

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. DOI: [10.12265/j.cjors.2020240](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020240)

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) DOI: [10.12265/j.cjors.2020240](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020240)

面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道研究

王健¹ 杨闯² 闫宁宁¹

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘 要 为支撑 B5G、6G 通信产业发展和系统转型升级, 将数字孪生技术与 B5G、6G 通信信道模拟的关键环节、关键场景、关键对象紧密结合, 提出了数字孪生信道的技术内涵. 在此基础上, 面向 B5G 和 6G 通信场景, 建立了数字孪生信道的应用体系、功能体系、技术体系和标准体系, 并从全生命周期视角对数字孪生信道在 B5G 和 6G 通信系统论证设计、研制生产、测试试验、运维管理等环境的应用进行了探讨. 上述研究有望为 B5G、6G 通信系统的产业发展和工程建设提供有益参考, 推动数字孪生信道在 B5G、6G 通信领域和行业中的应用, 为实现 B5G、6G 通信信道数字化、智能化、服务化、绿色可持续化提供技术支撑.

关键词 数字孪生; B5G; 6G; 通信信道

中图分类号 TN929.5

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2021)03-0340-09

DOI [10.12265/j.cjors.2020240](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020240)

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

WANG Jian¹ YANG Chuang² YAN Ningning¹

(1. Tianjin University, Tianjin 30072, China; 2. Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract In order to support the development of the beyond 5G(B5G) and 6G communication industry and system transformation and upgrading, the connotation of the B5G and 6G communication channel digital twin technology is proposed by combining the key links, key scenes, and key objects of the B5G and 6G communication channel simulation. On the above basis, the application model, function framework, technology framework, and standard framework of the digital twin channel are established for B5G and 6G communication. And the application method of communication channel digital twin is discussed in demonstration design, development, and production, test, operation, and maintenance management, which are the traditional life cycle activities of the B5G and 6G communication system. The above research is expected to provide a useful reference for the industrial development and engineering construction of the B5G and 6G system, and promote the application of digital twin technology in the B5G and 6G communication field and industry, and provide technical support for the realization of the B5G and 6G communication channel digitization, intellectualization, servitization, and green sustainability.

Keywords digital twin; beyond 5G(B5G); 6G; communication channel

引 言

5G 通信作为目前通信领域最为火热的通信技术^[1], 已经逐步改善了人们的生活, 深刻影响着社会经济的变革. 它提供了极高的频谱效率、极低的延

迟、极高的连接密度和极低的功耗, 其典型应用场景包括连续广域覆盖、热点高容量场景、低功耗大连接场景和低时延高可靠场景^[2], 可实现从移动互联网拓展到万物互联网, 从个人通信领域延伸到社会经济的各个角落, 可真正做到“信息随心至, 万物触手

收稿日期: 2020-10-26

联系人: 杨闯 E-mail: chuanyang@bupt.edu.cn

可及”^[3]。作为万物互联的开启技术,5G通信急需在信息交互的深度上进行提高,以满足未来深层无线通信网的需求,因此,面向B5G(beyond 5G)的无线通信技术研究已经在开展^[4-5]。随着人类社会对无线通信需求的增加,B5G将进一步提高信息交互能力,满足深层次的移动互联需求,从而不断地扩展信息交互的深度与广度,最终实现真正意义上的万物互联^[6]。在此基础上,未来的6G通信网络将实现陆海空天一体化通信的目标,大大扩展通信覆盖广度和深度,在传统蜂窝网络的基础上与深海远洋通信、航空通信和卫星通信深度融合^[7]。6G陆海空天一体化网络是以地面网络为基础,以空间网络为延展,覆盖陆地、海洋、空中、深空的信息网络,为陆基(地面蜂窝网络)、海基(近海沿岸无线网络、远洋船只与悬浮岛屿无线网络以及海洋水下无线通信网络等)、空基(航空飞机、无人机、气球、近地飞行器等通信网络)、天基(卫星通信网络)等各类用户的活动提供信息保障;6G的总体愿景是实现“智慧连接”“深度连接”“全息连接”和“泛在连接”,达到“一念天地,万物随心”^[8]。随之“数字孪生(digital twin)”成为了6G通信面向2030年的社会发展愿景之一,展望2030年及以后的时代,整个世界将基于物理世界生成一个数字化的虚拟世界^[9]。

无线信道作为通信系统收发设备间的传播通路,受地形地物、对流层、电离层、太阳活动等诸多因素的影响,信道特性决定着无线通信的性能。针对未来B5G和6G通信系统论证设计、研制生产、测试验证和运维管理全寿命过程,无线信道建模与仿真均非常重要,精确的信道模型与高逼真的仿真环境能够促进通信系统产业的发展,且通信系统产业的深入发展与转型需求,也将促使无线信道的研究进一步完善。数字孪生技术作为一种集成多物理、多尺度、多学科属性的仿真过程,具有实时同步、忠于映射的特征,可实现物理世界与信息世界的交互融合^[10]。数字孪生技术与新一代无线通信信道研究相结合,目标是实现无线通信信道近真实模拟,为B5G和6G系统建设及产业化发展提供技术支撑。鉴于此,本文将针对B5G和6G通信产业的发展,将数字孪生技术与B5G和6G通信的关键环节、关键场景、关键对象紧密结合,提出了面向B5G和6G数字孪生信道的技术内涵、应用体系、功能体系和标准体系,旨在提升B5G和6G系统的论证、设计、研制、测试能力,从全生命周期视角为B5G和6G产业发展、工程建设提供有益参考。

