



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

5G网络切片研究进展

田晨景, 谢钧, 曹浩彤, 骆西建, 刘亚群

引用本文

田晨景, 谢钧, 曹浩彤, 骆西建, 刘亚群. [5G网络切片研究进展](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(11): 282-295.

TIAN Chenjing, XIE Jun, CAO Haotong, LUO Xijian, LIU Yaqun. [Research Developments of 5G Network Slicing](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(11): 282-295.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于软件定义网络的高故障保护率的路由保护方案](#)

Routing Protection Scheme with High Failure Protection Ratio Based on Software-defined Network
计算机科学, 2023, 50(9): 337-346. <https://doi.org/10.11896/jsjx.220900220>

[一种拥塞避免的SDN单链路故障恢复模型](#)

Failure Recovery Model for Single Link with Congestion-Avoidance in SDN
计算机科学, 2023, 50(4): 212-219. <https://doi.org/10.11896/jsjx.220300184>

[SDN网络边缘交换机异常检测方法](#)

Anomaly Detection Method of SDN Network Edge Switch
计算机科学, 2023, 50(1): 362-372. <https://doi.org/10.11896/jsjx.211100223>

[一体化网络多终端接入智能路由技术](#)

Intelligent Routing Technology for Multi-terminal Access in Integrated Network
计算机科学, 2022, 49(12): 332-339. <https://doi.org/10.11896/jsjx.210900042>

[基于最小生成树的vSDN故障快速恢复算法](#)

vSDN Fault Recovery Algorithm Based on Minimum Spanning Tree
计算机科学, 2022, 49(11A): 211200034-7. <https://doi.org/10.11896/jsjx.211200034>

5G 网络切片研究进展

田晨景¹ 谢钧¹ 曹浩彤² 骆西建¹ 刘亚群¹

¹ 陆军工程大学指挥控制工程学院 南京 210001

² 香港理工大学计算机系 香港 999077

(tianchenjing17@nudt.edu.cn)

摘要 作为 5G 及未来通信网络的关键使能技术,网络切片凭借其在垂直行业定制、服务质量保障、灵活性、可靠性等方面的潜在优势,获得了运营商和学术界的广泛关注和认可。目前,已有不少相关组织以专题报告的形式呈现了其对网络切片的理解及未来发展设想。但是,这些报告的侧重点各有不同且相关术语尚未规范统一,此类问题的存在给研究人员理解网络切片带来了诸多阻碍。为便于研究人员把握网络切片的发展脉络、技术架构,以及管理编排等具体内容,文中对相关研究进行了综述。首先介绍了网络切片的产生背景、具体含义以及功能特性。其次,针对端到端网络切片的实现,分别就接入网切片、承载网切片以及核心网切片这 3 方面的内容,对近年来的网络架构发展、技术突破以及标准化成果展开了论述。而后就网络切片管理与编排的具体内容进行了介绍与分析,并依据切片场景的不同对相关研究进行了分类梳理与比较。最后,结合网络切片的发展需求和现实困境,指出了目前研究所面临的一些开放性挑战。

关键词: 网络切片;切片管理与编排;软件定义网络;网络功能虚拟化;分段路由;灵活以太网;云网融合;服务化架构

中图分类号 TP393

Research Developments of 5G Network Slicing

TIAN Chenjing¹, XIE Jun¹, CAO Haotong², LUO Xijian¹ and LIU Yaquin¹

¹ Command & Control Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210001, China

² Department of Computing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China

Abstract As the key enabling technology for fifth-generation communication networks and beyond, network slicing(NS) has received a surge of attention and recognition from network operators and academia for its promising abilities in vertical industry customization, quality of service(QoS) assurance, isolation, flexibility, and reliability. In recent years, many institutions have presented their understanding and development plans of NS through special reports or white papers. However, these works have varying focuses, and the terminology has not been standardized, which hampers the researchers' overall grasp of NS picture. To facilitate researchers' understanding of the developmental context, technology architecture, management and orchestration, and other relevant aspects of NS, this paper presents a comprehensive review for recent related work. First, it provides an overview of NS by examining its historical background, definitions, and key characteristics. Subsequently, we discuss the end-to-end NS realization in three components, namely access NS, carrier NS, and core NS. In each component, the network architecture developments, technological breakthroughs, and standardization achievements in recent years are presented and analyzed. Afterward, an introduction is made to the content of network slice management and orchestration, and the relevant research is discussed according to the slicing scenario. Finally, in view of NS's development requirements and practical dilemmas, several open research problems are identified.

Keywords Network slicing, Slice management and orchestration, Software defined network, Network function virtualization, Segment routing, Flex ethernet, Cloud-network integration, Service-based architecture

1 引言

目前,互联网正在经历一场大规模的转型升级,传统人与人的互联模式逐渐不能满足社会发展需求,各行各业期待着万物互联时代的到来^[1]。在网络服务需求方面,这个时代具有以下 3 个显著特征。

1)网络流量飞速增长。越来越多的用户通过移动智能设备连接进入互联网。据全球移动通信系统协会预测,预计到 2025 年,移动用户的数量将达到 58 亿(约占全球总人口数量的 71%)^[2]。除了用户数量的快速增长,人类使用网络传递信息的形式也在不断升级,从 1G/2G 时代的短信语音业务,到 3G/4G 时代的多媒体业务,再到 5G 时代的虚拟现实/增强

现实业务。国际数据公司预测,全球互联网的年运行流量将从2018年的33ZB增长至2025年的175ZB^[3]。

2) 联网设备数量庞大。下一个时代被称作是万物互联的时代,大量具有唯一标识的嵌入式网络设备得以接入互联网,并且这些联网设备正从单一的数据消费模式演变为数据生产消费并存模式。物联网设备产生的数据被收集至边缘或集中式的数据中心,通过识别、分析、预测等操作形成一定的数字产品,这些数字产品进而为人类提供更加自动化、智能化的社会服务。据统计,截至2018年底,全球大约有220亿物联网设备,按照近年来物联网设备数量的增长趋势,预计2030年全球物联网设备数量有望超过500亿^[4]。

3) 网络应用垂直多样。网络作为经济发展的催化剂,其所惠及的范围越来越广,从以往的消费领域扩展到现在的生产领域,同时也从虚拟经济快速延伸到实体经济。目前,网络创新发展与工业转型升级正处于历史交汇的节点。工业生产正在经历由信息技术所主导的革新^[5],在此过程中,层出不穷的垂直行业应用需求也为网络发展提出了更大的挑战。

在网络服务供给方面,电信运营商也表达出了对现行的网络体系和商业模式进行改进的诉求。其原因主要有以下两点。

1) 可持续发展的未来网络需要“高效、低成本”的网络建设^[6]。长期以来,电信运营商所服务的上游业务以及自身网络建设成本的增长速率,要超出其营收的增长率^[7]。这不仅导致电信运营商的利润率大打折扣,也预示了一个不可持续的未來网络发展路径。基于此,网络运营商亟需探索一种能够在一张基础网络上支撑各种复杂业务的商业模式,并以此来实现“高效、低成本”的网络建设。

2) 有创新活力的未来网络需要“开放、灵活”的网络体系。在传统的分布式网络架构中,控制面/用户面功能共同寄存在各类软硬件紧密耦合的专用网元设备之中^[7]。一方面,这种强耦合的网络体系不够灵活,难以向新兴业务提供“差异化、定制化”的网络服务。另一方面,垂直集成的硬件和软件缺乏开放性和高效性,使得网络创新从生成到落地往往需要很长的周期,严重阻碍了网络的创新发展。基于此,网络运营商期望能够探索出一条用户面/控制面、软/硬件分别解耦的发展道路,以此来提升网络的开放性和灵活性,并激发网络的创新活力。

供给方面和需求方面存在的矛盾给现行的网络体系提出了不小的挑战,但同时,其也作为革新架构和技术的有力推手,为网络发展提供了重大机遇。为了应对这些挑战,国际上多个电信联盟和标准化组织开启了对5G移动通信的研究与探索工作^[8]。在现实困境的召唤与技术发展的推动之下,网络切片逐渐在5G架构设计中崭露头角。它凭借在差异化服务需求满足、QoS保证、灵活性、可靠性等方面的潜在优势,获得了电信运营商、垂直行业以及学术界的广泛关注和认可。经过近些年标准化组织和学术界的共同努力,网络切片已经形成较为完善的体系架构和技术路径。

本文分3个部分对网络切片展开介绍,呈现了一个更加全面的网络切片发展脉络与研究进展。第一部分为网络切片概述,主要介绍了网络切片的产生、发展、具体含义以及功能要求。第二部分针对网络切片的技术实现,结合近年来网络

架构发展、技术突破和标准化成果,对接入网切片、承载网切片以及核心网切片展开了详细的论述。第三部分针对网络切片管理与编排相关内容进行了介绍,并对相关研究按照切片场景进行了分类梳理与比较。最后,结合网络切片发展需求和现实困境,指出了目前研究所面临的一些开放性挑战。

2 网络切片概述

2.1 产生与发展

切片作为网络资源分配及网元部署的一种方式,并不是近年来才出现的新鲜概念。2005年,美国国家科学基金会启动了名为“全球网络创新环境(Global Environment for Network Innovations, GENI)”的行动计划。GENI旨在创建一个共享网络测试平台,它允许研究者将所需的计算和网络资源添加至切片之中,并利用所创建的切片进行大规模网络实验^[9]。2009年,Rochwerger等提出了联合云计算模型,其中切片可用于协调和分配不同站点的计算资源,为应用提供服务^[10]。在4G网络中,运营商可以在公共路基移动网中部署多个专用核心网络,每个专用核心网可根据订阅用户的不同需求来提供特定功能的用户平面和控制平面^[11]。这些已有的思想和技术都为网络切片的产生奠定了基础。

