



无线信道数字孪生关键技术现状及展望

官 科, 张美文, 何丹萍, 艾 渤, 刘 婷, 王熙平, 魏 尧, 赵 旭, 卢 斌, 窦建武, 王欣晖, 钟章队

The current situation and prospects of the critical digital twin technology for wireless channels

GUAN Ke, ZHANG Meiwen, HE Danping, AI Bo, LIU Ting, WANG Xiping, WEI Yao, ZHAO Xu, LU Bin, DOU Jianwu, WANG Xinhui, and ZHONG Zhangdui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024178>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向B5G和6G通信的数字孪生信道研究

Study on digital twin channel for the B5G and 6G communication

电波科学学报. 2021, 36(3): 340–348, 385

智能可控电磁表面信道建模

On the channel modeling of intelligent controllable electro-magnetic-surface

电波科学学报. 2021, 36(3): 368–377

一种射线跟踪信道仿真的电磁参数选取方法

A method of electromagnetic parameters selection for ray-tracing channel simulation

电波科学学报. 2022, 37(1): 99–105

面向6G的毫米波多频段多天线信道测量系统构建及实测验证

Construction and measurement verification of 6G mmWave multi-band multi-antenna channel measurement system

电波科学学报. 2023, 38(1): 44–53

6G超大规模天线信道波束域传播特性分析

Beam domain propagation characteristics analysis of 6G ultra-massive MIMO channels

电波科学学报. 2023, 38(1): 35–43

无线信道建模中二分K均值聚类多径分簇算法

Multi-path clustering method based on bisecting K-means clustering in wireless channel modeling

电波科学学报. 2023, 38(2): 284–291



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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, xxxx, x(x): x-xx. DOI: 10.12265/j.cjors.2024178

GUAN K, ZHANG M W, HE D P, et al. The current situation and prospects of the critical digital twin technology for wireless channels[J]. Chinese journal of radio science, xxxx, x(x): x-xx. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2024178

无线信道数字孪生关键技术现状及展望

官科^{1,2} 张美文^{1,2} 何丹萍^{2*} 艾渤² 刘婷² 王熙平² 魏焱³ 赵旭³
卢斌³ 窦建武^{4,5} 王欣晖⁵ 钟章队²

(1. 北京交通大学 先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 3. 中国电信研究院移动与终端技术研究所, 广州 510630; 4. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 深圳 510515; 5. 中兴通讯股份有限公司, 深圳 510515)

摘 要 随着 6G 的逐步推进, 无线信道数字孪生技术作为未来网络演进的关键技术之一, 受到了广泛的关注。本文综述了无线信道数字孪生技术的背景、系统架构及关键技术, 并展望了未来的发展方向。首先, 介绍了无线信道数字孪生技术的发展背景与需求、系统特点以及研究进展。然后, 详细讨论了复杂环境多介质电磁参数获取、高性能射线追踪仿真技术和模型-数据双驱动的混合信道建模等关键技术。最后, 对无线信道数字孪生技术在 6G 时代的发展做出展望, 并总结了潜在的标准化工作。无线信道数字孪生技术通过构建无线信道的虚拟孪生体, 提供了无线信道特性建模及其效应预测能力, 对 6G 及未来通信系统的发展具有重要意义。

关键词 6G; 无线信道; 数字孪生; 射线追踪; 混合信道建模; 介质电磁参数

中图分类号 TN92

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(xxxx)00-0001-11

DOI 10.12265/j.cjors.2024178

The current situation and prospects of the critical digital twin technology for wireless channels

GUAN Ke^{1,2} ZHANG Meiwen^{1,2} HE Danping^{2*} AI Bo² LIU Ting² WANG Xiping² WEI Yao³
ZHAO Xu³ LU Bin³ DOU Jianwu^{4,5} WANG Xinhui⁵ ZHONG Zhangdui²

(1. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Mobile Communication and Terminal Research Department, China Telecom Research Institute, Guangzhou 510630, China; 4. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 510515, China; 5. ZTE Corporation, Shenzhen 510515, China)

Abstract With the gradual advancement of the sixth-generation mobile communication system (6G), the digital twin technology for wireless channels, as one of the critical technologies for future network evolution, has received widespread attention. This paper summarizes the background, system architecture, critical technologies, and future development direction of the digital twin technology for wireless channels. Firstly, this paper introduces the development background and demand of digital twin technology for wireless channels, as well as its system characteristics and research progress. Then, this paper discusses critical technologies such as multi-medium electromagnetic (EM) parameter acquisition in complex environments, high-performance ray-tracing (RT) simulation technology, and hybrid channel modeling driven by both models and data. Finally, the paper looks forward to the development of wireless channel digital twin technology in the 6G era and summarizes potential standardization work. The digital twin technology for wireless channels provides the ability to model wireless channel characteristics and predict effects for EM wave propagation by constructing a virtual twin of the wireless channel, which is of great

收稿日期: 2024-08-18

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2904801); 教育部基金 (8091B032123); 北京市自然科学基金 (L221009)

通信作者: 何丹萍 E-mail: hedanping@bjtu.edu.cn

significance for developing 6G and future communication systems.

Keywords 6G; wireless channel; digital twin; ray-tracing; hybrid channel modeling; multi-medium electromagnetic parameter

0 引言

在 2030 年及以后的时代,以全息交互、通感互联等为代表的新业务和新场景将对移动通信提出更高的要求^[1]。因此,在 5G 商用部署之后,全球就开始了对于 6G 的探索^[1]。随着“智慧泛在、数字孪生”的 6G 愿景逐步成为业界共识,数字孪生技术将在未来网络演进中发挥重要作用^[2]。结合数字孪生技术的数字孪生网络 (digital twin network, DTN),以数字化方式创建网络本体的虚拟孪生体,通过与网络本体之间的实时交互映射,实现网络的闭环控制和全生命周期管理,达成 6G 的高质量发展^[3],是《数字中国建设整体布局规划》中的数字技术关键能力之一,对经济社会发展具有重要的战略意义和迫切的国家需求^[1]。

在无线网络数字孪生的背景下,通过将无线网络中的信道与数字孪生技术相结合,可以构建无线信道的虚拟孪生体,建立“由实构虚”“以虚导实”和“迭代演进”的闭环^[4]。无线信道数字孪生技术可以精确表征并预测各种复杂环境中的电波传播与无线信道特性,它的应用,不仅可以大量减少对现场测试的依赖,降低研发和运维成本,还能显著加快通信技术的研发进程,为太赫兹通信、物联网、通信感知一体化等热点技术的发展提供强有力的支撑^[5-6]。这有助于先进无线系统的设计,为未来通信网络的高效运行、智能管理和持续创新奠定坚实的基础^[1]。

