

文章编号: 1001-0920(2002)01-0001-05

Internet 业务流的自相似性——建模、分析与控制

汪小帆¹, 卢俊国², 王执铨¹

(1. 南京理工大学 自动化系, 江苏 南京 210094; 2 上海交通大学 电子信息工程系, 上海 201102)

摘要: Internet 的异构性、大规模和不断变化等特性, 使其成为一个典型的复杂系统, 其中有许多复杂的建模和控制问题。介绍了 Internet 业务流的自相似特性, 综述了自相似业务流的数学建模、性能分析和控制策略等方面的研究进展, 指出了存在的问题和进一步的研究方向。

关键词: 网络; 自相似; 控制; 排队; 性能分析

中图分类号: TN 913 **文献标识码:** A

Self-similarity in internet traffic ——Modeling, analysis and control

WANG Xiao-fan¹, LU Jun-guo², WANG Zhi-quan¹

(1. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2 Department of Electronics and Information Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201102, China)

Abstract: The heterogeneity, great size and rapid change of internet make it becomes a typical complex system consisting of many complex modeling and control problems. The self-similarity nature of internet traffic is introduced. Research developments in mathematical modeling, performance analysis and control of self-similarity traffic are reviewed. Some open problems and future research directions are also pointed out.

Key words: network; self-similarity; control; queuing; performance analysis

1 引言

近年来, Internet 的飞速发展已成为人类进入网络信息时代的主要标志。Internet 的复杂性源于以下特征: 1) 异构性: Internet 采用开放的 TCP/IP 协议, 将分布在世界各地的形形色色的计算机系统和网络连接在一起。可以预见, 在不久的将来, 不但电脑和手机可以上网, 而且各种家用电器、汽车以及控制设备等都可以连接到网上。2) 规模性和变化性: 随着计算机和网络技术的快速发展, Internet 的规

模也在急剧膨胀。Internet 的上网用户和业务量几乎平均每 6 个月翻一番。Internet 从服务内容到服务形式始终处在不断变化之中, 其结构和协议也在不断改进。这些特征使得对 Internet 的建模与仿真以及分析与改进变得十分重要而又极其困难。

Internet 的各种技术和应用都是直接由市场驱动的, 它从发展初期就强调工程应用和实践。而 Internet 的一些新的复杂性特征, 使得经典的基于电路交换技术的通信网络理论, 并不能简单地照搬到基于分组交换技术的计算机网络(包括 Internet)。

收稿日期: 2000-09-14; 修回日期: 2001-01-05

作者简介: 汪小帆(1967—), 男, 江苏句容人, 博士, 从事复杂非线性系统分析与控制的研究; 王执铨(1939—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 从事动态大系统建模与控制、混沌控制等研究。

大量实际数据测量和分析表明,适用于电话网络业务流的Poisson模型,并不能用于描述Internet的业务流特性,Internet业务流具有本质上的自相似特性。深入理解业务流的特性,对于分析与改善网络性能是十分重要的。

本文将较全面地综述近年来在自相似业务流的数学建模、性能分析和控制策略等方面已取得的研究成果,并指出存在的问题和进一步的研究方向。从事该方向研究的主要是网络、通信和统计等领域的研究人员,还需要更多的控制科学与工程研究人员关注Internet中的控制问题,从而使Internet中一些新的控制问题具有新的控制思想与技术。

2 自相似性简介

自相似性意味着局部以某种方式与整体相似。但是这种自相似性通常并不很严格,而是从统计意义上讲的,即局部适当放大后,与整体具有相同的统计分布。首先给出常用的时间序列的二阶自相似性的数学定义。

令 $\{X_t | t \in Z_+\}$ 表示按某一固定时间间隔测量得到的业务量序列, $\{X_t\}$ 的 m 阶聚合序列为 $X^{(m)} = \{X_i^{(m)}, i = 1, 2, \dots\}$,其中, $X_i^{(m)} = (X_{(i-1)m+1} + \dots + X_{im})/m$,即 X_t 被分成大小为 m 的数据块,再对每块中的数据进行平均而得 $X_i^{(m)}$; $r(k)$ 和 $r^{(m)}(k)$ 分别表示 X_t 和 $X_i^{(m)}$ 的自相关函数,假设 X_t 具有有限均值和方差。如果对于所有 $k \geq 1$,有

$$r^{(m)}(k) \sim \frac{1}{2}((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}), \quad m \quad (1)$$

