

基于 SDN 的云架构网络高确定性流量控制方法

高 平¹, 张 帆², 张 东³, 翟飞龙⁴

(1. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200233; 2. 西安交通大学 计算机科学与技术系, 西安 710049;
3. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054; 4. 中国电子科技集团公司第三十二研究所, 上海 201808)

摘 要: 针对目前云架构网络不能较好地应对云网络中数据传输的多样性以及细粒度和确定性流量控制需求等问题, 提出一种基于软件定义网络(SDN)的高确定性流量控制方法。将 SDN 集中优化控制、全网感知能力的优势与交换机上的多队列调度机制相结合, 在获取全网拓扑和流量信息的基础上规划业务流最优路径, 为交换机分配合理的队列调度参数, 并利用 DCTCP 减小网络拥塞, 保证各类业务的带宽和时延, 同时运用全可编程交换机实现业务流的细粒度管理, 配合个性化的流表下发机制, 动态调整业务传输带宽和业务流等级。实验结果表明, 该方法关键业务流的平均排队时延小于 2 ms, 排队时延抖动小于 10 ms, 丢包率小于 10^{-6} , 可实现对云网络中的业务流集中化、可实时化和精细化管理。

关键词: 云架构网络; 流量控制; 软件定义网络; 多队列调度; 服务质量

中文引用格式: 高 平, 张 帆, 张 东, 等. 基于 SDN 的云架构网络高确定性流量控制方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(12): 74-78, 84.

英文引用格式: GAO Ping, ZHANG Fan, ZHANG Dong, et al. High deterministic traffic control method for cloud architecture network based on SDN[J]. Computer Engineering, 2018, 44(12): 74-78, 84.

High Deterministic Traffic Control Method for Cloud Architecture Network Based on SDN

GAO Ping¹, ZHANG Fan², ZHANG Dong³, ZHAI Feilong⁴

(1. China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China;
2. Department of Computer Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China;
4. The 32nd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201808, China)

[Abstract] Aiming at the problem that the current cloud architecture network can not deal with the diversity of data transmission in cloud network and the requirements of fine-grained and deterministic traffic control, a high-deterministic traffic control method based on Software Defined Network(SDN) is proposed. It combines the advantages of centralized optimization control of SDN and the awareness of the whole network with the multi-queue scheduling mechanism on the switch, and plans the optimal path of the service flow based on the topology and traffic information of the whole network, and allocates a reasonable queue scheduling parameters for the switch, and uses DCTCP to reduce network congestion and ensures bandwidth and delay of various services. At the same time, the full programmable switch is used to implement the fine-grained management of the service flow, and the personalized flow table delivery mechanism is used to dynamically adjust the service transmission bandwidth and service flow level. Experiment result shows that the critical business flow of this method achieves the average queueing delay less than 2 ms, the queueing delay jitter is less than 10 ms, and the packet loss rate is less than 10^{-6} , it can realizes the centralized, real-time and fine management of the traffic flow in the cloud network.

[Key words] cloud architecture network; traffic control; Software Defined Network(SDN); multi-queue scheduling; Quality of Service(QoS)

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0049484

基金项目: 中国航空无线电电子研究所项目(PM-12210-2016-001)。

作者简介: 高 平(1983—), 男, 高级工程师、硕士, 主研方向为分布式系统、云计算; 张 帆, 博士研究生; 张 东, 研究员、博士、博士生导师; 翟飞龙, 工程师。

收稿日期: 2017-11-29

修回日期: 2018-01-10

E-mail: david_gao0301@126.com

0 概述

云计算为越来越多的互联网应用业务,如在线购物、网络直播、数据存储等提供强有力的技术支持,云平台则对计算、存储网络等资源进行统一的管理和调度^[1]。云架构网络作为云计算技术的基础设施平台,它的性能直接影响到企业提供的云服务质量。在网络性能优化上,由于云计算业务种类和数量的急剧增长以及服务节点和网络规模的不断增大,节点流量模型的更加复杂,对网络流量控制提出更高的要求。针对复杂业务模型和动态网络环境,为了给各类业务提供高确定的与合理的服务质量(Quality of Service, QoS)保障,研究一种适用于云架构网络的流量控制技术势在必行。为此,本文提出一种基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的高确定性流量控制方法。该方法将SDN集中优化控制、全网感知优点与多队列调度机制、拥塞控制策略相结合,保证各类业务的带宽和时延,同时使用全可编程SDN交换机并配合个性化的流表下发机制,动态调整业务传输带宽和业务流等级。

