

文章编号: 2095-4980(2024)11-1209-12

面向 5G-R 的链路级传输速率仿真技术

史 政¹, 王晓燕², 朵 灏^{*3}, 郭梓烨¹, 张 玉⁴, 孙 斌¹, 王 玮^{5,6}, 郭兰图⁷

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 31567 部队, 北京 100144; 3. 中国信通院 泰尔终端实验室, 北京 100191;
4. 北京乾径科技有限公司, 北京 100076; 5. 中兴通讯股份有限公司, 陕西 西安 710114;
6. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518055; 7. 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

摘 要: 为帮助基于 5G 技术的铁路新一代移动通信(5G-R)系统在复杂铁路环境中确定基站间距, 提出一种链路级传输速率仿真技术。该技术依托多种经验传播模型, 获取电磁波在铁路沿线不同场景中的路径损耗, 进而评估无线链路的参考信号接收功率(RSRP)。基于得到的 RSRP 数据, 通过蒙特卡罗仿真方法计算链路级传输速率。仿真结果表明, 对于开阔场景, 基站间距可设置在 2 000~3 000 m 之间; 在城市和复杂地形中, 间距应缩短以维持性能。该技术能够反映 5G-R 系统在不同场景中的信号传输特性, 包括不同基站间距下传输速率和 RSRP 的变化, 为后续 5G-R 系统的基站部署规划提供了科学依据。

关键词: 5G-R 系统; 参考信号接收功率; 链路级传输速率; 基站间距

中图分类号: U284

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024520

Link-level transmission rate simulation technology for 5G-R

SHI Zheng¹, WANG Xiaoyan², DUO Hao^{*3}, GUO Ziyi¹, ZHANG Yu⁴, SUN Bin¹, WANG Wei^{5,6}, GUO Lantu⁷

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Unit 31567, Beijing 100144, China;

3. CTTL-Terminals, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;

4. Beijing Qianjing Technology Co., Ltd., Beijing 100076, China; 5. ZTE Corporation, Xi'an Shaanxi 710114, China;

6. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen Guangdong 518055, China;

7. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao Shandong 266107, China)

Abstract: To assist in determining the base station spacing for the new generation of mobile communication systems for 5G-Railway(5G-R) in complex railway environments, a link-level transmission rate simulation technology is proposed. This technology relies on various empirical propagation models to obtain the path loss of electromagnetic waves in different scenarios along the railway line, thereby assessing the Reference Signal Received Power(RSRP) of the wireless link. Based on the obtained RSRP data, link-level transmission rates are calculated by using the Monte Carlo simulation method. Simulation results indicate that in open-field scenarios, base station spacing can be set between 2 000 meters to 3 000 meters, while in urban and complex terrain environments, the spacing should be reduced to maintain performance. This technique accurately reflects the signal transmission characteristics of 5G-R systems across various scenarios, including the changes in transmission rate and RSRP with different base station spacings. And it provides a scientific basis for future base station deployment planning in 5G-R systems.

Keywords: 5G-R systems; Reference Signal Received Power; link-level transmission rate; base station spacings

铁路无线通信系统是保障铁路运输安全和效率的重要组成部分。传统的 GSM-R(Global System for Mobile

收稿日期: 2024-08-31; 修回日期: 2024-10-16

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司研究开发计划课题资助项目(N2023G052, K2023G006); 中国铁路青藏集团有限公司重大专项资助项目(2023QZzht12101, 2023QZzht12102); 中兴产学研合作资助项目(W23L01180); 教育部基金资助项目(8091B032123)

*通信作者: 朵 灏 email:duohao@caict.ac.cn

Communications-Railway)系统长期以来为铁路行业提供了可靠的通信服务,但作为基于2.5G技术的窄带系统,GSM-R的数据传输速率和连接能力已无法满足铁路运输对大规模数据通信和实时信息传输的需求^[1]。因此,铁路行业迫切需要更为先进的通信系统替代GSM-R,以适应未来铁路智能化发展的需要。

基于5G的5G-R系统应运而生,并逐渐成为铁路智能联接的首选技术。5G-R系统以其低时延、大规模连接能力以及出色的抗干扰性能,能够有效满足现代铁路通信系统的多样化需求,如实时视频监控、终端到终端(Terminal to Terminal, T2T)通信、列车多媒体调度和铁路物联网等^[2]。2.1 GHz频段作为5G-R系统的主要工作频段之一,具备较好的传播特性和覆盖能力,能够为高速铁路沿线提供稳定的通信服务^[3]。

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。现有的信道建模方法主要分为3类:经验模型、几何模型以及混合模型。经验模型基于大量测量数据得出,计算复杂度低,适用于大规模场景的快速评估。几何模型,如射线追踪技术,通过模拟电波在环境中的反射、折射、绕射等过程,精准地预测信号传播路径,但计算复杂度较高^[4]。混合模型结合了以上两者的优势,但仍存在场景依赖性强、参数调优复杂等局限性。此外,人工智能技术开始融入信道建模,展现出巨大的潜力^[5]。文献[6]测量并分析了1.89 GHz和2.6 GHz频段下,高铁场景中的路径损耗、莱斯K因子以及时延扩展等信道参数。文献[7]对2.15 GHz频段下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,并提出了一种适用于高速列车场景的信道模型。文献[8]通过射线跟踪技术,对3.5 GHz频段下城市轨道交通车站中的5G无线系统信道特性进行了仿真研究,并分析了路径损耗、均方根时延扩展和角度扩展等信道参数。文献[9]基于北京环形铁路测试线的实际测量数据,研究了2.1 GHz频段下的5G-R信道特性,分析了在开阔场景和复杂地形中信号衰减的特性。文献[10]利用射线跟踪技术对城市隧道内的无线信号覆盖进行了仿真研究。文献[11]通过射线跟踪技术,研究了高铁车站场景下5G-R网络的优化技术。文献[12]基于大量测量数据,提出了一种经验模型,并结合Hata模型进行修正,适用于铁路编组场景的路径损耗预测。可以看出,相关研究大多集中于对特定环境中信道特性的建模和评估,缺乏对2.1 GHz频段下多种复杂铁路场景的综合分析。这导致在实际应用中,如何在各种铁路场景中有效预测链路级传输速率和优化基站部署间距仍面临挑战。

链路级仿真作为一种评估通信系统性能的重要手段,得到了广泛应用。链路级仿真不仅能够基于现有信道模型,模拟多输入多输出系统(Multi-Input Multi-Output, MIMO)在复杂环境中的性能,还可以通过动态分析信道状态信息等参数,评估系统在不同信道条件下的整体性能^[13]。考虑到本研究中的场景多样性和实时性要求,本文提出一种基于多种经验传播模型的链路级传输速率仿真技术,专注于模拟2.1 GHz频段下铁路沿线环境中的信号传播特性。通过对不同场景中的RSRP和信号传输速率结果进行直观展示与分析,为确定5G-R系统基站部署间距提供数据支撑。

