

IP 多媒体网络中自相似通信量和网络性能的研究

Research on Self-Similar Traffic and Network Performance of Multimedia Networks over IP

董宇翔¹ 党小骥² 严寒冰¹ 扬晓晖³

(重庆移动通信公司 重庆400041)¹(成都市电信局)²

(贵州省数据局)³

Abstract In recent years, as broadband multimedia services over IP became popular, they necessitated new traffic models with self-similar characteristics. In this article, we present a survey of the self-similarity phenomenon observed in multimedia media traffic and its influences on network performance. Our current research aims to fill the gap between this new traffic model and network engineering. An immediate consequence of this study is the demonstration of the limitations of validity of conventional resource allocation methods in the presence of self-traffic.

Keywords Self-similarity, QoS, Long-range dependence, Heavy-tailed distribution

1 引言

随着 Internet 网络规模的迅速扩大,网络上开放的业务种类也在不断增加。在传统的非实时的数据通信基础上,网络业务正逐步向实时性要求很强的电话通信、传真通信和多媒体通信等方面发展。在 IP 多媒体网络中,网络通信量模型的建立是提供较高 QoS 性能保证的关键,同时也是进行网络资源分配的依据。

我们可把通信量看成应用或分组类别,应用类别是指如“会议电视”之类的多媒体业务,分组类别可由一个随机模型给出,它是应用中分组到达过程的仿真。显然,为了对通信量进行量化,需要采用不同的分组类别表示不同的业务,而不同多媒体业务流的相关性却对网络的性能产生了很大的影响,在多媒体通信中,一条链路上传输不同的视频、音频和数据业务流,而这些业务流的业务模式和性能要求存在很大的差异,这就造成了多媒体网络中通信量的复杂性。特别是 IP 实时通信中压缩视频流和音频流,其可变比特率(VBR)导致了“突发”的业务模式,表现出不同业务分组之间的业务相关性和时间上的长程依赖性。这样就提出了一个问题:在什么情况下,这种业务模式是普遍的,以至于在分析网络性能时要充分考虑这种自相似性,为了解决这一问题,对网络 QoS 和资源分配的全面了解是很必要的。通常,如果要获得较高的 QoS(由排队延迟、重发次数、包丢失率和比特错误率等参数来表示)保证,需对网络的资源配置进行优化,因为资源优化决定了网络输出端口的缓存容量、可分配带宽和其它资源

的分配^[4]。

2 IP 多媒体网的 QoS

国际标准化组织(ISO)把 QoS 作为衡量网络业务优劣的标准。如图1所示,为多媒体通信(MCS)中 QoS 的分层结构模型, QoS 参数通常由误码率、帧错误率、信元丢失率、延迟和抖动等表示,抖动是指两个分组之间的端到端的最大延迟差别。

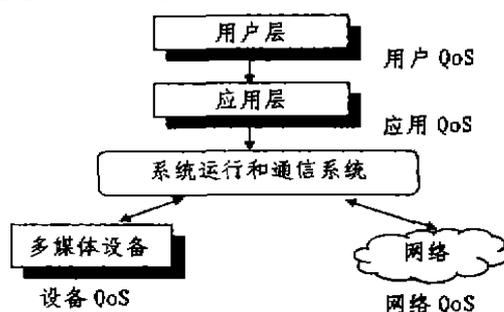


图1 多媒体通信系统(MCS)的 QoS 分层模型

图1中, MCS 的用户和应用映射到通信系统中,通信系统尽力(Best-Effort)地满足各种业务需求,对于不同的业务类型,其业务参数由符合 ISO 标准的 QoS 指标来表示,本文中,我们主要讨论网络层的 QoS 和业务特性,并分析它对网络性能的影响。

网络 QoS 特性参数描述了网络的业务要求^[1],可表示为:

董宇翔 硕士生,主要研究领域为宽带 IP 网络。

网络负载:由网络连接中分组到达的平均/最小间隔时间、节点中的分组大小和连接分组的服务时间决定;

网络性能:描述了保证相关业务需求的网络要求,可通过特定包丢失率的源目端延迟界限来表示;

