

文章编号: 2095-4980(2022)05-0449-09

高铁站场景 2 100 MHz 信道仿真与传播特性分析

杜 晓

(中国铁建电气化局集团 第四工程有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘 要: 随着铁路通信系统的发展需要和第五代移动通信技术(5G)的快速推进, 5G-Railway (5G-R)有望成为铁路通信系统的下一代标准。2 100 MHz 作为 5G-R 的潜在频段, 其在经典铁路场景中的传播特性亟待研究。构建符合场景典型特征的三维模型, 基于射线跟踪仿真法研究半封闭式高铁站台场景 2 100 MHz 无线信道的传播特性。在车站立柱、扶梯旁部署发射机, 定义传播模型参数, 分别在手持移动设备与车载移动台处进行大量仿真。计算路径损耗、时延扩展、角度扩展等信道特性, 为 5G-R 部署的覆盖功率预测和网络规划与优化提供参考, 弥补该频段在铁路应用方面研究的短缺。

关键词: 5G-R 标准; 铁路通信; 射线跟踪; 信道仿真; 传播特性

中图分类号: TN928

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022015

Channel simulation and propagation characteristics analysis at 2 100 MHz in high-speed railway station scenario

DU Xiao

(The 4th Engineering Co., LTD. of China Railway Construction Electrification Bureau Group, Changsha Hunan 410007, China)

Abstract: With the development of railway communication system and the rapid advancement of 5G technology, 5G-R (5G-Railway) is expected to become the next generation standard of railway communication system. As a potential frequency band of 5G-R, the propagation characteristics in classical railway scenarios of 2 100 MHz need to be studied urgently. In this paper, a 3D model conforming to the typical characteristics of the scenario is constructed, and the propagation characteristics of 2 100 MHz wireless channel in the semi-enclosed high-speed railway platform scene are studied based on ray tracing simulation method. Transmitters are deployed beside columns and escalators. Meanwhile, the parameters of propagation models are defined, and massive simulations are conducted on hand-held and vehicle-mounted mobile devices respectively. Finally, channel characteristics such as path loss, delay spread and angular spread are analyzed respectively, providing a reference for coverage power prediction, network planning and optimization of 5G-R deployment, which makes up for the shortage of research on railway application of this frequency band.

Keywords: 5G-R; railway communication; ray tracing; channel simulation; propagation characteristics

随着 5G 技术的逐步发展, 铁路行业的相关应用迫在眉睫。铁路 5G 技术应用进入落地攻关阶段。稳定的 GSM-R 通信系统, 在高速铁路、重载、高寒高原铁路发挥至关重要的作用。但受限于以 2G 为基础, 无法兼容物联网、大数据、人工智能等技术。5G 的传输速率和可靠性高, 时延低, 可与多种的铁路场景融合, 优化客货运信息传输服务, 提高旅客出行体验。我国铁路即将向智能铁路转型升级, 催生了智慧车站、8 k 视频监控等大量铁路相关业务, 而 5G-R 是满足铁路新业务与新需求的关键系统, 5G-R 的专网建设和公网应用兼顾安全可靠性与高速的传输效率。作为我国 5G-R 网络部署的主要测试频段, 2 100 MHz 频段的信号穿透、绕射能力均强于 3 500 MHz 频段, 传播及覆盖能力更强, 更适用于大型高铁站等场景, 以更低的成本打造连续覆盖的网络。高铁站作为经典

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-03-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(2020JBZD005); 石景山区“科技创新”专项资金资助项目; 高速铁路 5G-R 应用及装备研究基金资助项目

的铁路场景，其客流量大，移动终端数目多，网络质量需求高，同时也需要高质量的车地通信来保证车站的正常运作，是重要的 5G-R 专网与 5G 公网共存的场景，故在该场景开展铁路 5G-R 通信系统的信道建模对于 5G-R 专网的研究与落地是必要的。不仅如此，该场景下的信道建模工作也可对网络的部署、承载能力、场强和服务质量提供技术参考。

目前的发射机部署及网络优化主要基于大量的现场测试和工程经验，耗费人力与物力，且信道样本有限。Rappaport 团队在研究信道特性时在曼哈顿及布鲁克林城区进行了为期 3 年的测量和模型的建立^[1]。室内也开展过相应测量工作，并基于测量建立了办公室场景的路损模型^[2]。本文使用射线跟踪(Ray Tracing, RT)技术，进行准确、高效的确定性信道建模。射线跟踪信道模型是一种基于几何光学(Geometrical Optics, GO)理论和均匀绕射理论(Uniform Theory of Diffraction, UTD)的确定性信道模型，将从发射机到达接收机的电磁波近似为光学射线，准确表征无线信道中的多径分量，可以突破通信场景、频率、带宽等测试因素的限制，并解决标准信道模型中信道参数不完备等问题，是研究 5G 信道特性的重要方法^[3]。通过将仿真与少量测试结果进行对比验证及校正后，可以获得准确的信道特性，方便后续研究。射线跟踪已被广泛应用于确定性信道建模，在较早期就用于对 60 GHz 的室内宽带信道进行仿真并计算信道参数^[4]。射线跟踪仿真建模可应用到更低的 1 900 MHz 频段，证明三维射线追踪模型可作为室内传播分析、网络设计和实现的有用工具^[5]。同样的，城市环境也进行过相关比较与验证^[6]。不仅对于静态场景，在有移动散射体的场景，如铁路，射线跟踪仿真法应用于高速移动信道，克服了移动信道测量的挑战^[7-9]。无论对于静态场景或是动态场景，射线跟踪仿真都发挥了可靠且高效的作用。目前对于射线跟踪在 5G 上的研究多集中在毫米波频段，如对 12 GHz、28 GHz、30 GHz 的城区环境进行射线跟踪仿真，研究不同的发射机的部署对于信道的影响^[10-11]，也可对发射基站的部署进行优化^[12]。Rappaport 团队对 5G 信道模型做出总结，肯定了射线跟踪在信道模型中的贡献^[13]。