1 架构设计

仿真技术架构由数据输入模块、核心计算引擎和结果可视化3个部分组成(如图1所示)。数据输入模块负责接收并配置发射功率、收发方式、基站间距等关键仿真参数。核心计算引擎包括路径损耗计算、RSRP计算和速率评估3个单元,通过经验模型的选择与实现,计算信号路径损耗,进而评估RSRP及传输速率。结果可视化模块通过生成接收功率分布图和速率分布图,以直观方式展示仿真结果,并生成详细的结果数据文件,为5G-R系统的基站部署和网络优化提供参考。

2 关键技术实现方法

在整个仿真技术架构中,选择合适的传播模型与评估链路传输速率是关键部分。不同的铁路沿线场景具有独特的传播特性,因此需要根据场景的特点选择合适的传播模型。本节重点介绍了多种适用于不同场景的传播模型的选择与实现,并进一步阐述了链路级传输速率的计算原理。

2.1 传播模型的选择与实现

本文选择了自由空间传播模型、Okumura-Hata模型、COST-231 Hata模型、IEEE 802.16d模型、UMa模型和RMa模型用于路径损耗预测。通过上述模型的组合,能够有效覆盖铁路通信场景中所涉及的各种环境,包括开阔地带、城市和郊区以及丘陵、林区和山地等复杂地形。

2.1.1 自由空间传播模型

文献[14]给出了自由空间传播模型的数学公式,该模型假设信号在传播过程中仅受距离影响,而不考虑其他

环境因素。该模型的数学表达式为：

$$L = 20 \lg d + 20 \lg f + 20 \lg \left(\frac{4\pi}{c} \right) \quad (1)$$

式中：\$L\$ 为路径损耗；\$d\$ 为传播距离；\$f\$ 为信号频率；\$c\$ 为光速。

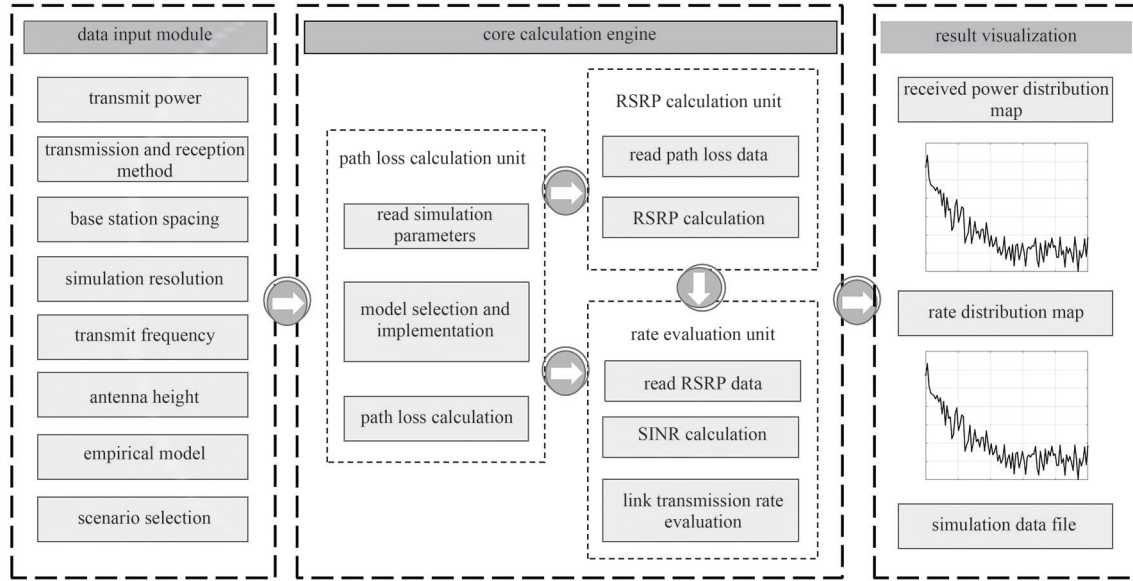


Fig.1 Overall architecture of simulation technology

图 1 仿真技术总体架构

自由空间模型适用于信号传播路径没有显著的遮挡物的开阔场景，如平原和高架桥段。由于其计算简单且不需要复杂的环境参数，因此可用作基准模型评估其他更复杂的传播模型在相同条件下的表现。

2.1.2 Okumura-Hata 模型

文献[15]给出了 Okumura-Hata 模型的数学公式，该模型对地形和环境类型进行了分类，并给出了相应的修正系数。对于市区(中小城市、大城市)环境，该模型的数学表达式为：

$$PL_{Hata,U}(d) = 69.55 + 26.16 \lg f - 13.82 \lg h_{Tx} - C_{Rx} + [44.9 - 6.55 \lg(h_{Tx})] \lg d \quad (2)$$

式中：\$PL_{Hata,U}\$ 为路径损耗；\$h_{Tx}\$ 为发射天线高度；\$d\$ 为发射天线和接收天线之间的距离；\$h_{Rx}\$ 为接收天线的高度；\$C_{Rx}\$ 为接收站天线高度的修正因子：

$$C_{Rx} = \begin{cases} 8.29 [\lg(1.54 h_{Rx})]^2 - 1.1, & \text{大城市 } 150 \text{ MHz} \leq f \leq 300 \text{ MHz} \\ 3.2 [\lg(11.75 h_{Rx})]^2 - 4.97, & \text{大城市 } 300 \text{ MHz} \leq f \leq 1500 \text{ MHz} \\ 0.8 + (1.1 \lg f - 0.7) h_{Rx} - 1.56 \lg f, & \text{中小城市} \end{cases} \quad (3)$$

对于郊区和开阔地，该模型的数学表达式为：

$$PL(d) = \begin{cases} PL_{Hata,U}(d) - 2 \left(\lg \frac{f}{28} \right)^2 - 5.4, & \text{郊区} \\ PL_{Hata,U}(d) - 4.78 (\lg f)^2 + 18.33 \lg f - 40.97, & \text{开阔地} \end{cases} \quad (4)$$

该模型以大量实际测量数据为基础，能够有效考虑建筑物密度、地形起伏等关键环境因素。因此，Okumura-Hata 模型在铁路沿线场景中，特别是在城市和郊区环境中，能够提供较为准确的路径损耗预测。

2.1.3 COST-231 Hata 模型

文献[16]给出了 COST-231 Hata 模型的数学表达式，该模型是对 Okumura-Hata 模型的扩展，旨在增强其在更高频率(1500~2000 MHz)和城市环境中的适用性。对于城市环境，其表达式为：

$$PL_U(d) = 46.3 + 33.9 \lg f - 13.82 \lg h_{Tx} - ah_{Rx} + (44.9 - 6.55 \lg h_{Tx}) \lg d + C_m \quad (5)$$

