

面向6G的无线接入网络 数字孪生技术



Digital Twin Technology for Wireless Access Network Oriented to 6G

段向阳/DUAN Xiangyang^{1,2}, 康红辉/KANG Honghui^{1,2},
吕星哉/LYU Xingzai^{1,2}, 芮华/RUI Hua^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055)
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230620.1345.006.html>

网络出版日期: 2023-06-20

收稿日期: 2023-04-25

摘要: 未来6G网络不但可以为数字孪生技术提供数据传输、高可靠性连接等基础能力,自身也可以利用数字孪生技术来实现网络智能化。从数字孪生技术的原理及6G网络的需求出发,研究了数字孪生无线网络的架构、关键技术和应用等,探讨了数字孪生技术在6G无线接入网络中的作用。认为数字孪生无线网络可成为6G网络的基础性架构,也是6G网络智能化的关键使能因素。

关键词: 数字孪生; 6G; 人工智能; 大数据; 无线信道

Abstract: The future 6G networks can not only provide basic capabilities such as data transmission and high-reliability guarantee for digital twin technologies, but also utilize digital twin technologies to achieve network intelligence. Focusing on the principles of digital twin technologies and the requirements of 6G networks, the architecture, key technologies, and applications of digital twin wireless networks are studied, and the role of digital twin technologies in 6G wireless access networks is analyzed. It is believed that digital twin wireless networks will become the fundamental architecture of 6G networks, and will be the key factor of the intelligentization of 6G networks.

Keywords: digital twin; 6G; artificial intelligence; big data; wireless channel

引用格式: 段向阳, 康红辉, 吕星哉, 等. 面向6G的无线接入网络数字孪生技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 32-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303007

Citation: DUAN X Y, KANG H H, LYU X Z, et al. Digital twin technology for wireless access network oriented to 6G [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 32-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303007

1 数字孪生无线网络发展现状

数字孪生技术能够将物理世界的物、人、事及其互动联系在数字世界中建立虚拟映像,是近年来的革命性技术。在数字域构造一个物理对象或系统的虚拟数字孪生体,可以有效地模拟、优化和预测对应物理实体的行为和性能^[1]。目前数字孪生技术已在多个垂直行业实现落地应用,如自动驾驶、数字城市、数字矿山、数字工厂等。在电信领域,无线通信网络不仅可以为数字孪生在各个领域的应用提供泛在高速的连接,也可以借助数字孪生技术来实现新架构、新流程和新服务^[2-3]。

在传统电信网络中,解决网络“规建维优”问题的思路是:使用物理公式对网络环境进行简化,设置约束条件,将问题建模为一个数学优化问题来求解,或者用数值近似方法

来逼近最优解。但随着网络日趋复杂,网络参数数急剧增加,在现网路测评估中使用常规算法变得越来越不可行。当前运营商在网络“规运维优”中面临诸多困难:在外场特别是To B场景中,环境多变,运维费时费力,故障诊断和分析困难;新技术效果和理论与仿真差距大,难以提前实地验证,落地部署缓慢;同时数据被封闭在不同网元上,形成无数“数据孤岛”,难以汇聚为大数据以发挥其价值。

未来的6G网络显然不能再采用传统思路,而是要采用以人工智能为核心驱动力的网络“规建维优”方案。人工智能驱动方案避免了数学建模的抽象性转换问题,更能满足现网需求,可通过大规模神经网络计算来快速给出合理决策。这样的系统首先需要和现网十分接近的数字模型来为人工智能提供输入数据;其次,由于人工智能结果的不可解释

性，也需要一个具备仿真能力的平台来验证其决策的有效性。人工智能、数字模型和动态仿真能力三者的结合就是智慧内生的数字孪生系统。通过在数字域构筑无线网络的数字孪生体，利用网络可视、数据开放、动态仿真和智能分析决策等手段可有效赋能自主自治的未来6G网络。

