



引用格式:胡光武,张超钦,邬可可. 地址语义驱动的服务功能链架构方案研究[J]. 轻工学报,2020,35(5):71-79.

中图分类号:TP393.2 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.05.010

文章编号:2096-1553(2020)05-0071-09

地址语义驱动的服务功能链架构方案研究

Research on the architecture of address semantics-driven service function chaining

胡光武¹,张超钦²,邬可可¹

HU Guangwu¹,ZHANG Chaoqin²,WU Keke¹

1. 深圳信息职业技术学院 计算机学院,广东 深圳 518172;

2. 郑州轻工业大学 计算机与通信工程学院,河南 郑州 450001

1. School of Computer Sciences, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China;

2. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

关键词:

服务功能链;服务功能路径;地址语义;软件定义网络;中间件

Key words:

service function chaining; service function path; address semantics; software-defined networking; middlebox

摘要:针对服务功能链(SFC)服务功能路径建立机制中存在的数据流分类粒度不灵活、数据包转向机制开销较大等问题,提出一种地址语义驱动的服务功能链架构方案。该方案创新地将用户的多重语义属性编码于数据包中的IP源地址中,利用软件定义网络(SDN)架构,在定制的中心控制服务器上根据用户的需求形成策略并下发,从而指导流分类器根据地址语义属性对数据流进行灵活分类,同时使SDN转发设备建立基于IPv6源路由技术的数据流转向机制,构建多约束条件下的网络资源动态优化模型,以实现对服务功能链所承载网络资源的动态优化。实验结果表明,本方案可实现动态、灵活、多粒度、负载均衡的服务功能链,较同类型方案,本方案构建的服务功能链效率更高、时延更短,可作为一种为大型ISP/ICP提供多样化、智能化网络服务的解决方案。

收稿日期:2020-04-18

基金项目:深圳市基础研究项目(JCYJ20170817115335418);广东省自然科学基金项目(2018A030313746)

作者简介:胡光武(1980—),男,湖南省桃源县人,深圳信息职业技术学院副研究员,博士,主要研究方向为计算机网络体系结构和网络安全。

通信作者:张超钦(1978—),男,河南省柘城县人,郑州轻工业大学副教授,博士,主要研究方向为计算机网络体系结构。

Abstract: To address the shortcomings that existed in the establishment of SFC service function path, such as inflexible dataflow classification and high cost of flow steering, an address semantics-driven service function chaining architecture scheme was proposed. The scheme creatively encoded multiple semantic attributes of users into the IP source address, and used a software-defined network (SDN) architecture to form and issue policies based on user needs on a customized central control server, thereby instructing the flow classifier to flexibly classify data flows based on the semantic attributes of addresses. At the same time, SDN forwarding equipment established the data flow diversion mechanism based on IPv6 source routing technology. A dynamic optimization model of network resources under multiple constraints was constructed to achieve dynamic optimization of network resources carried by the service function chain. Experiment results showed that the scheme could build a dynamic, flexible, multi-granularity, load-balancing service function chain. Compared with the same type of scheme, the service function chain constructed by the scheme was more efficient and had less delay, and could be the best candidate for large ISP/ICP to provide diversified and intelligent network services.

0 引言

近年来,随着互联网规模的不断扩大和网民数量的急骤增长,互联网用户向网络提供商(ISP)和网络内容提供商(ICP)提出了多样化、差异化的服务需求^[1].为满足这些需求,ISP/ICP一般通过在网络中部署多种网络中间件设备(如防火墙、流量整形、WEB缓存、代理服务、入侵检测系统、网络地址转换、负载均衡设备等),并组合其提供的服务功能SF(service function)予以实现^[2-3].但是,传统的中间件设备基本都架构在网络设备厂商专属的硬件上,一般只能提供单一的服务功能,具有封闭性和专属性,且严重依赖网络的物理拓扑.这就导致网络管理者在增加或者调整网络服务时,极易出现配置错误,且人力成本较高.同时,网络管理者无法使用上层统一的管理策略表达,也无法动态地调整服务功能.而错误地改变一个或多个服务功能实例可能引发错误叠加效应,进而导致数据流引导的环路或黑洞^[4].这些问题不仅给网络的管理带来巨大的成本,同时也阻碍了网络的演进和创新.

