

针对不同需求的专用功能选择及组合结果.在定制化的路由服务中,属于同一个分类的多个专用功能,最多只能有一个被选择,例如,一个路由服务只能执行一种特定的带宽分配算法.在线模式神经网络被初始化后,其起始训练状态能够保证输出层中属于同一分类的各专用功能有相同的输入,例如,对 $SY_k, SY_{k+1}, SY_{k+2} \in YC_l$, 有 $ISY_{jk} = ISY_{jk+1} = ISY_{jk+2}$.这样,在进一步的在线学习过程中,通过不断训练 H 和 SY 之间各连接权值,优化专用功能选择及组合结果.

用户通常难以(且无必要)确知所获路由服务各功能的构成细节(如每个具体的专用功能被选择的情况),同时,用户也难以对所获服务从专业角度进行评估(如延迟、抖动和出错率等数据),往往只能从服务外部可得的主观感受(如可视电话的画面清晰度、语音的辨识度及画面和语音的同步性等)对所获得的路由服务进行评价和反馈.然而,用户可以主动表述的某项主观感受(如对画面清晰度的感受)通常并不能单独地由某个功能独立地支持,而是需要多个功能以协作的方式共同作用,尤其当用户对服务有多种主观感受的需求时,更需要从整体上合理地选择多个可搭配的功能,使这些功能以组合协同的方式来满足多种需求.若依据用户反馈的某项具体的主观感受对单个功能被选择的概率进行独立优化的效果并不理想,不仅可能会使下次被选择的多个功能因搭配不合理导致该主观感受还不如之前,还可能会给其他主观感受带来消极影响.因此,本文考虑不针对用户单项的主观感受独立地对单个功能被选择的概率进行优化,而是对用户的各项主观感受进行综合考虑,并由此获取用户对路由服务的整体满意度评估情况,这样,从合成路由服务的多个专用功能的组合及搭配的角度,对多个专用功能被选择及组合的方式进行训练和优化.假设用户对所获路由服务的各项主观感受满意度集合为 $PSD = \{PSD_1, PSD_2, \dots, PSD_v\}$, 则用户对服务的整体满意度 ASD 可以表示为

$$ASD = \sum_{PSD_i \in PSD} \omega_i \cdot PSD_i \tag{21}$$

其中, ω_i 表示用户对各主观感受的重视程度(即权重),可由相对比较法获得各权重值,同时满足 $0 < \omega_i < 1$ 且 $\sum_{i=1}^v \omega_i = 1$.由验证 1 可知,刚初始化后的在线模式神经网络输出的功能选择结果至少能保证最基本的应用通信.定义用户对最基本服务的满意度为其最低满意度,记作 LSD .定义用户期望获得的服务满意度为 ESD .定义用户最高的服务满意度为 HSD (即,满意度为 1 的情况).显然, $LSD < ESD < HSD$, 且 $LSD < ASD < HSD$.本文通过奖励方式对 HSY 中各元素值进行调整和优化,定义奖励量 CE 为

$$CE = \begin{cases} \frac{(HSD-ASD)^2}{(ASD-ESD)^2}, & ESD < ASD < HSD \\ \varepsilon, & ASD = ESD \\ 0, & LSD < ASD < ESD \end{cases} \tag{22}$$

其中, $0 < \varepsilon < 1$.当 $ESD < ASD < HSD$ 时,用户对所获路由服务的实际满意度高于其期望值,越接近最高满意度,奖励量越大;越接近期望满意度,奖励量越小.当 $ASD = ESD$ 时,用户所获的路由服务刚好满足其期望值,只给一个很小的奖励量.当 $LSD < ASD < ESD$ 时,用户所获路由服务仅能满足其最基本的通信,达不到用户期望,则不给予奖励.

每次获得相同需求下用户对所获路由服务的反馈后,对 HSY 中各元素值进行调整.对于 HSY_{jk} ,其调整方式同理于表达式(8),定义如下:

$$HSY_{jk} \leftarrow HSY_{jk} + \Delta HSY_{jk} \tag{23}$$

在一个定制化的路由服务中,属于同一个分类的多个专用功能最多只有一个可被选择.定义在一个路由服务中,被选择的专用功能集合为 $SSY, SSY \subset SY$.当 $ESD < ASD < HSD$ 时, ΔHSY_{jk} 的计算过程如下:

$$\Delta HSY_{jk} = \begin{cases} \beta \cdot CE \cdot OH_j, & SY_k \in SSY \\ 0, & SY_k \notin SSY \end{cases} \tag{24}$$

表达式(24)表明:用户对所获路由服务的满意度大于或等于其期望值时,对此服务中所有被选择的专用功能对应的权值做奖励处理,其他没被选择的专用功能对应权值不变.