1 数字孪生信道技术内涵

数字孪生作为一种在信息世界刻画物理世界、仿真物理世界、优化物理世界、可视化物理世界的重要技术,自提出后就成为当前全球关注的热点,该概念是2002年Michael Grieves教授首次提出的^[10]。Gartner公司在过去三年持续将数字孪生列为十大新兴技术之一,并预测在未来三到五年内,数十亿计的实物将通过数字孪生来表达^[11]。数字孪生概念是针对物理世界中的物理实体,以数字化的方式在数字世界中建立一个对应的多维、多尺度、多物理的虚拟实体,用来实现对物理实体的属性、行为、规则的刻画、分析、掌握和优化^[12]。数字孪生虚实融合与实时交互、迭代运行与优化以及全要素/全过程/全业务数据驱动的特点,使得其不仅被应用于产品的设计阶段,而且延展到了产品研制、生产、测试、运维阶段,贯穿了产品各个阶段;同产品生命周期管理(product lifecycle management, PLM)的理念不谋而合,数字孪生技术的发展将PLM的能力和理念从设计阶段真正扩展到了产品全生命周期^[11]。随着物联网、人工智能和虚拟现实等技术的不断发展,更多产品具备了智能的特征,而数字孪生技术和应用逐步扩展到了包括智能制造和信息服务在内的完整的产品周期阶段,并不断丰富着数字孪生的形式和概念^[13-14]。

无线信道作为一种电磁物理实体,存在着“形态无法直观看见”“特征无法直接触摸”和“效应无法直接辨识”的特点,因此亟需引入数字孪生的技术创建无线信道的数字孪生模型,用于支撑B5G和6G通信信道的可视化分析,优化系统设计,保障系统测试、验证以及运营、维护、管理等环节。

数字孪生信道的研究旨在加速B5G和6G通信系统的研发过程,提高论证、研发和生产的有效性和经济性,更有效地掌握B5G和6G通信传输全寿命周期情况,有效地避免损失,更能精准地将通信效能情况反馈到设计端,实现B5G和6G通信系统的有效改进。

数字孪生信道并不是一种单纯的数字化技术,而是在物联网、大数据、云处理、人工智能技术支撑和交叉融合基础上,通过构建通信信道所对应的数字孪生模型,实现数字孪生模型的可视化、定性和定量分析,用于优化通信信道应用策略,提升通信信道的使用效率。系统化、智能化、多维度、可视化是数字孪生信道区别于传统信道建模的主要特点。下面重点叙述数字孪生信道应用体系、功能体系、技术

体系、标准体系。

2 数字孪生信道应用体系

数字孪生在 B5G 和 6G 通信领域落地应用的首要任务是创建无线通信信道的数字孪生模型。陶飞团队在 Grieves 和 Vickers 最初定义的三维模型^[10]基础上提出了五维模型^[11], 其核心要素包括: 物理实体、虚拟模型、孪生数据、连接和服务^[15]。根据数字

孪生五维模型的概念, 可定义通信信道的数字孪生模型如下:

$$M = (P, V, S, D, C). \quad (1)$$

式中: P 表示物理信道; V 表示虚拟信道; S 表示应用服务; D 表示孪生数据; C 表示各组成部分间的连接。根据式 (1), 可构建数字孪生信道模型结构如图 1 所示。

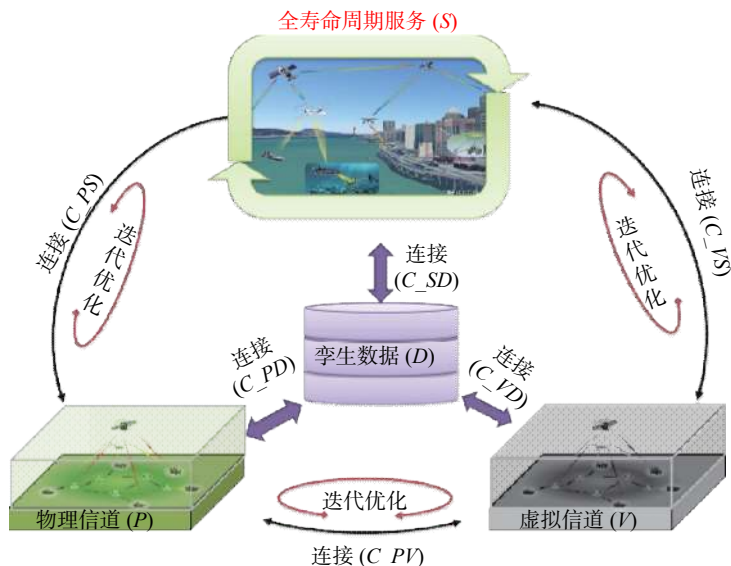


图 1 B5G 和 6G 通信信道的五维数字孪生模型

Fig. 1 Five-dimensional digital twin model for B5G and 6G communication channel

无线信道的数字孪生的认识与实践离不开具体对象、具体应用与具体需求, 从应用和解决实际需求的角度出发, 实际应用过程中不一定要求所建立的“数字孪生”具备所有理想特征, 而是能满足用户的

