

基于数字孪生网络的6G无线网络自治



6G Autonomous Mobile Network Enabled by Digital Twin Network

刘光毅/LIU Guangyi, 邓娟/DENG Juan, 郑青碧/ZHENG Qingbi

(中国移动通信集团有限公司研究院, 中国 北京 100053)
(The Research Institution of China Mobile Communications Group Co., Ltd, Beijing 100053, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230626.1422.002.html>

网络出版日期: 2023-06-26

收稿日期: 2023-04-25

摘要: 基于数字孪生网络的网络自治是解决因部署规模日益庞大和多网并存所导致的网络运维难的有效手段。6G 需要从网络架构设计之初就以内生的形式引入网络的数字孪生, 保证高效的数据获取和对不同场景的建模、验证能力, 并结合 AI 的应用实现高度的网络自治。数字孪生网络有望实现针对各种潜在的新能力与新服务, 高效地进行功能性能的虚拟化预验证, 降低现网验证的风险和成本。

关键词: 6G; 网络自治; 数字孪生; 内生 AI

Abstract: The digital twin network-enabled network autonomy is an effective means to solve the difficulties of network operation and maintenance caused by the increasing deployment scale and the coexistence of multiple networks. The native design of the digital twin network facilitates the artificial intelligence (AI) enabled network autonomy by providing sufficient data collection and modeling/pre-verification of different usage scenarios. The digital twin network is expected to realize the efficient pre-verification of virtualization of functional performance for various potential new capabilities and new services, and reduce the risk and cost of current network verification.

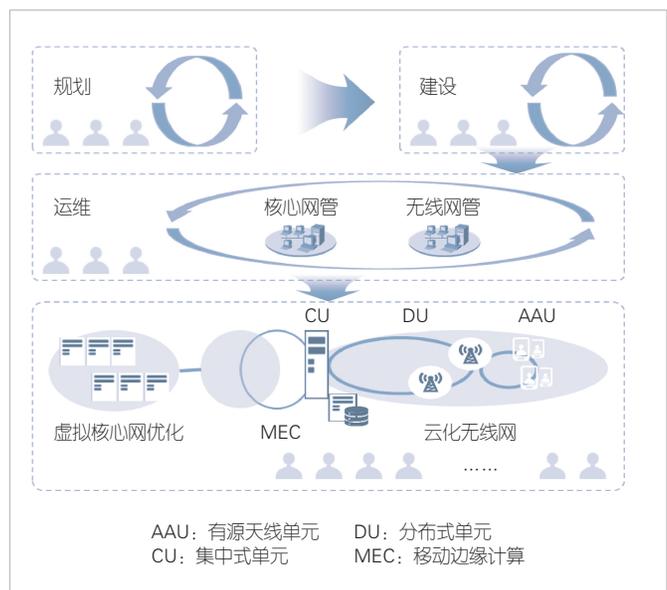
Keywords: 6G; network autonomy; digital twin; endogenous AI

引用格式: 刘光毅, 邓娟, 郑青碧. 基于数字孪生网络的6G无线网络自治 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 2-7. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303002

Citation: LIU G Y, DENG J, ZHENG Q B. 6G Autonomous mobile network enabled by digital twin network [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 2-7. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303002

随着5G的大规模部署, 运营商移动通信网络的总体规模越来越大。以中国运营商为例, 目前已累计开通了数百万个基站, 包括2G、3G、4G、5G, 甚至Wi-Fi和其他物联网制式, 且每个网络都存在多个频点, 网络间的互操作参数复杂。在传统的网络建设运营模式下, 规划、建设、运维、优化的流程完全割裂, 如图1所示。5G网络自动化水平较低, 网络生命周期各阶段割裂, “规建维优”人力成本高, 运营支出(OPEX)高。这给网络的运营和优化带来了巨大的挑战, 成为运营商日常开支中的重要组成部分。因此运维高度复杂是5G网络发展面临的主要挑战之一^[1]。

