

一种快速公平收敛的拥塞控制算法

彭立宏,张鹤颖,姜新文,窦文华

(国防科学技术大学计算机学院,湖南长沙 410073)

摘要: 传统的拥塞控制算法在网络容量或往返延时很大时表现出很低的平衡收敛速度.本文提出一种称之为 NMKC 的算法改善公平收敛速度.算法基于网络反馈进行模式切换:低负载模式采用 MKC 的源端控制方程调整发送速率,从而指数收敛到效率;高负载模式构建了一种新颖的源端更新方法提高公平收敛速度.理论证明了新方法的稳定性和收敛性能,NS 仿真实验表明新方法能显著提高公平收敛速度.

关键词: 拥塞控制;最大-最小 Kelly 控制;公平收敛;效率

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1918-05

A Congestion Control Method with Quick Fairness Convergence Speed

PENG Li-hong, ZHANG He-ying, JIANG Xin-wen, DOU Wen-hua

(Computer School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Traditional Congestion control algorithms exhibit low convergence rate to equilibrium when the network capacity or round-trip delay is very large. In this paper, we propose a new algorithm called NMKC to accelerate the fairness convergence speed. To achieve this goal, our method incorporates two modes of operation based on the network feedback: low load mode updates the sending rate with MKC source control equation to achieve exponential convergence to efficiency, and high load mode constructs a novel source updating method to improve fairness convergence speed. The stability and convergence behavior is proved by theory. NS simulation results show that NMKC offers faster convergence speed.

Key words: congestion control; max-min Kelly control; fairness convergence; efficiency

1 引言

TCP (Transmission Control Protocol, 如 Reno, Vegas) 和具有代表性的 AQM (Active Queue Management, 如 RED, REM) 构成的系统能够收敛到平衡点并显著地降低互联网崩溃的概率.然而,随着通信技术的发展,传统 TCP 拥塞控制机制面临的具有挑战性的课题是高带宽延时积网络 (Bandwidth Delay Product) 的效率和公平问题^[1].

近年来,研究人员进行了大量的理论和实验工作,为高 BDP 网络设计高效稳定的拥塞控制方法^[2~7].其中一个研究热点是借助于优化理论或博弈论为网络建模,利用控制理论和非线性理论分析系统的稳定,公平和效率等性能,从而指导新协议的设计和分析.

Kelly 及其合作者建立了网络系统全局最优问题的数学模型,并提出了求解的原始 (primal) 算法和对偶 (dual) 算法,为拥塞控制的研究提供了新思路^[8,9].然而,文献[8]仅在无延时影响的情况下证明了算法的全局稳定性,且算法的收敛性能与 TCP 类方法相似都是

线性收敛到效率.上述性能对网络带宽的高效公平利用极为不利.

围绕实现高带宽延时积网络的延时稳定性,出现了大量的改进和增强算法.文献[10~12]研究了网络延时的影响,给出了延时相同和不同时的局部稳定性条件.然而,稳定性条件与延时相关.为克服延时对系统稳定性的不利影响,Zhang 等人提出 MKC 算法,建立了与延时无关的局部稳定性条件^[13].MKC 算法允许网络反馈,即数据包丢失率为负数,获得了效率的指数收敛^[13].然而,MKC 方法收敛到公平的速率仍然是线性的.

针对目前研究现状的不足,本文提出一种模式切换的拥塞控制机制:源端根据路由器反馈的网络数据包丢失率将网络拥塞状态划分为低负载区域和过载区域,并针对不同网络拥塞状态分别采取不同的源端控制方程调整发送速率.称新方法为 NMKC (New Max-Min Kelly Control).NMKC 在延时相同和不同的情况下都保持渐近稳定性,并快速收敛到效率和公平,且公平收敛速度显著快于 MKC.