1 相关研究

队列调度是网络流量控制的重要技术,也是实现网络QoS控制的重要手段。在工业界和学术界已经出现了许多队列调度算法及其改进算法。文献[2]提出的RR算法实现简单,但不能满足不同类业务对时延的需求。文献[3]提出的PQ算法考虑到不同业务处理的优先级,但易使低优先级的业务流“饿死”,难以保证调度的公平性^[4]。文献[5]提出的WFQ算法在原理上比轮询类调度算法优越,但实现较为复杂^[6],传统网络交换设备的处理算法对用户不透明,用户无法做过多的干预,所以无法对相应的业务流做精确的带宽保证。文献[7]提出的CBWFQ算法允许用户对流分类,并且考虑到公平性,但缺少对语音类业务的支持。文献[8-9]提出的WRR算法和DWRR算法为每个队列设置不同的权重值,保证了不同优先级队列中的业务,但由于受到硬件资源的限制,只能将各类业务大致的划分到有限的队列中进行粗粒度管理,无法充分发挥算法的作用。此外,网络中业务数量和流量分布经常变化,需要时常调整算法参数。传统配置方式在频繁操作下存在人力时间成本高、易引入误操作的问题。除了RR、WRR这类轮循类算法外,另外提出了基于时延的调度算法,如EDF^[10]、RCS^[11]等,以及基于服务曲线理论的调度算法,如HFSC^[12]、SCED^[13]等,但这些算法很少能在商用交换设备得到部署。综上,在传统网络中使用上述某种算法对云架构网络进行流量控制存在以下问题:传统队列调度算法难以同

时保证业务带宽和时延保证;传统网络的队列调度算法难以实现细粒度流量控制;静态的参数配置不适合动态的网络流量需求。可以看出,在传统网络中使用上述流量控制技术难以以为云架构网络中的业务提供高确定性的时延和带宽保证。

2 云架构网络流量控制方法

基于对云架构网络业务及传统流量控制问题的分析,根据提出的SDN高确定性流量控制方法,本文设计一套高确定性流量控制系统,将SDN技术与传统流量控制技术相结合,对云架构网络中的各类应用业务全面感知,实现对网络中的业务流集中化、实时化、精细化管理。

2.1 总体架构

本文系统采用分层设计,总体分为应用层、控制层和网络层。系统总体架构如图1所示。

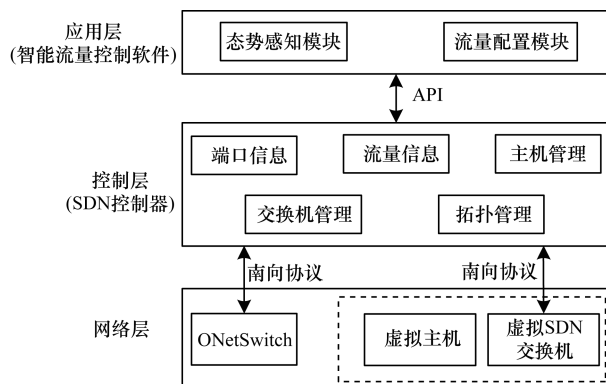


图1 本文系统总体架构

系统总体架构由以下3个方面组成:

1)应用层。在该层上主要运行智能流量控制软件,包括网络态势感知模块和网络流量配置模块。网络态势感知模块感知网络情况并将网络信息呈现给网络管理者;网络流量配置模块根据网络管理者下发的策略,区分不同的业务流,对不同级别的业务流下发不同的QoS保证策略。

2)控制层。在该层运行SDN控制器,系统采用轻量级的Ryu^[14]作为SDN控制器。该层包括5个模块:即端口信息收集模块、流量信息收集模块、主机管理模块、交换机管理模块和拓扑管理模块,获取网络的资源以及网络流量状况。其中网络的信息包括交换机、端口、主机的信息和网络拓扑结构,以及基于流的流量统计信息和基于端口的流量统计信息。控制器根据这些信息下发流量策略,完成网络的通信。

3)网络层。该层由物理SDN交换机、虚拟SDN交换机以及终端主机组成,其中虚拟SDN交换机、虚拟主机以及两者之间的链路由虚拟交换机生成软件Mininet^[15]生成。SDN交换机跟控制器使用OpenFlow作为南向协议进行交互,完成网络状态信息的提取和流表的下发。