网络切片(Network Slicing, NS)作为5G网络的设计原则,2015年首次出现在了下一代移动网络联盟(Next Generation Mobile Networks, NGMN)所编写的5G白皮书中^[12]。同年,国际通信网络标准化组织3GPP针对未来场景启动了5G网络架构设计与标准化工作,先后发布了R14-R18的5G技术规范和技术报告。在其2016年7月所编写的R14技术报告中,3GPP也将网络切片列为5G系统架构的关键特征之一^[13]。自2017年开始,工业界和学术界对网络切片的讨论和研究热度明显增强。该年年初,中国未来移动通信论坛开启了有关端到端网络切片白皮书的编写工作。欧洲则在该年先后启动了“5G-TRANSFORMER^[14]”“5G-MoNArch^[15]”“NECOS^[16]”等多个以5G网络切片架构和技术为目标的研究项目。与此同时,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)^[17]、互联网工程任务组(The Internet Engineering Task Force, IETF)、开放网络基金会^[18]、欧洲电信标准协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)^[19]、中国通信标准化协会^[20]也相继开展了对网络切片的研究和标准制定工作。

ITU无线电通信组在其所发布的国际移动通信2020愿景中设想了5G时代下的三大应用场景,分别是增强型移动宽带(enhanced Mobile Broadband, eMBB)、海量机器通信(massive Machine Type Communications, mMTC)、高可靠低时延通信(Ultra-reliable Low Latency Communications, URLLC)^[21]。在此基础之上,3GPP又提出了增强型车辆及外部环境互联(enhanced Vehicle to Everything, eV2X)应用场景^[22]。这几种应用场景的内在差异,导致其对底层网络提出了不同的服务需求。图1给出了这4种场景相应的应用示例和网络需求。

1) 增强型移动宽带。该服务多呈现出用户连接密度大且带宽需求高的特点。主要应用场景有写字楼、商场、大型集会等人员密集场所中的直播、4K影音播放、AR/VR游戏等

应用服务。eMBB 切片需要考虑区域话务容量、用户体验速率、峰值速率、移动性等服务需求,还需兼顾频谱效率、网络能效等制约因素。

2)海量机器通信。随着智能时代的到来,越来越多的电器、传感器新增了联网通信的需求。例如,智能家居场景下的各类家用电器、应用于森林防火和环境监测场景的数据采集器、智慧城市中的各类传感器。mMTC 网络切片具有联网设备数量庞大、数据包小、能量消耗少、通信时延要求不高等特点。

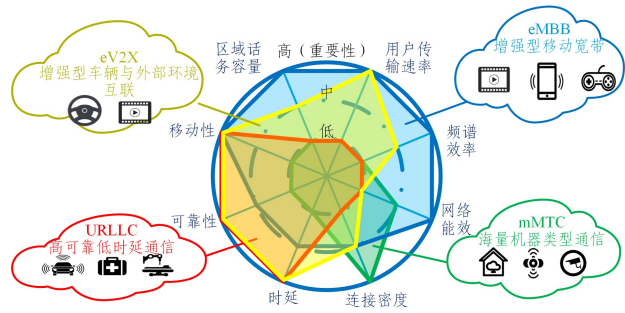


图1 5G网络切片应用场景及服务需求

Fig. 1 Application scenarios and service requirements of 5G network slicing

3)高可靠低时延通信。自动驾驶、灾难与应急响应、远程医疗、高端精密仪器制造等是 URLLC 网络切片的主要应用场景。在这些场景下,对网络的端到端时延以及网络的可靠性都提出了极高的要求。

4)增强型车辆及外部环境互联。该应用场景被划分为两个模块,分别为非安全相关的 V2X 服务(如移动高速影音娱乐、数字地图动态更新、车载办公等),安全相关的 V2X 服务(如自动驾驶、编队行驶、远程驾驶等)。与 URLLC 相比,eV2X 除了在可靠性和时延方面的需求外,还要求网络提供较高的用户传输速率和频谱效率。

2.2 定义与特征

立足于不同的角度,各大标准开发组织均对网络切片进行了定义^[23]。例如,基于切片与基础设施之间的关系,NGMN 将网络切片定义为运行在公共通信网络基础设施之上,并且可进行独立业务操作的虚拟网络^[12]。着眼于网络切片的技术实现,ITU 将网络切片定义为网络软件化条件下的

逻辑隔离网络分区,它需要包含有提供业务支撑的虚拟资源、可编程的数据和控制平面^[24]。从市场运营的角度,3GPP 将网络切片定义为一种运营商赋能技术,它使得运营商能够针对特定市场场景的不同需求为租户提供优化的网络解决方案^[13]。虽然各个标准化组织给出的切片定义不尽相同,但对其所应具有的功能特性却有着基本相似的要求,主要包含以下几个方面。

1)定制化要求。网络切片需要向租户提供定制的网络功能、网络资源乃至数据转发机制,以满足不同切片租户在可用性、时延、时延抖动、吞吐量、丢包率等方面的多样化服务需求。

2)隔离性要求。共存于公共网络基础设施的多个切片能够独立运行且彼此之间不产生操作和性能的相互干扰^[25],这就要求网络切片在逻辑上是相对独立的,同时也意味着切片需要拥有相对独立的计算、存储和网络资源。

3)可靠性要求。切片的可靠性指在综合考虑物理网络元件故障发生概率的情况下,切片服务能够正常交付的概率。为了对于一些可靠性要求较高的服务,网络切片需要通过故障检测、节点/链路备份、多路径传输等机制来确保服务的可靠性得到满足。

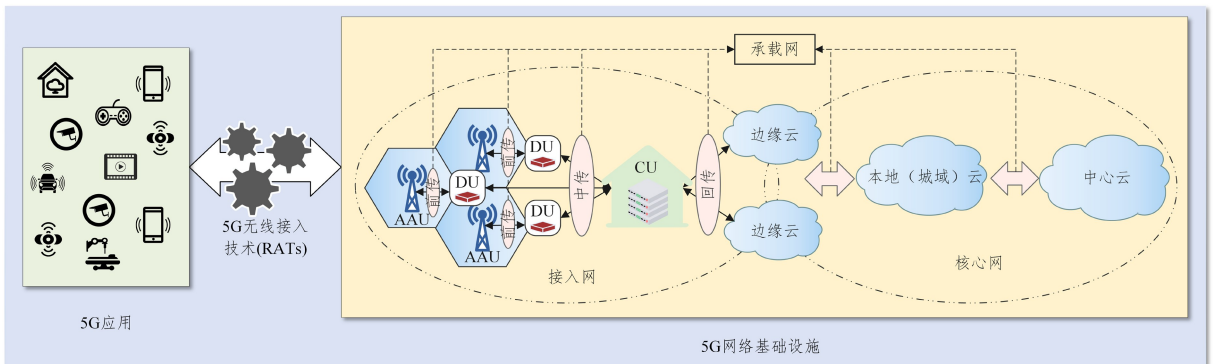
4)可编程性要求。通过软件编程技术可简化服务提供、网络管理、资源调配等工作^[8]。因此网络切片要求实现可编程的用户面/控制面网络功能,同时也应支持向租户提供一定权限的编程接口,以便于其对自身租用的切片进行管理。

5)弹性要求。网络切片有望使底层网络资源得到充分高效的利用,做到既能满足运营商与租户之间的服务水平协定,又不至于出现资源的闲置与浪费。这就意味着网络切片所分配到的资源应根据切片负载变化,以系统或自主的方式进行灵活的调整^[26]。

6)自治性要求。网络切片要求能够自主对租户服务进行生命周期管理(包括部署、运行、下线等操作),并能够在切片运行阶段对其所拥有的网络功能及网络资源进行动态调整。

3 底层架构与技术

本章主要对 5G 网络切片的底层架构和支撑技术进行了介绍。图 2 给出了 5G 网络连接的简化图,左侧代表了 5G 场景中多样的网络应用,右侧为 5G 移动网络的基础设施。



AAU: 有源天线单元 (Active Antenna Unit) DU: 分布式单元 (Distributed Unit) CU: 集中式单元 (Centralized Unit)

图2 5G网络架构

Fig. 2 5G network architecture

按照所承担功能的差别,底层网络又可被划分为接入网、承载网和核心网。其中,接入网是连接用户终端至骨干网络的所有网络设备的统称;承载网是用于连接接入网与核心网,并负责两者之间数据传输的基础网络;核心网主要负责向用户请求提供相应服务的访问,与此同时还担负认证、授权、记账、移动和接入管理等一系列网络功能。如图2所示,请求不同服务的终端设备和接入基站之间通过多元无线接入技术(Radio Access Technologies, RATs)进行连接^[27],而后相应的用户数据经由接入网、承载网和核心网的处理和转发进而获取所需服务。从5G网络架构来看,实现端到端网络切片意味着需要同时实现接入网切片、承载网切片和核心网切片。

3.1 接入网切片

作为接入网重要的组件之一,基站负责将用户终端的数据请求,通过传输设备汇聚至机房,进而实现用户的上传和下载需求。传统基站通常由天线、实现射频收发功能的射频拉远单元(Remote Radio Unit, RRU)、负责信号调制的基带处理单元(Baseband Processing Unit, BBU)组成。在目前被广泛采纳的云接入网(cloud-RAN)概念中,天线、RRU、BBU的部分物理层处理功能被合并为有源天线单元(Active Antenna Unit, AAU),BBU被分割为分布式单元(Distributed Unit, DU)和集中式单元(Central Unit, CU)^[28]。其中,DU负责处理时延敏感的物理层协议和服务,CU主要处理非实时的高层协议和服务。与此同时,结合软件定义网络(Software Defined Network, SDN)和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)等技术,无线接入网所包含的网络功能将会被虚拟化,并以软件的形式部署于更靠近用户端的CU、DU或边缘数据中心之中。

