



算力网络路由调度技术研究

庞冉^{1,2}, 易昕昕^{1,2}, 辛亮³, 曹畅^{1,2}, 唐雄燕^{1,2}

(1. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048;

2. 下一代互联网宽带业务应用国家工程研究中心, 北京 100048;

3. 联通智网科技股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 面向数字经济高质量发展需求, 算力网络的研究和发展不断加速。如何实现算力与网络资源的一体化调度是算力网络研究的关键问题, 介绍了算力网络演进进展, 分析了算力网络资源感知和路由调度技术, 提出了算力网络混合式路由调度解决方案, 实现按需灵活、快速路由、易于实现的算网一体化能力。介绍了混合式路由调度方案在车联网远程驾驶场景的实现流程, 在车辆移动状态下支持提供算网一体、快速调优的差异化服务。

关键词: 算力网络; 资源感知; 路由调度

中图分类号: TN919

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023163

Research on routing scheduling technology of computing power network

PANG Ran^{1,2}, YI Xinxin^{1,2}, XIN Liang³, CAO Chang^{1,2}, TANG Xiongyan^{1,2}

1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China

2. National Engineering Research Center of Next Generation Internet Broadband Service Application, Beijing 100048, China

3. China Unicom Smart Connection Technology Co., Ltd., Beijing 100037, China

Abstract: With the needs of high-quality development of the digital economy, the research on computing power network is accelerating. How to realize the integrated scheduling of computing resources and network resources becomes the primary challenge for computing power network. The evolution of computing power network was introduced, the resource awaring and routing scheduling technology of computing power network were analyzed, and a hybrid routing scheduling solution for computing power network was proposed to realize the ability of flexible on-demand, fast routing and easy implementation. The implementation process of the hybrid routing scheduling solution in the remote driving scenario of the Internet of vehicles was introduced, which supported the provision of differentiated services integrating computing and networking and fast tuning when the vehicle was moving.

Key words: computing power network, resource awaring, routing scheduling

收稿日期: 2023-07-11; 修回日期: 2023-08-13

通信作者: 曹畅, caoc15@chinaunicom.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2019YFB1802600)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB1802600)



0 引言

数字经济已成为推动经济增长的主要引擎之一，信息通信技术（information and communications technology, ICT）产业格局向着泛在联接与泛在计算紧密结合的方向演进。中国产业界率先提出了“算力网络”的理念^[1-2]，在产业界的共同努力下，算力网络技术研究在国际和国内都取得了显著的进展。算力网络可以实现网络和计算一体化服务，实现云网边端业的高效协同，提高计算资源利用率和计算服务质量。在算力网络中，用户无须关心网络中计算资源的位置和部署状态，通过网络手段将计算、存储等基础资源在云一边一端之间进行有效调配，以此提升业务服务质量和用户的服务体验^[3]。

算力网络是中国信息通信产业响应国家政策导向、顺应产业发展趋势、适应市场新兴需求的体系创新、架构创新与能力创新。算力网络的概念随着数字经济的发展而不断演进，也伴随着系列国家政策的布局而完善。2020年12月，国家发展和改革委员会（简称“发改委”）发布《关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见》，推动算力、算法、数据、应用资源进行集约化和服务化创新。2021年5月，发改委发布《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》，推动新型算力网络，加快实施“东数西算”工程。2021年12月，中央网络安全和信息化委员会发布《“十四五”国家信息化规划》，明确提出构建云网融合的新型算力基础设施，加强新型网络架构的研究。2022年1月，中共中央国务院印发《“十四五”数字经济发展规划》，提出推进云网协同和算网融合发展。2023年2月，中共中央国务院发布《数字中国建设整体布局规划》，提出系统优化算力基础设施布局，促进东西部算力高效互补协同联动。

