

聚集业务流特性与 QoS 性能界限的研究^{*}

张信明

(中国科技大学计算机科学技术系 国家高性能计算中心 合肥230027)

摘要 文章首先对业务流特性模型进行了概述,然后以母函数为工具阐述了经典的有效带宽理论并获得了聚集业务流的 QoS(Quality-of-Service)性能界限,最后以网络演算为工具对受限敌对流方法进行了扩展,获得了更一般的聚集业务流特性与 QoS 性能界限。本文的研究结果适用于区分服务 DiffServ(Differentiated Services)的边界节点。

关键词 业务流聚集,服务质量,有效带宽,受限敌对流,网络演算,区分服务

Research on the Aggregate Traffic Characterization and QoS Performance Bounds

ZHANG Xin-Ming

(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, National High Performance Computing Center, Hefei 230027)

Abstract In this paper, the author first summarizes the traffic characterization models. Then, describes the effective bandwidth theory based on moment generating function, and obtains the Quality-of-Service (QoS) performance bounds of aggregate traffic. Finally, extends the regulated adversarial traffic technique by network calculus, and obtains more general aggregate traffic characterization and QoS performance bounds. The results of this paper can be used at the boundary of Differentiated Services (DiffServ).

Keywords Traffic aggregation, Quality-of-Service, Effective bandwidth, Regulated adversarial traffic, Network calculus, DiffServ

1 引言

随着实时多媒体业务的不断涌现以及 Internet 自身的不断商业化,在 Internet 环境下为用户提供适宜的 QoS 保证已变得非常重要且极富挑战性。业务流(traffic)聚集(aggregate)(或复用)的基本作用是提高计算机网络资源的利用率^[1],该技术也成为了解决 Internet QoS 控制机制可扩展性问题而出现的 DiffServ^[2]的基础。DiffServ 的目标在于简单有效,以满足实际应用对可扩展性的要求,实现途径是:将路由器分为核心与边界两类,边界路由器保存业务流状态信息并进行流量管制,核心路由器只进行简单的调度转发,核心路由器是状态无关的。边界路由器根据用户的流量限制(profile)和资源预置信息将进入网络的单流分类、整形、聚合为不同的流聚集,这种聚集信息存储在每个 IP 包头的 DS(Differentiated Services)标记域(field)中,称为 DSCP(Differentiated Services CodePoint);核心路由器在调度转发 IP 包时根据包头的 DSCP 选择提供特定质量的调度转发服务,其外特性称为 PHB(Per-Hop Behavior)。业务流的聚集及其对业务流 QoS 性能的影响是当前一个研究热点与难点^[3-9]。本文的研究目标是通过研究聚集业务流特性以及 QoS 性能界限来寻求聚集业务流的进入流量、QoS 保证、资源需求(信道容量、缓冲区大小)之间的关系。考虑到实时多媒体业务的多数对 QoS 的需求为统计性的^[10],又鉴于业务的多样性使得统一、可靠的估算模型较难获得^[6],本文仅对基于界限模型的统计性聚集业务流特性与 QoS 性能界限展开研究。文章首先对

业务流特性模型进行了概述(第2节),然后以母函数为工具阐述了经典的有效带宽(effective bandwidth)理论并获得了聚集业务流的 QoS 性能界限(第3节),最后以网络演算(network calculus)为工具对受限敌对流(regulated adversarial traffic,简记为 RAT)方法进行了扩展,获得了更一般的聚集业务流特性与 QoS 性能界限(第4节)。本文的研究结果适用于 DiffServ 的边界节点。

2 业务流特性模型

为业务流建立适当的特性模型是 QoS 控制的基础^[11-12]。无论是流量规范的确定,还是接纳控制或分组调度均须知道业务流特性。业务流特性模型大致可分为估算模型与界限模型两类。估算模型试图使用数学工具(最常用的是随机过程)描述流量行为;如 Poisson、SMP(semi-Markov process)、MMPP(Markov-modulated Poisson process)、流体流(fluid flow)、自相似性过程(self-similar process)等。与估算模型直接模型化流量的随机进入行为不同,界限模型试图给出信源在一时间区间内进入流量的上界。界限模型既可以是确定性的,也可以是统计性的。最常用的确定性界限模型是 Cruz 的 (σ, ρ) 模型,即在时间区间 $t(t \geq 0)$ 内进入的流量上界为 $\sigma + \rho t$;或更形式地表示为 $I(\tau, t + \tau) \leq \sigma + \rho t$,其中 $I(\tau, t + \tau)$ 表示在时间区间 $[\tau, t + \tau]$ 产生的流量。统计性界限模型有 EBB(Exponentially Bounded Burstiness)、SBB(Stochastically Bounded Burstiness)等。EBB 模型可形式地表示为 $\Pr\{I(\tau, t + \tau) \geq \rho t + \sigma\} \leq Ae^{-\alpha}$ 。SBB 模型则将 EBB 模型的界限函数

