

网络瓶颈带宽测量的噪声分析

林 宇, 邬海涛, 程时端, 王重钢, 金跃辉, 王文东

(1. 北京邮电大学程控交换和通信网国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 包对/串技术通过两个/多个背靠背发送的测量包所经历的散布间隔来估测一条路径的瓶颈带宽. 本文分析了瓶颈带宽测量中的噪声特性, 解释了在不同测量包长和测量包数情况下测量样点的分布. 基于噪声分析的结论, 文中提出了一种基于信号模式的滤波算法(MBFA, Model-Based Filtering Algorithm), 它利用信号模式/特征来增强信号、过滤噪声.

关键词: 主动网络测量; 带宽检测; 容量瓶颈带宽; 可用带宽; 测量噪声

中图分类号: TN393.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 04-0552-05

A Noise Analysis for Measuring Network Capacity Bottleneck

LIN Yu, WU Hai-tao, CHENG Shi-duan, WANG Chong-gang, JIN Yue-hui, WANG Wen-dong

(1. National laboratory of Switching Technology & Telecommunication Networks, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: The packet pair/train technique estimates the capacity bottleneck of a path from the dispersion experienced by two/multiple back-to-back packets. This paper analyzes the measured noise and explains the distributions of measured samples under different probing packet sizes and different packet train lengths. Based on the noise analysis and a 'signal model', a new algorithm called MBFA (Model-Based Filtering Algorithm) is presented, which uses 'signal model' to enlarge the signal and to eliminate the noise.

Key words: active network measurements, bandwidth monitoring, capacity bottleneck, available bandwidth, measurement noise

1 引言

网络带宽是影响服务质量的重要参数, 较高的带宽通常意味着较大的吞吐量和较好的端到端服务质量. 因此, 带宽监测对于网络用户和 ISP (Internet Service Providers) 的网络优化和扩容规划非常重要^[1]. 此外, 网络带宽测量对于许多 Internet 应用和协议意义重大. 内容分发网络^[2]、边到边网络^[3]、网络缓存的位置选择和维护策略^[4]、端系统的组播^[5]、内容服务器中的流调度和接纳控制策略^[6]等都需要网络带宽测量的有力支持.

包对技术 (Packet pair technique) 是测量路径容量瓶颈的著名方法^[7-14]. Jacobson 最早提出包对的概念, 但没有考虑背景流量的影响, 没有区分出瓶颈带宽和可用带宽的概念^[7]. Keshav 注意到在路由器使用先进先出排队规则时, 包对的散布间隔对应的不是瓶颈带宽^[8]; 如果所有路由器使用以平调度策略, 则包对技术测量的结果是可用带宽. 包对技术的关键是分析测量噪声的特征, 并在此基础上寻找滤波算法去除噪声, 现有的滤波方法可分为标准统计滤波^[9,10]. 它们都假定容量瓶颈带宽总是位于测量样点最为集中分布的地方, 这个假定被文献^[11-13]证明不成立. Paxson 发现在多跳或重载情况

下, 测量样点分布呈现多峰形态, 并提出 PBM (Packet Bunch Modes) 启发式方法, 从这些峰值中选择一个作为瓶颈带宽^[11,12]. Dovrolis^[13] 发现增加数据包串的长度 N , 测量结果的方差将变小, 当 N 充分大, 测量样点分布将呈现单峰形态, 且峰值将收敛于 ADR (Asymptotic Dispersion Rate)^[13], 但 ADR 小于容量瓶颈带宽, 并且不是可用带宽. 据此提出 pathrate 滤波方法. 文^[7-14] 都没有完整地分析测量样点的分布, 因此滤波方法都停留在启发和经验性的层面.

本文分析了测量噪声, 较好地解释了测量样点分布的成因, 为寻找新滤波算法奠定了理论基础. 本文组织如下: 第2节介绍基本概念; 第3节分析带宽测量噪声; 第4节总结全文.

2 基本概念

定义路径为从源端到接收端数据包所经过的链路序列. 假定在测量中路径不变且唯一. 定义路径容量瓶颈为在路径上没有竞争背景流量时 IP 层所能达到的最大吞吐量. 定义可用带宽为在路径上存在竞争流量时 IP 层所能达到的最大吞吐量. H 为路径上的总跳数, C_i 表示链路 i 的容量, C_0 表示信源的发送速率. 设第 n 跳为瓶颈链路, 则 C 为瓶颈链路的容量.