作为网络切片中最靠近用户的部分,接入网切片主要通过无线时频资源在不同切片间的分配以及不同切片接入网功能的差异化部署,来满足不同业务的多样化网络需求。图3为基于cloud-RAN架构的接入网切片示意图。考虑到基站间的干扰,接入网切片首先需要根据服务请求的分布,在同一区域内的5G基站(gNodeB)之间进行频谱资源的空间分配。相邻的gNodeB将会被分配一组正交的频谱资源,而距离较远的gNodeB将会进行频谱的复用。在确定了各个基站的可用频谱资源后,接入网切片将会根据基站覆盖范围内的切片用户分布进行更细粒度时频资源的切片间分配。除时频资源的分配之外,接入网切片还需考虑接入网功能部署及相应资源配置问题。根据3GPP所定义的标准,接入网主要包括物理处理(Physical Processing, PHY)、介质访问控制(Medium Access Control, MAC)、无线链路控制(Radio Link Control, RLC)和分组数据汇聚(Packet Data Convergence Protocol, PDCP)等网络功能。在虚拟化技术的支持之下,这些网络功能能够以软件的形式部署在通用服务器的虚拟机或容器之中。因此接入网切片可以灵活地将这些接入网功能部署于CU、DU或边缘服务器之中,从而满足不同业务的多样化网络需求。例如,对于URLLC切片,可将PHY, MAC, RLC, PDCP网络功能均部署于更靠近用户的DU进行处理,以满足用户服务的低时延需求。而对于eMBB切片,可将PHY部署于DU,将MAC, RLC以及PDCP部署于CU,这种部署方案有利于通过多点协作技术提升各个蜂窝小区的大带宽

用户体验^[29]。总体而言,接入网切片主要考虑基站方面时频资源的切片间分配以及不同切片的接入网功能部署及资源配置问题,通过对这些问题的优化可满足不同切片的多样化网络需求。

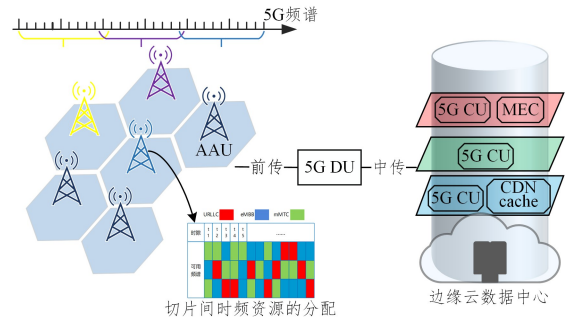


图3 5G接入网切片

Fig. 3 5G access network slicing

3.2 承载网切片

对于承载网而言,网络切片可以看作是在基础物理网络上实现多个拥有独立网络拓扑和网络资源的逻辑网络^[30-31],以满足垂直业务在带宽、时延、可靠性、安全性、移动性和连接数量等方面的不同需求。目前,承载网切片的支撑技术主要包括灵活以太网(Flex Ethernet, FlexE)、分段路由(Segment Routing, SR)以及软件定义网络等^[32]。

1) FlexE技术可以通过在物理层和数据链路层之间添加FlexE垫片,来实现以太网接口速率与光传输设备能力速率之间的解耦。FlexE垫片层可将容量为100GE的以太网物理层划分为20个时隙(每个时隙的容量大小为5GE)。类似于时分多路复用系统, FlexE技术通过“捆绑”“通道化”“子速率”3种功能进行时隙的切片间分配,从而实现承载网中链路带宽的按需分配^[33]。

2) SR是基于源路由数据包转发方法的一项技术^[34]。区别于根据数据包目标地址逐跳选择路由路径的传统方法, SR技术在入口(源)路由器将数据包路由路径以分段列表的形式编码在数据包头部。因此, SR技术可以根据网络状态灵活地选择数据包的路由路径,从而有利于实现承载网切片对不同业务QoS的保证。

3) SDN是一种逻辑集中控制,且支持对网络进行动态、弹性管理的新型网络架构。该架构具有3个鲜明的特点:逻辑上对网络进行集中控制、数据平面与控制平面分离,以及支持网络开放编程。其中, SDN控制器以逻辑集中的形式部署于服务器之中,其通过控制-应用(北向)接口获取切片用户的网络服务需求,而后通过控制-数据(南向)接口收集网络实时状态,并实现对底层网络资源的管理和数据转发行为的控制。

FlexE和SR技术分别负责承载网切片中链路带宽分配与路由路径选择的工作,而SDN控制器则可作为控制决策单元指引FlexE和SR执行具体的操作。图4以具体例子简要给出了3种技术支撑下的承载网切片示意图。其中, SDN控制器负责收集承载网中节点和链路的实时状态,而后结合切片服务的不同网络需求,对切片用户的数据包通过分段路由的方式进行路由选择(例如,图4中mMTC切片数据包通过B-C-E-F的路由路径进行转发)。在此基础之上, FlexE技术通过为不同的切片划分传输时隙的机制,来为多个在同一

链路进行传输的切片数据分配传输带宽并提供物理隔离。除此之外, FlexE 技术可通过“捆绑”机制使得多条物理链路同时工作, 从而支持大带宽应用的网络需求(例如图 4 中通过 D-C-E 和 D-F-E 两条路径的“捆绑”来满足 eMBB 切片的传输带宽需求)。结合 SDN, SR 以及 FlexE 技术的承载网切片不仅可以实现切片间的物理隔离^[35], 还可以根据网络状态和切片服务需求灵活地优化网络资源配置, 进而保证切片用户服务等级协议。

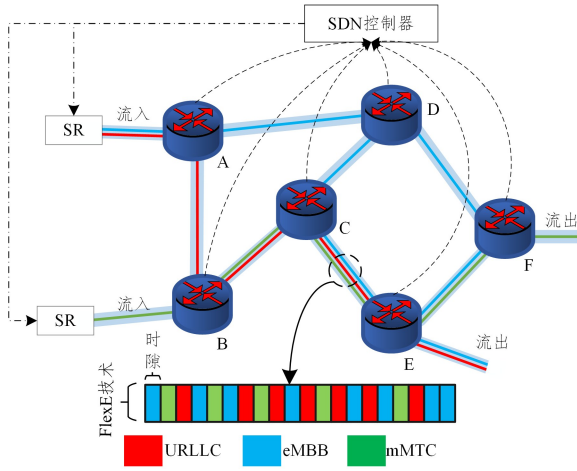


图 4 承载网切片

Fig. 4 Carrier network slicing

3.3 核心网切片

核心网是移动通信网络的大脑, 主要负责用户连接、用户管理、会话管理, 移动性管理、业务转接等功能。相比 4G 演化分组核心网(Evolved Packet Core, EPC), 5G 核心网(Next Generation Core, NGC)能够支持网络切片的落地主要得益于两方面的改进, 分别为基于微服务的核心网架构的形成与云化网络的发展。

3.3.1 服务化核心网架构

NGC 采用基于微服务的网络架构(Service Based Architecture, SBA)^[36]。其中, SBA 将 EPC 中承担多个网络功能的专用网元解耦为 NGC 中一个个细粒度的微服务, 而每个微服务只负责相对单一的网络功能^[37]。在 3GPP 标准中^[38], 基于微服务架构的核心网主要包含以下网络功能。

- 1) 鉴权服务器功能(Authentication Server Function, AUSF)。AUSF 负责为请求切片服务的终端提供鉴权服务。
- 2) 接入和移动管理功能(Access and Mobility Management Function, AMF)。AMF 主要负责用户的注册、连接、可达性和移动性管理。
- 3) 统一数据存储库(Unified Data Repository, UDR)。UDR 支持存储和检索其他网络功能的具体数据。
- 4) 网络公开功能(Network Exposure Function, NEF)。NEF 具有连接 UDR 的标准数据接口, 可向外公开某个网络功能的能力和事件。
- 5) 网络仓储功能(Network Repository Function, NRF)。NRF 支持发现功能, 维护所有可用网络功能的配置文件。
- 6) 网络切片选择功能(Network Slice Selection Function, NSSF)。NSSF 支持根据用户提供的辅助信息为其选择提供服务的网络切片。

7) 策略控制功能(Policy Control Function, PCF)。PCF 为控制平面的网络功能提供统一的策略, 以规范网络行为。

8) 会话管理功能(Session Management Function, SMF)。SMF 负责会话的建立、修改和释放。

9) 统一数据管理(Unified Data Management, UDM)。UDM 负责对用户进行身份验证并生成身份验证凭证。

10) 用户面功能(User Plane Function, UPF)。UPF 的主要功能是依据控制面的策略, 进行协议的封装和解封装, 以及数据包的检查、分组路由与转发。

图 5 给出了基于微服务的核心网架构。其中, 虚线框部分为核心网中的控制面功能(Control Plane Functions, CPFs)。基于微服务的思想, 这些松散耦合的控制面功能可以通过 NFV 技术, 以软件化的形式部署于通用服务器中的虚拟机或容器之中, 进而向终端用户提供接入管理、会话管理以及数据包转发控制等核心网功能^[39]。基于微服务的核心网架构主要具有以下几点突出优势。首先, SBA 标志着从整体架构到模块架构的转变, 这意味着每个网络功能都可以在不影响已有网络功能的前提下相对独立地发展, 这将极大减小网络创新阻力, 推动网络的创新发展。其次, SBA 架构使得服务交付更加灵便, 相比具有特定功能的专用网元硬件, 软件化的功能实例在部署、撤销和容量放缩等方面都更加方便快捷。最后, 网络功能与专用网元硬件的解耦, 使得网络切片能够根据自身业务需求灵活地将这些网络功能部署于“云化网络”的不同层级。

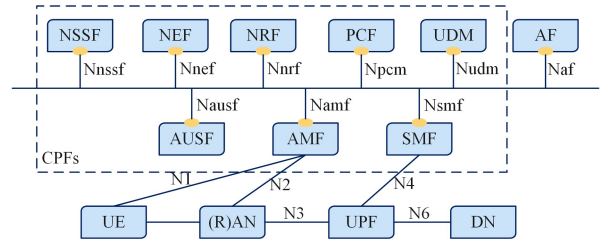


图 5 基于微服务的核心网架构

Fig. 5 Service-based core network architecture

3.3.2 云化网络

传统的互联网采用“云-网-端”的服务架构。其中, 上层应用集中部署于云计算中心, 终端用户则通过接入网、传输网和核心网访问云计算中心来获取所需的服务^[40], 这种服务架构具有层级明显、管理方便的优势。但是, 对于 5G 以及未来场景中将会出现的多样化应用服务而言, 继续采用“云-网-端”的网络架构则会导致业务需求难以满足的困境^[41]。例如, 对于 eMBB 切片, 带宽和连接数量的增加将会导致骨干网的传输压力倍增; 而对于 URLLC 切片来说, “云-网-端”架构所带来的服务访问距离过长, 将会导致超低时延业务需求无法得到满足。除此之外, 该架构也难以支持网络切片按需定制的要求。

