

文章编号: 2095-4980(2025)12-1261-08

## 面向铁路编组站场景的 5G-R 网络优化

高婷婷

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

**摘要:** 铁路编组站是列车的解编核心, 其网络覆盖优劣关乎铁路运输效率。传统网络优化方案在应对编组站基站干扰及电磁环境敏感等特殊场景时存在不足。本文介绍基于射线追踪技术构建的无线环境数字孪生平台及其系统架构、优化流程和结果可视化。以大秦铁路沿线的某编组站为案例, 通过平台模拟并优化信号弱覆盖问题。仿真结果表明, 较之初步基站部署方案, 基站参数经优化后有效提升了整体信号接收质量, 有利地辅助了设计工作, 为面向铁路编组站场景的基于 5G 技术的铁路新一代移动通信系统(5G-R)专网高质量建设和优化提供了理论支撑和技术积累。

**关键词:** 射线追踪; 铁路 5G 专网; 铁路编组站; 无线网络优化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025174

## 5G-R network optimization for railway marshalling yard scenario

GAO Tingting

(CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** Railway marshalling yards are the core of train disassembly and reassembly, and the quality of their network coverage directly affects the efficiency of railway transportation. Traditional network optimization solutions are insufficient in dealing with special scenarios such as base station interference and sensitive electromagnetic environments in marshalling yards. A wireless environment digital twin platform based on ray tracing technology is introduced, along with its system architecture, optimization process, and result visualization. Taking a marshalling yard along the Daqin Railway as a case study, the platform simulates and optimizes the issue of weak signal coverage. The simulation results show that compared with the initial base station deployment plan, the optimized base station parameters have effectively improved the overall signal reception quality. This not only supports the design work but also provides theoretical support and technical accumulation for the high-quality construction and optimization of the next-generation railway mobile communication system 5G for Railway(5G-R) dedicated network for railway marshalling yards based on 5G technology.

**Keywords:** ray tracing; 5G for Railway(5G-R); railway marshalling yard; wireless network optimization

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随之提高。随着对通信业务质量要求的提高以及新型业务的不断涌现, 铁路数字移动通信系统(Global System for Mobile Communications-Railway, GSM-R)在干扰、容量以及业务需求的局限性不断显现<sup>[1]</sup>。

铁路 5G(5G-R)专用移动通信相较于 GSM-R 系统, 其通信制式基于 5G 技术, 网络性能优于 GSM-R, 并支持网络切片、边缘计算等业务, 能为铁路移动通信业务提供更可靠、更高效的信息传输以及更安全的服务质量保障<sup>[2-4]</sup>。近年来, 国家各单位不断出台相关文件, 从政策及预研标准层面积极鼓励推进 5G-R 系统的研究及应

收稿日期: 2025-05-23; 修回日期: 2025-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2268201; 2300-K1240018)

引用格式: 高婷婷. 面向铁路编组站场景的 5G-R 网络优化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(12):1261-1268. DOI:10.11805/TKYDA2025174.

**Citation format:** GAO Tingting. 5G-R network optimization for railway marshalling yard scenario[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(12):1261-1268. DOI:10.11805/TKYDA2025174.

用。2020年,国铁集团发布了《关于加快推进5G技术铁路应用发展的实施意见》、《铁路5G技术应用科技攻关三年行动计划》,推进铁路5G-R专网建设,为开展铁路5G专网建设和业务应用奠定基础。2022年1月,国务院印发了《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》,在“交通基础设施数字化网联化升级工程”专栏明确指出要“实施新一代铁路移动通信专网工程”。2023年9月,国铁集团发布的《数字铁路规划》特别指出,要加强站场5G专网和宽带无线接入能力建设,全力推进5G-R系统的建设。2025年4月,工信部向国铁集团批复5G-R系统试验频率,支持其在部分线路开展5G-R系统现场技术试验,进一步加速铁路数字化、智能化步伐。

