

文章编号: 2095-4980(2022)08-0769-06

基于 5G-R 系统的高铁站台场景信道特性

曾成胜¹, 单馨漪^{2a,2b}, 何丹萍^{*2a,2b}, 陈付坤¹, 丁建文^{2a,2b}

(1. 中国铁建电气化局集团有限公司, 北京 100040; 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. 宽带移动通信铁路行业重点实验室, 北京 100044)

摘要: 为推进智能铁路总体建设, 实现高速铁路智能化, 高铁信息基础设施将应用第五代移动通信技术(5G)建设铁路 5G 专用移动通信系统, 2.1 GHz 有望成为铁路 5G 专用移动通信系统的承载频段。高铁站台作为客货乘降与调度中转的功能核心, 其在 2.1 GHz 下的电波传播特性亟待研究。本文以厦门北站高铁站台为研究场景, 利用射线跟踪(RT)技术仿真 2.1 GHz 频段下的电波传播, 基于仿真结果分析此场景无线信道特性, 包括均方根时延扩展(RMS DS)、到达/离开方位角扩展、到达/离开俯仰角扩展(ASA/ASD, ESA/ESD)、交叉极化比(XPR)和以上参数的互相关。根据以上结果, 对高铁站台场景中铁路 5G 专用移动通信系统的设计和评估提出相关建议。

关键词: 铁路 5G 专用移动通信系统; 射线跟踪; 高铁站台; 信道特性

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022048

Channel characteristics of high-speed rail platform scenario based on 5G for railway system

ZENG Chengsheng¹, SHAN Xinyi^{2a,2b}, HE Danping^{*2a,2b}, CHEN Fukun¹, DING Jianwen^{2a,2b}

(1.China Railway Construction Electrification Bureau Group Co.Ltd, Beijing 100040, 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 promote the overall construction of the intelligent railway and to realize the intelligent high-speed railway, the communication infrastructure of high-speed railway will apply the 5th Generation Mobile Communication Technology(5G) to build the 5G for railway system. 2.1 GHz band is expected to be the bearer band for the 5G for railway system. The high-speed rail platform is the functional core of the loading and discharging of passengers and the cargo, and its propagation characteristics at 2.1 GHz need to be studied urgently. The wireless channel in the high-speed rail platform of Xiamen North Station at 2.1 GHz is characterized through Ray-Tracing(RT) simulations. Based on the simulation results, the channel parameters in the high-speed rail platform scenario are analyzed, including Root-Mean-Square Delay Spread(RMS DS), azimuth angular spread of arrival/departure, elevation angular spread of arrival/departure(ASA/ASD, ESA/ESD), Cross-Polarization Ratio(XPR) and cross-correlations of the above parameters. Based on these results, relevant suggestions are provided for the design and evaluation of the 5G for railway system in the high-speed rail platform scenario.

Keywords: 5G for railway system; Ray-Tracing; high-speed rail platform; channel characteristics

智慧高铁是加快建设交通强国, 构建现代综合交通运输体系的重要环节。2020年8月, 国铁集团出台了《新时代交通强国铁路先行规划纲要》, 提出到2035年高铁里程达到7万公里左右, 并率先建成智慧高铁。2021年12月, 国务院《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确在智能铁路中实施新一代铁路通信专网工程, 从而解决目前铁路窄带移动通信系统(Global System for Mobile Communications-Railway, GSM-R)存在承载能力

收稿日期: 2022-02-26; 修回日期: 2022-03-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费(智慧高铁系统前沿科学中心)资助项目(2020JBZD005); 石景山区“科技创新”专项资金项目; 高速铁路 5G-R 应用及装备研究资助项目(2021-C43)

*通信作者: 何丹萍 email:hedanping@bjtu.edu.cn.

不足、频段干扰严重、生命周期正走向终结等问题^[1]。目前,工信部与国家铁路集团已达成共识,选定 2.1 GHz 为承载频段,以第五代移动通信技术(5G)为依托建设铁路 5G 专用移动通信系统,以实现移动通信质量、接入设备数目、高数据速率可靠传输的进一步提升^[2]。

