

# 无线网络孪生中的统计信道建模方法:现状与前沿



## Statistical Channel Modeling Methods in Wireless Network Twinning: Current Status and Frontiers

张树韬/ZHANG Shutao<sup>1,2</sup>, 薛焯/XUE Ye<sup>3</sup>,  
史清江/SHI Qingjiang<sup>3,4</sup>, 张纵辉/CHANG Tsung-Hui<sup>1,5</sup>

(1. 香港中文大学(深圳), 中国 深圳 518172;  
2. 鹏城实验室, 中国 深圳 518055;  
3. 深圳市大数据研究院, 中国 深圳 518172;  
4. 同济大学, 中国 上海 200082;  
5. 广东省大数据计算基础理论与方法重点实验室, 中国 深圳 518172)  
(1. The Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), Shenzhen 518172, China;  
2. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China;  
3. Shenzhen Institute of Big Data, Shenzhen 518172, China;  
4. Tongji University, Shanghai 200082, China;  
5. GuangDong Key Laboratory of Big Data Computing, Shenzhen 518172, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230623.1021.002.html>

网络出版日期: 2023-06-25

收稿日期: 2023-04-25

**摘要:** 数字孪生作为一种全新的数据驱动范式开始赋能各行各业。着重讨论了无线网络孪生的发展现状和无线网络孪生中最基础的数字孪生信道建模技术。针对现有数字孪生信道建模方法的不足,设计了一套面向无线网络的在地化统计信道建模方法,旨在实现对无线信道高效准确的数字孪生。搭建了可视化平台,以展示该数字孪生信道模型对特定无线网络环境大尺度多径统计特性的刻画。最后,展示了设计的数字孪生信道模型在5G无线网络优化中的两种典型应用。

**关键词:** 角度功率谱; 信道建模; 数字孪生; 网络优化; 稀疏优化

**Abstract:** Digital twins have emerged as a new data-driven paradigm empowering various industries. The development status of wireless network twinning and the most fundamental digital twin channel modeling techniques are emphasized. In response to the limitations of existing digital twin channels, a localized statistical channel modeling method for wireless networks is proposed to achieve efficient and accurate digital twinning of wireless channels. Furthermore, a visualization platform is introduced to demonstrate how this digital twin channel model characterizes the large-scale multipath statistical properties of specific wireless network environments. Finally, two typical applications of the designed digital twin channel model in the optimization of 5G wireless networks are presented.

**Keywords:** angular power spectrum; channel modeling; digital twin; network optimization; sparse optimization

**引用格式:** 张树韬, 薛焯, 史清江, 等. 无线网络孪生中的统计信道建模方法:现状与前沿 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 26-31. DOI:10.12142/ZTETJ.202303006

**Citation:** ZHANG S T, XUE Y, SHI Q J, et al. Statistical channel modeling methods in wireless network twinning: current status and frontiers [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 26-31. DOI:10.12142/ZTETJ.202303006

### 1 无线网络孪生

数字孪生是一种将现实世界的物理系统与数字世界的虚拟模型相结合的技术。这一概念最早可追溯至2002年密歇根大学 M. GRIEVES 教授提出的产品生命周期管理 (PLM) [1]。2011年美国空军研究实验室在航空航天领域首次提到数字孪生。2013年德国提出工业4.0,随后数字孪生技术在工业制造领域得到关注并被逐渐推广。总的来说,数字孪生技术充分利用传感器生成的实时数据、历史数据等多

种信息,将多学科行业知识集成到虚拟模型中,从而对现实场景进行多物理量、多尺度、多概率的仿真。通过在计算机上创建物理实体的镜像“克隆”,数字孪生具有高预测性能、全生命周期等优势。因此,数字孪生在城市交通、航空航天、医疗卫生等各行各业都受到广泛关注。特别地,本文关注数字孪生技术在无线网络中的具体部署与应用,即如何从真实无线网络中合理地构建出对应的数字孪生网络,我们将这一过程称之为无线网络孪生。

