



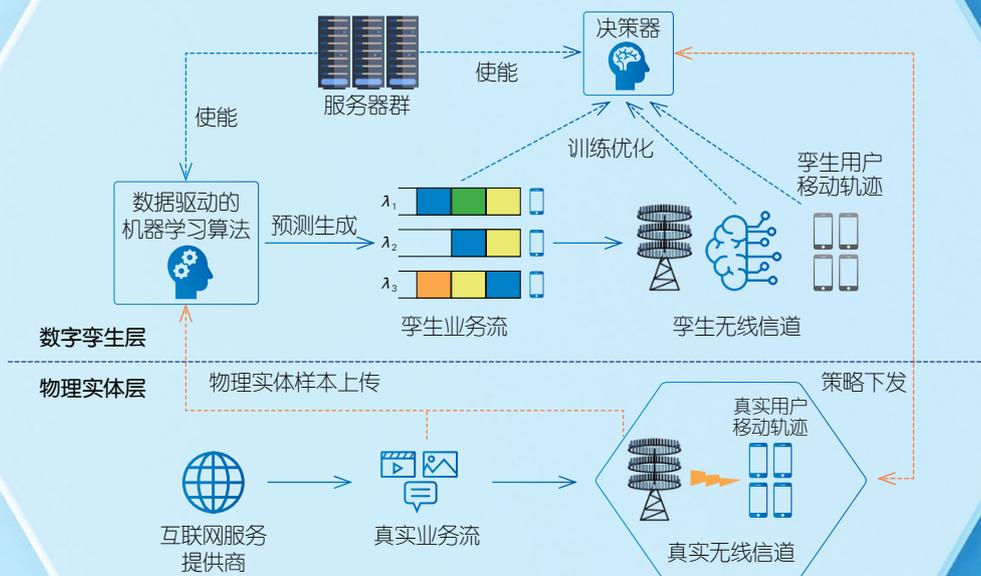
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2023年6月·第3期

专题：数字孪生技术



(封面图片详解见 P16)

ISSN 1009-6868



9 771009 686236



《中兴通讯技术》第9届编辑委员会成员名单

顾问 侯为贵(中兴通讯股份有限公司创始人) 钟义信(北京邮电大学教授)
陈锡生(南京邮电大学教授) 糜正琨(南京邮电大学教授)

主任 陆建华(中国科学院院士)

副主任 李自学(中兴通讯股份有限公司董事长) 李建东(西安电子科技大学教授)

编委 (按姓名拼音排序)

| | | | |
|-----|-----------------|-----|-------------------|
| 陈建平 | 上海交通大学教授 | 陶小峰 | 北京邮电大学教授 |
| 陈前斌 | 重庆邮电大学教授、副校长 | 王文博 | 北京邮电大学教授、副校长 |
| 段晓东 | 中国移动研究院副院长 | 王文东 | 北京邮电大学教授 |
| 葛建华 | 西安电子科技大学教授 | 王喜瑜 | 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 管海兵 | 上海交通大学教授 | 王翔 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 |
| 郭庆 | 哈尔滨工业大学教授 | 王耀南 | 中国工程院院士 |
| 洪伟 | 东南大学教授 | 卫国 | 中国科学技术大学教授 |
| 黄宇红 | 中国移动研究院院长 | 吴春明 | 浙江大学教授 |
| 纪越峰 | 北京邮电大学教授 | 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 江涛 | 华中科技大学教授 | 向际鹰 | 中兴通讯股份有限公司首席科学家 |
| 蒋林涛 | 中国信息通信研究院科技委主任 | 肖甫 | 南京邮电大学教授、副校长 |
| 金石 | 东南大学首席教授、副校长 | 解冲锋 | 中国电信研究院教授级高工 |
| 李尔平 | 浙江大学教授 | 徐安士 | 北京大学教授 |
| 李红滨 | 北京大学教授 | 徐子阳 | 中兴通讯股份有限公司总裁 |
| 李厚强 | 中国科学技术大学教授 | 续合元 | 中国信息通信研究院副总工 |
| 李建东 | 西安电子科技大学教授 | 薛向阳 | 复旦大学教授 |
| 李乐民 | 中国工程院院士 | 薛一波 | 清华大学教授 |
| 李融林 | 华南理工大学教授 | 杨义先 | 北京邮电大学教授 |
| 李自学 | 中兴通讯股份有限公司董事长 | 叶茂 | 电子科技大学教授 |
| 林晓东 | 中兴通讯股份有限公司副总裁 | 易芝玲 | 中国移动研究院首席科学家 |
| 刘健 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 | 张宏科 | 中国工程院院士 |
| 刘建伟 | 北京航空航天大学教授 | 张平 | 中国工程院院士 |
| 隆克平 | 北京科技大学教授 | 张钦宇 | 哈尔滨工业大学(深圳)教授、副校长 |
| 陆建华 | 中国科学院院士 | 张卫 | 复旦大学教授 |
| 马建国 | 之江实验室教授 | 张云勇 | 中国联通云南分公司总经理 |
| 毛军发 | 中国科学院院士 | 赵慧玲 | 工业和信息化部通信科技委专职常委 |
| 孟洛明 | 北京邮电大学教授 | 郑纬民 | 中国工程院院士 |
| 石光明 | 鹏城实验室副主任 | 钟章队 | 北京交通大学教授 |
| 孙知信 | 南京邮电大学教授 | 周亮 | 南京邮电大学教授 |
| 谈振辉 | 北京交通大学教授 | 朱近康 | 中国科学技术大学教授 |
| 唐宏 | 中国电信IP领域首席专家 | 祝宁华 | 中国科学院院士 |
| 唐雄燕 | 中国联通研究院副院长 | | |

目次

中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)
总第170期 第29卷 第3期 2023年6月

信息通信领域产学研合作特色期刊 第三届国家期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊 工信部优秀科技期刊 十佳期刊 中国五大文献数据库收录期刊 1995年创刊

热点专题 ▶

数字孪生技术

- 01 专题导读 陈前斌
- 02 基于数字孪生网络的6G无线网络自治 刘光毅, 邓娟, 郑青碧
- 08 基于数字孪生网络的6G智能网络运维 王威丽, 唐伦, 陈前斌
- 15 基于长短期记忆网络的数字孪生移动通信网络环境生成技术
..... 梁广明, 杨鲲, 刘强, 陈建军
- 21 数字孪生边缘网络 张彦, 卢云龙
- 26 无线网络孪生中的统计信道建模方法:现状与前沿 张树韬, 薛焯, 史清江, 张纵辉
- 32 面向6G的无线接入网络数字孪生技术 段向阳, 康红辉, 吕星哉, 芮华
- 38 数字孪生赋能下的6G网络资源管控机制 程子豪, 刘向南, 高宏伟, 管婉青, 张海君
- 46 基于数字孪生的算力网络自优化技术研究 许胜, 许方敏, 赵成林
- 51 天地一体网络场景下的数字孪生关键技术 陈新宇, 张强, 陆光辉

专家论坛 ▶

- 59 智能计算中心发展态势研究 焦奕硕, 邱绍岩

企业视界 ▶

- 64 5G XR关键技术挑战和方案研究 王新台, 袁知贵

技术广角 ▶

- 73 光接入网络遥测技术的分析与实践 刘刚, 张德智, 陈爱民

《中兴通讯技术》2023年热点专题名称及策划人

1. 面向云网安全的新型防护技术
中国电信研究院教授级高工 解冲锋
北京邮电大学教授 杨义先

3. 数字孪生技术
重庆邮电大学教授 陈前斌

5. 6G网络技术
北京邮电大学教授 王文东

2. 语义通信
中国科学院院士 陆建华
清华大学教授 陶晓明

4. 算力网络和东数西算
工业和信息化部通信科技委
专职常委 赵慧玲

6. 面向双碳的新一代无线通信网络
华中科技大学教授 葛晓虎
西安电子科技大学教授 李建东

MAIN CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL
Vol. 29 No. 3 Jun. 2023

Special Topic ▶

Digital Twin Technology

- 01 Editorial CHEN Qianbin
- 02 6G Autonomous Mobile Network Enabled by Digital Twin Network
..... LIU Guangyi, DENG Juan, ZHENG Qingbi
- 08 6G Intelligent Network Operation and Maintenance Based on Digital Twin Network
..... WANG Weili, TANG Lun, CHEN Qianbin
- 15 Digital Twin Environment Generation for Mobile Communication Networks: A Long Short-Term
Memory Approach LIANG Guangming, YANG Kun, LIU Qiang, CHEN Jianjun
- 21 Digital Twin Edge Networks ZHANG Yan, LU Yunlong
- 26 Statistical Channel Modeling Methods in Wireless Network Twinning: Current Status and
Frontiers ZHANG Shutao, XUE Ye, SHI Qingjiang, CHANG Tsung-Hui
- 32 Digital Twin Technology for Wireless Access Network Oriented to 6G
..... DUAN Xiangyang, KANG Honghui, LYU Xingzai, RUI Hua
- 38 Scheme of Resource Management in Digital Twin-Aided 6G Networks
..... CHENG Zihao, LIU Xiangnan, GAO Hongwei, GUAN Wanqing, ZHANG Haijun
- 46 Self-Optimization Technology of Computing Power Network Based on Digital Twin
..... XU Sheng, XU Fangmin, ZHAO Chenglin
- 51 Digital Twin Key Technologies for Satellite and Mobile Communication Network
..... CHEN Xinyu, ZHANG Qiang, LU Guanghui
- 59 Advances of Intelligent Computing Center JIAO Yishuo, DI Shaoyan
- 64 Key Technical Challenges and Solutions for 5G XR WANG Xintai, YUAN Zhigui
- 73 Analysis and Practice of Telemetry Technology in Optical Access Network
..... LIU Gang, ZHANG Dezhi, CHEN Aimin

Expert Forum ▶

Enterprise View ▶

Research Paper ▶

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*78*zh*P*¥20.00*6500*13*2023-06

敬告读者

本刊享有所有发表文章的版权, 包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权, 所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。未经本刊许可, 不得以任何形式全文转载本刊内容; 如部分引用本刊内容, 须注明该内容出自本刊。

数字孪生技术专题导读



专题策划人



陈前斌，重庆邮电大学副校长、教授、博士生导师，教育部新一代信息网络与终端省部共建协同创新中心主任，教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员，重庆市本科高校教学信息化与教学方法创新指导委员会主任委员，中国通信学会会士、常务理事、组工委副主任委员，中国通信学会人工智能技术与应用委员会副主任委员，重庆市电子学会副理事长兼秘书长；获得国家科技进步二等奖1项、重庆市技术发明一等奖1项、重庆市科技进步一等奖1项、国家级教学成果二等奖2项。

近年来，数字孪生技术在通信网络领域的应用受到了全球学术界和工业界的极大关注。数字孪生网络旨在提供物理网络系统的虚拟表示形式，用于模拟不同的设计场景，验证网络管控策略，评估网络系统的行为。数字孪生网络正成为有效控制和管理现代通信网络的新范式，有助于提升网络的自动化和智能化水平。数字孪生网络目前仍然处于研究初期，需要应对诸多挑战，包括网络模拟和建模、网络监测和测量、网络智能资源管控、网络智能与自治、网络优化和验证等。

本期专题文章从数字孪生网络的架构、应用、关键技术等方面展开研究。《基于数字孪生网络的6G无线网络自治》介绍了数字孪生网络的架构、数据采集和分析技术、仿真建模技术、预验证场景和网络性能优化技术，并给出了数字孪生网络的无线网络自治用例。《基于数字孪生网络的6G智能网络运维》提出了基于数字孪生网络构建的自动化6G智能网络运维系统，并研究了数字孪生辅助下的智能故障管理、网络性能优化和策略验证方案，可在不影响真实网络运行的前提下完成系统故障的自定位和修复。《基于长短期记忆网络的数字孪生移动通信网络环境生成技术》基于长短期记忆网络在真实数据集上构建了无线信道孪生、基站业务流孪生、用户轨迹孪生，为无线网络的智能优化提供了高精度的数字孪生环境。《数字孪生边缘网络》提出了一种融合区块链和联邦智能技术的数字孪生边缘网络架构，并探讨了存在的关键问题。所提出的架构为实现低时延、高可靠、安全的

边缘智能提供了解决方案。《无线网络孪生中的统计信道建模方法：现状与前沿》讨论了数字孪生信道建模技术，并搭建了可视化平台以展示数字孪生信道模型对特定无线网络环境大尺度多径统计特性的刻画，确保对真实无线网络信道的准确反映。《面向6G的无线接入网络数字孪生技术》研究了数字孪生无线网络的架构、关键技术和应用，对数字孪生无线网络具有指导性作用。《数字孪生赋能下的6G网络资源管控机制》提出了一种6G移动通信场景下的物理层-数字孪生网络层-计算应用层的3层数字孪生网络建模方法，同时探讨了实-实-虚-虚、虚-实3种连接与交互方式，并提出了一种基于区块链数据共享与加密的解决方案，最后讨论了数字孪生在无线资源管理中的应用。《基于数字孪生的算力网络自优化技术研究》将数字孪生网络技术引入算力网络，建立算力网络的虚拟映射网络，实现对算力网络的高效分析、诊断和控制。该文可作为将数字孪生网络应用到算力网络中实现网络整体服务时延优化的优秀范例。《天地一体网络场景下的数字孪生关键技术》提出天地一体网络数字孪生的融合架构，研究了天地一体网络数据原生、知识图谱、网络模拟仿真和网络策略优化等关键技术及其应用。

本期专题的作者来自各知名高校、企业与科研机构，从数字孪生无线网络架构、数字孪生信道建模、数字孪生网络环境生成、数字孪生边缘网络，以及数字孪生赋能下6G无线网络自治、6G智能网络运维、网络资源管控、算力网络自优化等方面，介绍了数字孪生技术应用的最新研究成果和经验。希望本期的内容能为读者提供有益的借鉴与启示，并在此对所有作者的大力支持表示由衷的感谢！

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303001
收稿日期: 2023-06-08

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.

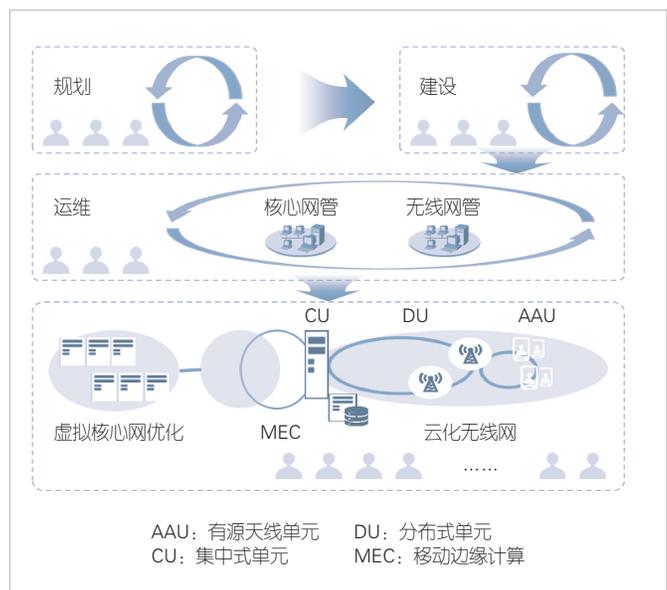
Keywords: 6G; network autonomy; digital twin; endogenous AI

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

AAU: 有源天线单元 DU: 分布式单元
CU: 集中式单元 MEC: 移动边缘计算

▼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。

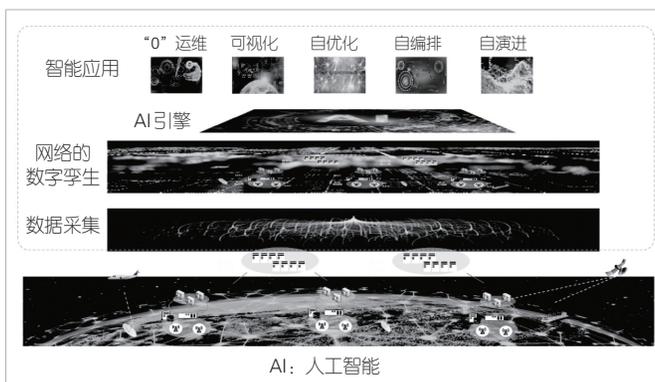
另外，面向企业（ToB）垂直行业领域的应用场景用例需求差异大，各种专网的设计部署和运维成本更高。6G会拓展新的服务和应用场景，这将导致更复杂的网络部署运维。云原生和信息技术（IT）虚拟化等技术的应用，又会进一步增加无线系统管理编排的复杂性。所以，6G将面临着“多元多维性、高复杂性、高动态性和高可靠性服务质量（QoS）保障”等方面的技术挑战，迫切需要一种具有“自发现、自服务、自优化、自治愈、自验证”等特征的系统综

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。

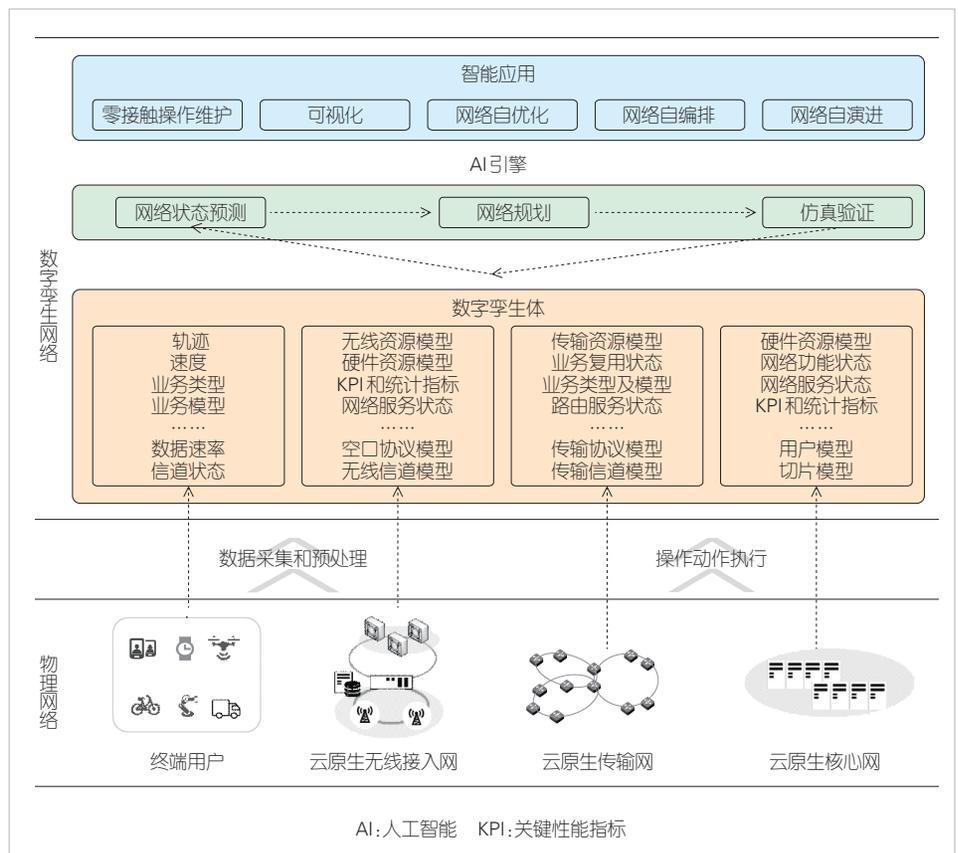
通过数字孪生，每个网络实体和用户服务都可以通过实时信息采集和建模实现数字化。数字化网络的模拟和仿真使得网络的实时状态监测、轨迹预测、故障和服务恶化的早期干预成为可能，实现高水平的网络自动化、“零接触维护”和“预测性维护”^[5]。这不仅可以提高网络的运行效率和服务效率，还可以提前验证网络新功能部署的效果，加快新功能的改进和优化，实现新功能的快速、自动引入，从而实现网络的演进。网络的数字孪生将在很大程度上帮助运营商实现网络的高度自治，有助于解决移动通信网络运维难的问题。

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

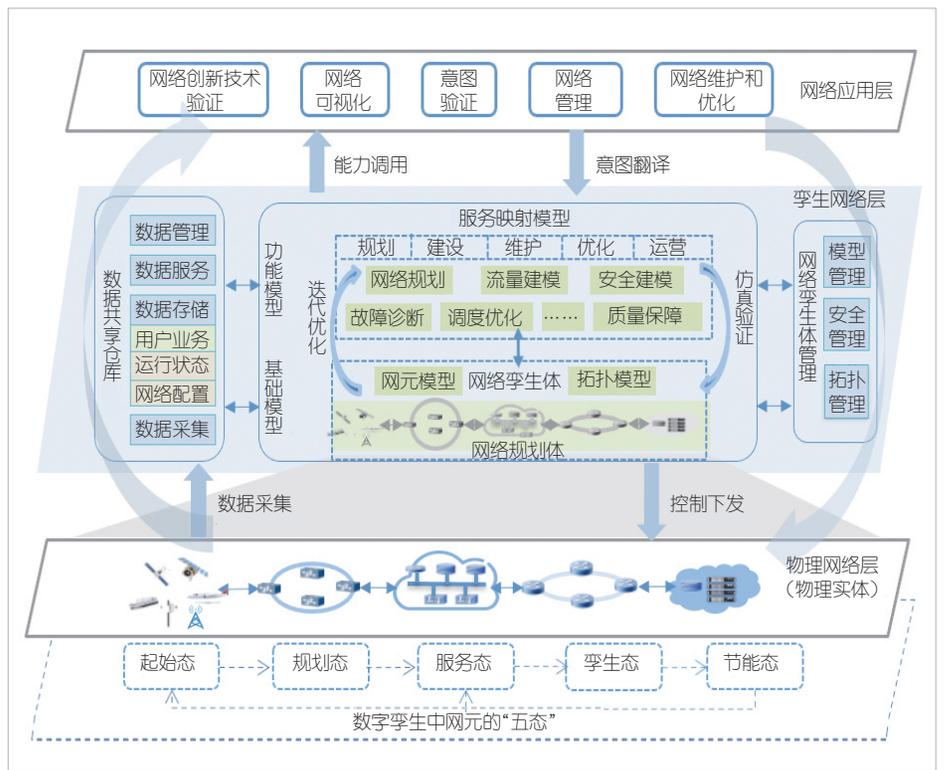
功能，我们需要研究相应的使能技术。数据采集与分析技术是数字孪生网络的基础，应满足物理域与数字域同步的性能要求。数字孪生仿真建模技术实现数字孪生体、数字规划体的构建，应具有按需定制、动态生成、灵活扩展的特征。数字孪生网络预验证场景优化技术进一步优化孪生的预验证环境，满足预验证场景的拟真需求。数字孪生网络性能优化技术实现数字孪生网络性能的长期监测控制与优化，提升数字孪生网络的准确性。

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。

基于数字孪生网络的 6G 智能网络运维



6G Intelligent Network Operation and Maintenance Based on Digital Twin Network

王威丽/WANG Weili, 唐伦/TANG Lun, 陈前斌/CHEN Qianbin

(重庆邮电大学, 中国 重庆 400065)
(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing
400065, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230621.1947.005.html>

网络出版日期: 2023-06-25

收稿日期: 2023-04-25

摘要: 为解决现有网络运维系统存在的智能化程度低且灵活性不足、故障定位难且恢复慢、优化效率低且成本高的问题, 提出基于数字孪生网络构建自动化的6G智能网络运维系统。研究数字孪生辅助下的智能故障管理、网络性能优化和策略验证方案, 明确关键支撑技术, 实现对可能发生的性能恶化和系统故障的自定位和自修复、闭环的性能优化和不影响真实网络运行的策略验证, 满足6G网络对高可靠和高效率运维系统的发展需求。

关键词: 6G; 网络运维; 数字孪生; 人工智能

Abstract: The current network operation and maintenance system faces three challenges: the lack of intelligence and flexibility, difficulties in fault location and fast recovery, and low optimization efficiency and high cost. To solve these problems, an automated 6G intelligent network operation and maintenance system is designed based on the digital twin network. The intelligent fault management, network performance optimization, and policy verification schemes are researched with the assistance of digital twin, and key supporting technologies are clarified. The developed system can support the self-location and self-recovery of possible performance deterioration and system failures, the closed-loop performance optimization process, and the policy verification without affecting the real network, satisfying the development needs of 6G networks for highly reliable and efficient operation and maintenance systems.

Keywords: 6G; network operation and maintenance; digital twin; artificial intelligence

引用格式: 王威丽, 唐伦, 陈前斌. 基于数字孪生网络的6G智能网络运维[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 8-14. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303003

Citation: WANG W L, TANG L, CHEN Q B. 6G intelligent network operation and maintenance based on digital twin network [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 8-14. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303003

1 6G时代运维新挑战

以智能制造、自动驾驶、智慧城市、虚拟/增强现实等为代表的网络新业务的不断涌现, 成为移动通信网络技术不断发展的主要驱动力。新一代6G移动通信网络旨在支撑和实现未来经济社会的万物智联, 助力各行各业的数字化和智能化转型与升级^[1]。然而, 随着网络规模的持续扩大和业务类型的日益多样化, 网络运行和维护的复杂度越来越高, 建立高可靠和高效率的网络运维系统也将面临巨大挑

战, 具体如下:

1) 智能化程度低、灵活性不足。当前网络运维系统在感知、分析、决策和执行方面依然以人工操作为主、系统自动完成为辅。网络运维的自动化和智能化程度难以应对6G网络在资源分层级、多维度、规格异构、集中式和分布式混合的架构形态方面的挑战。此外, 6G网络将承载的业务类型和连接设备类型的多样化对网络运维系统的灵活性与可扩展性提出了更高的要求^[2]。

2) 故障定位难、恢复慢。一方面, 随着传统网络逐渐向软件化和可编程的方向演变, 网络运维人员面临的网元管理规模扩大了几十倍; 另一方面, 由于网络新业务对实时性

基金项目: 国家自然科学基金(62071078)

分析的要求越来越高，网络运行数据的收集间隔从分钟升级到毫秒，数据量呈千倍增长。传统的故障定位和恢复主要基于人工经验（用户投诉和运维人员例行巡检）。运维人员根据这些经验对网络故障进行定位和修复。这种方式管理效率低、成本高，无法保证网络可靠性和业务连续性^[3]。

3) 优化效率低、成本高。因当前网络缺乏有效的数字化验证平台，网络运维优化操作和优化策略调整在实施之前通常由专家进行评估和测试验证，所需周期长、效率低，且无法根据实时的现网基础设施的运行状态和业务需求进行动态调整，因此无法满足6G网络新业务对参数按需配置、功能按需编排和资源按需分配的严格要求，无法验证新操作和新策略的性能和效果，从而不可避免地增加网络运维成本。

为了应对上述挑战，自动化和智能化成为未来网络运营和维护的重要发展方向。目前，华为提出的“AI使能自动驾驶网络”^[4]、欧洲电信标准化协会（ETSI）推进的“零接触网络”^[5]以及中兴通讯主导的“自智网络”^[6]均致力于网络运维的智能化转型，借助大数据和人工智能技术，建立灵活、高效、高质量以及自动化的网络管理、服务和运营系统。此外，中国移动于2022年发布《基于数字孪生网络的6G无线网络自治白皮书》^[7]，提出基于网络的数字孪生构建自动化的网络运营和维护系统，实现“自治”的网络全生命周期管理。利用数字孪生技术建立完全数字化的6G网络，便于实现网络状态的实时监测、用户行为的精准预测，以及对可能发生的性能恶化和系统故障的自定位和自修复，从而优化整个网络运维系统的运行性能和服务效率。

2 数字孪生网络研究与应用现状

数字孪生技术以全数字化的方式创建物理实体的虚拟镜像，并完成物理实体与其虚拟镜像之间的实时同步，充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据实现对物理实体全生命周期过程的监督、预测、控制及管理^[8]。数字孪生的基本原理和应用背景如图1所示。数字孪生的主要应用场景包括智能工厂、智慧城市、智能制造、智慧医疗、工业物联网、车联网、虚拟/增强现实等。数字孪生在其中主要扮演信息收集与共享、性能预测和监督、策略评估与验证、数据存储与分析以及学习算法开发与训练的角色，实现观测系统可视化，辅助自动化网络控制，提高操作灵活性和准确性，支撑智能和安全服务，

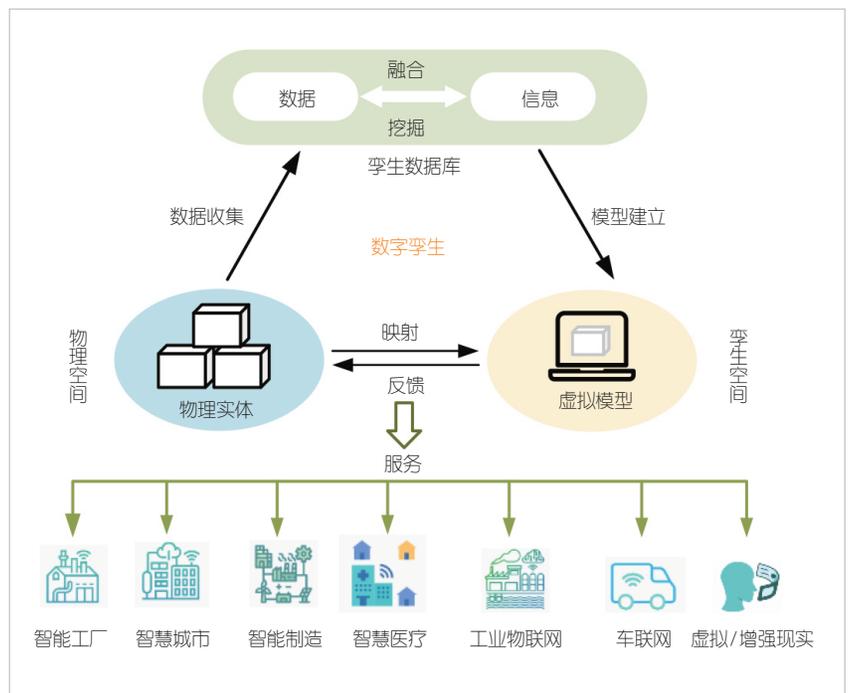
增强系统协作能力以及自治能力等功能。

数字孪生将成为促进6G网络自动化和智能化规划、运行、管理和运营的重要手段，助力网络实现拓扑透视和流量全息、从设备到组网的全生命周期管理、实时闭环控制以及低风险高效率的优化。为了应对数字孪生网络在应用领域扩展、与网络新技术深度融合、信息物理数据驱动、智能服务等方面的新趋势，数字孪生技术需要与人工智能（AI）、大数据、物联网等网络新技术融合，实现物理实体和虚拟实体间的双向连接与交互。孪生数据融合了网络的信息数据和物理数据，促进了信息空间和物理空间的同步性和一致性，能够为数字孪生网络的全生命周期管理过程提供全面的数据支撑。服务模块可以对不同领域的不同业务所需的模型、数据、算法、仿真等功能进行封装，并以应用软件的形式为用户提供服务，实现网络服务的按需管理。数字孪生支持物理实体、虚拟实体、孪生数据和服务之间的实时交互和融合，使得数字孪生网络能够从多时空维度描述和刻画物理网络的运作过程^[9]。

3 数字孪生在智能网络运维方面的应用

3.1 数字孪生在智能故障管理方面的应用

智能故障管理作为智能网络运维的重要功能之一，旨在无人干预的条件下，对影响网络性能故障进行自动、迅

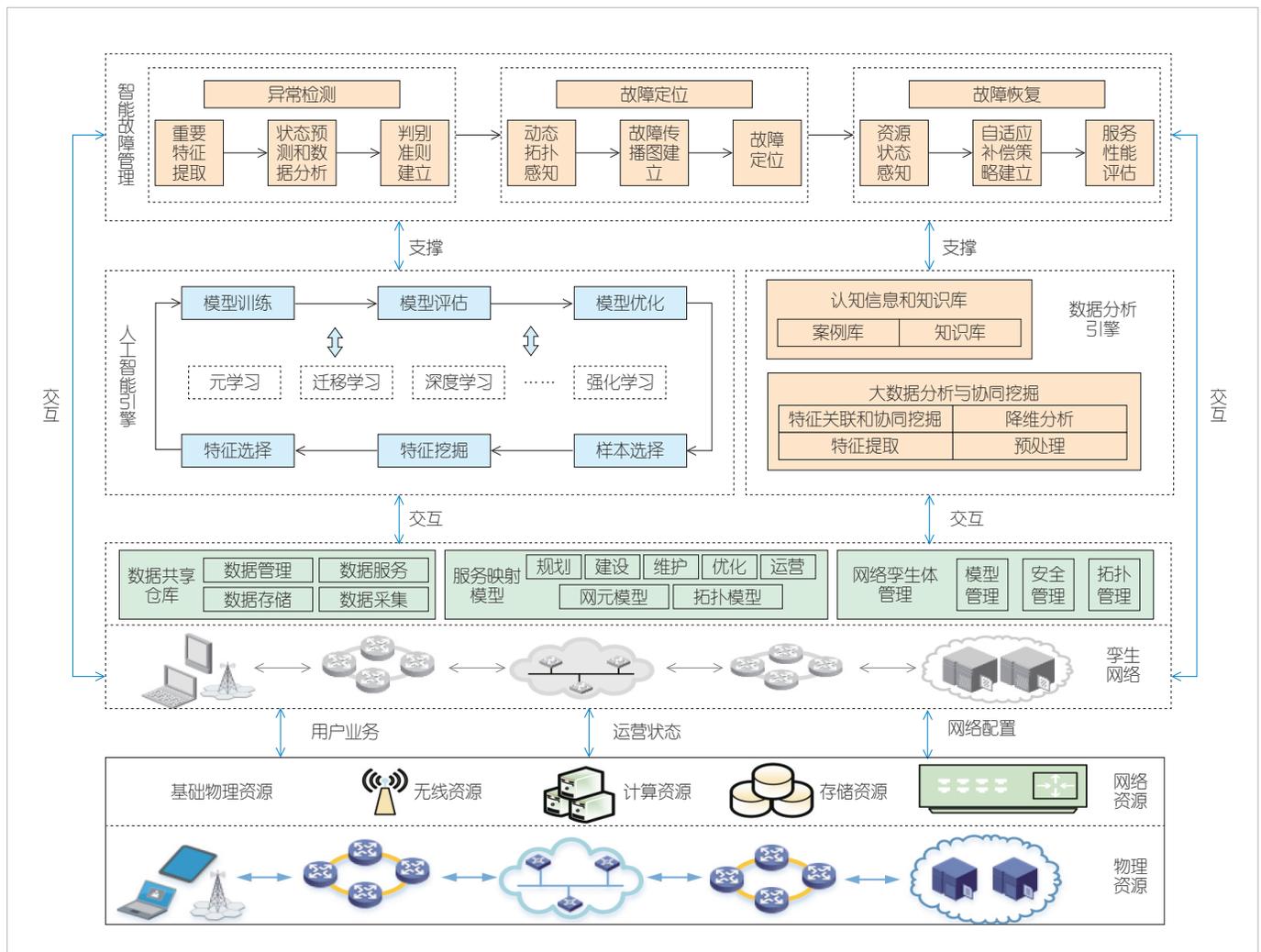


▲图1 数字孪生的基本原理和应用背景

速、精确地检测、定位以及恢复^[10]。AI技术的发展使得故障的智能化和自动化管理水平达到了前所未有的高度。通过建立包含网络告警、日志、性能、资源等数据在内的数据库并优化网络告警关联模型，可基于AI技术构建自动化的智能故障管理平台。然而，尽管基于AI的故障管理具有实时性高、自动化程度高的特点，其运维仍面临数据标准化程度低、故障样本量不足、测试成本高、端到端能力差、适应性和可扩展性差等诸多挑战^[11]。上述问题可以通过数字孪生技术来解决。具体而言，通过创建物理网络基础设施的虚拟镜像，构建数字网络平台，利用物理网络与数字孪生之间的实时交互和影响，可实现灵活、动态的自适应智能故障管理方案，具体如图2所示。

在异常检测阶段，借助数字孪生技术，配备传感和监测控制模块的物理网络设备可以实时采集各种运行状态参数，包括环境温度、资源使用率、负载等。基于从物理空间的网

络设备中获得的历史运行状态数据，使用双向门控递归单元算法在数字空间中生成异常检测模型，可进行异常精准预警，从而实现网络行为模式和运行状态的实时监测控制，提高异常检测精确率^[12]。在故障定位阶段，通过在数字孪生体中建立物理网络的动态拓扑模型并学习网络设备间的故障依赖关系图，可以实现网络故障的迅速定位。当网络拓扑发生变化时，利用迁移学习方法即可以较小的时间和计算成本对拓扑模型和故障依赖关系图进行实时更新，从而定位出具体出现故障的网络部件，实现故障定位全面自动化，提升故障定位效率、实时性及准确性^[13]。在故障恢复阶段，借助数字孪生中的数据模型和拓扑可视化可实现物理网络的故障自恢复；通过感知物理网络状态和业务需求，分析恢复故障所需的网络功能和资源类型，制定补偿策略并将其作用于物理网络中，可实现主动响应的网络性能复原，在降低系统成本的同时保障物理网络可靠性和服务连续性。

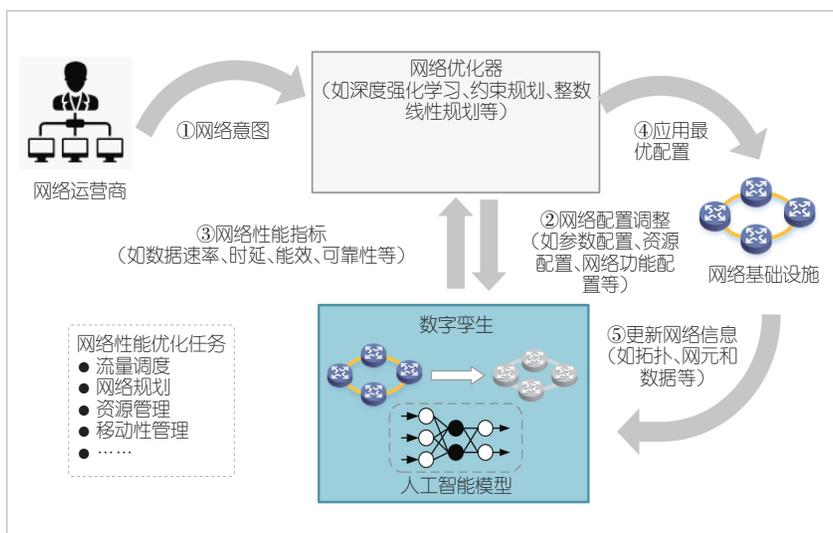


▲图2 数字孪生在智能故障管理方面的应用

3.2 数字孪生在网络性能优化方面的应用

数字孪生技术可与网络优化器结合，以解决不同的任务（如流量调度、网络规划、资源管理、移动性管理等）。具体来说，使用数字孪生技术，优化器可以在优化过程中获得即时的网络性能估计，具体过程如图3所示。首先，网络运营商获取不同业务的性能指标需求（如数据速率、时延、能效、可靠性等）；其次，优化器负责搜索满足用户性能指标需求的最佳网络配置（步骤②）；再次，将优化器获取的网络配置作用于数字孪生体中，若该配置取得的性能指标表明解决方案不够好（步骤③），那么网络优化器将继续搜索，直到满足停止条件；最后，将优化器找到的最佳解决方案应用于真实网络（步骤④）。在数字孪生技术的辅助下，网络可实现闭环的性能优化过程，无须任何人工干预。

流量、应用、资源利用率和拓扑结构等会不断变化，真实网络也将处在高度动态变化中。例如，物理节点或链路可能由于内外部的原因而突然失效，或因网络用户的不同行为模式导致难以预测的网络资源利用高峰。因此，为了实现高效的网络管理，选择能够适应网络实时变化的优化器非常重要。深度强化学习是解决该问题的一项关键技术，且已在动态场景中显示出了强大的网络运营和优化能力。在网络性能优化任务中，网络规划是网络全生命周期管理最核心的阶段之一，直接决定了网络部署的成本和时间，以及最终效果。基于数字孪生进行网络规划能够解决传统规划过程中所面临的相关数据来源分散、验证周期长且效率低、规划过程间断且不统一、人工规划成本高且不准确的难题。基于数字孪生的网络规划系统可以实现对各种网络实体的数据采集和管理，以及对所采集数据的融合处理，并可根据控制信息对物理实体进行反馈和控制。根据网络规划需求在数字孪生空间中构建相应模型，实现网络规划需求预测、方案设计、方案验证、方案优化与评估等功能，可满足网络规划高效准确的实际应用需求^[14]。此外，数字孪生技术能大大提高网络资源管理的效率和性能。基于图神经网络和数字孪生技术创建网络的虚拟表征，发现业务需求、资源利用和物理基础设施间复杂的依赖关系，可以在不影响物理网络的情况下执行各种假设场景和资源分配的方法，并在网络配置变化时预测网络的服务质量和性能。数字孪生辅助下的资源分配可通过对网络服务质量和性能持续监测控制制定效率高、性能优的资源管理策略^[15]。移动性管理是涉及多个管理层面的



▲图3 数字孪生在网络性能优化方面的应用

复杂决策过程，需要先进的实时数据收集和大数据分析 and 处理能力作为支撑。数字孪生技术在状态感知、实时仿真、控制反馈以及可视化分析方面的优势可帮助其实现移动性管理的自动化和决策的智能化。在物理网络的数字孪生体中分析大量用户的当前位置、移动速度、运行轨迹等移动性行为数据，建立用户移动的模拟预测模型，可有效降低业务中断概率和网络能耗^[16]。

3.3 数字孪生在策略验证方面的应用

策略验证是促进智能网络运维技术快速落地的关键一环。智能网络运维的实现不仅需要根据动态变化的网络环境自主制定网络管控策略，还要根据真实物理网络反馈的性能表现验证网络管控策略的正确性、合理性。物理网络基础设施的数字孪生体具有与物理网络相同的拓扑、网元和数据，以及网络运维优化操作和优化策略调整，可在接近真实网络的数字化环境中进行验证。相比于传统仿真平台的验证结果，数字孪生体中由训练得到的模型和验证结果具有更高的可靠性。此外，数字孪生网络支持网络运维优化操作和优化策略调整的追溯和回放，能在不影响真实网络运行的前提下完成策略验证，大大降低网络运维成本。数字孪生辅助下的网络策略验证如图4所示。

针对网络新场景和新技术，数字孪生能为网络配置验证和新技术验证提供试验平台，这大大降低了现网的风险。新场景和新技术可在孪生网络内进行调整和优化，从而实现对物理网络的实时控制、反馈和优化，有望实现网络自学习、自验证、自进化的实时闭环控制^[17]。在高度动态变化的网络环境中，在将更新的网络优化策略应用于真实网络之前，可

在具有预测未来网络状态能力的数字孪生空间中进行评估和验证。基于预测模型，从网络历史数据中预测用户的运动轨迹和业务需求变化，协助数字孪生空间的创建和更新，从而在孪生空间中对用户的实际运动轨迹和业务需求与预测值进行比较和匹配，对预测模型的参数进行调整，实现低成本试错和高效寻优^[18]。

