



5G 承载网数字孪生典型场景与应用方案探索

王郁¹, 崔潇¹, 朱剑², 周晓慧³, 李芳¹

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100091;

2. 华为技术有限公司, 湖北 武汉 430205;

3. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518112)

摘要: 近年来, 数字孪生技术在承载网智能化管控领域的应用成为一个新的热点和研究方向。国内外各研究机构纷纷开展相关应用场景的探索、标准化研究等工作, 产业生态正逐步形成。基于当前的信息通信领域数字孪生技术研究, 分析了 5G 承载网管控面临的新挑战, 探索了数字孪生技术在 5G 承载网的应用场景和需求。基于这些典型应用场景, 提出了数字孪生应用服务方案设计, 以及仿真器和模拟器组件的功能和数据描述。最后列举了 5G 网络切片资源划分和变更仿真功能的应用案例。

关键词: 数字孪生; 5G 承载; 模型; 典型场景; 仿真; 组件

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024165

Exploration of typical scenarios and application schemes of digital twin in 5G bearer network

WANG Yu¹, CUI Xiao¹, ZHU Jian², ZHOU Xiaohui, LI Fang¹

1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100091, China

2. Huawei Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China

3. ZTE Corporation, Shenzhen 518112, China

Abstract: In recent years, the application of digital twin technology in the field of intelligent management and control of bearer networks has become a new hotspot and research direction. Various research institutions both domestically and internationally are exploring relevant application scenarios and conducting standardization research. Based on the current research on digital twin technology in the field of information and communication, the new challenges faced by the management and control of 5G bearer networks were analyzed, and the application scenarios and requirements of digital twin technology in 5G bearer networks were explored. Based on these typical application scenarios, the design of digital twin application service scheme and the function and data description of emulator components were proposed. Finally, an application case of 5G network slicing resource allocation and change simulation function was described.

Key words: digital twin, 5G bearer, model, typical scenario, simulation, component

0 引言

数字孪生的概念早在2013年就被提出,陆续在智能制造、智能交通、智慧城市等领域引起广泛关注,并实现创新应用。根据Gartner预测^[1]:到2027年,全球超过40%的大型企业机构将在基于元宇宙的项目中使用Web3、增强现实(AR)云和数字孪生的组合来增加收入。未来几年数字孪生技术在全球的应用规模将呈现高速增长趋势,体现数字孪生技术在各领域的应用前景和重要价值。由于数字孪生技术在生命全周期管控方面所具备的特殊优势,被通信领域挖掘出其用于网络管控的潜在能力。目前网络数字孪生的产业发展和标准化工作还处于起步阶段。2019年,工业和信息化部推动成立IMT-2030(6G)推进组,将“万物智联、数字孪生”作为6G网络愿景,将数字孪生作为6G的关键技术之一。

5G承载网管控体系正向着智能化管理、控制和分析能力发展,数字孪生技术将成为未来承载网智能化管控的有力补充,增强在现网无法实施的管控活动或操作。同时,在同步的虚拟空间提供一种高效可靠的验证手段,有效节省试验验证周期和成本。随着5G承载网自智能能力向L5等级演进,需要引入数字孪生技术,用仿真分析决策反向控制物理网络,以实现网络的动态自调整能力。

1 5G承载网管控面临的新挑战

随着5G承载网在规划、优化、运营、维护以及特殊场景下的智能化管控能力需求日渐凸显,高效管控海量设备和复杂跨域网络业务成为5G承载网络管控技术所面临的新挑战,主要包括以下几个方面。

(1) 网络规模快速扩张,带来大规模网络管控新挑战。

随着新基建的不断推进,运营商网络为满足5G网络发展建设需求,不断扩大网络规模和容

量。新建网络,或对原有网络进行扩容,带来被管理网络设备数量繁多、网络和业务规划复杂等难点。如何在新建或扩容网络上保障业务性能要求是大规模网络运营面临的挑战。

(2) 难以预测的复杂运维场景,带来网络实时模拟仿真新挑战。

由于传统网管仅具备对现网设备和网络下发指令进行管控操作的功能,只能通过人工计算并判断的方式对网络的一些特殊调整或运维操作进行预测。而在引入新型设备、大规模网络故障等特殊场景下,传统网管缺乏准确可靠的模拟仿真手段,无法对网络的运维方案进行准确的评估、验证和决策。如何利用新技术弥补传统网管功能的不足,实现网络实时仿真及模拟功能成为一个重要挑战。

