

SDN 环境下基于 QLearning 算法的业务划分路由选路机制

金子晋, 兰巨龙, 江逸茗, 孙鹏浩, 魏鹏

(国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 随着当前网络的多元化发展, 用户对于网络的需求也不断增加, 网络的承载性受到极大挑战。在软件定义网络环境下, 提出一种以业务属性为依据、基于 QLearning 算法的路由选路机制, 设计了链路发现、链路分类、强化学习训练及 Q 值表下发 4 个模块, 根据网络的实施情况对不同属性的业务流分配不同的路径以保障用户路由的 QoS。实验结果表明, 所提算法可使数据流的总体分组丢失率低于 5%, 对于部分属性的业务流可接近 0 分组丢失, 同时对于时延也有大幅降低。

关键词: SDN; QLearning 算法; 业务属性分类; 多路径路由

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2018073

QLearning based business differentiating routing mechanism in SDN architecture

JIN Zijin, LAN Julong, JIANG Yiming, SUN Penghao, WEI Peng

National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China

Abstract: With the diversified development of the current network, users' demand grows as well which brings great challenge for its load ability. A QLearning based business differentiating routing mechanism in SDN architecture was proposed to guarantee users' routing QoS. To do that, four modules (discovery of link, classification of link, intensive learning and Q -value table sending) were designed to assign different paths to data streams of different attributes. The experiment shows that the proposed algorithm can decrease the packet loss rate to less than 5% and for some of the data streams, this rate is almost 0, simultaneously, it also helps the delay problem.

Key words: SDN, QLearning algorithm, business differentiating, multipath routing

1 引言

根据中国互联网络信息中心 (CNNIC, China Internet Network Information Center) 发布的第 41 次《中国互联网络发展状况统计报告》, 截至 2017 年 12 月, 中国互联网络用户数量达 7.72 亿, 普及率达 55.8%^[1]。随着互联网技术及各种新兴技术的不断发展进步, 用户的需求也从单一的数

据传输转变为数据、视频、交互及时事多媒体等多样化的网络应用, 以微博、抖音、快手、网盘、视频网站等为代表的新型流媒体业务的兴起, 也进一步加剧了网络需求的多样化, 对网络的承载性提出了极大的挑战。而传统的 IP 网络架构设备底层具有封闭性, 策略部署十分困难, 其安全性和灵活性也有不足, 因此, 斯坦福大学的 McKeown^[2]提出了软件定义网络 (SDN, software

收稿日期: 2018-06-25; 修回日期: 2018-08-15

通信作者: 金子晋, 2738808824@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61502530)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61502530)

defined networking) 的新型架构。

SDN 是一种控制平面与转发平面独立的网络, 具有控制跟转发分离、有开放的编程接口、集中式的控制等特点。在传统的网络中, 交换机/路由器通过自学习维持着在 SDN 环境下的路由表, 交换机根据流表进行路由转发。当前 SDN 网络中, 基于流量的路由算法大多仍采用以跳数为度量的最短路径算法得到最优路径。然而, 这种算法并未考虑到时延、带宽及资源利用率等方面的因素, 所选取的链路不一定是最优路径, 而且可能存在某一链路被多条业务流选取为最优路径的情况, 造成链路拥塞和资源浪费。

一直以来, 路由的服务质量 (QoS, quality of service) 问题都是学术界的研究热点, 在传统网络架构中, 就有很多方法来保障用户的 QoS。例如, Best Effort 模型 (即尽力而为模型)^[3] 是一个单一的服务模型, 网络采用先入先出的调度原则, 尽最大的可能性发送报文, 但对时延、可靠性等性能不提供任何保证。综合服务模型^[4] 将业务定义为有保证的业务、控制负载的业务、尽力而为的业务, 在发送方和接收方之间使用 RSVP (资源预留协议) 作为每个数据流的信令, 从接收方到发送方之间沿途的每一个网络单元都要支持 QoS 控制机制, 为每一个要求 QoS 的数据流预留资源。

学术界和产业界对在 SDN 环境中的路由策略做了大量的研究。在减少资源浪费方面, 田铭等^[5] 提出了一种基于链路繁忙趋势值的等价多路径选择算法, 通过链路在网络中的路径趋势值表征链路的可能任务量, 链路带宽表征链路的传输能力, 通过计算链路的繁忙趋势值, 从而在等价多路径中选择瓶颈链路繁忙趋势值最小的路径, 实现流量尽量避免在网络的热点链路上传输, 有效避免了拥塞, 增大了吞吐量, 提高了资源利用率, 该方法对资源的利用率有较好的提升, 但是未能考虑到流量特性的差异, 对最优方案的选择有所影响; 孔祥彬等^[6] 在研究中以代宽为度量参数, 将业务流提出的带宽约束要求转换成链路代价, 使用基于 Dijkstra 算法的 QoS 路由算法为业务流选择满足带宽约束的 QoS 路由, 一定程度上提高了检测的收敛速度, 有利于根据信

