

基于SDN/NFV的卫星互联网服务功能资源分配研究

徐媚琳, 贾敏, 郭庆

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨, 150006)

摘要: 软件定义网络和网络功能虚拟化能够有效解决大型网络难以管控、资源调度困难等问题。随着大规模卫星网络广泛应用, 用户数量激增, 对服务性能要求逐渐增加, 这给网络管控和资源调度带来极大的负担, 将软件定义网络的架构模型以及网络功能虚拟化等技术应用在大规模卫星互联网, 可以有效解决目前存在的一些问题。提出基于SDN/NFV的新型卫星互联网架构, 不同的卫星域可负责不同的功能, 星间和域间可利用SDN和NFV进行有效协作, 高效地利用网络资源, 同时对其服务功能资源分配技术进行研究, 优化VNF部署; 提出基于资源感知的模拟退火算法, 仿真结果表明此算法可以有效地降低服务功能链(SFC)数据流在传输时的端到端时延和带宽消耗, 可以为用户提供更好的服务。

关键词: 卫星互联网; SDN; NFV; SFC

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022006

Research on Resource Allocation of Satellite Internet Service Function Based on SDN/NFV

XU Meilin, JIA Min, GUO Qing

School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China

Abstract: Software-defined networks and network function virtualization can effectively solve the problems of difficult management and control of large-scale networks and difficulties in resource scheduling. Applying the software-defined network architecture model and network function virtualization technologies to the large-scale satellite internet can effectively solve some problems. This paper proposed a new SDN/NFV-based new satellite internet architecture, different satellite domains could be responsible for different functions, inter-satellite and inter-domain could used SDN and NFV for effective collaboration, efficient used of network resources, research and optimization of its service function resource allocation technology after VNF deployment, a simulated annealing algorithm based on resource awareness was proposed. Simulation results showed that this algorithm could effectively reduced the end-to-end delay and bandwidth consumption of SFC data flow during transmission, and could provided users with better services.

Keywords: satellite internet, SDN, NFV, SFC

0 引言

卫星通信的主要特点包括广泛覆盖、支持广播和多播、可用性高以及支持大量的新型卫星部署等。卫星通信服务将成为6G系统不可或缺的一部分^[1]。随着卫星的迅速发展, 其数量和种类逐渐增加, 卫星服务要求提供更加灵活、敏捷和效益更高的运营方式。软件定义网络

(SDN)和网络功能虚拟化(NFV)的结合则可以很好地解决当前卫星互联网所面临的灵活配置、低成本等问题。软件定义网络^[2]可将控制平面与数据平面解耦, 根据集中控制和灵活管理, SDN控制器可以根据获取的网络信息有效地控制网络功能(NF)之间的网络转发, 因此SDN可以有效解决卫星网络的灵活配置问题。网络功能

收稿日期: 2022-01-07; **修回日期:** 2022-03-09

通信作者: 贾敏, jiamin@hit.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2021YFB2900500); 黑龙江省优秀青年科学基金(No. YQ2020F001)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2900500), The Natural Science Foundation for Outstanding Young Scholars of Heilongjiang Province (No. YQ2020F001)

虚拟化可以将硬件模块变成虚拟软件模块^[3]，其中模块功能被称为虚拟网络功能（VNF），此技术可以有效解决卫星网络中硬件设备昂贵的问题^[4]。

随着SDN和VNF的迅速发展，服务功能链（SFC）成为目前一种流行的服务范式。SFC定义一组有序或部分有序的VNF和一定的排序约束^[5]。SFC请求流结构如图1所示。随着SFC的应用，可在目前的互联网中提供更加智能的路由策略^[6]。SFC服务功能链中的VNF部署是影响SDN/NFV网络性能的关键技术之一^[7]。需要在服务终端与用户之间找到一条满足所有请求资源约束的路径，以便在物理底层网络中部署VNF和虚拟网络链路。部署VNF需要的资源包括三元内容可寻址存储器（TCMA）资源^[8]、CPU资源以及链路带宽资源，同时不同的路径选择会带来不同的端到端时延，因此部署路径的不同选择会带来SFC请求流不同的性能。在SFC部署过程中，不同于其他普通的数据包传输，需要考虑VNF的顺序以及不同的资源约束。随着卫星网络规模的不断扩大以及用户服务数量的激增，如何成功地部署SFC服务功能链成为新的挑战。互联网工程任务组完成了一组相关SFC用例草案^[9]，涉及SFC架构，目前已有相关的研究表明SFC部署问题是一个NP-Hard问题^[10-11]。