软件定义网络SDN(software-defined networking)^[5]和网络功能虚拟化NFV(network functions virtualization)^[6]技术是为解决当前网络服务创新能力不足而提出的解决方案.SDN

将控制与转发平面分离,并将控制平面形成逻辑集中的控制器决策层,进而指导转发元素专注于数据包的转发.借助于SDN的网络编程能力和控制器提供的全局网络拓扑视图,网络管理者可以灵活制定上层网络策略,加快新协议、新功能的部署,实现网络功能创新.而NFV将物理资源与逻辑功能分离,以软件的方式实现传统必须基于硬件的网络功能,并可以部署于虚拟机或者普通服务器上,从而完成网络功能的快速部署与迁移,降低网络管控成本,实现网络功能的扩展.

近年来,在SDN、NFV等新技术的支持下,为了更好地满足上层业务需求,减少服务功能部署和管理成本,提高服务功能、中间件的灵活组合和动态调整能力,国际互联网工程组(IETF)和学术界提出了服务功能链SFC(service function chaining)或网络服务链NSC(network service chaining)的概念,简称“服务链”.然而截至目前,学术界和工业界对服务功能链还没有一种统一而明确的定义.IETF将其定义为“数据包必须经过的一组抽象服务特定序列”^[7],而学术界将其定义为“一种基于网络功能关联、运营商级别的持续交付服务组合”^[8]、“一组能够处理特殊应用的传输(数据平面)、控制、监视(控制平面)数据流的链序服务集合”^[9].基于此,本文对服务功能链尝试给

出的定义是“一种使数据流根据策略按序经过部署的一系列服务功能组合,为用户提供差异化网络服务的技术”。

在数据层面上,服务功能链主要通过数据包打标签^[10-11]、隧道封装^[12]、OpenFlow 多级流表^[13-14]等方法建立数据包的转向机制,从而使数据流按序经过服务功能节点 SFN (service function node);而在管理控制层面,网络管理者无须关心底层数据流分类、路由调度、数据包处理等细节,只需通过集中管控的服务链管理平台,将传统的中间件设备或者 NFV 环境下的服务功能识别为服务功能节点或服务功能实例,通过上层策略定义实现服务链的描述、构建和动态调整,从而构建出自定义的服务功能路径。

鉴于服务功能链具有解耦服务功能与物理拓扑之间紧耦合关系的能力,给网络管理和部署带来了极大的便利性,ISP 和 ICP 期望利用该技术构建动态的服务功能组合,从而为用户提供灵活性、多样化、差异化、定制化的服务。目前,利用 SDN、NFV 和相关技术构建服务功能链,助力传统网络服务进行变革,在学术界和工业界已形成共识,成为当前的研究热点。IETF 为此专门成立了 SFC 工作组^[15],主要负责服务功能链的场景描述、方案架构、路由机制、数据包格式等标准化的制定工作;欧洲电信标准化协会(ETSI)则成立了 NFV 工作组^[16],主要关注服务功能链应用于纯虚拟化/半虚拟化环

境的策略编排、流量调度与优化、控制器实现等问题;而学术界则集中对服务链的架构、策略定义、数据流与服务功能路径的映射机制、路由调度、数据流在服务功能处理前后的识别、服务功能实例的放置和负载均衡等问题进行研究。

目前针对服务功能链的研究成果较为分散,且学术界和工业界尚未形成统一、完整、可部署的技术架构方案。鉴于此,本文针对现有研究流分类粒度(五元组方式)不灵活、数据流转向机制开销较大等问题,拟提出一种地址语义驱动的服务功能链架构方案,以期为大型 ISP/ICP 提供多样化、智能化的网络服务提供解决方案。

1 地址语义驱动的服务功能链架构和关键技术

1.1 架构设计

服务功能链简单场景示意图如图 1 所示。流分类器首先对用户数据流进行分类,之后根据流分类结果使不同的数据流按序经过流量整形、地址转换、WEB 代理等中间件,形成 3 个不同的服务链,分别为 BT 数据流提供整形服务、为其他数据流提供地址转换服务、为 HTTP 数据流提供缓存服务。在大型网络的实际使用场景中,服务链的构成更加复杂,除了图 1 所示的单向路径服务链外,还有对称路径服务链、混合路径服务链等。其中,对称路径服务链要求数据