近年来,国内外开展了大量针对铁路典型场景 5G 信道特性的研究。文献[3]基于 3.45GHz 的第五代新无线电(5G New Radio, 5G-NR)网络,应用无源信道探测仪对上海至无锡高铁沿线进行了信道测量工作,并从中萃取、分析路径损耗、延迟扩展和莱斯 K 因子等信道参数;文献[4]对 5.2 GHz 下的火车站、开阔地和路堑 3 个不同场景的列车对列车(Train-to-Train, T2T)通信传播信道进行了测量,并根据分析测量数据推导出大、小尺度时变随机信道参数;文献[5]基于射线跟踪(RT)仿真研究了 3.5 GHz 高架桥场景下的 5G 信道特性,分析了路径损耗、角度扩展、时延扩展和多普勒频移等信道参数。然而,当前针对高铁站台场景的 5G 信道特性研究较少,一些经典信道模型如 COST-231、Okumura、Hata 等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。高铁站台作为铁路基础设施、列车、旅客和货物紧密互联的中心,基于铁路 5G 专用移动通信系统在此场景下开展信道建模研究是必要的。

本文使用 CloudRT 高性能射线跟踪仿真平台进行仿真并得到多径信息。该平台采用基于几何光学(Geometrical Optics, GO)与几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)的射线跟踪方法,追踪场景中不同传播机制的电波。该平台曾被应用于高速列车场景宽带路径损耗参数建模^[6]和 IMT-2020(5G)技术评估报告框架中的模型建立^[7]。本文首先在 5 m 分辨力的电子地图里融合厦门北三维场景模型,并赋予场景中各材料电磁参数。以 2.1 GHz 为研究频段,采用 CloudRT 进行动态仿真,得到相应的射线信息,从中萃取分析均方根时延扩展(RMS DS)、角度扩展(Angular Spread, AS)和交叉极化比(XPR)信道特性参数并计算以上参数的互相关。

1 RT 仿真配置

1.1 CloudRT 射线跟踪平台

CloudRT 是基于云计算的高性能射线跟踪仿真平台,可以仿真各种传播机制的射线,包括直射、反射、散射、绕射、透射。用户配置环境模型、天线模型、传播机理和收发信机位置等参数后进行仿真。CloudRT 的仿真结果包含对应于每组收发机位置的信道冲击响应(Channel Impulse Response, CIR)和多径详细信息。基于此可计算本文所需的均方根时延扩展(RMS DS)、角度扩展(AS)等信道参数,继而进行高精度信道表征与建模。

1.2 场景建模与仿真配置

本文以厦门北站为研究场景,利用 SketchUp 软件对该场景进行还原建模,包括站台、股道、牵引架、列车散射体。同时结合 5 m 精确度的 Planet 电子地图进行地物表征,以更加精细地还原场景。

本文选择 2.1 GHz 作为研究频段,设置信道带宽为 100 MHz。如图 1 中的俯视图所示,分别在离车站远处(case1)和近处(case2)部署发射机(Transmitter, Tx)Tx1 和 Tx2,发射机高度距离地面 15 m。接收机(Receiver, Rx)部署在列车车头顶部距离车顶 0.01 m 处,距离地面高度 4.5 m,跟随列车移动,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 1 箭头方向所示^[8]。RT 仿真模拟中的某一快照如图 2 所示,其中不同颜色的线条即为按照接收功率的不同追踪到的多径。