(3) 网络自智能化等级要求的不断提升,带来自智管控新挑战。

传统网络的全生命周期管理^[2]——规划、建设、维护、优化、运营是根据网络及设备状态进行被动的运维管理,系统优化通常收到网络告警或投诉单再进行被动响应。随着自智能化等级水平不断提高,需要进一步对用户需求进行感知、分析、预测并利用人工智能技术匹配网络灵活运维的新需求。自智能化要求越来越高,成为运营商和厂商面临的新挑战。

面对以上网络运营管控的新挑战,按需引入面向5G承载的数字孪生技术,能够在不影响现网业务的前提下,在网络新建或扩容之前预测网络业务的性能,实现网络运维过程中针对影响业务的操作进行精确仿真和模拟,弥补传统管控方式的不足,成为未来达到更高网络自智等级水平的新引擎。

2 面向5G承载的数字孪生应用

2.1 与原有管控系统之间的关系

基于数字孪生模型构建理论^[3-5]和网络数字



孪生架构^[6-13], 5G承载网数字孪生与原有管控系统将共同构建新一代智能化传送网管控体系^[14-15], 具有管理、控制、分析、仿真、模拟等管控能力。随着自智水平达到L4级别, 为增强智能化分析决策能力, 管控系统自身会采用人工智能 (artificial intelligence, AI)、大数据等新技术^[16-18], 以实现健康度评估、网络业务性能预测、故障溯源、业务路由预计算等分析能力。因此, 未来数字孪生技术的引入需要考虑现有承载网管控系统的管理、控制、分析能力, 明确现有管控系统与数字孪生体之间的能力边界, 充分利用管控系统已具备的自智能力, 尽量规避能力上的重叠, 充分发挥数字孪生的应用价值。

5G承载网数字孪生技术的最大应用价值聚焦在实时仿真、模拟能力上, 扩展并支撑管控系统, 执行现网无法预实施的管控操作或活动, 如新技术验证、故障模拟、业务割接等。通过数字孪生技术的引入, 预先评估实施效果, 以获得最优解和实施方案。因此, 数字孪生技术的应用将有效增强现有承载网管控体系的智能化水平, 成为各层管控手段的有力补充。

2.2 应用需求将直接引导技术架构和方案设计

与传统技术架构的设计有所不同, 5G承载网数字孪生体系架构的设计与应用需求和典型场景密切相关。数字孪生模型、数据和服务等核心要素具有基于场景的方案设计和实例化特征。因此, 应用需求和典型场景的选择就显得尤为重要。网络应用层的面向典型场景的应用服务将直接向下引导孪生模型和数据等的实例化方案设计。不同应用服务, 采用的模型和数据方案不同, 主要体现在孪生模型算法、数据采集方式、频率和协议等方面, 均需要进行场景化的方案设计。优先选择现网管理运营中的痛点问题, 能有效提升网络运营效率的应用需求和场景。通过对5G承载网的典型场景和应用需求分析, 在网络全生命周期运营过程中, 可以得出数字孪生在网

络运维优化阶段更具有应用价值。

2.3 由被动运维逐步转向主动运维模式

通过数字孪生的实时仿真和模拟能力, 助力5G承载网的运营管理由原来的被动运维向着主动运维模式演进。通过在孪生体上对特定运营活动的预验证、预优化、预操作, 预估网络业务性能运行趋势以及执行效果, 提前规避风险隐患, 由被动修复向主动预防转换, 从而有效节省运营维护和技术验证成本, 提高运维效率。

与部署策略密切相关, 数字孪生的引入也会打破传统的网络管理维护边界, 因此需要调整传统的运营管理体制和运维习惯, 以适应新的运营管理需求。同时, 对运营管理人员提出了更高的要求, 需要利用新技术手段参与到日常运营中。

3 5G承载网数字孪生典型应用场景与需求

在5G承载网中引入数字孪生技术, 首先要从用户或网络应用服务的更高视角出发, 考虑存在哪些面向5G承载的数字孪生典型应用场景与需求, 并且可以覆盖网络的规划与建设、运营与维护以及优化等网络的全生命周期, 为后续应用方案的研究奠定基础。

