

文章编号: 2095-4980(2025)12-1289-12

## 面向智慧地铁的无线物联网信道特性及容量分析

张晨阳<sup>1</sup>, 罗珊<sup>\*2a,2b</sup>, 弓子悦<sup>3</sup>, 官科<sup>2a,2b</sup>

(1.北京市地铁运营有限公司, 北京 100044; 2.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; 3.北京乾径科技有限公司, 北京 100076)

**摘要:** 地铁作为城市公共交通的主要载客工具之一, 其智慧化发展迫切需要高效、可靠的无线物联网(IoT)支持信息传输。本文面向地铁隧道场景, 在 2.6 GHz 频段基于真实地铁隧道的三维模型与场景介质电磁特性参数, 采用射线追踪仿真分析无线物联网信道特性, 并提出了地铁隧道物联网系统设计的相关建议; 此外, 针对地铁物联网业务的高传输容量需求, 通过探究发射/接收阵元天线结构、多输入多输出(MIMO)系统的最佳传输数据流数量(传输层数), 得出线型发射天线阵列与方型接收天线阵列的组合最适配地铁隧道物联网系统; 地铁隧道场景的 4 层 MIMO 传输能实现最优的传输容量性能。

**关键词:** 智慧地铁; 无线物联网; 射线追踪; 信道特性; MIMO 系统; 传输容量

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025291

## Analysis of channel characteristics and capacity of wireless IoT for smart subway

ZHANG Chenyang<sup>1</sup>, LUO Shan<sup>\*2a,2b</sup>, GONG Ziyue<sup>3</sup>, GUAN Ke<sup>2a,2b</sup>

(1.Beijing Subway Operation Co., Ltd., Beijing 100044; 2a.State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation;  
2b.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
3.Beijing MetaRadio Technology Co., Ltd., Beijing 100076, China)

**Abstract:** As one of the major passenger-carrying means of urban public transportation, the intelligent development of subways urgently requires support from efficient and reliable wireless Internet of Things(IoT) for information transmission. Focusing on the subway tunnel scenario, this paper employs ray tracing simulation to analyze the characteristics of wireless IoT channels in the 2.6 GHz frequency band, based on real 3D models of subway tunnels and electromagnetic parameters of scene media, and puts forward relevant suggestions for the design of subway tunnel IoT systems. In addition, in response to the high transmission capacity demand of subway IoT services, by exploring transmit/receive element antenna structures and the optimal number of transmitted data streams (i.e., transmission layers) of the Multiple Input Multiple Output(MIMO) system, it is found that the combination of a linear transmit antenna array and a square receive antenna array is most suitable for the subway tunnel IoT system. With the system's maximum transmission capacity as the evaluation criterion, it is found that 4-layer MIMO transmission in the subway tunnel scenario achieves the optimal transmission capacity performance.

**Keywords:** smart subway; wireless Internet of Things(IoT); ray tracing; channel characteristics; MIMO system; transmission capacity

收稿日期: 2025-09-19; 修回日期: 2025-11-03

基金项目: 北京地铁自有信息化改造科研资助项目(2024000501000012)

\*通信作者: 罗珊 email:luoshan@bjtu.edu.cn

引用格式: 张晨阳,罗珊,弓子悦,等. 面向智慧地铁的无线物联网信道特性及容量分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(12):1289-1300.  
DOI:10.11805/TKYDA2025291.

**Citation format:** ZHANG Chenyang,LUO Shan,GONG Ziyue,et al. Analysis of channel characteristics and capacity of wireless IoT for smart subway[J].Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(12):1289-1300. DOI:10.11805/TKYDA2025291.

随着城市化进程的迅猛推进,城市人口急剧增加,交通压力日益增大,地铁作为城市公共交通的主力军,承担着越来越重要的运输任务<sup>[1]</sup>。为满足人们日益增长的出行需求,提升地铁运营的效率、安全性和智能化水平已成为当务之急,智慧地铁应运而生<sup>[2]</sup>。智慧地铁<sup>[3]</sup>的核心在于依托先进的无线物联网技术,构建一个高度智能、互联互通的地铁运营生态系统。在这个系统中,实现列车与地面控制中心之间高效、可靠的数据传输是关键所在。通过实时、准确的数据交互,地面控制中心能够对列车进行实时监控、精准调度以及远程控制,从而确保地铁的安全、稳定运行,提高运营效率,提升乘客的出行体验。

在地铁隧道这一特殊场景下,分布着大量的监测设备和传感器,如轨道状态监测传感器、隧道环境监测传感器(温度、湿度、气体浓度等)、列车设备状态监测传感器等。这些设备如同地铁系统的神经末梢,时刻感知着隧道和列车的各种状态信息。但要将这些设备采集到的状态信息准确、及时传递给地面控制中心,依赖于稳定、高效的无线通信信道<sup>[4]</sup>。地铁隧道作为一个复杂的传播环境,给无线信号的传输带来了诸多挑战。其独特的几何结构,如狭长的隧道空间、弯曲的轨道等,会导致信号的反射、散射和衍射现象频繁发生,产生多径效应。同时,隧道壁的材料特性也会对信号的传播产生显著影响,不同材料的吸收、反射特性不同,进一步加剧了信号传播的复杂性。此外,列车的动态移动也会引起信号传播环境的变化,如列车与发射天线的相对位置不断改变,导致信号强度和传播路径发生动态变化。这些复杂的因素使地铁隧道内的无线信号传播特性变得极为复杂<sup>[5]</sup>,信号在传输过程中容易出现衰减、干扰等问题,从而影响数据传输的可靠性和有效性。

在无线信道特性研究方面,众多学者针对不同场景开展了大量工作。文献[6]通过在 1.8 GHz、5.8 GHz 马蹄形隧道实测,明确路径损耗指数随频率升高而降低,且弯曲隧道曲率越小,路径损耗越大;同时 5.8 GHz 频段的阴影衰落标准差显著高于 1.8 GHz,表明高频段多径波动更剧烈。文献[7]补充了 2.4 GHz 与 5 GHz 频段对比,进一步验证了高频段在直隧道中损耗更低,但多径波动更显著的规律,体现波导效应下高频段的传播优势,同时其多径时延扩展和阴影衰落标准差均大于 2.4 GHz。文献[8]则改进射线追踪法,精准仿真直道、弯道场景的路径损耗、莱斯 K 因子等参数,量化了隧道曲率对多径时延扩展的增强效应,为实测数据提供了机理层面的解释。

