

Review

爱立信
技术评论



网络数字孪生
- 展望与机遇



ERICSSON

网络数字孪生

- 展望与机遇

根据个别用例需求定制的数字孪生在电信过程中具有重要潜力，可创造价值，涵盖从研发到部署、管理和现场工程等网络运营的各个环节。

PETER ÖHLÉN, CIARAN
JOHNSTON, HÅKAN
OLOFSSON, STEPHEN
TERRILL, FEDOR
CHERNOGOROV

数字孪生是一个数字表示的现实世界对象，在指定的时间周期和保真度下保持同步。最初的概念几十年前出现，基于首次在科幻作品和阿波罗计划中出现的思想[1]。

如今，在航空航天、汽车、能源和制造等行业中使用的数字孪生已经按照特定目的创建，通过在虚拟环境中复制现实的相关方面，以改进流程、产品和业务结果。它们通过将数据和知识与各种分析和可视化工具结合，增加价值，并定期同步，保持真实世界与虚拟世界的同步。

近年来，人们对在更广泛范围应用数字孪生概念产生了越来越多的兴趣。在移动网络的情况下，数字孪生可以应用于通信服务提供商和供应商自身组织的广泛用例，从而增强现有功能并引入全新的功能。

数字孪生的特征

对数字孪生的高度关注以及其多样的适用性导致了许多对这一术语的定义[1]。在爱立信，我们采用了数字孪生协会（Digital Twin Consortium）对移动网络的定义[2]。该定义将数字孪生视为虚拟表示真实世界网络实体和过程的对象，以及它们的环境和用户，在指定的周期和准确性下保持同步，并为特定目的提供附加价值。

数字孪生基于获取准确、相关和及时的数据，并利用先进的分析、模拟和可视化工具。与数字孪生的交互会导致相关的知识库的创建，涉及到数字孪生及其真实世界对应物的知识。无论实现方式如何，数字孪生都具有一些基本特征。首先，需要一个合适的结构来以适当的细节级别表示真实世界的状态和知识，范围从低级硬件到服务和网络的聚合特性。

其次，真实世界和数字孪生之间必须保持连续的同步，并且两者必须同时演化。根据不同的情况，时间尺度可以从毫秒到数天甚至更长。在大多数用例中，从真实世界资产到数字孪生的主要数据流是测量和事件数据，这些数据用于表征性能和行为。通过适当的控制机制，也可以将配置和控制操作反馈到真实世界。

移动网络中数字孪生的用例概述

网络数字孪生（NDTs）在各种不同范围的应用例中有潜力创造价值。对NDTs进行分类的一种好方法是确定孪生的真实世界目标、适用的过程以及其目的。考虑的过程可以多样，包括从研发到网络控制，再到部署和站点工程等网络运营过程。

在某些情况下，真实世界的NDT目标可以是物理环境，例如一个蜂窝站点[3]，准确地对站点结构、电缆和设备进行建模。这使得运营商可以全面了解站点情况，可以用于模拟推出和设计过程，并支持故障排除和站点升级过程。

“有许多不同范围的应用案例，网络数字孪生（NDTs）在这些案例中有潜力创造价值。”

NDTs还可以在地理环境中代表多个蜂窝站点，基于测量和基于物理的模拟创建无线电传播模型。在网络运营[4]中优化传输功率水平是一个很好的例子。类似的方法也可以应用于其他关键性能指标（KPI），如城市区域、工厂站点、工作环境或其组合的覆盖范围和吞吐量。

NDT目标还可以是逻辑网络——单个节点、网络域或端到端（E2E）网络，具体取决于目标用例。在这里，可以使用NDT来观察和实验网络配置，以改进网络运营。全面的NDT实现通常将包含逻辑网络和物理环境的各个方面。

NDTs在模拟网络扩展过程中可以极大地帮助选择站点位置，并模拟新技术、新设备和无线频率（RF）扩展的影响，同时还有助于预测即将出现的容量瓶颈，从而为网络增长提供预防性建议。