面向5G承载的数字孪生典型应用场景与需求如图1所示, 提出了覆盖5G承载网运营管理全生命周期的数字孪生的典型应用场景与需求^[16-19]。可以看出, 其中5G网络切片资源划分和变更仿真、5G海量业务承载下的多重故障模拟、5G层次化性能仿真和预测、5G端到端专线业务服务等级协议 (service level agreement, SLA) 质量保障以及5G业务割接演练和模拟等场景, 在网络运维阶段的需求更为凸显。以下选择部分典型场景做进一步说明。

3.1 5G网络切片资源划分和变更仿真

5G承载网在切片网络中提供网络切片的承载方案, 并带来了满足不同5G网络切片在带宽、

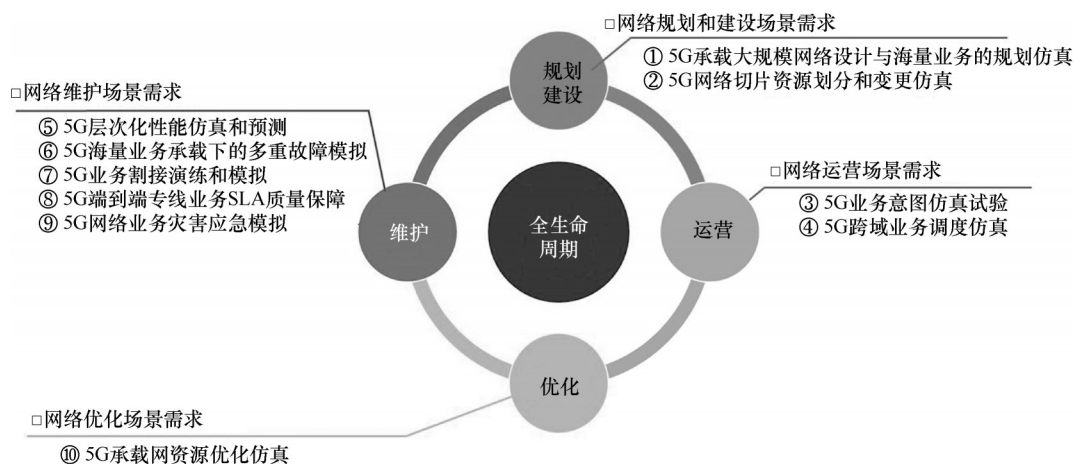


图1 面向5G承载的数字孪生典型应用场景与需求

时延、广连接特性和组网灵活性方面的不同需求，避免无法达到客户对各个业务SLA要求而影响用户体验。当前，在进行切片资源划分时，无法预知通过规划后划分的切片网络是否满足网络流量质量需求，需要在实际切片网络应用后进行验证，并在验收不通过的情况下需要多次沟通调整切片网络，导致业务受到影响，同时浪费大量人力物力。

因此，切片资源划分需求主要是指网络规划根据不同的切片网络对业务SLA的诉求，形成规划的切片网络组网方案，并在网络建设过程中对规划各个切片组网方案进行资源划分，分配切片资源需要验证是否满足各个网络切片业务的带宽、时延、广连接特性和组网灵活性方面诉求。而切片资源变更是在网络运营过程中，当用户感知变差时，通过用户投诉或者告警等触发切片资源的变更。此外，切片资源优化调整时，也会触发切片资源的变更。在切片资源变更情况下，变更下发到实际网络之前，急需一种切片网络预变更环境提前验证变更的影响。

基于数字孪生技术的承载网，结合历史数据以及人工智能、大数据、专家经验等技术在孪生体中进行切片资源划分和变更仿真验证，以提前预知部署或变更后的效果和影响，能主动发现问

题、解决问题，大大节省了人力物力，提高网络维护效率。

3.2 5G层次化性能仿真和预测

5G承载网作为5G接入网与核心网连接的基础网络，其核心是要满足多层级承载网络、灵活调度连接、层次化网络切片以及4G/5G混合承载的诉求。为此需要满足5G层次化承载需求，覆盖L0层光波长、L1电层通道以及L2和L3层的分组隧道。随着5G承载网络的建设及规模扩大，差异化的L0~L3层传送技术的应用也加剧了网络运行维护的难度。主要因为5G业务在时延、带宽以及可靠性方面有着更高要求，任何网络资源的劣化或中断将极大影响5G业务的体验，所以如何保障5G承载网络的性能要求是亟待解决的问题。