无线信道的数字孪生依赖于精确的信道建模。目前,基于几何的统计模型 (geometry-based statistical model, GBSM) 和射线追踪 (ray-tracing, RT) 技术是最常用的信道建模方法。GBSM 通过几何参数和统计方法模拟无线信道的传播特性,适用于多种场景的广泛信道建模^[7]。RT 技术则能够精确模拟电波的直射、反射、散射和绕射等复杂传播机制,特别适用于城市、室内等复杂场景。然而,RT 的高计算复杂度限制了其在大规模网络中的应用,因此,如何平衡建模精度与计算效率是当前研究的热点之一。

本文综述了无线信道数字孪生技术的背景、系统架构及关键技术,并对未来发展方向进行了展望。第一节介绍了无线信道数字孪生系统的架构与特点。第二节总结了近年来无线信道数字孪生技术的研究进展。第三节详细讨论了无线信道数字孪生的三项关键技术。最后,对无线信道数字孪生技术在 6G 时代的发展做出展望,并总结了潜在的标准化工作。

1 无线信道数字孪生系统

1.1 无线信道数字孪生系统架构

文献 [4] 提出了面向 B5G 和 6G 通信数字孪生信道标准体系,其中包含评测、应用、关键技术、共性基础以及安全。本文在文献 [4] 的基础上,重点通过关键技术构建无线信道数字孪生系统,其总体架构如图 1。

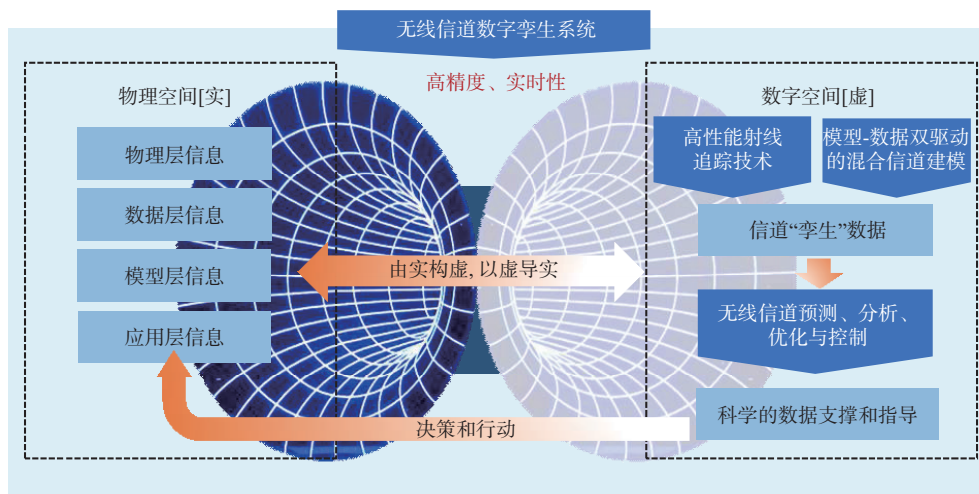


图 1 无线信道数字孪生系统总体构架

Fig. 1 Overall architecture of the digital twin system for wireless channels

物理空间:物理空间作为“实”的部分,由物理层、数据层、模型层以及应用层构成。物理层主要关注信道数字孪生的对象,包括物理空间的几何、电磁及其他多物理场特性等;数据层主要为物理空间测量到的时、空、频、极化等多维信道数据,是数字孪生主要的数据来源;模型层是对数据层信息的建模,包括对信道数据的去冗降噪、多径萃取与特性表征等;应用层主要包括无线信道数字孪生技术的具体决策应用,如通过在数字孪生信道的推演预测,为当前无线网络的优化运维、升级改造提供最佳决策,实现以虚导实^[1]。

利用三维场景建模技术与介质电磁参数获取技术,可以对物理空间进行几何电磁表征与建模,搭建“实”与“虚”之间的桥梁。

数字空间:在数字空间中,基于高性能 RT 技术,发展模型-数据双驱动的混合信道建模技术,高效准确地生成无线信道孪生数据,进而实现从物理空间的数据采集到数字空间的预测、分析、优化与控制的闭环,以虚导实,为物理世界的决策和行动提供有力的指导。

发展无线信道数字孪生系统面临一系列技术挑战,包括如何在复杂场景中获取多类型介质的电磁特性,如何实时生成高精度多径传播多维信道特征,以及如何确保该系统能够适应不同通信环境和满足多样化的应用场景等。尽管存在这些挑战,随着相关技术的不断进步,无线信道数字孪生系统将在未来通信发展中发挥重要的作用,不仅推动通信网络向着更加智能、高效和可靠的方向发展,还能通信技术提供强有力的支撑,促进信息通信领域的可持续高质量发展^[1]。

1.2 无线信道数字孪生系统特点

无线信道数字孪生系统通过“虚实结合”的方式,借助物理空间中的几何、电磁信息,在数字空间构建精准实时的无线信道数据孪生体,将预测推演结果传回物理空间,起到决策和行动的作用。结合现有关于数字孪生网络以及信道数字孪生的相关文献,可以将无线信道数字孪生系统的特点总结如下:

1) 物理空间精确表征:无线信道数字孪生系统可高度还原物理空间中的几何信息,建立几何环境的数字孪生体。通过多介质电磁参数获取技术,可以准确表征物理环境中的介质电磁参数信息,搭建实到虚的桥梁。在文献[3]中,地理环境模型作为整个 DTaaS 架构的支撑。文献[7-8]将多介质电磁参数获取作为面向 6G 时代信道数字孪生中的关键技术。综合物理空间几何与电磁的多维信息,完成物理空间的精确表征。

2) 高精度仿真与预测:无线信道数字孪生技术能够提供高度详细和准确的信道模型,这些模型能够实时反映信道的当前状态,并能进行精准高效的推演预测。如文献[2]中阐述到,无线仿真算法需要在保证性能的同时快速迭代,这对于优化网络部署、管理和维护至关重要。

3) 实时数据分析:通过持续收集和分析来自物理世界的无线信道及其虚拟副本的数据,无线信道数字孪生系统能够提供实时的洞察和决策支持^[5],以提高无线网络的效率和可靠性。

4) 网络管理与优化:无线信道数字孪生允许在不影响现实的情况下测试网络配置和策略,文献[6]将无线信道数字孪生作为 6G 网络管理中的关键技术,将虚拟环境中推演寻优的结果应用到实际网络中。

5) 支持复杂应用场景:随着 6G 技术对超高速率、超低延迟和大规模设备连接的支持,无线信道数字孪生系统将能够模拟和优化更为复杂的应用场景。如文献[4]所提到,无线信道数字孪生面向陆海空天一体化场景,又如文献[7]中更细分的低空智联、自动驾驶、智能城市场景等。