术语和缩略语

AGV	自动驾驶车	KPI	关键绩效指标	OSS	运营支持系统
AI	人工智能	LA	链路自适应	RAN	无线接入网
BSS	业务支持系统	MCS	调制与编码方案	RF	射频
CSI	信道状态信息	MIMO	多输入多输出	RRM	射频资源管理
E2E	端到端	NDT	网络数字孪生	SINR	信号干扰噪声比
GPU	图形处理单元	NR	新无线电	URLLC	高可靠低时延通信

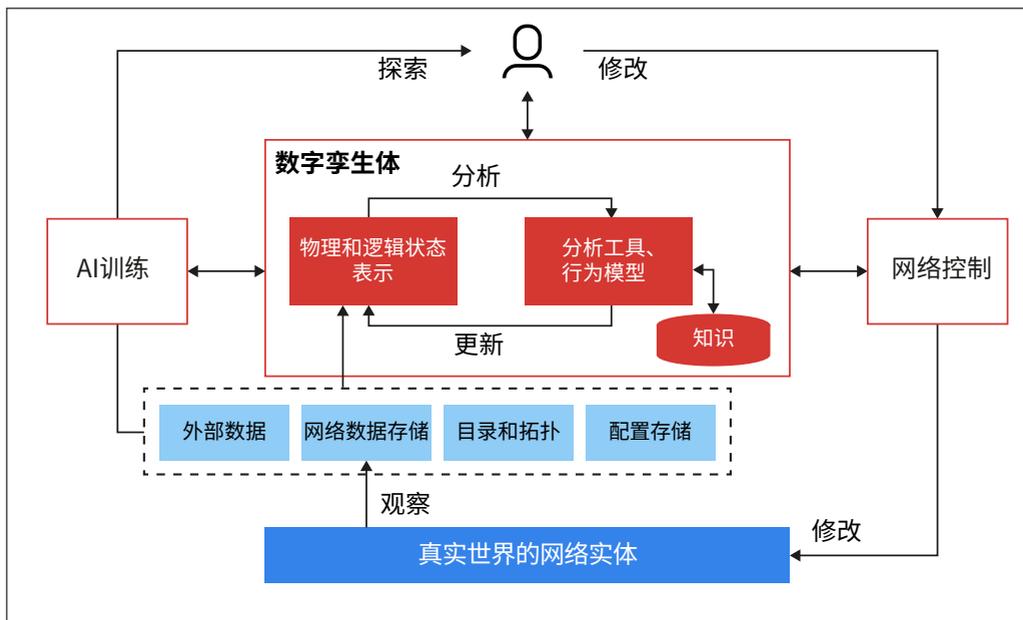


图1 网络数字孪生的主要元素和环境

NDTs增加价值的另一种方式是预测操作者行为（无论是人为操作还是自主系统[5]），这些行为可能产生不利的副作用。通过使用NDT，可以在实施之前对可能的行动进行评估。同样，新的机器学习算法可以在孪生环境中进行安全的训练和验证，仅在达到满意性能水平后才引入真实网络。

E2E网络的孪生可以通过分析消费者服务的变化增加价值。这种类型的NDT可以在部署前评估新的网络切片的成本和性能，以及对现有服务的影响。根据这个分析，工作负载的位置和网络配置可以进一步优化以满足所需的特性。

还有一种类型的NDT可以通过评估各种“假设”场景，如设备故障、安全攻击或电源中断，来确定应急计划和网络改进措施。

NDTs还可以满足对流量和用户行为进行表示的需求。在这些情况下，NDT需要根据其用途进行调整，从汇总或详细的流量特性和应用流程，到与订阅提供和计划相关的行为。通过使用足够准确的匿名化技术，可以实现这些类型的孪生，并且同时尊重隐私和保护个人数据。

除了在公共网络中带来诸多益处外，网络数字孪生（NDTs）在工业连接用例中也有巨大的增值潜力。为了在工业4.0环境中实现移动网络的整合，5G联合工业和自动化联盟（5G ACIA）定义了5G网络资产管理壳（5G Network Asset Administration Shell）[6]，它将数字孪生扩展到工厂管理，包括了对工业5G的表示。