网络数字孪生技术可以有效地解决5G承载网的运行维护难题，通过对5G承载网网络态势的实时感知以及数字化建模，在数字空间中层次化孪生出L0~L3层网络、业务的性能仿真和趋势预测。通过数字孪生模型实现层次化性能仿真和预测服务（数字孪生模型学习所需要的数据通过管控系统同步，或由设备主动上报），监测网络和业务运行性能，实现性能仿真与趋势预测，其结果服务于网络和业务的优化分析和决策。



3.3 5G海量业务承载下的多重故障模拟

运营商需要为5G应用提供高带宽、低时延且稳定可靠的传输网络服务，在城域回传网络中，传输设备等网络设备的数量通常高达数万台，同时多种多样的海量业务被混合部署到同一环境中，因此对传输网的故障维护要求较高，需要准确定位故障原因并及时确定网络业务进行保护和恢复的行为和影响。

通过数字孪生模型对5G承载网海量业务负载下由网络错误配置、突发自然灾害等因素造成的承载网络多处节点及链路故障场景进行模拟仿真。故障仿真验证结果可对故障演变过程、业务生存性及网络生存性进行分析，分析网络瓶颈点及薄弱点，从而提高业务生存性及网络可靠性。多重故障模拟仿真所需要的数据可通过管控系统、网络设备采集同步，多重故障模拟仿真及预测结果服务于网络扩容及业务可靠性调整等决策。

3.4 5G业务割接演练和模拟

5G要面向多样化和不确定的新用例，需要网络灵活组装、更新业务应用、提升网络效率、缩短业务上线时间。5G业务割接是其中的关键，网络业务的割接流程主要分为割接前的准备、割接过程中的配置、割接后的测试验证和割接失败的倒回等。

通过数字孪生模型实现5G承载网业务割接方案的仿真演练及模拟。孪生网络通过模拟网络业务参数或配置发生改变时，观察网络切片业务、通道及链路是否出现异常事件，从而确保5G承载网割接时网络调整及配置操作的安全可靠。业务割接模拟需要的数据可通过管控系统、网络设备采集同步，业务割接及模拟结果服务于网络和业务的配置调整及网络变更等决策。

4 面向5G承载的数字孪生应用方案

4.1 面向5G承载的通用服务方案框架与交互流程

基于5G承载网数字孪生体架构^[14-15]，网络

孪生层按实际应用场景和需求定制孪生模型、数据、管理和交互方案。根据数字孪生体与原有管控系统之间的关系，数字孪生体部署存在3种方案，分别为分离部署、融合部署和扁平化部署。其中，分离部署时两者通过外部东西向接口交互；融合部署时两者则通过内部东西向接口交互；扁平化部署是将网络管控层中各单域数字孪生模型封装后，分别迁移到网络协同层系统中，同时实现域内和域间的网络孪生需求。

基于数字孪生的通用应用服务方案是基于预先创建的数字孪生模型，根据上层应用需求，在网络孪生层，对光信噪比（optical signal to noise ratio, OSNR）、光功率、时延、路由等各项性能指标进行仿真预测，评估验证决策对网络性能的影响、潜在风险隐患等。当仿真决策验证无误时，将仿真决策通过管控系统下发到5G承载网，并将意图决策结果反馈到网络应用层。通用应用服务方案框架与交互过程如图2所示。

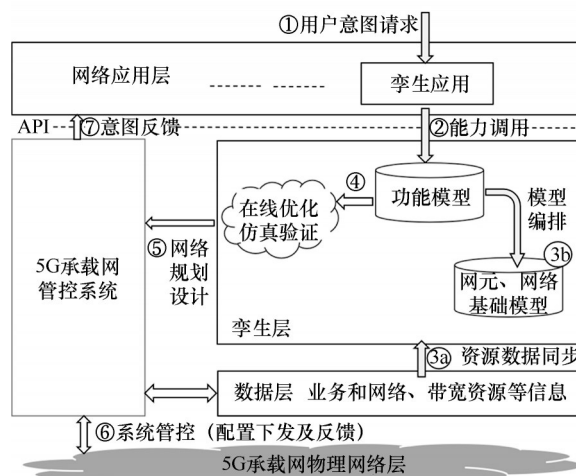


图2 通用应用服务方案框架与交互过程

4.2 应用服务仿真器/模拟器组件的构建

为实现典型场景的应用服务，需要部署相应的仿真器/模拟器组件，通用应用服务方案框架如图3所示。根据应用服务需求，可以按需灵活配置相应的仿真器/模拟器组件，以更低的成本、更