2 无线信道数字孪生技术研究进展

近年来,随着 6G 技术的发展,关于无线网络与无线信道数字孪生的研究日益增多。文献[9]指出创造数字孪生世界需要准确表征每一个对象的时空特性。文献[10]指出,6G 网络将包含大规模网元,网络拓扑结构复杂。因此,如何对真实的物理网络进行实时建模是一个巨大的挑战。无线信道数字孪生技术是网络数字孪生中不可缺少的组成部分。实时准确的场景自适应信道模型需要考虑如何实时准确地表征传播环境,以及如何预测无线信道未来可能发生的变化。文献[11]提出的 6G 普适信道模型,为数字孪生提供了一个统一的信道建模框架,可以模拟不同频段和场景下的无线信道特性,支持实时信道预测和优化,使得数字孪生能够精确反映 6G 通信环境中的信道行为。文献[12]针对实时信道数字孪生的需求,提出了一种融合 RT 和人工智能算法的超分辨率建模方法,减少对 RT 的调用次数,提升了信道数据生成的效率。文献[13]利用数字孪生模型来预测和优化室内电波传播特性,获取了基站到移动目标之间的太赫兹信号最佳传播路径。文献[14]提出的 EWaveNet 架构通过环境感知和电磁波传播特性预测,类似于信道数字孪生,实现了对物理环境的虚拟化和无线信道的动态模拟,以增强 6G 网络在复杂场景下的适应性。文献[15]利用来自分布

式基础设施和用户设备的多模态传感数据不断更新物理无线环境,服务于通信和感知决策的制定与优化。文献[7]对文献[11]中提出的第六代普适信道模型进行了补充,新道模型能够支持从次 6 GHz 到太赫兹频段,以及各种复杂场景的通信系统,从而为数字孪生的精确信道仿真提供了理论基础和模型支持。

尽管近年来学术界在无线信道数字孪生领域取得了显著进展,但该技术在实时性、兼容性、广泛应用场景研究和高频段硬件实现方面还有很多工作需要完成。这些领域的进一步研究将为未来 6G 及更高代际通信技术的发展奠定坚实基础。

3 无线信道数字孪生关键技术

为最大程度发挥无线信道数字孪生在通信网设计、运营和维护过程中的优势,无线信道数字孪生系统融合了多种关键技术,例如文献[4]中提出的“B5G 和 6G 通信数字孪生信道驱动技术体系”,其中包含了多维感知、宽谱测量、全景仿真、机器学习、边缘计算等技术。又例如文献[14]所提出的“电磁波传播特性预测使能网络”,其中将感知增强、物理环境重构、电磁波传播特性计算作为核心模块。本文总结无线信道数字孪生的现有技术,重点阐述无线信道数字孪生系统中的骨干技术,如图 2 所示:由物理空间出发,无线信道数字孪生系统的物理层精准映射各类对象,数据层实时更新数据,模型层承载虚实交互,协同支撑了复杂环境多介质电磁参数获取技术;在此基础上,高性能 RT 仿真技术与模型-数据双驱动的混合信道建模技术共同构建数字空间,实现无线信道数字孪生系统的虚实交互以及具体决策应用。

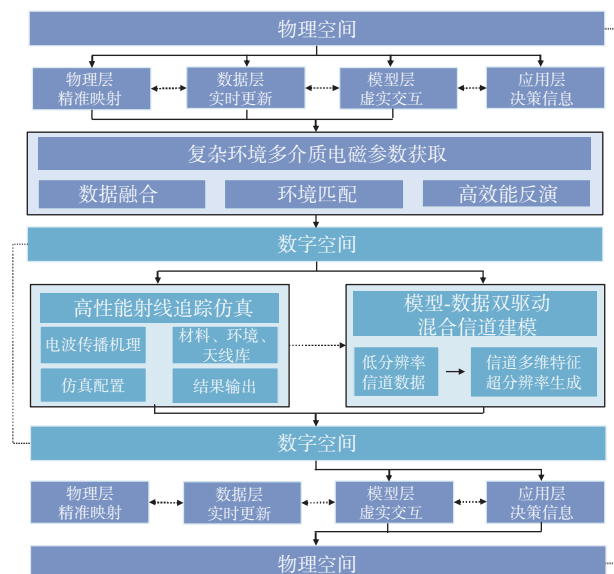


图 2 无线信道数字孪生关键技术^[1]

Fig. 2 Critical technologies of the digital twin system for wireless channels^[1]

3.1 复杂环境多介质电磁参数获取技术

无线信道数字孪生技术的应用场景大多包含复杂的结构体和多种电磁特性各异的介质,其对电波传播会造成复杂的传播效应^[16]。因此,无线信道数字孪生技术的实现离不开准确的介质电磁参数。在直射、散射、反射等电波传播机制的数学模型中,电磁参数作为关键变量,将直接决定孪生结果的准确性。然而,随着无线系统的应用环境愈发复杂,介质电磁参数获取过程在时间和准确性上均遭遇瓶颈。因此,如何在复杂环境中准确、快速获取介质电磁参数是无线信道数字孪生技术实现过程中所面临的重大挑战^[17]。

和使用传统国际电信联盟无线电通信部门推荐值不同,文献[18]提出了一种新的复杂环境多介质电磁参数获取技术,可以开展基于场景特点的准确高效电磁参数反演。实施关键步骤涉及多源异构电磁传播数据融合^[19]、多径萃取与环境映射技术,实现多介质电磁参数的准确高效反演,具体流程如图 3 所示。

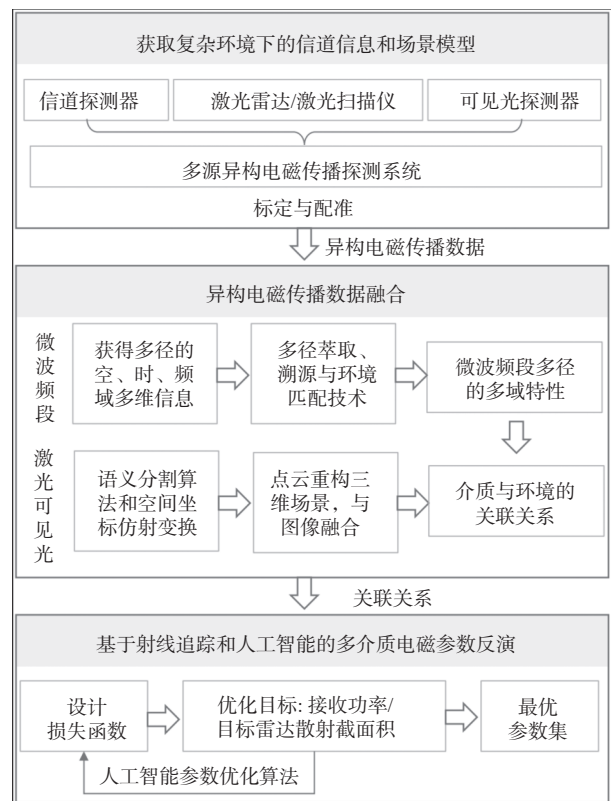


图 3 复杂环境多介质电磁参数获取技术流程^[18]