^{*}本课题的研究得到宁波市重点博士科学基金(2003A61003)和国家重点基础研究发展规划(973)(G1998030400, G1999032700)的资助。张信明 博士,副教授,硕士生导师,主要研究领域为计算机网络与操作系统。

$Ae^{-\rho t}$ 进一步地扩展为 $f(\sigma)$, 即形式地表示为 $\Pr\{I(\tau, t + \tau) \geq \rho t + \sigma\} \leq f(\sigma)$, 其中 $(\int_{-\infty}^{\infty} du)^n f(u)$ 必须有界。由于获得较为准确的估算模型是非常困难的, 所以在 QoS 控制研究中通常采用界限模型。

3 基于母函数的有效带宽理论

有效带宽^[12~14]用来描述以统计界限为模型(如 EBB 等)的业务流的渐近特性。信源的有效带宽是指满足给定 QoS 的带宽需求, 其值介于信源平均与峰值速率之间。

3.1 复用器模型与符号约定

复用器 MUX(multiplexer)共有 N 个输入 $I_k(t)$ ($1 \leq k \leq N$)、一个输出链路并包含缓冲区及调度器。其中缓冲区为无限大, 调度器的工作方式为有事即干(连续工作)(work-conserving), 业务流 k 的进入曲线为 $A_k(t) = \sigma_k + \rho_k t$, MUX 的输出速率为 C 并满足 $C \geq \sum_{k=1}^N \rho_k$, 队列(单队列)长度为 $Q(t)$ 。这样在时间区间 $[u, t]$ 内进入 MUX 的流量总量 $I(u, t) = \sum_{k=1}^N I_k(u, t)$ 。另外还假定进入 MUX 的业务流均为相互独立的、平稳的随机过程并且具有相同的 QoS 需求。

3.2 基于母函数的有效带宽理论

对随机变量 $x(t)$ 定义其母函数 $E[e^{\theta x(t)}]$, $\theta(0 < \theta < \infty)$ 为变换变量, 业务流 k 的进入流量的母函数可表示为 $E[\exp(\theta I_k(u, t))]$, 其随机界限为

$$E[\exp(\theta I_k(u, t))] \leq \exp(\theta A_k(\theta, t-u)) \quad (1)$$

$$A_k(\theta, t) = \sigma_k(\theta) + \rho_k(\theta)t \quad (2)$$

3.2.1 有效带宽 当时间区间为 $[0, t]$ 时, 由式(1)可得

$$A_k(\theta, t) \geq \frac{1}{\theta} \ln E[\exp(\theta I_k(t))] \quad (3)$$

据式(2)、(3)得

$$\rho_k(\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} A_k(\theta, t) \geq \frac{1}{\theta} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln E[\exp(\theta I_k(t))] \quad (4)$$

所以业务流 k 的有效带宽

$$C_k = \frac{1}{\theta} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln E[\exp(\theta I_k(t))] \quad (5)$$

$$A(\theta, t) = \sum_{k=1}^N A_k(\theta, t) = \sum_{k=1}^N \sigma_k(\theta) + \sum_{k=1}^N \rho_k(\theta)t = \sigma(\theta) + \rho(\theta)t \quad (6)$$

由式(4)、(6)得 $\rho(\theta) = \sum_{k=1}^N \rho_k(\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} A(\theta, t) \geq \frac{1}{\theta} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t}$

$\ln E[\exp(\theta I(t))]$, 所以聚集业务流的有效带宽 $C_s = \sum_{k=1}^N C_k = \frac{1}{\theta} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln E[\exp(\theta I(t))]$ 。

3.2.2 QoS 性能界限 由 $Q(t) = (Q(t-1) + I(t-1, t) - C)^+$, $x^+ = \max(0, x)$ 可得:

$$Q(t) = \max(I(t-u, t) - uC)$$

$Q(t)$ 的母函数:

$$E[\exp(\theta Q(t))] = E[\exp(\theta(\max(I(t-u, t) - uC)))]$$

$$= \max E[\exp(\theta(I(t-u, t) - uC))]$$

$$\leq \sum_{u=0}^t E[\exp(\theta(I(t-u, t) - uC))]$$

$$= \exp(-\theta uC) \prod_{k=1}^N E[\exp(\theta I_k(t-u, t))]$$

$$\leq \exp(-\theta uC) \prod_{k=1}^N \exp(\theta A_k(\theta, u)),$$

再由式(6)可得

$$E[\exp(\theta Q(t))] \leq \exp(-\theta uC) \sum_{u=0}^t \exp(\theta A(\theta, u))$$

$$= \exp(\theta \sigma(\theta)) \sum_{u=0}^t \exp(\theta u(\rho(\theta) - C)) \quad (7)$$

