软件定义网络中基于网络切片和ILP模型的路由方案

庞 博[1] 金乾坤[2] 合尼古力·吾买尔[3] 齐兴斌[4]
(商丘职业技术学院机电工程系 河南 商丘 476100)[1] (北京理工大学软件学院 北京 100081)[2]
(南京航空航天大学机电工程学院 南京 210016)[3] (山西大学计算机工程系 太原 030013)[4]

摘 要 针对软件定义网络(SDN)中数据层的路由优化问题,提出一种基于网络切片和整数线性规划(ILP)多约束优化的路由方案。首先,根据多租户业务的链路需求,基于Kruskal算法对数据层中的链路资源进行网络切片,尽可能形成相互隔离的租户子网络。然后,在考虑链路约束和租户业务的服务质量(QoS)约束下,以最小化传输延迟为目标,构建一个ILP整数线性规划(ILP)路由优化模型,并获得最佳的路由方案。仿真结果表明,所获得的路由方案具有较少的共享链路,有效降低了链路拥塞和传输延迟。

关键词 软件定义网络,路由优化,QoS约束,网络切片,整数线性规划,Kruskal算法
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.04.023

Routing Scheme Based on Network Slicing and ILP Model in SDN

PANG Bo[1] JIN Qian-kun[2] HENIGULI·Wu Mai Er[3] QI Xing-bin[4]
(Department of Mechanical Engineering,Shangqiu Polytechnic,Shangqiu,Henan 476100,China)[1]
(School of Software,Beijing Institute of Technology,Beijing 100081,China)[2]
(College of Mechanical and Electrical Engineering,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 210016,China)[3]
(School of Computer Engineering,Shanxi University,Taiyuan 030013,China)[4]

Abstract For the issues of the routing optimization problem in data layer of software defined network(SDN),a routing scheme based on network slicing and integer linear programming (ILP) multi-constrained optimization was proposed. Firstly,the Kruskal algorithm is used to slice the link resources in the data layer according to the link requirement of multi-tenancy service,so as to form the isolated sub-network as far as possible. Then,an ILP integer linear programming(ILP) routing optimization model was constructed under considering the link constraint and the QoS constraint of the tenant service,to minimize the transmission delay and obtain the optimal routing scheme. Simulation results show that the proposed routing scheme has fewer shared links,and it can effectively reduce the link congestion and transmission delay.

Keywords Software defined network,Routing optimization,QoS constraints,Network slicing,Integer linear programming,Kruskal algorithm

1 引言

软件定义网络(Software-Defined Networks,SDN)[1]是一种新型的网络架构,能将控制平台从数据平台中解耦出来,使得数据平台得到极大的简化。另外,其可使用控制器对网络进行逻辑上的集中式管理,为应对网络规模的快速增长提供了一个基础平台[2-3]。

路由机制对SDN网络的服务效率和质量起着重要的作用。为了减小全网数据流的传输延迟,对数据流进行调度、对网络链路资源进行合理的分配成为了路由机制的主要目标。由于SDN网络架构与传统网络有较大区别,因此大部分传统路由协议并不适用于SDN[4-5]。目前,可用于SDN的路由协议主要有路由信息协议(Routing Information Protocol,RIP)[6]和开放式最短路由优先(Open Shortest Path First,OSPF)协议[7],但这些协议都存在一些局限性,例如OSPF协议仅以最短路由为优化目标进行路由选择,在多租户情况下致使一些链路被重叠使用,造成网络拥堵,增加了传输延迟[8]。在SDN网络路由协议的制定过程中,不仅要满足租户的服务质量(Quality of Service,QoS)要求[9],还需要考虑网络的各种约束条件,如容量、丢包率等约束;另外,SDN网络中,租户业务程序的类型多种多样,有突发性的实时业务、多媒体(例如视频和声音)传输业务等[10],这些业务所产生的流量具有较强的不确定性。因此,路由协议需要对突发流量进行及时分配,以支持这些业务。

到稿日期:2017-04-05 返修日期:2017-06-22 本文受河南省教育厅高等学校重点科研项目(18B120004),河南省教育厅高等学校重点科研项目(16B520009)资助。