IP 多媒体网络中,不同多媒体业务流要求对网络资源进行合理分配,我们所关心的是怎样在应用、系统和网络中进行资源分配。多媒体传输中,必须满足下列几个条件:①时间限制,包括延迟、计算时间和信令延迟;②空间限制,即系统缓存区的缓存空间限制;③频率限制,即数据传输的网络带宽和系统带宽限制。网络资源配置中,首先应分析网络的业务特性,然后确定缓存区容量和带宽等参数,使网络资源获得最好的利用。

3 IP 网络的自相似理论分析

3.1 自相似性

自相似现象描述了一个较长的时间尺度上结构的相似性。在网络通信中,数据通信量在大多数时间尺度上是突发的,可采用自相似的统计特性来进行描述。自相似性的概念与另外两个获得广泛注意的概念即分形和混沌理论有关,它在一种维度的不同“放大”程度或不同尺寸上看起来是相同的或表现是相同的,对于一个随机过程,可以说过程的统计特征对时间尺度上的变化保持不变,无论是定性还是定量地看,这样的过程都没有特征尺度;过程的短期平均行为与其长期平均行为是一样的,因此在一个较长的时间尺度上,过程表现出某种突发性。

3.2 自相似数据通信量

自相似数据通信量最早的研究是论文“On the Self-similar Nature of Ethernet Traffic”^[6],这篇论文打破了使用 Poisson 通信量假设进行直接排队分析就已足以描述所有网络通信量的思想,利用大量的数据和统计分析,指出以太网通信量存在自相似性,即以太网通信量趋向于在大时间尺度(小时、分钟)和小时间尺度(秒、毫秒)看起来是相同的,另外,对 ATM 或统计复用器中的多媒体业务流进行了研究,表明结团现象是持续存在的。对 Poisson 通信量而言,结团只出现在短时间(小时间尺寸)内,长时间看,结团就被平滑掉了,但是如果突发性行为本身是突发的——即到达簇也结成更大的簇——那么排队大小就会比 Poisson 通信流造成的排队更大。这就导致一个结果:传统排队分析由于假定了 Poisson 通信量,因而可能没有精确预计自相似通信量的性能^[5]。

传统上,用 Markov 统计模型来描述网络的性能,模型反映了网络中的短程依赖性。Markov 模型中,突发数据流可进行平滑,即在长时间尺度上,对突发数据

流进行平均可得到一个平滑的数据流。而在自相似模型中,网络则具有不同的性能参数和拥塞控制机制。

3.3 长程依赖性和重尾分布

3.3.1 长程依赖性 自相似过程最重要的特性之一是所谓长程依赖性^[6]。这个特性是由 τ 增加时的自协方差 $C(\tau)$ 的行为定义的。许多随机过程的自协方差随 τ 的增加而迅速衰减,例如,具有增量 N 和均值 λ 的 Poisson 增量过程的自相关函数:

$$R(\tau) = \begin{cases} \lambda^2, & |\tau| > N \\ \lambda^2 + (\lambda^2/L)[1 - |\tau|/L], & |\tau| < N \end{cases} \quad (1)$$

其在 $\tau > N$ 时的自协方差为:

$$C(\tau) = R(\tau) - \lambda^2 = \lambda^2 - \lambda^2 = 0$$

一般地,短程依赖过程满足如下条件即它的自协方差至少衰减得同指数方式一样快:

$$C(k) \sim a^{|k|} \quad \text{当 } |k| \rightarrow \infty \text{ 时 } \quad 0 < a < 1 \quad (2)$$

其中 \sim 表示表达式两边渐近地成正比,可观察到 $\sum_k C(k)$ 是有限的。

以此对照,长程依赖过程则具有双曲型衰减的自协方差:

$$C(k) \sim k^{1-\beta} \quad \text{当 } |k| \rightarrow \infty \text{ 时 } \quad 0 < \beta < 1 \quad (3)$$

其中 β 是前边曾定义的同个参数,它满足 $H = 1 - (\beta/2)$,这时 $\sum_k C(k) = \infty$ 。

长程依赖性从直观上看反映了自相似过程中的持续现象,即结团和突发特性在所有时间尺度上都存在的现象。

3.3.2 重尾分布 可以用来描述诸如分组到达间隔时间和突发长度等通信量过程的概率密度,随机变量 x 的分布称为重尾的,是指:

$$1 - F(x) = Pr[X > x] \sim \frac{1}{x^\alpha}$$

当 $x \rightarrow \infty$ 时, $0 < \alpha$

一般来说,具有重尾分布的随机变量具有较高甚至是无穷大的方差。

最简单的重尾分布是具有参数 k 和 α ($k, \alpha > 0$) 的 Pareto 分布,其密度和分布函数如下:

$$\begin{aligned} f(x) &= F(x) = 0, & (x \leq k) \\ f(x) &= \frac{\alpha}{k} \left(\frac{k}{x}\right)^{\alpha+1}, \\ F(x) &= 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha, & (x > k; \alpha > 0) \end{aligned} \quad (4)$$

