

Internet 拥塞控制系统在不同源控制算法作用下的资源竞争分析

戴 航 慕德俊 王 林 张慧翔

(西北工业大学自动化学院 西安 710072)

摘 要 在未来的 Internet 拥塞控制协议中,不同的用户群根据不同的 QoS 需求,可以实现不同的控制算法。系统地研究了拥塞控制系统在 AIMD 和 MIMD 两类源算法共同作用下的稳态和动态特性,这些特性揭示了配置不同源控制算法的用户群对网络资源的竞争。内容包括 AIMD, MIMD 算法共同作用下的系统模型、系统稳态分析、系统稳定性分析等。基于 NS2 系统的仿真结果,证实了给出的分析方法的有效性,并揭示了不同源算法对网络资源的竞争情况。

关键词 拥塞控制系统, AIMD 算法, MIMD 算法, 共同作用, 系统模型, 稳态分析, 稳定性分析, 资源竞争

中图法分类号 TP311 **文献标识码** A

Analysis of Resource Competition for Internet Congestion Control Systems with , Different Deployment of Source Algorithms

DAI Hang MU De-jun WANG Lin ZHANG Hui-xiang

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract In the future Internet congestion control protocols, several groups of users may deploy different source algorithms in order to meet the different QoS requirements. The analysis of resource competition for congestion control systems with mixed deployment AIMD algorithm and MIMD algorithm was systematically studied, including the system model, the system steady-state analysis, the system stability analysis. In the end of this paper, simulations based on NS2 system validited the analysis results of proposed method, and the resource competition between AIMD and MIMD algorithms.

Keywords Congestion control system, AIMD algorithm, MIMD algorithm, Mixed deployment, System model, System steady-state analysis, Stability analysis, Resource competition

拥塞控制系统设计中,最关键的问题是确定控制算法。在 TCP 层的源端(主机或网络边缘设备)上的控制算法称为源算法(Source algorithm),而在 IP 层的网络设备(路由器)上的控制算法称为链路算法(Link algorithm)。前者是拥塞控制系统的主要算法,而后者则是辅助算法。最常见的源算法有 AIMD^[1-3](Additive Increase Multiplicative Decrease)算法和 MIMD^[4-6](Multiplicative Increase Multiplicative Decrease)算法。在未来的 Internet 拥塞控制协议中,不同的用户群根据不同的 QoS 需求,可以配置不同的控制算法。本文系统地研究了拥塞控制系统在 AIMD 和 MIMD 两类源算法作用下的稳态和动态特性,这些特性揭示了配置不同控制算法的用户群对网络资源的竞争。本文内容包括 AIMD, MIMD 算法共同作用下的系统模型、系统稳态分析、系统稳定性分析等。基于 NS2 系统^[8]的仿真结果,证实了本文所给出的分析方法的有效性,并揭示了不同源算法对网络资源的竞争情况。

1 系统模型

我们研究具有二值同步反馈的拥塞控制系统。设 n_1 个用户采用 AIMD 算法,其拥塞窗口为 $w_i (i=1, \dots, n_1)$; n_2 个

用户采用 MIMD 算法,其拥塞窗口为 $w_j (j=n_1+1, \dots, n)$, 这里 $n=n_1+n_2$ 。 n 个流共享一个单瓶颈链路,该链路所能提供的总资源量为 B , B 描述了网络的带宽时延乘积(Bandwidth-Delay Product, BDP)。设各流的队列时延较小,其往返时间(Round Trip Time, rtt)主要由传播时延所确定,因此可假设各流的 rtt 相同,且为常数。

对于二值同步反馈的拥塞控制系统,路由器中的数据计数器检测各流所发送的数据包的总和:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n_1} w_i(t) + \sum_{j=n_1+1}^n w_j(t) \quad (1)$$

路由器比较 $y(t)$ 与总资源量 B , 当 $y(t) < B$ 时,系统处于非拥塞状态;当 $y(t) \geq B$ 时,系统处于拥塞状态。系统的拥塞与非拥塞状态,构成了二值的反馈信号。当路由器检测到的数据包总和达到总资源量 B 时:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{n_1} w_i(k) + \sum_{j=n_1+1}^n w_j(k) = B, (\forall k) \quad (2)$$