收稿日期: 2003-07-16; 修回日期: 2002-12-25

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划 (No. 90204003); 国家 863 项目 (No. 2003AA1212201; No. 2002AA103063) 和 (No. 2001AA121052); 高校博
士学科点专项科研基金项目 (No. 20010013003)

$$C = C_n = \min_{i=1 \dots H} C_i \quad (1)$$

数据包在网络中需经历发送时延、传播时延和排队时延。在链路 i 上,一个长 L 数据包的发送时延 $\tau_i = L/C_i$ 。包对实验从源端发送两个背靠背的测量包(前一数据包包头和后一包尾间隔为 0),如果路径上没有竞争流量,两包将在容量瓶颈处散布成最大到达间隔 $\tau_n = L/C_n$,第 n 跳为瓶颈。此后两包将保持到达间隔,当包对到达接收端时,其到达间隔 $\Delta_H = \tau_n$,恰好是瓶颈链路处的发送时延。因此可获得测量估值 η

$$\eta = L/\Delta_H \quad (2)$$

包串技术^[9,14]是包对技术的发展:它从发送端发送 $N > 2$ 个背靠背的等长测量包,接收端利用测得的第一个数据包和最后一个数据包之间的间隔 Δ_H 来估测路径容量:

$$\eta_N^L = (N-1)L/\Delta_H \quad (3)$$

如果令 $\eta_2^L = \eta$,则当 $N=2$ 时,式(3)与式(2)相同。

由于网络中总是存在背景流量,为了获得更为精确的估值,需要进行一系列的测量,定义 $\{\eta_i, i=1, \dots, M_e\}$ (简称 $\{\eta_i\}$) 为测量样点集合,其中 M_e 为测量总次数; $\{\eta_i\}$ 常采用带宽矩形分布函数来展现。定义示性函数 $S(i, h, x)$ 为

$$S(i, h, x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in (i-h/2, i+h/2) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

定义带宽矩形分布函数 $d(i, h)$ (简称为 $d(i)$) 为:

$$d(i, h) = \sum_{k=1}^{M_e} S(i, h, \eta_k), \quad i=0, h, 2h \dots \quad (5)$$

h 表示矩形宽度。

3 瓶颈带宽测量的噪声分析

按照对到达间隔的影响,可将噪声分为时间压缩噪声 (time compression noise) 和时间扩展噪声 (time extended noise)^[10]。如果第一个数据包被背景数据包所延迟,二者的间隔将减小,导致时间压缩;如果只有第二个数据包被延迟,二者的间隔将加大,导致时间扩展。使用随机变量 ζ^c, ζ^e, ζ 分别表示压缩噪声、扩展噪声、总噪声。

本文采用 $[p_1, p_2, \dots, p_N]$ 表示长度为 N 的数据包串。(p_i 表示第 i 数据包,包长为 L , N 为等长数据包的个数, $[\]$ 表示数据包串的边缘)。对于包串 $[p_1, p_2, \dots, p_N]$,定义其在接收端的理想到达间隔(即假定没有背景流量下)为

$$T_N^L = (N-1)L/C \quad (6)$$

显然, T_N^L 对应于 C 。定义实际到达间隔为 Δ_H , 即

$$\Delta_H = T_N^L + \zeta = T_N^L + \zeta^c + \zeta^e \quad (7)$$

则由式(3)可得

$$\eta_N^L = \frac{(N-1)L}{\Delta_H} = \frac{C}{1 + \zeta/T_N^L} \quad (8)$$

为了分析方便,定义标准噪声

$$\zeta' = \zeta/T_N^L \quad (9)$$

ζ' 和 ζ 相差一个常数,形态相同。下面分成小间隔、中等间隔和大间隔三种情况讨论,并假定链路带宽为整数。

3.1 小理想间隔

当 $N=2$, 测量包长 L 很小, ΔT_2^L 将很小。假定测量包的初

始间隔为 $\Delta_0 = L/C_0$, 设在第 i 跳链路处二者间隔为 Δ_i 。若网络中没有背景数据流, $\Delta_i = \max\{\Delta_{i-1}, \tau_i\}$, 到达接收端时, $\Delta_H = \min_{i=0 \dots H} \tau_i = \tau_n$ 。如果存在背景数据流,设在瓶颈链路 n 上两测量包的间隔为 Δ_n , 显然 $\Delta_n \geq \tau_n = T_2^L$, Δ_n 包括理想到达间隔和扩展噪声,

