

自相似网络业务流建模方法与比较

葛晓虎 朱光喜 朱耀庭

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉430074)

摘要 随着网络服务的发展,多媒体数据逐渐成为网络业务流的主要内容。基于多媒体数据的网络业务流对服务质量(QoS)提出了更高的要求。通常对服务质量的要求必然转化为对网络资源的需求,然而这个需求的量化必须基于一个能够准确描述网络变化的网络业务流数学模型。同时,网络业务流的不同特征以及研究目的的不同使得自相似网络业务流建模成为一个挑战性的问题。近来,一系列的方法被用于自相似网络业务流建模,本文的作者将这些方法分为两类共四种方法。本文全面分析比较了这些方法,并提出一种分类机制用于根据不同的研究需要确定相应的建模方法。

关键词 网络,自相似,业务流建模,Alpha 稳定过程

Self-Similar Network Traffic Modeling Approaches and Comparability

GE Xiao-Hu ZHU Guang-Xi ZHU Yao-Ting

(Department of E&I, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract With the diversification of network service, multimedia data have been gradually becoming the main content in network traffics. The network services based on multimedia data put forward higher requirement for QoS (Quality of Service). In general, the requirement for QoS must be transformed into the need of network resources, whereas the quantification of this need is based on a mathematical model of network traffic which can exactly describe changes of network traffic. Furthermore, the different features of network traffic and purposes of research have been made self-similar network traffic modeling a challenging research question. Recently, there have been a number of approaches applied to self-similar network traffic modeling. The authors of this article classify these approaches into two categories and four approaches. A thorough analysis and comparison among these approaches is discussed in this paper. Furthermore, we propose a novel scheme to determine an appropriate modeling approach to satisfy the requirement of a specific research.

Keywords Network, Self-similar, Traffic modeling, Alpha-stable process

1 引言

泊松模型作为最早的业务流模型要回溯到电话的发明和著名的电话工程师 A. K. Erlang。泊松模型意味着在传输过程中业务流到达数量服从泊松分布,间隔时间服从指数分布。由于泊松模型在电话通讯中取得了巨大成功,因此传统的网络业务流模型通常是基于泊松模型^[1]。

自从 Leland, Taquq, Willinger 和 Wilson^[2]首先通过实地测量证明了网络业务流中存在明显的自相似现象,并将自相似性作为理解网络业务流建模和性能分析的重要理念以来,大量有关这方面的研究深入探讨了自相似现象的各个方面。人们发现随着路由器内存容量的增加整体丢包率的下降非常缓慢,而根据泊松模型随着路由器内存容量的增加丢包率应该呈指数下降;同时人们发现随着路由器内存容量的增加数据包的延迟总是随之上升,而根据泊松模型数据包的延迟是有一个固定上限的,并且这个上限不随着路由器内存的增加而增加。因此,根据泊松模型设计的第一代网络路由器对网络传输产生了负面影响。实验表明上述存在于宽带网络业务流传输中的现象是由于网络业务流中自相似性造成的,因此能够准确描述自相似现象的网络业务流模型成为设计网络资源分配的一个关键问题。

自相似概念首先由 Mandelbrot 在20世纪60年代提出^[3],其本意是特指一类随机过程,在改变时间(或空间)尺度时其相应的统计特性不会丢失。网络业务流的自相似性可以通过图1来描述,图1的左边数据是由 Leland 在 Bellcore Morristown Research and Engineering 采集得到^[2],而右边的数据是根据泊松模型仿真生成。通过比较左右两边的数据可以发现,当我们增加数据测量时间尺度,从0.01秒逐渐增至100秒,在实际数据中各个时间尺度上都存在突发性,而在仿真数据中随着测量时间尺度的增加突发性在逐渐丢失。上述数据表现出来的特征就是我们所说的网络业务流自相似性。为了衡量数据集中自相似的程度,通常采用 Hurst 参数(文中简记为 H)来表示这种自相似性。H 值越接近1,则自相似性越强。如果 $H > 0.5$,我们称数据集具有长程相关特性;如果 $H \leq 0.5$,我们称数据集具有短程相关特性。对于 Hurst 参数的测量方法除了最常用的 R/S 方法外,还有许多其它方法可以测量 Hurst 参数,诸如方差时间法(variance-time method),基本周期图法(periodogram-based method)等^[2]。