### 1.1 无线网络孪生的发展现状

随着5G移动通信系统的大规模部署,5G无线网络的规模和异构程度与日俱增。这些网络新型态叠加动态多变的无线信道,使得5G无线网络的部署建设、管理运维和性能优化面临极大挑战<sup>[2]</sup>。为了应对这一挑战,无线网络孪生通过使用数字孪生来赋能无线网络,将真实无线网络映射到虚拟空间中,从而能够有效地对真实网络进行建模、仿真、验证、运维和优化<sup>[3-6]</sup>。目前,无线网络孪生已经成为一个很有前景的关键移动通信技术,能够被应用于5G无线网络以及未来的6G无线网络<sup>[7-10]</sup>。

以图1所示的5G无线网络为例,无线网络孪生基于真实无线网络的历史数据(用户流量分布、基站参数配置等性能指标)来构建数字孪生网络。具体而言,无线网络孪生将数字孪生与无线网络有机结合,把真实无线网络的无线信道、接入网、传输网和核心网一对一地映射到虚拟空间。由于5G无线网络包含增强移动宽带(eMBB)、超可靠低时延通信(URLLC)和海量机器类通信(mMTC)这三大业务场景,无线网络孪生需要支持网络切片技术,为不同服务提供量身定制的资源<sup>[11]</sup>。一旦数字孪生网络成功构建,就能够预测不同的基站参数配置下的性能指标,并通过寻优算法生成改善真实无线网络的操作命令。这些操作命令终将被部署到真实无线网络中,从而改善网络性能<sup>[12]</sup>。值得一提的是,真实无线网络中的调参难度大、风险极高,可能造成通信中断和经济损失。而在数字孪生网络中进行的优化过程,则不会破坏真实无线网络。与传统基于数据包的网络仿真模拟器(如OMNet++、ns-3等)相比,无线网络孪生能够更高效准确地模拟实际物理网络<sup>[13]</sup>。

### 1.2 无线网络孪生中的信道建模

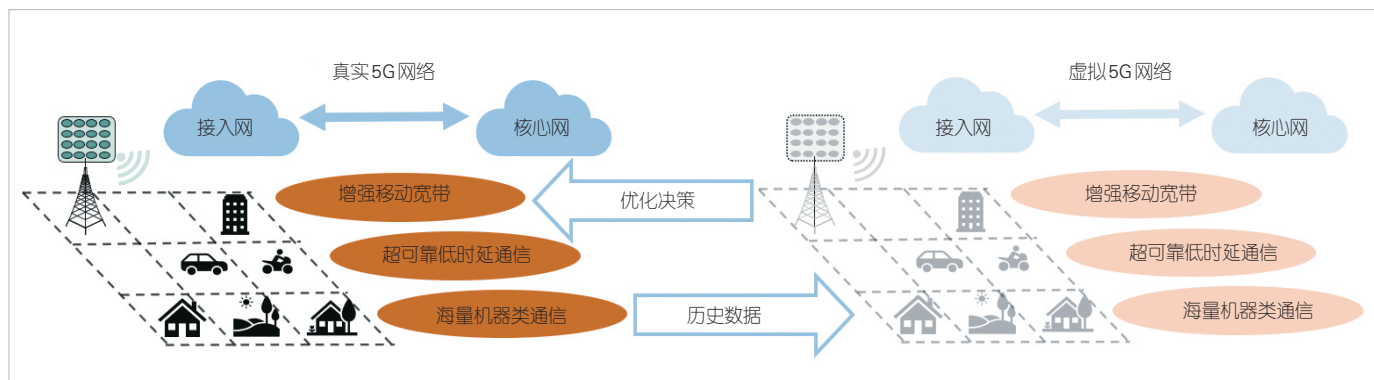
无线网络中的无线信道作为电磁波传递的载体,反映了通信网络环境状况,因此无线信道模型是无线网络系统设