高的效率和更小的现网业务影响实现新需求、新技术、新业务的快速验证和部署，同时具有应用服务的可扩展性。

通过按需部署特定功能的仿真器组件，对外提供特定的数字孪生应用服务。组件功能可以由若干个子功能构成，通过相应的孪生模型支撑并实现。组件特性通过对外提供的功能和数据的描述来定义。其中，组件的外部数据描述包括来源于上层北向接口（northbound interface，NBI）发起的请求或参数配置等的输入数据、来源于东西向接口（east-west interface，EWI）或南向接口（southbound interface，SBI）的基础网络业务信息采集的输入数据，以及通过仿真器得出的结果数据输出。基于提出的面向 5G 承载的数字孪生典型应用场景，按图 3 的构建方法提出相应的应用服务仿真器/模拟器的组件部署方案。

4.3 仿真器/模拟器组件功能和数据特性描述

为了实现网络运营阶段 5G 业务意图仿真试验场景的应用服务，需要引入用户意图仿真器组件；为了实现网络维护阶段的应用服务，需要分别引入层次化性能仿真器、多重故障模拟器、业务割接模拟器、专线业务 SLA 质量保障仿真器等组件，维护阶段仿真器/模拟器组件功能和外部数据描述见表 1。

5 5G 网络切片资源划分和变更仿真功能应用实现案例

选取第 4.2 节提出的 5G 网络切片资源划分和变更仿真功能为例，进一步说明其功能的应用实现。

5.1 应用方案框架和交互流程

5G 网络切片资源划分和变更仿真功能服务方案的交互过程如图 4 所示。该功能的前置条件是全网资源配置数据和资源状态已完成同步，主要包括网络和业务资源配置、拓扑配置，以及故障告警状态、资源占用状态等数据。交互过程具体描述如下。