任度的变化进行模型的调整和重构, 具有效率高、速度快的特点, 但是考虑因素仍然有些单一, 不够全面。

在解决时延问题方面, 王红川等^[7] 的研究引入了“虚拟时延”的概念, 提出了 VL-EDF (virtual latency earliest deadline first algorithm) 队列调度算法, 对不同的数据分组赋予不同的“虚拟时延”值, 结合数据分组的到达时间和截止时间动态调整传输的次序, 该方法可以很好地处理对时延要求高的数据分组, 但是未能考虑其他相关影响因素; YAN 等^[8] 提出了 HiQoS 的概念, 利用源到目的节点的多条路径, 并使用排队机制为不同业务的传输带宽提供保障, 同时, 作者还提出了一种故障检测策略, 每隔一段时间对链路的状态进行更新, 当发生故障时可以对数据分组进行重路由, 该方法可以有效减小时延且路由具有一定的顽健性, 但是单路径传输使资源没有得到充分利用且并未照顾到所有因素。

在满足用户个性化定制方面, Seddiki 等^[9-10] 提出了一种家用 FlowQoS 体系结构, 通过应用程序标识并使用流表规则在家庭路由器上以适当的速率转发流量, FlowQoS 控制器对上下行流量进行标识和 QoS 配置, 并对用户指定的应用流进行优先转发, 以适应用户的个人喜好, 该方法可以满足用户对应用的优先级需求, 提升流量的转发速率, 然而并没有考虑到数据分组丢失率等因素。

上述论文都从某一个方面解决了路由服务质量的问题, 但并未统筹考虑。本文基于现有的研究成果, 提出一种以业务分类为依据的路由选路算法, 将业务流按属性分类, 结合链路的时延、带宽及分组丢失率等因素建立权值公式, 运用机器学习算法进行动态优化, 从而选择合适的路径进行路由。

2 业务属性相关的多路径传输机制的设计与实现

为了实现在 SDN 环境下以业务分类为依据的路由选路算法, 本文提出以下路径规划系统, 如图 1 所示, 主要包含链路发现、链路分类、强化学习训练及 Q 值表下发 4 个模块, 而所用拓扑如图 2 所示, 由 7 台交换机及 12 台主机构成。

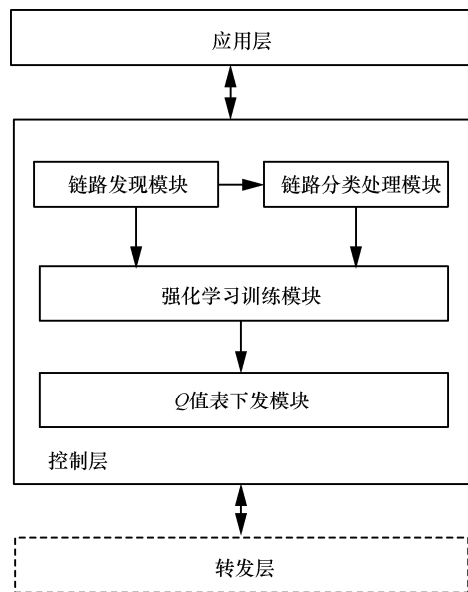


图 1 路径规划系统架构

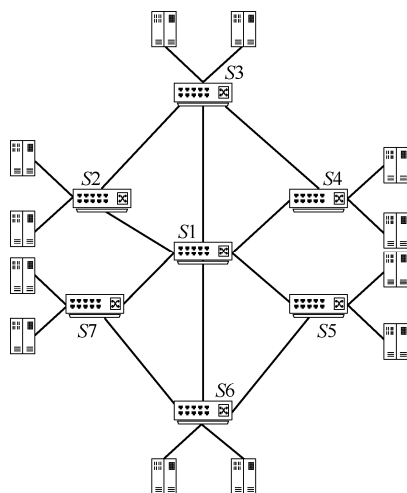


图 2 实验拓扑

2.1 业务的划分

随着网络技术的不断发展，网络业务种类也不断增加，不同的数据分组种类对 QoS 的需求也有所不同。根据 3GPP 对网络业务的划分^[11]，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 4 种。

