

数字孪生网络接口设计及其协议分析



Multi-Protocol Cooperative Interface for Digital Twin Network

陈丹阳/CHEN Danyang, 陆璐/LU Lu, 孙滔/SUN Tao

(中国移动通信有限公司研究院, 中国 北京 100053)
(Research Institute of China Mobile, Beijing 100053, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202201008

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220222.1905.004.html>

网络出版日期: 2022-02-23

收稿日期: 2021-12-22

摘要: 探讨了数字孪生网络南北向接口和孪生层内部接口应具备的不同特性, 并给出了当前一些通用接口在数字孪生网络中的适用性建议。同时, 针对数字孪生网络面临的多协议问题, 提出在孪生网络层和物理网络层间引入南向接口协议适配功能, 在孪生网络层和网络应用层间引入北向接口协议适配功能。借助南向和北向的接口协议适配功能, 分别提出南北向多协议的识别、解析、转换方法, 实现孪生层内部接口的多协议协同, 降低构建数字孪生网络的协议处理的复杂度。

关键词: 数字孪生网络; 网络孪生; 多协议协同; 闭环控制

Abstract: The different characteristics of the north-south interface and the internal interface of the twin layer in the digital twin network and the applicability suggestions of some general interfaces for the digital twin network in the current network are given. At the same time, aiming at the multi-protocol problem of digital twin network, the southbound interface protocol adaptation between the twin network layer and physical network layer, and northbound interface protocol adaptation between the twin network layer and network application layer are introduced. Based on the protocol adaptation function of southbound and northbound interfaces, the identification, parsing, and transformation methods of southbound and northbound multi-protocol are proposed to realize the multi-protocol collaboration of interfaces in the twin-layer and reduce the complexity of protocol processing in constructing digital twin network.

Keywords: digital twin network; network twin; multi-protocol collaboration; closed-loop control

1 数字孪生网络(DTN)发展概述

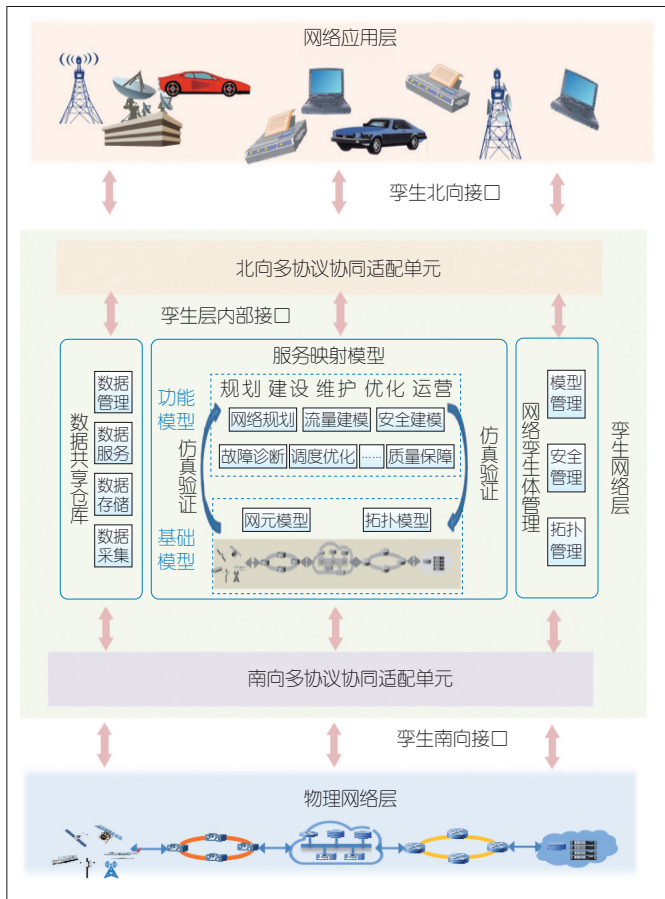
2003年, 美国密歇根大学的 M. GRIEVES 教授于产品全生命周期管理课程上提出了数字孪生的概念^[1], 并将其定义为包括实体产品、虚拟产品以及二者间联系的三维模型。到2012年, 美国空军研究实验室和美国国家航空航天局(NASA)合作并提出了构建未来飞行器的数字孪生体, 同时将数字孪生定义为高度集成的多物理场、多尺度、多概率的仿真模型, 并且能够利用物理模型、传感器数据和历史数据等反映与该模型对应的实体的功能、实时状态以及演变趋势等。近年来, 随着建模仿真技术的迅猛发展, 数字孪生技术逐渐开始应用在诸如卫星、医疗、能源、交通等各行各业中^[2]。