其均值为: $\mu = \frac{\alpha}{\alpha-1}k, (\alpha > 1)$

参数 k 确定这一随机变量可以取最小值,参数 α 确定这一随机变量的均值和方差:如果 $\alpha \leq 2$,则这一分布具有无穷大的方差,而如果 $\alpha \leq 1$,它就具有无穷大的均值和方差,图2对 Pareto 和指数密度函数在对数-线性坐标尺度上进行比较,Pareto 分布的尾部则比指数分布的尾部衰减得慢得多。

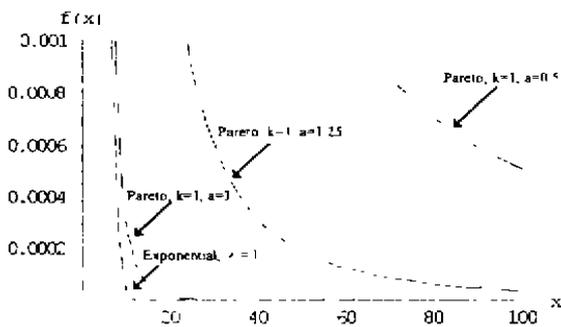


图2 Pareto 分布与指数概率密度函数

4 网络性能的仿真和研究

很多研究都指出在网络环境中存在自相似通信模式,自相似通信量对网络的性能有着很大的影响,它增大了排队延迟和包丢失率。然而,Heyman 却发现,当 $H < 0.7$ 且存在较强的短程依赖时,长程依赖对于设计缓存大小时可以忽略^[6]。但是,却没有讨论 H 较大且存在较强的短程依赖时的情况。

自相似性对网络的一个显著影响是交换机和复用器所需要的缓存空间要比采用传统排队理论预测的缓存空间大,这些较大的缓存区将导致单个信息流比原先预测产生更大的延迟。特别在实时多媒体网络中,网络的延迟-带宽积受到较大的网络带宽和 QoS 的限制,从而增大了优化网络性能的复杂性。

影响网络性能的自相似性达到什么程度才需要通过传输/网络层进行调节呢?我们可观察到排队延迟和包丢失率之间存在一个指数平衡关系。传统的排队理论中,缓存区容量的增加将导致包丢失呈指数下降,并使传输容量利用率成正比增大。但在自相似通信量中,情况并非如此。在一定的假设条件下,存储或缓存需求 q 与平均利用率之间有如下关系:

$$q = \frac{\rho^{1-H}}{(1-\rho)^{H-1-H}} \quad (5)$$

其中 H 是自相似参数, $H=0.5$ 时这个关系式简化为 $\rho/(1-\rho)$, 这就是具有指数到达时间间隔和指数服务时间的 M/M/1 系统的经典排队结果。对于定长服务时间 M/D/1 的系统,经典排队结果是:

$$q = \frac{\rho}{2(1-\rho)} - \rho \quad (6)$$

图3为通过仿真画出了 $H=0.95$ 和 $H=0.78$ 时的结果并将这些结果与 M/M/1 和 M/D/1 时的情况进行了比较。从图中可以看出,对于较高程度的长程依赖性(较高的 H 值)缓存需求从较低的利用率就开始急剧增长。这对于缓存设计有明显的后果:如果要达到高利用率,对于自相似通信量而言,需要缓存量比基于经典排队分析所作的预测值要大得多。

对于具有较大 H 参数的源端,当缓存区容量不是

太大时,Markov 模型能较好地估计缓存区占有率^[2],但当缓存区容量过大时,Markov 模型可能就不能估计信元丢失率和平均缓存容量。另外当缓存区容量太大时,由于自相似特性而使队列的延迟呈现出超线性,对于长程依赖来说,其队列长度分布比短程依赖减少得慢。