基于网络业务流的自相似性,存在两类建模方式。一类称之为构造建模,这类方式试图利用已知的传输知识来解释所观察到的数据特征,诸如由于资源共享而导致大量信源叠加的事实,这类建模方式中最著名的方法是 ON-OFF 建模方

法。另一类称之为行为建模,这类方式试图模拟所测量数据的变化趋势,它主要包括有三类方法,即 FBM(Fractional Bro-

wnian Motion)建模, FARIMA (Fractional Auto-Regressive Integrated Moving-Average)建模和 Alpha 稳定建模。

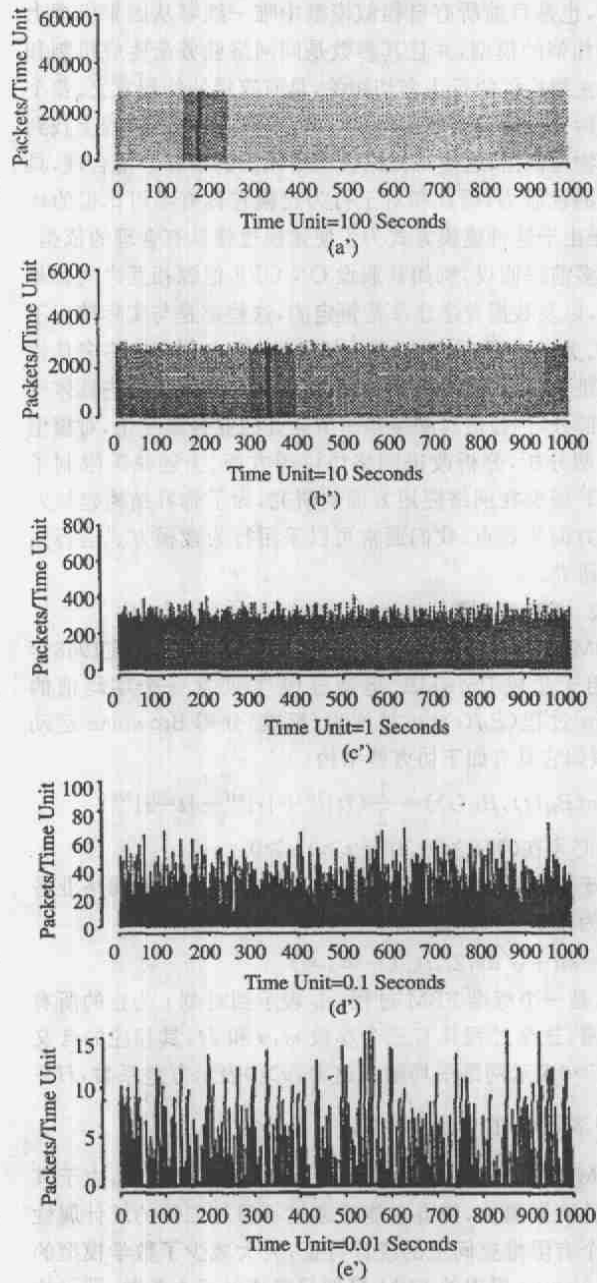
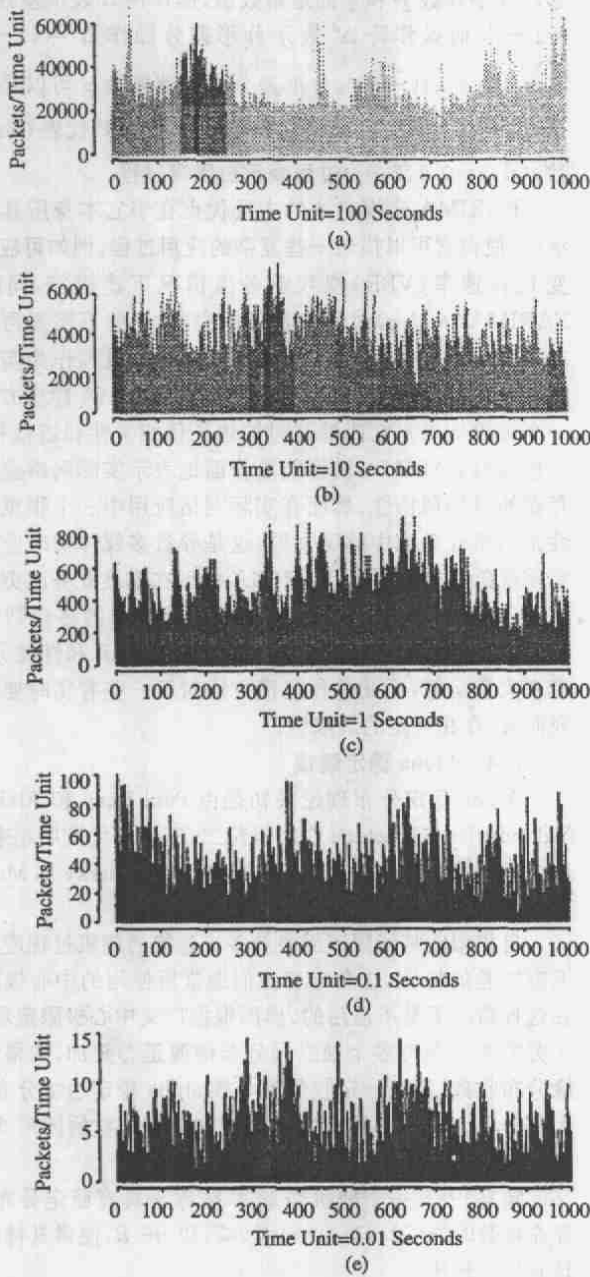