目前,传统的针对GSM-R系统的网络优化通常需要基于路测结合人工经验进行调整。文献[5]基于两个多径干扰条件与站点间距约束,分析两类多径干扰的经典案例,提出涵盖网络质差反馈、人工数据分析、现场测试处理及效果验证的多径干扰排查方法。文献[6]对杭温高铁接入杭长高铁义乌站引起的基站迁改后出现直放站多径干扰问题进行案例分析,提出在新线引入并线段时,需综合考虑多种情况并论证各种造成网络覆盖变化的可能性,提出可行的测试方案。在条件允许的情况下充分测试、合理调整工程和网络参数,优化GSM-R网络,使优化后的GSM-R网络能够稳定运行。随着5G-R专网建设的推进,高铁车站场景5G-R网络覆盖优化也在逐步深化。文献[7]在2.1 GHz频段下,面向高铁站台场景基于射线追踪对部署智能反射表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)前后进行了信道分析,并指出部署RIS可以显著提高室外宏站对车站内的信号覆盖,从而减小由于车站建筑物遮挡对信号传输的影响。文献[8]在2.1 GHz频段下,通过三维建模的厦门北高铁车站场景和射线跟踪技术对射线传输机理进行研究,提出了面向车站场景的反散射模型和基于散射体空间分布以及多径能量特征的无线网络基站参数优化算法。此外,研究者们也对5G连续广域铁路正线和交叉并线场景的网络优化进行了研究。文献[9]采用射线追踪技术研究了2.1 GHz高铁高架桥场景下的电波传播特性,设计了RIS的部署位置和波束,优化了铁路正线的信道容量。铁路无线网覆盖场景广泛,包括铁路正线、车站,还包括高架桥、隧道、山区等复杂特殊场景。这些不同场景之间环境差异大,无线信道传播特性也明显不同。如隧道因其地理环境复杂、隧道内封闭且长度各异、设备和线缆安装空间有限、列车接收信号在隧道出入口存在波动等特点使该场景的网络优化需要人工反复迭代调试与验证<sup>[10]</sup>。因此,为落实国家对铁路通信系统高质量建设和发展的需求,需对铁路5G-R通信系统的无线网络进行精准和高效的优化。

编组站在铁路货物运输中发挥着重要作用,负责大量货运列车的解体和编组作业。传统的网络优化方案存在消耗大量人力、成本高、周期长以及优化效果差等问题,目前已有的研究针对这些问题大多在连续广域铁路正线、复杂交叉线以及高铁站台等场景,结合射线追踪、RIS以及聚类等技术探索数字化优化网络的手段。然而铁路编组站与经典的铁路移动通信场景在建筑结构、散射体表面材料以及空间封闭性等方面均存在较大差异。此外,编组站基站之间的密集部署可能会造成基站之间较强的干扰,编组站内大量的列车停靠会使该场景电磁情况对位置变化很敏感等独具编组站场景特点的问题也会导致该场景的网络优化难度提升<sup>[11]</sup>。因此,在铁路数智化转型与新一代铁路移动通信系统高质量建设推进的背景下<sup>[12-13]</sup>,面向铁路编组站场景的5G-R专网数字化优化技术还有待进一步研究。

针对上述问题以及铁路数字化进程中列车智能协同调度与高可靠通信需求,本文依托基于高性能射线追踪技术的无线环境数字孪生平台<sup>[14]</sup>,针对大秦铁路沿线某编组站在5G-R建设方案过程中出现的场强弱覆盖问题进行数字化网络优化研究,并给出面向编组站场景的5G-R网络覆盖优化方案。

## 1 无线环境数字孪生平台

随着高速铁路智能化与数字化进程的加速推进,5G-R通信系统具有数据传输能力更强、通信业务延迟更低、业务类型更丰富等特点,是保障铁路运输安全与高效的关键支撑。传统经验模型,如Okumura-Hata、COST231,受限于场景普适性不足,难以精确刻画高速移动下动态变化的电波传播效应,因此,5G-R通信系统的高质量运转要求对行车途中的电波传播实现高精度、高效率、可泛化的预测。本文采用基于高性能射线追踪仿真工具CloudRT构建无线环境数字孪生平台,对编组站场景的网络优化进行研究<sup>[15]</sup>。

### 1.1 无线网络孪生优化流程

图1为基于射线追踪的无线网络孪生优化流程图。首先为多源异构跨域场景的生成,通过整合建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、计算机辅助设计(Computer-Aided Design, CAD)等多系统的数据,结合倾斜摄影、卫星影像等异构信息,将这些来源不一、格式多样的数据在统一的三维空间内进行融合与优化,构建出涵盖从宏观到微观的铁路典型结构体基础数据库,包括电力牵引架、路堑、车站等元素,从而为后续的仿真工作提供坚实的数据支撑。在此基础上,利用电波传播