Fig. 3 Flowchart of multi-medium electromagnetic parameter acquisition in complex environment^[18]

首先,需要获取复杂环境下的信道信息和场景模型,并进行异构电磁传播数据融合。具体地,结合信道探测器、激光雷达/激光扫描仪与可见光探测器,搭建多源异构的电磁传播探测系统,获得全面、

多源的信道信息;由激光雷达或激光扫描仪获取的点云数据重构场景三维模型,基于搭建的多源异构电磁传播探测系统,研究异构数据的标定与配准方法,为实现复杂环境下异构电磁传播数据融合提供数据基础。

然后,需要针对微波频段数据开展进一步萃取和匹配:研究多径萃取、溯源与环境匹配技术。对于激光点云和可见光图像,利用语义分割算法和空间坐标仿射变换等技术实现点云与图像的融合^[12];对于微波频段,利用点云重建的场景三维模型,结合 RT 技术^[20],重构微波频段多径传播路径,获得多径的空、时、频域多维信息。基于多径检测等算法,在时延域、角度域、多普勒域上进行多维度变换,获得微波频段多径的多域特性;结合融合后的点云及图像数据,实现从微波到可见光的多频段传播特性关联,并在此基础上开展多径识别与参数萃取。随后,建立微波多径、激光点云、图像的映射关系表和相关性模型,旨在揭示多频段数据之间的内在联系。

最后,利用介质与复杂环境的关联关系,结合 RT、人工智能参数优化^[12]等方法准确、高效地实现多介质电磁参数反演。通过设计损失函数,可用接收功率或目标雷达散射截面作为优化目标,利用人工智能的方法同时对多个介质、不同传播机理涉及到的多类电磁参数(如介电常数实部、电导率、散射系数、等效粗糙度等)开展反演,输出使仿真和实测结果误差最小的最优参数集。

2022 年,文献[21]基于道路测量获取的信道数据对车辆金属材料开展了反演,利用高精度的 RT 计算获取了准确的介电常数、损耗角正切及反射系数等多类电磁参数。2023 年,该研究团队进行了无线信道数字孪生实验^[12],其自主研发的多传感器数据采集系统实现了多传感器标定与数据融合,可在城市道路、乡村道路、交叉路口、高速公路、山地等典型场景中采集卫星-惯导组合、毫米波雷达、激光雷达和摄像头的实测数据,并实现了激光点云和图像的融合,同时反演了复杂环境中多频段(微波、激光、可见光)、多类型(车辆、高架桥、道路)的多种电磁参数(介电常数实部、损耗角正切、散射系数等),为准确、高效地同时反演多个介质的电磁参数奠定了基础,结果如图 4 和图 5 测量结果所示。

基于本节电磁参数获取新方法,在图 4 所示的高架桥场景中利用高性能 RT 技术溯源多径,反演多介质电磁参数,由此计算出接近真实测量的电磁场分布情况。如图 4 和图 5 的无线信道数字孪生结果所示,对孪生的点云和图像进行异构数据融合,准确复现了测量结果:可见光与激光频段的光照强度均

方根误差为 10^{-2} sr^{-1} 左右^[12],微波频段为 3.54 dB^[22]。

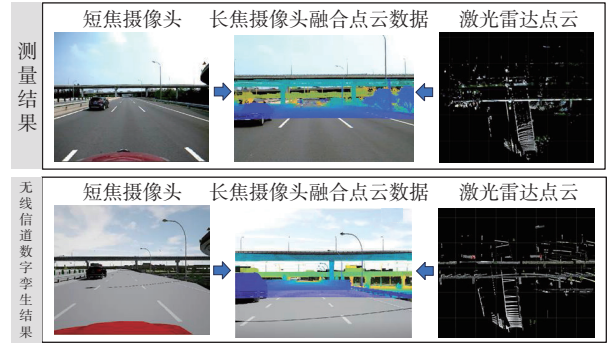


图 4 可见光与激光频段多传感器标定与数据融合测量结果和基于反演后电磁参数开展的无线信道孪生结果^[12,18]

Fig. 4 Results of multi-sensor calibration and data fusion measurements in visible and laser bands with wireless channel twin based on the calibrated electromagnetic parameters^[12,18]

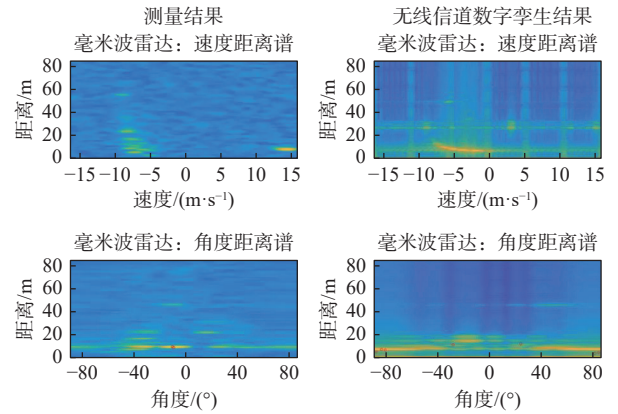


图 5 微波频段多传感器标定与数据融合测量结果和基于反演后电磁参数开展的无线信道孪生结果^[18,22]

Fig. 5 Results of multi-sensor calibration and data fusion measurements in microwave bands with wireless channel twin based on the calibrated electromagnetic parameters^[18,22]

可见,上述方法可以准确高效获取复杂场景多介质多频段的电磁参数,从而实现不同场景及应用的无线信道数字孪生。

3.2 高性能 RT 仿真技术

RT 是一种被广泛应用于仿真无线通信场景中电波传播过程的技术,可以准确模拟电磁波在环境中的各种传播机理^[23],进而对复杂场景中的多径信道特征进行准确的表征。

具体而言,RT 仿真技术将物理环境中的电波传播过程抽象为不同类型的射线^[24-25],用以表征直射、反射、透射、绕射、散射等电波传播机理^[26-27]。其中,直射通常使用费里斯方程进行计算,描述信号在直线路径上传播的损耗。反射和透射的传播方向遵循斯涅尔定律,该定律描述了入射角、反射角和折射角之间的关系^[28]。反射与透射电场的大小由不同偏