本文使用 CloudRT^[14]高性能射线跟踪仿真平台，可以准确追踪每一条射线的时、空、幅、频、相信息，支持多种多径传播机理类型(直射、反射、散射等)。基于此，可以计算关键的信道参数，从而进行高精确度的信道表征与建模。射线追踪有基于信道测量的校正方法，通过对地铁内部环境中多路径分量(Multi-Path Components, MPCs)的关键参数进行校正和源跟踪进行校正，且准确度较高^[15]。该平台被用于高速铁路动态信道传播，评估 3GPP (第三代合作伙伴计划, 3rd Generation Partnership Project)提出的高速客运方案和部署参数^[16]，以及 5G 毫米波段的高铁站台信道特性分析^[17]，助力“智慧站台”。该平台也被用于更广泛的场景，在不同高度下为列车用户提供无线连接的 1.4 GHz 的空对地信道^[18]，为实际铁路环境下 A2G 信道的有效链路预算提供了基础。

基于射线追踪技术，本文针对 2 100 MHz 频段，对我国常见的半封闭式高铁站场景进行信道建模，并进行信号覆盖预测和信道特性分析。构建了三维的场景模型，还原典型高铁站内的特征性设施，并对不同物体表面材料赋予电磁参数，还原其传播特性。随后使用射线跟踪平台(CloudRT, <http://cn.raytracer.cloud:9090/>)进行大量仿真，获取射线信息及信道参数。通过结果计算得到信号覆盖功率，拟合以及信道特性如时延扩展、莱斯 K 因子及角度扩展等。通过准确的场景建模和材料电磁参数赋值，可以实现准确的信道建模、覆盖预测及部署分析，实现“零现场测试”，减少测量人力物力，同时也保证了较高的准确性。

1 电波传播特性研究

1.1 高铁站台场景三维建模

本文使用 SketchUp 软件进行三维场景建模，图 1 为高铁站台的 3D 模型，物体的表面被涂上不同的颜色来表示其材料，材料的电磁参数值来自项目组长期的测量验证。其中，材料主要有金属、砖石、混凝土墙壁、玻璃及地面等，电磁参数涉及介电常数、损耗角正切、透射系数、透射损耗、方向性散射系数、材料表面等效粗糙度等。本场景主要对候车室、站台、立柱、股道及列车等站台常见物体进行建模，对物体保留重要细节，既保证了仿真效率，又保证了准确性^[19]。

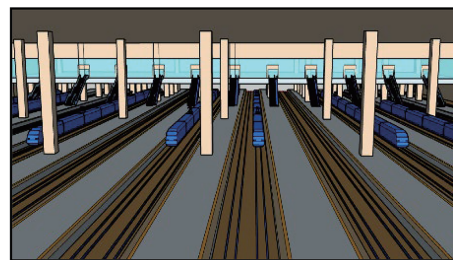


Fig.1 3D model of railway station
图 1 高铁站台 3D 模型

1.2 仿真配置

1) 传播机理选择

在高铁站台场景下，主要的传播机制包括视距(Light-of-Sight, LOS)传播、反射、散射及透射。仿真使用的传播模型及其计算方法见表 1。

2) 链路配置

针对 2.1 GHz 频段，其带宽为 10 MHz，收发信机均为全向天线，以便更好地观察场景特性。该场景设置 2 个发射天线(Tx1 与 Tx2)，Tx1 设置在中央立柱距离地面约 6 m 处，Tx2 设置在中央位置候车室下行至站台的出口处墙壁上，位于两扶梯之间，轨道的正上方，距离地面约 10.65 m 处，链路基本参数配置见表 2。

表 2 链路配置
Table 2 Link configuration

parameters	static		dynamic	
	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
center				
frequency/GHz	2.1	2.1	2.1	2.1
bandwidth/MHz	10	10	10	10
Tx antenna	omnidirectional	omnidirectional	omnidirectional	omnidirectional
Rx antenna	omnidirectional	omnidirectional	omnidirectional	omnidirectional
Tx transmitting power/dBm	0	0	0	0
Tx height/m	6	10.65	6	10.65
Rx height/m	1.3	1.3	4.6	4.6

表 1 传播模型
Table 1 Propagation model

propagation mechanism	geometry calculation	electric field calculation
LOS	free space LOS	Friis equation
reflection	Snell's law with image-based method [20]	Fresnel equation [20]
transmission	Snell's law for transmission through slab [21]	He's model [21]
scattering	directive scattering [22]	scattering coefficient and equivalent roughness [22]

