

SDN网络中基于业务划分的路由选择机制

李兵奎¹ 庄雷¹ 马丁^{1,2} 胡颖¹ 王国卿¹ 景晨凯¹

(郑州大学信息工程学院 郑州 450001)¹ (河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001)²

摘要 软件定义网络(SDN)是一种新型的网络架构,其路径是根据全局网络拓扑计算得到的。然而,当前SDN网络中依然存在负载不均衡和不能满足网络流量QoS要求的问题。为此,根据SDN控制器掌握全局网络信息的特点,结合网络感知功能和基于流量的业务划分,利用K最短路径算法,提出一种基于业务划分的路由选择机制。实验结果表明,该机制能够为不同业务类型的数据流选择一条最能满足其QoS要求的路径,并使整个网络达到负载均衡,进而提高了底层网络资源的利用率。

关键词 软件定义网络,业务划分,K最短路径,网络感知

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.026

Routing Mechanism Based on Business Differentiating in Software Defined Network

LI Bing-kui¹ ZHUANG Lei¹ MA Ding^{1,2} HU Ying¹ WANG Guo-qing¹ JING Chen-kai¹

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)¹

(College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)²

Abstract Software defined network is a novel network architecture whose data path is obtained based on the global topology. In current SDN network, load balance and QoS assurance are the crucial issues which are unresolved perfectly. To this end, according to the global network information hold by the SDN controller, we proposed a differentiated business based routing mechanism in which the function of network awareness, the traffic-based business differentiating and the K shortest path algorithm are applied. Experimental results show that this mechanism can choose an optimal path which satisfies the QoS requirements for different types of data traffics, balance the load of entire network and improve the utilization of the underlying network resources.

Keywords Software defined network, Business differentiating, K shortest paths, Network awareness

1 引言

随着互联网的发展和各种新型业务的爆炸式增长,人们对现实网络的需求也在不断地提升,这对网络的可承载能力提出了极大的挑战。传统的IP网络架构存在着安全性、移动性、可管理性、可扩展性等各种各样的问题。对此,社会各界纷纷开始了对未来网络体系结构的研究计划,如GENI^[1], FIRE^[2], JGN2plus^[3]等。其中,最具有前景的是SDN/OpenFlow^[4-5],它是由斯坦福大学提出的应用于未来网络的体系架构,受到了产业界和学术界普遍的关注和认可。软件定义网络(Software Defined Network, SDN)是对未来网络的一场技术变革。

软件定义网络由控制器、交换机和通信协议组成,它将网络的控制平面与数据转发平面进行了分离^[6],控制器与交换

机通过安全通道进行相互通信。控制器具有全局的逻辑视图,交换机变成了简单的转发设备,实现了网络的逻辑集中式控制和可编程性,便于网络管理的实现。OpenFlow^[5]是目前较为主流的通信协议,实现了SDN控制器和底层网络基础设施之间的通信,由开放式网络基金会(Open Network Foundation, ONF)^[7]主导。在SDN网络中对数据包的操作是通过匹配流表项来获得的,若有匹配的流表项,则按其指定的action动作进行处理;否则,交换机向控制器发送流表请求(packet-in)消息,首先控制器根据全局的网络视图进行转发路径计算和流表下发,然后在相应的交换机上进行流表项的安装,最后再根据流表项指定的动作对数据包做出相应的操作。

软件定义网络不同于传统的IPv4/IPv6网络。在传统的网络中,交换机/路由器通过自学习并维持着路由表;而在

到稿日期:2015-11-20 返修日期:2016-02-29 本文受国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB315901),国家自然科学基金资助项目(61379079),河南省科技厅攻关项目(122102210042)资助。

李兵奎(1989-),男,硕士生,主要研究方向为软件定义网络, E-mail: 13938562465@163.com; 庄雷(1963-),女,博士,教授,主要研究方向为网络虚拟化、下一代互联网; 马丁(1978-),男,博士生,讲师,主要研究方向为网络虚拟化、互联网体系结构; 胡颖(1982-),女,博士生,讲师,主要研究方向为网络虚拟化、下一代互联网; 王国卿(1989-),男,博士生,主要研究方向为软件工程; 景晨凯(1991-),男,硕士生,主要研究方向为深度学习。