庞 博(1985-),男,硕士,讲师,主要研究方向为网络安全、路由算法,E-mail:pangbohnsq@126.com(通信作者);**金乾坤**(1968-),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络;**合尼古力·吾买尔**(1976-),女,博士生,教授,主要研究方向为计算机网络;**齐兴斌**(1976-),男,硕士,副教授,主要研究方向为计算机网络。

为此，针对 SDN 网络结构的特点，提出一种基于网络切片和整数线性规划(Integer Linear Programming，ILP)多约束优化的路由方案。主要创新点在于：

1)在路由选择前，先根据租户的业务情况对 SDN 网络的数据层进行网络切片，这样能够最小化各租户链路之间的交集，为后续路由选择中实现较低的链路拥塞提供了基础。

2)在网络切片中，将网络构建成一个加权连通图，以便于采用一种优秀的最小生成树算法——Kruskal 算法来实现网络切片。

3)在路由选择的过程中，考虑链路和业务 QoS 方面的多种约束，构建了一个 ILP 路由选择模型，从而获得性能均衡的最佳方案。

2 SDN 系统模型

2.1 SDN 架构

SDN 体系结构分为 3 层，包括管理应用层、控制层和数据层[11]，如图 1 所示。数据层由多个交换机设备组成，负责数据的处理和转发，并通过 OpenFlow 协议[12]与控制层进行通信。控制层由一个集中控制器构成，负责向交换机分配转发规则，并执行整个网络的监管。管理应用层由若干 SDN 应用和满足不同租户业务 QoS 要求的管理工具构成。

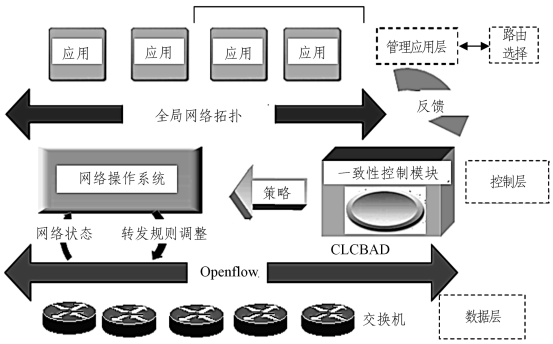


图 1 SDN 的体系结构

Fig. 1 Architecture of SDN

本文的目标是设计一种路由选择算法，在满足所有租户业务的 QoS 要求下，对租户业务的流量路由进行选择并合理分配流量，以最大化地隔离开 SDN 架构中多租户所使用的链路资源，避免因链路冲突而导致的拥塞。文中所涉及的符号如表 1 所列。

表 1 文中的符号及含义

Table 1 Symbols and their meanings

符号	定义
$G=(V,E)$；$\bar{G}=(V,\bar{E})$	SDN 拓扑图 G 和补图 $\bar{G}$
$n\in N$	租户集，$\|N\|$ 个租户
$G_n=(V_n,E_n)$	租户的切片子网
$w_n^{\max}$	子网 G_n 的最大允许路由权重
$W(G_n)$	子网 G_n 支持的权重
$H_{n,f}$	流量 $f\in F^n$ 的抖动约束
$p_{n,f}^{\max}$	流量 $f\in F^n$ 的丢包率约束
$D_{f,i}^{q,n}$	流量 $f\in F^n$ 在节点 i 的排队延迟
$p_{f,i,j}^n$	链路 $(i,j)\in E_n^f$ 的丢包率
c_{ij}	链路 $(i,j)\in E$ 的链路容量
$D_{n,f}^{\max}$	流量 $f\in F^n$ 的总延迟约束

2.2 数据层的网络模型

SDN 的数据层可用一个无向网络图模型 $G=(V,E)$ 来表示[13]，其中 V 表示交换机集合，$|V|$ 为交换机数量；E 表示链路集合，$|E|$ 为链路数量。N 表示租户集合，$|N|$ 个租户共享同一个 SDN。在选择租户业务的路由前，需要将物理网络虚拟成多个子网络，尽可能使各租户所用资源间实现隔离。

设图 $G'=(V',E')$ 为图 G 的子图(子网络)。图 G 是一个全连通图，即图中的任何两点间都至少存在一条通路连接。此外，图 G 的补图表示为 $\bar{G}=(V,\bar{E})$，G 具有与图 G 相同的节点和图 G 中不包含的边。无向图 G 的最小生成树包含连接每个节点的最小权重边集。