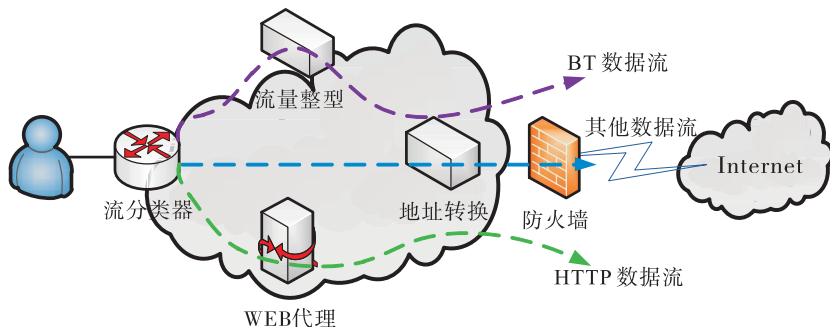


图 1 服务功能链简单场景示意图

Fig. 1 The scenario illustration of SFC

流经过的服务功能路径 SFP(service function path) 必须是对称的,而混合路径服务链则是单向路径服务链和对称路径服务链的混合,还可能包含有服务功能组合的环路.在数据流的引导策略控制下,服务功能路径的构建无须再依赖于物理网络拓扑,并可指导数据流按策略按序经过每一个服务功能节点,直至被最后一个节点处理后再按路由转发.

服务链可以用以下模型予以描述.若将服务功能节点记为 SFN ,那么一个服务链可以表示为 $SFC = \{SFN_1, SFN_2, \dots, SFN_m\}$,表明该服务链使数据包按序经过所列各节点;服务链策略则包含了多个服务的定义,即 $Policy = \{SFC_1, SFC_2, \dots, SFC_n\}$.另外,为了使数据流按服务功能节点顺序流转,在当前服务功能节点 SFN_i 上,还必须部署转发规则集合 $FR_{SFN_i} = \{(flow_j, SFN_{i+1}, Port_r)\}$,使得数据流 $flow_j$ 从其端口 $Port_r$ 转发给下一个服务功能节点 SFN_{i+1} .

结合 SDN、NFV 架构和实际需求,本文设计的由地址语义驱动的服务功能链总体架构如图 2 所

示,其自上而下包含 3 个层次,分别是 SFC 策略编排层、SFC 策略执行层和基础设施层.其中, SFC 策略编排层直接面向管理用户,由用户根据需求定义数据流的分类属性、服务功能路径组成,以及数据流与服务功能路径的映射关系; SFC 策略执行层在网络全局视图的支持下,将 SFC 策略和流分类策略形成逻辑上的映射关系: $\langle \text{服务链}, \text{数据流}, \text{拓扑路径} \rangle$,最终通过规则生成器将该映射关系转换成 SDN 的南向规则(如 OpenFlow^[17], POF^[18]),并下发至基础设施层的 SDN 交换机;基础设施层的流分类器根据执行层下发的映射规则,对数据流进行分类后,将其映射的服务功能路径中所有服务功能节点的 IP 地址,以源路由的方式按序加入源路由包头并进行转发,同时网络中的传统路由器只需按源路由的方式进行转发即可.而当数据包被某个服务功能节点处理后,其源路由包头应删除当前节点的 IP 地址,并向后续节点转发,最终完成服务功能节点的遍历,从而实现服务功能路径的流转.

1.2 地址语义驱动的数据流分类机制

传统网络流的定义由 $\langle \text{源地址}, \text{目的地址}, \text{源端口}, \text{目的端口}, \text{协议号} \rangle$ 五元组来确定.然而,作为服务功能链的服务对象,这样固定的流分类粒度并不灵活.例如,某服务要对 VIP 组的用户进行质量服务保证,当所有 VIP 组用户并非处于同一个子网或者由同一个设备提供接入服务时,传统方案必须为每个用户在其接入交换机上配置访问控制规则.而当用户因为更换接入位置或者移动访问导致 IP 地址发生变化时,网络必须删除旧规则并重新下发新规则,这就给网络的管理带来了不便.

