

基于统计网络演算的融合网络网关节点时延性能研究

赵一 A, 张中荃

(西安通信学院, 陕西 西安 710106)

摘要: 为分析融合网络网关节点统计时延性能, 根据最小加代数理论中的统计网络演算的相关知识, 提出了一种基于改进的 GPS 调度系统模型, 然后利用网络演算理论求解出网关节点统计时延上界。数值结果分析表明, 改进的调度模型有效地改善了自相似特性对网关延迟上界所造成的影响, 与未改进的模型相比, 网关统计延迟上界更具有良好的紧致性, 为下一步由单节点扩展到端到端节点延迟上界研究提供了参考。

关键词: 融合网络; 统计网络演算; GPS 调度系统; 自相似过程

中图分类号: TN923

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)19-0047-04

Research on the delay properties of the converged network gateway node based on statistical network calculus

Zhao YiA, Zhang Zhongquan

(Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China)

Abstract: In order to analyse the statistical delay performance for gateway node of converged network, according to the knowledge of the statistical network calculus in minimum plus algebra theory, this paper proposes a scheduling system based on improved model of GPS, and then uses the network calculus to solve the upper bound of statistical delay in gateway nodes. Numerical results show that the improved scheduling model improves the impact from self-similar processes on the delay. Compared with the model without improved, it not only has a better compactness on the upper bound of delay, but also provides a reference value for the next extension from a single node to the end-to-end nodes of the upper bound.

Key words: converged network; statistical network calculus; GPS scheduling model; self-similar processes

随着网络向高速化综合化方向发展, 融合网络^[1]成为目前网络研究的热点。迄今为止, 已经对 IP 网络的时延问题进行了大量研究, 但这些研究都没有考虑融合网络输入业务的复杂性和服务的多变性, 使得对融合网络的时延性能分析将面临许多新的问题和挑战。融合网络中, IP 所承载的各种多媒体业务和实时非弹性业务^[2]等通信量成为现今高速网络中的主流, 经过以参考文献[3]为代表的一系列研究表明, 这些通信量都具有对网络性能有一定影响的自相似特征^[3]。为保证服务, 网关成为对网络性能评估和预测的瓶颈, 需根据预测和估算来判断网络是否有能力满足该流的时延要求, 其关键是在网关边界节点处估算统计时延上界。因此, 只有对上界进行合理的估计, QoS 保证机制才能有效实现, 否则, 过大的时延会导致网络拥塞, 降低网络系统性能和资源

利用率。

因此, 为了更好、更深入地对融合网络中的业务流问题进行研究, 本文利用一种新型的网络性能分析工具——统计网络演算^[4], 在参考文献[5-6]的基础上对原有的 GPS 调度模型进行改进, 加入了聚合调度算法, 并具体地说明了用什么样的服务曲线可以更好地抽象模拟服务调度策略, 以及为如何利用网络演算中的定理和结论来方便地分析统计时延提供了保证, 建立适合于融合网络时延性能统计上界模型。因此, 对基于统计网络演算的融合网络时延性能的研究具有非常重要的理论意义和应用价值。

1 相关理论知识

统计网络演算是对传统网路演算在概率意义上的扩展, 利用最小加运算等相关理论来计算网络性能的概

网络与通信 Network and Communication

率或统计边界问题,符合融合网络中具有概率随机性业务流的真实性,能够从统计复用独立通信流中获得更大的增益,并有效地提高资源利用率。下面介绍本研究需要用到的统计网络演算技术基础^[4]。

定义 1(统计流量包络):给定一个通信流的累积函数 $A(t)$,若在任意时间区间 $[t, t+\tau]$ 上的累积流量 $A(t, t+\tau)$ 满足以下关系:

$$\Pr\{A(t, t+\tau) \leq \vartheta(\tau)\} \geq 1 - \varepsilon \quad (1)$$

则称 $\vartheta(\tau)$ 为该流量过程的统计型流量包络, ε 表示最大违背概率。

定理 1(聚合流的统计流量包络):给定两个通信流的累积函数 A_1 和 A_2 ,若在任意时间区间 $[t, t+\tau]$ 上的累积流量 $A_i(t, t+\tau)$ 满足 $\Pr\{A_i(t, t+\tau) \leq \vartheta_i\} \geq 1 - \varepsilon_i$,且以下关系也成立:

$$\Pr\{A_1(t, t+\tau) + A_2(t, t+\tau) \leq \vartheta(t)\} \geq 1 - \varepsilon_1 \otimes \varepsilon_2 \quad (2)$$