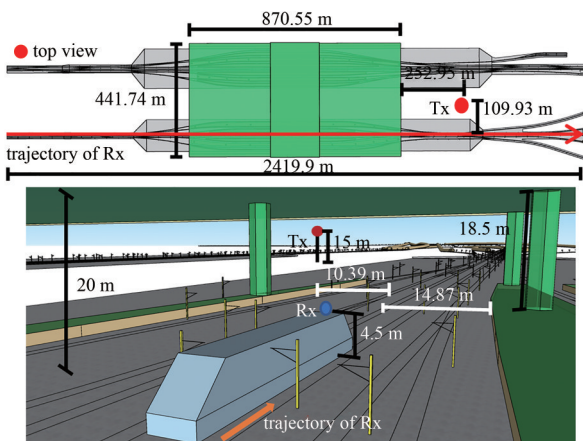


Fig.1 Schematic of scenario model
图 1 场景模型示意图

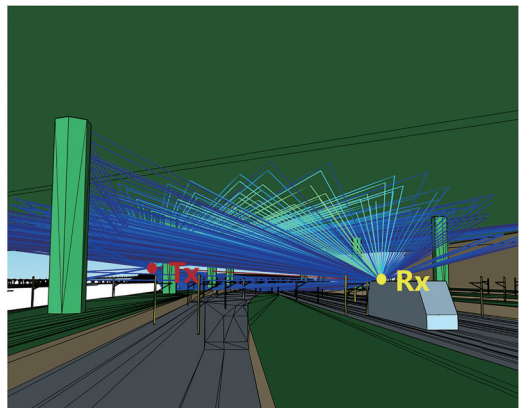


Fig.2 One snapshot of RT simulations
图 2 RT 仿真中的一个快照

仿真中收发信机均采用发射功率为 0 dBm 的全向天线^[8]。为分析交叉极化比(XPR)，分别对 4 个极化信道进行仿真，其中 Tx-Rx 天线的极化组合为垂直极化-垂直极化(V-V)情况、垂直极化-水平极化(V-H)情况、水平极化-水平极化(H-H)情况，水平极化-垂直极化(H-V)情况。在分析其他参数时，收发信机均采用垂直极化天线。

2 基于 RT 仿真的信道特性参数分析

基于 RT 仿真结果，本文对 2.1 GHz 频段高铁站台场景信道参数进行了分析和表征。信道特性包括均方根时延扩展、到达/离开方位角扩展(ASA/ASD)、到达/离开俯仰角扩展(ESA/ESD)、交叉极化比(XPR)及以上参数的互相关。每个信道参数均采用均值和标准差的正态分布进行拟合。所有萃取的参数汇总在表 1 中，其中 $\mu_{DS}, \mu_{ASA}, \mu_{ASD}, \mu_{ESA}, \mu_{ESD}, \mu_{XPR}$ 分别表示 RMS DS, ASA, ASD, ESA, ESD 和 XPR 的平均值。 $\sigma_{DS}, \sigma_{ASA}, \sigma_{ASD}, \sigma_{ESA}, \sigma_{ESD}$ 和 σ_{XPR} 分别表示 RMS DS, ASA, ASD, ESA, ESD 和 XPR 的标准差。

表 1 两种情况的信道参数
Table1 Channel parameters for two cases

cases	μ_{DS}/ns	σ_{DS}/ns	$\mu_{ASA}/(^{\circ})$	$\sigma_{ASA}/(^{\circ})$	$\mu_{ASD}/(^{\circ})$	$\sigma_{ASD}/(^{\circ})$	$\mu_{ESA}/(^{\circ})$	$\sigma_{ESA}/(^{\circ})$	$\mu_{ESD}/(^{\circ})$	$\sigma_{ESD}/(^{\circ})$	μ_{XPR}/dB	σ_{XPR}/dB
case1	156.91	112.72	16.10	13.02	3.63	5.31	1.80	1.80	0.44	0.74	2.46	10.29
case2	147.63	113.40	88.52	62.97	5.06	6.65	2.12	2.18	1.65	1.59	3.95	6.49

2.1 均方根时延扩展

由于多径效应，接收机接收到的各多径的到达时间不同，从而产生时间色散。均方根时延扩展可有效量化信道时间色散的程度，定义为功率延迟曲线的二阶中心矩的平方根，计算公式如下^[9]：

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_{k=1}^K P(\tau_k)} - \bar{\tau}^2} \quad (1)$$

式中 σ_{τ} 为均方根时延扩展，平均附加时延 $\bar{\tau}$ 由下式确定：

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{k=1}^K P(\tau_k) \tau_k}{\sum_{k=1}^K P(\tau_k)} \quad (2)$$

式中： τ_k 表示第 k 条射线的相对时延； $P(\tau_k)$ 是第 k 条射线的功率； K 是射线的数目。

根据公式计算 case1 和 case2 的均方根时延扩展。case1 的均方根时延扩展的均值为 156.91 ns，case2 小于 case1 为 147.63 ns，这说明当发射机部署在离车站近处时，多径的传播距离通常小于发射机部署在离车站远处时。在相关场景中，文献[10]中 1.89 GHz 频段下计算的车站环境均方根时延扩展的均值为 146.5 ns，本文与之基本一致。

图 3 给出了均方根时延扩展的累积分布(Cumulative Distribution Function, CDF)图，从图 3 中可以看出 case1 和 case2 的均方根时延扩展最大值均不超过 400 ns，超过 90% 的均方根时延扩展集中在 320 ns 之内，case1 中 69.25%、case2 中 72.17% 的均方根时延扩展小于 240 ns，与文献[10]中计算的高铁车站场景均方根时延扩展分布基本一致。

2.2 角度扩展

在多径信道中，信号在接收天线上的到达角度会展宽，从而产生角度色散，并引起信号的空间选择性衰落。角度扩展是描述角度色散和信道空间选择性衰落的主要参数。其 3GPP 定义为^[11]：

$$\sigma_{AS} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M (\theta_{m,\mu})^2 P_m}{\sum_{m=1}^M P_m}} \quad (3)$$