在标准制定方面，2021年7月，国际电信联

盟电信标准部（ITU-T）第13研究组（SG13）发布了首个算力网络领域国际标准（Y.2501）^[4]，规定了算力网络的功能架构。2023年7月，ITU-T SG11发布了算力网络服务部署信令要求（Q.4140）标准^[5]。2023年，国际互联网工程任务组（IETF）成立了与算力网络相关的算力路由（Computing-Aware Traffic Steering, CATS）工作组^[6]，开展算力路由系列标准研究工作。在欧洲电信标准组织（ETSI）和宽带论坛（BBF）启动了包括网络功能虚拟化支持网络功能连接扩展（NFV support for network function connectivity extensions）、城域算网（metro computing network）在内的多个项目。在中国通信标准化协会（CCSA）网络与业务能力技术工作委员会（TC3），算力网络系列标准正在制定过程中，《算力网络总体技术要求》^[7]已经正式发布为行业标准 YD/T 4255-2023。

在生态建设方面，2020年国内网络5.0产业联盟成立了“算力网络特设工作组”，开展算力网络相关研究工作。2022年中国通信学会算力网络委员会成立，凝聚产业共识，推动算力网络基础技术和应用持续创新。2022年开放基础设施基金会（OIF）成立算力网络工作组，Linux Edge基金会旗下Akraino开源社区立项“算力网络泛在算力调度”项目，牵引算力网络基础设施开源工作推进。

1 算力网络路由调度技术

算力网络理念是通过网络、存储、算力等多维度资源的统一管理和协同调度，实现连接和算力在网络的全局优化。从网络角度看，算力网络是面向计算和智能服务的新型网络体系，增强网络内生算力是算力网络演进的重要方向；从算力角度看，算力网络是网络化的算力基础设施，是依托网络构建的多样化算力资源调度和服务体系；从服务角度看，算力网络的目标是提供算网一体服务，是云网融合服务的新阶段，是数字基

基础设施服务的新形态。

不论从网络、算力和服务哪一角度看,算力网络均需要解决算网一体化感知和路由调度问题,实现网络、算力、服务资源的全局优化。由于技术视角和实现方案的不同,算力路由调度技术可分为集中式方案、分布式方案及混合式方案等多种技术路线。不论算力网络路由调度技术采取何种实现路线,均需要解决两个核心问题:算力和网络资源如何实时、精准、可量化地感知;算力和网络资源如何一体化路由调度。

1.1 算力网络资源感知技术

算力和网络资源高效一体化路由调度的前提是异构泛在网络状态和资源状态的实时感知能力,包括网络资源状态感知、算力资源状态感知,其中感知过程包括网络与算力资源状态的量化和信息发布。

(1) 网络资源状态感知

网络资源状态感知主要指对网络承载性能的测量和通告,包括带宽、时延、抖动、丢包率等关键性能指标。目前承载网络中有双向主动测量协议(two-way active measurement protocol, TWAMP)、随流检测(in-situ flow information telemetry, IFIT)等多种技术可以实现网络承载状态感知,云内可以采用 pingmesh 等技术实现网络

性能测量。当前承载网及云内性能检测相对割裂且存在检测精度低等问题,随着算网一体的逐步发展,亟须跨云网的端到端网络性能检测手段。

SRv6 是当前 IP 网络发展的方向,其基于 IPv6 可达性和源路由的特性可以很好地支持云网融合业务的需求。跨云网性能测量解决方案如图 1 所示,通过研发支持 SRv6/IPv6+技术的云内虚拟安全网关(VSG),可以实现跨云网的随流检测,实现网络资源状态感知能力升级。该方案不需要云内网络硬件设备升级,从而降低网络演进复杂度。

(2) 算力资源状态感知

算力资源状态感知主要指网络侧或算网编排层感知算力状态信息。根据感知算力状态信息的主体不同,在实现方式上可以分为面向网络侧的算力资源状态感知和面向算网编排层的算力资源状态感知。

面向网络侧的算力资源状态感知可用于分布式算力路由调度解决方案,将算力状态信息关联到网络层并进行传播。算力资源状态感知解决方案如图 2 所示,算力节点首先将算力资源状态信息进行建模度量,定义新的网络协议报文携带算力状态信息,基于网络协议对网络侧通告算力状态信息,通告流程如 a1→a2→a3 所示。网络层中常用的路由协议包括边界网关协议(border