计算模型和射线路径计算方法，辅以并行计算架构和散射中心稀疏化技术，实现高效、精准的高性能 RT 动态链路仿真，旨在模拟并优化无线信号在复杂环境中的传输效果。同时，智能优化模块通过融合跨平台 Web 开发、三维地图渲染、动态射线渲染以及计算资源优化等前沿技术，不仅实现几何电磁解耦，还借助 AI 算法推动参数的快速迭代优化。尤其是在调整现实空间中的站点参数时，如天线的下倾角，系统能够迅速响应并实时呈现调整后的天线辐射方向，确保仿真结果的精确度与运算效率的平衡。

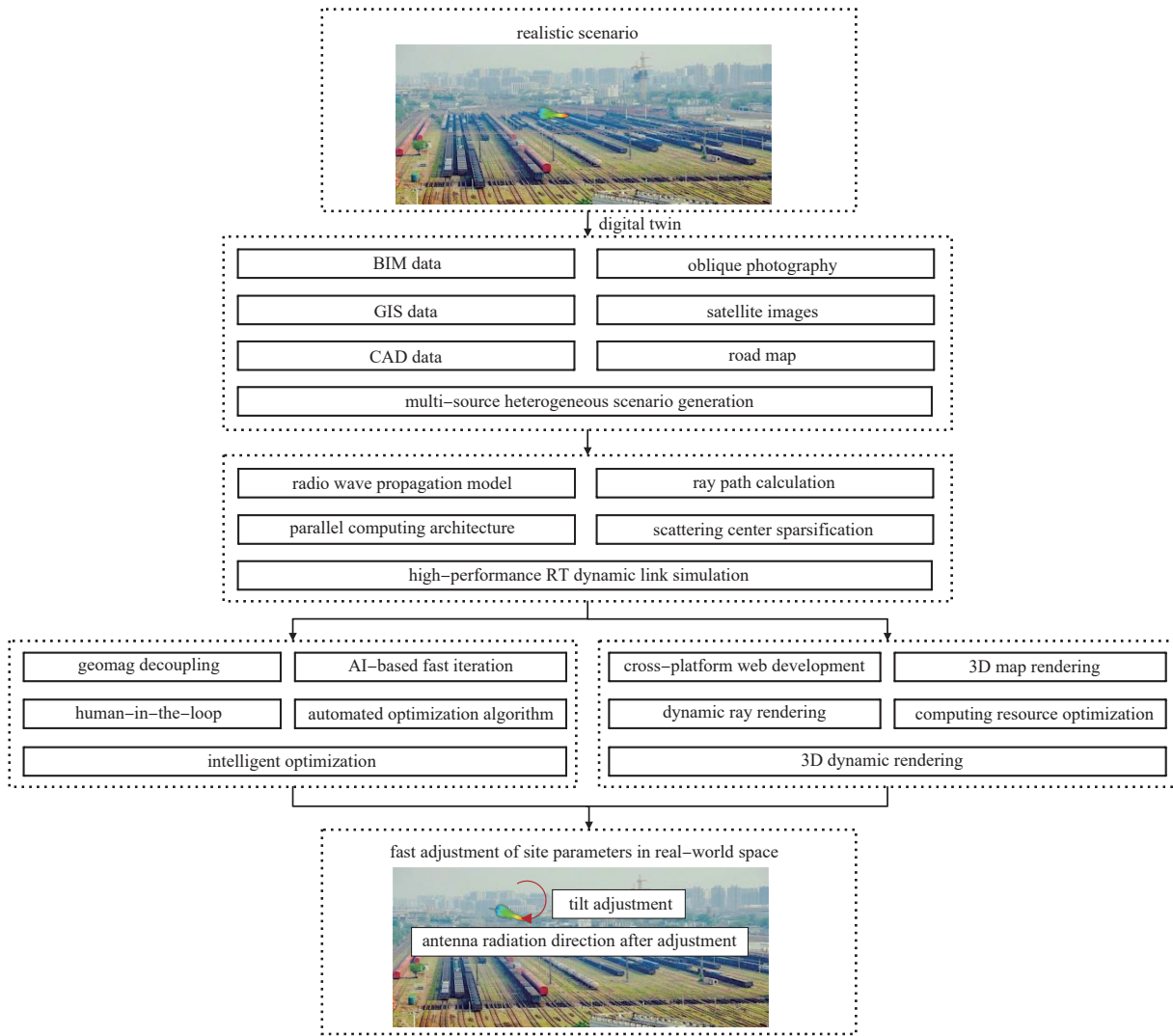


Fig.1 Flowchart of wireless network twin optimization  
图 1 无线网络孪生优化流程图

### 1.2 多源异构场景建模

铁路专用移动通信系统的部署场景呈现多样化特征，不仅涵盖常规的区间干线和枢纽站点，还包括隔音屏、高架桥及山区峡谷等特殊复杂环境。这些差异性显著的地理环境会使电磁波的传播特性产生较大变化。因此，对射线追踪仿真场景的准确高效建模，是确保基于射线追踪进行铁路移动通信网络孪生优化有效的基础。在铁路移动通信场景下进行射线追踪仿真时，需基于场景的三维电子地图进行仿真。三维电子地图中场景地形、地图以及建筑信息建模的准确性非常重要，直接影响多径集合基础信息的准确性。三维电子地图场景的构建依赖于地形数据、建筑数据以及地物数据，这些数据来源多样，架构、格式和坐标系各异。

图 2 为多源异构数据融合流程图，基于全球数字高程模型的地形数据，通过坐标转换将地形的原始数据转换到统一的通用横轴墨卡托投影(Universal Transverse Mercator, UTM)坐标系，根据需求对转换后的数据进行裁剪和重采样，从而生成三维场景建模数据中海拔信息的 tif 数据。基于无人机倾斜摄影数据，采用算法提取数字正射影像数据，利用人工智能技术提取建筑物矢量轮廓数据，进而利用提取的建筑物数据作为二维约束条件获取建筑的高度矢量信息，最后系统生成带有建筑物轮廓和高度矢量信息的 shp 数据。地物数据是倾斜摄影数据和

WorldCover 数据的融合，倾斜摄影数据为主要地物数据，WorldCover 数据为基底。从无人机倾斜数据中提取数字正射影像数据后采用人工智能算法，提取不同地物特征信息的数据，并对地物数据进行平滑处理，生成高质量的主要地物数据。对基础地物数据进行坐标系转换并将其剪裁、重采样、重分类后得到的数据与提取的主要地物数据进行整合形成包含地物类别的 tif 数据。