4 关键支撑技术

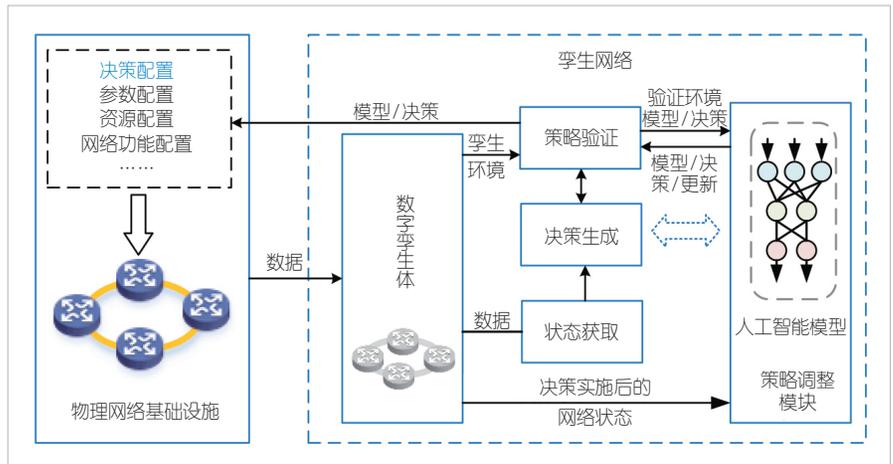
4.1 数据采集和融合技术

数字孪生的实现需要网络运行所涉及的所有元素和整个生命周期的海量数据。只有从物理网络中收集充足的数据，才能在数字空间中准确地建立物理网络的虚拟模型。数据层是整个数字孪生系统的基础和底层支撑，具体包括数据采集模块和数据传输模块两个部分。网络的运维过程会产生大量的数据，包括历史数据、初始数据、实时更新的网络运行状态数据与用户性能数据等。数据收集设备（如射频识别标签和传感器）负责从物理网络中收集数据，高性能传感器和分布式传感技术确保准确感知和获取物理网络的实时运行数据。由图5可知，数据层会从物理网络中获取各类多源异构数据，旨在实现对多平面（如终端、接入、传输和核心节点）的充分认知，从而感知当前网络运行状况。网络状态数据（如网络拓扑、空间信息、资源、协议、接口、路由、信令、进程、告警等）可从网络日志查看器中获取，设备运行状态数据（如环境温度、不可用时间、输入/输出功率等）和用户性能数据（如数据速率、时延等）可由传感器获取。然而，不同的数据具有不同的结构特征、运行方式、存储机制和匹配算法。因此，有必要在数据层对所有的多源异构数据进行数据融合。所有数据通过数据传输模块聚集到一起，并经过脱敏、清洗、标记、命名、标准化、采样、增强、平衡等处理实现数据融合^[12]，从而将原始数据转化为可处理的数据和可用的信息，具体如图5所示。

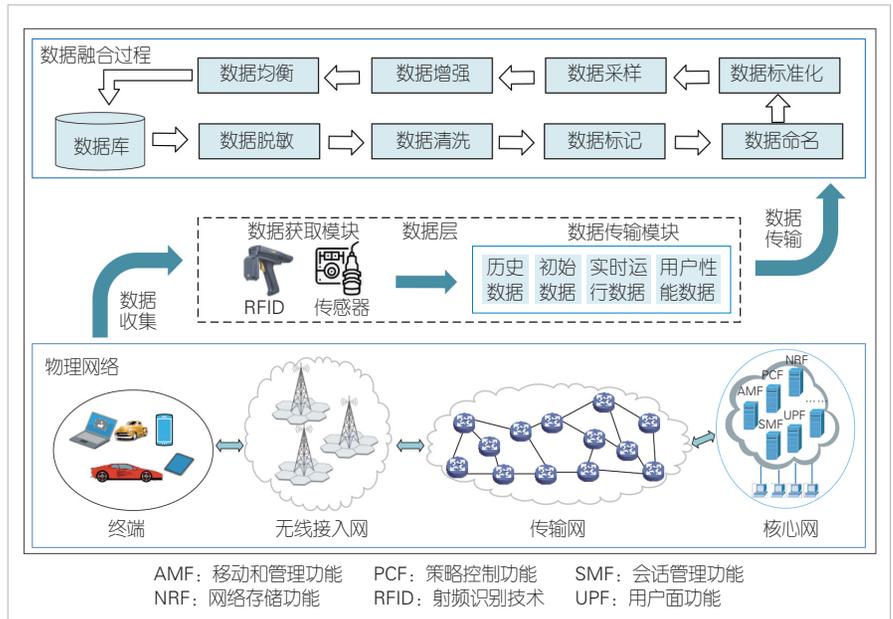
4.2 机器学习技术

数字孪生的优势之一是可以为物理实体带来前所未有的认知能力，即一种能够比人类专家更快地理解大量数据并从中得出特定结论的智能感知和处理能力。因此，在网络运维过程中，数字孪生应能从物理网络及其环境生成的数据中推断出有意义且可操作的信息。为了达到这一目标，机器学习技术在数字孪生网络中不可或缺。

在建立物理网络的数字孪生体后，可采用机器学习技术解决网络运维过程中的诸多问题，具体如表1所示。一种常见的应用场景是解决性能优化问题，即采用数据驱动模型来最小化或最大化给定的过程参数，例如，面对高度动态变化的物理网络，利用数字孪生体生成的经验数据训练基于深度强化学习的策略优化模型，学习用户关联、资源分配等策



▲图4 数字孪生在策略验证方面的应用



▲图5 数据采集和融合过程

▼表1 支撑数字孪生网络的机器学习技术

| 功能 | 目标 | 机器学习方法 | 工作原理描述 |
|---------|------------------|---------------------------|---|
| 性能优化 | 提高吞吐量、能量效率等 | 深度强化学习 (如DQN、DDPG、AC) | 利用数字孪生体生成的经验数据训练深度神经网络模型,并通过强化学习实现与动态变化网络环境的实时交互,制定自适应的性能优化策略 |
| 状态预测 | 物理网络运行状态检测、故障定位等 | 支持向量机、长短期记忆网络、随机森林、贝叶斯网络等 | 基于历史时序数据学习网络运行状态变化规律,结合数字孪生体感知到的当前网络运行状态,预测未来网络变化情况 |
| 数据和模型增强 | 提高模型训练效率、模型质量等 | 生成对抗网络、迁移学习等 | 数字孪生网络中的数据生成能力和策略验证能力可辅助机器学习算法实现数据和模型增强,从而进一步提高数字孪生网络的智能感知和处理能力 |

AC: Actor-Critic算法 DDPG: 深度确定性策略梯度算法 DQN: 深度Q网络

略,以最大限度地提高整个网络的吞吐量或能量效率等。除网络性能优化外,机器学习技术的另一应用是预测物理网络的未来行为,包括基于历史时序数据预测未来的设备运行状态、用户所需数据和运行轨迹等。预测模型可用于辅助网络性能的进一步优化、物理网络运行状态检测以及故障定位等。常用的机器学习技术包括支持向量机、长短期记忆网络、随机森林、贝叶斯网络等。机器学习模型的训练同样可以从数字孪生网络中受益:一方面,数字孪生网络可以生成人工训练数据,对真实网络数据进行泛化,提高模型训练鲁棒性和效率;另一方面,在机器学习模型训练过程中,可利用孪生网络环境对模型参数进行预验证和实时调整,提高模型质量和精度。常用的机器学习技术包括生成对抗网络、迁移学习等。

4.3 可视化呈现技术

可视化呈现技术能够直观地体现物理网络的运作过程,是数字孪生的内在要求。通过图形化展示网络的拓扑、数据模型以及与用户的动态交互过程,数字孪生技术不仅可以帮助用户认识网络的内部工作原理,还可以帮助用户深入挖掘网络内部的有用信息^[2]。当前数字孪生网络的可视化出现功能面临网络规模大、实时性要求高、数据模型可解释性差等难题,因此需要进一步研究实时、高效、精确且互动性强的可视化呈现方法。孪生网络的可视化呈现包括以下3种:

1) 网络拓扑可视化。拓扑可视化通过将网络设备和连接不同设备的链路以图形的方式呈现,直观地反映物理网络的运行状况。拓扑可视化布局需要尽可能地避免节点重叠和线路交叉,满足基本的美学标准。考虑到当前通信网络系统高动态、大规模、分域管理等特点,网络拓扑可视化需要连续显示大量设备和链路的运行状态。

2) 数据模型可视化。数字孪生网络是物理网络的数字化表征,通过将可视化技术运用到网络异常检测、故障定位

和恢复、网络性能优化等数据模型中,实现数据建模和相应模型的可视化呈现,可进一步发挥数字孪生技术在智能网络运维方面的作用。

3) 动态交互过程可视化。可视化用户和物理网络的动态交互可以让用户更好地理解网络数据和网络模型,了解网络的内部工作原理,从而起到共同监督的作用。此外,动态交互过程可视化还能进一步提升网络服务效率,改善用户体验。

5 结束语

新一代6G“自智”网络旨在助力各行各业的数字化和智能化转型与升级,而高可靠和高效率的智能运维系统是支撑6G网络高效运行的重要基础。本文中,我们分析了数字孪生在6G智能网络运维系统中的重要作用,探索了数字孪生辅助下的智能故障管理、网络性能优化和策略验证方案,明确了包括数据采集和融合、机器学习和可视化呈现在内的关键支撑技术,旨在促进数字孪生、人工智能等新兴技术在6G网络中的广泛应用,推动网络运维系统的自动化和智能化进程。

参考文献

- [1] 刘光毅,邓娟,郑青碧,等. 6G智慧内生:技术挑战、架构和关键特征[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 68-78
- [2] 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
- [3] DEALMEIDA J M, PONTES C F T, DASILVA L A, et al. Abnormal behavior detection based on traffic pattern categorization in mobile networks[J]. IEEE transactions on network and service management, 2021, 18(4): 4213-4224. DOI: 10.1109/TNSM.2021.3125019
- [4] 华为. 华为iMaster NAIE网络人工智能引擎技术白皮书[R]. 2020
- [5] ETSI ZSM. Zero-touch network and service management [EB/OL]. (2023-04-10) [2023-04-20]. <https://www.etsi.org/technologies/zero-touch-network-service-management>
- [6] 中兴通讯. 自智网络白皮书[R]. 2022
- [7] 中国移动研究院. 基于数字孪生网络的6G无线网络自治白皮书[R]. 2022
- [8] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable

emergent behavior in complex systems [M]//Transdisciplinary perspectives on complex systems. Cham: Springer International Publishing, 2016: 85-113

- [9] 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. DOI: 10.13196/j.cims.2019.01.001
- [10] MULVEY D, FOH C H, ALI IMRAN M, et al. Cell fault management using machine learning techniques [J]. IEEE access, 2019, 7: 124514-124539. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2938410
- [11] ZHENG Y F, KONG H M, WANG N, et al. Practice on fifth-generation core (5GC) network fault self-recovery based on a digital twin [J]. Digital twin, 2022, 2: 18. DOI: 10.12688/digitaltwin.17692.1
- [12] WANG D S, ZHANG Z G, ZHANG M, et al. The role of digital twin in optical communication: fault management, hardware configuration, and transmission simulation [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(1): 133-139. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000727
- [13] WANG W L, TANG L, WANG C M, et al. Real-time analysis of multiple root causes for anomalies assisted by digital twin in NFV environment [J]. IEEE transactions on network and service management, 2022, 19(2): 905-921. DOI: 10.1109/TNSM.2022.3151249
- [14] ZHAO J, XIONG X M, CHEN Y M. Design and application of a network planning system based on digital twin network [J]. IEEE journal of radio frequency identification, 2022, 6: 900-904. DOI: 10.1109/JRFID.2022.3210750
- [15] WANG H Z, WU Y L, MIN G Y, et al. A graph neural network-based digital twin for network slicing management [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2022, 18(2): 1367-1376. DOI: 10.1109/TII.2020.3047843
- [16] XU H W, BERRERES A, YOGINATH S B, et al. Smart mobility in the cloud: enabling real-time situational awareness and cyber-physical control through a digital twin for traffic [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2023, 24(3): 3145-3156. DOI: 10.1109/TITS.2022.3226746
- [17] WANG D, SU R R, ZHANG S H, et al. Trends and challenges of policy verification for intent-based networking towards 6G [C]//Proceedings of 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). IEEE, 2022: 134-139. DOI: 10.1109/ICCCWorkshops55477.2022.9896717
- [18] ZHAO L, HAN G J, LI Z H, et al. Intelligent digital twin-based software-defined vehicular networks [J]. IEEE network, 2020, 34(5): 178-184. DOI: 10.1109/MNET.011.1900587

作者简介



王威丽, 重庆邮电大学在读博士研究生; 主要研究方向为虚拟化网络、网络切片、智能故障管理; 发表论文10余篇。



唐伦, 重庆邮电大学教授、博士生导师; 主要研究方向为下一代移动通信网络、移动边缘计算、物联网、数字孪生; 已发表论文70余篇。



陈前斌, 重庆邮电大学副校长、教授、博士生导师, 教育部新一代信息网络与终端省部共建协同创新中心主任, 教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员, 重庆市本科高校教学信息化与教学方法创新指导委员会主任委员, 中国通信学会会士、常务理事、组工委副主任委员, 中国通信学会人工智能技术与应用委员会副主任委员, 重庆市电子学会副理事长兼秘书长; 获得国家科技进步二等奖1项、重庆市技术发明一等奖1项、重庆市科技进步一等奖1项、国家级教学成果二等奖2项。

基于长短期记忆网络的数字孪生移动通信网络环境生成技术



Digital Twin Environment Generation for Mobile Communication Networks: A Long Short-Term Memory Approach

梁广明/LIANG Guangming¹, 杨鲲/YANG Kun¹,
刘强/LIU Qiang¹, 陈建军/CHEN Jianjun^{2,3}

(1. 电子科技大学, 中国 成都 611731;
2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;
3. 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. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
3. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230620.1322.004.html>

网络出版日期: 2023-06-20

收稿日期: 2023-04-26

摘要: 未来6G时代将进入虚拟化的数字孪生世界, 实现“万物智联, 数字孪生”的愿景。移动通信网络的数字孪生需要建立物理通信网络与孪生通信网络之间的高精度映射, 保证孪生虚拟数据与实际物理数据保持高度匹配。针对上述数字孪生环境生成的问题, 采用了数据驱动的长短期记忆网络的方法, 对移动通信网络中的无线信道、基站业务流和用户移动轨迹进行时序预测与生成, 从而构建出高精度数字孪生环境。仿真结果表明, 所提算法能精准生成未来时序数据, 与物理通信网络真实数据保持高度一致。

关键词: 移动通信网络; 数字孪生; 长短期记忆网络; 时序预测

Abstract: The future 6G era will enter a virtual digital twin world and realize the vision of wisdom connection and digital twin. The digital twin of mobile communication network needs to establish a high-precision mapping between the physical communication network and the twin communication network to ensure that the virtual data and the physical data are highly matched. To solve the problem of digital twin environment generation, the method of data-driven long short-term memory network is adopted to predict the time sequence of wireless channel, base station traffic flow and user mobility trajectory in mobile communication network, so as to construct a high-precision digital twin environment. Simulation results show that the proposed algorithm can accurately predict future time series data.

Keywords: mobile communication network; digital twin; long short-term memory network; time series prediction

引用格式: 梁广明, 杨鲲, 刘强, 等. 基于长短期记忆网络的数字孪生移动通信网络环境生成技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 15-20. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303004

Citation: LIANG G M, YANG K, LIU Q, et al. Digital twin environment generation for mobile communication networks: a long short-term memory approach [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 15-20. DOI:10.12142/ZTETJ.202303004

数字孪生是指对物理世界的数字镜像, 借助数据驱动的方法对物体实体的历史数据和实时数据进行分析与挖掘, 从而对物理实体进行高精度模拟和预测。同时, 数字孪生需要具备强大的智能纠错和数据自生成能力。当前数字孪生已经开始应用在各个领域中, 为各项技术提供模拟、验证和试错的高精度孪生环境。在工业领域, 文献[1]提出了一种数据驱动的工业设备数字孪生结构和维护框架, 为发电厂

的风力涡轮机开发了一个数字孪生体, 以便进行故障预测与检测。在电力和能源领域, 文献[2]提出了一种采用前馈神经网络的冷却器数字孪生方法, 将孪生体收集到的数据提供给遗传算法, 从而进行多目标优化, 使冷却效率、性能系数和湿球效率实现最大化。在医疗与健康领域, 文献[3]提出了一种模拟患者的头部行为的数字孪生模型, 并在该模型上检测患者颈动脉狭窄的严重程度, 实现了非侵入式的检测。

IMT-2030 (6G) 推进组在《6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书》^[4]中指出, 未来6G时代将进入虚拟化的数字孪生

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB2900204); 国家自然科学基金 (62132004)

世界,实现“万物智联,数字孪生”的愿景。当前,基于数字孪生的移动通信网络受到学术界和工业界的广泛关注,正在成为一个热门研究方向。文献[5]认为模拟器训练得到的策略无法直接部署到真实环境,这极大限制了深度强化学习(DRL)在无人机集群运动场景中的应用;因此提出了一种基于数字孪生的DRL训练框架来解决这个问题。DRL智能体可以学习数字孪生环境,在策略收敛后快速部署在真实世界的无人机上。为了应对高效边缘计算提出的重大挑战,文献[6]将数字孪生技术和人工智能技术融入到车辆边缘计算网络的设计当中,提出了一种协作图驱动的车辆任务卸载方案。该方案通过在数字孪生网络和物理网络中进行智能任务卸载调度来最小化卸载成本。为了解决用户任务卸载中强化学习方法动作空间过大和收敛速度过慢问题,文献[7]提出了一种基于数字孪生的强化学习任务调度方法,利用多个智能体在数字孪生环境中进行交互,以提高决策性能和策略收敛性。然而,目前的研究工作大多基于数字孪生体已经被完美构建的假设,很少探讨移动通信网络数字孪生体的生成问题。

数字孪生需要建立物理通信网络与孪生通信网络之间的高精度映射。在单个运行周期内,两者之间需要保持精确同步。在运行周期之间,数字孪生体需要在交互机制的指导下与物理实体展开数据交互,以保证下一周期能与物理世界保持高度一致。未来6G网络需要兼容海量异构通信设备并满足亚毫秒级时延要求,这对未来网络数字孪生体的构建提出了巨大挑战。因此移动通信网络中的数字孪生环境生成问题是当前亟待攻克的技术难点。

人工智能技术可以用于时间序列预测,从而构建与物理实体时隙对齐的数字孪生体。文献[8]将递归神经网络(RNN)作为流量模型,用于预测即将到来的流量,并与DRL结合从而做出链路布局决策。文献[9]基于多维数据,利用长短期记忆网络(LSTM)的深度学习模型来构建时空中多播服务的动态流量模型,为进一步的网络资源分配提供了基础。

针对上述的背景,本文的主要贡献如下:

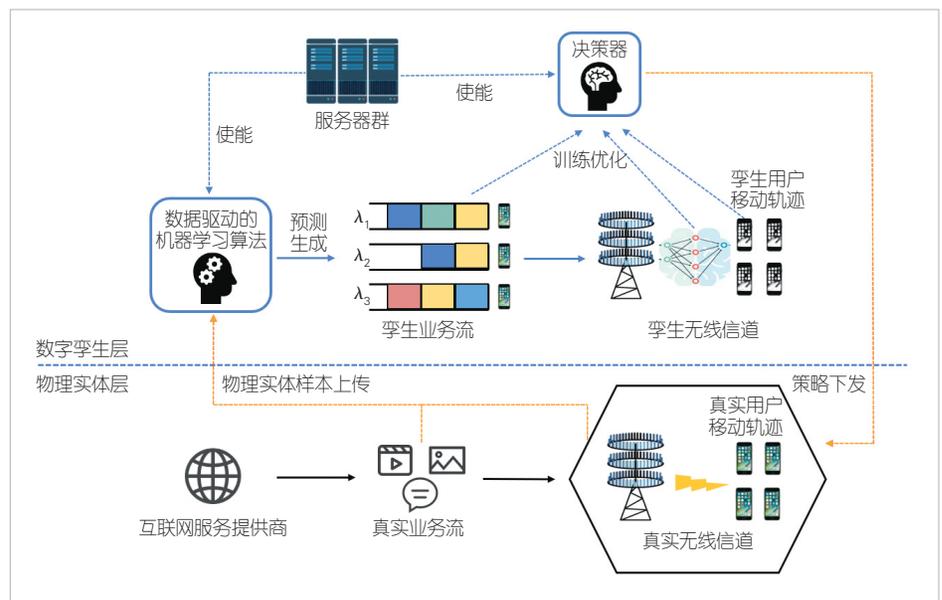
1) 提出了一种基于LSTM网络的移动通信网络数字孪生方法,该方法通过学习时序数据中的时间相

关性,基于历史数据预测未来数据,从而构建移动通信网络的数字孪生环境。

2) 基于3个公开数据集,将该方法应用在移动通信网络中的无线信道孪生、基站业务流孪生和用户移动轨迹孪生上,验证了LSTM网络方法构建高精度数字孪生环境的有效性。

1 数字孪生整体架构

移动通信网络数字孪生的整体架构如图1所示,主要分为物理实体层和数字孪生层。在物理实体层中,互联网服务提供商为用户提供业务流,然后蜂窝基站通过无线信道将信息传递给各个用户终端。物理实体层将无线链路质量数据、业务流数据和用户移动轨迹数据定时上传到数字孪生层。在数字孪生层中,通过数据驱动的机器学习方法预测并生成对应的虚拟孪生环境数据,使得自生成的虚拟数据与实际数据保持高度匹配。当虚拟数据被送入无线链路和网络决策器时,决策器基于时隙提前孪生数据完成智能策略的预训练。通过链路控制和资源分配可实现无线链路和网络长期性能最优化。值得注意的是,孪生数据生成过程以及无线链路和网络决策的训练过程均由数字孪生层中的高性能服务器群完成。最后,预训练好的无线链路和网络传输策略被下发并提前部署在物理实体层,从而提升通信系统的各项性能指标。因此,对物理实体中无线信道质量、无线业务流量以及移动用户轨迹进行高精度的时间序列预测,是构建数字孪生环境的关键,是完成数字孪生网络推演的集成。



▲图1 数字孪生构建-决策整体架构

2 数字孪生环境生成技术

2.1 长短期记忆网络

时间序列预测的基础是，当前时隙的数据与过去时隙的数据存在着时间相关性。通信网络中的时序数据往往都存在着较为复杂的非线性关系，因此适合采用数据驱动的LSTM方法^[10]来挖掘当中的时序相关性，解决时间序列预测的问题。

LSTM是递归神经网络(RNN)^[11]的变种，它解决了RNN无法学习时序数据中，当前时隙数据与过去较远时隙数据之间的长期相关性的问题。RNN较为简单的循环结构，导致过去较远时刻产生的梯度在当前时刻会出现消失现象，因此无法有效学习到数据间的长期依赖关系。相比RNN只有一个传递状态，LSTM有两个传输状态，分别是细胞状态 c^t 和隐藏状态 h^t 。细胞状态 c^t 在传递过程中变化很慢，通常是由上一个状态传递过来的 c^{t-1} 经过少量线性变换得到的，而隐藏状态 h^t 则在传递过程中发生较快变化。

LSTM内部结构如图2所示。其中， z^f 、 z^i 和 z^o 是门控状态，相应的生成过程如下：当前状态输入 x^t 和上一状态传递下来的 h^{t-1} 拼接形成向量 s^t ；向量 s^t 乘以不同的权重矩阵，并通过sigmoid激活函数转换为0到1之间的数值。而图2中 z 是输入数据，相应的生成过程如下：拼接向量 s^t 乘以相应的权重矩阵后，通过tanh激活函数转换到-1到1之间的数值。门控状态 z^f 、 z^i 和 z^o 以及输入数据 z 对应的计算公式为：

$$z^f = \text{sigmoid}(W^f s^t), \tag{1}$$

$$z^i = \text{sigmoid}(W^i s^t), \tag{2}$$

$$z^o = \text{sigmoid}(W^o s^t), \tag{3}$$

$$z = \text{tanh}(W s^t), \tag{4}$$

其中， W^f 、 W^i 、 W^o 和 W 分别是 z^f 、 z^i 、 z^o 和 z 对应的权重矩阵。

在LSTM内部向量的计算中， \odot 代表哈达玛乘积，即两个矩阵中对应的元素相乘，而 \oplus 代表的是矩阵加法，即两个矩阵中对应的元素相加。LSTM其余变量计算公式为：

$$c^t = z^f \odot c^{t-1} + z^i \odot z, \tag{5}$$

$$h^t = z^o \odot \text{tanh}(c^t), \tag{6}$$

$$y^t = \text{sigmoid}(W' h^t), \tag{7}$$

其中， y^t 为当前状态输出值， W' 为 y^t 对应的权重矩阵。

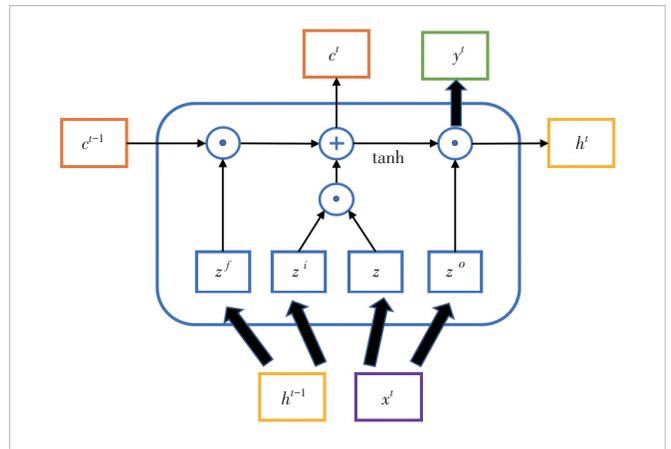
LSTM内部主要有3个阶段，分别是遗忘阶段、选择记忆阶段和输出阶段：

1) 遗忘阶段。该阶段是对上一个状态输入的 c^{t-1} 信息进行选择性遗忘，即采用 z^f 作为遗忘门控，以控制哪些数值需要遗忘。

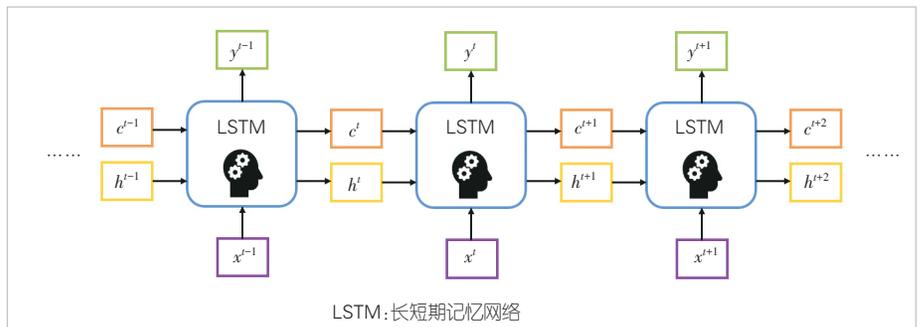
2) 选择记忆阶段。该阶段对当前状态输入的 x^t 和 h^t 信息进行选择性记忆，即采用 z^i 作为选择记忆门控，以控制哪些数值需要被着重记忆。

3) 输出阶段。该阶段将决定哪些经过变换后的输入信息将会被当成当前状态的输出，即采用 z^o 作为输出门控，以控制整个输出过程。与RNN类似， y^t 是通过 h^t 进行变换得到的。

如图3所示，将LSTM按状态进行展开时，每个状态的细胞状态和隐藏状态信息都会被刷新并向下一个状态传输，而权重矩阵 W^f 、 W^i 、 W^o 、 W 和 W' 都是固定的。训练时，需要采用反向传播算法^[12]优化上述5个权重矩阵。训练完成后，选择性能表现最好的矩阵参数，执行前向传播算法，并输出预测结果。这种方法的总体思想是，通过LSTM中的细胞状态和隐藏状态提取时间特征之后，将时序特征送入全连



▲图2 长短期记忆网络的内部结构图



▲图3 LSTM状态展开图

接神经网络，实现连续数据预测。

2.2 无线信道数据孪生生成

在移动通信网络的蜂窝内，基站到用户终端的无线信道质量随时间变化，构成时变信道。信道的时变性质主要由用户与基站之间的相对运动引起。在信号中心频率 f_c 和信号传输周期 T_s 确定的情况下，用户与基站之间的相对速度 v 引起的多普勒频偏 f_d 直接决定了无线信道变化的快慢。在经典无线通信理论中，在传播信号的相干时间 T_c 内，可以近似认为无线信道质量保持不变^[13]，其中相干时间的计算可由公式(8)完成：

$$T_c \approx \frac{0.5c}{vf_c} = \frac{1}{2f_d} \quad (8)$$

我们考虑基站单发射天线、用户单接收天线的场景，并采用单载波信号传输（信号传输周期 T_s 远小于相干时间 T_c ）。在该场景下，采用LSTM网络对无线信道数据进行孪生生成，而孪生生成的时序信道数据中每个时隙的长度均是 T_s 。我们将过去 P_w 时隙的实际物理信道数据输入LSTM网络结构，生成未来 L_w 时隙的数字孪生信道数据。

2.3 基站业务流数据孪生生成

移动通信网络的蜂窝基站为用户提供的语音、短信、业务流量也是随着时间变化的，具备时序数据特征。因此，根据过去 P_j 时隙的物理移动网络实际业务流量数据，通过挖掘时序相关特征，可以在数字孪生层生成未来 L_j 时隙虚拟孪生业务流，以便对业务流调度策略等移动网络传输策略进行提前训练。然而，蜂窝基站承载的网络业务流除了存在时间相关性外，还存在显著的周期性。因此，除了采用LSTM网络外，还需要采用快速傅里叶变换（FFT）的方法提取周期性^[14]。具体孪生业务生成器的训练步骤如下：

1) 将训练集数据 X_t 送入FFT模块，然后提取频谱中峰值最高的50个频率分量，并根据这些参数生成相应的正弦波叠加的大尺度周期分量集 X_t^p ；

2) 将周期分量的数据从数据集中减去，得到小尺度分量集 $X_t^r = X_t - X_t^p$ ；

3) 利用数据集 X_t^r 来训练LSTM模块。

在孪生业务生成器训练收敛后，根据物理移动网络实际业务流量数据，孪生业务流的具体生成步骤为：

1) 用提取到的频率分量参数预测大尺度周期性分量 \widehat{X}_t^p ；

2) 用LSTM预测小尺度分量集 \widehat{X}_t^r ；

3) 获得最终用户业务流预测结果 $\widehat{X}_t = \widehat{X}_t^p + \widehat{X}_t^r$ 。

2.4 用户移动轨迹数据孪生生成

物理移动网络中用户的移动轨迹记录了移动对象的时空分布足迹，是移动对象活动特征的真实反应，具备空间特征和时间特征，同时数据中隐藏着方向、速度、用户聚集性等重要的属性信息。用户移动轨迹数据兼具时间相关性和空间相关性。LSTM等方法可以深入挖掘移动轨迹数据的时空特征，根据当前 P_w 时隙的物理移动网络中用户移动轨迹数据，孪生生成 L_w 时隙的虚拟轨迹数据。但在移动网络中，海量用户精准轨迹的预测将浪费极大的计算资源。精准移动轨迹并不能显著提升移动网络的吞吐量等网络性能。

移动通信网络通常由相互独立的蜂窝构成。当进入某一基站的覆盖范围时，移动用户会与该基站形成关联，由该基站满足其各类通信需求。伴随用户移动行为，网络中各个基站承载的用户数目发生时序动态变化。不同蜂窝基站可关联不同数目的用户。我们将用户移动区域划分为若干小区，针对每一个蜂窝小区，设计LSTM网络，以便根据过去 P_w 时隙中物理移动网络内的各个基站关联的用户数目真实数据，在数字孪生层生成未来 L_w 时隙中各个基站关联的用户数目虚拟数据。该孪生数据可以用于移动网络中基站间资源分配策略的提前训练。

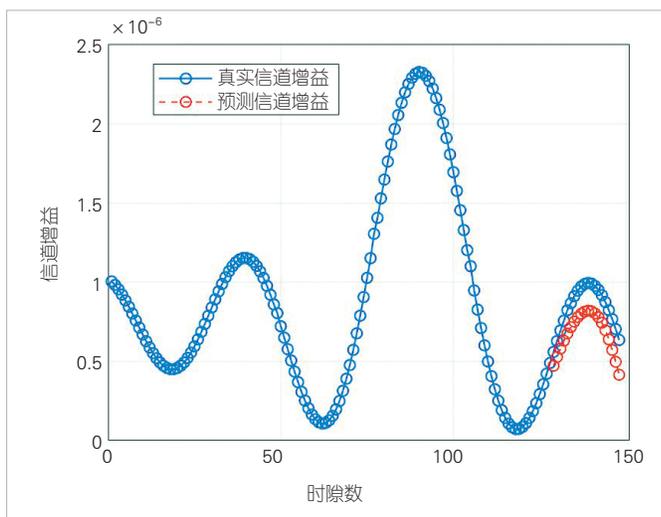
3 仿真实验

3.1 无线信道预测生成

在本部分实验中，物理移动网络的真实无线信道数据来自基于3GPP TR 38.901 TDL-A协议的5G toolbox^[15]，其中信号的中心频率 $f_c = 1.71$ GHz，多普勒频偏 $f_d = 50$ Hz，基站高度 $h_b = 20$ m，用户高度 $h_u = 10$ m，基站与用户间距离 $d = 10$ m，信号周期 $T_s = 0.25$ ms。我们每隔 T_s 周期采集1次无线信道数据，一共采集了15 000组数据，且划分训练集和测试集的比例为5 : 1。

我们采用3层LSTM网络，设置输入层节点数目为 1×128 ，隐藏层节点数目为200，输出层节点数为20；采用适应性矩估计（Adam）优化器，损失函数采用均方误差（MSE），对输入数据进行线性归一化处理。

我们设置 $P_w = 128$ ， $L_w = 20$ ，即使用128个时隙（单时隙时长度为0.25 ms）的信道增益预测未来20个时隙的信道增益。由图4中可知，预测值与真实值在趋势上与幅度上都较为接近。LSTM方法能较好地预测未来20个时隙信道增益先上升后下降的走势。训练收敛后，LSTM最终在测试集上



▲图4 时隙为0.25 ms时的无线信道时序预测

取得了94.2%的准确率。

3.2 基站业务流预测生成

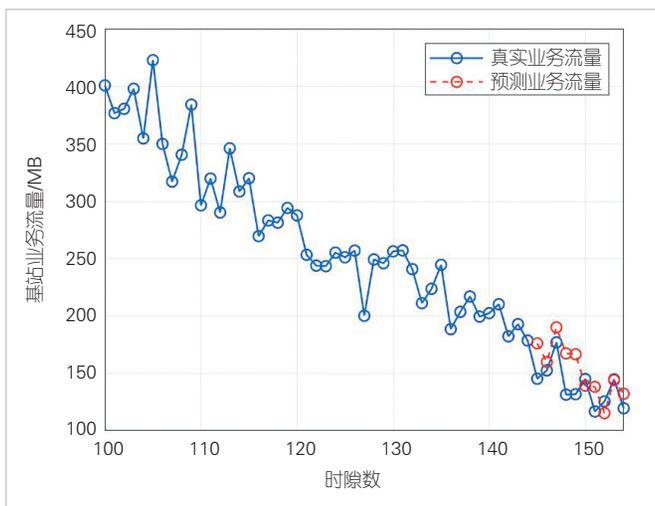
我们选取哈佛大学公开的一个基站流量数据集^[16]作为数据来源。该数据集记录了意大利电信公司于2013年11月1日—2014年1月1日在米兰市采集的区域流量信息。该数据集将区域划分为 100×100 个小区，每隔10 min记录一次当前区域内的短信业务、话音业务及互联网业务的流量数据。每一条数据均包含小区编号、时间戳、国家代码、短信接收流量、短信发出流量、电话呼入流量、电话呼出流量以及互联网流量。我们只选取其中一个小区的互联网业务流量，以用于分析与预测。我们采用30 d共4 320条数据，其中29 d的4 176条数据作为训练集，1 d的144条数据作为测试集，即训练集和测试集的比例为29 : 1。

我们采用3层LSTM网络，输入层节点数目为 1×144 ，隐藏层节点数目为200，输出层节点数为12，采用Adam优化器，损失函数采用MSE，对输入数据进行线性归一化。

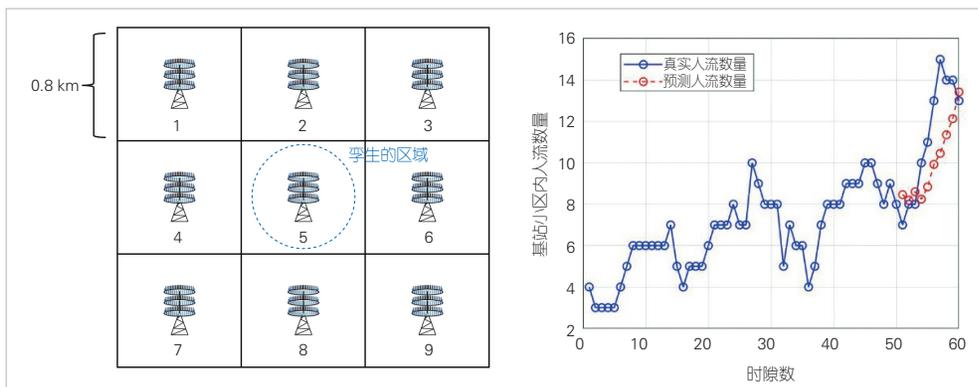
我们设置 $P_f = 144$ ， $L_f = 12$ ，即使用144个时隙（单时隙长度为10 min）的业务流量来预测未来12个时隙的业务流量。从图5中可以看出，预测值与真实值在趋势上与幅度上都较为接近。LSTM方法能较好地预测未来12个时隙互联网业务流量总体下降走势。训练收敛后，LSTM最终在测试集上取得了81.2%的准确率。

3.3 用户移动轨迹预测生成

我们选取韩国科学技术学院公开的用户移动轨迹数据集^[17]。该数据集每30 s记录一次92名用户的具体坐标，其中所有用户的最短记录时长为250 min。由于预测的是基站所在小区内的人流数量，因此需要根据用户移动轨迹数据集中的坐标信息，为基站划定小区的范围。简单起见，我们假设基站的小区为正方形区域。用户的移动行为具备显著的聚集特征，即绝大多数用户偏向于在某些区域内活动，只有极少数用户会前往较为遥远的区域。我们决定不依据用户最大的活动范围来划分区域，因为这会造成只有少量区域有用户关联，而其他大部分区域没有用户。如图6所示，将用户的活动范围划分成9个 $0.8 \times 0.8 \text{ km}^2$ 的标准正方形，最终形成一个 $2.4 \times 2.4 \text{ km}^2$ 的九宫格，其中每个正方形格子拥有一个基站。根据最小距离关联原则，用户至与其距离最近的基站进行关联。我们共采用数据集中的500条用户坐标数据，并将其关联到各个基站中。本文对九宫格中的5号基站的人流数量进行时序预测生成，其中，225 min（450条数据）为训练集，25 min（50条数据）为测试集，划分训练集和测试集的



▲图5 时隙为10 min时的基站业务流时序预测



▲图6 时隙为30 s时的用户移动轨迹时序预测

比例为9:1。

我们采用3层LSTM网络,输入层节点数目为 1×50 ,隐藏层节点数目为200,输出层节点数为10,采用Adam优化器、MSE损失函数,对输入数据进行线性归一化处理。

我们设置 $P_{lr} = 50$, $L_{lr} = 10$,即使用50个时隙(单时隙长度为30 s)的基站蜂窝人流量来预测未来10个时隙的基站小区内人流量。从图6可以看出,LSTM方法能较好地预测未来10个时隙的蜂窝基站人流量总体上升走势。训练收敛后,LSTM最终在测试集上取得了82.0%的准确率。

4 结束语

在未来的6G时代,基于数字孪生的移动通信网络具有广阔的应用前景。本文利用数据驱动的长短期神经网络的方法,对无线信道、基站业务流和用户移动轨迹进行时序预测。结果表明,这些预测最终均达到了80%以上的准确率。该方法生成了移动通信网络中关键数据的数字镜像,为无线链路和网络的智能传输策略提供了预训练的高精度数字孪生环境。

致谢

感谢电子科技大学信息与通信工程学院的车畅、杨子慕、陈昌彬3位同学对本论文做出的贡献。

参考文献

- [1] ZHANG T, REN G, MING H, et al. Application exploration of digital twin in rail transit health management [C]//Proceedings of 2022 Global Reliability and Prognostics and Health Management. IEEE, 2022: 1-5. DOI: 10.1109/phm-yantai55411.2022.9942083
- [2] GOLIZADEH A Y, BADIEI A, ZHAO X D, et al. A constraint multi-objective evolutionary optimization of a state-of-the-art dew point cooler using digital twins [J]. Energy conversion and management, 2020, 211: 112772. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112772
- [3] CHAKSHU N K, CARSON J, SAZONOV I, et al. A semi-active human digital twin model for detecting severity of carotid stenoses from head vibration—a coupled computational mechanics and computer vision method [J]. International journal for numerical methods in biomedical engineering, 2019, 35(5): e3180. DOI: 10.1002/cnm.3180
- [4] IMT-2023(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021
- [5] SHEN G Q, LEI L, LI Z L, et al. Deep reinforcement learning for flocking motion of multi-UAV systems: learn from a digital twin [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(13): 11141-11153. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3127873
- [6] ZHANG K, CAO J Y, ZHANG Y. Adaptive digital twin and multiagent deep reinforcement learning for vehicular edge computing and networks [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2022, 18(2): 1405-1413. DOI: 10.1109/TII.2021.3088407
- [7] WANG X C, MA L F, LI H C, et al. Digital twin-assisted efficient reinforcement learning for edge task scheduling [C]//Proceedings of 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). IEEE, 2022: 1-5. DOI: 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860495
- [8] LUO Z Y, WU C, LI Z P, et al. Scaling geo-distributed network function chains: a prediction and learning framework [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2019, 37(8): 1838-1850. DOI: 10.1109/JSAC.2019.2927068
- [9] YU P, ZHOU F Q, ZHANG X, et al. Deep learning-based resource allocation

- for 5G broadband TV service [J]. IEEE transactions on broadcasting, 2020, 66(4): 800-813. DOI: 10.1109/TBC.2020.2968730
- [10] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural computation, 1997, 9(8): 1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
- [11] LIPTON Z C, BERKOWITZ J, ELKAN C. A critical review of recurrent neural networks for sequence learning [EB/OL]. [2023-04-16]. <https://arxiv.org/abs/1506.00019>
- [12] YANN L. A theoretical framework for back-propagation [EB/OL]. [2023-04-16]. https://www.researchgate.net/publication/2360531_A_Theoretical_Framework_for_Back-Propagation
- [13] TSE D, VISWANATH P. Fundamentals of wireless communication [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- [14] WANG W, ZHOU C H, HE H L, et al. Cellular traffic load prediction with LSTM and Gaussian process regression [C]//Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2020: 1-6. DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9148738
- [15] 3GPP. User equipment (UE) radio transmission and reception: 3GPP TS 38.521-3 [S]. 2022
- [16] Harvard Dataverse. A multi-source dataset of urban life in the city of Milan and the Province of Trentino Dataverse [EB/OL]. [2023-04-16]. <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/EGZHFV>
- [17] Data World. A user movement trajectory dataset from the Korean academy of science and technology [EB/OL]. [2023-04-16]. <https://data.world/crawdad/human-mobility-data-collected>

作者简介



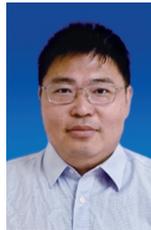
梁广明, 电子科技大学信息与通信工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为面向移动通信网络的数字孪生、机器学习在无线通信中的应用、数能一体化通信网络等。



杨鲲, 电子科技大学特聘教授、数能网络实验室主任、国家海外高层次人才计划人才、欧洲科学院院士、IEEE Fellow、IET Fellow; 研究领域包括无线通信和网络、未来网络技术以及移动边缘计算等; 发表论文300余篇, 获授权发明专利20余项。



刘强, 电子科技大学长三角研究院(衢州)副教授; 长期从事通信与网络相关的教学和科研工作, 主要研究方向为物联网、无线传感器网络、无线自组织网络、低功耗广域网、分子通信等; 发表论文40余篇。



陈建军, 中兴通讯股份有限公司无线架构工程师; 曾担任中兴通讯5G分布式皮基站产品经理, 负责TD-SCDMA网络组网性能优化、TD-LTE高速组网方案制定; 主要研究方向为下一代无线通信组网架构。

数字孪生边缘网络



Digital Twin Edge Networks

张彦/ZHANG Yan¹, 卢云龙/LU Yunlong²

(1. 奥斯陆大学, 挪威 奥斯陆 0317;
2. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 中国 北京 100044)
(1. University of Oslo, Oslo 0317, Norway;
2. State Key Lab of Rail Traffic Control & Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230625.1757.002.html>

网络出版日期: 2023-06-26

收稿日期: 2023-04-25

摘要: 面向未来网络的愿景与需求, 融合区块链与联邦智能技术, 提出了一种新的数字孪生边缘网络架构, 并探究了数字孪生边缘网络部署与实施过程中所面临的主要挑战与关键问题, 如虚实孪生映射与孪生体迁移等。所提方案能够在未来网络中构建低时延、高可靠、安全可信的边缘智能系统, 可以有效推动未来6G网络泛在智能连接愿景的落地与实现。

关键词: 6G; 数字孪生网络; 联邦学习; 边缘智能

Abstract: Focusing on the future vision and requirements of 6G networks, a new integrated architecture called the Digital Twin Edge Network (DITEN) is proposed, which is based on blockchain and federated intelligence. By utilizing techniques such as resource optimization and reinforcement learning, the challenges of digital twin mapping and digital twin migration during the deployment and implementation of DITEN are explored. The proposed solution aims to establish low-latency, high-reliability, secure, and trustworthy edge intelligence in future networks, thereby facilitating the realization of the pervasive intelligence vision of 6G.