2 基本模型和相关工作

假设网络由源端集合和链路集合构成.从源端 i 发出的数据流在时刻 n 的速率为 $x_i(n)$.源端 i 到路由器 j 的延时和路由器 j 到源端 i 的延时分别用 D_{ij}^{\rightarrow} 和 D_{ij}^{\leftarrow} 表示,显然往返延时 $D_i = D_{ij}^{\rightarrow} + D_{ij}^{\leftarrow}$.路由器 j 在时刻 n 观察到的聚合到达速率为 $X_j(n) = \sum_{i \in j} x_i(n)$,其中 $i \in j$ 表示经过链路 j 的流集合.类似的, $j \in i$ 表示流 i 经过的链路集合.

MKC 是一个典型的基于速率的端到端显式反馈拥塞控制算法:流 i 的路径上每个路由器 j 根据链路容量和聚合到达速率周期地计算反馈,即包丢失率.这个反馈值随后与所有流经路由器 j 的数据包头部的对应值进行比较,若大于数据包头部的值则替换,否则维持不变.该反馈值通过确认数据包反馈给源端.源端 i 收到沿途最拥塞路由器的反馈并根据式(1)动态地调整发送速率:

$$x_i(n) = x_i(n - D_i) - \beta q_i(n) x_i(n - D_i) + \alpha \quad (1)$$

其中 $x_i(n - D_i)$ 是源端 i 在一个 RTT 前的速率, α 和 β 是正的增益常数, q_i 是源端 i 在时刻 n 收到的沿途最拥塞路由器的反馈,即:

$$q_i(n) = \max_{j \in i} p_j(n - D_{ij}^{\leftarrow}) \quad (2)$$

其中 $q_i \in (-\infty, 1)$, p_j 是路由器 j 的反馈:

$$p_j(n) = \frac{\sum_{u \in j} x_u(n - D_{uj}^{\rightarrow}) - C_j}{\sum_{u \in j} x_u(n - D_{uj}^{\rightarrow})} \quad (3)$$

式(3)中 C_j 是路由器 j 的容量.

文献[13]证明在延时不同的情况下,MKC 算法的稳定条件是 $0 < \beta < 2$,与延时无关.假设系统中有 N 条流,则路由器的稳态聚合到达速率为 $X^* = C + N\alpha/\beta$.可见,稳态时 MKC 的聚合到达速率高于链路带宽,存在过载现象.MKC 指数收敛到效率,但是公平收敛速度是线性的.为此我们提出新算法改进公平收敛速度.

3 NMKC

对 MKC 公平收敛速度的改善是本文关注的焦点.本节提出一种新颖的非线性方法,根据网络拥塞程度进行模式切换,获得了快速的公平收敛速度.

3.1 模式切换

根据网络反馈的数据包丢失率,可以把拥塞控制分为两个阶段.第一个阶段 $q_i(n) \leq 0$,此时链路处于低载状态,以效率收敛为主.第二个阶段 $0 < q_i(n) < 1$,反馈值为正数,此时链路处于高载状态,聚合到达速率大于瓶颈链路容量,以公平收敛为主.

在效率收敛阶段,源端采用式(1)更新发送速率.

在这个阶段,发送速率指数收敛到效率.

在公平收敛阶段,参数 α 的取值将直接影响公平收敛速度.若 α 取常数,则收敛速度是线性的.为了改善公平收敛速度,我们考虑将反馈值引入该项,根据反馈值动态地调整增加量.反馈值的引入应该使得网络拥塞程度高时速率变化较小,而网络拥塞程度低时速率变化较大.符合这种变化规律的函数较多,我们以 $1/\sqrt{q_i(n)}$ 为例,得到如下的源端控制方程:

$$x_i(n) = x_i(n - D_i)(1 - \beta q_i(n)) + \alpha/\sqrt{q_i(n)} \quad (4)$$

注意到 MKC 稳态聚合速率大于瓶颈链路容量,存在稳态丢包问题.为减少稳态丢包,路由器在计算包丢失率时采用虚拟容量 γC 而不是实际物理容量 C ,其中 $0 < \gamma \leq 1$,链路利用率可调.因此,路由器 j 根据下面的公式周期地计算反馈值:

$$p_j(n) = \frac{\sum_{u \in j} x_u(n - D_{uj}^{\rightarrow}) - \gamma C_j}{\sum_{u \in j} x_u(n - D_{uj}^{\rightarrow})} \quad (5)$$

3.2 稳态性能分析

由于被同一个瓶颈路由器阻塞的 NMKC 流收到相同的反馈,源端行为与被其它路由器阻塞的流无关,因此下面讨论算法的性能时只考虑了单瓶颈网络.此时,每条流仅有一个瓶颈路由器.