软件定义网络中,控制平面与转发平面进行了分离,交换机的路由转发功能是根据流表进行的。当前SDN网络中默认的路径计算模块是根据全局网络拓扑,使用以跳数为度量单位的最短路径算法计算得到的。但通过这种方法计算出的路径并没有考虑到链路的可用带宽、带宽利用率、时延、丢包率及数据流本身的业务属性等因素,这样计算出来的路径极有可能不是最佳路径。例如虽然满足了最短路径,但带宽、时延或丢包率却没有得到满足;同时也极有可能存在某条链路被多条最短路径利用的情况,那么这条链路就很容易发生拥塞,从而影响经过本条链路的路径中的数据传传输,这时就存在某些链路处于拥塞状态而另一些链路处于空闲或者低利用率状态的情况,造成网络资源的整体利用率不高,计算出的路径也不能够满足不同网络流量的QoS要求。因此,本文提出一种基于业务划分的路由选择机制,即通过对网络流量进行业务划分,并根据网络感知模块获得的当前底层网络信息,从多条路径中选择一条能够满足其业务需求的最佳路径。

本文第2节对解决SDN网络中负载均衡与QoS问题的多种策略进行了描述;第3节首先介绍了网络流量的业务划分,其次对路径信息进行了形式化描述,然后引入了路径权值公式,最后用伪代码对路由选择算法进行了呈现;第4节对实验及其结果进行了阐述;最后总结全文,并展望下一步工作。

2 相关工作

目前,学术界和产业界也对SDN网络中的路由策略极为关注,并对此做了大量的研究。文献[8]提出了一种关于链路关键性的路由算法,它通过链路的期望平均负载来判定链路的关键性,然后映射为链路的权值并为路由选择提供数据依据,从而实现对网络流量的负载均衡。文献[9]根据媒体生产网络中网络流量可以预测的特点,通过带宽预留的方法达到提高资源利用率和节约成本的目的。文献[10]引入了“虚拟时延”的概念,提出了VL-EDF(Virtual Latency Earliest Deadline First Algorithm)队列调度算法,它可以很好地服务于时延敏感的数据;同时也提出了时延不敏感数据流调度算法LBFS(Latency Based Flow Scheduling Algorithm),其可以对交换节点端口进行监测,在端口流量负载超过设定阈值时,将对应链路上时延不敏感的数据流切换到轻载链路上。文献[11]为了充分利用底层网络中的链路带宽,并减少网络拥塞,当源节点与目的节点间存在多条等价路径时,尽量避免网络中的流量在热点链路上传输,根据链路的路径趋势值表示链路的可能任务量,链路带宽表示链路的传输能力,提出一种基于链路繁忙趋势值的等价多路径选择算法,该算法能够有效地避免多个最短路径树在某条链路上的重叠,从而增大网络的吞吐量,提高网络底层资源的利用率。文献[12]选择一条带宽利用率最小的路径来转发数据,该算法能够有效地缓解网络拥塞,进而提高网络资源的利用率。文献[13]利用控制器掌握全局逻辑视图的优势,当网络中存在拥塞链路时,把发生拥塞的链路从网络拓扑中删除,然后从拥塞链路中选择一条或者多条转移开销最小的数据流,在剩余的拓扑中从数据

流入口处进行重路由,以此解决网络拥塞的问题。文献[14]提出参照网络状态ECMP机制,在SDN控制器中添加网络测量系统信息搜集模块和多路径路由子系统,并在底层网络中添加网络测量子系统。当新流请求路径时,首先计算出源节点与目的节点间的多条等价路径,然后从多条路径中选择一条可用带宽最大的路径作为最佳路径,进而达到避免网络拥塞和提高资源利用率的目的。

大多已有路径选择算法只考虑到了链路的利用率、带宽或时延中的某一个因素,并没有综合考虑网络中数据流的业务属性与路径的可用带宽、带宽利用率、时延、丢包率之间的关系。因此,本文提出了基于业务划分的路由选择机制,即首先采用K最短路径算法计算出多条路径,然后根据不同业务数据流的QoS要求从多条路径中选择一条最佳路径,以达到对网络资源合理、有效的分配,进而提高网络的整体性能。