为此, 业界开始实践网络的智能化, 希望通过大数据和人工智能(AI)的运用^[2], 逐步将原有的人工操作自动化。为此, 国际电信联盟(ITU)还定义了网络智能化的5个等级^[3], 如表1所示。



▲图1 5G网络初期的运维体系

▼表1 网络智能化分级标准

等级	名称	分级评估维度				
		执行	数据采集	分析	决策	需求映射
L0	人工运营网络	人工	人工	人工	人工	人工
L1	辅助运营网络	人工和系统	人工和系统	人工	人工	人工
L2	初级智能化网络	系统	人工和系统	人工和系统	人工	人工
L3	中级智能化网络	系统	系统	人工和系统	人工和系统	人工
L4	高级智能化网络	系统	系统	系统	系统	人工和系统
L5	完全智能化网络	系统	系统	系统	系统	系统

注：1) 所有等级的决策和执行都支持人工介入，人工审核结论及执行指令具有最高权限；
2) 在智能化等级评估实施中，可以对各个维度进行单独评估

针对网络智能化，运营商虽已进行了多年的探索、研究和应用部署，但仍无法有效解决网络能耗高、多制式互操作繁杂、运维成本高、效率低等难题。同时，随着网络向可编程、软件驱动、服务化架构的方向演进，网络运维的复杂性和操作规模将达到前所未有的高度，新业务、新技术的引入也对网络操作的灵敏性提出了更加苛刻的要求。运营商急需一种更全面、更智能、可扩展且性价比可接受的网络自动化运维系统。

网络运维的自动化具有不同颗粒度，可以是任务、功能或过程的自动化，也可以是网络和服务全生命周期管理的自动化。当前5G网络运维自动化水平较低，大部分是依赖程序固化的专家规则和自动调度流转来实现的，部分场景仍依赖人工操作。基于智能化手段实现的网络运维自动化仍是“补丁式”和“外挂式”的。“补丁式”指通过用例驱动的方式实现某些特定功能的较高自动化程度，并降低人工干预度，比如自组织网络（SON）中基站自启动、邻区关系自优化、物理小区ID（PCI）自优化、移动鲁棒性优化（MRO）等；“外挂式”指将相关数据采集、汇总到网管或相关平台上进行训练，并将模型下发到对应网元以生成运维所需的智能。这种“烟囱式”的自动化系统和研发模式在现有的网络架构下可在一定程度上提升网络管理的自动化水平，但由于现有网络结构、数据的有效性和实时性的局限性，不同厂商之间的数据难以互通和共享，这导致网络自动化的效率较低、效果难以达到预期。

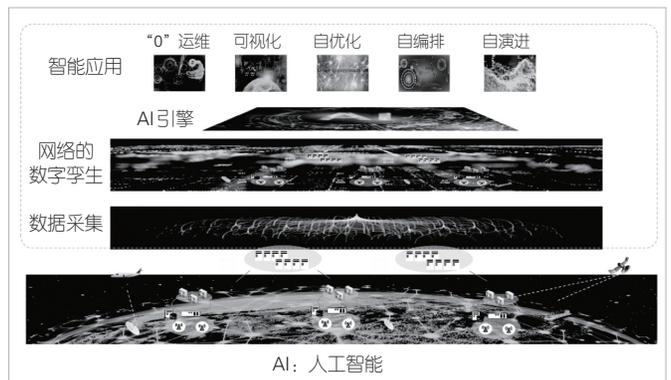
另外，面向企业（ToB）垂直行业领域的应用场景用例需求差异大，各种专网的设计部署和运维成本更高。6G会拓展新的服务和应用场景，这将导致更复杂的网络部署运维。云原生和信息技术（IT）虚拟化等技术的应用，又会进一步增加无线系统管理编排的复杂性。所以，6G将面临着“多元多维性、高复杂性、高动态性和高可靠性服务质量（QoS）保障”等方面的技术挑战，迫切需要一种具有“自发现、自服务、自优化、自治愈、自验证”等特征的系统综

