

自相似网络通信量模型研究综述

邵立松 窦文华

(国防科学技术大学计算机学院并行与分布处理实验室 长沙 410073)

摘要: 越来越多的研究表明网络通信量不是 Markov 过程,而是在任意时间尺度上都具有突发特性,即自相似特性。描述网络通信量的数学模型主要有自相似和长相关结构。网络的某些参数服从重尾分布,从而导致网络通信量时间尺度上的突发特性。该文分析了传统网络通信量模型和性能分析的弊端,描述了新型网络通信量模型应该具有的基本特征。本文重点研究了网络自相似通信量相关的 ON/OFF 模型、用户访问概率模型和网络流量闭环模型,讨论了相关的研究方向,并总结了在研究网络通信量模型的过程中应该注意的原则和问题。

关键字: 网络通信量 自相似 重尾

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)10-1671-06

Survey on Self-similar Network Traffic Model

Shao Li-song Dou Wen-hua

(National Laboratory for Parallel & Distributed Processing, School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract More and more researches show that network traffic is not Markovian process, but shows the burst nature called "self-similarity" at any time scale. The mathematic models describing network traffic mainly include self-similar process and long range dependence structure. Due to some network parameters obeying heavy tail distribution, network traffic shows the burst nature at large time scale. This paper analyses the drawbacks of the classical network traffic models and performance evaluation, and describes the basic trademarks of evolutionary traffic models. This paper studies three important models of self-similar network traffic: ON/OFF model, user access probability model and fluid flow close loop model, and discusses relative research directions. Some issues and principles that shall be noticed during studying and modeling network traffic are given in the end.

Key words Network traffic, Self-similarity, Heavy tail

1 引言

排队分析对于网络设计和系统分析人员进行容量规划和性能预测很有用处。然而在许多实际场合,人们发现排队分析所得到的预测结论与实际观察到的性能差异很大。排队分析的有效性依赖于数据通信量的Markov过程,但是越来越多的研究表明网络通信量不是Markov过程,而是在任意时间尺度上都具有突发特性,即自相似特性。Markov过程对实际情况失效是因为:首先它对某些性能变量做了严格限制,例如排队系统中的等待时间,这些限制也构成了排队分析的基础^[1];其次,Markov信源产生的通信量只具有简单相关结构;尤其是,在经过适当的放缩时间尺度后,Markov过程在大时间尺度上的相关信息将被丢失。

在网络通信量建模和性能分析领域内, Leland, Taqqu,

Willinger和Wilson首次提出自相似过程概念。在他们具有开创性工作基础之上,围绕网络通信量的多重属性形成了许多研究热点^[2]。90年代初期,文献[3]证明了局域以太网通信量的自相似性,文献[4]证明了每个WWW的WAN IP通信量的自相似突发性,文献[5]发现WWW通信量具有自相似性。这些研究工作强有力地证明了自相似特性不是一个孤立的假象,而普遍存在于整个网络环境当中。文献[5-7]认为是通信量信源的应用层导致了网络通信量的自相似特性,具有重尾分布的某些网络参数决定了通信量的自相似特性,并证明了长度呈重尾分布的Web文件在IP层产生的汇聚通信量具有自相似特性,而且还证明了如果on周期的长度是重尾分布,那么无穷个ON/OFF信源组成的网络模型产生的汇聚通信量具有自相似特性;文献[8-13]则认为是传输层协议是形成自相似特性的一个原因,并且认为TCP协议的超时重传

和指数后退机制对自相似特性起主要作用。随着研究的进一步深入,文献[14]发现 TCP 协议只能影响小时间尺度上的通信量,对大时间尺度通信量没有影响,因而认为 TCP 产生的通信量是伪自相似特性的。文献[4, 15, 16]认为网络通信量的自相似特性会导致网络的许多性能指标恶化,缓冲区溢出概率增高,排队延迟增大和拥塞周期增长,而且这些性能指标的恶化程度与度量自相似程度的 Hurst 参数成正比。基于 TCP 是网络通信量自相似特性的原因,文献[17, 18]提出改进主动队列管理算法来削弱通信量的自相似程度,从而提高网络的稳定性和网络性能指标。另外针对重尾分布是网络通信量自相似特性的原因以及重尾分布的预测结论,文献[19, 20]提出网络流量预测方案,从而提前做出响应来提高网络性能指标。