Keywords: 6G; digital twin networks; federated learning; edge intelligence

引用格式: 张彦, 卢云龙. 数字孪生边缘网络[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 21-25. DOI:10.12142/ZTETJ.202303005

Citation: ZHANG Y, LU Y L. Digital twin edge networks [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 21-25. DOI:10.12142/ZTETJ.202303005

1 边缘智能网络概述

无线通信及物联网技术的飞速发展, 推动了万物互联时代的快速到来。在云-边-端协同的架构下, 海量物联网设备、传感器终端等通过无线接入网络, 带来了极大的计算与传输负载。未来6G网络以超低时延、超高可靠、泛在智能为特征, 旨在实现万物智联、数字孪生的美好愿景。然而, 传统集中式处理架构需要经过较长的传输路径, 难以满足网络中低时延、高可靠的处理需求。在这种背景下, 边缘智能网络成为实现6G泛在智能连接的关键驱动范式。基于数字孪生、联邦学习等一系列新兴技术, 通过融合边缘计算与人工智能, 边缘智能网络将计算和存储推进至用户侧, 能够大幅缩短传输距离, 提升响应的时延表现。

面向未来6G泛在连接, 智能边缘网络对时延、资源利用效率、能耗等提出了更为严格的业务需求。然而, 边缘设

备受限的资源与智能计算的高资源需求之间的矛盾, 在海量连接的情况下变得尤为突出, 成为边缘智能网络亟需解决的问题。研究者们利用优化理论^[1]、强化学习^[2]等方法进行计算卸载、资源优化等调度决策, 从而提升有限资源利用率, 缓解资源供需矛盾。然而, 资源的优化调度在较大程度上依赖于资源状态与需求的感知, 以实现精准高效的匹配。随着未来网络规模的迅速扩张, 网络拓扑结构日益复杂, 动态异构场景下资源的优化调度面临着严峻挑战。

本文提出数字孪生边缘网络新型架构, 通过在边缘网络中融合区块链、联邦智能技术, 实现数字孪生的高效构建; 对于数字孪生边缘网络的构建和运行过程中所面临的关键基础性问题(时延、容错、效率)进行了深入分析, 并对移动性场景下数字孪生的构建与迁移问题进行了详细探讨。

2 关键驱动技术

2.1 数字孪生

数字孪生是数字孪生边缘网络的关键支撑技术, 同时也

基金项目: 国家自然科学基金(62201030); 北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金资助(L211013)

是6G的关键驱动技术。数字孪生通过在虚拟空间建立物理对象的数字镜像，实现从物理世界到数字空间的映射以及虚实世界间的实时同步。整个数字孪生集成系统通常由物理对象，物理对象的虚拟孪生、数据、服务以及它们之间的连接组成^[3]，是物理世界实体的虚拟表示。通过挖掘丰富的历史和实时数据，并借助先进的算法模型，数字世界能够对物理实体或者过程进行模拟、验证、预测、控制，从而获得物理世界的最优决策状态^[4]。在网络边缘构建数字孪生，可以有效减小基于传统云计算建模的高通信负荷，提升网络的运行效率。如图1所示，数字孪生系统由物理系统、虚拟模型、人工智能（AI）分析3部分组成。物理系统中的边缘节点（如基站、手机、车辆等）可以收集物理设备的运行状态，通过无线通信技术与对应的虚拟孪生体实时同步数据。数字孪生体可以部署在边缘云或者边缘服务器，从而贴近物理实体以进行实时的系统状态更新。在数字虚拟空间，借助AI、大数据等技术，完成数字孪生体的仿真、实时优化反馈、智能计算等，以支持物理平面和虚拟平面的实时交互，为物理系统提供进一步的优化决策和反馈，从而实现低延迟、高可靠、高效、安全的通信传输与边缘计算。

2.2 区块链

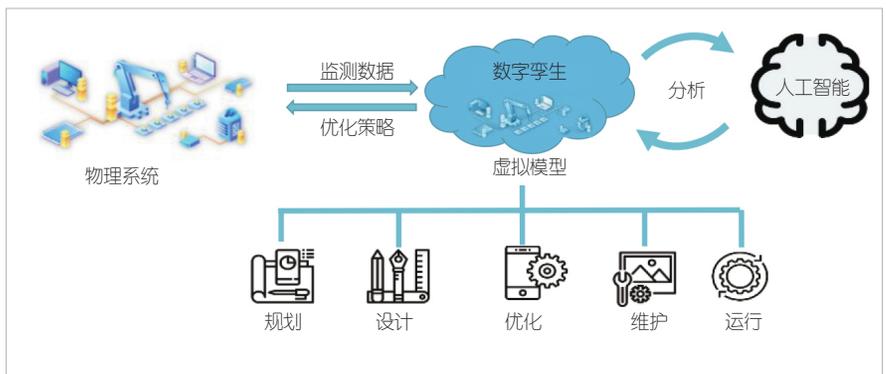
无线通信技术的快速发展及各种新兴应用的爆发式增长，使得无线网络的安全性、可靠性等问题愈发凸显。区块链是一种去中心化、不可篡改、可溯源、安全可靠的分布式账本技术，融合了加密算法、点对点传输、共识协议等多种新型技术。在无线边缘网络中，区块链技术可以为数据共享^[5]、身份验证、智能合约等应用提供一种安全、可靠、高效的去中心化协作方式。

通过将区块链嵌入边缘网络的方式将数字孪生体进行连接，可以有效构建可靠的数字孪生边缘网络，以增强边缘数字孪生系统的安全性与可靠性。由于网络中海量连接的边缘节点具有分布式和去中心化等特征，利用同样分布式的区块链能够显著提升网络的内生安全能力。同时，通过在互不可信的多方设备间建立一种安全可靠的协作机制，区块链可以有效地保证链上数据的安全性。在数据传输与处理过程中，传统边缘计

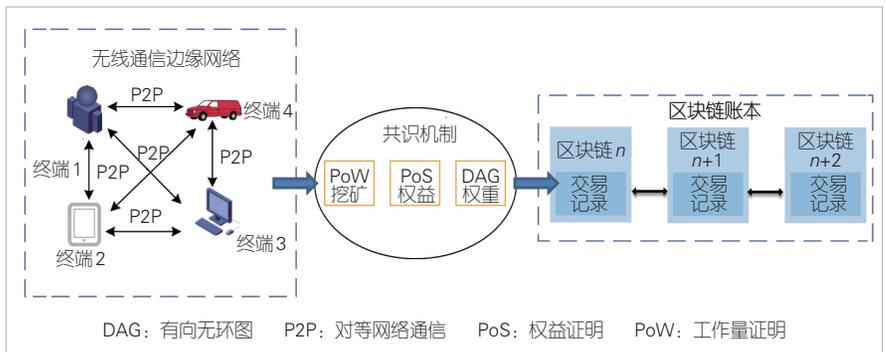
算网络将终端设备的海量数据传输到边缘服务器进行集中处理，难以保证传输及存储过程中的数据隐私安全，并会带来较高的存储、通信与计算负载。如图2所示，利用区块链分布式的节点来对数字孪生边缘网络进行接入认证，对数据进行存储和共享，可以有效保证网络的安全性和可靠性。此外，利用区块链的智能合约及密码学技术，可以对接入数字孪生边缘网络的设备进行统一的身份验证与访问授权，从而保证网络的安全性与数据的隐私性。

2.3 联邦智能

在未来数字孪生边缘网络中，接入设备数量的增加导致产生的数据呈现指数增长，而模型的精准构建需要依赖于大量数据的计算与训练，有限的网络通信资源难以负担如此庞大数量的数据传输。这也给中心服务器造成了巨大的计算压力。此外，数据在带来巨大价值的同时，其隐私保护也面临严峻挑战。为了缓解网络通信和计算的压力，同时保护用户的数据隐私，以联邦学习^[6]为代表的联邦智能为数字孪生边缘网络的模型构建提供了解决方案。在联邦学习中，用户在本地图先基于自身感知、收集到的数据完成模型训练，再将本地模型参数上传到服务器进行全局模型的更新；之后，服务器将更新的全局模型发送给用户进行新一轮的本地训练，并



▲图1 数字孪生系统



▲图2 区块链应用于边缘网络

不断迭代与重复这个过程直至达到理想的准确度或预设的迭代次数。联邦智能在实时性要求较高的自动驾驶、路径规划等场景中有着广泛的应用。在智能交通场景中，传统基于云端集中式架构的道路流量预测需要大量的数据传输与集中式计算，难以满足实时驾驶决策的需求。而在基于联邦学习的智能交通^[7-8]场景中，如图3所示，利用联邦学习模型结合少量的本地路况数据，可以实现快速实时的交通流量预测。总的来说，利用联邦智能构建数字孪生边缘网络，具有以下几个优势：首先，物理用户从数据提供方转变为计算设备，用户无须上传本地数据集，极大地保护了用户隐私；其次，打破了现有智能模型中因隐私泄露造成的数据孤岛困境，能够有效激励更多数据持有方参与训练，扩充了数字孪生模型的训练数据量，提高了数字孪生模型的准确度；最后，因为只需将数字孪生模型的参数进行上传，大大降低了网络通信资源的消耗，减轻了服务器的计算负担，并且减少了任务的执行时延。

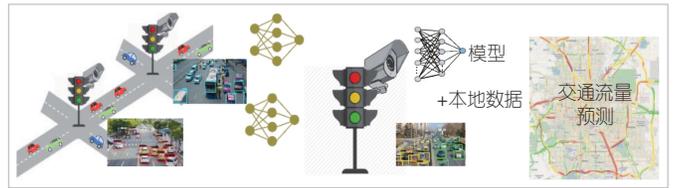
3 数字孪生边缘网络

3.1 系统架构

为了实现高精度建模与低时延同步，数字孪生需要依赖于大量的数据传输与计算分析，数字孪生的构建及运行也因此面临严峻挑战。为此，我们通过融合联邦智能与区块链技术，提出数字孪生边缘网络^[9]架构，如图4所示。整个网络架构分为用户层（物理实体层）、边缘层（建模层），以及孪生网络层3部分。

1) 用户层：由移动终端、车辆等物理实体组成。这些用户设备的计算和存储能力较为有限，通过无线的方式接入边缘层的基站、路旁单元等边缘设备。用户终端所具备的部分存储和算力将被用于运行联邦学习的本地计算，计算的结果通过无线传输上传到边缘层。

2) 边缘层：在边缘层，一些基站配备了边缘计算（MEC）服务器来对所收集的用户层数据执行聚合计算任务，而其他基站则为终端用户提供无线连接服务。这些基站与服务器通过区块链实现可靠的存储与连接。用户层物理实体的数字孪生体由 MEC 服务器利用联邦学习等 AI 算法进行实时的建模、更新、维护。由于物理层中实体的数量远远大于数字



▲图3 联邦智能应用于智能交通

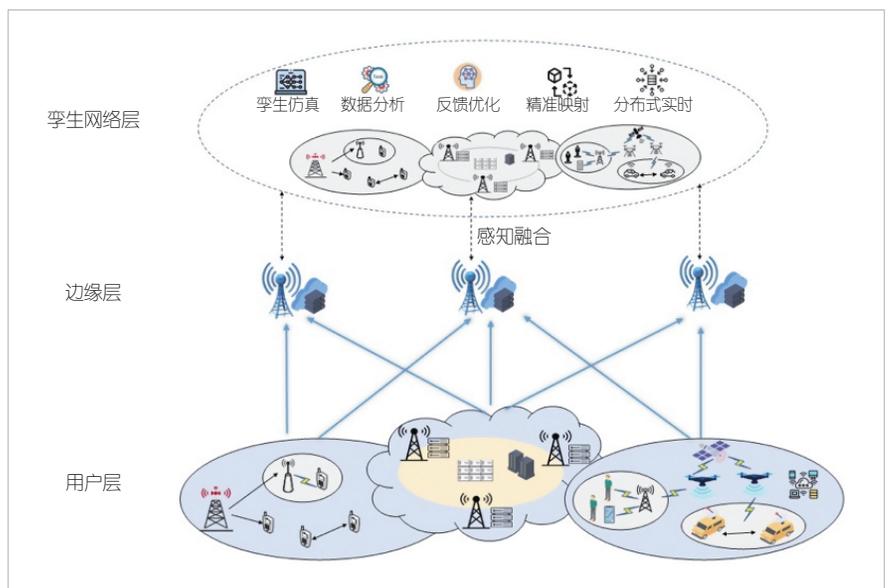
孪生层中 MEC 服务器的数量，因此一个 MEC 服务器可能会映射和维护多个物理实体的数字孪生体。

3) 孪生网络层：在孪生网络层，大量的数字孪生体通过核心网与云服务器建立可靠的连接，形成数字孪生网络。数字孪生体之间相互连接并共享各自的数据与资源，结合 AI 等分析技术，可以有效实现网络整体态势的多维度感知。

在上述数字孪生边缘网络中，用户/物理平面中的设备（包括车辆、传感器、智能终端等）通过无线通信技术实时与相应的虚拟孪生体进行数据和状态的同步。同时，这些设备还接受来自其虚拟孪生体的反馈，以对物理系统进行即时的控制和校准。因此，移动边缘网络应提供低延迟、高可靠性、高速度、强隐私和安全保护的通信和计算能力，以支持物理平面和虚拟平面之间的实时交互。

3.2 优势与挑战

我们提出的数字孪生边缘网络，是基于区块链、联邦学习等技术进行构建的，兼具联邦学习及区块链的分布式、联合智能、可信等特征，并具有一系列的性能优势。首先，能够进行实时的计算与建模分析。通过联邦学习等分布式智能算法，将计算推进至用户终端，实现低时延的数据分析与训



▲图4 数字孪生边缘网络架构

练建模。其次，支持可靠的无线通信传输。通过区块链的接入认证、安全存储，以及共识机制，显著提升通信网络的可靠性。对模型参数的传输，能够将原始数据留在用户端，从而增强模型的隐私性。最后，数字孪生网络通过收集和映射物理网络的实时状态，利用AI等优化分析工具，能够提供优化的模拟和决策，从而提升物理系统的运行性能。

与此同时，数字孪生边缘网络也面临着诸多挑战：首先，数字孪生的构建与维护需要耗费大量的资源^[10]。数字孪生体的构建基于大量的运行数据采集及分析计算，这一过程需要消耗大量的通信、存储与计算资源。其次，终端设备能力异构。移动终端、物联网传感器、车辆等不同的用户设备所具备的计算、通信与存储能力异构，在低时延、高可靠的业务需求下，异构终端的协同面临较大挑战。最后，无线带宽资源有限。数字孪生模型的准确构建基于大量数据的传输与同步，边缘网络中有限的带宽资源难以满足实时传输的需求，需要探索更优的数据参数特征提取机制以降低数据量，并且进行带宽资源的合理分配以提升频谱效率。

3.3 关键问题

1) 孪生业务需求

数字孪生边缘网络将在6G网络低时延、高可靠、泛在智能的支撑方面发挥重要作用。其中，在数字孪生体的构建与运行过程中，存在一些关键基础性问题，需要进一步探索与研究：

a) 还有哪些新的建模方法？数字孪生的建模需要利用物理实体的运行数据以及AI分析，来捕捉物理对象的主要特征。因此，如何针对异构多样的不同网络实体，借助新的建模方法，构建合适的数字孪生模型，是数字孪生边缘网络需要解决的基础性问题。

b) 如何提升效率，降低时延？数字孪生所同步数据的传输和数字孪生模型的计算需要在资源受限的条件下实现较高的通信和计算效率。数字孪生模型应该以超低的时延，甚至实时的方式进行持续更新。因此，如何利用优化或者资源分配等技术^[10]，提升数字孪生网络的运行效率，值得深入研究。

c) 如何保障可靠性？数字孪生的采集数据及训练模型的安全性和隐私性需要在传输及计算过程得到保障。数字孪生模型如何被可信地构建需要进一步探究^[11]。

2) 虚实孪生映射

在数字孪生网络的部署与应用方面，同样面临诸多挑战，例如数字孪生体与物理实体之间的映射关联，即如何确定在哪个边缘服务器上放置与物理实体对应的孪生体。如何

建立物理实体与边缘服务器间的虚实关联映射（如图5所示），是数字孪生边缘网络需要解决的首要问题。为此，通过综合考虑不同终端及服务器的存储、计算能力以及传输链路的通信能力，我们提出基于优化理论、强化学习算法的物理实体与数字孪生体关联映射方案，实现数字孪生体的高效、准确构建及维护^[8]。

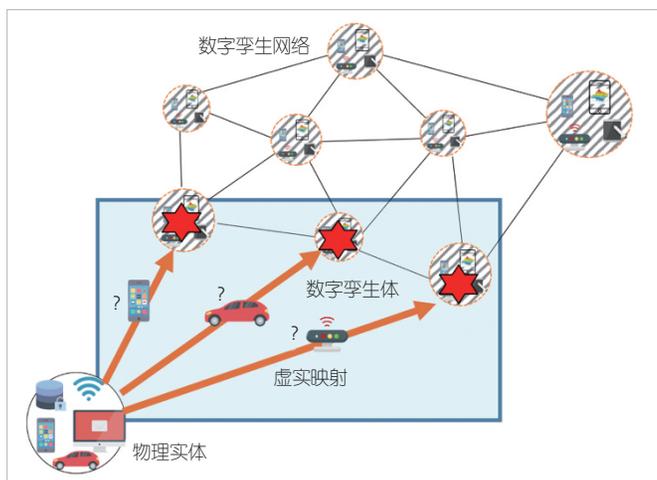
3) 孪生体跨域迁移

在轨道交通、车联网等高移动场景中，数字孪生体如何依据物理实体的移动进行迁移，以建立低时延、高可靠的同步连接，是数字孪生边缘网络高效运行的关键问题。为了解决物理实体因移动性所导致的远距离传输与跨域同步问题，我们提出基于多智能体迁移学习的数字孪生迁移策略。该策略充分考虑了多域网络状态，并综合考虑物理实体的移动性及所具备的资源，旨在确立最优的跨域迁移策略，实现实时可靠、智能高效的数字孪生运行与维护，为物理系统持续提供反馈与优化控制。

4 应用场景

本文中，我们所提出的数字孪生边缘网络技术方案，在智能制造、智慧工厂、智能交通、智慧医疗等场景中有着广泛的应用前景。

1) 智能制造。传统的智能制造虽然可以基于历史数据和仿真来优化产品制造过程，但由于生产制造之间数据交互是非实时的，因此面临生产效率低、产品生命周期过长等问题。数字孪生边缘网络可以构建物理对象与虚拟空间的映射连接，通过对大量历史数据和实时数据的分析，将物理生产制造系统与数字空间集成在一起，从而完成对整个产品生命周期的分析。通过在数字孪生空间进行计算与分析，数字孪生边缘网络能够获得优化的操作流程与指令，为物理空间的产品生产和制造过



▲图5 数字孪生网络中的虚实关联映射

程提供指导,从而提高产品制造的质量和效率。

2) 智慧工厂。在工业物联网中,数字孪生边缘网络可以通过收集数据并创建计算模型来对工业机械设备进行设计和测试,以减少开发成本和时间,提高工业设备的运行安全性和性能^[2]。具体来说,数字孪生边缘网络通过实时分析工厂设备运行数据来创建数字化孪生体,监测和评估工业设备的全生命周期状态,进行风险预测、运维优化、应用数据处理、故障诊断等。然而,在工业物联网领域应用数字孪生边缘网络,仍面临一些挑战:由于工业设备需要精确的控制和指令来确保生产安全,因此数字孪生模型应该具有很高的精度;在一些特殊工业场景中,工业设备与数字孪生边缘服务器之间的通信是不可靠的,需要设计具有一定容错率的数字孪生模型来确保孪生体的稳定性。

3) 智能交通。传统的交通系统存在交通堵塞和交通事故等严重问题。数字孪生边缘网络通过模拟数字孪生体的城市交通流,并进行实时分析与优化,从而有效地预测和避免交通事故,改善交通管理和优化行驶路径。此外,通过数字孪生体的实时模拟和评估,数字孪生边缘网络还可以检测交通设施的使用情况,并进行维护决策优化,以提高交通设施的效用。然而,数字孪生边缘网络在智能交通方面也面临着一些挑战:一方面,动态和时变的运输环境对建立准确的交通数字孪生模型提出了严峻的挑战;另一方面,包含智能汽车运行状态和信息的大量数据需要传输到数字孪生边缘服务器中。不可靠的通信环境和高传输延迟增加了构建交通数字孪生体的难度。

4) 智慧医疗。在可穿戴物联网设备的辅助下,数字孪生边缘网络可以通过实时收集物联网传感器和智能监测设备的数据来检测患者的健康状况,从而建立数字孪生体。数字孪生体可以通过密切监测患者的状况,分析患者的生理状态、药物使用信息、精神状态和生活规律等情况,预测患者未来的健康状况并提供全方位的医疗护理。数字孪生体还可以通过患者体征的观测,协助医生进行手术模拟,提高手术成功率。此外,数字孪生体也将在医疗设备的监控、管理和维护中发挥重要作用。

5 结束语

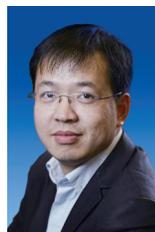
数字孪生是推动未来6G网络发展、实现泛在智能连接的关键驱动力。为了解决边缘智能网络中资源紧缺这一问题,我们提出融合区块链与联邦学习的数字孪生边缘网络架构,并详细分析了所提架构的优势及面临的主要挑战;进一步地,探讨了数字孪生边缘网络部署与实施过程中所面临的孪生映射与迁移两个主要问题,并给出了未来的典型应用场

景。数字孪生边缘网络将为未来6G网络中实现低时延、高可靠、强安全的边缘智能提供有效的解决方案,为泛在智能连接愿景的实现奠定重要基础。

参考文献

- [1] REN J, MAHFUJUL K M, LYU F, et al. Joint channel allocation and resource management for stochastic computation offloading in MEC [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(8): 8900–8913. DOI: 10.1109/TVT.2020.2997685
- [2] LU Y., HUANG X, ZHANG K, et al. Blockchain empowered asynchronous federated learning for secure data sharing in Internet of vehicles [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(4): 4298–4311. DOI: 10.1109/TVT.2020.2973651
- [3] 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
- [4] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021
- [5] LU Y L, HUANG X H, DAI Y Y, et al. Blockchain and federated learning for privacy-preserved data sharing in industrial IoT [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2019, 16(6): 4177–4186. DOI: 10.1109/TII.2019.2942190
- [6] YANG Q, LIU Y, CHEN T, et al. Federated machine learning: concept and applications [J]. ACM transactions on intelligent systems and technology (TIST), 2019, 10(2): 1–19
- [7] 张彦, 张科, 曹佳钰. 边缘智能驱动的车联网 [J]. 物联网学报, 2018, 2(4): 40–48. DOI: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00080
- [8] AI B, MOLISCH A F, RUPP M, et al. 5G key technologies for smart railways [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 856–893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595
- [9] LU Y L, HUANG X H, ZHANG K, et al. Low-latency federated learning and blockchain for edge association in digital twin empowered 6G networks [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2021, 17(7): 5098–5107. DOI: 10.1109/TII.2020.3017668
- [10] GEHRMANN C, GUNNARSSON M. A digital twin based industrial automation and control system security architecture [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2020, 16(1): 669–680. DOI: 10.1109/TII.2019.2938885
- [11] MILTON M, CASTULO DE LA O, GINN H L, et al. Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics [J]. IEEE transactions on power electronics, 2020, 35(9): 9850–9864. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2971775

作者简介



张彦, 挪威奥斯陆大学教授、欧洲科学院院士、挪威皇家科学院院士、挪威工程院院士、IEEE Fellow、IET Fellow、全球高被引科学家,担任多个IEEE期刊及中国核心期刊的编委;主要研究领域为新一代无线通信网络和智能安全物联网。



卢云龙, 北京交通大学全国重点实验室副教授;主要研究方向为数字孪生网络、边缘智能、物联网安全等;获得IEEE车辆技术学会Daniel E. Noble Fellowship Award、北京市科协首都前沿学术成果。

无线网络孪生中的统计信道建模方法:现状与前沿



Statistical Channel Modeling Methods in Wireless Network Twinning: Current Status and Frontiers

张树韬/ZHANG Shutao^{1,2}, 薛焯/XUE Ye³,
史清江/SHI Qingjiang^{3,4}, 张纵辉/CHANG Tsung-Hui^{1,5}

(1. 香港中文大学(深圳), 中国 深圳 518172;
2. 鹏城实验室, 中国 深圳 518055;
3. 深圳市大数据研究院, 中国 深圳 518172;
4. 同济大学, 中国 上海 200082;
5. 广东省大数据计算基础理论与方法重点实验室, 中国 深圳 518172)
(1. The Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), Shenzhen 518172, China;
2. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China;
3. Shenzhen Institute of Big Data, Shenzhen 518172, China;
4. Tongji University, Shanghai 200082, China;
5. GuangDong Key Laboratory of Big Data Computing, Shenzhen 518172, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230623.1021.002.html>

网络出版日期: 2023-06-25

收稿日期: 2023-04-25

摘要: 数字孪生作为一种全新的数据驱动范式开始赋能各行各业。着重讨论了无线网络孪生的发展现状和无线网络孪生中最基础的数字孪生信道建模技术。针对现有数字孪生信道建模方法的不足,设计了一套面向无线网络的在地化统计信道建模方法,旨在实现对无线信道高效准确的数字孪生。搭建了可视化平台,以展示该数字孪生信道模型对特定无线网络环境大尺度多径统计特性的刻画。最后,展示了设计的数字孪生信道模型在5G无线网络优化中的两种典型应用。

关键词: 角度功率谱; 信道建模; 数字孪生; 网络优化; 稀疏优化

Abstract: Digital twins have emerged as a new data-driven paradigm empowering various industries. The development status of wireless network twinning and the most fundamental digital twin channel modeling techniques are emphasized. In response to the limitations of existing digital twin channels, a localized statistical channel modeling method for wireless networks is proposed to achieve efficient and accurate digital twinning of wireless channels. Furthermore, a visualization platform is introduced to demonstrate how this digital twin channel model characterizes the large-scale multipath statistical properties of specific wireless network environments. Finally, two typical applications of the designed digital twin channel model in the optimization of 5G wireless networks are presented.

Keywords: angular power spectrum; channel modeling; digital twin; network optimization; sparse optimization

引用格式: 张树韬, 薛焯, 史清江, 等. 无线网络孪生中的统计信道建模方法:现状与前沿 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 26-31. DOI:10.12142/ZTETJ.202303006

Citation: ZHANG S T, XUE Y, SHI Q J, et al. Statistical channel modeling methods in wireless network twinning: current status and frontiers [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 26-31. DOI:10.12142/ZTETJ.202303006

1 无线网络孪生

数字孪生是一种将现实世界的物理系统与数字世界的虚拟模型相结合的技术。这一概念最早可追溯至2002年密歇根大学 M. GRIEVES 教授提出的产品生命周期管理 (PLM) [1]。2011年美国空军研究实验室在航空航天领域首次提到数字孪生。2013年德国提出工业4.0,随后数字孪生技术在工业制造领域得到关注并被逐渐推广。总的来说,数字孪生技术充分利用传感器生成的实时数据、历史数据等多

种信息,将多学科行业知识集成到虚拟模型中,从而对现实场景进行多物理量、多尺度、多概率的仿真。通过在计算机上创建物理实体的镜像“克隆”,数字孪生具有高预测性能、全生命周期等优势。因此,数字孪生在城市交通、航空航天、医疗卫生等各行各业都受到广泛关注。特别地,本文关注数字孪生技术在无线网络中的具体部署与应用,即如何从真实无线网络中合理地构建出对应的数字孪生网络,我们将这一过程称之为无线网络孪生。

1.1 无线网络孪生的发展现状

随着5G移动通信系统的大规模部署,5G无线网络的规模和异构程度与日俱增。这些网络新型态叠加动态多变的无线信道,使得5G无线网络的部署建设、管理运维和性能优化面临极大挑战^[2]。为了应对这一挑战,无线网络孪生通过使用数字孪生来赋能无线网络,将真实无线网络映射到虚拟空间中,从而能够有效地对真实网络进行建模、仿真、验证、运维和优化^[3-6]。目前,无线网络孪生已经成为一个很有前景的关键移动通信技术,能够被应用于5G无线网络以及未来的6G无线网络^[7-10]。

以图1所示的5G无线网络为例,无线网络孪生基于真实无线网络的历史数据(用户流量分布、基站参数配置等性能指标)来构建数字孪生网络。具体而言,无线网络孪生将数字孪生与无线网络有机结合,把真实无线网络的无线信道、接入网、传输网和核心网一对一地映射到虚拟空间。由于5G无线网络包含增强移动宽带(eMBB)、超可靠低时延通信(URLLC)和海量机器类通信(mMTC)这三大业务场景,无线网络孪生需要支持网络切片技术,为不同服务提供量身定制的资源^[11]。一旦数字孪生网络成功构建,就能够预测不同的基站参数配置下的性能指标,并通过寻优算法生成改善真实无线网络的操作命令。这些操作命令终将被部署到真实无线网络中,从而改善网络性能^[12]。值得一提的是,真实无线网络中的调参难度大、风险极高,可能造成通信中断和经济损失。而在数字孪生网络中进行的优化过程,则不会破坏真实无线网络。与传统基于数据包的网络仿真模拟器(如OMNet++、ns-3等)相比,无线网络孪生能够更高效准确地模拟实际物理网络^[13]。

1.2 无线网络孪生中的信道建模

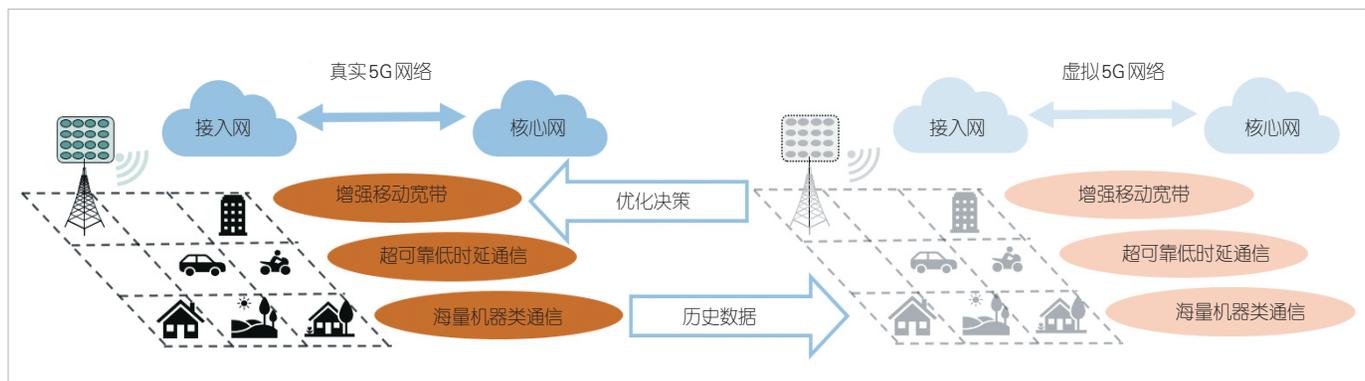
无线网络中的无线信道作为电磁波传递的载体,反映了通信网络环境状况,因此无线信道模型是无线网络系统设

计、研发和评估的基础与前提。在构建无线网络孪生时,数字孪生信道建模起到关键作用,直接影响到无线网络孪生的建模准确性。我们对数字孪生信道建模进行调研,已有的研究工作大致可以分为以下3类。

第1类信道模型基于简化的统计模型来刻画无线信道。传统的COST2100、WINNER II、3GPP 38901等统计信道模型是基于室内室外、城市郊区这类典型通信场景的,无法直接在无线网络孪生中使用,需要适当地简化。在文献[14]中,香港理工大学的研究者在城市孪生网络的研究中将无线信道表示为一维路损。在文献[15]中,东北大学和深圳大学的研究者关注了数字孪生技术在车联网中的应用,在进行信道建模时结合了自由空间一维路损模型和瑞利衰落模型。重庆邮电大学的研究者在文献[16]中研究了数字孪生辅助的边缘网络计算任务卸载问题,其中信道参数被表示为自由空间一维路损系数与复高斯随机变量的乘积。总的来说,这类模型较为简单,忽略了通信性能指标与现实环境间复杂的关系,难以准确描述通信网络环境,无法反应真实无线信道的时空特性。

第2类信道模型是确定性的射线追踪法。以爱立信的数字孪生5G网络为例^[17],爱立信在Omniverse平台中构建了数字孪生5G网络,帮助确定如何放置和配置每个基站以获得最佳覆盖范围和网络性能。数字孪生5G网络为每个基站添加精确位置、高度和天线模式等,能够集成无线电传播数据,并利用射线追踪法来快速可视化和计算覆盖区域中每个点的信号质量。在文献[18]基于智能反射面的太赫兹通信孪生网络研究中,射线追踪法也被用来产生基站到智能反射面的路径,以确定将发射波束反射给用户的最佳智能反射面放置位置。然而,射线追踪法需要通过麦克斯韦方程来计算电磁波的传播,相关计算复杂度过高且依赖于精确的地图信息^[19]。

第3类信道模型使用人工智能和机器学习的方法来表示



▲图1 5G无线网络孪生优化框架

信道。上海科技大学的研究者利用生成对抗神经网络 (GAN) 对高斯白噪声加性信道进行了参数拟合与建模^[20]。类似地,东南大学、紫金山实验室和山东大学的研究者也训练了一个全连接的前馈神经网络来构建孪生信道,即通过输入发射端和接收端的位置、距离和载波频率等参数,神经网络能够输出信道增益、角度扩展以及时延扩展等信道特性^[21]。北京交通大学的研究者在文献[22]中介绍了使用人工智能和机器学习的方法对直射路径和非直射路径进行识别。这一方法也可以对不同的通信场景进行识别,并能对下一时刻和位置的孪生信道进行预测。这类数字孪生信道虽然有可进一步提高建模的精度,但是神经网络的训练需要依赖大量实地测量数据,在大规模无线网络中的扩展应用仍比较困难。

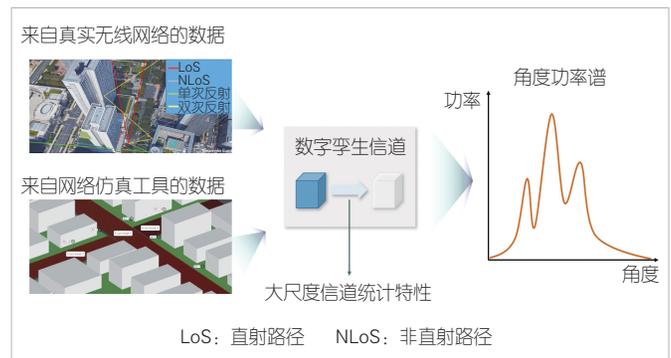
综上所述,现有的数字孪生信道构建方法存在如下局限性:基于简化统计信道模型的方法过于简单,难以真实反应在地化信道状况;基于确定性射线追踪法的信道建模方法计算复杂度过高;基于人工智能和机器学习的信道建模方法过度依赖于大量高质量的实地信道测量数据,数据采集成本过高,不易在大规模网络中进行扩展。

2 数字孪生信道

为了解决以上问题,使得数字孪生信道可以更好地服务于无线网络优化,我们提出一套在地化统计信道建模方法。与面向无线网络中其他应用的信道建模方法不同,我们所提出的建模方法能够更好地适配无线网络优化所需的大尺度信道信息,从而准确高效地刻画在地化场景下的信道统计信息,赋能无线网络优化中的性能预测。基于这一方法,我们还设计了一个可视化平台,用于展示数字孪生信道建模方法的有效性,并将所建立的信道模型部署到5G无线网络优化的两种典型应用中。

2.1 数字孪生信道建模方法

如图2所示,我们提出一套数字孪生信道建模方法。该方法通过从真实世界的路测数据或信道仿真工具(例如DeepMIMO、QuaDRiGa)产生的数据中高效地提取信道角度功率谱(APS)的大尺度统计信息。通过结合先进的稀疏优化技术挖掘信道的统计特征,该建模方法能够以较低复杂度精确刻画信道的在地化场景中的大尺度统计信息^[23-25]。我们提出的在地化统计信道模型优势如下:与第1类简单的信道模型相比,能够感知和刻画在地化场景中特定无线网络环境的多径结构;与第2类复杂度过高的信道模型相比,避免了复杂的方程求解,从而大大降低了复杂度;与第3类基



▲图2 数字孪生信道建模方法

于人工智能和机器学习的信道模型相比,只需要采集一轮路测数据,就能够高效输出信道的角度功率谱大尺度统计特性,经济成本低,可以扩展到大规模的无线网络。

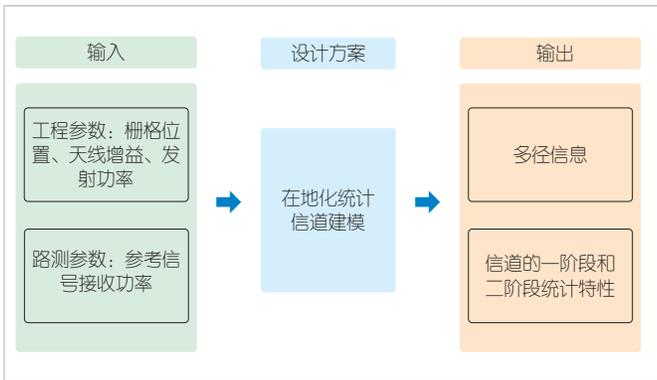
具体而言,我们将给定的二维地理区域划分为 L 个二维方形栅格,每个栅格代表一个特定的地理位置。在 t 时刻,终端在第 l 个栅格可以测量从基站发出的第 m 个波束的参考信号接收功率(RSRP)。波束域RSRP可以表达为:

$$RSRP_m^{(l)}(t) = P \left| \sum_{x,y} h_{x,y}^{(l)}(t) w_{x,y}^{(m)} \right|^2, \quad (1)$$

其中, $h_{x,y}^{(l)}(t)$ 是天线面阵中第 x 行和第 y 列的天线在第 l 个栅格的信道冲激响应, $w_{x,y}^{(m)}$ 是第 m 个波束的预编码权重。为了消除信道快衰变的影响,我们对一段时间内测量到的波束域RSRP求期望和方差,以建立波束域RSRP与信道角度功率谱密度间的一阶和二阶统计关系。接着,我们研究了地理空间与用户信道的时空交互作用机理,利用相邻栅格的信道相关性,进一步采用先进的稀疏信号处理技术,求解三维空间中的每个传输路径的角度功率谱密度^[23-25]。从波束域RSRP中提取的角度功率谱密度统计特性可以反映信道的路径损耗以及阴影衰落等大尺度信息,这个大尺度信息由在地化环境决定,在较长的时间(数周甚至数月)内维持不变,能够满足网络优化的需求。图3给出了数字孪生信道建模输入、输出与处理流程,总结了以上的数字孪生信道建模方法。

2.2 数字孪生信道可视化平台

为了更为直观地展示数字孪生信道建模效果,我们基于实际采集的数据在云服务器上搭建了可视化平台。如图4(a)所示,我们在香港中文大学(深圳)校园进行实测,其中基站发射天线与测量终端存在直射路径。图4(b)将实测场景进行可视化,我们根据基站工参在地图上标定了各个小区的位置和天线朝向,并展示了服务小区与测量终