式中： σ_{AS} 表示角度扩展； P_m 表示第 m 条多径的功率； M 表示多径的总数； $\theta_{m,\mu}$ 由下式确定：

$$\theta_{m,\mu} = \text{mod}(\theta_m - \mu_{\theta} + \pi, 2\pi) - \pi \quad (4)$$

式中： θ_m 是第 m 条多径的到达方位角/离开方位角/到达俯仰角/离开俯仰角； μ_{θ} 的计算公式如下：

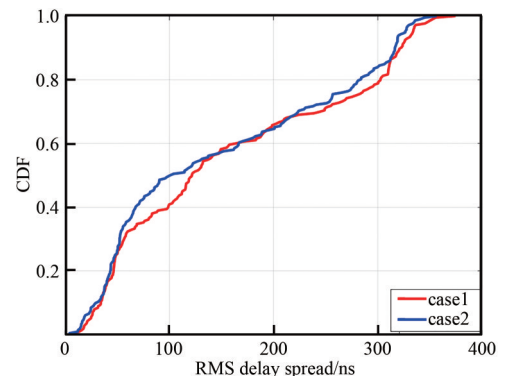


Fig.3 CDF of RMS DS
图 3 均方根时延扩展累积分布

$$\mu_{\theta} = \frac{\sum_{m=1}^M \theta_m P_m}{\sum_{m=1}^M P_m} \quad (5)$$

2.2.1 到达方位角扩展

图 4(a)为 case1、case2 的到达方位角扩展(ASA)的 CDF 图。可以看出 case1 的 ASA 的均值(16.1°)远小于 case2 情况下的 ASA 的均值(88.52°)，这是因为当电波从侧面穿过车站时，各接收点的到达方向角较大。而且，case2 的 ASA 分布近乎对称，这是因为场景和 Rx 的移动轨迹相对于 Tx 也是近乎对称的。ASA 的分布范围为 0°到 170°，其中，大约 85% 会对称地集中在 15°到 40°和 140°到 165°的范围内。ASA 的这种高度依赖环境的属性意味着高铁站台场景信道的特殊性，值得在未来的工作中进行更深入的研究。