式中： PL_U 为路径损耗； d 为发射基站和接收基站之间的距离； a 为接收天线高度的修正因子； C_m 为环境修正因子，当环境为中小城市时，该参数为 0 dB，当环境为大城市时，该参数为 3 dB。

当环境为郊区时，需将城市环境中的路径损耗代入郊区修正公式：

$$PL(d) = PL_U(d) - 2 \left(\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5.4 \quad (6)$$

对于不同类型的环境， ah_{Rx} 的表达式为：

$$ah_{Rx} = \begin{cases} (1.1 \lg f - 0.7)h_{Rx} - (1.56 \lg f - 0.8), & \text{中小城市或郊区} \\ 3.2 [\lg(11.75h_{Rx})]^2 - 4.97, & \text{大城市 } f \geq 300 \text{ MHz} \\ 8.29 [\lg(1.54h_{Rx})]^2 - 1.1, & \text{大城市 } f \leq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (7)$$

COST-231 Hata 模型的设计考虑了高密度建筑物对信号传播的影响，该模型特别适用于铁路沿线的大城市环境。

2.1.4 IEEE 802.16d 模型

文献[17]给出了 IEEE 802.16d 模型的数学公式，该模型引入了对数正态阴影衰落，并根据收发端之间的障碍物密度，将环境划分为 3 种类型：A 类、B 类和 C 类，如表 1 所示。

表 1 IEEE 802.16d 模型分类表
Table 1 Classification of IEEE 802.16d model

type	description	parameter a	parameter b	parameter c
A	densely forested to moderately forested hilly areas(hills, mountainous regions, forests)	4.6	0.007 5	12.6
B	moderate path loss conditions(suburban areas)	4.0	0.006 5	17.1
C	sparsely forested flat areas (open areas)	3.6	0.005 0	20.0

该模型的数学表达式为：

$$PL_{802.16d}(d) = \begin{cases} 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + 10\gamma \lg \left(\frac{d}{100} \right) + C_f + C_{Rx}, & d > d_0 \\ 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right), & d < d_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$d_0 = 10^{-\frac{C_f + C_{Rx}}{10\gamma} + 2} \quad (9)$$

$$\gamma = a - bh_{Tx} + \frac{c}{h_{Tx}} \quad (10)$$

$$C_f = \begin{cases} -10.8 \lg \left(\frac{h_{Rx}}{2} \right), & \text{A型和B型} \\ -20 \lg \left(\frac{h_{Rx}}{2} \right), & \text{C型} \end{cases} \quad (11)$$

$$C_{Rx} = \begin{cases} -10 \lg \left(\frac{h_{Rx}}{3} \right), & h_{Rx} \leq 3 \text{ m} \\ -20 \lg \left(\frac{h_{Rx}}{2} \right), & h_{Rx} > 3 \text{ m} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $PL_{802.16d}$ 为路径损耗； a 、 b 、 c 为参数，用于匹配不同的传播环境，具体如表 1 所示； d 为传输距离； d_0 为断点； γ 为路径损耗指数； C_f 为载波频率相关系数； C_{Rx} 为接收天线相关系数。

IEEE 802.16d 模型中包含了针对复杂地形和植被条件的特定参数调整，能够更精确地模拟信号因地形起伏和植被遮挡而产生的路径损耗和多径效应。因此，该模型常用于模拟复杂地形和植被条件下的信号传播，尤其适用于山地、丘陵、林区等铁路沿线场景中。

2.1.5 RMa 模型

文献[18]给出了 RMa 模型和 Uma 模型的数学表达式，其中 RMa 模型主要用于模拟农村或开阔地中信号的传播，当场景为视距(Line Of Sight, LOS)传播时，其路径损耗表达式为：

$$PL_{\text{RMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d_{\text{BP}} \\ PL_2, & d_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 10 \text{ m} \end{cases} \quad (13)$$

$$PL_1 = 20 \lg(40\pi d_{3D} f_c / 3) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \lg d_{3D} - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \lg h \times d_{3D} \quad (14)$$

$$PL_2 = PL_1(d_{\text{BP}}) + 40 \lg \left(\frac{d_{3D}}{d_{\text{BP}}} \right) \quad (15)$$

式中： f_c 为载波频率； h 为平均建筑物高度，设为第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)中的默认值 5 m； d_{3D} 为收发天线之间的欧氏距离； d_{2D} 为收发天线之间的水平距离； d_{BP} 为断点距离，具体取值为：

$$d_{\text{BP}} = 2\pi h_{\text{BS}} h_{\text{UT}} f_c \quad (16)$$

式中： h_{BS} 为发射天线高度； h_{UT} 为接收天线高度。

当场景为非视距(Non-Line Of Sight, NLOS)传播时，其路径损耗为：

$$PL_{\text{RMa-NLOS}} = \max(PL_{\text{RMa-LOS}}, PL'_{\text{RMa-NLOS}}) \quad (17)$$

式中：

$$PL'_{\text{RMa-NLOS}} = 161.04 - 7.1 \lg W + 7.5 \lg h - \left(24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_{\text{BS}}} \right)^2 \right) \lg h_{\text{BS}} + (43.42 - 3.1 \lg h_{\text{BS}})(\lg d_{3D} - 3) + 20 \lg f_c - \left(3.2 (\lg(11.75h_{\text{UT}}))^2 - 4.97 \right) \quad (18)$$

式中 W 为平均街道宽度，根据铁路场景实际设置为 10 m。

阴影衰落通常为对数正态分布，标准差(σ_{SF})依赖于具体的传播环境和条件，取值 $\sigma_{\text{SF}}=8$ 。

RMa 模型的设计考虑了信号传播路径较长、环境遮挡物较少以及地形起伏可能对传播效果产生的影响，因此该模型特别适合模拟铁路经过农村或开阔地的场景。

2.1.6 UMa 模型

UMa 模型适用于城市环境，特别是在高层建筑密集的区域，它可以准确模拟信号在高密度建筑物之间的传播行为。当其场景为视距传播时，其路径损耗公式为：

$$PL_{\text{UMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{BP}} \\ PL_2, & d'_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (19)$$

式中：

$$PL_1 = 28.0 + 22 \lg d_{3D} + 20 \lg f_c \quad (20)$$

$$PL_2 = 28.0 + 40 \lg d_{3D} + 20 \lg f_c - 9 \lg (d'_{\text{BP}})^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2 \quad (21)$$

式中 d'_{BP} 为断点距离，具体表达式为：

$$d'_{\text{BP}} = 4 \times \frac{h'_{\text{BS}} h'_{\text{UT}} f_{\text{Hz}}}{c} \quad (22)$$