在多输入多输出(MIMO)技术及传输容量研究领域,同样成果丰硕。文献[9]针对 LTE-M(Long Term Evolution for Machine-Type Communication)系统,在地铁隧道场景构建基于几何的单反射非稳态 MIMO 信道模型,通过分解散射与视距分量,揭示列车移动对信道时变自相关、功率谱密度等的影响,为 MIMO 性能分析提供动态建模基础。文献[10]以上海地铁隧道 5.6 GHz 实测为依托,证实交叉极化相较同极化能降低子信道相关性,提升容量,且小阵元间距下仍可实现高容量,适配隧道空间,契合非稳态建模降相关性应对时变的需求。文献[11]在巴塞罗那地铁隧道的实测表明,矩形直隧道 MIMO 性能优于拱形、弯隧道,且极化分集对容量的提升效果更显著,既呼应交叉极化优先策略,也为非稳态模型的场景化参数调整提供支撑。尽管已有丰富的研究成果,但针对地铁隧道内无线物联网信道特性<sup>[12]</sup>及 MIMO 传输容量的研究仍存在一些不足。一方面,地铁隧道环境具有其独特性,现有研究对于综合考虑地铁列车移动、隧道结构复杂等多因素下的信道特性研究还不够全面深入<sup>[13]</sup>;另一方面,在 MIMO 传输容量分析方面,缺乏针对地铁隧道场景下不同传输层数与信道容量变化规律的详细研究,以及如何依据信道特性优化 MIMO 传输层数以提高系统容量的探讨<sup>[14]</sup>。

本文以地铁隧道为研究场景,利用射线追踪仿真方法<sup>[15]</sup>,深入分析无线物联网信道特性,包括在隧道内设置发射天线、列车顶上放置接收天线且列车沿隧道移动情况下的路径损耗(Path Loss, PL)、莱斯 K 因子、均方根时延扩展(Root Mean Square Delay Spread, RMS-DS)、角度扩展(Angular Spread, AS)参数。同时,基于射线追踪仿真,研究隧道内部 MIMO 传输层数与传输容量之间的关系<sup>[16]</sup>,旨在为地铁隧道内无线物联网系统的设计和优化<sup>[17]</sup>提供理论依据和技术支持。

## 1 场景建模与仿真配置

为准确分析地铁隧道内无线物联网信道特性<sup>[18]</sup>及 MIMO 系统传输容量<sup>[19]</sup>,选用高性能射线追踪仿真平台 CloudRT<sup>[20]</sup>展开仿真。该平台依托云计算技术构建,具备强大的仿真能力,可对直射、反射、散射、绕射、透射等多种传播机制的射线进行仿真模拟。用户能够依据实际需求,灵活配置环境模型、天线模型、传播机理以及收发信机位置等关键参数。在无线信道仿真研究中,对真实场景进行合理建模<sup>[21]</sup>至关重要。以地铁隧道场景为例,隧道独特的几何结构、材质特性以及列车作为动态散射体的存在,都会对无线信号的传播产生复杂影响。只有精准构建仿真隧道环境以及散射体列车模型,才能最大程度还原真实的信号传播场景,使仿真结果更贴合实际情况,从而为深入探究信道特性提供可靠依据。

### 1.1 场景模型

为获取与实际环境几何特征一致的地铁隧道及列车模型支撑仿真研究, 本文面向北京东四地铁站进行了场景几何特征测量工作。获取隧道尺寸数据并调研常见地铁列车尺寸后<sup>[22]</sup>, 分别对隧道和地铁列车进行了三维建模。隧道实测场景与隧道三维建模如图 1 所示, 隧道长 700 m, 隧道口横截面宽 6 m, 高 5 m。

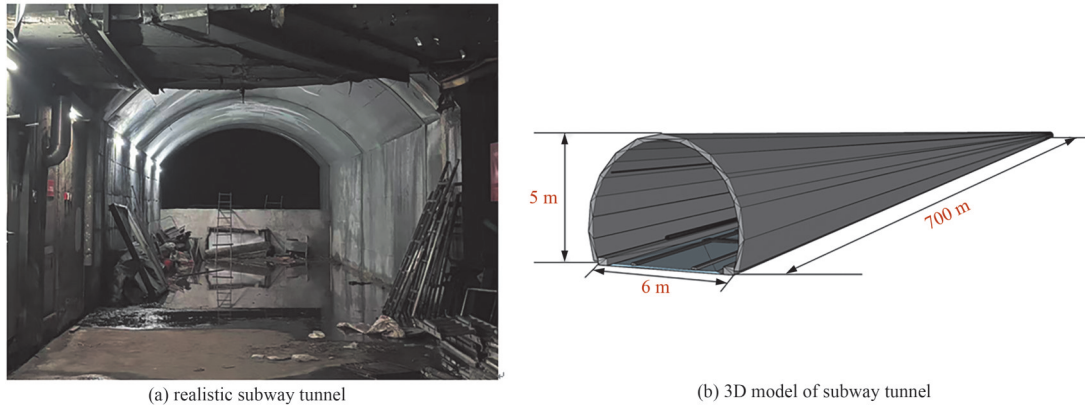


Fig.1 Field measured photo and 3D model of subway tunnel scenario

图 1 实际地铁隧道场景照片与对应三维模型

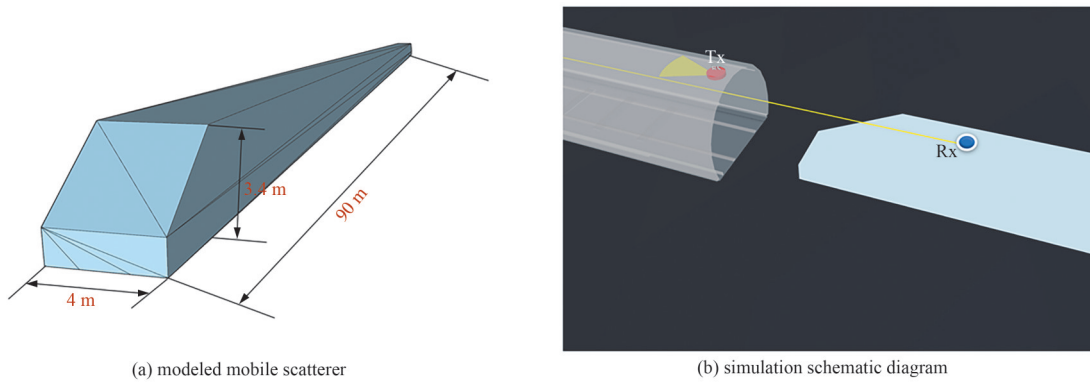


Fig.2 Modeling and simulation of mobile scatterer

图 2 移动散射体建模与仿真

移动散射体及仿真示意图如图 2 所示, 图 2(b)中标注了收发机的位置。此外, 隧道场景及列车模型所采用的材料电磁参数<sup>[23-24]</sup>如表 1 所示。这些模型和数据将为后续的仿真研究提供基础。

表 1 地铁隧道场景主要材料电磁参数

Table1 Electromagnetic parameters of main materials in subway tunnel 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
rubber	80.94	0.07	0.93	5.16
aluminum	3.77	0.11	0.41	4.91