$$\Delta_n = \tau_n + \zeta_n^e \quad (10)$$

其中, ζ_n^e 为第 n 跳链路上的扩展噪声。设在第 i 跳链路中新引入的压缩噪声和扩展噪声为 ζ_i^c 和 ζ_i^e , 则在第 H 跳链路上观察到噪声为

$$\zeta = \zeta_n^e + \sum_{i=n+1}^H (\zeta_i^c + \zeta_i^e) \quad (11)$$

由于背景流量的干扰,测量包可能引入额外的排队时间。定义 d_i^1 为第一测量包被延迟的时间; d_i^2 定义为在第一测量包发送结束后,第二测量包被延迟的时间。图 1 给出了一般情况下两测量包从第 i 跳链路到第 $i+1$ 跳链路的间隔变化情况,即

$$\Delta_i = \begin{cases} \tau_i + d_i^2, & \text{if } \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1} \\ \Delta_{i-1} + (d_i^2 - d_i^1), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12a)$$

$$\Delta_i = \begin{cases} \tau_i + d_i^2, & \text{if } \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1} \\ \Delta_{i-1} + (d_i^2 - d_i^1), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12b)$$

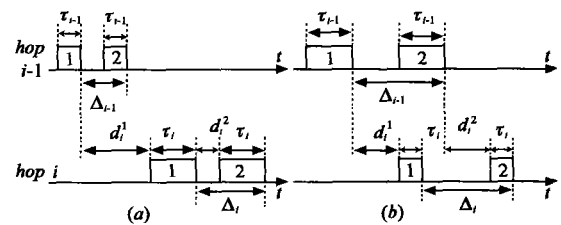


图 1 等式(12)的两种情况^[13]

注意到压缩噪声最多只能使前一测量包尾和后一测量包头的间隔变为 0, 而不可能为负。式(12a)可改写为:

$$\Delta_i = \begin{cases} \tau_i + d_i^2 & \text{if } \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1} \text{ and } d_i^2 > 0 \\ \tau_i & \text{if } \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1} \text{ and } d_i^2 = 0 \end{cases} \quad (13a)$$

$$\Delta_i = \begin{cases} \tau_i + d_i^2 & \text{if } \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1} \text{ and } d_i^2 > 0 \\ \tau_i & \text{if } \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1} \text{ and } d_i^2 = 0 \end{cases} \quad (13b)$$

因此,两测量包在第 i 跳链路上背靠背的概率,即

$$P(\Delta_i = \tau_i) = P\{\tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1} \text{ and } d_i^2 = 0\} = P\{\tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1} | d_i^2 = 0 | \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\} \quad (14)$$

当第 i 链路处于重负载时,路由器队长增大,使得 $P\{\tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\}$ 的概率较大;当 ΔT_2^L 减小时,在两测量包之间插入背景数据包的概率下降,使得 $P\{d_i^2 = 0 | \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\} = 1 - P\{d_i^2 > 0 | \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\}$ 的概率增大。因此短包长、重负载下, $P\{\Delta_i = \tau_i\}$ 的概率较大。

若两测量包在第 H 跳链路上背靠背(没有间隙),此时在第 H 跳观察到的间隔为 $\Delta_H = \tau_H$, 则

$$P\{\Delta_H = \tau_H\} = P\{\tau_H + d_H^1 \geq \Delta_{H-1} \text{ and } d_H^2 = 0\} \quad (15)$$

在短包长、第 H 链路重载下, $P\{\Delta_H = \tau_H\}$ 的概率较大。

若两测量包在第 i ($n \leq i \leq H$) 跳链路上背靠背,并且在后续链路中到达间隔保持不变,则第 H 跳观察到的间隔为 $\Delta_H = \tau_i$, 对应的 $\zeta = (C/C_i - 1)T_2^L$, ($n \leq i \leq H$)。同时,注意到如果在第 i 跳链路后存在 C_i 且 $C_k < C_i$, 则两测量包在第 k 跳链路上的到达间隔为 $\Delta_k \geq \tau_k > \tau_i$, 也就是说,两测量包在第 i 跳链路上的到达间隔 Δ_i 必然会被扩展,为了避免这种情况,定义集