假设单瓶颈链路网络,瓶颈链路的容量为 C ,网络中有 N 条流.不考虑延时,源端控制方程可以写为:

$$x_i(n) = \begin{cases} x_i(n-1)(1 - \beta q(n-1)) + \alpha, & q(n) \leq 0 \\ x_i(n-1)(1 - \beta q(n-1)) + \alpha/\sqrt{q(n)}, & q(n) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 $q(n)$ 是瓶颈路由器的反馈:

$$q(n) = \frac{\sum_{u=1}^N x_u(n) - \gamma C}{\sum_{u=1}^N x_u(n)} \quad (7)$$

定理 1 假设 N 维无延时系统(6)和(7)中所有用户有相同反馈,则系统局部渐近稳定的条件是: $0 < \beta \left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) < 2$.

证明 为证明非线性系统的稳定性,我们首先求稳定点,然后在稳定点附近线性化系统,求线性化系统的稳定性.证明方法类似文献[13].

首先求稳定点.假设所有源端收到相同反馈且同步响应,故稳定时, $x_i(n) = x^*$,对所有 i .由于稳定时 $q^* > 0$,故稳态速率满足下面的公式:

$$x^* = \frac{\alpha}{\beta(q^*)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

其中 $q^* = \frac{Nx^* - \gamma C}{Nx^*}$, C 是瓶颈链路容量.

令 $f_i(\mathbf{X}) = (1 - \beta q(\mathbf{X}))x_i + \alpha/\sqrt{q(\mathbf{X})}$, 在稳定点 $\mathbf{X}^* = \langle x^*, x^*, \dots, x^* \rangle$ 附近线性化系统, 得到:

$$\left. \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{X}^*} = \left(1 - \beta q - \beta x_i \frac{\partial q}{\partial x_i} - \frac{1}{2} \alpha q^{-\frac{3}{2}} \frac{\partial q}{\partial x_i} \right) \Big|_{\mathbf{X}^*} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial f_i}{\partial x_k} \right|_{\mathbf{X}^*} = \left(-\beta x_k \frac{\partial q}{\partial x_k} - \frac{1}{2} \alpha q^{-\frac{3}{2}} \frac{\partial q}{\partial x_k} \right) \Big|_{\mathbf{X}^*}, k \neq i \quad (10)$$

因为数据包丢失率仅与所有用户的聚合输入速率有关, 且稳定状态聚合速率 $X^* = Nx^*$, 故 $\left. \frac{\partial q}{\partial x_k} \right|_{\mathbf{X}^*} = \frac{\partial q}{\partial x_i} \Big|_{\mathbf{X}^*}$. 于是 NMKC 有如下的雅克比行列式:

$$J = \begin{pmatrix} a & b & \cdots & b \\ b & a & \cdots & b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b & b & \cdots & a \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中, $a = 1 - \beta q^* - \beta x^* \left. \frac{\partial q}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{X}^*} - \frac{1}{2} \alpha q^* \left. \frac{\partial q}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{X}^*}$

$$b = -\beta x^* \left. \frac{\partial q}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{X}^*} - \frac{1}{2} \alpha q^* \left. \frac{\partial q}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{X}^*}.$$

非线性系统局部稳定的充要条件是雅克比行列式 J 的所有特征值在单位圆内, 即

$$|\lambda_k| = |a + b(\xi_k + \xi_k^2 + \cdots + \xi_k^{N-1})| < 1 \quad (12)$$

其中 $\xi_k = e^{i2\pi k/N}$ ($k = 0, 1, \dots, N-1$).