则称 X_t 是具有参数 H ($1/2 < H < 1$)的渐近二阶自相似序列。 H 称为Hurst系数,它的范围是 $1/2 < H < 1$ 。式(1)具有如下两个性质: 1) $r^{(m)}(k) \sim r(k), k \rightarrow \infty$; 2) $r(k) \sim ck^{-\beta}, k \rightarrow \infty$, 其中 $0 < \beta < 1, c > 0$ 为常数。性质1)说明相关结构不随时间聚合程度而变化,并且 X_t 在二阶意义上是自相似的,性质2)说明 $r(k)$ 的行为是双曲的, $r(k) \sim ck^{-\beta}$ 称为长相关

(LRD)特性。如果 $r(k) \sim ck^{-\beta}, \beta > 1$,则称相应的过程为短相关(SRD)过程。一般地,自相似性与长相关并不等价,如 $H = 1/2$ 的分形布朗运动是自相似的,但它不是长相关的。然而,二阶自相似与长相关是等价的,因此这两个术语在网络业务流分析中经常互用。

自相似程度是由Hurst系数表征的,因此人们

通过估计Hurst系数来判断和检验业务流的自相似性。估计Hurst系数的方法有多种,其中鲁棒性较好的方法有R/S分析法^[1],方差-时间估计法^[1],Whittle估计法^[2]和基于小波分析的EM估计法等^[3]。

3 Internet自相似业务流建模

传统的基于Poisson过程或Bernoulli过程的网络业务流模型都是短期相关模型,即认为当前时刻业务量与间隔较长的过去时刻的业务量是不相关的。20世纪90年代初,Leand等人^[1]通过对几个以太网段上收集到的数百万个实际传输的数据包的分析发现,计算机网络上的突发业务流在很长时间范围内都具有相关性,可用具有长期相关性的模型——自相似模型较好地描述。文献[1]为研究计算机网络业务流的自相似性奠定了基础。此后,大量的业务流监测与分析表明,各种计算机网络上的各种业务,都在相当长的时间尺度下呈现出统计自相似性^[4~10]。无论网络的拓扑结构、用户数量、协议类型、传输介质、业务地点、编码方式、服务和业务类型如何变化,这种自相似性都始终存在。一些文献还应用多重分形理论分析自相似业务流的分形行为,以求更加深入细致地了解业务量特性^[11]。建立合适的数学模型对业务流的性能分析和控制是很重要的。对于提出的多种描述业务流自相似特性的数学模型,本文介绍其中的两类。

3.1 基于自相似高斯噪声的随机性模型

这类模型用分形高斯噪声和分形布朗运动等生成自相似业务流^[12~14]。分形布朗运动 A_t 是一种具有定常增量的自相似高斯噪声,它可描述为

$$A_t = mt + \sqrt{am}B_t^H, \quad t \in (0, +\infty)$$

式中, m 为业务的平均到达位率, $a > 0$ 为方差系数, B_t^H 为标准的分形布朗运动, $H \in (0.5, 1)$ 为Hurst系数。产生分形布朗运动的快速算法主要是RMD法,该算法的缺点在于生成业务的Hurst系数与期望值不一致。

分形布朗运动的增量过程即为分形高斯噪声。可通过对分形高斯噪声的频谱进行快速Fourier逆变换^[15]获得业务数据,此方法生成的业务源Hurst系数具有较好的一致性,而且业务数据样本的边际分布非常接近高斯分布。但多数真实业务源在很短的时间间隔下具有与分形高斯过程不同的相关结构。

考虑到真实业务数据可能具有不同的相关结

构,人们还提出了基于分形ARMA(p, d, q)过程的业务生成方法^[16~19],但这类方法的计算量很大。

3.2 基于混沌映射的确定性模型

混沌是确定性非线性系统产生的一种类似随机的复杂行为,采用混沌映射可对复杂业务流给出较为简洁的描述。混沌映射能产生分数维的具有长相关特性的业务流,其Hurst系数为映射参数的简单函数^[20]。混沌映射产生的业务源具有非整数的分形维和长相关性,且其Hurst系数是映射参数的简单函数。混沌映射既能产生简单分形业务流,又能产生多重分形业务流。

首先考虑单个业务源,用如下映射来描述一个ON/OFF业务源

$$x_{n+1} = F(x_n; d, m_1, m_2) = \begin{cases} F_1(x_n) = x_n + \left(\frac{1-d}{d^{m_1}}\right) x_n^{m_1} & 0 < x_n < d \\ F_2(x_n) = x_n - \left(\frac{d}{(1-d)^{m_2}}\right) (1-x_n)^{m_2} & d < x_n < 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x_n \in (0, 1)$, $m_1, m_2 \in (1, 2)$, $d \in (0, 1)$ 。与式(2)相关联的是代表ON/OFF状态的变量

$$y_n = y(x_n) = \begin{cases} 0, & 0 < x_n < d, \text{ OFF (no packet)} \\ 1, & d < x_n < 1, \text{ ON (packet)} \end{cases} \quad (3)$$