网络数字孪生的实现

在理想情况下，NDT将是其现实世界实体的完美复制。但在现实中，通常需要基于领域知识的一定程度的简化才能使其可行。在NDT的核心是描述现实世界相关方面的数据和知识，辅以从捕获的数据中生成洞察力的工具，如图1所示。

NDT中表示了多个现实世界实体。为了捕获它们的状态和关系，NDT从多个来源聚集数据，包括库存、配置设置和在网络不同层级进行的测量。根据目的，可能需要来自外部源（例如地理空间映射信息）的附加数据来构建完整的图像。

网络的库存和配置可以通过运营支持系统（OSS）访问，该系统可以将网络应用拓扑与虚拟化、硬件和传输系统提供的拓扑和连接性进行关联。

关于网络测量的大量数据和不断流动使得数据管理系统[7]至关重要。以文件、流或离散事件等不同形式的数据都被收集并作为共享可重复使用的数据资产提供给不同的消费者。随着新数据的可用性，数字孪生会更新其模型。

为了在孪生环境中进行分析并提取所需的知识，需要应用适当的工具或模型，以完成手头的任务，并满足给定用例的响应时间和准确性等要求。分析可以基于计算、模拟或人工智能（AI）算法。通常，这涉及根据当前状态预测系统行为。

模拟器的角色

我们认为模拟器是数字孪生分析工具箱的一部分，用于知识提取。常规模拟器与数字孪生之间的一个关键区别在于后者与现实世界实体定期进行同步。

可以进行高度详细的模拟。然而，在模拟场景的规模、评估时间和所需计算能力之间存在权衡。较小的场景可以快速进行模拟，而较大的场景需要更长的执行时间。在许多用例中，快速响应时间很重要，这导致需要简化模型，重点关注最相关的方面，或将场景大小限制为网络的子集。

新的模拟模型和计算硬件的演进不断扩展着可能性的边界，实现了更高级和更真实的模拟。更复杂的模型要求以比目前更详细的方式捕获数据。通常，数据和建模的选择需要进行迭代定义，即通过不断改进模型和更新数据选择，直达到准确性、评估时间和成本之间的令人满意的平衡。人工智能模型在其中发挥着重要作用，无论是用于预测、数据生成还是基于观察行为创建黑盒模型，进一步推动了对用于训练和优化的数据可用性的需求。

将数字孪生整合到网络运营流程中需要进行一些考虑，无论是调用数字孪生还是利用所得到的洞察力。对于以人为中心的用例，可视化是孪生的重要组成部分，而其他用例则需要应用程序

编程接口将孪生集成到自动化流程中。根据数字孪生的用途，它可能位于运营支持系统、业务支持系统（BSS）、网络功能甚至供应商的研发领域。

●● 对网络和其用户进行模拟是研究和开发新无线接入网（RAN）功能的关键方法。●●

两个有前景的使用案例

具有潜在显著价值的众多NDT使用案例中，两个重要的案例是能够进行网络性能评估以及在工厂环境中处理无线资源管理（RRM）。

使用案例 # 1: 网络性能评估

对网络和其用户进行模拟是研究和开发新无线接入网（RAN）功能的关键方法，用于评估不同RAN产品和部署策略的网络性能，并探索“下一代”（the next G）的创新点。爱立信和广泛的电信行业都有丰富的无线网络模拟模型历史——从3GPP（第三代合作伙伴计划）模型和常用的RAN部署规划工具到更精细的专有射频传播模型。它们都捕获了射频传输的深层物理属性并提供预测准确性。

从今天的无线网络模拟器到利用几十年投资在3D游戏和计算机生成图像技术的NDTs的演变预计将带来显著的好处。新功能和功能将包括：

- 高分辨率和复杂的城市或室内几何结构（桥梁、隧道、植被、室内和室外等）
- 影响射频传播的详细表面材料，例如工厂地方的金属涂层和金属特征
- 表示用户移动性和动态场景特征，例如汽车交通
- 能够通过视觉探索复杂模型
- 内部和外部协作和数据共享
- 物理准确模型的极高计算复杂性