在信息技术加速融合发展的背景之下, 学术界及电信运营商尝试通过“云网融合”方案来解决这些困境^[42]。云网融合指通过信息技术在广域范围内进行计算、存储、网络等资源的深度融合, 而融合后的网络又被称为“云化网络”^[6]。目前, 按照云网融合的策略, 网络运营商正在逐步将各个层级的机房转换为边缘、城域和中心级云数据中心^[42]。

其中,中心级数据中心一般建设于大区或省会中心城市,主要用于承载集中部署的网络功能,如 SDN 控制器、网络运营管理系统、部分切片的核心网功能;城域数据中心一般服务于地级市范围,可用于部署部分用户面功能、时延敏感型切片的核心网功能以及增值功能;边缘数据中心部署位置与终端用户距离较近,主要用于负责移动边缘计算、第三方应用服务以及用户面功能的部署。可以看出,多层次数据中心的建立为网络切片的落地实施提供了底层网络支撑。依托于多层次数据中心,核心网切片可将基于微服务的网络功能根据相应切片的服务需求部署于不同层级数据中心的虚拟机或容器之中。这种基于云化网络的部署方式一方面实现了网元功能与专有硬件的解耦,提高了核心网部署和管理的灵活性^[43];另一方面支持核心网切片的按需定制,满足了不同切片的多样化服务需求。

3.3.3 核心网切片

从前文所描述的微服务架构与云化网络基础设施中不难看出,5G 核心网主要通过网络架构服务化、网元功能虚拟化、硬件平台通用化,来构建一个更加扁平、开放、有活力的网络体系^[44]。作为网络切片的关键组成部分,核心网切片本质上是根据不同垂直应用的服务需求所定制的多样化核心网功能部署方案。图 6 通过对 3 种切片核心网功能的部署选择,直观地给出了核心网切片。其中,UPF,CPFs,AF(Application Function)分别为微服务核心网架构中的用户面、控制面和应用功能。需要注意的是,为方便表示,图 6 中的控制面和用户面功能使用 CPFs 和 UPF 统一表示。但在实际网络中,CPFs 和 UPF 可包含多种控制面和用户面功能,例如,CPFs 可以包含会话管理功能、移动和接入管理功能、策略控制功能等,UPF 可以包含编/解码、加/解密、Web 加速、视频优化等网络功能。这些网络功能通过 NFV、虚拟机、容器等技术,以相互独立的方式部署于不同层级数据中心的通用服务器之中。

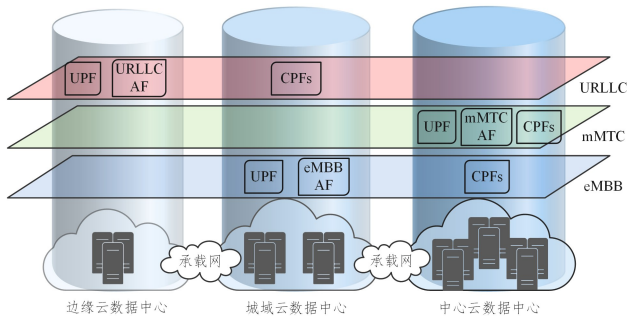


图 6 核心网切片

Fig. 6 Core network slicing

从图 6 中可以看出,对于时延要求较高的 URLLC 核心网切片而言,UPF 和应用服务功能(如自动驾驶应用功能)可选择部署在靠近用户侧的边缘数据中心,而 CPFs 则放置于城域数据中心。对于连接数量庞大但时延要求不高的 mMTC 切片,选择将 UPF、CPFs 以及应用服务功能(如智能抄表功能)均放置于中心云数据中心,以降低管理成本,提升管理效率。此外,将 eMBB 切片中的 UPF、应用服务功能(如内容分发缓存服务)放置于城域数据中心,控制面功能放置于核心数据中心,则可以有效降低骨干网的传输压力^[45]。值得注意的是,除了控制面功能和用户面功能之外,5G 核心网

切片还支持向垂直行业提供其所需的计算和存储能力,以便于其应用功能的部署。这种方式将推动运营商从传统的“以提供网络资源为中心”的运营模式演变为未来的“以提供服务为中心”的运营模式^[46]。

4 切片管理与编排

除了通过网络架构和技术的发展为网络切片的落地提供底层网络支撑之外,设计合理有效的管理与编排系统也是实现端到端网络切片过程中十分重要的步骤。本章主要对切片管理与编排的具体内容展开介绍。

4.1 切片管理与编排

切片的管理和编排指通过一系列活动,使得网络切片能够向提出需求的业务提供特定的通信网络服务^[47]。具体而言,这些活动可以包括物理/虚拟网络资源管理、网络切片生命周期管理、租户服务质量/体验质量管理等^[48]。网络切片的管理与编排过程主要围绕 3 个主体展开^[49-51]。

1)网络切片代理(Network Slice Agent,NSA)。NSA 可理解为是一个对自己的网络域具有完全感知和控制权的基础设施提供商,其拥有用于提供通信服务的网络、计算、存储等资源。NSA 之内又设有资源代理,其主要负责收集网络域内的具体信息,例如网络拓扑、节点的计算、存储资源情况以及链路的带宽、时延、成本等信息。出于对自身信息的保密,以及方便上层应用管理使用的目的,NSA 将自身网络域内的基础设施信息抽象化,并将抽象化的信息开放给网络切片提供商^[52]。

2)网络切片提供商(Network Slice Provider,NSP)。NSP 中的资源数据库将多个 NSA 提供的底层基础设施信息进行集成。因此,对于 NSP 而言,资源数据库提供了多个 NSA 的底层基础设置的全貌。除此之外,NSP 还根据网络切片租户所提供的网络切片服务概况进行网络切片的实例化。在切片实例化过程中,NSP 中的资源计算和切片映射功能起到了主要的作用^[49]。其中,资源计算功能负责提供切片实例化所需的充足资源,网络切片映射功能负责将网络切片中逻辑网络的构成部分(如逻辑节点/链路)与基础设施之间建立映射关系。

3)网络切片租户(Network Slice Tenant,NST)。在下一代网络协议架构中,NST 既可以是网络服务的终端消费者,也可以是基于网络切片的服务提供者^[49],其中后者又被称为网络切片即服务(Network Slice as a Service,NSaaS)模式。为了获取所需的切片,NST 需要向 NSP 提供切片的服务概况信息,该信息主要包含服务图和一些额外的服务属性,例如服务类型、服务的订阅实体。服务图(可使用服务功能链或虚拟网络进行描述)包含了租户对切片的具体需求信息,其中包括图节点的网络功能类型(如防火墙、入侵检测系统、负载均衡器等)及其所需的计算、存储资源。另一方面也可以定义节点之间边的具体需求,如链路带宽、时延、包损失率等。

值得注意的是,NST 向 NSP 提供服务图并非是实现网络切片的唯一路径^[23]。在 GSMA 的设想中,网络切片的具体结构并非由租户所提供的服务图所描述,而是通过通用切片模板(Generic Slice Template,GST)进行定义。在这种模式中,NSP 首先通过市场调查获取大量垂直行业的潜在服务

需求,而后将这些需求转化为网络切片属性并集成到 GST 之中。从本质上讲,GST 可被看作是一组用来刻画切片特征的通用属性集合,例如上/下行链路的吞吐量、端到端时延、切片覆盖范围等^[50]。故租户可以通过定义 GST 中的属性值来实例化一个特定需求的网络切片。不难看出,服务图模式为

租户提供了自由度更高的切片定义方法,而通用切片模板的方法对于租户而言则更加便捷和高效。目前,网络切片仍处于加速落地的过程中,未来何种模式会占据主流又或者出现更加有效的切片实例化方法,都有待时间和实践给出答案。