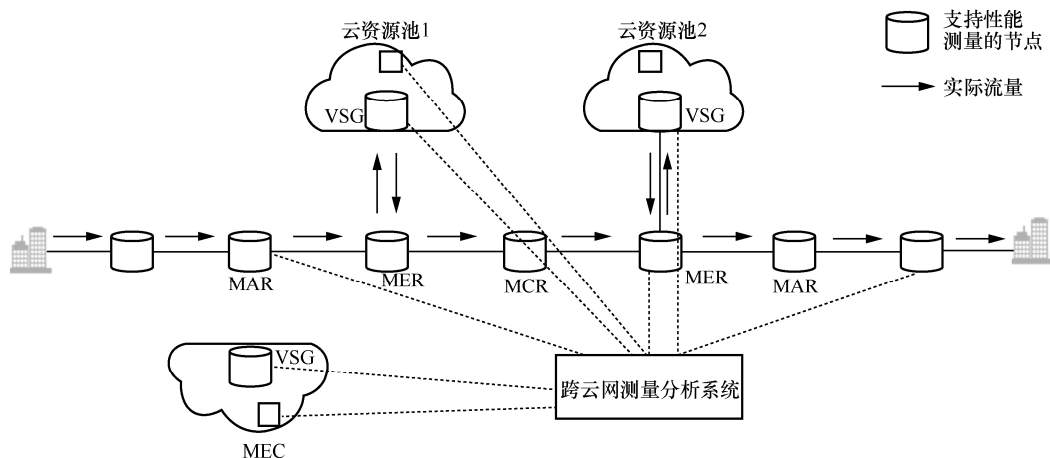


图1 跨云网性能测量解决方案

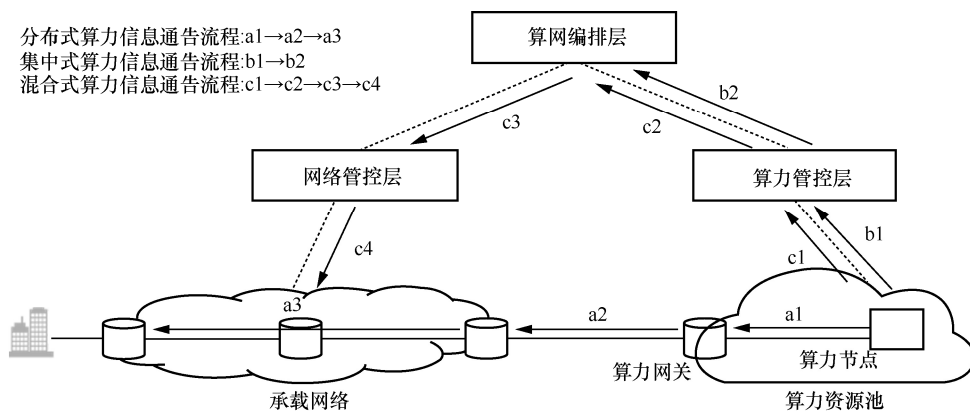


图2 算力资源状态感知解决方案

gateway protocol, BGP) 和内部网关协议 (interior gateway protocol, IGP), IGP 包括开放最短路径优先 (open shortest path first, OSPF) 协议、中间系统到中间系统 (intermediate system to intermediate system, ISIS) 协议等。面向算力信息域内和域间的同步需求, 需要对 IGP 及 BGP 进行扩展, 目前 IETF 正在 CATS 工作组开展相关的工作, 同步在 CCSA TC3 WG2 工作组《算力网络 算力路由协议技术要求 OSPF 协议扩展》《算力网络 算力路由协议技术要求 BGP 协议扩展》等相关标准正在编制。

面向算网编排层的算力资源状态感知可用于集中式算力路由调度解决方案和混合式算力路由调度解决方案。集中式算力路由调度解决方案中, 算力状态信息通告流程如图 2 b1→b2 所示, 算力节点通过南北向接口将算力状态信息逐层向算力管控层、算网编排层通告。面向算网编排层的算力状态感知是目前算网一体调度实现的现有技术。在混合式算力路由调度解决方案中, 也可以通过南北向接口进一步实现算力状态信息由算网编排层向网络侧的传递。如图 2 所示, 算力状态信息通过算力侧北向接口传递至算网编排层 (c1→c2), 由算网编排层进行智能化处理 (如阈值判定、通告颗粒度调整等) 后, 由网络侧北向接口下发至网络设备层 (c3→c4)。面向算网编排层的算力资源状态感知相对于直接面向网络层的