具体需求即可。根据上述数字孪生五维模型体系^[11], 其可确定 B5G 和 6G 通信数字孪生信道应用体系, 如图 2 所示。

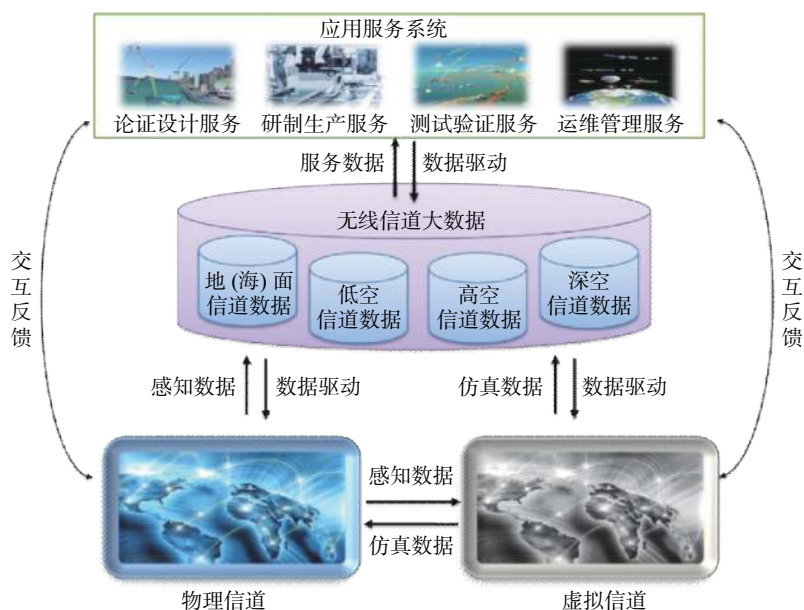


图 2 B5G 和 6G 通信数字孪生信道应用体系

Fig. 2 Application framework of digital twin channel for B5G and 6G communication

2.1 物理信道(P)

物理信道是数字孪生模型的构成基础,对物理信道的准确感知和掌握是建立数字孪生信道的前提。对于未来6G的陆海空天一体化网络,信道基础参数,如地形、地物、海浪、风、云、雾、雨、雪、电离层、磁层、太阳等可视为对应的通信信道的物理实体。地形、地物、海浪等共同构成的地(海)面通信信道模型实体,风、云、雾、雨、雪等共同构成的低空信道模型实体,电离层和磁层共同构成的高空信道模型实体,太阳及其他星体可视为深空信道模型实体。根据不同应用需求和粒度对物理信道进行分层,是分层构建数字孪生模型的基础。数字孪生信道模型通过对物理实体的交互与耦合关系进行描述,从而对陆海空天通信信道的变化进行分析与预测。

2.2 虚拟信道(V)

虚拟信道是物理信息在数字空间的真实、客观、完整的映射,是数字孪生信道数据的载体。虚拟信道包括几何模型、物理模型、行为模型和规则模型,这些模型能够从多时空角度对虚拟信道进行描述。几何模型能够描述物理信道中涉及的物理实体,如地形、地物的几何参数(尺寸、位置等)的三维模型,实现与物理实体良好的时空一致性。物理模型则是在几何模型的基础上对物理信道的物理属性和特征等信息进行描述,通过数字仿真工具对无线信道中的结构、电磁场进行仿真分析,实现信道的动态近似模拟。行为模型刻画了不同粒度下的物理信道随外部环境扰动而引起的变化,如随空间变化的信道模型的演化,随时间推进的信道的变化,这些变化可利用人工神经网络、混沌计算、贝叶斯网络等方法进行创建。规则模型主要指无线通信行业的标准、规范以及基于历史数据总结得到的规律等,抑或利用机器学习、深度学习等算法挖掘出的新规则,这些规则通过自我学习可实时判断、评估和预测信道特性和信道质量。通过对上述四类模型的融合,可建立与物理信道高保真映射的虚拟信道。进而借助虚拟现实、增强现实等技术,将虚拟信道以超现实的形式展现,从视觉、触觉等方面进行沉浸式的虚拟现实体验,增强虚拟信道及其影响效应的可视化效果。

2.3 孪生数据(D)

孪生数据是数字孪生信道的核心驱动力,为虚拟信道和物理信道融合提供准确、全面的数据源。信道孪生数据可划分为物理信道数据、虚拟信道数

据、应用服务数据、信道知识数据和信道衍生数据。其中,物理信道数据主要包括通过陆基、海基、空基等无线信道多源传感器采集到的物理信道的特征参数、外部扰动等数据。虚拟信道数据包括虚拟信道的相关数据,如通信信道几何尺寸、位置等几何模型数据,信道结构、场分布等物理模型数据,空间变化、随时扰动、演进变化等行为模型数据,信道标准、规范等规则模型数据以及基于上述模型开展的信道模拟、评估、预测等仿真数据。应用服务数据包括论证设计数据、研制生产数据、测试验证数据和运维管理数据等。知识数据包括已形成或未来形成的行业标准,具体可体现为信道模型库、专家知识等。通过对上述数据进行数据转换、分类、融合等相关处理后可得衍生数据。衍生数据通过融合实时信道数据与历史数据、信道标准数据等相关数据,可得到多时空、多尺度融合后的信道数据,能够更加真实地反映通信环境中的信道特征情况,实现信道信息的共享。

2.4 应用服务(S)

