



一种面向计算的网络模态——算力网络模态探讨

林睿¹, 邢文娟², 雷波²

(1. 中国电信集团有限公司, 北京 100033;
2. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209)

摘要: 新型计算类应用对通信网络提出新的挑战, 传统的网络无法满足新型业务灵活部署、定制化服务、安全可信等需求。多模态网络作为一种网络技术与支撑环境分离的发展范式, 为支撑各类新型应用的差异化需求提供了新的解决思路。针对多模态网络中面向计算的业务需求, 结合算力网络发展态势, 探讨了一种面向计算的网路模态, 即算力网络模态。首先探讨了算力网络模态的设计, 然后对算力网络模态的关键技术进行了分析, 最后对算力网络模态的应用场景进行了展望。希望本文的探索能为面向计算的多模态网络应用的未来研究和发展提供借鉴。

关键词: 多模态网络; 算力网络模态; 关键技术

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023195

Discussion on a computation-oriented network modality ——computing power network modality

LIN Rui¹, XING Wenjuan², LEI Bo²

1. China Telecom Group Co., Ltd., Beijing 100033, China
2. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

Abstract: New computing applications present new challenges to communication networks, for example, traditional network cannot meet the demands of flexible deployment, customized services, security and trustworthiness of new services. As a development paradigm that separated network technology and supported environment, polymorphic network provided new solutions to support the differentiated demands of various new applications. A type of computation-oriented network modality namely computing power network modality was discussed, for the computation-oriented business requirements based on the development trend of computing power network. Firstly, the design of computing power network modality was investigated, then the key technologies of computing power network modality were analyzed. Finally, the application scenarios of computing power network were prospected. It is hoped that the discussion can provide a reference for the future research and development on application of computation-oriented polymorphic network.

Key words: polymorphic network, computing power network modality, key technology

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-09-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFB2901405)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2901405)

0 引言

现阶段新型互联网业务层出不穷,这对网络服务能力提出了更高要求,如多元化、超低时延、超高带宽、高可靠性等。然而,传统的网络模式存在IP地址单一承载、网络结构僵化、未知威胁难以抑制等基础性问题,这类“IP瘦腰”问题导致传统网络已经不能满足日新月异的应用需求,发展新型网络技术成为国家级发展战略以及产学研业界的迫切需求^[1-2]。为打破当前网络发展困境,我国邬江兴院士团队提出了一种新型网络架构——全维可定义的多模态智慧网络,其具备多模态功能呈现、全方位覆盖、全业务承载、智慧化管理控制和内生安全等特性,支持互联网的演进式发展,从根本上满足网络智慧化、多元化、个性化、高稳健、高效能的业务需求^[3-4]。多模态网络体系所具备的特质包括:通过全维可定义技术打破传统网络刚性架构,对开放网络架构下的软硬件、协议、接口、芯片全维可定义;通过多模态寻址路由技术可实时分析用户需求、网络状态并在数据传输过程中智能按需进行标识空间切换,从根本上解决传统网络只能通过IP地址进行标识的瓶颈问题^[5];网络智慧化管理控制技术能够构建“感知-决策-适配”一体的智能管控闭环;基于动态异构冗余的内生安全结构,能够从根本上抑制随机失效和人为扰动,获得网络内生安全效应。

信息通信基础设施向地球空间智联网络、云网算融合方向转型已成为产业界广泛共识^[6-7],这些新技术方向对多模态网络提出了需求。6G支持面向多样化应用场景的多元无线空口体制^[8],这与多元化的网络体制生态具有相似性,多模态网络环境加速构建6G网络多元化技术体质新生态^[9]。采用云网融合、算力网络(computing power network)等技术高效调度算力已成为面向计算类应用场景的迫切需求,也是解决算力孤岛、算力资源利用率低等难题,优化算力需求结构的有效手段^[10]。