全文结构如下:第2节介绍描述网络通信量的数学模型,主要包括自相似和长相关结构,另外还介绍了重尾概念和预测结论;第3节分析了传统通信量模型和性能分析的弊端,并提出了实际网络需要考虑的问题;第4节分析了网络通信量的3个重要模型:ON/OFF模型试图解释自相似网络通信量的物理原因;网络用户访问概率模型重点从应用层用户角度出发揭示了网络参数的重尾现象及其本质,并针对重尾预测结论提出改进路由器的队列和路由方案;网络流量的闭环模型强调了网络和分布式终端用户之间的相互作用:用户通信量的动态性影响网络状态,网络状态也通过反馈机制影响用户通信量。第5节总结了在研究网络通信量的过程中成功和失败的经验。

2 描述网络通信量的数学模型

2.1 自相似和长相关过程

定义1 $Y(t)$ 是一个自相似累计过程, Hurst 参数 $H(0 < H < 1)$, 对于所有的 $\alpha > 0$ 且 $t \geq 0$ 有

$$Y(t) =_d \alpha^{-H} Y(\alpha t) \quad (1)$$

定义2 平稳过程 $X(t)$ 是准确二阶自相似增量过程, Hurst 参数为 $H(1/2 < H < 1)$, 如果

$$\gamma(k) = \frac{\sigma^2}{2} \left((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right) \quad (2)$$

对于所有的 $k \geq 1$ 。 $X(t)$ 是渐近二阶自相似, 如果

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \gamma^{(m)}(k) = \frac{\sigma^2}{2} \left((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H} \right) \quad (3)$$

定义3 平稳过程 $X(t)$ 是长相关(LRD), 定义自相关函数 $r(k) = \gamma(k) / \sigma^2$ 对于 $0 < H < 1, H \neq 1$, 有 $r(k) \sim H(2H-1)k^{2H-2}, k \rightarrow \infty$, 如果满足

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} r(k) = \infty \quad (4)$$

下面讨论 H 的取值和它对 $r(k)$ 的影响: 如果 $H=1/2$ 那么 $r(k)=0$, $X(t)$ 是短相关(SRD); $H=1$ 无意义, 因为它导致对于所有的 $k \geq 1$ 都有 $r(k)=1$; H 的值大于 1 不允许, 因为 $X(t)$ 的平稳条件限制。现在我们讨论自相似过程和长相关结构的关系^[21]: 长相关结构不一定是自相似过程, 自相似过程也不一定具有长相关结构。举例说明, 布朗运动是白噪声增量的过程, 布朗运动是 $H=1/2$ 的自相似过程, 但是白噪声短相关的。相反地, 某些分形 ARIMA 时间序列产生的长相关结构但并不是分布意义上的自相似。但是在渐近二阶自相似情况下, 由于定义中限定 $1/2 < H < 1$, 自相似过程就意味着具有长相关结构, 反之亦然。

2.2 重尾分布和预测

定义4 随机变量 Z 服从重尾分布, 如果

$$\Pr\{Z > x\} \sim cx^{-\alpha}, x \rightarrow \infty, 0 < \alpha < 2, c > 0 \quad (5)$$

在网络环境中我们只讨论 Z 具有有穷均值和无穷方差的情况, 即 $1 < \alpha < 2$ 。服从重尾分布的随机变量的主要特征是具有剧烈的突变性。重尾分布能产生不可忽略的大值, 也就是对重尾分布的随机变量进行采样时, 大量的采样值都很小, 但少量的采样值却非常大。 α 越接近 1, 重尾作用越来越明显。