应用服务是数字孪生信道功能实现的媒介,是指满足不同领域用户、不同业务需求的全生命周期服务。主要包括设计论证服务、研制生产服务、测试验证服务和运维管理服务。设计论证服务主要面向通信系统研制单位,包含通信场景服务、信道预测服务、信道态势变化服务,可在全局角度辅助综合判定B5G和6G通信系统效能。研制生产服务主要面向研发技术人员,包含信道效应评估服务、系统性能评估服务、研发过程优化服务等。测试验证服务面向测试操作人员,包含信道特性感知服务、信道环境构建服务、通信能力迭代优化服务。运维管理服务主要面向系统运维管理人员,包含信道恶化预警服务、部署辅助决策服务等。通过这些应用服务可在B5G、6G通信系统从先期论证到后期维护的全生命周期提供有力支撑和参考。

2.5 信息连接(C)

连接是实现物理信道、虚拟信道、孪生数据和服务之间的互联互通,其中 C_{PV} 实现物理信道和虚拟信道的交互,可将采集得到的物理信道数据通过传感网络传输至虚拟信道,用于更新虚拟信道模型和参数,而虚拟信道的仿真数据可驱动物理信道的传感网络的部署。 C_{PS} 实现物理信道和服务的交互,采集的物理信道实时数据能够实现对服务的迭代优化,而服务的分析决策结果提供给具体操作人员实

现对物理信道传感网络的调控. C_{VS} 实现虚拟信道和服务的交互, 可将虚拟信道的各类模型和仿真结果以服务的形式提供给用户, 同时把用户需求传递给虚拟信道. C_{PD} 实现物理信道和孪生数据的交互, 通过传感网络将物理信道的数据传输至孪生数据, 并将孪生数据处理后的数据反馈到物理信道. C_{SD} 实现应用服务与孪生数据的交互, 可通过数据库接口将服务数据储存到孪生数据中, 并可读取孪生数据中的信道模型、历史数据等对外提供各类服务. C_{VD} 实现虚拟信道和孪生数据的交互, 一方面

可通过数据库接口将虚拟信道的仿真分析结果储存在孪生数据中, 另一方面将孪生数据提供给虚拟信道以支撑虚拟信道的动态仿真.

3 数字孪生信道功能体系

为全面展现数字孪生信道的功能, 在此, 从 B5G 和 6G 通信信道功能出发, 利用数字孪生功能模型构建方法, 对数字孪生信道功能进行分析建模, 可得到面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道功能模型, 如图 3 所示.

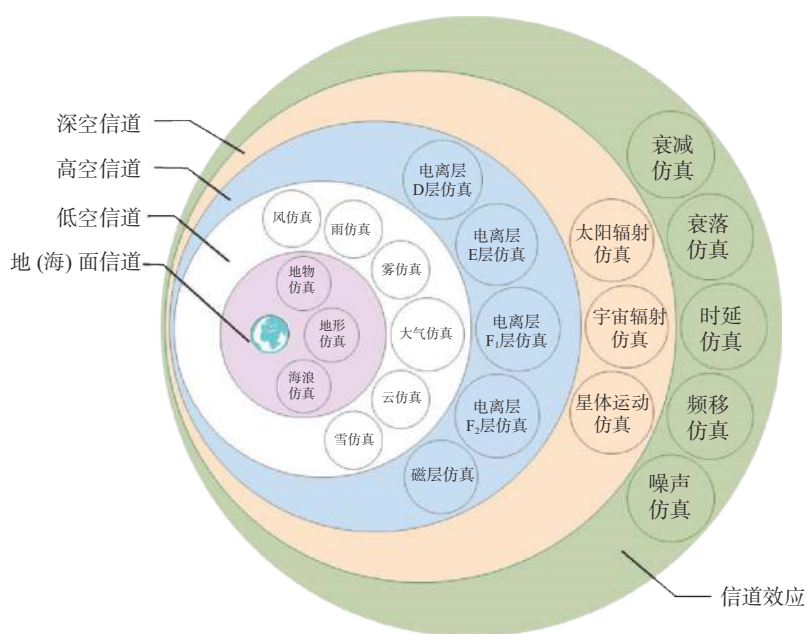


图3 B5G和6G通信数字孪生信道功能体系

Fig. 3 Function framework of digital twin channel for B5G and 6G communication

从图3可以看出, 数字孪生信道通过地(海)面、低空、高空、深空等无线信道参数实现衰减、衰落、时延、频移等特性的分析. 其中, 地(海)面信道模型实现地形、地物、海浪等参数的仿真, 低空信道模型实现风、云、雾、雨、雪、大气等参数的仿真, 高空信道模型实现对电离层D层、E层、F层(包括 F_1 层和 F_2 层)以及磁层等参数的仿真, 深空信道模型实现太阳辐射、宇宙辐射、星体运动等参数的仿真.

对于未来的B5G、6G通信来说, 陆海空天一体的信道特性决定着整个通信网络的性能, 可以说信道模型是通信系统性能评估的基础. 当前, 无线通信及信道正向更高频率、更大规模的天线阵规模、更多样化的通信方式的趋势发展, 上述特性对传统信道及建模方法提出了新的挑战^[16]. 因此, 数字孪生信道将充分延展现有信道模型及应用. 如图4所示, 数

字孪生信道建模方法在现有单一场景基础上, 重点是开展陆海空天全空间混合场景的建模^[3,17]; 通信模式在考虑单输入单输出(single-input single-output, SISO)、单输入多输出(single-input multi-output, SIMO)和多输入单输出(multi-input single-output, MISO)的同时, 更加关注于大规模和超大规模的多输入多输出(multi-input multi-output, MIMO)^[3]; 频段在现有通信频段的基础上, 将扩展至毫米波、太赫兹等频段^[17]; 建模对象在大尺度和小尺度效应的基础上, 同时关注信道参数及其所引发的各类效应的新特性; 建模方法也将在现有确定性、经验性以及半经验方法的基础上有深入扩展和延伸, 如研究简化或快速射线追踪方法代替传统的射线追踪方法^[19], 融合基于几何和随机的方法建立模型^[3], 引入机器学习特别是深度学习等人工智能方法进行建模^[20].