为了提高数据流分类的灵活性和多重粒度性,本文提出地址语义驱动的数据流分类机制,其思路是将用户身份多重属性语义(如身份标签、身份组、接入交换机、所在子网等)有机地

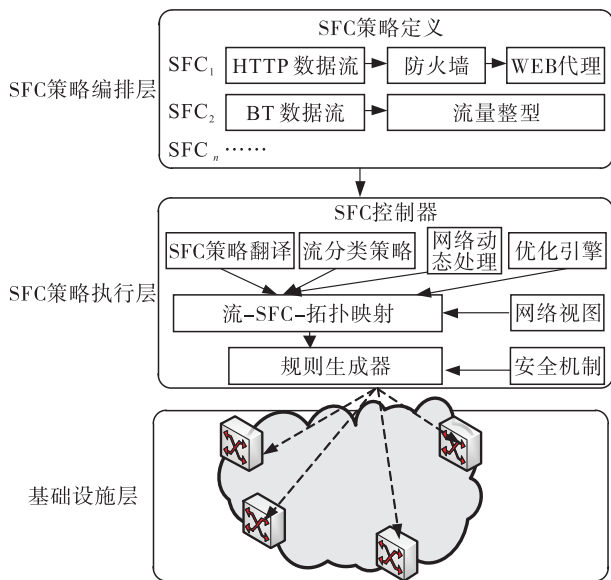


图 2 地址语义驱动的服务功能链架构

Fig. 2 The architecture of address semantics-driven SFC

组合到用户主机 IPv6 地址的后 64 位中,形成用户唯一的地址语义标签 (ASL), 即:
 $ASL(U_i) = f_1(P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,n})$.

该机制使得用户的 IPv6 地址变为: <子网前缀 Prefix(64 位), 用户地址语义标签 ASL(64 位)>. 在具体实现方式中, 可由管理者自行定义属性组合. 主机对以上 IPv6 地址的获取方式, 可通过改进 DHCPv6 协议来实现, 即当 DHCP 服务器在收到主机的 DHCPv6 Request 报文后, 通过查询后台用户身份数据库、确认请求主机的身份后, 根据管理员策略, 将用户的多重属性编码于 IPv6 地址中, 并以 DHCPv6 Offer 报文返回给用户.

流分类器收到用户数据包后, 首先对其进行分类, 然后根据分类结果为其建立服务功能路径. 本机制可根据上层定义的策略按应用类型、源地址、目的地址、用户组、所在楼宇、所在子网等多种单一语义灵活地对数据流进行分类, 也可以通过以上语义的组合进行分类, 即

$$Classifier(Packet_{U_i}) = f_2(P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,n})$$

尽管 OpenFlow 不能对 IP 地址语义进一步解析, 但华为的 POF^[18] (protocol oblivious forwarding) 协议可对任意字段进行任意长度的匹配. 因此, 本机制不需要改变转发设备的软硬件架构, 直接采用支持 POF 协议的 SDN 交换机即可实现流分类器功能.

可实现流分类器功能.

1.3 基于 IPv6 源路由的服务功能路径建立机制

分类之后的数据流应按服务功能路径 (SFP) 转发, 使属于同一流的数据包按定义的服务功能组合顺序流转. 目前, SFP 的建立机制主要通过 SDN 交换流表设计、多重隧道封装、设定标签 (在数据包中插入下一个服务功能的标签)、设计专门的网络包头来实现^[19], 但以上方案在交换机转发效率、数据包载荷比、可实现性等方面存在不足. 本文利用 IPv6 源路由 SRv6^[20] 技术, 提出了服务功能路径建立机制 (见图 3).