当 $N=1$ 时, 式(12)特征值为 a , 故只需考虑 $N > 1$ 的情况. 即:

$$|\lambda_k| = \begin{cases} |a + b(N-1)| < 1, & \xi_k = 1 \\ |a + b \frac{\xi_k - \xi_k^N}{1 - \xi_k}| = |a - b| < 1, & \xi_k \neq 1 \end{cases} \quad (13)$$

求解式(13)中第一个不等式得到:

$$\begin{aligned} |a + b(N-1)| &= \\ \left| 1 - \beta q^* - N\beta x^* \left. \frac{\partial q}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{X}^*} - \frac{N}{2} \alpha q^* \left. \frac{\partial q}{\partial x_i} \right|_{\mathbf{X}^*} \right| &< 1 \end{aligned} \quad (14)$$

由于稳定时 $C < Nx^*$, 于是:

$$0 < \beta(1 + \frac{\gamma}{2}) < 2 \quad (15)$$

求解式(13)中第二个不等式得到:

$$0 < \beta q^* < 2 \quad (16)$$

由于丢包率 q^* 不大于 1, 故式(16)的条件弱于式(15). 因此, 式(15)是系统稳定的条件. 该条件与延时无关.

根据文献[13]的推论 2, 式(15)也是延时不同的系统(1)(4)和(5)的渐近稳定条件.

3.3 收敛性能分析

当 $q_i(n) < 0$ 时, 易知 NMKC 指数收敛到效率. 当 $q_i(n) > 0$ 时, 采用 ϵ -公平讨论算法的公平收敛速度.

定义 1(ϵ -公平速率分配) 对某个给定的 $\epsilon > 0$, 称速率分配 (x_1, x_2, \dots, x_N) 是 ϵ -公平的如果,

$$f = \frac{\min_{r=1}^N x_r}{\max_{r=1}^N x_r} \geq 1 - \epsilon \quad (17)$$

定理 2 假设单瓶颈链路容量为 C , 有 N 条流, 系统从最不公平状态开始, 则在相同参数 (N, α, β) 情况下, NMKC 到达 ϵ -公平比 MKC 快 $\left(\frac{(C + N \frac{\alpha}{\beta})\beta}{N\alpha} \right)^{1/3}$ 倍.

证明 假设 (x, y) 是整个分析期间最不公平两条 NMKC 流的速率, 其中初始速率 $y_0 > x_0$. 此时 $q(n) > 0$, 则第 n 步的公平指数为:

$$\begin{aligned} f_n = \frac{x_n}{y_n} &\approx 1 - \frac{(y_0 - x_0)(1 - \beta p^*)^n}{y_n} \\ &\geq 1 - \frac{(y_0 - x_0) \left(1 - \left(\frac{N\alpha\sqrt{\beta}}{X^*} \right)^{2/3} \right)^n}{y^*} \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $X^* = Nx^*$ 是稳态聚合速率. 假设第 n 步时 $f_n \geq 1 - \epsilon$, 则

$$\begin{aligned} n &\leq \log_1 - \left(\frac{N\alpha\sqrt{\beta}}{X^*} \right)^{2/3} \frac{y^* \epsilon}{y_0 - x_0} \\ n &\approx - \left(\frac{X^*}{N\alpha\sqrt{\beta}} \right)^{2/3} \log \left(\frac{y^* \epsilon}{y_0 - x_0} \right) + \Theta \left(\frac{N\alpha\sqrt{\beta}}{C} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

如果系统中有 N 条 MKC 流, (x, y) 是两条最不公平 MKC 流, 则第 n 步的公平指数为:

$$\begin{aligned} \theta &\leq \log_1 - \frac{N\alpha}{X^*} \frac{y^* \epsilon}{y_0 - x_0} = \frac{\log(y^* \epsilon / (y_0 - x_0))}{\log \left(1 - \frac{N\alpha}{X^*} \right)} \\ \theta &\approx - \frac{X^*}{N\alpha} \log \left(\frac{y^* \epsilon}{y_0 - x_0} \right) + \Theta \left(\frac{N\alpha}{C} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

假设 $N\alpha \ll C$, 并适当选取 γ , 使得两个算法的稳态聚合速率相同, 都为 $X^* = C + N\alpha/\beta$. 则式(19)除以式(20)得到:

$$\frac{n}{\theta} \approx \left(\frac{X^* \beta}{N\alpha} \right)^{1/3} = \left(\frac{(C + N \frac{\alpha}{\beta})\beta}{N\alpha} \right)^{1/3} \quad (21)$$

NMKC 的公平收敛时间不仅与参数 α 有关, 也与参数 β 有关.