图1 网络业务流的自相似现象

本文在第2节介绍了四种方法,并分析比较了它们之间的优缺点;在第3节提出一种分类机制用于根据不同的研究需要确定相应的建模方法;最后对全文进行总结。

2 四种建模方法的分析比较

2.1 ON-OFF 建模

这种方法最初是由 Mandelbrot 在 renewal-rewards 过程的基础上提出, W. Willinger, M. Taqqe, R. Sherman 和 D. Wilson 探讨了这种方法在远程通讯中的应用^[4]。

一个 ON-OFF 过程可以表示为在一对信源和目的地之间的业务流传输过程。这个过程是由两个交替的周期组成: ON 周期,在此期间信源以恒定的速率发送数据;OFF 周期,在此期间信源不发送任何数据。令 X_{ON}, X_1, X_2, \dots 是一组独立同分布的非负随机数,其表示各个 ON 周期的长度,则第 i 个信源的 ON-OFF 过程可以表示如下:

$$W_i = Bl[0, X_{ON}^{(i)}](t) + \sum_{n=0}^{\infty} 1_{[T_n, T_n + X_{n+1})}(t), t \geq 0$$

其中 B 表示一个 Bernoulli 随机变量, $X_{ON}^{(i)}$ 表示第 i 个信源的 ON 周期长度, T_k 表示第 k 个 ON 周期的发生时间。ON-OFF 过程 W_i 是一个 Binary 过程,如果在 t 时刻 W_i 处在一个 ON 周期,则 $W_i=1$,而如果在 t 时刻 W_i 处在一个 OFF 周期,则 $W_i=0$ 。我们假设一个网络是由 M 个独立同分布的信源组成,每个信源产生一个 ON-OFF 过程 $W_i^{(m)}$,则在 t 时刻整个网络的业务流可表示为:

$$W_M(t) = \sum_{m=1}^M W_i^{(m)}, t \geq 0$$

如果许多信源过程被叠加在一起,并且各个信源的 ON 周期的分布满足重尾分布,则叠加生成的业务流过程是(渐进)自相似的。这个假设的结果是同网络实际测量结果相一致的。