3 基于业务划分的路由选择机制

现有的SDN控制器如OpenDaylight^[15],Floodlight^[16]等,均提供了用于完成数据转发的模块,但这些模块均采用Dijkstra^[17]最短路径路由策略。这样的路由策略在整体网络资源利用率不高的情况下可能会使局部链路负载过大,导致网络拥塞,从而造成数据丢失和时延增长。

为了避免产生以上问题,本文的路由选择机制首先采用K最短路径寻找出从源节点到目的节点间的多条备选路径,这样就可以有效地实现网络中流量的负载均衡,并且可以根据不同业务流量的需求,从中选择一条最佳路径。

3.1 网络流量业务划分

不同网络流量对QoS的要求也是不相同的,本文把网络中的流量划分成不同的业务类型,进而为其选择一条最佳路径。根据3GPP对网络业务的分类,把网络流量划分为会话类业务、流媒体业务、交互类业务、数据类业务^[18]。

会话类业务:实时类业务,对时延有较高的要求,对丢包率有一定的承受能力。

流媒体业务:实时类业务,对时延和丢包率的要求相对较高。

交互类业务:非实时类业务,对时延和丢包率均有一定的要求。

数据类业务:非实时类业务,对丢包率有较高要求,对时延要求较低。

随着SDN技术的发展,其南向通信协议OpenFlow经历了V1.0,V1.1,V1.2,V1.3,V1.4的演进过程。为了使交换机提供更多的功能,流表项中包头域的长度也在不断增加。本文提出的基于业务划分的路由选择机制是通过数据包中的一个字段实现对其业务类型区分的,在流表项的包头域中存在与之对应的字段,就可以实现本文的路由选择机制。开放式网络基金会ONF把OpenFlow V1.0和V1.3作为长期支持的稳定版本。OpenFlow V1.0的优势是它可以与现在的商业交换芯片兼容,它是目前使用和支持最广泛的协议版本。本文实验中将使用OpenFlow V1.0标准协议,它定义了12

元组作为包头域,如图1所示,包括:入端口、源MAC地址、目的MAC地址、以太网类型、Vlan id、Vlan优先级、源IP地址、目的IP地址、IP协议、ToS字段、TCP/UDP源端口、

Ingress Port	Ether Source	Ether Dst	Ether Type	Vlan id	Vlan Priority	IP src	IP dst	IP proto	IP ToS	TCP/UDP Src Port	TCP/UDP Dst Port
--------------	--------------	-----------	------------	---------	---------------	--------	--------	----------	--------	------------------	------------------

图1 包头域

3.2 路径信息的形式化描述

使用无向图 $G(V, E)$ 表示当前网络拓扑,其中 V 表示 SDN 底层网络中交换机节点的集合, E 表示 SDN 底层网络中链路的集合。用 M 和 N 分别表示交换机节点数量与链路数量,即 $M=|V|, N=|E|$ 。每条从源节点所在交换机 $v_i (1 \leq i \leq M)$ 到目的节点所在交换机 $v_j (1 \leq j \leq M)$ 的路径 P 由一组不重复的链路 $(l_1, l_2, l_3, l_4, \dots, l_n) (1 \leq n \leq M-1)$ 组成。对于 $\forall l_h \in E (1 \leq h \leq N)$, 都有与之对应的链路总带宽、时延、丢包率和可用带宽等信息,它们分别用 $b_{l_h}, d_{l_h}, s_{l_h}, a_{l_h}$ 表示。那么, $\forall l_h \in E$ 的链路带宽利用率 $r_{l_h} = \frac{(b_{l_h} - a_{l_h})}{b_{l_h}} (0 \leq r_{l_h} \leq 1)$, 当带宽利用率达到一定值时,链路的丢包率会显著增加。 a_{l_h} 表示链路 l_h 的剩余可用带宽,由于各个链路的总带宽不尽相同,因此带宽利用率大的不一定可用带宽也大,此参数表示链路的实际可承载能力。路径 P 的总时延 $D(P)$ 为路径中所有链路时延之和,即 $D(P) = \sum_{f=1}^n d_{l_f}$ 。路径 P 的丢包率 $S(P)$ 为路径中所有链路丢包率之和,即 $S(P) = \sum_{f=1}^n s_{l_f}$ 。路径 P 的带宽利用率用 $R(P)$ 表示, $R(P)$ 为路径中链路带宽利用率的最大值,即 $R(P) = \max\{r_{l_h} | l_h \in P\}$, 链路带宽利用率越大,说明这条路径中某条链路处于或即将处于拥塞状态的可能性就越大。路径 P 的可用带宽用 $A(P)$ 表示, $A(P)$ 为路径中链路剩余可用带宽的最小值,即 $A(P) = \min\{a_{l_h} | l_h \in P\}$, 此参数表示路径的最小可承载能力。