合 $\gamma = \{i: C_k > C_i \text{ 对于所有 } k > i, n \leq i \leq H\}$. 对于 $i \in \gamma$ 有

$$\begin{aligned}
P\{\zeta = (C/C_i - 1)T_2^i\} &= P(\Delta_H = L/C_i) \\
&\geq P\{\Delta_i = \tau_i\} P\{\Delta_H = L/C_i\} \\
&= P\{\Delta_i = \tau_i\} P\left\{\sum_{k=i+1}^H (\zeta_k^i + \zeta_k^i) = 0 \mid \Delta_i = \tau_i\right\} \quad (16)
\end{aligned}$$

例如,对于路径 Path = {80,55,30,60,50,70}, 则 $\gamma = \{3, 5, 6\}$, 需去除链路 $C_4 = 60\text{Mbps}$. 从式(15)和(16)可知, ζ 可能在点集 $\Omega_\zeta = \{(C/C_i - 1)T_2^i, i \in \gamma\}$ 出现峰值.

在 T_2^i 很小时, 假定 ζ 在 Ω_ζ 近似呈离散分布, 而在其他区域连续分布. 定义集合 $\Omega = \{C/C_i - 1, i \in \gamma\}$, 集合 $\Theta = \{x > \min\{(C/C_i - 1)\}, x \neq (C/C_i), i \in \gamma\}$. 则标准噪声 $\zeta' = \zeta/T_2^i$ 的分布函数 $f(x)$ 为, $i \in \gamma$

$$\begin{aligned}
F(\min\{(C/C_i - 1), i \in \gamma\}^-) &= 0 \\
F((C/C_i - 1)^+) - F((C/C_i - 1)^-) &= P\{\Delta_H = \tau_i\} \\
F(x) = F((C/C_i)^+) + \int_{(C/C_i - 1)^-}^x f(t) dt, & x \in \Theta, x > (C/C_i - 1) \quad (17)
\end{aligned}$$

其中, “+”和“-”分别表示左极限和右极限. $f(x)$ 是在 $x \in \Theta$ 上的连续函数. 由式(11)可看出, 噪声将受到众多因素的影响, 如背景流负荷、背景流数据包长分布、背景数据流类型、背景流到达分布、测量包长、测量次数等, 因此假定 ζ' 在区域 $x \in \Theta$, 近似满足正态分布 $N(\mu, \sigma_1)$, 则有

$$f(x) = (A/\sqrt{2\pi}\sigma_1) e^{-(x-\mu_1)^2/2\sigma_1^2}, x \in \Theta \quad (18)$$

其中, 归一化常数 A 使得整个分布域上概率为 1, 有

$$A = \frac{1 - \sum_{n=i}^H P\{x = (C/C_i - 1)\}}{\int_{x \in \Theta} (1/\sqrt{2\pi}\sigma_1) e^{-(x-\mu_1)^2/2\sigma_1^2} dx} \quad (19)$$

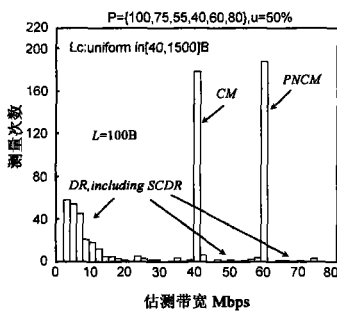


图2 仿真带宽分布函数

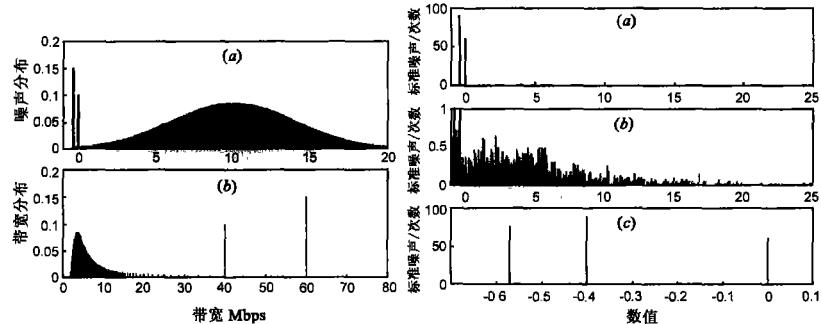


图3 理论噪声分布函数和带宽密度分布函数

图4 仿真获得的测量噪声图样

$$n(i, h) = \sum_{k=1}^{M_e} S_n(i, h, \zeta_k), \quad i=0, h_t, 2h_t, \dots \quad (21)$$

$$S_n(i, h_t, x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in (i - h_t/2, i + h_t/2] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