3 网络链路切片

在分配网络链路资源之前，需要根据租户的情况对网络链路资源进行切片。网络链路切片的目的是实现多租户间拓扑资源的划分，尽量实现资源的隔离。具体来说，SDN 拓扑图 G 上有 $|N|$ 个租户，在满足租户业务的 QoS 约束下，每个租户的子网 $G_n=(V_n,E_n)$ 之间应最小化共享边数(即 $|E_n\cap E_m|\to 0,\forall 1\leqslant n\leqslant m\leqslant |N|$)。

所有租户的权重约束为：

$$W(G_n)<w_n^{\max},\forall n\in N \tag{1}$$

其中，$w_n^{\max}$ 表示子网 n 的最大允许路由权重，$W(G_n)$ 表示在所有现有路由支持下的子网的权重。请注意，每个子网都必须是连通图，即子网中每对节点都能够互相通信。

为了实现租户间资源的隔离，每个子网最好是其他 $|N|-1$ 个子网图并集的补图，即 $G_n\subseteq\bigcap_{k=1,k\neq n}^{N}\bar{G}_k$。通常很难实现边不相交，尤其当存在许多租户共享同一个 SDN 中的多条边时。因此，一种实用的方法是允许存在一定数量的共享边，但需要使其最小化。那么，网络切片的目标函数为：

$$\min_{\{G_n;\forall n\in N\}}\sum_{1\leqslant n\leqslant m\leqslant |N|}|E_n\cap E_m| \tag{2}$$

网络链路切片旨在最小化租户间的共享边数，以最小化多租户业务间的干扰。为此，基于 Kruskal 算法[14]提出了一种网络切片算法，如算法 1 所示。Kruskal 算法是一种基于贪婪策略求解加权连通图的最小生成树算法。

算法 1 网络链路切片算法

输入：拓扑结构 G；各子网权重 $w_1^{\max},\cdots,w_N^{\max}$

输出：子网 $G_1,\cdots,G_N$

1. 在 G%上运行 Kruskal 算法，得到 G 的最小生成树；
2. 将检索到的边添加到 G_N 中；
3. 找到路由权重值大于 $w_N^{\max}$ 的源-目的对(u，v)；
4. for 检索到源-目的地址对(u，v) do
5. when (u，v)间的路由权重值$>w_N^{\max}$ do
6. 在 G_N 上运行 Kruskal 算法，检索源-目的地址对(u，v)；
7. 将检索到的边加入 G_N；
8. end
9. end

4 利用 ILP 模型的路由优化

完成对多租户的网络链路切片后，在考虑多种链路约束和 QoS 要求下，需要根据租户的具体业务，将网络路由选择问题规划成一个 ILP 模型，从而在各子网中选择出最佳通信路由，并合理分配流量，以实现最低的数据传输延迟。

4.1 约束条件

SDN 中，以租户业务程序的转发流量来表征数据包。设定

$X^n_{f,i,j}$ 表示链路 $(i,j)\in E^f_n$ 的数据包传输速率；f 为租户子网 n 中的业务流量；λ^n_f 表示源节点 s^n_f 到目的节点 d^n_f 的数据包到达率，其中 $f\in F^n$，$n\in N$。因此，路由约束为：

$$X^n_{f,i,j}=0,\ \forall\,(i,j)\notin E^f_n,\ f\in F^n,\ n\in N \tag{3}$$

式(3)意味着，如果子网中的某条链路没有包含在某一业务流量所需的链路中，则将该特定业务流量在该条链路上的数据包速率设置为 0。此外，$c_{i,j}$ 表示给定链路 $(i,j)\in E$ 的容量。那么，链路容量约束为：

$$\sum_{n\in N}\sum_{f\in F^n}X^n_{f,i,j}\leqslant c_{ij} \tag{4}$$

根据流量守恒，节点的输出流量等于从邻节点流入的流量[15-16]。那么，流量守恒约束为：

$$\sum_{j:(i,j)\in E^f_n}X^n_{f,i,j}-\sum_{j:(j,i)\in E^f_n}X^n_{f,j,i}=\lambda^n_f I_{\{i=s^n_f\}}$$
$$\forall\, i\neq d^n_f,\ f\in F^n,\ n\in N \tag{5}$$