合自治能力，而网络的数字孪生技术是实现这种网络自治能力的关键技术。

1 基于数字孪生网络的无线网络自治

1.1 数字孪生网络的概念

数字孪生技术为实现6G网络自治提供了新的思路与解决方案，即通过对网络本身进行数字孪生来构建孪生的数字化网络^[4]。如图2所示，数字孪生网络是一个由物理网络实体及其孪生的数字化网络构成的网络系统。在该网络系统中，物理网络与孪生的数字化网络之间能进行实时交互映射的。物理网元对应的孪生数字化网元可以通过各种数据采集和仿真模拟手段来构建，进而在数字域形成网元的数字孪生体和网络的数字孪生体。数字域通过丰富的历史数据和实时数据以及先进的算法、模型，生成感知和认知智能，持续地对物理网络的最优状态进行寻优和仿真验证，并提前下发对应的运维操作，自动校正物理网络，预测性地提前解决网元或者网络可能出现的故障，使通感预测性干预和维护达到“治未病”的运维效果；再通过采集校正后的数据来评估运维效果，形成闭环。通过这种数字域和物理域的闭环交互、认知智能，以及自动化运维操作，网络可快速地认识并适应



▲图2 基于数字孪生网络的网络自治

复杂多变的动态环境，基于数据和模型对物理网络进行高效的分析、诊断、仿真和控制，实现规划、建设、维护、优化和治愈等网络全生命周期的“自治”。

一方面，网络的数字孪生体作为物理网络设施的数字化镜像，与物理网络具有相同的网元、拓扑、数据，可实现网络和设备的全流程精细化“复制”，为网络运维优化操作和策略调整提供接近真实网络的数字化验证环境。因此，相比于传统仿真平台，基于网络的数字孪生体所训练的AI模型和预验证结果具备更高的可靠性。另一方面，数字孪生网络会记录和管理网络数字孪生体的行为，支持追溯和回放，因而能在不影响网络运营的情况下完成预验证，极大地降低试错成本。此外，数字孪生网络具备自主构建和扩展的能力，并能与AI技术结合。尚未部署到现网的新业务需求可被探测到并在孪生的数字化网络中验证效果，从而实现网络的自演进。

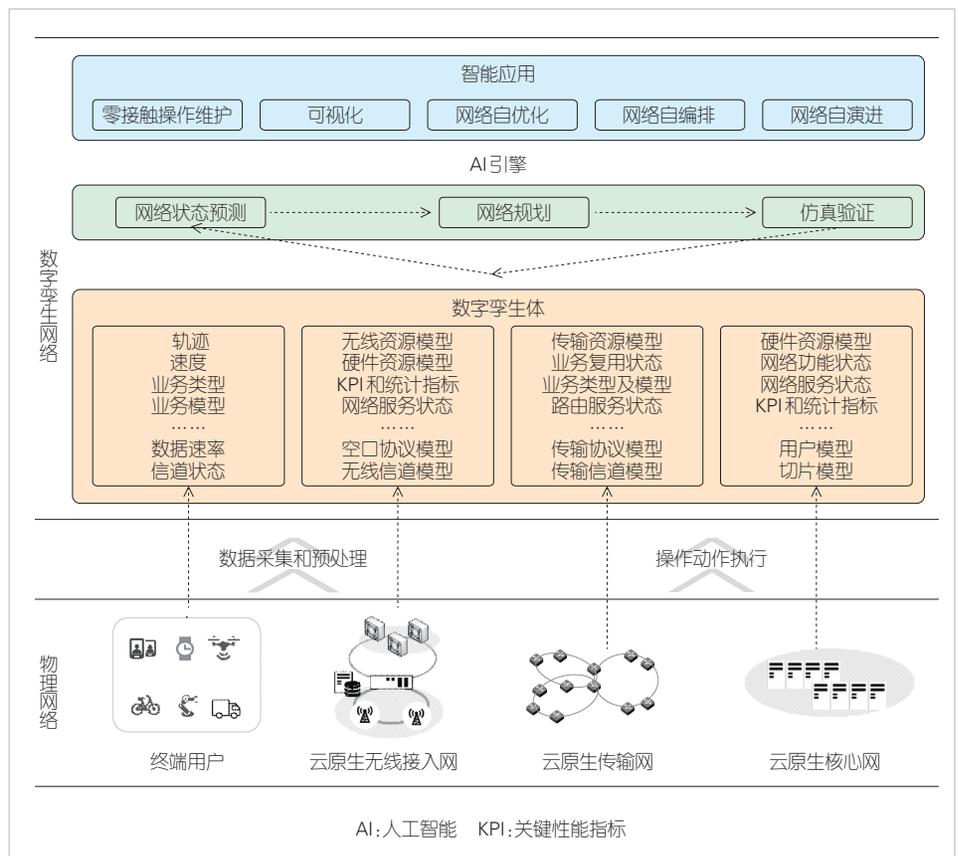
通过数字孪生，每个网络实体和用户服务都可以通过实时信息采集和建模实现数字化。数字化网络的模拟和仿真使得网络的实时状态监测、轨迹预测、故障和服务恶化的早期干预成为可能，实现高水平的网络自动化、“零接触维护”和“预测性维护”^[5]。这不仅可以提高网络的运行效率和服务效率，还可以提前验证网络新功能部署的效果，加快新功能的改进和优化，实现新功能的快速、自动引入，从而实现网络的演进。网络的数字孪生将在很大程度上帮助运营商实现网络的高度自治，有助于解决移动通信网络运维难的问题。