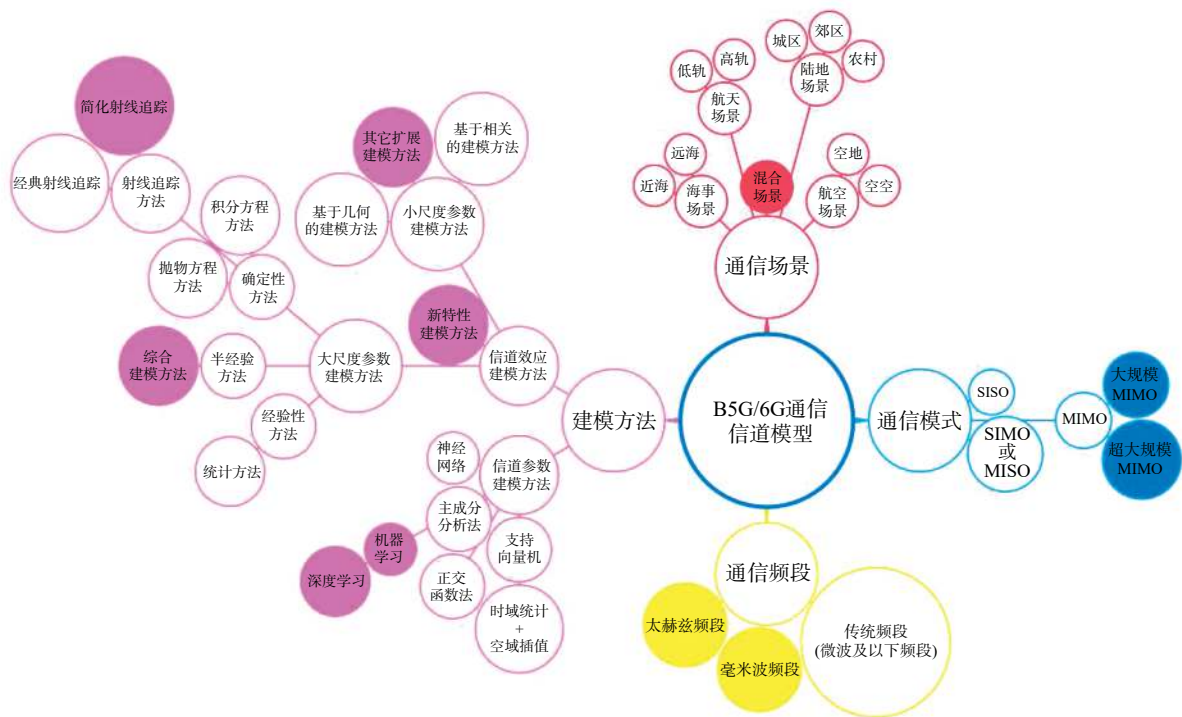


图 4 B5G 和 6G 通信数字孪生信道建模方法的知识图谱

Fig. 4 Knowledge graph of channel modeling function for B5G and 6G communication

4 数字孪生信道技术体系

当前, 人工智能、物联网、大数据等领域新兴技

术的快速发展, 为实现数字孪生信道提供了新型的驱动力^[21-23], 数字孪生信道不同环节中具体技术的应用如图 5 所示。

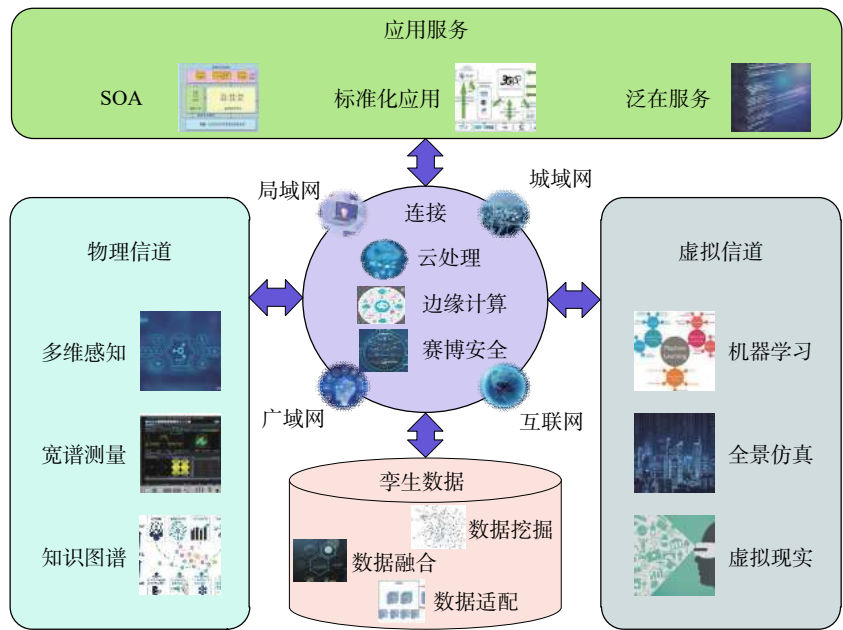


图 5 B5G 和 6G 通信数字孪生信道驱动技术体系

Fig. 5 Enabling technologies and framework of digital twin channel for B5G and 6G communication

