47	-57
48	2023-05-04 20:06:56 119480	WNB-LTD01	K1010+48	1009		-47	-47	-56
49	2023-05-04 20:06:56 588459	WNB-LTD01	K1010+48	1009		-47	-47	-54
50	2023-05-04 20:06:57 080064	WNB-LTD01	K1010+48	1009		-47	-47	-57
51	2023-05-04 20:06:57 548927	WNB-LTD01	K1010+48	1009		-52	-52	-55
52	2023-05-04 20:06:58 041113	WNB-LTD01	K1010+58	1009	bad signal quality	-57	-57	-54
53	2023-05-04 20:06:58 509978	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-51	-51	-56
54	2023-05-04 20:06:59 002396	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-55	-55	-56
55	2023-05-04 20:06:59 470681	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-52	-52	-59
56	2023-05-04 20:06:59 939663	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-51	-51	-60
57	2023-05-04 20:07:00 431620	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-60	-60	-56
58	2023-05-04 20:07:00 900486	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-58	-58	-55
59	2023-05-04 20:07:01 392791	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-57	-57	-56
60	2023-05-04 20:07:01 861426	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-64	-64	-56
61	2023-05-04 20:07:02 353847	WNB-LTD01	K1010+58	1009		-63	-63	-56

Fig.4 GSM-R signal measurement data of WeiNanBei Station  
图4 渭南北站 GSM-R 信号采集数据

根据上述对渭南北站 GSM-R 信号采集数据分析结合车站环境情况调研可知, 渭南北站行车轨道上方存在大量雨棚金属支架和电力牵引架等密集散射体, 列车行驶在车站时, 接入基站的接收功率会发生衰落深陷, 导致站内接收信号强度弱覆盖问题的发生。为支撑未来面向高铁车站场景准确高效的 GSM-R 网络泛化优化, 以渭南北站的弱场强覆盖问题优化为案例, 论证 GSM-R 无线网络优化平台的有效性, 并给出基于该系统的无线网络覆盖优化方案。

### 3 基于 RT 的 GSM-R 无线网络优化案例

#### 3.1 网优平台仿真配置

有效的无线网络优化效果依托于准确的射线追踪仿真结果, 而精确还原建模的结构体模型、移动散射体模型、发射机/接收机天线模型、材料电磁参数模型<sup>[15]</sup>是仿真结果准确的数据基础<sup>[16]</sup>。

##### 3.1.1 高铁车站模型

站内弱覆盖场景的研究需在 Planet 电子地图的基础上建立准确的高铁车站三维模型, 使用三维场景激光扫描仪可同时获取渭南北站场景的激光点云信息与 360°实景照片, 该点云数据在距离场景 10 m 处的精确度为毫米级, 扫描半径可达 150~200 m。图 5 为基于高铁车站场景的激光扫描彩色点云结果, 通过点云处理软件转换后的尺度可调三角面元模型。

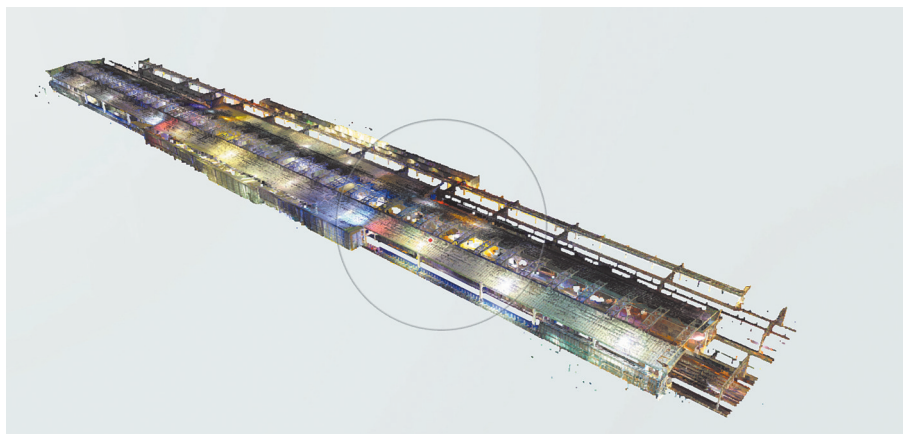


Fig.5 Color point cloud triangulated facet model of WeiNanBei Station  
图5 渭南北站彩色点云三角面元化模型