本机制首先使用 SDN 交换机充当的服务功能接入交换机 SFS (SF switch), 为所有服务功能提供接入服务, 使之能够接受 SFC 控制器的统一控制. 当用户数据包到达流分类器时, 流分类器首先根据 SFC 控制器下发的流分类策略对其进行分类, 根据数据流与服务功能链的映射关系, 对数据包添加源路由包头; 然后, 流分类器将其对应的服务功能路径上所有的服务功能节点 IP 地址、提供接入服务的 SDN 交换机 IP 地址成对地填充至源路由包头中; 最后进行转发.

当数据包流到达第一个服务功能交换机

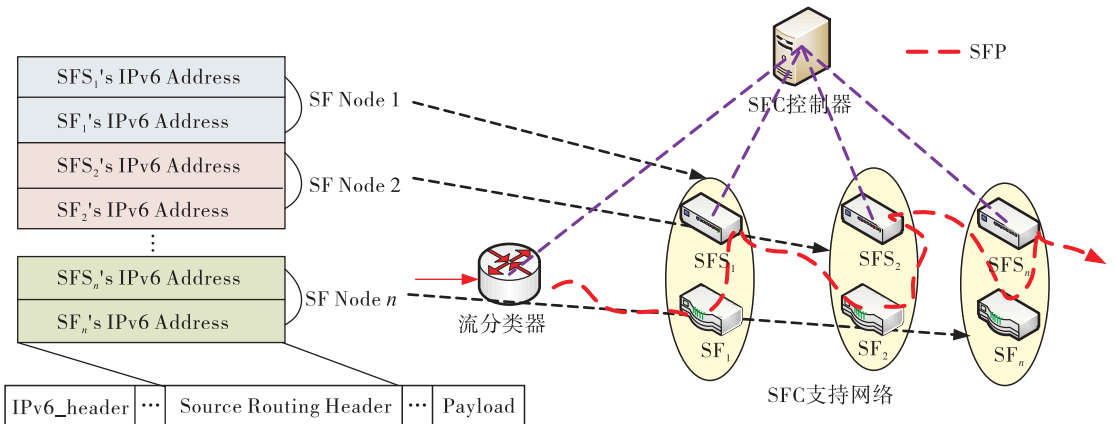


图 3 基于 IPv6 源路由技术的服务功能路径建立机制示意图

Fig. 3 The illustration of SFP establishment mechanism based on IPv6 source routing

(SFS₁)时,该交换机首先对源路由包头进行解析,并按顺序将数据包转发至第一个服务功能(SF₁).当数据包被SF₁处理完毕,重回SFS₁并向下一跳转发之前,SFS₁应删除自身这一跳的源路由对,转发至SFS₂;之后,当数据包被SF₂处理后,SFS₂再删除第二项路由地址.依次循环,直至数据包源路由包头中的IP地址列表为空,再转发至目的地址.

与添加标签、隧道封装等方式相比,本文提出的服务功能路径建立机制的优势在于:不改变现有网络架构和网络协议,只需部署相应的流分类器和服务功能接入交换机至网络对应位置即可.以上两种设备均可由成熟的SDN交换机充当,因此本机制具有易部署、易实现、兼容现在网络资产等优势.

1.4 多约束条件下的网络资源优化模型

为了进一步优化网络资源,防止SF交换机、中间件设备处理能力不足造成的单点故障,链路和路径因数据流分配过多造成网络拥塞等情况,本文对网络资源优化场景进行了建模.设网络拓扑G表示为

$$G = (V, E)$$

其中,V为网络中主要路由器和服务功能的集合,E为以上节点之间的链路(边)集合.本文设计的多约束条件下的服务功能链网络资源优化模型的符号描述如表1所示.

建立的模型在满足相关约束条件的同时,以最大化网络内所有链路的流量比例作为优化目标,即

$$\text{Max } DF$$

$$\forall v \in V_s : \sum_{v \in p} \delta(f(p)) \times v_p \leq r_v \quad \text{①}$$