ON-OFF 模型的构造较为简单,但是却能够既直观又抽

象地描述网络业务流的生成过程,从结构上为网络中自相似业务流的生成提供了一种解释,这既是结构建模方式所独有的特点,也是目前所有自相似模型中唯一能够从因果机理上解释自相似的模型,并且其参数是同网络业务流生成机制和网络中主要构件的行为密切相关,具有直接的物理意义。整个模型的构造过程都能够从网络业务流生成的物理过程上找到相应的物理依据,这使得根据模型所做出的解释合情合理,具有很强的说服力,因此相对于行为建模它具有不可比拟的优势。但是由于这种建模方式为了使建模过程具有合理的依据,作了很多前提假设,例如其假设 ON-OFF 信源相互之间都是独立的,以及数据发送速率是恒定的,这些都是与实际情况不相符的。另一方面,由于模型的抽象性,使它省略掉许多具体的复杂细节部分,这也使得它不适用于研究分析一些具体网络细节部分,例如仿真网络某一节点处的业务流变化,对模型进行预测分析,分析改进网络协议等方面。上述缺陷限制了 ON-OFF 模型在网络应用方面的研究,为了弥补结构建模方式在这方面的弱点,我们通常可以采用行为建模方式进行这方面的研究。

2.2 FBM 建模

FBM 方法最初是由 Mandelbrot 和 Van Ness 在 1968 年引入,用于生成 Brownian 运动过程^[5]。通常一个零均值的 Gaussian 过程 $(B_H(t))_{t \geq 0}$ 被称为(标准)分形 Brownian 运动过程,假如它具有如下协方差结构:

$$Cov(B_H(t), B_H(s)) = \frac{1}{2} (|t|^{2H} + |s|^{2H} - |t-s|^{2H})$$

参数 H 必须在 0 和 1 之间,并且 $t \geq 0, s \geq 0$ 。

基于 FBM 过程, Norros 给出了第一个自相似网络业务流的行为模型^[6],其形式如下:

$$A_t = mt + \sqrt{\alpha m} Z_t, t \in (-\infty, \infty)$$

其中 Z_t 是一个标准 FBM 过程, A_t 表示到时刻 t 为止的所有业务流量。这个过程具有三个参数 m, α 和 H , 其相应的含义如下: $m > 0$ 表示网络平均输入速率, $\alpha > 0$ 表示方差系数, $H \in (\frac{1}{2}, 1)$ 表示 Z_t 的 Hurst 参数。

FBM 建模方法是一种简约的、易于处理的方法,由于其所具有的高斯属性,使得它能够通过不超过二阶的统计属性描述整个有限维空间上的统计特征,大大减少了数学模型的复杂性。Norros 提出的 FBM 模型只需通过三个参数,即平均输入速率、方差系数和 Hurst 参数,就可以有效地描述局域网内的自相似网络业务流。因此 FBM 模型有利于开展进一步的性能分析,由于模型的简约性使得它适用于需要进行实时仿真和性能分析的研究。然而,这种方法只能适用于高斯情况,并且不能在时间序列建模中同时描述长程相关特性和短程相关特性。而实际的网络业务流中不仅具有长程相关特性而且具有短程相关特性,并且在很多情况下存在着很强的非高斯特性。FBM 过程的边缘分布是一种高斯过程,因此将其用于描述具有很强突发性的自相似网络业务流时,会受到一定的限制。