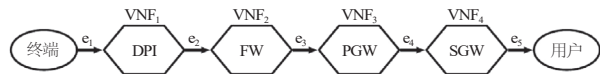


图1 SFC请求流结构

SFC的相关部署目前已有很多学者对其进行研究。SFC的部署为NP-Hard问题，随着网络节点的增加，如何选择最优的节点部署，如何高效地利用网络资源成为目前的研究热点。参考文献[12]针对服务功能实例选择和服务功能路径问题提出服务功能选择算法，实现VNF实例之间的负载均衡，通过权衡流的延迟特性来制定VNF实例。参考文献[13]基于欧拉距离和SP算法提出一种虚拟机选择算法，为SFC请求流创建最佳服务链路径。参考文献[14]提出一种新的特征分解方法来处理分布式云环境中的VNF放置和链接问题，该算法首先需要将相邻的矩阵扩展到与物理网络相同的维度，然后执行Umeyamas的特征分解方法来选择VNF实例并构建路径。参考文献[15]提出中间盒放置优化算法，该算法使用底层拓扑和SFC的排序来优化SFC部署的端到端时延。参考文献[16]提出在支持SDN/NFV的卫星地面网络中多余SFC的编排方法，但是重点在于架构设计，没有研究资源分配的方法。以上的研究为本文所提出的架构和算法提供理论基础和新的设计思路。

1 基于SDN/NFV的空间网络架构研究

基于多域的星地一体化网络系统模型，卫星采用多域模式，即将卫星分成不同的域，不同的域由不同的SDN控制器控制和独立的NFV编排器^[17]编排，可实现多域协同高效且安全的网络，当一个具有SFC功能的数据包进行传输时，SFC功能链由多个带有特定顺序的VNF构成^[18]。如对物理底层信号的处理流程为，其中一个域负责对地面的无线远程单元传输的射频信号进行接收和传输，边缘卫星负责将射频信号转为基带信号，将基带信号传输到另一个卫星域。此卫星域接收基带信号，同时部署VNF对基带信号进行处理，包括网络接收、捕获和跟踪等，同时也可以部署针对数据包的IDS/IPS、防火墙、LB等相关功能。地面站包括云服务中心、卫星控制中心。卫星控制中心负责根据卫星运行轨道和周期来观测卫星用户服务周期。基于SDN/NFV的新型卫星互联网架构如图2所示。

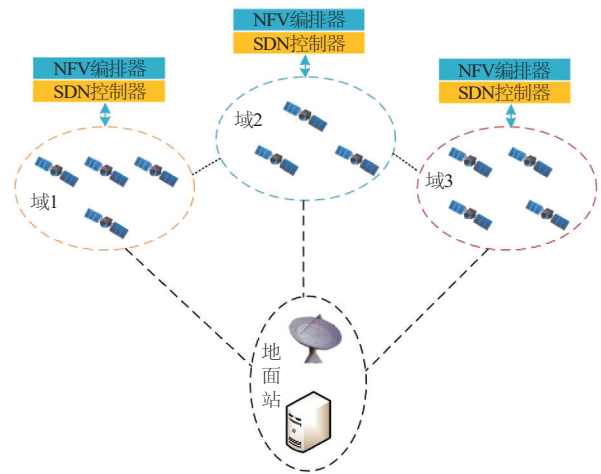


图2 基于SDN/NFV的新型卫星互联网架构

2 基于SDN/NFV的网络资源编排研究

2.1 SDN/NFV架构下的物理网络模型研究

SFC的VNF部署在图2中，其中各个卫星节点为物理底层网络，卫星所携带的资源为物理底层网络的资源。物理网络是负责映射SFC的底层网络，由一组交换机节点与服务器以及一组链接组成^[19]。服务器有一定的计算资源，与交换机相连接，同时存在TCMA资源，负责存储路由转发的流表。链路则有带宽资源。本文将服务器和交换机抽象为节点，物理链路抽象为拓扑中的链路，底层的物理网络建模为 $G=\{N_p, L_p\}$ ， N 为底层物理网络的物理节点， L 为两两节点之间的链路^[20]。节点 N 分为两种，一种为 $N_{vn}=\{N_{vn1}, N_{vn2}, \dots, N_{vnk}\}$ ， $N_{vnk} \in N$ 为可部署VNF的节点，另一种为 $N_{sn}=\{N_{sn1}, N_{sn2}, \dots, N_{snk}\}$ ， $N_{snk} \in N$ 为无法部署VNF的节点。