其中, h_t 无量纲, 称之为时间尺度.

图4给出了在 Path = {80,55,30,60,50,70}, $L = 100B, u = 50\%$, 背景数据包包长在 [40, 1500] 内均匀分布条件下仿真获得的噪声 (ζ') 图样. (图4包含了 40 组实验, 每组进行 1000 次测量, 图中的数据是按组平均后的结果.) 图4(b)与 4(a) 时间尺度相同 (x 轴), 但纵坐标缩小 100 倍, 可以看出除了尖峰点

则带宽估计变量 $\eta_2 = C/(1 + \zeta')$ 分布函数 $G(x)$ 为:

$$G(x) = \int_{\frac{C}{1+\zeta} \leq x} dF(\zeta) \quad (20)$$

$G(x)$ 也将某些点出现跳变, 相应地, η_2 可能在点集 $\Phi = \{C_i, i \in \gamma\}$ 出现峰值.

下面利用仿真来验证分析, 我们使用 OPNET 进行仿真, 仿真模型与文献[13]相同, 每条链路采用 16 个 ON/OFF 信源 ($\alpha = 1.9$) 产生背景流量, 考虑两种背景流的包长 L_c 分布 (固定 $L_c = 1500B$, 或者 L_c 在 [40, 1500] B 间均匀分布). 考虑了两种与测量路径相关的背景流路由: 背景流路由由同测量包路径相同 (Path Persistent cross traffic), 背景流进入路径后在下一跳离开该路径 (One-hop Persistent cross traffic). 限于篇幅, 本节仅列举 One-hop Persistent, 包长在 [40, 1500] 均匀分布下的结果. (我们还针对其他不同情况进行了大量仿真工作, 仿真结果均与分析较好吻合.) 本文还引用了文献[13]的结果来辅助验证.

图2 引用文献[13]的图 8(a) ($L = 100B, u = 50\%$, Path = {100,75,55,40,60,80}, 背景数据包包长在 [40, 1500] 内均匀分布), 它是仿真获得的测量带宽分布. 噪声在 $\zeta' = 0$ 处的峰值导致了 40Mbps 处的 CM (Capacity Mode^[13]), 而噪声在 $\Omega - \{0\}$ 的其他峰值导致了 60Mbps 处的 PNCM^[13], 它正好属于集合 $\Phi - \{C_n\} = \{60, 80\}$ Mbps. 在其他区域 Θ , ζ' 近似满足正态分布, 形成了 CM 和 PNCM 外的样点分布, 称为 DR (Dispersion Range, 图2). SCDR 仅是 DR 的一部分, 此时样点分布呈多峰形态. 图 3(a) 是使用式(18)和(20)绘制的噪声理论分布曲线, 其中取 $P\{\Delta_H = L/60\} = 0.15, P\{\Delta_H = L/40\} = 0.1$. 图 3(b) 是对应的带宽分布曲线. 理论带宽分布的形态和图 2 非常接近.

定义噪声样点集合 $\{\zeta'_i, i = 1 \dots M_e\}$, 简称 $\{\zeta'_i\}$, 并采用噪声分布函数 $n(i, h_t)$ 或 $n(i)$ 来展现.

之外, 噪声在其他区域呈现近似正态分布. 图 4(c) 是将图 4(a) 在时间尺度 (x 轴) 缩小的结果 (时间尺度 h_t 从 0.1 缩小到 0.003), 我们发现噪声在约 -0.57、-0.4 和 0 达到峰值, 分别对应 70、50 和 30Mbps 链路. 注意, 在图 4(a) 中由于 $h_t = 0.1$ 过大使得 -0.57、-0.4 两个谱线合并.