当 $y_n = 1$ 时,一次产生 k 个信元;当 $y_n = 0$ 时,不产生信元。映射(2)和(3)能对具有不同统计特性的业务流进行建模。Hurst系数可用映射参数来表示。当 $m_1 = m_2 = 1$ 时,映射(2)和(3)产生Hurst系数 $H = 1/2$ 的Poisson过程,ON/OFF时间呈几何衰减,由该映射产生的业务流是不相关的;当 $m_1 > 3/2$ 或 $m_2 > 3/2$ 时,映射(2)和(3)产生的业务流是渐近二阶自相似的。

用混沌映射对业务流建模的一个主要困难是无法给出不变密度的解析表达式。最近,Mondragon发现当ON事件与OFF时间无关时,可给出不变密度的近似表达式^[20],这样便可用映射参数完全刻画由混沌映射生成的业务流特性。混沌映射还可用于描述聚集业务源和排队长度动力学。

除上述两类业务源生成方法外,还有一些其它生成方法,包括直接叠加具有拖尾特性的ON/OFF业务源^[21],利用M/G/1排队模型^[15]和利用逆小波变换^[22]等方法。

4 自相似业务流的性能分析

Internet从数学本质上可看成是一个排队网络,因而可将排队理论用于网络业务流的性能分析。具有长相关输入与具有Markov输入的队列行为之间的性能特性不同,在无限缓冲区系统中,长相关输入的队列长度分布具有一个慢于指数下降的拖尾;而在短相关输入情况下,队列长度分布则是指数衰减的。文献[23,24]研究了在确定长相关对网络的影响范围时,小缓冲区和有限时间范围的作用。

许多有关队列研究结果的主要缺点表现为它们是渐近的。例如在无限缓冲区系统中,队列长度分布拖尾的上下界是在队列长度趋于无穷时推导得出的;而在有限缓冲区系统中,缓冲区的溢出概率是在缓冲区的容量变得无界时得出的。文献[25,26]给出了零缓冲区的有趣结果;[27~29]研究了渐近结果和有限缓冲区系统观测结果之间的协调。

现有性能分析结果的另一个不足是它们都集中于有关包的丢失率的一阶性能的测量,对属于抖动(如包的丢失方差或延迟等二阶性能)的测量却很少,而二阶性能在多媒体通信中则是很重要的。例如,两个丢失过程可能有相同的一阶统计特性,但如果其中一个丢失过程以包丢失时间相对集中的形式比另一个过程具有更高方差,就可能对在实时业务传输中使用的基于包的前向误差校正有不利的影响^[30~32]。收敛过程太慢的稳定性是没有工程价值的,这时暂态性能测量在实际中就显得更有价值,而人们对暂态性能测量的了解还很少。

5 自相似业务流控制

近年来,随着Internet用户数量的急剧增加,拥塞现象也越发频繁和严重。因此,有效的拥塞避免和控制机制是很重要的,并且始终是人们关注的热点。文献[33]利用在自相似业务中存在的长相关结构,提出了多时间尺度拥塞控制(MTSC),即利用在不同时间尺度中提取的信息,在多时间尺度上同时进行拥塞控制,它能提高基于速率的反馈控制性能。该文构造了两级多时间尺度拥塞控制协议,在两个时间尺度上分别进行拥塞控制:第1部分是作用在较小时间尺度(20~200ms)上的通用线性增加/指数减少反馈拥塞控制,控制律为

$$\frac{d\lambda}{dt} = \begin{cases} \delta, & dY/dt > 0 \\ -a\lambda, & dY/dt < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\delta, a > 0$ 为正常数, λ 为包到达率, Y 为吞吐量。

第2部分是作用在较大时间尺度(2~5 s)上的选择竞争控制(SAC)的拥塞控制模块,也称为选择斜率控制(SSC)。它用2~5 s尺度上的有关网络状态的预测信息,以控制线性增加/指数减少反馈拥塞控制在线性增加阶段的竞争性。