在无向图 G 中,通过 K 最短路径算法计算出从节点 $v_i (1 \leq i \leq M)$ 到节点 $v_j (1 \leq j \leq M)$ 的多条路径 $p^1, p^2, \dots, p^q (1 \leq q \leq K)$, 并指定路径带宽利用率上限 X 和路径可用带宽下限 Y 。最优路径需同时满足以下两个条件:

- 1) $R(p^q) \leq X$
- 2) $A(p^q) \geq Y$

其中: $1 \leq q \leq K$ 。

条件 1) 使得路径的带宽利用率不超过上限,这样可以避免局部链路处于拥塞状态而其他链路处于空闲状态;条件 2) 确保最优路径的可用带宽大于所规定的最小值。

3.3 路径权值公式

在选择最优路径时需要综合考虑链路的可用带宽、时延、丢包率、带宽利用率等因素,但由于它们的含义不同,如果不对这些因素做进一步的处理,会对路径权值的计算结果造成很大影响。为了消除因素间的不可比性,需要对这些因素进行标准化,即对每个因素的值进行归一化,这样各个因素就处于同一数量级别,能够对不同的因素进行统一考量。本文采用 min-max (Min-Max Normalization)^[19] 进行标准化:

$$x^\Delta = \frac{x - \min}{\max - \min}$$

TCP/UDP 目的端口。其中,包头域中的 ToS 字段对应数据包中的 ToS 字段,所以用此字段来区分网络中数据流的业务类型。

其中, \max 为数据中的最大值, \min 为数据中的最小值。则

$$A(X^\Delta) = \frac{A(p_q) - \min\{A(\text{path})\}}{\max\{A(\text{path})\} - \min\{A(\text{path})\}}$$

$$D(X^\Delta) = \frac{D(p_q) - \min\{D(\text{path})\}}{\max\{D(\text{path})\} - \min\{D(\text{path})\}}$$

$$S(X^\Delta) = \frac{S(p_q) - \min\{S(\text{path})\}}{\max\{S(\text{path})\} - \min\{S(\text{path})\}}$$

$$R(X^\Delta) = \frac{R(p_q) - \min\{R(\text{path})\}}{\max\{R(\text{path})\} - \min\{R(\text{path})\}}$$

当存在多条可选路径时,从 packet-in 消息中获得 ToS 字段,进而判断数据包属于哪个业务类型,然后进入相应的路径权值计算公式。权值计算通式为:

$$W(p_q) = \beta * A(X^\Delta) - \gamma * D(X^\Delta) - \eta * S(X^\Delta) - \alpha * R(X^\Delta), p_q \in \text{Path}(v_i, v_j)$$

其中,可用带宽与权值公式正相关,所以采用正值;而其他链路属性与权值公式都是负相关,所以采用负值。每类业务对带宽利用率、可用带宽、时延、丢包率的要求各不相同,所以在每种业务类型权值公式中 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 的值也是不同的,但都遵循 3GPP 划分的业务属性要求。对于实时类业务,尽可能找到一条既满足时延相对较小又满足带宽要求的路径;对于非实时类业务,尽可能找到一条带宽相对较大而丢包率又相对较低的路径。本文对各类业务权值公式参数 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 的设定遵循表 1 所列的参数关系。

表1 参数关系

业务类别	参数关系
会话类业务	$\gamma > \alpha > \beta > \eta$
流媒体业务	$\gamma > \eta > \alpha > \beta$
交互类业务	$\eta > \gamma > \beta > \alpha$
背景类业务	$\eta > \beta > \alpha > \gamma$