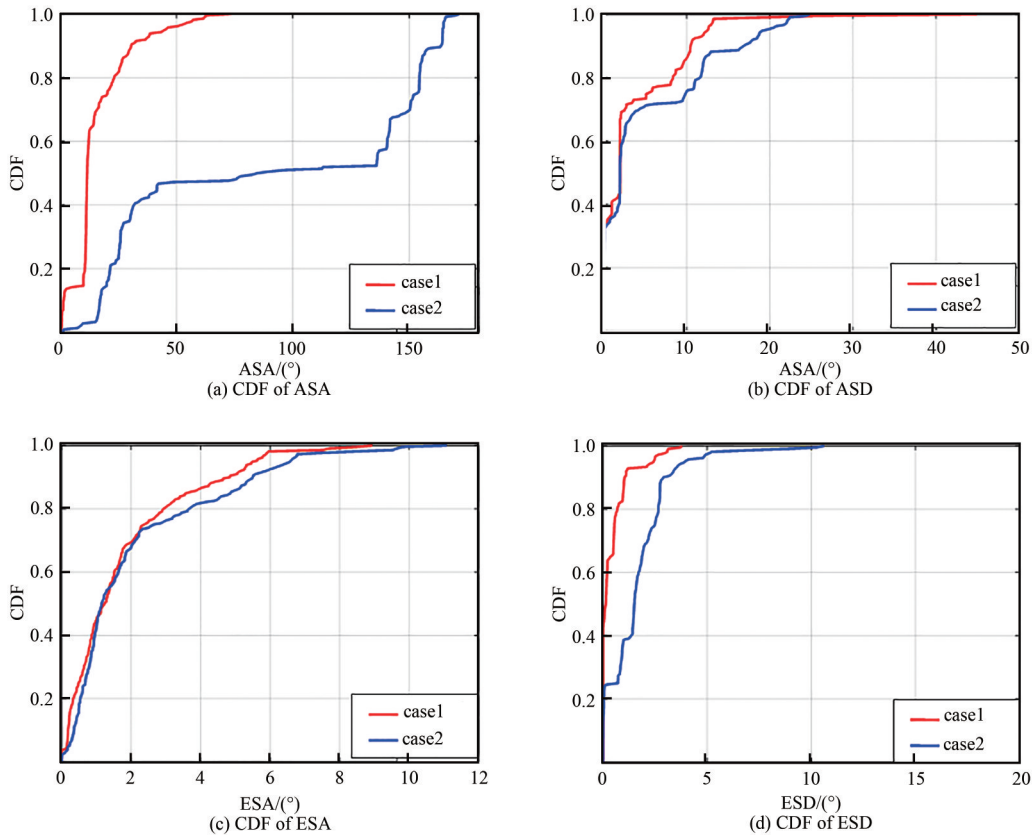


Fig.4 CDF of AS
图4 角度扩展累积分布

2.2.2 离开方位角扩展

图 4(b)为 case1、case2 的离开方位角扩展(ASD)的 CDF 图。case1 的 ASD 均值为 3.63°，case2 的 ASD 均值为 5.06°，两种情况下均有超过 90% 的 ASD 集中在 0°到 20°且分布几乎相同，这意味着本文中两种不同发射机的部署方式对此参数影响很小。case1 和 case2 的 ASD 均值(3.63°、5.06°)均小于 ASA 均值(16.1°、88.52°)，case2 相差更大。产生此现象的原因是因为发射机架较高(发射机距离地面 15 m，接收机距离地面 4.5 m)且所处位置距离接收机较远，如图 2 所示，能够产生大量有效(相较于路径损耗最低的多径其路径损耗高出 35 dB 以内)散射径的有效散射体(电力架)大多分布在接收机附近，发射机所在平面有效散射体较少。故接收机附近能够在在大角度范围内产生丰富多径，而发射机附近的多径角度范围较为狭窄，离开方位角扩展(ASD)自然会小于到达方位角扩展(ASA)。

2.2.3 到达俯仰角扩展

图 4(c)为 case1、case2 的到达俯仰角(ESA)扩展的 CDF 图。与 ASA 相比，两种情况下的射线在俯仰角域到达 Rx 的范围窄(0°到 12°)且分布相似。case1 的 ESA 均值为 1.80°，case2 的 ESA 均值为 2.12°，case1、case2 两种情况下分别有 98.15%、93.47% 的 ESA 集中在 0°到 6°。case2 的 ESA 整体高于 case1，这是因为当发射机部署在离车站近处时，经雨篷反射和散射的电磁波的到达俯仰角更大，从而导致 ESA 更大。

2.2.4 离开俯仰角扩展

图 4(d)为 case1、case2 的离开俯仰角(ESD)扩展的 CDF 图。可以看出俯仰平面中的角度扩展比方位平面中的角度扩展小得多。这是因为收发信机均采用了垂直极化天线，大多数多径在方位平面上产生，因此可以提供较多的分集增益^[12]。

2.3 交叉极化比

交叉极化比(XPR)是衡量双极化天线极化特性的常用指标，代表了不同极化之间场强的不平衡，其定义为同极化(V-V 或者 H-H)接收信号场强与交叉极化接收信号场强之比。计算公式如下：

$$XPR = 20 \lg \left(\frac{E_{co}}{E_{cross}} \right) \tag{6}$$

式中： E_{co} 为同极化接收场强； E_{cross} 为交叉极化接收场强。

交叉极化比(XPR)的 CDF 如图 5 所示。case1 情况的 XPR 均值(2.46 dB)小于 3 dB，这意味着去极化效应严重，此时天线应考虑圆极化天线；case2 情况的 XPR 均值(3.95 dB)大于 3 dB，此时去极化效应并不严重。然而，由于多径传播，仍有大约 20% 的可能性存在严重的去极化信道。因此，case2 应选用双极化天线。

2.4 互相关

互相关以 0.7 的阈值计算(与 3GPP 一致)^[12]，并总结在表 2 中。根据表 2，大多数参数之间的互相关很小，只有 ESA 和 ESD 在两种情况下均有较高的相关度，这反映了高铁站台场景会高度影响垂直面上的多径产生。

综上，表 1 和表 2，以及图 3~图 5 全面描述了 2.1 GHz 两种发射机部署情况下高铁站台场景的信道特性。基于以上特性，对高铁站台场景的通信系统设计建议如下：