2.3 FARIMA 建模

ARIMA 模型首先由 Box 和 Jenkins 于 1970 年提出^[7],由于模型本身的灵活性,这类模型可以被应用于许多领域,尤其是时间序列分析。分形 ARIMA (FARIMA) 模型是 ARIMA 模型的自然扩展。一个 FARIMA(p, d, q) 过程可以由一个随机过程 $X = (X_k; k=0, 1, 2, \dots)$ 表示如下:

$$\Phi(B)\Delta^d X_k = \Theta(B)\epsilon_k$$

$\Phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ 和 $\Theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ 都是由一种后移操作 $BX_k = X_{k-1}$ 构成的多项式。在多项式中参数 p 和 q 都是整数值。操作符 Δ 表示差分操作 $\Delta = 1 - B$, 而操作符 Δ^d 表示分形差分操作 $\Delta^d = (1 - B)^d = \sum_{k=0}^{\infty} C(d, k)(-B)^k$, 分形差分意味着参数 d 可以是非整数值,其中 $C(d, k)(-1)^k = \frac{\Gamma(-d+k)}{\Gamma(-d)\Gamma(k+1)}$, Γ 代表 Gamma 函数, $(\epsilon_k; k=0, 1, 2, \dots)$ 过程表示白噪声过程。

FARIMA 建模方法的主要优点在于它本身所具有的灵活性,使得它可以描述一些复杂的应用过程,例如可应用在可变比特速率 (VBR) 视频业务流情况下建模等,同时由于 FARIMA(p, d, q) 过程本身已很完善,一般不需要再另外建立模型,可以直接使用 FARIMA(p, d, q) 过程作为实际应用的数学模型。相对于 FBM 建模方法, FARIMA 建模方法的另一个突出优点是它能够同时描述长程相关性和短程相关性,这也使得 FARIMA 模型能更全面地表示实际网络业务流中存在的自相似特性。然而在实际网络应用中一个很重要的特性是网络业务流中的突发性,这是导致多媒体实时业务流中拥塞现象的主要原因, FARIMA 模型在描述业务流突发性方面是不足的,同时 FARIMA 模型由于本身的多参数和运算的复杂性,使得其在实际应用中,如网络仿真和性能分析中,带来大量运算,因此这种建模方法对于一些有实时要求的研究而言,存在一定的局限性。

2.4 Alpha 稳定建模

Alpha 稳定分布理论最初是由 Paul Levy 和 Aleksander Yakovlevich Khinchine 在 20 世纪二、三十年代发展起来。有关这方面的最新论著是由 Gennady Samorodnitsky 和 Murad S. Taquq 于 1994 年撰写的^[8]。

自相似性暗示用于网络业务流建模的随机过程应该具有无穷方差的特性,这意味着我们通常所使用的中心极限定理在这种情况下是不适用的。然而根据广义中心极限定理,具有无穷方差的无穷多个独立同分布信源正态叠加,如果它的边缘分布收敛,则它一定收敛到一族 alpha 稳定边缘分布。由于大部分稳定分布不具有密度函数和分布函数的闭形式,我们通常用特征函数来表示 alpha 稳定分布。

定义 1^[8] 一个随机变量 X 被称为具有稳定分布,如果存在参数 $0 < \alpha \leq 2, \sigma > 0, -1 \leq \beta \leq 1$ 和 $\mu \in R$, 使得其特征函数具有如下形式:

$$E \exp i\theta X =$$

$$\begin{cases} \exp\{-\sigma|\theta|^\alpha(1-i\beta(\text{sign } \theta)\tan \frac{\pi\alpha}{2})+i\mu\theta\} & \text{if } \alpha \neq 1 \\ \exp\{-\sigma|\theta|(1+i\beta(\text{sign } \theta)\ln|\theta|)+i\mu\theta\} & \text{if } \alpha = 1 \end{cases}$$

$$\text{sign } \theta = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases}$$