图 7 给出了网络切片的编排与管理流程。

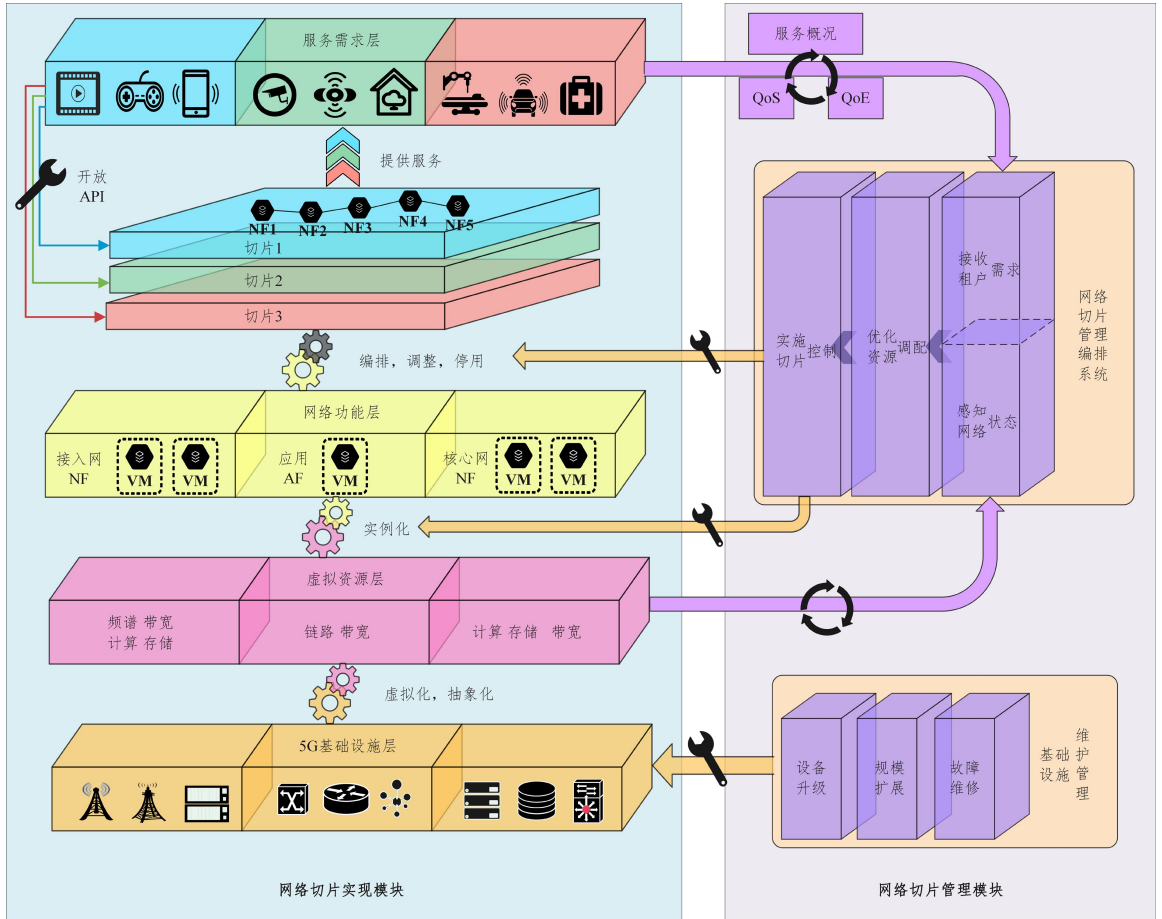


图 7 5G 网络切片编排与管理

Fig. 7 Management and orchestration of 5G network slicing

总体来看,其可分为两大模块:网络切片实现模块和网络切片管理模块^[53]。网络切片实现模块自下而上依次为基础设施层、虚拟资源层、网络功能层、网络切片层以及服务需求层。基础设施层主要包含用于通信网络服务的硬件设备,如 5G 基站、多接入边缘云设备、支持 SDN 的交换机、路由器和网关设备,以及核心云中部署的通用云服务器、存储设备、机架间交换机等^[54]。基础设施层的物理资源经过虚拟化和抽象化后形成上层的虚拟资源层,并通过 API 呈递给切片管理系统,以便于其对底层资源进行管理和使用。利用虚拟资源层所提供的接口,切片编排系统调用底层资源进行虚拟网络功能的实例化,这些网络功能可以包括控制面功能、用户面功能以及应用功能^[55]。基于实例化的网络功能,管理编排系统利用虚拟链路资源将其依照一定的次序连接起来,形成服务功能链,进而向服务需求层的租户提供通信网络服务^[56]。在这里,网络切片支持向租户提供一定权限的 API,以便于租户对自身租用的切片进行管理。

图 7 右半部分为网络切片管理模块。其中基础设施维护管理子模块主要负责基础设施的故障维修、设备升级以及规模扩展等工作。切片管理子模块则主要负责网络切片的生命

周期管理。切片生命周期管理可大致被分解为 3 个阶段:实例化、配置和激活阶段、运行时阶段、下线阶段^[57]。在实例化、配置和激活阶段,切片编排系统接收来自租户的服务概况文件,并依据文件所描述的业务需求实例化租户所需网络功能组件,而后基于这些功能组件激活网络切片,为租户提供网络服务^[58]。在运行时阶段,切片管理系统负责感知网络状态的变化,并监测网络切片的关键性能指标(Key Performance Indicator, KPI)。当 KPI(如 QoS、传输时延等)未能达到服务水平协定时,切片管理系统则需要对切片进行一定的修改操作(如故障修复、容量升级、网络功能的添加或解除等)^[59]。下线阶段指租户租用到期后,终止网络切片的服务,并根据网络功能的类型(专有/共享)进行资源的释放与回收。

4.2 相关研究

切片的管理与编排在网络负载均衡、资源利用效率以及切片服务质量等优化问题中起到了至关重要的作用,近年来该问题得到了学术界的广泛关注和研究。如前文所述,网络切片本质上为包含切片租户所需网络功能及资源的逻辑隔离网络分区,故而网络切片的管理编排问题又可转化为切片网络功能部署/下线和资源分配/回收等问题^[60]。根据研究

针对的具体场景,切片管理编排问题可大致划分为以下几种不同的类型:接入网切片、核心网切片、端到端网络切片以及特定场景下的网络切片。已有工作表明,承载网切片一般不作为一个的单独研究内容,而是融合至前文所提到的切片问题中综合考虑。

4.2.1 接入网切片管理编排问题

接入网切片管理编排问题主要针对接入网侧的无线时频资源、云/雾边缘计算场景中的存储/计算以及回传带宽等资源,在接入基站、切片以及用户之间进行分配,从而实现特定的优化目标。根据接入网切片场景的差异,可将其大致分为3种类型:常规无线接入网切片、异构无线接入网切片以及云/雾无线接入网切片。图8给出了3种接入网切片的大致场景。在常规无线接入网场景中^[61-62],一般只存在单个宏基站(Macro Base Station, MBS),故而该场景仅需要考虑无线时频资源在不同切片及用户之间的分配。在异构无线接入网场景中,为了提升频谱利用效率以及网络容量^[63],宏基站的覆盖范围内通常还部署有多个小基站(Small Base Station, SBS)。无线时频资源在基站和切片之间的分配以及切片用户的接入站点选择是异构无线接入网切片需要解决的问题。此外,在云网融合发展趋势下,云/雾接入网切片也得到了广泛的研究。在该场景中,服务器以集中/分布的方式部署于接入基站侧,故而场景下的切片管理编排不仅需要考虑接入站点的无线资源,还需要考虑边缘服务器中存储、计算、回传带宽等资源的分配。

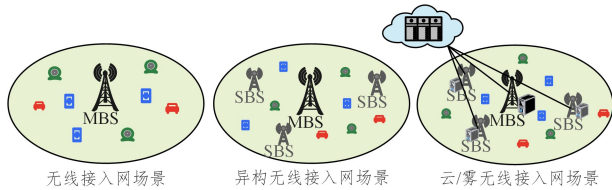


图8 无线接入网切片场景

Fig. 8 Radio access network slicing scenarios

结合常规无线接入网场景, Qi等^[61]考虑无线频谱资源在不同切片间的分配,以期最大化频谱利用率与QoS满足率的加权和。Tun等^[62]将竞价博弈的思想用于协调无线带宽资源在切片间及切片内部用户之间的分配,从而最大化切片的总体估值。针对异构无线接入网场景, Ye等^[63]考虑无线通信资源在不同基站及切片之间的分配,并使用备选凸搜索算法最大化网络的总效用。为了提升无线接入网的能量效率, Wang等^[64]使用最节能资源优先的启发式算法对接入节点及信道资源在不同切片用户之间进行分配。基于云无线接入网场景, Tang等^[65]通过对频谱及功率资源在不同切片用户间的分配,来实现接入网运营商营收的优化。Tang等^[66]基于决策后状态的在线强化学习算法,对无线资源的切片间分配及缓存策略进行学习,进而对所有切片的速率之和进行优化。Phuong等^[67]在不同切片之间对无线带宽、缓存及回传带宽资源进行分配,以最小化基站负载及切片时延的加权和。在雾计算无线接入网场景下, Zheng等^[68]使用凸近似交替迭代算法来确定请求不同切片内容用户的接入、计算缓存站点的选择,进而最小化网络的时延效用函数。

4.2.2 核心网切片管理编排问题

核心网切片管理编排问题通常基于云化网络展开

研究^[69]。图9给出了核心网切片的部署情形。如图9所示,底层网络由具有计算和存储能力的云节点、具有数据转发功能的转发节点以及具有带宽资源的底层链路组成^[70-71]。目前,在NFV技术(如路由器虚拟化、vSwitch等)的推动下,转发功能同样能够以软件化形式部署于云服务节点^[72]。因此,在一些研究工作中,云化网络仅由云节点和物理链路组成。核心网切片通常被抽象为虚拟网络或服务功能链^[60]。其中,虚拟网络为具有一定资源需求的虚拟节点和虚拟链路按照切片租户需求形成特定的逻辑网络虚体。而服务功能链则由切片租户所需的虚拟网络功能(Virtual Network Function, VNF),依照一定次序形成链式结构,进而向切片租户提供所需服务^[73]。基于此,核心网切片管理编排问题可被建模为虚拟网络映射或服务功能链编排问题^[54]。

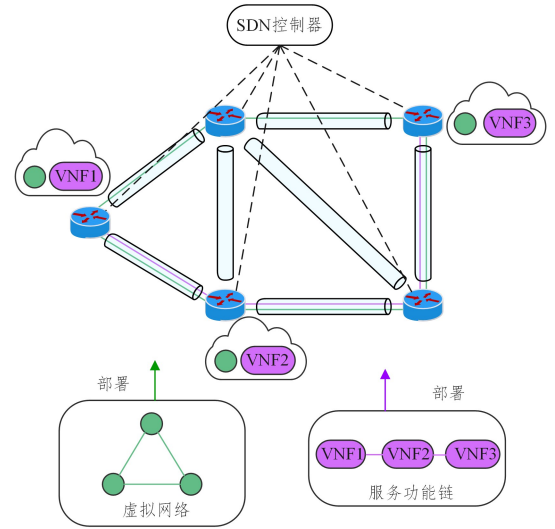


图9 核心网切片场景

Fig. 9 Core network slicing scenarios

一些工作基于服务功能链编排模型对核心网切片管理编排问题展开研究。Li等^[70]首先将待编排的服务功能链进行优先级排序,而后基于共享和准入控制启发式算法对网络净收益进行优化。Huang等^[74]采用基于性能感知的模拟退火-离散粒子群算法优化网络功能链中虚拟网络功能的部署选择,而后通过最短路径方法将虚拟链路映射至底层链路。为了优化系统资源的公平性, Leconte等^[69]使用基于交替方向乘子法的启发式算法对网络中的计算和带宽资源在不同的服务功能链之间进行分配。Qu等^[71]使用基于跳跃延迟边界重新分布的启发式算法,对流量负载发生变化的网络切片进行网络计算资源再配置。此外,文献[75-76]将核心网切片管理编排建模为虚拟网络映射问题。其中,文献[75]采用基于神经网络的深度强化学习算法优化切片部署的营收支出比,文献[76]使用基于优势动作评价的深度强化学习算法最大化切片的资源利用效率。

