

高速铁路下感知路由器群的协同拥塞控制

鲁凌云, 陈娅婷, 李婷婷

(北京交通大学 计算机与信息技术学院, 北京 100044)

摘 要: 在高速移动环境下, 由于较少考虑单路由器与相邻路由器的连接速率, 容易导致拥塞检测准确性差以及数据流整体传输误差率较高的问题。为解决多节点网络拥塞问题, 结合网络大数据动态性、快速性和时效性强的特性, 提出一种基于路由器群的感知网络控制算法。通过采集参数和数据感知获得更为精准的信息作为判断拥塞情况的依据, 并将相互连接的多路由器分层划分, 邻近两层的路由器设置成一个虚拟节点。针对虚拟节点内部拥塞发生的 3 种拥塞情况, 由控制器对虚拟节点中的边缘路由器参数进行控制和调整。实验仿真结果验证了该算法的可靠性及其稳定性。

关键词: 高速移动; 数据感知; 主动队列管理; 随机早期发现; 协同拥塞控制

中文引用格式: 鲁凌云, 陈娅婷, 李婷婷. 高速铁路下感知路由器群的协同拥塞控制[J]. 计算机工程, 2017, 43(12): 136-140, 154.

英文引用格式: LU Lingyun, CHEN Yating, LI Tingting. Collaborative Congestion Control of Sensing Router Group in High Speed Railway[J]. Computer Engineering, 2017, 43(12): 136-140, 154.

Collaborative Congestion Control of Sensing Router Group in High Speed Railway

LU Lingyun, CHEN Yating, LI Tingting

(School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] In the high speed mobile environment, due to less consideration of single router and adjacent router connection rate, it is easy to lead to poor accuracy of congestion detection and the high error rate of data flow transmission. In order to solve the problem of multi-node network congestion, a kind of sensing network control algorithm based on router group is proposed in combination with the characteristics of dynamic, fast and timeliness of large network data. Through the acquisition of parameters and data-aware to obtain more accurate information as a basis for congestion judgment, and divided the connected routers into the hierarchical routers group, and adjacent two layers of the router was set up as a virtual node. By analyzing the three different congestion cases in the virtual node, the controller will be control and adjust the parameters of the edge router in the virtual node. Experimental simulation results verified the reliability and stability of the algorithm.

[Key words] high speed movement; data sensing; Active Queue Management (AQM); Random Early Detection (RED); collaborative congestion control

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.12.026

0 概述

近年来, 高速移动宽带通信服务越来越受到人们的关注。相较于静态、缓慢移动的场景, 在高速移动场景下, 由于节点移动速度快以及网络越区切换, 网络性能大大下降, 经常产生类似连续丢包、传输中断等异常行为^[1-2]。网络拥塞的出现也是不可避免的, 这将势必影响移动网路服务在高速铁路中的普及和应用。越来越多的科研人员将注意力集中到了优化拥塞控制机制的研究中。

拥塞控制是一种保证网络性能的关键技术, 可以避免拥塞严重导致网络通信中出现死锁现象^[3-4]。主动队列管理 (Active Queue Management, AQM) 是拥塞控制问题的研究热点之一^[5-6]。其中, 随机早期发现 (Random Early Detection, RED) 算法^[7-9]是 IETF 推荐的经典 AQM 算法, 它的基本思想是通过一定概率丢失或标记报文来通知端系统网络拥塞的情况。多个文献的研究表明了 RED 的缺陷问题, RED 的算法性能对参数的设置很敏感。由于高速铁路环境下网络的流量特性是动态

基金项目: 国家自然科学基金 (61201200)。

作者简介: 鲁凌云 (1977—), 女, 副教授、博士, 主研方向为数据通信; 陈娅婷、李婷婷, 硕士研究生。

收稿日期: 2016-10-06 **修回日期:** 2016-12-21 **E-mail:** lylu@bjtu.edu.cn

变化的,随着网络接入数目的增加,敏感程度加剧,单一参数的配置不能使 RED 路由器对拥塞的控制达到满意的效果,必将影响网络业务的正常运行。针对 RED 缺陷以及不同的网络环境,许多文献已提出自适应 RED (Adaptive RED, ARED)、稳定 RED (Stabilized RED, SRED)、Gentle-RED、BLUE 等多种 AQM 改进算法^[10-12],但仍没有获得一个广泛认可和应用的方案。如 ARED^[13]算法是 RED 的改良算法,它在一定程度上实现了参数的自适应配置,但是 RED 的瞬时队列长度不稳定,响应性差的问题并没有得到解决。