当 $LSD < ASD < ESD$ 时, ΔHSY_{jk} 计算过程如下:

$$\Delta HSY_{jk} = \begin{cases} 0, & SY_k \in SSY, SY_k \in YC_l \\ \beta \cdot \varepsilon \cdot OH_j, & SY_k \notin SSY, SY_k \in YC_l \end{cases} \quad (25)$$

表达式(25)表明:用户对所获路由服务的满意度小于其期望值时,不对此时被选择的专用功能对应的权值做奖励,而对那些与被选择专用功能属于同一分类但没被选择的专用功能对应的权值做小的增量处理.以这种方式,可以持续地优化该个性化需求下专用功能选择及组合,从而实现路由服务的定制化目标,改善用户的服务体验.

4 仿真实现和性能评价

4.1 仿真实验配置

为实现本文提出的基于 SDNFV 的路由服务合成机制(routing service composition mechanism,简称 RSCM),本文在 Linux 平台(Intel core i5 3.3GHz,16GB DDR3 RAM)上搭建仿真系统.仿真实验中,选用 Floodlight^[35]作为模型的控制,负责计算和优化路由服务定制方案,并下发路由服务匹配规则.转发设备选用 OpenFlowClick^[36]进行仿真实现.OpenFlowClick 是一种基于 Click Modular Router^[37]的可扩展可编程的软件路由器,其内部由一系列负责处理数据分组的功能组成,各功能可依据相应的服务合成方案被独立地调用和组装,构成完整的路由服务,实现对不同类型数据分组差异化的处理,而且其内部的 OpenFlowClick 模块支持转发设备接收和部署控制器下发的服务匹配规则,以及支持多个转发设备被控制器统一地集中管理和控制.

仿真实验中,依据弹性/非弹性和交互/非交互特性选择 4 种典型的网络应用,见表 1.离线模式神经网络的训练样例选用集成服务机制(integrated service mechanism,简称 IntServM)^[38],来训练对每种类型应用通用的路由服务配置.本文主要面向应用对 QoS 特性的需求进行路由服务定制,在应用的通信路径上,可供 ISP 选择构成路由服务的功能包括准入控制、资源预留、带宽分配、分组调度、分组转发、差错控制、流量整形和缓存处理.用户对所获服务的 QoS 满意度评估由带宽、延迟、抖动和丢失率参数依据文献[39]中的方法计算,其中,各参数对 4 种类型应用的重要程度(权值)依据 ITU-T Y. 1541^[40]和 ITU-T E.802^[41]由文献[42]中方法计算获得,具体设置见表 2.仿真时,本文选用两种实际的网络拓扑,分别为中国教育科研计算机网 CERNET^[43]和美国下一代互联网 INTERNET2^[44],拓扑结构如图 8 所示.为评价本文提出的 RSCM 机制的性能,本文选用典型的 IntServM 和相关工作中另一种基于 SDN 和 NFV 的服务合成模型——服务链即服务机制(SCaaS)^[28]进行对比.这 3 种机制在两种网络拓扑下,在不同网络负载(轻载、中载和重载)情形和不同候选功能数量情形下,分别对路由服务的性能和用户的服务体验进行对比评价.在仿真实验中,轻载是指网络中所有链路带宽的平均利用率低于 30%的情况,重载是指网络中所有链路带宽的平均利用率高于 70%的情况,介于两者之间为中载.

Table 1 Typical network applications

表 1 典型网络应用

	非交互	交互
弹性	文件下载	网页浏览
非弹性	视频点播	可视电话

Table 2 Weight setting

表 2 权值设置

	带宽	延迟	抖动	丢失率
文件下载	0.52	0.08	0.08	0.34
网页浏览	0.26	0.35	0.04	0.35
视频点播	0.43	0.06	0.22	0.29
可视电话	0.16	0.35	0.35	0.14

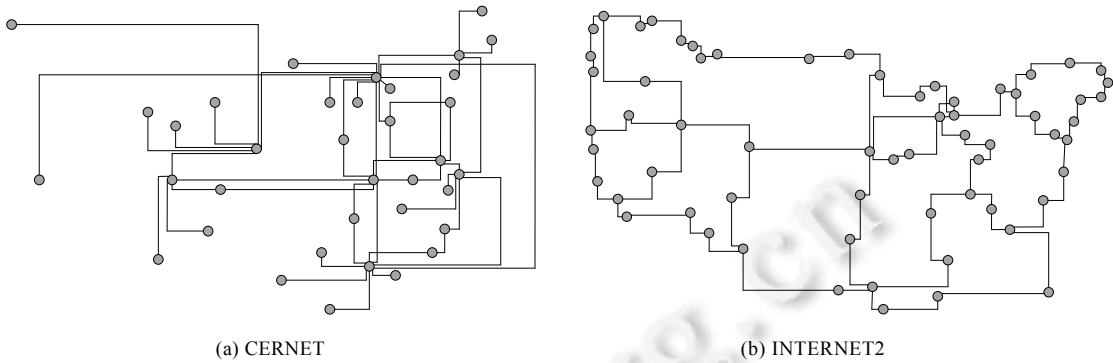


Fig.8 Network topologies

图 8 网络拓扑

4.2 性能评价

4.2.1 接入成功率

接入成功率是指被成功接入的应用个数对请求接入的应用总数的比例.在 3 种网络负载情形下,3 种机制对应用的接入成功率比较结果如图 9 和图 10 所示.