▲图3 数字孪生信道建模输入、输出与处理流程



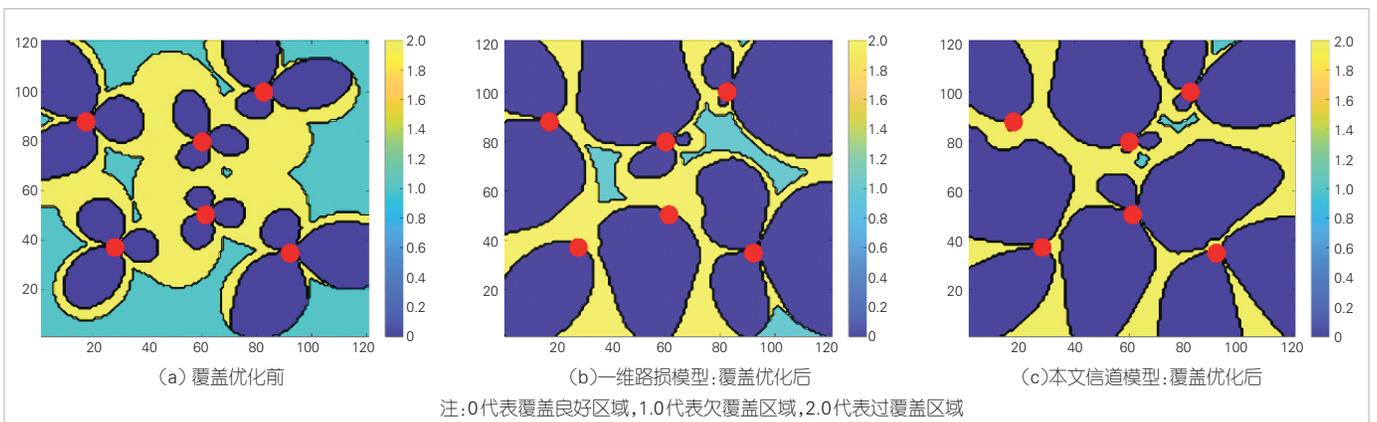
▲图4 数字孪生信道可视化平台

端所在的栅格点A的信道。其中,该信道的最强路径下倾角为 20° ,水平角为 -5° ,这与实测场景中观测到的直射路径的角度基本一致,从而验证的数字孪生信道建模的可靠性。

2.3 数字孪生信道典型应用

为了验证本文提出的数字孪生信道建模方法在5G无线网络优化中的有效性,我们通过两种典型应用进行了仿真,包括网络覆盖优化和在地化码本设计。

1) 网络覆盖优化



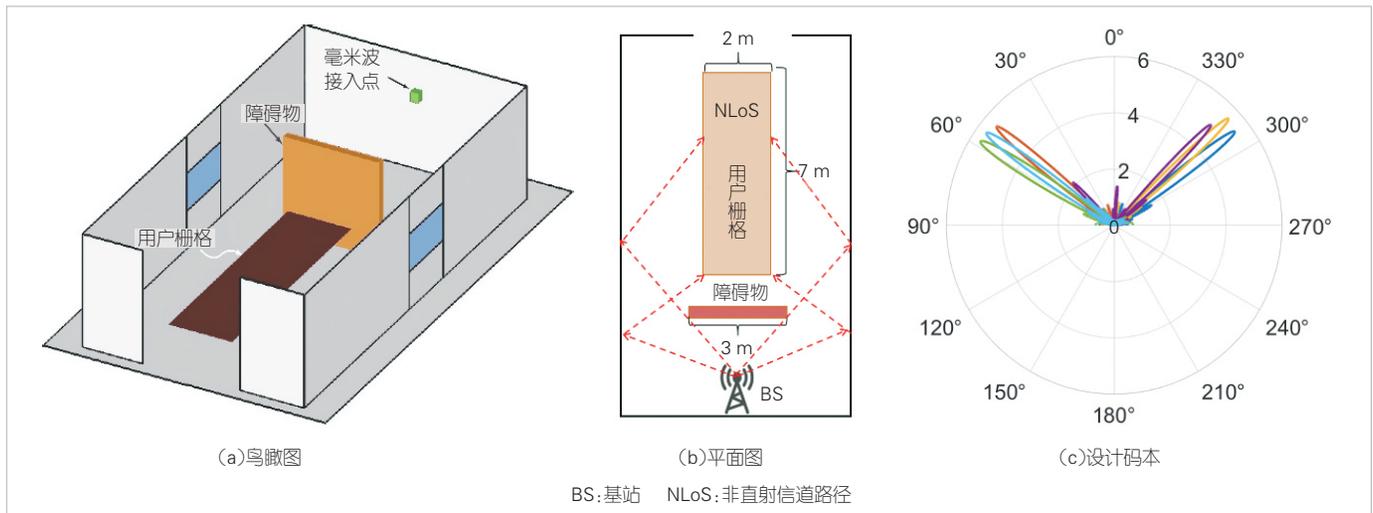
▲图5 基于数字孪生信道的网络覆盖优化

图5展示了基于数字孪生信道的网络覆盖优化结果。我们将给定的地理区域划分为 $L=120 \times 120=14\ 400$ 个栅格,其中红色圆点表示基站,每个基站被划分为3个小区,总共有18个小区。所有的栅格都能够接收到这18个小区发射的信号,并从中选择信号功率最强的小区作为当前栅格的服务小区。我们分别用一维路损模型^[14]和本文提出的数字孪生信道模型来产生小区到每个栅格间的信道。如果当前栅格的服务小区的信号功率小于一个阈值,则说明当前栅格欠覆盖(图5中靛青色的区域);如果当前栅格的非服务小区的信号功率远大于服务小区的信号功率,说明当前栅格受到太强干扰造成过覆盖(图5中黄色区域)。图5中剩下的紫色区域是覆盖良好的区域。

通过黑盒优化^[26],我们发现一维路损模型能够将覆盖良好的区域占比从36%提升到70%,而本文提出的数字孪生信道模型能够进一步将覆盖良好的区域占比提升到75%。这验证了本文提出的数字孪生信道在反映和刻画实际环境方面的优越性。

2) 在地化码本设计

传统的码本设计在角度域进行均匀切分,在每个角度上都发射一个对应的波束,这会带来较大的通信开销。另外,由于实际环境中用户分布的差异,很多波束没有发挥作用,造成通信资源浪费。基于此,我们设计了一个基于数字孪生信道的在地化码本。如图6(a)所示,基站与用户之间的直射路径被障碍物阻挡。如图6(b)所示,非直射信道路径(NLoS)通过室内两边的墙壁反射到用户。如图6(c)所示,经过数字孪生信道数据训练后,在地化码本中的波束能够感知空间的障碍物,自动地避开障碍物,将波束方向调整到两边,从而降低训练对齐波束的通信开销,提升通信系统的效率。



▲图6 基于数字孪生信道的在地化码本设计

3 结束语

无线网络孪生可以利用数字孪生技术来赋能无线网络。以5G无线网络为例,无线网络孪生能够为5G无线网络的性能推断、预测和优化决策提供高效模型支撑。我们提出的数字孪生信道建模方法通过生成与在地化场景大尺度统计分布一致的模拟信道,确保了对真实无线网络的准确反映。数字孪生信道的可视化平台能够直观展示无线网络环境下的信道多径角度功率谱,为覆盖优化和在地化码本设计这两种5G网络优化典型应用提供了新的思路。未来,数字孪生信道需要满足灵活性、泛化性和自适应性等要求,以适应日益复杂的无线网络环境。数字孪生信道有着广阔的发展前景,在5G和6G无线网络的发展中将扮演越来越重要的角色。

参考文献

[1] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [M]//Transdisciplinary perspectives on complex systems. Cham: Springer International Publishing, 2016: 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4

[2] LI Y, ZHANG S T, REN X H, et al. Real-world wireless network modeling and optimization: from model/data-driven perspective [J]. Chinese journal of electronics, 2022, 31(6): 991-1012. DOI: 10.1049/cje.2022.00.191

[3] NGUYEN H X, TRESTIAN R, TO D, et al. Digital twin for 5G and beyond [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(2): 10-15. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000343

[4] 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

[5] 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

[6] 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

[7] SHEN X M, GAO J, WU W, et al. Holistic network virtualization and

pervasive network intelligence for 6G [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 1-30. DOI: 10.1109/COMST.2021.3135829

[8] 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

[9] 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

[10] KHAN L U, SAAD W, NIYATO D, et al. Digital-twin-enabled 6G: vision, architectural trends, and future directions [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(1): 74-80. DOI: 10.1109/MCOM.001.21143

[11] WANG H Z, WU Y L, MIN G Y, et al. A graph neural network-based digital twin for network slicing management [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2022, 18(2): 1367-1376. DOI: 10.1109/TII.2020.3047843

[12] ALMASAN P, FERRIOL-GALMÉS M, PAILLISSE J, et al. Network digital twin: context, enabling technologies, and opportunities [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(11): 22-27. DOI: 10.1109/MCOM.001.2200012

[13] HUI L B, WANG M W, ZHANG L, et al. Digital twin for networking: a data-driven performance modeling perspective [J]. IEEE network, 2022(99): 1-8. DOI: 10.1109/MNET.119.2200080

[14] DING C, HO I W H. Digital-twin-enabled city-model-aware deep learning for dynamic channel estimation in urban vehicular environments [J]. IEEE transactions on green communications and networking, 2022, 6(3): 1604-1612. DOI: 10.1109/TGCN.2022.3173414

[15] YUAN X M, CHEN J H, ZHANG N, et al. Digital twin-driven vehicular task offloading and IRS configuration in the Internet of vehicles [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(12): 24290-24304. DOI: 10.1109/TITS.2022.3204585

[16] LIU T, TANG L, WANG W L, et al. Digital-twin-assisted task offloading based on edge collaboration in the digital twin edge network [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(2): 1427-1444. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3086961

[17] ÖHLÉN P, JOHNSTON C, OLOFSSON H, et al. Network digital twins - outlook and opportunities [J]. Ericsson technology review, 2022(12): 2-11. DOI: 10.23919/ETR.2022.9999174

[18] PENGNOO M, BARROS M T, WUTTISITTIKULKIJ L, et al. Digital twin for metasurface reflector management in 6G terahertz communications [J]. IEEE access, 2020, 8: 114580-114596. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003734

[19] ZHANG Y B, SUN J L, GUI G, et al. A generalized channel dataset generator for 5G new radio systems based on ray-tracing [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(11): 2402-2406. DOI: 10.1109/LWC.2021.3101908

[20] YANG Y, LI Y, ZHANG W X, et al. Generative-adversarial-network-based wireless channel modeling: challenges and opportunities [J]. IEEE

communications magazine, 2019, 57(3): 22–27. DOI: 10.1109/MCOM.2019.1800635

- [21] HUANG J, WANG C X, BAI L, et al. A big data enabled channel model for 5G wireless communication systems [J]. IEEE transactions on big data, 2020, 6(2): 211–222. DOI: 10.1109/TBDATA.2018.2884489
- [22] HUANG C, HE R S, AI B, et al. Artificial intelligence enabled radio propagation for communications—part II: scenario identification and channel modeling [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2022, 70(6): 3955–3969. DOI: 10.1109/TAP.2022.3149665
- [23] 张树韬, 宁新智, 郑熙, 等. 无线信道评估方法及系统: CN116155412A [P]. 2023
- [24] NING X Z, ZHANG S T, ZHENG X, et al. Multi-grid-based localized statistical channel modeling: a radio map approach [C]//Proceedings of 2022 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2022: 1–6. DOI: 10.1109/ISWCS56560.2022.9940390
- [25] ZHANG S T, NING X Z, ZHENG X, et al. A physics-based and data-driven approach for localized statistical channel modeling [EB/OL]. [2023-04-10]. <https://www.researchgate.net/publication/368350585>
- [26] LIU Y R, HU Y Q, QIAN H, et al. ZOOpt: toolbox for derivative-free optimization [EB/OL]. [2023-04-10]. <https://arxiv.org/abs/1801.00329>

作者简介



张树韬, 香港中文大学(深圳)与深圳市大数据研究院联合培养在读博士生; 主要研究领域包括无线信道建模、稀疏信号处理以及数字孪生网络; 曾获得IEEE ISWCS会议最佳论文奖。



薛焯, 深圳市大数据研究院研究科学家、副研究员; 主要研究领域包括非凸优化、机器学习、通信网络等; 参与多个国家重点研发计划项目; 发表论文10余篇。



史清江, 同济大学软件工程学院教授、博士生导师, 深圳市大数据研究院信息系统大数据实验室主任; 主持多项国家重点研发计划项目和国家自然科学基金重点项目; 主要研究领域包括算法设计与分析、信号处理和无线网络等; 连续3年入选爱思唯尔高被引学者榜单, 2022年获得IEEE信号处理学会最佳论文奖; 发表论文80余篇, 申请国家专利40余项。



张纵辉, 香港中文大学(深圳)理工学院副教授、博士生导师, IEEE Fellow, 广东省大数据计算基础理论与方法重点实验室副主任, IEEE信号处理学会感知与通信一体化技术工作委员会创始主席, 《IEEE Transactions on Signal Processing》编委; 主要研究领域包括通信系统与机器学习中的关键信号处理与优化方法; 2015年获得IEEE通信学会亚太区杰出青年学者奖, 2018与2021年两度获得IEEE信号处理学会最佳论文奖。

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。

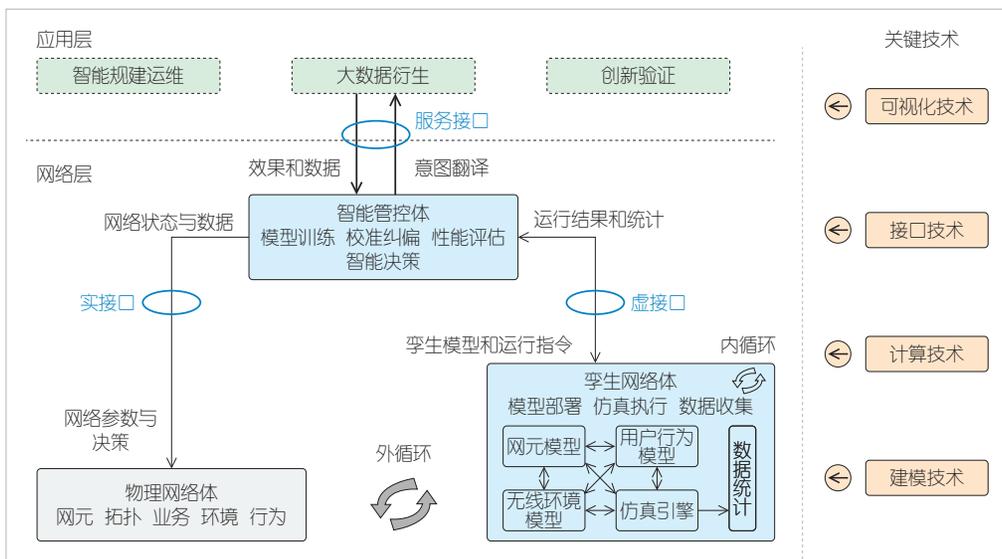
6G中的数字孪生网络如图1所示。该网络拥有“双层、三体、双循环”结构。其中，“双层”是指应用层和网络层，“三体”是指物理网

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

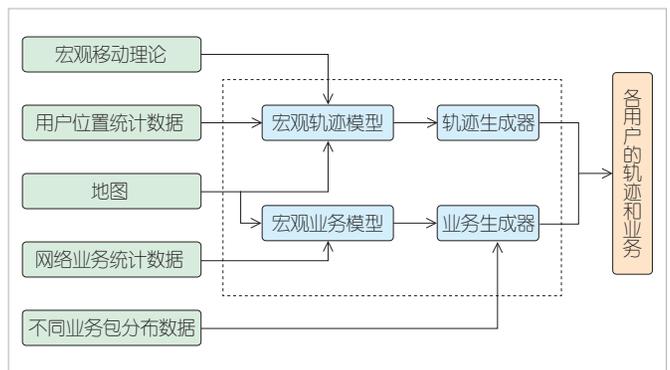
在数字孪生无线网络中，模型可以分为3类：网元模型、无线环境模型和用户行为模型。这些模型由智能管控体训练生成，随后被部署到孪生网络体中。

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

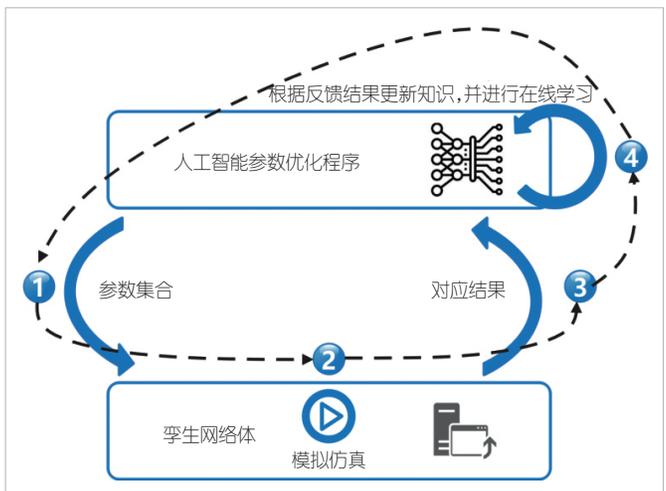
中获得快速验证。步骤1—4的往复循环迭代使得决策出的参数集合接近最优解。这种方式改变了以往网优过程费时费力的低效率人工优化模式，节省了大量的时间和人力开销。此外，一部分的网络智能运维功能也属于准实时应用。

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/LVWC.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。

数字孪生赋能下的 6G 网络资源管控机制



Scheme of Resource Management in Digital Twin-Aided 6G Networks

程子豪/CHENG Zihao, 刘向南/LIU Xiangnan,
高宏伟/GAO Hongwei, 管婉青/GUAN Wanqing,
张海君/ZHANG Haijun

(北京科技大学, 中国 北京 100083)
(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20230620.1434.008.html>

网络出版日期: 2023-06-25

收稿日期: 2023-04-20

摘要: 如何提高资源利用率, 高效分配和管理稀缺的无线通信资源, 是发展未来移动网络通信技术的关键。数字孪生技术因其具有可以连接物理实体与数字模型的特性广泛应用于各个领域。建立数字孪生网络可以实现物理世界与信息世界交互与融合, 利用虚拟模型在物理实体的整个生命周期中进行仿真模拟、辅助优化决策, 有助于控制和优化物理实体。对移动通信场景下的数字孪生网络建模方法进行阐释, 讨论了面向数字孪生的传统无线资源、新型无线资源管理和人工智能赋能下数字孪生技术在无线资源管理方面的应用。

关键词: 数字孪生; 6G 网络; 无线资源管理; 人工智能; 区块链技术

Abstract: How to improve resource utilization and efficiently allocate and manage scarce radio resources is the key to developing future mobile network communication technology. Digital twin technology is widely applied in various fields due to its ability to connect physical entities with digital models. By establishing a digital twin network, the physical world and the information world can interact and integrate, and virtual models can be used to simulate and optimize decisions for physical entities. The modeling method of digital twin networks in mobile communication scenarios is introduced. The traditional wireless resources and new wireless resource management under the digital twin technology are discussed. Meanwhile, with the aid of artificial intelligence, the digital twin in radio resource management is elaborated.

Keywords: digital twin; 6G network; radio resource management; artificial intelligence; blockchain technology

引用格式: 程子豪, 刘向南, 高宏伟, 等. 数字孪生赋能下的6G网络资源管控机制 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 39-45. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303008

Citation: CHENG Z H, LIU X N, GAO H W, et al. Scheme of resource management in digital twin-aided 6G networks [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 38-45. DOI:10.12142/ZTETJ.202303008

当前, 随着6G通信技术的不断更新迭代以及新业务的不断涌现, 人们对于通信的需求持续增加。新需求具有计算密集和高时延敏感的特性, 因此需要6G网络提供低时延、高可靠、易管理的服务保障, 这给6G网络资源管理带来了挑战。同时随着硬件设施、网络架构的进一步升级, 网络资源不再局限于速率、时隙、频谱等传统资源, 还包括新兴的计算、缓存资源, 这进一步加大了新一代无线通信资源管控的难度。此外, 由网络中大量难以预测的用户行为造成的无线网络状态实时变化, 也对网络资源管理提出了挑战。由于缺乏有效的虚拟验证平台, 实时变化的网络优化策

略不得不直接作用于现有的网络, 而这给网络带来了较大的风险^[1]。这些均使得人们迫切地想要应用学科建模、虚拟仿真技术将现有网络数字化, 推动数字孪生技术与新一代移动通信技术的融合。

数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性, 具有实时同步、忠实映射、高保真度特性, 能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段^[2]。应用数字孪生技术可以实现物理实体整个生命周期的虚拟数字化。这说明在时间维度上, 物理实体要与其数字孪生模型保持状态同步。具体而言, 通过物理实体与虚拟模型双向实时的数据交互, 物理实体将实时参数发送给数字孪生模型。数字孪生模型基于接收到的实时数据更新状态, 并通过建模和仿真分析对物理实体下一时刻的状态做出预测分析, 并将结果反馈给物理实

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U22B2003)

体,从而实现对物理实体的控制和优化。值得一提的是,应用数字孪生网络技术可以有效地辅助网络实时捕获异常^[3]。

随着6G移动通信技术的发展,人们对应用流程自动化的需求持续提高,而实现自动化的核心是大量的数据。这需要通信网络提供快速、可靠的传输服务,在有限的资源下传输尽可能多的数据,而高效的资源管理策略是实现这些需求的关键。6G移动网络将实现虚拟现实、全息技术、物联网等新型应用,这说明连接到移动通信网络中的不仅是人,还会有汽车、可穿戴设备、机器人等智能终端。如何有效地管理不同类型的终端并有效地处理多模态的数据,是6G移动网络资源管理的关键。对于大规模的移动通信网络,应用人工智能技术可以有效地处理不同类型的数据,辅助制定网络资源管理策略。因此,高效地融合人工智能与新一代移动通信技术是推动未来6G移动网络发展的关键因素。

数字孪生可以为不同类型的终端构建相应的数字孪生模型,并在虚拟空间中实现统一管理、控制和优化。同时,数字孪生网络中存储的大量数据和对应物理实体的虚拟模型可以辅助人工智能模型的训练。因此,融合数字孪生技术与移动网络资源管控技术,是新一代移动通信技术的潜在发展方向。VAN H.等利用数字孪生技术将基于超可靠低时延(URLLC)的链路计算密集型网络虚拟化,对边缘服务器进行建模,并以此优化整个系统的资源分配^[4]。为解决移动用户终端因计算资源和存储资源不足而无法有效训练神经网络的问题,LIU T.等提出数字孪生边缘网络架构,利用数字孪生收集到的大量数据辅助移动用户终端进行计算任务卸载,一定程度上提高了网络的整体性能^[5]。由此可见,数字孪生技术可以有效地辅助资源分配算法的求解。数字孪生技术本质上是虚拟模型对物理实体的仿真技术。也就是说,没有对物理实体的精确建模,数字孪生技术就无法完成后续的仿真、模拟、优化等。上述研究只是对某一具体场景下的通信系统进行建模。对于各类异构网络,如何准确地建立起高保真的数字孪生网络模型,仍是融合数字孪生和新一代通信技术的关键问题。

数字孪生技术的本质是虚拟模型对物理实体的仿真,而驱动数字孪生技术的是物理实体与虚拟模型间实时的数据交互,这对虚-实间可靠的连接与交互提出了挑战。同时,与物理实体网络类似,数字孪生网络完成特定的模拟仿真任务,需要依靠虚拟模型间的相互配合,这也需要数据在虚拟环境中实时交互。数字孪生连接与交互的内涵已经被定义,相应的“感知-通信-映射-联动-融合”连接与交互的理论体系也被提出^[6]。JIANG H.等提出了基于物联网和大数据的数据交互模型,对物理实体与虚拟模型间的数据传感、处

理、传输、存储和分析等相关功能进行了阐释^[7],但是对于连接与交互技术的具体实现和应遵守的准则缺少明确的定义。在数字孪生融合移动通信技术实现的过程中,如何满足较高的数据交互实时性、安全性要求,是实现数字孪生技术的一个挑战。基于上述问题,本文将探讨数字孪生赋能下的6G网络资源管控机制。

1 移动通信场景下的数字孪生网络建模

数字孪生网络由物理实体网络和与其对应的虚拟孪生体组成,二者通过数据的双向实时交互使状态保持同步。从上述定义可以看出,数字孪生网络基于数据创建模型,即通过对物理实体网络数据进行收集来构建目标网络模型。但是通信网络具有节点和链路数量多、网络信息复杂、拓扑结构动态变化的特点,这对构建各类异构网络的数字孪生模型提出了挑战。对目标网络进行精准建模,并描述网络中各层次的信息,是数字孪生技术实现高效仿真、控制、分析和诊断的关键。

1.1 数字孪生网络拓扑结构及功能

数字孪生网络包含物理空间要素和虚拟空间要素。在物理空间中存在大量的物理实体要素,这些实体要素在通信网中主要分为网络节点要素、网络链路要素和网络拓扑要素。其中,网络节点要素指的是通信网中各个节点的外部特征和内部属性(后简称属性),例如终端、交换机、路由器、服务器等,这些不同的节点由不同的软硬件体系组合而成;网络链路要素指的是网络中通信链路的属性,包含时延、带宽、吞吐量、时延带宽积等通信链路量化数据,是分析网络性能的重要指标;网络拓扑要素指的是通信网络的拓扑结构,例如星形、树形、总线型等。虚拟空间由大量数字孪生子模型构成。子模型通过对物理实体外在特征和内部逻辑的虚拟映射,分别对应物理空间中不同的物理实体。同时这些子模型可以组成功能不同的虚拟层,例如:用于描述物理空间要素实体信息的模型层,描述路由规则、安全规则等的通信协议层,实现用户行为和网络行为的行为层。这些不同的虚拟层构成完整的数字孪生网络。正如物理空间中通信网络各个节点相互配合为用户提供可靠的服务一样,虚拟世界中各个数字孪生子模型也可以相互配合完成特定任务。数字孪生网络功能的实现需要做到虚-实间数据实时交互,本文第2节会对此着重说明。

上文介绍了数字孪生网络不同的组成部分,分别为物理实体、数字孪生子模型、数字孪生网络、连接与交互。在实际应用中,系统会基于不同的场景,对上述组成部分进行不

同的组合，形成不同的架构，但大体都可分为3层：物理层、数字孪生网络层、计算应用层，如图1所示。

1) 物理层

物理层包括物理实体设备和设备的计算、存储资源。这些物理实体是客观存在的，例如基站、路由器、终端设备等。它们通过6G通信技术连接到附近的基站，例如：在基于数字孪生的URLLC边缘网络的任务卸载和资源分配系统中，物理层包括基于URLLC的移动边缘计算服务器架构、边缘网络中的任务卸载模型、边缘服务器接入点、天线、用户终端等物理设备。在数字孪生应用之前，这些设备已经可以构成一个功能完善的系统，相互配合完成特定任务。在融合数字孪生技术后，这些物理实体通过无线通信技术将实时数据上传给数字孪生网络，然后数字孪生网络处理这些数据，辅助物理层完成特定任务。相比于仅依靠物理层，利用数字孪生技术可以提高完成任务的效率和准确率，同时降低物理设备损坏的几率。

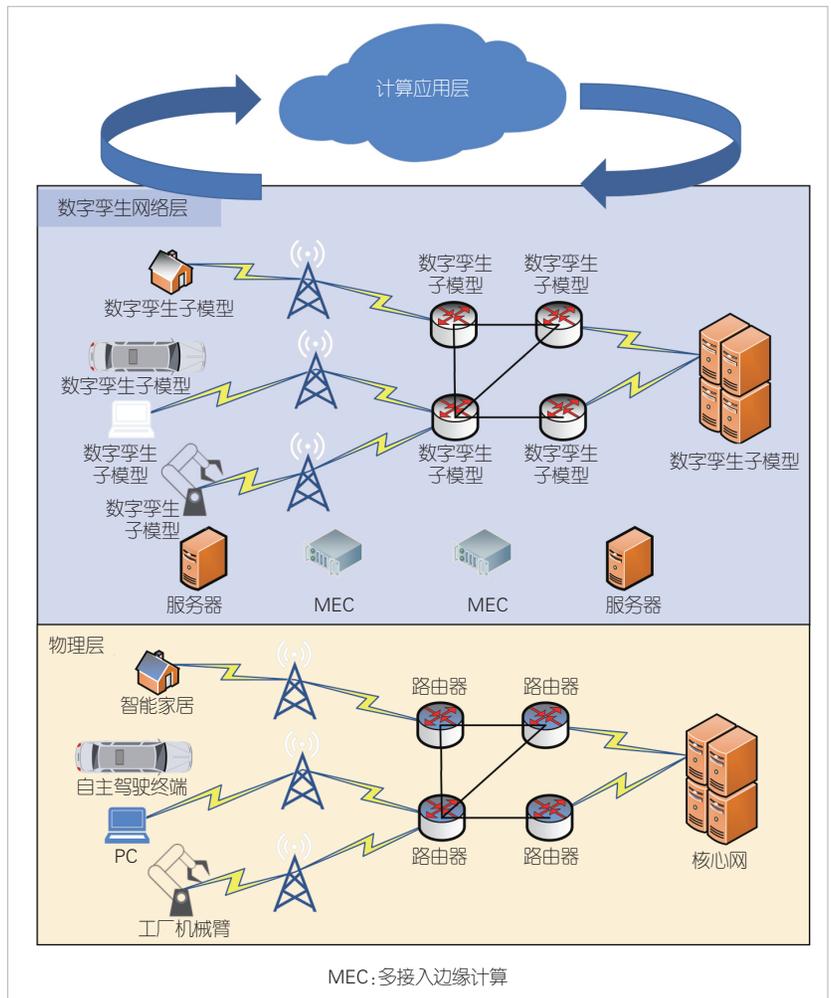
2) 数字孪生网络层

在数字孪生网络层，一些基站配备负责执行计算任务的移动边缘计算服务器，其他基站为终端用户提供无线通信服务。数字孪生网络中的虚拟模型由配备移动边缘计算服务器的基站建模和维护。上述模型分为两类：一类是物理实体模型，它是物理设备的仿真映射，即对硬件配置、实时状态信息和历史运行数据的映射；另一类是指向性服务模型，它是针对某一特定应用而建立的轻量化映射模型，该模型并不需要收集物理实体的全部状态参数，只收集完成某特定功能必需的数据。以自动驾驶数字孪生网络为例，物理实体模型可以是一辆车的虚拟映射模型，这个模型拥有这辆车的所有参数，例如型号、体积，甚至是颜色；而指向性服务模型是专门用来支持自动驾驶服务的，它仅需要收集车辆的驾驶信息，不需要颜色这类对自动驾驶服务没有显著帮助的信息。上述数据的收集由物理层中多种类型的传感器完成。数据收集完成后，经传感器上传至移动边缘计算服务器，以便构建孪生网络数据库。数据库中不仅包含物理层的实时状态信息，还包含历史状态信息。在网络出现异常时，可以根据历史数据回溯物理实体状态，从而保持网络的正常运转。移动边缘计算服务器基于孪生网络数据库中的数据对物理实体的“几何-物理-逻辑-行为规则”4个方面进行建模，即对物理实体的几何特征、物理特性、行为操作、逻辑规范多方面进行虚拟仿真，从而构建其虚拟数字孪生子模型；对单元级虚拟模型构建完成后，要在逻辑空间上实现单元级模型到系统网络模型的构建，即基于数字孪生子模型搭建数字孪生网络。这需要以物理层中不同物理实体之间交互方式为基准，在数字孪生网络层中为不同数字孪生子模型间添加交互规则，从而使虚拟网络可以完成与物理层形式上完全等价的功能。

辑-行为规则”4个方面进行建模，即对物理实体的几何特征、物理特性、行为操作、逻辑规范多方面进行虚拟仿真，从而构建其虚拟数字孪生子模型；对单元级虚拟模型构建完成后，要在逻辑空间上实现单元级模型到系统网络模型的构建，即基于数字孪生子模型搭建数字孪生网络。这需要以物理层中不同物理实体之间交互方式为基准，在数字孪生网络层中为不同数字孪生子模型间添加交互规则，从而使虚拟网络可以完成与物理层形式上完全等价的功能。

3) 计算应用层

计算应用层分为计算模块和应用模块。其中，计算模块并不是必需的。当物理层包含的设备很少，对计算资源和存储资源的需求不大时，简单的任务完全可以由数字孪生网络层中的边缘计算服务器独立完成，并不需要将任务上传到计算应用层进行处理；当物理层规模很大，单独依靠边缘计算服务器不足以完成计算任务时，就需要配备计算模块来辅助计算。计算模块中配备了大量的计算和存储资源，可以有效



▲图1 移动通信场景下的数字孪生网络

地映射物理实体，并将数字孪生模型存储，为应用模块服务。应用模块利用已建模的数字孪生网络模拟仿真物理实体的真实行为，通过模拟不同的行为产生不同的业务需求，传达任务指令，使虚拟网络中模型相互配合完成相应的任务。模拟的用户行为可以是基于物理层用户真实行为的模拟仿真，也可以是数字孪生网络管理者为验证算法、检查网络故障行为而人为发出的虚拟指令。

1.2 面向数字孪生的双循环移动网络架构

当前网络按照功能可划分为两部分：接入网和核心网。根据国际电信联盟电信标准分局的定义，接入网是指核心网到用户之间的所有设备，由业务节点接口和用户网络接口之间的一系列传送实体组成，可为电信业务提供相应的支撑。核心网主要负责数据的交换、转发、接续、路由。在接入网中，传统技术通过光接入与无线接入技术的融合，使接入网的性能大大提升。然而，近些年出现了许多计算密集、时延要求高的新型业务，例如车联网、虚拟现实等。一种新技术的出现——计算任务卸载解决了移动端设备（例如手机）中计算资源有限的问题，即移动设备将计算资源要求高的任务卸载到边缘服务器中。相比于传统云计算，边缘服务器部署的位置与用户的距离更近。这样一来，数据通过一跳即可在超低时延下传输到拥有大量计算资源的服务器中。边缘服务器向周围用户实时传输数据，这与基于数据建模的数字孪生技术相符。因此，我们可以在接入网的边缘服务器中利用实时交互的数据，对物理空间中的通信设备进行建模，以对应数字孪生网络中的实体要素建模；根据实时交互的数据来更新模型参数，使数字孪生模型与物理实体状态保持一致。当网络中计算任务量大，并且原先网络中的边缘服务器无法同时满足任务卸载和数字孪生建模需求时，服务器将以任务卸载等能满足用户服务质量的业务需求为首要任务。此时，边缘服务器对数字孪生网络来说只起到传输数据的作用，它将物理层网络中的实时状态信息传输到计算应用层。计算应用层完成数字孪生子模型建模的任务。此外，当边缘服务器的存储资源不足时，系统可以利用云端存储部分数据，并在需要时通过网络将数据传输到客户端，从而节省了边缘服务器的存储资源。由此可见，边缘服务器可以在一定程度上解决接入网中物理实体要素的数字孪生建模问题。同时，目前商用的核心网已经实现了完全的虚拟化，只需要进行一些精简和适配即可构建核心网对应的数字孪生模型。

在新一代移动通信网络融合数字孪生技术后，移动网络架构可以描述为外循环和内循环相结合的分层结构，即双循环移动网络结构。外循环包含物理实体网络和数字孪生网

络。其中，物理实体网络是由接入网和核心网组成的完整移动通信网络，数字孪生网络在外循环中只提供数据传输的接口。外循环可满足用户通信需求，并负责传输虚-实间实时交互的数据。内循环由虚拟网络中的数字孪生模型组成。这些模型分别对应不同的物理实体，可以相互配合完成与物理实体网络相同的功能，负责对物理实体各项参数的不断迭代调优和仿真验证。具体来说，在处理实际需求时，新一代移动通信网络会根据物理实体网络构建数字孪生网络：首先由网络管理人员下达优化命令，数字孪生网络会以需求为导向执行内循环，在内部不断进行自我迭代和仿真模拟，直至虚拟环境中的网络性能达到网络运维预设的要求；在外循环中，物理实体网络接收到来自数字孪生网络的优化策略并在实际中运行，若发现实际结果与预期不符，则再将实时状态参数反馈给数字孪生网络。内外循环不断运转，驱动物理网络性能达到预设目标。其中，内循环迭代优化策略既可以采用人为设计静态算法，也可以利用智能技术动态“自学习”优化算法（将在3节中详细介绍）。内外循环运转的前提是虚-实间数据的实时交互，只有物理实体与其数字孪生模型保持状态同步，才能在内循环中进行正确的迭代优化。

2 数字孪生连接与交互

作为连接物理世界和虚拟世界的媒介，数字孪生技术的本质是虚拟世界对物理世界的映射，映射的对象包含外在特征和内部逻辑。上文提到，只有获取强时效、高保真的数据，数字孪生网络才能够正确地更新状态，实现预设定的功能，而这需要虚-实之间可靠的连接与交互服务。对于数字孪生网络，连接与交互不仅包括虚拟模型与物理实体间的数据传输，还包括物理层内物理实体间的数据交互和数字孪生网络层内虚拟模型间的数据交互，如图2所示。依据数据交互主体的存在形式，连接与交互的形式包括实-实、虚-虚、虚-实3种方式。其中，虚-实连接与交互最为关键，它促使虚拟模型与物理实体高度耦合，以实现虚拟模型实时更新参数、物理实体及时得到反馈的良性循环。同时为了实现这种循环，虚-实间连接与交互需要满足实时性、准确性和安全性等要求。

2.1 数字孪生连接方式

1) 实-实连接与交互

实-实连接与交互是指物理实体间的通信行为，它保证了物理实体之间的数据交互和数据共享。实-实连接与交互发生在物理信道中，因此数据传输的速度、质量都会受到环

境的干扰。各种通信设备（如传感器、控制器等）与物联网网关、网络接入点和支持实-实之间通信的基站连接。此外，网络连接通过各种通信协议及低功耗广域网技术（如窄带物联网等）来实现。

2) 虚-虚连接与交互

虚-虚连接与交互是指利用虚拟模型映射发生在真实的物理实体之间的通信行为。虚-虚连接与交互的好处是数据传输建模。相对于物理实体间的传输数据模态的多样性，在虚拟模型中数据可以有效地数字化，从而提高数据传输速率，突破在物理实体中的时间约束。物理实体中的通信往往需要一定的时间成本，然而虚拟空间中的通信可以在非常短的时间内完成相同的通信行为。因此，我们可以用较低的时间成本来反映或模拟长时间的通信行为。相比于物理空间，某些给定的通信行为可以在逻辑空间中更早地发生。也正是因为这种时效性，物理实体可以利用数字孪生网络提前发出的反馈做出正确的优化、控制决策。同时虚拟环境相比于物理环境更加稳定，可以高保真地传输数据，提高传输数据的准确性。此外，实-实连接与交互会消耗无线频谱、功率等资源，而虚-虚连接与交互主要依赖数字孪生网络服务器的计算资源来模拟数据的传输行为。

3) 虚-实连接与交互

虚-实连接与交互是指物理实体通过无线通信技术与数字孪生对象实现信息传输，实时共享物理实体的数据，并接收数字孪生对象产生的反馈。与实-实连接与交互类似，

虚-实连接与交互也发生在真实物理信道中，因此传输的数据会受到周围环境的干扰；但相较于虚-虚连接与交互，虚-实、实-实连接与交互可直接利用现有的移动网络进行通信。实传向虚的数据主要为网络节点要素、网络链路要素和网络拓扑要素，具体包括网络状态参数、网元状态参数、网络拓扑结构等。这些数据可以分为驱动建模数据和驱动服务数据。其中，驱动建模数据可帮助网络对物理实体建模；驱动服务数据是指传输用户的行为、业务需求等数据，为数字孪生网络下达指令，使其完成仿真、优化决策等功能。虚传向实的数据主要为仿真得出的结果、下一时刻优化的控制决策。相应的通信技术主要为广域网无线通信技术，如5G蜂窝通信等。在这种情况下，物理实体是通过基站连接到无线接入网络的无线终端。该终端最后连接到互联网上的数字孪生网络。

2.2 数字孪生虚-实连接准则

虚-实连接与交互需要满足以下3个准则。

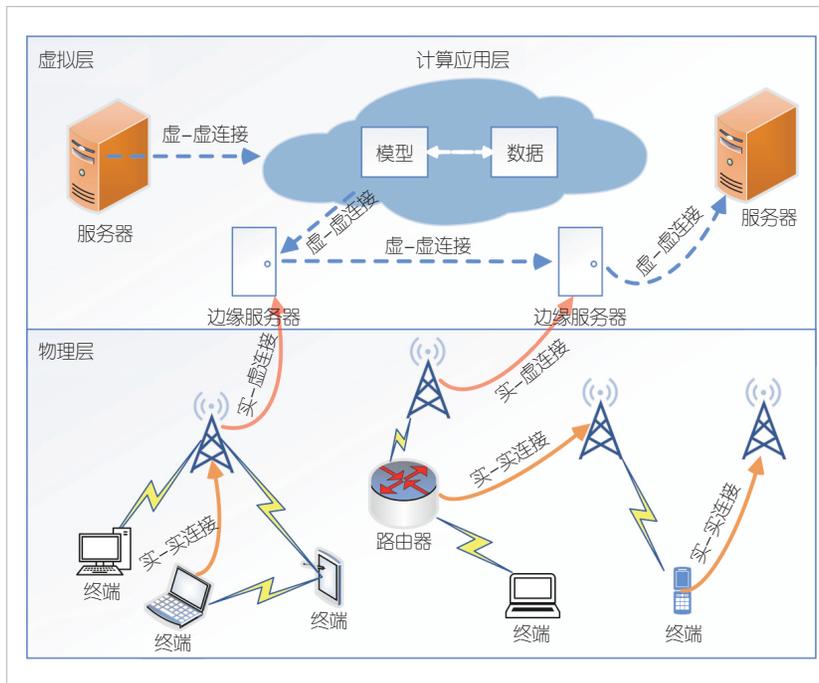
1) 实时性

在实时性要求严格的场景中，需要考虑实-虚通信延迟。等待时间的要求取决于物理实体和反馈数据两者对时间的敏感性。如果物理实体的演化严重依赖于虚拟孪生的实时反馈，那么减少实-虚的延迟是非常重要的，例如：在健康检测、远程手术和药物控制中，物理实体与其数字孪生之间的通信是超低延迟的；智能交通系统与高速公路预警系统中的虚拟系统之间的通信也要求低延迟。

2) 准确性

数字孪生与物理实体之间能否实现正确连接，数据交互是否真实有效，是保证数字孪生技术实现预测、分析、模拟等功能的基石。其中的准确性包括准确获取物理实体状态参数和准确传输数据。数字孪生需要正确获取物理实体的信息，并将实时数据准确可靠地传输给虚拟模型。与此同时，虚拟模型做出的决策、数据分析，也需要准确可靠地反馈给物理实体，然后物理实体才能进行下一步操作。例如：在通信网络资源分配中，错误的数据传输到数字孪生网络中，会导致数字孪生做出错误决策；紧接着物理实体接到反馈后会做出相对应的错误操作，又会导致网络堵塞，甚至网络崩溃。总之，数字孪生依赖模型进行预测和优化，而精确建模的关键是可靠、准确的通信。

3) 安全性



▲图2 数字孪生下的连接与交互

物理实体和数字孪生之间的数据传输对隐私性和安全性要求很高。在实向虚传输的数据中包含通信网络相关配置信息。若这部分数据被攻击，则虚拟网络将做出错误的仿真模拟，从而使实体网络做出错误的决策。同时，在数据传输过程中，用户的身份信息也需要加密。此外，在虚向实的反馈中，会包含网络下一时刻的状态参数和控制决策，若不加以防护，则会成为很大的网络安全隐患。