步骤 1 网络应用层接收用户意图请求——切片资源划分/变更请求。

步骤 2 网络应用层意图模块解析切片资源规划/变更需求。

步骤 3 网络仿真应用模块向数据层请求需求所需的网络对象数据，并同时向孪生层选取相应的切片资源规划/变更模型。

步骤 4 切片资源规划/变更模型调用基础模型和拓扑模型进行切片资源编排。

步骤 5 生成网络切片资源规划/变更方案。

步骤 6 根据用户需求对网络切片资源规划/

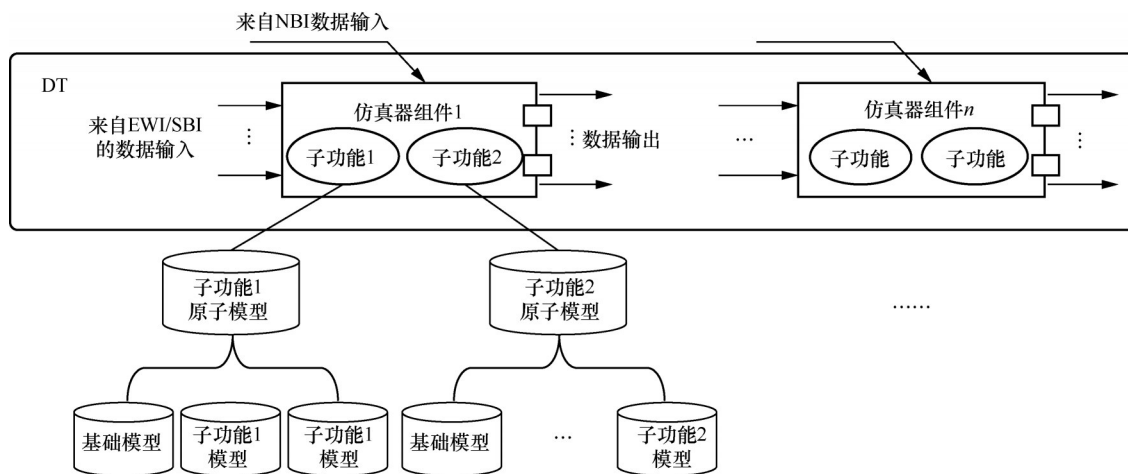


图 3 通用应用服务方案框架



表1 维护阶段仿真器/模拟器组件功能和外部数据描述

序号	仿真器/模拟器 组件名称	组件功能	组件外部数据描述		
			数据输入 (自 NBI)	数据输入 (自 EWI/SBI)	数据输出
1	用户意图仿真器组件	基础网络功能、意图识别功能、意图规划功能、意图保障功能	用户意图请求信息	网元和链路资源配置和状态信息、业务配置信息等	网络和业务性能输出、网络优化策略输出等
2	层次化性能仿真器组件	基础网络功能、孪生性能计算功能、仿真结果分析功能	性能仿真和预测请求、性能阈值	网元和链路资源配置信息、通道和隧道配置、业务配置、性能数据等	光性能预测结果、流量负载预估结果、时延预估等
3	多重故障模拟器组件	网络基础功能、多重故障模拟功能、故障模拟分析功能	多重故障模拟请求、阈值数据等	网元配置数据、网络配置数据、业务配置数据等	仿真后业务数据、仿真后流量数据、故障前后业务影响分析结果、故障前后流量影响分析结果、故障前后负载影响分析结果等
4	业务割接模拟器组件	基础网络功能、割接仿真验证功能、割接影响分析功能	数据输入：业务割接模拟意图请求、阈值数据等	网元配置数据、网络配置数据、业务配置数据等	网络业务 SLA 及路由数据、网络流量分布和带宽利用率、网络性能数据分布及变化统计结果等
5	专线业务 SLA 质量保障仿真器组件	基础网络功能、SLA 保障需求分析功能、SLA 预测功能、SLA 保障和方案验证功能	专线业务 SLA 保障请求	网元和链路资源配置、专线业务配置和状态信息等	专线业务 SLA 要求、预测指标、保障方案和方案验证、预警结果等