会话类业务：是一种单向传输，不需要进行交互的实时类业务，如视频通话等，对时延有较高的要求而可以承受一定的分组丢失率。

流媒体业务：是一种单方面的实时业务，如视频点播、电子商务等，对时延和分组丢失率的要求相对较高。

交互类业务：是一种终端用户（人或机器）和远程设备（如远程服务器）进行在线数据交互的业务，为请求响应模式，具有非实时性，如 Web 浏览、网络游戏等，对时延和分组丢失率均有一定的要求。

数据类业务：非实时类业务，如后台的 E-mail 接收、文件下载等，对分组丢失率有较高要求，对时延要求较低。

在本文中，采用分组头域中的 ToS 域进行数据分组业务类型区分，在 OpenFlow V1.0 中，流表的分组头域中包括 12 个元组（Tuple），相关内容如图 3 所示^[12]。

2.2 基于 QLearning 算法规划路由

QLearning 的主要流程如图 4 伪代码所示^[13]，在其学习过程中，通过 $Q(S,A)$ 不断迭代来逼近最

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	目的地IP地址	IP	IP ToS 位	TCP/UDP 源端口	TCP/UDP 目的端口
Ingress Port	Ether Source	Ether Des	Ether Type	VLAN ID	VLAN Priority	IP Src	IP Dst	IP Proto	IP ToS bits	TCP/UDP Src Port	TCP/UDP Dst Port

图 3 流表分组头域

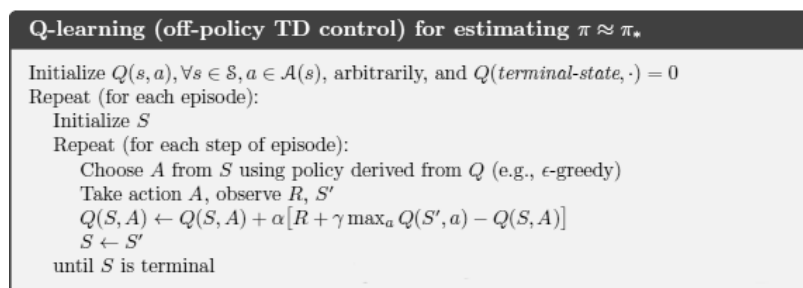


图 4 QLearning 流程

优值,其核心就是公式 $Q(S,A) \leftarrow Q(S,A) + \alpha[R + \gamma \max_a Q(S',A) - Q(S,A)]$, 其中,左侧 $Q(S,A)$ 表示更新后的值,而右侧 $Q(S,A)$ 表示 Q 表中数值, α 为学习效率, r 为奖励值。整个算法就是一直不断更新 Q table 中的值,然后根据新的值判断要在某个 state 采取怎样的 action 的过程。一旦 Q 表训练完成,通过 Q 值表下发模块,将得到的 Q 值表下发到所有 OpenFlow 交换机中,新到的流量包按照自身的属性很容易地在已获得的 Q 矩阵中寻找一条从 s 节点出发的转发路径。

2.3 链路信息采集及处理

在本文中,选择最优路径时,要考虑到链路的时延(delay,后用 D 表示)、可用带宽(bandwidth,后用 B 表示)、分组丢失率(packet loss rate,后用 L 表示)以及带宽利用率(bandwidth utilization,后用 U 表示)4个因素,此处考虑各因素的正负相关性,为其分别赋予 α 、 β 、 γ 及 λ 这4种不同的权重且 α 、 β 、 γ 、 $\lambda \in [0,1]$,可得 QLearning 算法中的奖励值公式如下。

$$R = (\beta B - \alpha D - \gamma L - \lambda U) \times 100$$

根据不同属性业务对各参数要求各不相同的特性,所用权重关系如表1所示。

表1	权重关系
业务类型	权重关系
会话类业务	$\alpha > \lambda > \beta > \gamma$
流媒体业务	$\alpha > \gamma > \lambda > \beta$
交互类业务	$\gamma > \alpha > \beta > \lambda$
数据类业务	$\gamma > \beta > \lambda > \alpha$

为了获取链路中各项数据信息,本文采用 Iperf^[14]工具监测链路中各项数据。同时,为了对数据进行统一考量,采用 min-max 标准法^[15]对各

项数据进行归一化处理,使其统一映射到[0,1]区间内,计算方法如下。

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

3 实验与结果分析

3.1 实验仿真

本文的实验环境为 Windows7 操作系统,CPU 型号为 Core i7-4710HQ,主频 2.50 GHz,采用 mininet^[16]工具对底层网络进行搭建(场景如图2所示),对4种业务流 ToS 值指定如表2所示,而相应的参数赋值如表3所示。