2.2 SFC请求流模型研究

SFC请求流由一组VNF和链接组成,在卫星互联网中,卫星网络可负责SFC请求流的传输。根据不同的用户需求,SFC请求流为不同的模型^[21]。VNF请求包括一定的流表资源、计算资源,连接VNF的虚拟链路需要一定的带宽资源。VNF具有严格的顺序约束,流量必须按照严格定义的顺序从终端流向用户^[22],因此SFC可以看作一个单向链表。

SFC请求流为有向图 $G=\{N_s, L_s\}$, S_s 表示经过物理底层网络的SFC请求流集合, $SFCR_i \in S_s$; $SFCR_i = \{S_i, D_i, V_i, F_i^{ft}, F_i^{cpu}, F_i^{bw}, F_i^{max\ Delay}\}$, S_i 表示源节点, D_i 表示目的节点, $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}\}$, $v_{in} \in V$ 表示SFC请求流所需部署的VNF, $F_i^{ft}, F_i^{cpu}, F_i^{bw}, F_i^{max\ Delay}$ 分别表示第 i 个SFC请求流所需的节点流表资源、CPU计算资源、链路带宽资源以及SFC请求流的最大容忍时延。SFC的请求流模型如图3所示,同时SFC请求流在传输过程中应该符合资源约束条件^[23]。

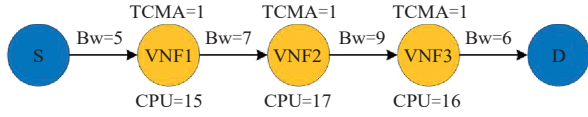


图3 SFC请求流模型

2.3 基于资源感知的模拟退火算法设计与实现

本小节主要针对上述问题模型,对基于资源感知的模拟退火算法进行设计与实现。针对此底层物理网络,所需考虑的资源约束包括流表资源、CPU计算资源和链路带宽资源^[24];同时每个SFCR请求流包括最大容忍时延。当SFC请求流经过物理底层网络时,每个节点的流表资源和CPU计算资源应大于SFC请求流所需的资源^[25],经过的每条链路应大于SFC请求流所需的链路带宽资源,同时SFC请求流的端到端时延应小于最大容忍时延。每个交换机节点仅允许部署一个VNF,同时源节点和目的节点不消耗CPU计算资源。

本文针对以上的问题模型对RA-SA算法进行了设计。RA-SA算法的初始解是由贪心算法所得出来的局部最优解。贪心算法的输入为物理底层网络,其中包括可用的交换机节点和链路以及相应的资源容量和剩余资源,还包括SFC请求流。SFC请求流为有向图,其中包括源节点、目的节点、所需部署的VNF以及相应的资源需求,同时包括最大容忍时延。针对每个交换机节点计算当前的时延,并选择最小时延进行VNF部署,算法具体流程如算法1所示。

算法1.基于贪心算法部署VNF

输入: 物理底层网络 $G(N, L)$, SFCR请求流, 所需部署的VNF节点 Q

输出: 是否部署成功ifSuccess, 部署方案DS

初始化: ifSuccess = False, DS = {},

```

已部署的节点dependedVnf = [], 已部署的交换机节点
dependedSwitch = []
for vnf in Q:
    minCost = inf
    for switch in N:
        if switch not in dependedSwitch:
            计算当前节点的时延代价
            curCost = Cal(G, dependedSwitch,
                           switch)
            if curCost < minCost:
                minCost = curCost
                switchNode = switch
    if switchNode符合资源约束:
        dependedSwitch.append(switchNode)
        dependedVnf.append(vnf)
return ifSuccess, DS