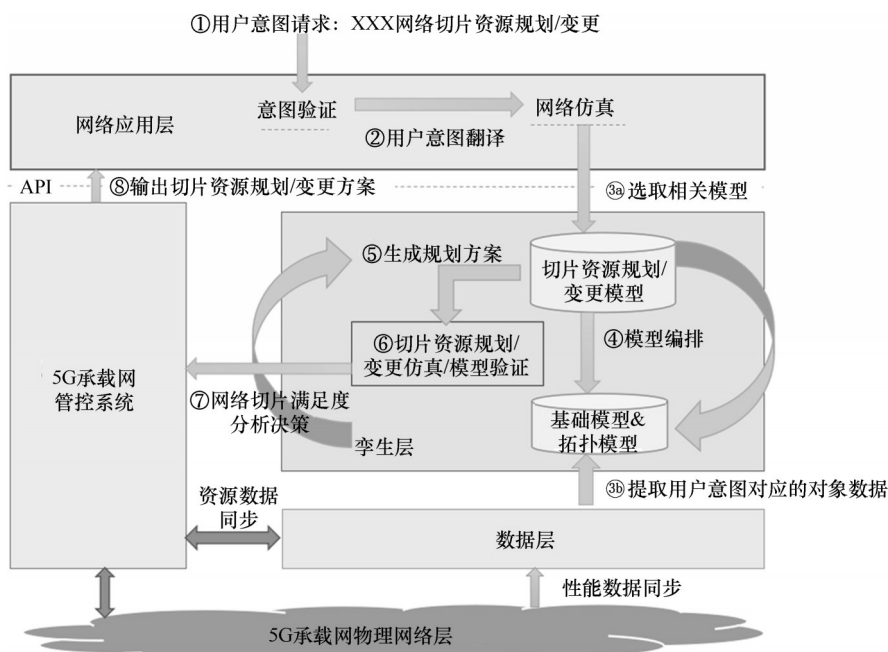


图4 5G网络切片资源划分和变更仿真功能服务方案的交互过程

变更方案进行仿真模拟验证。

步骤7 承载网管控系统对切片资源规划/变更后的方案进行评估,确认方案是否满足客户意图诉求,如果不满足客户意图,重复步骤4~步骤7,直到方案满足客户意图。

步骤8 输出切片资源规划/优化方案。

5.2 切片资源规划和变更仿真器功能描述

为支撑切片资源规划和变更仿真器功能实现,仿真器需提供以下子功能。

(1) 基础网络功能:包括网元配置和网络拓扑配置及其呈现。

网络资源主要包括以下两部分。

① 网元资源,包括交叉/交换容量、端口、端口时隙、波长等资源的配置。

② 拓扑资源,包括链路资源、业务路径资源的配置等。

(2) 网络切片需求分析功能:根据应用场景和业务指标需求,在物理基础设施上切成多张相互独立的端到端逻辑隔离的虚拟网络,以满足业务对SLA的诉求,如低时延、高带宽、高可靠性等不同的业务指标,从而规划/变更不同业务类型的网络资源切片。

(3) 网络切片资源规划功能:系统根据网络切片要求来规划各个网络切片对应的硬切片资源和软切片资源,其中硬切片资源包括硬切片的交换属性、硬切片的颗粒大小、保护方式等,软切片属性包括低时延算路、高带宽算路、特殊算路方式,通过上述属性对不同的网络切片进行规划。为每个切片分配资源和设置对应的服务质量参数,如链路带宽、时延要求,对应的流量、时延预警等要求。

(4) 网络切片资源变更功能:根据现网无法满足切片业务SLA诉求的切片网络,对切片资源做变更,可选择不同的优化变更策略、策略参数和设置等;支持根据不同策略,输出不同的切片资源变更方案。

(5) 网络切片资源规划/变更方案验证功能。

① 根据切片资源规划/变更,对规划/变更的切片网络进行模拟计算,得出网络切片中L0~L3层资源分配情况和切片业务指标属性。对规划方案做仿真预验证和评估分析,判断规划的切片网络是否满足用户业务的诉求。

② 网络切片资源变更时,仿真分析切片资源变更过程是否影响现有业务及影响业务的原因。

③ 当采用不同变更策略,输出多个切片资源变更方案时,可提供多个方案的分析比对,给出变更方案选择策略或最优方案。

5.3 组件模型和数据

网络切片资源规划/变更仿真组件功能由上述5个子功能构成,为了支撑子功能的实现,需要网元模型、拓扑模型、切片需求分析模型、网络切片资源规划和变更模型以及切片资源变更验证模型等进行相互配合实现。可以对用户的切片资源规划和变更请求进行分析评估,在轮询迭代计算过程中输出最佳方案。基于切片资源规划和变更仿真器功能定义,构建切片资源规划和变更仿真器组件,切片资源规划和变更仿真器组件如图5所示。

图5中,切片资源划分和变更模型根据网络切片需求分析模型和用户切片资源划分/变更请求计算出切片资源划分/变更方案。通过切片资源变更验证模型根据切片资源划分/变更方案进行仿真验证,对切片资源划分/变更方案在孪生网络中进行系统的分析,以提供最优解。

6 结束语

5G承载网数字孪生技术的引入将进一步提升网络智能化水平,提供更广阔的发展空间。它将影响网络全生命周期的运营管理模式向着主动运维方向迈进。当前5G承载网数字孪生技术与应用正处在起步阶段的研究与不断探索中,随着技术的应用和发展,5G承载网数字孪生的发展

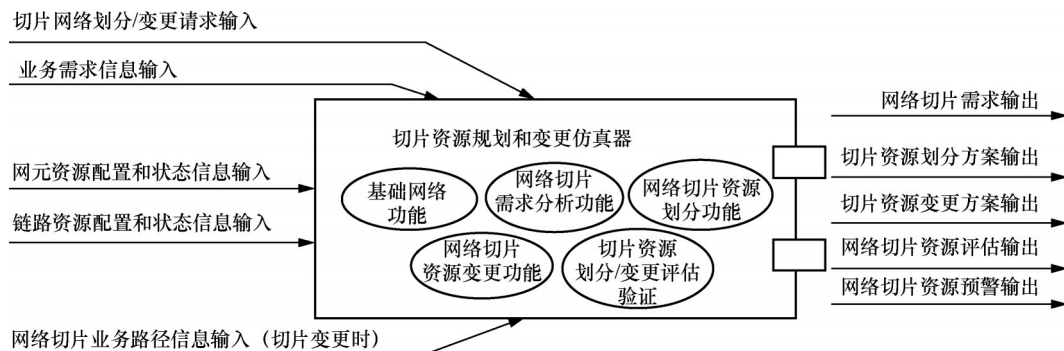


图5 切片资源规划和变更仿真器组件

趋势会经历不同阶段,随着技术成熟度的不断提高,智能化等级水平也将逐步提升。

参考文献:

- [1] Gartner. Top strategic technology trends 2023[EB]. 2023.
- [2] 王达, 孙滔, 孙晓文, 等. 数字孪生在网络全生命周期管理中的研究[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 138-145.
WANG D, SUN T, SUN X W, et al. Study on digital twins in network lifecycle management[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 138-145.
- [3] 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.
- [4] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.
TAO F, ZHANG H, QI Q L, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1-15.
- [5] 陶飞, 马昕, 戚庆林, 等. 数字孪生连接交互理论与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 1-10.
TAO F, MA X, QI Q L, et al. Theory and key technologies of digital twin connection and interaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(1): 1-10.
- [6] 孙滔, 周铨, 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.
SUN T, ZHOU C, DUAN X D, et al. Digital twin network (DTN): concepts, architecture, and key technologies[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(3): 569-582.
- [7] SUN X W, ZHOU C, DUAN X D, et al. A digital twin network solution for end-to-end network service level agreement (SLA) assurance[J]. Digital Twin, 2021(1): 5.
- [8] SHU M, SUN W F, ZHANG J, et al. Digital-twin-enabled 6G network autonomy and generative intelligence: architecture, technologies and applications[J]. Digital Twin, 2022(2): 16.
- [9] 中国移动. 数字孪生网络(DTN)白皮书[R]. 2021.
China Mobile. Digital twin network (DTN) white paper[R]. 2021.
- [10] ITU-T. Y.3090. Digital twin network - requirements and architecture[S]. 2022.
- [11] IETF. Requirements for interfaces of network digital network[S]. 2022.
- [12] IETF. Digital twin network: concepts and reference architecture[S]. 2023.
- [13] IETF. Performance-oriented digital twins for packet and optical networks[S]. 2022.
- [14] CCSA TC7 软件定义光网络(SDON)管控系统(MCS)总体技术要求: YD/T 4611-2023[S]. 2023.
CCSA TC7 General technical specification for management and control system(MCS) of software defined optical network (SDON): YD/T 4611-2023[S]. 2023.
- [15] 中国联通. 光网络数字孪生技术白皮书[R]. 2022.
China Unicom. White paper on optical network digital twin technology [R]. 2022.
- [16] CCSA TC6. SR 368-2022. 数字孪生和大数据技术在传送网领域的应用研究[R]. 2022.
CCSA TC6. SR 368-2022. Technical research on the application of digital twin technology and big data technology in transport network[R]. 2022.
- [17] 中国移动. 光网络人工智能(AI)应用白皮书[R]. 2021.
China Mobile. White paper on optical Network artificial intelligence (AI) applications[R]. 2021.
- [18] 朱康奇, 华楠, 李艳和, 等. 数字孪生技术在光网络中的应用

与问题[J]. 信息通信技术与政策, 2021(12): 69-75.

ZHU K Q, HUA N, LI Y H, et al. Application and problems of digital twin technology in optical network[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021(12): 69-75.

[19] IMT-2020. 5G 承载需求白皮书[R]. 2018.

IMT-2020. White paper on 5G carrier requirements[R]. 2018.

[作者简介]



王郁 (1975-), 女, 中国信息通信研究院高级工程师, 主要研究方向为光网络管控、自智网络、数字孪生、AI 智能化等。



崔潇 (1995-), 女, 中国信息通信研究院工程师, 主要研究方向为智能光网络、SDN 和空间光通信。



朱剑 (1995-), 男, 博士, 华为技术有限公司光产品线高级工程师, 主要研究方向为光网络智能化管控技术。



周晓慧 (1984-), 女, 中兴通讯股份有限公司软件产品总监, 主要研究方向为网络智能化管控、数字孪生等。



李芳 (1974-), 女, 中国信息通信研究院正高级工程师, 主要研究方向为高速光通信、4G/5G 移动承载和光网络智能化等。