

因特网业务量多重分形性本质成因的研究*

张骏温¹, 陈海文², 陈常嘉¹

¹(北方交通大学 电子信息工程学院,北京 100044);

²(北京大学 计算机科学技术系,北京 100871)

E-mail: jw66_zhang@sina.com.cn

http://www.njtu.edu.cn

摘要:近年来,关于因特网业务量多重分形性的研究已成为网络通信研究领域的一个热点.目前,在关于这一多重分形性的成因方面已经有了一些研究成果,大部分都认为这是由现代网络分层的体系结构造成的.然而这些结论对现代因特网的负载极重这一事实及其对网络业务量性质的影响没有给予充分的重视.通过对已有成果的研究,结果表明,在网络处于重负载的条件下,业务量多重分形性是由于 TCP(transmission control protocol)独特的发送行为和多个 TCP 连接的汇聚造成的.为了支持这一结论,利用小波分析、模型模拟分析、实际数据计算等手段,从多个方面进行了论证.由于该发现是由现代因特网的实际情况得出的,因而比某些现有的结论更加接近实际,并且对因特网的网络设计和性能估计等方面具有重要的理论指导意义和实际使用价值.

关键词: 多重分形;TCP(transmission control protocol);因特网

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近年来,随着研究的不断深入,研究人员逐渐发现,因特网业务量的长相关性仅表现在较大的时间尺度上,而在较小的时间尺度上却表现出多重分形性^[1~6].这个发现揭示出因特网业务量具有二重性:大尺度上的长相关性和小尺度上的多重分形性.后者与前者相比是一种完全不同的特性,对这个问题的深入研究,有助于更精确地认识因特网业务量本质,因而对于网络设计、性能估计和网络协议的制定等都具有十分重要的意义.

对于产生这种多重分形性的根源问题,目前已有研究人员在进行探讨^[1],而且认为其根源主要来自网络协议体系结构的多分层性.然而本文的研究表明,情况并非如此.通过对已有研究成果的分析、借鉴,对网上获取的大量高时辨析度的分组级业务量踪迹以及利用 NS 模拟器生成的大量分组级业务量踪迹所进行的多重分形性分析,作者发现:(1) 当网络处于重负载状态时,网络服务机制对网络业务量的影响起着决定性的作用;(2) 业务量的局部特性与多重分形行为相符;(3) 小时间尺度上的多重分形性通常是由因特网的服务机制造成的,具体讲是由 TCP 协议的流控、拥塞控制机制以及网络自身的动态行为造成的,而这三者起作用的基本条件则是网络的重负载.

本文首先介绍多重分形的几个重要概念和小波刻画方法,在此基础上,着重对会聚产生多重分形进行研究,最后是本文的结论.

1 多重分形和几个与之相关的概念

重负载是指参加汇聚的 TCP 连接的数量 N 很大,每个连接的发送端都有大量的数据要传送.网络资源 W 是指瓶颈链路的带宽与该处缓冲器容量的结合(注意,不是二者的简单相加).

* 收稿日期: 2000-07-25; 修改日期: 2000-09-18

作者简介: 张骏温(1966 -),男,内蒙古包头人,博士,讲师,主要研究领域为宽带通信网,因特网技术;陈海文(1968 -),男,陕西宁强人,博士,讲师,主要研究领域为数据库理论,管理信息系统;陈常嘉(1949 -),男,江苏常州人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为宽带通信网,多媒体技术.

为了定量分析因特网业务量在特定时刻 t_0 的局部变化规律,本文引入一个概念——业务量速率过程,它是从时间点 t_0 起,在长为 δt_0 的小区间 $[t_0, t_0 + \delta t]$ 内计数到的分组数或字节数,记为 $v(t_0)$ 。

定义 1. 称 $\alpha(t_0)$ 为业务量的局部分尺 (scaling) 指数,如果业务量的速率过程 $v(t_0)$ 在时刻 t_0 有如下特性: $v(t_0) \sim (\delta t)^{\alpha(t_0)}$, $\delta t \rightarrow 0$ 。

当 $\alpha(t_0) > 1$ 时,表明业务量在 t_0 时刻强度水平较低,或者说是局部变化小,而当 $\alpha(t_0) < 1$ 时,表明此时业务量的突发水平很高。

定义 2. 对于一个业务量踪迹 X ,如果对所有时刻 t_0 都有 $\alpha(t_0) = H$ 成立,则称该踪迹为单重分形的,如果 $\alpha(t_0)$ 随 t_0 的改变而变化,则称该踪迹为多重分形的。