当前大部分关于 AQM 的研究工作都是基于单路由器的,即 TCP 终端直接与边界路由器相连的情况。研究和实验证实,依靠单个路由信息获取的信息对拥塞问题进行处理会产生如下影响:拥塞事件检测准确性不高;对数据流的整形效果不好;当拥塞发生时,单路由器的丢包处理容易引起网络流量的大范围波动;网络中的 AQM 路由器相互之间会产生影响^[14-15]。随着网络规模的扩大,拥塞往往不会发生在边界路由器,而是通常发生在网络的中间路由器,因此,需要路由器之间协同控制拥塞。目前很少有文献研究整个网络中的 AQM 路由器之间协同工作的问题,这将是拥塞控制研究的一个新方向。如果将不同的 AQM 算法分布在网络的路由器中,从局部考虑分别产生各个算法认为最优的控制信号,各种控制信号叠加在一起,势必会对整个网络的稳定性产生新的影响,将给该问题的研究增加难度。因此,需要网络中的路由器采用同一类 AQM 算法或者采用弃尾队列,进而展开理论分析和算法设计。

拥塞控制信息是动态生成,利用数据挖掘,大数据分析,将长时段和短时段的参数,例如 RTT、吞吐量等信息进行快速挖掘和分析,为拥塞控制形成更为精准的判断依据。本文提出一种分层网络多路由节点的协同拥塞控制方法。该方法建立了多 RED 路由器协同处理的网络虚拟节点,在单节点拥塞控制基础上,根据已有的 ARED 算法,将高速移动的因素考虑在内,在多路由器节点上进行协同拥塞控制,并利用非线性理论进行稳定性分析。

1 双层网络虚拟节点的拥塞模型

如图 1 所示,终端分别与 n 层边缘路由器相连,输入流量为 $S_{e1} \sim S_{en}$,边缘路由器再分别与 m 层核心路由器相连,输入流量为 $I_{e1} \sim I_{en}$,核心路由器的输出流量为 $I_{c1} \sim I_{cm}$ 。

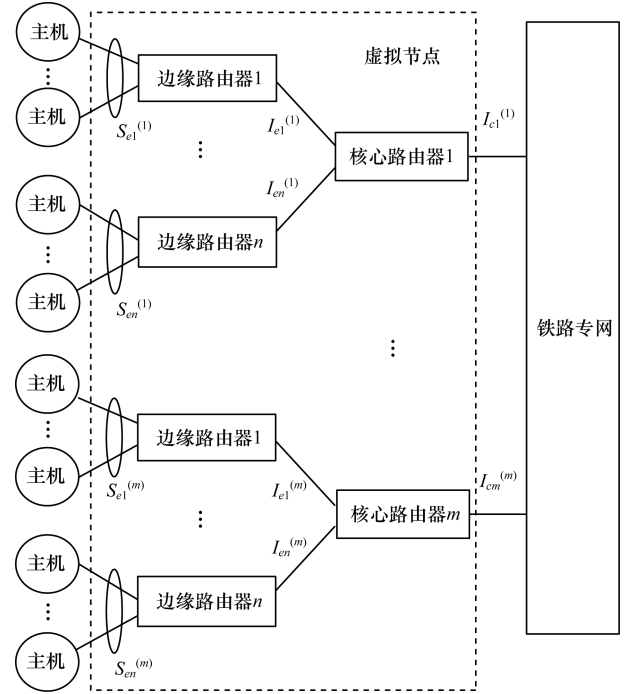


图1 分层路由器群拥塞模型

协同处理的拥塞控制算法将多个路由器节点,即路由器群组成的网络看成一个网络虚拟节点。对该虚拟节点的多路由器进行协同管理,以便对经过该虚拟节点的数据流进行拥塞处理。这种多节点的协同拥塞控制方法可以利用在高速网络环境下获得的多个路由器的信息,利用大数据相关技术进行快速分析和挖掘,从而对网络拥塞事件进行更为准确的检测,并且在多个节点同时对数据流进行拥塞控制。同时,使用网络管理平台进行协同控制,使这种控制算法具有可扩展性,能兼容不同类型的 AQM 路由器。