对于网络的数字孪生来说，从所有网络域获取数据至关重要^[1]。如图3所示，对各个网络实体和功能的数据进行处理和参数化建模，可以得到虚拟空间中整个网络的数字建模。用户的数字孪生可能包括用户轨迹、移动速度、流量类型、流量模型、数据速率和通道状态等数据。云原生无线接入网（RAN）的数据可能包括无线资源模型、硬件资源模型、无线协议模型、无线信道模型、网络服务状态以及关键性能指标（KPI）和统计指标数据。类似的建模过程和数字孪生也可以发生在传输网（TN）和核心网

（CN）中。AI引擎根据获得的数字孪生数据，利用AI算法预测网络状态。网络规划实体将不断寻找实体网络的最优状态，并通过仿真进行验证，然后在管理域执行相应的操作，将其映射到现实世界中的网络上。

任何网络资源对象都可以在数字域中生成相应的数字孪生体，包括底层的物理资源、网络功能以及上层的各种应用和服务。数字孪生体的产生依赖于各种数据采集、数据处理和存储以及数字孪生建模技术。为了实现资源对象的优化，数字孪生网络根据采集到的数据和信息，建立优化模型，生成未来时间点的数字规划体^[4]；然后，通过调用配置函数，为每个资源对象实现数据规划。上述数字孪生网络功能以及数字域与物理域之间的连接管理、同步优化等功能都是网络功能。数字孪生网络的数据包括数字孪生体、数字规划体和智能模型。数字孪生网络通过这些功能和数据，向上提供各种应用和服务，向下调用和优化各种资源对象。同时，数字孪生网络可以通过各种共享技术与第三方共享上述功能和数据。此外，它还可以通过各种安全技术防止攻击和篡改。

数字孪生网络是由物理网络及其孪生数字网络组成的网络系统，能够在网络间进行实时交互映射。数字孪生网络有望为网络运维提供一个接近真实的数字化验证环境，捕获网



▲图3 基于数字孪生的网络自治^[1]

络状态，控制网络行为，追溯、回放网络行为，并在不干扰真实网络的情况下对解决方案进行预验证，从而最大限度地降低试用成本。数字孪生网络架构将主要通过两种路径发展进行迭代，实现低成本试错寻优、新业务的需求探索与效果验证等多种功能。

1.2 面向6G高水平自治的数字孪生网络架构

6G网络高水平自治具有数据深度开放、数据价值密度提升、自治需求自生成和低成本试错寻优等4项关键技术需求，数字孪生网络也因此具有多种模型并存（数据类模型、仿真类模型和智能类模型，标准化和非标模型）、网络自治需求自生成和自解析、数字孪生模型动态按需构建与扩展、仿真场景自动设计与仿真 workflow 按需编排等4个技术特征。