下面是对重尾分布的网络通信量变量进行预测分析^[21]。

假设随机变量 Z 是具有重尾分布的网络连接持续时间。假设我们观测到连接在 $\tau > 0$ 时间内一直都活跃。假设时间是离散的 ($t \in Z_+$), 并且 $A: Z_+ \rightarrow \{0, 1\}$ 表示当且仅当 $Z \geq t$, 有 $A(t)=1$ 。连接将持续到将来某个 τ 秒的条件概率计算如下。对于重尾分布, 相应的推导有

$$L(\tau) = \Pr\{A(\tau+1)=1 | A(t)=1, 1 \leq t \leq \tau\} \quad (6)$$

$$L(\tau) = 1 - \frac{\Pr\{Z = \tau\}}{\Pr\{Z \geq \tau\}} \quad (7)$$

$$\frac{\Pr\{Z = \tau\}}{\Pr\{Z \geq \tau\}} \sim \frac{c\tau^{-\alpha} - c(\tau+1)^{-\alpha}}{c\tau^{-\alpha}} = 1 - \left(\frac{\tau}{\tau+1} \right) \quad (8)$$

当 $\tau \rightarrow \infty$, $L(\tau)$ 就趋于 1, 这说明如果观察到的某个连接活动时间越长, 该连接的生命周期就越长。因此, 可以利用重尾分布的预测结论, 采取相应的策略提高网络性能指标。

2.3 其它描述通信量的数学模型

除了自相似和长相关结构还有很多网络通信量数学描述模型: 时域(协方差、方差)描述模型、频域(谱密度)描述模型、小波域(能量函数)描述模型。其中, 采用小波分析工具对小时间尺度上网络通信量进行研究取得了较理想的进展。另外还有更复杂的描述模型: 用 SRD 结构近似 LRD 结构、分数 ARIMA(p,d,q)模型、多重分形过程和层叠模型等等。

3 突破传统通信量和性能分析模型

传统通信量模型认为分组到达是随机的并彼此独立的。它最重要的一个假设是分组到达概率服从泊松分布，或者到达间隔时间服从负指数分布。传统通信量模型是一个开环通信量模型，对网络的其他组成部分不需要了解，而被描述成固定的随机过程——泊松过程，因此在所有时间尺度上的动态性都必须由外部给出。传统性能分析是建立在泊松分布通信量模型基础上，采用模型来驱动排队系统；在研究排队行为时，把网络性能看作排队行为函数和模型参数，并通过和仿真实验比较分析结论来验证正确性，参见图 1。

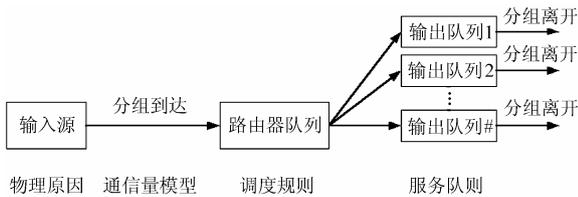


图 1 典型的排队系统模型

Internet 通信量动态性分为两个部分：大时间尺度和小时间尺度的动态性。所谓的大时间尺度是指远远超过 RTT 时间尺度，大时间尺度的动态性主要是由通信量重尾传输导致的，改变网络底层配置和状态对大时间尺度的动态性没有影响；所谓的小时间尺度是指在 RTT 附近或者小于 RTT 的时间尺度，根本原因目前还处于研究阶段；文献[8-13]主要是采用纳秒仿真，进行等长度分组 TCP 传输，通过观察链路节点队列长度得出网络通信量的自相似特性与 TCP 协议有关，文献[22-24]研究了 TCP 超时和指数后退机制引起的 TCP 通信量在有限的时间尺度上(从毫秒级到秒级)呈现伪自相似现象，并指出 TCP 流的自相似程度与丢弃概率成正比，超时和指数后退的概率越大，Hurst 参数越大；但是 Willinger 认为 TCP 协议本身对网络通信量的自相似特性没有影响，它既不能产生也不能消除通信量的自相似性，Feldmann 研究了小时间尺度结构和网络对 TCP 反馈控制机制的相互作用，小时间尺度的自相似特性可能与反馈控制机制有本质的联系，但是根本原因还不清楚。

