

文章编号: 2095-4980(2022)08-0747-07

智能高铁铁路枢纽场景 5G-R 信道与传播特性分析

杨琪¹, 单馨漪^{2a,2b}, 冯敬然¹, 郭兴海^{2a,2b}, 何丹萍^{2a,2b}

(1. 中国铁路设计集团有限公司 电化电信工程设计研究院, 天津 300308; 2. 北京交通大学 a. 轨道交通控制与安全国家重点实验室; b. 宽带移动信息通信铁路行业重点实验室, 北京 100044)

摘要: 为构建现代综合交通运输体系, 支撑我国高速铁路向智能化方向发展, 基于第五代移动通信技术(5G)的铁路 5G 专用移动通信(5G-R)系统将成为铁路智能联接的首选。2.1 GHz 频段有望承载 5G-R 系统, 支持铁路产业不断涌现的新业务。高速铁路枢纽场景是列车行车指挥和客货调度的中枢, 具有业务量大、业务类型复杂等特点, 对铁路通信系统提出了更高的要求。本文以厦门北站铁路枢纽为研究场景, 基于电子地图建立三维场景模型, 采用射线跟踪方法, 仿真并分析场景的信道与传播特性, 并提出了通信系统设计的相关建议。本文的研究结果将有助于为铁路枢纽场景 5G-R 系统设计与优化提供参考, 提高铁路枢纽场景无线覆盖质量。

关键词: 5G-R; 射线跟踪; 信道仿真; 传播特性

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022071

Analysis of 5G-R channel and propagation characteristics for smart high-speed railway hub scenario

YANG Qi¹, SHAN Xinyi^{2a,2b}, FENG Jingran¹, GUO Xinghai^{2a,2b}, HE Danping^{2a,2b}

(1. Electrification & Telegraphy Engineering Design Research Department, China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China; 2a. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety; 2b. Key Laboratory of Railway Industry of Broadband Mobile Information Communications, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to build the modern integrated transport system and support the development of China's high-speed railways towards intelligence, based on the fifth-generation mobile communication technology(5G), the 5G for railways(5G-R) system will become the preferred choice for intelligent rail connectivity. The 2.1 GHz band is expected to host the 5G-R system to support new services that are emerging in the railway industry. The high-speed railway hub scenario with a large volume of complex types of services is the center for train operation command and the dispatching of passengers and the cargo. Thus, it places higher demands on the railway communication system. In this paper, the railway hub of Xiamen North Station is taken as the research scenario. A 3D model is built based on the electronic map. The Ray-Tracing(RT) method is adopted to simulate and analyze the channel and propagation characteristics of the scenario. Relevant suggestions are proposed for the design of the communication system. The results of this paper will help to provide a reference for the design and optimization of 5G-R systems for railway hub scenarios, and improve the quality of wireless coverage in railway hub scenarios.

Keywords: 5G-R; Ray-Tracing; channel simulation; propagation characteristics

智能铁路是构建现代综合交通运输体系的重要部分, 是第五代移动通信(5G)与交通运输深度融合的重要产业。铁路 5G 专用移动通信(5G-R)系统的建设是落实国家 5G 新基建战略部署的重要举措, 也是确保铁路 5G 智能联接, 实现智能铁路各要素全面感知和融合处理的保障。2020 年 8 月, 国铁集团发布《关于加快推进 5G 技术铁路应用发展的实施意见》, 明确提出推进铁路综合数字移动通信系统(Global System for Mobile Communications-Railway, GSM-R)向 5G-R 系统演进, 以支撑将在智能铁路开展的实时 4K/8K 超高清视频传输、大规模传感器应

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2022-04-21

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题资助项目(2021A240802)