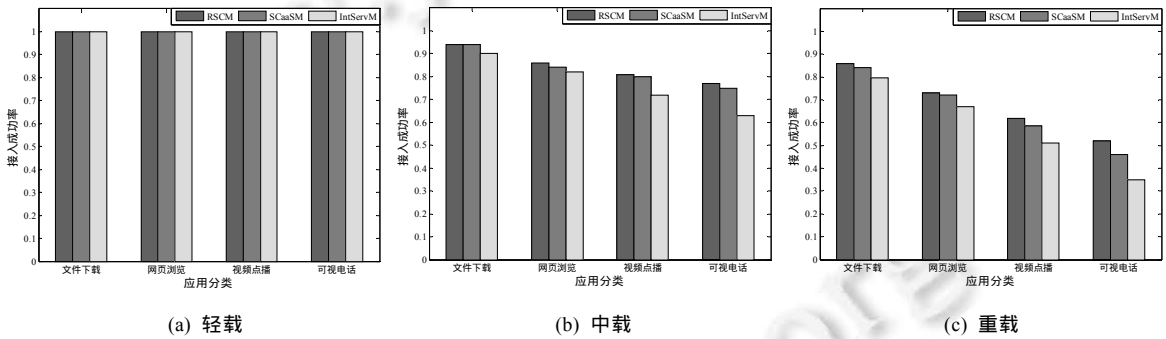


Fig.9 Access success ratio over CERNET

图 9 CERNET 下接入成功率

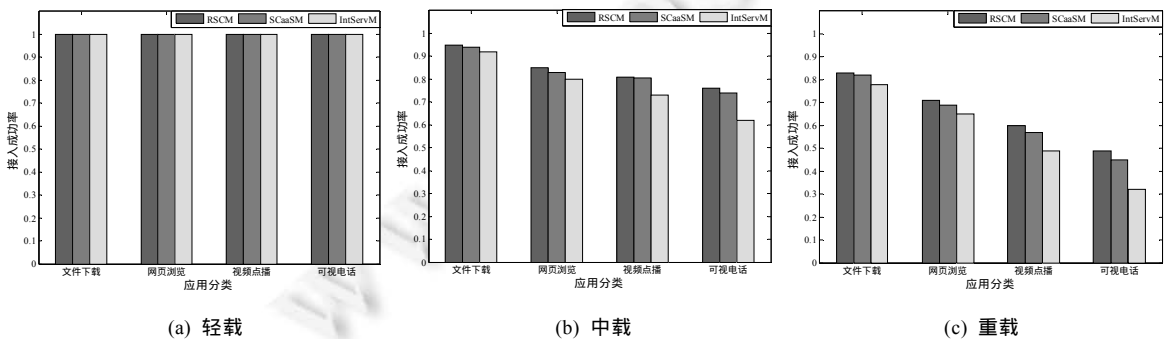


Fig.10 Access success ratio over INTERNET2

图 10 INTERNET2 下接入成功率

RSCM,SCaaS 和 IntServM 这 3 种机制都能够提供端到端的保证型服务,即:只有在能为应用通信分配资源并提供满足要求的路由服务时,才允许接入该应用.但是随着网络负载增大,三者的接入成功率都有所下降.

RSCM 和 SCaaSM 两种机制在两种拓扑下接入成功率的下降程度都明显低于 IntServM 机制,尤其是当网络负载达到重载之后,这是因为 RSCM 和 SCaaSM 都基于 SDN 的全局网络视图和 NFV 灵活的功能及资源调用,当网络负载发生变化时,都能够从全局视图上更好地规划路由服务的路径和功能部署(如选择能够避开资源不足链路的路由算法和拥塞控制机制),从而降低接入失败率.此外,由于 RSCM 还能够通过接入失败的情形进行学习改进,提高重载下资源及功能分配的效用,因而进一步提高了接入成功率.

4.2.2 用户满意度

用户满意度是指路由服务能满足用户个性化通信需求的程度,即,用户对所获路由服务的满意程度.本文主要针对路由服务的 QoS 特性来评估用户满意度,在不同网络负载下,用户对 3 种机制提供的路由服务的满意度比较结果如图 11 和图 12 所示.