4 仿真及结果分析

我们在 NS2 中实现了 NMKC 算法, 对算法的性能进行了验证, 并与 MKC 算法做了比较^[14]. 在下面的仿真中, 如果没有特别说明, 参数设置为 $\alpha = 0.5\text{Mbps}$, $\beta = 0.9$, $\gamma = 0.98$.

4.1 单瓶颈链路

本节采用单瓶颈链路的网络拓扑结构, 即典型的

哑铃网络拓扑结构进行仿真,如图 1 所示,其中 S_i 为源端, R_1 为路由器, R_2 为目的节点. 源 S_i 和目的节点 R_2 之间建立连接 x_i . R_1-R_2

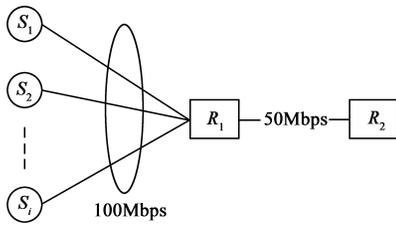


图1 单瓶颈链路

是唯一的瓶颈链路,其带宽为 50Mbps,传输延时为 5ms. 其它链路带宽为 100Mbps,传输延时为 20ms.

瓶颈链路带宽的影响 为了考察瓶颈链路带宽对收敛速度的影响,仿真实验中,瓶颈链路的带宽从 16Mbps 变化到 1024Mbps. 两条流分别在 $t = 0s$ 和 $t = 5s$ 开始发送数据,流的往返传输延时均为 50ms. 仿真结果如图 2 所示. 从图中可以看出, MKC 和 NMKC 在不同瓶颈链路带宽下都能有效利用带宽,并获得公平带宽共享. 其中, NMKC 的收敛速度明显快于 MKC, 而且随着带宽的增加,改善越明显.

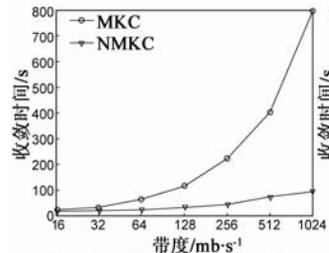


图2 瓶颈链路带宽的影响 (横轴是对数坐标)

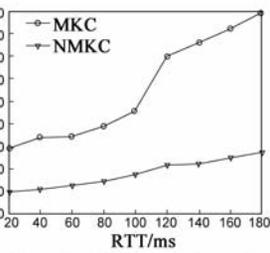


图3 往返传输延时的影响

往返传输延时的影响 仿真实验中,瓶颈链路的带宽固定为 100Mbps,数据流的往返传输延时从 20ms 变化到 180ms. 仿真结果如图 3 所示. 从图中可以看到, NMKC 的公平收敛时间明显快于 MKC. 往返传输延时的增加对 NMKC 收敛时间的影响不大.

不同 RTT 的影响 仿真实验中,瓶颈带宽为 100Mbps,10 条流共享该瓶颈,流的往返传输延时分别为 20,30,⋯,110ms. MKC 和 NMKC 的仿真结果如图 4 和图 5 所示(为便于观察,图中仅画出了单数流). 从图中可以看到,在流的 RTT 不同的网络环境中两个算法都能收敛到公平带宽共享,而 NMKC 在第 7s 收敛到稳定状态,明显快

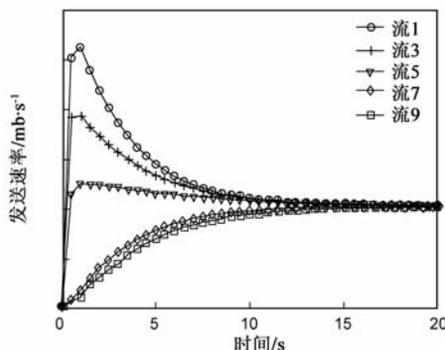


图4 不同RTT时MKC的仿真结果

于 MKC(约在第 16s 收敛到稳定状态).