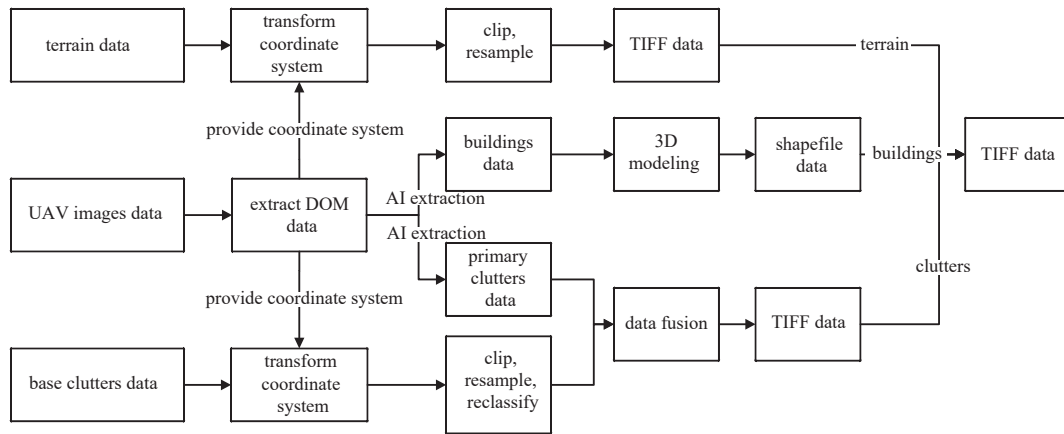


Fig.2 Flow chart of multi-source heterogeneous data fusion  
图2 多源异构数据融合流程图

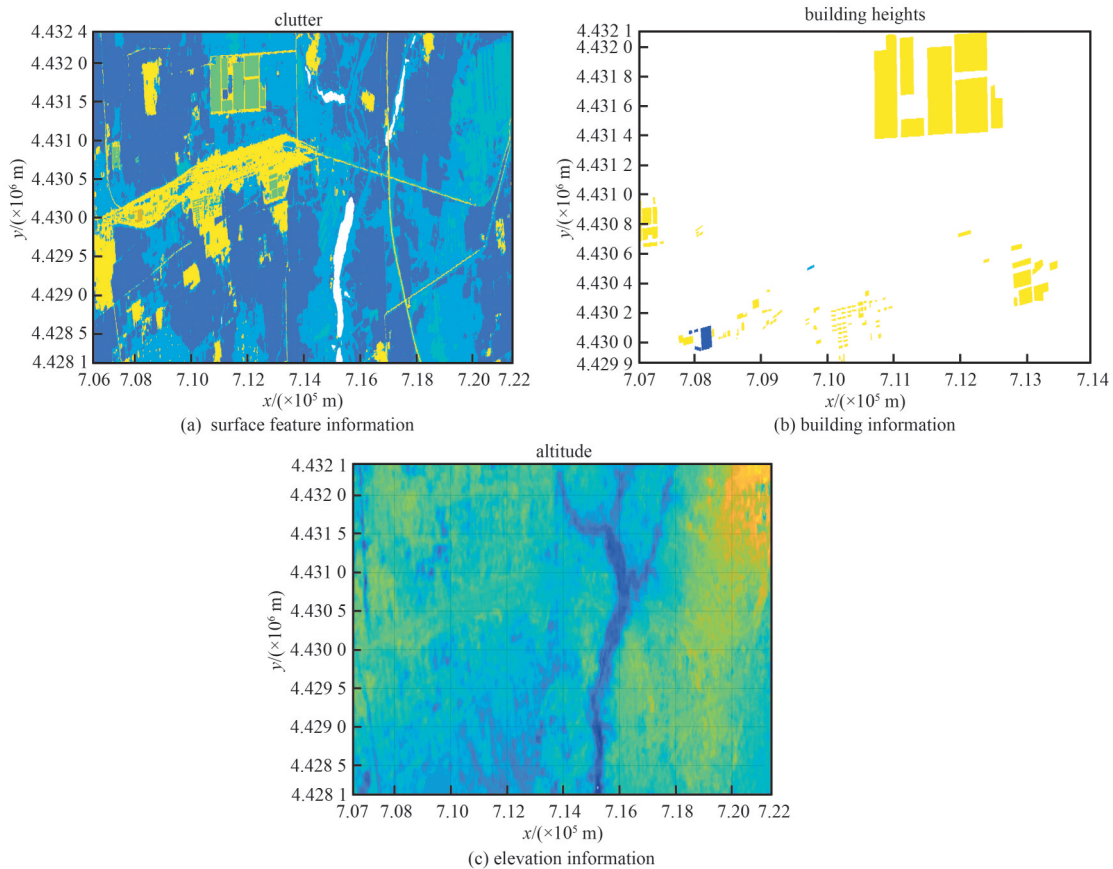


Fig.3 3D scene information of marshalling yard  
图3 编组站三维场景信息

## 2 面向编组站场的网络智能评估与优化

大秦铁路是横跨华北地区，连接山西大同与河北秦皇岛的国家I级货运专线，作为中国第一条双线电气化重载干线铁路，大秦线不仅是改革开放背景下建成的首条煤炭运输战略通道，更开创了我国重载铁路运输的先河，

承担着“西煤东运”核心动脉的重要使命。在铁路通信业务保障层面，通信业务的正常运转是保障大秦线货运安全高效的重要支撑，因此，针对大秦线沿线某编组站在 5G-R 建设方案研究过程中出现的弱场强覆盖问题，采用无线环境数字孪生平台进行网络覆盖优化。

2.1 网络优化仿真配置