4.2.3 端到端切片管理编排问题

端到端网络切片综合考虑接入网、承载网与核心网,以期实现完整的网络切片^[77]。类似于核心网切片问题,大部分端到端切片管理编排研究工作将网络切片建模为服务功能链。与接入网切片不同的是,端到端切片管理编排问题不仅关注云节点计算存储资源的分配和核心网功能的部署问题,还考虑了

接入节点时频资源的分配以及接入网功能的部署问题^[78]。

基于包含接入和转发节点的端到端云化网络场景, Wang等^[79]设计了混合切片资源再配置算法, 实现了服务功能链的部署与再配置, 进而最大化切片收益。文献[80]使用基于广度搜索和最短路径的启发式算法对不同类别的切片进行差异化部署。Guan等^[81]将深度强化学习方法引入切片运行时的资源再配置过程, 进而在保证切片 QoS 的同时优化切片再配置收益。文献[82]考虑接入节点以及虚拟网络功能的位置约束, 通过整数线性规划的切片部署方法最小化底层网络的加权资源消耗。在忽略转发节点的端到端网络切片场景下, Zhao等^[83]通过基于广度优先搜索的差异化切片部署算法, 在满足切片节点和链路的安全约束条件下, 最小化切片的

部署成本。Shinde等^[84]考虑切片中虚拟网络功能在不同层级节点中的部署偏好问题, 通过遗传算法优化网络功能部署资源消耗的加权和。

除此之外, 一些工作还针对特殊场景下的网络切片管理编排展开研究。Liu等^[85]以信息中心网络为背景, 使用基于贪婪思想的启发式切片部署算法来优化服务质量与资源消耗的加权和。Song等^[86]针对分层边缘云移动前传网络, 使用基于综合资源管理的启发式切片部署算法对数据包传输时延进行优化。此外, Suzhi等^[87]对基于卫星云雾网络的切片部署进行了建模与求解。表1列出了本文中的网络切片管理编排算法, 主要内容包括不同研究工作的切片场景、系统模型、优化目标、分配资源以及优化方法。

表1 网络切片管理编排研究比较

Table 1 Comparison of different network slice management and orchestration researches

类别	切片场景	文献	系统模型	优化目标	分配资源	优化方法
无线接入网切片管理与编排	常规无线接入网	[61]	无线资源在不同切片间的分配	最大化频谱利用率与QoS满足率的加权和	频谱	基于优势函数的确定性策略梯度下降算法
		[62]	无线资源在不同切片间及切片用户间的分配	最大化切片的总估值	无线带宽	基于凯利值的竞价博弈方法
	异构无线接入网	[63]	无线资源在不同基站及切片之间的分配	最大化网络总效用	频谱	备选凸搜索算法
		[64]	无线资源在不同切片用户间的分配	最大化网络能量效率	接入节点、信道	基于最节能资源优先的启发式算法
	云无线接入网	[87]	无线资源在不同切片间及切片用户间的分配	最大化接入网运营商的营收	频谱、功率	基于连续凸近似和半定松弛的混合整数非线性规划
		[66]	无线资源的切片间分配及缓存策略选择	最大化平均切片和速率	信道、缓存	基于决策后状态的在线学习算法
[67]	多种资源的切片间分配	最小化基站负载及切片时延的加权和	无线带宽、缓存、回传带宽	近端块坐标下降算法		
[68]	雾无线接入网	不同切片用户的接入、计算、缓存站点选择	最小化网络的时延效用函数	无线带宽、缓存、计算、回传带宽	连续凸近似交替迭代算法	
核心网切片管理与编排	带有转发节点的分布式云核心网	[70]	基于功能共享的服务功能链的网络切片部署	最大化网络净收益	计算、链路带宽	基于优先级的启发式算法
		[71]	基于服务功能链的网络切片再配置	最大化网络负载均衡与再配置资源消耗加权差	计算	基于跳跃延迟边界重新分布的启发式算法
	[74]	基于服务功能链的网络切片部署	最小化全网虚拟网络功能性能影响因子总和	计算、存储、链路带宽	基于模拟退火的离散粒子群算法	
	[69]	基于服务功能链的切片资源管理	最大化系统资源的公平性	计算、链路带宽	基于交替方向乘子法的启发式算法	
	分布式云核心网	[75]	基于虚拟网络映射的网络切片部署	最大化切片部署的营收支出比	计算、链路带宽	基于图神经网络的深度强化学习算法
[76]	基于虚拟网络映射的网络切片准入控制与资源管理	最大化切片资源利用效率	计算、链路带宽	基于优势动作评价的深度强化学习算法		
端到端网络切片管理与编排	带有接入和转发节点的端到端云化网络	[79]	基于服务功能链的网络切片部署与再配置	最大化切片收益	计算、链路带宽	混合切片资源再配置算法
		[80]	基于服务功能链的网络切片部署	最大化基础设施资源利用效率	计算、链路带宽、无线带宽	基于广度搜索和最短路径的启发式算法
		[81]	基于服务功能链的网络切片准入控制与资源管理	最大化切片再配置收益	计算	基于深度强化学习的分层资源调度算法
	带有接入节点的端到端云化网络	[82]	基于服务功能链的网络切片部署	最小化切片部署资源消耗加权和	计算、存储、链路带宽	基于整数线性规划的精确求解算法
		[83]	基于服务功能链的网络切片部署	最小化切片部署成本	计算、存储、无线带宽、链路带宽	基于节点排序的启发式算法
		[84]	基于服务功能链的网络切片部署	最小化切片网络功能部署资源消耗加权和	计算	基于遗传算法的元启发式算法
特殊场景下的网络切片管理与编排	信息中心网络	[85]	基于虚拟网络映射的网络切片部署	最大化服务质量与资源消耗加权差	计算、存储、链路带宽	基于贪婪节点部署的启发式算法
	天基云雾卫星网络	[87]	基于服务功能链的网络切片部署	最小化平均网络时延	星载计算能力、卫星链路带宽	基于任务类型的启发式算法
	分层边缘云移动前传网络	[86]	基于服务功能链的网络切片资源分配	最小化数据包传输时延	计算、存储、带宽	基于时延优先级的启发式算法

5 现存挑战

5.1 接入网研究挑战

目前,接入网切片的研究尚不充分,挑战主要存在于以下3个方面。

1)接入网的异构性所带来的同频干扰及不同接入制式挑战。受限于频谱资源的稀缺性,无线带宽难以应对5G时代下激增的移动用户流量需求。为了增大无线网络的数据承载量,运营商普遍采用小区裂化(在宏基站覆盖范围内部署多个小基站)的方式缩小频谱共享的范围。但在这种部署方式下,宏基站与其覆盖范围内的小基站通常使用重叠的频谱资源,因此宏基站和小基站之间的“同频干扰”成为了5G接入网切片需要考虑的一个问题。除此之外,当前的无线环境中包括2G-GSM,3G-UMTS,4G-LTE,5G-NR以及WiFi等多种制式的接入技术^[88],它们通常采用不同的空口和协议控制方式,如何通过统一的标准将它们纳入到接入网切片之中是目前需要解决的问题。

2)终端的移动性所带来的切片管理挑战。接入网切片负责将用户数据转发至相应的核心网切片进行处理,但在终端移动场景下(如无人机任务执行、自动驾驶、高铁/火车中的影音娱乐支持)^[89],同一个接入节点的用户数量以及终端切片请求类型都会发生不同程度的变化。如何在这种动态情况下高效管理无线接入网的资源并及时建立/迁移/撤销接入网切片,进而保证用户在移动过程中服务质量的可持续交付是一个值得深入研究的问题。

3)接入网方面资源复杂性所带来的协调分配挑战。接入网侧的物理资源包括空口载波的无线时频资源、射频天线及发射功率资源、CU,DU及边缘数据中心的计算存储资源、接入网方面外部接口的网络传输资源^[90]。除了资源的多样性,资源内部也体现出差异化的性质,例如,相对于低频无线资源,较高频率的毫米波具有可用频谱资源丰富、数据传输速率高的优势,但毫米波传输和穿透损耗较高。因此,如何根据切片的QoS需求为其分配合适的资源,使其达到相互协调的状态是接入网切片需要思考的问题。

5.2 动态网络切片挑战

动态变化是通信网络的固有属性。由于人类的昼夜活动规律,网络中的流量也会随之发生周期性变化。除此之外,旧业务的服务终止、新业务的切片租赁、文体赛事直播、线上购物狂欢节、服务攻击/服务器宕机、无线信道的可变性、网络链路拥塞/故障等都给通信网络带来了不确定的因素^[45]。而网络切片的产生在很大程度上正是为了排除这些不确定因素或减轻其影响,进而向切片租户提供端到端、定制化、有保障的网络服务。基于此,动态网络切片的实现对于切片在5G及未来通信网络中发挥效能有着十分重要的意义。一方面,这要求网络切片具有预测并感知租户需求及网络状态变化的能力。切片租户可能会直接在切片描述文件中对自身需求的时变特性进行定义。例如,mMTC中传感器类型切片可能会选择夜间网络空闲时段进行采集数据的集中上传。若切片租户未在描述文件中体现相关信息,则需要网络切片具有预测用户流量波动的能力^[91]。例如,可利用时序预测方法根据租户

过去时刻的流量变化特征对下一时刻的流量强度进行预测,进而引导管理系统对切片的一些具体功能及资源占比进行缩放。除感知用户需求变化之外,切片还需对网络状态进行感知,在网络攻击、服务器故障、链路拥塞/故障的情况下及时对切片中的虚拟网络功能或路由选择进行调整。