- 1) 由于均方根时延扩展小于 400 ns，通信系统可用较短的循环前缀(不短于 400 ns)来提高信息传输速率。
- 2) ESA 和 ESD 的值低于 ASA 和 ASD。由于相干距离与角度扩展成反比，所以在水平面上相干距离较小。因此，当采用多天线的分集技术时，发射机应采用水平线阵天线。
- 3) case1 的 XPR 平均值均小于 3 dB，说明去极化效应严重。因此，这种情况下应考虑使用圆极化天线；case2 的 XPR 平均值大于 3 dB，说明 case2 的去极化效应并不严重。考虑到仍有大约 20% 的可能性信道的去极化效应比较严重，因此，在 case2 条件下应采用双极化天线。

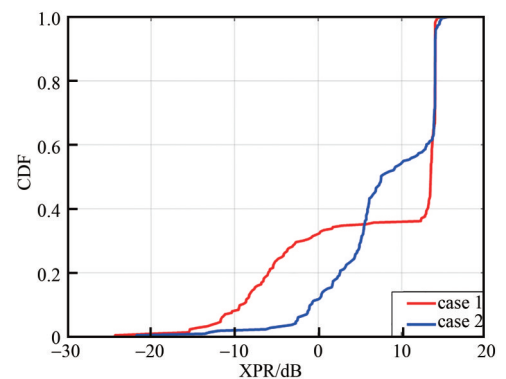


Fig.5 CDF of XPR
图 5 交叉极化比累积分布

表 2 参数的互相关

Table 2 Cross correlation of parameters

	DS		ASA		ASD		ESA		ESD	
	case1	case2	case1	case2	case1	case2	case1	case2	case1	case2
DS	1.00	1.00	0.37	0.22	0.05	0.67	0.05	-0.15	0.06	-0.05
ASA			1.00	1.00	0.22	0.07	0.04	0.13	0.35	0.12
ASD					1.00	1.00	0.04	0.07	0.19	0.30
ESA							1.00	1.00	0.49	0.70
ESD									1.00	1.00

3 结论

本文通过 RT 仿真，分析了 2.1 GHz 频段下的厦门北站铁路枢纽场景信道。通过分析信道参数发现铁路枢纽场景的 RMS 时延扩展累积分布与车站场景类似。当发射机部署在离车站远处时，大多数多径的传播距离要大于发射机部署在离车站近处时，故 case1 条件下 RMS 时延扩展的均值(156.91 ns)略大于 case2 条件下的(147.63 ns)；因 Tx 部署位置的不同，ASA 的 CDF 差别很大。case2 条件下，场景与 Rx 的移动轨迹相对于 Tx 近乎对称，故 ASA 的 CDF 图也呈现出对称现象。Tx 部署在离车站远处的 case1 的 ASA 则不呈现上述现象，而是普遍集中在 10° 左右；在所有萃取的信道参数中，只有 ESA 和 ESD 具有较高的相关性。针对交叉极化比(XPR)这一参数，case1 的 XPR 均值(2.46 dB)低于 3 dB，case2 的 XPR 均值(3.95 dB)高于 3 dB，基于此，本文建议 case1 情况下采用水平线阵

圆极化天线, case2 情况下采用水平线阵双极化天线。

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.)
- [2] 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.
- [3] SONG Minhui, YIN Xuefeng, ZHANG Linjian. Wideband high-speed-train channel characterization based on measurements in in-service 5G-NR networks[C]// 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. London, UK: IEEE, 2020:1-6.
- [4] UNTERHUBER P, WALTER M, FIEBIG U-C, et al. Stochastic channel parameters for train-to-train communications[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2021,2(1):778-792.
- [5] TANG Pei. Channel characteristics for 5G systems in urban rail viaduct based on ray-tracing[C]// 2021 4th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems. Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2021:24-28.
- [6] 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.
- [7] 田磊, 张建华. IMT-2020 信道模型标准综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018,41(5):62-68. (TIAN Lei, ZHANG Jianhua. Overview on IMT-2020 channel model standard[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018,41(5):62-68.)
- [8] 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.)
- [9] DAHMAN G, COUILLARD D, GRANDMAISON M E, et al. Improved 2-ray model for overwater propagation channels: modeling the instantaneous variations in the received signal strength[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019,8(3):865-868.
- [10] 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.)
- [11] GUAN Ke, PENG Bile, HE Danping, et al. Channel characterization for intra-wagon communication at 60 and 300 GHz bands[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019,68(6):5193-5207.
- [12] GUAN Ke, PENG Bile, HE Danping, et al. Measurement, simulation, and characterization of train-to-infrastructure inside-station channel at the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019,9(3):291-306.

作者简介:

曾成胜(1984-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为通信工程. email:306288400@qq.com.

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.

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.

陈付坤(1989-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为通信工程.

丁建文(1980-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.