本场景仿真分为静态与动态情况：静态仿真为场景全覆盖情况，接收机(Rx)高度为人手持移动设备的高度，约 1.3 m；动态仿真为列车移动情况下的信号接收情况，模拟列车真实进出站台情况，部分列车停靠站台上上下乘客，部分列车直接路过站台不停靠，部分列车处于起步或刹车状态。接收机(Rx1 与 Rx2)高度为列车车顶高度，列车 1 (Train1)为距离发射机较近股道的来车，列车 2 (Train2)为距离发射机较远处股道的来车。具体动态仿真模式发射机和接收机位置如图 2 和图 3 所示。

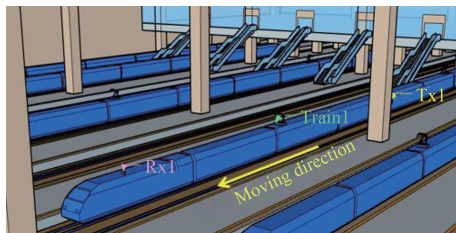


Fig.2 Location of Tx1 and train1
图 2 Tx1 与列车 1 位置图

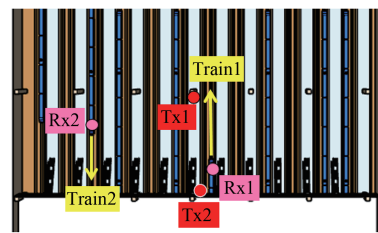


Fig.3 Location of Tx and Rx (top view)
图 3 Tx 与 Rx 关系图(俯视)

1.3 仿真结果分析

射线跟踪可以将无形的电波可视化，展现出具体的多径传播路径。图 4 呈现了高铁站台场景多径的传播。对高铁站场景整体的覆盖情况进行预测，得到俯视图结果如图 5 所示，图 5(a)中发射机 Tx1 放置在立柱附近，人员活动密集区大部分位置接收功率处于 -90~-50 dBm 范围内。图 5(b)为发射机 Tx2 放置在候车室出口扶梯位置，但位置较高，且因扶梯及墙体阻挡，相邻站台及候车室下方位置覆盖情况弱于发射机 Tx1。

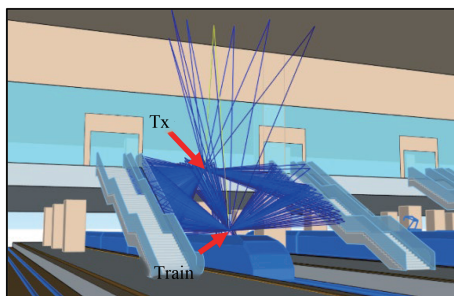


Fig.4 Example of ray propagation: Tx2 dynamic simulation
图 4 射线传播情况示例:Tx2 动态仿真

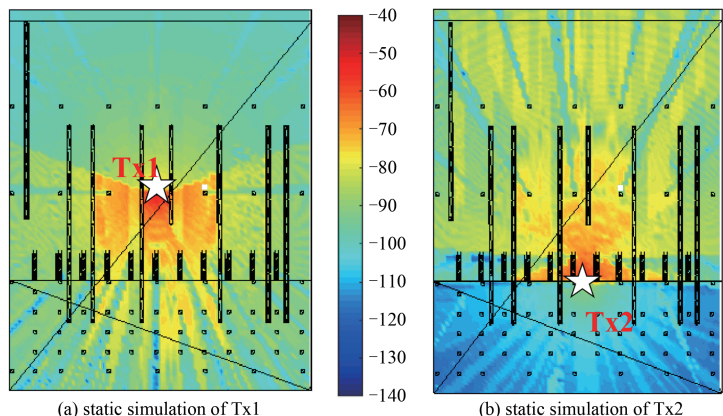


Fig.5 Example of ray propagation:Tx2 dynamic simulation
图 5 射线传播情况示例:Tx2 动态仿真

2 信道特性分析

2.1 路径损耗

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CI(Close-In)自由空间相对距离路径损耗模型^[23]的路径损耗计算：

$$PL(f_c, d) = FSPL(f_c, d_0) + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_{CI}^\sigma$$

式中： n 为路径损耗指数(Path Loss Exponent, PLE)； d 为Tx与Rx之间的距离，单位是m； χ_{CI}^σ 为标准差为 σ 的零均值高斯随机变量； f_c 为载频。

图6展示了视距(LOS)传播下的路损。图6(a)、(b)展示了静态覆盖时全场景的路损情况。LOS的路损基本符合自由空间路径损耗(Free-Space Path Loss, FSPL)，但因反散射的功率叠加，整体路损略小于FSPL。动态仿真时，观察到2台接收机的路损等参数在距离上连续，故此将列车1与列车2结果进行合并分析。至列车2的路径附近散射体丰富，因反散射功率叠加，其接收信号的路损略小于自由空间路径损耗。Tx1有更多被遮挡的情况，图6(c)、(d)中的不连续处为经过立柱时接收机被挡住而造成的非视距(Non-Light-of-Sight, NLOS)情况，单一的发射机部署无法保证距发射机较远处股道来车的信号接收质量，适当增添不同位置的发射机可以有效增强列车接收信号的稳定性。表3中给出路损的相关参数。