式中： f_{Hz} 为频率； h'_{BS} 和 h'_{UT} 分别为发射天线和接收天线的有效高度，具体表达式为：

$$h'_{\text{BS}} = h_{\text{BS}} - h_{\text{E}} \quad (23)$$

$$h'_{\text{UT}} = h_{\text{UT}} - h_{\text{E}} \quad (24)$$

式中 h_{E} 为有效环境高度，其表达式为：

$$h_{\text{E}} = \begin{cases} 1 \text{ m}, & \frac{1}{1 + C(d_{2D}, h_{\text{UT}})} \\ \text{Discrete Uniform}(\{12, 15, 18, \dots, h_{\text{UT}} - 1.5\}), & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式中：

$$C(d_{2D}, h_{\text{UT}}) = \begin{cases} 0, & h_{\text{UT}} < 13 \text{ m} \\ \left(\frac{h_{\text{UT}} - 13}{10} \right)^{1.5} g(d_{2D}), & 13 \text{ m} \leq h_{\text{UT}} \leq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (26)$$

$$g(d_{2D}) = \begin{cases} 0, & d_{2D} \leq 18 \text{ m} \\ \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100} \right)^3 \exp\left(\frac{-d_{2D}}{150}\right), & d_{2D} > 18 \text{ m} \end{cases} \quad (27)$$

阴影衰落通常为对数正态分布, 标准差取值 $\sigma_{SF}=4$ 。

当其场景为非视距传播时, 其路径损耗为:

$$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS}) \quad (28)$$

式中:

$$PL'_{UMa-NLOS} = 13.54 + 39.08 \lg d_{3D} + 20 \lg f_c - 0.6(h_{UT} - 1.5) \quad (29)$$

阴影衰落通常为对数正态分布, 标准差取值 $\sigma_{SF}=6$ 。

综上所述, 不同的传播模型适用于不同的铁路场景。仿真工具通过结合这些模型, 实现了对铁路沿线复杂环境下的路径损耗和链路级传输速率的预测。

2.2 链路级传输速率仿真原理

在完成路径损耗预测后, 需进一步对 5G-R 系统的传输速率进行评估。本文将第一个基站视为接入小区, 其他基站视为干扰小区, 获取信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)。

首先, 基于经典经验模型计算接入小区在目标点位的路径损耗, 之后得到接收功率, 再通过式(30)计算 SINR。

$$R_{SIN} = \frac{P_r}{I + N} \quad (30)$$

式中: P_r 为接收功率; I 为其他基站的干扰; N 为热噪声功率。热噪声功率计算公式为:

$$N = kTB \quad (31)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度, 本文取 290 K; B 为系统带宽。

然后, 容量计算将基于 SINR 结果, 提取边缘速率结果。图 2 为基于 3GPP 协议的理论速率计算原理图。如图 2 所示, 理论峰值速率计算需要设置双工模式、带宽、子载波间隔和最大可用资源数目(包含资源块数目、共享信道符号数)以确定传输的时频域资源。首先, 双工模式的选择决定了系统的上下行链路资源分配方式, 通常分为频分双工(Frequency Division Duplex, FDD)和时分双工(Time Division Duplex, TDD); 带宽是速率计算中的核心因素, 它决定了系统可利用的频谱宽度, 在 5G-R 系统中, 使用的带宽为 10 MHz; 子载波间隔则决定了资源块的大小和符号时长, 较小的子载波间隔能够提供更多的资源块; 最大可用资源数目, 包括资源块数和共享信道符号数, 定义了系统在给定频资源内可分配的物理资源块数。随着资源块数的增加, 链路可承载的数据量也相应提高。最大支持层数将用以衡量 MIMO 多层传输下对传输效率的影响, 高支持层数可提高理论峰值速率。接收端的最大支持调制编码等级和与 SINR 对应的调制与编码策略(Modulation and Coding Scheme, MCS)等级将用以评估码率与调制阶数, 在高 SINR 条件下, 系统可使用更高阶的调制方式和更高的编码率, 从而获得更高的传输速率。3GPP 根据以上信息进行理论速率计算时遵循蒙特卡洛仿真方式, 先进行小区的撒点, 基于撒点结果和小区的 SINR 进行统计性仿真。基于统计性仿真结果与 5G 速率进行同理性的映射关系, 然后得到一个通用性的速率值。

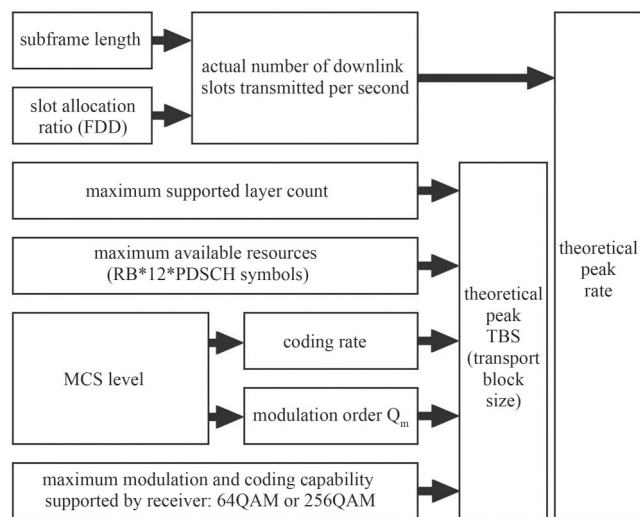


Fig.2 Schematic diagram of the rate calculation principle

图2 速率计算原理示意图

3 仿真配置与结果分析

3.1 仿真配置

本文选取典型的铁路通信场景模拟不同环境下的 5G-R 系统性能，实验场景涵盖了城市、郊区、丘陵、山地、林区以及开阔地多种铁路场景。目前，工业和信息化部已与中国国家铁路集团有限公司达成共识，即 2.1 GHz 频段将用于 5G-R 建设^[3]，因此文中采用 2.1 GHz 作为仿真频率。发射天线高度设置为 25 m，反映了实际基站塔的安装情况；接收天线高度设置为 1.5 m，模拟了列车顶部天线的高度。这一设置能够确保仿真结果与实际铁路场景的通信情况相符。详细仿真参数配置见表 2。

表2 工具仿真参数配置

Table2 Configuration of simulation parameters for the tool

parameter	value
transmit power/ dBm	43
transmission and reception method	4T4R
maximum distance between base stations/m	2 000
simulation resolution/m	20
center frequency/GHz	2.1
transmit antenna height/m	25
receive antenna height/m	1.5