精准的场景建模、收发天线模型及材料电磁参数设定是确保射线追踪仿真可靠性的核心要素<sup>[16-17]</sup>。场景模型的精确构建为几何计算提供坚实基础，收发天线模型的不同会对仿真结果产生显著影响，而散射体表面材料电磁参数则是电磁计算可靠性的关键保障。这些要素共同确保了射线追踪仿真的准确性和有效性。

2.1.1 编组站场景模型

仿真场景为使用大秦铁路沿线某编组站地图数据生成的分辨率为 5 m 的 planet 电子地图，面积约 63 km<sup>2</sup>。图 3 为该 planet 电子地图的地物、建筑及海拔信息。其中，地物数据图层用于描述地物分类和区分地表所有用地及建筑的类别；建筑数据使用栅格数据模型描述各种建筑物的分布及建筑物的高度；海拔数据用于精准描述目标区域地形及其高度。通过整合这些信息，生成包含建筑物高度信息的矢量数据并以 shp 格式输出，作为无线环境数字孪生平台的三维场景模型输入，用于平台射线追踪仿真。

2.1.2 天线模型

本次研究中，基站端发射天线选用最大增益为 17 dBi 的高增益定向天线，接收端采用零增益全向天线，以天线文件所包含的水平面和垂直面增益数据为基础进行处理，进而得到适用于射线追踪仿真的收发端天线模型。图 4(a)为编组站基站端发射天线模型，图 4(b)为接收端天线模型。