目前业界针对数字孪生无线网络已经开展了很多研究。中国移动连续发布《数字孪生网络（DTN）白皮书》^[4]《数字孪生技术应用白皮书》^[5]《基于数字孪生网络的6G无线自治白皮书》^[6]等，明确提出了数字孪生网络的4项技术特征，设计了端到端网络架构，规划了关键技术体系，给出了具体案例。国际电信联盟电信标准化部门正在制订“数字孪生网络的要求和体系结构”标准。针对数字孪生技术赋能个性网络应用场景，中国通信标准化协会正在制订“行业现场数字孪生场景与需求”系列标准。IMT-2030（6G）推进组发布的白皮书更是将数字孪生技术作为6G网络的架构性技术之一。在研究领域，从理论框架、模型构建到业务应用的研究成果也在不断涌现^[7-9]。

随着人工智能技术的发展，未来6G网络架构不仅需要一种能和真实现场高精度匹配的验证环境，还需要提供数据开放和数据生产能力以便为人工智能提供训练输入。这决定了数字孪生技术在6G网络中将扮演重要的角色。本文将从架构、技术和应用几个方面深入探讨面向6G无线接入网络的数字孪生技术。

2 概念与架构

在传统的数字孪生技术中，数字孪生包括产品孪生、产品线孪生、性能孪生、运营孪生积累。面向6G的数字孪生网络应该是以上各种类的综合，是一种包含新技术设计和验证、网元开发和部署、网络规划和建设、网络性能和运维多维度、全网络生命周期的网络。它能够为新技术预研专家、产品开发工程师、规建运维人员等提供服务，具备支持6G网络可视、可控、自主演进的能力。

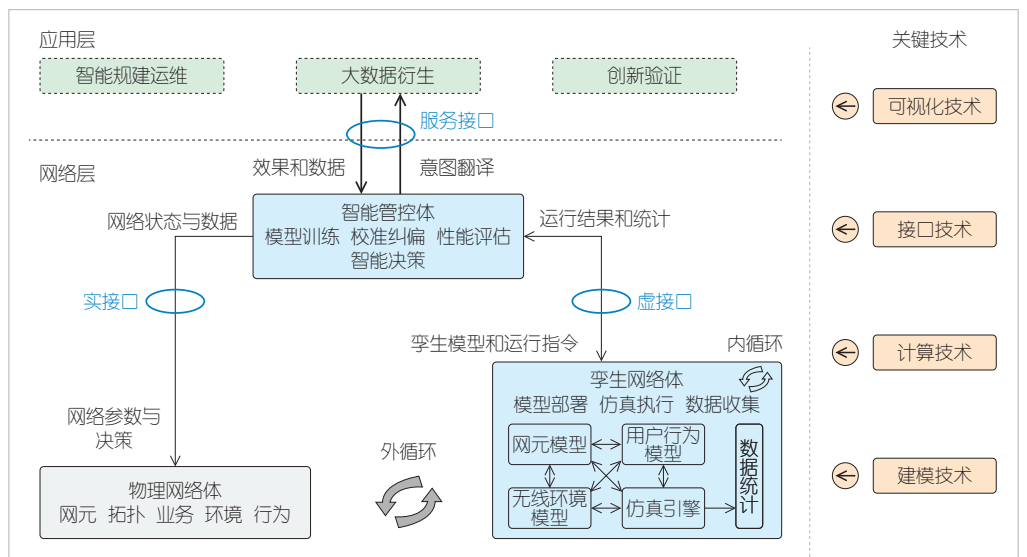
6G中的数字孪生网络如图1所示。该网络拥有“双层、三体、双循环”结构。其中，“双层”是指应用层和网络层，“三体”是指物理网

络体、孪生网络体和智能管控体，“双循环”是指内循环和外循环。

应用层提供各种数字孪生网络的服务，主要包括三大类：1) 网络智能“规建运维”服务；2) 对AI算法赋能，并提供的大数据衍生服务；3) 对新技术、新产品进行快速低成本的创新验证服务。各种服务通过服务接口并经过相应的意图翻译后，将应用的需求传递到下面的网络层。随后，服务接口接收执行返回的数据。