随着数字孪生技术在各行各业的应用, 如何在通信网络领域中引入数字孪生技术并构建DTN成为了新的研究热点

之一。同时, DTN也逐渐被认为是6G网络的关键技术之一。文献[3]中, DTN被定义为“一个具有物理网络实体及虚拟孪生体, 且二者可进行实时交互映射的网络系统”, 其应当具备4个核心要素: 数据、模型、映射和交互, 并相应设计了“三层三域双闭环”架构。

基于如上所述的架构定义, 数字孪生网络的各层接口及所处位置如图1所示。物理实体网络中的网元通过孪生南向接口同孪生网络层交互网络数据和网络控制信息。孪生网络层中含有数据共享仓库、服务映射模型和数字孪生体管理3个关键子系统, 也通过相应的接口协议, 满足其构建与交互需求, 并通过孪生层内部接口实现3个关键子系统之间以及与物理网络层和网络应用层间的交互。网络应用通过孪生北向接口向孪生网络层输入需求, 并通过模型化实例在孪生网络层进行业务部署。综上所述, DTN不同层间, 以及孪生层内部的接口协议需求存在差异性。此外, 物理网络层中的不同设备所支持的协议也多有不同, 因此DTN的构建也需要考虑如何实现不同协议间的高效协同。

基金项目: 基于服务的6G核心网关键技术研究(62032003)



▲图1 数字孪生网络接口示意

2 数字孪生网络的接口及协议

本章依据文献[3]所提架构，进一步提出了孪生北向接口、孪生层内部接口和孪生南向接口需具备的能力，总结了各接口应具备的特性，并在此基础上总结分析了一些现有通信协议在DTN构建中的适用性。

2.1 孪生北向接口

孪生北向接口是网络应用层与孪生网络层间的接口，网络应用需求由孪生北向接口输入到孪生网络层。孪生北向接口能够支持网络运维和优化、网络可视化、意图验证、网络自动驾驶等网络应用以更低的成本、更高的效率和更小的现网业务影响快速部署。因此，孪生北向接口应具备4个方面的特征。

(1) 开放性：孪生北向接口须让不同网络应用的业务需求输入到孪生网络层，因此它需要具备良好的开放性与兼容性。

(2) 可扩展：网络应用层内部存在着多种网络应用，这

必然会导致更新换代的发生。同时，网络的不断发展势必引入新的网络应用。随着网络应用的升级和新应用的产生，孪生北向接口应能及时地扩展，以满足新网络的应用需求。

(3) 可移植：孪生网络层中存在大小不一、功能不同的孪生体，网络应用层中各类应用的相同或相似需求可能部署在不同的孪生体上，因此，孪生北向接口应能够较方便地移植、部署到不同的孪生体上。

(4) 灵活易部署：为减少部署时间，降低部署成本，孪生北向接口须能灵活部署。

2.2 孪生层内部接口

孪生网络层内部包含数据共享仓库、服务映射模型和数字孪生体管理3个关键子系统，它们是数字孪生网络最关键的部分。孪生层内部接口指的是这3个子系统内部及其之间的接口。为支持这3个子系统各自的功能及其交互，孪生层内部接口应具备如下4个功能。