其中，d^n_f 表示子网 n 中业务流量 f 的目的地；$I\{\cdot\}$ 为指示函数，当事件发生时其值为 1，否则为 0。

为了支持各租户业务的端到端 QoS 要求，还需要设定以下 3 个约束：最大允许延迟 $D^{\max}_{n,f}$、延迟抖动 $H_{n,f}$ 和丢包率 $p^{\max}_{n,f}$。QoS 约束分别表示如下：

$$D^n_f=\sum_{(i,j)\in E^f_n}\left(\frac{1}{X^n_{f,i,j}}+D^{q,n}_{f,i}\right)<D^{\max}_{n,f} \tag{6}$$

$$var(D^n_f)<H_{n,f} \tag{7}$$

$$\prod_{(i,j)\in E^f_n}p^n_{f,i,j}<p^{\max}_{n,f} \tag{8}$$

其中，$\frac{1}{X^n_{f,i,j}}$ 和 $D^{q,n}_{f,i}$ 分别为传输率和排队延迟；$var(\cdot)$ 为延迟方差；$p^n_{f,i,j}$ 为链路丢包率。

4.2　ILP 模型

为了在给定的链路容量和租户 QoS 要求下进行路由选择和流量分配，将该问题构建成一个 ILP 模型[17]。目标函数为将所有 N 个租户业务流量的网络传输延迟总和 D^* 最小化，即：

$$\sum_{n\in N}\min_{\{X^n_{f,i,j};\,\forall\,(i,j)\notin E^f_n,\,f\in F^n\}}D^n_f \tag{9}$$

为此，构建 ILP 模型为：

目标：$\sum_{n\in N}\min_{\{X^n_{f,i,j};\,\forall\,(i,j)\notin E^f_n,\,f\in F^n\}}D^n_f$

约束于：

$X^n_{f,i,j}=0$；$\sum_{n\in N}\sum_{f\in F^n}X^n_{f,i,j}\leqslant c_{ij}$；$\sum_{j:(i,j)\in E^f_n}X^n_{f,i,j}-\sum_{j:(j,i)\in E^f_n}X^n_{f,j,i}=\lambda^n_f I_{\{i=s^n_f\}}$；$D^n_f=\sum_{(i,j)\in E^f_n}\left(\frac{1}{X^n_{f,i,j}}+D^{q,n}_{f,i}\right)<D^{\max}_{n,f}$；$var(D^n_f)<H_{n,f}$；

$\prod_{(i,j)\in E^f_n}p^n_{f,i,j}<p^{\max}_{n,f}$

5　仿真及分析

5.1　仿真设置

为了评估提出的 SDN 路由算法的有效性，采用 Sprint 网络拓扑结构[1)]（25 个节点和 53 条链路）作为 SDN 基础设施。Sprint 网络模型提供了各链路的容量、延迟、丢包率等数据，如图 2 所示。利用 Matlab 软件构建网络模型，并利用 LINGO 求解器工具来求解 ILP 问题。假定在基础设施上有 3 个租户运作。其中，租户 1 执行实时业务，并产生突发性流量，采用帕累托分布来模拟流量发生量；租户 2 和租户 3 执行非实时业务，采用指数分布来模拟流量发生量。