网络层由物理网络体、孪生网络体和智能管控体构成。其中，智能管控体通过实接口和虚接口分别连接物理网络体和孪生网络体。物理网络体即现实中部署的真实外场网络，包含网元、运行的业务、无线环境及用户的行为等。孪生网络体即物理网络在数字域的虚拟镜像，其中的孪生模型能够高保真地复现真实外场网络中的各种复杂因素，并具备模拟这些复杂因素互动和变化的动态仿真能力。作为系统的“大脑”，智能管控体则进行各种流程调度、资源分配、数据处理配置以及最终决策，从真实的物理网络体中采集并获取网元、拓扑、业务、环境和用户行为的状态与数据，通过专门的知识提取和训练技术将其构建为孪生模型，并将这些模型部署到孪生网络体中；同时根据智能决策产生的方案指导数字孪生体进行仿真，收集相应的运行数据，进行迭代优化。此外，智能管控体会根据仿真结果评估在现实网络中的可行性和增益，矫正孪生网络体和物理网络体的偏差，最后做出可信、可解释的优化决策并将其配置给物理网络，实现性能优化和故障诊断，并向应用层反馈效果和相应的数据。

6G中的数字孪生网络运行过程可以概括为内循环和外循环。其中，内循环是指在孪生网络体内部根据智能管控体



▲图1 面向6G的数字孪生无线孪生网络参考架构和关键技术

的指示，不断尝试新策略、新参数以寻找更优方案的过程；外循环是指在物理网络体和孪生网络体间的同步和逼近迭代。在外循环中，孪生网络体根据物理网络体现状修正自身模型，不断逼近物理网络体；同时物理网络体使用新策略和新参数改变自身状态，以逼近孪生网络体仿真得到的未来状态。孪生网络体内迭代优化的内循环和孪生网络体与物理网络体之间往复迭代的外循环可实现虚实同步共生，高效推进网络智能自我更新和生长。

3 关键技术和挑战

面向6G的数字孪生技术目前仍面临从显示、建模到计算的一系列挑战。因此，我们需要重点关注以下关键技术。

3.1 建模技术

3.1.1 方法论

建模技术是数字孪生的基础。如果没有和物理实体贴近的数字模型，就不可能构建合理的数字孪生无线网络。传统的孪生模型包括数学模型和数据驱动模型。数学模型具备一定的泛化性。因为在现实中难以获得具体场景和实体的全部参数与边界条件，所以构建足够精确的模型是比较困难的。数据驱动模型是由具体场景和实体的输入输出训练得到的，它可以很好地拟合具体场景和实体，但是存在泛化能力弱的问题。因此，使用知识+数据的双驱动建模方式显得更为合理。这种方式将数学公式和物理规律抽象为知识，并利用这些知识减少神经网络的复杂度，提升其泛化能力。知识可以通过知识图谱来存储和运算，以便更好地理解数字孪生模型中各个元素之间的关系，更加深入地分析和优化孪生模型。数据中包含具体场景和实体的信息。利用训练可以提取这些特性信息，使得模型更为准确地拟合具体场景和实体。

同时，以ChatGPT为代表的大模型技术也在兴起。大模型可以通过更多的参数和层数来学习更丰富的特征，从而提高建模和仿真的准确性。通过大模型，数字孪生可以模拟更复杂的系统，并预测可能的结果，例如：大模型可以用于建立高精度的3D模型，这可以为数字孪生提供更多的信息来模拟现实世界中的各种场景。

3.1.2 各模型构建技术

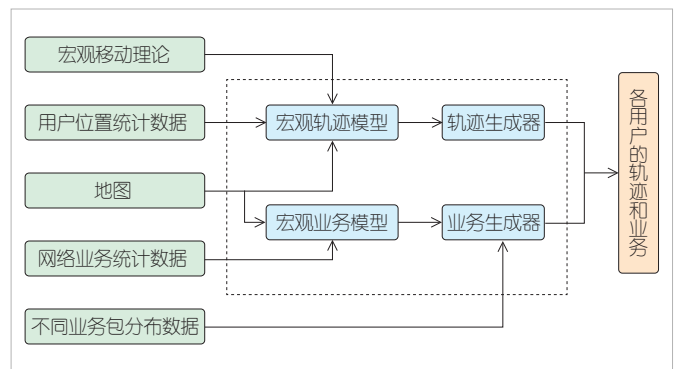
在数字孪生无线网络中，模型可以分为3类：网元模型、无线环境模型和用户行为模型。这些模型由智能管控体训练生成，随后被部署到孪生网络体中。