振的非涅耳方程计算^[28]。

绕射射线的计算更复杂,涉及到绕射几何理论 (geometrical theory of diffraction, GTD)、一致性绕射理论 (uniform theory of diffraction, UTD)^[29]、一致渐近理论 (uniform asymptotic theory, UAT)、多边绕射模型 (如 Deygout 模型和 Epstein-Peterson 模型) 以及其他绕射理论。

散射遵循的传播机理会随散射体的特性而不同。文献 [30] 将建筑物立面的散射分为镜面和非镜面分量,提出了一种与每个建筑物墙壁相关联的等效粗糙度 (Effective Roughness, ER) 模型,该模型不仅考虑了实际表面粗糙度,还考虑了墙壁不连续、表面具有小物体的效应等^[31]。文献 [31] 针对不同的表面的不规则性提出了“Directive Model”和“Backscattering Lobe Model”两种模型。前者已被纳入和使用在 RT 仿真技术中,并在低于 6 GHz 频段和毫米波频段的城市和铁路环境中进行了验证。对于植被的散射,多重散射理论 (multiple scattering theory, MST)^[32] 是获取相干和非相干散射场最常用的方法。在当前版本的 ITU-R Rec P.833-10^[33] 中, MST 被纳入植被的散射传播机理模型。雷达散射截面已被用于研究在多种结构体的散射传播,如灯柱、公交候车亭和各种交通标志。

相较于传统的 RT 方法,高性能 RT 技术^[12,20,23] 在算法、算力和数据层面进行了如下优化:

算法层面:高性能 RT 技术利用全波分析获得真实场景复杂结构体的散射场,变换为雷达图像后利用 CLEAN 算法提取关键散射中心,以极少数关键散射中心表征绝大部分散射能量,形成了散射中心稀疏化表征方法^[34]。

算力层面:高性能 RT 技术将 RT 方法与高性能计算机理相结合,对不同仿真时隙以及每个时隙中的多径进行并行计算,同时引入空间分割等计算机图形学算法,提高了数据生成的效率^[34]。

数据层面:高性能 RT 技术对仿真得到的多径大数据进行显著性分析,滤除次要多径,对主要传播机理的空-时-频等关键特性参数进行“兼具空间一致性和随机性”的混合建模^[34]。

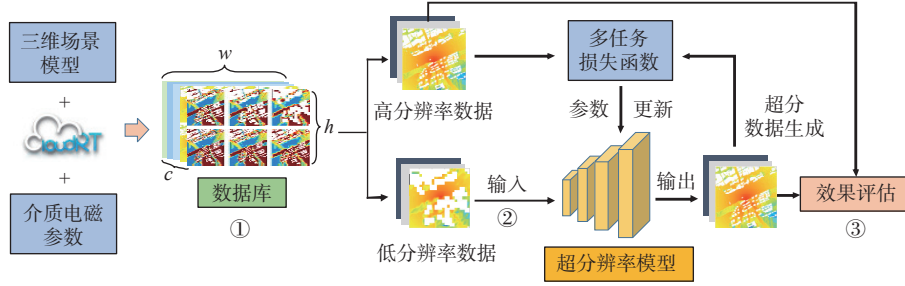
无线信道数字孪生技术要求虚实实时镜像与交互,多径信道数据的更新频率要和通信系统同步,通常要求孪生系统的信道冲激响应更新时间缩至毫秒量级。通过算法、算力和数据层面三重优化后的高

性能 RT 技术,在保证精准度的同时,可以将计算时间降到原本的千分之一,逼近了虚实镜像与交互的实时性要求。利用高性能 RT 仿真生成的多径级别信道数据可以训练各类人工智能模型和算法,进而实现数据驱动的信道建模^[18-19]。

3.3 模型-数据双驱动的混合信道建模技术

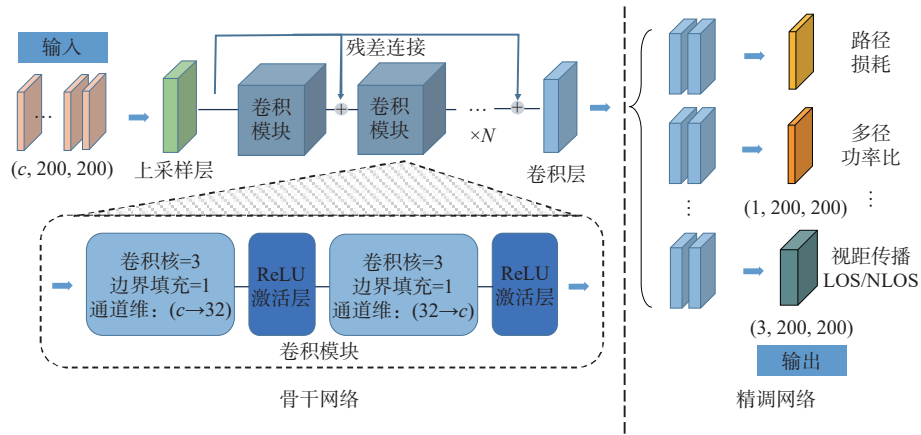
数字孪生技术将在未来“智慧泛在、数字孪生”的 6G 应用中发挥重要作用^[35]。无线信道数字孪生系统通过创建信道本体的虚拟孪生体,从而实现无线信道的精确仿真以及全生命周期管理^[2,36]。准确的无线信道模型是无线信道数字孪生系统的重要基础。同时,为了实现与物理实体的同步与闭环,无线信道数字孪生技术要求无线信道数据的生成速度与实际系统一致。在“高精度”的基础上叠加“实时性”,这成为了无线信道数字孪生系统的新问题与新挑战。针对具体场景,RT 技术是准确表征多径信道多维特征的主要方法。但随着波长的减小和场景的扩大,RT 的计算复杂度将急剧升高,无线信道的多径表征难以兼顾精度与效率。尽管现有研究的机理模型正持续优化效率,但和“高精度、实时性”仍有差距,难以达到无线信道数字孪生所需的技术要求。伴随着 6G 的迅猛发展,深度学习技术已被确认为 6G 的关键支柱之一^[37]。数据驱动的方法 (如深度学习方法) 通常具备强大的学习和推理能力,以数据驱动的方法拟合无线信道这一充满时变性和非线性特征的系统,有望克服传统机理模型难以兼顾精度与效率的问题^[38]。