则称 $\vartheta(t)$ 为该聚合流的统计型流量包络。

定理 2 如果一个通信流由多个微流聚合而成,微流的汇聚被当作一个汇聚流处理,则由微业务流的流量包络即可得到聚合流的流量包络:

$$\vartheta_c(\tau) = \sum_{j \in C} \vartheta_j(\tau) \quad (3)$$

定义 2(服务曲线):给定一个通信流的累积函数 $A(t)$,若通信流的输出函数 $D(t)$ 满足以下关系:

$$\Pr\{D(t) \geq A \otimes \beta(t)\} \geq 1 - \varepsilon \quad (4)$$

则称该 $\beta(t)$ 为通信流 $A(t)$ 提供的服务曲线。

定义 3(延迟统计上界):假设一个到达曲线 $\alpha(t)$ 的通信流穿过一个网络系统,该系统为通信流提供的有效服务曲线为 $\zeta(t)$,对任意时间 $t > 0$,则通信流在该系统中的延迟小于 $d = \inf\{d \geq 0; \alpha(t-d) \leq \beta(t), \forall t \geq 0\}$ 的概率为 $1 - \varepsilon$,即:

$$P[W(t) \leq d] \geq 1 - \varepsilon \quad (5)$$

有效带宽理论^[7]能够以统一的形式描述突发性业务流量的性能,通过建立有效带宽和有效包络之间的联系,可以分析突发性业务流的各种网络性能。

定义 4(分形布朗运动过程):分形布朗运动过程^[8](FBM)是自相似过程的经典模型之一,通常用 $A(t) = \rho t + \beta Z$ 表示输入流量,具备自相似特征。其中, Z 为符合自相似参数 $H > 1/2$ 的归一化分形布朗运动, $\rho > 0$ 为流量的均值速率, β^2 为 $A(t)$ 的标准方差,利用有效带宽理论得到对应的有效包络满足:

$$\vartheta(t) = \rho t + \sqrt{-2 \log \varepsilon} \beta t^H \quad (6)$$

2 改进的通用处理器共享调度模型

通用处理器共享^[5](GPS)调度系统是一个最理想的公平调度策略,它既是一种连续工作型调度策略,也是一个基于分组长度无限可分假设的流体理论模型,每条共享相同数据链路的连接都有各自单独的队列。

参考文献^[5-6]中所采用理想的 GPS 调度算法中的

服务都为先入先出(FIFO)形式,当融合网络中多种业务共同进入网络时, FIFO 形式不能对业务进行合理调度。因此,本文在模型中加入分类聚合调度模块,如图 1 所示。先对输入业务按照某种规约进行分类,再将优先级相同的单个若干流进行聚合流,这样大大简化了网络的服务机制,为网络内部节点提供区分服务奠定基础,可满足实际应用对扩展性的要求。同时,创新性地具有优先级的有效服务应用在 GPS 调度算法中,将建立起改进的 GPS 调度算法与统计网络演算理论之间的关系,为 GPS 系统的调度策略响应不同的服务请求提供一种有效的方法。与以往方法相比,该方法不仅能有效分析时延特性,还使网关处节点对时延的估算更为接近实际值。