SAC(控制接口)算法为:若 $\lambda > \lambda_a$,则 $\lambda = \lambda_a + a_i$;否则, λ 值不变。其中, λ_a 为式(3)在时间 t 的新的校正速率值, $\lambda(t < t)$ 为先于 t 的最近的校正速率值。确定竞争因子 $a_i > 0$ 的SAC(竞争性确定)算法为:1)令 $l = L_1(S_i)$;2) $\bar{T} = E(L_2 | L_1 = l) = \sum_{m=1}^{\infty} l \Pr\{L_2 = m | L_1 = l\}$;3) $a_i = \epsilon(\bar{T})$ 。其中 S_i 是接收端通过反馈报告的时间间隔 $[t - T_1, t]$ 的合计吞吐量。竞争调度 $\epsilon(\bar{T})$ 的一种取法为 $\epsilon(\bar{T}) = 1/\bar{l}$ 。

文献[34]把多时间尺度业务流控制框架扩展到以TCP为基础的可靠传输和基于窗口的拥塞控制中,得到多时间尺度TCP(TCP-MT),以改善TCP的性能。由于绝大部分Internet业务流都由TCP控制,因此提高TCP的性能无疑是非常重要的。TCP-MT由两大部分组成:TCP模块和应用SSC的大时间尺度控制模块。

文献[32]把MTSC应用到实时多媒体业务流的控制中,通过把自适应分组水平前向误差校正(AFEC)与MTSC结合起来,提出了多时间尺度的冗余控制框架AFEC-MT。

6 有待研究的几个问题

1) 基于自相似过程的排队系统分析目前尚无完善和令人满意的理论方法,人们只能采用计算机仿真的方法对信源特性、排队性能等进行研究,但由于缺乏数学分析方法,在某种意义上显得不是很严格。目前大部分分析方法(如大偏差技术)都是渐近方法。渐近分析不是假设缓冲区容量无限,就是假设缓冲区容量有限,但缓冲区的溢出概率是在缓冲区的容量趋于无界时计算得到的。此外,人们所获得的大多数长相关输入的队列结果都是针对开环系统的,而忽略了实际网络环境中存在的反馈控制问题。由于反馈控制直接影响业务到达队列,因此在闭环队列系统中考虑反馈控制的影响是一个重要的课题。

2) 目前,在自相似条件下的性能分析集中于包丢失率和平均队列延迟等一阶性能的测量,而对于有关延迟方差和包丢失率方差等抖动的二阶性能的

测量还有待研究。这对于多媒体数据传输和服务质量的提高及在自相似条件下基于包的前向误差校正的性能分析都是十分重要的问题。

3) 自相似业务流控制面临一系列问题。首先,自相似业务流控制过去很少引起人们的注意,如何更好地利用长时相关和拖尾连接持续时间的可预测性,以及探索各种业务流控制方法是进一步的工作;其次,构成业务量的大部分长生存期的连接是业务流控制的主要目标,对数目众多的短生存期进行有效控制也是一个重要问题;最后,对于自相似业务流,有关反馈闭环系统的稳定性和最优性的分析,以及多时间尺度业务流控制的稳定性和最优性的分析都有待解决。

4) 混沌控制在自相似业务流控制中的应用。本文已介绍了用混沌映射描述自相似业务流的方法,计算机网络可看成一组由业务流耦合起来的节点,从而可用耦合映射格子来模拟。每个节点的混沌映射产生局部业务输入,耦合由业务的排队和切换确定。近10年来,混沌控制已发展成为非线性科学的一个前沿性研究方向^[35],在耦合混沌映射格子的控制方面也有不少研究。混沌控制一个诱人的特点是可用局部性小的控制获得全局性大的控制效果。因此,把混沌控制的思想和方法用于自相似业务流控制是一个值得探索的研究方向。

参考文献(References):

- [1] Leland W E, Taqqu M S, Willinger W, et al. On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version) [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1994, 2(1): 1-15.
- [2] Garrett M. Contribution toward real-time service on packet switched networks [R]. Columbia University, CU/CTR/TR 340-93-20, 1993.
- [3] Wornell G W, Oppenheim A V. Estimation of fractal signals from noisy measurements using wavelets [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 40(3): 611-623.
- [4] Erramilli A, Willinger W. Fractal properties in packet traffic measurements [A]. ITC Regional Seminar St Petersburg, 1993.
- [5] Paxson V, Floyd S. Wide-area traffic: The failure of poisson modeling [A]. Proc ACM SIGCOMM 94[C]. London, 1994: 257-268.
- [6] Addie R, Zukeman M, Neame T. Fractal traffic: Measurement, modeling and performance evaluation [A]. Proc IEEE NFOCOM 95[C]. Boston, 1995: 977-