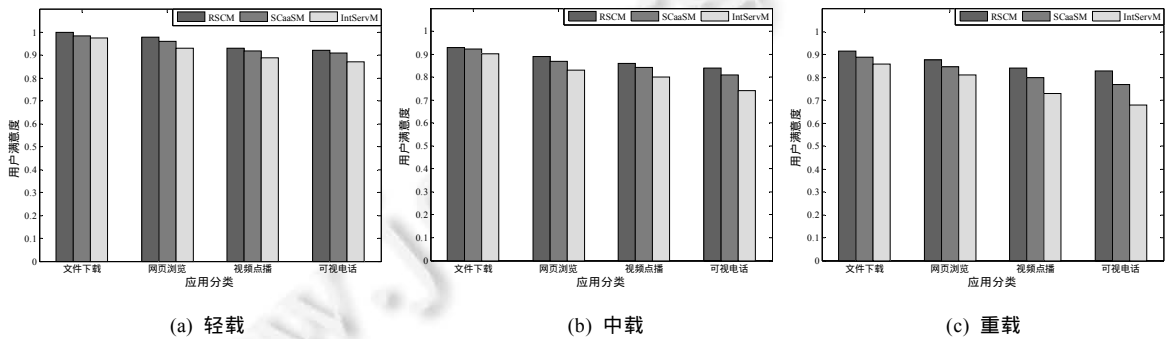


Fig.11 User satisfaction degree over CERNET

图 11 CERNET 下用户满意度

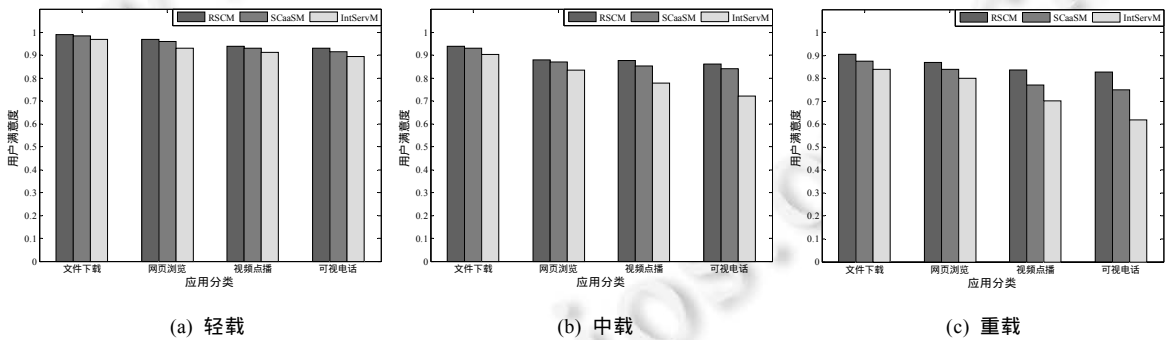


Fig.12 User satisfaction degree over INTERNET2

图 12 INTERNET2 下用户满意度

对于被成功接入的应用,RSCM 所提供路由服务的用户满意度较高且相对稳定,SCaaSM 所提供路由服务的用户满意度紧随其后,相比之下,用户对 IntServM 所提供路由服务的平均满意度随着网络负载的加重而明显下降.这是因为网络负载较低时,IntServM 可以通过预留并分配足够多的资源来提高用户满意度,但是当负载加重时,这种方式难以为继.RSCM 和 SCaaSM 因其全局视图和动态功能及资源调用,具备依据用户需求实施更合适的路由服务合成方案的能力,从而提高了用户的服务满意度.此外,RSCM 还具备自适应学习能力,能够在不同情形下,持续地训练及优化服务的定制方案,尽可能最大限度地满足用户多样化和个性化的需求,从而进一步提高了用户满意度.

4.2.3 功能利用率

功能利用率是指在多种多样候选的专用路由功能中,被选择组装路由服务的路由功能占所有候选路由功

能的比例.随着候选功能数量的增加,3种机制的比较结果如图 13 和图 14 所示.

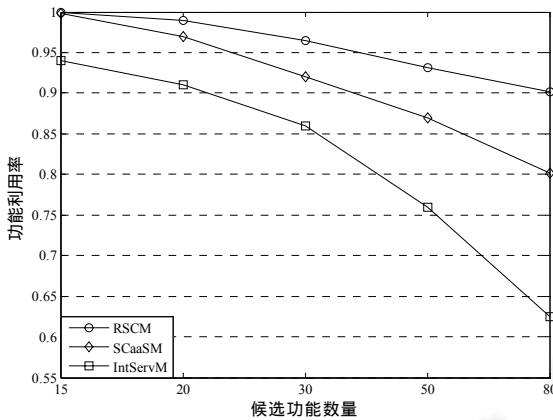


Fig.13 Function utilization ratio over CERNET
图 13 CERNET 下功能利用率

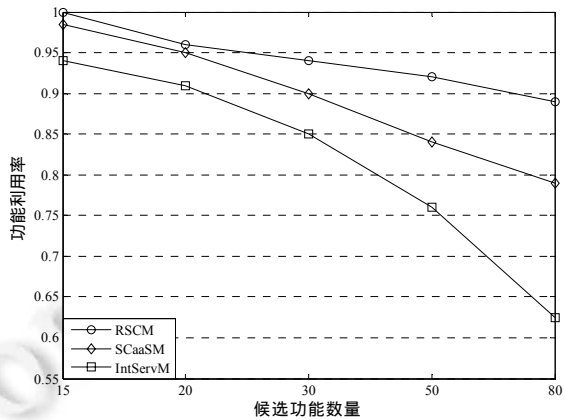


Fig.14 Function utilization ratio over INTERNET2
图 14 INTERNET2 下功能利用率

当候选的路由功能的数量增加时,RSCM 的功能利用率明显高于 SCaaS 和 IntServM,尤其当候选功能数量增加较多时.这是因为 IntServM 基于预先设置的标准选择功能来提供路由服务,不具备随着候选功能增加尝试选择新功能替换初始预设功能的能力,虽然候选功能增加,但其对功能的选择目标不变,因而导致功能利用率低.SCaaS 由于相对灵活的功能调用机制,能够随着候选功能的增加便捷地进行功能选择,提高了新添加的功能被选择的概率.相比之下,RSCM 为了改善用户体验,自适应地尝试多样化可行的候选功能选择及组合方案,而且通过定制化,使其具备面向不同需求及网络状态情形而合成差异化路由服务的能力,从而使其功能利用率最高.