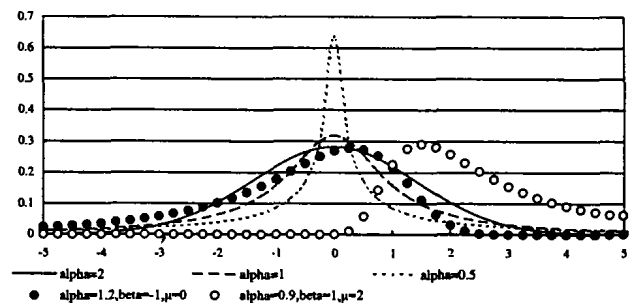


图 2 Alpha 稳定过程概率密度函数变化图

参数 α 被称之为特征指数,它用来表示在分布中突发的程度。整个分布可以是偏斜的,只要偏斜参数 β 不等于零。 β 取正值表示密度函数偏斜向右尾部,取负值表示密度函数偏斜向左尾部,其变化过程如图2所示。 α 和 β 参数可以从整体上决定整个分布函数的形状。 σ 和 μ 参数被称之为尺度和位置参数,分别表示分布的偏差值和均值(或中值)。一个服从 Alpha 稳定分布并具有上述参数的随机变量,可以表示为 $X \sim Sa(\sigma, \beta, \mu)$ 。

Alpha 稳定自相似过程存在多种不同的表现形式,其中一种称之为线性分形稳定(LFSM)过程,它的增量过程称之为线性分行稳定噪声(LFSN)过程。由于 LFSN 过程具有的可离散性,使得这种稳定过程成为最常用的数学建模工具,其定义如下:

定义2 线性分行稳定噪声过程具有如下离散形式,

$$N_{\alpha, H}(i) = (h_d * S_{\alpha, \beta, 0}^{\sigma}(i)) = \sum_{k=1}^{K_m} h_d(k/m) S_{\alpha, \beta, 0}^{\sigma}(i-k/m)$$

$$h_d(x) = \begin{cases} x^d - (x-1)^d, & 1 < x \\ x^d, & 0 < x \leq 1 \end{cases}$$

$$d = H - 1/\alpha$$

其中 $X \sim S_{\alpha, \beta, \mu}^{\sigma}(i)$ 是独立同分布的 Alpha 稳定随机变量, m 是积分离散近似过程中的度量参数, k 是积分的截断点。

基于线性分行稳定噪声过程,葛晓虎和朱光喜等提出了一种 Alpha 稳定网络业务流模型^[9],这种模型能够准确地描述网络业务流中的自相似性和突发性。其形式如下:

$$M(i) = c_1 N_{\alpha, \beta, H}(i) + c_2 = c_1 (h_d * S_{\alpha, \beta, 0}^{\sigma}(i)) + c_2$$

$$= c_1 \{ h_d * [(\frac{1+\beta}{2})^{1/\alpha} S_{\alpha, 1, 0}^{\sigma}(i) - (\frac{1-\beta}{2})^{1/\alpha} \tilde{S}_{\alpha, 1, 0}^{\sigma}(i)] \} + c_2$$

其中 $M(i)$ 表示在 i 时刻网络业务流总和, c_1 和 c_2 表示正的实值常量, $-1 < \beta < 1$, $N_{\alpha, H}(i)$ 表示 1 稳定的线性分形稳定噪声过程的离散时间迹, $S_{\alpha, 1, 0}^{\sigma}$ 和 $\tilde{S}_{\alpha, 1, 0}^{\sigma}$ 是两个具有共同分布的独立同分布随机变量。

通过对实际网络业务流的测量,人们发现突发现象存在于所有时间尺度上,并且上述叠加业务流具有很强的 No-Gaussian 特性,但是无论 ON-OFF 模型,FBM 模型还是 FARIMA 模型都无法直接在 No-Gaussian 条件下描述突发现象。另一方面,通过对实际网络业务流数据的测量分析,葛晓虎和朱光喜等证明实际的以太网络业务流到达过程是一种 Alpha 稳定过程^[10]。在仿真实验中,上述 Alpha 稳定网络业务流模型被证明能够在 Gaussian 和 No-Gaussian 条件下有效地描述突发现象。同时,由于 Alpha 稳定过程是自相似的,其边缘分布是重尾分布,所以 Alpha 稳定模型能够有效地描述网络业务流中的自相似性和重尾特性。然而由于缺乏密度函数的闭形式,Alpha 稳定建模方法在进行性能分析时会遇到一定的困难。