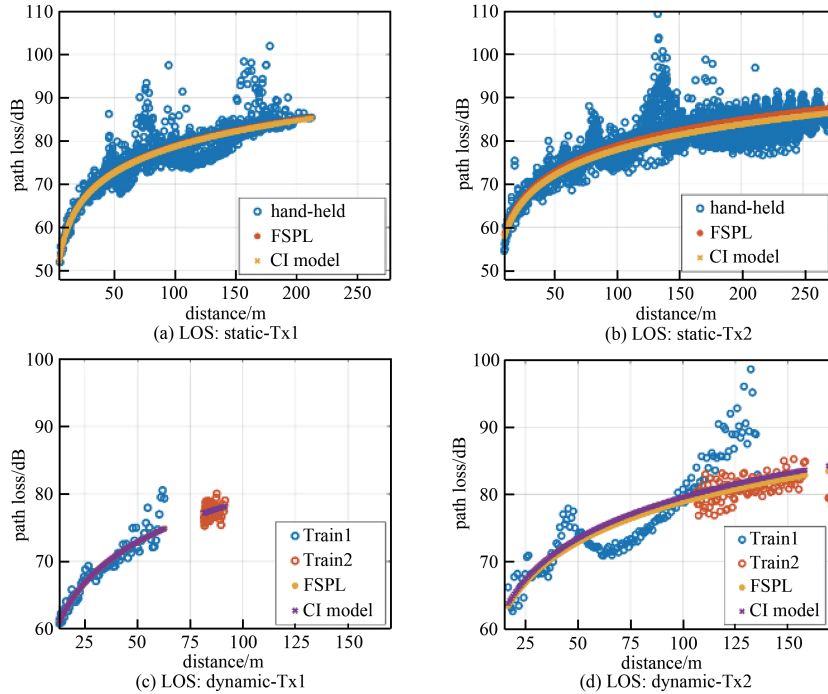


Fig.6 Path loss of LOS
图6 视距传播下的路径损耗

表3 视距下的路径损耗参数

Table3 Path loss parameters of LOS components

path loss parameter	static		dynamic	
	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
n	1.99	1.95	2.00	2.03
σ /dB	3.18	3.30	1.20	3.56
mean error/dB	-0.01	0.07	0.01	-0.04
standard deviation of error/dB	3.18	3.30	1.20	3.56

对于NLOS，因立柱等物体的遮挡，路损远大于FSPL，拟合后的 n 值也大于LOS情况。其中Tx2到列车1无NLOS情况，非视距下路损的参数见表4。

视距分量的误差均值和标准差均在可接受范围内，并能准确地反映信号传播的真实情况。非视距的标准差达到-12.51 dB，如图7所示，故非视距情况不宜用简单的经验模型来描述场景特性，而使用射线跟踪仿真法可以显示每条射线的细节，包括其接收功率、时延功率谱等，可以根据场景的变化捕捉特定的信道特性。

表 4 非视距下的路径损耗参数
Table 4 Path loss parameters of NLOS component

path loss parameter	static		dynamic	
	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
n	2.62	2.95	2.68	2.39
σ /dB	4.85	12.51	2.20	5.63
mean error/dB	0.07	0.62	0.28	-0.23
standard deviation of error/dB	4.85	12.51	2.20	5.63

