



层次化跨区域 SDN 验证示范系统的设计与建设

刘智峰¹, 尹霞¹, 王之梁¹, 施新刚¹, 华一强², 黄小红³,

魏亮⁴, 姚姜源⁵, 张晗⁶, 曾曼³, 苏子君³, 刘帅³

(1. 清华大学, 北京 100086; 2. 中国联合网络通信有限公司网络技术研究院, 北京 100048;
3. 北京邮电大学, 北京 100876; 4. 江苏省未来网络创新研究院, 江苏 南京 211100;
5. 海南大学, 海南 海口 570228; 6. 北京航空航天大学, 北京 100083)

摘要: 软件定义网络(SDN)架构给网络带来了卓越的灵活性和可管理性。为了给新型 SDN 技术与应用提供大规模可行性验证试验床与试点部署平台, 提出了依托于 CERNET 的层次化跨区域 SDN 异地验证示范网络试验系统的总体架构, 建设了 9 个城市、13 个节点的 SDN 验证示范核心网与包含 3 个数据中心的接入网, 并对基于 SDN 的 vCPE 智能专线业务、IPv4/IPv6 过渡技术、流量监控调度应用和数据中心应用进行验证与示范。

关键词: 软件定义网络; OpenFlow; 验证示范系统; 试验床

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018286

Design and construction of hierarchical and cross-regional SDN verification and demonstration system

LIU Zhifeng¹, YIN Xia¹, WANG Zhiliang¹, SHI Xingang¹, HUA Yiqiang², HUANG Xiaohong³,

WEI Liang⁴, YAO Jiangyuan⁵, ZHANG Han⁶, ZENG Man³, SU Zijun³, LIU Shuai³

1. Tsinghua University, Beijing 100086, China; 2. China Unicom Network Technology Research Institute, Beijing 100048, China;
3. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 4. Jiangsu Future Networks Innovation Institute, Nanjing 211100, China; 5. Hainan University, Haikou 570228, China; 6. Beihang University, Beijing 100083, China

Abstract: SDN architecture could bring excellent flexibility and manageability to the network. In order to provide a large-scale verification testbed and a pilot deployment environment for SDN-based new technologies and applications, a hierarchical and cross-regional SDN verification and demonstration system over CERNET was proposed, and a SDN verification and demonstration core network consisted of nine cities and thirteen nodes and an access network containing three data centers was built. Based on this system, several SDN-based technologies and applications such as CPE virtualization line service, IPv4/IPv6 transition technology, traffic monitoring and scheduling application and data center applications were deployed, verified and demonstrated.

Key words: software defined networking, OpenFlow, verification and demonstration system, testbed

收稿日期: 2018-09-26; 修回日期: 2018-11-10

通信作者: 王之梁, wzl@cernet.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2015AA016105); 国家自然科学基金资助项目(No.61802092)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program) (No.2015AA016105), The National Natural Science Foundation of China(No.61802092)



1 引言

随着信息技术的进步,互联网的规模不断扩大,远超出其诞生之初网络架构师的设想。如今,基于传统分布式网络体系结构的互联网在安全性、可扩展性、可管理性和时效性等诸多方面遇到了瓶颈。为此,研究人员致力于在未来网络中使用新型网络协议或引入新型网络体系结构。

软件定义网络 (software defined networking, SDN)^[1]是一种将控制平面和转发平面分离的新型网络体系结构,受到了国内外研究学者的广泛关注。在 SDN 架构中,网络管理人员可以在控制器上通过软件编程的方式灵活调度网络资源,通过 OpenFlow 协议等南向接口下发合适的流表集中控制设备的转发规则,提高网络的灵活性;转发平面上的硬件设备只需要关注于转发能力,不需要进行复杂的策略计算,降低了硬件的成本^[2]。由于其卓越的灵活性和可编程性,SDN 已经成为未来网络的主流研究方向之一。微软、谷歌已经成功在其数据中心中部署 SDN 架构,从而提高数据中心的性能和容错能力^[3-4]。SDN 架构也为网络安全性问题提供了新的解决方案^[5]。

新型 SDN 技术与应用的可行性验证依赖于切合实际的大规模 SDN 试验床。为此,本文提出并搭建了依托于中国教育和科研计算机网 (China Education and Research Network, CERNET) 的层次化跨区域 SDN 异地验证示范网络试验系统,并对部分基于 SDN 的新型业务和应用进行了试点部署与验证。具体地,本文的创新点包括以下 3 个方面:

- 提出依托于 CERNET 的层次化跨区域 SDN 异地验证示范网络试验系统的总体架构;
- 搭建依托于 CERNET 的层次化跨区域 SDN 异地验证示范网络 (简称“SDN 验证示范网络”)。该 SDN 验证示范网络包括分布在 9 个城市、13 个节点的核心网和包含

3 个数据中心的接入网;

- 以 SDN 验证示范网络为试验平台,对基于 SDN 的 vCPE 智能专线业务、基于 SDN 的 IPv4/IPv6 过渡技术、SDN/OSPF 混合网络流量工程系统、SDN 流量监控调度应用和两种新型数据中心应用进行试点部署与验证。