6G数字孪生无线网络将呈现集中式与分布式相结合的架构。局部网元的数字孪生体及其功能可满足局部或单一网元的自治需求；无线网络的数字孪生平台存储了无线网络级数字孪生体及其功能，可满足广域或网络级自治需求。我们提出数字孪生网络中的资源对象具有“三体”和“五态”，并通过“双闭环”实现持续优化。“三体”即6G无线网络自治对象在数字孪生网络中的3个形态体：物理实体、数字孪生体和数字规划体。“五态”即网络设备从供货到退服的5种状态：起始态、规划态、服务态、孪生态和节能态，整体功能架构如图4所示。

数字孪生无线网络需要6G无线系统具备4项基本功能：基于上层意图和网络状态数据的分析，自动生成无线网络自治用例和“规建维优”的需求或用例；根据自治用例的需求选择模型类型，构建模型结构、编排和组合模型；结合实时数据采集和模型生成并更新数字孪生无线网络；基于无线网络自治目标和无线网络的数字孪生体，通过迭代优化算法和效果验证，生成数字域性能较优的数字规划体并实施到物理无线网络中。

数字孪生网络将与内生AI^[6]交互与融合，实现6G网络全生命周期的高水平自治。

1.3 数字孪生网络关键技术

为了实现数字孪生网络的基本

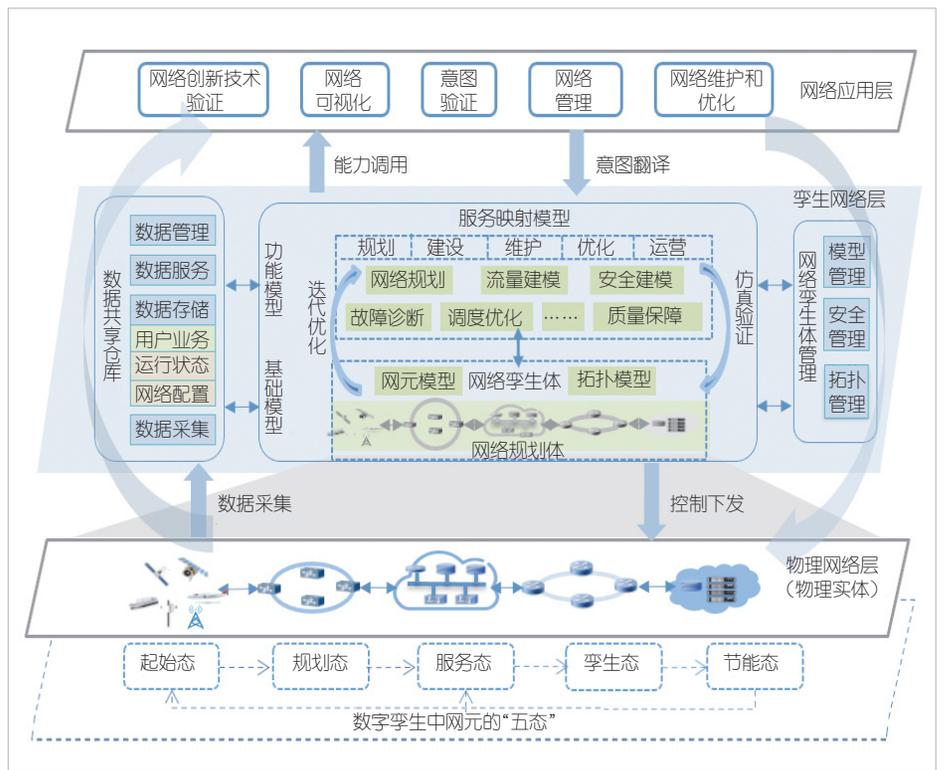
功能，我们需要研究相应的使能技术。数据采集与分析技术是数字孪生网络的基础，应满足物理域与数字域同步的性能要求。数字孪生仿真建模技术实现数字孪生体、数字规划体的构建，应具有按需定制、动态生成、灵活扩展的特征。数字孪生网络预验证场景优化技术进一步优化孪生的预验证环境，满足预验证场景的拟真需求。数字孪生网络性能优化技术实现数字孪生网络性能的长期监测控制与优化，提升数字孪生网络的准确性。