如图 2 所示,是拥塞控制模型的简化,终端分别与 2 个边缘路由器 1 和 2 连接,2 个边缘路由器为第一层,输入流量分别为 S_{e1} 和 S_{e2} 。边缘路由器再连接到核心路由器上,输入流量分别为 I_{e1} 和 I_{e2} 。核心路由器与铁路专网相连接,输入流量为 I_c 。这些路由器节点看成一个网络虚拟节点,在这个虚拟节点内可能存在 3 种拥塞情况。

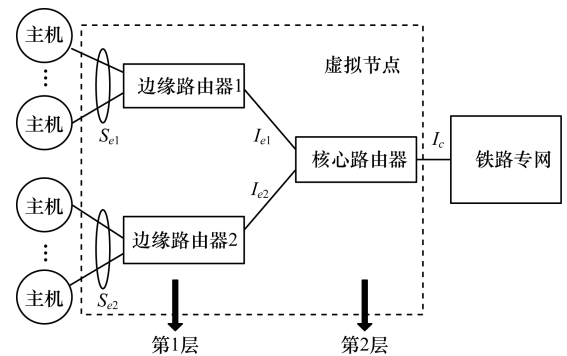


图2 简单分层路由器群拥塞模型

1.1 拥塞只发生在边缘路由器的情况

如果存在至少一个边缘路由器的输入流量 S_{e1} 或 S_{e2} 大于其输出链路容量 I_{e1} 或 I_{e2} , 并且核心路由器的输入流量 S_1 小于核心路由器的输出链路容量 I_c , 那么导致拥塞只发生在边缘路由器, 充要条件如下:

$$\text{Edge_Congestion} = \{S_{e1} > I_{e1} \& S_1 < I_c\} \text{ or } \{S_{e2} > I_{e2} \& S_1 < I_c\} \quad (1)$$

1.2 拥塞只发生在核心路由器的情况

如果所有边缘路由器的输入流量 S_{e1} 和 S_{e2} 均小于边缘路由器的输出链路容量 I_{e1} 和 I_{e2} 且核心路由器的输入流量 S_1 大于核心路由器的输出链路容量 I_c , 那么拥塞将只发生在核心路由器, 充要条件如下:

$$\text{Core_Congestion} = \{S_{e1} < I_{e1} \& S_{e2} < I_{e2} \& S_1 > I_c\} \quad (2)$$

1.3 拥塞发生在边缘路由器和核心路由器的情况

如果存在至少一个边缘路由器的输入流量 S_{e1} 或 S_{e2} 大于其输出链路容量 I_{e1} 或 I_{e2} , 并且核心路由器的输入流量 S_1 大于核心路由器的输出链路容量 I_c , 那么导致拥塞同时发生在边缘路由器和核心路由器, 充要条件如下:

$$\text{Edge And Core_Congestion} = \{S_{e1} > I_{e1} \& S_1 > I_c\} \text{ or } \{S_{e2} > I_{e2} \& S_1 > I_c\} \quad (3)$$

2 感知拥塞控制算法及其稳定性

如图 3 所示, 虚拟节点需配置拥塞探测器, 可采用软件或硬件方式实现。如采用软件方式, 可以在核心路由器进行配置; 如采用硬件方式, 可与核心路由器相连。

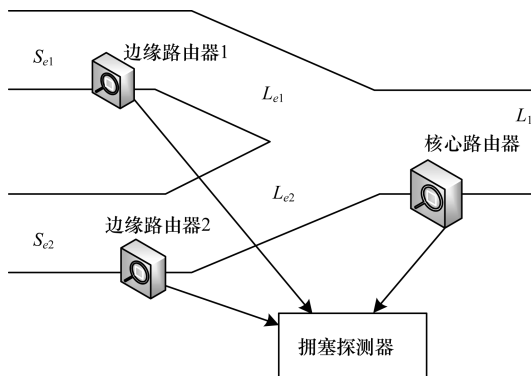


图 3 双层路由器群协同拥塞控制原理

2.1 感知拥塞控制算法

由图 3 可见, 边缘路由器之间的影响是通过核心路由器间接传递的, 从以上分析可知, 核心路由器发生拥塞时会影响经过该路由器群的所有流的丢包概率。协同路由算法的目的就是将核心路由器发生的拥塞分散到边缘路由器上, 特别是在高速移动环境下, 降低受拥塞影响的数据流数目。本文只考虑核心路由器与边缘路由器之间的交互, 不考虑边缘路由器