3.4 路由选择算法描述

在本文的路由选择机制中,当控制器接收到 packet-in 消息时,首先利用 K 最短路径算法对源节点和目的节点间的路径进行计算。如果路径不存在,则返回空。如果路径条数为 1,则返回此路径。如果路径条数大于 1,则从中选择出满足大于可用带宽阈值且小于带宽利用率阈值的路径组,若路径组中的路径条数大于 1,则根据 ToS 字段进入相应的权值公式,对各个路径进行权值计算,然后从中选择一条权值最大的路径作为最佳路径并返回此路径;当路径组中的路径条数等于 1 时,则返回此路径;否则,为了减小对底层网络资源的占用及对其他路径的影响,从多条路径中选择一条路径最短且可用带宽相对较大的路径并返回此路径。路由选择如算法 1 所示。

算法 1 路由选择算法

输入:底层网络拓扑 $G(V, E)$, V 表示 SDN 底层网络中交换机节点的集合, E 表示 SDN 底层网络中链路的集合; packet-in 消息
输出:路径 Path

1. 通过 K 最短路径从 G 中计算出路径组 Paths;
2. if Paths.size() $>$ 1 then
3. 从 Paths 路径组中选出满足大于可用带宽阈值且小于带宽利用率阈值的路径集合 PS;
4. if PS.size() $>$ 1 then
5. 从 packet-in 消息中获得 ToS 字段;
6. for all P \in PS do
7. 获得路径 P 的可用带宽、丢包率、时延、链路利用率, 然后利用 $x^{\Delta} = \frac{x - \min}{\max - \min}$ 进行归一化;
8. 根据 ToS 值, 利用相应的权值公式计算路径权值;
9. 把路径 P 和权值存入 PWS 路径组;
10. end for
11. Path \leftarrow 从路径组 PWS 中选择一条权值最大的路径;
12. else if PS.size() $=$ 1 then
13. Path \leftarrow PS;
14. else
15. Path \leftarrow 从 Paths 中选择一条最短且可用带宽相对较大的路径;
16. end if
17. else if Paths.size() $=$ 1 then
18. Path \leftarrow Paths;
19. else
20. Path \leftarrow null;
21. end if
22. return Path;

4 实验与对比分析

4.1 实验场景设置

实验采用 Floodlight 控制器, 利用 mininet^[20] 网络仿真工具对底层网络进行搭建。Floodlight 控制器的功能实现是基于模块的, 可以在控制器中添加网络感知模块对底层网络信息进行采集。目前 OvS(Open vSwitch)^[21] 交换机已经部署了 sFlow^[22] 功能, 在使用时只需开启此功能并对其做相应的配置, 就可以采集到实时的底层网络信息。网络感知模块能够向 sFlow 采集器发送 http 请求, 从而获得实时的底层带宽信息。同时, 网络感知模块还能够从底层拓扑中读取网络链路的时延及丢包率等信息。

本文实验拓扑如图 2 所示, 其中包括 6 台 Open vSwitch 交换机(s1-s6)和 10 台主机(h1-h10)。底层网络资源初始化链路带宽在图 2 中标出, 如: 30M, 50M, 60M, 初始化链路时延如表 2 所列, 初始化链路丢包率如表 3 所列。本实验中各业务类型权值计算公式中参数 $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ 的赋值如表 4 所列。

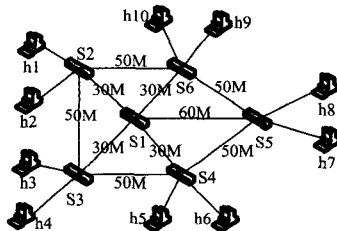


图 2 实验拓扑

表 2 链路时延/ms

时延大小	链路					
3	s2 \rightarrow s3	s2 \rightarrow s6	s3 \rightarrow s4	s4 \rightarrow s5	s6 \rightarrow s5	
2	s2 \rightarrow s1	s3 \rightarrow s1	s1 \rightarrow s6	s1 \rightarrow s4	s1 \rightarrow s5	