### 1.2 天线模型

本次仿真发射端采用垂直极化方式的定向天线, 其最大增益为 17 dBi, 接收端采用零增益垂直极化全向天线, 收发天线的三维模型如图 3 所示。

### 1.3 链路配置

仿真选用 5G 公网频段 2 550~2 650 MHz, 带宽为 100 MHz。发射机置于隧道口贴近顶壁处, 高 4.5 m; 接收机设于列车顶部, 列车沿隧道以 80 km/h 的速度移动, 列车高 3.5 m。仿真链路配置详见表 2, 传播机制涵盖直射、透射、反射、散射, 相关传播模型及计算方法见表 3。

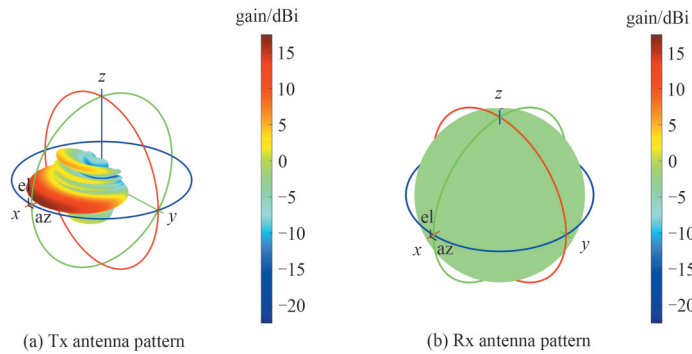


Fig.3 Tx/Rx antenna pattern  
图3 收发天线三维模型

表2 仿真链路配置

parameter	value
frequency band/MHz	2 550~2 650
bandwidth/MHz	100
subcarrier spacing/kHz	30
resource block	273
propagation mechanism	direct, reflection, scattering, transmission
Tx antenna gain/dBi	17
Rx antenna gain/dBi	0
Tx antenna height/m	4.5
Rx antenna height/m	3.5
transmit power/dBm	49
train speed/(km/h)	80
modulation scheme	256QAM

表3 传播模型总结

Table3 Summary of propagation models

propagation mechanism	propagation model	calculation method
direct	free space loss	Friis transfer equation
reflection	Snell's law based on image method <sup>[25]</sup>	Fresnel equation <sup>[25]</sup>
transmission	Snell's law <sup>[26]</sup>	Fresnel equation <sup>[25]</sup>
scattering	directional scattering <sup>[27]</sup>	scattering coefficient and equivalent roughness <sup>[27]</sup>

## 2 基于射线追踪仿真的信道特性参数分析

在基于射线追踪仿真的地铁隧道无线物联网信道特性参数分析中，路径损耗、莱斯  $K$  因子等(信道参数的详细定义及公式见文献[28])关键参数至关重要。这些参数从不同维度刻画了无线信号在地铁隧道复杂环境中的传播特性，通过对这些参数的系统分析，能够为地铁隧道内无线物联网系统的优化设计、网络规划以及性能提升提供科学依据和有力支撑。

### 2.1 路径损耗

路径损耗作为衡量信号传播中能量衰减的关键指标，体现接收信号平均功率随传播距离的变化情况。地铁隧道的封闭结构、壁面材质及列车运行带来的动态环境，使电磁波传播特性异于自由空间。基于地铁隧道场景列车移动情况下的仿真结果提取信道参数，得到路径损耗如图4所示。

该场景下，CI(Close-In, reference distance path loss model)路径损耗指数为1.94，略小于自由空间的2，清晰地表明在隧道中信号随距离衰减的速度慢于在自由空间中的衰减。这源于隧道波导效应对自由空间损耗的补偿，隧道壁多次反射引导信号轴向传播，部分抵消自由空间扩散损耗。从损耗分布看：近距离阶段，波导效应未充分建立，低阶多径与直射径叠加不稳定，多径能量相互抵消更为显著，且隧道壁首次反射引入额外损耗，使衰减快于自由空间；中距离阶段，波导效应主导，隧道壁多次反射引导信号轴向传播，补偿扩散损耗，多径与直射径能量叠加使接收功率衰减放缓；远距离阶段，电磁波需多次反射到达接收端，隧道壁非理想反射的累积损耗超过波导效应的补偿能力，导致损耗陡增并偏离拟合曲线。

### 2.2 莱斯 $K$ 因子

莱斯  $K$  因子用于衡量视距(Line Of sight, LOS)路径功率与非视距(None-Line Of Sight, NLOS)多径总功率的比值，反映信道莱斯衰落程度。图5为该场景下的莱斯  $K$  因子统计分布图。

本次仿真中，隧道壁和列车金属表面近似镜面反射，高阶反射机制与列车强反射使NLOS多径数量、能量显著增加。当NLOS多径总功率超过LOS路径功率时， $K$ 因子出现负值。 $K$ 因子最大值为47.07 dB，均值为13.29 dB，

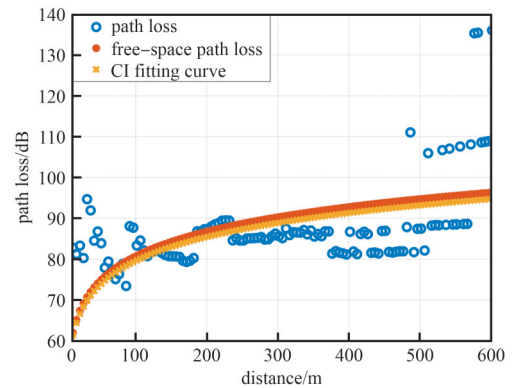


Fig.4 Path loss and fitting results in subway tunnel scenario  
图4 地铁隧道场景路径损耗及拟合结果

中位数 6.99 dB 为正, 说明多数场景下隧道轴向结构仍保障 LOS 径主导。累积概率分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)曲线显示,  $K$  因子在低区间(如  $K < 0$  dB)有一定占比, 随  $K$  值升高, 累计概率上升。这种 LOS 与 NLOS 多径动态竞争的  $K$  因子分布, 源于高频段、高阶反射及列车强反射的综合作用, 为隧道通信系统提供设计依据: 需根据  $K$  因子动态切换调制编码方案, 较大的  $K$  因子可用高阶调制提高信息传输的有效性; 较小的  $K$  因子可用“低阶调制+强纠错”提高信息传输的可靠性。

### 2.3 均方根时延扩展

在基于射线追踪仿真的地铁隧道无线物联网信道特性参数分析中, 均方根时延扩展作为量化信道时间色散程度的关键指标, 具有重要的研究价值。它能够有效反映多径效应导致的信号在时间上的展宽情况, 对于评估信道的传输质量和系统性能至关重要。通过射线追踪仿真可精确获取多径信号的到达时间及功率等信息, 为计算均方根时延扩展提供数据支持, 进而深入剖析地铁隧道信道的时延特性。