之间的影响。因此, 核心路由器发生拥塞时, 只考虑其中一个边缘路由器的拥塞情况, 另一个情况类似。假设边缘路由器的最大队列长度阈值 $p'_{\max,e}$ 为:

$$p'_{\max,e} = (p'_{\min,e} / \hat{p}_{\min,e}) \times \hat{p}_{\max,e} \quad (4)$$

$$p'_{\min,e} = I_{c1} \times 0.01 \quad (5)$$

其中, $p'_{\min,e}$ 是协同拥塞控制中每个边缘路由器的最小队列长度阈值; $\hat{p}_{\max,e}$ 和 $\hat{p}_{\min,e}$ 分别是每个边缘路由器的最大和最小初始队列长度阈值; I_{c1} 是核心路由器的输出量。协同路由器群拥塞控制算法如下所示。

1) 把核心路由器的最小和最大队列长度初始化为边缘路由器的最小和最大队列长度:

$$p_{\min,e} = \hat{p}_{\min,e}$$

$$p_{\max,e} = \hat{p}_{\max,e}$$

2) 以 0.01 s 为周期, 判断核心路由器拥塞情况及调整参数以减轻拥塞。则:

If $0 < q_1$ then

// 核心路由器发生拥塞

if $p_{\min,e} > p'_{\min,e}$ then

$$p_{\min,e} = \left(\frac{1}{2}\right)p_{\min,e}$$

endif

if $p_{\max,e} > p'_{\max,e}$ then

$$p_{\max,e} = \left(\frac{1}{2}\right)p_{\max,e}$$

endif

if $q_1 > q_{1,\max}$ then

// 核心路由器发生严重拥塞

$$q_{\max,e} = \left(\frac{3}{2}\right)q_{\max,e}$$

endif

endif

end

根据上述 3 种拥塞情况提出双层路由器群的协同拥塞控算法。其中, $p_{\min,e}$ 与 $p_{\max,e}$ 是核心路由器的最小和最大队列长度阈值。 q_1 是核心路由器的丢包率, $q_{1,\max}$ 是核心路由器的最大丢包率, $q_{\max,e}$ 是动态调节后的边缘路由器最大丢包率。在 10 ms 周期内, 如果核心路由器的丢包率大于 0, 那么代表核心路由器发生拥塞, 并对核心路由器的最小或最大队列长度进行折半调整。如果核心路由器的丢包率超过最大丢包率, 那么路由器发生严重拥塞, 需要动态调节边缘路由器的最大丢包率。

在高速环境下, 以 10 ms 为周期从虚拟节点获取各路由器端口队列长度信息, 利用大数据相关技术对获得的相关信息进行快速分析和挖掘, 从而获得更为精准的判断依据, 进而对虚拟节点中的边缘路由器参数进行更准确的控制和调整。如果核心路

由器节点拥塞减轻或消失,10 ms 后恢复边缘路由器节点的 RED 参数设置。如果拥塞发生在核心路由器,本文将启动路由器群协同拥塞算法。边缘路由器收到拥塞探测器传送的信号,则根据协同路由器群拥塞控制算法更新系统参数。

2.2 稳定性分析

当数据包到达路由器时,不同的流量特征需要配置不同的 RED 参数,而参数的配置会直接影响到多层 RED 路由器群拥塞控制的稳定性能。根据上述协同拥塞控制算法,提出了双层协同路由器群拥塞控制的稳定性定理。

定理 1 根据双层路由器协同拥塞控制算法,系统达到稳定状态当且仅当满足下式:

$$\left| 1 - u - \frac{uM(t)W}{2\sqrt{\frac{q_{1,\max}}{p_{\max,e} - p_{\min,e}}}(p^* - p_{\min,e})^{\frac{3}{2}}} \right| < 1 \quad (6)$$