(1) 统一性：孪生网络层中任一子系统应能通过孪生层内部接口为其他子系统提供统一的数据格式和数据服务，即接口应具备统一性。

(2) 适配性：孪生网络层须与网络应用层和物理网络层交互，应能很好地适应于各种网络设备，并与多种接口适配，因此孪生层内部接口也需要具备适配性。

(3) 可移植：服务映射模型子系统为不同应用提供的数据模型实例可能存在极高的相似度，为提高效率，数据模型实例须能通过不同的孪生层内部接口提供及部署。

(4) 灵活可扩展：孪生网络层须能对不同的网络新业务进行验证，为缩短功能实现时间，孪生层内部的功能实现应尽可能简化，因此孪生网络层内部接口须做到灵活可扩展。

2.3 孪生南向接口

孪生南向接口是孪生网络层与物理实体网络间的接口。控制更新由孪生南向接口下发至物理实体网络，同时物理实体网络中的各种网元通过孪生南向接口同孪生网络层交互网络数据和网络控制信息。因此，孪生南向接口应具备3个功能。

(1) 信息交互能力：孪生南向接口应能收集不同物理网元或网络设备的信息，同时将孪生网络中的配置信息下发给物理网络来执行，即能实现孪生网络层与物理实体网络间的信息交互。

(2) 实时性：孪生网络配置验证等功能的实现须具备一定的实时性，因此从物理实体网络中采集并上传的信息以及从孪生网络下发给物理网络的配置信息均须具备一定的实时

性，以满足数字孪生网络的实时性要求。

(3) 可兼容：不同厂商生产的网络设备及网元所使用的接口及协议千差万别，孪生南向接口应具备良好的兼容性，保证信息采集与配置下发的可靠性。

2.4 通用协议

目前网络中存在多种多样的南北向及网络内部协议，如 RESTCONF^[4]、NETCONF^[5]、OpenFlow^[6]、可扩展消息处理线程协议 (XMPP)^[7]、East-West Bridge^[8]等。不同协议适用于不同的孪生网络接口，如表 1 所示。表 1 给出了目前适合 DTN 的一些通用协议的适用性建议。

3 多协议协同的接口实现机制

如上所述，DTN 中的物理网络涵盖移动接入网、核心网、数据中心网等多种网络类型，因此网元设备种类繁多，各厂家设备所支持的协议存在差异性。同时，DTN 中的网络应用层也须支持不同网络应用的多样化协议。因此，孪生层内部接口须能实现多协议协同，以满足不同厂家的网元或网络设备所支持的多样化协议，以及差异化的数据格式。此外，孪生层内部接口也须支持不同应用、应用升级等带来的需求改变和接口协议的适配变化。同时，由于孪生网络层的构建并非简单的、1:1 的完全复制物理网络，而是通过模型抽象的方式实现物理网络的映射，因此在孪生层内部通过

多协议协同实现协议转换等处理，既能实现孪生层内部协议简单化，又不会影响 DTN 原系统构建。

当前，针对网络中存在的协议类别多的问题，业界也展开了相关研究。例如，文献[10]对窄带物联网中网关处不同协议的转换问题进行了探讨；文献[11]研究了基于 OpenFlow 协议实现的支持多业务融合和多协议转发的网络架构设计；文献[12]结合了简单网络管理协议 (SNMP)、超文本传输协议 (HTTP) 等多协议，用于网络拓扑发现；文献[13]提出了一种使用元数据以抽象方式指定变量和消息的多代理协议组合方法，实现相同协议配置的多次调用，提升了协议组合的效率。由此可见，多协议转换、融合的研究已有一定基础，但在 DTN 中如何实现多协议协同仍有待研究。另外，由于孪生北向接口与孪生南向接口所需处理的协议不同，南北向接口协议适配功能存在一定的差异性。

3.1 孪生南向接口协议适配功能

基于上述相关协议融合与协议转换的研究，为实现孪生网络层与物理网络层间协议的转换，保证协议处理的高效性，配置信息分发的准确可执行，并尽可能地降低协议处理的复杂度，本文在孪生网络层与物理网络层交互处引入了南向接口协议适配功能。如图 2 所示，南向接口协议适配功能由协议配置管理、协议解析及转换、协议识别及匹配和数据管理 4 个模块组成。