1) https://www.sprint.net/performance/

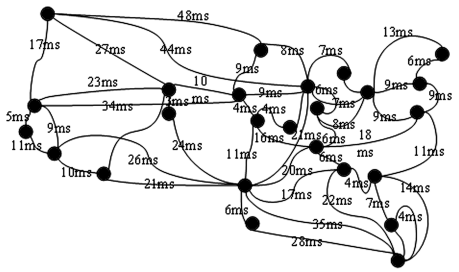


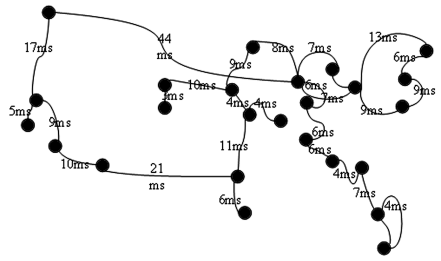
图 2　实时 Sprint 网络的拓扑结构

Fig. 2　Topology of real-time Sprint network

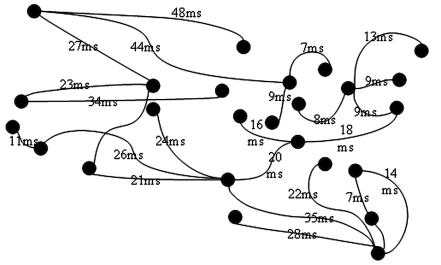
将一个遵循参数为 α 和 x_m 的帕累托分布的随机变量表示为 $X\in PAP(\alpha,x_m)$，则 $P(X>x)=(x_m/x)^\alpha$。将一个遵循参数为 λ 的指数分布的随机变量表示为 $X\in EXP(\lambda)$，那么 $P(X>x)=\mathrm{e}^{-\lambda x}$。基于此，设定租户 1 业务的流量遵循 $PAP(1.5,10)$，租户 2 业务的流量遵循 $EXP(0.2)$，租户 3 业务的流量遵循 $EXP(0.4)$。另外，将允许的最大路由延迟作为最大路由权重。这里，设定各租户的权重值分别为 100 ms，400 ms，500 ms。

5.2　网络链路切片

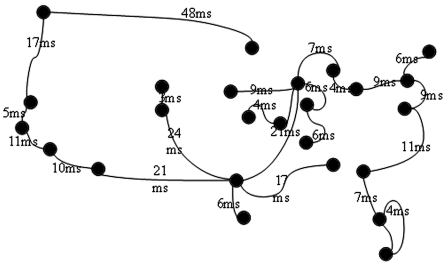
首先，需要对网络链路资源进行切片，以获得具有最少共享链路的各租户链路子网图。图 3(a)－图 3(c)分别给出了运行切片算法后，租户 1－租户 3 的子网。



(a) 租户 1 的子网



(b) 租户 2 的子网



(c) 租户 3 的子网

图 3　各租户的子网

Fig. 3　Subnets of each tenant

图 4 给出了 3 个租户的共享和专属链路，共享链路用虚线表示。

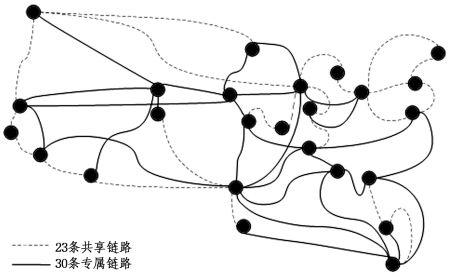


图 4 3 个租户的共享链路和专属链路

Fig. 4 Shared link and exclusive link of three tenants

对于这些共享链路，通过提出的路由选择算法进行流量分配，在约束条件下尽量避免在共享链路中传输数据，以降低网络拥堵和传输延迟。

5.3 路由选择的性能分析

将提出的路由方法与其他 2 种传统路由方法即文献[7]提出的基于 OSPF 的流量工程方法(OSPF-TE)和随机路由选择方法进行比较。其中，OSPF-TE 基于最短路由算法来决定路由。本文从共享链路数量和拥塞链路延迟 2 个方面来评估各路由方案的性能。

图 5 显示了 3 个租户业务共同运作时，SDN 中的共享链路数量随时间的变化结果。其中，当设置 2 个租户共用一条链路时，共用链路数加 1；当 3 个租户都共用一条链路时，共用链路数加 2。从图 5 可以看出，不同时间段的租户流量不同，从而共享链路的使用情况也不同。其中，OSPF-TE 和随机方法的共享链路数都较多。而本文方案可以通过网络管理程序来使共享链路的数量保持在较小的值，从而实现更好的租户隔离，降低网络拥塞。这是因为本文方案构建的 ILP 路由选择模型根据当前的链路容量来优化路由选择，尽量避免选择流量较多的共享链路，使得即使在未来租户业务流量很大时，也能够提供更多的带宽。总之，本文方案最大程度地降低了共享链路的使用，实现了租户链路的隔离，允许租户更多地输入流量。

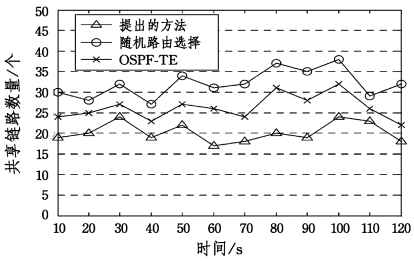
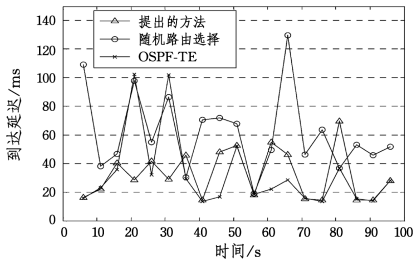