网元即无线网络中存在的各种设备，比如天线、基站、

终端和路由器等。由于硬件结构和软件代码都是可知的，因此对精确度要求很高的场景可以采用白盒建模的方案，在孪生网络体中复现其硬件运行机理，运行和实际相同的软件代码。但此种方法对大规模网络的运算量提出较高的要求。对精确度要求较低的场景可以采用黑盒建模的方案，利用训练后的神经网络来模拟整个网元的输入和输出函数关系。进一步使用大模型建模可以有效通过一个模型来模拟不同功能和供应商的网元，更好地预测网元的状态和行为。

不同于网元，无线环境包含无线信道和干扰，具有很强的随机性和多样性，因此往往需要根据现场的实际信息和数据来进行场景化建模。这些现场信息包括数字地图、卫星和航拍照片、各种测量结果和实际网络数据。同时，无线信号传播规律有很成熟的理论，因此无线环境建模十分适合使用知识+数据双驱动建模方法。文献[10]中，中兴通讯利用传统信道估计方案提取信道特征，并对现场数据进行驱动训练。在2022年IMT-2030（6G）测试中，中兴通讯使用类似方法成功地对室内信道进行建模，即首先利用照片合成3D模型，再将对应的几何模型输入到射线孪生算法中以生成信道，最后利用人工智能算法和现场实测数据对射线追踪进行校准，从而得到精确的信道模型。

如图2所示，用户行为建模包括轨迹建模和业务建模两方面。轨迹建模以社会学移动理论作为指导，根据具体的高精度地图信息及现网中的用户位置统计信息来构筑宏观轨迹模型。该模型对网络中的主要道路和常见移动轨迹进行辨识，并对用户位置时空特征进行分析，可以实现网络级的大量用户移动和分布趋势的预测。宏观业务模型是基于地图和网络中的业务统计信息而构筑的模型，可以在业务层面复现，甚至能预测整个物理网络中流量变化的情况。在获得宏观空时分布模型后，可以调用轨迹生成器和业务生成器，根据相应的特征生成各个用户的轨迹和业务。其中，轨迹生成器可以加入随机因素，产生一个具体的可能路径；业务生成



▲图2 用户行为模型示意图

器则可以根据现网中某些典型业务的实际包到达时间、大小和分布数据进行训练，然后结合宏观模型输出的业务特征生成一个具体的业务包序列。

3.2 计算技术

计算速度和效率是数字孪生网络的关键。一切数据和决策都存在时效性限制。即使有精确的模型和孪生系统，过长的运算时间和结果反馈时间，依然会让数字孪生无线网络失去现实意义。只有以和物理网络相近的速度运行，数字孪生无线网络才具备对物理网络体的分析和指导能力。在较高的计算速度下，构成一个包含数百乃至数千小区的物理网络对应的孪生网络体，可能需要几十台乃至几百台服务器。对此，以云计算为基础构筑的数字孪生无线网络计算平台，能够提供高速低成本、弹性可扩展、高可靠性、高安全性的计算服务。在软硬件设计方面，除了传统的中央处理器（CPU）计算单元外，系统还需要引入异构计算，使用加速芯片，例如：使用图形处理器（GPU）对计算密集任务进行并行加速。

计算程序的部署位置是计算技术的另一个重要方面。如果将计算节点部署在云端，则可以获得高计算、高存储能力，但是时延较高，安全冗余性较差；反之，如果在边端部署计算节点，则时延较低，分布式安全性更好，但计算存储能力受限。因此，比较合理的部署方式是类似于雾计算的云端和边端的混合部署。这种部署能够将不同时延要求的计算业务按需部署到云端或者边端，通过互相协作来保证系统的高效运行。

3.3 可视化技术

可视化是数字孪生的初始阶段和基本要求。将网络状态、运行情况和内部数据直观地呈现在可视化界面上，可以使工程师等使用人员快速看到各种参数，进而辅助决策。可视化技术的关键包括：用于生成各种物体和环境的可视化模型的3D建模和实时渲染技术、使得用户可以在虚拟数字世界和孪生体交互的增强现实和虚拟现实技术，以及可将复杂数据和关系能直观表达的数据可视化技术。这些可视化技术可以使得使用者对网络有更深刻的洞察和理解，获得更简易的网络操作方式。目前已经有一系列软件可以支持这些技术，包括Unity引擎、Nvidia Omniverse和Simens NX建模软件、Tableau数据动态可视化软件等。