▼表 1 通用协议的适用性建议

协议	特性	孪生北向接口	孪生层内接口	孪生南向接口
RESTCONF	RESTCONF 以 HTTP 作为传输协议，用 XML/JSON 作为消息交换格式，允许 WEB 应用以模块化和可扩展的方式访问网络设备的配置和操作数据。	√		
NETCONF	NETCONF 使用基于 RPC 的机制为客户机和服务器之间提供一套能够新增、修改、删除网络设备配置，查询配置、状态和统计信息的框架机制，可以作为网络管理员或网络配置应用程序与网络设备之间进行逻辑连接。NETCONF 可传输配置数据和状态数据两类信息。	√		√
OpenFlow	用于 OpenFlow 交换机与控制器的信息交互。			√
XMPP	用于即时消息传递、多方聊天、语音和视频呼叫、协作、内容联合以及通用的 XML 数据路由的开放技术。		√	√
I2RS	可基于拓扑变化、流量统计等信息动态下发路由状态和策略，能支持外部应用或控制实体读取路由器中的信息。		√	√
East-West Bridge 协议	East-West Bridge 是基于 TCP/SSL 的一种应用层协议，具有良好的移植性和可扩展性。可将网元抽象为节点、链路、端口、流等概念，通过扩展的链路层发现协议获取域内各网元的标识、容量、状态等信息。		√	
SNMP ^[9]	专门设计用于在 IP 网络管理网络节点的一种标准协议。网络管理员能够使用 SNMP 管理网络效能，发现并解决网络问题以及规划网络增长。	√	√	

HTTP：超文本传输协议
I2RS：路由系统接口协议
JSON：一种轻量级的数据交换格式

RPC：远程过程调用
SNMP：简单网络管理协议
SSL：安全套接字协议

TCP：传输控制协议
XML：可扩展标记语言
XMPP：可扩展消息处理线程协议

(1) 协议配置管理模块：对物理网络层发给孪生网络层的所有数据包进行处理并得到相应的配置信息，为协议识别及匹配模块和协议解析及转换模块提供所需的配置信息。

(2) 协议识别及匹配模块：通过孪生南向接口实现与物理网络层的交互，根据网元设备标识、终端设备信息、接入控制携带的网元信息等，识别并记录物理网络层设备所支持的协议类别，形成相应的终端协议表，具体形式如表2所示。此外，协议识别及匹配模块在孪生网络层完成相应的功能验证并生成相应的网络配置，再将网络配置信息下发至物理网络的具体设备。这时协议识别及匹配模块会根据终端协议表，确保命令传输协议为相应设备所支持的协议类型。

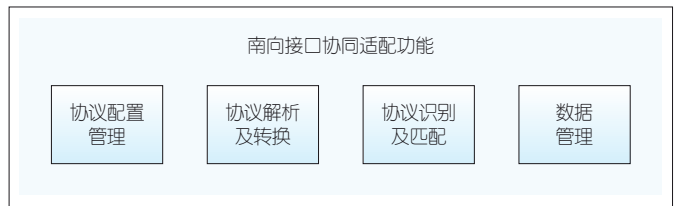
(3) 协议解析及转换模块：对从物理网络上传的信息等进行解析并转换为孪生网络层内部数据共享仓库、服务映射模型和数字孪生体管理3个子系统支持的协议类型；或做逆处理，即将孪生层内部3个子系统的数据信息、模型信息、配置信息等解析并转换为外部应用和物理设备支持的协议类型。同时，孪生网络层内部不同子系统功能各不相同，协议解析及转换模块须在孪生层内部将协议转换为统一的且孪生网络层3个子系统均支持的协议格式，以简化孪生网络层内部协议转发及信息交互流程。

(4) 数据管理模块：将物理网络层和网络应用层所用的不同协议的不同数据格式转换成孪生网络层内部所用协议适用的数据格式。

孪生层内部南向接口协议适配功能对物理网络层中不同终端、设备用到的多种协议进行识别、解析和转换等操作，简化了孪生网络层内部3个子系统间以及孪生网络层与物理网络层间的信息交互，实现了孪生层内部协议无关的信息处理和数据转发等功能。南向接口协议适配功能简化流程如图3所示。通过引入南向接口协议适配单元，无须过多修改底层物理网络中的网络设备，协议转换、适配等工作就可以全部由南向多协议适配单元完成。这使得孪生网络层的功能更容易实现，数字孪生网络的构建复杂度进一步降低。