表 3 链路丢包率/%

丢包率	链路		
1	s1-s4	s1-s5	s1-s6

表 4 参数赋值

业务类别	α	β	γ	η
会话类业务	4	5	2	1
流媒体业务	4	3	7	6
交互类业务	4	5	6	7
背景类业务	2	3	1	5

为了测试本文路由选择机制的性能, 对 mininet 进行二次开发, 使其支持 Iperf^[23] 在两主机间随机发送各种业务类型的数据流。在实验中, 源主机组 h1-h4 向目的主机组 h5-h10 随机地选择主机对, 并发送服从 [3M, 8M] 上均匀分布的 4 种业务类型的数据流, 数据流业务类型通过 ToS 值指定, 对应关系如表 5 所列。

表 5 业务类型与 ToS 值的对应关系

业务类型	ToS 值
会话类业务	4
流媒体业务	8
交互类业务	16
背景类业务	32

4.2 实验结果对比

本文提出的基于业务划分的路由选择机制可以根据底层网络的当前信息, 综合考虑路径的时延、丢包率、可用带宽、带宽利用率, 选择一条最适合某种业务类型的路径。本文路由选择机制与参照网络状态 ECMP 机制^[14]、随机多路径路由机制^[14]和最短路径路由机制^[17]进行了对比。其中, 参照网络状态 ECMP 机制是从等价路径中选择一条可用带宽最大的路径; 随机多路径路由机制是从等价路径中随机选择一条路径。经多组实验得到各种路由选择机制对应的 4 种业务类型的丢包率及时延信息, 如图 3、图 4 所示。

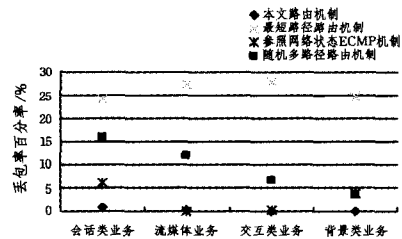


图 3 丢包率

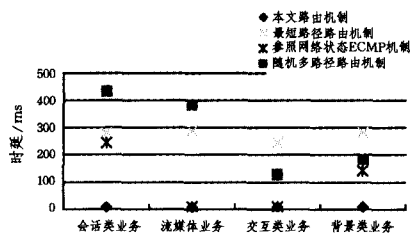


图 4 时延

从图 3、图 4 中可以看出, 本文路由机制优于其他 3 种路由机制。本文路由机制和参照网络状态 ECMP 机制的整体吞吐量相当, 但后者只能按可用带宽进行选路, 并没有考虑到数据流本身的 QoS 要求, 同时非实时类业务也不能为实时类业务预留网络资源, 所以丢包率和时延整体比本文路由机制

高。随机多路径路由机制的性能比本文路由机制更差,它表现出的效果很不稳定,容易导致局部链路处于拥塞状态,并且随机选择的路径对其他路径的影响也比较大,但其整体性能优于最短路径路由策略。最短路径路由策略的性能最差,因为从源节点到目的节点始终选择的是固定的路径,最容易导致链路发生拥塞,不能很好地做到对网络流量的负载均衡。

本文路由机制可以按照网络流量的业务类型合理分配底层网络资源,对时延要求较高的业务流会选择时延相对小的路径,对丢包率要求较高的业务流会选择丢包率相对低的路径,并且非实时类业务能够为实时类业务预留网络资源。

结束语 网络中有很多不同业务属性的流量,并且这些流量分布不均且具有突发性。由于当前路由机制的不灵活性,其没有把网络中的流量分布和流量本身的业务属性相结合,在链路总体资源利用率不高的情况下,局部链路容易出现拥塞的状况,这样既降低了网络的整体性能,又浪费了网络中的闲置资源。为了避免不同业务属性的网络流量盲目竞争有限的网络资源,同时为其选择一条适合自身需求的路径。基于业务划分的路由选择机制,结合了SDN的全局网络视图和网络感知功能,充分考虑了底层网络的使用情况、链路本身的性质和数据流的业务属性等多个因素,提高了网络资源的整体利用率,避免了局部链路出现拥塞的状况,同时有效地满足了各类业务流的QoS要求。