将三角面元可调的彩色点云模型导入 SketchUp 建模软件并进行模型细节调整还原, 可得到支持射线追踪仿真的精细化渭南北站三维结构体模型。图 6(a)为渭南北站模型的外部视图, 图 6(b)为渭南北车站内部的模型, 模型中包含了钢轨、电力牵引架、雨棚金属支架、乘客站台、混凝土立柱等高铁车站中的特征元素。

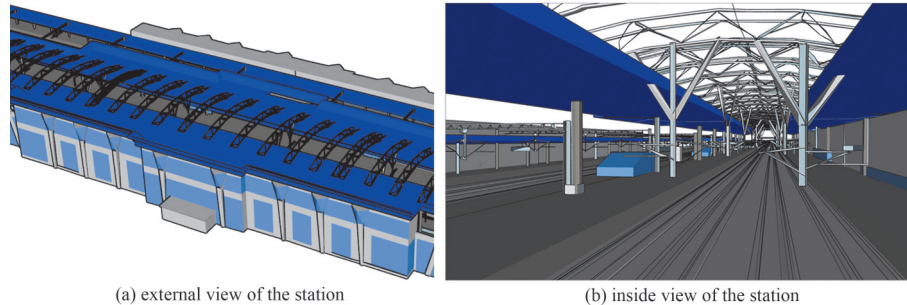


Fig.6 3D model of WeiNanBei Station

图6 渭南北站三维模型

### 3.1.2 天线模型

通过对相关路局的行业调研可得到基站端和车载端的天线增益文件, 基于天线文件的水平面和垂直面增益数据进行处理, 得到可用于射线追踪仿真的收发端天线模型。图 7(a)为 WeiNanBei 和 WNB-LTD01 基站端发射天线模型, 图 7(b)为列车车顶接收天线模型。

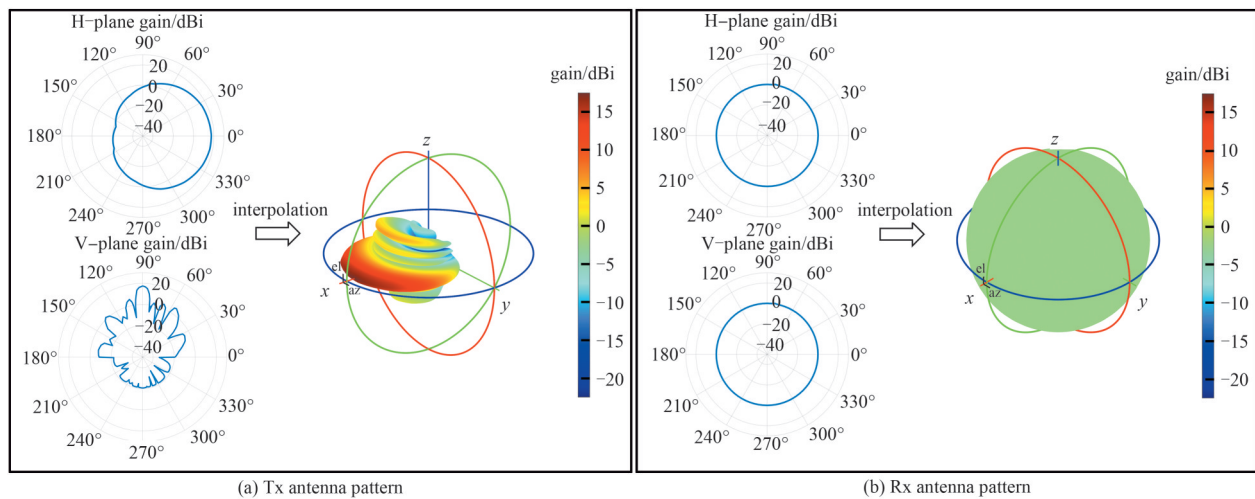


Fig.7 3D pattern of Tx/Rx antenna

图7 发射端/接收端天线三维模型

### 3.1.3 移动散射体模型

完成对高铁车站结构模型和收发天线三维模型构建后, 还需考虑移动散射体对射线追踪仿真中的电波传播影响, 因此需对铁路移动通信场景中的显著移动散射体进行建模。高铁列车是铁路移动通信场景中最具特征的移动散射体, 图 8 是以复兴号列车为原型进行的三维还原建模。