2 相关工作

从 2008 年开始,国外陆续开展了多项大规模 SDN 试验网建设的相关工作。美国从 2009 年开始建设全球范围的分布式网络创新实验室 (Global Environment for Network Innovations, GENI),并将 GENI 的部分节点与 7 个大学、5 个 Internet 2 节点和 5 个 NLR 项目节点二层互联,形成了一个全国范围的 SDN 试验网络,用于 SDN 技术的创新和验证^[6];韩国于 2009 年开始与美国 GENI 项目合作,将韩国开放研究网络 (Korea Research Environment Open Network, KREONET) 大田核心节点与美国 GENI 西雅图节点进行光纤互联,建设 K-GENI,进行跨国界端到端 OpenFlow 技术与应用的研究^[7];同时,韩国还与 7 个南亚、东南亚国家合作,以覆盖网的方式,基于第四代跨欧亚信息网 (Trans-Eurasia Information Network 4, TEIN4) 建设跨国 SDN 试验网 OF@TEIN,节点之间通过 VxLAN 隧道通信^[8];欧盟从 2010 年开始建设跨欧洲的 SDN 试验网 OFELIA,总共包含 8 个节点,分布在 8 个不同的国家,节点之间通过二层直连或 VPN 互联,从而进行跨欧洲范围的 SDN 技术应用的验证^[9];日本于 2010 年开始建设覆盖于现网之上的 SDN 试验平台 RISE,总共包含 8 个节点,分布在日本的 8 个不同城市,通过 Q-in-Q 技术互连。基于 RISE,研究人员和运营商可以在不受现有网络限制的情况下进行全国范围 SDN 技术的试验与验证^[10]。

相比之下,目前国内 SDN 试验网建设的相关

工作相对较少, 基于 SDN 的新型研究的验证大多局限于仿真或实验室部署, 缺乏试点部署验证平台。因此, 本文提出并建设了依托于 CERNET 的层次化跨区域 SDN 异地验证示范网络试验系统, 为新型 SDN 技术与应用提供试点部署与实地验证平台。

3 层次化跨区域 SDN 异地验证示范网络试验系统架构设计

本文提出了一种依托于 CERNET 的层次化跨区域 SDN 验证示范网络试验系统的总体架构。该架构涵盖了 SDN 核心网络和边缘网络, 提供了端到端的通信能力, 为多业务应用的部署和运行提供了一个基础支撑平台。图 1 给出了层次化跨区域 SDN 验证示范网络试验系统的总设计图。

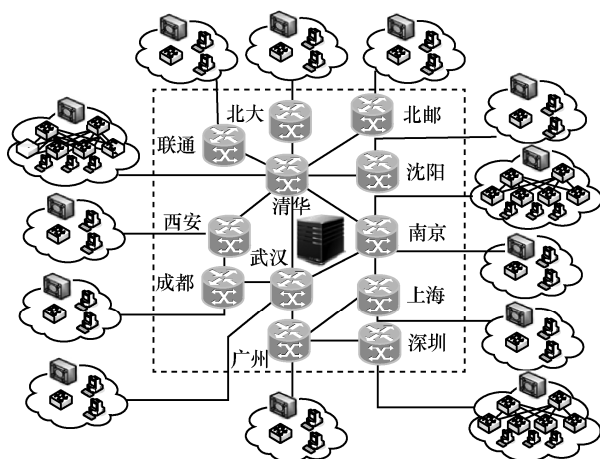


图 1 层次化跨区域 SDN 验证示范网络试验系统总设计图

在该系统中, 整个 SDN 验证示范网络包含核心网络和边缘网络两个层次。核心网络覆盖于 CERNET, 由位于北京、沈阳、西安、成都、南京、武汉、广州、上海、深圳 9 个城市的 13 个节点构成, 每个节点部署一台 SDN 核心交换机, 清华节点部署核心网控制器。每个节点的 SDN 交换机直接通过万兆或吉比特线路接入 CERNET 设备, 各节点 SDN 交换机之间通过 VxLAN 隧道的方式建立连接。VxLAN^[11]是一种网络虚拟化技

术, 通过采用隧道的机制, 可以在复杂的物理拓扑之上建立各站点之间的虚拟连接, 无需对物理拓扑进行重配置。基于 VxLAN 组建覆盖网的方式, 核心网各节点的 SDN 交换机可以直接接入现有 CERNET, 开销较小, 而且不需要对 CERNET 骨干设备进行复杂配置。

核心网采用厂商 A 和厂商 B 两种不同型号的万兆 SDN 交换机。两种型号的 SDN 交换机均支持 VxLAN 隧道, 支持主流 OpenFlow 控制器。核心网各节点为 SDN 交换机提供两个公网地址, 其中一个公网地址作为 VxLAN 的隧道端点 VTEP 地址, 用于各节点之间建立 VxLAN; 另一个公网地址作为交换机管理口地址, 各节点交换机通过管理口地址连接核心网控制器, 同时网络管理人员通过管理口地址进行设备的远程配置。