对网络测量的研究工作表明，在一条链路上观察到的通信量反映了网络的动态性是内部因素导致的，网络通信量在所有时间尺度上都呈现明显的突发特性，从而应该把网络通信量当作闭环通信量来研究网络的性能：通信量的动态性影响着网络状态(图 2)；网络状态反过来也影响着通信量。互联网上的通信量一般分为两大类：弹性和非弹性通信量。而运用最广的是弹性通信量，典型的弹性通信量包括 TCP 通信量，ATM 上的 ABR 通信量等等。因此研究网络通信量需要广泛了解网络到底需要什么，以及网络的哪些方面导致了通信量哪些特征；另外对现代通信网络的设计和控制还需要用到相关知识领域，例如非线性规划、网络规划以及随机建模

等知识领域。



图 2 通讯量动态性

4 新型通信量模型

下面重点讨论 3 种新型网络通信量的模型。虽然它们不是针对同一个问题提出来的，但是它们都是基于网络通信量的突发特性，从不同角度对网络的真实面貌进行描述的。ON/OFF 通信量模型是对网络通信量的突发特性的本质原因进行分析，用数学方法描述了网络中各种流量的突发程度，并严格证明了具有重尾分布参数的网络通信量在汇聚过程中将产生自相似特性。网络用户访问概率模型解释了 Web 文件大小为什么呈重尾分布，该模型认为 Web 文件重尾结构不是人们故意造成的，而是人类对信息组织结构优化的结果，并根据这一结论提出相应的设计和控制策略。网络流量的闭环模型是针对网络的闭环结构提出了用户和网络资源的最优化问题。该模型认为用户的通信量汇聚过程会影响网络资源的利用状态，网络资源又通过隐代价(标注或丢弃)对用户的通信量进行反馈控制。

4.1 ON/OFF 通信量模型

Leland^[3]中最早提到 ON/OFF 模型。ON/OFF 模型是以 Mandelbrot^[25]介绍的 renewal-reward 过程为基础，并成为网络通信量建模研究的理论支柱。这些理论基础和重尾 ON/OFF 持续时间的经验证据，更深入、更直接地解释了自相似产生的本质原因，并成为区分 ON/OFF 模型和其他自相似数学模型的主要特征。Willinger 认为大量独立的 ON/OFF 信源(服从重尾分布)在流量汇聚过程中导致了汇聚通信量的自相似性^[24]。

我们首先介绍一下相关概念。对于一个平稳过程的通信量随机序列 $X(t)(t=1,2,\dots,i)$ ，在时间 $n > 0$ 之前的累积通信量为 $S(n) = X(1) + X(2) + \dots + X(n)$ ；在时间 n 之前的最大通信量可以表达成 $M(n) = \max(X(1), X(2), \dots, X(n))$ 。如果当 n 趋于无穷时， $M(n)/S(n)$ 趋于 1，则认为通信量分布函数是剧烈的，即通信量存在不可忽略的大值，且该大值和累积通信量是同阶的；如果当 n 趋于无穷时， $M(n)/S(n)$ 趋于 0，则认为通信量分布函数是温和的，即通信量中的每一个值相对于累积通信量来说都很小。根据累积通信量随机过程的分布函数和相应增量随机过程的相关结构，Mandelbrot 按照突发程度将网络通信量分成 4 类(参考图 3)：