具体而言,基于机理模型生成空域稀疏的信道特征数据 (空域低分辨率数据),训练深度学习模型实现超分辨率恢复空域中密集信道特征数据 (空域高分辨率数据),这种模型-数据双驱动的方式能够降低 RT 仿真工作量,满足无线信道数字孪生技术对于信道生成的“高精度、实时性”的要求。整体流程如图 6 所示:首先将三维模型和区域内建筑材料的电磁参数输入到 RT 仿真器生成信道特征数据 (也可使用结合 GPS 位置信息的测量报告 (measurement report, MR) 中参考信号接收功率 (reference signal receiving power, RSRP) 数据以及路测 RSRP 数据); 然后利用这些数据构建用于训练超分辨率信道生成模型的数据集; 接下来利用训练集训练信道特征超分辨率模型; 最后,针对信道特征超分辨率模型进行评估分析。

图 6 基于人工智能的超分辨率信道生成方法流程图^[39]Fig. 6 The workflow of AI-based channel characteristics super-resolution generation method^[39]

接下来将具体介绍数据-模型双驱动的信道特征数据生成的技术流程。将 3D 电子地图和多介质电磁参数输入自主研发的高性能 RT 平台^[12,20]中,仿真生成大量的信道特征数据。在此基础上,构建包含路径损耗、多径功率比、均方根时延扩展、均方根到达水平角扩展、均方根到达俯仰角扩展、直射和非直射的信道特征数据集。将降采样得到的低分辨率数据经上采样恢复成原始数据的尺寸,作为模型训练的输入数据,仿真得到的原始数据为真值,依照所需的比例划分训练集和测试集,最终形成多维信道特征超分辨率模型的训练集和测试集。

多维信道特征超分辨率模型(以下简称超分模型)由骨干(Backbone)网络和精调(Fine-tune)网络共同组成,如图 7 所示。骨干网络能够从输入数据中提取高维特征,该网络由两个卷积模块组成。每个卷积模块包含两个卷积层,这些卷积层使用 ReLU 激活函数,每个卷积层的卷积核尺寸为 3,边界填充为 1,两个卷积模块由残差方式连接。精调网络由多个并行的轻量级模型组成,这些模型与骨干网络串联。对于直射与非直射分类任务,精调网络的输出是对应传播条件的概率。对于其他的任务,网络输出的都是超分辨率恢复后的信道特征数据。

图 7 多维信道特征超分辨率模型^[39]Fig. 7 The super-resolution model of multi-dimension channel characteristics^[39]

超分模型的训练配置介绍如下:在一台配备了 NVIDIA Quadro RTX 8 000 GPU、Intel Core i9-9900K CPU 和 32 GB DDR4 RAM 的工作站上使用 1.10.2 版本的 PyTorch 进行多维信道特征超分辨率模型的训练。在训练中,模型的学习率设置为 0.000 01,并使用了 Adam 优化器进行梯度下降。信道特征数据集按 8:2 的比例随机分为训练集和测试集。超分辨率尺度因子(scale)设置为 2, 4, 8。

图 8 是路径损耗的超分辨率可视化结果。最左侧是真值数据。上方是低分辨率输入数据(顶部的 3 幅图像),通过降采样和双线性插值获得,高分辨率

输出数据是超分模型所输出的恢复结果。与低分辨率输入数据相比,即使在尺度因子较大时(4 或 8),高分辨率输出数据也接近真值数据。由此可见,超分模型在恢复信道特征数据时具有明显优势。超分模型能够显著减少无线信道数字孪生系统的计算量,当超分辨率尺度为 2 和 4 时,超分模型可以将仿真计算量减少至原始计算量的 1/4 和 1/16 左右,超分模型恢复的路损与真值相比误差仅为 3.10 dB 和 4.14 dB^[39]。使用前文所述的工作站通过 RT 仿真生成一套信道数据需要大约 40 min,而超分模型仅需要几秒钟即可完成计算。由此可见,数据-模型双驱

动的多维信道特征超分辨率模型,能够支持无线信道数字孪生系统快速实现高精度的信道特征数据恢复。

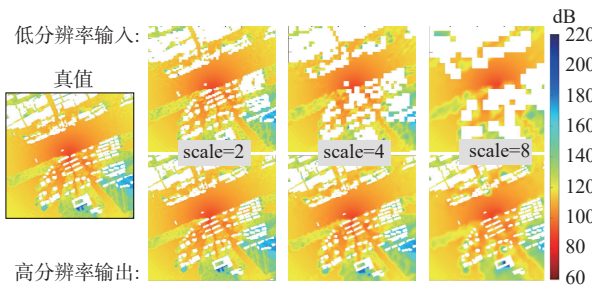


图 8 信道特征超分辨率恢复效果 (路径损耗)^[39]

Fig. 8 Performances of channel characteristics super-resolution recovery (path loss)^[39]

4 展望及潜在标准化工作

4.1 无线信道数字孪生关键技术展望

第三节详细介绍了 6G 时代所需的三种无线信道数字孪生关键技术,以此实现对无线信道的精确建模与实时优化。展望未来,以下几方面的技术进步将推动无线信道数字孪生在 6G 通信中的广泛应用与部署:

复杂环境多介质电磁参数获取技术将进一步提升无线信道数字孪生在复杂场景中的建模精度。通过集成多源异构的电磁传播数据、实现多径效应的提取与环境映射,该技术将为复杂场景下的信道建模提供更为全面、精细的电磁参数,确保在高度动态、非平稳环境中实现精确的信道模拟与预测。这将使 6G 网络具备自适应能力,能够根据实时的场景变化优化通信性能,满足不同应用场景的需求。

高性能 RT 仿真技术将在支持 6G 通信网络的多频段、多天阵列系统中发挥关键作用。该技术可以高效模拟电波的直射、反射、散射、透射等传播机制,并且能够在复杂环境下精准表征多径效应。这将有助于提升 6G 网络对复杂地理环境及多种物理结构的适应性,为实现大规模超密集网络部署、超高速率通信以及超低时延应用场景奠定基础。

模型-数据双驱动的混合信道建模技术将在确保信道模拟精度的前提下,显著降低计算复杂度,满足 6G 时代对实时性和计算效率的严格要求。通过结合数据驱动与模型驱动的优势,混合信道建模技术将能够有效解决 RT 计算复杂度随场景扩大而快速增加的问题,从而实现大规模场景下的高效信道预测与优化,进一步推动信道数字孪生在多样化应用中的普及与实践。

总体而言,随着复杂环境电磁参数获取、高性能

RT 以及混合信道建模技术的不断发展,无线信道数字孪生技术将在 6G 通信网络的设计、优化和维护中发挥关键作用。这不仅将提升网络在多样化场景中的通信性能,还将为实现高度智能化的未来网络(如自动驾驶、智慧城市、工业物联网等)提供强大的技术支撑。