然而,算力网络中面向计算的不同业务场景对网络的功能和性能存在差异化需求,需要多元化灵活自适应的网络能力支撑,多模态网络多元化的特性能够满足不同的算力业务需求。另外,基于多模态网络的通用基础底座实现算力网络模态,能够避免为搭建完全适配的专用网络环境带来的资源消耗。多模态网络环境下的算力网络模态研究具备一定的探讨价值。

本文对多模态网络中的一种面向计算的新型网络模态,即算力网络模态进行探讨,认为算力网络模态是多模态网络环境中的一种网络模态。针对面向计算的典型应用场景,探讨算力网络模态设计,包含算力网络模态的需求、设计目标和功能框架,并探讨算力网络模态的关键技术。最后,对典型的算力网络模态的应用场景进行了探讨。

1 算力网络模态设计

1.1 算力网络模态需求

多模态网络旨在支撑各类网络技术体系以网络模态的形式在物理环境上动态加载和运行,实现多种网络模态在同一技术物理环境内的共生共存、独立演进与变革、模态间隔离和内生安全功能^[11]。各种网络模态(网络技术体制)以类似“应用插件”的形式快速部署(或撤收),按业务需求灵活选择网络模态,即插即用,在支持多元化业务方面存在独特优势^[12]。凡是按照网络技术体制、网络所支持的行业应用、网络的运维体系、网络部署等方式定义的物理实体网络,都可以抽象为一种能通过标准化软/硬件接口运行的网络模态^[5]。移动网络、身份标识网络^[13]、内容标识网络^[14]、地球剖分网络^[15]等各种网络都可以用网络模态的形式来描述,不同的网络模态具有各自的协议体系、技术架构和适用范围。例如,身份标识网络模态面向接入(身份)标识通信,实现基于身份标识的寻址路由,可提升终端接入的灵活性,解决终端的移动性问题;内容标识网络模



态基于内容标识进行寻址路由,网络设备中融入计算、存储能力,使网络数据灵活流动,为用户 提供高品质内容体验。

另外,随着元宇宙、虚拟现实类业务、ChatGPT 等新型应用领域的发展,算力规模急速膨胀,对网络的服务能力提出了全新的挑战。现有的网络能力无法满足算力资源池内部及外部的互联需求,云网融合、算力成网成为两者重要的演进趋势。算力网络技术将多级分布式算力依靠通信网络无缝协同,为应用提供更便捷的算力调度方式^[16],实现算力供需结构优化,提高算力利用率,满足各类算力协同调度需求,为用户按需匹配所需算力资源^[17]。

算力网络模态是多模态网络体系中的一种网络模态,算力网络模态与多模态网络体系的关系^[13]如图 1 所示。算力网络场景中的业务存在多样化需求,如灵活部署需求、高通算力调度需求、超低时延需求等,仅以信息或数据的端到端传送为目标的互联网,已远不能满足其服务需求。基于多模态网络的能力特性能够为算力网络中各类面向计算的应用提供差异化的服务,不同业务能够灵活调用多模态网络的各项软/硬件能力,为用户灵活提供最优算网服务。例如,多模态网络中的全维可定义技术,能够建立网络功能全维度可定义的灵活、通用、开放架构,资源高效自动适配,通过网络结构自组织灵活支撑各项算力业务需求;多模态寻址路由技术支持多样化标识空间的定义与适配,而算力网络模态以算力资源为网络主体对象进行通信,其标识空间为算力资源标识(算力标识),在多模态网络节点融入计算、存储等算力能力,进行基于算力标识的寻址路由,实现以“算力”为中心的网络能力流动,使用户获得高效的算力服务体验。算力网络模态与其他网络模态共存时,应实现不同模态间、同一模态不同业务流量间按需高效隔离和高效传输,避免模态间资源依赖、竞争引起的性能下降。应考虑业

务运行时端到端的隔离策略,研究通过相应的软/硬件方式的隔离机制。值得说明的是,当前算力网络技术的研究基本都基于 IP 的协议栈展开,本文认为基于 IP 协议栈的算力网络模态与不基于 IP 协议栈的算力网络模态,都属于多模态网络中算力网络模态的研究范畴,两种方式都具有有别于传统互联网的协议体系、适用范围和寻址路由机制。