当将3D游戏技术应用于开发5G无线网络的相关模型时，结果是游戏技术和无线技术的有吸引力的结合，例如利用图形处理单元（GPU）硬件来建模射频传播[8]。游戏处理极其详细和复杂的场景几何结构，应用细粒度纹理，并拥有高度发展的“角色”人工智能，提供场景动态，这对于表示网络是具有吸引力的。

技术进步在多个方面提高了我们的能力：可视化、集成、格式标准化、协作和建模准确性。这些共同使我们能够在数字孪生中准确地模拟无线网络。

为了说明结合这些能力的强大之处，图2展示了一个网络模拟研究的示例，我们从现实世界收集数据，导入并使用它来创建一组模拟模型。左侧的现实世界部分显示一辆连接到爱立信蜂窝网络的汽车行驶在斯德哥尔摩的街道上。在图的右侧，数字孪生动态地展示了由此产生的大规模多输入多输出（MIMO）天线和信号传播路径，从而使其可以进行分析。



图2 真实世界城市环境示例（左），在数字孪生模拟器中准确建模（右）

在图2所示的模拟中使用的数据包括城市环境的详细信息，包括建筑材料、屋顶形状和窗户。网络部署包括网络设备部署信息以及用户的移动模式。这与传播的详细射线追踪模型和3GPP规定的射频和5G New Radio (NR) 层1-3模型相结合，创建了整个系统的NDT表示，使得在这个“真实”环境中进行5G NR系统的极其准确的网络模拟成为可能。

从这种类型的详细评估中获益的RAN功能的一个例子是大规模MIMO干扰感知。使用NDT，我们可以确定干扰对基站波束成形行为的影响。除了从普通网络模拟器中提取非常准确的统计性能测量外，NDT还能够提供如此高级别的细节，

以至于可以展示朝向单个用户的具体波束模式，如图2的右侧所示。类似地，当将NDT应用于干扰感知时，它可以展示无线网络如何避免将功率定向到其干扰范围内的用户，从而降低干扰水平并提高性能。

使用案例 #2: 工厂中的无线资源管理

NDT在工厂部署中能够提供利益的一个重要方式是通过RAN系统中的NDT与具有提供有关静止和移动工厂对象信息能力的工厂数字孪生之间的合作来增强工业蜂窝网络的性能。NDT使用来自工厂数字孪生的信息，以实现更好的5G基站调度器中的链路自适应 (LA) 决策。



图3 包含5G联网固定机械臂和移动AGV的工厂车间示意图

我们使用了一个动态的系统级模拟器来准确地建模图3所示的工厂场景。固定连接的机器臂根据其连接的小区进行着色，并定期向高6米处的5G基站发送数据包，而携带2m x 4m集装箱的金属灰色自动引导车（AGV）在生产车间地板上移动。我们在毫米波频率下评估了工厂网络的性能，其中射频波传播的阻塞影响尤为严重。

传统的LA方法使用基于测量历史的信号干扰噪声比（SINR）信息，以通道状态信息（CSI）报告的形式提供。在基于数字孪生的LA中，SINR信息是通过一个NDT收集的，该NDT预测受到阻挡物位置影响的路径损耗，并执行小小区间干扰协调。

NDT通过从AGV控制器或类似实体接收有关主要障碍物位置的准确数据来实现前者。为了实现后者，NDT控制5G调度器在每个小区中进行的时频资源分配。这两个能力使NDT能够进行比传统LA更优化的调制和编码方案（MCS）选择，超越众所周知的基于小小区间干扰协调的调度性能。

图4中的表格展示了对两种LA算法进行评估的结果，其中包括中位数谱效率、两个不同延迟百分位数和数据包传输的可靠性。虽然CSI测量报告存在一定数量的NR时隙的延迟，但传统的LA算法表现还不错，某种程度上捕获了干扰和路径损耗的变化。我们的结果显示，传统LA的