计、研发和评估的基础与前提。在构建无线网络孪生时,数字孪生信道建模起到关键作用,直接影响到无线网络孪生的建模准确性。我们对数字孪生信道建模进行调研,已有的研究工作大致可以分为以下3类。

第1类信道模型基于简化的统计模型来刻画无线信道。传统的COST2100、WINNER II、3GPP 38901等统计信道模型是基于室内室外、城市郊区这类典型通信场景的,无法直接在无线网络孪生中使用,需要适当地简化。在文献[14]中,香港理工大学的研究者在城市孪生网络的研究中将无线信道表示为一维路损。在文献[15]中,东北大学和深圳大学的研究者关注了数字孪生技术在车联网中的应用,在进行信道建模时结合了自由空间一维路损模型和瑞利衰落模型。重庆邮电大学的研究者在文献[16]中研究了数字孪生辅助的边缘网络计算任务卸载问题,其中信道参数被表示为自由空间一维路损系数与复高斯随机变量的乘积。总的来说,这类模型较为简单,忽略了通信性能指标与现实环境间复杂的关系,难以准确描述通信网络环境,无法反应真实无线信道的时空特性。

第2类信道模型是确定性的射线追踪法。以爱立信的数字孪生5G网络为例<sup>[17]</sup>,爱立信在Omniverse平台中构建了数字孪生5G网络,帮助确定如何放置和配置每个基站以获得最佳覆盖范围和网络性能。数字孪生5G网络为每个基站添加精确位置、高度和天线模式等,能够集成无线电传播数据,并利用射线追踪法来快速可视化和计算覆盖区域中每个点的信号质量。在文献[18]基于智能反射面的太赫兹通信孪生网络研究中,射线追踪法也被用来产生基站到智能反射面的路径,以确定将发射波束反射给用户的最佳智能反射面放置位置。然而,射线追踪法需要通过麦克斯韦方程来计算电磁波的传播,相关计算复杂度过高且依赖于精确的地图信息<sup>[19]</sup>。

第3类信道模型使用人工智能和机器学习的方法来表示



▲图1 5G无线网络孪生优化框架

信道。上海科技大学的研究者利用生成对抗神经网络 (GAN) 对高斯白噪声加性信道进行了参数拟合与建模<sup>[20]</sup>。类似地,东南大学、紫金山实验室和山东大学的研究者也训练了一个全连接的前馈神经网络来构建孪生信道,即通过输入发射端和接收端的位置、距离和载波频率等参数,神经网络能够输出信道增益、角度扩展以及时延扩展等信道特性<sup>[21]</sup>。北京交通大学的研究者在文献[22]中介绍了使用人工智能和机器学习的方法对直射路径和非直射路径进行识别。这一方法也可以对不同的通信场景进行识别,并能对下一时刻和位置的孪生信道进行预测。这类数字孪生信道虽然有可进一步提高建模的精度,但是神经网络的训练需要依赖大量实地测量数据,在大规模无线网络中的扩展应用仍比较困难。

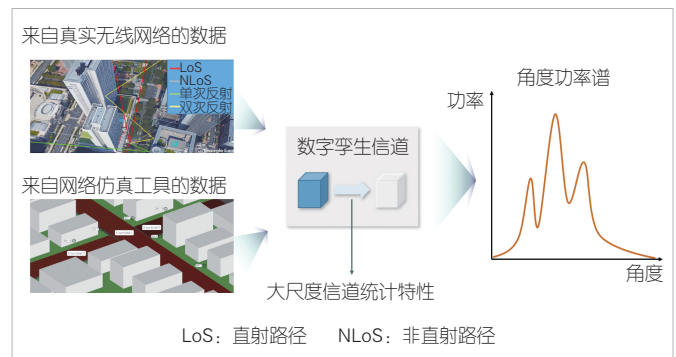
综上所述,现有的数字孪生信道构建方法存在如下局限性:基于简化统计信道模型的方法过于简单,难以真实反应在地化信道状况;基于确定性射线追踪法的信道建模方法计算复杂度过高;基于人工智能和机器学习的信道建模方法过度依赖于大量高质量的实地信道测量数据,数据采集成本过高,不易在大规模网络中进行扩展。