算力资源状态感知方案, 可能存在感知速度的差异, 但在算力信息的高效利用、现网升级等方面有较大优势。

1.2 算力网络路由调度技术

算力网络中基于网络和算力信息的网络路径选择和算力调度并不是一个全新的课题, 在学术界已经有了大量的计算卸载相关技术研究^[8]。算力网络需要结合各算力节点的状态、网络转发能力的实际情况和应用效能, 以网络为基础实现算力资源的高效利用。单个算力节点的计算资源通常有限的, 且算力存在强异构性, 算力节点的计算能力也始终处于动态变化的过程中。同时可能存在多个算力节点均可以完成相关的计算任务, 计算节点的负载、经济成本、网络路径等因素均可能影响算力节点的选择。因此如何将计算任务分派并调度至最匹配的边缘计算节点, 以提升计算任务处理效率是算力网络的关键技术之一, 同时也是计算卸载的研究方向之一。

在计算卸载/算力路由调度的过程中, 需要综合考虑网络承载质量 (时延、带宽、丢包率等) 以及计算节点算力状态 (算力类型、负载等)、经济成本、能耗等多重因素。在计算卸载的大量研究工作中, 考虑了无线网络与算力节点的联合路由调度, 如文献[9]解决了定期产生计算密集型任务的无线设备卸载决策问题, 文献[10]研究了不确定无线环境下的多用户计算卸载问题。相比于目

前以承载网络+算力节点为主的算力网络路由调度研究,计算卸载在学术领域的研究更加全面,可以对算力网络的路由调度技术形成有效补充。

在算力网络资源感知技术的基础上,算力网络的编排系统或者算力路由节点的路由表中包含了计算资源和网络资源的状态信息数据,可能包括算力节点的成本、能耗、负载状态,以及到达该算力节点的网络路径带宽、时延、丢包率等信息。算力网络的编排系统或者算力路由节点可以通过对网络资源与计算资源信息的加权计算,选出最优的边缘计算节点和网络转发路径。在这个过程中,集中式算力路由调度方案由算网编排系统做出路由决策,分布式算力路由调度方案由算力路由节点做出路由决策。

2 算力网络混合式路由调度方案

2.1 技术架构与方案实现

集中式路由调度方案由集中的统一控制单元(算网编排层)完成资源状态感知以及路由调度,分布式方案则是由分布的网元设备协作完成资源状态感知与路由调度。结合前文对于算力网络资源感知技术和路由调度技术的解决方案分析,本文提出混合式路由调度方案,通过算网编排层实现算力状态的感知与通告,通过算力路由设备实现算力与网络一体的最优路径计算和服务调度。

混合式路由调度方案通过集中+分布协同的方式实现算力网络路由调度,以构建按需灵活、快速路由、易于实现的算网一体化能力。混合式路由调度方案总体架构如图3所示,包括两个主要组成部分,分别为算力网络编排管理系统和算网基础设施。

算力网络编排管理系统负责资源状态感知与通告,包括从算力资源收集算力状态信息,并进行智能化处理,如聚合计算、阈值判定等,然后通过南北向接口方式将处理后的算力状态按需下发至网络设备节点。

算网基础设施包括算力资源和网络资源,算力资源负责向上层系统上报算力状态信息,网络资源负责接收上层系统下发的算力状态信息,并基于算网综合状态计算最优路径,进行路由调度与业务引流。

混合式方案的实现流程如下。

步骤1 各个算力云池将算力资源状态通过南/北向接口上报给算力网络编排管理系统,包括服务类型、算力成本、算力负载等。

步骤2 算力网络编排管理系统将收集到的算力状态进行智能化处理。当网络中算力节点较多、算力状态数据量较大时,可以进行聚合计算及阈值判定。可根据地理区域、统计时间等信息进行数据聚合处理以压缩信息量,通过预先设定