1) 数据采集与分析技术

数字孪生网络的构建离不开数据采集，为了保证数字孪生网络与真实网络的同步，数字孪生网络应依据网络自治场景的具体需求，精准感知海量异构数据，并根据网络的变化动态调整采集数据的规模，避免数据冗余。

同时，为了降低孪生网络从物理网络采集和传输数据的开销，解决传统真实数据获取难等问题，数字孪生网络可以按需生成部分特征数据，实现性能更好、更鲁棒的决策配置。

知识图谱通过对特征数据集的刻画，可以辅助数字孪生网络实现数据的按需采集与分析。AI大模型（如6GNet - GPT）具有强大的自然语言处理和智能分析能力以及模型生成能力，或可用于数据分析与生成。



▲图4 数字孪生网络架构

2) 数字孪生仿真建模技术

数字孪生仿真建模技术需根据物理网络的数字化镜像构建、编排和调整数字孪生体和数字规划体模型。为了减少资源开销,需要识别不同自治场景和网络状态下的高价值数据和模型,对孪生体和规划体模型进行在线选择、构建、编排与扩展,进而在不影响网络运营的情况下完成预验证,降低网络运维操作及AI决策可能导致网络性能恶化的潜在风险。

数字孪生体需跟踪真实网络的状态变化,结合实时数据采集进行更新。基于网络自治目标和网络的数字孪生体,数字规划体通过迭代优化算法和效果验证进行优化,并根据自治用例的实时性进行调整。

数据与知识协同是一种智能算法设计范式,可用于数字孪生仿真建模,从而增强预验证功能,提高评价精度。

3) 数字孪生网络预验证场景优化技术

数字孪生网络的预验证场景直接影响了数字孪生网络的预验证功能和性能,因此需要根据真实网络进行实时调整,并对真实数据进行数据增广,模拟更全面的虚拟场景,优化虚拟场景精准度,减少不必要的数据样本采集量。

4) 数字孪生网络性能优化技术

数字孪生网络在长期运行中,可能出现采集数据传输错误、孪生环境与真实环境出现差异等情况,这些会使得数字孪生网络生成的决策与期望决策差异较大,甚至会对真实网络产生不利影响。这些差异可能由数字孪生网络的各个环节产生。数字孪生网络性能优化技术能够对数字孪生网络的各个模块性能或整体性能(预验证结果)进行优化,提升数字孪生网络的准确性。

2 基于数字孪生网络的无线网络自治的用例

未来无线通信系统将具备众多新业务服务和应用能力(如AIaaS等AI能力),提供更高效、性能更优的新服务,网络通信的模式、承载的业务类型、网络所服务的对象、连接到网络的设备类型等将呈现出更加多样化发展的态势。数字孪生网络有望实现针对各种潜在的新能力与新服务,高效地进行功能性能的虚拟化预验证,降低现网验证的风险和成本。

2.1 应用场景

我们将通过网络优化案例来阐述数字孪生网络在真实应用场景下的潜在应用和可能带来的性能优势。

1) 大规模天线波束权值优化

基于数字孪生网络的大规模天线波束权值优化方案包含数据增强模块、数字孪生预评估模块和数字规划生成模块

(即权重优化模块),能根据信道信息、用户位置信息等生成权值的预验证环境,以专家经验权值为基线,动态调整大规模多输入多输出(MIMO)天线的权值,使多小区大规模MIMO的网络覆盖性能实现最大化。

2) 智能RAN切片

数字孪生网络能够通过对切片数据样本的增广、对未来网络状态的预测,不断更新切片配置方案,辅助实现低复杂度、高性能、高环境适应性的智能RAN切片,实现高效可靠的切片资源管理。