表2	业务流 ToS 值
业务类型	ToS 值
会话类业务	4
流媒体业务	8
交互类业务	16
数据类业务	32

表3	参数赋值			
业务类别	α	β	γ	λ
会话类业务	0.8	0.4	0.2	0.6
流媒体业务	0.8	0.2	0.6	0.4
交互类业务	0.6	0.4	0.8	0.2
数据类业务	0.2	0.6	0.8	0.4

在 Iperf 工具中指定阶梯带宽以测试当前链路的最大可用带宽,由图5可知,当主机终端设置发送带宽为 72 Mbit/s 时,分组丢失率为 0,当发送带宽增加到 150 Mbit/s 时,已出现分组丢失现象,分组丢失率为 0.74%,随着发送带宽的增加,分组丢失率也在增加,显示的带宽基本稳定在 100 Mbit/s,即

```
[ 4] local 10.10.118.127 port 4101 connected with 10.10.119.197 port 41071
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth    Jitter    Lost/Total Datagram
[ 4] 0.0-10.0 sec   119 MBytes  72 Mbits/sec  0.94 ms    0/7252 (0%)
[ 4] 0.0-10.0 sec   1 datagrams received out-of-order
[ 5] local 10.10.118.127 port 4101 connected with 10.10.119.197 port 58114
[ 5] 0.0-10.0 sec   190 MBytes  95 Mbits/sec  1.40 ms    404/54560 (0.74%)
[ 5] 0.0-10.0 sec   1 datagrams received out-of-order
[ 4] local 10.10.118.127 port 4101 connected with 10.10.119.197 port 58412
[ 4] 0.0-10.0 sec   195 MBytes  100 Mbits/sec  1.51 ms    395/51267 (0.77%)
```

图5 Iperf 服务器接收不同发送带宽结果示意

可知链路的最大可用带宽为 100 Mbit/s。

同时, 在不同周期下, QLearning 算法路由选择的准确率如表 4 所示, 从表中可以看出, 随着训练周期的增加, 准确率不断逼近 100%, 在本文拓扑中, 当训练周期到达 40 时, 基本收敛。

表 4 路由选择准确率

周期	准确率
5	60.3%
10	75.6%
20	94.6%
30	98.7%
40	99.8%
50	99.9%
60	99.9%
70	100%

3.2 实验结果对比

本文综合时延、链路可用带宽、分组丢失率、带宽利用率等因素, 以业务属性为依据规划路由路径。将本文所得实验结果与 ECMP (equal-cost multipath routing) 算法^[17]及文献[18]的蚁群算法进行了对比, 经过多次实验, 可得各路由算法对 4 种业务的时延及分组丢失率如图 6 和图 7 所示 (从左至右分别为会话类业务、流媒体业务、交互类业务及数据类业务)。

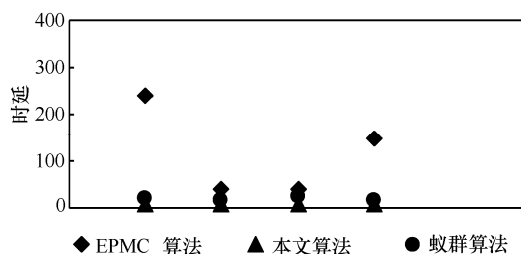


图 6 各算法时延对比

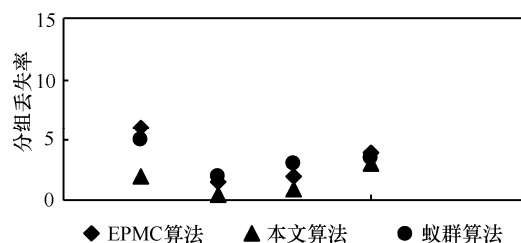


图 7 各算法分组丢失率对比

从图 6 和图 7 可以看出, 本文算法能为 4 种不同属性业务保障分组丢失率且有效降低时延, 所得结果明显优于现有算法, 在会话类业务和数据类业务方面提升尤为明显。