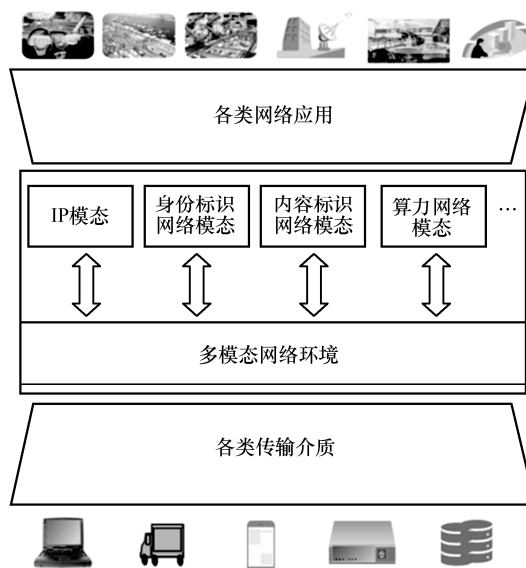


图 1 算力网络模态与多模态网络体系的关系^[13]

1.2 算力网络模态设计目标

在多模态网络中,不同的网络模态面向的网络主体对象不同,例如 IP 标识模态面向身份和位置进行通信,地理空间标识模态面向地理区域进行通信,而算力网络模态则面向算力资源进行通信。现有算力网络技术已有一些研究基础,但在适配多模态网络运行环境应有相应的升级、改造或补充。算力网络模态主要考虑的设计目标如下。

(1) 精细化算力服务

算力网络模态应针对不同的计算类业务场景灵活提供相应的算力网络服务切片,实现提供算力服务的精细化、多元化能力。通过多模态网络环境,解耦原来业务侧与资源侧的绑定关系,精准解析用户的业务需求,撮合用户需求信息与算

网资源信息,生成资源编排策略,精确地为用户匹配最优的算网资源。

(2) 智能化管控

算力网络模式需要实现算网资源的智能化管理和协同调度。基于资源编排策略,智能执行资源调度,为用户进行算力资源分配和网络连接服务。另外,智能化管控还应包含智能运维管理,从而提高系统运维效率,降低网络对人工运维管理的依赖。

(3) 灵活算力路由

通过算力标识技术和基于算力标识的寻址路由技术,实现算力网络模式下灵活的算力路由能力。算力标识用于在整个算力资源池中唯一地快速索引某个算力资源,满足当前资源的唯一性和可溯源性。基于算力标识的寻址路由技术可灵活根据业务需求以及资源调度策略,为用户建立到所需算力资源的网络连接。

1.3 算力网络模式的功能框架

将算力网络模式的功能框架自上而下分为3层:服务层、管控层和资源层,算力网络模式功能框

架如图2所示。具体如下。

(1) 服务层

负责业务承载与资源编排。多模态网络的服务层主要进行业务需求与算网资源的拟合。算力网络的服务层面向差异化的计算类业务(如虚拟现实类、大科学计算类等),精准感知和解析业务需求,统筹算力资源和网络资源,为业务按需生成资源编排策略。另外,算力网络服务层还需实现安全策略等能力。传统网络中通过集中式管控平台进行服务管理的方式^[18],其处理能力和可靠性需要依赖专有的平台,且无法根据业务的类型以及业务需求进行差异化、精细化的资源适配。

(2) 管控层

负责资源管理调度与寻址路由。算力网络模式的管控层主要实现算网资源调度以及基于算力标识的寻址与路由。针对多元业务需求,算力标识体系可以有多种形式,如业务维度的算力标识、资源维度的算力标识等。管控层针对不同的业务特性,灵活承载其资源调度能力,基于算力标识体系进行算力资源的寻址路由。管控层还包含对