当 $t \rightarrow \infty$, 显然只有 $C > \rho(\theta)$ 成立, $\sum_{u=0}^t \exp(\theta A(\theta, u))$ 才会收敛, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} E[\exp(\theta Q(t))]$ 是有界的; 由式(7)可得

$$E[\exp(\theta Q)] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[\exp(\theta Q(t))] \leq \beta(\theta) \quad (8)$$

其中 $\beta(\theta) = \exp(\theta \sigma(\theta)) / [1 - \exp(\theta(C - \rho(\theta)))]$; 由式(8)及 Chernoff 界限^[12]可得 QoS 性能界限 $P[Q \geq \delta] \leq \exp(-\theta \delta) E[\exp(\theta Q)] \leq \beta(\theta) \exp(-\theta \delta)$ 。

4 更一般的 RAT 流聚集与 QoS 性能界限

称满足业务流是统计独立的, 并且每个业务流受限于一个确定性整形器(如漏桶)的业务流为 RAT 流^[3,6-9]。

4.1 MUX 输出速率为常数、输入流量的受限曲线相同的 RAT 流聚集

假定 MUX 的输入:

$$I_k(u, t) \leq \min[\sigma_k + \rho_k(t-u), \pi_k(t-u)] = A_k(t-u) \quad (u \leq t, 1 \leq k \leq N) \quad (9)$$

输出速率为 Nc (c 为常量); 其中 $0 < \rho_k < c < \pi_k, \sigma_k > 0$ 并记 $a = \rho_1/c, \beta = (\pi_1 - c) / (\pi_1 - \rho_1), I_k$ 是平稳与独立的。则

$$Q_k(t) = \sup_{-\infty < u \leq t} [I_k(u, t) - c(t-u)] \quad (10)$$

$$Q(t) = \sup_{-\infty < u \leq t} [\sum_{k=1}^N I_k(u, t) - Nc(t-u)] \quad (11)$$

由式(10)、(11)得 $Q(0) \leq \sum_{k=1}^N \sup_{-\infty < u \leq 0} [I_k(t, 0) + ct] = \sum_{k=1}^N Q_k(0)$, 则 $Q(0)$ 的母函数

$$E[\exp(\theta Q(0))] \leq E[\exp(\theta \sum_{k=1}^N Q_k(0))] = \prod_{k=1}^N E[\exp(\theta Q_k(0))] \quad (12)$$

$$\text{而 } E[\exp(\theta Q_k(0))] \leq 1 - a + a \exp(\theta a^{-1}(\sigma_1 - (c - \rho_1)\gamma(\theta))) \quad (13)$$

其中 $\frac{\pi_1}{c} \cdot \frac{\sigma_1}{\pi_1 - \rho_1} < \gamma(\theta) < \frac{\sigma_1}{c - \rho_1}$; 这样根据式(12)、(13)可求得 MUX 输出速率为常数、输入流量的受限曲线相同的 RAT 流聚集的 QoS 性能界限

$$P[Q(0) \geq N\delta] \leq \exp(-\theta N\delta) E[\exp(\theta Q(0))] \leq \exp(-N \sup_{\theta > 0} F(\theta)) \quad (14)$$

其中 $\delta \leq \beta \sigma_1, F(\theta) = \delta \theta - \ln(1 - a + a \exp(\theta a^{-1}(\sigma_1 - (c - \rho_1)\gamma(\theta))))$ 。

4.2 MUX 输出速率为常数、输入流量的受限曲线不同的 RAT 流聚集

假定 MUX 的输入:

$$I_k(u, t) \leq \min[\sigma_k + \rho_k(t-u), \pi_k(t-u)] = A_k(t-u) \quad (u \leq t, 1 \leq k \leq N) \quad (15)$$