3.4 接口技术

由图1可知，数字孪生无线网络系统包含多个外部和内

部接口。

应用层和网络层之间的服务接口可以是语音、文本、触屏、按钮等形式，甚至可以是ChatGPT式的智能聊天机器人。基于人工智能的语义分析和自动推导是该接口的关键。

在智能体与物理网络体、孪生网络体之间的实接口和虚接口，需要采集大量的数据。这些数据会占用一定的带宽，因此需要进行压缩。比较常见的压缩方法包括：使用现有的成熟数据压缩算法进行处理；充分利用数据本身的特征，使用基于人工智能的算法来压缩数据。其中，使用基于人工智能的算法对信道数据进行压缩处理^[1]，可以取得比传统算法更高的压缩比和性能。此外，我们还可以采用数据定制和智能周期策略，根据计算的需要、数据更新的频率来采集数据，进一步减少数据交互量。

在孪生模型之间设有统一标准化的接口^[12]，以方便数字孪生系统的扩展。尤其是在多设备供应商的网络中，只有不同的厂商按照统一的格式进行互通互联，才有可能将各自的网元孪生模型拼接成一个大的孪生系统，从而生成自动化工作流。

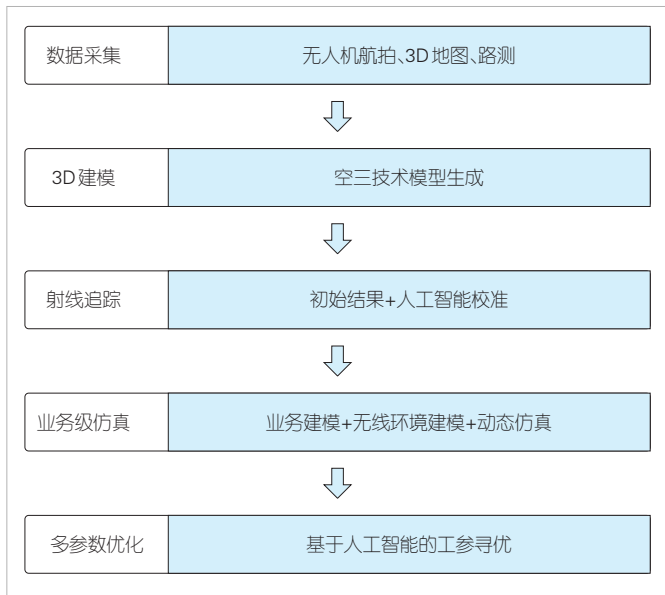
4 应用和演进

按照实时性要求，数字孪生系统分为非实时应用、准实时应用和实时应用3类。

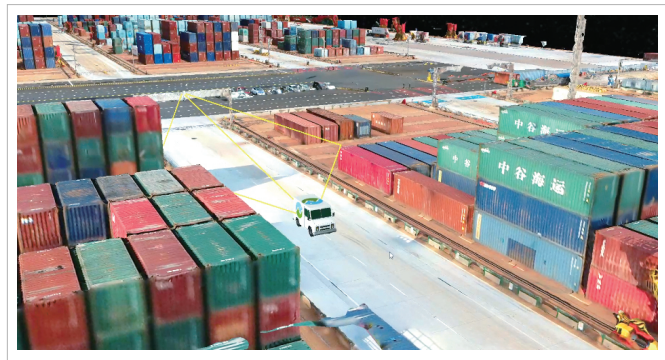
4.1 非实时应用

非实时应用对数据采集和决策输出没有实时性的要求，孪生网络体可以作为离线系统运行。这方面的典型应用是网络规建，即在某个地区建设网络之前，使用数字孪生构建实地3D模型和无线环境，在其中摆放天线和基站等各孪生网元，比较不同的建网方案，再利用人工智能自动寻优以给出最优工参建议，并支持远程3D虚拟路测，从而给出业务体验级别的性能评估。图3和图4分别为中兴通讯在某港口构建数字孪生系统以支持网络规建的流程图和远程虚拟路测效果图。在该案例中，使用数字孪生系统可以有效解决由集装箱堆高变化而导致的无线环境改变的问题，支持所见即所得，避免有缺陷方案造成的返工浪费；利用远程虚拟路测可以减少实地测试的人工和时间开销。