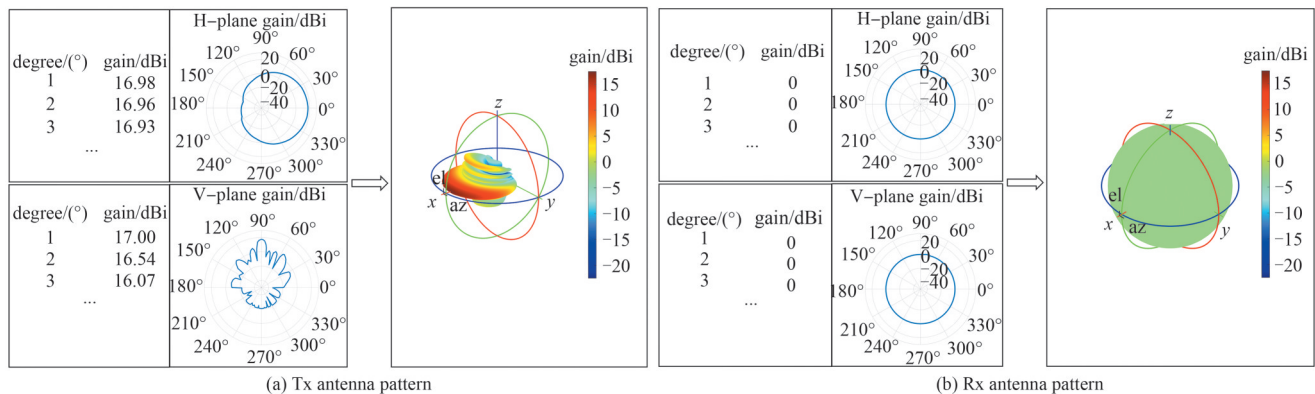


Fig.4 3D pattern of Tx/Rx antenna  
图4 发射端/接收端天线三维模型

表 1 编组站基站参数

Table1 Marshalling yard base station parameters

base station name	longitude/(°)	latitude/(°)	UTM-x/m	UTM-y/m	base station height/m
K19+730	113.428 7	39.995 6	707 337	4 430 099	18
K21+240	113.445 8	39.997 3	708 794	4 430 331	28
K23+530	113.469 8	39.995 7	710 847	4 430 199	43
K25+580	113.497 4	39.999 3	713 193	4 430 669	28
K27+190	113.514 7	40.000 4	714 667	4 430 834	18
K29	113.552 4	39.996 1	717 898	4 430 447	12
K32+590	113.577 6	39.993 4	720 061	4 430 209	43

表 2 无线环境数字孪生平台仿真参数

Table2 Simulation parameters of the digital twin platform for wireless environment

parameter	value	parameter	value
frequency band/MHz	2 155-2 165	Tx antenna gain/dBi	17
bandwidth/MHz	10	Rx antenna gain/dBi	0
subcarrier spacing/kHz	15	cable loss/dB	5.7
resource block	52	Rx antenna height/m	4.05
propagation mechanism	direct, 1-order reflection, 1-order scattering, transmission <sup>[18]</sup>		

### 2.1.3 仿真参数

在针对大秦铁路沿线某编组站的 5G-R 专网建设方案研究过程中, 基站初步部署的经纬度和通用横墨卡托格网系统(UTM)坐标及相对于地面的高度参数见表 1, 无线环境数字孪生平台的详细仿真参数配置见表 2, 大秦铁路沿线编组站场景中主要的材料电磁特性参数见表 3。

表 3 编组站场景主要材料电磁参数

Table 3 Electromagnetic parameters of main materials in marshalling yard scenario

material	real permittivity	loss tangent	directive $s$	directive $\alpha$
concrete	4.65	0.05	0.22	5.31
metal	1.00	$1.00 \times 10^7$	0.23	2.01
river	80.94	0.07	0.93	5.16
tree	2.32	0.13	0.63	5.04
glass	6.77	0.23	0.91	6.28
green land	15.07	0.06	0.10	2.35
road land	2.69	$8.00 \times 10^{-3}$	0.77	2.41
brick	5.72	0.47	0.74	7.09
suburban open area	3.23	0.53	0.24	4.97
height building	6.71	0.01	0.51	5.03
ordinary building	3.77	0.11	0.41	4.91