本次仿真的均方根时延扩展(图 6)呈现出小时延色散的典型特征: 最大值为 1.4 ns, 中位数仅 0.12 ns, 整体集中在纳秒级区间。由于隧道狭长封闭的几何结构严格限制了多径分量的路径长度差, 即便存在高阶反射, 隧道壁、列车表面等反射面的空间约束, 反射径与直射径的物理长度差异也极小; 同时, 该频段的电磁波波长较短, 进一步压缩了多径分量的时延差, 最终导致多径的时间色散程度极低。这种小时延扩展特性表明多径信号几乎同时到达接收端, 符号间干扰极弱, 为该场景下的高速无线通信提供了有利信道条件, 无需复杂的均衡算法即可保障传输可靠性。

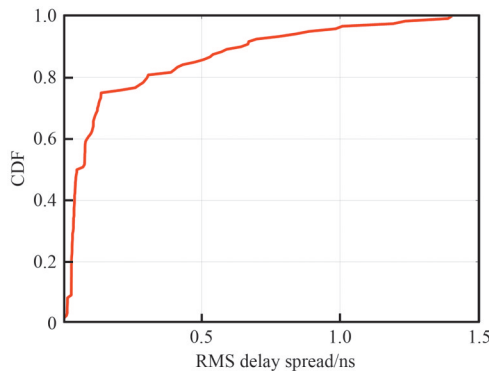


Fig.6 CDF of RMS DS  
图6 均方根时延扩展累积分布

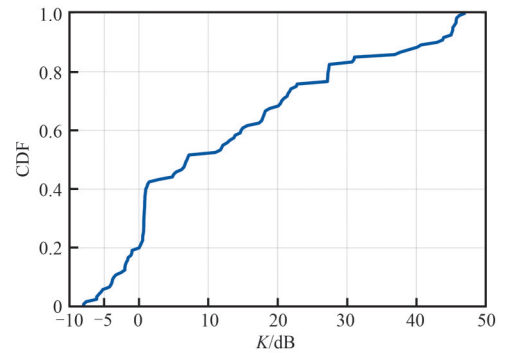


Fig.5 CDF of Rice  $K$ -factor  
图5 莱斯  $K$  因子累积分布

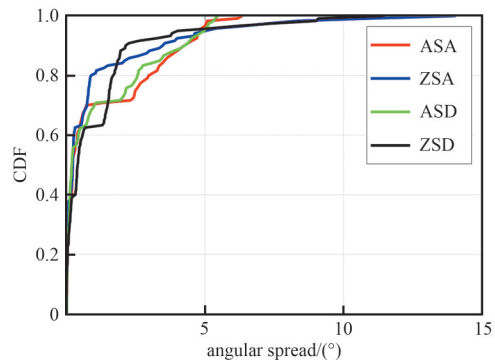


Fig.7 CDF of AS  
图7 角度扩展累积分布

### 2.4 角度扩展

角度扩展是多径信道角度域色散的关键参数, 其包含到达方位角扩展(Azimuth angular Spread of Arrival, ASA)、到达天顶角扩展(Zenith angular Spread of Arrival, ZSA)、离开方位角扩展(Azimuth angular Spread of Departure, ASD)、离开天顶角扩展(Zenith angular Spread of Departure, ZSD), 对信道空间特性理解和天线设计至关重要。射线追踪仿真能获得多径角度信息, 为角度扩展计算与隧道信道角度特征分析提供支撑。

图 7 为本次仿真的角度扩展结果, 从统计特征看, ASA、ZSA、ASD 中位数均约为  $0.2^\circ$ , ZSD 中位数为  $0.41^\circ$ , 多径角度在水平与垂直维度均高度集中。这一特性表明信号能量高度集中于一个极窄的方向上, 天线波束可以非常精准地对准该方向, 从而获得极高的波束成形增益和抗干扰能力。这对于提升车地通信的链路稳定性和覆盖距离极为有利, 且收发天线布局压缩了角度分散范围。ZSA、ZSD 最大值显著高于 ASA、ASD, 因天顶角维度反射易受局部结构影响产生大角度扩散, 而方位角受隧道水平线性约束更强。

这种角度扩展特性对通信系统设计具有重要指导意义: 多数场景下角度高度集中, 天线波束赋形极易聚焦有效传播路径, 可通过窄波束提升接收信噪比; 同时, 空间选择性衰落的影响被大幅削弱, 保障了信道的空间稳定性; 对于天顶角维度偶现的大角度扩展, 可通过设计垂直波束宽度可调节的天线增强覆盖灵活性<sup>[29]</sup>, 应对局部多径的角度分散, 最终为该频段下高可靠、高速率的车地通信提供角度域的有力支撑。

## 2.5 信道特性参数综合分析

本次仿真的所有信道特性参数如表 4 所示。综合表 4 中路径损耗、莱斯  $K$  因子、时延扩展与角度扩展的仿真结果发现，地铁隧道场景下的无线信道呈现出低路径损耗指数、高莱斯  $K$  因子均值、小时延扩展、小角度扩展的典型特征。这些特性之间存在着紧密的内在联系，共同反映了隧道环境的独特传播机制。隧道狭长封闭的几何结构是决定上述信道特性的根本原因，波导效应使电磁波被约束在轴向传播，隧道壁的不断反射部分抵消了自由空间扩散损耗，导致路径损耗指数低于自由空间理论值；同时，这种空间约束严格限制了多径分量的路径差异，使时延扩展集中在纳秒级别，角度扩展也高度集中于轴向。莱斯  $K$  因子的统计特征，均值为 13.29 dB，中位数为 6.99 dB，表明视距传播在多数情况下占据主导，这同样得益于隧道的轴向结构保障了直射路径的稳定性。但  $K$  因子动态范围较大，最大值为 47.07 dB，部分点位出现负值，反映了列车移动和隧道壁反射带来的多径动态变化。

上述信道特性为高阶调制的应用和高阶 MIMO 空间复用提供了有利条件，系统设计时可简化均衡算法，减小波束管理的复杂度。较高的莱斯  $K$  因子均值表明系统可充分利用稳定的视距分量，采用定向天线和波束成形技术进一步提升链路预算。同时， $K$  因子的动态变化要求系统具备自适应调制编码能力，在 LOS 强时采用高阶调制提升频谱效率，在 NLOS 主导时切换至稳健的低阶调制保障可靠性。低路径损耗指数意味着信号在隧道中能够传播更远距离，有利于减少中继节点部署，降低网络建设成本。这些特性共同表明，地铁隧道环境为实现高可靠、低时延、大容量的车地通信提供了有利的信道条件。

## 3 地铁隧道场景 MIMO 系统容量研究

信道特性分析是 MIMO 系统容量研究与优化设计的基础。基于第 2 章获得的信道参数，本章将深入研究地铁隧道场景下 MIMO 系统的传输性能，探讨不同天线阵列结构和传输层数对系统容量的影响。