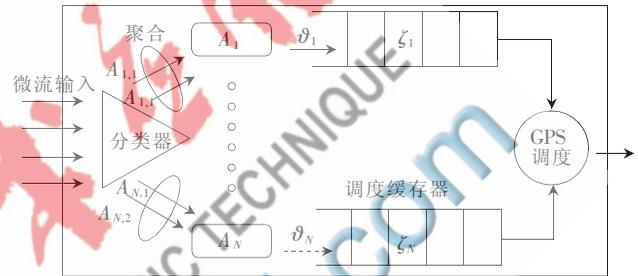


图1 改进后的GPS调度模型

为了便于分析,本文将具体分析考虑这样一个 GPS 调度系统,该 GPS 系统允许的最大服务速率为 R , 假设有 N 种不同优先级的业务流,记为 $\{A_{q,k}(s,t); q=1,2,\dots,N; k=1,2,\dots,m_q\}$, q 值越大表明优先级越高, m_q 表示对应第 q 个优先级业务中有 m 个微流, $A_{q,k}(s,t)$ 对应的长期平均速率为 $r_{q,k}$,系统的服务利用率为 θ 。当业务的优先级为 q 时,经过聚合调度后,聚合业务流 $A_q(s,t)$ 对应有效包络记做 ϑ_q ,长期平均速率和所赋予服务权重因子分别为 r_q 和 ϕ_q ($\phi_q > 0$),且业务 $A_q(s,t)$ 在时间间隔 $[s,t]$ 内得到的服务为 $S_q(s,t)$,相应的 GPS 调度系统中有效服务曲线为 $\zeta_q(t)$,则 GPS 的有效服务曲线 S_q 为:

$$\zeta_q(t) = \lambda_q \left(Ct + \sum_{p \neq q} [\lambda_p Ct - \vartheta_p] \right) \quad (7)$$

其中, $\lambda_q = \frac{\phi_q}{\sum_{r \in B} \phi_r}$

根据各种聚合流不同的优先级,服务器就会按照权重提供给数据流正比于服务共享因子 ϕ 的相应服务速率,这样可以得到每个数据流更精确的服务曲线,而不是像以往调度算法中的平均分配,大大提高了服务的利用率。改进的实际服务速率为:

$$R_Q = \frac{\phi_q}{\sum_{p \in B} \phi_p} R \quad (8)$$

3 网关统计时延上界

3.1 时延统计上界

根据定义 3 可得聚合后第 i 种业务流的网关时延边界:

《微型机与应用》2011年第30卷第19期

$$d_{\max} = \inf\{d_i \geq 0 : A_i(s, t) \leq S_i(s, t+d)\} \quad (9)$$

则 d_{\max} 取值则为不等式中满足条件的边界值, 因此需对不等式求解。联立式(1)~式(7)可得到统计时延上界 d

$$d \geq \frac{\lambda_q^2 \left(Ct + \sum_{p \neq q} [\lambda_p C(t-s) - \psi_p t] \right)}{\theta \sum_{p=1}^{q-1} R_p - \lambda_q^2 \left(C + \sum_{p \neq q} [\lambda_p C - \psi_p t] \right) - \psi_q t + \lambda_q \sum_{p=1}^{q-1} \theta R_p(t-s) \lambda_q} \quad (10)$$

其中,

$$\psi_q = \rho_q + \sqrt{-2\gamma_q} \chi_q t^{H_q-1} \quad (11)$$

这里 χ_q 为 $A_q(s, t)$ 的标准偏差, H_q 为 $A_q(s, t)$ 的自相似参数, γ_i 为一个正常数(通常取 $\gamma_i=6$)。

将式(11)带入式(10), 由 $\Pr\{D_i(s, t) \leq d_{\max}\} \geq 1-\varepsilon$ 最终可得:

$$1-\varepsilon \leq \Pr\{D_i(s, t) \leq d\} \leq$$

$$\Pr \left\{ D_q(s, t) \leq \frac{\lambda_q^2 \left(Ct + \sum_{p \neq q} [\lambda_p C(t-s) - \psi_p t] \right)}{\theta \sum_{p=1}^{q-1} \left[\frac{\phi_p}{\sum_{i \in B} \phi_i} R - \lambda_q^2 \left(C + \sum_{p \neq q} [\lambda_p C - \psi_p t] \right) \right]} - \frac{\lambda_q^2 \theta(t-s) \sum_{p=1}^{q-1} \left[\frac{\phi_p}{\sum_{i \in B} \phi_i} R - \psi_p t \right]}{\theta \sum_{p=1}^{q-1} \left[\frac{\phi_p}{\sum_{i \in B} \phi_i} R - \lambda_q^2 \left(C + \sum_{p \neq q} [\lambda_p C - \psi_p t] \right) \right]} \right\} \quad (12)$$