2.2 中等理想间隔

当 $N = 2$ 但测量包长较长, 或测量包长较小但 N 较大, 对应于中等理想间隔的情况. 先考察 $N = 2, L$ 较大的情况, 重新考察式(14):

$$P\{\Delta_i = \tau_i\} = P\{\tau_i + d_i^2 \geq \Delta_{i-1} \text{ and } d_i^2 = 0\}$$

$$= P\{\tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\} P\{d_i^2 = 0 | \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\} \quad (23)$$

若网络流量情况不变, d_i^1 的分布不变. 假定 Δ_{i-1} 正比于测量包长 $L, \Delta_{i-1} = k_{\Delta} \times L$ 则

$$P\{\tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\} P\{1/C_i + d_i^1/L \geq k_{\Delta}\} \quad (24)$$

随着 L 的增大, $P\{\tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\}$ 概率将减小. 同时, 在两测量包之间没有数据包插入的概率也将减小, 导致 $P\{d_i^2 = 0 | \tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}\}$ 减小. 因此, $P\{\Delta_i = \tau_i\}$ 的概率将减小, 使 ζ' (或 η'_N) 在 Ω (或 Φ) 点集附近领域的峰值迅速减弱甚至消失.

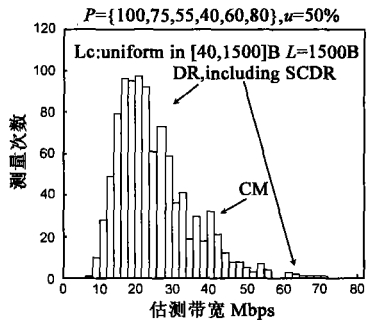


图 5 仿真获得的带宽分布曲线

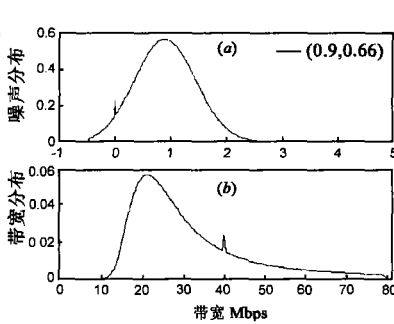


图 6 理论噪声分布和带宽分布曲线

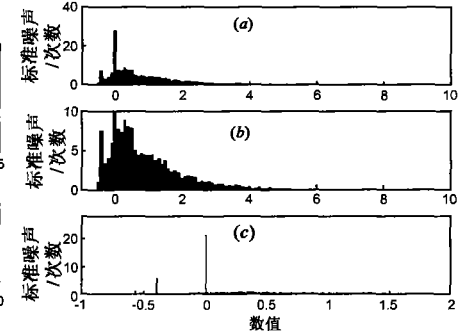


图 7 $N=2, L=1000$ 噪声分布

再考察 $N > 2, L$ 较小的情况: 数据包串为 $[p_1, p_2, \dots, p_N]$, 对于噪声在 Ω 点集的情况, 需将式(14)改写为:

$$P\{\Delta_i = (N-1)\tau_i\} = \prod_{k=1}^{N-1} P\{\Delta_i^{(k,k+1)} = \tau_i\} \\ = \prod_{k=1}^{N-1} P\{\tau_i + d_i^1 \geq \Delta_{i-1}^{(k,k+1)} \text{ and } d_i^2 = 0\} \quad (25)$$

其中, $\Delta_i^{(k,k+1)}$ 表示在 p_k 和 p_{k+1} 之间的间隔, 随测量包长或者测量包数量 N 增大, $P\{\Delta_i = (N-1)\tau_i\}$ 概率将迅速减小, 使 ζ' (或 η'_N) 在 Ω (或 Φ) 附近领域的峰值迅速减弱甚至消失.

再看 ζ' 在 Ω 区域的分布情况: 设 p_i 和 p_{i+1} 之间引入的标准噪声为 $\zeta'_{i,i+1}$, 则总的标准噪声 ζ' 为

$$\zeta' = \sum_{i=1}^{N-1} \zeta'_{i,i+1} / (N-1) \quad (26)$$

如果 $\zeta'_{i,i+1}$ 在 Θ 独立且都近似满足正态分布 $N(\mu_1, \sigma_1)$, 则 ζ' 在 Θ 区域也近似满足正态分布 $N(\mu_2, \sigma_2)$, 有

$$D[\zeta'] = \sigma_2^2 = \sigma_1^2 / (N-1) \quad (27)$$

显然, 随着 N 增大, ζ' 的方差将减小.