3. 针对不同的研究选择相应的方法

根据上述介绍和分析结果,我们针对不同的研究目的,在选择相应的建模方法时,提出了一套判断机制,这可以归结到表1中。

表1 四种自相似网络业务流建模方法的分析与比较

类型	方法	优点	缺点	适宜的研究目的
构造建模	ON-OFF 模型	模型构造简单,且构造过程具有明确的物理意义,能从构造过程的因果机理上解释自相似现象,各参数具有直接的物理含义。	前提假设条件与实际情况存在脱节,难以对实际复杂情况进行仿真和性能分析。	探索网络自相似现象产生的渊源,研究模型各参数和控制策略对网络设计的影响。
行为建模	FBM 模型	模型易于处理,参数简约,能在高斯条件下描述自相似性。	无法同时描述长程相关性和短程相关性。	适用于局域网内实时建模仿真和性能分析。
	FARIMA 模型	模型极为灵活,能够同时描述长程相关性和短程相关性。	模型过于复杂,仿真运算量太大,对网络业务流中的突发性缺乏表述。	适用于复杂网络建模和非实时性能分析。
	Alpha 稳定模型	模型简约,可在高斯和非高斯条件下描述网络业务流中突发性和重尾分布,可同时描述长程相关性和短程相关性。	缺乏概率密度函数的闭形式,不利于作进一步的性能分析。	研究在高斯和非高斯情况下网络业务流中自相似性、突发性和重尾分布的变化。

总结 网络业务流中的自相似性直接影响着网络的性能,而在自相似的基础上存在着一系列的网络业务流建模方法。通过对上述四种主要方法的分析,我们可以发现每种方法都有其自身的特点,因此根据研究目的的不同选择相应的建模方法是极为重要的。本文通过对各种方法进行分析比较,提出了一套选择建模方法的机制,这为网络中自相似业务流研究的发展提供了一个研究框架,有助于推动这方面的研究和探索。

参考文献

- Ishizaki F, Lin G, Suda T. On-Line Sensitivity Analysis of Feedback Controlled Queueing Systems with Respect to Buffer Capacity. IEEE Conference on Decisions and Control (CDC'99), 1999
- Leland W, Taqqu M, Willinger W, Wilson D. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version). IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, 2(1)

- Mandelbrot B B. Long-run Linearity, Locally Gaussian Processes, H-spectra and Infinite Variances. Intern. Econom. Rev., 1969, 10: 82~113
- Willinger W, Taqqu M, Sherman R, Wilson D. Self-similarity through high variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level. In: Proc. ACM SIGCOMM '95, 1995. 100~113
- Mandelbrot B, Ness J V. Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications. SIAM Rev., 1968, 10: 422~437
- Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks. J. Sel. Areas in Commun., 1995, 13 (6): 953~962
- Box G E P, Jenkins G M. Time series analysis: forecasting and control. Holden Day, San Francisco, 1970
- Samorodnitsky G, Taqqu M S. Stable Non-Gaussian Random Processes. Chapman & Hall, 1994
- Ge Xiaohu, Zhu Guangxiu, Zhu Yaoting. An Improved Modeling for Network Traffic Based on Alpha-Stable Self-similar Processes. The Chinese Journal of Electronics, Oct. 2003
- Ge Xiaohu, Zhu Guangxiu, Zhu Yaoting. On the Testing for Alpha-stable Distributions of Ethernet Network Traffic. the Journal of Electronics (Chinese), July, 2003