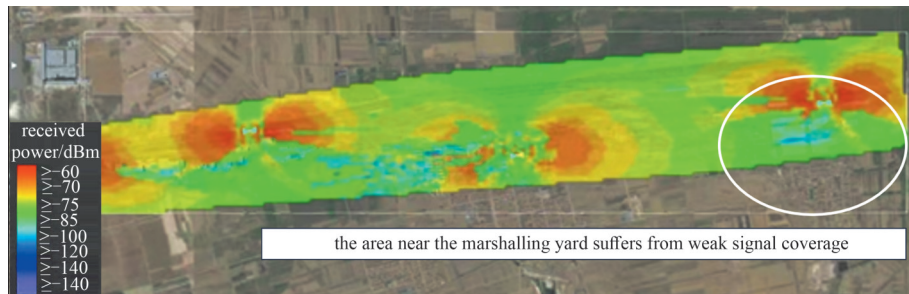


Fig.5 Global simulation signal coverage heatmap

图 5 全局仿真信号覆盖热图

## 2.2 基于编组站场的网络优化系统仿真分析

将网络优化系统所需场景地图、天线模型及材料电磁参数输入后, 在大秦线沿线选择包含某编组站的区域进行仿真。接收功率热图的仿真结果如图 5 所示, 可见该方案下某编组站附近存在场强覆盖较弱的问题。某编组站区域接入的基站为 K25+580, 为便于后续对该编组站区域进行网络优化, 进一步对某编组站区域进行局部放大网络优化仿真。

图(6)为局部放大后编组站附近区域的优化前后仿真结果, 图 6(a)为优化前仿真热图效果。利用平台的无线网络自动优化功能对区域接收功率进行优化, 设定接收功率阈值-80 dBm 的通过率为 90%, 基于多目标寻优算法对某编组站场景中的既有基站参数进行迭代寻优, 优化目标阈值收敛后输出的优化基站参数见表 4, 优化后接收功率覆盖热图如图 6(b)所示。优化前扇区 0 和扇区 1 的发射功率分别为 32 dBm 和 23 dBm, 优化后分别为 40.3 dBm 和 42 dBm; 扇区 1 的天线方位角由 267°优化为 240°, 天线下倾角由 -3°优化为 3°。

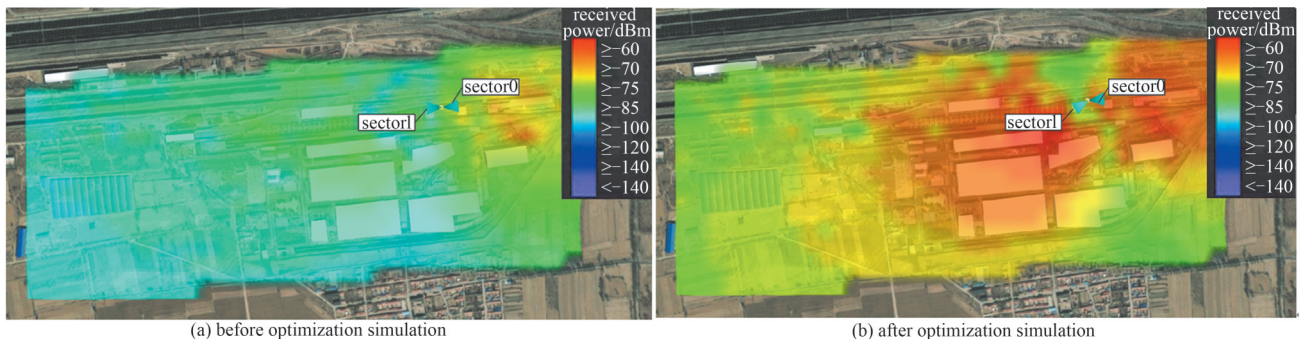


Fig.6 Comparison of simulation heatmaps before and after optimization

图 6 优化前后仿真热图对比

表 4 基站参数优化前后对比

Table4 Comparison of base station parameters before and after optimization

parameters	before optimization	after optimization
power of sector0/dBm	32	40.3
power of sector1/dBm	23	42
azimuth angle of sector0/(°)	85	85
azimuth angle of sector1/(°)	267	240
tilt angle of sector0/(°)	3	3
tilt angle of sector1/(°)	-3	5

表 5 优化前后信号接收强度统计结果对比

Table5 Comparison of statistical results of signal reception strength before and after optimization

ratio of simulation area	statistical results of signal reception strength/dBm	
	before optimization	after optimization
90%	-78.2	-66.3
50%	-93.6	-73.5
10%	-98.2	-78.9