2.3 基于区块链数据共享与加密的虚-实连接与交互

如2.2节所述，在搭建数字孪生网络层时，虚-实间数据往来需要遵循实时性、准确性和安全性。然而，数字孪生网络的时变环境复杂，对网络计算资源需求量大，同时达到上述3点要求的难度很大。区块链作为一种新兴的、去中心化分布式账本技术，通过多方共识和交易备份，可为用户提供安全的数据共享环境。

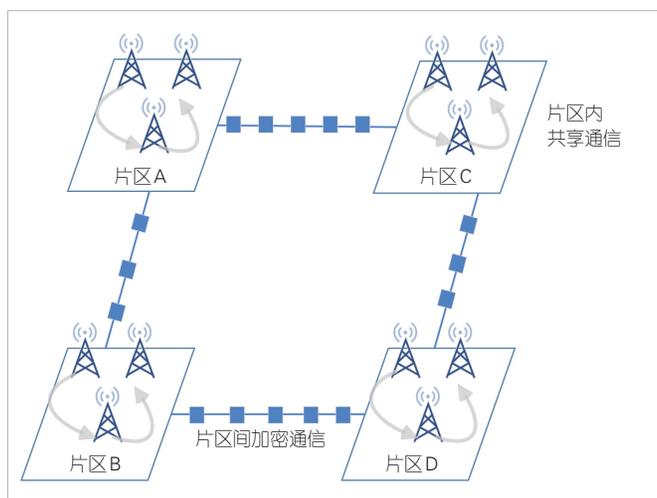
首先，区块链具有去中心化的特点。它可以帮助数字孪生物理实体与其对应的模型进行点对点数据传输。无论是虚拟模型依据物理实体数据更新参数，还是物理实体根据虚拟模型反馈的数据进行优化，都不需要第三方的介入，即有效减少数据传输的时延，可以满足虚-实传输实时性。其次，区块链还具有开放性。如图3所示，采用区块链分片技术，将不同服务区域的智能终端和接入点进行分片，在一个片区内的节点采用本地多播数据共享交易，可使片区内节点共享片区的所有数据（节点隐私除外），生成本地孪生数据共享链；片间边缘服务器采用基于委托权益证明的联盟区块链，验证全局孪生数据共享交易，生成全局孪生数据共享链^[9]。本地、全局孪生数据共享链通过信息交互，共同维护系统数字孪生数据共享链，从而使网络中配备有移动边缘计算服务器的基站，实时采集服务区域内的网络数据，构建区域内智能终端、接入点、网络拓扑、环境等数字孪生模型。同时，数字孪生网络中的模型可以及时获取网络中的动态参数，各个节点在接收到用户的行为时统一执行相同的任务，以达到仿真模拟的效果。此外，区块链也具备安全性。在物理实体与其相应数字孪生模型进行数据交互时，基于特定的加密算法使传输信息不易被人为干扰，从而使数字孪生模型可以正确地更新状态参数。同时，区块链不受任何节点的控制，数据存储在多个节点上，攻击者没有单一的入口点，有效保证了区块链片区中数据的安全，即保证了数字孪生网络中模型参数和网络状态参数的安全。最后，区块链具有不可篡改的特性。存储在区块链的信息都通过现代密码学进行加密，数据一旦进入区块链，任何信息都不能随意更改。当物理实体和数字孪生网络交互数据时，数据一旦发出便在片区内无法

修改，即输出可以高保真地传输。这满足了虚-实间数据通信的准确性要求，保证了数字孪生网络的精准建模。综上所述，利用区块链赋能虚-实连接与交互，可以实现高效安全的数据交互。

3 数字孪生助力6G网络资源分配

3.1 传统无线资源管理

随着新技术的出现和无线通信应用场景的多样化和复杂化，6G通信技术对时、频、空、能、码等多维传统无线资源的需求在迅速增长。然而，相对于需求而言，资源却是有限的，因此高效的无线资源管理成为移动通信网络发挥全部效用的关键。在通信系统的不同层次中，如何管理有限的资源以大幅提高资源利用率是一个重要研究方向，例如：在网络接入层，系统以最大化非正交多址接入系统的吞吐量为优化目标，将其建模为非凸优化问题，通过对问题的求解来证明非正交多址接入可以有效提升频谱资源的利用率；在网络层，可以使用交替乘法法进行多个节点的服务优化，在尽量满足用户服务质量的同时，保证每个网络节点不出现过载问题。随着网络规模的不断扩大，新算法的复杂度也越来越高。这些算法在迭代更新或实际验证时存在较大的试错风险和较高的验证成本。借助数字孪生技术，许多错误代价高的算法可以在虚拟网络中得到充分验证和高效仿真，从而在一定程度上降低安全隐患。具体而言，数字孪生模型可以将物理实体的最优解在虚拟映射中提前执行，然后利用云端强大的计算能力快速模拟出下一时刻的状态——若下一时刻状态符合用户服务质量、能耗、最小传输速率等约束条件，则可以证明物理实体在这一时刻的决策是正确的；若下一时刻状



▲图3 区块链数据共享与加密下的虚-实连接与交互

态不满足约束条件，通信系统存在性能隐患，则数字孪生网络会第一时间将信息反馈给物理实体，随后物理实体可以根据反馈信息修改分配策略，从而避免现实中通信系统的性能隐患，提高通信系统的可靠性。

3.2 计算、缓存等新型资源管理

随着6G通信技术的发展，业务的多样性和网络规模的迅速发展大大增加了资源管理问题的复杂度，而解决这些问题会消耗大量的计算资源。因此，如何管理以计算资源为代表的新型资源，成为了新一代通信发展的难题。数字孪生技术可以依托于多接入边缘计算（MEC）提供一个强大的计算框架，同时可以利用服务器的计算能力优化整个系统的资源分配。利用MEC技术，基于无线通信的动态特性，在多种资源约束下，以减少用户的服务延迟为优化目标，合理分配计算任务和计算资源可减少移动计算密集型通信网络的平均时延。相对于基础算法，数字孪生带来的计算框架提高了资源分配决策的效率。同时数字孪生技术可以支持深度学习架构，以找到最佳资源分配策略和计算卸载策略。数字孪生可以依托通信系统完善的软硬件体系，为6G通信网络提供丰富的计算和存储资源，提高新型资源分配决策的效率。

网络规模的快速增加给通信系统的计算资源消耗和缓存资源部署带来了挑战^[9]。随着网络规模的扩大，数据传输业务的激增导致传输链路拥堵，从而增加了信息回传的时延。因此，合理优化缓存部署策略显得尤为必要。将资源缓存在不同的地理位置可以减少信息回传的时延。然而，由于6G网络结构、用户行为、网络状态等参数实时变化，缓存部署策略的时效性变得尤为重要。如何在极短的时间内找到最佳的缓存部署位置，如何更新替换缓存部署策略，都需要做进一步研究。数字孪生技术可以通过仿真模拟得到通信网络在未来短时间内的状态，即根据用户的行为提前预测网络未来的各项参数。具体而言，数字孪生网络预测用户短期内需要的数据，然后物理实体根据预测结果将常用的数据部署在用户附近，并舍弃不需要的数据，从而进行动态管理缓存资源的部署。数字孪生网络可以利用历史用户行为数据预测长时间网络状态的变化，从而得到缓存资源的默认最佳部署方案；配合短时期预测对缓存部署进行动态微调，从而可有效地减少用户接收回传信息的时延，提高用户的服务质量。

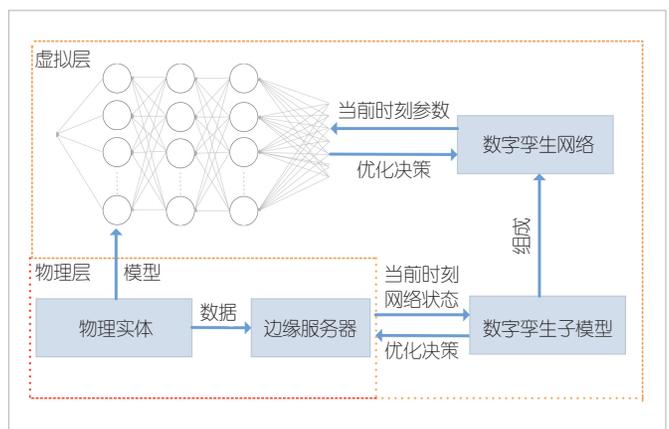
3.3 人工智能下的数字孪生在无线资源管理的应用

近年来，人工智能技术推动了各行业技术的快速发展。在新一代通信系统中，视频直播、网络电话等实时业务对网络系统提出巨大的挑战。当前通信系统中与用户服务质量相

关的因素不断增加，导致资源管理问题的复杂度不断提高。传统的静态资源分配和小规模资源管理已经无法满足多种分布式架构的需求^[10]。传统的算法往往只能以网络服务质量的某几项作为优化目标，忽略了其他的QoS因素。为了解决这些问题，新一代通信技术引入了人工智能，通过人工智能技术进行迭代学习，例如：应用深度确定性策略梯度算法得出用户调度和计算任务卸载优化算法。与传统算法相比，这种方式在提高收敛速度的同时，减小了系统延迟^[11]。然而，由于一些实际应用场景存在数据收集困难、模型参数敏感、训练迭代周期长等问题，人工智能智能技术难以发挥出最大优势。因此应用数字孪生技术可以有效地解决这些问题。

首先，数字孪生技术通过将物理实体的状态数字化，借助虚拟仿真技术生成丰富的训练集，并采用工具链自动标注数据，从而加速模型的训练过程；其次，数字孪生拥有丰富的计算资源，可以加速模型的收敛速度，减少模型的训练时间；最后，数字孪生还可以提供虚拟验证平台，以便对人工智能模型“自学习”的算法进行高效仿真验证，从而在低错误成本的前提下改进算法，如图4所示。此外，数字孪生技术还具有强大的历史状态储存能力，可以将网络状态参数和网元状态参数存储在本地或云端，在网络出现异常时将网络恢复至正常状态，还可以依据需求基于历史数据回溯网元状态。在引入人工智能技术赋能下的无线资源管理中，这些历史数据也可以作为数据集，帮助人工智能模型进行训练，从而不断优化人工智能模型，拟合更加复杂的模型。鉴于当前通信系统中的数学模型和传输速率的限制，传统技术在充分利用通信系统中不同模态的信息（如用户的位置、不同的天气条件等）时仍存在一定的困难。

随着人工智能技术的快速发展，现有模型可以拟合复杂的数据。其中，多模态强化学习技术可以应用于多模态无线通信资源的分配中，从而推动机器学习的发展。同时，数字



▲图4 人工智能赋能下的数字孪生无线资源管理策略

孪生技术具有传输数据量大、传输速率快、适应能力强等特点，可以与多模态通信技术相结合，弥补传统通信技术在跨模态信息之间潜在关系利用方面的不足。利用数字孪生技术可以解决人工智能技术应用在资源分配方面存在的问题，同时利用人工智能技术中的机器学习也可以辅助数字孪生建模。数字孪生网络层的任务是基于物理层传输的实时数据对物理实体进行建模，而实际上，这些实时数据的量级较大，对设备的计算资源提出了挑战。由于不同网元之间的外部特征和内部逻辑存在相似性，因此在建模的过程中我们可以利用人工智能技术学习模型的相似性，从而辅助设备对物理实体进行建模，减少软硬件资源消耗。

4 结束语

本文探讨了基于数字孪生的6G通信网络的资源管理问题，并提出了一种6G移动通信场景下的物理层-数字孪生网络层-计算应用层的3层数字孪生网络建模方法；探讨了实-实、虚-虚、虚-实3种连接与交互方式，并提出了一种基于区块链数据共享与加密的解决方案，以确保资源管理决策满足实时性、准确性和安全性要求；最后说明了数字孪生在6G网络资源管控中的具体应用，包括利用数字孪生技术对资源管理决策进行仿真，并根据网络状态进行验证，以降低网络异常的几率。数字孪生能够应用其强大的计算能力对复杂优化问题进行求解，并为物理实体提供优化决策反馈。

参考文献

[1] 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

[2] GUAN W Q, ZHANG H J, LEUNG V C M. Customized slicing for 6G: enforcing artificial intelligence on resource management [J]. IEEE network, 2021, 35(5): 264-271. DOI: 10.1109/MNET.011.2000644

[3] WANG W L, TANG L, WANG C M, et al. Real-time analysis of multiple root causes for anomalies assisted by digital twin in NFV environment [J]. IEEE transactions on network and service management, 2022, 19(2): 905-921. DOI: 10.1109/TNSM.2022.3151249

[4] 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

[5] LIU T, TANG L, WANG W L, et al. Digital-twin-assisted task offloading based on edge collaboration in the digital twin edge network [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(2): 1427-1444. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3086961

[6] 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. DOI: 10.13196/j.cims.2023.01.001

[7] JIANG H F, QIN S F, FU J L, et al. How to model and implement connections between physical and virtual models for digital twin application [J]. Journal of manufacturing systems, 2021, 58: 36-51. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.05.012

[8] 蒋丽, 谢胜利, 田辉. 面向数字孪生边缘网络的区块链分片及资源自适应优化机制 [J]. 通信学报, 2023, 44(3): 12-23. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023044

[9] 龙隆, 刘子辰, 陆在旺, 等. 移动边缘网络下服务缓存与资源分配联合优化策略 [J]. 通信学报, 2023, 44(1): 64-74. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023020

[10] LIU X N, ZHANG H J, LONG K P, et al. Proximal policy optimization-based transmit beamforming and phase-shift design in an IRS-aided ISAC system for the THz band [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(7): 2056-2069. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3158696

[11] ZHANG H J, FENG L Z, LIU X N, et al. User scheduling and task offloading in multi-tier computing 6G vehicular network [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(2): 446-456. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3227097

作者简介



程子豪, 北京科技大学在读本科生; 主要研究领域为数字孪生通信网络。



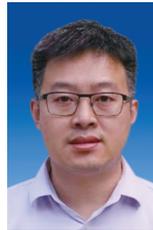
刘向南, 北京科技大学在读博士生; 主要研究领域为6G智能通信资源管理等。



高宏伟, 北京科技大学在读硕士生; 主要研究领域为通信感知一体化与智能通信等。



管婉青, 北京科技大学讲师; 主要研究方向为B5G/6G网络切片、无线网络资源管理等。



张海君, 北京科技大学教授、博士生导师; 主要研究方向为6G移动通信、人工智能与无线网络、机器学习与大数据等。

基于数字孪生的 算力网络自优化技术研究



Self-Optimization Technology of Computing Power Network Based on Digital Twin

许胜/XU Sheng, 许方敏/XU Fangmin, 赵成林/ZHAO Chenglin

(北京邮电大学, 中国 北京 100876)
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230621.1945.003.html>

网络出版日期: 2023-06-25

收稿日期: 2023-04-20

摘要: 将数字孪生网络技术引入算力网络, 可以建立算力网络的虚拟映射网络。数字孪生网络系统通过高保真的虚实实时交互, 实现对算力网络的高效分析、诊断和控制。以算力网络的自优化为例, 提出了一种数字孪生算力网络的结构自优化模型, 实现了数字孪生算力网络中网络自主学习、自验证、自演进的实时闭环控制。与传统自组织网络 (SON) 不同的是, 将物理网络基础设施与 SON 模块分离, 将 SON 自优化的过程迁移到虚拟网络中, 降低了算力网络运维的复杂度, 提高了网络的灵活性和适应性。仿真实验证明, 引入数字孪生网络技术后, 可以迅速地处理算力网络服务超时问题, 降低网络整体服务时延。

关键词: 数字孪生; 算力网络; SON; 遗传算法

Abstract: By introducing the digital twin network technology into the computing power network, the virtual mapping network of the computing power network can be established. Digital twin network system realizes efficient analysis, diagnosis, and control of computing power network through high-fidelity real-time interaction between virtual and real. Taking the self-optimization of computing power network as an example, a structural self-optimization model of digital twin computing power network is proposed, which realizes the real-time closed-loop control of network self-learning, self-verification, and self-evolution in digital twin computing power network. Different from the traditional self-organizing network (SON), the physical network infrastructure is separated from the SON module, and the SON self-optimization process is migrated to the virtual network, which reduces the complexity of computing power network operation and maintenance, and improves the flexibility and adaptability of the network. Simulation results show that the introduction of digital twin network technology can quickly deal with the problem of computing power network service timeout and reduce the overall service delay of the network.

Keywords: digital twin; computing power network; SON; genetic algorithm

引用格式: 许胜, 许方敏, 赵成林. 基于数字孪生的算力网络自优化技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 46-50. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303009

Citation: XU S, XU F M, ZHAO C L. Self-optimization technology of computing power network based on digital twin [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 46-50. DOI:10.12142/ZTETJ.202303009

当前, 随着新一轮科技革命和产业变革的不断深入, 新技术、新业态、新场景和新模式不断涌现。庞大的数据处理和价值挖掘都离不开算力, 算力已成为信息社会的核心生产力。中国准确把握算力时代的脉络, 提出要加快智能化综合性数字信息基础设施建设, 实施“东数西算”工程, 打通经济社会发展的信息“大动脉”, 推动数字经济与实体

经济融合发展。算力网络的核心思想是将分布的算力节点连接起来, 动态实时感知计算资源和网络资源状态, 进而统筹分配和调度计算任务, 形成一张计算资源可感知、可分配、可调度的网络^[1-2]。

随着算网一体的演进, 网络运行的高可靠性、网络测试的高成本等, 都使新技术的部署更加困难。针对目前算力网络性能遇到的瓶颈问题, 传统的方法是进行手动优化。然而, 这种方法在很大程度上依赖于操作和维护专家的经验, 且随着算力网络规模的日益增大, 实现难度大大增加^[3]。

基金项目: 北京市自然科学基金-海淀前沿项目 (L202017)

为了更好地解决上述问题，提升网络的自优化和自运维能力，数字孪生网络与意图网络等概念和技术被相继提出并得到业界认可^[4]。数字孪生网络是以数字化方式创建物理网络实体的虚拟孪生体。物理网络和虚拟孪生体之间可实时交互。数字孪生网络系统可以通过高保真虚实实时交互，实现对物理网络的高效分析、诊断、仿真和控制^[5]。

本文中，我们将数字孪生网络技术与算力网络相结合，建立数字孪生算力网络结构自优化模型。通过改进的遗传算法，我们可以很方便地计算出网络解决某一故障问题（如超时问题和丢包问题）的最小成本。通过物理网络和孪生网络的实时交互，数字孪生网络平台能够助力算力网络实现低成本试错、智能化决策和高效率创新。

1 面向算力网络的数字孪生网络架构

本文中，我们提出了一种面向算力网络的数字孪生架构，如图1所示。该架构主要由实体网络层、孪生网络层以及二者之间的感知/控制中间层组成：实体网络层包括物理对象和连接（如终端、接入网、骨干网、云、边缘节点等），实体网络层可以被主动感知，并受上层的感知/控制层控制；网络孪生层主要包括3个模块：网络孪生体、服务映射模型和数据仓库；感知/控制层实时采集实体网络层的数据，包

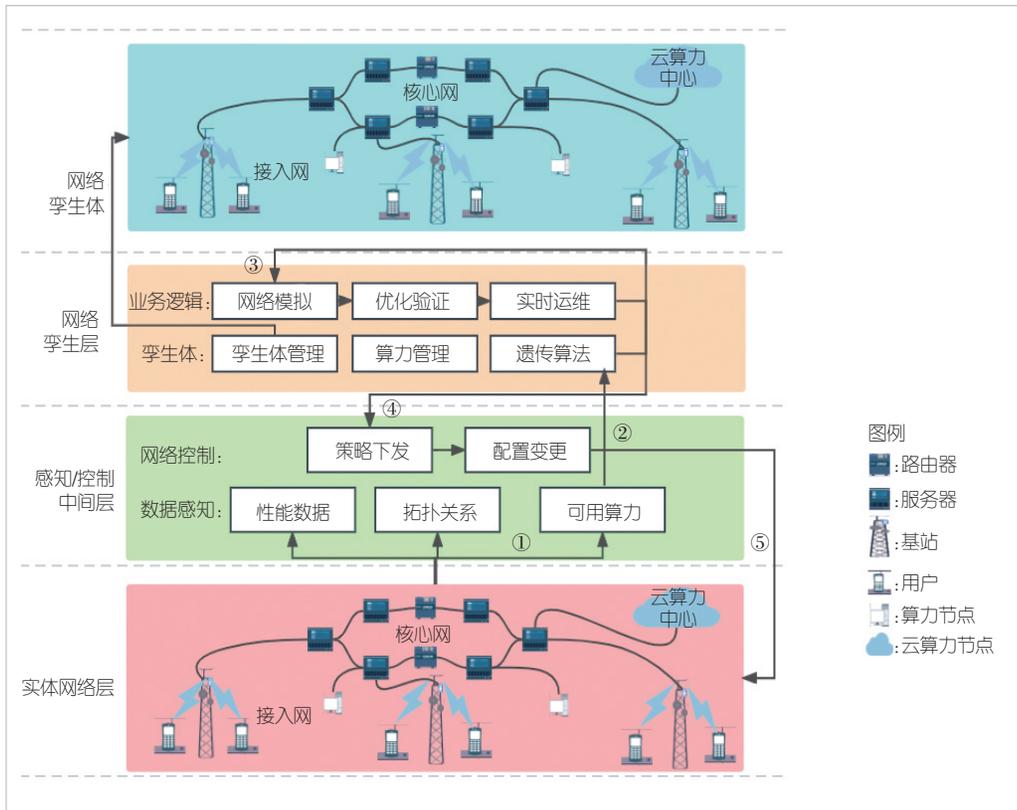
括拓扑连接关系、性能数据和当前资源状态日志及状态信息等，并上传、存储到网络孪生层。网络孪生体是对实体网络层的虚拟映射，以数字化的方式构建孪生网络。孪生网络业务功能先在孪生网络中验证、调整优化策略，然后将验证后的最优策略通过感知/控制层返回给实体网络层，最终在实体网络中执行策略。

2 基于遗传算法的数字孪生算力网络智能优化策略

数字孪生网络的优点是提供了一个低成本的验证平台。依托于网络服务层的灵活接口，孪生网络体可以实现和各种业务、算法的结合。以时延优化为例，我们将遗传算法引入网络孪生层，基于中间层采集的实体网络的状态信息，在原有网络拓扑的基础上通过新建连接或扩大链路的带宽等策略来优化网络时延。由于引入了遗传算法，我们可以在孪生网络中找到成本最小的策略组合来降低网络时延。实体算力网络接收孪生网络体返回的最优策略结果并实施相应的策略，达到降低时延和成本的效果，缓解了人工运维的压力。这使得实体网络能够借助数字孪生网络来实现自组织和自优化^[6]。

因此，我们将新建骨干网络连接和扩大链路带宽两种方案作为数字孪生算力网络的策略模型。若用户的时延超过允

许的最大业务处理时延，实体网络会生成超时日志，并将其上传至虚拟孪生网络中。那么，与实体网络对应的虚拟网络就会调用遗传算法，执行优化策略，改变虚拟网络中的网络结构与状态。这使得时延降低到业务最大容忍处理时延以下^[7]。我们对骨干网中的每个节点进行编号，范围从0~(n-1)。对于实体算力网络中的某个节点*i*(0 ≤ *i* < *n*)，由于数字孪生网络实时监测控制实体网络，当某一业务出现超时，实体网络将超时节点信息的当前网络状态信息传入孪生网络。孪生网络有如公式(1)中的策略可以选择：



▲图1 基于数字孪生的算力网络架构图

$$Policy = \{L(i, n - i + 1), D(i, i + 1)\}, \quad (1)$$

其中, $L(i, n - i + 1)$ 表示网络中的任意节点 i 都可以与第 $n - i + 1$ 号节点建立新的链路连接, $D(i, i + 1)$ 表示节点 i 与节点 $i+1$ 之间的带宽扩大为原来的2倍。

图2左侧是执行策略前的算力网络拓扑结构, 图2右侧表示执行策略后的算力网络拓扑结构。红色的线表示在2号节点和5号节点之间新建链路, 这样可以降低从2号节点到5号节点的请求时延; 绿色的线表示将2号节点和3号节点间的带宽扩大为原来的2倍, 这样也能降低时延。两种策略分别对应不同的成本。

对于新建链路的策略, 将单位长度的有线链路开销记作 c_l , 那么对于骨干网络中的任意一对节点 $i, j (j = n - i + 1)$, 由于 j 节点依赖于 i 节点的确立, 那么新建链路的开销 C_i^l 可以写为:

$$C_i^l = c_l d_{ij}, \quad (2)$$

其中, d_{ij} 表示节点 i 与节点 j 的物理距离。

对于扩容链路带宽的策略, 将扩充单位带宽所需的开销记作 c_b , 那么对于骨干网中任意两个节点 $i, j (j = n - i + 1)$, 扩容链路带宽的开销 C_i^b 可以写为:

$$C_i^b = c_b b_{ij}, \quad (3)$$

其中, b_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的带宽。

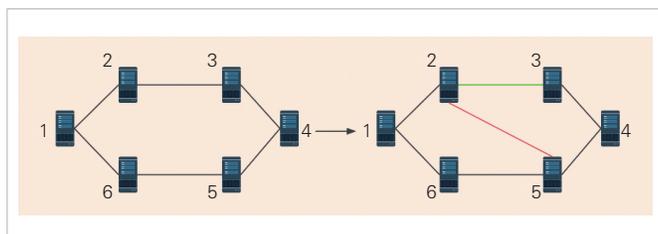
以上是单个节点的情况。

从网络整体的角度分析, 在保证时延不超过业务最大容忍时延的条件下, 每个节点可以采取也可以不采取上述策略, 那么网络整体的开销可以表示为:

$$C = \sum_{i=1}^N (X_i C_i^l + Y_i C_i^b), \quad (4)$$

其中, $X_i = \{0 \text{ or } 1\}$ 是一个布尔变量, 代表第 i 号节点是否选择新建链路的策略。同理, $Y_i = \{0 \text{ or } 1\}$ 表示第 i 号节点是否选择扩大链路带宽。

综上所述, 当物理网络一个业务超时后, 虚拟网络调用遗传算法, 优化目标可以写为:



▲图2 两种典型优化策略示意图

$$\begin{aligned} & \text{Min } C, \\ & \text{s.t. } T_m < T_{\text{thres}}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, T_{thres} 表示用户最大的容忍时延, T_m 表示用户 m 从发出任务请求到接收计算结果的时延, 可以表示为接入网无线链路的时延与核心网有线链路两部分时延之和:

$$T_m = \frac{B_m}{b_m b (1 + \gamma)} + b_n r, \quad (6)$$

其中, B_m 表示用户 m 发出任务的数据包大小, b_m 代表分配给用户 m 的带宽, γ 表示用户 m 到接入路由节点的传输信噪比, r 表示有线链路传输速率与带宽的速率系数, b_n 表示有线链路分配给该任务的带宽。

以上模型对于实体网络和孪生虚拟网络均适用。

遗传算法的基本运算过程包括种群的初始化, 适应度函数的选择、交叉、变异等。我们将遗传算法与数字孪生中的策略模型相结合, 并采用二进制编码, 编码数组的每一位表示网络中的一个节点, 取值为0或1, 0表示不执行式(5)中的策略, 1表示执行式(5)中的策略, 从而形成策略编码。

与数字孪生结合的遗传算法具体步骤如下:

1) 实时监测控制算力网络信息。孪生网络一直处于监测控制实体算力网络的状态, 能够实时采集实体网络的信息。当实体网络的节点 n 超时, 孪生网络会记录此时的实体网络状态信息和超时节点信息, 并将这些信息传入遗传算法模块。

2) 初始化策略种群。我们设置最大进化代数 max_gen 和子代数量 p , 随机生成 M 个个体作为初始群体 $P(0)$ 。

3) 适应度函数的选择。我们将改善网络状况的策略对应的开销作为适应度函数, 将时延小于业务最大允许时延作为约束条件。这一设置旨在最小化适应度函数, 即最小化开销, 对应公式(7)。

4) 个体评价。根据适应度函数计算策略群体 $P(t)$ 中各个策略个体的适应度, 即每种策略对应的开销总和。

5) 选择运算。我们对整个策略群体进行评估, 将每个个体的适应度由小到大进行排序, 保留排名靠前的 N 个个体, 舍弃策略对应的开销大的个体。选择运算的目的是把优化的个体直接遗传到下一代, 或通过配对交叉产生新的个体后再遗传到下一代。

6) 交叉。将步骤3)中选择算子筛选后的群体互相交叉, 产生新的策略组合。

7) 变异。将策略种群的部分个体的策略排列进行突变, 例如0变成1或者1变为0。

8) 重复步骤4)、5)、6)、7), 直到迭代次数等于最大迭代次数。

3 仿真实验

我们对所提出的基于数字孪生的算力网络自优化策略进行仿真。在仿真实验中, 我们参考了实际算力网络, 建立由多终端设备、多路由节点、多边缘计算节点和云计算节点组成的算力网络系统和孪生网络系统。该系统中包含接入网和非全连接网状骨干网络。我们对骨干网络节点数量进行解耦。在解耦过程中, 虽然网络节点数量可以进行具体的设定, 但是与计算节点之间的拓扑连接保持不变。其中, 骨干网络中的各个节点采用有线连接接入骨干网, 终端设备采用无线连接接入骨干网, 孪生网络采用相同的配置^[9]。

假设在一个时隙中, K 个用户业务均为同时发起, 每个业务的算力需求是随机的, 算力网络控制中心则会根据当前各个计算节点的剩余算力和每个计算节点与用户的距离为业务请求分配计算节点。原则是云控制中心为用户分配的计算节点剩余算力大于等于该业务的算力需求, 且计算节点的位置靠近用户^[10]。

3.1 运维成本

基于上述模型与假设, 为了验证遗传算法在降低运维成本方面的有效性, 我们模拟实际中大型骨干网络^[11-12], 分别建立由 60、100、160 个骨干网节点组成的实体网络。当网络中某一节点超时, 实体网络会将此时的网络状态信息与超时节点信息保存成日志。孪生网络会读取该日志并调用遗传算法寻找能够降低时延的成本最优策略。网络成本优化的过程如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 在节点数量比较少的情况下 (60 个), 遗传算法迭代到 40 代左右就找出了成本最优解。在包含 100 个骨干节点的算力网络系统中, 遗传算法迭代到 80 代左右就找到了成本最优解。

3.2 网络平均时延

从网络整体的角度考虑, 在数字网络运行初期, 可能会有很多超时节点。为了衡量数字孪生的自优化模块对网络整体时延的影响, 我们引入了网络平均处理时延这一指标。在某一时隙内网络平均处理时延可以表示为:

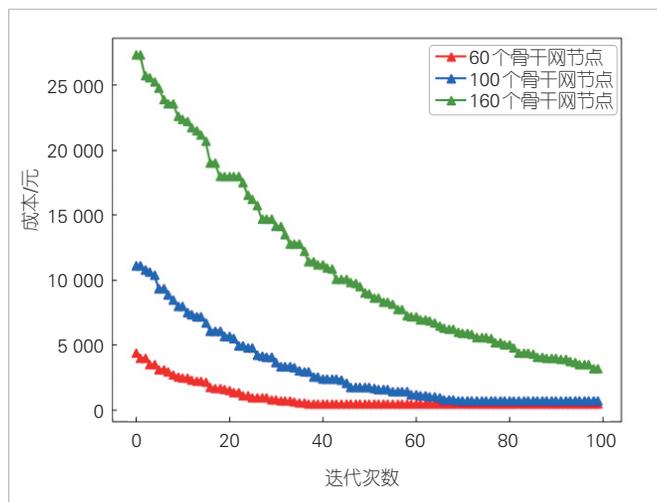
$$D_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M D_{ij}}{N}, \quad (7)$$

其中, D_{ij} 表示某一路由节点下所有用户的时延之和^[6]。

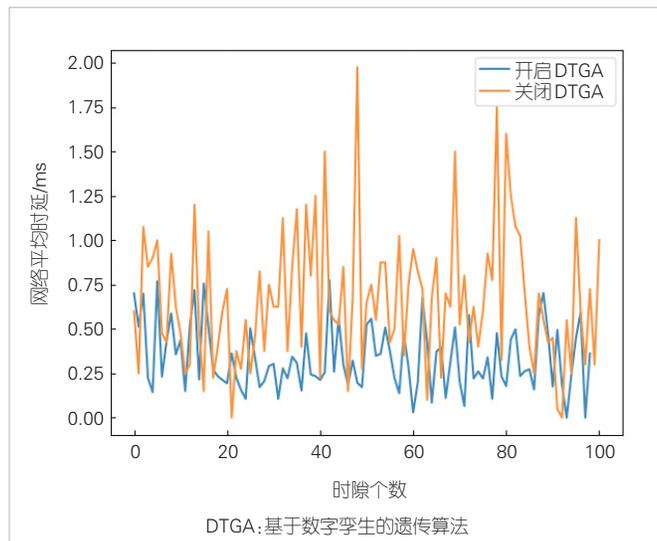
为了验证孪生网络自优化的有效性, 我们监测了 100 个时隙内开启数字孪生自优化模块和关闭数字孪生的网络平均时延, 时延的波动情况如图 4 所示。

如图 4 所示, 我们将最大容忍时延设置为 0.75 ms。在未开启数字孪生自组织优化模块的情况下, 用户的请求在超时后无法被及时处理。可能再过了几十个时隙后, 超时问题才被处理。这种情况会导致较多用户长时间处于超时状态, 用户体验较差。

当数字孪生的遗传算法模块开启后, 用户请求在超时后仍可以被立即响应, 即时优化网络结构。网络的整体时延明显下降, 并且没有超时节点。与关闭数字孪生的情况对比, 整体网络波动趋于稳定, 网络平均时延没有太大的波动, 从而改善了用户的服务质量^[13]。



▲图3 网络成本-迭代次数曲线



▲图4 网络平均时延-时隙曲线

4 结束语

本文中，我们提出了基于数字孪生网络的自组织算力网络。通过将实体算力网络映射到虚拟网络，并将网络优化的策略与遗传算法相结合，网络配置可以在网络孪生层内进行调整、优化和验证。我们提出的网络自优化策略综合考虑业务需求和运维成本，并使用最小的成本优化网络整体时延。该方案借助数字孪生网络对物理网络进行实时控制、反馈与优化，助力算力网络实现自动化和智慧化运维。同时，我们通过仿真验证了开启数字孪生与关闭数字孪生下的算力网络平均时延波动状况。仿真结果表明，开启数字孪生后，网络平均时延明显下降，且网络时延稳定，无明显超时节节点，网络整体的稳定性得到了提高。未来，我们将在数字孪生平台中加入更多的业务功能，诸如故障发现、故障诊断等，进一步减轻人工运维的压力，达到数字孪生网络自治理、自运维的水平。

参考文献

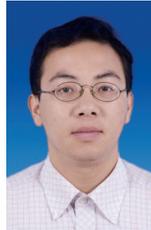
[1] 中国联通研究院. 中国联通算力网络白皮书 [R]. 2020
 [2] 中国移动研究院. 算力感知网络(CAN)技术白皮书(2021版) [R]. 2021
 [3] 贾庆民,丁瑞,刘辉,等. 算力网络研究进展综述 [J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(5):1-12
 [4] 姚惠娟,耿亮. 面向计算网络融合的下一代网络架构 [J]. 电信科学, 2019, 35(9): 38-43. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019212
 [5] 何涛,曹畅,唐雄燕,等. 面向6G需求的算力网络技术 [J]. 移动通信, 2020, 44(6): 131-135. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.020
 [6] 孙钰坤,张兴,雷波. 边缘算力网络中智能算力感知路由分配策略研究 [EB/OL]. (2021-12-07) [2023-04-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1099.TN.20211202.1821.002.html>
 [7] 李铭轩,曹畅,杨建军. 基于可编程网络的算力调度机制研究 [J]. 中兴通讯技术, 2021,27(3):18-22. DOI: 10.12142/ZTETJ.202103005
 [8] 刘泽宁,李凯,吴连涛,等. 多层次算力网络中代价感知任务调度算法 [J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(9): 1810-1822. DOI: 10.7544/issn1000-1239.2020.20200198

[9] 戴鑫. 面向算力网络的微服务调度策略研究与实现 [D]. 东南大学, 2021
 [10] 席裕庚,柴天佑,恽为民. 遗传算法综述 [J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 697-708
 [11] 曹畅,张帅,刘莹,等. 基于通信云和承载网协同的算力网络编排技术 [J]. 电信科学, 2020, 36(7): 55-62. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020197
 [12] 孙滔,周毓,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
 [13] 中国移动研究院. 算网一体网络架构及技术体系展望白皮书 [R]. 2022

作者简介



许胜，北京邮电大学在读硕士研究生；主要研究领域为数字孪生网络和算力网络。



许方敏，北京邮电大学副教授；主要研究领域为未来网络架构及关键技术、工业物联网、大数据分析及应用；获河北省科技进步奖一等奖、吴文俊人工智能科技进步二等奖；发表论文40余篇，申请国家发明专利10余项，出版学术专著4部。



赵成林，北京邮电大学教授、博士生导师；主要研究领域为通信系统中的信号处理、认知无线电与频谱管理、软件定义网络、物联网及其应用，以及大数据分析等；获得省部级（军队）科技进步奖4项；已发表论文近百篇，申请（授权）专利10余项。

天地一体网络场景下的数字孪生关键技术



Digital Twin Key Technologies for Satellite and Mobile Communication Network

陈新宇/CHEN Xinyu, 张强/ZHANG Qiang,
陆光辉/LU Guanghui

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20230620.1624.012.html>

网络出版日期: 2023-06-21

收稿日期: 2023-04-15

摘要: 针对未来天地一体网络的动态组网、多模异构以及网络运维面临的挑战, 提出天地一体网络数字孪生的融合架构。该架构包含数据原生层、数字孪生层等, 可以使网络规划建设极简、运维智能化。针对新的架构, 研究了天地一体网络数据原生、知识图谱、网络模拟仿真和网络策略优化等关键技术及其应用。

关键词: 天地一体网络; 数字孪生; 动态组网; 模拟仿真; 策略优化

Abstract: In response to the challenges faced by dynamic networking, multi-mode heterogeneity, and network operation and maintenance of the future integrated satellite and mobile network, an integrated architecture of digital twins is proposed. This architecture includes a data native layer, a digital twin layer, etc., which can greatly simplify network planning and construction, and make operation and maintenance intelligent. With regard to the new architecture, key technologies and applications such as data native, knowledge map, network simulation, and network strategy optimization in the integrated satellite and mobile network.