$$\forall e \in E : \sum_{e \in p} f(p) \leq c_e \quad \text{②}$$

$$\forall m \in V_M : \sum_{m \in p} f(p) \leq g_m \quad \text{③}$$

$$\forall td_i : \sum_{e \in p} f(p) \geq DF \times d_i \quad \text{④}$$

$$\forall p \in P : f(p) \geq 0 \quad \text{⑤}$$

表1 服务功能链网络资源优化模型的符号表

Table 1 Notations for network resource optimization model of SFC

符号	意义
V	SDN交换机和服务功能节点的集合
E	链路(边)的集合
P	服务功能路径的集合
K	流量需求集合矩阵
V_s	集合 V 中所有SDN交换机的集合, $V_s \subset V$
V_M	集合 V 中服务功能节点的集合, $V_M \subset V$
r_v	SDN交换机 v 规则表的容量, $v \in V_s$
c_e	链路 e 的处理能力(带宽), $e \in E$
g_m	服务功能节点的流量处理能力, $m \in V_M$
c_p	路径的处理能力,其中 $p \in P$
v_p	建立路径 p ,在交换机 v 中所需要的规则数量,其中 $v \in V_s, p \in P$
d_i	第 i 条数据流的流量需求
td_i	源节点 src_i 到目标节点 dst_i 的流量需求, $td_i = \langle src_i, dst_i, d_i \rangle, i \in K$
sfc_i	第 i 个服务功能链
$f(p)$	路径 p 所经过的流量比例, $p \in P$
$\delta(f(p))$	当 $f(p) > 0$ 时,则 $\delta = 1$,否则 $\delta = 0$
DF	网络内所有链路的流量比例因子

其中,式①描述了所有流经 v 节点的服务功能路径所需的流规则数量之和应不超过该节点的规则表容量;式②描述了所有经过链路 e 上的服务链总流量应不大于该链路的处理能力;式③描述了所有流经 m 节点的服务链的总流量应不高于该节点的流量处理能力;式④描述了所有经服务功能路径的流量比例之和应不小于每条数据流与链路所承载的流量比例因子,即网络中的每条链路的流量大小应满足服务链的流量需求;式⑤表明路径 p 上的流量比例应不小于0.显然,该模型属于NP-hard问题,无法直接求解,但可设计相关算法并采用cplex、lingo等工具进行近似求解.

2 实验评估

为了测试本文方案的可行性和有效性,采用华为POF虚拟交换机(POFSwitch)作为流分类器,采用软件形式的OpenvSwitch作为服务功

能接入交换机. 而 SFC 控制器则利用开源的 OpenDaylight SDN 控制器来实现, 其下发流分类规则至 POFSwitch, 以及下发数据包转发控制规则至 OpenvSwitch. 此外, 还使用负载均衡、NAT、防火墙等几种典型的服务功能进行方案测试. 在此基础上, 本文重点考察流分类器的处理效率、服务功能交换机的处理效率、服务功能链加载后数据包端到端的时延.

2.1 流分类器的处理效率

数据流的分类是服务功能链实现的第一步, 因此, 流分类器对数据包的处理效率是方案是否可行的关键. 为此, 本文考察了在不同数量属性匹配和不同数据流情况下流分类器的处理效率, 结果如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 在匹配的属性个数达到 6 个、处理的数据流达到 1000 个以上时, 流分类器的处理效率开始明显下降, 但仍比 OpenFlow 方案效率高. 其原因在于本方案可以更加灵活地进行语义属性匹配, 而当 OpenFlow 方案匹配字段较多时, 需涉及多层流表, 因此处理效率受到一定影响.

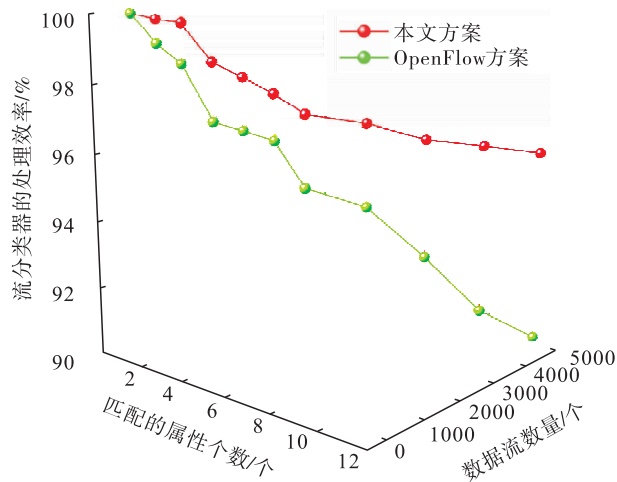


图 4 在不同数量属性匹配和数据流情况下流分类器的处理效率

Fig. 4 The flow classification efficacy comparison between our scheme and OpenFlow with different numbers of matched properties and flows