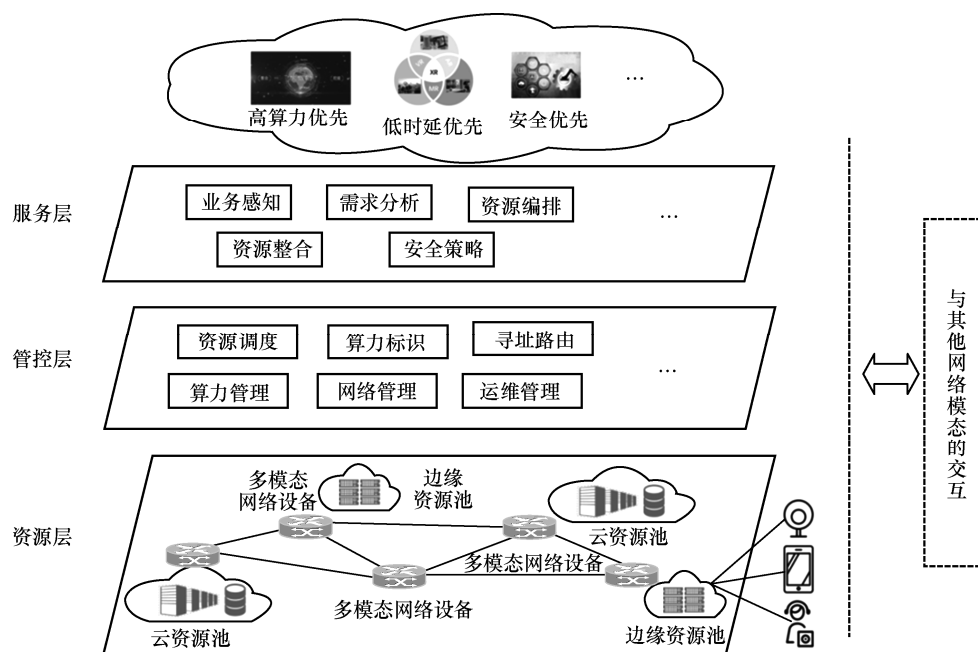


图2 算力网络模式功能框架



算力资源以及网络资源的注册、更新、管理等,以及系统运维管理等能力。

(3) 资源层

即多维融合资源等组成的基础设施层。算力网络模态的资源层包含多模态网络设备的软/硬件、拓扑、链路等网络资源,以及云计算、边缘计算等算力资源,支持多种终端接入、多种链路组网、异构接口协议接入,为多元化应用提供灵活、精细化的网络组件和服务。其中,多模态网络设备作为资源层的重要实体,提供标准化软/硬件接口,支持算力网络在内的多种网络模态共生运行。通过通用的多模态网络设备运行算力网络模态能力,避免传统算力网络方案中专用算力网络设备的新建或改造带来的软/硬件网络资源消耗。

2 算力网络模态关键技术

2.1 资源编排

资源编排技术属于算力网络模态功能框架中服务层的关键技术,是实现算力网络模态精细化算力服务目标的重要技术之一。为满足计算类业务差异化的服务请求,算力网络模态服务层实现“业务感知—业务分析—资源编排”一体的服务能力。其中,资源编排技术以用户业务需求为核心,基于对业务需求的实时感知和精确分析,以及算力能力、网络能力、网络路径等的整合视图,为业务制定适配的资源编排策略,以此来执行资源调度。

算力网络模态实现资源编排需要实时感知业务需求和算网信息的变化,使用人工智能、大数据分析等技术快速分析当前的业务需求,结合全局算网资源融合视图,生成业务适用的最佳算网资源编排策略,为算力网络模态管控层执行资源调度提供能力基础。资源编排技术能够针对不同的计算类业务提供不同的算力服务切片,如 AI 类业务切片、视频类业务切片等,为用户提供极致的体验。

2.2 资源调度

资源调度技术属于算力网络模态功能框架中管控层的关键技术,是实现算力网络模态智能化管控目标的重要技术之一。资源调度技术以算力标识技术为基础,根据资源编排策略进行算力资源和网络资源调度,定位目标算力资源及网络调度路径,同时使用人工智能技术,解决人工预定的网络路径策略在复杂多变的网络环境中不能灵活调整的问题。