数据衍生是数字孪生无线网络广泛采用的另一个非实时应用。难以获得大量真实数据是目前人工智能算法在无线领域应用的瓶颈之一。由于无线信道具有多变性和多样性，在现实网络中人们需要付出巨大的经济和时间成本才能获得足够多的、具有代表性的数据，以产生具有鲁棒的算法。使用数字孪生系统可以在获得现场传播特性的基础上改变参数配



▲图3 某港口数字孪生无线网络构建和运行流程图



▲图4 港口数字孪生无线网络远程虚拟路测功能示意图

置，低成本地产生大量的、类“真实”的衍生数据。文献[11]利用数字孪生无线网络产生大量的信道数据，以训练基于人工智能的信道信息压缩和反馈算法。结果表明，基于数字孪生利用少量真实数据训练算法的效果，要好于用少量采集数据直接训练算法。

4.2 准实时应用

在非实时应用中，系统对数据采集和决策输出有较为宽松的实时性要求，孪生网络体与物理网络体之间可以有较大的时延。比较典型的应用是网络参数优化，即根据现网的实际状态和信道环境，更新孪生网络体状态，并和上层的多参数、多目标优化程序对接协作，进行参数优化。如图5所示，上层多参数、多目标优化程序可以利用人工智能，根据过往和当前的数据获取网络参数和网络性能的对对应关系。采取和孪生网络体交互式的迭代方式可以大大减少大量参数的优化搜索工作量^[13]。每一次优化的结果都可以在孪生网络体

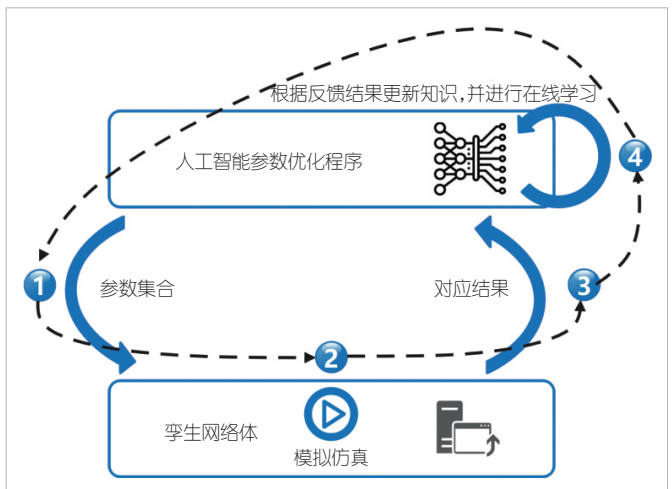
中获得快速验证。步骤1—4的往复循环迭代使得决策出的参数集合接近最优解。这种方式改变了以往网优过程费时费力的低效率人工优化模式，节省了大量的时间和人力开销。此外，一部分的网络智能运维功能也属于准实时应用。

4.3 实时应用

实时应用对数据采集和决策输出有严格的实时性要求，孪生网络体与物理网络体之间可以是同步实时运行的。此时，孪生网络体可以成为物理网络体的实时“大脑”，提供物理网络体中各网元、各协议层的算法决策。比如，由于孪生网络体可以重建现场无线传播环境，数字孪生无线网络可以计算出实时信道信息，并将这些信息通知实体物理网络，从而减少通信协议中导频和信道反馈的无线开销。此外，实时应用还具有波束管理功能：孪生数字体可以根据自身孪生的无线传播环境及用户移动轨迹，预测用户行进路线上的最佳波束，然后通知物理网络中的基站进行切换^[14]。数字孪生体具备全局视野能力，可以在获得多个基站的信息后提前进行波束规划，避免强干扰。对实时性要求更低的上层算法，也可以使用类似的方案，实现数字孪生无线网络辅助（或者主导下）的智能链路自适应、智能调度和智能切换等^[15]。未来6G将支持空天地一体化通信，对于可靠性要求很高的卫星通信系统，数字孪生技术会发挥更重要的作用^[16]。