其中, $W \in [1, \sqrt{8/3}]$, p^* 是虚拟节点核心路由器队列长度达到稳定状态的平衡点, $M(t)$ 是 TCP 数据流数目, u 是核心路由器队列长度变化的指数平均权值。

证明当数据包到达核心路由器时,则根据 λ 更新队列长度:

$$\bar{p}(t + T_0) = (1 - u) \cdot \bar{p}(t) + u \cdot \hat{p}(t) \quad (7)$$

其中, T_0 是数据流的最小平均往返时间, $\hat{p}(t)$ 是虚拟节点内核心路由器的瞬时队列长度,假如每个 TCP 流占用的链路带宽是均匀分布的,则:

$$\begin{aligned} \hat{p}(t) &= \frac{U_{c,\max}}{N} \left(\frac{M(t)WN}{U_{c,\max}\sqrt{q^*}} - K \right) \\ &= \frac{WM(t)}{\sqrt{q^*}} - \frac{U_{c,\max}K}{N} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, q^* 虚拟节点核心路由器队列长度达到稳定状态时的丢包率,假设所有数据包的长度都是 N , $U_{c,\max}$ 是核心路由器的最大吞吐量, K 是链路传输延迟。将式(8)代入式(7),则:

$$\begin{aligned} \bar{p}(t + T_0) &= (1 - u)\bar{p}(t) + u \\ &\quad \cdot \left(\frac{WM(t)}{\sqrt{q^*}} - \frac{U_{c,\max}K}{N} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中:

$$q^* = \frac{p^* - p_{1,\min}}{p_{1,\max} - p_{1,\min}} q_{1,\max} \quad (10)$$

假设边缘路由器和核心路由器都是稳定的,系统应满足下述条件:

$$\bar{p}(t + T_0) = \bar{p}(t) \quad (11)$$

由于 $\bar{p}(t + T_0)$ 是一个递减函数,可以通过对式(9)求偏导可以得到系统的稳定条件,即:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \bar{p}(t)} \bar{p}(t + T_0) \Big|_{p^*} &= 1 \\ -u - \frac{uM(t)W}{2\sqrt{\frac{q_{1,\max}}{p_{\max,e} - p_{\min,e}}}(p^* - p_{\min,e})^{\frac{3}{2}}} & \quad (12) \end{aligned}$$

稳定条件如下:

$$\left| \frac{\partial}{\partial \bar{p}(t)} \bar{p}(t + T_0) \Big|_{p^*} \right| < 1 \quad (13)$$

综上所述,当系统满足以上公式,多层 RED 路由器群趋于稳定,在协同拥塞控制算法改变路由器 RED 参数时,能保证系统不受参数的变动的影 响,保持稳定性。

3 仿真结果

为了检验算法及其稳定性定理的实用性,对其进行实验仿真。首先,仿真实验中产生长时 FTP 数据流和短时 HTTP 数据流,引入短时数据流相当于在路由器队列中混入噪声。在 2 s ~ 3 s 时,在每个边缘路由器上,有一个 CBR 类型的 UDP 流开始发送,速率是 400 packet/ms,从而模拟高速移动场景边缘路由器 1 和边缘路由器 2 连接的 TCP 流数目的取值范围为 [42, 60],其中 FTP 长时数据流为固定的 42 个,短时 HTTP 数据流在 [0, 18] 之间随机变化。为了模拟高速移动场景,实验设定边缘路由器最大输出速率为 3 000 packet/ms,核心路由器最大输出速率为 4 000 packet/ms。为保证 RTT 的最大值在 0.25 s 附近,设置边缘路由器最大丢包率为 0.4、最小队列长度为 60 packet、最大队列长度分 250 packet,其中每个数据包的大小为 100 Byte;设置核心路由器的最大丢包率 $q_{1,\max}$ 为 0.1、最小队列长度为 380 packet、最大队列长度分 800 packet。由于核心路由器为边缘路由器公平的分配链路资源,图 4 ~ 图 9 分别从 TCP 发送窗口均值、往返时间 RTT 均值、核心路由器丢包率、核心路由器和边缘路由器的吞吐量几个方面对比分析了协同拥塞控制算法和未采用协同拥塞控制算法的性能。