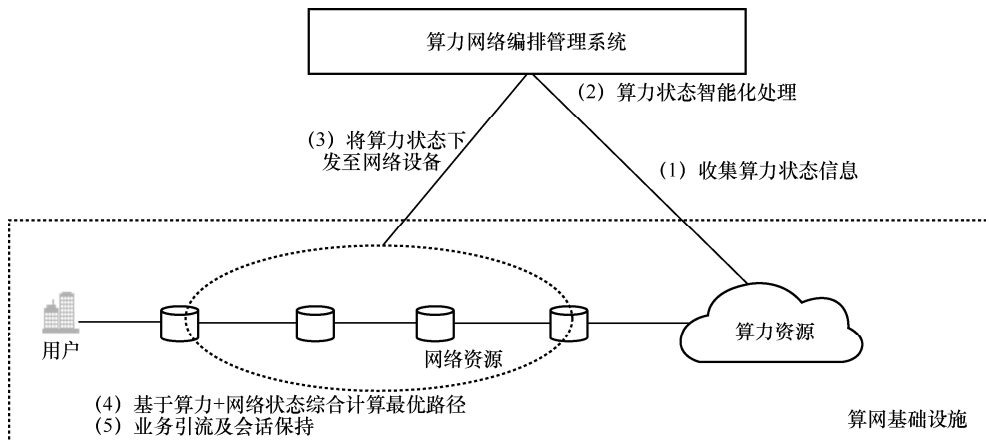


图3 混合式路由调度方案总体架构



的阈值判定是否需要将算力状态信息的变化向网络侧通告，避免状态数据的频繁波动带来通告的压力。

步骤 3 算力网络编排管理系统将处理后的算力状态数据下发至网络侧设备，一般情况下只需要下发至网络入口节点。

步骤 4 网络设备（通常是网络入口节点）基于接收到的算力状态和网络状态信息综合计算，生成最优算力服务节点和最优网络转发路径。

步骤 5 用户业务流量根据最优网络转发路径转发至最优算力服务节点，并实现会话保持。

2.2 技术优势

混合式算力网络路由调度方案融合了集中式和分布式的特点，主要体现在按需灵活、快速路由、易于实现 3 个技术特性。

（1）提供按需灵活的差异化服务能力

在混合式方案中，算力网络编排管理系统负责算力资源状态的感知与通告，同时也可以实现集中式的路径计算和服务调度，这样既可以由算力网络编排管理系统进行集中的服务调度，也可以通过系统下发算力资源状态然后由网络设备节点进行分布的服务调度，两种不同的方式可面向不同的用户业务需求提供差异化的能力。分布式服务调度由于其决策点更接近用户业务接入点，在路径调优时无须再经由上层系统决策与下发，可缩短路径调优的时间，提升服务切换的效率。集中式服务调度则可以综合考虑全局计算资源和网络资源情况，实现全局资源利用率最优。因此，混合式方案可以面向时延敏感型业务提供分布式路由调度能力，面向普通业务提供集中式路由调度能力。

（2）提供快速调度与调优的路由能力

由算力网络编排管理系统将收集并处理的算力资源状态下发给网络入口节点，网络入口节点可以综合算力和网络的多维度信息进行最优服务节点选择和最优路径计算，当服务节点发生状态变

化，或者用户接入位置发生变化，网络入口节点可以基于实时算力和网络状态进行服务节点和转发路径的重计算，实现快速的路径调优和服务切换。

（3）面向现网部署更易于实现

纯分布式方案中算力资源状态通告是基于 BGP/IGP 的扩展实现的，需要算力节点以及承载网中边界网络设备之间通过协议扩展进行信息扩散，一方面在协议标准化方面有较高的要求，另一方面在现网部署时需要现网设备规模升级改造。混合式方案通过南北向接口进行算力资源状态感知与通告，避免了 BGP/IGP 扩展问题，从管控能力升级角度更为简单。

3 车联网场景算力路由调度解决方案

混合式路由调度方案可提供灵活、高效、可靠的端到端算网服务能力，适用于车联网、大视频等新型业务场景。

车联网是能够实现智能化交通管理、智能动态信息服务和车辆智能化控制的一体化网络。近年来，车联网无人驾驶、远程驾驶等场景正在加速落地，其对算力和网络的极致时延、超高可靠、快速调优提出了更高要求。车辆在正常情况下为无人自动驾驶，当出现紧急情况时，由远端驾驶舱的驾驶人员接管实现远程控制驾驶，因此远程驾驶在正常情况下需要车辆自身进行实时信息采集及智能化处理，同时将实时状态上传至云端，便于云端实现实时监控，当判断出现紧急情况时，由驾驶员快速接管车辆，下达控制指令。在这一过程中，实时状态的上传以及控制指令的下达，对于网络及云端服务的要求都非常高，关系到车辆的行驶安全。