业务流 k 输出速率为 c_k (c_k 为常量且 $\sum_{k=1}^N c_k = Nc$), I_k 是平稳与独立的; 令 $\pi = \sum_{k=1}^N \pi_k, \sigma = \sum_{k=1}^N \sigma_k, \rho = \sum_{k=1}^N \rho_k$, 对于 $0 < \delta < \frac{\pi - nc}{\pi - \rho}, 0 < \rho < nc < \pi$, 则根据式(14)可得 MUX 输出速率为常数、输入流量的受限曲线不同的 RAT 流聚集的 QoS 性能界限 $P[Q(0) \geq \delta] \leq \exp(-F(N, \theta))$; 其中

$$F(N, \theta) = \sup_{\theta > 0} [\delta \theta - \sum_{k=1}^N \ln(1 - a_k + a_k \exp(\theta a_k(\sigma_k - (c_k - \rho_k)\gamma(\theta, k)))] \quad (16)$$

其中 $a_k = \rho_k/c_k, \frac{\pi_k}{c_k} \cdot \frac{\sigma_k}{\pi_k - \rho_k} < \gamma(\theta, k) < \frac{\sigma_k}{c_k - \rho_k}$ 。

4.3 MUX 输出速率为一般服务曲线的 RAT 流聚集

4.3.1 网络演算 网络演算^[15]是近年来为在综合业务

网络中提供确定性 QoS 保证的研究成果的汇集。网络演算包括进入曲线(arrival curve)(即流量包络)、服务曲线(service curve)及最小加代数下的卷积、反卷积等。其中进入曲线限制了进入过程,而服务曲线则限制了网络节点的输入、输出行为。网络时延的上界由进入曲线与服务曲线间的距离所决定。进入曲线的定义可见式(9),服务曲线的定义是对于输入流量为 $I(t)$,输出流量为 $O(t)$ 的网络节点 NE ,若对 $\forall t \geq 0, \exists t_0 (0 \leq t_0 \leq t)$ 使得

$$O(t) - I(t_0) \geq S(t - t_0) \quad (17)$$

成立,则称 NE 提供了服务曲线 $S(t)$;其中 I, S 均为广义递增函数。服务曲线是对路由器调度策略的一种抽象描述,对 QoS 性能界限的影响是至关重要的。根据服务曲线的定义可知 4.1、4.2 节中仅考虑了服务曲线为 $c \cdot t$ 的情形,显然是有一定局限性的,所以研究 MUX 输出速率为一般服务曲线的 RAT 流聚集将更有理论与实际意义。

基于网络演算的基本的 QoS 性能界限主要有虚时延、水平偏差与积压,它们的定义分别是

$$\text{虚时延: } d(t) = \inf\{T: T \geq 0 \text{ 且 } I(t) \leq O(t+T)\} \quad (18)$$

水平偏差:

$$h(A, S) = \sup_{u \geq 0} [\inf\{T: T \geq 0 \text{ 且 } A(u) \leq S(u+T)\}] \quad (19)$$

$$\text{积压: } b(t) = I(t) - O(t) \quad (20)$$

对于输入受限为 A 的业务流在经过服务曲线为 S 的网络节点时其虚时延的上界为 $h(A, S)$ 。对于输入受限为 A 的业务流在经过服务曲线为 S 的网络节点时其积压上界为:

$$v(A, S) = \sup_{u \geq 0} [A(u) - S(u)] \quad (21)$$

当网络节点采用单队列时积压表示队列长度,由式(20)、(17)得

$$Q(t) \leq \sup_{u \leq t} [I(t) - I(u) - S(t-u)] \quad (22)$$

4.3.2 输入流量的受限曲线相同的 RAT 流聚集 假定 MUX 的输入:

$$I_k(u, t) \leq A_k(t-u) (u \leq t, 1 \leq k \leq N) \quad (23)$$

输出速率为一般服务曲线 $S(t)$, I_k 是平稳与独立的;则

$$Q_k(t) = \sup_{u \leq t} [I_k(t) - I_k(t-s) - S(t-u)/N] \quad (24)$$

由 $I = \sum_{k=1}^N I_k, O = \sum_{k=1}^N O_k$, 式(22)、(24)得

$$Q(t) \leq \sum_{k=1}^N Q_k(t) \quad (25)$$

记 $\rho_k = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{A_k(t)}{t} = \inf_{t > 0} \{ \frac{A_k(t)}{t} \}$, 有:

$$\rho = \sum_{k=1}^N \rho_k \quad (26)$$

由式(21)得

$$Q_k(0) \leq v(A_k, S/N) \quad (27)$$

由 Little 定理^[12], 式(19)、(26)得

$$E[Q(0)] \leq \rho h(A, S) (A = N \cdot A_1) \quad (28)$$

对于 $\rho \cdot h(A, S) \leq \delta \leq v(A, S)$, 由式(25)得

$$P[Q(0) \geq \delta] \leq P[\sum_{k=1}^N Q_k(0) \geq \delta] \quad (29)$$

由式(27)、(28)、(29)得 MUX 输出速率为一般服务曲线、输入流量受限曲线相同的 RAT 流聚集的 QoS 性能界限

$$P[Q(0) \geq \delta] \leq \exp(-\sup_{\theta > 0} F(\theta, S)) \quad (30)$$

其中 $F(\theta, S) = \delta\theta - N \ln(1 - \rho\eta + \rho\eta \exp(\theta v(A_1, S/N)))$, $\eta = h(A, S)/v(A, S)$