SDN 验证示范网络边缘网包括若干相互独立、分布在不同地理位置的数据中心网络和用户接入网络。其中, 在北京、深圳、南京 3 个城市分别建立 SDN 数据中心网络, 其他核心节点均下连用户接入网络。用户接入网络可以是单一主机, 也可以是具有独立控制器和交换机的 SDN。

4 SDN 验证示范网络建设

4.1 SDN 验证示范网络核心网建设

SDN 验证示范网络核心网的 VxLAN 连接拓扑与隧道标识如图 2 所示。

结合拓扑图与各节点提供的公网地址, 本文在 SDN 核心网各节点之间建立了 VxLAN 隧道, 并进行连通性测试。测试过程发现厂商 A 的交换机无法自动对多跳 VxLAN 转发的报文进行封装和解封装。为此, 本文为厂商 A 的 SDN 交换机配置了专门的自环流表, 对 VxLAN 转发的数据分组进行封装和解封装。

本文在开源控制器 Floodlight 的基础上开发核心网控制器, 并根据不同业务开发相应的 SDN 应用。Floodlight^[12]是一款基于 Java 语言的开源

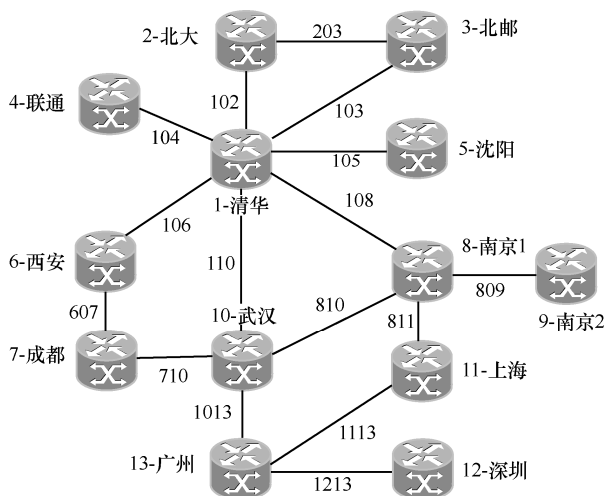


图2 SDN验证示范网络核心网拓扑图

SDN 控制器,提供了多种 API 与模块化编程框架,被广泛应用于 OpenStack、GENI 等大型 SDN 项目中。本文对 Floodlight 控制器进行了完善,使其支持厂商 B 交换机采用的 Nicira 扩展协议,并支持下发 VxLAN 相关流表。这一完善工作已经被合并到了 Floodlight 的主分支之上。

在上述工作的基础上,由各节点建设单位协助将 SDN 交换机的数据口和管理口接入 CERNET 设备相应端口,即完成了 SDN 验证示范网络核心网的建设。

4.2 SDN 验证示范网络边缘网建设

SDN 验证示范网络边缘网由分布在北京、深圳、南京的 3 个数据中心和若干用户接入网络构成。其中,北京数据中心下挂于核心网清华大学节点,采用厂商 C 的设备和控制器,主要进行基于 SDN 的数据中心流量调度应用的验证;深圳数据中心下挂于核心网清华大学深圳研究生院节点,采用厂商 D 的设备和控制器,主要进行 SDN 多租户业务链应用的验证;南京数据中心下挂于核心网江苏省未来网络创新研究院节点,采用厂商 E 的设备和控制器,主要进行基于 SDN 的流量监控和调度应用的验证。用户接入网络包括核心网各节点下挂的测试主机以及依托于核心网进行新型 SDN 应用验证时的接入网络。

4.3 SDN 验证示范网络连通性及基本性能测试

完成 SDN 验证示范网络核心网及边缘网建设后,本文对 SDN 验证示范网络核心网的连通性和端到端基本性能进行了测试。由于核心网覆盖于 CERNET 现网之上,实际流量都是通过现网进行转发,不适合进行吞吐量测试。因此在进行端到端基本性能测试时,主要选择时延和分组丢失作为测试指标。测试步骤如下:

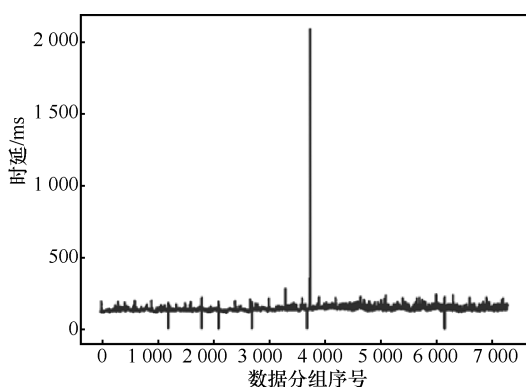
- 选定待测链路;
- 控制器给待测链路下发连通性测试流表;
- 远程登录待测链路两个端节点下挂主机,主机互相发送 ICMP 报文,验证待测链路的连通性;
- 根据主机 ICMP 报文的转发情况,统计给定时间段内待测链路的时延和分组丢失。