2.2 服务功能交换机的处理效率

服务功能交换机用于为服务功能提供接入服务, 并将接入的数据包转交给服务功能, 待服务功能处理完毕后, 再将数据包转发至源路由的下一跳, 同时删除当前这一跳的源路由. 因此, 服务功能交换机对数据包的处理效率也是影响服务功能路径建立的重要因素. 本文考察了在不同数据流情况下服务功能交换机的包转发效率和 CPU 压力, 结果如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 随着数据流数量的增多, 交换机的包转发效率下降, 但下降幅度不大 ($< 10\%$); CPU 压力明显上升, 特别是当数据流数量达到 2000 个以上时, CPU 压力上升至 30% 左右, 尽管如此, 在 6000 个数据流的情况下, 该交换机的 CPU 压力仍不超过 50%.

2.3 数据包端到端的时延

服务功能链建立后, 数据包端到端的时延说明了服务功能链整体性能的优劣, 将本方案与基准方案 (Ping)、StEERING 方案^[15] 进行对比, 结果如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 本方案比基准方案时延稍大, 相差并不明显, 但明显优于 StEERING 方案. 其原因在于, 基准方法只是

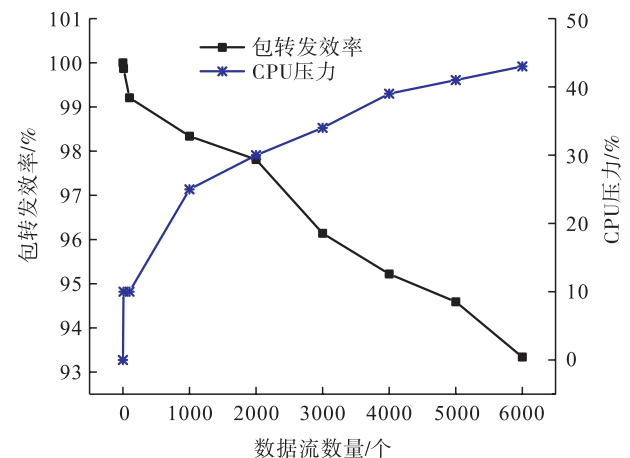


图 5 在不同数据流情况下服务功能交换机的包转发效率和 CPU 压力

Fig. 5 The packet forwarding efficacy and CPU pressure of SFS with different numbers of flows

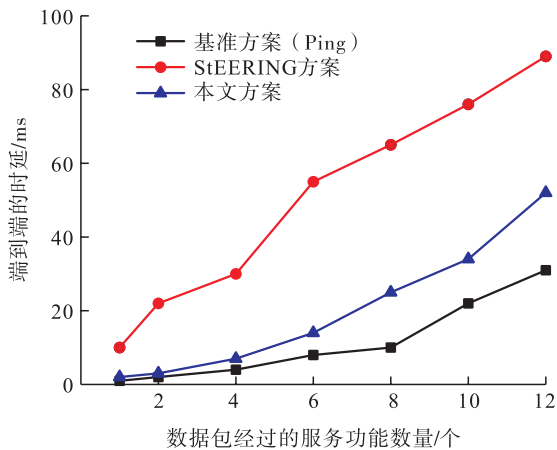


图6 服务功能链在不同服务功能数量时的数据包端到端时延

Fig. 6 The packets end-to-end latency of SFC with different numbers of service functions

表示数据包经过路由器节点往返的时间,并无服务功能对其进行处理,而 StEERING 方案是通过在 OpenFlow 交换机中创建多级流表,并对服务功能序列进行编码,以此完成数据流在不同服务功能实例之间的引导,本文方案则利用源路由的方式,交换机直接参与解析,因此更加高效。