4 结束语

本文提出了一种基于机器学习 QLearning 算法、以业务流属性划分的路由 QoS 保障机制, 结合底层网络实际情况、链路及业务自身属性等多个方面因素, 对网络资源利用率进行合理分配, 避免局部拥塞状况, 同时尽可能地满足用户 QoS 需求。当然, 本文算法还具有一定的局限性, 下一步, 将引入更深层次的机器学习算法 (如 Double Deep QLearning 等) 进行模型的训练。同时, 本文算法基于固定拓扑, 而网络拓扑往往是动态变化的, 在这方面仍有不足之处, 以待后续研究。

参考文献:

- [1] LI J. 41th China Internet development statistics report[J]. China Radio, 2018(3):96-96.
- [2] 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.
- [3] 张鹏飞, 黄生叶, 赵海琳. 宽带综合业务网络中尽力而为业务性能研究[J]. 计算机工程, 2007, 35(9):126-127.
ZHANG P F, HUANG S Y, ZHAO H L. Study on queueing system performance of best effort service in broad band Integrated service network[J]. Computer Engineering, 2007, 35(9):126-127.
- [4] 向渝, 雷维礼, 黄顺吉. IP QoS 综合服务模型研究[J]. 电讯技术, 2001, 41(3):106-110.
XIANG Y, LEI W L, HUANG S J. Research on IP QoS intserv model[J]. Telecommunication Engineering, 2001, 41(3):106-110.
- [5] 田铭, 兰巨龙, 朱宣勇. 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.
TIAN M, LAN J L, ZHU X Y. An equivalent multi path selection algorithm based on link busy trend value [J]. Journal of Information Engineering University, 2010, 11(2):190-195.
- [6] 孔祥彬, 沈苏彬, 李莉. 一种基于 SDN 网络的 QoS 路由选择方案[J]. 计算机技术与发展, 2018(2):102-106.
KONG X B, SHEN S B, LI L. A QoS routing scheme based on software-defined networking[J]. Computer Technology and Development, 2018(2):102-106.
- [7] 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.
WANG H C. Research on the data transmission delay in the smart grid communication networks[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [8] YAN J Y, ZHANG H L, SHUAI Q J. HiQoS: an SDN-based multipath QoS solution[J]. China Communication 2015, 12(5):123-133.

- [9] SEDDIKI M S, SHAHBAZ M, DONOVAN S, et al. FlowQoS: QoS for the rest of us[C]//The Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. 2014:207-208.
- [10] SEDDIKI M S, SHAHBAZ M, DONOVAN S, et al. FlowQoS: per-flow quality of service for broadband access networks[J]. 2015.
- [11] Quality of service (QoS) concept and architecture[J]. 2005.
- [12] 雷葆华, 王峰, 王茜. SDN 核心技术剖析和实战指南[J]. 中国科技信息, 2013(21):52-52.
- LEI B H, WANG F, WANG J. SDN core technology analysis and practical guide [J]. China Science and technology information, 2013(21): 52-52.
- [13] LI J, WANG J. Control device and system and transmission channel control method in software-defined networking: WO/2015/192306[P]. 2015.
- [14] TIRUMALA A, QIN F, DUGAN J, et al. Iperf1.7.0—the TCP/UDP bandwidth measurement tool[EB/OL]. <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf>. 2007.
- [15] JAIN K Y, BHANDARE K S. Min max normalization based data perturbation method for privacy protection[J]. International Journal of Computer and Communication Technology, 2011, 2,(8): 45-50.
- [16] KAUR K, SINGH J, GHUMMAN N S. Mininet as software defined networking testing Platform[C]//International Conference on Communication, Computing & Systems. 2014.
- [17] 董青. 增强型网络路由策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- DONG Q. Enhanced network routing strategy research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2013.
- [18] 余翔, 易明敏, 杨路. 一种 SDN 架构下业务属性相关的多径路由算法[J]. 电信科学, 2016, 32(11):10-15.
- YU X, YI M, YANG L. A multi-path routing algorithm based on business attributes under SDN architecture [J]. Telecommunication Science, 2016, 32(11):10-15.

[作者简介]



金子晋 (1992-), 女, 浙江三门人, 国家数字交换系统工程技术研究中心硕士生, 主要研究方向为新一代信息网络体系结构下路由相关技术。



兰巨龙 (1962-), 男, 河北张北人, 国家数字交换系统工程技术研究中心教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代信息网络关键理论与技术。

江逸茗 (1984-), 男, 江苏南通人, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师, 主要研究方向为网络虚拟化、网络架构。

孙鹏浩 (1992-), 男, 山东青岛人, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为可编程网络、数字交换技术。

魏鹏 (1994-), 男, 湖南衡阳人, 国家数字交换系统工程技术研究中心硕士生, 主要研究方向为新一代信息网络体系结构。