资源调度技术主要执行算力资源调度和网络连接调度:算力资源调度根据资源编排策略,基于算力标识定位目标算力资源,告知目标算力资源执行资源预留,更新算力资源信息数据,并根据业务需求变化进行弹性调整;网络连接调度根据资源编排策略得到网络连接需求,确认网络路径。基于资源调度能力,多模态网络设备完成基于算力标识的路由转发,建立用户侧到算力资源侧的网络连接,将业务流量路由到相应的资源节点供用户使用。

2.3 寻址路由

寻址路由技术属于算力网络模态功能框架中管控层的关键技术,是实现算力网络模态灵活算力路由目标的重要技术之一。多模态寻址路由技术通过实时需求分析灵活实现对网络状态、用户需求、服务需求、安全需求的自动适配^[5]。算力网络模态根据资源调度策略,进行基于算力标识的寻址路由,最终为用户提供高效、差异化的算力服务体验。针对不同的多模态网络域(单域、多域等)及算力网络模态实现方案(集中式、分布式等),应考虑相应的寻址路由机制。

算力网络模态下的多样化算力资源都被分配了唯一的算力标识。在集中式寻址模式下,中心管控平台整合了各类算力资源的标识信息,结合业务需求(如大规模通用算力、智能算力等)进行最优算力资源寻址。在分布式寻址模式下,接入侧的多模态网络设备可以根据业务需求进行基

于算力标识的寻址流程。基于算力标识的寻址技术可以为业务精准定位到最佳算力资源。基于算力标识的寻址技术研究除考虑寻址流程外,还需要考虑寻址的报文格式和结构等。基于算力标识的路由机制根据不同的算力网络模态实现方案,也可以有不同的实现方式。例如,可以基于集中的软件定义网络 (software defined network, SDN) 控制器进行路由策略下发与控制,也可以使用随路或者分布式控制方式^[11]。另外,基于算力标识的寻址路由技术还要考虑算力网络模态架构下各元素 (含多模态网络设备) 的功能要求及接口要求。

2.4 算力标识

算力标识技术属于算力网络模态功能框架中管控层的关键技术,是实现算力网络模态灵活算力路由目标的重要技术之一。针对算力网络模态下算力资源多级、异构、多样性等特点,建立统一的算力标识方法,是实现异构计算资源协同管理、高效调度以及未来构建分层、分域管理的算力网络模态的关键所在^[19]。在算力网络模态运行机制中,算力标识的主要作用是目标资源标识和寻址。当前业内还未形成对“算力标识”清晰明确的定义及技术要求。根据计算类业务的不同需求,算力标识可以有多种形式,如业务维度的算力标识、资源维度的算力标识等。业务维度的算力标识,可以由业务资源唯一标识符 (或标识号) 和业务资源属性 (如像素、帧率) 等组成。资源维度的算力标识可以由算力资源节点的唯一标识符和资源节点的计算能力属性 (如算力类型、算力大小等) 等组成。各种形式下的算力标识符都可用于唯一索引某个算力资源,满足当前资源在整个异构算力资源池中的唯一性和可溯源性。

算力网络模态下的算力标识体系,主要考虑算力标识的数据模型和算力标识的生成机制。算力数据模型定义了算力标识在网络中传递的数据结构、数据格式等。在生成机制方面,由于目标资源往往根据算力资源使用方的算力资源需求来