4.2 多瓶颈链路

本节在更为复杂的多瓶颈网络拓扑中考察算法性能. 采用典型的停车场网络拓扑结构,如图 6 所示,其中 S_i 为源端, R_i 为路由器, D_i 为接收端. 源 S_i 和 D_i 之间建立连接. 链路 R_1-R_2 , R_2-R_3 , R_3-R_4 的带宽分别为 80, 100 和 50Mbps, 传输延时分别为 10, 40, 20ms. 参数 γ 设为 0.98. 网络中 4 条数据流,间隔 50 秒发送数据.

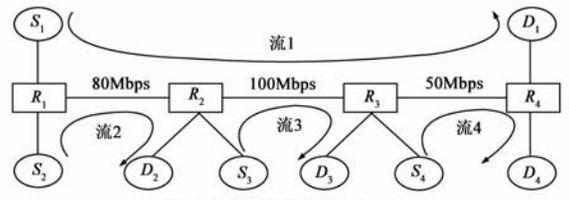


图6 多瓶颈链路网络拓扑

仿真结果如图 7 所示. 流 1 首先开始发送数据并很快到达稳定点. 第 50s, 流 2 开始发送数据, 瓶颈链路由 R_3-R_4 变成了 R_1-R_2 . 瓶颈链路的变化并没有影响两个算法收敛, 然而, NMKC 在 40s 的时间内达到了公平速率, 而 MKC 在 100s 时间内没有收敛到公平带宽共享. 流 3 在第 100s 加入, 很快获取了 R_2-R_3 链路的剩余带宽. 流 4 在第 150s 加入系统, 此时瓶颈链路由 R_1-R_2 变成了 R_3-R_4 . NMKC 在 50s 内收敛到公平带宽, 而 MKC 则花费了大约 100s 时间才收敛到稳定状态. 显然, 在复杂的瓶颈变化的多瓶颈链路中, NMKC 公平收敛速度较快.

图 7(b) 中我们发现, 每当有新流加入时, NMKC 流的发送速率出现了振荡, 如第 150s 流 x_3 和流 x_4 的发送速率. 这是因为当系统处于稳定状态时, 若有新流加入, 此时的反馈值并没有反映流数的变化, 如果采用式 (6) 的第二式更新速率, 则速率变化过大导致严重过载现象. 为了解决这个问题, 我们在实现 NMKC 算法时做了如下修正: 如果是新流开始发送数据, 则不管反馈值是多少, 前两个 RTT 采用较保守的方式, 即式 (6) 的第一个公式调整速率. 修改后再仿真, 发现各条流的发送速率平滑变化, 没有出现大的振荡.