4.2.4 服务优化率

服务优化率是指当可被选择的候选路由功能增多时,面向相同的通信需求,被优化的路由服务占有所有路由服务的比例.3种模型比较结果如图 15 和图 16 所示.

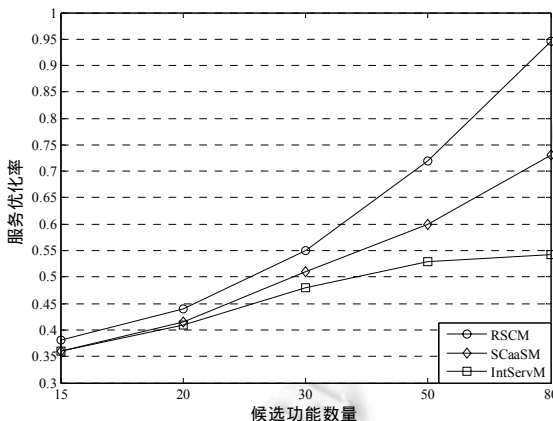


Fig.15 Service optimization ratio over CERNET
图 15 CERNET 下服务优化率

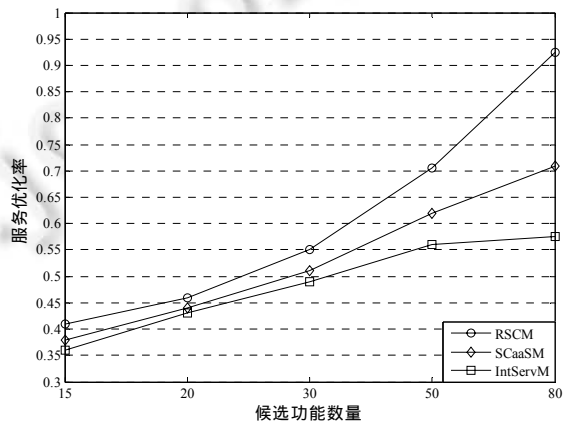


Fig.16 Service optimization ratio over INTERNET2
图 16 INTERNET2 下服务优化率

RSCM 对路由服务的优化率明显优于 SCaaS 和 IntServM,尤其是当可被选择的功能数量增加较多时.这是因为候选功能增多时,RSCM 可选的路由服务合成方案随之增多,而且 RSCM 定制路由服务时有明确的优化

目标,即优化用户的服务体验,因而更容易选择合适的功能及其组合而得到更优质的路由服务,特别是当候选功能增加时,其可以更主动地依据用户反馈情况持续优化服务的构成.相比之下,SCaaSM 和 IntServM 都不能依据用户的体验反馈情况有效地调整服务组成,但是,SCaaSM 对多样化功能调用的灵活性使其功能选择的可能组合更加丰富,因此随着候选功能增加,其提高服务优化率的能力强于 IntServM.

4.2.5 时间开销

时间开销是指从 ISP 接收到用户对应用的通信请求到 ISP 成功为用户提供路由服务所用的时间.本文对两种模型的时间开销进行对比(以最大的平均时间开销设为 1,其他为对其相对值),比较结果如图 17 和图 18 所示.