2.2 高确定流量控制方法

网络中的资源是有限的,当各种网络应用为了满足自身网络资源的需求而抢夺网络资源时,就会出现对服务质量的要求。服务质量主要包括传输带宽、传送时延、数据的丢包率和时延抖动等。网络中不同业务对于服务质量有不同的要求。例如,有些业务流具有时效性,只有在规定的时限内完成才有价值,这类流对时延和时延抖动敏感,而有些业务流较大,期望在相对较短时间内完成,这类流对吞吐量和带宽敏感。为了保证不同业务流需求,本文通过下面 4 种方法对业务流的 Qos 进行保障。

1) 多队列调度机制。考虑到 DWRR 比 WFQ 的计算复杂度更低,具有良好的公平性、各队列间互不影响等优点,本文方法将 DWRR 引入到 SDN 控制器的多队列调度中。根据应用层中为不同业务流定制的流表,将不同类别的流分配到相应的队列中,队列之间实现轮询发送。为保证不同队列的带宽,利用了“赤字计数器”,并为不同队列设置不同的权重值,即每次发送指定的字节数。

SDN 下的多队列调度流程如图 2 所示。

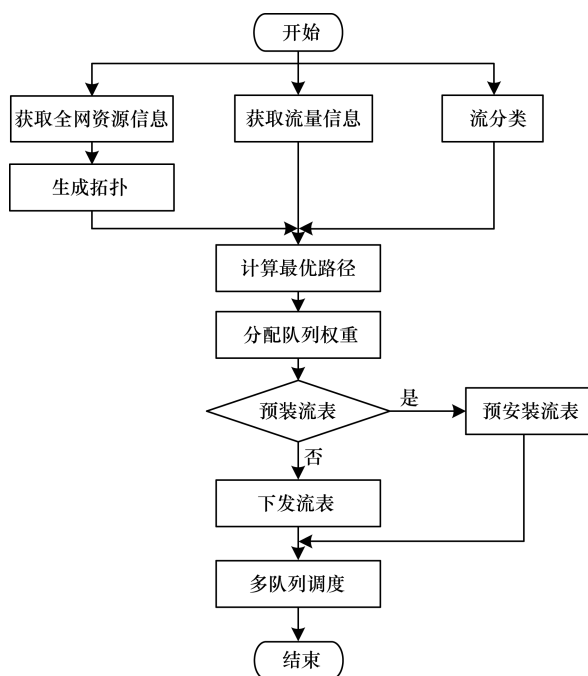


图 2 SDN 下的多队列调度流程

利用 SDN 网络全局控制的特性,为数据流分配合适的路径。对于有时延要求的业务流,将根据时延的敏感程度为其队列配置较大权重,控制器会根据其配置信息,在 SDN 交换机上预装流表,避免 Packet-In 消息上报和流表下发导致的网络时延。对于其他的业务流,网络流量管理模块会以网络态势感知模块获取的网络中每条链路的剩余带宽为权重,使用最短路径算法为其计算一条转发路径,并为路径上所有交换机下发相应的流表项,通过转发端

口权重值小的队列进行转发。同时,网络流量管理模块会实时地监控网络的负载情况,当局部链路负载过重时,调整对时延无要求或对时延要求较小的业务流相关的流表,实现网络的负载均衡。通过将 SDN 的全局感知的优势与 DWRR 算法相结合,对业务流充分合理调度,实现同时对业务带宽和时延的保证。

2) 拥塞控制策略。在云架构网络中流量分布具有高动态性和突发性,而且交换设备的缓存有限,很容易出现缓存溢出的拥塞丢包和流延迟变大的现象。为此,系统中摒弃 TCP Reno,采用 DCTCP 协议,如图 3 所示,利用显示拥塞通知(Explicit Congestion Notification, ECN)控制了缓存队列的长度,当拥塞发生时,对超过队列拥塞标记阈值的数据包标记,接收端收到被标记的包后,通知源端对这类包限速。这样可以在很少占用缓冲区的情况下实现高吞吐量传输。通过拥塞控制策略,进一步为网络中高 QoS 业务流提供高确定性时延和带宽保证。