### 3.1 MIMO 天线阵列部署

为研究阵元天线阵列结构对传输容量的影响，仿真时部署 4 个发射阵列天线与 4 个接收阵列天线，构成 4T4R 的 MIMO 传输系统<sup>[30]</sup>。参照 3GPP 技术报告 TR 38.901 中关于信道模型阵元天线部署的相关要求<sup>[31]</sup>，将发射端和接收端的天线阵列结构分别设置为线型阵列与方型阵列，共 4 种部署方式，且阵列天线之间的间距设为载波中心频率对应的半波长长度。图 8 为隧道内发射天线阵列为线型、列车顶接收天线阵列为方型的组合方式。其中，线型阵列沿隧道纵向布置，与列车运行方向一致。另外，根据 3GPP TS 38.104 所规定的 NR FR1 工作频段，以及该频段下带宽、子载波间隔和资源块(Resource Block, RB)的相互关联<sup>[32]</sup>，选取射线追踪仿真所需的参数。仿真配置具体参数见表 2。

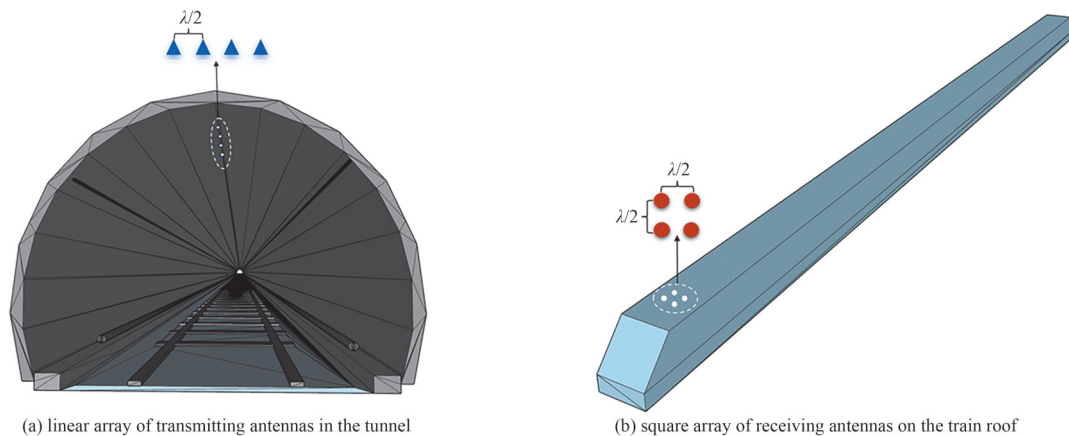


Fig.8 Schematic diagram of Tx/Rx antenna array structure of MIMO system

图 8 MIMO 系统收发端天线阵列结构示意图

表 4 信道参数

Table4 Channel parameters

channel parameter	value	
path loss	$n$	1.94
	$\sigma/\text{dB}$	5.30
Rice $K$ -factor/dB	maximum	47.07
	median	6.99
RMS-DS/ns	maximum	1.40
	median	0.12
ASA	maximum	6.34
	median	0.23
ZSA	maximum	14.02
	median	0.23
ASD	maximum	5.46
	median	0.20
ZSD	maximum	11.49
	median	0.41

### 3.2 MIMO 传输理论与信道相关性

MIMO 技术的核心是通过发射端与接收端的多天线配置, 利用空间域资源实现空间复用, 突破单天线系统的容量瓶颈。1948 年, 香农定理指出, 单天线系统的信道容量受限于带宽  $B$  和接收信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR):

$$C = B \log_2(1 + R_{SN}) \quad (1)$$

实际中, 带宽受频谱资源管制; 发射功率受设备功率、成本及干扰限制, 单天线系统难以满足大流量传输需求。MIMO 系统则通过“空域资源挖掘”解决这一问题: 发射端将高速数据流分解为多个子数据流, 由多根发射天线同时传输; 接收端通过多根接收天线捕获复合信号, 再经信号处理分离出各子数据流并还原为原始高速流。如图 9 所示, 若发射端有  $m$  根天线, 接收端有  $n$  根天线, 系统可利用天线间的空间独立性, 让多路子数据流在相同时间、相同频率上并行传输, 使频谱利用率在理想低相关信道下提升至单天线的  $\min(m, n)$  倍。

图 9 对应的 MIMO 系统的信道传输矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & \cdots & H_{1,m} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & \cdots & H_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n,1} & H_{n,2} & \cdots & H_{n,m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $H_{n,m}$  为第  $m$  个发射天线  $Tx_m$  和第  $n$  个接收天线  $Rx_n$  之间的信道传递函数。

为量化信道相关性, 需对信道矩阵  $\mathbf{H}$  进行奇异值分解, 分解形式为:

$$\begin{cases} \mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{V}^H \\ \mathbf{A} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{\min(m,n)}\} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  非零特征值对应的单位特征向量组成的正交矩阵;  $\mathbf{V}$  为  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$  非零特征值对应的单位特征向量组成的正交矩阵; 对角矩阵  $\mathbf{A}$  由信道传输矩阵  $\mathbf{H}$  的  $\min(m, n)$  个奇异值组成, 其中非零奇异值的数量为信道传输矩阵  $\mathbf{H}$  的秩, MIMO 系统最大可支持并行的独立数据流传输层数即为  $\text{Rank}(\mathbf{H})$ 。奇异值扩展  $v$  为信道矩阵最大奇异值与其余奇异值的比值, 用于衡量信道间的相关性。为分层研究信道相关性, 将奇异值降序排列后,  $v_i$  被定义为同一信道矩阵内最大奇异值与其他奇异值的比值(单位: dB):

$$v_i = 10 \lg \left( \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_i} \right), \lambda_{\max} > \lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_i > \cdots > \lambda_{n-1} \quad (4)$$

$v_i$  越小, 信道间相关性越弱;  $v_i$  越大, 信道间相关性越强。当  $v_i < 20$  dB 时, 信道相关性较弱, 适合复用传输, 此时  $i$  即为该传输点位的 MIMO 最大传输层数。

### 3.3 地铁隧道 MIMO 系统传输性能

#### 3.3.1 信噪比计算

SNR 作为衡量无线信道传输质量的核心指标, 直接影响 MIMO 系统的传输效能, 是 MIMO 系统传输层数选择和调制编码方案(Modulation and Coding Scheme, MCS)匹配的关键依据, 因此需要计算部署不同天线阵列方式时的每层接收信噪比。分层传输时, MIMO 系统每个天线阵元的 RE(Resource Element)级发射功率和接收端阵元天线接收功率的表达式为:

$$P_{RE} = 10 \lg \left( \frac{10^{P_{Tx}/10}}{12N_{RB}L} \right) \quad (5)$$

$$P_{Rx} = -10 \lg \left( \left| \sum \mathcal{F}^{-1}(H(f)) \right|^2 \right) + P_{RE} \quad (6)$$

式中:  $N_{RB}$  为物理资源块数量;  $L$  为 MIMO 系统传输层数;  $\mathcal{F}^{-1}$  为傅里叶逆变换计算;  $H$  为射线追踪仿真中收发阵