混合式路由调度方案可为远程驾驶提供灵活、高效的极致能力，实现算力与网络的有效协同与快速调度。

混合式路由调度方案赋能车联网远程驾驶场景如图 4 所示，具体的实现流程如下。

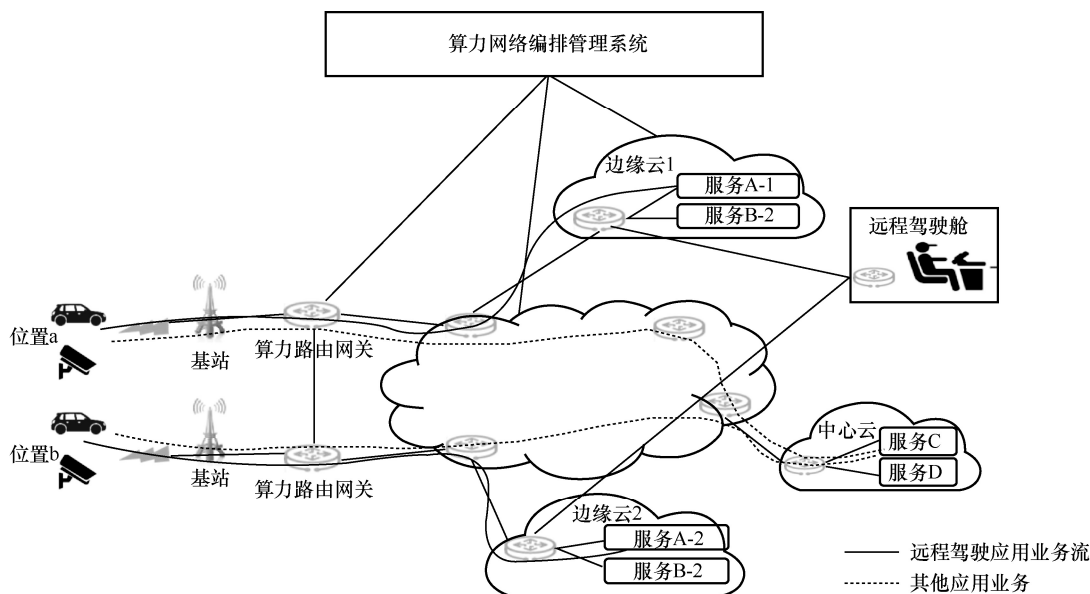


图4 混合式路由调度方案赋能车联网远程驾驶场景

(1) 车端应用发起远程驾驶服务请求，请求云端应用进行车辆状态监控。请求报文从车端发起，经由基站、算力路由网关到达边缘云服务节点，以及远程驾驶舱控制台，控制台实现该车辆的接入。在这一过程中，算力路由网关首先需要将基站转发的移动流量进行分流，然后进入混合式算力路由处理流程。算力路由网关已通过算力网络编排管理系统获取云侧服务状态信息，生成本地算力路由表项。算力路由网关基于算力路由表项进行综合评估，选择最优服务节点，如边缘云1中的服务A-1，以及具体的网络转发路径，使车辆在位置a时能够以最优服务节点和最优转发路径实现远程驾驶服务的接入。

(2) 车端及路端设备上传实时状态信息。实时状态的数据报文由车端/路端发起，经由基站、算力路由网关到达边缘云以及远程驾驶舱。远程驾驶舱的控制台可以实时监控车辆及路侧的状态信息。

(3) 车辆从位置a移动到位置b，接入另一个基站，触发算力服务和路由的重计算。车辆由于位置的移动，原有的算力服务A-1对于车辆最新位置来说，已经不再是最优服务节点和最优转发路径，则由算力路由网关根据最新的算力和网络