2 基于离散小波变换的多重分形的刻画方法

由于篇幅所限,本文假设读者熟悉离散小波变换 (discrete wavelet transform, 简称 DWT), 设业务量的踪迹为 X , 如果它在时刻 t_0 具有局部分尺指数 $\alpha(t_0)$, 则当 j 取绝对值很大的负值时 (即小尺度), 受 $X(t_0)$ 影响的小波系数 $d_{j,k}$ 就会表现出以下特性^[7]: $d_{j,k(t_0,j)} \approx 2^{j(\alpha(t_0)+\frac{1}{2})}$. 其中,“ \approx ”的意义为: 设 f 和 g 是两个函数, 则 $f \approx g$ 表示 $\lim_{j \rightarrow \infty} f(j)/g(j) = \text{常数}$ 。

定义 $\tilde{d}_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} d_{j,k}$ 和 $S(q, j) = \sum_k |\tilde{d}_{j,k}|^q$, 其中 $S(q, j)$ 被称为部分函数. 首先假设整个踪迹只有一个分尺指数 α , 即此踪迹是单分形的, 则当 $j \rightarrow \infty$ 时, 所有的小波系数都有以下形式: $d_{j,k} \approx 2^{j(\alpha+\frac{1}{2})}$. 此时有 $S(q, j) \approx 2^{-j(1-\alpha q)}$ 。

为了研究时间尺度或解析度变得越来越精细 (即 $j \rightarrow -\infty$) 时, $S(q, j)$ 的分尺行为的变化规律, 我们下面再来考虑基于小波的结构函数 $\tau(q)$ 。

定义 3. 当 $j \rightarrow -\infty$ 时, 函数 $S(q, j)$ 的分尺指数被称为业务量踪迹 X 的基于小波的结构函数, 记为 $\tau(q)$, 即

$$\tau(q) = \lim_{j \rightarrow -\infty} \frac{\log S(q, j)}{j \log 2}.$$

其实这就是要考察当时间尺度变得越来越精细时, 部分函数 $S(q, j)$ 的行为是否越来越靠近 $2^{j\tau(q)}$. 为了能更清楚地说明问题, 我们从两个例子出发来展开分析。

例 1: 对于整个踪迹只有一个分尺指数 α 的情况, 可以很容易地看出 $\tau(q) = \alpha q - 1$, 即单分形踪迹的结构函数是 q 的线性函数. 具体到精确自相似的业务量踪迹, 设其 Hurst 参数为 H , 则 $\tau(q) = Hq - 1$, 显然 H 可以很容易地从 $\tau(q)$ 中得出。

例 2: 现假设在一个踪迹的所有分尺指数中, 有 $100r\%$ ($0 < r < 1$) 为 α_1 , 其余 $100(1-r)\%$ 为 α_2 , 且 $\alpha_1 \neq \alpha_2$. 当 j 为绝对值很大的负数时 (即解析度水平非常精细), 在所有尺度为 j 的小波系数 $d_{j,k}$ 中, 有大约 $100r\%$ 的分尺行为符合 $2^{j(\alpha_1+\frac{1}{2})}$, 另 $100(1-r)\%$ 的分尺行为符合 $2^{j(\alpha_2+\frac{1}{2})}$. 经过计算, 得到部分函数 $S(q, j) = 2^{-j(r-\alpha_1 q)} + 2^{-j((1-r)-\alpha_2 q)}$. 并且结构函数 $\tau(q)$ 是由局部分尺指数 α_1, α_2 的相对强度来决定的, 经过同样的计算得到 $\tau(q) = \min(\alpha_1 q - r, \alpha_2 q - (1-r))$ 。

上述分析说明, 当踪迹中包含一个以上的局部分尺指数时, $\tau(q)$ 就不再是 q 的线性函数了, 而是一个凸函数. 在上述 $\tau(q)$ 的表达式中显然有两种函数, 对应于某些 q 值, $\tau(q)$ 取上述表达式中的一个函数, 而对于另外一些较大的 q 值, $\tau(q)$ 取另一个函数. 另外, 分割点的位置反映了踪迹中分尺指数的成份 (composition)。

上述分析可以很容易地被推广到踪迹中存在有限多个分尺指数 α_i 的情形. 在这种情况下, 使用一个函数 $f(\alpha_i)$ 来表示踪迹中局部分尺指数为 α_i 的那些时刻的个数的频率分布. 这个函数通常被称为踪迹 X 的多重分形谱. 在频率分布 $f(\alpha)$ 与结构函数 $\tau(q)$ 之间存在着以下关系: $\tau(q) = \min_{\alpha} (\alpha q - f(\alpha))$ 。

另外, 本文还可以合理地解释给定踪迹 X 的结构函数 $\tau(q)$ 的含义: 如果 $\tau(q)$ 表现出直线性质, 则意味着该踪迹是单分形的, 因而基本上可以排除多重分形性存在的可能性; 相反, 如果 $\tau(q)$ 是凸的, 则说明踪迹中分尺指数是变动的, 并且 $\tau(q)$ 的形状越凸, 说明踪迹中分尺指数的变动范围越宽, 这意味着结构函数的形状呈凸形是踪迹

具有多重分形性的标志.由于这些缘故,我们在后面进行多重分形分析时是从 $\tau(q)$ 入手的.