3) 扩展现实(XR)性能保证与优化

XR打通了虚拟场景与真实场景的界限,实现了沉浸化的业务体验,具有超低时延、超高带宽、高智能的特点。数字孪生网络能通过预验证场景构建、数据按需动态采集与生成,对图像、视频、增强现实(AR)等场景数据的并行大流量需求进行保障。

4) 车联网的智能协作

车联网的传统中心云计算存在大数据传输、数据处理的及时性,以及安全和能耗等方面的问题。数字孪生网络可从车联网平台中获得海量传感数据以获得全局视角,支持边缘智能协作方案,提升车联网的系统协同感知、自主决策和泛在服务能力,从而在车联网场景的整个生命周期内实现数字世界和物理系统的协调。

2.2 数字孪生网络的难点与挑战

作为基于规模庞大的通信网络构建的复杂系统,数字孪生网络在数据、模型和架构方面都存在多项需要攻克的技术难题:

1) 在数据方面,数据隐私保护、异厂商数据的兼容性,以及如何针对不同网络自治场景设计数字孪生体和规划体模型并保证数据质量,这些都是需要思考的问题。

2) 在模型方面,不同类型的模型如何互通互联,如何利用多种模型对数字孪生体精准度进行校正,仍需进一步研究。

3) 在架构方面,如何实现按需定制、动态生成的数字孪生体和规划体,如何根据局部/网元的数字孪生体构建全局/网络的数字孪生体,以及如何实现预验证意图的自解析和流程的自编排,以满足不同网络自治场景的性能需求(如实时性、精准度等)需要业界一同探索。

除此之外,面向6G的无线网络自治的数字孪生网络还有如下值得深入探索的关键技术问题:

1) 如何构建全网通用的智能数字孪生体,提高孪生网络的泛化能力和迁移能力?

2) 如何可控地生成虚拟网络场景, 提高数字孪生网络增广数据和预验证结果的可靠性?

3) 如何提高真实无线网络数据的使用效率, 降低数字孪生网络的建模成本?

3 结束语

规模日益庞大的移动通信网络面临越来越复杂的网络运营维护, 这导致运营商的OPEX日益攀升。5G网络引入网络的智能化, 试图解决这一问题, 但由于整个网络架构在设计之初就未考虑智能化所需的数据采集, 因此只能通过测量报告、深度数据包检测(DPI)等形式获得所需的数据。另外, 不同网元的设备供应商之间的数据共享存在瓶颈, 现有的网络智能化难以达到预期的效果。6G网络需要在架构设计之初就以内生的形式引入数字孪生, 能够支持高效的数据获取及不同应用场景的支持能力, 从而实现高度的网络自治。

参考文献

- [1] LIU G Y, LI N, DENG J, et al. The SOLIDS 6G mobile network architecture: driving forces, features, and functional topology [J]. Engineering, 2022, 8: 42-59. DOI: 10.1016/j.eng.2021.07.013
- [2] 中国移动. 中国移动自动驾驶网络白皮书 [R]. 2021
- [3] ITU-T. Grading method for intelligent capability of mobile networks: ML5G-1-151 [S]. 2018
- [4] 中国移动研究院. 基于数字孪生网络的无线网络自治白皮书 [R]. 2022
- [5] 中国移动研究院. 6G至简无线接入网白皮书 [R]. 2022
- [6] 中国移动研究院. 6G内生AI架构与技术白皮书 [R]. 2022

作者简介



刘光毅, 中国移动通信集团有限公司首席专家, 教授级高工; 主要研究方向为5G/6G端到端关键技术研究、标准化、原型验证与产业化等。



邓娟, 中国移动通信集团有限公司研究院高级研究员; 主要研究方向为6G内生AI网络架构及关键技术、6G数字孪生网络架构及关键技术等。



郑青碧, 中国移动通信集团有限公司研究院研究员; 主要研究方向为6G数字孪生网络自治领域的前沿技术。