Fig.8 3D model of high speed train

图8 高铁列车三维模型

3.1.4 仿真参数

表 1 为 GSM-R 无线网络优化平台的详细仿真参数配置，表 2 为仿真场景中的主要材料电磁特性参数。

表 1 无线网络优化平台仿真参数

Table1 Simulation parameters of wireless network optimization platform

parameter	value
frequency band/MHz	930-934
bandwidth/MHz	4
propagation mechanism	direct,1-order reflection,1-order scattering,transmission <sup>[17]</sup>
Tx antenna gain/dBi	17
Tx antenna 3 dB beamwidth/(°)	63
Rx antenna gain/dBi	0
cable loss/dB	5
WeiNanBei base station height/m	51
WNB-LTD01 base station height/m	43
Rx antenna height/m	4.69

表 2 仿真场景材料电磁参数

Table2 Electromagnetic parameters of simulation scenario material

material	real permittivity	loss tangent	scattering coefficient	equivalent roughness
brick	5.70	0.05	0.50	7.00
organic glass	2.60	0.20	0.93	6.26
plaster	5.00	0.02	0.72	7.16
rubber	5.64	0.34	0.73	7.12
silicone	1.89	7.48	0.04	5.00
metal	1.00	1.00×10 <sup>7</sup>	0.23	2.00

3.2 基于 RT 仿真结果的网络优化分析

无线网络优化平台融合渭南北站附近的 Planet 电子地图地形地貌特征、渭南北高铁车站精细结构体模型、WeiNanBei、WNB-LTD01 基站及扇区天线朝向等元素进行场景渲染并基于高性能射线追踪技术进行仿真，无线网络优化平台的呈现效果、多径可视化效果以及接收功率覆盖热图如图 9 所示，可见无线网络优化平台复现的仿真环境场景、散射体分布、基站分布等情况与图 3 所示的现实现场卫星图相一致。

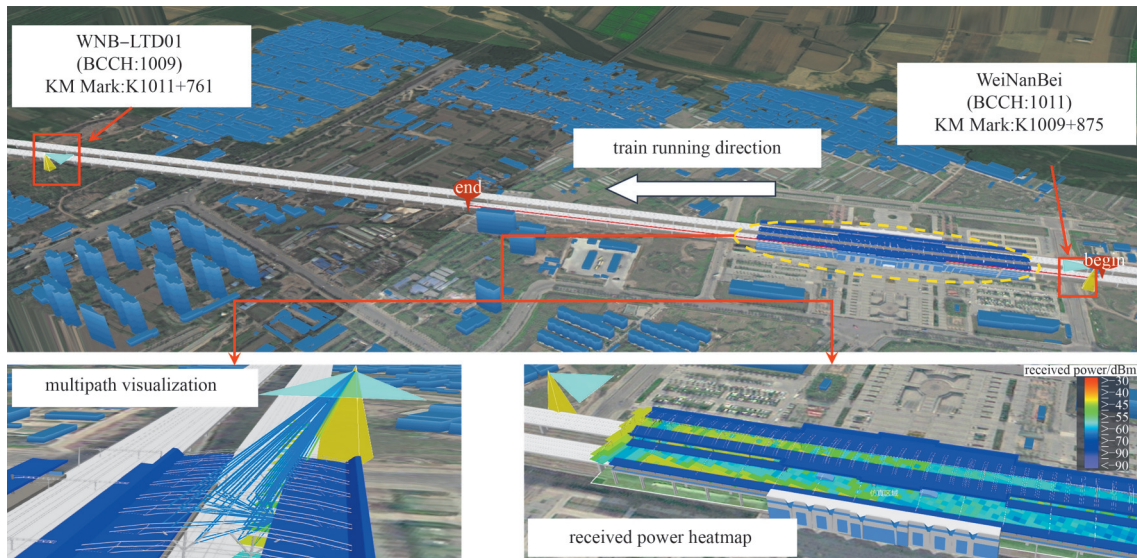


Fig.9 Visualization result of WeiNanBei station network optimization simulation

图9 渭南北站网络优化仿真可视化结果

提取渭南北站内轨道沿线的接收功率，模拟列车进站过程中在相同公里标位置处 WeiNanBei、WNB-LTD01 基站的接收功率强度，图 10 为优化前 BCCH 编号为 1009 和 1011 的射线追踪仿直接收功率对比曲线。由图可知，列车进站过程中在公里标为 K1010 处接入 BCCH 的编号由 1011 切换至 1009，并在发生切换后出现通话信号质量下降的情况，与图 4 所示的实际动检车采集信号情况一致。