## 2 数字孪生信道

为了解决以上问题,使得数字孪生信道可以更好地服务于无线网络优化,我们提出一套在地化统计信道建模方法。与面向无线网络中其他应用的信道建模方法不同,我们所提出的建模方法能够更好地适配无线网络优化所需的大尺度信道信息,从而准确高效地刻画在地化场景下的信道统计信息,赋能无线网络优化中的性能预测。基于这一方法,我们还设计了一个可视化平台,用于展示数字孪生信道建模方法的有效性,并将所建立的信道模型部署到5G无线网络优化的两种典型应用中。

### 2.1 数字孪生信道建模方法

如图2所示,我们提出一套数字孪生信道建模方法。该方法通过从真实世界的路测数据或信道仿真工具(例如DeepMIMO、QuaDRiGa)产生的数据中高效地提取信道角度功率谱(APS)的大尺度统计信息。通过结合先进的稀疏优化技术挖掘信道的统计特征,该建模方法能够以较低复杂度精确刻画信道的在地化场景中的大尺度统计信息<sup>[23-25]</sup>。我们提出的在地化统计信道模型优势如下:与第1类简单的信道模型相比,能够感知和刻画在地化场景中特定无线网络环境的多径结构;与第2类复杂度过高的信道模型相比,避免了复杂的方程求解,从而大大降低了复杂度;与第3类基



▲图2 数字孪生信道建模方法

于人工智能和机器学习的信道模型相比,只需要采集一轮路测数据,就能够高效输出信道的角度功率谱大尺度统计特性,经济成本低,可以扩展到大规模的无线网络。

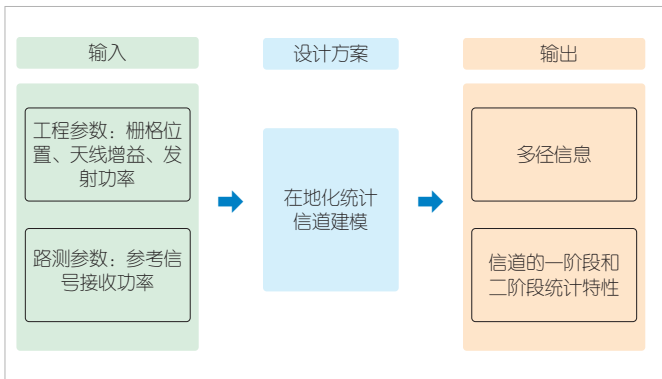
具体而言,我们将给定的二维地理区域划分为 $L$ 个二维方形栅格,每个栅格代表一个特定的地理位置。在 $t$ 时刻,终端在第 $l$ 个栅格可以测量从基站发出的第 $m$ 个波束的参考信号接收功率(RSRP)。波束域RSRP可以表达为:

$$RSRP_m^{(l)}(t) = P \left| \sum_{x,y} h_{x,y}^{(l)}(t) w_{x,y}^{(m)} \right|^2, \quad (1)$$

其中, $h_{x,y}^{(l)}(t)$ 是天线面阵中第 $x$ 行和第 $y$ 列的天线在第 $l$ 个栅格的信道冲激响应, $w_{x,y}^{(m)}$ 是第 $m$ 个波束的预编码权重。为了消除信道快衰变的影响,我们对一段时间内测量到的波束域RSRP求期望和方差,以建立波束域RSRP与信道角度功率谱密度间的一阶和二阶统计关系。接着,我们研究了地理空间与用户信道的时空交互作用机理,利用相邻栅格的信道相关性,进一步采用先进的稀疏信号处理技术,求解三维空间中的每个传输路径的角度功率谱密度<sup>[23-25]</sup>。从波束域RSRP中提取的角度功率谱密度统计特性可以反映信道的路径损耗以及阴影衰落等大尺度信息,这个大尺度信息由在地化环境决定,在较长的时间(数周甚至数月)内维持不变,能够满足网络优化的需求。图3给出了数字孪生信道建模输入、输出与处理流程,总结了以上的数字孪生信道建模方法。