用以及列车远程维护等 Gb/s 级数据速率的服务^[1]。准确的信道模型是 5G-R 网络设计与优化的基础，可为通信系统设计时的网络部署、承载能力、场强和服务质量提供技术参考。近年来，国内外针对高速铁路的不同场景、不同频段进行了大量的信道测量与建模工作。文献[2]中测量并分析了 1.89 GHz 和 2.6 GHz 频段下高铁场景的路径损耗、莱斯 K 因子和时延扩展等信道参数；文献[3]对 2.15 GHz 下的高速铁路典型场景中的高架桥、高路堑、矮路堑等进行了实地测量，提出了一种适用于高速列车场景信道模型。文献[4]采集了铁路场景 5G 专网数据，建立了铁路 5G 专网下的大尺度衰落模型。文献[5]利用射线跟踪技术，仿真研究了 3.5 GHz 下城市轨道交通车站 5G 无线系统的信道特性，分析了路径损耗、均方根时延扩展和角度扩展等信道参数。当前针对铁路枢纽场景 5G-R 信道的研究仍然较少，而 Hata、COST-231、Okumura 等经典信道模型更适用于陆地低速移动无线传播环境，对于高速移动的高铁场景并不适用。作为铁路网中行车指挥和客货运设备运转的支撑^[6]，在铁路枢纽场景开展铁路 5G-R 的信道建模的研究是必要的。本文采用高性能射线跟踪平台 CloudRT 获取场景的信道冲激响应。CloudRT 是基于射线跟踪技术的高性能仿真云平台，可对场景电波传播情况进行准确、高效的仿真^[7]。用户可通过 <http://www.raytracer.cloud/> 访问平台，导入环境模型、天线配置，设置电波传播机制和频率等参数，通过仿真获取包含收发机位置的信道冲激响应和多径信息，并根据以上信息进行进一步的信道特性建模与分析。

本文以 2.1 GHz 频段为中心频段对新福厦高铁厦门北站铁路枢纽场景进行室外动态仿真，对其路径损耗和莱斯 K 因子进行分析。首先，在 5 m 分辨率的电子地图里融合厦门北三维场景模型，并对不同物体赋予相应的材料电磁参数，使其能够精准还原现实场景中的电波传播特性。之后确定传播参数和收发信机部署方式，利用 CloudRT 平台进行仿真，基于仿真结果进行分析，总结场景的路径损耗和莱斯 K 因子特性。

1 RT 仿真配置

1.1 场景三维建模

图 1 为厦门北站铁路枢纽场景的电子地图，图 2 为利用 SketchUp 搭建的厦门北站铁路枢纽场景三维模型，材料的电磁参数详见表 1，地物数据由 Planet 电子地图呈现。

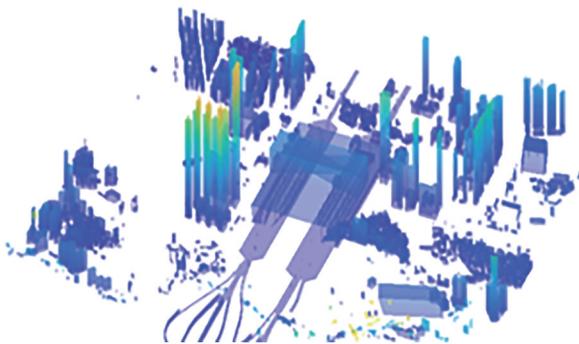


Fig.1 E-map of the railway hub scenario at Xiamen North Station
图 1 厦门北站铁路枢纽场景电子地图

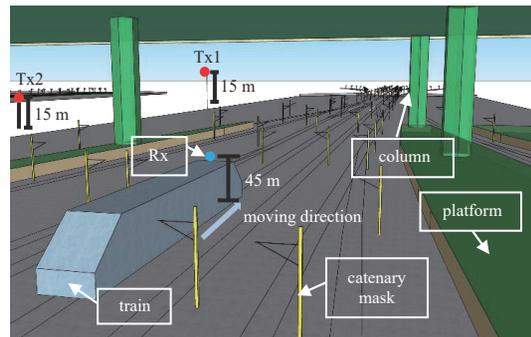


Fig.2 3D model of the railway hub scenario at Xiamen North Station
图 2 厦门北站铁路枢纽场景三维模型