4.2 潜在的标准化工作

无线信道数字孪生作为连接物理空间与数字空间的桥梁,其标准化对于无线网络设计、优化极为重要。为无线信道数字孪生技术制定统一的标准,可以确保无线网络的设计者和运营商利用最佳模拟实践和最新技术来优化通信性能。这有助于提高网络的速度、可靠性和效率,从而更好地满足未来应用的需求。潜在的标准化工作介绍如下:

场景几何颗粒度标准化:场景的几何颗粒度指的是场景模型中物理对象的细节级别,决定了对现实世界的建模在准确性和计算复杂度之间的平衡。颗粒度越细,模型就越接近于真实世界的几何特性,但同时对于计算资源的需求也会增加。颗粒度的标准化涉及制定通用的指导原则,以确定在不同场景和应用背景下所需的颗粒度水平。通过标准化颗粒度,可以确保模型的构建既能满足精度要求,又可避免无谓地消耗计算资源。

多介质电磁参数获取方式标准化:在推进信道数字孪生技术的发展过程中,确立对多介质电磁参数获取方式的标准化,可以确保在整个信道建模过程中使用高质量的准确数据。这种标准化不仅要求测量与反演方法的规范化,还要求在数据的收集、处理和分析过程中遵循统一的准则,对测量过程设置明确的标准,从而提高数据的可重复性和可靠性。同时,对于基于信道测量的反演过程,通过制定统一的反演算法框架和数据处理流程,不仅能够提高反演过程的效率和精度,还能确保不同研究者在面对相似问题时能够得出一致的结果。

介质电磁参数标准化:不同介质对电波的反射、散射和透射有着不同的反应,这对电波的传播有着直接影响。多介质电磁参数的标准化旨在建立一套统一的参数库,详细记录不同介质在不同频段下的电磁参数。它们直接影响数据的真实性和信道数字孪生系统的预测能力,标准化的介质电磁参数可以帮助研究者和工程师更好地理解 and 预测电波在各种环境中的传播特性。

典型场景电波传播机理标准化:典型场景中的电波传播机理包含直射、反射、散射、透射和透射,其标准化工作主要是对电波在各种场景下的传播机理进行精确和统一的物理描述,形成标准化的传播

机理模型,用于计算电波的传播路径、强度变化和传播时延等特性,以确保不同的无线信道数字孪生系统可以得出一致的无线信道孪生数据。

5 结 论

随着面向 6G 技术的前瞻研究和开发逐步加速,无线信道数字孪生技术已经显现出其在未来无线通信网络中不可或缺的价值。本文详细探讨了信道数字孪生的整体系统架构、部分关键技术以及潜在的标准化工作。尽管目前在实时性、兼容性和高频段硬件实现等方面仍存在挑战,但随着相关技术的不断进步,无线信道数字孪生系统将在未来通信发展中发挥更加重要的作用,为通信技术的创新提供强有力的支撑。在 2030 年及以后的时代,无线网络将面对更加复杂多变的通信环境和更高的性能要求。连接虚拟与现实世界的无线信道数字孪生技术将在其中发挥至关重要的作用。随着对无线信道数字孪生技术的研究持续深入,其潜力将进一步得到挖掘和释放,特别是在支持超高频通信、实现全球范围内的无缝覆盖、加强网络安全以及促进物联网和智慧城市发展等重要领域中,发挥不可替代的作用。