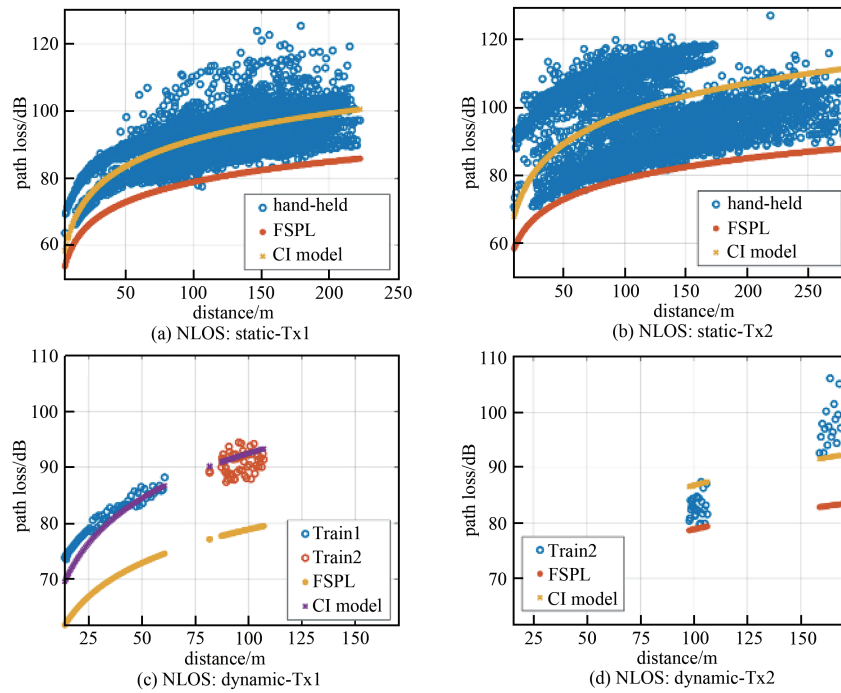


Fig.7 Path loss of NLOS
图 7 非视距传播下的路径损耗

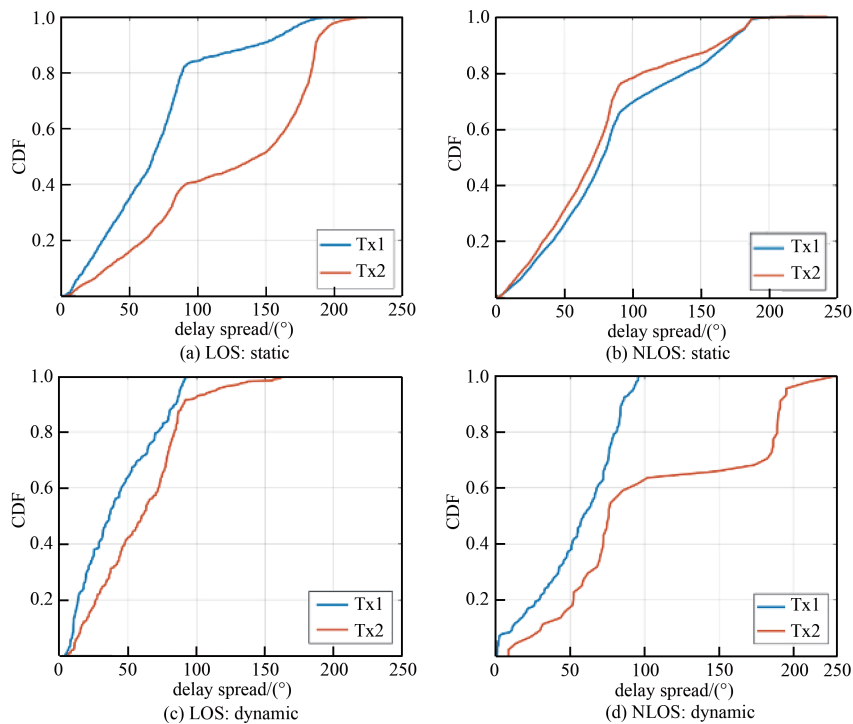


Fig.8 RMS delay spread
图 8 均方根时延扩展

2.2 均方根时延扩展

图 8 所示, Tx1 对于整个站台的覆盖情况优于 Tx2, 其 LOS 情况下的均方根(Root Mean Square, RMS)时延扩展中值为 67.35 ns, 非视距为 78.01 ns, 而来自 Tx2 的信号将会有较大时延扩展。动态情况下, Tx1 的时延扩展更小, 为 36.25 ns。NLOS 的均方根时延扩展大于 LOS, 因射线需要通过较长的路径绕过物体。具体的参数见表 5。

表 5 均方根时延扩展的仿真数据

Table5 Simulation data for RMS delay spread

RMS delay spread/ns	static		dynamic	
	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
LOS (median)	67.35	143.97	36.25	60.30
LOS (maximum)	206.21	224.14	95.65	164.30
NLOS (median)	78.01	71.09	59.10	76.01
NLOS (maximum)	225.73	242.68	96.30	229.27

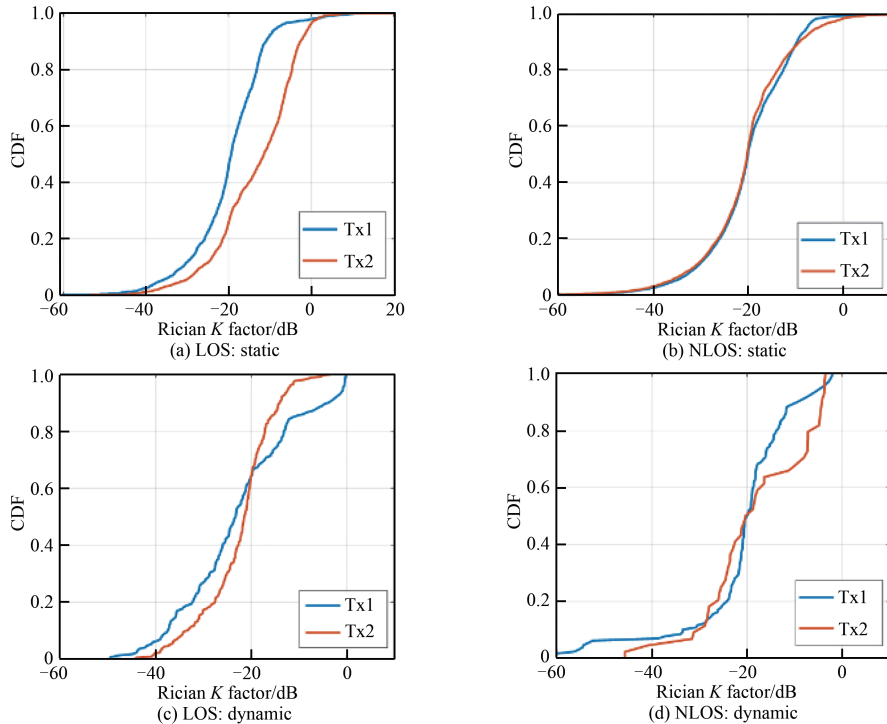


Fig.9 Rician K factor

图 9 莱斯 K 因子

2.3 莱斯 K 因子

LOS 与 NLOS 的 K 因子仿真数据如图 9 所示。该场景的 K 因子中值为 -19.37 dB, -11.44 dB(LOS)和 -23.17 dB, 21.37 dB(NLOS), 多径丰富且功率占比大。对于动态仿真, 两列车接收信号的 K 因子均小于 0, LOS 与 NLOS 的 K 因子值相近, 场景内反散射情况复杂, 多径的主导功率分布见表 6。