因此, 式(12)就为基于统计网路演算和有效服务曲线, 并适合于分形布朗通信流的改进 GPS 调度算法的时延统计上界。

3.2 统计时延的边界概率

根据定义 2 可知, 对于一个 GPS 系统, 一个优先级为 q 的延迟上界 $D_q(s, t)$ 满足下列表达式:

$$\Pr\{D_q(s, t) \geq d\} = \Pr\{A_q(s, t) \geq S_q(s, t+d)\}$$

联立式(7)、式(8)可得:

$$\Pr\{D_q(s, t) \geq d\} \leq \Pr \left\{ A_q(t) + \lambda_q^2 \sum_{p \neq q} A_p(t+d) \geq \lambda_q^2 \left(R(t+d) + \sum_{p \neq q} \lambda_p R(t+d-s) \right) + \lambda_q \sum_{p=1}^{q-1} \theta R_p(t+d-s) \right\} \quad (13)$$

又因为, 假设业务 q 中第 k 个流在时间间隔 $[s, t]$ 内的最大业务量使用业务包络函数 $\vartheta_q(t-s)$ 来表示, 可以由参考文献[9]中的式(10)、(17)求解得

$$E\{e^{\delta A_q(s, t)}\} \leq \frac{r_q \cdot (t-s)}{\vartheta_q(t-s)} (e^{\delta A_q(s, t)} - 1) + 1 \quad (14)$$

利用契卡夫边界定理, 将式(8)、式(14)带入式(13)可得

$$\Pr\{D_q(s, t) \geq d_q\} \leq$$

$$\inf_{\delta \geq 0} \left\{ \exp \left\{ -\delta \lambda_q^2 \left(R(t+d) + \sum_{p \neq q} \lambda_p R(t+d-s) \right) \right\} - \delta \theta \lambda_q R(t+d-s) \sum_{p=1}^{q-1} \frac{\phi_p}{\sum_{i \in B} \phi_i} \right\} \cdot \frac{\rho_q \cdot (t-s)}{\psi_q \cdot (t-s)} \cdot (\exp\{\delta \vartheta_q(t-s)\} - 1) + 1}{\frac{\rho_q \cdot (t+d-s)}{\psi_q \cdot (t+d-s)} \cdot (\exp\{\delta \lambda_q^2 \vartheta_q(t+d-s)\} - 1) + 1} \cdot \prod_{p=1}^N \frac{\rho_p \cdot (t+d-s)}{\psi_p \cdot (t+d-s)} \cdot (\exp\{\delta \lambda_q^2 \vartheta_p(t+d-s)\} - 1) + 1$$

其中, ψ_q 的取值与式(11)相同。

4 数值结果和分析

本节对基于改进的 GPS 的自相似业务在网关处延迟上界模型进行一系列的数值计算与比较分析, 以显示相关参数对于端到端延迟上界的影响, 以及基于改进的 GPS 的自相似业务网关处延迟上界比基于 GPS 的上界具有更好的紧致性。下面主要通过对比自相似业务穿过基于改进的 GPS 系统的单节点延迟上界和基于未改进的 GPS 的延迟上界进行一系列数值计算和比较分析。

考虑一个由 3 种业务组成的多业务系统, 该系统由两种不同优先级的 5 个自相似微业务流组成, 经过改进的 GPS 系统中的聚合调度后, 微业务流 $A_{1,1}(t)$ 、 $A_{1,2}(t)$ 、 $A_{1,3}(t)$ 聚合为聚合流 $A_1(t)$, 微业务流 $A_{2,1}(t)$ 、 $A_{2,2}(t)$ 聚合为 $A_2(t)$ 。

在查阅现有通信工程技术标准中所提性能参数的基础上, 仿真实例相应各参数配置如下: 为方便研究, 假设系统的 $s=0$ 时, 自相似业务的标准偏差 $\chi_q=150$ kb, 正常数 $\gamma_i=6$, 系统服务容量 $C=1000$ kb/s。

图 2 和图 3 分别给出了自相关业务穿过基于改进 GPS 的网关统计延迟概率与业务自相似参数、改进前后的网关基于改进的 GPS 延迟上界和其动态权重之间关系的对比图计算结果。