1) 多维感知、宽谱测量、知识图谱等技术可用于支撑物理信道应用, 具体来讲: 多维感知通过前端

多类型、多形态的信道传感设备实现物理信道特征数据的采集和聚合^[24], 为虚拟信道特性建模提供数

据基础; 宽谱测量可为物理信道感知提供更高的分辨率、更实时的捕获度, 大幅提升物理信道感知的时效性; 知识图谱的引入, 旨在通过数据处理、信息聚合、知识表征和图形显示等技术手段, 深度揭示物理信道的动态发展规律, 为虚拟信道及其效应的预测提供切实的、有价值的参考^[25]。

2) 机器学习、全景仿真、虚拟现实等技术可用于支撑虚拟信道建模, 具体来讲: 机器学习可通过物理信道特征历史数据的分析或变化规律的总结, 实现信道的实时预测和模拟, 为虚拟信道模型的建立提供有效的工具^[26]; 虚拟现实 (扩展包含增强现实) 的全景仿真技术将基于全景 360° 图像显示技术实现全方位、互动式虚拟信道特征展示^[27]。

3) 数据挖掘、数据融合、数据适配等技术可用于支撑孪生数据处理, 三者相辅相成, 该过程首先通过离散化、降噪等技术实现多源异构信道数据一致性处理, 并从海量数据中发现可用的知识, 最终形成可用的数据模型^[28]。

4) 云处理、边缘计算、赛博安全等技术, 可用于支撑模块间连接部分, 具体来讲: 云处理通过高灵活

性、可扩展性的分布式智能处理, 并辅以网络、计算、存储、应用核心能力为一体的开放边缘计算平台^[29], 为数字孪生信道应用服务提供保障; 赛博安全技术为上述服务提供网络安全保障。

5) 面向服务架构 (service oriented architecture, SOA)^[30]、标准化应用、泛在服务^[31]等技术可用于支撑数字孪生信道的应用服务, 具体来讲: SOA 为数字孪生信道应用服务定义良好的接口和协议, 在此基础上的系列化统一措施实现应用服务标准化, 进而为任意用户、任意时间、任意地点在任意网络上的按需服务。

5 数字孪生信道标准体系

作为一个新兴领域, 考虑数字孪生信道的理解与沟通需要标准的辅助, 数字孪生信道关键技术的研究与实施需标准参考, 数字孪生信道的落实应用需要标准指标, 同其他应用类似^[32], 数字孪生信道同样急需建立对应的标准体系。综合考虑拟建体系的合理性、完整性、系统性和可用性, 数字孪生信道标准体系框架如图 6 所示。

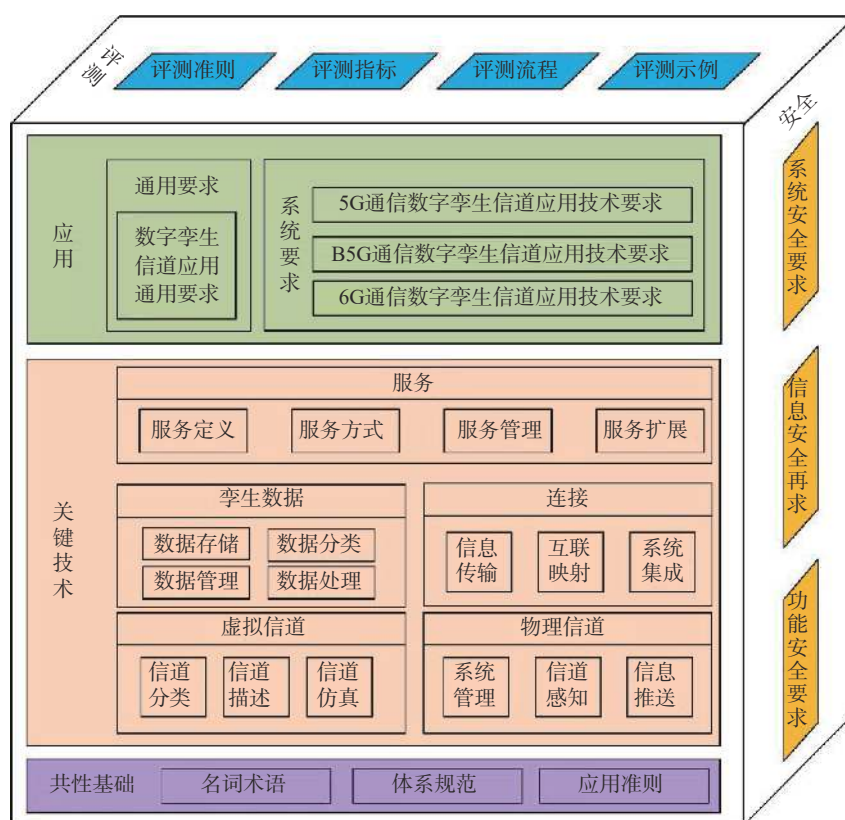


图 6 B5G 和 6G 通信数字孪生信道标准体系

Fig. 6 Standard framework of digital twin channel for B5G and 6G communication

1) 数字孪生信道基础共性标准包括无线信道数字孪生名词术语、体系规范、应用准则三个部分, 为

数字孪生信道技术内涵、概念定义、体系架构、应用范畴提供支撑。

2) 数字孪生信道关键技术标准包括物理信道标准、虚拟信道标准、孪生数据标准、连接标准、应用服务标准五部分,可用于指导数字孪生信道五维模型中的关键技术的研究和实施。