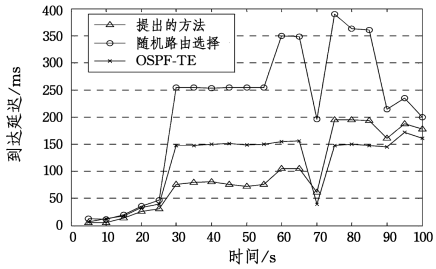
图 5 各种路由选择方法的共享链路数量

Fig. 5 The number of shared links for various routing methods

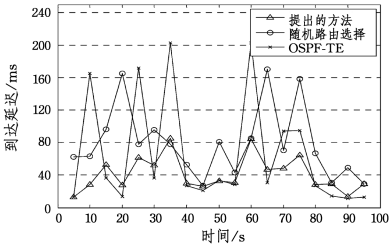
图 6 给出了 3 个租户业务中流量到达的延迟。需要注意的是，租户 1 具有实时业务，带来了更多的突发性流量，因此比租户 2 和租户 3 对非实时流量的延迟要求更高。结果表明，由于具有较大且高波动的延迟，导致 OSPF-TE 和随机方案中的延迟超过 100ms，不能满足租户 1 的需求，且对租户 2 和租户 3 的业务也具有较大的延迟。另一方面，本文方案为 3 个租户都提供了较小且低波动的延迟，保障了其有效性。总之，本文方案能够满足 SDN 中路由选择的需求，最大程度上降低了传输延迟，实现了多租户业务间的有效传输。



(a)租户 1 的子网



(b)租户 2 的子网



(c)租户 3 的子网

图 6 在各租户业务的子网中数据包端到端的平均延迟

Fig. 6 Average delay of data packets from end to end in each subnet of tenant

为了验证所选择的路由对网络吞吐量的影响，租户 1 采用帕累托分布来模拟流量的发生量，流量范围为 2～8 Mbps；租户 2 和租户 3 采用指数分布来模拟流量发生量，流量范围为 2～4 Mbps。各路由方法下的整体网络吞吐量如图 7 所示。可以看出，本文提出的方法所获得的网络吞吐量最大，这得益于最优网络路由的选择。

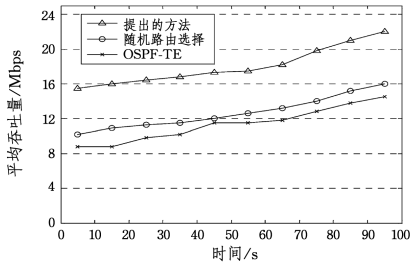


图 7 网络的平均吞吐量

Fig. 7 Average throughput of network

结束语 本文提出了一种多约束感知的 SDN 路由选择方案。基于 Kruskal 算法对数据层中的链路资源进行网络切

片,在考虑链路和 QoS 约束的条件下,以最小化传输延迟为目标,通过 ILP 路由优化模型来求解最佳路由。在实时 Sprint 网络拓扑结构上进行仿真实验,将所提路由方案与传统路由方案进行比较,结果证明了本文方案能够有效降低链路拥塞和传输延迟并提高网络吞吐量。

参 考 文 献

[1] ZHANG C K,CUI Y,TANG H Y,et al. State-of-the-Art Survey on Software-Defined Networking (SDN) [J]. Journal of Software,2015,26(1):62-81. (in Chinese)
张朝昆,崔勇,唐翯祎,等. 软件定义网络(SDN)研究进展[J]. 软件学报,2015,26(1):62-81.

[2] LIU J,HUANG T,ZHANG C,et al. Research on network virtualization slicing mechanism in SDN-based testbeds[J]. Journal on Communications,2016,37(4):159-171. (in Chinese)
刘江,黄韬,张晨,等. SDN 试验床网络虚拟化切片机制综述[J]. 通信学报,2016,37(4):159-171.

[3] NONG H W,HUANG C H,HUANG X P. SDN-based Multipath Routing Algorithm for Fat-tree Data Center Networks [J]. Computer Science,2016,43(6):32-34. (in Chinese)
农黄武,黄传河,黄晓鹏. 基于 SDN 的胖树数据中心网络的多路径路由算法[J]. 计算机科学,2016,43(6):32-34.