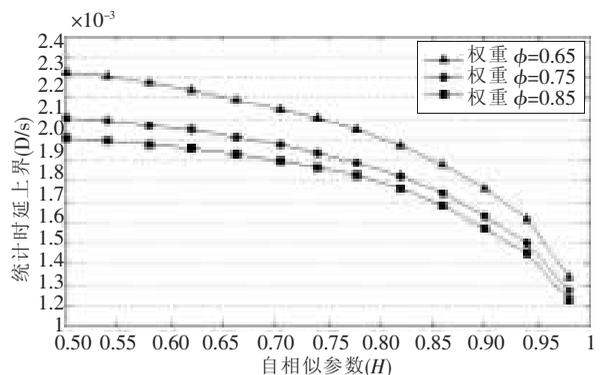


图 2 统计时延上界和自相似参数

从图 2 可以看出, 自相似业务穿过基于改进的 GPS 网关统计延迟上界随该业务的自相似参数 H 的增加而减

网络与通信 Network and Communication

小,且这种减小趋势随 H 的增大而有所增大;当自相似参数 H 值一定时,网关延迟上界随 GPS 系统分配给它的权重 ϕ_i 的增加而减小,且这种减小的趋势随动态权重的增加而减小;此外,单节点延迟上界与动态权重之间的影响程度也随自相似参数 H 的增大而有所减小。

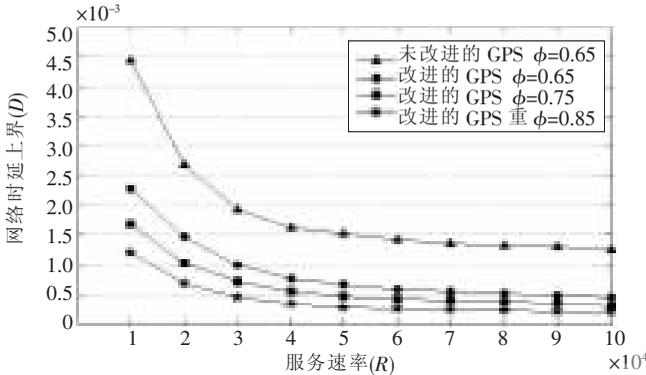


图3 时延上界和服务速率

从图3可以看出,基于改进的GPS网关单节点延迟上界小于基于未改进的延迟上界,即前者具有更好的紧致性。业务流通过基于改进的GPS节点的延迟上界随GPS系统服务速率 R 的增大而减小,且这种减小趋势随 R 的增大而变得越来越平缓;此外,当服务速率 R 一定时,基于改进的GPS系统的网络延迟上界随权重 ϕ_i 值的增加而有所减小。

图4和图5分别给出了该多业务GPS系统中每个聚合业务延迟 d 与延迟统计上界 $\Pr\{D>d\}$ 的对应关系。

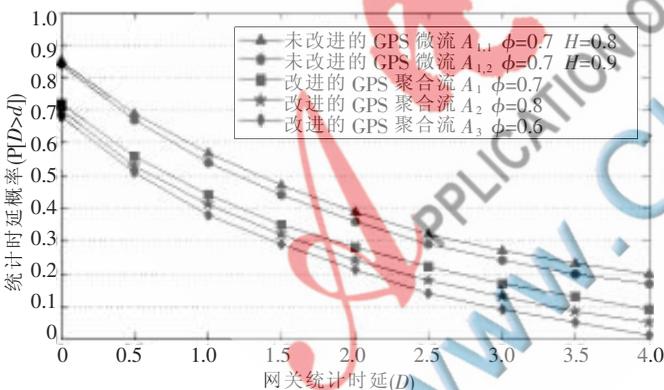


图4 统计时延上界和统计时延

从图4可以看出,在服务利用率($\theta=80\%$)恒定的情况下,聚合流 $\Pr\{D>d\}$ 随 d 的增大而减小;对于两个不相同的聚合流,权重 μ_i 大, $\Pr\{D>d\}$ 不一定小。随着服务速率 R 的增加,时延性能呈现下降的趋势。这表明,业务流所接收的服务速率越低,融合网络网关处的性能越差。从上述分析可知,为了保证网关处时延性能,在架构网络时,需要考虑网关的QoS性能与服务速率的关系。