本文选择了多条链路进行测试,从而覆盖整个核心网。测试过程中,各链路的时延和分组丢失结果在不同的时间段各不相同,因为数据分组实际是经过 CERNET 现网转发,时延和分组丢失受现网的网络状况影响。图 3 为核心网最大覆盖链路在时间间隔同为两小时的不同时间段的时延分布情况。两个时间段内该链路的时延主要分布在 100~250 ms,在某些时刻时延抖动较为明显,最大时延分别达到 2 093 ms 和 700 ms,最小时延都接近于 0。

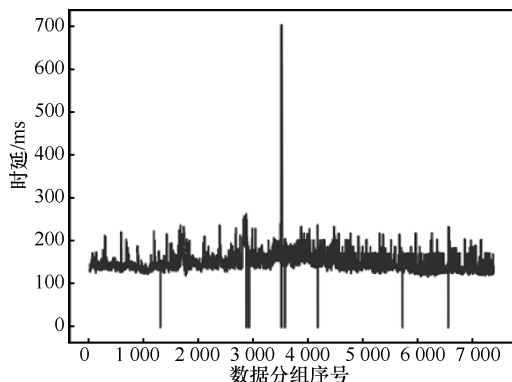
所有链路的测试结果显示,核心网各节点之间均可基于控制器下发的流表,通过 VxLAN 进行通信。通信过程中的时延和分组丢失情况由现网网络环境决定。

5 新型 SDN 业务应用试点部署与验证

在 SDN 验证示范网络试验平台的基础上,本文对基于 SDN 的 vCPE 智能专线业务、基于 SDN 的 IPv4/IPv6 过渡技术、SDN/OSPF 流量工程系统、SDN 流量监控调度应用与两种数据中心应用进行了试点部署与实地验证。



(a) 开始时间为2018年7月1日12时56分



(b) 开始时间为2018年7月2日15时47分

图3 SDN 验证示范网络核心网最大覆盖链路2小时时延测试结果

5.1 基于 SDN 的 vCPE 智能专线业务

在传统通信领域中,服务提供商需要为客户安装、管理和维护客户终端设备(customer premise equipment, CPE),这一过程存在着功能固化、部署复杂、管理控制困难等问题。基于 SDN/NFV 技术,服务提供商提出了一种新型的解决方案 vCPE (virtual CPE),通过在通用硬件上实现虚拟化网络功能来替代需要定制的 CPE 硬件设备,从而降低成本,提高客户终端管理的灵活性。

中国联通网络技术研究院以 SDN 验证示范网络为平台,对其开发的新型 vCPE 智能专线业务^[13]进行了试点部署,对 vCPE 虚拟专线建立、QoS 配置、ACL 配置等功能进行跨域验证,从而推进该业务的正式上线。部署过程中,相关设备作为两个 SDN 验证示范网络接入网,下挂于核心网的清华大学节点和北京邮电大学节点。图 4 为基于 SDN 的 vCPE 智能专线业务验证过程的接入拓扑图。

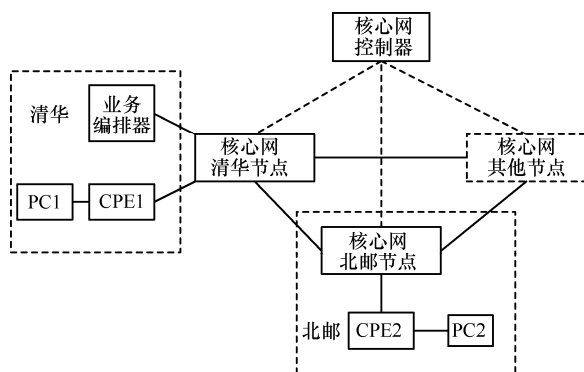


图4 基于 SDN 的 vCPE 智能专线业务验证拓扑图

试点部署过程中,清华大学节点接入网和北京邮电大学节点接入网模拟两个跨域企业。每个接入网包含一台新型 vCPE 白盒设备与一台主机,其中 vCPE 设备模拟企业的接入网关,主机模拟企业用户。业务编排器作为 vCPE 智能专线的控制器,下挂于核心网清华节点。管理人员可以在业务编排器上对 vCPE 设备进行上线,并给下挂的企业用户分配地址。业务编排器可以在 CPE 之间配置加密 VPN 隧道,再结合核心网下发对应流表,实现两个跨域企业用户的专线连接。业务编排器还可以对 CPE 互联隧道配置 QoS 策略和 ACL 策略,对跨域用户进行限速或过滤。多次测试的实验结果显示,业务编排器未配置 QoS 策略时,两个跨域用户之间的文件传输速率的平均值为 3.1 MiB/s;业务编排器在清华大学接入网 CPE 端配置 QoS 限速策略为 1.2 MiB/s 后,两个跨域用户之间的文件传输速率的平均值降为 1.2 MiB/s 与业务编排器配置的限速规则基本相同。业务编排器在在清华大学接入网 CPE 端配置 ACL 策略,限制北京邮电大学接入网用户的 IP 地址访问后,两个跨域用户无法建立连接。

试点部署验证的结果显示,基于 SDN 的 vCPE 智能专线业务能够实现 CPE 虚拟专线建立、QoS 配置和 ACL 配置等预期功能。目前该业务已经正式上线使用。