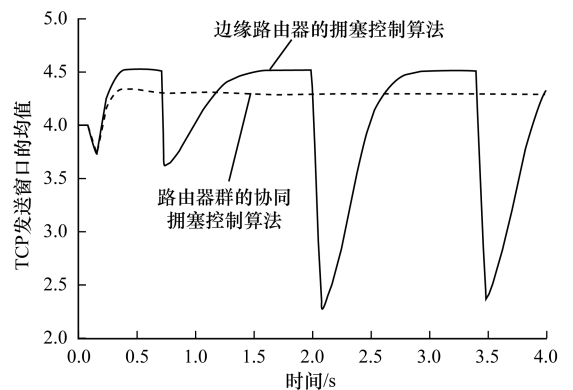


图 4 TCP 发送窗口的均值

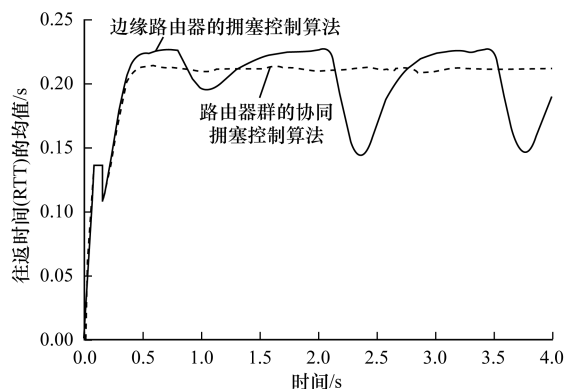


图 5 TCP 往返时间的均值

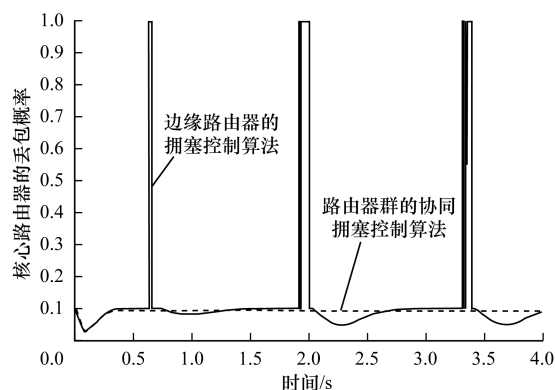


图 6 核心路由器的丢包概率

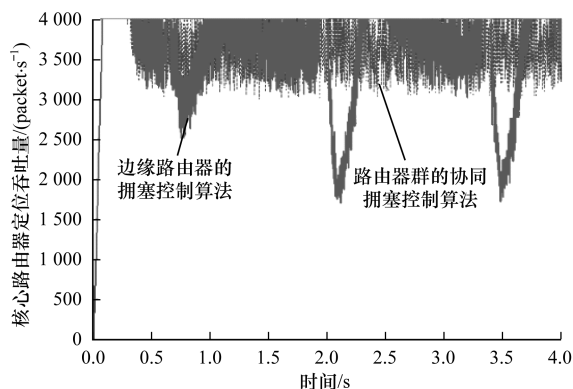


图 7 核心路由器的吞吐量

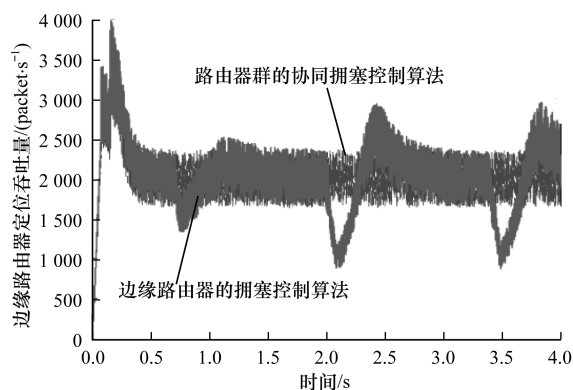


图 8 边缘路由器的吞吐量

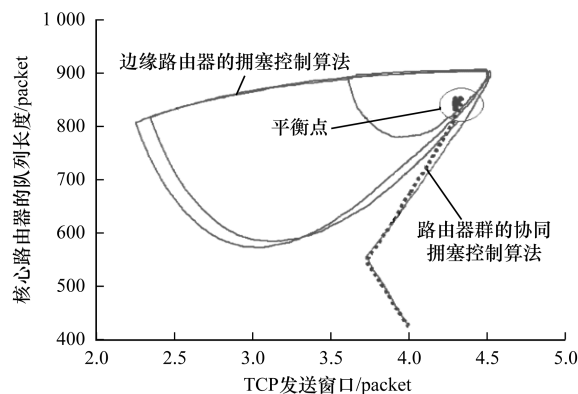


图 9 核心路由器队列长度稳定状态轨迹

在图 6 中,非协同拥塞控制算法的丢包率在 2 s 的时候达到了 1。在图 7 和图 8 中,队列长度在 2 s 的时候队列长度达到了极大值,但随后由于出现了 TCP 流同步现象,队列长度有快速减少。而协同拥塞算法中队列长度在 2 s~3 s 之间的变化不大,因此核心路由器的丢包率也没有出现大的波动。从图 4~图 8 发现,在 [0,4] 的观测时间内未采用协同拥塞控制算法情况下, TCP 发送窗口均值、往返时间 RTT 均值、核心路由器丢包率、核心路由器和边缘路由器的吞吐量的波动范围较大。而采用了协同拥塞算法波动范围较小,能够在 0.4 s 附近快速趋于平衡。在 0.4 s 之前系统振荡的原因可从图 9 的曲线轨迹中分析,当 TCP 发送窗口均值在 4.4 附近时,核心路由器的队列长度将达到稳定状态,使丢包率在 0.4 s 后小于 0.1,核心路由器的吞吐量在 0.4 s 后在 3 200 packet/s~4 000 packet/s 范围内达到稳定状态,边缘路由器的吞吐量在 0.4 s 后在 1 600 packet/s~2 400 packet/s 范围内达到稳定状态,从而保证了双层 AQM 网络趋于稳定。