5.3 网络切片安全挑战

作为一种新型的技术路径,网络切片在引入传统网络不具备的众多优点外,也带来了一些新的安全挑战。这些挑战主要在两个方面,一是网络功能虚拟化所带来的安全威胁。首先,相比专用的网络设备,通用的高性能服务器和大容量存储设备更容易受到病毒、蠕虫、木马攻击的影响;其次,运行在物理资源层上的虚拟机监视器对其所监管的虚拟网络功能具有很高的读写权限,一旦被攻破,运行在其上的网络功能也将暴露在威胁之下^[92]。此外,用于托管虚拟网络功能的虚拟机存在虚拟机逃逸、虚拟机跳跃、虚拟机迁移攻击等安全问题。二是基础设施共享所带来的安全威胁。当多个切片共享一些主要硬件设备时,其中一个植入恶意功能的切片可能会通过旁道攻击对另一个切片的敏感信息进行窃取^[93]。同样地,一个恶意的网络切片可以通过挤占共享硬件设备上其他切片的计算、存储和网络资源来实现拒绝服务(DoS)攻击。对于这些安全问题,需要实现更好的切片隔离性、更严格的认证和鉴权过程、针对不同安全等级的切片采用差异化的安全策略等方式加以防护。

结束语 近年来,网络服务需求方面与供给方面的矛盾推动着5G网络的不断发展。作为5G网络的关键革新部分,网络切片凭借其在垂直行业定制、QoS保证、隔离性、可靠性、灵活性、可编程性等方面的潜在优势,获得了巨大的发展前景。本文旨在向读者呈现一个较为完整的网络切片发展脉络与研究进展。首先介绍了网络切片的产生、发展、具体含义以及功能特性。其次,就接入网、承载网、核心网切片在近些年来的技术架构突破以及标准化成果展开论述。然后,详细介绍了切片管理与编排的具体内容,并依据切片的不同对相关研究进行分类梳理与比较。最后,结合目前网络切片研究的薄弱环节与未来发展需求,指出了有待进一步探索的问题与挑战。

参考文献

- [1] 中国互联网络信息中心. 第49次中国互联网络发展状况统计报告 [EB/OL]. (2022-02-25) [2022-03-26]. <http://www.cnnic.cn/hlwfzyj/hlwxzbg/hlwtjbg/202202/P020220407403488048001.pdf>.
- [2] Global System for Mobile Communications assembly(GSMA). The mobile economy 2019 [EB/OL]. (2019-04-23) [2022-04-01]. <https://data.gsmaintelligence.com/api-web/v2/research-file-download?id=39256194&file=2712-250219-ME-Global.pdf>.
- [3] International Data Corporation(IDC). The Digitization of the World From Edge to Core [EB/OL]. (2018-11-27) [2022-06-10]. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>.
- [4] BANSAL M,GARG S. Internet of Things(IoT) based Assisive

- Devices [C]//Proceeding of 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies. Piscataway, NJ: IEEE, 2021:1006-1009
- [5] 华为. 工业知识与 ICT 技术深度融合 [EB/OL]. (2020-11-24) [2022-04-02]. <https://www.huaweicloud.com/content/dam/cloudbu-site/archive/china/zh-cn/about/events/techwave/1126industrial/live/%E5%8D%8E%E4%B8%BA%E5%B7%A5%E4%B8%9A%E4%BA%92%E8%81%94%E7%BD%91%E7%99%BD%E7%9A%AE%E4%B9%A6.pdf>.
- [6] LIU Y, HUANG T, WANG S. Thoughts on Innovation of Future Network Architecture [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(1): 38-45.
- [7] WANG T, LIU G. Software Defined Virtualized Access Network Supporting Network Slicing and Green Communication [J]. Journal of Computer Research and Development, 2021, 58(6): 1291-1306.
- [8] BARAKABITZE A A, AHMAD A, MIJUMBI R, et al. 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges [J]. Computer Networks, 2020, 167: 106984.
- [9] DUERIG J, RICCI R, STOLLER L, et al. Getting started with GENI: a user tutorial [C]//Proceeding of ACM SIGCOMM'12. New York: ACM, 2012: 72-77
- [10] ROCHWERGER B, BREITGAND D, LEVY E, et al. The Reservoir model and architecture for open federated cloud computing [J]. IBM Journal of Research and Development, 2009, 53(4): 4:1-4:11.
- [11] TRIVISONNO R, AN X, WEI Q. Network slicing for 5G systems: A review from an architecture and standardization perspective [C]//Proceeding of 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 36-41.
- [12] Next Generation Mobile Networks(NGMN) Alliance. NGMN 5G White Paper [EB/OL]. (2015-01-17) [2022-04-02]. <https://www.ngmn.org/work-programme/5g-white-paper.html>.
- [13] 3rd Generation Partnership Project(3GPP). 3GPP TR 28. 801, Study on management and orchestration of network slicing for next generation network (Release 14) [EB/OL]. (2016-06-01) [2022-04-12]. https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/28_series.
- [14] DE LA OLIVA A, LI X, COSTA-PEREZ X, et al. 5G-TRANSFORMER: Slicing and orchestrating transport networks for industry verticals [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(8): 78-84.
- [15] GUTIERREZ-ESTEVEZ D M, DIPIETRO N, DEDOMENICO A, et al. 5G-MoNArch use case for ETSI ENI: Elastic resource management and orchestration [C]//Proceeding of 2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1-5.
- [16] SILVA F S D, LEMOS M O, MEDEIROS A, et al. Necos project: Towards lightweight slicing of cloud federated infrastructures [C]//Proceeding of 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops(NetSoft). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 406-414.
- [17] International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector(ITU-T). Framework of network slicing with AI-assisted analysis in IMT-2020 networks [EB/OL]. (2020-09-29) [2022-04-02]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3156-202009-1/en>.
- [18] Open Networking Foundation(ONF). TR -526, Applying SDN Architecture to 5G Slicing [EB/OL]. (2016-04-01) [2022-04-02]. https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/Applying_SDN_Architecture_to_5G_Slicing_TR-526.pdf.
- [19] European Telecommunications Standards Institute(ETSI). ETSI GR NFV-EVE 012 V3. 1. 1, Report on Network Slicing Support with ETSI NFV Architecture Framework [EB/OL]. (2017-12-01) [2022-04-02]. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/NFV-EVE/001_099/012/03.01.01_60/gr_NFV-EVE012v30101p.pdf.
- [20] 中国通信标准化协会. YD/T 5G 网络切片 端到端总体技术要求 [S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2021.
- [21] International Telecommunication Union-Radio Standardization Sector(ITU-R). Vision, framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT 2000 [EB/OL]. (2015-09-16) [2022-04-10]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf.
- [22] 3rd Generation Partnership Project(3GPP). 3GPP TR 38. 913, Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies(Release 17) [EB/OL]. (2021-03-01) [2022-06-22]. https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/38_series.
- [23] CHAHBAR M, DIAZ G, DANDOUSH A, et al. A Comprehensive Survey on the E2E 5G Network Slicing Model [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(1): 49-62.
- [24] International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector(ITU-T). Focus Group IMT-2020 Deliverables [EB/OL]. (2017-07-02) [2022-04-03]. <https://www.itu.int/en/publications/Documents/tsb/2017-IMT-2020-deliverables/index.html>.
- [25] CHANG C Y, JIMÉNEZ M A, GHARBAOUI M, et al. Slice Isolation for 5G Transport Networks [C]//Proceeding of 2021 IEEE 7th International Conference on Network Softwarization. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 366-368.
- [26] MEDEIROS A, NETO A, SAMPAIO S, et al. Enabling Elasticity Control Functions for Cloud-Network Slice-Defined Domains [C]//Proceeding of 2020 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 1-7.
- [27] CHEN S P, GEBERT J. Investigations of 5G Multiple Radio Access Technology Performance and Resource Selection Behavior [C]//Proceeding of 2017 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 437-444.
- [28] SUN Y, LI C, HUANG Y, et al. Optimal Energy-efficient Design for Cache-based Cloud Radio Access Network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(7): 1525-