动态匹配,因此在算力网络模态中,算力标识考虑动态生成。需要结合业务需求、算力网络模态的运行机制及算力标识寻址机制设计适合的算力标识体系。

3 算力网络模态应用场景

3.1 云化虚拟现实类场景

云化虚拟现实 (virtual reality, VR) 类业务是众多信息技术相互融合的新型业务,将云计算、云渲染的理念及技术引入 VR 场景中,为用户提供虚实结合的极致真实体验。VR 类业务往往对计算和网络提出较高要求。例如,一些复杂的视频或图像实时处理类计算需要在云侧完成,再将数据流传送到终端,同时保证高质量画面的传输交互,需要高带宽、低时延、稳定的网络来满足业务需求。另外,VR 业务需要进行实时图像渲染、音频处理等任务,为了满足交互感、沉浸感的用户体验需求,需要大量的计算资源作为支撑,还需要使用高效的软/硬件资源进行加速计算与渲染。

以 VR 弱交互类视频场景为例,涉及的实体和系统主要包括 VR 终端、边缘渲染系统、内容管理系统、算力资源等。算力网络模态服务层负责解析 VR 业务需求,感知算网资源,并根据业务需求进行资源编排调度,为用户选择合适的资源源和目标算力资源。多模态网络节点融入算力能力,根据任务流程进行基于算力标识的寻址路由和调度。服务层将内容源推送至目标算力资源,进行进一步的渲染及编码推送流程。算力网络模态能够为用户根据 VR 业务需求灵活选择最优算力资源。

3.2 视联网场景

视联网业务是一种基于网络技术实现的视频监控系

统,它使用视频摄像机捕捉监控区域的实时图像或视频流,并将这些数据通过网络传输到远程监控中心或用户的终端设备,以实现远程监



控、预警、管理等功能。视联网业务对算力和网络的需求主要体现在如下几个方面：在视频压缩和编解码阶段，视频监控需要将高清视频流进行压缩和编/解码，以减少数据量，需要大量算力提供高效处理保障；在视频传输和存储阶段，视频监控需要将实时视频流传送到远程平台或者用户设备，同时将视频进行存储，这都需要低时延、高速的网络来提供保障；在视频分析和处理阶段，为了更好地管理与使用视频数据，需要强大的算力支撑对视频的分析。

视联网业务通常包括视频监控终端、网络设备、存储与计算资源、视频管理平台等组成部分。算力网络模态中，服务层可根据视联网不同的业务需求（如算力资源要求、数据温冷热类型等）制定相应的调度策略，匹配最优资源。当处理业务数据的算力资源出现不足时，通过服务层的整体编排和管控层、资源层的寻址路由能力，为视频终端设备灵活选择所需的算力资源。算力网络模态可以为视联网业务提供差异化的最优算力服务选择，提升整体资源利用率，优化业务与资源的配置模式。

4 结束语

为解决多模态网络支撑面向计算的业务应用问题，本文探讨了一种面向计算的网路模态（即算力网络模态）的设计与应用构想，为多模态网络中的算力网络模态研究提供了一些初步的思路。但未来还有许多概念和技术需要继续深入探讨，例如，如何构建完善的算力网络模态的协议体系、运行机制、标识体系等；如何考虑算力网络模态的安全策略；算力网络模态如何与其他网络模态灵活切换等。诸多算力网络模态研究问题仍需深入研究，这也是笔者接下来工作的主要方向。

参考文献：

[1] 郭江兴, 兰巨龙, 程东年. 新型网络体系结构[M]. 北京: 人

民邮电出版社, 2014.

WU J X, LAN J L, CHENG D N. Novel network architecture[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2014.

[2] 邵帅, 侯心迪, 刘宁春, 等. 多模态网络环境异构标识空间管控架构研究[J]. 通信学报, 2022, 43(4): 26-35.

GAO S, HOU X D, LIU N C, et al. Research on heterogeneous identifier namespace management and control architecture in polymorphic network environment[J]. Journal on Communications, 2022, 43(4): 26-35.

[3] 郭江兴. 多模态智慧网络与内生安全[J]. 网信军民融合, 2018(11): 11-14.

WU J X. Polymorphic smart network and endogenous security[J]. Civil-Military Integration on Cyberspace, 2018(11):11-14.

[4] 胡宇翔, 伊鹏, 孙鹏浩, 等. 全维可定义的多模态智慧网络体系研究[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 1-12.