图5给出了服务利用率 ρ 与延迟统计上界 $\Pr\{D>d\}$ 的对应关系。从图5可以看出, $\Pr\{D>1\}$ 随 P 的增加而减小;当利用率 ρ 较小($\rho<30\%$)时,对于两个不相同的会

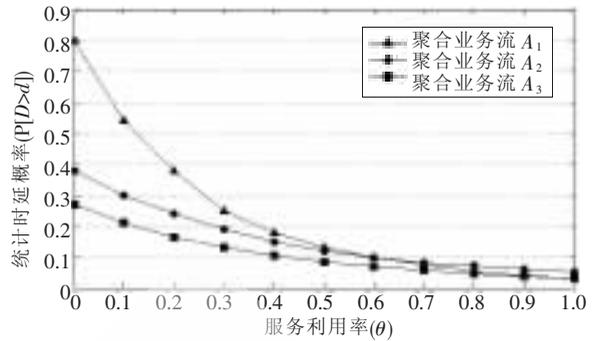


图5 统计时延概率和服务利用率

话,权重 μ_i 越大的会话的 $\Pr\{D>d\}$ 越小;当 ρ 较大时,会话权重 μ_i 对 $\Pr\{D>d\}$ 的影响减小。

综上所述,对上述多业务系统的数值结果进行分析可以归纳为:

(1) 本文给出改进的GPS系统的性能模型能够反映融合网络中的自相似业务流的特性,网关节点业务流能提供时延性能统计上界保证,并且该性能模型能反映业务流统计特性;

(2) 使用统计网络演算相关知识对融合网络网关业务流进行管制和调节,采用适合融合网络的服务速率,能够精确求解网关QoS性能,其服务速率可按权重比例进行分配,即使存在自相似程度较大的聚合流,也不致于影响自相似程度较低的其他聚合流。这种分配方案很好地保证了服务质量,体现了更好的公平性。

(3) 虽然一个业务得到的服务与GPS系统分配给它的权重成正比,但对于两个不相同的业务,获得较大服务速率的聚合统计时延上界不一定比获得较小服务速率的延迟统计上界小,这主要是由于两个业务流的通信量参数不同所引起的。

本文首先归纳并总结了统计网络演算的基本知识,提出了基于改进的GPS节点结构,然后利用改进的GPS系统和分形漏桶作为网络节点模型,研究了自相似业务单节点延迟界限问题,计算出网关处聚合业务流的延迟上界和相应的违背概率。对上述结果进行数值仿真,结果表明,基于统计网络演算理论计算网关处的延迟上界能得到令人满意的效果。本研究将对融合网络网关节点提供统计性保证服务,并对输入业务的接纳控制、资源分配等的有效控制具有一定的参考价值,为下一步由单节点扩展到端到端节点延迟上界的研究奠定了基础。

参考文献

- [1] Hu Hanrahan. Network convergence: services, applications, transport, and operations support [M]. Hoboken: John Wiley&Sons, 2007.
- [2] STALLINGS W. 高速网络与互联网——性能与服务(第二版)[M]. 齐望东,薛卫娟,傅麒麟,等,译.北京:电子工业出版社,2003.

- [3] Zhang J S. le-access interference processes are self-similar in multimedia CDMA cellular networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005,51(3):1024-1038.
- [4] JIANG Y. A basic stochastic network calculus [C]. Proceedings of ACM SIGCOMM, 2006.
- [5] Elwalid A'Mitra D. Design of generalized processor sharing schedulers which statistically multiplex heterogeneous QoS classes[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM'99, New York, 1999.
- [6] 张连明, 基于网络演算的自相似网络性能上界模型研究[D], 长沙:中南大学,2006.
- [7] Li Chengzhi, BURCHARD A, LIEBEHERR J. A network calculus with effective bandwidth [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007,15(6):1442-1453.
- [8] 邵立松, 窦文华. 自相似网络通信量模型研究综述[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(10): 1671-1676.
- [9] BOORSTYN R K, BURCHARD A, LIEBEHERR J, et al. Statistical service assurances for traffic scheduling algorithms [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(12):2651-2664.

(收稿日期: 2011-05-13)

作者简介:

赵一 A, 女, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 电信交换关键技术。

张中荃, 男, 1964 年生, 硕士, 教授, 研究生导师, 主要研究方向: 电信交换关键技术。