路由器就将拥塞状态信号同步地反馈到所有数据流。这种反馈可采用 TCP 协议的 ECN^[7](Explicit Congestion Notification)技术。

到稿日期:2008-12-31 返修日期:2009-03-22

戴 航(1969—),男,副教授,主要研究方向为网络控制与网络信息安全, E-mail: daihang3322@sina.com;慕德俊(1963—),教授,博士生导师,主要研究方向为自动控制与信息安全。

设 n_1 流 $w_i (i=1, \dots, n_1)$ 采用 AIMD 算法:

$$w_i(t+rtt) = w_i(t) + a_1 \quad (y(t) < B) \quad (3)$$

$$w_i(t+\delta t) = \beta_1 w_i(t) \quad (y(t) \geq B) \quad (4)$$

式中, 加性系数 $a_1 > 0$, 乘性回退系数 $0 < \beta_1 < 1, \delta t \rightarrow 0+$ 。如取 $a_1 = 1, \beta_1 = 0.5$, 与 TCP 相同。设 n_2 流 $w_j (j = n_1 + 1, \dots, n)$ 采用 MIMD 算法:

$$w_j(t+rtt) = a_2 w_j(t) \quad (y(t) < B) \quad (5)$$

$$w_j(t+\delta t) = \beta_2 w_j(t) \quad (y(t) \geq B) \quad (6)$$

式中, 乘性系数 a_2 略大于 1, 乘性回退系数 $0 < \beta_2 < 1, \delta t \rightarrow 0+$ 。如取 $a_2 = 1.01, \beta_2 = 0.875$, 与 Scalable TCP 相同。

当 $t = t_k (\forall k)$ 时, 各流所发送数据包的和 $y(k)$ 已达到系统资源总量(见式(2)), $t_k (\forall k)$ 可称为拥塞瞬间。令:

$$\Delta(k) = t_{k+1} - t_k, (\forall k) \quad (7)$$

$\Delta(k)$ 被称为拥塞周期间隔, 它以 rtt 为度量。从 t_k 到 t_{k+1} , 各流的窗口尺寸变化为:

$$w_i(k+1) = \beta_1 w_i(k) + a_1 \Delta(k), (i=1, \dots, n_1) \quad (8)$$

$$w_j(k+1) = \beta_2 a_2^{\Delta(k)} w_j(k), (j = n_1 + 1, \dots, n) \quad (9)$$

若令 $a_2 = 1 + \sigma$, 一般 σ 是很小的正数, 于是:

$$a_2^{\Delta(k)} = (1 + \sigma)^{\Delta(k)} \approx 1 + \sigma \Delta(k) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 可得:

$$w_j(k+1) = \beta_2 w_j(k) (1 + \sigma \Delta(k)), (j = n_1 + 1, \dots, n) \quad (11)$$

由 $i=1, \dots, n_1$ 的 n_1 个差分方程(8), $j = n_1 + 1, \dots, n$ 的 n_2 个差分方程(11), 以及代数约束方程式(2), 可解出拥塞瞬间 $t_k (\forall k)$ 的窗口尺寸 $w_i(k) (i=1, \dots, n_1), w_j(k) (j = n_1 + 1, \dots, n)$ 以及拥塞周期间隔 $\Delta(k)$ 。

2 稳态分析

由于式(11)是非线性差分方程组, 因此难以获得上述系统的解析解。先研究系统的稳态解, 再分析系统的全局稳定性。

在平衡状态或者稳态时, 窗口尺寸 $w_i(k) (i=1, \dots, n_1), w_j(k) (j = n_1 + 1, \dots, n)$ 和拥塞周期间隔 $\Delta(k)$ 的稳态解(定态解)分别为 $w_{si} (i=1, \dots, n_1), w_{sj} (j = n_1 + 1, \dots, n)$ 和 Δ 。由方程组(8)、(11)和(2)知, 系统的稳态解满足下列平衡状态方程组:

$$w_{si} = \beta_1 w_{si} + a_1 \Delta, (i=1, \dots, n_1) \quad (12)$$

$$w_{sj} = \beta_2 w_{sj} (1 + \sigma \Delta), (j = n_1 + 1, \dots, n) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} w_{si} + \sum_{j=n_1+1}^n w_{sj} = B \quad (14)$$