下一步将对网络流量的业务类型做出更细的划分,并使用机器学习算法根据底层网络信息动态地为路径权值公式的参数赋值,使其成为一种更优的路由选择机制。

参 考 文 献

- [1] ELLIOTT C. GENI: Opening up new classes of experiments in global networking[J]. IEEE Internet Computing, 2010, 14(1): 39-42.
- [2] GAVRAS A, KARILA A, FDIDA S, et al. Future internet research and experimentation: the FIRE initiative[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(3): 89-92.
- [3] JGN2plus [EB/OL]. [2015-5-6]. <http://www.jgn.nict.go.jp/english/index.html>.
- [4] ONF Market Education Committee. Software-defined networking: The new norm for networks[OL]. <http://www.mendeley.com/catalog/softwaredefinednetworking-new-norm-networks-white-paper>.
- [5] MCKEOWN N, ANDERSON T, BALAKRISHNAN H, et al. OpenFlow: enabling innovation in campus networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, 38(2): 69-74.
- [6] ZUO Q Y, CHEN M, ZHAO G S, et al. Research on OpenFlow-based SDN technologies[J]. Journal of Software, 2013, 24(5): 1078-1097. (in Chinese)
左青云, 陈鸣, 赵广松, 等. 基于 OpenFlow 的 SDN 技术研究[J]. 软件学报, 2013, 24(5): 1078-1097.
- [7] Open Networking Foundation [EB/OL]. [2015-5-6]. <https://www.open-networking.org>.
- [8] TANG Z G, LI L M, YU H F. Link Criticality Routing Algorithm for MPLS Traffic Engineering[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(5): 1187-1190. (in Chinese)
唐治果, 李乐民, 虞红芳. 针对 MPLS 网络流量工程的链路关键性路由算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1187-1190.
- [9] BARSHAN M, MOENS H, FAMAHEY J, et al. Algorithms for advance bandwidth reservation in media production networks [C]// 2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM). IEEE, 2015: 183-190.
- [10] WANG H C. Research on the Data Transmission Delay in the Smart Grid Communication Networks[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
王红川. 智能电网通信网中数据传输时延问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [11] TIAN M, LAN J L, ZHU X Y. Equal-Cost-Multi-Path Routing Algorithm Based on Link Busyness Potential Value [J]. Journal of Information Engineering University, 2010, 11(2): 190-195. (in Chinese)
田铭, 兰巨龙, 朱宜勇. 一种基于链路繁忙趋势值的等价多路径选择算法[J]. 信息工程大学学报, 2010, 11(2): 190-195.
- [12] YANG X Q, ZHANG L F, CAO Q H, et al. Routing algorithm based on link bandwidth utilization rate[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(9): 2422-2425. (in Chinese)
杨晓琴, 章丽芳, 曹庆皇, 等. 基于链路带宽利用率的路由选择算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(9): 2422-2425.
- [13] ZHU C, HONG P L, ZHANG H. Congestion Management Related Traffic Attribution in OpenFlow[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(4): 727-731. (in Chinese)
朱超, 洪佩琳, 张泓. 业务属性相关的 OpenFlow 网络拥塞管理机制[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(4): 727-731.
- [14] DONG Q. study of routing strategy in advanced network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
董青. 增强型网络路由策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [15] OpenDaylight [EB/OL]. [2015-5-6]. <https://www.opendaylight.org>.
- [16] Floodlight [EB/OL]. [2015-5-6]. <http://www.projectfloodlight.org>.
- [17] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.
- [18] Quality of Service (QoS) concept and architecture [EB/OL]. [2015-5-6]. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23107.htm>.
- [19] Min-Max Normalization [EB/OL]. [2015-5-6]. <http://webdata-analysis.net/data-analysis-method/data-normalization>.
- [20] Mininet [EB/OL]. [2015-5-6]. <http://mininet.org>.
- [21] Open vSwitch [EB/OL]. [2015-5-6]. <http://openvswitch.org>.
- [22] WANG M A, LI B C, LI Z P. sFlow: Towards resource efficient and agile service federation in service overlay networks [C]// 24th International Conference on Distributed Computing Systems, 2004. IEEE, 2004: 628-635.
- [23] Iperf [EB/OL]. [2015-5-6]. <https://iperf.fr>.