- 1532.
- [29] TSUKAMOTO Y, SAHA R K, NANBA S, et al. Experimental evaluation of RAN slicing architecture with flexibly located functional components of base station according to diverse 5G services [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 76470-76479.
- [30] QIN Z, TU L, ZANG Y, et al. IPv6+5G bearer network slicing technology and application [J]. *Telecommunications Science*, 2020, 36(8): 28-35.
- [31] WANG Q, CHEN J, LIAO G. Architecture and Key Technologies of 5G Transport Network Slicing [J]. *ZTE Technology Journal*, 2018, 24(1): 58-61.
- [32] LI G, ZHAO F, WANG Y. Requirements, Architecture and Solutions for 5G Transport [J]. *ZTE Technology Journal*, 2017, 23(5): 56-60.
- [33] ZHANG M. Flex ethernet technology and application in 5G mobile transport network [J]. *China Communications*, 2021, 18(2): 250-258.
- [34] FILSFILS C, NAINAR N K, PIGNATARO C, et al. The Segment Routing Architecture [C] // *Proceeding of 2015 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1-6.
- [35] 中国电信, 华为. 灵活以太网技术白皮书 [EB/OL]. (2018-09-25) [2022-03-27]. <https://carrier.huawei.com/~media/CN-BG/Downloads/Spotlight/5g/20180920.pdf>.
- [36] 3rd Generation Partnership Project(3GPP). 3GPP TS 23. 501, System architecture for the 5G system(Release 15) [EB/OL]. (2018-06-01) [2022-06-22]. https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/23_series.
- [37] AFOLABI I, TALEB T, SAMDANIS K, et al. Network Slicing and Softwarization: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 2429-2453.
- [38] 3rd Generation Partnership Project(3GPP). 3GPP TS 23. 501, System Architecture for the 5G System(Release 16) [EB/OL]. (2019-12-01) [2022-04-09]. https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/23_series.
- [39] YAZICI V, KOZAT U C, SUNAY M O. A new control plane for 5G network architecture with a case study on unified handoff, mobility, and routing management [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(11): 76-85.
- [40] ZHOU X, LI Z, QIN Y. 5G/B5G oriented intelligent cloud network architecture [J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(10): 21-30.
- [41] FOUKAS X, PATOUNAS G, ELMOKASHFI A, et al. Network Slicing in 5G; Survey and Challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(5): 94-100.
- [42] WEI L. Research on resource scheduling algorithm and experimental platform for cloud-network integration [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [43] MA L, WANG L, CHEN W, et al. Research and Implementation of Service Oriented 5G Core Network Slice Management System [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2018, 41(5): 78-85.
- [44] WANG X. Research on Virtual Resource Management Technology of 5G Network Slice [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018.
- [45] VASSILARAS S, GKATZIKIS L, LIAKOPOULOS N, et al. The Algorithmic Aspects of Network Slicing [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 112-119.
- [46] HUANG T, LIU J, WANG S, et al. Survey of the future network technology and trend [J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(1): 130-150.
- [47] 3rd Generation Partnership Project(3GPP). 3GPP TR 28. 801, Study on management and orchestration of network slicing for next generation network(Release 15) [EB/OL]. (2018-01-01) [2018-04-06]. https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/28_series.
- [48] GUERZONI R, VAISHNAVI I, CAPARROS D P, et al. Analysis of end-to-end multi-domain management and orchestration frameworks for software defined infrastructures; an architectural survey [J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2017, 28(4): e3103.
- [49] European Telecommunications Standards Institute(ETSI). Next Generation Protocols (NGP); E2E Network Slicing Reference Framework and Information Model(V1.1.1) [EB/OL]. (2018-09-01) [2022-06-22]. <https://tools.ietf.org/id/draft-defoys-coms-subnet-interconnection-02.html>.
- [50] Global System for Mobile Communications assembly(GSMA). 5G Network Slicing Report: From Vertical Industry Requirements to Network Slice Characteristics [EB/OL]. (2018-04-01) [2022-04-08]. <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/09/5G-Network-Slicing-Report-From-Vertical-Industry-Requirements-to-Network-Slice-Characteristics.pdf>.
- [51] 3rd Generation Partnership Project(3GPP). 3GPP TS 28. 541, Management and Orchestration; 5G Network Resource Model (Release 17) [EB/OL]. (2022-03-01) [2022-04-07]. https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/23_series.
- [52] ROCHA A L B, CESILA C H, MACIEL P D, et al. CNS-AOM; Design, Implementation and Integration of an Architecture for Orchestration and Management of Cloud-Network Slices [J]. *Journal of Network and Systems Management*, 2022, 30(2): 34.
- [53] WANG Q, ALCARAZ-CALERO J, WEISS M B, et al. SliceNet; End-to-End Cognitive Network Slicing and Slice Management Framework in Virtualised Multi-Domain, Multi-Tenant 5G Networks [C] // *Proceeding of 2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018.
- [54] HAWILO H, JAMMAL M, SHAMI A. Network Function Virtualization-Aware Orchestrator for Service Function Chaining Placement in the Cloud [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(3): 643-655.
- [55] KUKLINSKI S, TOMASZEWSKI L. IEEE. DASMO: A Scalable Approach to Network Slices Management and Orchestration [C] // *Proceeding of 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018.
- [56] MENESES F, FERNANDES M, CORUJO D, et al. SHIMANO: An Expandable Framework for the Management and Orchestra-

- tion of End-to-end Network Slices [C] // Proceeding of 2019 IEEE 8th Interational Conference on Cloud Networking. Piscataway, NJ: IEEE, 2020.
- [57] 28. 801 G T. Telecommunication management; Study on management and orchestration of network slicing for next generation network (Release 15) [R], 2018.
- [58] ZHANG S. An Overview of Network Slicing for 5G [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(3): 111-117.
- [59] ORDONEZ-LUCENA J, ADAMUZ-HINOJOSA O, AMEIGE-IRAS P, et al. The Creation Phase in Network Slicing: From a Service Order to an Operative Network Slice [C] // Proceeding of 2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 31-36.
- [60] SU R, ZHANG D, VENKATESAN R, et al. Resource Allocation for Network Slicing in 5G Telecommunication Networks: A Survey of Principles and Models [J]. *IEEE Network*, 2019, 33(6): 172-179.
- [61] QI C, HUA Y, LI R, et al. Deep reinforcement learning with discrete normalized advantage functions for resource management in network slicing [J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(8): 1337-1341.
- [62] TUN Y K, TRAN N H, NGO D T, et al. Wireless network slicing: Generalized kelly mechanism-based resource allocation [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(8): 1794-1807.
- [63] YE Q, ZHUANG W, ZHANG S, et al. Dynamic radio resource slicing for a two-tier heterogeneous wireless network [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(10): 9896-9910.
- [64] WANG Q, FU J, WU J, et al. Energy-Efficient Priority-Based Scheduling for Wireless Network Slicing [C] // Proceeding of 2018 IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2019.
- [65] TANG J, SHIM B, QUEK T Q. Service multiplexing and revenue maximization in sliced C-RAN incorporated with URLLC and multicast eMBB [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(4): 881-895.
- [66] TANG L, WEI Y, MA R, et al. Online Learning-based Virtual Resource Allocation for Network Slicing in Virtualized Cloud Radio Access Network [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1533-1539.
- [67] VO P L, NGUYEN M N, LE T A, et al. Slicing the edge: Resource allocation for RAN network slicing [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(6): 970-973.
- [68] ZHENG Y P, ZHANG T K, ZHU G Y, et al. Network Slicing-Oriented Joint Allocation Algorithm of 3C Resources in MEC Systems [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2021, 44(5): 41-47.
- [69] LECONTE M, PASCHOS G S, MERTIKOPOULOS P, et al. A resource allocation framework for network slicing [C] // Proceeding of IEEE INFOCOM 2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 2177-2185.
- [70] LI H, WEN X, KONG Z, et al. Service Function Chain Embedding for Network Slicing with Diversified Requirements [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2021, 45(2): 9-15.
- [71] QU K, ZHUANG W, YE Q, et al. Dynamic flow migration for embedded services in SDN/NFV-enabled 5G core networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(4): 2394-2408.
- [72] YI B, WANG X, LI K, et al. A comprehensive survey of Network Function Virtualization [J]. *Computer Networks*, 2018, 133(MAR. 14): 212-262.
- [73] ZU J, HU G, YAN J, et al. Resource Management of Service Function Chain in NFV Enabled Network: A Survey [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2021, 58(1): 137-152.
- [74] HUANG K, PAN Q, YUAN Q, et al. Method of network slicing deployment based on performance-aware [J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(8): 114-122.
- [75] RKHAMI A, HADJADJ-AOUL Y, OUTTAGARTS A. Learn to improve: A novel deep reinforcement learning approach for beyond 5G network slicing [C] // Proceeding of 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2021.
- [76] TROIA S, VANEGAS A F R, ZORELLO L M M, et al. Admission Control and Virtual Network Embedding in 5G Networks: A Deep Reinforcement-Learning Approach [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 15860-15875.
- [77] AN X, ZHOU C, TRIVISONNO R, et al. On end to end network slicing for 5G communication systems [J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2017, 28(4): e3058.
- [78] SANTOS J F, LIU W, JIAO X, et al. Breaking down network slicing: hierarchical orchestration of end-to-end networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(10): 16-22.
- [79] WANG G, FENG G, QUEK T Q, et al. Reconfiguration in network slicing—Optimizing the profit and performance [J]. *IEEE Transactions on Network Service Management*, 2019, 16(2): 591-605.
- [80] GUAN W, WEN X, WANG L, et al. A Service-Oriented Deployment Policy of End-to-End Network Slicing Based on Complex Network Theory [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 19691-19701.
- [81] GUAN W, ZHANG H, LEUNG V C. Customized slicing for 6G: Enforcing artificial intelligence on resource management [J]. *IEEE Network*, 2021, 35(5): 264-271.
- [82] ESTEVES J J A, BOUBENDIR A, GUILLEMIN F, et al. Location-based Data Model for Optimized Network Slice Placement [C] // Proceeding of 2020 6th IEEE Conference on Network Softwarization. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 404-412.
- [83] ZHAO J, FENG Q, WANG Z, et al. End to End Network Slicing Security Deployment Algorithm for Multi Service Scenarios [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(4): 1421-1428.
- [84] SHINDE S S, MARABISSI D, TARCHI D. A network operator-biased approach for multi-service network function placement in a 5G network slicing architecture [J]. *Computer Networks*, 2021, 201: 108598.

- [85] LIU J, ZHAO B, SHAO M, et al. Provisioning optimization for determining and embedding 5G end-to-end information centric network slice [J]. *IEEE Transactions on Network Service Management*, 2020, 18(1): 273-285.
- [86] SONG C, ZHANG M, ZHAN Y, et al. Hierarchical edge cloud enabling network slicing for 5G optical fronthaul [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(4): B60-B70.
- [87] CHO S, WEI J, HAN H, et al. Space edge cloud enabling network slicing for 5G satellite network [C]// *Proceeding of 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference*, Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 787-792.
- [88] XIE J. *Network Access and Spectrum Sensing in Heterogeneous Networks* [D]. Chendu: University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [89] ADDAD R A, TALEB T, FLINCK H, et al. Network Slice Mobility in Next Generation Mobile Systems: Challenges and Potential Solutions [J]. *IEEE Network*, 2020, 34(1): 84-93.
- [90] YANG L, LI D. Realization and Trend of Network Slicing in 5G NG-RAN [J]. *ZTE Technology Journal*, 2019, 25(6): 8-18.
- [91] KHAN L U, YAQOOB I, TRAN N H, et al. Network Slicing: Recent Advances, Taxonomy, Requirements, and Open Research Challenges [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 36009-36028.
- [92] AALAM Z, KUMAR V, GOUR S. A review paper on hypervisor and virtual machine security [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1950(1): 012027.
- [93] KHAN R, KUMAR P, JAYAKODY D N K, et al. A survey on security and privacy of 5G technologies: Potential solutions, recent advancements, and future directions [J]. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2019, 22(1): 196-248.



TIAN Chenjing, born in 1995, Ph.D candidate. His main research interests include network slicing, NFV, SDN, service function chaining and virtual network embedding.



XIE Jun, born in 1973, Ph.D, professor, Ph.D supervisor. His main research interests include computer networks, intelligent network management, and UAV ad hoc network.

(责任编辑:喻黎)