2.4 角度扩展

ASA, ASD, ESA 和 ESD 分别为到达方位角角度扩展, 出发方位角角度扩展, 到达俯仰角角度扩展和出发俯仰角角度扩展, 如图 10 所示。静态仿真中, LOS 中来自 Tx1 信号的 ASD 大于其他角度扩展, 中值为 17.53°, Tx1 附近的立柱对于信号的反射贡献较大。来自 Tx2 信号的角度扩展较为均匀, 约 4°。从表 7 可知, LOS 的角度扩展相对较小。

对于 NLOS 情况, 其 ASA 与 ASD 均明显大于其他角度扩展, 表明方位角平面的角度扩展十分丰富, 数据见表 8。动态仿真显示随着列车的移动, 射线的反射情况发生显著改变, 方位角的角度扩展呈现阶梯状。大的角度扩展带来小的信道相关性, 导致空间选择性衰落。而多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统

表 6 莱斯 K 因子仿真数据

Table6 Simulation data for Rician K factor

Rician K factor/dB	static		dynamic	
	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
LOS (median)	-19.37	-11.44	-23.17	-21.37
LOS (maximum)	12.79	20.37	-0.09	-2.90
NLOS (median)	-20.07	-20.22	-19.87	-19.54
NLOS (maximum)	22.55	18.77	-1.97	-3.49

要求信道之间的低相关性，Tx-Rx 对之间的高相关性会降低 MIMO 性能，角度扩展大的室内环境更适合 MIMO 配置，天线间可以彼此靠近，如图 11 所示。在 5G 车联网场景的研究中也有类似的观察和分析^[24]。

表 7 视距下角度扩展仿真数据

Table7 Simulation data for angular spread of LOS components

angular spread/(°)		static		dynamic	
LOS		Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
ASA	median	0.18	2.76	7.01	0.69
	maximum	44.43	45.47	37.26	13.05
ESA	median	3.40	3.07	2.80	4.04
	maximum	18.17	40.07	5.00	7.66
ASD	median	17.53	5.00	10.73	5.67
	maximum	26.58	152.88	20.82	29.28
ESD	median	3.55	3.54	3.46	3.97
	maximum	5.30	6.89	4.90	6.08

表 8 非视距下角度扩展仿真数据

Table8 Simulation data for angular spread of NLOS components

angular spread/(°)		static		dynamic	
LOS		Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
ASA	median	0	0.04	10.12	7.72
	maximum	159.6	137.94	34.97	37.72
ESA	median	0.03	0.48	2.90	3.32
	maximum	16.54	36.07	3.04	3.62
ASD	median	0	0.87	10.56	15.76
	maximum	119.45	136.72	20.78	47.52
ESD	maximum	20.81	38.69	3.46	10.11

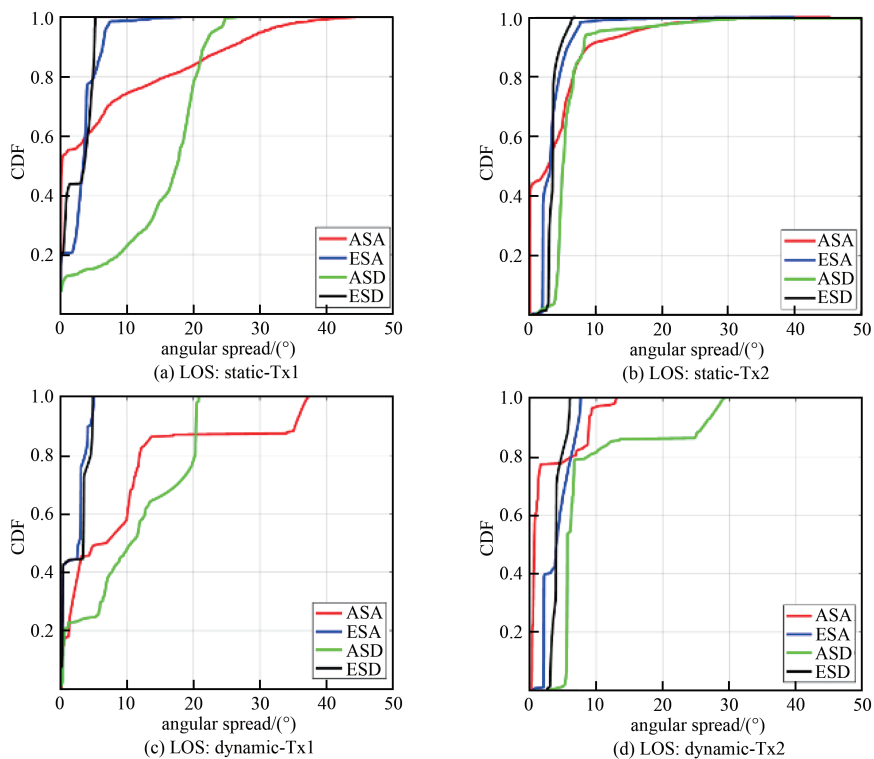


Fig.10 Angular spread of LOS

图 10 视距情况下角度扩展

3 结论

本文利用高性能射线跟踪仿真平台 CloudRT 研究了半封闭式高铁站台场景下的信道特性，包括路径损耗建模、均方根时延扩展、莱斯 K 因子和角度扩展。站台场景分析了 2 种发射机部署(立柱及候车室外墙)、2 种接收机部署(手持移动台、高铁上)方式下的信道特性，具体汇总见表 9。结果显示，发射机天线放置在立柱附近有更有