3.2 结果分析

对不同场景下的仿真结果进行详细分析，同时，结合传播模型的设计原则和对各种传播效应的考虑，探讨不同模型预测结果变化和差异的原因。

3.2.1 开阔场景下的分析

如图 3 所示，在开阔场景中，3 种传播模型(自由空间传播模型、Okumura-Hata 模型和 IEEE 802.16d 模型)在预测结果上存在显著差异。自由空间传播模型假设传播路径中无障碍物，其接收功率的衰减相对较慢，传输速率在较长距离内仍能维持较高水平；Okumura-Hata 模型和 IEEE 802.16d 模型因考虑了环境因素的影响，接收功率衰减更为明显；IEEE 802.16d 模型在 500 m 后，速率降至仿真设置的最低值。综合看来，自由空间模型适用于理想条件下的预测，而 Okumura-Hata 和 IEEE 802.16d 模型在较为复杂的开阔环境，如铁路周围有小丘或稀疏植被中能提供更可靠的预测。

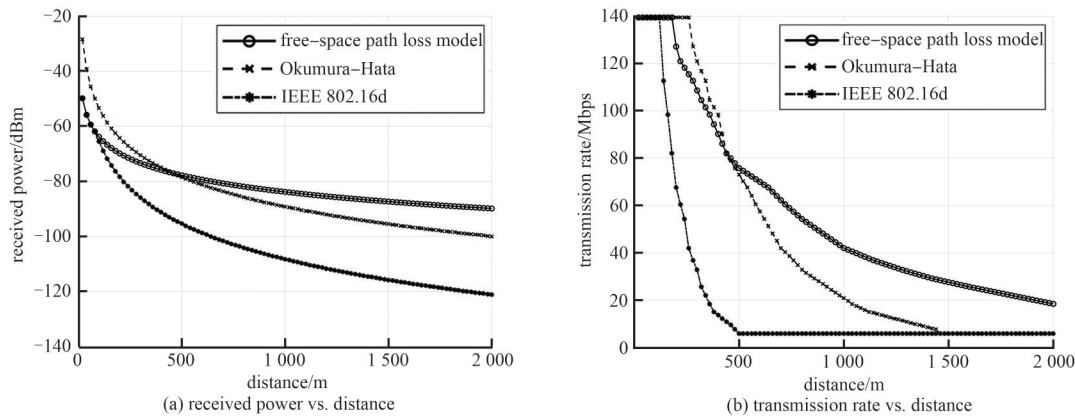


Fig.3 Comparison of results from different models in open scenarios

图3 开阔场景下的不同模型结果对比图

3.2.2 郊区场景下的分析

如图 4 所示，在郊区场景中，COST231-Hata 模型、Okumura-Hata 模型和 IEEE 802.16d 模型的结果在短距离内差异较小，接收功率和传输速率相近。随着距离的增加，接收功率和传输速率逐渐衰减，但在超过 500 m 后，基于 IEEE 802.16d 模型的接收功率和传输速率迅速下降。这是因为该模型考虑了多径效应和阴影衰落的影响。因此，在地形相对平坦的郊区环境中，COST231-Hata 和 Okumura-Hata 模型更为适用，而在地形复杂的郊区环境中，IEEE 802.16d 模型则更能准确反映实际信道特性。

3.2.3 城市场景下的分析

图 5 和图 6 为城市环境下 COST231-Hata 模型和 Okumura-Hata 模型的对比结果。COST231-Hata 模型在城市环境中表现出更为快速的信号衰减，尤其是在大城市环境中，这种衰减更加明显。这是因为 COST231-Hata 模型专门为高密度建筑环境设计，考虑了建筑物高度和多径效应的影响。而 Okumura-Hata 模型则更适合于建筑物密度较低的中小城市环境。