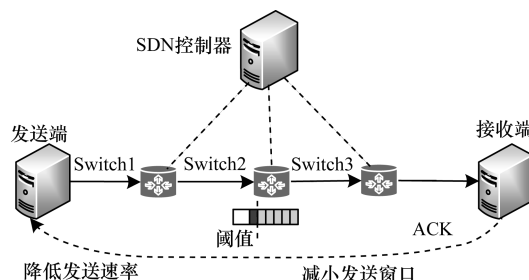


图 3 拥塞控制策略

3) 全可编程的 SDN 交换机。ONetSwitch 是一款全可编程的 SDN 交换机,系统将其做为网络层中物理 SDN 交换机。利用该交换机“软件可编程、逻辑可重构、硬件可扩展”的特点,可以对交换机端口队列数量合理配置,对业务数量大的端口多配队列,对业务量数量小的端口少配队列,使参与多队列调度的业务流得到了更精细的划分,在很大程度上增加了不同业务流之间的隔离程度,减小它们之间影响。ONetSwitch 交换机的使用让原有的队列调度算法实现了细粒度流量控制。

4) 个性化的流表下发机制。在传统网络流量 QoS 保障中,需要对网络设备进行参数设置,配置的策略是静态的。而且需要网络管理员精通不同厂家设备的配置方式,对管理员业务水平要求较高,配置过程耗时、易出错。本文方法能够让网络管理者根据业务流本身的性质通过网络流量配置模块,使控制器向交换机下发为不同的需求业务流定制的流表。流分类方法主要包含基于源 IP 地址、目的 IP 地址、源端口号、目的端口号、MAC 地址、服务编码(ToS)、基于 MPLS 包头等。网络流量配置模块可以将上述分类方法任意组合并根据带宽时延要求划

分业务流,不同类别的业务流可以随时调整转发队列。个性化的流表下发机制实现了在动态的网络环境下依然可以保证不同级别的 QoS 的。

3 系统实现

云架构网络流量控制系统原型分前端可视化界面、SDN 控制器和 SDN 交换机 3 个部分。

前端可视化界面由 JavaScript、HTML 和 CSS 开发,运行在 Apache 服务器上,用于实现软件和网络管理员的可视化交互。前端界面一方面通过 Restful 接口与 SDN 控制器交互,将网络拓扑信息、交换机信息、主机信息和相关的流量控制信息展示出来。其中,交换机信息包括交换机 dpid、端口号、端口 MAC;主机信息包括主机 MAC、连接端口号等;流量控制信息包括交换机上的流表信息、流表匹配数据包条目以及端口带宽等。另一方面,前端接收管理员的指令,根据源 IP 地址、目的 IP 地址、源端口号、目的端口号、协议号、流量的优先级和指定带宽,为业务流添加或删除流量策略,完成流量的细化控制。

云架构网络流量控制系统原型如图 4 所示。

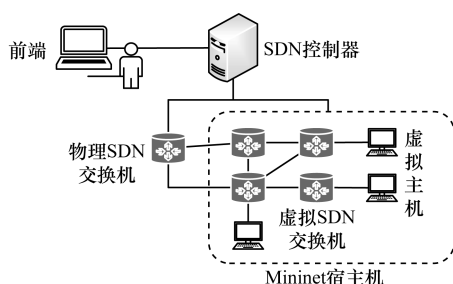


图4 云架构网络流量控制系统原型

SDN 控制器安装在一台服务器上,预装基于 Linux 的 Ryu 控制器系统。在 Ryu 控制器下,开发了流量控制的应用程序,通过 openflow 协议与 SDN 交换机交互,获取全网资源信息,生成网络拓扑,并根据流量信息和前端提供的流量策略为各类业务流计算最优传输路径,向在相应路径上的交换机下发流表信息,实现不同级别的 QoS 保证。同时,控制器与前端交互,向前端提供网络拓扑信息、交换机信息、主机信息和相关的流量控制信息。

由于本文系统需要在云网络下运行,既需要仿真的 SDN 网络中具有一定规模的主机、网络交换机和网络链路,又要具有更好的真实性效果。因此,本文采用 Mininet 和物理交换机组成半实物环境来进行仿真。运用 ONetSwitch 交换机作为物理 SDN 交换机,利用 Mininet 生成若干虚拟 SDN 交换机和虚拟主机,Mininet 宿主机上有多个网口,分别于控制器以及物理交换机相连。在宿主机上按照定义的网络结构为网卡和 Mininet 中相应的虚拟交换机之间搭建网桥,将物理网络中的流量导入 Mininet 构建的虚拟网络中,同时将虚拟网络的流