表 1 RT 仿真中的材料电磁参数^[8]

Table 1 EM property of materials in RT simulations^[8]

material	objects	relative permittivity	loss tangent
metal	high speed train	1.00	10^7
concrete	building, ground, station base, column	1.06	0.65
vegetation	vegetation	29.12	0.278
tiles	platform and catenary mask in station	1.85	0.07
brick	subgrade	3.75	0.091
organic glass	station	10.00	0.43

Planet 电子地图主要包括建筑物高度及轮廓 (buildings) 数据、地貌覆盖类型 (clutter) 数据与地面高程 (heights) 数据，其示意图分别如图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 所示。其中 buildings 数据用矢量和栅格两种数据模型描述各种建筑物的分布情况及建筑物的高度。在此场景中无建筑处栅格值为 0，最高建筑物栅格值为 187 m；clutter 数据用栅格模型描述地面覆盖类型。根据无线电波传播过程中各种地面覆盖类型的影响以及铁路设施覆盖范围，此场景中主要有建筑群、道路面、铁路中的路基等覆盖类型；heights 数据用栅格模型描述地面海拔高度变化，一个栅格像元对应地面范围是 5 m × 5 m。此场景中平均海拔高度为 23.17 m。

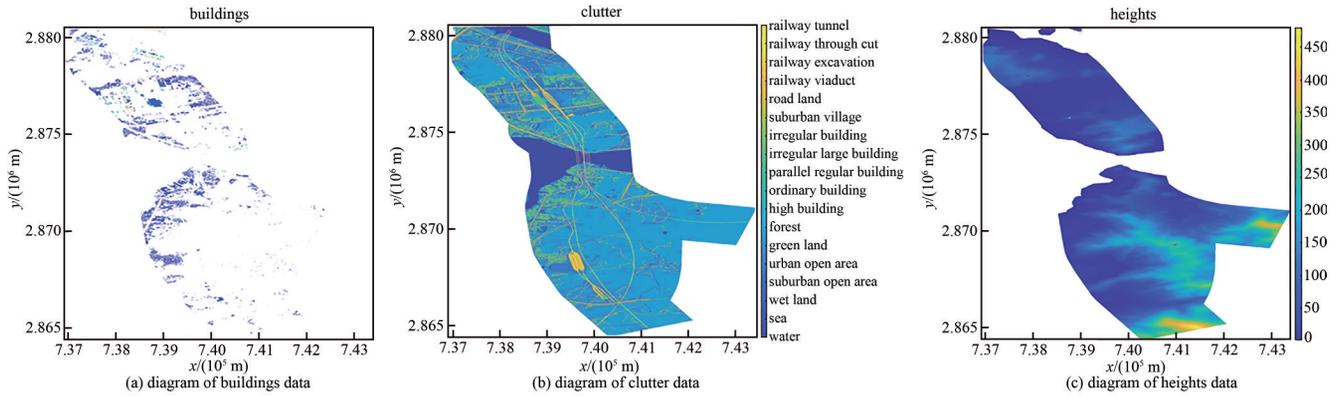


Fig.3 Planet electronic map data schematic of Xiamen North Station
图 3 厦门北站 Planet 电子地图数据示意图

1.2 传播机制

在铁路枢纽场景下，主要的传播机制包括直射、反射、散射及透射。表 2 总结了仿真使用的传播模型及其计算方法。

表 2 传播模型

Table2 Propagation model

propagation mechanism	geometry calculation	electric field calculation
LOS	free space LOS	Friis equation
reflection	Snell's law with image-based method ^[8]	Fresnel equation ^[9]
transmission	Snell's law for transmission through slab ^[10]	He's model ^[10]
scattering	directive scattering ^[11]	scattering coefficient and equivalent roughness ^[11]

1.3 链路机制

针对 2.1 GHz 频段，带宽为 100 MHz 的信道，收发信机均采用全向垂直极化天线，发射功率为 0 dBm。链路基本参数配置由表 3 给出。

表 3 链路配置

Table3 Link configuration

center frequency/GHz	bandwidth/MHz	Tx antenna	Rx antenna	Tx transmitting power/dBm	Tx height/m	Rx height/m
2.1	100	omnidirectional	omnidirectional	0	38	27.5