式中, $a_1 > 0, 0 < \beta_1 < 1, 0 < \beta_2 < 1, 0 < \sigma \leq 1, B$ 为系统的资源总量。

由 $j = n_1 + 1, \dots, n$ 的式(13)中任一式, 可得稳态的拥塞周期间隔 Δ 为:

$$\Delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right) \quad (15)$$

将式(15)代入 $i=1, \dots, n_1$ 的式(12), 可得 n_1 流具有 AIMD 算法的用户群的稳态解为:

$$w_{s1} = w_{s2} = \dots = w_{sn_1} = \frac{a_1}{1 - \beta_1} \Delta = \frac{a_1}{(1 - \beta_1)\sigma} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right) \quad (16)$$

再由式(14), 可得 n_2 流具有 MIMD 算法的用户群的稳态解之和为:

$$\sum_{j=n_1+1}^n w_{sj} = B - \sum_{i=1}^{n_1} w_{si} = B - \frac{n_1 a_1}{(1 - \beta_1)\sigma} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right) \quad (17)$$

综上, 可得系统稳态解的一些结论:

- 稳态的拥塞周期间隔值 Δ 仅由 MIMD 算法的参数 (a_2, β_2) 所确定, 这里, $a_2 = 1 + \sigma$ 。

- 采用 AIMD 算法的 n_1 个流, 在稳态时各流得到资源的公平分配, 其稳态解与 AIMD 算法的参数 (a_1, β_1) 和 MIMD 算法的参数 (a_2, β_2) 均有关, 但与系统资源总量 B 无关。

- 采用 MIMD 算法的 n_2 个流, 无法求出各流的稳态解, 而只能给出 n_2 流的稳态解之和。

- 对于低速网络, 即 B 较小的情况, 采用 AIMD 算法的用户较有利: 一方面它们获得较多的网络资源, 另一方面它们又获得资源的公平分配。

- 对于高 BDP 网络, 即 B 甚大的情况, 采用 MIMD 算法的用户十分有利: 它们占有了网络的绝大部分资源。

3 全局稳定性分析

下面证明该系统上述的稳态解是唯一的、收敛的。将 $i=1, \dots, n_1$ 的式(8)相加, 将 $j = n_1 + 1, \dots, n$ 的式(11)相加, 并令

$$W_1(k) = \sum_{i=1}^{n_1} w_i(k), (\forall k) \quad (18)$$

$$W_2(k) = \sum_{j=n_1+1}^n w_j(k), (\forall k) \quad (19)$$

于是可得:

$$W_1(k+1) = \beta_1 W_1(k) + n_1 a_1 \Delta(k) \quad (20)$$

$$W_2(k+1) = \beta_2 W_2(k) (1 + \sigma \Delta(k)) \quad (21)$$

而式(2)改变为:

$$W_1(k) + W_2(k) = B, (\forall k) \quad (22)$$

由式(20)、(22), 可得:

$$\Delta(k) = \frac{1}{n_1 a_1} (B - W_2(k+1) - \beta_1 B + \beta_1 W_2(k))$$

再将上式代入式(21), 经整理后得:

$$W_2(k+1) = \frac{\beta_2 W_2(k) (1 + \frac{\sigma}{n_1 a_1} (1 - \beta_1) B + \frac{\sigma}{n_1 a_1} \beta_1 W_2(k))}{1 + \frac{\sigma}{n_1 a_1} \beta_2 W_2(k)} \quad (23)$$