5.2 基于 SDN 的 IPv4/IPv6 过渡技术

作为下一代互联网的基础核心,IPv6 的相关



研究和规模部署已经上升到国家战略层次, 现有的 IPv4 网络将渐渐向 IPv6 进行过渡。为了满足用户从 IPv4 到 IPv6 的过渡需求, 有学者提出了一种基于 SDN 的 IPv4/IPv6 过渡技术。该技术对 OpenFlow 协议进行了扩展。SDN 控制器对交换机转发的报文进行监控, 根据上连骨干网络支持的 IP 协议类型, 自动对报文进行封装和解封装。封装过程根据不同场景, 采用 6RD 隧道、4over6 隧道和 NAT64 翻译等不同的 IPv4/IPv6 过渡技术^[4]。

基于 SDN 的 IPv4/IPv6 过渡技术测试过程中, 需要动态改变骨干网络和接入网络的 IP 协议类型, 这一实验场景在现网很难实现。依托于 SDN 验证示范平台, 研究人员只需要根据不同场景需求, 给核心网设备配置基于 IPv4 或 IPv6 的转发流表, 再调整接入网设备的 IP 协议, 即可动态改变骨干网和接入网的 IP 协议类型, 从而对该技术进行测试。因此, 研究人员以 SDN 验证示范网络为验证平台, 对基于 SDN 的 IPv4/IPv6 过渡技术进行了部署验证。在验证过程中, 相关设备作为 4 个 SDN 验证示范网络接入网, 下挂于核心网的北邮节点、沈阳节点、北大 (即“北京大学”) 节点和清华节点。其中, 沈阳节点、北大节点和清华节点核心网交换机分别下挂一台 SDN

接入交换机, 接入交换机下挂一台双栈主机; 北邮节点除了下挂 SDN 接入交换机和双栈主机, 还部署了接入网控制器, 用于运行上述 IPv4/IPv6 过渡技术应用。接入网控制器和 4 台接入交换机之间通过带外控制的方式建立连接。验证过程的拓扑图如图 5 所示。

验证过程中, 核心网 SDN 控制器根据不同的场景, 下发对应的流表, 将核心网模拟为 IPv4 网络、IPv6 网络以及 IPv4/IPv6 混合网络。IPv4/IPv6 过渡技术应用运行于接入网 SDN 控制器上, 根据接入交换机收到报文的 IP 协议类型以及核心网 IP 协议类型, 自动选择合适的过渡技术, 对数据分组进行封装, 并传输到核心网进行转发; 在对端接入交换机收到报文后, IPv4/IPv6 过渡技术应用会对报文进行解封装, 使得报文能够被下挂测试主机接收。实际异地部署验证的结果显示, 该基于 SDN 的新型 IPv4/IPv6 过渡技术可以在不同场景下自动选择合适的过渡技术对数据分组进行封装和解封装, 从而保证网络端对端的连通性。多次网络场景切换测试过程中, 该应用切换对应过渡技术并更新流表的平均时延约 500 ms, 能及时对场景切换后的数据分组进行转发, 网络震荡引起的分组丢失率不超过 4%。