针对此弱网覆盖问题，结合相关路局工程实施的便利性，使用无线网络优化平台对 WNB-LTD01 基站扇区天

线的下倾角参数进行调整。基于网络优化平台的射线追踪几何-电磁解耦计算功能,根据站参的调整快速联动显示最新射线追踪电磁计算结果并确定能使切换 BCCH 后的接收信号功率最高的 WNB-LTD01 基站扇区天线参数。

根据行业调研结合学术界相关研究<sup>[18]</sup>,可知蜂窝小区的天线下倾角范围在 $[0^\circ, 15^\circ]$ 时,小区的信号覆盖效果较好,故按照等差递增的形式从 $0^\circ$ 到 $15^\circ$ 调整 WNB-LTD01 基站扇区天线的下倾角,每次调整下倾角参数的颗粒度为 $1^\circ$ 。由于信道的衰落深度( $D_F$ )能够反映接收电平局部平均值的变化,是指导通信系统设计衰落余量和链路预算的重要参数,因此分别计算 WNB-LTD01 基站 $[0^\circ, 15^\circ]$ 下倾角对应的高铁车站内铁路沿线位置的衰落深度<sup>[19-20]</sup>:

$$D_F = P_{R_{x,\min}} - \overline{P_{R_x}} \quad (3)$$

式中: $P_{R_{x,\min}}$ 为高铁车站内轨道沿线的最小接收功率; $\overline{P_{R_x}}$ 为高铁车站内轨道沿线的所有路径点位的平均接收功率。

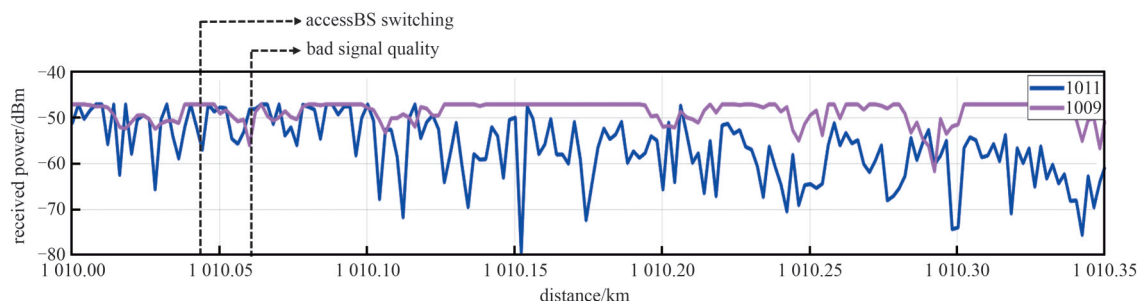


Fig.10 Comparison of received power curves of different BCCH RT simulation(before optimization)

图 10 不同 BCCH 射线追踪仿真接收功率对比曲线(优化前)

图 11 为无线网络优化平台仿真得到的 WNB-LTD01 基站不同下倾角对应的高铁车站内轨道沿线 BCCH1009 衰落深度曲线。通过对比可知,优化前 WNB-LTD01 基站扇区天线的下倾角为 $11^\circ$ ,此时站内轨道沿线 BCCH1009 的衰落深度为 11.90 dB;当 WNB-LTD01 基站扇区天线的下倾角为 $13^\circ$ 时,站内轨道沿线 BCCH1009 的衰落深度最小,为 6.19 dB,无线网络优化前后的具体参数对比见表 3。