量导入物理网络中,实现网络的互联,即可构建半实物半虚拟的网络环境,扩展网络规模、并增强了实验结果的真实性。

为了实现系统中的多队列调度机制,在物理 SDN 交换机上,对原有的轮循调度功能进行修改,实现 DWRR 调度;在虚拟 SDN 交换机上,通过 Linux 流量控制器 (Traffic Control, TC),根据控制器下发流量策略,将不同的业务流导入相应的队列中,并为队列设置指定带宽,实现了多队列的轮循调度,完成高 QoS 业务流带宽和时延保证功能。为了实现拥塞控制策略,在物理 SDN 交换机上,实现 ECN 功能,即为每个队列设置一个标记阈值,当实际队列长度超过该值时,会对多出的数据包进行 ECN 标记;在 mininet 上创建拓扑时启用 ECN 功能,使虚拟 SDN 交换机支持 ECN 功能,并且在虚拟终端上使用 DCTCP 协议。通过以上的方式可以进一步防止拥塞发生,减小业务流的时延。

4 系统评估及结果分析

本文系统能够根据用户需求区分关键业务流和背景流,为指定的关键业务流提供性能保证。为此,本文设计下面的实验,观察在多个流共存的拥塞状况下,关键业务流的丢包率、时延抖动、平均时延以及队列占用的情况。

实验环境:该系统在由一台安装 Mininet 的服务器、ONetSwitch 物理交换机以及安装 Ryu 控制器 PC 机组成的网络上运行,如图 5 所示。其中,虚拟化 SDN 交换机数量 10 台,物理 SDN 交换机端口数为 1 000 Mb/s。

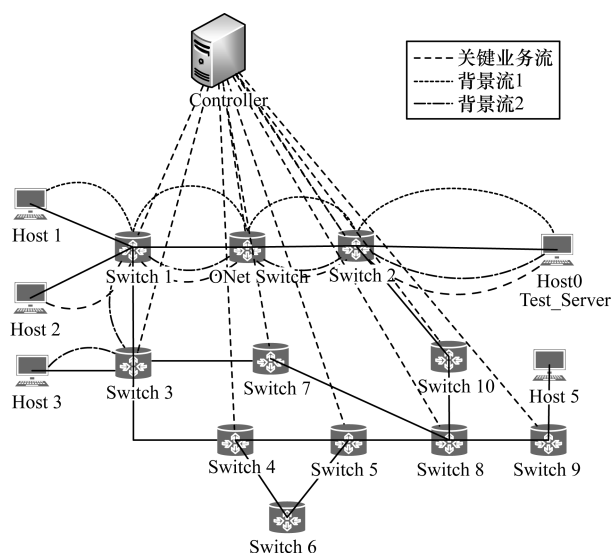


图5 实验拓扑示意图

在实验中,观察关键业务流在背景流的干扰下的性能指标。设置 1 条关键业务流与 2 条背景流。如图 5 所示,背景流为 TCP 流量,分别从主机 Host1 和 Host3

发出,都到达主机 Host0,一共占用1 000 Mb/s 的带宽,带宽被完全占用。关键业务流从主机 Host2 到主机 Host0,同样是 TCP 流量,持续 80 s,共计发送 8.688 GB 数据。在这种情况下,关键业务流与背景流在 Switch1、Switch2 和 ONetSwitch 3 个交换机上发生竞争。为了完全保证关键业务流的带宽和时延,通过前端为 3 条流配置流量策略:将关键业务流的优先级设为最高,带宽为 1 000 Mb/s,2 条背景流优先级分别设为中等和最低。

使用 sockperf 测试关键业务流时延,如图 6 所示,99% 的数据包的平均时延小于 500 μ s,所有的数据包平均时延为 270 μ s,小于 2 ms。并使用 iperf3 测试关键业务流的丢包率,如表 1 所示,出现了 4 个重传包,按照 1 500 Byte 的最大数据包大小进行计算:关键业务流丢包率 = $4 / ((8.688 \times 1\,024^3) / 1\,500) \approx 6.4 \times 10^{-7}$ 。为了测试关键业务流的时延抖动,将其改为 UDP 流,经过 iperf 测试发现时延抖动为 0.144 ms。通过以上测试,可以看出本文系统能为指定的业务流提供可靠的性能保障。