5 结束语

本文介绍了面向6G的数字孪生无线网络的概念、架构、关键技术和一些应用实践。可以看到，数字孪生无线网络可以成为6G网络的基础性架构，是6G网络智能化的关键所在。同时，也要注意，6G中的通感一体化、微服务、安



▲图5 基于人工智能和数字孪生无线网络的多参数迭代优化

全内生、算网一体架构也能为数字孪生提供数据、通信、安全和算力保障。6G和数字孪生网络技术的有机结合，将会成为构筑未来数字化社会的基石。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 中国移动, 亚信科技, 华为, 等. 数字孪生网络(DTN)白皮书 [EB/OL]. [2023-04-15]. <http://blog.kurokoz.com/wp-content/uploads/2021/10/1633947260-357-digital-twin-network.pdf>
- [5] 中国移动, 华龙讯达, 亚信科技, 等. 2021 数字孪生技术应用白皮书 [EB/OL]. [2023-04-15]. <http://www.100ec.cn/detail-6604418.html>
- [6] 中国移动. 基于数字孪生网络的6G无线网络自治 [EB/OL]. [2023-04-15]. <https://www.waitang.com/report/45641.html>
- [7] 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
- [8] 孙滔, 周斌, 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. DOI: 10.16383/j.aas.c210097
- [9] 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
- [10] YU Z H, LV X Z, RUI H, et al. Digital twin channel: a data-driven continuous trajectory modeling [C]//Proceedings of 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPi). IEEE, 2021: 302–305. DOI: 10.1109/DTPi52967.2021.9540134
- [11] XIAO H, TIAN W Q, LIU W D, et al. ChannelGAN: deep learning-based channel modeling and generating [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(3): 650–654. DOI: 10.1109/LWVC.2021.3140102
- [12] 陈丹阳, 陆璐, 孙滔. 数字孪生网络接口设计及其协议分析 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 27(1): 29–33. DOI:10.12142/ZTETJ.202201008
- [13] GÜEMES-PALAU C, ALMASAN P, XIAO S H, et al. Accelerating deep reinforcement learning for digital twin network optimization with evolutionary strategies [C]//Proceedings of NOMS 2022–2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. IEEE, 2022: 1–5. DOI: 10.1109/NOMS54207.2022.9789945
- [14] LI Y, LI K, CHENG L, et al. Digital twin-aided learning to enable robust beamforming: limited feedback meets deep generative models [C]//Proceedings of 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2021: 26–30. DOI: 10.1109/SPAWC51858.2021.9593108
- [15] VAN HUYNH D, NGUYEN V D, KHOSRAVIRAD S R, et al. URLLC edge networks with joint optimal user association, task offloading and resource allocation: a digital twin approach [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(11): 7669–7682. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3205692
- [16] ZHAO L, WANG C C, ZHAO K L, et al. INTERLINK: a digital twin-assisted storage strategy for satellite-terrestrial networks [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2022, 58(5): 3746–3759. DOI: 10.1109/TAES.2022.3169130

作者简介



段向阳, 中兴通讯股份有限公司无线架构总经理、国家重大专项专家组成员、未来移动通信论坛副理事长; 负责中兴通讯无线系统关键技术规划与创新, 拥有超过20年的移动通信关键技术和产品研发经验; 获得中国电子学会科技进步一等奖1次、深圳市科技进步一等奖2次; 发表论文多篇, 获得国家发明专利15项。



康红辉, 中兴通讯股份有限公司无线网络智能化首席架构师; 研究方向为无线网络智能化、6G网络AI架构及应用等; 获国家发明专利5项。



吕星哉, 中兴通讯股份有限公司资深预研工程师; 研究方向为无线网络智能化、无线资源管理等; 发表论文8篇, 获国家发明专利12项。



芮华, 中兴通讯股份有限公司无线技术预研资深专家; 主要研究方向为6G无线通信技术, 包括通感算一体新型接收机、NB-NTN窄带低轨卫星系统及关键技术、6G网络架构与协议标准化研究、数字孪生无线网络技术、网络智能化、区块链网络等; 发表论文10余篇, 申请发明专利20余项。