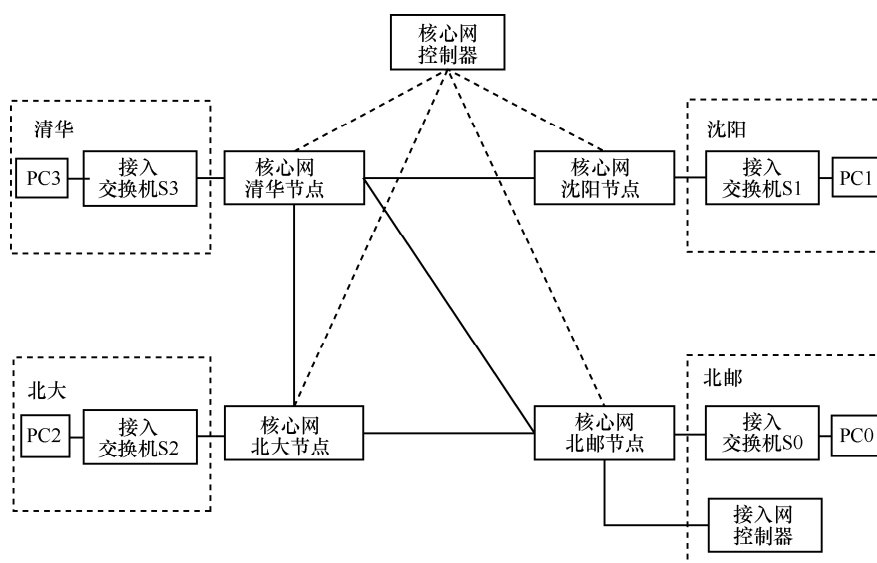


图 5 基于 SDN 的 IPv4/IPv6 过渡技术验证拓扑图

5.3 SDN/OSPF 混合网络流量工程

在 SDN 中,网络流量基于流表进行转发,管理人员可以通过在控制器上设计合适的路由算法,控制网络流量的传输路径,从而均衡链路的负载^[15]。考虑到短时间内从现有网络过渡到 SDN 难度较大,研究人员设计了一种混合场景,通过在运行开放式最短路径优先(open shortest path first, OSPF)协议^[16]的网络中引入若干 SDN 设备,根据网络负载情况对经过 SDN 设备的流量进行分流,从而均衡链路负载,提高网络的性能^[17]。目前,针对上述 SDN/OSPF 混合网络流量工程的相关研究局限于理论仿真,缺少实际工程实现。为了实际验证 SDN/OSPF 混合网络流量工程的可行性,本文在 SDN 验证示范网络边缘网北京数据中心的搭建了具有 3 台硬件交换机的 SDN/OSPF 混合网络试验床,并基于 Floodlight 开发了 SDN/OSPF 混合网络流量工程系统。由于网络链路的分组丢失、时延是网络最大链路利用率的递增函数,在验证过程中,本文以链路最大利用率为指标,采用思博伦商用测试仪随机生成 50 组网络流量,比较 SDN/OSPF 混合网络与 OSPF 网络的最大链路利用率,部分结果如图 6 所示。

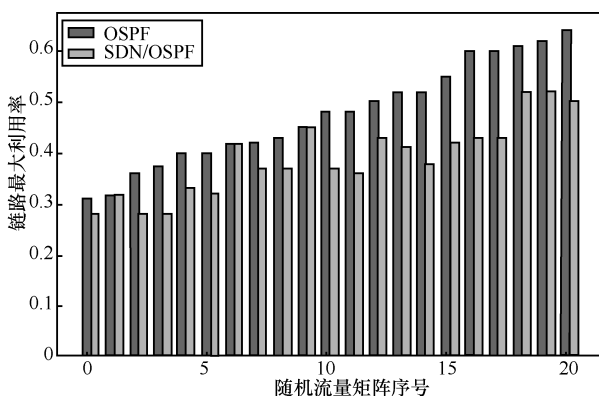


图6 OSPF网络与SDN/OSPF混合网络最大链路利用率

实验结果显示,在相同的网络流量需求下,SDN/OSPF 混合网络的最大链路利用率总是小于或等于 OSPF 网络的最大链路利用率。50 组随机流量测试的结果中,相比于 OSPF 网络,

SDN/OSPF 混合网络的网络最大链路利用率平均下降约 17.57%,说明该 SDN/OSPF 混合网络流量工程系统可以降低网络时延和分组丢失,提高网络的性能。

5.4 SDN 流量监控与调度系统

在 SDN 架构中,SDN 控制器具有网络的全局视图,管理人员可以在控制器上对 SDN 的流量进行采集和和监控,并根据链路负载进行流量调度。本文依托于 SDN 验证示范网络边缘网南京数据中心,对一套 SDN 流量监控与调度系统进行了试点部署,验证该系统的功能。部署验证过程中,该系统研发的 SDN 控制器可以给数据平面的交换机下发匹配特定端口、协议等字段的流表,将网络流量引流到后端分析服务器进行可视化,实现指定流量的监控分析。同时 SDN 控制器可以基于数据平面反馈的网络流量统计信息,结合网络全局拓扑,对 SDN 的链路流量进行实时监控^[18]。一旦发现有链路的实时流量超过其最大带宽,控制器会发出链路流量告警信息。同时,SDN 控制器可以根据链路情况,下发流表对流量进行智能调度;SDN 控制器可以下发 meter 表,对交换设备的流速率进行限速。并发测试结果显示,该系统支持 2 000 个终端同时查询 SDN 监控信息,查询平时时延为 1 339 ms,具有较好的顽健性。

5.5 新型数据中心应用

5.5.1 数据中心加权流组调度系统

随着互联网、云技术和大数据业务的不断发展,数据中心的规模不断扩大,产生的业务流量与日俱增。为了提高数据中心的性能、降低运营的成本,需要对数据中心流量进行有效的管理和调度,提升数据中心网络的利用率。本文基于 SDN 验证示范网络边缘网北京数据中心,对一种数据中心流组调度系统进行了试点部署。该系统基于 SDN 集中控制的思想,拥有一个核心节点和若干用户节点。用户节点之间相互具有流量需求,需要进行流量转发。在转发开始之前,用户节点会



向核心节点汇报其需要转发的流组信息；核心节点作为集中式控制器，根据不同用户节点反馈的流组信息，对用户节点之间的流组转发顺序进行权重计算和调度^[19-20]。流组调度系统建设完成后，本文在数据中心服务器部署了 Docker^[21]，一种轻量级的操作系统虚拟化平台，创建一系列的容器来运行该系统的核心节点和用户节点，并在用户节点之间随机生成了多组初始权重相同、大小随机的流组和初始权重不同、大小随机的流组，对该流组调度系统调度流组的功能进行了验证。不同场景的流组调度结果显示，与传统 TCP 相比，该流组调度系统可以减少约 10%~20% 的平均流完成时间。用户还可以通过设定流组权重，对流组进行优先级调度。