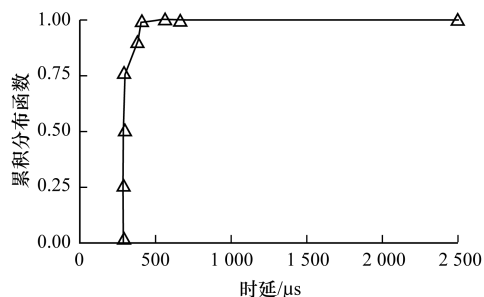


图 6 数据包时延分布

表 1 丢包率测试

间隔时间/s	传输量/MB	重传数据包数
0 ~ 10	1 116	0
10 ~ 20	1 108	1
20 ~ 30	1 116	0
30 ~ 40	1 112	1
40 ~ 50	1 113	0
50 ~ 60	1 110	1
60 ~ 70	1 111	1
70 ~ 80	1 110	0
0 ~ 80	8 896	4

为了进一步验证拥塞控制策略的性能,采用与图 5 相同的拓扑,链路带宽为 100 Mb/s,对比本文方法和传统的 TCP Reno 协议下拥塞控制方法的效果,并观察队列的占用情况。主机 Host1 和主机 Host2 向主机 Host0 同时发送数据,在这种情况下,交换机 Switch1 发生拥塞。如图 7 所示,与传统 TCP Reno 相比,本文系统的拥塞控制方法可以使队列中数据包个数降低到个位数,队列占用率至少降低了 80%,较大程度上避免了拥塞的发生。

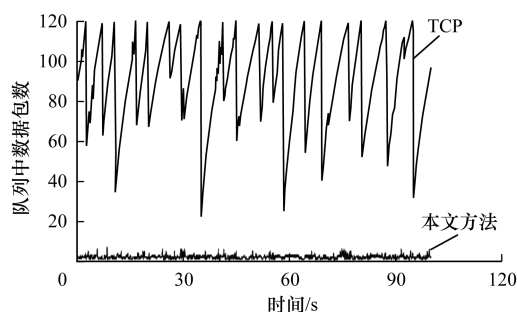


图 7 队列占用情况

5 结束语

本文提出一种基于 SDN 的云架构网络高确定性流量控制方法。该方法将 SDN 集中优化控制、全网感知、灵活敏捷管理的优点与传统多队列调度机制相结合,并使用拥塞控制策略保证了业务流的带宽和时延。运用全可编程交换机进行业务流的细粒度管理,再配合个性化的流表下发机制,实现了业务传输带宽、路由和业务流等级动态调整。实验结果表明,该方法实现对业务流的集中化、实时化、精细化管理,为云架构网络中交换业务提供高确定性带宽、路由和时延保障。下一步将继续完善本文方法,并将其使用到更大的网络范围中进行验证。

参考文献

- [1] 张浩,刘渊,王晓峰,等. 基于云平台的高逼真链路仿真研究[J]. 计算机工程,2017,43(8):1-7.
- [2] KATEVENIS M, SIDIROPOULOS S, COURCOUBETIS C. Weighted round-robin cell multiplexing in a general-purpose ATM switch chip[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,1991,9(8):1265-1279.
- [3] 朱培栋. 高性能路由器设计与实现[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [4] 张继军,高鹏编. 基于分组网络的服务质量保证[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004.
- [5] DEKERIS B, ADOMKUS T, BUDNIKAS A. Analysis of QoS assurance using weighted fair queueing scheduling discipline with low latency queue[C]//Proceedings of International Conference on Information Technology Interfaces. Cavtat, Croatia:IEEE Press,2006:215-222.
- [6] BENNETT J C R, ZHANG H. WF2Q: worst-case fair weighted fair queueing[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM'96. San Francisco, USA:IEEE Press,1996:158-264.
- [7] Cisco Systems, Inc.. Cisco IOS quality of service solutions configuration guide[EB/OL]. [2017-10-20]. https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/qos/configuration/guide/12_2sr/qos_12_2sr_book/rsvp_scalability.html.
- [8] SHIMONISHI H, YOSHIDA M, FAN R, et al. An improvement of weighted round robin cell scheduling in ATM networks[C]//Proceedings of GLOBECOM'97. Phoenix, USA:IEEE Press,1997:223-232.