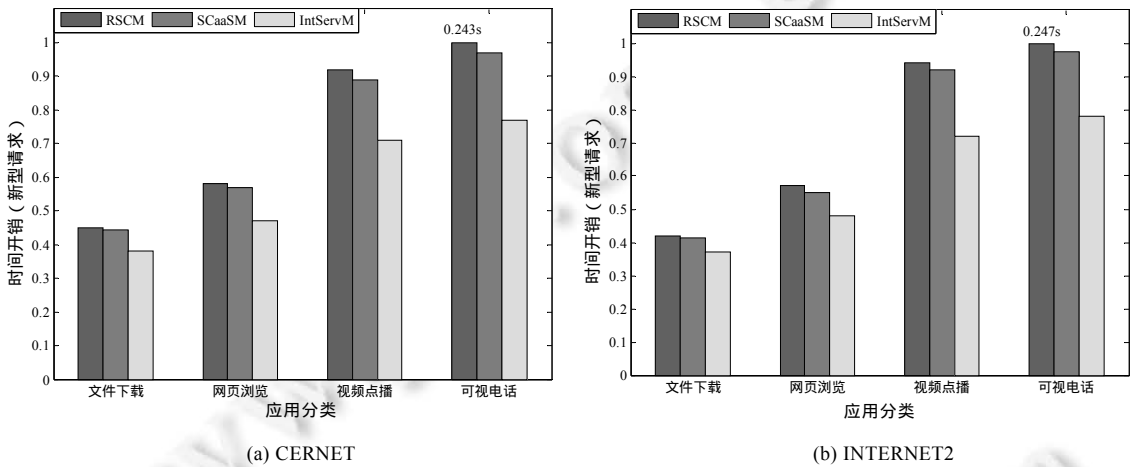


Fig.17 Service setup time for new requests

图 17 对新型请求的服务建立时间

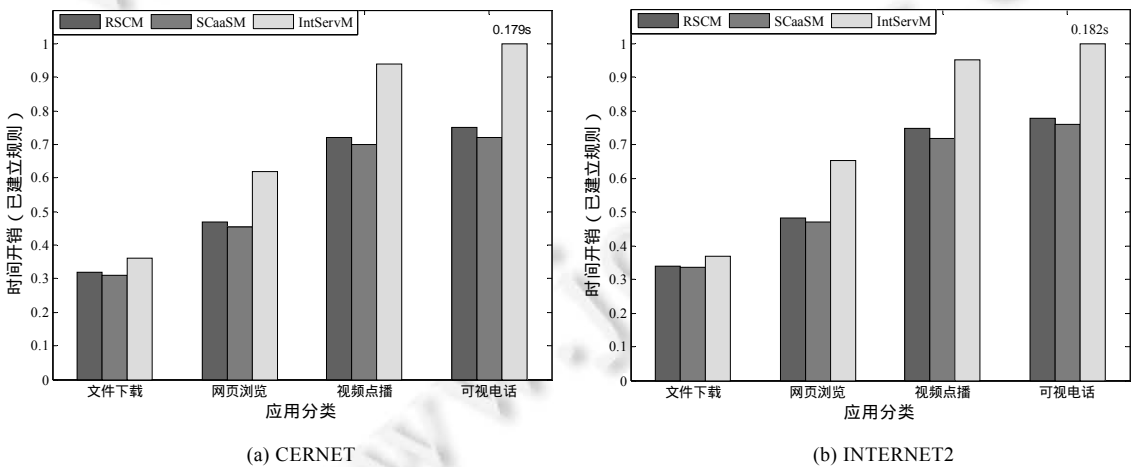


Fig.18 Service setup time according to the established rules

图 18 依据已建立规则的服务建立时间

当 RSCM 和 SCaaSM 首次为某类请求提供路由服务时,需要系统的控制平面分析及计算如何为该请求提供服务,生成相应的服务合成规则,而且合成服务所需的路由功能需要嵌入到相关的交换机,因此路由服务的建立时间开销高于 IntServM,如图 17 所示.然而,RSCM 和 SCaaSM 再收到同样类型的请求(即,收到请求的交换机可以成功匹配该请求对应的服务匹配规则)时,这两种机制服务建立时间开销变得明显低于 IntServM,如图 18

所示.这是因为此时交换机只需使用其已有的服务合成方案,调用并组合相应路由功能来提供路由服务即可.其中,RSCM的时间开销比SCaaS稍高些,这是因为RSCM有时还需要依据反馈进行规则更新,会带来少量的时间开销.

5 总结

当前网络环境中新型应用不断涌现,而且用户对不同类型应用的通信需求越来越复杂化、多样化和个性化.本文基于NFV把功能服务从承载设备中解耦,基于SDN把控制平面从数据平面中解耦,提出了一种基于SDNFV的路由服务合成机制.该机制能够针对用户不同的通信需求定制具备不同特性的路由服务,从而优化用户的服务体验.本文运用软件产品线的思想构建路由服务产品线,实现对多样化路由功能特性的划分,作为进一步优化路由服务的基础.为实现路由功能选择及服务合成的可演化能力,进而实现路由服务的定制化.本文基于机器学习思想,提出离线和在线两阶段路由服务神经网络学习模型,根据大量用户持续进行网络活动产生的与不同类型应用通信的相关信息(差异化的需求、获得的路由服务和体验反馈等),不断调整及优化路由功能选择及服务合成,持续改善用户服务体验.

应该指出的是:与专用的网络物理设备相比,本方法基于SDN和NFV范型,以多种实例化的路由功能运行于标准的通用网络设备中,性能与专用设备相比存在一定差距,但是面向大量用户对不同类型应用的独特多变且差异多样的通信需求,以及越来越关注于整体服务体验的应用情境,需要对多种多样的路由功能进行灵活及统一地选择部署及组合搭配,从而在不同的通信路径上动态且快速地提供定制化的路由服务,本方法显现出很好的适用性.在实际应用中,控制平面对大规模网络会面临可扩展性问题,需要进一步研究对控制平面进行多控制器联动和分域管控等机制.同时,本文通过多样化路由功能的自适应选择及合成,实现路由服务定制化来改善用户服务体验.但服务的消费和生产并不完全是买方市场,因此在未来的研究工作中,可以进一步引入ISP的经济利益考量,以实现供需双方共赢的目标来定制路由服务.此外,通过原型实现,在实际网络(如CERNET)上进行验证以提高本文工作的实用性,也是今后研究与开发工作的重点.