Keywords: integration of satellite and mobile communication network; digital twin; dynamic networking; simulation; policy optimization

引用格式: 陈新宇, 张强, 陆光辉. 天地一体网络场景下的数字孪生关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 51-58. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303010

Citation: CHEN X Y, ZHANG Q, LU G H. Digital twin key technologies for satellite and mobile communication network [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 51-58. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303010

1 天地一体网络的场景和面临的挑战

天地一体通信是未来5G、6G的重要技术方向, 面向山区、沙漠、海洋等提供宽带接入或广域物联, 尤其是能够为航线上的飞机提供空中网络接入服务^[1-3]。此外, 在发生地震、海啸等自然灾害时, 天地一体通信能进行应急通信, 实现遥感、观测等。

天地一体化融合通信通过分布式网络覆盖全域, 实现用户随时随地的网络接入。天地一体网络在5G、6G网络中, 将实现卫星和移动通信的融合: 卫星接入与地面接入互补, 地面控制与星上控制并存。

第3代合作伙伴计划(3GPP)从R15就开始研究卫星和

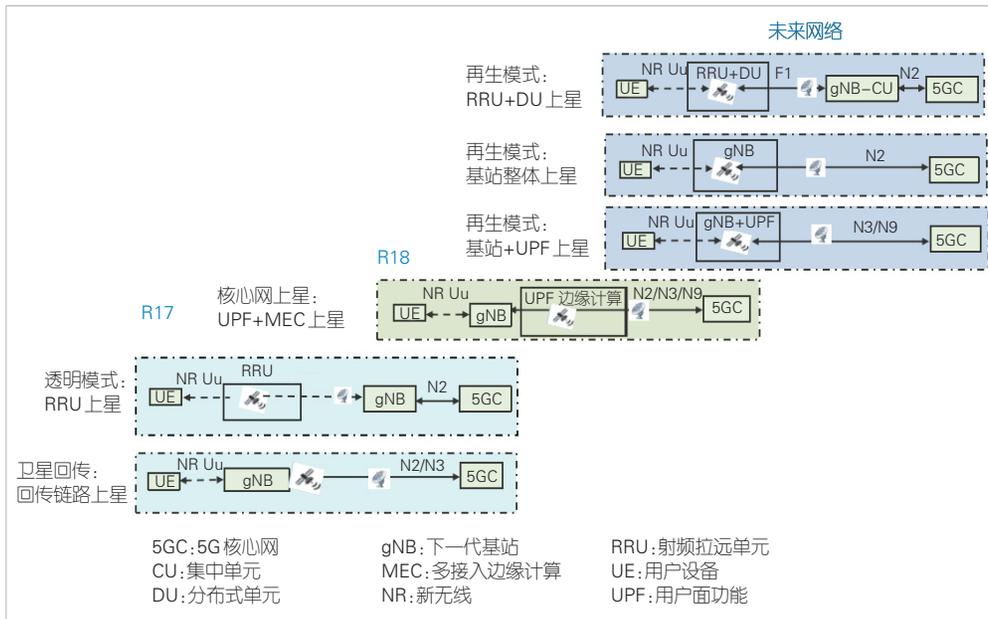
移动通信的融合组网^[4]; 在R16中继续研究卫星组网的通信模式、面临的挑战及解决方案^[5], 其中通信模式包括透明模式、再生模式、核心网上星模式及回传模式等; 在R17中将天地一体通信正式标准化, 包括透明模式和卫星回传; R18开始定义核心网上星, 如图1所示。

1) 透明模式。透明模式又叫弯管模式。在这种模式下, 卫星只进行频率转换, 透传基站空口的数据和信令。基站和核心网都在地面。基站空口的无线信号通过卫星转发到地面。

2) 再生模式。这种模式是指基站在卫星上, 即站随星动, 移动通信信号由星上的基站产生。其中, 基站可以部分或全部在卫星上。

3) 核心网上星。在这种模式下, 核心网网元部分或者全部在卫星上, 例如用户面功能 (UPF)、接入和移动管理

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1806700)



▲图1 天地一体的融合模式

功能（AMF）、会话管理功能（SMF）等^[6]。

4) 回传模式。该模式是指基站和核心网都在地面，卫星起到回传链路的作用。例如，当基站建在海岛上时，由于海岛与陆地之间很难布设光纤，基站无法连接到核心网，但可以通过卫星回传链路实现连接。

天地一体通信涉及卫星网络、天基网络、地基网络协同融合组网，面临一些挑战：

1) 组网复杂且具有动态性。未来卫星通信将涉及地球同步轨道（GEO）卫星、中地球轨道（MEO）卫星、低地球轨道（LEO）卫星等多种卫星。其中，低轨卫星的高速运动使网络拓扑动态变化。这对移动性管理和连接管理都提出了更高的要求。

2) 全异构、多模态接入。天地一体通信需要支持卫星网络、天基网络、地面网络等多模接入。终端的异构性、传输环境的多样化等使天地网络的融合调度更加复杂；其次，天地一体网络的用户分布、业务特性和网络规划都比单一的地面网络难度更大。

3) 运维优化难度高。相比于地面网络，星上和机载系统的部署、开通以及运维优化难度极大，

对板件的可靠性要求高，且难以扩容，因此需要考虑星上和空中网元设备的智能化运维及远程运维（甚至免运维）能力。

2 天地一体网络数字孪生融合的架构

针对天地一体网络在网络规划建设和运维优化方面面临的挑战，本文提出天地一体网络数字孪生的融合架构，如图2所示。该架构包括物理网络层、数据原生层、孪生网络层、孪生应用层，使天地一体网络规划建设极简、运维运营智能化。数字孪生技术与天地

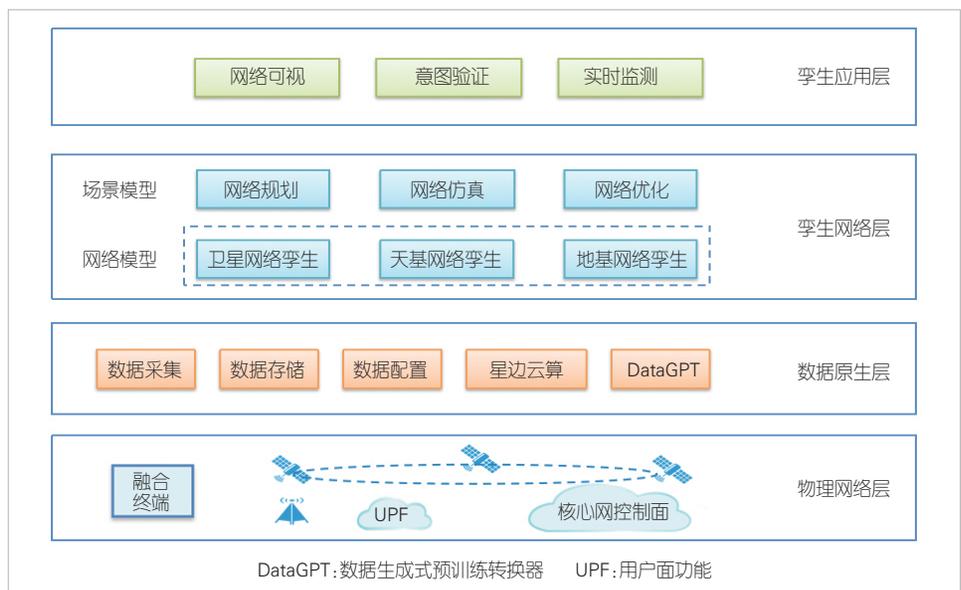
一体网络的结合有助于实现网络模拟仿真和策略优化。

1) 物理网络层

物理网络包括卫星网络、天基网络、地基网络。其中，卫星网络包含高中低轨的卫星，天基网络包含星上基站、核心网、多接入边缘计算（MEC）及业务平台，地基网络包含终端、基站、核心网、业务平台等。

2) 数据原生层

数据原生层是数字孪生的基础，它包含网络采集的原始数据、知识图谱数据，以及数据预处理后的数据大模型。此



▲图2 天地一体网络数字孪生架构

外，该层还包含：各种数据处理功能，例如数据的采集、转换、存储和配置能力；星边云的协同计算功能，例如星上算力、边缘算力和云端算力。其中，几种数据处理功能的介绍如下：

a) 数据采集。数据原生层通过网元管理接口采集卫星网络、天基网络和地基网络的原始数据。其中，原始数据包括配置数据、性能数据、告警数据、拓扑数据、信令数据等。

b) 数据转换。采集的数据需要进行预处理，包括清洗、加工和转换。结合数据生成式预训练转换器（DataGPT）技术产生的通用数据大模型，优化网络知识图谱，以支撑数字孪生层孪生模型的构建。

c) 数据存储。结合网络数据的多样化特性，利用多种数据存储技术，完成海量网络数据的高效存储。

d) 数据配置。根据数字孪生模型产生的优化策略，对实际的物理网络进行配置优化等。

上述 DataGPT 技术的作用是：结合人工智能（AI）技术，对采集的海量数据进行预先训练，进而产生网络数据大模型。DataGPT 可以根据网络孪生层或者其他应用的简要输入，给出当前网络或未来网络有价值的反馈，例如：当请求“当前网络低轨卫星信息”时，DataGPT 输出当前 LEO 卫星详细的卫星数量、轨道信息、覆盖信息等；当请求“如何新增 100 万用户卫星接入”时，DataGPT 反馈未来网络的网元新增数量建议或扩容建议等。根据获取的信息，孪生层可进行网络或网元孪生的生成及仿真。

3) 数字孪生层

数字孪生层根据数据原生层的数据和知识图谱构建卫星网络孪生、天基网络孪生和地基网络孪生（简称“三网”孪生）。“三网”孪生的有机结合，有助于形成统一的数字孪生模型。在这种模型的基础上构建场景模型，可实现网络模拟仿真和策略优化等。

4) 孪生应用层

孪生应用层为运维、运营人员提供各种基于孪生网络的应用，包括网络可视、网络监测、意图验证等。

在天地一体网络数字孪生的融合架构中，数据原生层和数字孪生层是数字孪生架构的核心，

包含数据原生技术、网络知识图谱技术、天地一体模拟仿真技术和策略优化技术等。

3 天地一体网络数字孪生关键技术

3.1 天地一体网络数据原生技术

天地一体孪生网络的构建离不开数据的采集、清洗和分析。随着 AI 技术的发展，5G 网络、6G 未来网络将是大数据模型时代的网络，而天地一体网络将是数据原生的网络，包含丰富的数据，例如用户数据、业务数据、网络数据、算力数据、环境数据、空间数据等。只有进行大量数据的采集和分析，才能够对卫星网络、天基网络和地面网络的数字孪生进行建模。

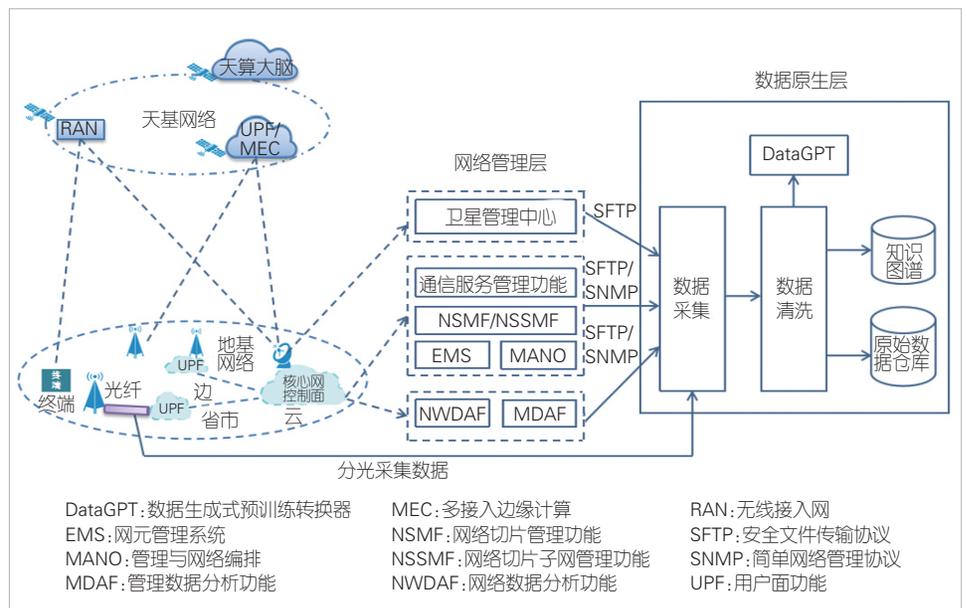
天地一体通信网络中的数据为多源异构数据，是跨层和跨领域的，有时甚至是跨运营商的，例如：卫星网络的轨道数据、星链数据、空间环境数据；天基网络的星上基站数据、星上核心网数据；地基网络的地面基站数据、地面核心网数据，以及网元部署涉及的地理环境数据、机房数据等。

3.1.1 数据采集

在采集数据方面，不同的网络可以采用不同的数据采集技术，如图 3 所示。

1) 地基网络

对于用户面数据，例如文本、图片、视频，可以采用分光技术，直接从光纤中采集；对于海量信令，也可以采用分



▲图3 数据原生技术

光技术进行收集；对于云化数据中心的虚拟资源数据，例如CPU、内存、网络等信息，可以从管理与网络编排(MANO)中采集；对于网元的数据，例如配置数据、拓扑数据、性能或告警数据，可以从网元管理系统(EMS)中采集；对于网络切片的数据，可以从网络切片管理功能(NSMF)、通信服务管理功能(CSMF)中采集。此外，地基网络还可以从管理数据分析功能(MDAF)、网络数据分析功能(NWDAF)中获取初步加工后的数据。现有的NWDAF/MDAF根据规则和算法，对从网元中采集的数据进行初步加工和处理，例如按切片或区域的流量分布信息等。

非实时的数据可以通过安全文件传输协议(SFTP)传递；实时的数据(如实时监测的性能数据)可以通过简单网络管理协议(SNMP)采集。

2) 天基网络

对于普通的数据，例如星上基站或核心网的配置数据，可以通过地面远程网元管理系统进行采集，这与地基网络类似。采集实时的动态数据具有很大的挑战性。这是因为网络是动态的，进行实时、大量原始数据的采集会造成天地通信信道资源的极大浪费。因此，后期部署星上孪生是一种不错的选择。星上孪生可以与星上运维系统进行一体化部署，对天基网元采集的数据进行提炼、归纳、特征提取等。在对数据进行精简后，星上孪生与地基网络孪生联合，最后形成统一的天地一体化网络数据仓库。

3) 卫星网络

卫星网络可以从卫星运维控制中心采集数据，例如星历数据；或者通过星关站或地面基站，收集或计算卫星网络的轨道数据。

3.1.2 数据清洗

在数据采集后，数据原生层将对数据进行清洗。数据清洗主要是对错误数据、残缺数据和重复数据进行清理。

1) 对错误数据进行纠错

数据错误通常包括格式错误、取值错误、前后不一致等。对此，可以根据模板或者配置数据的设置范围进行校验，例如：对于切片数据，我们可以根据切片模板对数据进行检测和纠正。

2) 对缺失数据进行补充

采集的网络数据的字段可能存在缺失值的问题。目前处理缺失值问题的方法有很多种，但无论哪种方法都需要遵从一定的步骤：首先确定缺失值范围，计算每个字段的缺失值比例，然后再按照缺失比例和字段重要性，分别制定策略。某些缺失值是可以填充的，相应的填充方法有3种：以业务

知识或经验推测填充缺失值；以同一指标的计算结果(均值、中位数、众数等)填充缺失值；以不同指标的计算结果填充缺失值。

3) 对重复数据进行删除

对重复数据进行删除是指：根据采集对象的粒度(如网元粒度、用户粒度等)进行检重，分别以网元名称、用户号码、业务标识等，对关键字段进行关联查询和验证，然后对相同对象的多份数据进行精简，删除其中重复的数据。

对于异构数据，如果是不同厂家的设备，数据配置字段可能有所差异。对此，通过字段对齐和数据转换，能够获得一致的结构化数据。如果涉及多个运营商，那些需要共享的敏感数据，可以基于区块链、联邦学习实现分享、转换和网络关联。

在完成清洗后，数据将被存入原始数据库中，随后经过进一步的分析和预处理。

DataGPT会对结构化的数据进行关联和统计分析，例如：实现同一个告警原因的跨层关联，即根因分析；对同一个用户的信令数据进行跨域关联，将不同域采集的数据关联到同一个号码，实现端到信令交互的可视化。对于非结构化数据(例如文本)，可基于业界经典算法进行分析，对数据模型进行预训练。

如果采集的数据包含新的实体或实体关系，则更新网络数据知识图谱。

3.2 天地一体网络知识图谱技术

知识图谱是结构化的语义知识库，用于迅速描述物理世界中的概念及相互关系。天地一体网络涉及卫星网络、通信网络、地理环境等复杂的物理世界，其中实体众多、关系较为复杂。因此，构建清晰、有逻辑的网络知识图谱，更有利于网络数字孪生的构建、仿真和优化。

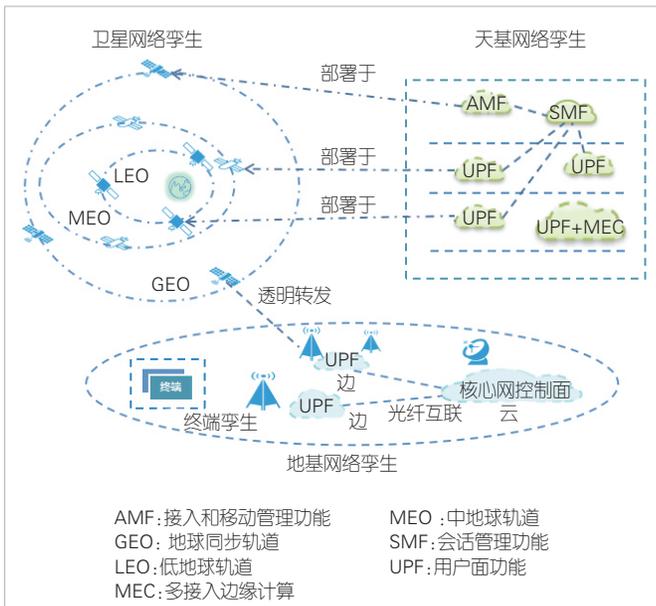
如图4所示，卫星移动通信网络包括卫星网络、天基网络、地基网络，而这3张网络又是有机融合在一起的，未来将实现终端融合、频谱融合、体制融合、业务融合、管理融合等^[7]。拥有3张网络的全景知识图谱可以更好地仿真和预测网络的运行状况。

如图5所示，天地一体网络知识图谱的构建过程包括信息抽取、知识融合和知识加工。

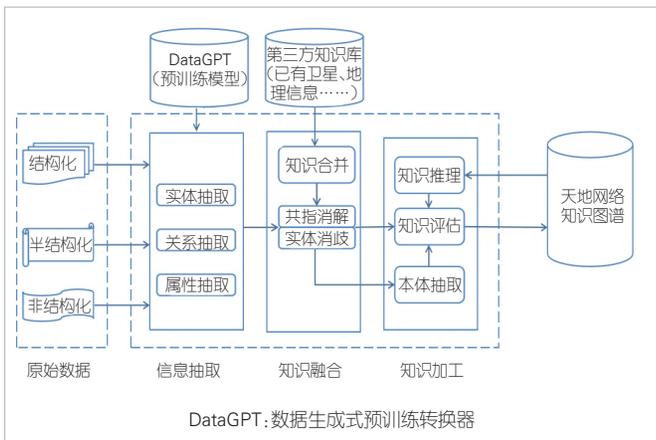
3.2.1 信息抽取

信息抽取是知识图谱建立的基础，它包括实体抽取、关系抽取和属性抽取。

1) 实体抽取



▲图4 “三网”孪生的知识图谱



▲图5 天地一体网络知识图谱构建

天地一体网络数据主要包括数据原生层采集的现网原始数据，例如网元配置数据、网络拓扑数据等；也包括其他文本数据，例如国际电信联盟（ITU）、3GPP、中国通信标准化协会（CCSA）的标准、研究报告等。由于网络实体通常是相对清晰明确的，因此我们可预先对常见的已知实体（例如基站、核心网等）进行建模和标注，结合采集的结构化网元配置数据，简化实体的抽取过程，避免从海量无序的数据中费时抽取。天地一体网络的实体示例如表1所示。这些网络实体可根据需要增加。

2) 关系抽取

常见实体之间的关系可通过有监督的标记学习方法进行识别。如表2所示，实体之间的关系包括卫星实体之间的关系、网元实体与卫星实体之间的关系、网元实体之间的关系。这些实体之间的关系可基于采集的网元拓扑数据自动生

成和更新，如核心网上星部署位置、组网信息及DataGPT的模型数据。

3) 属性抽取

结构化的数据可以直接从配置数据中抽取，例如：AMF网元属性的当前配置数据（包括AMF名称、位置、容量等）可以直接入库。此外，也可以基于业界的共知共识或其他规则对属性建模，例如：卫星轨道参数通常包括卫星编号、轨道半长径、偏心率、升交点、平均近点角、轨道倾角等。

对于非结构化或半结构化数据（如信令、日志文件等）可基于报文分析和模型训练自动抽取。

3.2.2 知识融合

知识融合是指对抽取的天地一体网络实体进行融合分析，它包括实体链接和知识合并。

1) 实体链接是指将抽取得到的实体对象链接到知识库中对应的正确实体对象的操作。在进行实体链接时，需要进行实体消歧和共指消解。实体消歧专门用于解决同名实体产生歧义问题，例如：星上基站可能是分布式单元（DU），也可能是DU/集中单元（CU）合一，因此需要结合部署数据进一步区分。共指消解主要用于解决多个指称对应同一实体对象的问题，例如：AMF和接入与移动性管理功能是同一个网元，需要进行合并。

2) 知识合并是指从第三方知识库产品或已有结构化数

▼表1 天地一体网络知识图谱实体

| 实体示例 | 说明 |
|------|------------------------------|
| 卫星 | 用于部署天基网络的基站或核心网,或提供无线空口的透明转发 |
| 信关站 | 提供天基网络与地基网络的互通 |
| 基站 | 多信道双向无线电发射站,可部署于卫星或地面 |
| 核心网 | 提供核心网相关功能,包括AMF、SMF、UPF等。 |
| 终端 | 可接入卫星或者地面基站 |

AMF:接入和移动管理功能 SMF:会话管理功能 UPF:用户面功能

▼表2 实体关系建模

| 实体之间 | 关系描述 |
|-------|---|
| 卫星与卫星 | 星际链路相连 位于相同轨道 |
| 网元与卫星 | 基站部署于卫星 核心网部署于卫星 卫星作为网元回传链路 卫星透明转发空口信号 基站通过信关站与卫星相连 |
| 网元与网元 | 网元间通过光纤互联 网元通过星地互联 |

据中获取知识输入，然后进行合并，以避免重复建库。相关的数据库包括地理信息库、已有的卫星知识库等。

3.2.3 知识加工

在对网络基本知识图谱进行抽取后，相关知识需要进行进一步加工和推理。

1) 基于抽取的实体、属性和关系，进行本体抽取。例如：在对抽取的实体进行归类时，AMF、SMF归类为核心网元，LEO、MEO、GEO归类为卫星等。

2) 基于现有的实体关系，推理更深层次的实体关系。例如：通过卫星的两两相邻或相连关系，推理多星串联远距离覆盖范围；通过卫星轨道的高度，推理卫星链路上下行通信时延等。

天地一体化网络知识图谱的构建是一个不断迭代和更新的过程。通过上述步骤进行反复迭代更新，我们就能逐步获得完善的网络知识图谱库。

3.3 天地一体网络模拟仿真技术

在完成数据仓库与网络知识图谱的建立后，我们可以对天地一体网络进行数字化仿真验证。我们认为可以通过数字孪生技术对卫星通信进行各种仿真实验，包括卫星的运行轨迹仿真、通信链路状态仿真等。

相比于单一的地面网络，空天一体网络的网络拓扑更加复杂，其连接方式不仅有静态的光纤，还有动态的星地链路、星际链路。此外，低轨卫星的部署使得网络的拓扑动态变化。因此，天地一体的网络模拟仿真具有很大的挑战性。

通常网络仿真的工具或方法大致可以分为3类：基于离散事件的仿真器、网络模拟器和数据驱动的网络仿真。

1) 基于离散事件的仿真器。相关的仿真器有网络仿真第2版本（NS-2）、NS-3，它们均利用完全包级别事件进行预测。这种仿真器的优点是准确性高，缺点是计算资源消耗大、在大规模网络中的仿真速度慢。

2) 网络模拟器。网络模拟器能够利用灵活的虚拟环境进行预测，其优点是可部分复现现网故障，仿真模拟过程简单，缺点是应用范围窄、复现性差。例如：Mininet是一种开源的网络仿真工具，它主要用于构建虚拟的软件定义网络（SDN）实验环境。

3) 数据驱动的网络仿真。数据驱动可结合目前的AI技术，如机器学习、深度学习、深度强化学习。这种方法的优势是无需人工参与（即使需要，也是很少量的）、表达能力强、可自动拟合复杂关系，缺点是数据的获取困难，有可能需要其他仿真工具补充数据

天地一体的网络仿真主要是基于第三种数据驱动的网络仿真。结合数据原生层采集的数据，这种方法可以将其化整为零，分级、分域、分场景地进行仿真，例如：先进行网元仿真、网络仿真，然后进行主题相关的场景仿真、多运营商协同仿真等。

首先，构建基本网元的孪生仿真仓库，即结合网络知识图谱，构建物理网元的孪生体组件库，包括卫星、信关站、基站、核心网等，如表3所示。

其次，构建网络数字孪生的仿真，即在孪生网元组件库的基础上，对卫星网络、天基网络、地基网络进行可视化的仿真建模，例如：卫星网络数字孪生，包括卫星模型、星链模型、轨道模型、信道模型、星地覆盖模型等，可实现全面立体的可视化建模。网络孪生的构建方式包括手工和自动两种，如图6所示。

1) 手工方式：在网络规划阶段或者技术验证阶段，可以根据业务需求、组网需求、性能需求，通过可视化界面，从基本孪生模型库仓库中选取基本的孪生组件元素，构建网络孪生。通过拖拽、灵活组装，手工方式可实现所见即所得。此外，手工方式还需要再设置各孪生组件的孪生特征、和连接关系。

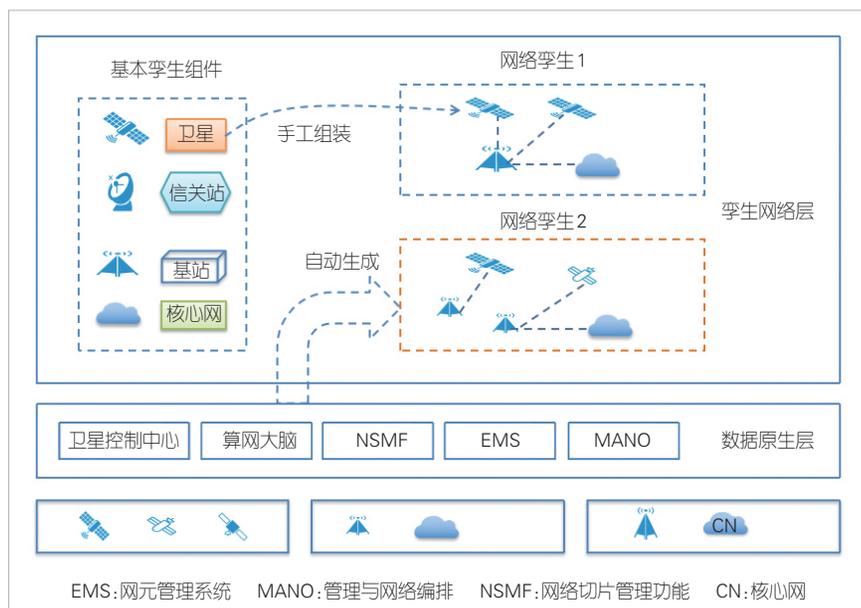
2) 自动方式：根据数据原生层采集的现网数据，结合知识图谱以及孪生组件库，自动构建现实物理网络的孪生网络。

最后，构建场景的数字孪生的仿真，即在数据和知识图谱双驱动的条件下先进行联合仿真，再结合神经网络，针对特殊的场景进行仿真和逐步收敛。此外，不同的仿真组件需要进行服务化设置，以根据需要满足灵活的定制和组装需

▼表3 基本网元孪生组件

| | 孪生体 | 孪生特性 |
|-----|----------------------|--|
| | 卫星 | 轨道参数(轨道倾角、升交点、偏心率、半长轴、平均近点角等)、波束信息、星际链路信息、频段、容量等 |
| | 信关站 | 位置、频段、协议等 |
| 基站 | AAU/RRU、DU/CU | 位置、频段、容量、信道等 |
| 核心网 | AMF、SMF、UPF、PCF、UDM等 | 位置、容量、资源等 |
| 终端 | VSAT、手机等 | 功耗、频段、类型、厂家等 |
| 链路 | 星际链路、星地链路、光纤 | 类型、时延、带宽、抖动等 |

AAU:有源天线单元
 AMF:接入和移动管理功能
 CU:集中单元
 DU:分布式单元
 PCF:策略控制功能
 RRU:射频拉远单元
 SMF:会话管理功能
 UDM:统一数据管理
 UPF:用户面功能
 VSAT:甚小口径卫星终端站



▲图6 天地一体网络仿真

求。基于微服务化的建模仿真架构可提供一系列灵活、可插拔的微服务仿真技术组件。每个微服务组件实现一个小的、高度可重用的功能，针对不同场景可按需获取，灵活组装和联动。

1) 基本场景：针对基本流程的话务模型的仿真，例如登记、会话建立、切换等^[8]，仿真星地协同、星地漫游、星地一体组网的各种场景下的流程。

2) 应用场景：针对特定需要进行定制，例如信令风暴仿真、容灾仿真、扩容仿真、动态切片仿真等。

3) 协同仿真：物理网络可能存在多运营商协同运营的场景，例如卫星网络属于A运营商，天基网络属于B运营商，地基网络属于C运营商，运营商之间的数据可以通过联邦学习、区块链实现数据的共享。

3.4 天地一体网络策略优化技术

数字孪生的目标是实现网络优化，通过数字孪生进行“以虚控实，以虚优实”，最终达到虚实共生（或者虚实融生）。

天地一体网络是异构多模的网络。卫星网络、天基网络、地面网络相互关联、相互影响。任何一个网络的调整都将影响到其他网络，例如：卫星参数的调整、基站参数的调整、

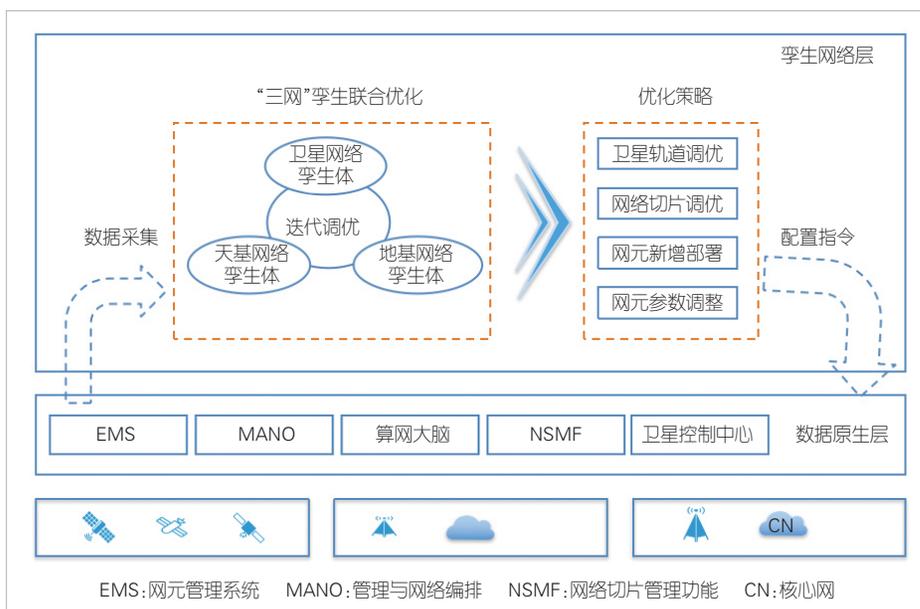
核心网网元的新增等，都会产生相互之间的影响。未来网络不仅有切片，还有子网，其系统是多频段、多子网的。此外，由于天基网络、卫星网络均在空中，网络升级、远程运维都不方便。

如图7所示，当物理网络需要调优的时候，系统从数据原生层采集数据，在“三网”孪生的基础上，可以结合已经构建的场景孪生模型进行迭代调优，还可以结合GAN，对仿真生成的预期目标与实际采集的数据进行对比分析；当网络性能达到预期目标的时候，再下发策略对网络进行调优。相关调优包括卫星轨道和覆盖调优、天基网络服务质量（QoS）策略调优^[9]、切片资源调度调优。

优化策略的执行有多种方式：可以通过EMS调整网元参数，也可以通过MANO调整网元的资源，或者通过NSMF对网络切片进行调整。如果过程中涉及算网调度策略，则可以与算网大脑进行协同，调整算网的调度策略；如果涉及卫星的调控，则可以与卫星调度管理中心进行协同，调整卫星的参数。

4 结束语

面对日益复杂的天地一体的未来网络，运维和优化都将面临极大的挑战。针对这些挑战，我们提出天地一体网络数字孪生融合的架构，在物理网络的基础上，构建数据原生



▲图7 天地一体优化决策

层、数字孪生层，以便支持数字孪生的各种应用，并着重研究了其中的数据原生、网络知识图谱、网络孪生仿真和决策优化技术。本文中我们研究天地一体网络数字孪生构建的基本思路和方法。其中，数字孪生和网元层、管理层是分离的。未来数字孪生可以基于AI技术进一步管理工具进行融合，甚至与网元层和网络层融合。物理实体和数字孪生模型基于双向交互，实时感知对方更新的内容，分析两者间的差异，并利用AI等技术实现孪生模型的自主构建或动态重构，使两者在长时间的运行过程中保持动态一致性，从而保证网络规范化、建设、运营、运维与数字孪生一体化，实现虚实共生，达到天地一体网络管理全可视化、全智能化。

参考文献

[1] 田开波, 杨振, 张楠. 空天地一体化网络技术展望 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 2-6. DOI:10.12142/ZTETJ.202105002

[2] MA Y Y, MA G Y, WANG N, et al. OTFS enabled NOMA for mMTC systems over LEO satellite [J]. ZTE Communications, 2021, 19(4): 63-70. DOI: 10.12142/ZTECOM.202104007

[3] 孙智立, 李天儒. 大规模低轨星座卫星通信网发展展望 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 48-51. DOI:10.12142/ZTETJ.202105010

[4] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks: 3GPP TR 38.811 [S]. 2020

[5] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): 3GPP TR 38.821 [S]. 2021

[6] 3GPP. System architecture for the 5G system: 3GPP TS 23.501[S]. 2020

[7] CCSA. 面向5G增强及6G的星地融合技术研究 [R].2021

[8] 3GPP. Procedures for the 5G system (5GS); stage 2: 3GPP TS 23.502 [S]. 2020

[9] 3GPP. Policy and charging control framework for the 5G system (5GS); stage 2: 3GPP TS 23.503 [S]. 2020

作者简介



陈新宇，中兴通讯股份有限公司电信云及核心网产品总经理；负责核心网整体经营，从事5G/6G核心网、电信云等关键技术研究。



张强，中兴通讯股份有限公司核心网架构师；从事5G、6G新技术研究及核心网产品规划的相关工作；发表论文5篇，申请专利近20项。



陆光辉，中兴通讯股份有限公司网络首席架构师；从事5G、6G、SDN/NFV、电信云研究，以及核心网产品规划工作；发表论文9篇，申请专利10余项。

智能计算中心发展态势研究



Advances of Intelligent Computing Center

焦奕硕/JIAO Yishuo, 邸绍岩/DI Shaoyan

(中国信息通信研究院, 中国 北京 100191)
(China Academy of Information Communication Technology, Beijing
100191, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20211018.1755.002.html>

网络出版日期: 2021-10-19

收稿日期: 2021-09-15

摘要: 智能计算中心是中国新型基础设施建设的重要组成部分, 是满足人工智能算力需求、支撑国家智能化转型的重要力量之一。智能计算中心已得到国家和业界高度关注, 将会迎来规模化建设和应用。智能计算中心作为智能算力的系统集成和融合创新平台, 将从需求侧拉动各类人工智能技术创新进步。此外, 智能计算中心将大大降低智能算力的使用门槛, 推动人工智能普惠化发展, 助力各行业智慧化转型升级。

关键词: 智能计算中心; 人工智能; 算力基础设施; 新基建

Abstract: The intelligent computing center is an important part of China's new infrastructure construction, and it is one of the important forces to meet the needs of artificial intelligence (AI) computing power and support the country's intelligent transformation. The intelligent computing center is highly concerned by the country and the industry and will usher in large-scale construction and application. As the systematic integration of various kinds of intelligent computing devices and techniques, the intelligent computing center will lead to the creative development of AI techniques. In addition, the intelligent computing center will greatly reduce the threshold of the use of intelligent computing power, promote the inclusive development of artificial intelligence, and help the intelligent transformation and upgrading of various industries.

Keywords: intelligent computing center; artificial intelligence; computing infrastructure; new infrastructure construction

引用格式: 焦奕硕, 邸绍岩. 智能计算中心发展态势研究 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 59-63. DOI:10.12142/ZTETJ.202303011

Citation: JIAO Y S, DI S Y. Advances of intelligent computing center [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 59-63. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303011

随着国民经济各行业向数字化、网络化和智能化的加速转型, 人工智能技术不断发展, 应用场景不断拓展。然而, 人工智能模型训练所需的海量数据和大规模算力已逐渐超过了多数企业的能力范围。这与日益增长的人工智能应用需求产生了较大矛盾。建造智能计算中心, 能够大规模生产智能算力, 并按需为人工智能应用落地提供算法、算力和数据服务。智能计算中心越发受到地方政府关注, 有望成为支撑和引领数字经济、智慧社会发展的关键新型基础设施之一。

1 智能计算中心发展背景

1.1 智能计算中心是满足人工智能算力需求的重要途径

随着人工智能在各行各业的加速落地, 数据处理需求加速增长, 算法模型复杂化程度不断提升, 智能算力需求也急速增长。据 OpenAI 的统计数据, 自 2012 年以来, 人工智能模型所需的计算量增长了 30 万倍。目前, 暴力计算仍是人

工智能解决一些应用问题最有效的手段。神经网络的能力边界有待于进一步探索, 预计未来会需更高的算力。在全球引起轰动的 ChatGPT 参数量达到了 1 750 亿, 微软甚至专门为 OpenAI 搭建了人工智能计算中心来支撑相关模型所需算力。然而, 除了以微软为代表的顶级科技巨头, 绝大多数企业无法承担人工智能计算中心的建设和运营费用。据互联网数据中心 (IDC) 调研, 74.5% 的企业期望采用具有公共设施意义上的人工智能计算中心。那么, 通过统一建设高性能、大规模的智能计算中心, 并面向公众以服务形式提供算力, 成为解决该问题的重要途径。

1.2 智能计算中心是“新基建”国家战略的重要组成部分

2018 年底的中央经济工作会议提出了“新型基础设施建设” (后简称为“新基建”)。“新基建”的概念正式进入公众视野。2020 年 4 月, 国家发展和改革委员会 (后简称为“国家发展改革委”) 在新闻发布会中进一步明确了“新基建”的范围, 提出“新基建”包括信息基础设施、融合基础

设施、创新基础设施3个方面。其中,信息基础设施包括以5G、物联网、工业互联网、卫星互联网为代表的通信网络基础设施,以人工智能、云计算、区块链等为代表的新技术基础设施,以数据中心、智能计算中心为代表的算力基础设施等。2020年5月,国家发展改革委在《关于2019年国民经济和社会发展规划执行情况与2020年国民经济和社会发展规划草案的报告》中提出,制定加快新型基础设施建设和发展的意见,并实施全国一体化大数据中心建设工程,在全国布局10个左右区域级数据中心集群和智能计算中心。工业和信息化部在2021年8月发布的《新型数据中心发展三年行动计划(2021—2023年)》中提出,要加快推进边缘数据中心、智能计算中心等标准建设,支撑新技术新应用落地。2022年1月,国务院印发的《“十四五”数字经济发展规划》中提出,推动智能计算中心有序发展,打造智能算力、通用算法和开发平台一体化的新型智能基础设施。

1.3 智能计算中心建设开始在全国各地落地

以广州、武汉、济南等为代表的各地纷纷宣布启动智能计算中心建设。2020年4月,广州市政府出台的《广州市加快打造数字经济创新引领型城市的若干措施》提出,面向人工智能和5G应用场景,建设基于图形处理器(GPU)的人工智能、区块链算力中心。2020年10月,武汉宣布启动武汉人工智能计算中心建设,计算中心将围绕武汉创建国家新一代人工智能创新发展试验区,助力武汉市智能制造、智慧医疗、智能数字设计与建造、智能网联汽车等产业发展。2020年11月,国家信息中心联合浪潮发布了《智能计算中心规划建设指南》,明确了智能计算中心的概念和架构等。浪潮集团在济南市积极筹建智能计算中心,并通过配套建立培育产业链群的专业园区,打造“中国算谷”人工智能算力平台,支撑济南建设国家新一代人工智能创新发展试验区。

2 智能计算中心的内涵和主要特征

2.1 智能计算中心的内涵

综合对比产业界对智能计算中心的理解,智能计算中心的概念可总结为:基于领先人工智能计算架构,为公众提供人工智能应用所需的算力服务、数据服务和算法服务的新型基础设施。不同于企业自建的人工智能算力中心,智能计算中心的定位是公共设施,是中国新型基础设施的有机组成部分。智能计算中心一般包含基础支撑、核心功能和提供服务等要素。其中,基础支撑主要指运行人工智能计算的相关芯片和算法等;核心功能主要指算力的生产、聚合、调度和释

放等作业环节以及支持相关环节实现的软硬件平台;提供服务主要是指计算中心对外提供的算力、数据和算法等相关服务^[1]。

2.2 智能计算中心的主要特征

1) 开放合作。智能计算中心的公共属性决定了其建设多由政府主导、筹划,技术密集属性决定了其具体建设运营须由相关科技企业或科研机构执行。智能计算中心的建设、运行须产学研用开放合作,协同推进。

2) 创新融合。为提供领先的算力和算法等服务,智能计算中心须采用最新的技术理念,通过硬件重构和软件定义等创新技术来实现多种资源和技术要素的协同和融合。

3) 生态协同。智能计算中心的基础设施属性决定其核心功能之一是为各行各业提供智慧化转型支撑。智能计算中心需面向行业发展需求,基于算力、算法和数据等核心资源的汇聚,开展技术研发、成果转化和落地等工作,进一步吸引业务、资金和人才等创新要素集聚,共同培育智能产业生态^[2-3]。

2.3 智能计算中心建设的主体力量

目前,智能计算中心正处于发展的起步阶段,政府、企业和学术机构均积极响应,并以多方合作的形式在智能计算中心建设领域进行探索。

1) 地方政府。以武汉、济南等为代表的地方政府均在顶层规划时就对智能计算中心进行布局,与企业开展合作,通过建设配套产业园区和人才培养平台等方式促进智能计算中心发展。

2) 业界企业。以华为和浪潮为代表的信息通信技术(ICT)基础设施企业凭借其物理设施建设优势,通过承建智能计算中心,搭建产业合作平台,打造人工智能算力生态。以寒武纪为代表的人工智能领域企业依托专精优势,通过成立合资公司等形式参与智能计算中心的建设和运营,借助智能计算中心平台扩大自有生态优势。

3) 学术机构。以国家信息中心、中国科学技术信息研究所等为代表的学术研究机构和企业合作发布智能计算中心相关白皮书,定义智能计算中心概念框架,提供建设建议,助力智能计算中心生态建设。

3 智能计算中心的核心架构和技术特征

3.1 智能计算中心的代表性架构和关键技术

当前,智能计算中心处于探索阶段,尚未开展规模化建

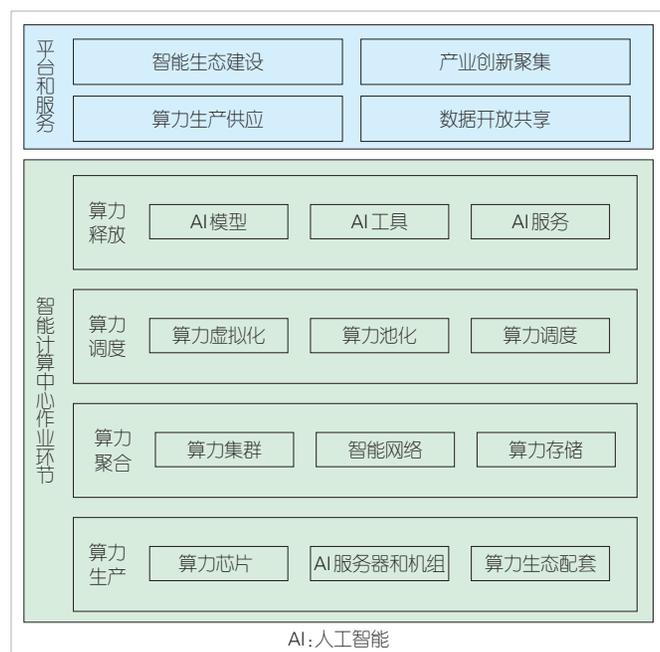
设, 因此暂未形成成熟稳定的技术指标体系。然而, 从定量层面上看, 智能计算中心以算力为主要技术指标。当前较多业界专家认为发展良好的智能计算中心所能提供的算力应在 5~10 EFlops, 与此同时, 其电源使用效率 (PUE) 大概为 1.3~1.4。从定性层面上看, 当前业界针对智能计算中心的架构和相关核心技术已达成一些共识, 其中以国家信息中心所发布的《智能计算中心规划建设指南》中所建议的架构最具有代表性^[4], 具体如图 1 所示。

算力生产环节主要包括以芯片为核心的各类硬件, 以及和其相配套的基础软件、基准性能测试等配套生态, 它们是智能计算中心对外提供服务和算力的基础支撑环节。算力生产环节的核心技术有中央处理器 (CPU)、GPU、现场可编程门阵列 (FPGA)、专用集成电路 (ASIC) 等, 以及将 GPU、FPGA 和 ASIC 各类算力进行系统集成的 AI 服务器和算力机组。算力聚合环节通过高速互联网络将各计算节点、存储节点进行连接, 针对智能计算多任务、大规模、高并发等特点, 构建高带宽和低延迟的数据汇聚交换平台, 从而将算力生产环节所产生的算力在计算中心内进行聚合。算力聚合环节的核心技术有数据中心网络和大数据混合加速等。数据中心网络又可分为节点内互联和节点外互联。寒武纪所研发的思源 MLU-Link 技术可以实现节点内 600 Gbit/s 级别的互联速率, 节点外互联以 Infiniband 为代表, 速率能够达到 200 Gbit/s。此外, 华为发布了 AI Fabric 智能无损数据中心网络方案, 通过将无损网络拥塞控制算法和网卡等硬件集成

协作, 承载远程直接数据存取 (RDMA), 形成无时延、无吞吐损失和丢包损失的开放以太网。为解决数据访问慢及数据多平台重复存储等性能瓶颈问题, 大数据混合加速主要针对存储和计算分离, 可在计算节点下构建虚拟数据湖, 在计算框架和存储框架中间增加中间缓存层, 从而实现缓存效率提升以及数据快速定位读取, 整体降低数据存储和访问成本^[5]。

基于云计算领域虚拟化和容器编排调度等技术, 算力调度环节将算力进行精准调配, 保证上层平台和服务的算力供应。算力调度环节的核心技术是 GPU 虚拟化以及虚拟 GPU 调度。其中, GPU 虚拟化是指将一块物理 GPU 通过虚拟化技术虚拟成为多块虚拟 GPU (vGPU), 通过将 vGPU 纳入统一管理并在多个工作负载中统一调配, 实现算力资源池化; 虚拟 GPU 调度多基于云原生核心技术 Kubernetes, 通过容器编排调度将算力更为优化地分配到有需求的节点, 从而减少资源空置, 提升整体效能和稳定性, 实现服务能力的最优配置^[5]。