3 汇聚产生多重分形性

理论分析表明,对于一个随机过程 $\{X_t, t \geq 0\}$,当给定一个时间点 $t = t_0$ 时,多重分形性考察的是在时刻 t_0 上过程的局部不规则性.在实际工作中,对该点的考察是很难做到的,通常考察的是过程 $\{X_t, t \geq 0\}$ 在 t_0 周围一个很小的时间范围 Δt 里的不规则性.根据TCP的流控和拥塞控制原理,它在发送数据时是以分组突发群的方式进行发送的,在其发送行为中存在着3种时间尺度:一个突发群的持续时间,即从来自任意一个连接的任意一个突发群的第1个分组被送入瓶颈链路起,到该突发群的最后一个分组被送入瓶颈链路为止这段时间;往返传输时间RTT;重传周期.通常意义上所说的小时间尺度指的就是上述第1种时间尺度.

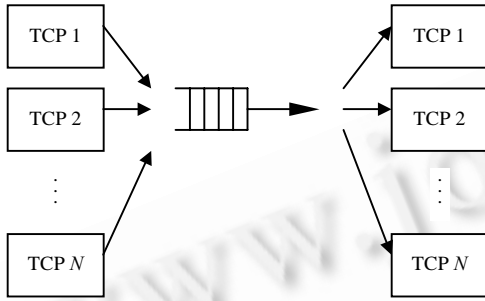


Fig.1 The network topology for simulating experiment
图1 模拟实验的网络拓扑

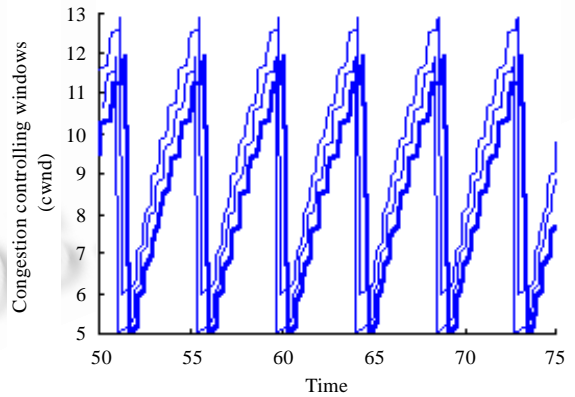
通过模拟方法,本文着重研究当多个TCP连接汇聚时,仅靠TCP的流控和拥塞控制机制的作用是否能够产生多重分形,如果能,则说明产生多重分形的根源在于TCP连接的汇聚.为此,我们设计了一个模型如图1所示.为了便于实验,假设:所有TCP连接都彼此独立;每一个发送端都有无穷多的数据待发送;图中缓冲器按FIFO规则服务;所有发送端都集中在图中源的一侧,而所有接收端都集中在图中目标一侧;接收端通告窗口很大,因而可以不考虑它的影响.为了便于与国外的研究成果对比,本文使用的模拟软件是ns-2^[8],TCP版本是Tahoe-TCP.

3.1 网络资源较富裕时的情形

选取一组参数:链路带宽 $C=0.2\text{Mbps}$,延迟 $d=10\text{ms}$,缓冲器容量 $B=30$ 分组,TCP连接的数量 $N=3$,即此时资源较富裕.令3个TCP连接同时开始发送数据,然后观察3个TCP连接各自的拥塞控制窗口(cwnd)的变化情况.模拟结果如图2所示.可以发现,经过一个很短暂的过渡期以后,3个TCP的cwnd都进入周期性变化的状态.图中显示,3条曲线除了在时间上有先后之分以外别无区别.同时还可以发现,在资源较富裕的情况下,3个TCP的分组突发群是严格交替出现的,三者互不重叠,即在TCP1的突发群的后面一定紧跟的是TCP2,TCP3的突发群,在TCP1的突发群中绝不会出现TCP2,TCP3的分组,反之亦然.