而且,在一个较大的时间尺度上,存在着特定的突发现象:一个集中时期内队列的长度很大,从而对拥塞控制产生了不利的影响,但长队列中业务流的相关性却可用于拥塞控制技术中。随着重尾的增加,网络的性能(主要由吞吐量、包丢失率、包重发率等参数衡量)逐渐劣化,这时拥塞控制可在减少重尾分布的自相似性的影响,保存业务流的同时,对源端通信量进行规定,使其输出恒定的业务流。

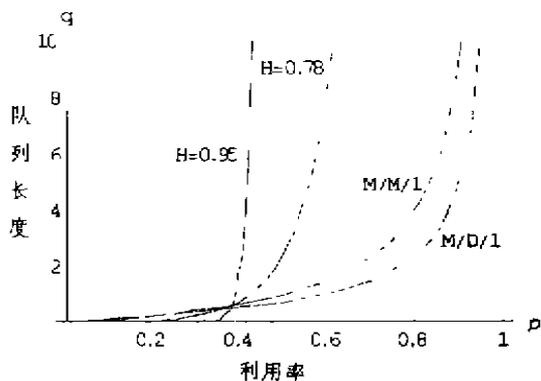


图3 自相似存储模型仿真曲线与经典排队的比较

很难实现动态的拥塞控制策略,因为这种策略是基于当前通信量来进行预测的,最终无法适应通信量的迅速变化^[7],另外,通过增大交换机和复用器的容量也很难达到拥塞避免的目的,因为数据网络中的通信量呈现出突发性和不可预测性,在几天、几星期、几个月期间,其通信量模式都可能发生变化,拥塞几乎可在任何时刻产生。另一方面,目前正在研究可预测的拥塞控制机制以提高网络性能,它通过预测未来的网络状态决定通信量控制策略,这种机制被称为 SAC (Selective Aggressiveness Control),它具有稳定、高效、灵活的特性,便于和目前的拥塞控制机制结合起来。

当 SAC 预测到未来网络状况是“空闲”时,它可根据“空闲”程度来调节可占据带宽的范围,从而在网络上攫取带宽。网络的自相似通信量越多,采用 SAC 所获得的网络性能的改善就越大,尽管实际上不可能对未来的网络拥塞进行全面的预测,但是与其它拥塞控制算法相比,诸如反馈拥塞控制, SAC 确实获得了最高的网络吞吐量。

通信量的自相似(通常由 Pareto 分布来描述, $\alpha = 3 - 2H$)和网络资源(缓存容量、瓶颈带宽)变化时,可

观察到包丢失率的变化:当自相似系数H逐渐减小时,伴随着缓存容量的下降,包丢失率将增加。如图4所示,为不同链路缓存容量(LB)下的包丢失率情况。

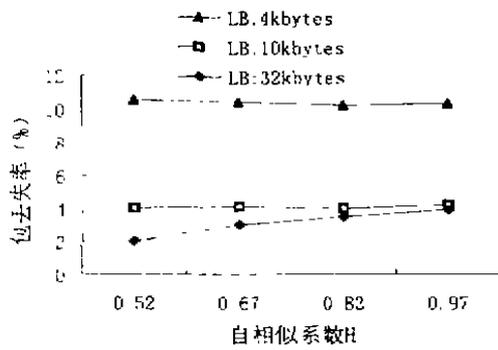


图4 不同链路缓存容量的包丢失率与自相似系数的关系

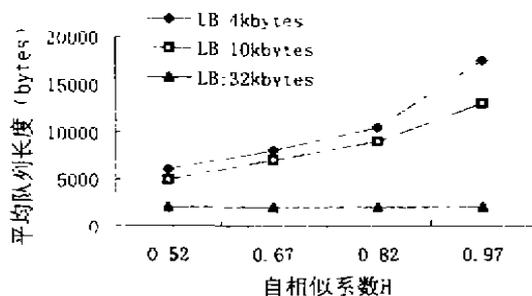


图5 不同链路缓存容量的平均队列长度和自相似系数的关系

在实现可靠流控分组传输时,伴随着自相似性的增长,分组丢失和重发率平滑下降,而自相似性对平均队列长度影响更大,可观察到自相似下的平均队列长度比 Poisson 减少得慢,如增加网络资源配置(诸如链路带宽和缓存空间),可使网络性能获得超线性的提高,同时增大了队列延迟,而在 IP 多媒体网络环境中,网络尽最大努力传输音频和视频流,只有大大减少队列延迟才能获得较低的包丢失率。