2.3 大理想间隔

当 N 充分大时, 对应于大理想间隔的情况. 在 N 充分大时, 若 $\zeta'_{(i,i+1)}$ 独立同分布, 且均值 μ 和方差 σ 都存在, 则当 N 充分大时, 根据中心极限定理, 有随机变量 ζ' 渐进遵从正态分布 $N(\mu_3, \sigma_3)$, $\sigma_3 = \sigma / \sqrt{N-1}$, 即

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\left(\frac{\zeta - \mu}{\sigma / \sqrt{N-1}} \leq x\right) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx \quad (28)$$

下面解释文献[13]对包串实验的发现. 随着 N 的增大, ζ' 的方差将减小, 绝大部分样点将落在 $(\mu_3 - 3\sigma_3, \mu_3 + 3\sigma_3)$ 区间内, 相应地, η'_N 将落在区间 $(\frac{C}{1 + \mu_3 + 3\sigma_3}, \frac{C}{1 + \mu_3 - 3\sigma_3})$ 内, 显然, 随着 σ_3 减小, 区间宽度将减小. 当 N 充分大时, $\sigma_3 <$

图 5 引用了文献[13]的图 8(b) ($Path = \{100, 75, 55, 40, 60, 80\}, L = 1500, u = 50\%$, 背景包长在 $[40, 1500]$ 内均匀分布下的仿真结果). 图 6(a) 是噪声近似满足正态分布 (在 Ω 集附近可能还有小峰值) 的理论曲线, 图 6(b) 是对应的带宽分布曲线. 可以看出, 图 6(b) 的形态与图 5 非常相似. 图 7 是我们在 $Path = \{80, 55, 30, 60, 50, 70\}, u = 50\%, N = 2, L = 1000$ B 下获得的仿真噪声图样, 此时在 Ω 点集处的峰值大大衰减. 此时带宽分布将由多峰形态过渡到双峰甚至单峰形态.

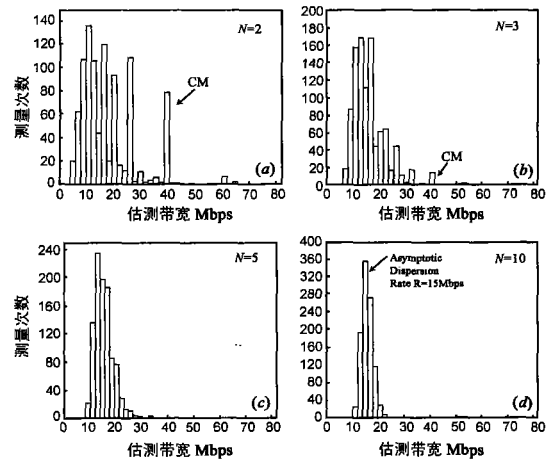


图 8 仿真获得的带宽分布图

$\mu_3/3$ 时, 有 $\eta'_N < \frac{C}{1 + \mu_3 - 3\sigma_3} < C$, 此时仅存在 SCDR 模式. 当 N 充分大时, 式(14)中 $P\{\Delta_i = \tau_i\}$ 的概率将很小, 此时 ζ' 的离散性消失, 在整个分布区间呈近似正态分布, 相应的, 带宽

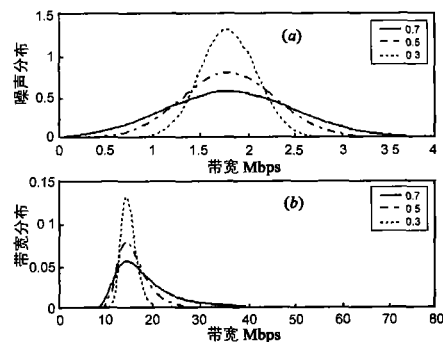


图 9 噪声分布及带宽分布理论曲线

分布将呈单峰形态.且随机变量 ζ_N^k 的均值为

$$E[\eta_N^k] = E\left[\frac{C}{1+\zeta^k}\right] = \frac{C}{1+\mu_3} \quad (29)$$

与 N 无关,即峰值 ADR 的位置与 N 无关.图 8 引用文献[13]中的仿真结果,图 9 是 σ_3 为 0.7、0.5、0.3 时相应的噪声分布及带宽分布曲线,图 9(b)带宽分布和图 8 的形态及变化趋势吻合.