```

RA-SA算法可以有效解决VNF的部署陷入局部最优解问题。同时实时感知网络的资源,算法的输入为底层物理网络和SFC请求流,算法的输出为VNF的部署方案。算法的邻居新解产生的方法有两种,一种为交换两个交换机作为新解,另一种为随机选择额外的一个交换机节点作为当前部署VNF的节点。初始温度 $t_0 = (1 - \lambda_1 - \lambda_2) \Delta d_{avg}^{tot} + \lambda_1 \Delta d_{min}^{tot} + \lambda_2 \Delta d_{max}^{tot}$, 温度的变化为 $t = t / (1 + \beta t)$, $\beta = 1.05$ 算法的迭代次数为 $iteNum = 2 \times |Q|^2 \times |S|$, 其中 Q 为交换机节点个数, S 为SFC请求流VNF节点个数, 接收概率

$$p(\Delta d^{tot}) = \begin{cases} 1, & \Delta d^{tot} < 0 \\ e^{-\frac{\Delta d^{tot}}{t}}, & \text{其他} \end{cases}$$

具体流程如算法2所示。

算法2.基于资源感知的模拟退火算法部署VNF

输入: 物理底层网络 $G(N, L)$, SFCR请求流, 所需部署的VNF节点 Q

输出: 是否部署成功ifSuccess, 部署方案DS

初始化: ifSuccess=False, DS={}, 初始化部署方案initDS={}

初始温度initT, 迭代次数iteNum, $i=0$, 最小时延

initDS=Greedy()

curNeiPath=initDS

minPath=curNeiPath

while $i < iteNum$:

 curDelay=Cal(G , curNeiPath)

 neiPath=NeiFunction(G , curNeiPath)

 newDelay=Cal(G , neiPath)

 difDelay=newDelay-curDelay

```

if rand(0,1)<P(difDelay):
    minPath=neiPath
    minDelay=newDelay
    i+=1
    t=t/(1+1.05)*t
DS=minPath
if DS符合资源约束:
    if Success=True
return ifSuccess, DS

```

3 仿真结果及分析

由于本文使用的网络拓扑为大中型网络，因此本文所描述的算法均使用Python3.8实现。基于以上的卫星互联网研究，此次仿真的网络拓扑主要参考大规模的低轨LEO卫星网络，LEO卫星网络为网格状网络^[26]。为实现其中一个网络拓扑的数据传输，将大规模的LEO卫星网络进行简化，仿真网络为 6×6 的网格状网络。仿真的网络拓扑如图4所示，每一层网络都与下一层网络相连接^[27]，其中包括36个节点。每个节点流表资源为800个单位，每个节点CPU计算处理资源为2 000 MIPS，每条链路有2 000 Mbit/s资源，每条链路端到端时延服从均匀分布 $U(30, 130)$ 。对于SFC请求流模型，每个SFC长度服从均匀分布 $U(4, 6)$ ，每个VNF部署需要1个单位的流表资源，所需的CPU资源服从均匀分布 $U(10, 20)$ ，SFC的VNF之间的所需链路带宽资源服从均匀分布 $U(10, 20)$ 。对于SFC请求流，端到端的传输时延应该小于最大容忍时延，最大容忍时延服从均匀分布 $U(50\ 000, 100\ 000)$ 。