如图 4 所示，分别在离车站远处(case1)和近处(case2)部署发射机(Transmitter, Tx)，当发射机离车站近时，通常无线电波穿过车站的侧面(边长较长的一面)；当发射机离车站较远时，电波传播的方向沿着轨道方向，主要穿过车站正面(边长较短的一面)。发射机海拔高度为 38 m，实际距离地面高度为 15 m；接收机(Receiver, Rx)位于列车车头顶部，海拔高度为 27.5 m，实际距离地面高度为 4.5 m，随列车移动，运行速度为新福厦高速铁路设计时速 350 km/h，运行方向为驶出厦门北站方向，具体如图 4 标红箭头方向所示。

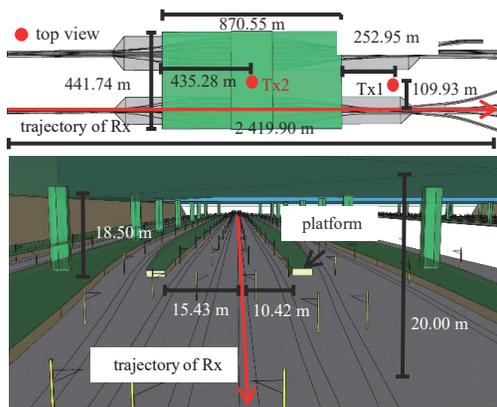


Fig.4 Scenario model schematic
图 4 场景模型示意图

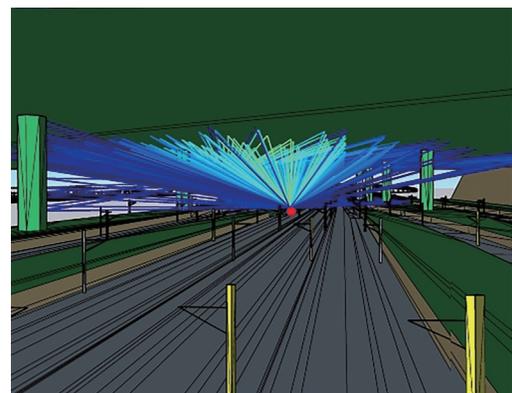


Fig.5 One snapshot of RT simulations
图 5 RT 仿真中的一个快照

RT 仿真中的某一快照如图 5 所示, 其中不同颜色的线条为不同接收功率的多径。

2 铁路枢纽场景电波传播特性研究

2.1 路径损耗

将场景分为视距(Line of Sight, LOS)区和非视距(Non-Line of Sight, NLOS)区, 非视距区是指没有直射径, 但有透射径和其他反射和散射径的区域。

路径损耗指空间中射线传播时由传输功率的扩散和信道的传输特性引起的损耗, 反映了接收信号在一定范围内平均功率的变化。使用近距离(Close-In, CI)自由空间相对距离路径损耗模型^[12]的路径损耗(Path Loss, PL)计算公式如下:

$$PL(f_c, d)[\text{dB}] = FSPL(f_c, d_0)[\text{dB}] + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_{CI}^2 \quad (1)$$

式中: n 表示路径损耗指数(Path Loss Exponent, PLE); d 表示发射机与接收机之间的距离, 单位是 m; χ_{CI} 是均值为 0, 标准差为 $\sigma(\text{dB})$ 的高斯随机变量。自由空间路径损耗(Free Space Path Loss, FSPL)的表达式如下:

$$FSPL(f_c, d_0)[\text{dB}] = 20 \lg\left(\frac{4\pi d_0 f_c}{c}\right) \quad (2)$$

式中: d_0 是相对 CI 距离; 光速 c 取 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; f_c 是载波频率, 单位是 Hz。