3.2.4 丘陵、山地及林区场景下的分析

如图 7 所示，在丘陵、山地和林区场景中，IEEE 802.16d 模型表现出显著的信号衰减，在距离超过 500 m 后，

传输速率降至最低值。这是由于该模型在设计时,引入了对数正态阴影衰落,详细考虑了地形起伏和植被密度对信号传播的影响。

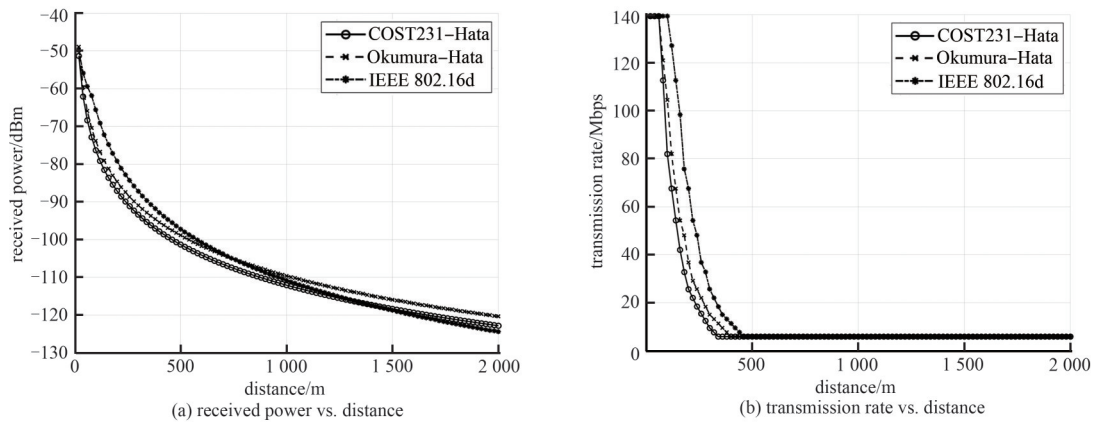


Fig.4 Comparison of results from different models in suburban scenarios

图4 郊区场景下的不同模型结果对比图

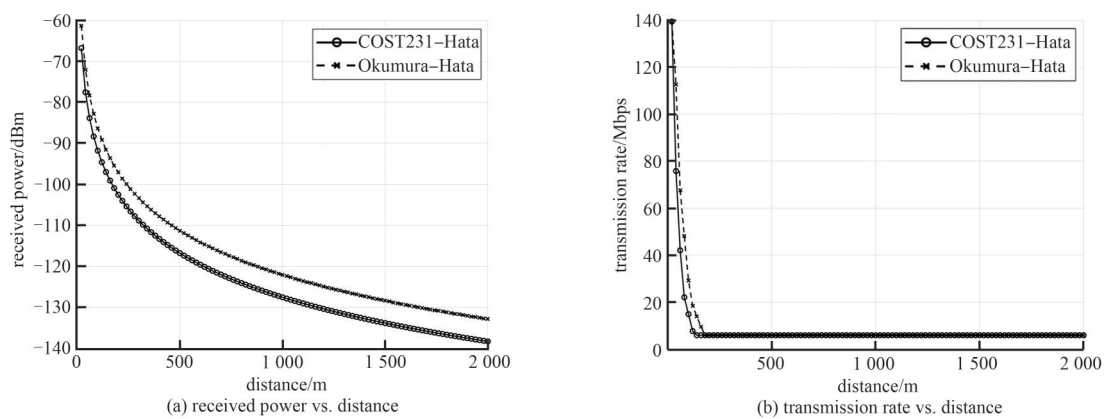


Fig.5 Comparison of results from different models in large city scenarios

图5 大城市场景下的不同模型结果对比图

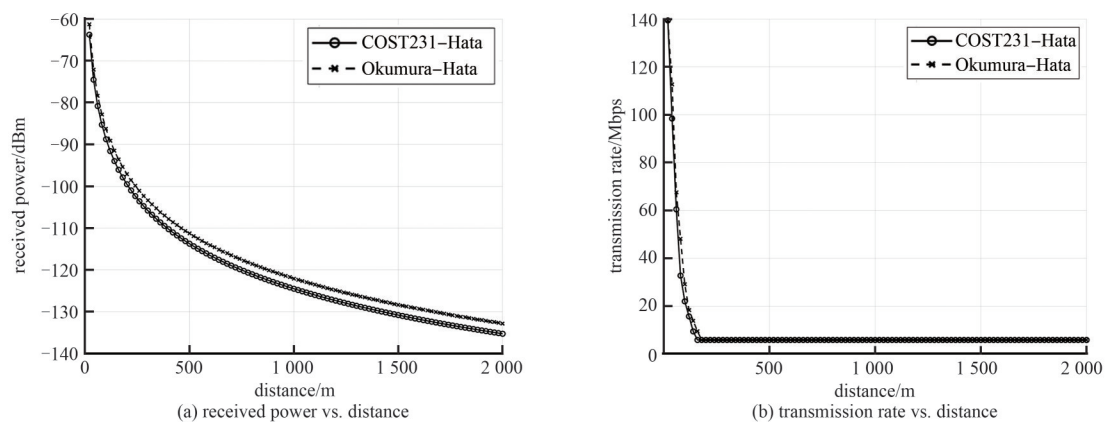


Fig.6 Comparison of results from different models in medium and small city scenarios

图6 中小城市场景下的不同模型结果对比图

3.2.5 开阔场景中的 LOS 与 NLOS 分析

在开阔场景中使用 RMa 模型进行仿真分析,结果如图 8~图 9 所示。在 LOS 条件下,信号传播路径较为简单,接收功率和传输速率衰减相对缓慢。在 NLOS 条件下,由于建筑物和地形的阻挡,信号传播路径变得更加复杂,导致接收功率的波动加大,传输速率衰减速度也显著增加。

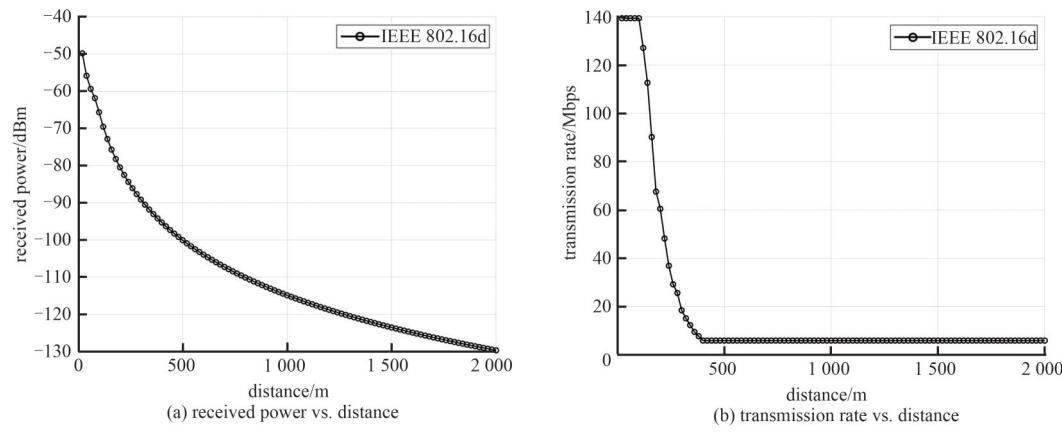


Fig.7 Results of IEEE 802.16d model in hilly, mountainous, and forested scenarios
图 7 丘陵、山地及林区场景下 IEEE 802.16d 模型结果图