3) 数字孪生信道应用标准包括通用要求以及在5G、B5G、6G通信等领域应用的具体技术要求,可用于规范数字孪生信道应用过程中运行环境、接口、集成、维护等技术要求。

4) 数字孪生信道评测标准包括评测准则、评测指标、评测流程和评测示例四个部分,用于规范数字孪生信道能力评测的目的、环境、要求(如易用性、扩展性、维护性)、过程等内容。

5) 数字孪生信道安全标准包括系统安全要求、信息安全要求和功能安全要求三个部分,用于规范数字孪生信道应用过程的系统操作安全、信息传输存储安全以及功能实现安全。

6 结论

本文针对性地提出了面向B5G、6G数字孪生信道的技术内涵、五维模型、应用体系、功能体系、技术体系和标准体系。该技术是传统信道模型的延展,是在现有信道建模方法及模型的基础上,融合物联网、大数据、云处理、人工智能等技术,对应物理信道变化特性实现信道参数特性及其影响效应的定量分析和可视化,用于B5G、6G通信系统的论证设计、研制生产、测试验证、运维管理等全寿命周期各阶段,进而推动:

1) 更便捷的创新。数字孪生信道通过数字仿真、虚拟现实等手段,将物理信道的各种属性映射到虚拟空间中,形成信道及其效应可复制、可转移、可编辑、可复现的数字镜像,加速研发和使用人员对物理信道的了解,让原来由于物理条件限制、必须依赖于真实信道而无法完成的工作成为触手可及的工具,探索出一条新途径来优化B5G、6G通信系统的设计、研制、测试、运维等环节。

2) 更全面的感知。无论是设计、研制、测试,还是运维,都需要精确地感知物理信道参数的多维属性和状态,以实现精准的分析用以支撑B5G、6G通信。数字孪生信道可借助于物联网、大数据、云处理等技术,通过采集有限的信道观测传感器的直接数据,并借助大样本库,通过机器学习、智能计算等技术,实现对当前信道状态的评估以及对未来趋势的精确预测,得到一些原本无法直接测量的信道特性,用以支撑B5G、6G通信性能的分析,提供全面的决

策支持。

3) 经验的数字化。数字孪生信道通过数字化的手段,将无线信道传感器的历史数据、专家经验进行数字化,可通过人工智能方法训练出针对不同现象的数字化特征模型,并提供了复制、编辑和转移的能力,形成对未来信道状态精准判决的依据,并可针对性地进行信道特征库的丰富和更新,最终形成自治化的智能诊断和判决。

本文研究工作仅对数字孪生信道的技术内涵、模型、体系涉及的主要内容进行了肤浅研究与探讨,还存在很多不足,所讨论内容还有待进一步补充完善,如探索数字孪生与大数据、云计算、人工智能等技术的关系,与B5G、6G通信系统应用及相关其他系统如何更好地结合考虑还不充分、不全面。

参考文献

- [1] ZHAO X W, ABDO A M A, XU C, et al. Dimension reduction of channel correlation matrix using cur-decomposition techniques for 3-D massive antenna system[J]. IEEE access, 2018(6): 3031-3039.
- [2] 庞立华, 张阳, 任光亮, 等. 5G无线通信系统信道建模的现状和挑战[J]. 电波科学学报, 2017, 32(5): 487-497.
PANG L H, ZHANG Y, REN G L, et al. Current status and challenges of channel modeling for 5G wireless communication systems[J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(5): 487-497. (in Chinese)
- [3] 王承祥, 黄杰, 王海明, 等. 面向6G的无线通信信道特性分析与建模[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 19-32.
WANG C X, HUANG J, WANG H M, et al. 6G oriented wireless communication channel characteristics analysis and modeling[J]. Chinese journal on internet of things, 2020, 4(1): 19-32. (in Chinese)
- [4] 魏克军, 赵洋, 徐晓燕. 6G愿景及潜在关键技术分析[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 17-21.
WEI K J, ZHAO Y, XU X Y. Analysis of 6G vision and potential key technology[J]. Mobile communication, 2020, 44(6): 17-21. (in Chinese)
- [5] ZHAO X, DU F, GENG S, et al. Playback of 5G and beyond measured MIMO channels by an ANN-based modeling and simulation framework[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(9): 1945-1954.
- [6] DAVID K, BERNDT H. 6G vision and requirements: is there any need for beyond 5G?[J]. IEEE vehicular technology magazine, 2018, 13(3): 72-80.
- [7] CHOWDHURY M Z, SHAHJALAL M, AHMED S, et al. 6G wireless communication systems: applications, require-