### 2.2 数字孪生信道可视化平台

为了更为直观地展示数字孪生信道建模效果,我们基于实际采集的数据在云服务器上搭建了可视化平台。如图4(a)所示,我们在香港中文大学(深圳)校园进行实测,其中基站发射天线与测量终端存在直射路径。图4(b)将实测场景进行可视化,我们根据基站工参在地图上标定了各个小区的位置和天线朝向,并展示了服务小区与测量终



▲图3 数字孪生信道建模输入、输出与处理流程



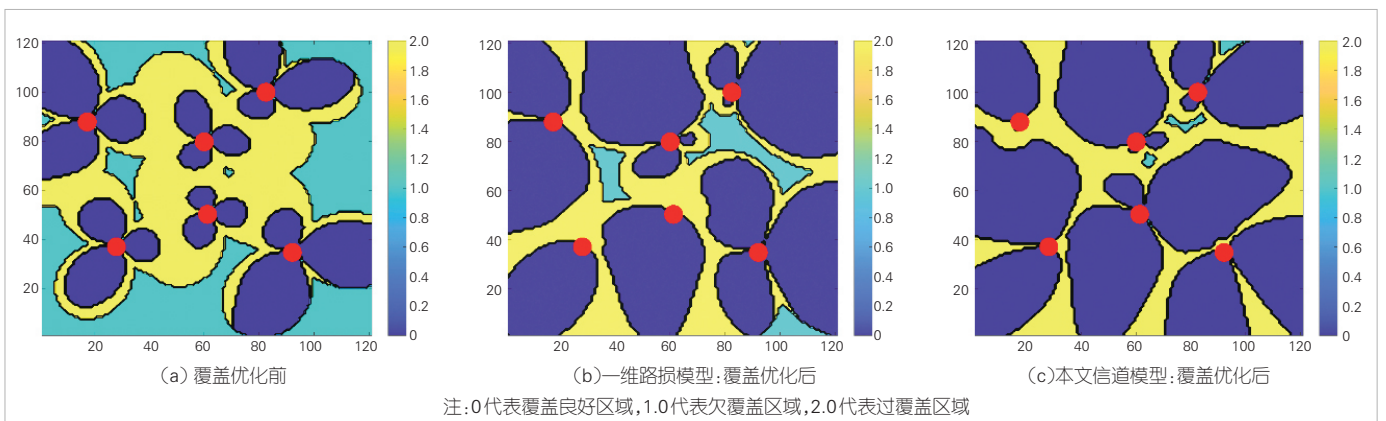
▲图4 数字孪生信道可视化平台

端所在的栅格点A的信道。其中,该信道的最强路径下倾角为 $20^\circ$ ,水平角为 $-5^\circ$ ,这与实测场景中观测到的直射路径的角度基本一致,从而验证的数字孪生信道建模的可靠性。