(1) 如果 TCP 或 UDP 传输的持续时间和发送的速率都是温和的，相应的汇聚通信量就是 smooth 的，相当于信号

分析的角度上的许多短而稀疏的白噪声信号。

(2) 如果 TCP 传输的持续时间是剧烈的, 发送速率是温和的, 相应的汇聚通信量是 *bursty* 的, 相当于信号分析的角度上的许多长而稀疏的彩色噪声信号。

(3) 如果 UDP 传输的持续时间是剧烈的, 发送速率是温和的, 相应的汇聚通信量是 *Bursty* 的, 相当于信号分析的角度上的许多短而密集的稳定噪声信号。

(4) 如果 TCP 或 UDP 传输的持续时间和发送速率都是剧烈的, 相应的汇聚通信量是 *BURSTY* 的, 相当于信号分析的角度上的彩色稳定噪声, 它包括短而密集、短而稀疏、长而密集和长而稀疏的所有情况, 这种有限过程的属性还处于研究阶段。

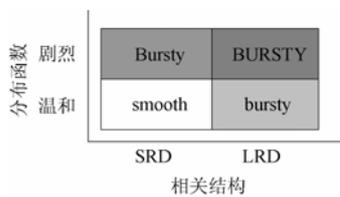


图3 流量的突发性

ON/OFF模型考虑了 N 个独立通信量源 $X_i(t), i \in [1, N]$, 每个信源都具有独立同分布的 on 周期和 off 周期, 即 $X_i(t)$ 在 1(on) 和 0(off) 之间来回取值, 而且 on 和 off 周期时间不发生重叠。 $X_i(t)=1$ 表示有分组发送, 因此 on 周期认为是有连续的分组发送。 $S_N(t) = \sum_{i=1}^N X_i(t)$ 表示在 t 时刻的积累通信量。考虑 T 时刻的汇聚通信量过程 $Y_N(T)$,

$$Y_N(T) = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^N X_i(s) \right) ds \quad (9)$$

定义 τ_{on} 和 τ_{off} 分别为描述 on 和 off 周期持续时间的随机变量。 τ_{on} 具有重尾分布, 即

$$\Pr\{\tau_{on} > x\} \sim cx^{-\alpha}, x \rightarrow \infty \quad (10)$$

这里 $1 < \alpha < 2, c > 0$ 是常数。文献[26]证明了汇聚通信量 $Y_N(T)$ 具有下面定义的分布朗运动(FBM)过程。

定理 1 (ON/OFF模型和FBM) 汇聚通信量 $Y_N(T)$ 的统计规律如下

$$\frac{E(\tau_{on})}{E(\tau_{on}) + E(\tau_{off})} NT + CN^{1/2} T^H B_H(t) \quad (11)$$

对于大数 T 和 $N, H=(3-a)/2, B_H(t)$ 是参数 H 的 FBM 过程, $C > 0$ 是仅依赖 τ_{on} 和 τ_{off} 的分布。

在网络通信量分析领域, 相关的前沿数学工作主要包括:

(1) 利用数学工具对网络通信量进行分析, 基于小波分析的工具分析小时间尺度上通信量动态性;

(2) 新型排队论分析, 分析长相关结构通信量的排队模型和重尾排队过程。

4.2 网络用户访问概率模型

在组织信息结构的时候, 人们都会潜意识地使某些相关参数服从重尾分布。例如访问 Web 站点, 最开始人们总是同时访问一些网站, 并很快地选择具有自己感兴趣的内容: 很可能立即关闭那些没有自己感兴趣内容的网站; 但是会保留某些含有自己比较感兴趣内容的网站。随着人们对某一类内容的感兴趣程度越来越强以至于关注的内容也越来越专业, 于是人们希望能在该网站上得到所有相关内容, 即使有关内容的文件(例如多媒体文件)很大。