好的整体覆盖效果，而在候车室外墙上的发射机由于部署高度受限以及近处扶梯遮挡，有更大的路损。此类场景建议在立柱上部部署基站或小区天线，以达到良好的覆盖效果。

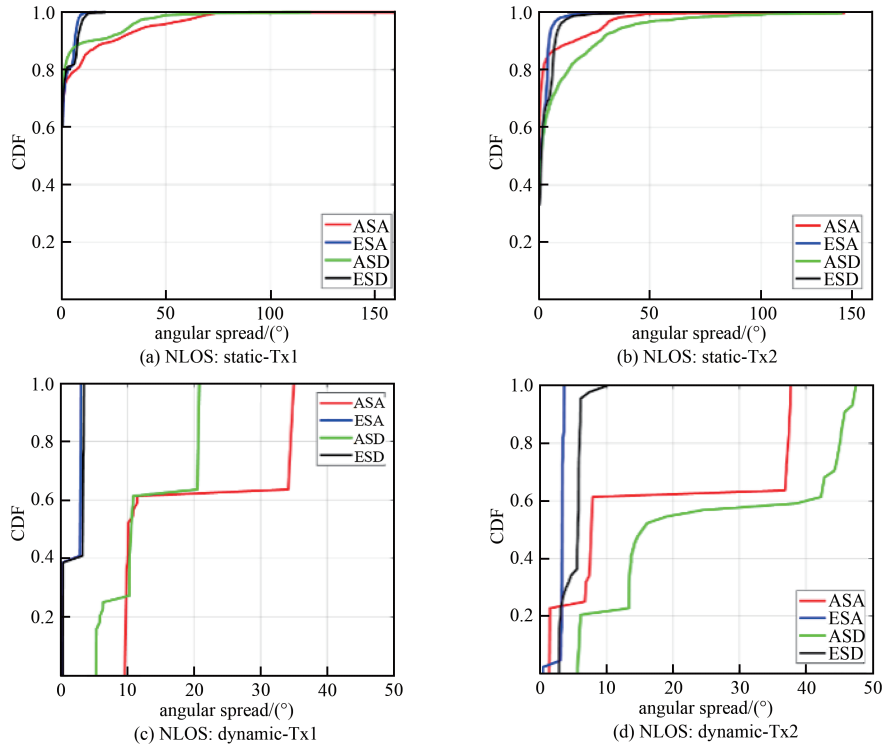


Fig.11 Angular spread of NLOS
图 11 非视距情况下角度扩展

表 9 信道特性参数总表

Table9 Parameters for channel characteristics

LOS/NLOS		LOS				NLOS				
simulation mode		static		dynamic		static		dynamic		
Tx		Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	
path loss	n	1.99	1.95	2.06	1.98	2.62	2.95	2.68	2.39	
	σ /dB	3.18	3.30	3.54	1.41	4.85	12.51	2.20	5.63	
	mean error/dB	-0.01	0.07	-0.18	-0.01	0.07	0.62	0.28	-0.23	
	Stdv. of error/dB	3.18	3.30	3.54	1.41	4.85	12.51	2.20	5.63	
RMS delay spread/ns	median	67.35	143.97	36.25	60.30	78.01	71.09	59.10	76.01	
	maximum	206.21	224.14	95.65	164.30	225.73	242.68	96.30	229.27	
Rician K factor/dB	median	-19.37	-11.44	-23.17	-21.37	-20.07	-20.22	-19.87	-19.54	
	maximum	12.79	20.37	-0.09	-2.90	22.55	18.77	-1.97	-3.49	
angular spread/(°)	ASA	median	0.18	2.76	7.01	0.69	0	0.04	10.12	7.72
		maximum	44.43	45.47	37.26	13.05	159.60	137.94	34.97	37.72
	ESA	median	3.40	3.07	2.80	4.04	0.03	0.48	2.90	3.32
		maximum	18.17	40.07	5.00	7.66	16.54	36.07	3.04	3.62
	ASD	median	17.53	5.00	10.73	5.67	0	0.87	10.56	15.76
		maximum	26.58	152.88	20.82	29.28	119.45	136.72	20.78	47.52
	ESD	median	3.55	3.54	3.46	3.97	0.02	1.14	3.29	5.68
		maximum	5.30	6.89	4.90	6.08	20.81	38.69	3.46	10.11

参考文献:

[1] RAPPAPORT T S,MACCARTNEY G R,SAMIMI M K,et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015,63(9):3029–3056.