References:

- [1] Wang XW, Li J, Tan ZH, Ma LB, Li FL, Huang M. The state of the art and future tendency of "Internet+" oriented network technology. *Journal of Computer Research and Development*, 2016,53(4):729-741 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7544/j.issn1000-1239.2016.20151146]
- [2] Bu C, Wang XW, Li FL, Huang M. A big data driven adaptive routing service customization scheme. *Chinese Journal of Computers*, 2016,39(1):65-79 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11897/SP.J.1016.2016.00065]
- [3] Carpenter B. Middleboxes: Taxonomy and issues. RCF 3234, 2002.
- [4] Wu J, Zhang JF, Hong Y. Cloud radio access network (C-RAN): A primer. *IEEE Network*, 2015,29(1):35-41. [doi: 10.1109/MNET.2015.7018201]
- [5] Shanbhag S, Wolf T. Automated composition of data-path functionality in the future internet. *IEEE Network*, 2011,25(6):8-14. [doi: 10.1109/MNET.2011.6085637]
- [6] Chen L, Duan XD, Chen W, Cheng WQ. Thoughts and practices about SDN and NFV. *Telecommunications Science*, 2014,8:23-27 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.004]
- [7] Mijumbi R, Serrat J, Gorricho JL. Network function virtualization: State-of-the-Art and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015,18(1):236-262. [doi: 10.1109/COMST.2015.2477041]
- [8] Diego K, Fernando MVR, Paulo EV, Christian Esteve R, Siamak A, Steve U. Software-Defined networking: A comprehensive survey. *Proc. of the IEEE*, 2015,103(1):14-76. [doi: 10.1109/JPROC.2014.2371999]
- [9] Lorena IBL, Ángel LVC, Luis JGV. Trends on virtualisation with software defined networking and network function virtualization. *IET Networks*, 2015,4(5):255-263. [doi: 10.1049/iet-net.2014.0117]
- [10] Ding WF, Qi W, Wang JP. OpenSCaaS: An open service chain as a service platform toward the integration of SDN and NFV. *IEEE Network*, 2015,29(3):30-35. [doi: 10.1109/MNET.2015.7113222]

- [11] Wang XW, Cheng H, Huang M. QoS multicast routing protocol oriented to cognitive network using competitive coevolutionary algorithm. *Expert Systems with Applications*, 2014,41(10):4513–4528. [doi: 10.1016/j.eswa.2014.01.020]
- [12] Wang XW, Qu DP, Huang M, Li KQ, Das SK, Zhang JH, Yu RY. Multiple many-to-many multicast routing scheme in green multi-granularity transport networks. *Computer Networks*, 2015,93(1):225–242. [doi: 10.1016/j.comnet.2015.10.015]
- [13] Nelly B, Svein H, Eduardo SDA. A view of the dynamic software product line landscape. *Computer*, 2012,45:10. [doi: 10.1109/MC.2012.292]
- [14] Yin H, Jiang Y, Lin C, Luo Y, Liu YJ. Big data: Transforming the design philosophy of future Internet. *IEEE Network*, 2014,28(4): 14–19. [doi: 10.1109/MNET.2014.6863126]
- [15] Sekar V, Egi N, Ratnasamy S, Reiter M, Shi GY. Design and implementation of a consolidated middlebox architecture. In: *Proc. of the USENIX Conf. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2012)*. 2012. 24–37.
- [16] Wang XW, Cheng H, Huang M. Multi-Robot navigation based QoS routing in self-organizing networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013,26(1):262–272. [doi: 10.1016/j.engappai.2012.01.008]
- [17] Peculea A, Iancu B, Dadarlat V, Ignat I. A novel QoS framework based on admission control and self-adaptive bandwidth reconfiguration. *Int'l Journal of Computers Communications & Control*, 2010,5(5):862–870. [doi: 10.15837/ijccc.2010.5.2247]
- [18] Baochun L, Klara N. A control-based middleware framework for quality of service adaptations. *IEEE Journal of Selected Areas in Communication*, 1999,17(9):1832–1650. [doi: 10.1109/49.790486]
- [19] Abdelmounaam R, Mohamed E. μ RACER: A reliable adaptive service-driven efficient routing protocol suite for sensor-actuator networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2009,20(5):607–622. [doi: 10.1109/TPDS.2008.94]
- [20] Rohallah B, Ramdane M, Zaïdi S. Towards scalability of reputation and QoS based web services discovery using agents and ontologies. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Information Integration and Web-Based Applications and Services (iiWAS 2011)*. 2011. 262–269. [doi: 10.1145/2095536.2095580]
- [21] Sasitharan B, Dmitri B, Ray C, Julien M, William D, Tadashi N, Tatsuya S. Adaptive dynamic routing supporting service management for future internet. In: *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2009)*. 2009. 1–7. [doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425353]
- [22] Abdulbaset HM, Michael EW. Localized QoS routing with admission control for congestion avoidance. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS 2010)*. 2010. 174–179. [doi: 10.1109/CISIS.2010.153]
- [23] Wang P, Lan JL, Zhang XH. Dynamic function composition for network service chain: Model and optimization. *Computer Networks*, 2015,92:408–418. [doi: 10.1016/j.comnet.2015.07.020]
- [24] Paganelli F, Ulema M, Martini B. Context-Aware service composition and delivery in NGSONs over SDN. *IEEE Communications Magazine*, 2014,52(8):97–105. [doi: 10.1109/MCOM.2014.6871676]
- [25] Cheng GZ, Chen HC, Hu HC. Enabling network function combination via service chain in-stantiation. *Computer Networks*, 2015, 92:396–407. [doi: 10.1016/j.comnet.2015.09.015]
- [26] Ma H, Bastani F, Yen IL. QoS-Driven ser-vice composition with reconfigurable services. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2011,6(1):20–34. [doi: 10.1109/TSC.2011.21]
- [27] Ran YY, Yang EZ, Shi YK. A NaaS-enabled framework for service composition in software defined networking environment. In: *Proc. of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps 2014)*. 2014. 188–193. [doi: 10.1109/GLOCOMW.2014.7063429]
- [28] Ding WF, Qi W, Wang JP, Chen B. OpenSCaaS: An open service chain as a service platform toward the integration of SDN and NFV. *IEEE Network*, 2015,29(3):30–35. [doi: 10.1109/MNET.2015.7113222]
- [29] Gamez N, Haddad JE, Fuentes L. SPL-TQSSS: A software product line approach for stateful service selection. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Web Services (ICWS 2015)*. 2015. 73–80. [doi: 10.1109/ICWS.2015.20]
- [30] Cai HH, Cui LZ, Shi YL. Multi-Tenant service composition based on granularity computing. In: *Proc. of the 2014 IEEE Int'l Conf. on Services Computing (SCC 2014)*. 2014. 669–676. [doi: 10.1109/SCC.2014.93]
- [31] Lee J, Kotonya G, Robinson D. Engineering service-based dynamic software product lines. *Computer*, 2012,45(10):49–55. [doi: 10.1109/MC.2012.284]
- [32] Hinchey M, Park S, Schmid K. Building dynamic software product lines. *Computer*, 2012,45(10):22–26. [doi: 10.1109/MC.2012.332]