上式可写成:

$$W_2(k+1) = f(W_2(k)) \quad (24)$$

令 $x = W_2(k)$, 则可得:

$$f(x) = \frac{\beta_2 x (1 + \frac{\sigma}{n_1 a_1} (1 - \beta_1) B + \frac{\sigma}{n_1 a_1} \beta_1 x)}{1 + \frac{\sigma}{n_1 a_1} \beta_2 x} \quad (25)$$

如果 $W_2(k)$ 收敛, 亦即 $\lim_{k \rightarrow \infty} W_2(k) = W_{2s}$, 则它必然收敛到式(25)中函数 $f(x)$ 的不动点(fixed point), 即方程 $f(x) = x$ 的解。

考察函数 $f(x)$ 。很明显, $x=0$ 是 $f(x)$ 的一个不动点, 但它是不稳定的。另一个不动点由式(25)易于求出, 为:

$$B_f = B - \frac{n_1 a_1}{(1 - \beta_1)\sigma} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right) \quad (26)$$

由式(17)知, 它即为式(19)的 $W_2(k)$ 的稳态解 W_{2s} 。

由式(26)知, $f(x)$ 存在非零不动点的条件是:

$$B > \frac{n_1 a_1}{(1 - \beta_1)\sigma} \left(\frac{1}{\beta_2} - 1 \right)$$

上述条件经变换后可得:

$$\beta_2 (1 + \frac{\sigma}{n_1 a_1} (1 - \beta_1) B) > 1 \quad (27)$$

下面计算式(25)中函数 $f(x)$ 的一阶导数。经推演可得:

$$f'(x) = \frac{\beta_2(1 + \frac{\sigma}{n_1\alpha_1}(1-\beta_1)B - \beta_1 + \beta_1(1 + \frac{\sigma}{n_1\alpha_1}\beta_2x)^2)}{(1 + \frac{\sigma}{n_1\alpha_1}\beta_2x)^2} \quad (28)$$

于是可得:

$$f'(0) = \beta_2(1 + \frac{\sigma}{n_1\alpha_1}(1-\beta_1)B)$$

再由式(27)可知, $f'(0) > 1$ 。另一方面, 将式(28)加以变换, 可得:

$$f'(x) = \frac{\frac{\beta_2 - \beta_1}{1 - \beta_1} + \frac{\sigma}{n_1\alpha_1}\beta_2B}{(1 + \frac{\sigma}{n_1\alpha_1}\beta_2x)^2} (1 - \beta_1) + \beta_1 \quad (29)$$

很明显, 当 $x=B$ 时, 式(29)右端第一项关于 $(1-\beta_1)$ 的系数小于 1, 故当 $0 < \beta_1 < 1$ 时, $f'(B) < 1$ 。

因此, 存在 $0 < B_c < B$, 使得 $f'(B_c) = 1$ 。由此可知, $f'(x)$ 为单调递减函数, 从而 $f(x)$ 为上凸函数。易于证明: $0 < B_c < B_f < B$ 。并且, 当 $0 < x < B_f$ 时, $x < f(x) < B_f$; 当 $x > B_f$ 时, $B_f < f(x) < x$ 。综上可知, 若 $0 < W_2(0) < B_f$ 时, $W_2(k)$ 单调递增, 且 $W_2(k) < B_f$, 从而 $W_2(k)$ 收敛到 B_f ; 若 $W_2(0) > B_f$, $W_2(k)$ 单调递减, 且 $W_2(k) > B_f$, 从而 $W_2(k)$ 收敛到 B_f 。结论是 $W_2(k)$ 收敛到 B_f 。

$W_1(k)$ 的稳态解 $\lim_{k \rightarrow \infty} W_1(k) = W_{1s}$, 可由:

$$W_{1s} + W_{2s} = B$$

而求得, 即为:

$$W_{1s} = \frac{n_1\alpha_1}{(1-\beta_1)\sigma} (\frac{1}{\beta_2} - 1) \quad (30)$$