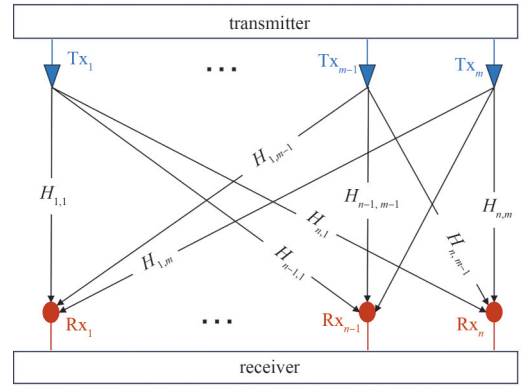


Fig.9 Block diagram of MIMO system  
图9 MIMO 系统框图

元天线的信道传输函数； $P_{RE}$  为发射端天线阵元的 RE 级功率。环境热噪声为：

$$P_{noise} = 10\lg\left(\frac{K \times T}{10^{-3}}\right) + 10\lg(N_{RB} \times 180 \times 10^3) \quad (7)$$

式中： $K$  为玻尔兹曼常数( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K)； $T$  为环境温度。当 MIMO 系统传输层数为  $i$  时，接收信噪比为：

$$R_{SN,i} = P_{s_i} - P_{noise} \quad (8)$$

式中  $P_{s_i}$  为 MIMO 系统传输层数为  $i$  时的接收信号功率(单位：dBm)。

图 10 为地铁隧道场景下 MIMO 系统不同阵列结构 1~4 层传输时对应的接收信噪比统计分布函数图，其平均接收信噪比如表 5 所示。

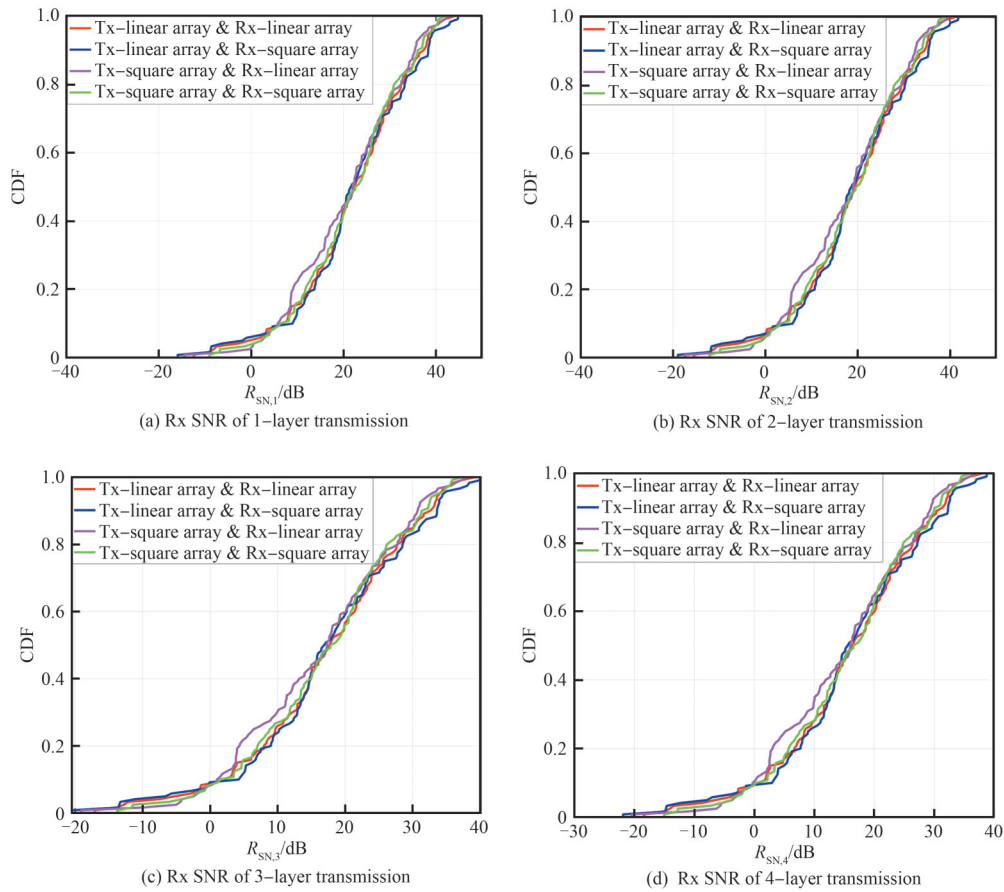


Fig.10 CDF of 4T4R MIMO Rx SNR in metro tunnel scenario

图 10 地铁隧道场景 4T4R MIMO 接收信噪比累积分布

表 5 地铁隧道场景 4T4R MIMO 平均接收信噪比

Table 5 4T4R MIMO average Rx SNR in subway tunnel scenario

antenna element array structure		average received $R_{SN}$ /dB			
transmitter	receiver	layer 1	layer 2	layer 3	layer 4
linear	linear	22.0	19.0	17.3	16.0
linear	square	22.2	19.2	17.5	16.2
square	linear	20.9	17.9	16.2	15.0
square	square	21.7	18.7	17.0	15.7

由上述统计分布函数图以及参数汇总可得，在地铁隧道场景下，MIMO 系统的平均接收信噪比与收发端阵元天线阵列的组合方式存在显著关联，且呈现出以下规律：当发射端固定采用线型阵列时，无论接收端搭配线型还是方型阵列，各传输层的平均接收信噪比均高于发射端为方型阵列的两类组合，说明发射端的天线阵列结构更适合部署线型阵列。当发射端为线型阵列结构时，接收端采用方型比线型阵列结构各层传输信噪比都高 0.2 dB，故接收端更适合部署方型阵列结构。总结为在地铁隧道场景下发射端采用线型，接收端采用方型阵列结

构时 MIMO 系统各层传输信噪比最大。

### 3.3.2 信道传输容量

在地铁隧道场景的 MIMO 系统研究中, 传输容量的计算参考 3GPP TS 38.306 技术规范中 NR(New Radio) 系统的理论模型<sup>[33]</sup>, 简化计算表达式为:

$$C = 12 \times L \times Q_m \times R \times N_{\text{sys}} \times (1 - OH) \tag{9}$$

式中:  $Q_m$  为与调制方式对应的调制阶数;  $R$  为编码率, 由接收信噪比映射的调制与编码策略等级确定<sup>[34]</sup>;  $N_{\text{sys}}$  为系统符号数;  $OH$  为资源开销占比。

依据上述计算方法, 结合地铁隧道场景下不同阵元天线阵列排布方式, 以及每层传输的接收信噪比与 3GPP TS 38.214 规定的 MCS 映射关系, 可对 MIMO 系统的上行峰值传输容量进行计算, 明确天线阵列结构对上行峰值传输容量的影响规律。图 11 和表 6 为地铁隧道场景下不同天线阵列结构在 256QAM 调制方式下的传输容量累积分布函数和平均传输容量汇总。