此在设计 Web 站点的文件组织结构时, 必须考虑到用户访问概率模型, 防止带宽浪费和操作不便: 如果 Web 站点的文件都比较小, 随着访问兴趣不断增强, 用户需要完成的链接操作将不断增多, 造成用户操作不便, 同时也使得用户的访问兴趣下降; 另一方面, 如果 Web 站点的文件都比较大, 那么在用户访问概率比较大的选择和筛选阶段, 用户就会接收到相当多自己不感兴趣的内容, 这样就会占用很多带宽, 造成网络和服务器带宽的严重浪费。重尾分布的文件布局与用户访问概率模型一致, 具有以下优势: 限制用户点击数, 即限制了文件深度且方便了用户操作; 用户访问的平均文件长度最小, 合理利用网络和服务器带宽。图 4 给出了直观的图形解释。这样一来就形成了许许多多的小流量连接, 我们称为老鼠数据; 偶尔也会出现大流量连接, 我们称为大象数据, 但一旦出现大流量的连接, 该流量的值就相当大。重尾分布的预测结论是: 如果某个事件的活动时间越长, 该事件的生命周期就越长。

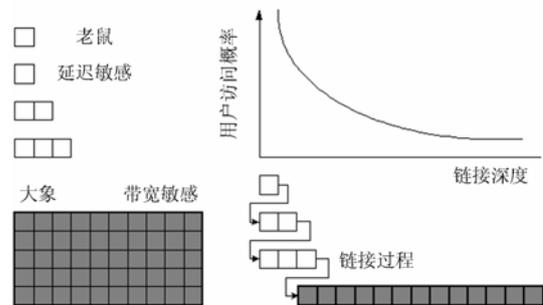


图4 用户访问概率和老鼠/大象模型

当前值得研究的问题:

(1) 基于用户访问概率和重尾分布的预测结论, 网络和 Web 站点可以利用到达的老鼠数据来预测大象数据何时到达, 这样一来网络和站点可以提前采取相应的策略;

(2) 老鼠分组和大象分组对传输性能要求的侧重点不同: 老鼠数据对端到端的延迟很敏感, 大象数据对网络的带宽提出了效率和公平性的要求。因此老鼠分组和大象分组对路由器队列的影响也不相同, 路由器队列可以区别对待这两种分组: 对于老鼠分组可以采用高发送优先级来尽量缩短排队延迟; 对于大象分组可以采用公平队列(参考图 5)。

(3) 除了在路由器的队列管理方面区别对待老鼠和大象

数据，在路由策略上也可以区别对待这两类数据：对老鼠数据的转发可以采用低拥塞和短延迟优先的路由策略，动态性比较高；对大象数据的转发则需要选择一条长期稳定的路由策略。

(4) 难点在于路由器怎样区分自私终端的这两类分组。除此之外，路由器还需要解决流信息保存问题。

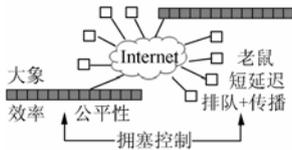


图 5 老鼠大象模型与路由器

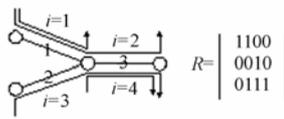


图 6 路由矩阵

4.3 网络流量的闭环模型

虽然网络通信量的小时间尺度突发特性的根本原因还不清楚，但很可能与网络反馈控制机制有本质的联系。当前网络的性能研究重点在于网络闭环通信量：汇聚通信量的动态性影响着网络状态；网络资源通过丢弃或标注等反馈控制方法也对分布式用户通信量有影响。Kelly提出了网络流量闭环的基本模型^[27]：网络中存在固定S个用户(源/目的对)共享L个资源(链路、路由器队列)。假定当路由达到稳定时，路由矩阵R是固定(参考图 6)：当用户i经过资源l时， $R_{li}=1$ ，否则 $R_{li}=0$ 。用户i发送分组的速率为 x_i ；资源l的总速率为 y_l ；链路l的容量 c_l 。每一条链路都有一个拥塞度量或者代价 p_l ，实际意义可以理解为分组丢弃或标注概率。假定用户i可以获得它经过所有资源的总代价 q_i ，用户根据这个总代价信息来调整自己的发送速率 x_i 。这里简单地将总代价理解为经过的资源代价之和，文献[28]给出符合实际情况的用户总代价计算关系式。因此可以得到下面的关系：

$$\begin{aligned}
 q_i(t) &= \sum_l R_{li} p_l(t - \tau_{i,l}^b) \\
 y_l(t) &= \sum_i R_{li} x_i(t - \tau_{i,l}^f)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