[4] DUAN X,WANG X. Authentication handover and privacy protection in 5G hetnets using software-defined networking [J]. Communications Magazine IEEE,2015,53(4):28-35.

[5] WANG C Z,LUO C,CHEN H W. Optimal path allocation algorithm based on load balancing for SDN[J]. Application Research of Computers,2016,33(8):2462-2466. (in Chinese)
王春枝,罗晨,陈宏伟. SDN 中基于负载均衡的最优路径分配算法研究[J]. 计算机应用研究,2016,33(8):2462-2466.

[6] GIROIRE F,MOULIERAC J,PHAN T K. Optimizing rule placement in software-defined networks for energy-aware routing[C] // Global Communications Conference. IEEE, 2014: 2523-2529.

[7] ROOZBEH A,SEFIDCON A,MAGUIRE G Q. Resource Monitoring in a Network Embedded Cloud: An Extension to OSPF-TE[C] // IEEE/ACM, International Conference on Utility and Cloud Computing. IEEE,2013:139-146.

[8] LIU H K,LI J L,ZHANG H J. Elastic QoS guarantee method based on OpenFlow network[J]. Journal of Computer Applications,2016,36(1):20-24. (in Chinese)
刘海客,李集林,张华健. 基于 OpenFlow 网络的弹性服务质量保障方法[J]. 计算机应用,2016,36(1):20-24.

[9] NAKAHODO Y,NAITO T,OKI E. Implementation of smart-OSPF in hybrid software-defined network[C] // IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content. IEEE,2014:374-378.

[10] WAN K,LUO X F,JIANG Y,et al. The Flow-oriented Scheduling Algorithms in SDN System[J]. Chinese Journal of Computers,2016,39(6):1208-1223. (in Chinese)
宛考,罗雪峰,江勇,等. 软件定义网络系统中面向流的调度算法[J]. 计算机学报,2016,39(6):1208-1223.

[11] ZHU C. Research on Routing Technology in Software Defined Network Based on OpenFIow[D]. Beijing: University of Science and Technology of China,2014:26-34. (in Chinese)
朱超. 基于 OpenFlow 的软件定义网络路由技术研究[D]. 北京:中国科学技术大学,2014:26-34.

[12] BRAUN W,MENTH M. Wildcard Compression of Inter-Domain Routing Tables for OpenFlow-Based Software-Defined Networking[C] // European Workshop on Software Defined Networks. IEEE Computer Society,2014:25-30.

[13] PANTUZA G,SAMPAIO F,VIEIRA L F M,et al. Network management through graphs in Software Defined Networks[C] // International Conference on Network and Service Management. IEEE,2015:400-405.

[14] LI W J,YUAN Y,YU P,et al. Fault Detection Method Based on Improved Kruskal Algorithm for Wireless Sensor Network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014,37(4):103-107. (in Chinese)
李文璟,袁野,喻鹏,等. 基于改进 Kruskal 算法的 WSN 故障节点检测方法[J]. 北京邮电大学学报,2014,37(4):103-107.

[15] WICKBOLDT J,DE JESUS W,ISOLANI P,et al. Software-defined networking: management requirements and challenges [J]. Communications Magazine IEEE,2015,53(1):278-285.

[16] ZHOU T Q,CAI Z P,XIA J,et al. Traffic Engineering for Software Defined Networks[J]. Journal of Software,2016,27(2): 394-417. (in Chinese)
周桐庆,蔡志平,夏竞,等. 基于软件定义网络的流量工程[J]. 软件学报,2016,27(2):394-417.

[17] HUANG K,ZHANG X X,ZHANG X M,et al. MPSoC Communication Optimization Strategy Based on Integer Linear Programming[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2015, 49(2):184-190. (in Chinese)
黄凯,张晓旭,张晓濛,等. 基于整数线性规划的 MPSoC 通信优化策略[J]. 上海交通大学学报,2015,49(2):184-190.

[18] WEN J B,LIAO H Z. Cloud Data App-RS Routing Algorithm Based on SDN[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Sicence),2017,31(11):172-178. (in Chinese)
文杰斌,廖海洲. 基于 SDN 的云数据 App-RS 路由算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2017,31(11):172-118.