表 6 地铁隧道场景 4T4R MIMO 平均上行传输容量

Table 6 4T4R MIMO average uplink peak capacity in subway tunnel scenario

antenna element array structure		average capacity/Mbps
transmitter	receiver	256QAM
linear	linear	533.3
linear	square	543.8
square	linear	475.2
square	square	513.5

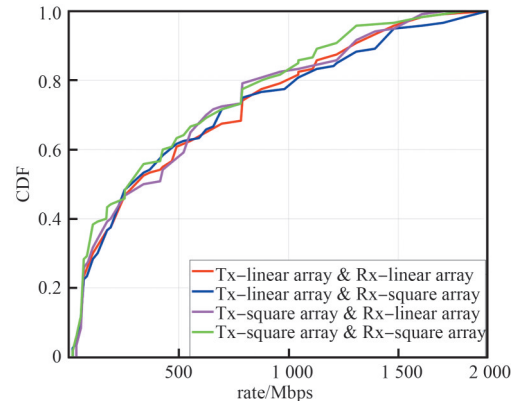


Fig.11 CDF of 4T4R MIMO uplink peak transmission capacity

图 11 4T4R MIMO 上行峰值传输容量

从中可以看出, 在地铁隧道场景下, 4T4R MIMO 系统采用 256QAM 调制方式时, 不同阵列天线结构组合的平均传输容量存在显著差异。其中, 当发射端为线型阵列, 接收端为方型阵列时, 系统平均上行传输容量最高, 达到 543.8 Mbps; 而发射端为方型阵列, 接收端为线型阵列时, 平均传输容量最低, 为 475.2 Mbps。整体上, 发射端采用线型阵列的组合(包括与线型、方型接收阵列的搭配), 其平均上行传输容量普遍优于发射端为方型阵列的组合, 说明在地铁隧道信道环境中, 发射端选用线型阵元天线阵列更有助于提升系统的传输容量。结合表 5 结果可知, 在地铁隧道场景的 5G FR1 频段范围内, MIMO 系统更适合采用发射端线型、接收端方型的阵元天线阵列结构。

本研究实现的 543.8 Mbps 上行传输容量, 为智慧地铁的关键业务提供了坚实的通信能力保障。该容量水平得益于优化的 MIMO 配置, 能够充分满足以下高带宽业务的并发需求: 支持多路 1080p 及以上高清视频的实时、低时延回传, 使控制中心能全面感知列车运行状态与车厢内外环境, 实现精准调度与安全预警; 保障轨道、隧道、列车轴承等海量传感器数据的高并发、高可靠上报, 为基于大数据分析的早期故障诊断与预测性维护提供数据管道; 在优先保障运营安全业务的前提下, 为车载 Wi-Fi、实时信息发布等面向乘客的增值服务提供充裕带宽, 提升出行体验。通过优化获得的高系统容量, 能够直接支撑构建可视、可测、可控的智慧地铁运营生态系统。

### 3.3.3 信道最佳传输层数

在 MIMO 系统中, 最大传输层数由信道秩等物理层约束决定, 代表信道理论上可承载的最多并行数据流数。但它并非最佳传输层数, 因为传输层数增加时, 编码率、调制阶数等会受信道质量制约而降低, 可能出现层数提升但系统传输容量不增反降的情况。最佳传输层数的选取, 需以系统传输容量最大化为目标: 遍历所有小于等于最大传输层数的可能层数, 通过传输容量公式计算每个层数对应的实际容量, 最终选择使传输容量最大的层数作为最佳传输层数。最佳传输层数是层数增益与编码/调制代价间的容量最优平衡点, 而非单纯追求层数最多。

为探究地铁隧道场景下 MIMO 系统传输层数的最优特性, 对发射端与接收端分别采用线型、方型阵列的 4 种组合, 统计分析其最佳传输层数占比, 图 12 展示了该场景下每种天线阵列部署方式下最大传输容量对应的 MIMO 传输层数占比柱状图, 表 7 为最佳传输层数占比的具体参数汇总。

由图 12 和表 7 可得, 在地铁隧道场景的 4T4R MIMO 系统中, 最佳传输层数占比随传输层数增加呈明显上升趋势。其中, 第 4 层的最佳传输层数占比显著高于低层数, 各类阵列组合在第 4 层的最佳占比均超 70%, 而第 1 层的最佳占比普遍低于 10%。发射端线型-接收端方型和发射端方型-接收端线型两种组合方式在 3 层和 4 层的占比和均达到了 94.2%。综上, 地铁隧道场景 5G FR1 频段下 MIMO 系统最佳传输层数可达 4 层。需要说明的是, 上

述关于4层传输为最佳传输层数的结论是在特定的仿真条件下得出的,其普适性存在一定的边界条件。首先,该结论在中高信噪比环境下最为适用。当系统工作于较低SNR区间时,每层信噪比的下降将迫使MCS转向更低阶,此时降低传输层数(如采用2层或3层)往往能获得更高的综合传输容量。其次,结论基于半波长天线间距的假设,若阵元间距显著减小,会增强信道相关性,降低信道有效秩,从而可能无法支撑4层并行传输。最后,本研究的隧道场景为标准直线隧道。在弯曲隧道或截面形状和尺寸发生变化的隧道中,波导效应与多径结构将发生改变,进而可能影响最佳传输层数的选择。因此,在实际工程应用中,应将4层传输视为一个在典型条件下的优选配置,并根据实际的SNR分布、设备集成要求与隧道结构进行动态调整与优化。

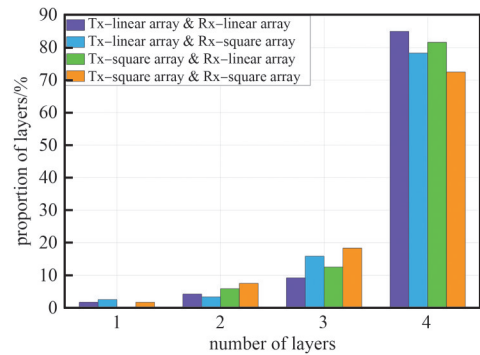


Fig.12 Comparative bar chart of 4T4R MIMO optimal layers  
图12 4T4R MIMO最佳传输层数占比柱状对比图

表7 4T4R MIMO 最佳传输层数占比

Table7 Proportion of optimal layers in 4T4R MIMO

antenna element array structure		proportion of optimal transmission layers/%			
transmitter	receiver	layer 1	layer 2	layer 3	layer 4
linear	linear	1.7	4.2	9.1	85.0
linear	square	2.5	3.3	15.8	78.4
square	linear	0	5.8	12.5	81.7
square	square	1.7	7.5	18.3	72.5