参考文献

- [1] 中国电信研究院. 无线信道数字孪生技术白皮书[M], 2024.
- [2] 中国移动研究院. 数字孪生网络 (DTN) 白皮书[M], 2021.
- [3] 中兴通讯股份有限公司. 无线网络数字孪生即服务技术白皮书[M], 2023.
- [4] 王健, 杨闯, 闫宁宁. 面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道研究[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(3): 340-348+385.
WANG J, YANG C, YAN N N. Study on digital twin channel for the B5G and 6G communication[J]. *Chinese journal of radio science*, 2021, 36(3): 340-348+385. (in Chinese)
- [5] LU H T, YAN X C, ZHOU Q, et al. Key intrinsic security technologies in 6G networks[J]. *ZTE communications*, 2022, 20(4): 22-31.
- [6] ZHAO M K, HUANG S, LI X. Federated learning for 6G: a survey from perspective of integrated sensing, communication and computation[J]. *ZTE communications*, 2023, 21(2): 25-33.
- [7] WANG C X, LV Z, CHEN Y F, et al. A complete study of space-time-frequency statistical properties of the 6G pervasive channel model[J]. *IEEE transactions on communications*, 2023, 71(12): 7273-7287.
- [8] ZHANG J H, LIN J X, TANG P, et al. Channel measurement, modeling, and simulation for 6G: a survey and tutorial[J]. *arXiv preprint arXiv: 2305.16616*.
- [9] VISWANATHAN H, MOGENSEN P E. Communications in the 6G era[J]. *IEEE access*, 2020, 8: 57063-57074.
- [10] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2023, 25(2): 905-974.
- [11] WANG C X, LYU Z, GAO X Q, et al. Pervasive wireless channel modeling theory and applications to 6G GBsMs for all frequency bands and all scenarios[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2022, 71(9): 9159-9173.
- [12] HE D P, GUAN K, YAN D, 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.
- [13] PENGNOO M, BARROS M T, WUTTISITTIKULKIJ L, et al. Digital twin for metasurface reflector management in 6G terahertz communications[J]. *IEEE access*, 2020, 8: 114580-114596.
- [14] NIE G F, ZHANG J H, ZHANG Y X, et al. A predictive 6G network with environment sensing enhancement: from radio wave propagation perspective[J]. *China communications*, 2022, 19(6): 105-122.
- [15] ALKHATEEB A, JIANG S, CHARAN G. Real-time digital twins: vision and research directions for 6G and beyond[J]. *IEEE communications magazine*, 2023, 61(11): 128-134.
- [16] ZHANG J H, MIAO H, TANG P, et al. New mid-band for 6G: several considerations from the channel propagation characteristics perspective[J]. *IEEE communications magazine*, 2024. (early access)
- [17] 朱秋明, 倪浩然, 华博宇, 等. 无人机毫米波信道测量与建模研究综述[J]. *移动通信*, 2022, 46(12): 1-11.
ZHU Q M, NI H R, HUA B Y, et al. A survey of UAV millimeter-wave channel measurement and modeling[J]. *Mobile communications*, 2022, 46(12): 1-11. (in Chinese)
- [18] GUO L T, GUAN K, LIU T, et al. Obtaining electromagnetic properties of multi-type media in realistic environments: state-of-the-art and prospects[J]. *China communications*, 2024. (early access)
- [19] 郭嘉琦, 赵友平. 一种射线跟踪信道仿真的电磁参数选取方法[J]. *电波科学学报*, 2022, 37(1): 99-105.
GUO J Q, ZHAO Y P. A method of electromagnetic parameters selection for ray-tracing channel simulation[J]. *Chinese journal of radio science*, 2022, 37(1): 99-105. (in Chinese)
- [20] HE D P, AI B, GUAN K, 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.
- [21] HE D P, GUAN K, AI B, et al. Channel measurement and ray-tracing simulation for 77 GHz automotive radar[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2023, 24(7): 7746-7756.
- [22] DUAN H Y, HE D P, GUAN K, et al. Measurement and modeling of vehicular millimeter wave radar signal in expressway environment[C]. The 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, March 26-31, 2023.
- [23] 艾渤, 何丹萍, 钟章队. 高性能射线追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 B, HE D P, ZHONG Z D. Application of high-performance ray tracing technology in intelligent transportation[J]. *Journal of terahertz science and electronic information technology*, 2023, 21(4): 530-538. (in Chinese)
- [24] GUAN K, HE D P, ZHONG Z D, et al. Cloudrt: a Chinese example of open science infrastructure and services[J]. *Culture of science*, 2021, 4(4): 217-226.
- [25] GUAN K, GUO X H, HE D P, et al. Key technologies for wireless network digital twin towards smart railways[J]. *High-speed railway*, 2024, 2(1): 1-10.
- [26] 曾成胜. 基于高性能射线追踪的高铁车站场景 5G-R 网络优化技术[J]. *北京交通大学学报*, 2023, 47(2): 13-22.
- ZENG C S. 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. (in Chinese)
- [27] 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 Y, OU P, CHEN F K, 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. (in Chinese)
- [28] GLASSNER A S. An introduction to ray tracing[M]. London: Academic, 1989.
- [29] KOUYOUMJIAN R G, PATHAK P H. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(11): 1448-1461.
- [30] DEGLI-ESPOSTI V. A diffuse scattering model for urban propagation prediction[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2001, 49(7): 1111-1113.
- [31] 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.
- [32] FOLDY L L. The multiple scattering of waves. I. General theory of isotropic scattering by randomly distributed scatterers[J]. *Physics review*, 1945, 67(3-4): 107-119.
- [33] International telecommunication union. Attenuation in vegetation[S]. Geneva: ITU Recommendations P. 833-10, 2021.
- [34] 弓子悦, 官科, 周敏, 等. 基于射线跟踪与离开角空间聚类的 5G-R 网络优化技术研究[J]. *铁道通信信号*, 2024, 60(1): 1-13.
- [35] IMT-2030(6G) 推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书[M], 2021.
- [36] 孙滔, 周铨, 段晓东, 等. 数字孪生网络 (DTN): 概念、架构及关键技术[J]. *自动化学报*, 2021, 47(3): 569-582.
- SUN T, ZHOU C, DUAN X D, et al. Digital twin network (DTN): concepts, architecture, and key technologies[J]. *Acta automatica sinica*, 2021, 47(3): 569-582. (in Chinese)
- [37] HUANG H J, GUO S, GUI G, et al. Deep learning for physical-layer 5G wireless techniques: opportunities, challenges and solutions[J]. *IEEE wireless communications*, 2020, 27(1): 214-222.
- [38] 何丹萍, 徐卓成, 曹惠云, 等. 基于机器学习和卫星图像的路径损耗预测[J]. *电波科学学报*, 2022, 37(3): 372-379.
- HE D P, XU Z C, CAO H Y, et al. Path loss prediction based on machine learning and satellite image[J]. *Chinese journal of radio science*, 2022, 37(3): 372-379. (in Chinese)
- [39] WANG X P, GUAN K, HE D P, et al. Super-resolution of wireless channel characteristics: a multitask learning model[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2023, 71(10): 8197-8209.

作者简介



官科 (1983—), 男, 云南人, 北京交通大学先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 电子信息工程学院, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁环境数字孪生。E-mail: kguan@bjtu.edu.cn



张美文 (2001—), 男, 甘肃人, 北京交通大学先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 博士在读, 研究方向为无线信道建模与铁路高可靠通信。E-mail: zhangmeiwen@bjtu.edu.cn



何丹萍 (1985—), 女, 广西人, 北京交通大学电子信息工程学院, 副教授, 博士生导师, 研究方向为无线信道建模与仿真。E-mail: hedanping@bjtu.edu.cn



艾渤 (1974—), 男, 陕西人, 北京交通大学电子信息工程学院, 二级教授, 博士生导师, 研究方向为宽带移动通信系统与专用移动通信。E-mail: boai@bjtu.edu.cn



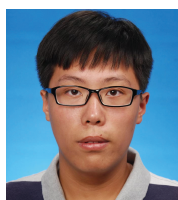
卢斌 (1970—), 男, 广东人, 中国电信股份有限公司研究院, 移动与终端技术研究所, 高级工程师, 研究方向为无线网络规划仿真与应用研发。E-mail: lubin6@chinatelecom.cn



刘婷 (1999—), 女, 山东人, 北京交通大学电子信息工程学院, 博士在读, 研究方向为电波传播与信道建模、无线系统的通感一体化应用等。E-mail: tingliu9@bjtu.edu.cn



窦建武 (1973—), 男, 山西人, 中兴通讯股份有限公司算法部资深算法专家, 博士, 研究方向为无线信道建模、智能超表面及应用、通感一体化、大规模多天线的NTN通信网络、系统仿真和无线资源管理等。E-mail: dou.jianwu@zte.com.cn



王熙平 (1998—), 男, 山东人, 北京交通大学电子信息工程学院博士在读, 研究方向为无人机定位与AI信道研究。E-mail: wangxiping@bjtu.edu.cn



王欣晖 (1973—), 男, 江苏人, 中兴通讯股份有限公司, 负责信息通信领域的技术创新、标准化及产业关系, 研究方向为先进通信技术以及标准化。E-mail: wangxinhui@zte.com.cn



魏垚 (1984—), 男, 浙江人, 中国电信股份有限公司研究院, 移动与终端技术研究所, 高级工程师, 研究方向为移动通信网络演进与关键技术。E-mail: weiy8@chinatelecom.cn



钟章队 (1962—), 男, 湖南人, 北京交通大学电子信息工程学院, 二级教授, 博士生导师, 研究方向为宽带移动通信系统与专用移动通信。E-mail: zhdzhong@bjtu.edu.cn



赵旭 (1975—), 男, 云南人, 中国电信股份有限公司研究院, 移动与终端技术研究所, 高级工程师, 研究方向为信道建模与无线网络规划仿真。E-mail: zhaox2@chinatelecom.cn