3.2 孪生北向接口协议适配功能

与物理层网元设备等支持的协议种类繁多相比，在当前网络应用层中，应用所使用的协议种类数量较少，采用基于Rest应用程序编程接口（API）实现方式的应用占绝大多数。因此，相比于南向接口协议适配功能，孪生北向接口协议适配功能相对要简单一些。类似于南向接口协议适配功能，北向接口协议适配功能同样需要有协议解析及转换模块，实现将基于Rest API接口的网络应用的业务需求转换成网络孪生层可执行的协议类型。

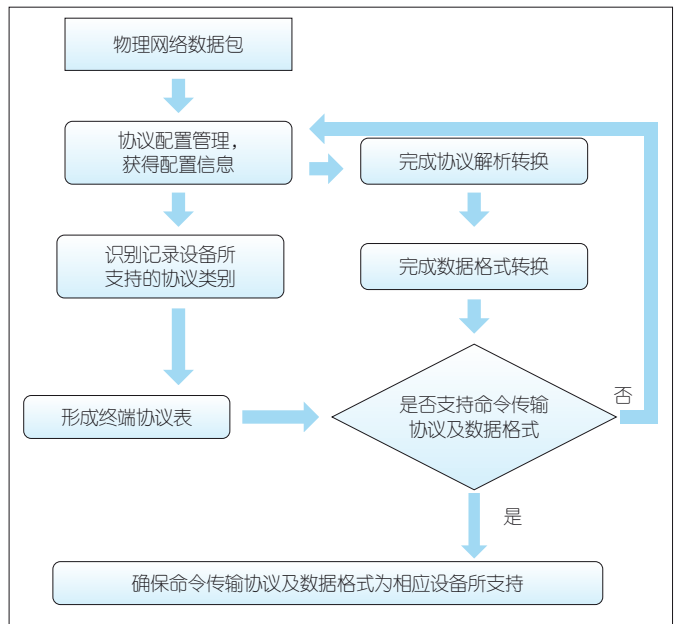


▲图2 南向接口协议适配功能

▼表2 终端及应用协议表

终端/应用	协议类别
交换机1	SNMP
交换机2	OpenFlow
服务器1	XMPP
.....

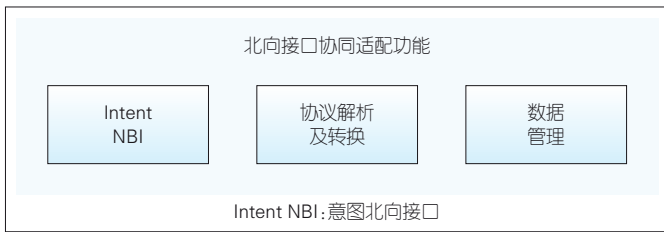
SNMP：简单网络管理协议 XMPP：可扩展消息处理线程协议



▲图3 南向接口协议适配功能流程图

此外，近年来随着意图网络^[14]的发展，意图北向接口（Intent NBI）概念及部署逐渐兴起。Intent NBI作为一种与具体网络实现无关的北向接口，仅关注应用相关的内容，而不关注具体的网络协议及网络技术。不同于Rest API类接口的实现方式，Intent NBI采用声明式的表达形式，仅关注实现结果而不指定具体的操作方式。独特的设计理念使Intent NBI在一定程度上具备了协议处理功能，与北向接口协议适配功能高度吻合。目前业界已有关于Intent NBI的一些设计实现工作。因此，我们考虑将Intent NBI作为孪生北向接口协议适配功能的一部分，以简化部分孪生北向接口多协议协同的实现。孪生北向接口协议适配功能的设计如图4所示。

如上所述，网络应用层目前主流的北向接口为基于



▲图4 北向接口协议适配功能

Rest API的实现方式。该方式多采用RESTCONF协议，其他协议占比较少。同时，考虑到随着意图网络的发展，以及Intent NBI设计理念的契合性，在北向接口协议适配功能中，设计引入Intent NBI，同时面向Rest API等接口设置协议解析及转换功能模块和数据管理功能模块，在降低协议处理的复杂度的同时，完成北向接口和孪生层内部接口间的协议转换和统一数据格式等工作。