链路自适应算法	中值频谱效率	时延第90个百分位数	时延第99个百分位数	Reliability % (1-packet error rate)
常规LA	0.3 bits/s/Hz	0.5 ms	20.66 ms	99.89%
基于数字孪生的LA	4.2 bits/s/Hz	0.125 ms	0.125 ms	99.99%

图4 传统和基于数字孪生的链路自适应算法性能比较

可靠性和延迟对于大多数非URLLC（超高可靠性低时延通信）工业应用来说是足够的，但对于需要至少99.99%可靠性和低于1ms延迟的URLLC服务来说则不够。

基于数字孪生的LA算法的性能比传统LA算法显着更好，因此更适合工业URLLC服务。这是因为基于数字孪生的LA算法可以更准确地预测SINR，从而实现更高的谱效率、更低的延迟和两个数量级更高的可靠性。这种性能改进对于依赖可靠连接的工业应用至关重要，表明数字孪生有可能显著改进工业5G网络中的RRM等功能。

总之，我们评估结果显示，基于数字孪生的算法从工厂数字孪生和NDT之间的集成中获得了显著的性能提升

标准与行业一致性

在标准组织如IETF（互联网工程任务组）[9]等方面，已经开始努力定义NDT框架。由于潜在的NDT用例多样，我们认为标准在于提供术语上的一致性，以及定义高层次的架构框架，而

不具体到抑制创新的程度。不同类型的NDT都有其自己的数据和特性需求，以及不同的起始点。为了支持创新，需要高度的灵活性，无论是在演进现有功能方面，还是引入全新的功能。

结论

网络数字孪生（NDTs）有潜力在移动网络中提供巨大的益处，支持从研发到规划、部署和运营等领域的用例。我们预见，在不远的将来会出现许多类型的NDT，每种类型都专为其所支持的过程而设计。其中一些将作为现有功能的演进出现，而其他一些将成为提供新功能的新创作。根据其目的，NDTs可能位于通信服务提供商和/或其供应商之中。

为确保NDT解决方案产生最大的影响，我们认为明智的做法是首先确定重用现有功能的机会，如管理功能和模拟与分析工具，同时确保其他必要的支持因素，如获得所需数据的访问权限。随着数字孪生的普及，NDT可能会与彼此以及工业数字孪生相结合，创建越来越复杂的数字表示形式，从而提供越来越强大的功能。

延伸阅读

- 爱立信，爱立信在NVIDIA Omniverse中模拟的5G数字孪生（视频），网址：
<https://www.youtube.com/watch?v=yTbUSXJ8M-8&t=35s>
- 爱立信博客，推动5G之旅加速的下一代仿真技术，网址：
<https://www.ericsson.com/en/blog/2021/4/5g-simulation-omniverse-platform>
- 爱立信博客，使用数字孪生控制您的网络资产，网址：
<https://www.ericsson.com/en/blog/2022/5/using-digital-twins-to-be-in-control-of-your-network-assets>
- 爱立信博客，数字孪生：概念介绍及其对未来网络的影响，网址：
<https://www.ericsson.com/en/blog/2022/3/what-are-digital-twins-three-real-world-examples>
- 爱立信博客，数字孪生的未来：对移动网络有何意义，网址：
<https://www.ericsson.com/en/blog/2021/7/future-digital-twins-in-mobile-networks>
- 爱立信博客 - 网络基站的智能部署和维护，网址：
<https://www.ericsson.com/en/network-services/deployment/intelligent-site-engineering>
- 未来技术：数字孪生——连接物理世界和虚拟世界，网址：
<https://www.ericsson.com/en/about-us/new-world-of-possibilities/imagine-possible-perspectives/digital-twins>