## 4 结论

本文围绕智慧地铁无线物联网的信道与容量问题,聚焦地铁隧道列车移动场景,在2.6 GHz频段采用射线追踪仿真分析了该场景下无线信道的路径损耗、莱斯 $K$ 因子、时延扩展及角度扩展等特性,揭示波导效应和多径传播对信道的作用机制:路径损耗CI指数为1.94;莱斯 $K$ 因子最大为47.07 dB,均值为13.29 dB;均方根时延扩展最大1.4 ns且整体集中于纳秒级;角度扩展多径高度集中于轴向。同时,4T4R MIMO系统容量仿真显示,发射天线阵列线型+接收天线阵列方型的部署方式更契合隧道空间特性。采用256QAM调制时,其每层平均接收信噪比较其他阵列组合提升0.2~1.1 dB,系统平均上行传输容量最高达543.8 Mbps,相较其余阵列结构提升10.5~68.6 Mbps;最佳传输层数分布呈高层占比显著更高的规律,4层传输时占比超70%,优势最突出。上述研究为智慧地铁隧道列车移动场景下的无线物联网信道建模提供了场景化参数依据,也为MIMO系统天线部署、传输层数选择及容量优化提供了关键参考。未来的研究将进一步探索列车运动对信道带来的时延扩展变化,以及隧道不同结构对信道的影响,致力于探索更精确的信道建模方法。此外,还将探索人工智能技术在信道预测与自适应传输优化中的应用,进一步提升轨道交通系统在复杂环境下的通信性能。

### 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] 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.
- [3] 方赞. 智慧城市背景下地铁与城际铁路一体化研究[J]. 新城建科技, 2025,34(7):72-74. (FANG Yun. Research on the integration of subways and intercity railways under the background of smart city[J]. New Urban Construction Technology, 2025, 34(7):72-74.)
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] ZANG Xuejian, HE Ruisi, YANG Mi, et al. Narrowband channel measurements and statistical characterization in subway tunnels at 1.8 and 5.8 GHz[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024,73(7):10228–10240. DOI:10.1109/TVT.2024.3368548.
- [7] LI Jinxing, ZHAO Youping, ZHANG Jing, et al. Radio channel measurements and analysis at 2.4/5 GHz in subway tunnels[J]. *China Communications*, 2015,12(1):36–45. DOI:10.1109/CC.2015.7084382.
- [8] 宋坤. 隧道环境下无线信道特性仿真分析[D]. 北京:北京交通大学, 2017. (SONG Kun. Simulation and analysis of radio channel characteristic in tunnel[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2017.)
- [9] 陈旭敏, 王大庆, 潘韵天, 等. LTE-M 在地铁隧道中的非稳态 MIMO 信道的几何建模[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2018, 24(6): 888–899. (CHEN Xumin, WANG Daqing, PAN Yuntian, et al. Geometrical modeling of non-stationary LTE-M MIMO channel in subway tunnel[J]. *Journal of Shanghai University(Natural Science Edition)*, 2018,24(6):888–899.) DOI:10.12066/j.issn.1007–2861.1858.
- [10] 纪文莉, 钱竞元, 郑国莘. 天线极化和阵元间距对地铁隧道 MIMO 性能的影响[J]. *电子测量技术*, 2023,46(10):178–183. (JI Wenli, QIAN Jingyuan, ZHENG Guoshen. Antenna polarization and array spacing on MIMO performance influence in subway tunnel[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023,46(10):178–183.) DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211088.
- [11] VALDESUEIRO J A, IZQUIERDO B, ROMEU J. MIMO channel measurement campaign in subway tunnels[C]// *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*. Barcelona, Spain:IEEE, 2010:1–4.
- [12] QIAN Zhongyu, LI Zhe'ao, ZHOU Wenqi, et al. 6G wireless channel scenario extensions and characteristics analysis for urban environment[C]// *2023 IEEE the 97th Vehicular Technology Conference*. Florence, Italy: IEEE, 2023: 1–6. DOI: 10.1109/VTC2023–Spring57618.2023.10200509.
- [13] 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.ejors.20241781.
- [14] FENG Yichen, WANG Rui, WANG Xiaodong, et al. A 3D geometry-based stochastic model for mmwave massive MIMO subway train channels in tunnel scenarios[J/OL]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025. DOI:10.1109/TWC.2025.3618938.
- [15] 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.
- [16] 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 Signalling & Communication*, 2024,60(4):49–58.) DOI:10.13879/j.issn.1000–7458.2024–04.23276.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 胡彦丰, 王东明, 梁楚龙, 等. 无蜂窝大规模 MIMO 中的大规模随机接入[J]. *中兴通讯技术*, 2024,30(1):26–32. (HU Yanfeng, WANG Dongming, LIANG Chulong, et al. Massive random access in cell-free massive MIMO system[J]. *ZTE Technology Journal*, 2024,30(1):26–32.) DOI:10.12142/ZTETJ.202401006.)
- [20] 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.
- [21] 张树韬, 薛焱, 史清江, 等. 无线网络孪生中的统计信道建模方法: 现状与前沿[J]. *中兴通讯技术*, 2023,27(2):26–31. (ZHANG Shutao, XUE Ye, SHI Qingjiang, et al. Statistical channel modeling methods in wireless network twinning: current status and frontiers[J]. *ZTE Technology Journal*, 2023,27(2):26–31.) DOI:10.12142/ZTETJ.202303006.
- [22] 马子昂. 基于射线跟踪技术的地铁隧道无线信号覆盖研究[D]. 北京:北京交通大学, 2022. (MA Zianguang. Ray-tracing based wireless coverage analysis for subway tunnels[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2022.)

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] GLASSNER A S. An introduction to ray tracing[M]. London, UK: Academic Press Ltd., 1989.
- [26] MCKOWN J W, HAMILTON R L. Ray tracing as a design tool for radio networks[J]. IEEE Network, 1991,5(6):27–30. DOI: 10.1109/65.103807.
- [27] DEGLI-ESPOSTI V, FUSCHINI F, VITUCCI E M, et al. Measurement and modelling of scattering from buildings[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007,55(1):143–153. DOI:10.1109/TAP.2006.888422.
- [28] 杨琪, 单馨漪, 冯敬然, 等. 智能高铁铁路枢纽场景 5G-R 信道与传播特性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(8): 747–753. (YANG Qi, SHAN Xinyi, FENG Jingran, et al. Analysis of 5G-R channel and propagation characteristics for smart high-speed railway hub scenario[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(8):747–753.) DOI:10.11805/TKYDA2022071.
- [29] 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.
- [30] WANG Hailun, LIN Siyu, DING Jianwen, et al. MIMO channel spatial correlation and capacity in tunnel entrance scenarios[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024,23(1):319–323. DOI:10.1109/LAWP.2023.3323822.
- [31] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[R]. TR 38.901 Release 18, 2024.
- [32] 3GPP. TS 38.104 Release 18 Base Station(BS) radio transmission and reception[S]. 2024-01-19.
- [33] 3GPP. TS 38.306 Release 18 User Equipment(UE) radio access capabilities[S]. 2024-02-01.
- [34] 3GPP. TS 38.214 Release 18 Physical layer procedures for data[S]. 2024-02-01.

#### 作者简介:

张晨阳(1991-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为物联网. email:zhangchenyang0801@bjsubway.com.

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.

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

官科(1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.