如图5所示,通信量处于较高的自相似情况下,通过增加链路带宽,提供较大的缓存容量可大大减少队列延迟的影响,而对于较低的自相似,效率就没有这么明显。因此,IP 多媒体网络中的高带宽通信链路应能消除队列延迟和包丢失(吞吐量)之间的指数均衡,以支持对 QoS 敏感的业务。

参考文献

- 1 Guerin R, Peris V. Quality-of-Service in packet network: basic mechanisms and directions. *Computer Networks*, 1999, 31: 169~189
- 2 Feldmann A, Gilbert A C, Willinger W. Dynamics of IP traffic. A study of the role of variability and the impact of control. *Computer Communication Review*, June 1999
- 3 Zeadally S, Cui Weiyou. Experiences with multimedia applications over native ATM. *Journal of Network and Computer Applications*, 1998, 21: 107~123
- 4 Savage S, Cardwell N, Wetherall D, Anderson T. TCP Congestion Control with a Misbehaving Receiver. *Computer Communication Review*, March 1999
- 5 Heyman D P, Lakshman T V. What are the Implication of Long-Range Dependence for VBR-Video Traffic Engineering. *IEEE Trans. Networking*, 1996, 4(3)
- 6 Leland W E, et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic. *IEEE Trans. Networking*, 1994, 2(1): 1~15

(上接第67页)

证明:为了简单起见,这里只证明第一种情况,即 Operation = delete, OP = delete, 从 R_i 中删除 t_i, 如果 t_i 是悬空行或者 V_i 可自维护, 则全局视图管理器不需要向 R_i 发送任何查询, 不会有异常情况产生, 所以不需要进行补偿操作(见 EMVM 算法第3步和第5步), 否则, 全局视图管理器向 R_i 发查询, 查找 R_i 中与 t_i 有相同连接属性的行(见 EMVM 算法第6步), 如果 S_i 在执行这条查询语句之前, 先从 R_i 中删除了一行 t_k, 且 t_k 与 t_i 有相同的连接属性, 此时就发生了异常情况(见 EMVM 算法第8步), 既然 t_k 已经删除, 全局视图管理器收到的查询结果中就不会有 t_k, 因此视图维护算法的执行结果没有从 V_i 中删除本应该删除的 $\pi_{\alpha, \beta}(JOIN_{\alpha, \beta}(L, t_k))$ (见 EMVM 算法第7步), 为了使全局视图回到一致状态, 补偿算法要从 V_i 中删除 $\pi_{\alpha, \beta}(JOIN_{\alpha, \beta}(L, t_k))$. □

现在我们讨论一下前面的假设条件: 假设所有与 Q_i 相关的底层关系的属性都为 V_i 的属性, 这个假设条件的目的是简化问题, 因为如果有查询中出现的底

层关系的属性不在全局视图出现, 则导出关系中不在全局视图中出现的属性只能用一个变量来表示, 这会使视图自维护问题变得更加复杂, 这里我们不再讨论这个问题。但是, EMVM 算法可以不要这个假设, 只要在判断视图是否可自维护时, 除了要求 R_i 的导出关系 R'_i 中, 连接属性与 t_i 相同的行数等于 V_i 记录的 R_i 中有该属性的行数, 再加上一个条件: R'_i 中连接属性与 t_i 相同的行中, 视图 V_i 中出现的属性中没有变量, 此时 EMVM 算法就可以不要前面的假设条件。

参考文献

- 1 Huyn N. Multiple-View Self-Maintenance in Data Warehousing Environments. *VLDB*, Greece, 1997: 26~35
- 2 Zhuge Y, Molina H G, Hammer J, Widom J. View Maintenance in a Warehousing Environment. *ACM SIGMOD Conference*, 1995: 316~327
- 3 Levy A, Sagiv Y. Query Independence of Updates. *VLDB*, Dublin, Ireland, August 1993: 171~181
- 4 Harrison J V, Dietrich S W. Maintenance of Materialized View in a Deductive Database: An Update Propagation Approach. In: *Proc. of the 1992 JICISIP Workshop on Deductive Database*, 1992