参考文献

1. IEEE Access, 第7卷, 页码167653-167671, 关于数字孪生的调查：定义、特征、应用和设计启示, 2019年, Barricelli, B.R.; Casiraghi, E; and Fogli, D, 网址: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8901113>
2. 数字孪生联盟, 数字孪生联盟定义数字孪生, 2020年12月3日, Olcott, S; Mullen, C, 网址: <https://blog.digitaltwinconsortium.org/2020/12/digital-twin-consortium-defines-digital-twin.html>
3. 爱立信博客, 使用数字孪生控制您的网络资产, 2022年5月3日, Kirac, E; Björkander, P; Garnett, N, 网址: <https://www.ericsson.com/en/blog/2022/5/using-digital-twins-to-be-in-control-of-your-network-assets>
4. 爱立信博客, 数字孪生：概念介绍及其对未来网络的影响, 2022年3月31日, Muñiz, C, 网址: <https://www.ericsson.com/en/blog/2022/3/what-are-digital-twins-three-real-world-examples/>
5. 爱立信技术评论, 利用基于意图的闭环创建自主网络, 2022年4月19日, Niemöller, J; Szabó, R; Zahemszky, A;
6. Roeland, D, 网址: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/creating-autonomous-networks-with-intent-based-closed-loops>
7. 5G-ACIA白皮书, 利用数字孪生将5G集成到生产网络, 2021年2月, 网址: <https://5g-acia.org/whitepapers/using-digital-twins-to-integrate-5g-into-production-networks/>
8. 爱立信技术评论, 电信应用的数据摄取架构, 2021年3月16日, Rönnberg, A-K; Åström, B; Gecer, B, 网址: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/data-ingestion-architecture-for-telecom>
9. 下一代仿真技术加速5G征程 <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/4/5g-simulation-omniverse-platform>
IETF Datatracker, 数字孪生网络：概念和参考架构（正在进行的工作/互联网草稿），Zhou, C等人, 网址: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-irtf-nmrg-network-digital-twin-arch/>



Peter Öhlén

◆是一位首席研究员，其工作重点是服务和网络自动化。他于2005年加入爱立信，拥有超过25年的固定和无线网络、网络管理和云系统方面的经验。他目前的重点是基于数据、人工智能和灵活的端到端架构实现认知网络愿景。Öhlén拥有瑞典斯德哥尔摩皇家理工学院（KTH Royal Institute of Technology）光子学的博士学位。



Ciaran Johnston

◆是运营支持系统（OSS）和可编程网络架构方面的高级专家，也是爱立信OSS产品组合的首席架构师。他于2000年加入爱立信，在OSS领域拥有超过20年的软件开发和架构经验。

Johnston在英国曼彻斯特科技大学获得了纯粹与应用物理学学士学位。



Håkan Olofsson

◆在移动行业工作了28年，专注于无线接入网络（RAN）。自1994年加入爱立信以来，Olofsson在不同岗位上服务，主要涉及战略技术发展和从

2G发展到5G的演进。他目前担任开发单位网络的系统概念项目负责人，专注于为5G和6G提供创新的用例和RAN解决方案。Olofsson在瑞典乌普萨拉大学获得了物理学工程硕士学位。



Fedor Chernogorov

◆是一位资深研究员，于2018年加入爱立信。他在无线通信和仿真工具的应用研究方面拥有12年的经验。Chernogorov目前领导一个专注于面向企业、工业和社会数字化的端到端蜂窝网络解决方案的研究项目。他的科研兴趣主要集中在面向工业用途的蜂窝网络、超高可靠低延迟通信和数字孪生技术。Chernogorov在芬兰于韦斯屈莱大学获得了数学信息技术博士学位。

Stephen Terrill

◆是爱立信自动化和管理方面的高级专家和首席架构师。自1994年加入公司以来，他主要从事电信架构、实施和行业合作。近年来，他的工作重点在OSS的自动化和演进方面。Terrill在澳大利亚墨尔本大学获得了工程硕士学位。



ISSN 0014-0171
284 23- 3358 | Uen

© Ericsson AB 2021
Ericsson
SE-164 83 Stockholm, Sweden
Phone: +46 10 719 0000