3 结语

本文提出了一种地址语义驱动的服务功能链架构方案,包括地址语义编码和数据流分类机制、基于源路由技术的服务功能链路径建立机制,以及多资源约束条件下的服务功能链动态优化模型。实验结果表明,本方案可实现动态、灵活、多粒度、负载均衡的服务功能链,与同类型方案相比,本方案构建服务的功能链具有更高的效率和更短的时延,可作为一种为大型 ISP/ICP 提供多样化、智能化网络服务的解决方案。下一步拟结合人工智能的方法对链路流量进行预测研究,从而更好地对服务链的上层策略进行设计。

参考文献:

- [1] 中国互联网信息中心. 第44次中国互联网络发展状况统计报告[R/OL]. (2019-08-27)[2020-02-01]. <http://www.cnnic.net.cn/hlwfzyj/hlwzxbg/hlwtjbg/201908/P02019-0830356787490958.pdf>.
- [2] QUINN P, KUMARS, AGARWALP, et al. Network service chaining problem statement[S]. IETF RFC7498, 2015.
- [3] BHAMARE D, JAIN R, SAMAKA M, et al. A survey on service function chaining[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2016, 75(11):138.
- [4] SHERRY J, HASAN S, SCOTT C, et al. Making middleboxes someone else's problem: Network processing as a cloud service[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer communication. New York: ACM, 2012:13.
- [5] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks[J]. SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2):69.
- [6] LIY, CHENM. Software-defined network function virtualization: A survey[J]. IEEE Access, 2015, 3:2542.
- [7] HALPERNJ, PIGNATARO C. Service function chaining (SFC) architecture[S]. IETF RFC 7655, 2015.
- [8] JOHN W, PENTIKOUSIS K, AGAPIOU G, et al. Research directions in network service chaining[C]//Proceedings of 2013 IEEE SDN for Future Networks and Services (SDN4FNS). Piscataway: IEEE, 2013:1.
- [9] MEDHATAM, TALEB T, ELMANGOUSH A, et al. Service function chaining in next generation

- networks; State of the art and research challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2):216.
- [10] HUANG C C, ZHU J F. Service forwarding label for network function virtualization and application-centric traffic steering [C] // Proceedings of International Joint Conference on E-business & Telecommunications. Piscataway: IEEE, 2015.
- [11] FAYAZBAKHS S K, CHIANG L, SEKAR V. Enforcing network-wide policies in the presence of dynamic middlebox actions using flowtags [C] // Proceedings of the 11th USENIX NSDI. Berkeley: USENIX Association, 2014:533.
- [12] QAZI Z A, TU C C, CHIANG L, et al. Simplifying middlebox policy enforcement using SDN [C] // Proceedings of ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2013:27.
- [13] ZHANG Y, BEHESHTI N, BELIVEAU L, et al. Steering: A software-defined networking for inline service chaining [C] // Proceedings of IEEE ICNP. Piscataway: IEEE, 2013.
- [14] VU A V, KIM Y H. An implementation of hierarchical service function chaining using OpenDaylight platform [C] // Proceedings of IEEE NetSoft. Piscataway: IEEE, 2016.
- [15] IETF. Service function chaining (sfc) [EB/OL]. (2013 - 05 - 01) [2020 - 03 - 27]. <https://datatracker.ietf.org/wg/sfc/about/>.
- [16] ETSI. Standards for NFV [EB/OL]. (2012 - 11 - 01) [2020 - 03 - 27]. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/nfv>.
- [17] ONF. Openflow switch specification Version 1.5 [EB/OL]. (2011 - 10 - 01) [2020 - 03 - 27]. <https://www.opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-switch-v1.5.1.pdf>.
- [18] SONG H Y. Protocol-oblivious forwarding: Unleash the power of SDN through a future-proof forwarding plane [C] // Proceedings of 2nd ACM SIGCOMM Workshop Hot Topics Software Defined Network. New York: ACM, 2013:127.
- [19] QUINN P, GUICHARD J. Service function chaining: Creating a service plane via network service headers [J]. Computer, 2014, 47(11):38.
- [20] FILS FILS C, PREVIDI S, GINSBERG L, et al. Segment routing architecture [S]. IETF RFC 8402, 2018.