- 984
- [7] Erramilli A, Pruthi P, Willinger W. Recent developments in fractal traffic modeling[A]. ITC 95[C]. Seminar, 1995: 240-251.
- [8] Heyman D, Tabatabai A, Lakshman T V. Statistical analysis & simulation study of video teleconference traffic in ATM network[J]. IEEE Trans CASVT, 1992, 3(1): 49-59.
- [9] Garret M, Willinger W. Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic[A]. Proc ACM SIGCOMM 94[C]. London, 1994: 269-280.
- [10] Crovella M, Bestavros A. Self-similarity in world wide web traffic: Evidence and possible cause[A]. Proc of the ACM SIGMETRICS 96[C]. 1996.
- [11] Feldmann A, Gilbert A C, Willinger W. Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of internet WAN traffic[A]. Proc ACM SIGCOMM 98[C]. Vancouver, 1998: 42-55.
- [12] Droz P, Boudec J L. A high speed self-similar ATM VBR traffic generator[A]. NFOCOM 96[C]. 1996.
- [13] Lau W C, Erramilli A, Wang J, et al. Self-similar traffic generation: The random midpoint displacement algorithm and its properties[A]. ICC 95[C]. Seattle, 1995: 466-472.
- [14] Cai H, Chen H M, Li Y D. Self-similar traffic——A new model for next generation ATM switch[A]. IEEE ICIT 96[C]. Beijing, 1996.
- [15] Paxson V. Fast approximation of self-similar network traffic[M]. Preprint, 1995.
- [16] Granger C W, Joyenn R. An introduction to long-memory time series models and fractal differencing[J]. J Time Series Anal, 1980, 1(1): 15-29.
- [17] Hosking J R M. Fractional differencing[J]. Biometrika, 1981, 68(1): 165-176.
- [18] Huang C C, Devetsikiotis M, Lambadaris I, et al. Modeling and simulation of self-similar variable bit rate compressed video: A unified approach[J]. ACM Comp Comm Rev, 25(4): 114-125.
- [19] Huang C C. Fast simulation for self-similar traffic in ATM networks[A]. ICC 95[C]. 1995: 18-22.
- [20] Mondragon R J. A model of packet traffic using a random walk model[J]. Int J of Bif and Chaos, 1999, 9(7): 1382-1392.
- [21] Alexander R, Brownlee N, Ziedins I. Modeling self-similar network traffic[R]. Univ of Auckland, 1995.
- [22] Stoksik M, Lane R, Nguyen D. Accurate synthesis of fractal brownian motion using wavelets[J]. Electr Lett, 1994, 30(5): 383-384.
- [23] Grossglauser M, Bolot J C. On the relevance of long-range dependence in network traffic[A]. Proc ACM SIGCOMM 96[C]. Stanford, 1996: 15-24.
- [24] Ryu B, Elwalid A. The importance of long-range dependence of VBR video traffic in ATM traffic engineering: Myths and realities[A]. Proc ACM SIGCOMM 96[C]. Stanford, 1996: 3-14.
- [25] Duffield N G, Whitt W. Control and recovery from rare congestion events in a large multi-server system[J]. Queueing Systems, 1997, 26(1): 69-104.
- [26] Duffield N G, Whitt W. A source traffic model and its transient analysis for network control[J]. Stochastic Models, 1998, 14(1): 51-78.
- [27] Erramilli A, Narayan O, Willinger W. Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic[J]. IEEE ACM Trans on Networking, 1996, 4(2): 209-223.
- [28] Heyman D, Lakshman T. What are the implications of long-range dependence for VBR-video traffic engineering[J]. IEEE ACM Trans on Networking, 1996, 4(3): 301-317.
- [29] Park K, Kim G, Crovella M. On the effect of traffic self-similarity on network performance[A]. Proc SPIE 97[C]. 1997: 296-310.
- [30] Biersack Ernst. Performance evaluation of forward error correction in ATM networks[A]. Proc ACM SIGCOMM 92[C]. 1992: 248-257.
- [31] Park K, Wang W. QoS-sensitive transport of real-time MPEG video using adaptive forward error correction[A]. Proc IEEE Multimedia Systems 99[C]. 1999: 426-432.
- [32] Tuan T, Park K. Multi-time scale redundancy control for QoS-sensitive transport of real-time traffic[A]. Proc IEEE NFOCOM 00[C]. 2000.
- [33] Tuan T, Park K. Multiple time scale congestion control for self-similar network traffic[J]. Perfor Eval, 1999, 36/37: 359-386.
- [34] Tuan T, Park K. Performance evaluation of multiple time scale TCP under self-similar traffic conditions[R]. Purdue University. CSD-TR-99-040. 1999.
- [35] G Chen, X Dong. From chaos to order——Perspectives methodologies and applications[M]. Singapore: World Scientific, 1998.