4 结束语

本文通过数据感知获得更为精准的信息作为判断依据,并将高速移动因素考虑在内,提出一种以多路由器为虚拟节点进行网络拥塞控制的新型算法。在多数数据流情况下,该算法利用网络管理平台对其进行协同控制,通过对虚拟节点内路由器中参数的修改实现对流量的分布拥塞处理。仿真结果表明,该算法具有较好的稳定性。下一步将利用路由协议进行协同控制参数的传递,避免使用网管平台进行控制带来的时滞,将 2 层虚拟节点模型扩展到多层。

参考文献

- [1] LI Li, KE Xu, DAN Wang, et al. A Measurement Study on TCP Behaviors in HSPA + Networks on High-speed Rails[C]//Proceedings of INFOCOM'15. Washington D. C., USA:IEEE Press,2015:2731-2739.
- [2] YANG Y, FAN P. Doppler Frequency Offset Estimation and Diversity Reception Scheme of High-speed Railway with Multiple Antennas on Separated Carriage[J]. Journal of Modern Transportation,2012,20(4):227-233.

(下转第 154 页)

翻转易位操作,使得算法能够在解空间中进行随机投影。通过对比实验结果表明,DMEA 在函数优化和 MMKP 中均表现出较好的性能。算法种群同质化测试中的数据也表明 DMEA 具有较强的多维函数优化和解决复杂问题的能力。