在实验中,如果把3个TCP连接的启始时间随机地错开,或者另设一组参数重做上述模拟,所得结果与前面所述完全相同.这一事实说明,当网络资源较为丰富时,系统是稳定的.

如果用 $\{X_t, t \geq 0\}$ 来代表因特网业务量的速率过程,其中 X_t 表示在时刻 t 业务量的到达速率,则从上述模拟结果可以看出,因为在这种情况下,不同连接的突发群之间是不相互重叠的,并且两个TCP连接间除了在时间上有先后之分以外别无区别,因而当给定 t_0 时,对于足够小的 Δt ,时间段 $I_{t_0} = (t_0, t_0 + \Delta t]$ 内的业务量 $N(I_{t_0})$ 基本上来自同一个TCP连接,而当 t_0 不同时,各时间段 I_{t_0} 内的业务量间的差别并不大,即 $\alpha(t_0) = \lim_{|I_{t_0}| \rightarrow 0} \log N(I_{t_0}) / \log |I_{t_0}|$ 基本上是一个常数,因而此时的业务量中基本没有多重分形性.



拥塞控制窗口(cwnd), 时间.

Fig.2 The changing of congestion controlling windows when network load is light
图2 轻负载时的拥塞控制窗口变化

3.2 网络资源较为紧张时的情形

这里所选取的参数为 $C=1\text{Mbps}, d=20\text{ms}, B=20$ 分组, $N=40\text{TCP}$. 这是一种较为极端的情形, 每个 TCP 连接平均还不到一个分组的缓冲器容量, 即资源极其紧张. 模拟时间为 40 分钟. 如图 3 所示为从 40 个 TCP 连接中任意地选择出 3 个 TCP 连接的 cwnd 的变化情况, 时间长度为 3 分钟, 显然它们都已不再是周期的了. 对照图 2 和图 3 不难发现, 随着瓶颈缓冲器容量及链路带宽与 TCP 数量的相对减小(对应着网络资源逐渐由富裕到紧张), 业务量的局部规则性在急剧下降, 不同连接间的突发群之间开始发生重叠, 在任一个 TCP 连接的突发群的持续时间 Δt 里, 开始有其他 TCP 连接的分组存在, 并且参加汇聚的 TCP 连接的数量越大, 重叠的程度就越高. Δt 内分组的来源也就越复杂, 因而随着 t_0 的改变, 时间段 $(t_0, t_0 + \Delta t]$ 内的业务量间的差别也会越大, $\alpha(t_0) = \lim_{|I_{t_0}| \rightarrow 0} \log N(I_{t_0}) / \log |I_{t_0}|$ 成为 t_0 的函

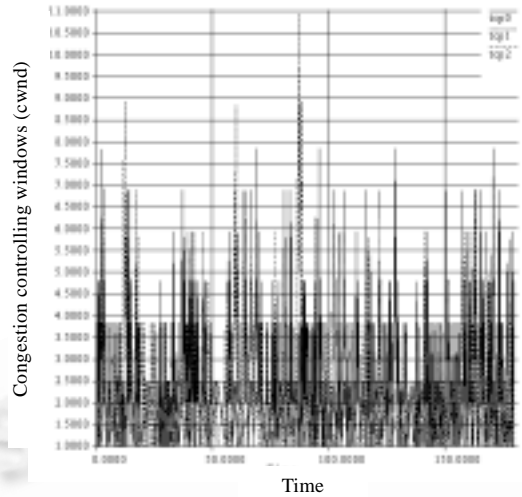


Fig.3 The changing process of congestion controlling windows when network load is heavy
图 3 重负载时拥塞窗口的变化

数, 根据第 1 节中的定义 2, 显然此时业务量 $\{X_i, i \geq 0\}$ 中具有多重分形性. 这意味着因特网业务量的多重分形性源自于 TCP 连接的大量汇聚.