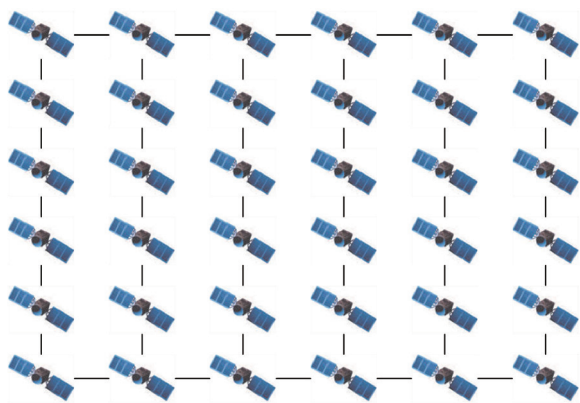


图4 网络拓扑

下面将本文提出的算法与贪心算法进行对比，主要关注的性能指标包括端到端时延和部署的链路带宽消耗，同时针对不同的场景对此算法的性能进行分析。

图5表示发送500个SFC请求流时，本文提出的基于资源

感知的RA-SA算法与贪心算法端到端时延性能仿真结果。图中横坐标表示端到端的时延，纵坐标表示小于横坐标时延的用户比例，可以看出RA-SA算法的端到端时延主要集中在200~500 ms，贪心算法的端到端时延主要集中在440~800 ms，端到端的时延性能有明显的提升。图6表示请求流带宽消耗分布，横坐标表示不同带宽消耗，纵坐标表示SFC请求流所需的不同带宽消耗，可以看出RA-SA算法的SFC请求流带宽消耗明显低于贪心算法的带宽消耗。

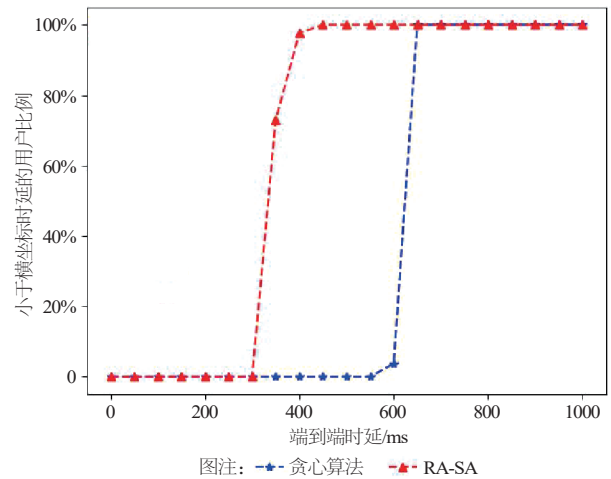


图5 端到端时延性能仿真结果

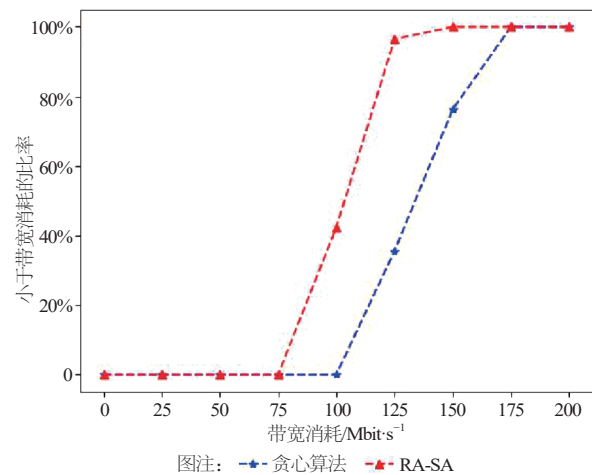


图6 SFC请求流带宽消耗分布

进一步对不同场景的两种算法性能进行比较。图7表示发送不同SFC请求流数量时的平均端到端时延，横坐标表示发送的SFC请求流的数量，纵坐标表示端到端的平均时延，可以看出RA-SA算法不仅可有效降低端到端时延，也可以有良好的稳定性。图8表示发送不同数量的SFC请求流时的平均带宽消耗，可以看出RA-SA算法可以有效降低数据流的带宽消耗，进而增大系统的吞吐量。同时针对不