参考文献

- [1] 陈 皓,崔杜武,崔颖安,等. 族群进化算法[J]. 软件学报,2010,21(5):978-990.
- [2] 刘 振,胡云安,彭 军. 协同进化扩展紧致量子进化算法[J]. 控制与决策,2014(2):320-326.
- [3] ZHAO Fuqing, SHAO Zhongshi, WANG Junbiao, et al. A Hybrid Optimization Algorithm Based on Chaotic Differential Evolution and Estimation of Distribution[J]. Computational and Applied Mathematics, 2015, 36(1): 1-26.
- [4] 周永权,黄正新,刘洪霞. 求解 TSP 问题的离散型萤火虫群优化算法[J]. 电子学报,2012,40(6):1164-1170.
- [5] HALDAR A. A Review on Genetic Algorithm[J]. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 2014, 3(1):369-372.
- [6] MUSA H, IBRHHIM S B. A Review of Particle Swarm Optimization(PSO) Algorithms for Optimal Distributed Generation Placement[J]. International Journal of Energy and Power Engineering, 2015, 4(4):232-239.
- [7] SANTANA R, MENDIBURU A, LOZANO J A. A Review of Message Passing Algorithms in Estimation of Distribution Algorithms[J]. Natural Computing, 2014, 15(1):1-16.
- [8] 刘 全,王晓燕,傅启明,等. 双精英协同进化遗传算法[J]. 软件学报,2012,23(4):765-775.
- [9] MARTÍNEZ J L F, GONZALO E G. The PSO Family: Deduction, Stochastic Analysis and Comparison[J]. Swarm Intelligence, 2015, 3(4):245-273.
- [10] KABÁN A, BOOTKRAJANG J, DURRANT R J. Towards Large Scale Continuous EDA: A Random Matrix Theory Perspective[C]//Proceedings of Conference on Genetic and Evolutionary Computation. New York, USA: ACM Press, 2015:383-390.
- [11] GROBA C, SARTAL A, VÁZQUEZ X H. Solving the Dynamic Traveling Salesman Problem Using a Genetic Algorithm with Trajectory Prediction: An Application to Fish Aggregating Devices[J]. Computers & Operations Research, 2015, 56(C):22-32.
- [12] JORDEHI A R. Enhanced Leader PSO (ELPSO): A New PSO Variant for Solving Global Optimization Problems[J]. Applied Soft Computing, 2015, 26: 401-417.
- [13] VALDEZ S I, HERNÁNDEZ A, BOTELLO S. A Boltzmann Based Estimation of Distribution Algorithm[J]. Information Sciences, 2013, 236:126-137.
- [14] LIANG J J, RUNARSSON T, MEZURA-MONTES E, et al. Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2006 Special Session on Constrained Real-Parameter Optimization[EB/OL]. [2016-09-02]. <http://www.lania.mx/~emezura>.
- [15] HIFI M, MICHRAFY M, SBIHI A. Heuristic Algorithms for the Multiple-choice Multidimensional Knapsack Problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 2004, 55(12):1323-1332.

编辑 金胡考

(上接第 140 页)

- [3] 王元卓,靳小龙,程学旗. 网络大数据:现状与展望[J]. 计算机学报,2013,36(6):1125-1138.
- [4] 孟小峰,慈 祥. 大数据管理:概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展,2013,50(1):146-169.
- [5] 任丰原,林 闯,黄小猛,等. 主动队列管理算法的分类器实现[J]. 电子学报,2004,32(11):1796-1800.
- [6] HOLLOTC V, MISRA V, TOWSLEY D, et al. Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(6):945-959.
- [7] 任丰原,林 闯,王福豹. RED 算法的稳定性:基于非线性控制理论的分析[J]. 计算机学报,2002,25(12):1302-1307.
- [8] 何 阳,周井泉. 一种改进的 RED 主动队列管理算法[J]. 计算机技术与发展,2013,23(8):111-115.
- [9] CHEN Weifeng, LIAN Fenhuang, CHENG Xu, et al. Congestion Control Scheme Performance Analysis Based on Non-linear RED[J]. IEEE Systems Journal, 2015(99):1-8.
- [10] PATELC M. URED: Upper Threshold RED an Efficient Congestion Control Algorithm[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014:1-5.
- [11] OTTT J, LAKSHMAN T V, WONG L H. SRED: Stabilized RED[C]//Proceedings of INFOCOM'99. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1999:1346-1355.
- [12] HOLLOTC V, MISRA V, TOWSLEY D, et al. On Designing Improved Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows[C]//Proceedings of INFOCOM'01. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2001:1726-1734.
- [13] RICHARD J L, PRIYA R, EYAD H A. Analysis of Adaptive Random Early Detection (ARED)[J]. Teletraffic Science & Engineering, 1993, 51(8):1271-1280.
- [14] 刘 明. 面向网络拥塞控制的主动队列管理机制研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.
- [15] GONG Y, ROSSI D, TESTA C, et al. Fighting the Bufferbloat: On the Coexistence of AQM and Low Priority Congestion Control[C]//Proceedings of INFOCOM'13. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013:3291-3296.

编辑 刘 冰