- [33] Cybenko G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 1989,2(4): 303–314. [doi: 10.1007/BF02551274]
- [34] Han SG, Wee KN, Wan L, Vincent CSL. Privacy-Preserving gradient-descent methods. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2010,22(6):884–899. [doi: 10.1109/TKDE.2009.153]
- [35] Project floodlight. 2016. <http://www.projectfloodlight.org>
- [36] Mundada Y, Sherwood R, Feamster N. An OpenFlow switch element for click. In: *Proc. of the Symp. on Click Modular Router*. 2009.
- [37] Kohler E. The click modular router. *ACM Trans. on Computer Systems*, 2000,18(3):263–297. [doi: 10.1145/319151.319166]
- [38] Braden R, Clark D, Shenker S. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview. IETF RFC 1633, 1994. 1–28. <https://tools.ietf.org/html/rfc1633>
- [39] Wang XW, Cheng H, Huang M. Multi-Robot navigation based QoS routing in self-organizing networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013,26(1):262–272. [doi: 10.1016/j.engappai.2012.01.008]
- [40] ITU-T Y. 1541. 2011. <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541/en>
- [41] ITU-T E. 800. 2008. <http://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-1>
- [42] Kiran A, Brahmjit S, Rajesh K. Network selection based on weight estimation of QoS parameters in heterogeneous wireless multimedia networks. *Wireless Personal Communications*, 2014,77(4):3027–3040. [doi: 10.1007/s11277-014-1692-4]
- [43] CERNET. 2016. <http://www.topology-zoo.org>
- [44] INTERNET2. 2014. <http://www.internet2.edu/media/medialibrary/2014/03/17/AboutInternet2.pdf>

附中中文参考文献:

- [1] 王兴伟,李婕,谭振华,马连博,李福亮,黄敏.面向“互联网+”的网络技术发展现状与未来趋势. *计算机研究与发展*,2016,53(4): 729–741. [doi: 10.7544/issn1000-1239.2016.20151146]
- [2] 卜超,王兴伟,李福亮,黄敏.大数据驱动的自适应路由服务定制机制. *计算机学报*,2016,39(1):65–79. [doi: 10.11897/SP.J.1016.2016.00065]
- [6] 李晨,段晓东,陈炜,程伟强.SDN 和 NFV 的思考与实践. *电信科学*,2014,8:23–27. [doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.004]



卜超(1987 -),男,山东枣庄人,博士生,主要研究领域为未来互联网,自适应路由服务定制机制.



黄敏(1968 -),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为智能算法设计与优化,调度理论与方法.



王兴伟(1968 -),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为未来互联网,云计算,网络空间安全.