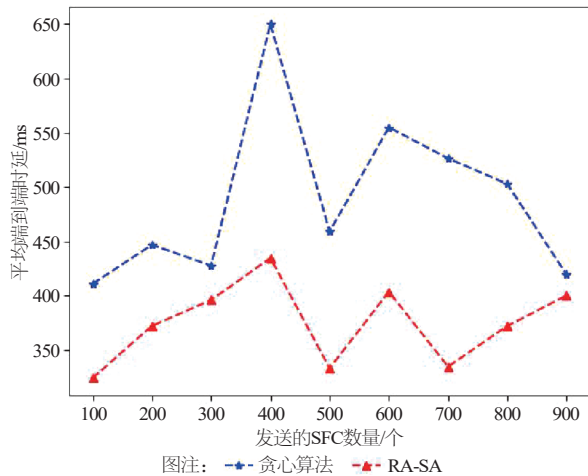


图7 发送不同SFC请求流数量时平均端到端时延

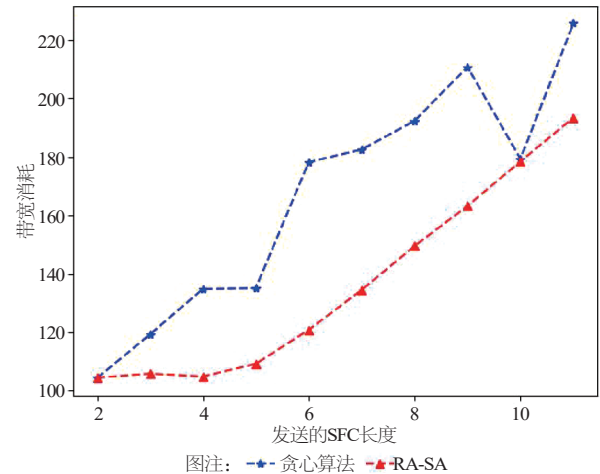


图10 发送不同长度SFC时平均带宽消耗

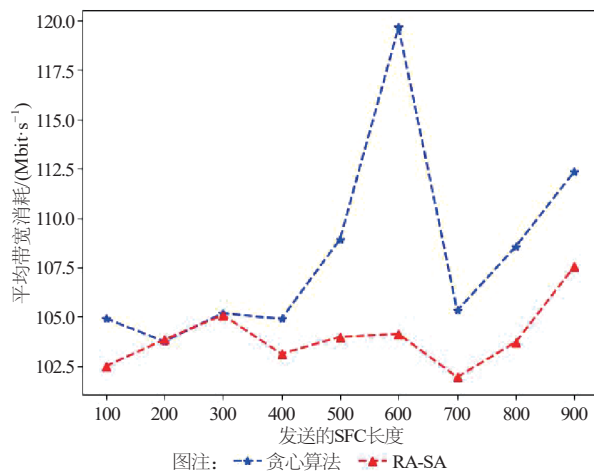


图8 发送不同SFC请求流数量时平均带宽消耗

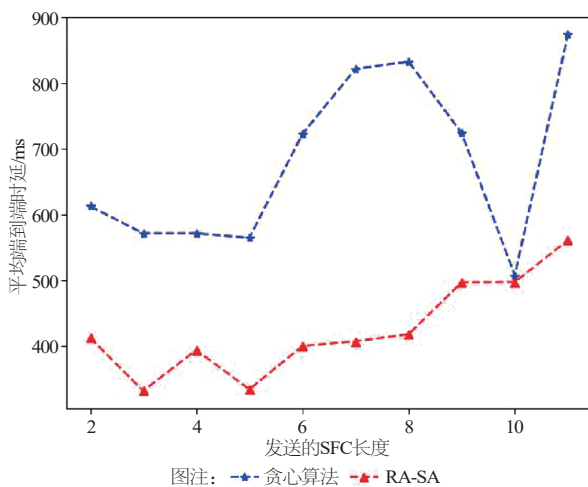


图9 发送不同SFC长度时平均端到端时延

同SFC长度下两种算法的性能进行仿真。图9和图10表示发送不同SFC长度时，两种算法的平均端到端时延和平均带宽消耗，可以看出RA-SA算法可以有效降低端到端的时延以及平均带宽消耗，同时此系统具有良好的稳定性。

参考文献：

- [1] 翟立君, 潘沐铭, 汪春霆. 卫星5G技术的发展和展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 1-9.
- [2] ZHAI L J, PAN S M, WANG C T. Development and prospect of satellite 5G technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 1-9.
- [3] NGUYEN X N, SAUCEZ D, BARAKAT C, et al. Rules placement problem in OpenFlow networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1273-1286.
- [4] ERAMO V, TOSTI A, MIUCCI E. Server resource dimensioning and routing of service function chain in NFV network architectures[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2016, 13(3): 518-532.
- [5] KATSIKAS G P, BARBETTE T, KOSTIC D, et al. Metron: NFV service chains at the true speed of the underlying hardware[C]//Proceedings of 15th USENIX Symposium NSDI. [S.l.:s.n.], 2018: 171-186.
- [6] YUAN Y F, WANG Y P, WANG R, et al. HALO: accelerating flow classification for scalable packet processing in NFV[C]//Proceedings of the 46th International Symposium on Computer Architecture. New York: ACM, 2019: 601-614.
- [7] GAO S, PENG Z, XIAO B, et al. FloodDefender: Protecting data and control plane resources under SDN-aimed DoS attacks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on

- Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [7] HUANG H W, GUO S, LI P, et al. Cost minimization for rule caching in software defined networking[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 27(4): 1007-1016.
- [8] DIXIT A A, HAO F, MUKHERJEE S, et al. ElasticCon: an elastic distributed sdn controller[C]//Proceedings of the Tenth ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems - ANCS '14. New York: ACM Press, 2014: 17-28.
- [9] HALPERN J, PIGNATARO C. Service function chaining (SFC) architecture[Z]. 2015.
- [10] SUN G, CHEN Z R, YU H F, et al. Online parallelized service function chain orchestration in data center networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 100147-100161.
- [11] GHAZNAVI M, SHAHRIAR N, KAMALI S, et al. Distributed service function chaining[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(11): 2479-2489.
- [12] MEDHAT A M, CARELLA G, LÜCK C, et al. Near optimal service function path instantiation in a multi-datacenter environment[C]//Proceedings of 2015 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM). Piscataway: IEEE Press, 2015: 336-341.
- [13] OH H, YU D, CHOI Y H, et al. Design of an efficient method for identifying virtual machines compatible with service chain in a virtual network environment[J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2014, 9(11): 197-208.
- [14] MECHTRI M, GHRIBI C, ZEGHLACHE D. A scalable algorithm for the placement of service function chains[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2016, 13(3): 533-546.
- [15] CAN O Y, WEI Y K, LENG S P, et al. Service chain performance optimization based on middlebox deployment[C]//Proceedings of 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1947-1952.
- [16] LI G L, ZHOU H C, FENG B H, et al. Horizontal-based orchestration for multi-domain SFC in SDN/NFV-enabled satellite/terrestrial networks[J]. China Communications, 2018, 15(5): 77-91.
- [17] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICHIO J L, et al. Network function virtualization: state-of-the-art and research challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 236-262.
- [18] MIRJALILI G, LUO Z Q. Optimal network function virtualization and service function chaining: a survey[J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 27(4): 704-717.
- [19] CAO H T, WU S C, AUJLA G S, et al. Dynamic embedding and quality of service-driven adjustment for cloud networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 1406-1416.
- [20] KULKARNI S G, ZHANG W, HWANG J, et al. NFVnice: dynamic backpressure and scheduling for NFV service chains[J]. ACM Transactions on Networking, 2020, 28(2): 639-652.
- [21] RIFFEL F, GOULD R. Satellite ground station virtualization: secure sharing of ground stations using software defined networking[C]//Proceedings of 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-8.
- [22] ZHOU D, SHENG M, WANG X J, et al. Mission aware contact plan design in resource-limited small satellite networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(6): 2451-2466.
- [23] TIPALDI M, GLIELMO L. A survey on model-based mission planning and execution for autonomous spacecraft[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3893-3905.
- [24] DU J B, ZHAO L Q, CHU X L, et al. Enabling low-latency applications in LTE-A based mixed fog/cloud computing systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1757-1771.
- [25] CAO H T, XIAO A L, HU Y, et al. On virtual resource allocation of heterogeneous networks in virtualization environment: a service oriented perspective[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(4): 2468-2480.
- [26] DU J B, YU F R, LU G Y, et al. MEC-assisted immersive VR video streaming over terahertz wireless networks: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 9517-9529.
- [27] D'ORO S, GALLUCCIO L, PALAZZO S, et al. Exploiting congestion games to achieve distributed service chaining in NFV networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(2): 407-420.

[作者简介]



徐媚琳（1994—），女，哈尔滨工业大学硕士生，主要研究方向为SDN、网络虚拟化技术。



贾敏（1982—），女，哈尔滨工业大学教授、博士生导师，入选国家重大人才工程，主要研究方向为天地一体化认知通信、组网与接入技术。



郭庆（1964—），男，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院院长、教授、博士生导师，主要研究方向为卫星通信和宽带多媒体通信。