因此,选取 WNB-LTD01 基站扇区天线下倾角 $13^\circ$ 作为优化后的站参,进行高铁车站内轨道全线射线追踪仿真,评估无线网络优化效果,仿真结果如图 12 所示。由图 12 所示的站内轨道沿线接收功率评估图和表 3 所示的网优前后参数对比可知,当 WNB-LTD01 朝向渭南北车站扇区天线的下倾角调整为 $13^\circ$ 时,渭南北站轨道沿线接收信号衰落深度减小 5.7 dB,在高铁车站内行进过程中(公里标 K1010.3 之后),接收功率整体大于 $-54$  dBm。可见,通过本文的 GSM-R 网络优化平台指导调整基站参数优化后的高铁站内整体接收信号功率得到明显改善。

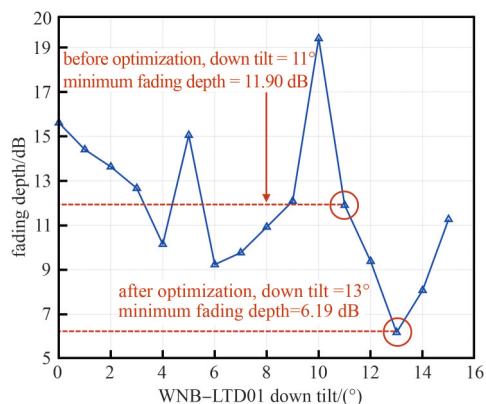


Fig.11 BCCH1009 fading depth curve

图 11 BCCH1009 衰落深度曲线

表 3 无线网络优化前后参数对比

Table3 Parameter comparison before and after wireless network optimization

parameter	value before optimization	value after optimization
WNB-LTD01 down tilt( $^\circ$ )	11	13
$D_F$ /dB	11.90	6.19

## 4 结论

针对传统 GSM-R 网络优化方案存在的优化滞后性、测量成本高、人工调参-迭代检验周期长等痛点问题,本文基于射线追踪技术构建 GSM-R 网络优化平台,并详细阐述其技术架构、网络优化流程和结果呈现形式。基于渭南北站实际存在的网络问题状况,分析面向高铁车站场景的接收信号弱覆盖优化需求,通过本文构建的无线网络优化平台复现渭南北站的弱网覆盖问题并调整列车在高铁站内行驶时接入基站的扇区天线参数进行优化仿真。仿真结果表明,渭南北站出站口基站 WNB-LTD01 的下倾角参数调整后,站内轨道沿线的接收信号衰落深

度减小 5.7 dB, 站内沿线的整体 GSM-R 接收电平均大于 -54 dBm, 较优化前得到提升。本文构建的 GSM-R 无线网络优化平台能够改善传统网优方案面临的痛点问题, 准确模拟铁路移动通信场景的电波传播和信号覆盖状况, 为 GSM-R 网络高质量、高精度、高效率的优化提供指导参考和技术积累。未来研究可结合实际 GSM-R 信号采集数据对隧道、路堑、山地等铁路全路通信场景的射线追踪模型进行校正, 推动普及 GSM-R 无线网络优化平台的高质量泛化应用。

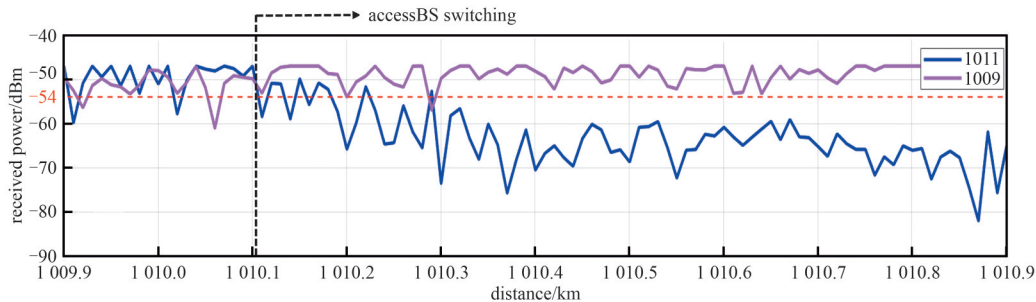


Fig.12 Comparison of received power curve of different BCCH RT simulation(after optimization)

图 12 不同 BCCH 射线追踪仿真接收功率对比曲线(优化后)