### 2.3 数字孪生信道典型应用

为了验证本文提出的数字孪生信道建模方法在5G无线网络优化中的有效性,我们通过两种典型应用进行了仿真,包括网络覆盖优化和在地化码本设计。

#### 1) 网络覆盖优化



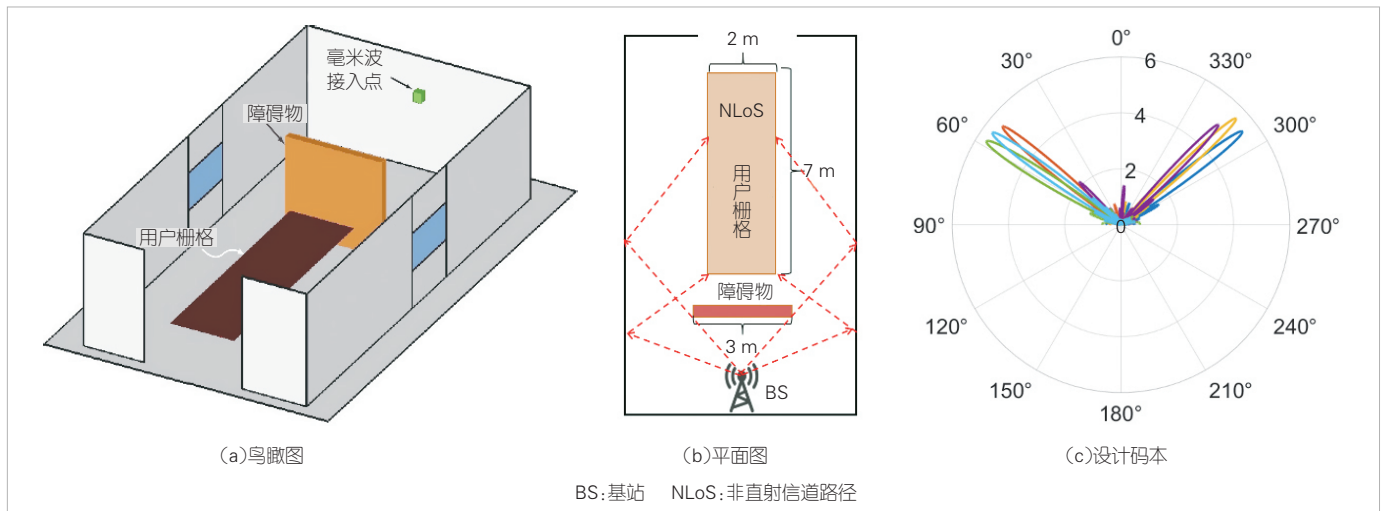
▲图5 基于数字孪生信道的网络覆盖优化

图5展示了基于数字孪生信道的网络覆盖优化结果。我们将给定的地理区域划分为 $L=120 \times 120=14\ 400$ 个栅格,其中红色圆点表示基站,每个基站被划分为3个小区,总共有18个小区。所有的栅格都能够接收到这18个小区发射的信号,并从中选择信号功率最强的小区作为当前栅格的服务小区。我们分别用一维路损模型<sup>[14]</sup>和本文提出的数字孪生信道模型来产生小区到每个栅格间的信道。如果当前栅格的服务小区的信号功率小于一个阈值,则说明当前栅格欠覆盖(图5中靛青色的区域);如果当前栅格的非服务小区的信号功率远大于服务小区的信号功率,说明当前栅格受到太强干扰造成过覆盖(图5中黄色区域)。图5中剩下的紫色区域是覆盖良好的区域。

通过黑盒优化<sup>[26]</sup>,我们发现一维路损模型能够将覆盖良好的区域占比从36%提升到70%,而本文提出的数字孪生信道模型能够进一步将覆盖良好的区域占比提升到75%。这验证了本文提出的数字孪生信道在反映和刻画实际环境方面的优越性。

#### 2) 在地化码本设计

传统的码本设计在角度域进行均匀切分,在每个角度上都发射一个对应的波束,这会带来较大的通信开销。另外,由于实际环境中用户分布的差异,很多波束没有发挥作用,造成通信资源浪费。基于此,我们设计了一个基于数字孪生信道的在地化码本。如图6(a)所示,基站与用户之间的直射路径被障碍物阻挡。如图6(b)所示,非直射信道路径(NLoS)通过室内两边的墙壁反射到用户。如图6(c)所示,经过数字孪生信道数据训练后,在地化码本中的波束能够感知空间的障碍物,自动地避开障碍物,将波束方向调整到两边,从而降低训练对齐波束的通信开销,提升通信系统的效率。