5 结论

本文在回顾了现有的基于优化理论的原始算法研

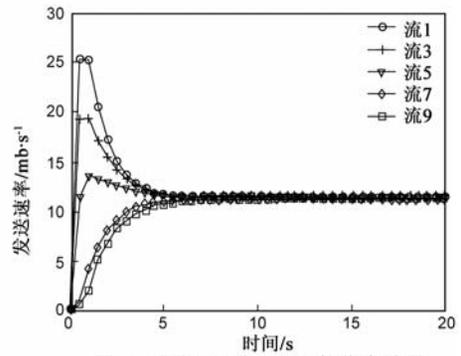


图5 不同RTT时NMKC的仿真结果

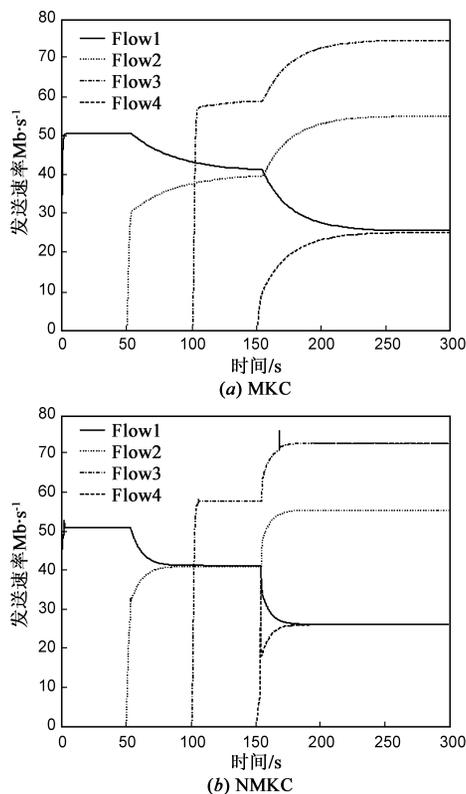


图7 多瓶颈链路仿真结果

究成果后,提出了一种基于网络反馈进行模式切换和动态选取增益参数的原始算法 NMKC.通过大量的仿真实验以及与 MKC 算法的对比分析,验证了 NMKC 在公平收敛速度上有显著的改善.

参考文献:

- [1] Floyd S. Highspeed TCP for large congestion windows[S]. IETF RFC 3649, Experimental, 2003.
- [2] Wei D, Jin C, Low S. FAST TCP: Motivation, architecture, algorithms, performance [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2006, 14(6): 1246 – 1259.
- [3] Katabi D, Handley M, Rohrs C. Congestion control for high bandwidth-delay product networks [A]. In Proc. ACM SIGCOMM 2002 [C]. Pittsburgh: ACM Press, 2002. 89 – 102.
- [4] Qazi I, Andrew L, Znati T. Congestion control using efficient explicit feedback [A]. In Proc. IEEE INFOCOM 2009 [C]. Brazil: IEEE Press, 2009. 20 – 25.
- [5] Zhang Y, Leonard D, Loguinov D. JetMax: Scalable max-min congestion control for high-speed heterogeneous networks [A]. In Proc. IEEE INFOCOM 2006 [C]. Spain: IEEE Press, 2006. 1 – 13.
- [6] 苏凡军, 潘雪增, 蔡亮, 徐建. CB-HSTCP: 高速网络中的公平 TCP 算法 [J]. 电子学报, 2005, 33(11): 2084 – 2089.
Su F J, Pan X Z, Cai L, Xu J. CB-HSTCP: fair TCP in high-speed network [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11): 2084 – 2089. (in Chinese)

- [7] 关洪涛, 王东, 赵有健, 吴建平. NewReno 拥塞控制方式下路由器缓冲区容量研究 [J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1440 – 1446.

Guan H T, Wang D, Zhao Y J, Wu J P. Study on router buffer size with NewReno congestion control method [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1440 – 1446. (in Chinese)

- [8] Kelly FP. Changing and rate control for elastic traffic [J]. European Transactions on Telecommunications, 1997, 8(1): 33 – 37.
- [9] Kelly FP, Maulloo AK, Tan D. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability [J]. Journal of the Operations Research Society, 1998, 49(3): 237 – 252.
- [10] Johari R, Tan D. End-to-end congestion control for the Internet: delays and stability [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(6): 818 – 832.
- [11] Vinnicombe G. On the stability of end-to-end congestion control for the Internet [DB/OL]. Technical Report, CUED/F-INFENG/TR. 398, Cambridge: University of Cambridge, 2000.
- [12] Massoulié L. Stability of distributed congestion control with heterogeneous feedback delays [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 47(6): 895 – 902.
- [13] Zhang Y, Kang S, Loguinov D. Delayed stability and performance of distributed congestion control [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(5): 838 – 851.
- [14] McCanne S, Floyd S. The network simulator-ns-2 [DB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.

作者简介:



彭立宏 女, 1972 年 10 月出生, 湖南长沙, 现为国防科学技术大学计算机学院在读博士研究生, 主要研究方向为网络拥塞控制.

E-mail: p. lihong@yahoo.com



张鹤颖 女, 国防科学技术大学计算机学院副研究员, 主要研究方向为计算机网络等.

E-mail: hey_zhang@hotmail.com

姜新文 男, 国防科学技术大学计算机学院教授, 主要研究方向为算法及其复杂性分析等.

窦文华 男, 国防科学技术大学计算机学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机网络, 体系结构等.