由于仿真基本上发生在平原区域, 其特征接近于 Hata 模型中对开放区域环境的描述, 因此扩展 Hata 模型^[13]中的开放区域环境可以用作预测路径损耗的参考。通过文献[14]和文献[15]中的大量测量结果比较, Hata 模型的开放环境已被验证适用于铁路环境。在文献[16]中, Hata 模型也被推荐为列车间通信的路径损耗模型。

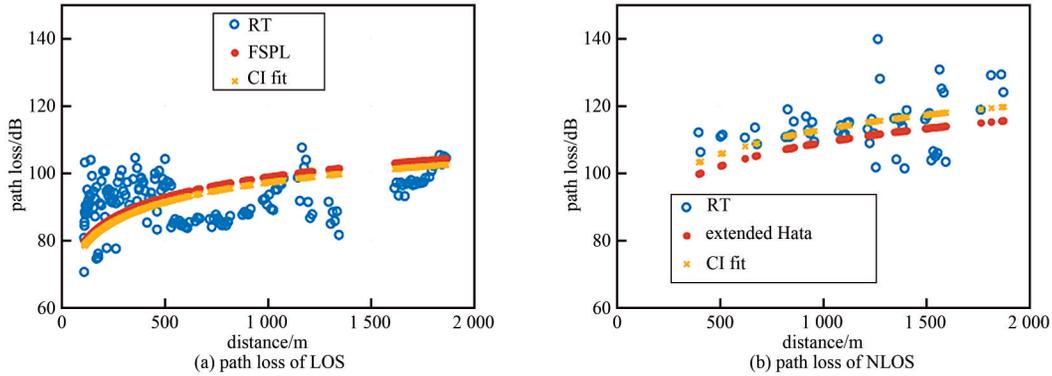


Fig.6 Path loss of case1
图 6 case1 的路径损耗

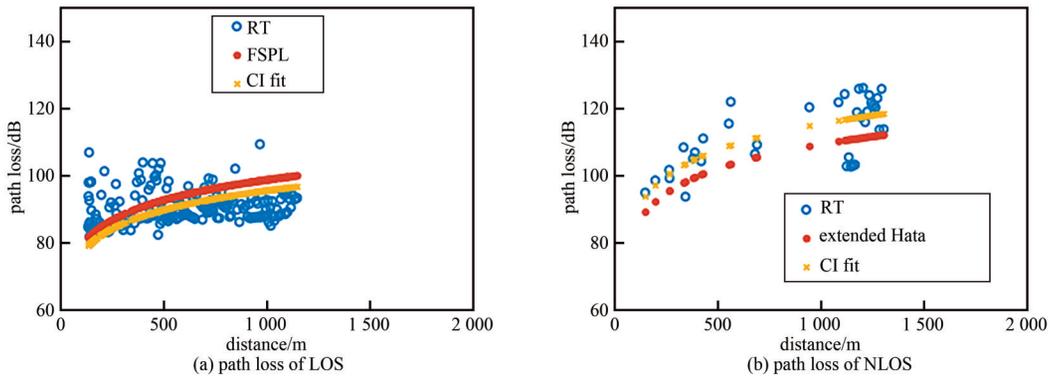


Fig.7 Path loss of case2
图 7 case2 的路径损耗

分别基于 CI 相对距离路径损耗模型对 case1、case2 的 LOS 与 NLOS 区路径损耗结果进行拟合, 如图 6、7 所示。根据图 6(a)和图 7(a), 两种情况下 LOS 区的路径损耗都接近于自由空间路径损耗, 但因周围散射体反射和散射了的多径使得整体的路径损耗略小于自由空间路径损耗。从图 6(b)和图 7(b)可以看出, 由于不存在直射径, 两

种情况下 NLOS 区的路径损耗都远大于自由空间损耗。根据《铁路 GSM-R 系统运用质量标准》中的 GSM-R 无线场强覆盖标准要求：对于承载话音及非列控数据业务、接收天线位于列车顶部、列车运行速度未限定的情况，仍需满足 95% 以上的时间、地点最小接收电平大于 -98 dBm，而本文中单一的 0 dBm 发射功率的全向天线发射机部署无法满足此要求。