状态重新计算，并将车辆的远程驾驶会话迁移到新的服务节点（服务A-2）和转发路径上，实现路径最优调度，在这一过程中，需要由网络层和服务端协同实现业务的连续性。

上述业务流程可为车辆上类似远程驾驶这样的超低时延需求应用提供服务，而车端一些在线音乐等非低时延应用，则可以由上层的算力网络编排管理系统进行全局调度，将业务流量引导到中心云的服务C进行处理。

通过上述混合式的路由调度，可为车联网提供更优、更灵活的解决方案。

(1) 综合算力和网络状态进行服务选择及路径计算，为终端应用提供最优算力服务。混合式方案提供易于实现的算力感知方案，使得用户侧算力路由网关能够实时感知算力和网络的状态，可为车辆终端应用提供最优服务节点和最优转发路径的最佳算网服务。

(2) 分布式路由调度为低时延应用提供快速调优的算力路由能力。混合式路由调度包含了网络节点设备自主决策的路由调度能力，由网络节点基于实时状态实现服务和路径切换，可以有效提升切换效率，从而实现快速调优，在车辆移动



过程中仍能保证高效的服务能力。

(3) 分布和集中路由调度按需协同, 实现面向应用的差异化服务。混合式路由调度方案中也包含了由上层管控系统实现的集中式路由调度方案, 一些在线音乐、影视等非低时延应用, 可以通过集中式方案进行全局调度, 有效提升全网的算力和网络的最优利用率, 为不同应用服务提供差异化的算网服务。

4 结束语

算力网络技术正在快速演进和成熟中, 算力路由调度相关技术研究有非常大的研究价值和空间。本文提出了集中+分布协同的混合式算力网络路由调度解决方案, 该方案具有按需灵活、快速路由、易于实现的优点, 将有助于算力网络能力的进一步升级和加速落地。

参考文献:

- [1] 唐雄燕, 曹畅, 李建飞, 等. 算力网络前沿报告[R]. 2020. TANG X Y, CAO C, LI J F, et al. Cutting edge report of computing power network[R]. 2020.
- [2] 中国联通. 算力网络白皮书[R]. 2019. China Unicom. White paper of computing power network[R]. 2019.
- [3] 何涛, 杨振东, 曹畅, 等. 算力网络发展中的若干关键技术问题分析[J]. 电信科学, 2022, 38(6): 62-70. HE T, YANG Z D, CAO C, et al. Analysis of some key technical problems in the development of computing power network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(6): 62-70.
- [4] ITU-T. Computing power network-framework and architecture: Y.2501[S]. 2021.
- [5] ITU-T. Signalling requirements for service deployment in computing power network: Q.4140[S]. 2023.
- [6] IETF. Computing-aware traffic steering(cats)[EB]. 2023.
- [7] 中国通信标准化协会. 算力网络总体技术要求[S]. 2021. CCSA. Architecture and technical requirements of computing-aware networking[S]. 2021.
- [8] ALQARNI M M, CHERIF A, ALKAYAL E. A survey of computational offloading in cloud/edge-based architectures: strategies, optimization models and challenges[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2021, 15(3): 008.

- [9] JOŠILO S, DÁN G. Computation offloading scheduling for periodic tasks in mobile edge computing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(2): 667-680.

- [10] TANG L, HE S B. Multi-user computation offloading in mobile edge computing: a behavioral perspective[J]. IEEE Network, 2018, 32(1): 48-53.

[作者简介]



庞冉 (1989-), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院、下一代互联网宽带业务应用国家工程研究中心高级工程师、主任研究员, 主要从事下一代互联网、算力网络方面的研究工作。



易昕昕 (1990-), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院、下一代互联网宽带业务应用国家工程研究中心工程师、高级研究员, 主要从事下一代互联网、算力网络方面的研究工作。



辛亮 (1987-), 男, 联通智网科技股份有限公司工程师, 主要从事面向车联网的 5G 边缘计算、算力网络技术及创新应用场景方面的研究工作。



曹畅 (1984-), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院、下一代互联网宽带业务应用国家工程研究中心正高级工程师, 主要从事下一代互联网、算力网络方面的研究工作。



唐雄燕 (1967-), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院、下一代互联网宽带业务应用国家工程研究中心正高级工程师、副院长、首席科学家, 长期从事通信新技术的研发和管理, 主要研究方向为宽带通信、光纤传输、互联网/物联网、新一代网络等。