算力释放环节是指在算力生产、算力聚合和算力调度的基础上, 面向各类应用场景需求, 基于最新的 AI 理论和算法, 为客户提供各类 AI 模型、服务和算力的过程。由此, 我们可以构建人工智能技术和产业生态。算力释放环节的核心技术是 AI 算法、AI 服务以及各类相关配套工具。其中, AI 算法以深度学习为核心, 主要包括卷积神经网络、图神经网络、循环神经网络等模型结构, 以及反向传播优化算法等面向不同任务的新型模型算法; AI 服务是人工智能计算中心和下游应用厂商合作的主要渠道, 主要有模型接口、开发接口和在线服务等服务提供形式; 相关配套工具是为 AI 推理和训练提供数据处理等方面配套的软件工具, 如 Hadoop 用于大数据处理, OpenCV 用于图像处理等^[5]。



▲图1 智能计算中心架构

3.2 智能计算中心的新技术特征

作为新一代数据中心, 智能计算中心由于服务对象和工作模式有别于当前主流的超级计算中心和云数据中心, 因此在技术特征上也和传统数据中心有所区别。一是理论基础不同: 超算中心的顶层架构是基于并行计算的算法和设计理论, 云计算中心顶层架构基于虚拟化的算法和设计理论, 而智能计算中心则基于深度学习的理论进行顶层架构设计。二是所采用的计算架构不同: 智能计算中心采用不同于传统数据中心的、较为领先的人工智能计算架构。为向客户提供优质服务, 智能计算中心须采用最新的人工智能运算架构来提升运算和相应速度。当前, 芯片间互联和开放架构的设计是业界的技术研究热点。2019年, 在美国举办的开放计算项

目(OCP)全国峰会上,微软、Facebook和百度联合制定了OCP加速器模块(OAM)标准。该标准用于指导AI硬件加速模块和系统设计,通过定义AI加速模块、主板、互联拓补等方面的设计规范,推动不同AI加速模块和系统建立互操作性,实现多计算节点间的高速互联通信,未来有望成为智能计算中心内规模化采用的重要技术。

4 智能计算中心的重要作用

4.1 智能计算中心对人工智能产业发展的支撑作用

1) 满足大规模预训练场景的算力需求。近来,大规模预训练成为人工智能的技术热点,通过大规模数据和超大模型算法训练通用模型,再在此基础上逐步缩小场景模型,可有效降低成本。智能计算中心通过搭载大量人工智能服务器,对算力进行大规模集中生产、聚合、调度和释放,实现算力的提升和快速交付,从而提高算法效率和演进节奏。

2) 推动人工智能普惠化发展。智能计算中心既可通过服务形式为有需求的企业提供算力支撑,省去企业投资建设和运营费用,又可通过平台开放接口的方式将行业领军企业的算法、数据资源及运营服务等创新要素输送给信息技术(IT)基础相对薄弱的企业,进一步降低人工智能使用门槛,助力各行业智慧化转型升级^[4]。

4.2 智能计算中心对人工智能技术发展的支撑作用

1) 完善供需对接机制。智能计算中心可作为供需对接平台,从需求侧拉动核心技术发展。通过在智能计算中心搭载新兴芯片和算法等核心技术,面向应用场景提供服务,可为原创技术提供一个接受市场检验的快速通道,通过行业应用反馈形成可迅速迭代的良性闭环,助力芯片和算法的发展。

2) 促进技术创新融合。智能计算中心作为新技术融合发展平台,将大大促进融合架构技术发展。智能计算中心通过集成最新的人工智能加速芯片和存储介质等,成为各新兴计算单元进行大规模融合的重要载体,可从需求侧刺激硬件重构和软件定义等融合架构技术创新发展。通过推进平台、框架和算法的协同优化,打通人工智能软硬件产业链,智能计算中心加速人工智能算力技术和产业生态形成^[6]。

5 智能计算中心发展所面临的主要问题

中国智算中心当前建设的整体框架、建设运营、生态构建等方面仍存在一些问题和挑战,业界需要加大协同力度,形成创新发展合力,共同推动中国智能计算中心高质量

发展。

1) 整体框架不统一,多点建设面临碎片化风险

智能计算中心的概念框架不清晰。从各地智能计算中心规划建设情况来看,一方面,智能计算中心的核心架构、服务内容等并不完全一致,建设主体思路存在一定差异;另一方面,多点建设未形成合力。智能计算中心建设和运营过程中的业务逻辑、软硬件规范和信息安全等方面仍缺乏一个较为通用的标准体系。多点建设过程存在属地化、碎片化风险,对跨区域协同创新和生态构建造成不利影响。

2) 建设和运营模式不成熟,资金压力较大

智能计算中心的建设多以政府为主导、企业合作投资的形式开展。而政府和企业的投资划分、建设和运营主体职能和权责大多处于探索阶段,尚缺乏清晰统一的界定。此外,智能计算中心建设和运营成本高昂,不论是政府还是企业投资均面临较大的资金压力。且智能计算中心当前暂未经过实践验证的成熟商业运营模式,难以保证建设运营的长期运行。

3) 应用尚未落地,生态构建任重道远

当前智能计算中心多处于概念和规划阶段,全国各地尚不存在稳定运行并面向公众提供服务的智能计算中心。智能计算中心的服务提供模式及其所能支撑的人工智能应用仍待进一步验证。智能计算中心在应用生态构建过程中,仍面临本身能力建设、地理位置选择、合作模式探索和合作平台搭建等多方面挑战。

6 智能计算中心发展建议

1) 加大研发力度,突破核心关键技术

面向重点应用场景计算需求,鼓励芯片企业、平台软件企业、行业解决方案企业开展协同创新,突破人工智能芯片、计算架构、平台软件和模型算法等智能计算中心核心技术,提升技术关键环节自主水平。提前布局前瞻性技术,在保障信息安全的基础上加大新兴引领技术先行先试力度。引导支持新型高效节能技术在各中心内应用,推动各中心低碳化、绿色化发展。

2) 优化建设模式,形成高效发展路径

加大政企协作力度,强化政策保障和要素支持,积极学习借鉴其他国家相关人工智能算力中心建设和运营经验,探索开放共赢的建设运营模式和多方协同的合作机制。支持建设和运营主体围绕数据脱敏开放、多主体收益分成等主题,积极探索新型商业模式,推动智能计算中心高质量、可持续发展。

3) 加快应用落地,引领塑造产业生态

强化需求驱动，组织行业用户梳理热点、痛点需求，支持有关行业组织加大供需对接力度，为智能计算中心提供更多应用场景。针对重点行业的特色应用开展应用示范，形成一批可推广的典型应用创新模式。引导有智能计算需求的企业积极接入智能计算中心，使用智能计算中心服务，加速企业集聚和数据共享。

4) 完善标准制定，引导产业有序发展

加大企业、协会、高校和科研院所等行业主体的合作力度，加快制定架构体系、数据接口、信息安全、软硬件规范等方面的标准体系。引导各地新建智能计算中心间建立对接机制，形成各中心互联互通，避免出现信息孤岛。支持各智库、行业组织等第三方机构推进评估评测等方面的研究，找准各智能计算中心发展优劣势和各发展环节“堵点”，推动各行业、各地域间协调配合，平衡产业供需，优化地域布局，形成优势互补、错位发展的良性发展格局。

7 结束语

随着以大模型为代表的人工智能技术飞速进步，应用场景加速拓展，经济社会发展对于智能算力的需求仍将持续走高。智能计算中心作为智能计算的重要载体，预计将在经济社会发展中发挥重要的支撑作用，未来发展前景一片光明。智能计算中心在各地的加速落地，将驱动人工智能和各行各业加速融合，推动各行业优化升级。

参考文献

- [1] 孙杰贤.《智能计算中心规划建设指南》解读[J].中国信息化,2020(12):17-18. 10.3969/j.issn.1672-5158.2020.12.008
- [2] 王恩东.智算中心成为新基建的基本条件与智慧时代动力源[J].中国工业和信息化,2020(4):44-50
- [3] 王恩东.智算中心是智慧时代的新基建[J].信息化建设,2020(5):56-57
- [4] 国家信息中心信息化和产业发部.智能计算中心规划建设指南[R].2020
- [5] 杨明川,刘倩,赵继壮.人工智能数据中心研究[J].信息通信技术与政策,2021,47(4):1-7. DOI:10.12267/j.issn.2096-5931.2021.04.001
- [6] 张金颖,郑子亨.夯实人工智能“新基建”发展经济新动能[J].网络安全和信息化,2020(6):53-54

作者简介



焦奕硕，中国信息通信研究院信息化与工业化融合研究所高级工程师；主要从事先进计算、5G通信、智慧城市等方面的研究工作，主持并参与多个课题、规划编制的相关研究工作。



邸绍岩，中国信息通信研究院信息化与工业化融合研究所高级工程师；主要从事集成电路、5G通信、数字经济等领域研究工作，主持并参与多个课题、规划编制的相关研究工作。

5G XR 关键技术挑战和方案研究



Key Technical Challenges and Solutions for 5G XR

王新台/WANG Xintai, 袁知贵/YUAN Zhigui

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303012

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230620.1151.002.html>

网络出版日期: 2023-06-20

收稿日期: 2023-04-15

摘要: 扩展现实 (XR) 业务引入 5G 仍面临业务识别和保障、网络接口开放、头显终端不成熟等诸多挑战。研究了 XR 业务的特征和分类, 并提出智能优先比特率 (Smart PBR) 方案和无线接入网 (RAN) 分组时延预算 (PDB) 协同调度方案。Smart PBR 方案可为 XR 业务提供带宽确定性保障。RAN PDB 协同调度方案可使小区中满足 PDB 要求的报文比例显著增加, 大大提高用户体验质量。本研究对推动 XR 业务在 5G 网络中部署有一定的指导意义。

关键词: 业务模型; 小区容量; 业务特征; 业务识别与保障; 智能优先比特率; 分组时延预算协同调度

Abstract: Extended reality (XR) services in the 5G network still face many challenges such as service identification and guarantee, network interface openness, and immature head display terminals. The characters and classification of XR services are discussed, and the Smart PBR and radio access network (RAN) packet delay budget (PDB) collaborative scheduling schemes are proposed. The Smart PBR scheme can provide bandwidth deterministic guarantee for XR services. The RAN PDB collaborative scheduling scheme can significantly increase the proportion of packets that meet PDB requirements in the cell, greatly improving the quality of experience. This study has certain guiding significance for promoting the deployment of XR services in 5G networks.

Keywords: service model; cell capacity; service character; service identification and guarantee; intelligent prioritised bit rate; packet delay budget collaborative scheduling

引用格式: 王新台, 袁知贵. 5G XR 关键技术挑战和方案研究 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 64-72. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303012

Citation: WANG X T, YUAN Z G. Key technical challenges and solutions for 5G XR [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 64-72. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303012

扩展现实 (XR) 作为元宇宙的重要技术支撑, 越来越受到业界关注^[1-4]。各大视频和游戏平台已经出现一些虚拟现实 (VR) 类应用, 比如 VR 全景视频、VR 云游戏等。随着头显的轻量化发展, 增强现实 (AR)、混合现实 (MR) 类应用也越来越多。目前这些头显主要通过有线或者 Wi-Fi 连接到服务器, 而这限制了用户使用业务的范围。随着 5G 网络覆盖的逐渐完善, 5G 大带宽、低时延、高速率的连接特性可满足 XR 业务的需求^[5-7]。然而, XR 业务承载仍然面临不少挑战。本文中, 针对 XR 业务在 5G 网络中的部署, 我们提出了一些解决方案和建议。

1 XR 业务特征分析

XR 是 VR、AR、MR 的总称, 本质上是基于虚拟空间的 3D 视频。相对于 2D 视频, XR 增加了沉浸感和存在感, 即被虚拟环境环绕的感觉以及身处虚拟空间的感觉。为了实现这些感觉, XR 业务提供了姿势流、触觉流、视频流等。其

中, 姿势流为身体姿势动作产生的数据流, 触觉流为穿戴设备触摸产生的数据流, 视频流为 3D 空间视频投射到 2D 空间产生的视频流 (视频流通常包括声音流)。这些数据流使用不同的传输协议, 包括实时传输协议 (RTP)、安全实时传输协议 (SRTP) 等。为了降低传输数据量, 图像需要压缩编码。相应的编码协议有 H.264、H.265、H.266 等, 图像编码方案有图片组 (GOP) 编码和 Slice-based 编码。

在传输上基于不同的帧/片码流和声音码流的打包传输方式, XR 的业务模型可以分为两种: 下行业务模型和上行业务模型。

1) 下行业务模型

a) 单流模式

I 帧/片、P 帧/片、B 帧、声音等码流混在一起传输, 形成一个流。互联网协议 (IP) 五元组为源地址、源端口号、目的地址、目的端口号和协议类型, 通常被用来进行报文过滤, 但无法分辨流数据。由于流数据的差别体现在 IP 净荷

的 RTP 报文里，因此我们可通过帧类型、时间戳等进行分辨。

b) 双流模式

双流模式下的 XR 数据在传输时主要分成两个流。根据端口型号，IP 五元组将这两个流进行分离。

典型的双流模式为 I 流模式和 P 流模式，即将 I 帧/片编码后的码流封装到 I 流中，将 P 帧/片编码后的码流封装到 P 流中。需要说明的是，B 帧通常会被归入 P 流中。

2) 上行业务模型

a) 单流模式

与下行单流模式相比，上行单流模式包含上行姿势流数据。

b) 双流模式

姿势与控制数据一个流，视频等其他数据一个流。

c) 三流模式

三流模式通常为：姿势一个流，I 帧一个流，P 帧一个流。此外，三流模式也可以是：姿势一个流，声音和数据一个流，图像一个流。

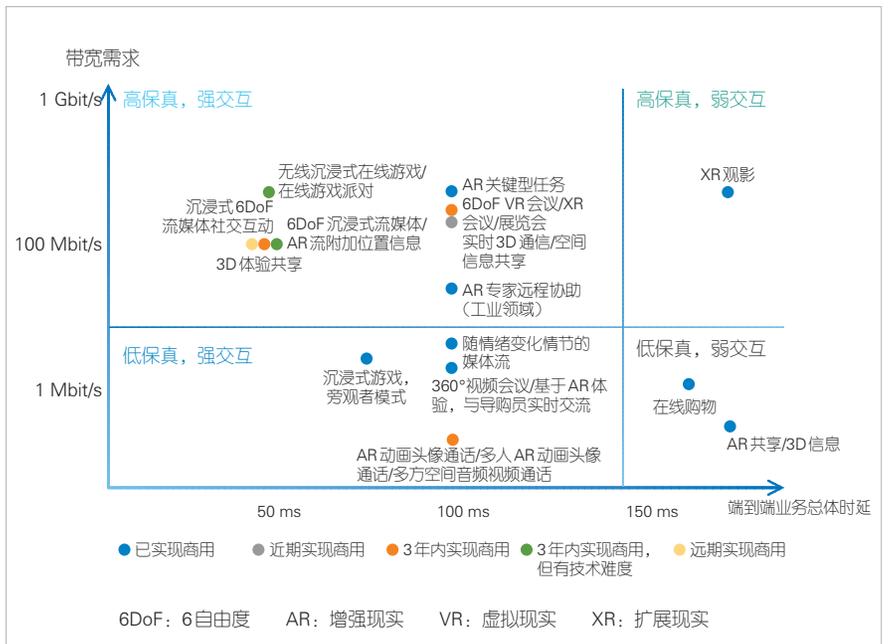
不同 XR 业务使用不同的业务模型，比如：对于 VR 业务，上行使用一个姿势流，下行使用单流或两流模式。具体使用哪种模式取决于编码器输出码流的封装方式。

3GPP 26.928 中描述了 23 种 XR 业务场景。依据不同的服务质量 (QoS) 要求，这些 XR 业务可分成四大类，具体如图 1 所示。

负责 XR 业务的渲染、数据发送和接收等；3) 5G-XR 客户端：即 XR 终端功能，负责 XR 终端的图像显示及本地渲染、姿势和动作的收集，以及视频数据的收发、XR 业务质量的测量等。

5G 系统负责在 XR 应用和终端应用之间建立通道，并提供 QoS 保障。其中，N33 和 N5 接口负责与第三方应用信令对接，接收第三方 XR 应用发起的 XR 业务 QoS 请求，并将其发送给 5G 核心网 (5GC) 以建立专用 QoS Flow。

XR AF 属于第三方应用的网元。XR 应用大多使用有线或 Wi-Fi 的连接方式，不需要提供 QoS 保障，因此通常没有 XR AF 网元。该网元的缺失在一定程度上会减缓 XR 在 5G 中的部署速度。



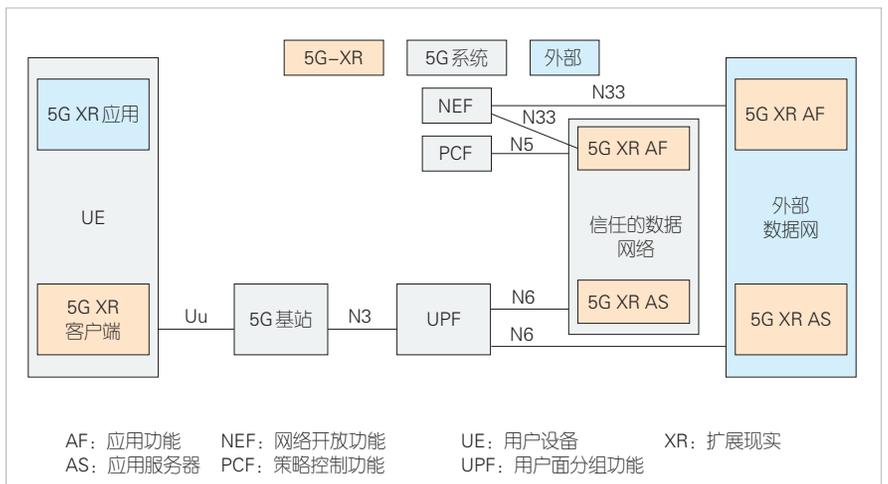
▲图1 XR业务分类

2 5G XR业务面临的技术挑战

2.1 5G XR业务部署架构

5G XR业务部署架构如图2所示，其中，蓝色代表第三方应用提供商提供的具体应用，黄色代表XR业务的功能块，灰色代表5G系统已有的功能和相关接口。

XR业务的功能块主要包括3种：1) 5G-XR应用功能 (AF)：即XR应用功能，负责XR业务的管理、注册、性能监控和管理、会员用户管理等；2) 5G-XR应用服务器 (AS)：即XR应用服务器，



▲图2 5G XR业务部署架构

2.2 头显终端及连接方式

XR的终端有VR和AR两种类型，连接方式包括有线连接和无线连接。

有线连接是指，XR头显通过电缆连接路由器、交换机，或者先连接到一个XR专用本地设备，然后由本地设备连接路由器，随后通过路由器和交换机连接到XR服务器。无线连接分为Wi-Fi无线连接和5G连接。Wi-Fi无线连接在业务和信令流程上与有线连接一样，没有专门的QoS保障。5G连接是指，通过5G承载网络实现XR头显与XR服务器之间的连接。有线连接和Wi-Fi无线连接使得XR业务只能在室内使用。5G承载网络具有带宽大、时延短的特点，可显著扩大XR业务在移动场景下的使用范围。

理想的XR头显重量轻、携带方便、耗电低，并自带5G通信模组，比如XR眼镜。然而，目前市面上还没有这样的产品。目前主流的XR终端是VR设备。虽然该设备支持有线连接和Wi-Fi无线连接，但是存在设计缺陷，用户无法在室外移动。不支持5G网络连接的特点进一步限制了XR设备在室外的应用。

2.3 网络带宽、时延、容量

XR业务包含VR、AR、MR等多种类型。不同XR业务的帧率、分辨率、头显刷新能力不同，服务器视频编码压缩的协议和图像压缩方案也不同。这导致服务器编码之后输出的码率不同。实际上，相同业务的码率也有可能不同。在未来，XR AF具有性能监测功能，能依据信道质量自适应调整码率。在网络质量不同的情况下，相同头显的码率是不同的。这给空口带宽带来很大的不确定性。

不同XR业务对时延的要求不同。通常，VR业务比如VR视频、VR直播等，对时延要求不高；而MR、AR业务则对时延要求较高，要求用户设备（UE）到服务器的单向时延在10ms内。5G网络中使用默认QoS Flow的普通终端难以达到这个时延要求。如果要达到这一时延要求，就需要引入

一些专有保障措施。这些专有保障措施通常会耗费更多的空口资源。

表1为3GPP 23.501对XR业务使用的标准5QI的QoS要求。其中，5QI 80是3GPP R17之前推荐的，而5QI 87、5QI 88、5QI 89、5QI 90是R17新增的。

通常XR云平台能够统计XR业务的时延，以便在服务器侧评估网络质量。中兴通讯XR云平台端到端时延分解如图3所示。

图3中，云渲染平台没有对动作捕获时延T0和上屏渲染时延T9进行专门统计。主流程时延包括指令处理时延T2、游戏渲染时延T3、视频编码时延T4、发送等待时延T5、终端调度时延T7、视频解码时延T8。指令上行时延T1和视频接收时延T6构成网络时延。基站内部网络时延分解如图4所示。其中，上行T1是指：从UE无线空口到核心网后经过N6接口再到服务器的时延；下行T6是指：从服务器经过N6接口到核心网后再到UE无线空口的时延。

无线链路控制（RLC）的业务数据单元（SDU）时延和PDCP层处理时延可通过基站关键性能指标（KPI）获取。网络时延和主流程时延可通过大空间云渲染平台获取。其中，RLC SDU时延包括空口时延、基站RLC层处理时延。

这里我们以5G NR 100 Mbit/s带宽商用小区为例，测试40 Mbit/s的VR业务。在轻载情况下，从QoS Flow 5QI9服务器到UE的单向时延为15~20ms。在网络拥塞的情况下，该时延达到几百毫秒。因此，该带宽仅能满足对时延不敏感的VR业务，难以满足对时延敏感的AR和MR业务。

XR业务对网络速率（码率、传输开销）及时延要求不同，导致小区可承载的XR用户数（XR业务数）有很大差异。根据3GPP 38.838，2.6 GHz频段、100 MHz带宽的NR小区，仅能支持12个XR用户（这是极限情况下的容量）。显然，XR业务在5G网络中的规模应用仍面临巨大挑战。

▼表1 3GPP标准中XR的5QI QoS要求

| 5QI 值 | 资类型源 | 默认优先级 | 分组时延 预算/ms | RAN 分组时延 预算/ms | 分组错误率 | 默认最大 突发数据量/B | 默认平均 窗口时延/ms |
|-------|----------|-------|---------------|-------------------|-----------|-----------------|-----------------|
| 80 | Non-GBR | 68 | 10 | 8 | 10^{-6} | N/A | N/A |
| 87 | 时延敏感 GBR | 25 | 5 | 4 | 10^{-3} | 500 | 2 000 |
| 88 | | 25 | 10 | 9 | 10^{-3} | 1 125 | 2 000 |
| 89 | | 25 | 15 | 14 | 10^{-4} | 17 000 | 2 000 |
| 90 | | 25 | 20 | 19 | 10^{-4} | 63 000 | 2 000 |

3GPP: 第3代合作伙伴计划
5QI: 5G QoS标识

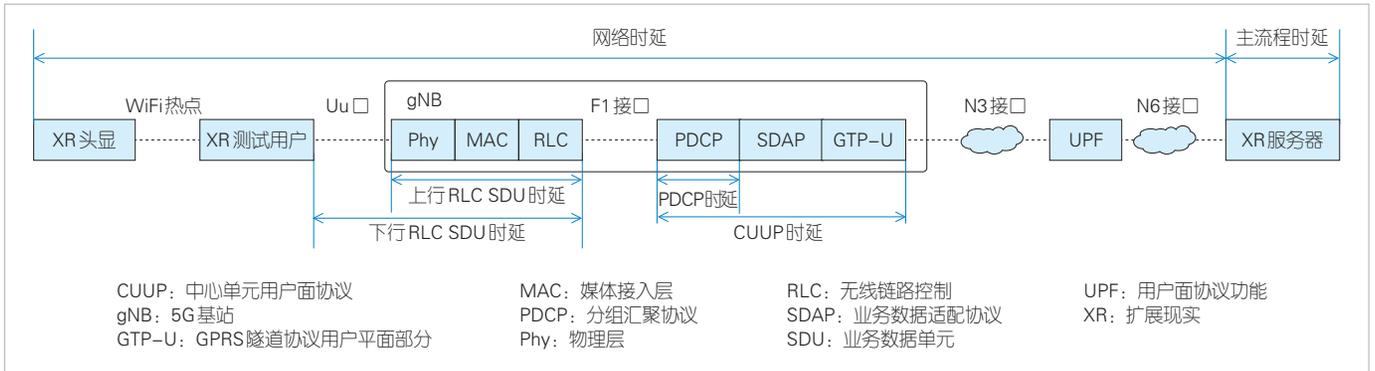
GBR: 保障速率
Non-GBR: 非保障速率

QoS: 服务质量
RAN: 无线接入网

XR: 扩展现实



▲图3 中兴通讯XR云平台端到端时延分解



▲图4 基站内部网络时延分解

2.4 XR业务识别

5G网络是无线网络，其可靠性与有线网络有一定的差异。5G网络要想实现对XR业务的保障，需要首先识别XR业务；在识别之后，需要根据XR业务的特征，在调度优先级、丢包策略、时延保障等基础上进行参数优化，才可以满足QoS保障要求。

XR业务的识别对XR AF有一定的依赖性。XR AF短时间内无法商用，这导致XR业务的识别面临较大困难。如果XR AF能实现商用部署，则不同XR业务的QoS要求可由XR AF提出，并通知到5G核心网。随后，核心网会依据QoS的要求建立专用QoS Flow。这样XR业务就可以在专用QoS Flow上进行，QoS保障就有了基础。进一步地，XR业务的具体业务特征，如I流和P流的帧周期、帧大小，会对基站的调度优化有较大帮助。比如，我们可依据XR的业务周期和报文大小进行配置授权（CG）等。

此外，在XR AF不能商用部署的情况下，XR的业务特

征需要借助核心网或者基站，通过深度报文识别（DPI）的方式来识别。这给XR业务的规模部署带来不确定性。

2.5 XR业务保障

XR业务在完成识别后，需要满足QoS要求，即满足分组时延预算（PDB）、丢包率和码率要求，同时要考虑小区中存在多用户、多业务流、多业务场景的情况，比如NR语音（VoNR）用户、VIP上网用户、实时游戏用户、工业控制与自动化用户、XR用户，以及XR用户多业务流。这些用户或业务流在小区中体现为各种QoS Flow。如何协同业务流，最大程度地满足QoS要求，提高小区容量，同时又不会引来普通用户和VIP用户的投诉，是5G网络面临的一大挑战。

2.6 网络能力开放

在XR部署到5G网络后，5G网络需要向XR AF开放接口，即图2中的N5和N33接口。XR AF可以利用这些接口向

5G网络发起专有QoS保障、业务性能监测、网络性能监测等申请。XR AF还可以根据5G网络提供的业务速率、时延等指标动态调整分辨率、帧率，从而产生不同的码率，比如：网络在空闲时可以提供更高的分辨率和帧率，在拥塞时提供可接受的分辨率和帧率。XR AF由第三方应用负责开发和部署。由于XR业务尚处于发展阶段，XR AF的部署在短期内还无法商用。

由于XR业务的QoS要求比普通的上网业务高，如果没有XR AF的辅助，XR专用QoS Flow就不能对具体XR业务的QoS提供保障。这会严重影响XR业务在5G网络的应用。

3 5G XR业务解决方案

3.1 头显近距离连接

XR的头显形式有多种^[8]，如图5所示。其中，最理想的形式是XR5G-A5，即轻薄眼镜。该头显自带5G通信模组和电源模块，比较省电，可在各种移动场景中使用。但受限于显示技术、芯片、电池等，这种头显在短期内还无法商用。

目前XR头显与网络的连接方式主要包括以下4种：

1) Wi-Fi或有线连接

XR头显通过有线直接连接到路由器（或者通过头显Wi-Fi连接到路由器），然后通过有线网络连接到XR应用服务器。目前市场上的主流头显多采用这种连接方式。这种方式的缺点是用户只能在有限的空间内移动。

2) Wi-Fi+普通5G热点中继连接

头显的Wi-Fi接入5G智能终端的Wi-Fi热点，通过5G

网络连接基站，然后连接到服务器。

3) Type-C和普通5G智能终端中继连接

头显的Type-C接口可通过Type-C连接线与5G智能终端相连接，并通过5G网络连接基站，然后连接到服务器。

4) 头显自带5G无线模组连接

头显上的5G无线模组先连接到基站，再连接到服务器。

XR与5G技术结合后，可能的连接方式是方式2、方式3、方式4。其中，由于方式4的通信模组增加了头显重量，在短时间内使用这种连接方式的头显还无法实现商用。方式2和方式3是目前可行的连接方式。一些对时延要求较低的VR业务可采用方式2。实测表明，方式2和方式3从UE到UPF的单向时延分别约为20、18 ms，可以满足大多数XR业务场景时延要求。如果空口使用优先级高的专用QoS Flow进行承载，同时引入5QI级专有保障方案，那么时延会进一步降低。在使用方式2时，多个用户的5G手机Wi-Fi热点可能存在干扰，信道质量会受到影响。方式3使用Type-C接口连接，其信道质量相对稳定。更重要的是，Type-C接口还可以给头显充电，因此方式3的优势更加明显。

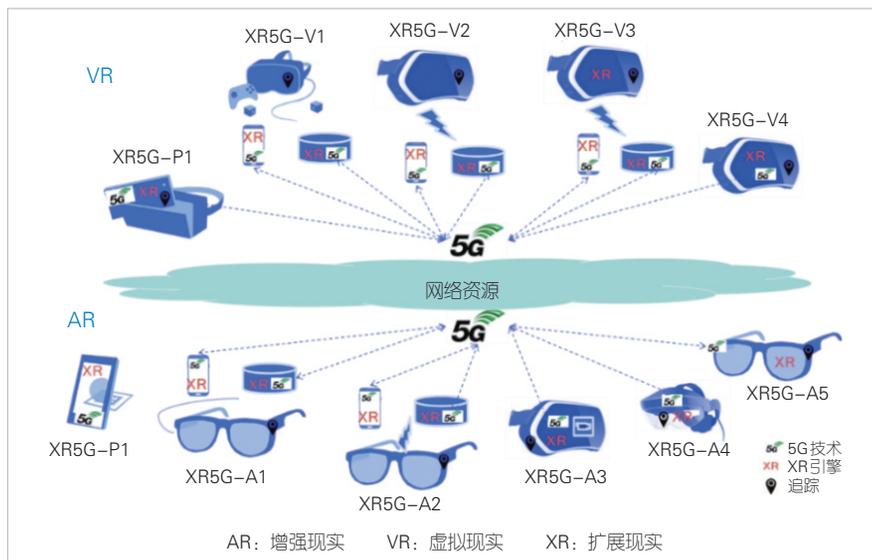
3.2 XR业务网络承载保障

XR业务大多对时延敏感，需要大带宽，并要求QoS保障能够在专用QoS Flow上进行。因此，5GC需要依据QoS建立XR专用QoS Flow，并绑定特定XR 5QI。3GPP定义的适合承载XR的QoSFlow主要有5QI 80、5QI 87、5QI 88、5QI 89、5QI 90。其中，5QI 80是非保障速率（N-GBR）QoS Flow，5QI 87、5QI 88、5QI 89、5QI 90是Delay Critical GBR QoS Flow。

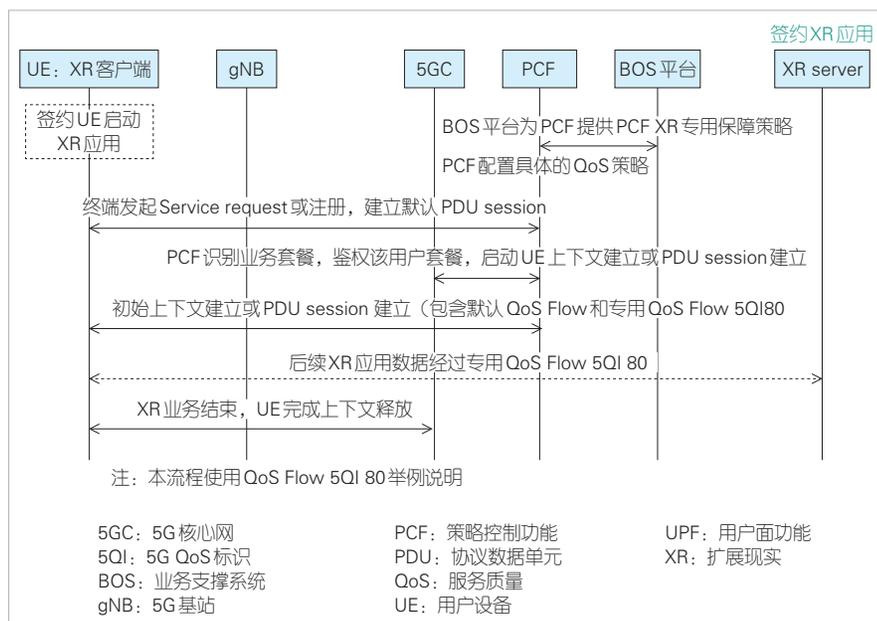
XR专用QoS Flow的建立方式主要有以下4种：

1) 网络侧静态建立XR专用QoS Flow

用户签约并为指定终端建立专用QoS Flow，如图6所示。这种建立方式不由业务触发。注册后网络使用固定的业务流模板（TFT）参数模板直接建立默认QoS Flow和XR专用QoS Flow。这种方式使用简单，无须识别具体的第三方XR应用。在商用初期用户数少，XR业务应用也较少，各XR业务的QoS要求大体相同，因此这种方式在各种XR测试中比较适用。然而，这种方式也存在不足：建立后的专用QoS Flow可能存在较长时间的闲置，会浪费基站的资源；专用QoS Flow的QoS



▲图5 多种XR头显形式^[8]



▲图6 网络侧静态建立XR专用QoS Flow

要求可能与具体XR应用的QoS要求不匹配。

2) 终端主动发起建立XR专用QoS Flow

这种XR专用QoS Flow的建立方式属于动态建立。在终端发起XR应用请求时，XR应用通知终端非接入层（NAS），携带QoS要求、IP分组过滤器。NAS层发起专用QoS Flow的建立请求。终端发起PDU Session修改请求，携带请求的QoS要求及IP分组过滤器。过滤器是IP五元组，可以对指定的XR服务器地址生效。在策略控制功能（PCF）识别和鉴权用户套餐后，QoS规则被绑定到设定的5QI中，从而建立专用QoS Flow。

目前智能终端和头显不支持这种方式。部分客户终端设备（CPE）通过配置可以主动发起专用QoS Flow的建立请求。

3) 网络侧通过UPF探测动态建立XR专用QoS Flow

通常业务支撑系统（BOS）平台或者其他业务平台会配置XR业务，并将其发送到PCF。PCF针对某些XR服务器地址、端口等，配置专用QoS Flow的建立策略。PCF将报文探测规则发送给会话管理功能（SMF），随后SMF再将其配置给UPF。

终端在上电注册时建立默认PDU Session和QoS Flow。XR业务在应用发起时，在默认QoS Flow上向XR服务器地址和端口发送数据。UPF使用预配置的探测来探测数据，并将其发送给指定的IP地址和端口。随后PCF鉴权用户套餐，并通知SMF建立XR专用QoS Flow。

这种方式无法依据真实的XR QoS要求建立专用QoS

Flow，只能根据已知的XR业务要求，预先在PCF端配置QoS参数，即需要提前知道要给哪些XR服务器（或XR应用）建立专用QoS Flow，并预先在核心网网元进行预配置。

4) XR AF动态发起专用QoS Flow建立

根据XR业务具体的QoS要求，XR AF向5GC发起专用QoS Flow的建立请求，随后携带具体的带宽、时延要求或QoS参考标识（预定义的参数模板标识），以及UE IP地址、AF标识、业务流描述信息等。PCF经过鉴权向SMF发起专用QoS Flow的建立请求。XR AF在发起专用QoS Flow的建立请求时，还可以依据自身策略进行判断，比如：判断用户是否为XR应用的会员用户——如果是会员用户，

则提供专用QoS保障。

XR专用QoS Flow的释放可以通过两种方式实现：一种是XR AF通知PCF停止专用QoS Flow，另一种是当专用QoS Flow上长期没有业务数据时自动释放。

这种XR专用QoS Flow的建立方式需要运营商部署网络开放功能（NEF）网元，适用于各种第三方应用。NEF网元负责第三方应用的鉴权。未授权的第三方应用无法拥有专用QoS保障。这样可以保障5G网络的安全。

动态建立XR专用QoS Flow可以节省5G网络资源，支持更多XR用户。此外，当第三方应用需要付费才能享有保障时，使用这种方式可以节省成本。

3.3 XR业务特征感知与精准保障

为精准保障XR业务，网络需要对XR业务特征进行感知，以确定XR业务的保障速率，满足PDB、错包率（PER）要求。此外，业务流传输打包方式也需要确定，即确定业务流是单流模式，还是双流或多流模式。在双流模式下，哪个流是I流，哪个流是P流，I流、P流的周期是多少，I帧、P帧的大小是多少，服从什么统计规律，都需要明确。基站利用这些信息进行调度优化，比如：进行不同流优先级的设置和权重调度，依据流的重要程度及流间的关系在出现传输错误时进行丢包。因为P帧是依赖于I帧的，所以当I帧出现错误时，GOP内的P帧也会出错。理论上这些出错的P帧都要被丢掉。基站不仅可以利用I流、P流的周期进行上行调度优化，比如精准匹配CG周期及授权大小，还可以依据周期

来增强非连续接收 (DRX) 功能, 减少头显用电量。

XR业务特征的识别方法有两种: 一种是3GPP标准中的方法, 即核心网与XR AF交互, 获得QoS要求及业务特征, 或者通过核心网自身的DPI识别功能直接识别XR的业务特征; 另一种是基站自身的业务识别方案, 即基于数据统计和部分解码来感知具体的业务特征。

3.3.1 基于核心网的XR业务感知方案

核心网通过XR AF与PCF的沟通, 完成XR业务特征的感知。3GPP标准只给出了这种思路, 并没有给出具体的方案。目前可能的技术方案有两种: 单业务流模式和双业务流模式。

1) 单业务流模式

XR AF将I流、P流数据当做单一的业务流, 然后发起QoS保障请求, 如图7所示。I流、P流的QoS要求是一致的。I流、P流的信息被放在RTP头中。

5GC可以将I流、P流当做一个业务流处理, 并为它们分配一个QoS流标识。这只需要通知UPF, 使用DPI功能, 解码RTP头, 将对应的I流、P流信息标记到GTP-U (GPRS隧道协议用户平面部分) 报文里。

基站则将XR业务流当做一个流处理, 并将其映射为一个数据无线承载 (DRB)。当出现I帧传输错误丢包时, 基站依据纠错能力指示来决定是否丢弃后续GOP内的P帧; 有纠错能力时, 不主动丢帧; 没有纠错能力时, 丢弃连续P帧。

2) 双业务流模式

XR AF分别将I流、P流的QoS要求在请求消息中提供给PCF, 如图8所示。它们的QoS要求可以不一样。消息中的流描述信息包含不同的IP五元组信息。

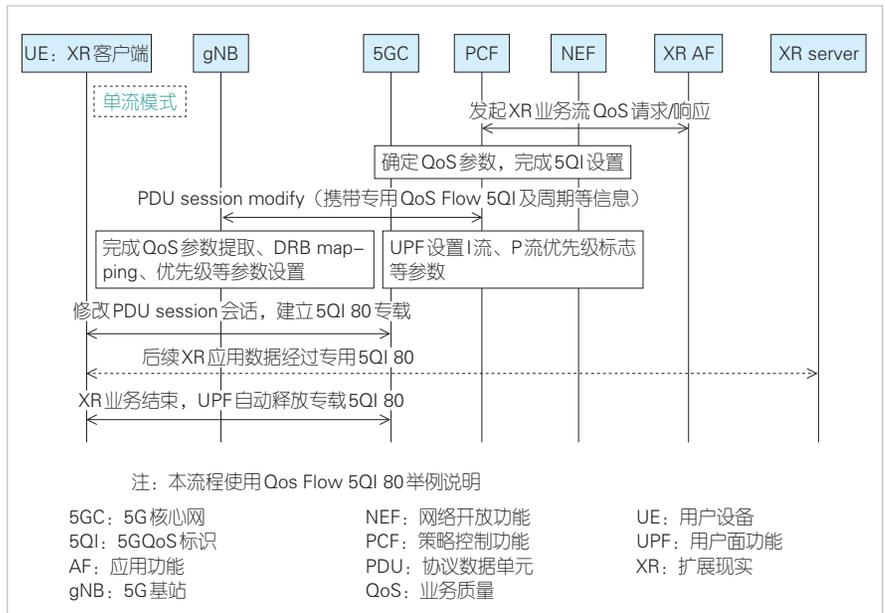
PCF依据I流、P流的QoS要求, 设置两个流的5QI及相关参数, 并通知SMF建立两个QoS Flow。随后基站收到两个QoS Flow的建立信息。该信息包含帧周期、帧PDB、帧PER等帧级的QoS要求。基站依据QoS Flow到DRB映射配置, 建

立一个或两个DRB。基站依据5QI优先级或者GTP-U头中的流优先级进行调度或者丢包处理。

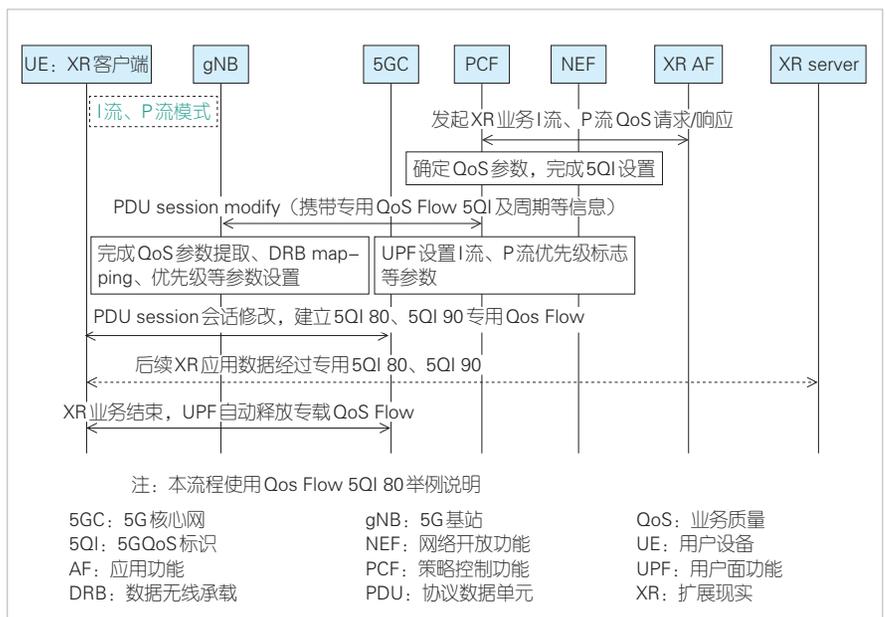
在建立这两个DRB时, 为降低复杂度, 可以仅依据调度优先级进行调度, 无须考虑两个DRB之间的数据优先级关系, 在出现传输错误时进行P流关联性丢包即可。