仿真得出的路径损耗参数由表 4 给出。因雨篷、立柱、牵引架等物体的阻挡，NLOS 区的路径损耗系数 n 值大于 LOS 区的 n 值；NLOS 条件下的阴影衰落标准差 σ 大于 LOS 条件下的，说明信号幅值波动较大。

表 4 路径损耗参数
Table4 Path loss parameters

	LOS		NLOS	
	case1(Tx1)	case2(Tx2)	case1(Tx1)	case2(Tx2)
max/dB	107.58	109.24	136.51	125.59
min/dB	76.00	82.02	90.54	93.27
mean/dB	91.78	90.67	110.68	111.93
median/dB	92.97	89.78	111.63	113.27
n	1.95	1.89	2.47	2.54
σ /dB	4.01	5.15	7.32	7.20

对于 LOS 区，针对相较于自由空间路径损耗的额外损耗(extra loss compared to FSPL)这一指标具体数值由表 5 给出。case1 的均值和中值均大于 case2，产生此现象的主要原因是当接收机已穿过车站而视距仍得以保持时，case1 电波由正面穿过整个车站，车站的雨篷及车站内大量散射体会遮挡部分的第一菲涅尔区，从而削弱视距传播的能量。

表 5 LOS 区相较于自由空间路径损耗的额外损耗
Table5 Extra loss compared to FSPL of LOS

extra loss compared to FSPL/dB	case1(Tx1)	case2(Tx2)
max	23.16	24.82
min	-19.81	-13.79
mean	-0.66	-2.44
median	-0.85	-4.04

对于 NLOS 区，针对相较于扩展 Hata 模型路径损耗的额外损耗(extra loss compared to extended Hata)这一指标具体数值由表 6 给出。case1 的均值和中值均小于 case2，产生此现象的主要原因是当接收机位于车站内部时，电波由正面穿过所经过的车站内散射体数量少于从侧面穿过时的，更少的物体阻挡使其路径损耗更小。

表 6 NLOS 区相较于扩展 Hata 模型路径损耗的额外损耗
Table6 Extra loss compared to extended Hata model of NLOS

extra loss compared to FSPL/dB	case1(Tx1)	case2(Tx2)
max	28.22	18.64
min	-11.21	-8.13
mean	4.02	5.93
median	4.01	6.78

两种情况下的路径损耗预测模型均方根误差由表 7 给出。CI 模型两种情况下的均方根误差(5.57 dB、5.02 dB)小于扩展 Hata 模型下的(8.54 dB、9.18 dB)，CI 模型能够更准确地预测高速移动场景下的路径损耗。

表 7 两种情况下的均方根误差
Table7 RMSE of models in two cases

case	CI/dB	extended Hata/dB
case1	5.57	8.54
case2	5.02	9.18

2.2 莱斯 K 因子

莱斯 K 因子的定义为信号功率最强的多径的功率同其余多径的功率之和的比值，反映了无线电波传播环境中小尺度衰落的严重程度， K 值越小，表示衰落越严重。莱斯 K 因子计算公式如下：

$$K(s) = \frac{P_d(s)}{\sum_{i=1}^{N_r} P(s,i) - P_d(s)} \quad (3)$$

式中： $K(s)$ 表示第 s 个快照的莱斯 K 因子； N_r 表示多径的总数； $P(s,i)$ 表示多径 i 的功率； $P_d(s)$ 表示信号功率最强的多径的功率。

图 8(a)、(b) 分别给出了 case1、case2 的莱斯 K 因子的累积分布 (Cumulative Distribution Function, CDF) 图, 表 8 给出两种情况下的莱斯 K 因子仿真数据。