第 1 个关系式体现了汇聚通信量对网络资源的占用情况；第 2 个关系式体现了网络资源对用户的通信量的反馈控制作用。

在网络流量闭环模型的基础(参考图 7)上，Kelly提出了网络非线性规划问题。每个用户都有一个经济学上的效用函数 $U_i(x_i)$ ，这是一个处处可导、递增的严格凹函数。因此整个系统希望在不超其容量上限 c_l 的前提下，选择一组最优的用户发送速率 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 使得所有用户的效用函数之和取得最大值。

SYSTEM(U, R, C)

$$\text{Maximize } \sum_{i \in R} U_i(x_i)$$

$$\text{s.t. } RX \leq C, X \geq 0$$

网络闭环模型存在以下研究问题：

(1) 网络闭环模型的建模问题，既要符合实际网络的主

要特征，又要在数学上较容易处理。现代通信网络的设计和 研究在采用最优化理论、网络规划和随机建模等研究方法 时，呈现出许多值得研究的课题；

(2) 分布式通信量控制器的设计，例如现在终端用户最流行的 TCP 传输层协议，特别是 TCP 友好协议的设计。

(3) 各种通信量控制算法对网络的稳定性和公平性的影响。传统上认为稳定性只是工程问题，而公平性只是经济学问题；但是随着研究的不断深入，对网络的稳定性和公平性的研究不断涉及到许多交叉学科领域。

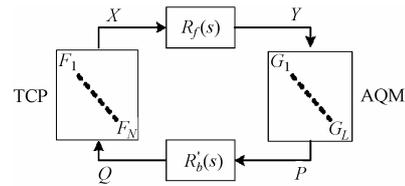


图 7 网络流量的闭环模型

5 结束语

虽然自相似网络通信量提出了已经有十年的时间，但是围绕网络通信量还有很多可以值得研究的地方。在网络通信量突发特性的研究过程中，出现过许许多多的观点，有些看似正确观点并不一定是正确的。因此在研究过程中，需要注意以下问题：

(1) 不能忽略网络的真实情况，而仅仅是采用仿真实验来验证自己的观点和模型；

(2) 要注重网络闭环特性，自己的观点和模型一定要通过“闭环”测试；

(3) 要了解相关知识领域，采用严格的数学理论来指导建模工作；

(4) 要注重网络的测量工作，测量所表现出来的网络特性在模型中一定要体现出来。

参 考 文 献

[1] Kleinrock. L. Queueing Systems. Volume 1: Theory. New York: Wiley-Interscience, 1975.

[2] Abry P, Veitch D. Wavelet analysis of long-range dependent traffic. *IEEE Trans on. Information Theory*, 1998, 44(1): 2 – 15.

[3] Leland W, Taquq M, Willinger W, Wilson D. On the selfsimilar nature of Ethernet traffic. In Proc. ACM SIGCOMM' 93, 1993: 183 – 193.

[4] Paxson V, Floyd S. Wide-area traffic: the failure of Poisson modeling. In Proc. ACMSIGCOMM'94, 1994: 257 – 268.