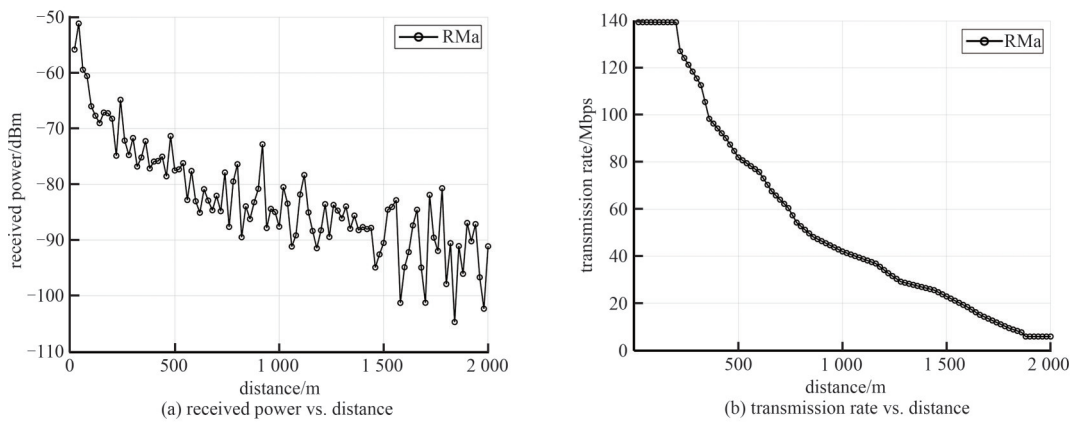


Fig.8 Results of RMa model under LOS conditions
图 8 LOS 条件下 RMa 模型结果图

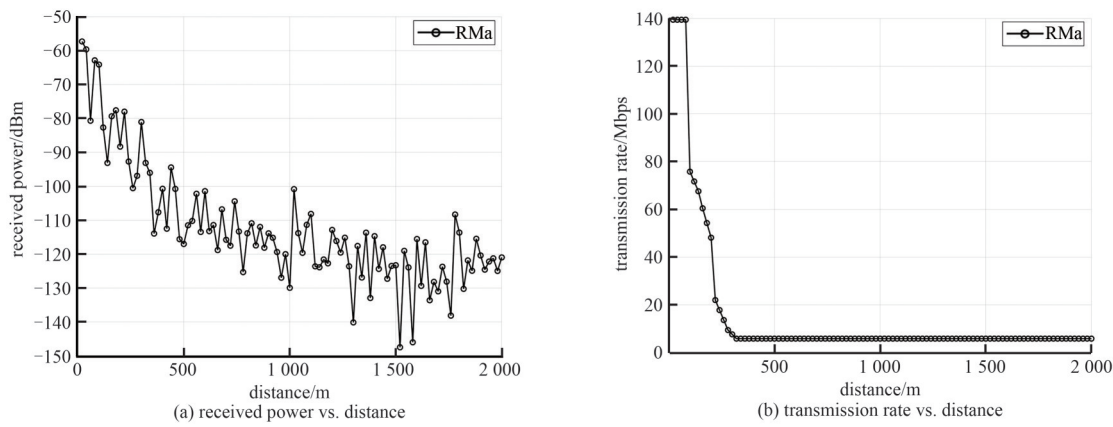


Fig.9 Results of RMa model under NLOS conditions
图 9 NLOS 条件下 RMa 模型结果图

3.2.6 城市场景中的 LOS 与 NLOS 分析

在城市场景中使用 UMa 模型进行类似分析，结果如图 10~图 11 所示。在 LOS 条件下，信号传播受环境的阻挡较少，接收功率和传输速率的衰减较为平缓。在 NLOS 条件下，建筑物的阻挡和反射使信号传播更加复杂，接收功率表现出更大的波动和更快的衰减，特别是在远距离时，这种现象更为明显。

基于前述分析，不同传播模型在 5G-R 系统中的表现因其设计原理不同而存在显著差异。此外，LOS 和 NLOS 条件下的信号传播特性对网络性能影响显著，在 NLOS 条件下，信号的衰减和传输速率的波动更大。

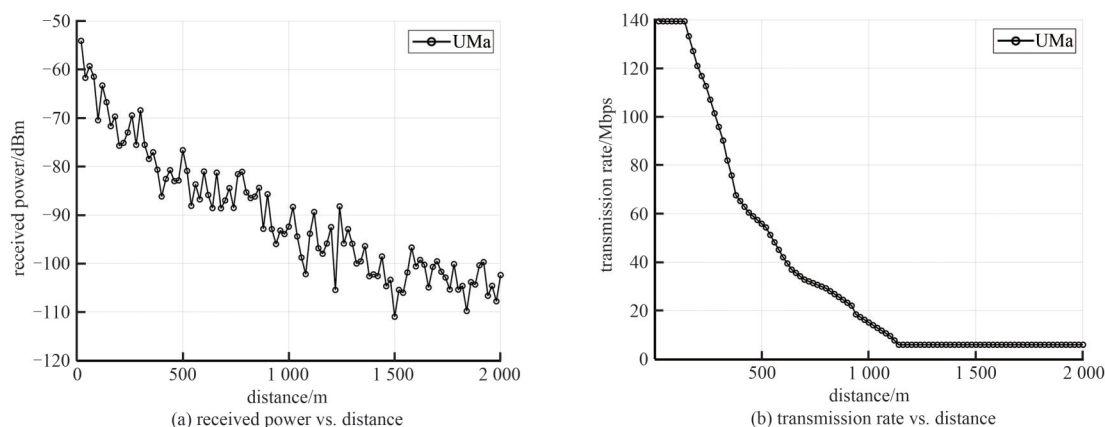


Fig.10 Results of UMa model under LOS conditions

图 10 LOS 条件下 UMa 模型结果图

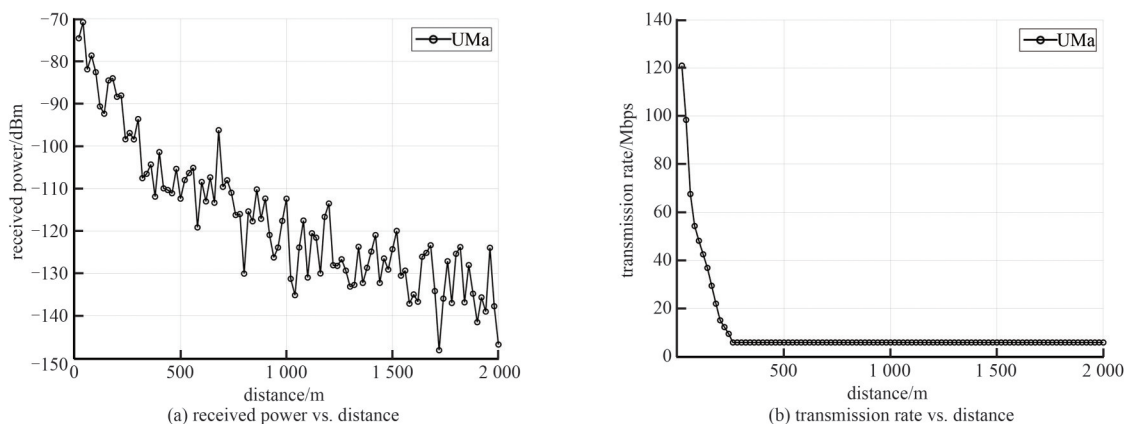


Fig.11 Results of UMa model under NLOS conditions

图 11 NLOS 条件下 UMa 模型结果图

3.3 5G-R 系统基站部署间距优化策略

3.3.1 开阔场景的部署策略

在开阔场景中, 仿真结果显示, 接收功率在距离增加到约 1 500 m 时开始显著下降, 信号强度接近 -110 dBm 的临界值^[19], 但在 1 000 m 内仍能保持较高的传输速率。由于 5G-R 基站沿铁路线朝两个方向覆盖, 建议基站间距设置在 2 000~3 000 m 之间, 以确保覆盖范围和传输速率之间的平衡。

3.3.2 城市的部署策略

在城市 NLOS 环境中, 仿真结果表明, 在 500 m 以后, 接收功率和传输速率都迅速下降。因此, 在城市 NLOS 条件下, 建议基站间距控制在 1 000 m 以内, 以保证信号覆盖的稳定性和传输性能。

在城市 LOS 条件下, 仿真结果显示, 接收功率和传输速率在前 1 000 m 内下降较快, 但仍保持在相对较高的水平, 超过 1 000 m 后, 信号质量开始显著下降。因此, 在城市 LOS 条件下, 建议基站间距设置在 2 000 m 以内。

3.3.3 郊区的部署策略

在郊区场景中, 3 种模型都显示出较为快速的信号衰减, 信号在 1 000 m 左右接近临界值 -110 dBm。建议在郊区环境中, 基站间距控制在 1 600~2 000 m 以内。

3.3.4 复杂地形场景的部署策略

对于丘陵、山地、林区等复杂地形环境, IEEE 802.16d 模型的仿真结果显示, 接收功率在超过 800 m 后低于临界值 -110 dBm。因此, 在这些地形复杂的区域, 建议将基站间距控制在 1 200~1 600 m 以内, 并在关键区域增加基站密度, 弥补信号衰减带来的覆盖不足。