4 结束语

数字孪生网络作为网络智能化、自治化、6G网络演进的技术支撑，越来越多地受到专家学者的关注。但由于通信网络与其他行业存在明显不同，数字孪生网络的构建不能单纯照搬其他行业中的应用方案，必须考虑通信网络本身的各种特性。本文中，我们从数字孪生网络构建的不同接口应具备的特性出发，给出了当前一些协议在数字孪生网络中的适用性建议。同时，针对孪生网络层如何实现多协议共存和协调的问题，我们提出在孪生网络层面向物理网络层和网络应用层处分别引入南北向接口协议适配功能，以实现南北向多协议的识别、解析与转换，简化孪生网络层内部信息传递、数据转发等功能，并降低对网络现有设备的影响和数字孪生网络构建的复杂度。多协议协调的接口实现只是构建数字孪生网络所面临的诸多问题中的一个，未来我们将继续探讨并研究数字孪生网络构建中所面临的其他问题与挑战。

参考文献

[1] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication [EB/OL]. [2021-12-12]. https://www.researchgate.net/profile/Michael-Grievess/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication/links/5535186a0cf23947bc0b17fa/Digital-Twin-Manufacturing-Excellence-through-Virtual-Factory-Replication.pdf

[2] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2019, 15(4): 2405-2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186

[3] 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

[4] BJORKLUND M, SCHONWALDER J, SHAFER P, et al. RESTCONF extensions to support the network management datastore architecture, RFC 8527 [EB/OL]. (2019-03-06)[2021-12-10]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc8527/>

[5] BJORKLUND M, SCHONWALDER J, SHAFER P, et al. NETCONF extensions to support the network management datastore architecture, RFC 8526 [EB/OL]. (2019-03-06)[2021-12-10]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc8526/>

[6] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow [J]. ACM SIGCOMM computer communication review, 2008, 38(2): 69-74. DOI: 10.1145/1355734.1355746

[7] ABDRE S P. Extensible messaging and presence protocol (XMPP): address format, RFC 7622 [EB/OL]. (2020-01-21)[2021-12-10]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc7622/>

[8] LIN P, BI J, WANG Y Y. East-west bridge for SDN network peering [EB/OL]. [2021-12-12]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-53959-6_16

[9] FEDOR M, SCHOFFSTALL M, DAVIN J, et al. Simple network management protocol (SNMP), RFC 1157 [EB/OL]. (2013-03-02)[2021-12-12]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc1157/>

[10] 孙握瑜. 基于NB-IoT技术的物联网网关多协议转换研究 [J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2021, 37(4): 49-53

[11] 冯龙. SDN网络控制器面向多协议虚拟网络接口的研究与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014

[12] 潘爽, 苏亚维. 多协议融合的网络拓扑发现技术研究 [J]. 物联网技术, 2021, 11(9): 14-17. DOI: 10.16667/j.issn.2095-1302.2021.09.005

[13] TAKAHASHI R, TEI K, ISHIKAWA F, et al. A flexible protocol composition for multi-party coordination protocols in multi-agent systems [C]//2008 Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom). IEEE, 2008: 609-614. DOI: 10.1109/PERCOM.2008.94

[14] PANG L, YANG C G, CHEN D Y, et al. A survey on intent-driven networks [J]. IEEE access, 2020, 8: 22862-22873. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2969208

作者简介



陈丹阳，中国移动研究院研究员；研究方向为数字孪生网络和意图网络。



陆璐，中国移动研究院基础网络技术研究所副所长、中国通信标准化协会TC5核心网组组长；长期从事移动核心网策略、演进、标准和技术研究工作，主要涉及未来网络架构、智能管道、边缘计算等领域。



孙滔，中国移动研究院首席专家，正高级工程师，3GPP SA2副主席；主要从事移动通信网络架构、网络融合、网络智能化、5G/6G等网络新技术的研发工作；从2009年开始代表中国移动参加3GPP会议，作为报告人完成5G架构的研究和标准制订的工作。