4 仿真实验

我们利用网络仿真软件 NS2 系统^[8], 验证本文分析方法的合理性。实验采用单瓶颈网络拓扑, 各数据流往返传播延迟为 200ms, 数据包大小为 1000 字节。AIMD 数据流参数设置为: $\alpha_1 = 1, \beta_1 = 0.5$, MIMD 数据流参数设置为: $\alpha_2 = 1.01, \beta_2 = 0.8$ 。

仿真实验中瓶颈带宽为 100Mbps, 3 个 FTP 数据流采用 AIMD 算法, 3 个 FTP 数据流采用 MIMD 算法。根据上述理论分析, 采用 AIMD 数据流的稳态窗口大小为 50 个数据包。图 1 显示了两类数据流窗口的变化情况。进一步, 将瓶颈带宽增大到 200Mbps, 5 个 FTP 数据流采用 AIMD 算法, 5 个 FTP 数据流采用 MIMD 算法, 图 2 显示了两类数据流拥塞窗

口的变化情况。可见, 仿真结果与理论分析是一致的。

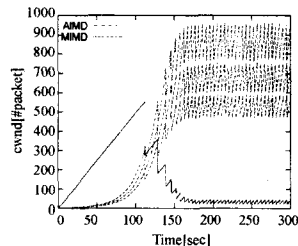


图 1 稳态时拥塞窗口的变化情况

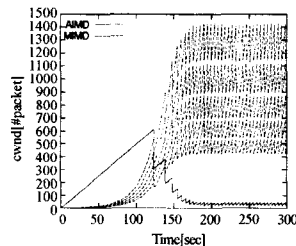


图 2 稳态时拥塞窗口的变化情况

结束语 本文对二值同步反馈拥塞控制系统在 AIMD 和 MIMD 源算法共同作用下进行了动力学分析, 以揭示不同用户群配置上述两种源算法时的资源竞争问题。本文的分析指出, AIMD 算法对低速网络和用户的公平性有利, 而 MIMD 算法对高 BDP 网络用户的资源竞争十分有利。

参考文献

- [1] Low S H, Paganini F, Doyle J C. Internet Congestion Control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 32(1): 28-43
- [2] Jain R. Congestion Control in Computer Networks: Issues and Trends [J]. IEEE Network Magazine, 1999, 4(3): 24-30
- [3] Chiu D M, Jain R. Analysis of the Increase and Decrease Algorithms for Congestions Avoidance in Computer Networks [J]. Journal of Computer Networks and ISDN Systems, 1989, 17(1): 1-14
- [4] Altman E, Avrachenkov K E, Prabhu B J. Fairness in MIMD Congestion Control Algorithms [C] // Proc. of the 24th Conference on Computer Communications, vol. 2, Miami, Piscataway: IEEE Press, 2005: 1350-1361
- [5] Kelly T. Scalable TCP: improving performance in highspeed wide area networks [J]. SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(2): 83-91
- [6] Altman E, Avrachenkov K, Barakat C, et al. Analysis of MIMD congestion control algorithm for high speed networks [J]. Computer Networks, 2005, 48(6): 972-989
- [7] Ramakrishnan K, Floyd S, Black D. The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP [S]. RFC 3168, September 2001
- [8] The network simulator ns-2. 30. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>

(上接第 23 页)

- [29] Zan Mo, Shan Feng, Chao Tang. A Study on Integrated Model of Decision Support Systems [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2002, 11(3): 62-66
- [30] 高洪深. 决策支持系统 (DSS): 理论、方法、案例 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
- [31] Shim J P. Past, present, and future of decision support technology [J]. Decision Support Systems, 2002, 33(2)
- [32] 张建华, 刘仲英. 案例推理与规则推理结合的紧急预案信息系统 [J]. 同济大学学报, 2002, 30(7)

- [33] 王知行, 等. 知识管理系统中的 CBR 技术及其应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(7)
- [34] Ozbayak M, Bell R. A knowledge-based decision support system for the management of parts and tools in FMS [J]. Decision Support System, 2003, 35(4)
- [35] 徐晓臻, 高国安. 案例推理在多准则评价智能决策支持系统中的应用研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(1)
- [36] 倪志伟, 李锋刚, 毛雪岷. 智能管理技术与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2007