(下转第 84 页)

法使用的多线程任务分配策略存在缺陷,在四核 CPU 下并行挖掘的平均加速比依然小于 2.5 (最优值为 4),今后将在以下 2 个方面进行改进:完善 BPEclat 算法的多线程任务分配策略,提高算法在并行挖掘下的加速比;研究 BPEclat 算法的分布式并行模式,将 BPEclat 移植到分布式处理平台上,以适应大数据下的频繁项目集挖掘。

参考文献

- [1] AGRAWAL R, SRIKANT R. Fast algorithm for mining association rules in large database [C]//Proceedings of International Conference on Very Large Data Bases. Santiago, Chile: [s. n.], 1994: 487-499.
- [2] PARK J S, CHEN M S, YU P S. An effective hash-based algorithm for mining association rules [C]//Proceedings of 1995 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York, USA: ACM Press, 1995: 175-186.
- [3] ZAKI M J. Scalable algorithms for association mining [J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2000, 12(3): 372-390.
- [4] HAN J, PEI J, YIN Y. Mining frequent patterns without candidate generation [J]. ACM SIGMOD Record, 2000, 29(2): 1-12.
- [5] 熊忠阳, 陈培恩, 张玉芳. 基于散列布尔矩阵的关联规则 Eclat 改进算法 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(4): 1323-1325.
- [6] 冯培恩, 刘 屹, 邱清盈, 等. 提高 Eclat 算法效率的策略 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(2): 223-230.
- [7] 张步忠, 程玉胜, 王则林. 基于片上多核的频繁项集并行挖掘算法 [J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 55-58.
- [8] YU X, WANG H. Improvement of Eclat algorithm based on support in frequent itemset mining [J]. Journal of Computers, 2014, 9(9).
- [9] KAUR M, GARG U, KAUR S. Advanced Eclat algorithm for frequent itemsets generation [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10(9): 23263-23279.
- [10] WANG K, QI Y, FOX J J, et al. Association rule mining with the micron automata processor [C]//Proceedings of Parallel and Distributed Processing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 689-699.
- [11] DIAS V, MOREIA R, MEIRA W, et al. Diagnosing performance bottlenecks in massive data parallel programs [C]//Proceedings of IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 273-276.
- [12] ZOIS V, PANANGANAN A, PRASANNA V. Accelerating support count for association rule mining on GPUs [C]//Proceedings of IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 1423-1432.
- [13] KHOLOD I, SHOROV A, GORLATCH S. A functional approach to parallelizing data mining algorithms in Java [C]//Proceedings of International Conference on Parallel Computing Technologies. Berlin, Germany: Springer, 2017: 459-472.
- [14] HEATON J. Comparing dataset characteristics that favor the Apriori, Eclat or FP-growth frequent itemset mining algorithms [EB/OL]. [2017-02-21]. <http://www.xcdsystem.com/Southeastcon>.
- [15] 严健康, 陈更生. 基于 CPU/GPU 异构资源协同调度的改进 H-Storm [J]. 计算机工程, 2018, 44(4): 1-11.
- [16] 李丽娜, 魏晓辉, 李 翔, 等. 流数据处理中负载突发感知的弹性资源分配 [J]. 计算机学报, 2018, 41(10): 2193-2208.
- [17] ZHANG C, ZHANG X, TIAN P. An approximate approach to frequent itemset mining [C]//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Data Science in Cyberspace. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 68-73.
- [9] LI M, SONG B. Design and implementation of a new queue scheduling scheme in DiffServ networks [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Control. Shenyang, China: [s. n.], 2010: 321-329.
- [10] GEORGIADIS L, GUERIN R, PAREKH A. Optimal multiplexing on a single link: delay and buffer requirements [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1997, 43(5): 1518-1535.
- [11] ZHANG H, FERRARI D. Rate-controlled service disciplines [M]. Clifton, UK: IOS Press, 1994.
- [12] STOICA I, ZHANG H, NG T S. A hierarchical fair service curve algorithm for link-sharing, real-time and priority services [C]//Proceedings of SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. Cannes, France: [s. n.], 1997: 236-245.
- [13] STOICA I, SHENKER S, ZHANG H. Core-stateless fair queueing: achieving approximately fair bandwidth allocations in high speed networks [C]//Proceedings of SIGCOMM Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. Vancouver, Canada: [s. n.], 1998: 145-157.
- [14] Ryu SDN Framework Community. Ryu SDN framework [EB/OL]. [2017-11-07]. <http://osrg.github.io/ryu/>.
- [15] LANTZ B, HELLER B, MCKEOWN N. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks [C]//Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. New York, USA: ACM Press, 2010: 152-164.

编辑 索书志

编辑 索书志

(上接第 78 页)