[5] Crovella M, Bestavros A. Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes. In Proceedings of the 1996 ACM SIGETRICS International Conference on Measurement and

- Modeling of Computer Systems, May 1996.
- [6] Kumar A. Comparative performance analysis of versions of TCP in a local network with a lossy link. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 1998, 6(4): 485 – 498.
- [7] Feldmann A, Gilber A C, Huang P, Willinger W. Dynamics of IP traffic: A study of the role of variability and the impact of control. Proceeding of ACM SIGCOMM, Boston, MA, August 1999.
- [8] Figueiredo D, R, Liu B, Misra V, Towsley D. On the autocorrelation structure of TCP traffic. Technical Report TR 00-55, University of Massachusetts, Computer Science Department, Amherst, MA, 2000.
- [9] Guo L, Crovella M, Matta I. How does TCP generate pseudoself-similarity? Proceedings of MASCOTS, Cincinnati, OH, August 2001.
- [10] Park K, Kim G, Crovella M. On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similarity network traffic. Proceeding of ICNP, Columbus, OH, October 1996: 171 – 180.
- [11] Sikdar B, Vastola K S. The effect of TCP on the self-similarity of network traffic. Proceedings of the 35th Conference on Information Sciences and Systems, Baltimore, MD, March 2001.
- [12] Veres A, Kenesi Z, Molnar S, Vattay G. On the propagation of long-range dependence in the Internet. Proceedings of ACM SIGCOMM, Stockholm, Sweden, September 2000: 243 – 254.
- [13] Veres A, Boda M. The chaotic nature of TCP congestion control. Proceedings of IEEE INFOCOM, Tel-Aviv, Israel 2000: 1715 – 1723.
- [14] Guo L, Crovella M, Matta I. How does TCP generate pseudon Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, Cincinnati, OH, August 2001.
- [15] Erramilli A, Narayan O, Neidhardt A, Sainee I. Performance impacts of multi-scaling in wide area TCP/IP traffic. Proceedings of IEEE INFOCOM, Tel Aviv, Israel March 2000: 352 – 259.
- [16] Erramilli A, Narayan O, Willinger W. Data networks as cascades: Investigation the multifractal nature of Internet WAN traffic. *Computer Communications Review*, 1998, 28(4): 42 – 58.
- [17] Sikdar B, Chandrayana K, Vastola K S, Kalyanaraman S. Queue Management Algorithms and Network Traffic Self Similarity. <http://www.ecse.rpi.edu/Homepages/shivkuma/research/papers/sikdar-selfsim-hpsr.pdf>. 2001.
- [18] Sikdar B, Vastola K S, Kalyanaraman S. On reducing the degree of self-similarity in network traffic. <http://citeseer.ist.psu.edu>. 2002.
- [19] Sharma M, Byers J, W. How well does file size predict wide-area transfer time. <http://cs-people.bu.edu/manishrs/paper.pdf>. 2001.
- [20] Orugant S S, Devetsikiotis M, Keith J, Townsend S. Exploiting traffic Prediction and Adaptive Control to Implement Robust Active queue management schemes. http://lion.cs.uiuc.edu/paqm_journal_new3.pdf. 2002.
- [21] Park K, Willinger W. Self-similarity Network Traffic and Performance Evaluation. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000.
- [22] Sikdar B, Vastola K S. The effect of TCP on the self-similarity of network traffic. Proceedings of the 35th Conference on Information Sciences and Systems, Baltimore, MD, March 2001.
- [23] Figueiredo D R, Liu B, Misra V, Towsley D. On the autocorrelation structure of TCP traffic. Technical Report TR 00-55, University of Massachusetts, Computer Science Department, Amherst, MA, 2000.
- [24] 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.
- [25] Mandelbrot B B. Long-run linearity, locally Gaussian processes, h-spectra and infinite variance. *Int. Econom. Rev.*, 1969, 10(1): 82 – 113.
- [26] Taqqu M, Willinger M, Sherman R. Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling. *Comput. Comm. Rev.*, 1977, 26(1): 5 – 23.
- [27] Kelly F P, Maullo A, Tan D. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of Operations Research Society*, 1998, 49(3): 237 – 252.
- 邵立松: 男, 1977年生, 博士生, 研究领域为计算机网络体系结构。
- 窦文华: 男, 1946年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机体系结构、计算机网络安全体系结构。