综上所述, 在 5G-R 网络规划中, 建议根据具体的铁路场景灵活选择适用的传播模型, 并针对复杂环境采取场景定制化优化的策略, 在关键区域增加基站数目, 确保网络性能的稳定性和可靠性。

4 结论

本文针对 2.1 GHz 频段的 5G-R 系统,提出了一种链路级传输速率仿真技术。通过集成多种传播模型,得到了铁路沿线不同场景下的特定点位接收功率和传输速率仿真结果,为 5G-R 基站的部署提供了科学依据。建议在不同的环境下灵活调整基站间距,优化网络覆盖和传输性能。

参考文献:

- [1] 鲁玉龙,沈海燕,张俊尧,等. 智能铁路新一代移动通信关键技术探索与展望[J]. 电信科学, 2023,39(1):30-41. (LU Yulong, SHEN Haiyan,ZHANG Junyao,et al. Exploration and prospect of key technologies for new generation mobile communication in intelligent railways[J]. Telecommunication Science, 2023,39(1):30-41.) doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2023002.
- [2] 李翠然,谢健骊,高文娟. 基于 5G-R 业务的高速铁路异构网络接入技术[J]. 中兴通讯技术, 2021,27(4):18-23. (LI Cuiran, XIE Jianli,GAO Wenjuan. Heterogeneous network access technologies based on 5G-R services for high-speed railway[J]. ZTE Technology Journal, 2021,27(4):18-23.) doi:10.12142/ZTETJ.202104005.
- [3] 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. doi:10.1109/MNET.001.1900659.
- [4] HE Danping, AI Bo, GUAN Ke, et al. The design and applications of a 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.
- [5] 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.
- [6] ZHOU T, TAO C, 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. doi:10.1109/GLOCOM.2015.7417096.
- [7] YANG J, AI B, 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. doi:10.1109/TVT.2019.2894186.
- [8] TANG Pei. Channel characteristics for 5G in urban rail station at 3.5 GHz based on ray-tracing[C]// 2021 the 7th International Conference on Computer and Communications. Chengdu, China: IEEE, 2021:2264-2268. doi:10.1109/ICCC54389.2021.9674363.
- [9] LIANG Yiqun, LI Hui, LI Yi, et al. Mainline railway modeled with 2 100 MHz 5G-R channel based on measured data of test line of loop railway[J]. Symmetry, 2024,16(4):431. doi:10.3390/sym16040431.
- [10] 唐庆涛, 马子昂, 官科, 等. 基于高性能射线跟踪技术的城市隧道无线信号覆盖研究[J]. 北京交通大学学报, 2021,45(5):16-21. (TANG Qingtao, MA Ziang, GUAN Ke, et al. Research on wireless signal coverage in urban tunnels based on high-performance ray tracing[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021,45(5):16-21.) doi:10.11860/j.issn.1673-0291.20210107.
- [11] 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 scenarios 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.
- [12] DING Jianwen, LIU Yao, LIAO Hongjian, et al. Statistical model of path loss for railway 5G marshalling yard scenario[J]. ZTE Communications, 2023,21(3):117-122. doi:10.12142/ZTECOM.202303015.
- [13] 周强正. 面向高空基站的链路级性能评估平台设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2022. (ZHOU Qiangzheng. Design and implementation of a link-level performance evaluation platform for high-altitude base stations[D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022.) doi:10.26969/d.cnki.gbydu.2022.002163.
- [14] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2024.
- [15] HATA M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980(29):317-325. doi:10.1109/T-VT.1980.23859.
- [16] 闻映红. 天线与电波传播理论[M]. 北京:清华大学出版社, 2002. (WEN Yinghong. Antenna and radio wave propagation theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [17] IEEE. 802.16-2004-IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 16: air interface for fixed broadband wireless access systems: Std 802.16-2022[S]. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2022.
- [18] 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[R]. 2017.
- [19] Teltonika Networks. Mobile signal strength recommendations[EB/OL]. [2024-08-31]. https://wiki.teltonika-networks.com/view/Mobile_Signal_Strength_Recommendations.

作者简介:

史 政(2001-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为铁路现代化转型 .email:24125162@bjtu.edu.cn.

王晓燕(1982-), 女, 硕士, 主要研究方向为信息服务.

朵 灏(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为移动通信技术.

郭梓烨(2001-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为铁路现代化转型.

张 玉(2000-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无线信道建模和无线网络规划优化.

孙 斌(1981-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为宽带移动通信与专用移动通信.

王 玮(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无线干扰分析、无线网络规划与优化.

郭兰图(1982-), 男, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为频谱管理和复杂电磁环境建模.

(上接第 1198 页)

- [7] 中国电子技术标准化研究院. 工业互联网平台白皮书(2018 年)[R]. 2018. (China Institute of Electronic Technology Standardization. Industrial internet platform white paper(2018)[R]. 2018.)
- [8] 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟. 边缘计算与云计算协同白皮书(2018 年)[R]. 2018. (Edge Computing Consortium, Alliance of Industrial Internet. Edge computing and cloud computing collaboration white paper(2018)[R]. 2018.)
- [9] ZHOU Zhi, CHEN Xu, LI En, et al. Edge intelligence: paving the last mile of artificial intelligence with edge computing[J]. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2019, 107(8):1738-1762. doi:10.1109/JPROC.2019.2918951.
- [10] CHEN Jiasi, RAN Xukan. Deep learning with edge computing: a review[J]. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2019, 107(8):1655-1674. doi:10.1109/JPROC.2019.2921977.
- [11] KUSHNER H J, YIN G G. Stochastic approximation and recursive algorithms and applications[M]. New York, USA: Springer, 2003. doi:10.1007/978-1-4899-2696-8.
- [12] 刘昌锦, 韦哲. 香农公式在扩频通信中的应用[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4):80-83. (LIU Changjin, WEI Zhe. Research on application of Shannon formula in spread spectrum communication[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2013, 34(4):80-83.) doi:10.11809/scbgxb2013.04.024.
- [13] BERENGUER I, WANG X D, KRISHNAMURTHY V. Adaptive MIMO antenna selection via discrete stochastic optimization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(11):4315-4329. doi:10.1109/TSP.2005.857056.
- [14] KRISHNAMURTHY V, WANG X D, YIN G. Spreading code optimization and adaptation in CDMA via discrete stochastic approximation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(9):1927-1949. doi:10.1109/TIT.2004.833338.

作者简介:

燕增伟(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为列车控制系统、通信传输技术、大数据应用等. email:bjdyzw@163.com.

林 森(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为边缘计算、强化学习、深度学习等.

肖 骁(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为列车控制系统、5G、机器学习.