3.3.2 基站XR业务感知方案

在核心网由于各种原因, 比如XR AF无法商用部署或核心网自身不支持DPI功能, 基站为了实现调度优化、业务



▲图7 单业务流模式XR业务特征感知和参数传递



▲图8 双业务流模式XR业务特征感知和参数传递

质量评估、帧级性能统计，就需要对XR业务进行帧级业务特征学习和感知。

学习和感知的方案有两种：一种是特定APP ID或IP五元组信息的识别和感知，一种是非特定APP ID或IP五元组的识别和感知。

对于特定APP ID或IP五元组，我们把这些APP ID或指定服务器上的IP报文流特征做成一个特征库文件。基站在用户面利用DPI功能对报文进行解析。如果解析结果与特征库中某个应用的特征相匹配，则该业务是XR业务，同时该业务的I帧、P帧、周期等信息均可被提取。

对于非特定APP ID或IP五元组，我们利用I流、P流周期性发送数据的特征，进行数据统计。具体做法为：首先确定数据流的周期；然后部分解码报文中的RTP头，并通过报文头中的帧类型信息确定I帧、P帧，以及各帧的大小；最后识别XR业务的I帧、P帧，以及帧周期、帧大小等信息。这种方法不需要解包所有RTP报文，在确定帧边界之后，只需要解码少量报文就可以获取XR的业务特征。目前这种方法还只能用于某些特定的场景——使用H.264和H.265协议、RTP封包、UDP传输、IP报文不能加密的场景。

3.4 XR保障创新方案

要使XR业务承载到专用QoS Flow上，基站需要基于这些QoS Flow进行保障。除了通用的优先级、时延、可靠性保障手段之外，中兴通讯还提出了一些创新性解决方案。

3.4.1 Smart PBR解决方案

Smart PBR即智能优先比特率，该方案可以为XR业务提供带宽确定性保障。

XR业务的码率在多种场景下是变化的。由于分辨率、帧率、刷新率不同，对于同一种业务，不同终端输出的码率不同。这是因为服务器要依据头显的解码能力来使用头显所能支持的分辨率和帧率。另外，在空口拥塞时，服务器也可能自适应调整码率。这导致XR业务的码率并不完全固定。5QI 80是非保障速率的5QI，其带宽保障通过配置基站PBR来实现。配置的PBR大小往往与实际的XR业务带宽无法准确匹配：配置过大时，空口可接纳的XR业务用户数会减少；配置较小时，资源受限，无法保障XR业务的带宽。5QI 87~5QI 90是Delay

Critical GBR的5QI，其流保障比特速率（GFBR）由5GC带给基站。5GC从XR AF中获得业务保障速率。当XR AF不可用时，5GC则依据5QI静态配置GFBR。但所配置的GFBR与XR业务需要的带宽往往不匹配。另外，如果没有考虑空口各协议层的开销，核心网侧的保障速率将会与真实速率之间产生差异。因此，我们需要引入一种手段来准确匹配XR业务的实际带宽。

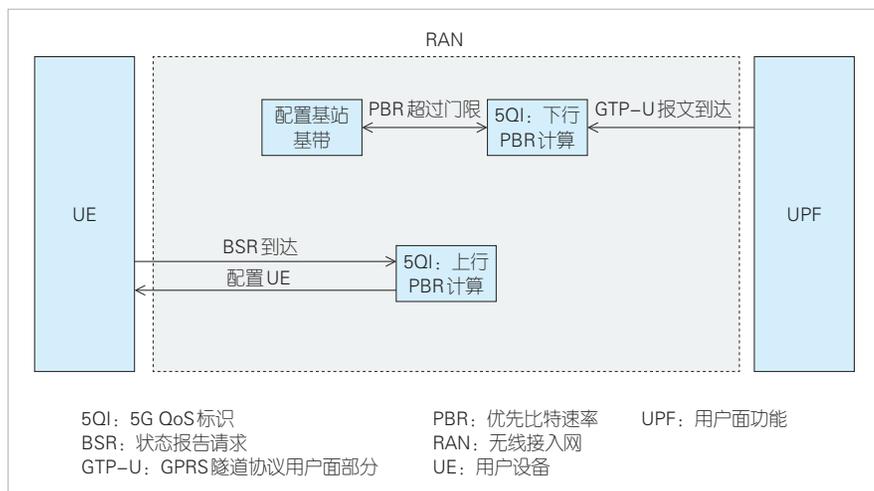
3GPP 38.331给逻辑信道配置了一个字段：prioritised bit rate。prioritised bit rate是指，在用于UE上行调度组包时，依据逻辑信道优先级优先保障的速率，属于枚举类型，其取值范围为8 kB/s~64 MB/s。Smart PBR方案利用该字段，在基站可以自动周期性学习XR业务的实际带宽，并依据带宽是否超过3GPP 38.331定义的范围，来确定是否给终端配置PBR（上行），从而实现在XR业务速率变化时，系统可以自动匹配真实业务带宽，如图9所示。

下行方案参考3GPP标准中的速率分级方法。具体分级方式由基站静态配置确定。通过对下行GTP-U报文的学习，考虑空口PDCP、RLC的头开销，下行方案能够获得业务的实际速率。实际速率需要通过基站速率分级评估。如果实际速率发生变化，则基站会使用新的速率门限作为PBR。

业务带宽得到保障，XR业务的时延就能得到保障。实测表明，在网络拥塞的情况下，Smart PBR既可以保障业务带宽，又可以减小时延（最大可减小95%）。

3.4.2 RAN PDB协同调度方案

RAN PDB协同调度方案是指：在多个XR用户或者同一XR用户的多个业务流之间，或者在其他对时延敏感的5G用户的业务流之间，基于RAN PDB余量调度的方案。RAN



▲图9 Smart PBR方案架构

PDB余量越少，调度权重就越大。该方案可以解决多个时延敏感业务流之间单纯依据优先级来分配资源块（RB）的问题，尤其是5QI优先级与PDB要求不一致的问题。这使得小区中更多的UE和业务流满足PDB要求，从而提高用户体验。

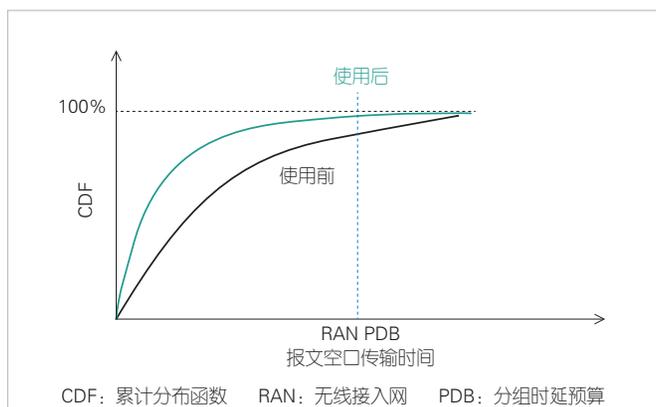
基于多个XR用户或者多个XR业务流时，不同XR业务流的PDB各不相同。小区中业务流的调度主要依据5QI的优先级。5QI的优先级越高，则调度的优先级就越高。但是5QI的优先级与PDB大小并不完全一致：有些5QI的优先级较高，但是PDB要求较低；有些5QI的优先级较低，同时PDB也较小。因此，按照5QI的优先级进行调度并不能保障每个5QI的PDB。

RAN PDB协同调度方案的思路为：在5QI调度优先级的基础上，将PDB的剩余量作为调度的权重因子。剩余量越小，调度权重因子就越大，分配的RB资源就越多。当基站能获取XR业务的I帧、P帧周期时，该5QI的RAN PDB余量可以使用帧级PDB余量，保障帧级PDB满足度，以及小区中其他业务流5QI的PDB满足度，从而提高小区中用户的整体体验。

RAN PDB协同调度预期结果如图10所示。可以看出，使用RAN PDB协同调度后，小区中满足PDB要求的报文比例显著提升。

4 结束语

XR是移动场景下元宇宙的技术基础。5G具有网络带宽



▲图10 RAN PDB协同调度预期结果

大、时延短、连接广的特性。两者的结合不仅可以发挥各自的优势，还能扩展XR业务的应用场景。然而，5G网络承载XR尚处于研究阶段。中兴通讯在5G网络承载XR业务方面持续深入研究，努力提供创新解决方案，助力XR业务在5G网络的商用部署，希望为运营商和业界伙伴提供更多技术支持。

致谢

本文得到中兴通讯股份有限公司鲁楷锋、邹斯雨、李婷、侯志远的帮助，向他们表示感谢！

参考文献

- [1] 陆平, 盛斌, 朱方. 下一代通信助力实时分布云渲染 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(1): 17-20. DOI:10.12142/ZTETJ.202101005
- [2] 朱文瀚, 翟广涛, 陶梅霞, 等. 超高清内容清晰度用户体验质量评价 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(1): 37-43. DOI:10.12142/ZTETJ.202101009
- [3] 吕达, 郑清芳. 构建智能实时网络, 使能5G视频业务繁荣 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(1): 60-67. DOI:10.12142/ZTETJ.202101013
- [4] 徐代刚, 姜磊, 梅君君. 面向视频云微服务系统的智能运维技术 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(1): 68-76. DOI:10.12142/ZTETJ.202101014
- [5] LIU Z, GAO Y, LI D P, et al. Enabling energy efficiency in 5G network [J]. ZTE communications, 2021, 19(1): 20 - 29. DOI: 10.12142/ZTECOM.202101004
- [6] XIAO K, LIU X, HAN X H, et al. Flexible multiplexing mechanism for coexistence of URLLC and eMBB services in 5G networks [J]. ZTE Communications, 2021, 19(2): 82 - 90. DOI: 10.12142/ZTECOM. 202102011
- [7] ZHANG M, LI D P, LIU Z, et al. QoE management for 5G new radio [J]. ZTE Communications, 2021, 19(3): 64 - 72. DOI: 10.12142/ZTECOM.202103008
- [8] 3GPP. Extended reality (XR) in 5G: 3GPP TR 26.928 [S]. 2022

作者简介



王新台, 中兴通讯股份有限公司RAN产品规划工程师; 长期从事无线通信系统的研发工作, 先后负责TD-SCDMA 3G系统、TD-LTE 4G系统和5G系统的研发工作; 拥有发明专利10余项。



袁知贵, 中兴通讯股份有限公司RAN首席架构专家; 拥有20年以上的移动通信技术研发经验, 负责RAN架构及5G-A演进规划工作。

光接入网络遥测技术的分析与实践



Analysis and Practice of Telemetry Technology in Optical Access Network

刘刚/LIU Gang¹, 张德智/ZHANG Dezhi¹,
陈爱民/CHEN Aimin²

(1. 中国电信集团有限公司, 中国 北京 100033;
2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(1. China Telecom Co., Ltd., Beijing 100033, China;
2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202303013

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20230620.1621.010.html>

网络出版日期: 2023-06-20

收稿日期: 2023-04-12

摘要: 软件定义网络架构下的Telemetry遥测技术可以完成准确实时的网络测量任务, 已成为网络感知的基础技术之一。介绍了Telemetry技术的发展背景, 分析了光接入网络遥测关键技术——数据订阅和数据发布。中国电信的光接入网遥测实践表明, Telemetry技术采集的数据精度高、准确性好, 能够满足现网需求。认为Telemetry技术将在未来智能网络、数字孪生等领域获得广泛应用。

关键词: 网络遥测; 网元管理; 软件定义网络; 光接入网络

Abstract: The telemetry technology under software defined network architecture can fulfill accurate real-time network measurement tasks, and has become one of the fundamental technologies of network awareness. The development background of telemetry technology is introduced, and the key telemetry technologies including data subscription and data publishing in optical access network are analyzed. The telemetry practice of China Telecom's optical access network has shown that telemetry technology collects data with high accuracy and can meet the needs of the current network. It's believed that the telemetry technology will be widely applied in future fields such as intelligent networks and digital twins.

Keywords: network telemetry; network element management; software defined network; optical access network

引用格式: 刘刚, 张德智, 陈爱民. 光接入网络遥测技术的分析与实践 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 73-78. DOI:10.12142/ZTETJ.202303013

Citation: LIU G, ZHANG D Z, CHEN A M. Analysis and practice of telemetry technology in optical access network [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(3): 73-78. DOI:10.12142/ZTETJ.202303013

1 网络遥测的发展背景

1.1 网络遥测的驱动力

Telemetry是一个传统技术术语, 通常指一个自动通信过程, 其中文字面意思是遥测。该技术是一种远程数据采集技术, 能够远程采集数据, 并将数据传输到接收设备进行分析^[1]。近年来, Telemetry遥测技术因能够实时远程获得物理网络设备和虚拟网络设备的准确信息, 在信息技术 (IT) 和通信技术 (CT) 行业中日益流行。

在Telemetry遥测技术出现以前, 常见的网络设备远程数据采集技术主要有: 命令行界面 (CLI)、简单网络管理协议 (SNMP)、系统日志 (SYSLOG)、网络配置协议 (NETCONF), 相应技术分析如表1所示。

这些传统技术在用来获取网络设备运行状态信息时, 存在诸多不足:

1) 不同数据采集技术能够获取的信息各有不同且不够完整, 需要组合起来使用;

2) 在网络设备的各种状态信息中, 除了告警和事件采用了实时性较好、主动上报的PUSH推送模式以外, 其他信息都只支持基于查询&应答的PULL获取模式。PULL模式存在一些缺点: 数据获取慢、操作效率低; 报文传输时延的不确定性导致采样数据的时间戳不精确。

3) 网络设备各种状态信息的规范化程度不够高, 很多都是设备厂家自定义的数据格式, 不利于实现构建统一的数据分析平台。

随着当前网络规模不断扩大、业务速率不断提高^[2-5], 传统网络设备远程数据采集技术已经难以满足网络智能管控所需的、不断提高的数据精度要求。过于频繁的数据查询将大量消耗数据采集器和网络设备的运算资源和网络资源: 网络设备提供的采样数据的准确性可能会劣化; 数据处理延迟可能会加大, 从而导致采样数据时间戳的准确性产生劣化; 在极端情况下, 部分网络设备可能会因处理性能的设计余量被过度透支而影响正常业务。

理想的Telemetry远程数据采集技术应当具备以下几个

▼表1 常见的网络设备远程数据采集技术

| 技术参数 | CLI | SNMP GET | SNMP TRAP | SYSLOG | NETCONF | NETCONF通知 |
|--------|-----------------------|--------------|-------------|---------|--------------|-----------|
| 数据获取方式 | PULL 获取 | PULL 获取 | PUSH 推送 | PUSH 推送 | PULL 获取 | PUSH 推送 |
| 信息数据模型 | 设备特定 | 标准&设备特定 MIB | 标准&设备特定 MIB | 设备特定 | YANG 模型 | YANG 模型 |
| 典型数据信息 | 配置信息 状态信息 告警/事件 | 配置信息 状态信息 | 告警/事件 | 事件 | 配置信息 状态信息 | 告警/事件 |
| 典型操作频度 | 1 min | 1 min | 1 s | 1 s | 1 min | 1 s |

CLI: 命令行界面 MIB: 管理信息数据库 NETCONF: 网络配置协议 SNMP: 简单网络管理协议 SYSLOG: 系统日志

特点^[1]:

- 1) 选择订阅-发布 (Sub-Pub) 模式, 即网络设备接收订阅, 周期发布采样数据;
- 2) 选择主流的控制协议和数据流协议, 使用标准化数据模型;
- 3) 选择有成熟工具链支持的数据存储和检索方式。

1.2 网络遥测的产业现状

Telemetry 网络遥测技术可被视为“软件定义数据采集”, 是传统网络测量技术与软件定义网络 (SDN) 技术的结合。网络的智慧化演进为 Telemetry 网络遥测技术提供了广阔的应用场景。如何更加高效地协调网络控制平面、数据平面和管理平面的资源, 对网络进行更为实时、准确和可靠的数据采集, 实现网络的智慧管控, 已经成为重要的研究内容^[6]。

目前学术界网络遥测的代表性研究成果包括: 带内网络遥测 (INT)、原位操作维护管理 (In-situ OAM)、主动网络遥测 (ANT)、被动网络遥测 (PNT)、交替标记性能测量 (AM-PM) 等^[6]。

互联网工程任务组 (IETF)、宽带论坛 (BBF) 等国际标准组织正在开展网络遥测相关的标准制订工作。IETF 正在进行 In-situ OAM、PBT、iFIT 和 AM-PM 的标准化工作^[6]。BBF 正在推进自动智能管理架构 (AIM) 的标准化进程。其中, AIM 的采集功能 (CF) 模块支持 Telemetry 技术^[7]。

中国的标准组织中国通信标准化协会 (CCSA) 在推进 Telemetry 相关标准方面更胜一筹。中国电信牵头编写的 Telemetry 行业标准^[8]即将发布。同时, 诸如《接入网设备测试方法 Telemetry 接口采集功能》等标准也在稳步推进中。

2 网络遥测关键技术分析

Telemetry 网络遥测系统可分为采控层和网元层, 如图1所示。

采控层由 Telemetry 遥测业务相关的控制、采集和分析软件组成, 负责遥测任务的编排, 向网元层下发数据订阅, 并完成网元层发布的遥测数据的接收、存储和分析。采控层通过 Telemetry 遥测服务接口向外部应用提供所需的数据或数据分析结果。典型的应用有流量分析、流量预测、运行状态记录、根因分析、业务质量评估、业务质量保障等。

网元层由物理网络设备或虚拟网络设备组成, 负责执行数据订阅任务, 完成被订阅数据的采集、封装和周期发布。

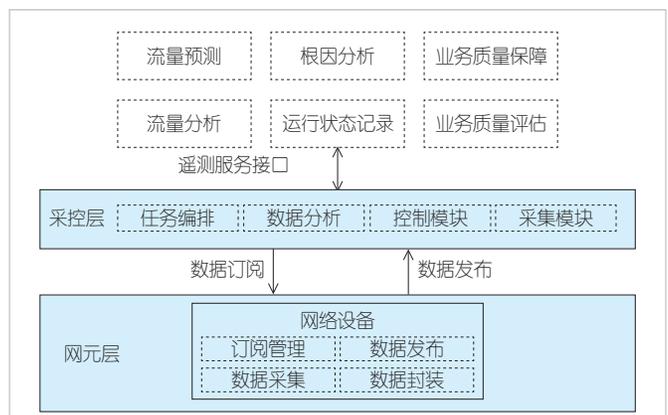
本文讨论的 Telemetry 技术是采控层与网元层的核心工作机制, 其关键技术涉及数据订阅、数据发布。

2.1 数据订阅

Telemetry 数据订阅是指: 数据订阅者向数据源设备发送 Telemetry 订阅报文, 请求将指定的遥测数据上报给指定的数据接收者。订阅报文至少包含以下信息: 指定的数据采集项、数据的发布周期、数据的接收者等。

2.1.1 数据订阅使用的协议和数据模型

Telemetry 数据订阅必须使用主流控制协议和标准化数据模型。光接入网络的 Telemetry 数据订阅使用 NETCONF 协议和 CCSA 标准 Telemetry YANG 数据模型, 从而有效保障订



▲图1 Telemetry 网络遥测系统的逻辑框架

阅操作的通用性和规范性。

网络配置协议 NETCONF 由 IETF 的 RFC4741 发布（后来更新为 RFC6241），目前已经成为主流的网络设备配置协议。数据建模语言 YANG 由 IETF 的 RFC6020 发布（后来更新为 RFC7950），可以描述任何一个由诸多数据节点构建而成的多层级树形结构。YANG 语言用于 NETCONF 协议相关数据和操作的建模，以及标准化的数据模型定义。

CCSA 的 Telemetry 行业标准^[8]定义了光接入网络适用的 Telemetry 标准 YANG 模型。相关框架结构如下：

```

+--rw telemetry-system
+--rw sensor-groups
| +--rw sensor-group* [sensor-group-id]
| +--rw sensor-group-id -> ../config/sensor-group-id
| .....
| +--rw sensor-paths
| +--rw sensor-path* [path]
| +--rw path -> ../config/path
| .....
+--rw destination-groups
| +--rw destination-group* [group-id]
| +--rw group-id -> ../config/group-id
| .....
| +--rw destinations
| +--rw destination* [destination-address destination-port]
| +--rw destination-address -> ../config/destination-address
| +--rw destination-port -> ../config/destination-port
| .....
+--rw subscriptions
+--rw persistent-subscriptions
| +--rw persistent-subscription* [name]
| +--rw name -> ../config/name
| +--rw config
| | +--rw name? string
| | +--rw local-source-address? an-inet:ip-address
| | +--rw originated-qos-marking? an-inet:dscp
| | +--rw protocol? identityref
| | +--rw encoding? identityref
| | .....
| +--rw sensor-profiles
| | +--rw sensor-profile* [sensor-group]
| | +--rw sensor-group -> ../config/sensor-group
| | +--rw config

```

```

| | | +--rw sensor-group? -> ../..../..../..../sensor-groups/
sensor-group/config/sensor-group-id
| | | +--rw sample-interval? uint64
| | | +--rw heartbeat-interval? uint64
| | | +--rw suppress-redundant? boolean
| | | .....
| +--rw destination-groups
| +--rw destination-group* [group-id]
| +--rw group-id -> ../config/group-id
| .....

```

2.1.2 Telemetry 数据订阅的要素分析

在 Telemetry 的 YANG 模型中，subscriptions 节点下的 persistent-subscriptions 代表了数据订阅列表，其下每个 persistent-subscription 节点代表一个数据订阅。数据订阅主要包括以下信息：

1) 订阅名

每个订阅都需要被设定一个独一无二的名字。

2) 数据发布使用的本地通信地址、通信协议类型和编码类型

在光接入网络中，光线路终端（OLT）设备支持 Google 远程过程调用（gRPC）协议或用户数据报协议（UDP）进行数据发布，支持 protobuf v3 数据编码。

3) 被订阅的采样数据和样本周期

sensor-profiles 节点代表被订阅的数据列表，其下的每个 sensor-profile 节点均包含一个被选中的传感器组（sensor-group）以及期望的样本间隔。传感器组可以理解为事先定义好的、由一个或多个采样路径（sensor-path）组成的采样数据群组。在光接入网络中，OLT 设备被要求支持 CCSA Telemetry 行业标准^[8]规定的标准采样路径。其中，每个特定的采样路径字符串代表一个标准的采样数据集。这种方法具有规范性好、便于实现的优点，适合信息成员固定的 OLT 设备的 Telemetry 数据采集。

在光接入网络中，考虑到不同属性的数据信息有各自的数据变化频度，CCSA Telemetry 行业标准^[8]为每个采样路径设定了各自的数据样本间隔门限值。

4) 数据采集对象

Telemetry 的 YANG 模型没有数据采集对象节点，因此不支持显式配置。整个网络设备中与采样路径相关的所有适用对象都会被纳入数据采集范围。在光接入网络中，CCSA Telemetry 行业标准^[8]可以通过为采样路径设定特定的过滤条件来指定某个数据采集对象。

5) 采样数据的接收者

destination-groups 节点代表被订阅采样数据的接收者列表，其下的每个 destination-group 节点均代表一个被选中的目标组。目标组可以理解为先定义好的、由一个或多个数据接收者组成的群组。

2.2 数据发布

Telemetry 数据发布是指数据源设备遵从数据订阅的要求，完成指定数据的采集，并按指定样本周期，将采样数据封装后定期上报给指定接收者。

与数据发布相关的主要技术要点包括：数据发布使用的协议和数据发布使用的数据编码类型。

2.2.1 数据发布使用的协议

数据发布使用的协议包括 gRPC 协议和 UDP 协议。表 2 给出了这两种协议的对比。

gRPC 协议适合 Telemetry 采样数据的发布，通过 proto 文件定义标准化的数据信息模型，可以灵活高效地实现 Telemetry 遥测数据的推送。在光接入网络中，CCSA 的 Telemetry 行业标准^[8]指出，可以选择 gRPC 协议作为数据发布协议。

在使用面向连接的协议（例如 gRPC 协议）进行 Telemetry 数据发布时，网络设备内部分布式采集到的数据可能会遇到系统级单连接的转发问题，数据并发上报能力受到限制。此外，采集层控制模块也可能受到系统可用的传输控制协议（TCP）长连接资源的限制，能够并发采集的网络设备的数量也受到限制。在光接入网络中，CCSA 的 Telemetry 行业标准^[4]指出，也可以选择 UDP 协议作为数据发布协议。

2.2.2 数据发布使用的数据编码类型

Telemetry 遥测数据使用直观灵活的信息表达格式，同时编码方式须支持高效压缩以保证海量数据的传输和存储效率。

Google 协议缓冲区（ProtoBuf）是源自 Google 公司的一种针对结构化数据的序列化工具，拥有出色的序列化效率和数据压缩率，而且与编程语言和平台无关。ProtoBuf 的序列化采用二进制而非文本。虽然数据流的可读性差，但数据额外开销极小。ProtoBuf 的数据压缩效率高，解析速度快。

在光接入网络中，CCSA 的 Telemetry 行业标准^[8]选择使用层次化的 ProtoBuf 文件来分层定义 Telemetry 遥测数据的发布格式，涵盖 RPC 层、Telemetry 层和业务数据层，规定了每个采用路径各自对应的采样数据集的数据格式。不同的 Telemetry 数据发布协议并不影响 Telemetry 数据的信息格式。无论是使用 gRPC 协议还是使用 UDP 协议，作为数据净荷的 Telemetry 层和业务数据层都使用完全相同的数据格式。

3 光接入网络遥测技术的实践

中国电信积极推动网络遥测技术在光接入网络的应用，牵头制订了 CCSA 标准《接入网设备支持基于 Telemetry 接口采集功能的技术要求》。2021 年 8 月，中国电信研究院组织中兴通讯、华为、烽火三大 OLT 设备制造商进行 OLT 设备的 Telemetry 实验室联调测试，确定了光接入网络适用的 Telemetry 遥测技术，完成了技术方案及测试方案的更新。

3.1 光接入网络遥测技术方案

1) 光接入网络的 Telemetry 数据订阅者

在光接入网络中，为了确保网络的管控安全，Telemetry 数据订阅者只能是采控层的控制模块：OLT 设备只接纳采控层控制模块发起的 NETCONF 数据订阅会话和数据订阅事务。

2) 光接入网络适用的 Telemetry 数据发布协议

OLT 设备作为光接入网络的局端设备，拥有多种类型业务状态的数据：流量类统计数据（样本间隔为 1 s），包括上联口流量、无源光网络（PON）口流量、光网络单元（ONU）流量、ONU 业务流流量、端口的队列流量；OLT 光

▼表 2 gRPC 协议和 UDP 协议的对比

| 协议类型 | 规范性 | 通用性 | 技术特点 |
|---------|---|------------------------|---|
| gRPC 协议 | 源自 Google 公司的一个开源的 RPC 框架 | 云原生计算基金会的孵化项目，目前已被广泛使用 | <ul style="list-style-type: none"> 使用 Proto Buffer 可快捷定义服务 部署方便且支持扩展 跨语言跨平台的强大工具链 基于 HTTP2 实现高效编码数据流的双向收发 |
| UDP 协议 | IETF RFC 768 发布的一种传输层协议，一种无须预先建立连接就可以直接发送 IP 数据包的方法 | 互联网基础协议之一，至今仍然广泛使用 | <ul style="list-style-type: none"> 发送者在发送 UDP 数据前无须预先与接收者建立连接，随时可发送且发送时延小 UDP 数据包的传输是尽力而为、没有保障的，但不影响发送 |

gRPC: Google 远程过程调用
HTTP2: 超文本传输协议第 2 版

IETF: 国际互联网工程任务组
RFC: 请求注释文档

RPC: 远程过程调用
UDP: 用户数据报协议

模块状态数据（样本间隔为1~3 min），即PON口光模块状态数据；ONU状态数据（样本间隔为5~15 min），包括ONU光模块状态数据、ONU状态及下行链路信息、ONU在线信息、ONU上行链路信息。

典型的满配OLT设备为：15个PON线卡，每块线卡有16个PON口，每个PON口支持32个ONU，每个ONU对应4个业务流。相应的Telemetry采样对象规模为：2~8个上联口、240个PON口、7 680个ONU、30 720个业务流。据此估算，OLT设备系统级需要支持30 000个采集数据对象。按每个采集对象的样本数据以及适用的样本间隔估算，OLT设备系统级需要每秒发送7 500个满载采样数据包。

当前光接入网络中的OLT设备通常都采用分布式硬件架构，每块线卡都有一定的数据采集和数据发送能力。充分利用OLT设备的线卡级并发处理能力，可以在不影响设备正常业务功能的前提下满足Telemetry的性能要求。因此，光接入网络OLT设备Telemetry数据的发布协议优先选择UDP，以便于OLT设备实现Telemetry任务的线卡级并发。

3.2 中国电信的光接入网络遥测试点

2021年9月，中国电信研究院联合广东电信、安徽电信、四川电信、浙江电信、江苏电信等，针对OLT基于Telemetry接口采集功能技术方案中的设备功能和性能、采集器软件性能等技术专题，开展试点验证工作。现网试点的典型组网方案如图2所示。

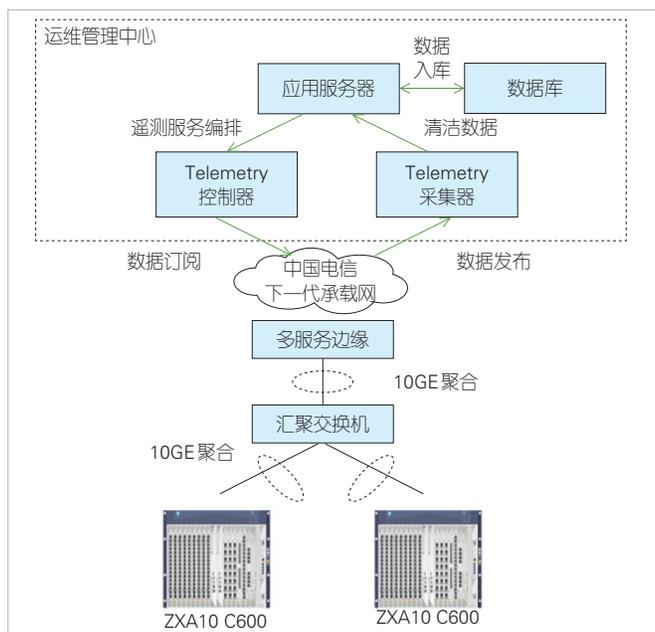
OLT设备通过多条10 GE链路上联汇聚交换机。汇聚交换机通过多条10 GE链路上联多服务边缘（MSE）设备，然后接入中国电信下一代承载网。在运维管理中心内，应用服务器向Telemetry控制器提交遥测服务请求。Telemetry控制器向OLT设备下发相应的数据订阅。Telemetry采集器接收来自OLT设备的数据，并在完成无效数据清洗后上报应用服务器。随后，应用服务器将数据保存到数据库并进行分析处理。

3.3 中国电信的光接入网络遥测实践成果

中国电信现网Telemetry规模试点表明：OLT设备基于Telemetry技术的高精度数据采集方案是可行的，Telemetry数据的采集上报与现网业务之间具有较好的兼容性和稳定性，同时采集器软件也具有良好稳定性。Telemetry技术采集的数据精度高、准确性好，能够满足现网需求。这一实践成果充分验证了Telemetry这种新型网络遥测技术的价值。

1) 采集数据的精度提升明显

以上联口流量信息为例，传统SNMP技术的数据采集精度通常为5 min。当采用Telemetry技术后，数据采集精度可



▲图2 Telemetry现网试点的组网方案

达1 s。从图3可以看出，Telemetry技术获取的数据精度远高于传统SNMP技术。

2) 采样数据的时间戳更为准确

在使用SNMP技术实施数据采集时，数据采样时间的准确性会受到应答数据传输时延波动的影响。采用Telemetry技术之后，由于遥测数据自身携带有样本数据的时间戳信息，因此采集器在接收数据后，可以准确知晓样本数据的采样时间，不再受到数据上传时延的影响。

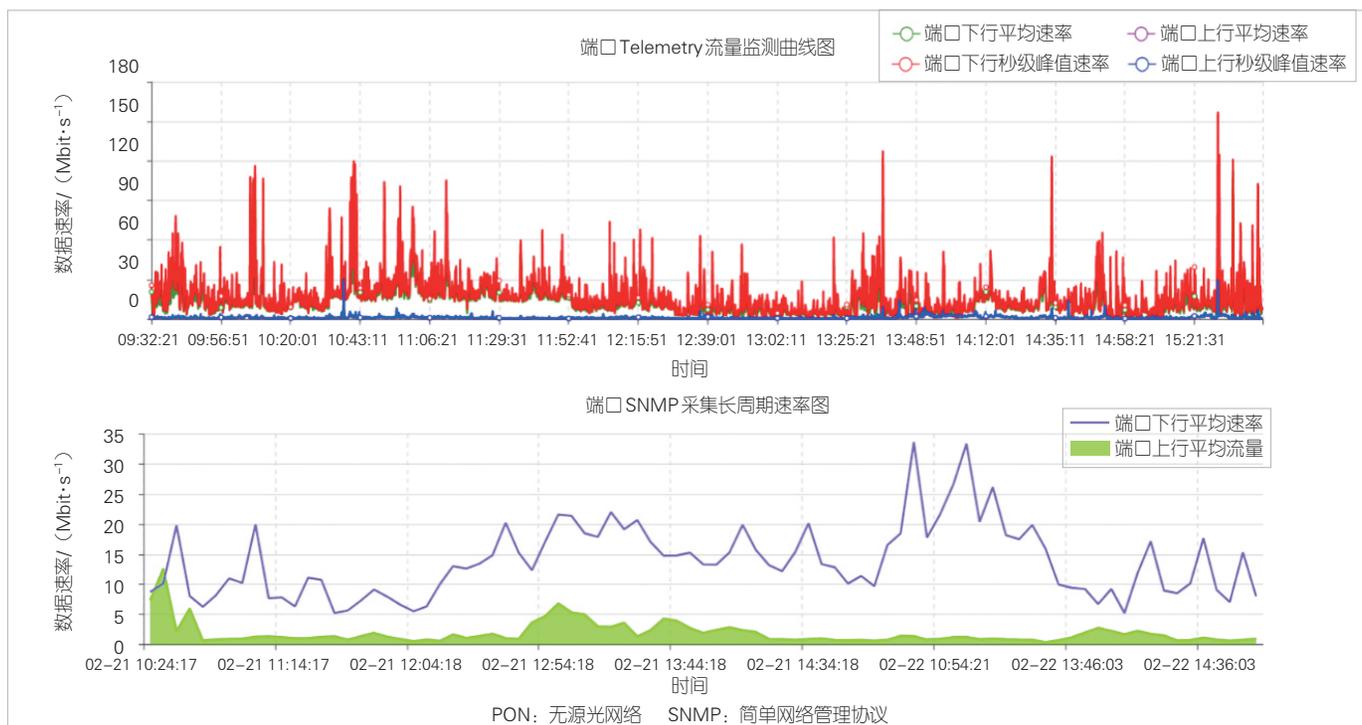
3) 采样数据的传输效率得到提升

对于同样的数据采集任务，采用Telemetry技术的传输效率比SNMP技术要高得多。同时数据传输占用的平均带宽大大降低。以某个采集任务为例：以1 min为采样频率，采集单个OLT设备的32个上联口流量信息，持续采集10 min。当使用SNMP技术实施数据采集时，数据包总量为545 kB；当采用Telemetry技术时，数据包总量为14 kB，这时数据包总量减小了531 kB，数据传输平均带宽降低了约97%。

4 未来发展方向

Telemetry在技术层面值得探索的方向还有很多：提供更丰富的数据信息，例如采集使用随流检测技术度量出来的业务质量数据；支持由指定事件或者指定阈值越界触发的遥测任务订阅，例如只有当上联口流量超过50%时，某个订阅才启动；支持采集项的数值有变化才上报的压缩模式，例如光模块温度值没有变化就不重复上报。

Telemetry作为未来网络智慧化的关键技术之一，必将



▲图3 现网试点的Telemetry数据(采样周期1 s)与SNMP数据(采样周期5 min)对比

会在自智网络、数字孪生等领域得到广泛应用，例如：参与智能网络管理流程，提供实时精准的设备和网络的全方位信息，实现光接入网络和家庭网络的自动化和智能化。

5 结束语

本文从网络遥测的发展背景和产业现状出发，分析了网络遥测关键技术，展示了中国电信的光接入网络遥测实践成果，最后讨论了网络遥测技术的未来发展方向。当前的实践已经证明，Telemetry 遥测技术具有广阔应用前景，而且在关键技术和应用领域方面存在巨大的研究和创新空间，值得产业界继续积极探索。

参考文献

[1] BROCKNERS F, CLAISE B. Telemetry: industry status, challenges, and IETF opportunities [EB/OL]. (2019-03-28)[2023-04-15]. <https://datatracker.ietf.org/meeting/104/materials/slides-104-edu-sessa-telemetry-industry-status-challenges-and-ietf-opportunities-00.pdf>

[2] 史凡. 云网络: 云网融合的新型网络发展趋势 [J]. 中兴通讯技术. 2022, 27(1): 8-10. DOI:10.12142/ZTETJ.202201004

[3] ZHANG W L, YUAN L Q. Higher speed passive optical networks for low latency services [J]. ZTE communications, 2021, 19(2): 61 - 66. DOI: 10.12142/ZTECOM.202102008

[4] 王卫斌, 周建锋, 黄兵. ODICT 融合的网络 2030 [J]. 中兴通讯技术. 2022, 27(1): 47-56. DOI:10.12142/ZTETJ.202201011

[5] 陆平, 欧阳新志, 高雯雯. 5G 行业虚拟专网能力提升与实践 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 27(2): 68-74. DOI:10.12142/ZTETJ.202202011

[6] 谭立状, 苏伟, 张臻熠, 等. 网络遥测研究进展 [EB/OL]. (2019-03-28)[2023-04-15]. https://www.researchgate.net/publication/341479151_wangluoyaoceyanjijinzhan

[7] Access & home network O&M automation/intelligence: TR-436 [S]. 2021

[8] 接入网设备支持基于 Telemetry 接口采集功能的技术要求 [EB/OL]. [2023-04-

15]. <https://www.doc88.com/p-48139677418059.html>

作者简介



刘刚，中国电信集团有限公司云网运营部无线和接入网运行处副处长、高级工程师；主要研究方向为 PON 网络技术、千兆宽带、全屋智能等；牵头推进中国电信移动及光网质量双提升、接入网切片方案及关键技术等项目；获中国通信标准化协会科学技术奖二等奖。



张德智，中国电信集团有限公司光接入领域高级专家、中国电信研究院网络技术研究所接入网络研究中心总监；主要研究方向为下一代高速 PON、工业 PON、全光组网、光接入网 SDN 和智能化等；负责中国电信的多项科研项目；在 ITU-T 牵头制定 10 余项国际标准，发表论文 10 篇。



陈爱民，中兴通讯股份有限公司光接入产品线规划总工；主要研究方向为下一代宽带接入架构、光接入网 SDN 和自智网络演进、50G PON 技术等；负责新一代 OLT 产品设计和创新解决方案；发表论文 3 篇，拥有专利 10 项。

中兴通讯技术杂志社

促进产学研合作青年专家委员会

主任 陈 为 (北京交通大学)

副主任 秦晓琦 (北京邮电大学) 卢 丹 (中兴通讯股份有限公司)

委员 (按姓名拼音排序)

| | | | |
|-----|-----------|-----|--------------|
| 曹 进 | 西安电子科技大学 | 秦志金 | 清华大学 |
| 陈 力 | 中国科学技术大学 | 史颖欢 | 南京大学 |
| 陈琪美 | 武汉大学 | 王景璟 | 北京航空航天大学 |
| 陈舒怡 | 哈尔滨工业大学 | 王兴刚 | 华中科技大学 |
| 陈 为 | 北京交通大学 | 王勇强 | 天津大学 |
| 官 科 | 北京交通大学 | 温淼文 | 华南理工大学 |
| 韩凯峰 | 中国信息通信研究院 | 吴泳澎 | 上海交通大学 |
| 何 姿 | 南京理工大学 | 夏文超 | 南京邮电大学 |
| 胡 杰 | 电子科技大学 | 徐梦炜 | 北京邮电大学 |
| 黄 晨 | 紫金山实验室 | 徐天衡 | 中国科学院上海高等研究院 |
| 李 昂 | 西安交通大学 | 杨川川 | 北京大学 |
| 刘春森 | 复旦大学 | 尹海帆 | 华中科技大学 |
| 刘 凡 | 南方科技大学 | 于季弘 | 北京理工大学 |
| 刘俊宇 | 西安电子科技大学 | 张 娇 | 北京邮电大学 |
| 卢 丹 | 中兴通讯技术杂志社 | 张宇超 | 北京邮电大学 |
| 陆游游 | 清华大学 | 章嘉懿 | 北京交通大学 |
| 宁兆龙 | 重庆邮电大学 | 赵昱达 | 浙江大学 |
| 祁 亮 | 上海交通大学 | 周 伊 | 西南交通大学 |
| 秦晓琦 | 北京邮电大学 | 朱秉诚 | 东南大学 |

刊物相关信息



投稿须知



投稿平台



过刊下载



论文索引与
引用指南

中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

办刊宗旨:

以人为本, 荟萃通信技术领域精英
迎接挑战, 把握世界通信技术动态
立即行动, 求解通信发展疑难课题
励精图治, 促进民族信息产业崛起

产业顾问(按姓名拼音排序):

段向阳、高 音、胡留军、华新海、刘新阳、
陆 平、史伟强、屠要峰、王会涛、熊先奎、
赵亚军、赵志勇、朱晓光

双月刊 1995 年创刊 总第 170 期
2023 年 6 月 第 29 卷 第 3 期

主管: 安徽出版集团有限责任公司
主办: 时代出版传媒股份有限公司
深圳航天广宇工业有限公司
出版: 安徽科学技术出版社
编辑、发行: 中兴通讯技术杂志社

总编辑: 王喜瑜
主编: 蒋贤骏
执行主编: 黄新明
编辑部主任: 卢丹
责任编辑: 徐焯
编辑: 杨广西、朱莉、任溪溪
设计排版: 徐莹
发行: 王萍萍
编务: 王坤

《中兴通讯技术》编辑部
地址: 合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室
邮编: 230061
网址: tech.zte.com.cn
投稿平台: tech.zte.com.cn/submission
电子信箱: magazine@zte.com.cn
电话: (0551) 65533356

发行方式: 自办发行
印刷: 合肥添彩包装有限公司
出版日期: 2023 年 6 月 28 日
中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
定价: 每册 20.00 元