5.5.2 数据中心多租户业务链

在多租户数据中心中，不同租户的业务流量往往需要进行一定程度的隔离，常用的隔离方法是将不同租户的流量引流到配置相关隔离策略的防火墙。传统数据中心中，对用户流量进行引流需要更改路由器和交换机的配置，较为繁琐且容易出错。基于 SDN 技术，厂商 D 实现了虚拟服务链技术，以编程的方式指定流量的路由转发路径，并以虚拟化的方式实现防火墙功能，简化了多租户业务链的部署，并以 SDN 验证示范网络边缘网深圳数据中心为试点，搭建虚拟网络环境，对同私有云同网段用户、同私有云不同网段用户、跨私有云用户之间的流量引流和隔离等功能进行了验证。

5.6 新型 SDN 业务应用试点部署与验证

依托于 SDN 验证示范网络，本文成功对上述新型 SDN 业务应用进行了试点部署与验证。验证结果显示，上述新型 SDN 业务应用的实际部署可以达到预期效果，SDN 架构可以实际应用到的专线通信业务、IP 协议过渡、流量监控调度与数据中心多租户服务等领域中。试点部署过程也发现了部分业务应用存在一定的局限性。除了通用的

OpenFlow 协议和 Netconf 协议^[22]，中国联通以及厂商 C、厂商 D 还在其 SDN 控制器和设备之间部署了私有的南向协议，因此 vCPE 智能专线业务、数据中心多租户虚拟网络与服务链业务需要部署在专门的设备和控制器上，无法直接移植到其他 SDN 环境中，通用性较差；SDN/OSPF 混合网络流量工程系统的 SDN 设备需要支持 OpenFlow 混合模式，同时运行 OpenFlow 协议和 OSPF 协议。在对经过 SDN 设备的流量进行分流时，只能为不同的流选择不同的转发路径进行近似分流，不能拆分一条流，无法按照理论算法对流量进行任意比例分流，与理论算法偏差较大。

6 结束语

本文提出了一种依托于 CERNET 的层次化跨区域 SDN 异地验证示范网络试验系统的总体架构，并基于该架构建设了分布在 9 个城市、13 个节点的 SDN 验证示范网络核心网与包含 3 个数据中心的 SDN 验证示范网络接入网，为新型 SDN 技术与应用的验证提供了大规模异地试点部署与验证平台。在此系统上，本文对基于 SDN 的 vCPE 智能专线业务、基于 SDN 的 IPv4/IPv6 过渡技术、SDN/OSPF 混合网络流量工程系统、SDN 流量监控调度应用与两种新型数据中心应用进行了实地部署，对这些新型技术和应用实际落地的可行性进行了验证与示范。

本文的工作也存在一定的局限性。例如，目前 SDN 验证示范网络不支持切片功能，多个并行部署验证的应用可能会互相产生影响；核心网各节点还无法提供虚拟主机服务，在进行应用验证时需要采用物理主机作为测试主机，较为繁琐。在未来工作中，本文将尝试在 SDN 验证示范网络核心网控制器上部署 FlowVisor^[23]，提供切片功能，对并行运行的应用进行一定程度的隔离；同时，在核心网各节点部署提供虚拟主机的服务器，从而简化应用的测试流程。

致谢

本文工作受到国家高技术研究发展计划(“863”计划)(No.2015AA016105)与国家自然科学基金(No.61802092)资助。同时,清华大学、北京大学、北京邮电大学、中国联合网络通信有限公司网络技术研究院、东北大学、西安交通大学、电子科技大学、南京大学、江苏省未来网络创新研究院、武汉大学、上海交通大学、清华大学深圳研究生院、华南理工大学等建设单位相关人员为SDN验证示范核心网交换机进行了部署和维护;清华大学、北京邮电大学、中国联合网络通信有限公司网络技术研究院、江苏省未来网络创新研究院相关人员对本文验证的新型SDN业务与应用进行了开发。在此一并致以衷心的感谢!

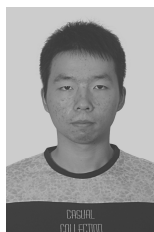
参考文献:

- [1] Open Networking Foundation. Software-defined networking: the new norm for networks[R]. 2012.
- [2] 韦乐平. SDN 的战略性思考[J]. 电信科学, 2015, 31(1): 7-12.
WEI L P. Strategic thinking on SDN [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(1): 7-12.
- [3] HONG C Y, KANDULA S, MAHAJAN R, et al. Achieving high utilization with software-driven WAN[J]. Computer Communication Review, 2013, 43(4): 15-26.
- [4] JAIN S, KUMAR A, MANDAL S, et al. B4: experience with a globally-deployed software defined wan[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4): 3-14.
- [5] SCOTT-HAYWARD S, NATARAJAN S, SEZER S. A survey of security in software defined networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 623-654.
- [6] BERMAN M, CHASE J S, LANDWEBER L, et al. GENI: a federated testbed for innovative network experiments [J]. Computer Networks, 2014, 61(5): 5-23.
- [7] KIM D, KIM J, WANG G, et al. K-GENI testbed deployment and federated meta operations experiment over GENI and KREONET[J]. Computer Networks, 2014, 61(3): 39-50.
- [8] KIM J W, CHA B R, KIM J, et al. OF@TEIN: an OpenFlow-enabled SDN testbed over international SmartX rack sites[J]. Plant & Soil, 2013, 36(1): 17.
- [9] SUÑÉ M, BERGESIO L, WOESNER H, et al. Design and implementation of the OFELIA FP7 facility: the European OpenFlow testbed[J]. Computer Networks, 2014, 61(1): 132-150.
- [10] KANAUMI Y, SHU-ICHI S, KAWAI E, et al. RISE: a wide-area hybrid OpenFlow network testbed[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, E96.B(1): 108-118.
- [11] MAHALINGAM M, DUTT D, DUDA K, et al. Virtual eXtensible local area network (VxLAN): a framework for overlaying virtualized Layer 2 networks over layer 3 networks[Z]. 2014.
- [12] HARKAL V B, DESHMUKH A A. Software defined networking with floodlight controller[J]. International Journal of Computer Applications, 2016: 23-27.
- [13] 王瑾, 李洪峰. 企业网虚拟化(vCPE)技术研究[J]. 邮电设计技术, 2016(11): 51-53.
WANG J, LI H F. Study on the techniques of CPE virtualization (vCPE)[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2016(11): 51-53.
- [14] 黄小红, 赵钦, 陈蔚瀚, 等. 一种基于 SDN 的数据处理方法及装置: 201611083513.9[P]. 2017-03-22.
HUANG X H, ZHAO Q, CHEN W H, et al. A data processing method and device based on SDN: 201611083513.9[P]. 2017-03-22.
- [15] AGARWAL S, KODIALAM M, LAKSHMAN T V. Traffic engineering in software defined networks[C]//2013 IEEE INFOCOM, April 14-19, 2013, Turin, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2013: 2211-2219.
- [16] MOY J. OSPF version 2[J]. Request for Comments, 1998, 28(4): 1.
- [17] GUO Y, WANG Z, YIN X, et al. Traffic engineering in SDN/OSPF hybrid network[C]//IEEE International Conference on Network Protocols, Oct 21-24, 2014, Raleigh, NC, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 563-568.
- [18] 杨帅, 王松生, 檀朝红, 等. 基于 SDN 的流量监控研究[J]. 信息技术, 2016, 10(2): 28-35.
YANG S, WANG S S, TAN C H, et al. SDN-based traffic monitoring study[J]. Information & Communications Technologies, 2016, 10(2): 28-35.
- [19] ZHANG H, SHI X, YIN X, et al. Yosemite: efficient scheduling of weighted coflows in data centers[C]// 2017 IEEE International Conference on Network Protocols, Oct 10-13, 2017, Toronto, ON, Canada. Washington D C: IEEE Computer Society, 2017: 1-2.
- [20] ZHANG H, SHI X, GUO Y, et al. More load, more differentiation — let more flows finish before deadline in data center networks[J]. Computer Networks, 2017: 127.
- [21] MERKEL D. Docker: lightweight Linux containers for consistent development and deployment[J]. Linux Journal, 2014(239).
- [22] ENNS R. NETCONF configuration protocol: RFC 4741[S]. 2006.



- [23] AZODOLMOLKY S, NEJABATI R. Optical FlowVisor: an OpenFlow-based optical network virtualization approach[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition, March 4-8, 2013, Los Angeles, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-3.

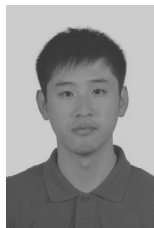
[作者简介]



刘智峰（1996-），男，清华大学硕士生，主要研究方向为软件定义网络、互联网路由。



尹霞（1972-），女，博士，清华大学教授、博士生导师，CCF 高级会员，主要研究方向为互联网体系结构与协议、网络协议测试与形式化方法、互联网路由。



王之梁（1978-），男，博士，清华大学副教授、博士生导师，主要研究方向为网络协议测试与形式化方法、互联网体系结构与协议、软件定义网络。

施新刚（1980-），男，博士，清华大学高级工程师，主要研究方向为网络测量、互联网体系结构与协议、互联网路由。

华一强（1981-），男，博士，中国联合网络通信有限公司网络技术研究院高级工程师，主要研究方向为软件定义网络、数据通信。

黄小红（1978-），女，博士，北京邮电大学副教授、博士生导师，主要研究方向为计算机网络、软件定义网络。

魏亮（1981-），男，博士，江苏省未来网络创新研究院 CDN 团队总监，主要研究方向为软件定义网络、云计算和网络试验平台。

姚姜源（1984-），男，博士，海南大学助理教授，主要研究方向为网络协议测试与形式化方法。

张晗（1990-），男，博士，北京航空航天大学助理教授，主要研究方向为数据中心网络、云计算。

曾曼（1995-），女，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为软件定义网络、下一代互联网。

苏子君（1995-），男，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为软件定义网络、下一代互联网。

刘帅（1994-），男，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为软件定义网络、下一代互联网。