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙普. B5G 高铁网络演进方案研究[J/OL]. 中兴通讯技术, 2025:1-15. (SUN Pu. Research on the evolution of B5G high-speed railway networks[J/OL]. ZTE Technology Journal, 2025:1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241212.1527.006.html>.)
- [3] 钟章队,官科,丁建文,等. 从 2B 到 4B——电信行业与垂直行业的供需协同倍增发展[J]. 中兴通讯技术, 2024,30(增刊 1):67-75. (ZHONG Zhangdui, GUAN Ke, DING Jianwen, et al. From 2B to 4B—supply-demand synergy and value-multiplying development of telecom industry and vertical industries[J]. ZTE Technology Journal, 2024,30(Suppl.1):67-75.)
- [4] 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.
- [5] 马平娃. 一种简约化 GSM-R 网络优化方法及系统的研究与实现[J]. 铁道通信信号, 2024,60(2):54-62. (MA Pingwa. Study and implementation of a simplified GSM-R network optimization method and system[J]. Railway Signalling and Communication, 2024,60(2):54-62.) DOI:10.13879/j.issn.1000-7458.2024-02.23194.
- [6] 孙鲁泉,刘静,张玉. 基于高性能射线追踪技术的复杂交叉并线场景 GSM-R 网络优化研究[J]. 铁道通信信号, 2024,60(3):39-48. (SUN Luquan, LIU Jing, ZHANG Yu. Research on GSM-R network optimization in complex cross and parallel line scenarios based on high-performance ray tracing technology[J]. Railway Signalling and Communication, 2024,60(3):39-48.) DOI:10.13879/j.issn.1000-7458.2024-03.23237.
- [7] 梅靖. 镇江枢纽地区 GSM-R 网络优化案例[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023,20(4):46-51,72. (MEI Jing. Case study on GSM-R network optimization in Zhenjiang hub area[J]. Railway Signalling and Communication Engineering, 2023,20(4):46-51,72.) DOI:103969/j.issn.1673-4440.2023.04.009.
- [8] 代小虎. GSM-R 同址双基站异常切换原因分析及其优化方案[J]. 铁路技术创新, 2020(2):62-67. (DAI Xiaohu. Cause analysis and optimization scheme for abnormal handover of GSM-R same-site double base stations[J]. Railway Technical Innovation, 2020(2):62-67.) DOI:CNKI:SUN:TJCX.0.2020-02-014.
- [9] 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.
- [10] 申瑜,欧盼,陈付坤,等. 智能超表面辅助的 5G 高铁场景信道特性[J]. 北京交通大学学报, 2023,47(2):23-35. (SHEN Yu, OU Pan, CHEN Fukun, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted channel characteristics in 5G high-speed railway scenario[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023,47(2):23-35.) DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20220098
- [11] 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.
- [12] 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):789–799. (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):789–799.) DOI:10.12265/j.cjors.2024178.
- [13] 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.
- [14] 艾渤,何丹萍,钟章队. 高性能射线跟踪技术在智能交通领域的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(4):530–538. (AI Bo, HE Danping, ZHONG Zhangdui. Application of high-performance ray tracing technology in intelligent transportation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(4):530–538.) DOI:10.11805/TKYDA2023031.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李津汉,王一冉,官科,等. 面向 5G-R 高铁站场景的 CDL 建模与研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024,22(11):1181–1192. (LI Jinhan, WANG Yiran, GUAN Ke, et al. CDL modeling and research for 5G-R high-speed railway station scenario[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024,22(11):1181–1192.) DOI:10.11805/TKYDA2023400.
- [18] YANG J, DING M, MAO G, et al. Optimal base station antenna downtilt in downlink cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019,18(3):1779–1791. DOI:10.1109/TWC.2019.2897296
- [19] 于俊逸. 内河场景下的无线信道测量与建模研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018. (YU Junyi. Wireless channel measurements and channel modeling for inland river scenario[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2018.)
- [20] GUAN Ke, ZHONG Zhangdui, AI Bo, et al. Propagation measurements and analysis for train stations of high-speed railway at 930 MHz[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014,63(8):3499–3516. DOI:10.1109/TVT.2014.2307917.

#### 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和智能终端. email:duohao@caict.ac.cn.

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.

赵国超(1985–), 男, 学士, 主要研究方向为通信技术.

路晓彤(1970–), 男, 学士, 高级工程师, 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.

何文锋(1982–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为通信技术.

蒋 鑫(1986–), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为移动通信和智能终端.