表 5 对比了优化前后的信号接收强度统计结果。从表中可以看出，优化前，编组站仿真的信号接收强度较弱：90% 仿真区域的信号功率低于 -78.2 dBm，50% 低于 -93.6 dBm，10% 低于 -98.2 dBm。使用无线环境数字孪生平台进行参数优化后，编组站区域信号接收强度显著提升：90% 仿真区域的信号接收功率提高到 -66.3 dBm，50% 仿真区域的信号接收功率提高到 -73.5 dBm，10% 仿真区域的信号接收功率提高到 -78.9 dBm。

图 7 为优化前后信号接收强度的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)对比曲线。由图中可以直观地看出，仿真中编组站场景的信号接收强度经由平台调整基站参数后得到明显改善。

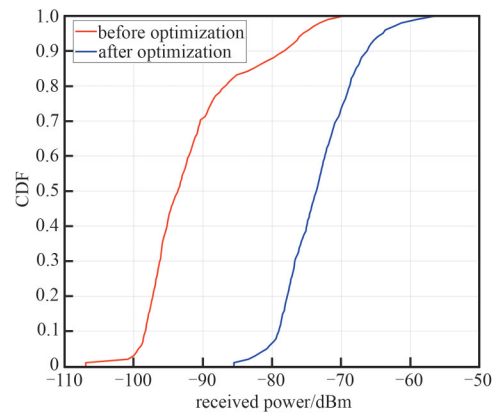


Fig.7 Comparison of CDF of signal reception strength before and after optimization

图 7 优化前后信号接收强度的累积分布函数对比

### 3 结论

本文分析了铁路编组站网络覆盖对列车运输效率的重要性，指出传统网络优化方法在应对编组站复杂电磁环境时的不足，并介绍了基于射线追踪技术的无线环境数字孪生平台。该平台可面向编组站场景对基站参数进行优化，并提供直观的仿真结果可视化。通过大秦铁路沿线某编组站的案例仿真，分别优化基站扇区天线的发射功率、方位角及下倾角。对比优化前后的接收信号强度统计，仿真结果表明编组站场的信号接收强度得到了明显改善，从而论证了无线环境数字孪生平台的有效性。本文研究成果可为铁路编组站场景的移动通信网络运维提供精准、高效的网络优化技术积累。

#### 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 ] 尹一凡. 铁路 5G-R 系统的 QoS 测试方法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024,21(12):43-47,120. (YIN Yifan. QoS test method of railway 5G-R systems[J]. Railway Signalling & Communication, 2024,21(12):43-47,120.) DOI: 10.3969/j. issn. 1673-4440. 2024.12.007.

[ 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.) DOI: 10.12142/ZTETJ.2024S1010.

[ 4 ] 陈庭德,王海龙,陈煜. 移动性增强技术在铁路 5G 专网中应用场景研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024,21(1):42-46. (CHEN Tingde,WANG Hailong,CHEN Yu. Research on application scenarios of mobility enhancement technology in 5G-R

- network[J]. *Railway Signalling & Communication*, 2024,21(1):42–46.) DOI:10.3969/j.issn.1673–4440.2024.01.008.
- [5] 曾祥兵. 高铁 GSM-R 多径干扰典型案例及解决方案[J]. *铁路通信信号工程技术*, 2018,15(11):36–41. (ZENG Xiangbing. Typical case and solution of high-speed railway GSM-R multipath interference[J]. *Railway Signalling & Communication Engineering*, 2018,15(11):36–41.) DOI:10.3969/j.issn.1673–4440.2018.11.008.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 曾成胜. 基于高性能射线追踪的高铁车站场景 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.
- [9] 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.
- [10] 葛伟涛,冯敬然,周敏,等. 铁路 5G-R 隧道覆盖方案研究[J]. *中国铁路*, 2022(9):83–87. (GE Weitao, FENG Jingran, ZHOU Min, et al. Research on 5G-R coverage scheme for railway tunnels[J]. *China Railway*, 2022(9):83–87.) DOI:10.19549/j.issn.1001–683x.2022.03.10.003.
- [11] 陈建译,闫连山,郭兴海,等. 基于机器学习算法的智能编组站 5G 天线参数规划[J/OL]. *西南交通大学学报*, 2025:1–10. [2025–05–23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20220804.1509.002.html>. (CHEN Jianyi, YAN Lianshan, GUO Xinghai, et al. 5G antenna parameter planning for intelligent marshalling yard based on machine learning algorithm[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2025:1–10. [2025–05–23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20220804.1509.002.html>.)
- [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] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [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] 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.
- [18] 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.

#### 作者简介:

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 .email:gaotingting@crscd.com.cn.