▲图6 基于数字孪生信道的在地化码本设计

### 3 结束语

无线网络孪生可以利用数字孪生技术来赋能无线网络。以5G无线网络为例,无线网络孪生能够为5G无线网络的性能推断、预测和优化决策提供高效模型支撑。我们提出的数字孪生信道建模方法通过生成与在地化场景大尺度统计分布一致的模拟信道,确保了对真实无线网络的准确反映。数字孪生信道的可视化平台能够直观展示无线网络环境下的信道多径角度功率谱,为覆盖优化和在地化码本设计这两种5G网络优化典型应用提供了新的思路。未来,数字孪生信道需要满足灵活性、泛化性和自适应性等要求,以适应日益复杂的无线网络环境。数字孪生信道有着广阔的发展前景,在5G和6G无线网络的发展中将扮演越来越重要的角色。

#### 参考文献

[1] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [M]//Transdisciplinary perspectives on complex systems. Cham: Springer International Publishing, 2016: 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4

[2] LI Y, ZHANG S T, REN X H, et al. Real-world wireless network modeling and optimization: from model/data-driven perspective [J]. Chinese journal of electronics, 2022, 31(6): 991-1012. DOI: 10.1049/cje.2022.00.191

[3] NGUYEN H X, TRESTIAN R, TO D, et al. Digital twin for 5G and beyond [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(2): 10-15. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000343

[4] KHAN L U, HAN Z, SAAD W, et al. Digital twin of wireless systems: overview, taxonomy, challenges, and opportunities [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(4): 2230-2254. DOI: 10.1109/COMST.2022.3198273

[5] MIHAI S, YAQOOB M, HUNG D V, et al. Digital twins: a survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(4): 2255-2291. DOI: 10.1109/COMST.2022.3208773

[6] WU Y W, ZHANG K, ZHANG Y. Digital twin networks: a survey [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(18): 13789-13804. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3079510

[7] SHEN X M, GAO J, WU W, et al. Holistic network virtualization and

pervasive network intelligence for 6G [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 1-30. DOI: 10.1109/COMST.2021.3135829

[8] KURUVATTI N P, HABIBI M A, PARTANI S, et al. Empowering 6G communication systems with digital twin technology: a comprehensive survey [J]. IEEE access, 2022, 10: 112158-112186. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215493

[9] AHMADI H, NAG A, KHAR Z, et al. Networked twins and twins of networks: an overview on the relationship between digital twins and 6G [J]. IEEE communications standards magazine, 2021, 5(4): 154-160. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2000041

[10] KHAN L U, SAAD W, NIYATO D, et al. Digital-twin-enabled 6G: vision, architectural trends, and future directions [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(1): 74-80. DOI: 10.1109/MCOM.001.21143

[11] WANG H Z, WU Y L, MIN G Y, et al. A graph neural network-based digital twin for network slicing management [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2022, 18(2): 1367-1376. DOI: 10.1109/TII.2020.3047843

[12] ALMASAN P, FERRIOL-GALMÉS M, PAILLISSÉ J, et al. Network digital twin: context, enabling technologies, and opportunities [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(11): 22-27. DOI: 10.1109/MCOM.001.2200012

[13] HUI L B, WANG M W, ZHANG L, et al. Digital twin for networking: a data-driven performance modeling perspective [J]. IEEE network, 2022(99): 1-8. DOI: 10.1109/MNET.119.2200080

[14] DING C, HO I W H. Digital-twin-enabled city-model-aware deep learning for dynamic channel estimation in urban vehicular environments [J]. IEEE transactions on green communications and networking, 2022, 6(3): 1604-1612. DOI: 10.1109/TGCN.2022.3173414