4.3.3 输入流量的受限曲线不同的 RAT 流聚集 假定 MUX 的输入

$$I_k(u, t) \leq A_k(t-u) (u \leq t, 1 \leq k \leq N) \quad (31)$$

输出速率为一般服务曲线 $S(t)$, I_k 是平稳与独立的,其服务曲线为 $\mu_k S (\mu_k > 0, \sum_{k=1}^N \mu_k = 1)$;则由式(27)得

$$Q_k(0) \leq v(A_k, \mu_k S) \quad (32)$$

由式(28)得

$$E[Q(0)] \leq \rho h(A, S) (A = \sum_{k=1}^N A_k) \quad (33)$$

由式(32)、(33)、(29)得 MUX 输出速率为一般服务曲线、输入流量受限曲线不同的 RAT 流聚集的 QoS 性能界限 $P[Q(0) \geq \delta] \leq \exp(-F(N, S))$; 其中 $F(N, S) = \sup_{\mu} \frac{2(\delta - \rho h(A, S))^2}{\sum_{k=1}^N v^2(A_k, \mu_k S)}$ 。

结束语 本文主要研究了可适用于 DiffServ 边界节点的聚集业务流特性与 QoS 性能界限问题。本文的主要贡献是以网络演算为工具对 RAT 流方法进行了扩展,获得了更一般的聚集流特性与 QoS 性能界限。有了 QoS 性能界限,既可获得聚集业务流对网络资源的需求量,也可获得业务流的流量规范从而对业务流进行接纳控制。由于有效带宽理论、RAT 流方法均使用了网络演算的基本工具之一的进入曲线,本文的结果一方面进一步印证了网络演算可以提高 QoS 控制问题的可分析性,另一方面也存在对资源需求过多的缺点。对于经典的进入流量不受限的统计复用问题可见文[1]。

参考文献

- Walrand J, Varaiya P. High-performance communication networks. Second edition. Beijing: China Machine Press and Morgan Kaufmann, 2000
- Blake S, Black D, Carlson M, et al. An architecture for differentiated services. RFC2475, Dec. 1998
- Firoiu V, et al. Advances in Internet Quality of Service; [Technical Report TR00-049]. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2002
- Zhang Z L, Duan Z, Hou Y T. Fundamental trade-offs in aggregate packet scheduling. In: Proc. of IEEE ICNP'01, 2001. 129~137
- Guerin R, Pla V. Aggregation and conformance in differentiated service networks; a case study. ACM Computer Communication Review, 2001, 31(1): 21~32
- Boorstyn R, Burchard A, Liebeherr J, et al. Effective envelopes: statistical bounds on multiplexed traffic in packet networks. In: Proc. of IEEE INFOCOM'00, 2000
- Kesidis G, Konstantopoulos T. Extremal shape-controlled traffic patterns in high-speed networks. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(5): 813~819
- Kesidis G, Konstantopoulos T. Worst-case performance of a buffer with independent shaped arrival processes. IEEE Communication Letters, 2000, 4: 26~28
- Rajagopal S, Reisslein M, Ross K W. Packet multiplexers with adversarial regulated traffic. In: Proc. of IEEE INFOCOM'98, 1998. 347~355
- Zhang Z L. End-to-end support for statistical Quality-of-Service guarantees in multimedia networks; [Ph. D. thesis]. University of Massachusetts, Feb. 1997
- 张信明, 陈国良, 刘峰. Internet QoS 控制机制综述. 计算机科学, 2002, 29(3): 20~23
- Schwartz M. Broadband Integrated Networks. Beijing: Tsinghua University Press. Prentice Hall, 1998
- He L, Wong A K. Connection admission control design for GlobeView®-2000 ATM core switches. Bell Labs Technical Journal, 1998, 3(1): 94~111
- Chang C S. Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(5): 913~931
- Le Boudec J Y, Thiran P. Network calculus. Springer-Verlag, 2001