HU Y X, YI P, SUN P H, et al. Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 1-12.

[5] 李丹, 胡宇翔, 郭江兴. 新型网络技术创新发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 5-21.

LI D, HU Y X, WU J X. Innovative development strategy of new network technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 15-21.

[6] 郭江兴. 论网络技术体制发展范式的变革: 网络之网络[J]. 电信科学, 2022, 38(6): 3-12.

WU J X. Revolution of the development paradigm of network technology system—network of networks[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(6): 3-12.

[7] CAI Q, ZHOU Y Q, LIU L, et al. Collaboration of heterogeneous edge computing paradigms: how to fill the gap between theory and practice[J]. IEEE Wireless Communications, 2023(99): 1-9.

[8] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.

[9] 郭江兴. 打造 6G 网络弹性工程“钢筋骨架”, 构建 6G 内生安全可信体系[Z]. 全球 6G 技术大会. 2023.

WU J X. Building a “steel skeleton” for 6G network elastic engineering, building an endogenous security and trust system for 6G[Z]. Global 6G Conference. 2023.

[10] LEI B, ZHAO Q Y, MEI J. Computing power network: an interworking architecture of computing and network based on IP extension[C]//Proceedings of 2021 IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.

[11] 郭江兴, 胡宇翔. 网络技术体系与支撑环境分离的发展范式[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(8): 1-11.

WU J X, HU Y X. The development paradigm of separation between network technical system and supporting environ-

- ment[J]. Telecommunications Network Technology, 2021, 47(8): 1-11.
- [12] 杨思锦, 庄雷, 宋玉, 等. 多模态网络中时间敏感网络模式的智能调度机制[J]. 通信学报, 2022, 43(5): 82-91.
YANG S J, ZHUANG L, SONG Y, et al. Intelligent scheduling mechanism of time-sensitive network modal in polymorphic network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(5): 82-91.
- [13] ZHANG H K, QUAN W, CHAO H C, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future Internet[J]. IEEE Network, 2016, 30(3): 46-51.
- [14] AHLGREN B, DANNEWITZ C, IMBRENDA C, et al. A survey of information-centric networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(7): 26-36.
- [15] DONG F, CHENG C Q, GUO S D. Design and research on GeolP[C]//Proceedings of 2010 14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. Piscataway: IEEE Press, 2010: 13-17.
- [16] 李正茂, 雷波, 孙震强, 等. 云网融合: 算力时代的数字信息基础设施[M]. 北京: 中信出版集团, 2022.
LI Z M, LEI B, SUN Z Q, et al. Cloud and network integration: digital information infrastructure in the age of computing power[M]. Beijing: CITIC Press Group, 2022.
- [17] 邢文娟, 雷波, 赵倩颖. 算力基础设施发展现状与趋势展望[J]. 电信科学, 2022, 38(6): 51-61.
XING W J, LEI B, ZHAO Q Y. Development status and trend prospect of computing power infrastructure[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(6): 51-61.
- [18] 黄光平, 史伟强, 谭斌. 基于 SRv6 的算力网络资源和服务编排调度[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(3): 23-28.
HUANG G P, SHI W Q, TAN B. Computing power network

resources based on SRv6 and its service arrangement and scheduling[J]. ZTE Communications, 2021, 27(3): 23-28.

- [19] XING W J, DONG G Z, WU N, et al. A URL-based computing power identification method[C]//Proceedings of 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE). Piscataway: IEEE Press, 2023: 99-103.

[作者简介]



林睿 (1975—), 男, 中国电信集团有限公司云网运营部副总经理、高级工程师, 主要研究方向为云网融合、国际网络规划、区块链、Web3 技术等。



邢文娟 (1989—), 女, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为未来网络、云网融合、算力网络等。



雷波 (1980—), 男, 中国电信股份有限公司研究院网络技术研究所副所长、正高级工程师, 主要研究方向为未来网络、云网融合、算力网络、新型 IP 网络技术等。