[15] YUAN X M, CHEN J H, ZHANG N, et al. Digital twin-driven vehicular task offloading and IRS configuration in the Internet of vehicles [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(12): 24290-24304. DOI: 10.1109/TITS.2022.3204585

[16] LIU T, TANG L, WANG W L, et al. Digital-twin-assisted task offloading based on edge collaboration in the digital twin edge network [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(2): 1427-1444. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3086961

[17] ÖHLÉN P, JOHNSTON C, OLOFSSON H, et al. Network digital twins - outlook and opportunities [J]. Ericsson technology review, 2022(12): 2-11. DOI: 10.23919/ETR.2022.9999174

[18] 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. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003734

[19] ZHANG Y B, SUN J L, GUI G, et al. A generalized channel dataset generator for 5G new radio systems based on ray-tracing [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(11): 2402-2406. DOI: 10.1109/LWC.2021.3101908

[20] YANG Y, LI Y, ZHANG W X, et al. Generative-adversarial-network-based wireless channel modeling: challenges and opportunities [J]. IEEE

communications magazine, 2019, 57(3): 22–27. DOI: 10.1109/MCOM.2019.1800635

- [21] HUANG J, WANG C X, BAI L, et al. A big data enabled channel model for 5G wireless communication systems [J]. IEEE transactions on big data, 2020, 6(2): 211–222. DOI: 10.1109/TBDATA.2018.2884489
- [22] HUANG C, HE R S, AI B, et al. Artificial intelligence enabled radio propagation for communications—part II: scenario identification and channel modeling [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2022, 70(6): 3955–3969. DOI: 10.1109/TAP.2022.3149665
- [23] 张树韬, 宁新智, 郑熙, 等. 无线信道评估方法及系统: CN116155412A [P]. 2023
- [24] NING X Z, ZHANG S T, ZHENG X, et al. Multi-grid-based localized statistical channel modeling: a radio map approach [C]//Proceedings of 2022 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2022: 1–6. DOI: 10.1109/ISWCS56560.2022.9940390
- [25] ZHANG S T, NING X Z, ZHENG X, et al. A physics-based and data-driven approach for localized statistical channel modeling [EB/OL]. [2023-04-10]. <https://www.researchgate.net/publication/368350585>
- [26] LIU Y R, HU Y Q, QIAN H, et al. ZOOpt: toolbox for derivative-free optimization [EB/OL]. [2023-04-10]. <https://arxiv.org/abs/1801.00329>

### 作者简介



**张树韬**, 香港中文大学(深圳)与深圳市大数据研究院联合培养在读博士生; 主要研究领域包括无线信道建模、稀疏信号处理以及数字孪生网络; 曾获得IEEE ISWCS会议最佳论文奖。



**薛焯**, 深圳市大数据研究院研究科学家、副研究员; 主要研究领域包括非凸优化、机器学习、通信网络等; 参与多个国家重点研发计划项目; 发表论文10余篇。



**史清江**, 同济大学软件工程学院教授、博士生导师, 深圳市大数据研究院信息系统大数据实验室主任; 主持多项国家重点研发计划项目和国家自然科学基金重点项目; 主要研究领域包括算法设计与分析、信号处理和无线网络等; 连续3年入选爱思唯尔高被引学者榜单, 2022年获得IEEE信号处理学会最佳论文奖; 发表论文80余篇, 申请国家专利40余项。



**张纵辉**, 香港中文大学(深圳)理工学院副教授、博士生导师, IEEE Fellow, 广东省大数据计算基础理论与方法重点实验室副主任, IEEE信号处理学会感知与通信一体化技术工作委员会创始主席, 《IEEE Transactions on Signal Processing》编委; 主要研究领域包括通信系统与机器学习中的关键信号处理与优化方法; 2015年获得IEEE通信学会亚太区杰出青年学者奖, 2018与2021年两度获得IEEE信号处理学会最佳论文奖。