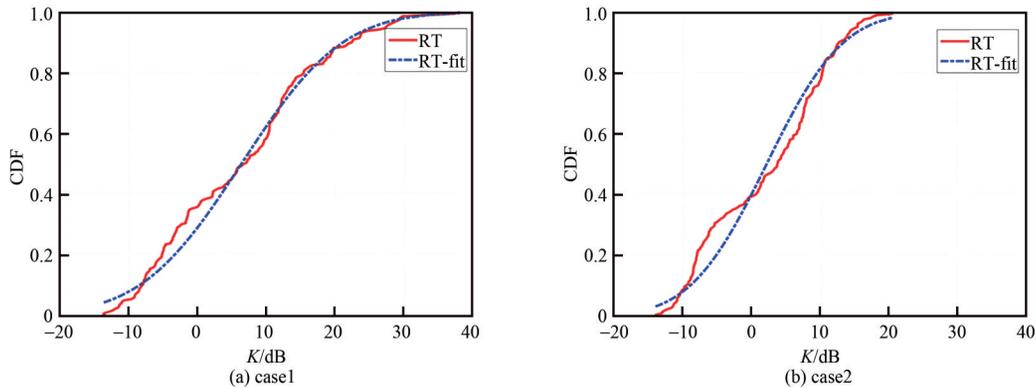


Fig.8 CDF of Rician K factor

图 8 莱斯 K 因子累积分布

表 8 莱斯 K 因子仿真数据

Table 8 Simulation data for Rician K factor

Rician K factor/dB	case1	case2
max	38.00	20.66
min	-13.66	-14.04
mean	6.33	2.94
median	6.77	3.84
std	11.47	8.74

case2 的莱斯 K 因子中值、均值和标准差均小于 case1, 这是因为当接收机在车站内时, 较之从正面穿过车站, 电波从侧面穿过时会经过更多的立柱、牵引架以及相邻轨道和列车等散射体, 产生更多的反射、散射径, 形成更为复杂的多径传播环境。

在 1.89 GHz 频段下, 列车行驶在城郊场景中, 莱斯 K 因子均值为 3.20 dB, 在车站场景中为 4.98 dB, 在平原场景中为 8.56 dB^[17]。而在本文的研究中, case1 条件下铁路枢纽场景的莱斯 K 因子均值为 6.33 dB, 高于车站场景, 低于平原场景。这是因为, 较之车站内部存在大量散射体且相对封闭的结构, 铁路枢纽场景更为开阔; 而较之空旷平原, 铁路枢纽场景的传播环境中存在的散射体更为丰富, 多径分量更强。case2 的条件下的莱斯 K 因子均值为 2.94 dB, 其传播环境更加类似于城郊环境。在 930 MHz 频段, 发射机部署类似于 case1 的条件下, 莱斯 K 因子均值为 4.21~5.41 dB, 发射机部署类似于 case2 的条件下, 莱斯 K 因子均值为 1.39~3.44 dB^[18], 本文研究与之基本相符。

3 结论

本文利用高性能射线跟踪仿真平台 CloudRT 对厦门北站 2.1 GHz 频段电波传播进行仿真, 并将场景分为 LOS 区和 NLOS 区, 分析天线在两种位置情况下的路径损耗参数和莱斯 K 因子。由于散射体反射和散射的多径, case1、case2 在 LOS 区的路径损耗整体略小于自由空间路径损耗。case1 在 LOS 区和 NLOS 区的路径损耗中值和均值均大于 case2, 是因为 case1 电波由正面穿过整个车站, 散射体会遮挡部分的第一菲涅尔区, 从而削弱直射径传播的能量; 当接收机位于车站内部时, 阻挡电波正面穿过的散射体数量小于从侧面穿过的数量, 使 case1 在 NLOS 区的路径损耗更小。case2 的莱斯 K 因子均值小于 case1, 说明发射机部署在离车站较近位置时衰落更严重, 因此铁路枢纽场景下的发射机部署应尽量避免离车站过近。发射机最理想的位置, 应该能确保车站正好落在其所产生的小区的中部。当发射机离车站近时, 哪条轨道承载列车都会对电波传播的视距条件造成影响, 所以当发射机离车站近时, 建议在车站两个侧面外都安装发射机, 这样不论列车在哪条轨道上都等于是在近轨道上。

参考文献:

- [1] AI Bo, MOLISCH A F, RUPP M, et al. 5G key technologies for smart railways[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6):856-893.
- [2] ZHOU Tao, CHENG Tao, Salous S, et al. LTE-based channel measurements for high-speed railway scenarios[C]// 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, CA, USA: IEEE, 2015:1-6.
- [3] YANG Jingya, AI Bo, Salous S, et al. An efficient MIMO channel model for LTE-R network in high-speed train environment[J].

- IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019,68(4):3189–3200.
- [4] 李岸宁,李辉,梁轶群. 铁路 5G 专网大尺度信道建模[J]. 铁道标准设计, 2022,66(8):1–6. (LI Anning,LI Hui,LIANG Yiqun. Large scale channel modeling for railway 5G dedicated network[J]. Railway Standard Design, 2022,66(8):1–6.)
- [5] TANG Pei. Channel characteristics for 5G in urban rail station at 3.5 GHz based on ray-tracing[C]// 2021 7th International Conference on Computer and Communications. Chengdu,China:IEEE, 2021:2264–2268.
- [6] 蹇峡. 西安铁路枢纽通信骨干传输网的建设研究[J]. 铁道标准设计, 2016,60(10):122–125. (JIAN Xia. Research on backbone communication transmission network construction of Xi'an railway hub[J]. Railway Standard Design, 2016,60(10): 122–125.)
- [7] 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.
- [8] STAVROU S,SAUNDERS S R. Review of constitutive parameters of building materials[C]// The 12th International Conference on Antennas and Propagation. Exeter,UK:IET, 2003:211–215.
- [9] GLASSNER Andrew S . An introduction to ray tracing[M]. San Francisco:Morgan Kaufmann, 1989.
- [10] HE Danping,LIANG Guixuan,PORTILLA J,et al. A novel method for radio propagation simulation based on automatic 3D environment reconstruction[C]// 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation. Prague,Czech Republic:IEEE, 2012:1445–1449.
- [11] DEGLI-ESPOSTI V,FUSCHINI F,VITUCCI E M,et al. Measurement and modelling of scattering from buildings[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2007,55(1):143–153.
- [12] GEORGE R M,THEODORE S R,SUN S,et al. Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks[J]. IEEE Access, 2015:2388–2424.
- [13] Manual/propagation models/extended Hata: Hata-and-Hata-SRD-implementation[EB/OL]. [2022-04-21].<http://tractool.seamcat.org/wiki/Manual/PropagationModels/ExtendedHata>.
- [14] PRASAD M V S N,RATNAMLA K,DALELA P K. Mobile communication measurements along railroads over eastern-Indian rural regions[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2010,52(5):131–141.
- [15] PRASAD M V S N,DALELA P,CHAITANYA M. Experimental investigation of land mobile prediction methods and modeling of radio planning tool parameters along Indian rail road rural zones[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2008: 285763-1–285763-10.
- [16] GARCIA C R,LEHNER A,STRANG T,et al. Channel model for train to train communication using the 400 MHz band[C]// VTC Spring 2008-IEEE Vehicular Technology Conference. Marina Bay,Singapore:IEEE, 2008:3082–3086.
- [17] 周涛,李华玉,秦鑫彤,等. 高速铁路信道小尺度衰落与非平稳特性研究[J]. 铁道学报, 2019,41(4):88–95. (ZHOU Tao,LI Huayu,QIN Xintong,et al. Research on small-scale fading and non-stationary properties for high-speed railway channels[J]. Journal of the China Railway Society, 2019,41(4):88–95.)
- [18] 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.

作者简介：

杨 琪(1977-), 女, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为铁路无线通信.email:yangqi@crdc.com.

冯敬然(1968-), 男, 本科, 正高级工程师, 主要研究方向为铁路通信工程设计.

何丹萍(1985-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电波传播与信道建模、无线通信技术.

单馨漪(1999-), 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.

郭兴海(2000-), 男, 在读本科生, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.