为了验证上述发现, 下面对上述踪迹进行多重分形分析. 把时间分为一个个长为 0.01ms 的时间段, 在每个

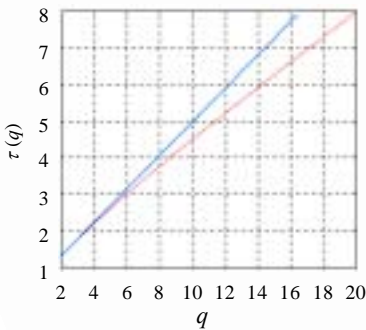


Fig.4 The structure function of a single TCP connection
图 4 单个 TCP 的结构函数图

时间段内对任意一个(比如第 1 个)TCP 连接所发出的字节数进行计数, 得到一个时间序列 $\{X_i, i=1, 2, \dots\}$, 其中 X_i 表示在第 i 个时间段中计数到的该 TCP 连接所发出的字节数, 则上述时间序列总共有 240 000 000 个值. 选此时的尺度为 18, 即 $j=-18$, 对 $\{X_i, i=1, 2, \dots\}$ 进行 DWT, 得到第 1 组近似 CA1 和小波系数 CD1, 然后对 CA1 再进行 DWT, 得到第 2 组近似 CA2 和小波系数 CD2, 如此进行 16 次 DWT, 得到从 CD1 到 CD16 共 16 组小波系数. 改变 j 而保持 q 不变, 计算部分函数 $S(q, j)$, 就可以得到一条关于 j 的曲线, 然后改变 q 的值重复上述计算就得到不同的曲线. 取每条曲线的 j 的绝对值较大部分的斜率, 得到一条新的曲线, 此即结构函数 $\tau(q)$, 如图 4 所示. 为了便于对比, 图中还画出了一条直线. 从该图可见, 踪迹具有多重分形性, 这意味着在 TCP 服务机制的作用下, 汇聚确实能产生多重分形, 从而证实了多重分形源自于 TCP 业务量的汇聚, 在

此过程中, TCP 的发送机制起着间接然而却必不可少的作用.

4 结 论

本文研究发现, 参加汇聚的 TCP 连接的数量 N 不大时, 网络负载很轻, 各个连接的突发群间不发生重叠, 因而它们各自的发送行为几乎都是确定过程, 业务量中没有多重分形性. 但当 N 很大时, 各个突发群间会发生重叠, 在一个突发群的持续时间里, 会出现其他突发群的分组, 并且 N 越大, 重叠越严重, 所以说, 因特网业务量中的多重分形性是汇聚引起的, 而 TCP 独特的发送机制为多重分形性的形成提供了必要的条件.

References:

- [1] Feldmann, A., Gilbert, A.C., Willinger, W. Data networks as cascades: investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic. In: Steenstrup, M., ed. Proceedings of the ACM/SIGCOMM'98. New York: ACM Press, 1998. 42~55.
- [2] Feldmann, A., Gilbert, A.C., Willinger, W., *et al.* The changing nature of network traffic: scaling phenomena. *Computer Communication Review*, 1998,28(2):5~29.
- [3] Gilbert, A.C., Willinger, W., Feldmann, A. Scaling analysis of random cascades, with applications to network traffic. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999,45(3):971~991.
- [4] Goncaves, P., Riedi, R., Baraniuk, R. Simple statistical analysis of wavelet-based multifractal spectrum estimation. In: Abry, P., Veitch, D., eds. Proceedings of the 32nd Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove: CA, 1998. 109~121.
- [5] Riedi, R., Crouse, M., Ribeiro, V., *et al.* A multifractal wavelet model with applications to network traffic. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999,45(3):991~1018.
- [6] Taqqu, M.S., Teverovsky, V., Willinger, W. Is network traffic self-similar or multifractal? *Fractals*, 1997,5(1):63~73.
- [7] Daubechies, L. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, PA: Society of Industry and Applied Mathematics, 1992.
- [8] Floyd, S. NS. 1998. <http://www-mash.CS.Berkeley.EDU/ns>.

Study on Source of Multifractal Nature of Internet Traffic*

ZHANG Jun-wen¹, CHEN Hai-wen², CHEN Chang-jia¹

¹(School of Electronics and Information Engineering, North Jiaotong University, Beijing 100044, China);

²(Department of Computer Science and Technology, Beijing University, Beijing 100871, China)

E-mail: jw66_zhang@sina.com.cn

<http://www.njtu.edu.cn>

Abstract: Recently, the study on the multifractal nature of Internet traffic has been becoming a hot-point in the field of study on communication networks. There have been some results on the problem of the source of multifractal in Internet traffic, most of which think that the source comes from the hierarchical feature of networks protocols. However, these results ignore the fact that the traffic load in modern Internet is very heavy, which makes important effects on traffics. After analyzing the existing results, it is found that, in the case of heavy loading, the source of the multifractal in Internet traffic is the aggregation of lots of TCP (transmission control protocol) connections, as well as the particular sending behavior of TCP protocol. To support the find, means of wavelet analysis, simulation, and practical data calculating are used. As the find is concluded on the base of practical case in Modern Internet, it is more approach to the truth than existing results, and is more valuable in networking designing and performance evaluating.

Key words: multifractal; TCP (transmission control protocol); Internet

* Received July 25, 2000; accepted September 18, 2000