- ments, technologies, challenges, and research directions[J]. IEEE open journal of the communications society, 2020: 1.
- [8] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G移动通信网络: 愿景, 挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987. ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies[J]. Scientia sinica informationis, 2019, 49(8): 963-987. (in Chinese)
- [9] 刘光毅, 金婧, 王启星, 等. 6G愿景与需求: 数字孪生, 智能泛在[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 3-9. LIU G Y, JIN J, WANG Q X, et al. Vision and requirements of 6G: digital twin and ubiquitous intelligence[J]. Mobile communications, 2020, 44(6): 3-9. (in Chinese)
- [10] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//KAHLEN F J, FLUMERFELT S, ALVES A. Trans disciplinary perspectives on complex systems. Cham: Springer, 2017.
- [11] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18. TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019, 25(1): 1-18. (in Chinese)
- [12] 黄培. 详解数字孪生应用的十大关键问题[EB/OL]. [2020-06-28]. http://www.360doc.com/content/20/0628/21/44194329_921145088.shtml.
- [13] 周有城, 武春龙, 孙建广, 等. 面向智能产品的数字孪生体功能模型构建方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25: 1393-1404. ZHOU Y C, WU C L, SUN J G, et al. Function model construction method based on digital twin for intelligent products[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019, 25: 1393-1404. (in Chinese)
- [14] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念, 关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 565-588. LIU W R, TAO F, CHENG J F, et al. Digital twin satellite: concept, key technologies and applications[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2020, 26(3): 565-588. (in Chinese)
- [15] WU C L, ZHOU Y C, PESSA M V P, et al. Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model[J]. Journal of manufacturing systems, 2020.
- [16] ZHANG J H, TANG P, YU L, et al. Channel measurements and models for 6G: current status and future outlook[J]. Frontiers of information technology & electronic engineering, 2020, 21: 39-61.
- [17] 周杰, 刘鹏, 黄雷, 等. 室内直达与非直达环境无线传播综合信道建模[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 170505. ZHOU J, LIU P, HUANG L, et al. Indoor wireless propagation under line of sight and no line of sight comprehensive channel modeling[J]. Acta physica sinica, 2015, 64(17): 170505. (in Chinese)
- [18] 田浩宇, 唐盼, 张建华. 面向6G的太赫兹信道特性与建模研究的综述[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 29-35+43. TIAN H Y, TANG P, ZHANG J H. A review of terahertz channel characteristics and modeling for 6G[J]. Mobile communications, 2020, 44(6): 29-35+43. (in Chinese)
- [19] TAN J, SU Z, LONG Y. A full 3-D GPU-based beam-tracing method for complex indoor environments propagation modeling[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(6): 2705-2718.
- [20] WANG J, MA J, HUANG X, et al. Modeling of the ionospheric critical frequency of the F₂ layer over Asia based on modified temporal-spatial reconstruction[J]. Radio science, 2019, 54(7): 680-691.
- [21] ZHUANG C B, GONG J C, LIU J H. Digital twin-based assembly data management and process traceability for complex products[J]. Journal of manufacturing systems, 2020.
- [22] LIU Z F, CHEN W, ZHANG C X, et al. Intelligent scheduling of a feature-process-machine tool super network based on digital twin workshop[J]. Journal of manufacturing systems, 2020.
- [23] WANG X Z, WANG Y C, TAO F, et al. New paradigm of data-driven smart customisation through digital twin[J]. Journal of manufacturing systems, 2020.
- [24] SUN X, XU P, SHUANG K, et al. Multi-dimensional aware scheduling for co-optimizing utilization in data center[J]. China communication, 2011, 8(6): 19-27.
- [25] 吴运兵, 阴爱英, 林开标, 等. 基于多数据源的知识图谱构建方法研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 329-335. WU Y B, YIN A Y, LIN K B, et al. Knowledge graph construction method based on multiple datasources[J]. Journal of Fuzhou University (natural science edition), 2017, 45(3): 329-335. (in Chinese)
- [26] SHANG C, YOU F. Data analytics and machine learning for smart process manufacturing: recent advances and perspectives in the big data era[J]. Engineering, 2019, 5(6): 1010-1016.
- [27] LIN S, CHENG H F, LI W, et al. Ubii: Physical world interaction through augmented reality[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2017, 16(3): 872-885.

(下转第 385 页)

Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Montreal, 2016: 1-5.

- [16] JAECKEL S, RASCHKOWSKI L, BÖRNER K, et al. QuaDRiGa: a 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(6): 3242-3256.

作者简介



崔昊 (1997—), 男, 北京人, 现为华北电力大学电气与工程学院硕士在读研究生, 主要研究方向为 5G 毫米波时变信道建模与仿真.



钱肇钧 (1984—), 男, 北京人, 2012 年获北京邮电大学电子与通信工程硕士学位, 现就职于国家无线电监测中心(国家无线电频谱管理中心), 工程师, 主要从事 5G 电磁兼容分析、频谱使用评估、电波传播特性等研究与标准化工作.



富子豪 (1996—), 男, 现为华北电力大学电气与工程学院博士在读研究生, 主要研究方向为无线通信系统信道建模及仿真.

(上接第 348 页)

- [28] 王璿. 数据挖掘与数据融合相结合的信息处理技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [29] 赵梓铭, 刘芳, 蔡志平, 等. 边缘计算: 平台、应用与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(2): 327-337.
- ZHAO Z M, LIU F, CAI Z P, et al. Edge computing: platforms, applications and challenges[J]. Journal of computer research and development, 2018, 55(2): 327-337. (in Chinese)
- [30] YANG J I, PING Z, ZHENG H, et al. Towards mobile ubiquitous service environment[J]. Wireless personal communications, 2006, 38(1): 67-78.
- [31] CAPORUSCIO M, RAVERDY P G, ISSARNY V. ubiSOAP: a service oriented middleware for ubiquitous networking[J]. IEEE transactions on services computing, 2012, 5(1): 86-98.

- [32] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2405-2418.

TAO F, MA X, HU T L, et al. Research on digital twin standard system[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019, 25(10): 2405-2418. (in Chinese)

作者简介

王健 (1979—), 男, 河北人, 研究方向为无线通信.

杨闯 (1992—), 男, 河北人, 研究方向为无线通信.

闫宁宁 (1990—), 女, 河南人, 研究方向为天线理论与设计.