[2] 李双德,刘莞健,林乐科. 28 GHz室内毫米波信道路径损耗模型研究[J]. 电波科学学报, 2017,32(5):602–611. (LI Shuangde, LIU Yuanjian,LIN Leke. Path loss models of millimeter-wave channel in indoor environment at 28 GHz[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017,32(5):602–611.) doi:10.13443/j.cjors.2017091801.

[3] 崔壮壮,钟章队,官科,等. 基于射线跟踪的车联网毫米波信道准平稳区间研究[J]. 电波科学学报, 2017,32(5):570–577. (CUI Zhuangzhuang,ZHONG Zhangdui,GUAN Ke, et al. Quasi-stationary regions of millimeter-wave channel for vehicular networks

- based on ray tracing[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017,32(5):570–577.)
- [4] PETER W,KEUSGEN W,FELBECKER R. Measurement and ray-tracing simulation of the 60 GHz indoor broadband channel: model accuracy and parameterization[C]// The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007. Edinburgh:IET, 2007:1–8.
- [5] DEGLI-EPOSTI V,LOMBARDI G,PASSERINI C,et al. Wide-band measurement and ray-tracing simulation of the 1 900 MHz indoor propagation channel:comparison criteria and results[J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions on, 2001,49(7):1101–1110.
- [6] ERRICOLO D,CROVELLA U G,USLENGHI P L E. Time-domain analysis of measurements on scaled urban models with comparisons to ray-tracing propagation simulation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002,50(5):736–741.
- [7] HE Danping,AI Bo,GUAN Ke,et al. Channel measurement,simulation, and analysis for high-speed railway communications in 5G millimeter-wave band[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018,19(10):3144–3158.
- [8] HE Danping,AI Bo,GUAN Ke,et al. Ray-tracing assisted 3GPP stochastic channel modeling for high-speed railway rural scenario[C]// 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC). Gran Canaria:[s.n.], 2018:1–4.
- [9] BRISO-RODRÍGUEZ C,LÓPEZ C F,JEAN R,et al. Broadband access in complex environments:LTE on railway[J]. IEICE Transactions on Communications, 2014,E97.B(8):1514–1527.
- [10] OESTGES Claude,HENNAUX Gauthier,GUEUNING Quentin. Centimeter and millimeter-wave channel modeling using ray-tracing for 5G communications[C]// 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference(VTC2015-Fall). Boston,MA,USA:IEEE, 2015:1–5.
- [11] HUR Sooyoung,BAEK Sangkyu,KIM Byungchul,et al. 28 GHz channel modeling using 3D ray-tracing in urban environments[C]// 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Lisbon,Portugal:IEEE, 2015:1–5.
- [12] HSIAO Anyao,YANG Changfa,WANG Teshun,et al. Ray tracing simulations for millimeter wave propagation in 5G wireless communications[C]// International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego,CA,USA:IEEE, 2017:1901–1902.
- [13] RAPPAPORT T S,XING Yunchou,MACCARTNEY G R,et al. Overview of millimeter wave communications for Fifth-Generation(5G) wireless networks—with a focus on propagation models[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017,65(12):6213–6230.
- [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, 2018,21(1):10–27.
- [15] ZHENG Chunfu,XU Ziheng,HE Danping,et al. Millimeter-wave channel measurement based ray-tracing calibration and analysis in metro[C]// International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Atlanta,GA,USA: IEEE, 2019:1–2.
- [16] HE Danping ,YANG Jingya,GUAN Ke,et al. Ray-tracing simulation and analysis of propagation for 3GPP high speed scenarios[C]// 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation. Paris,France:IEEE, 2017: 2890–2894.
- [17] XIONG Lei,MIAO Haiyang, AI Bo,et al. Channel characteristics of high-speed railway station based on ray-tracing simulation at 5G mmwave band[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2019(12):1–10.
- [18] MA Lei,GUAN Ke,HE Danping,et al. Ray-tracing simulation and analysis for air-to-ground channel in railway environment[C]// International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston,MA,USA:IEEE, 2018:1–2.
- [19] LI Kunmao,HE Danping,GUAN Ke, et al. Efficient environment model for intra-wagon millimeter wave ray-tracing simulation[C]// International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego,CA,USA: IEEE, 2017:1909–1910.
- [20] ANDREW S Glassner. An introduction to ray tracing[M]. New York,USA:Academic Press Ltd., 1989.
- [21] HE Danping,LIANG Guixuan,PORTILLA Jorge,et al. A novel method for radio propagation simulation based on automatic 3D environment reconstruction[C]// European Conference on Antennas and Propagation. Prague,Czech Republic:IEEE, 2012:1445–1449.
- [22] DEGLI-ESPOSTI V,FUSCHINI F,VITUCCI E M,et al. Measurement and modeling of scattering from buildings[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2007,55(1):143–153.
- [23] GEORGE R Maccartney, THEODORE S Rappaport, SUN Shu, 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(3):2388–2424.
- [24] DUAN Wei,GU Jinyuan,WEN Miaowen,et al. Emerging technologies for 5G-IoV networks:applications,trends and opportunities[J]. IEEE Network, 2020,34(5):283–289.

作者简介:

杜 晓(1988–), 男, 湖南省津市市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为铁路通信.email:duxiao2832@163.com.