4 结论

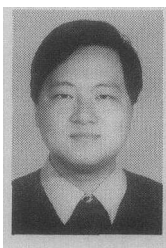
本文分布了容量瓶颈带宽测量中噪声的特性,较好地解释了在不同测量包长度和测量包数量情况下测量样点的分布.在本文噪声分析的基础上,我们还提出了一种新的基于信号模式的滤波算法,限于篇幅,我们将另文讨论.

参考文献:

- [1] R Caceres, N Duffield, A Feldmann, et al. Measurement and analysis of IP network usage and behavior [J]. IEEE Communications Magazine, May, 2000: 144 - 152.
- [2] A Barbir, et al. Known CDN request-routing mechanisms [OL]. <http://www.globecom.net/ietf/draft/draft-cain-cdn-known-request-routing-01.html>.
- [3] STOICA I, MORRIS, R. et al. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications [A]. ACM SIGCOMM'01 [C]. San Diego, USA. 2001. 149 - 160.
- [4] J Kangasharju, J Roberts, K W Ross. Object replication strategies in content distribution networks [A]. WCW'01 [C]. Boston, USA: 2001.
- [5] CHU Y, RAO S G, ZHANG H. A case for end system multicast [A]. ACM SIGMETRICS'00 [C]. Santa Clara, USA. 2000. 1 - 12.
- [6] M E Crovella, R Frangioso, M. Harchol-Balter. Connection Scheduling in Web Servers [A]. USITS'99 [C]. http://ns.chejue.ac.kr/~jkim/web_os/connectserver.ps.
- [7] V Jacobson, Congestion avoidance and control [A]. ACM SIGCOMM [C]. Stanford, CA USA. 1988. 314 - 329.
- [8] S Keshav. A control-theoretic approach to flow control [A]. ACM SIGCOMM'91 [C]. Zurich, Switzerland. 1991. 3 - 15.

- [9] R L Carter, M E Crovella, Server selection using dynamic path characterization in wide-area networks [A]. IEEE INFOCOM'97 [C]. 3, 1997. 1014 - 1021.
- [10] K Lai, M Baker. Measuring bandwidth [A]. IEEE INFOCOM'99 [C]. New York, USA. 1999. 235 - 245.
- [11] V Paxson. End-to-end internet packet dynamics [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 1999, 7(3): 277 - 292.
- [12] Vern Paxson. Measurements and analysis of end-to-end internet dynamics [OL]. PhD thesis, University of California, Berkeley, 1997, <ftp://ftp.ee.lbl.gov/papers/vp-thesis/>.
- [13] C Dovrolis, P Ramanathan, D Moore. What do packet dispersion techniques measure [A]. IEEE INFOCOM 2001 [C]. Anchorage, Alaska USA. Vol. 2A, 2001. 905 - 914.

作者简介:



林宇男, 1976年12月生于福建浦城, 1998年毕业于北京邮电大学, 获机械电子工程和通信工程双学士学位, 现为北京邮电大学交换和网络国家重点实验室博士生, 研究兴趣包括 Internet 测量、无线网络、移动组播、TCP 建模.

邬海涛 男, 1976年9月生于江西南昌, 北京邮电大学交换和网络国家重点实验室博士研究生, 1998年毕业于北京邮电大学电信工程工程系, 目前研究方向为宽带网络服务质量, TCP/IP 改进, 区分服务, 流控和拥塞控制, 及无线分组网络性能.

程时端 女, 1940年生于上海, 主持过十余项重大科研项目, 发表文章 150 余篇, 专著 2 册, 译著 3 册, 1992 - 1999 年间, 任 863 网络与交换专家组组长, 目前研究方向包括 TCP/IP, 协议工程, 业务量工程, 移动互联网性能分析和服务质量控制等.

王重钢 男, 1974年生于四川仁寿人, 2002年在北邮交换和网络国家重点实验室获博士学位, 现在香港科技大学从事博士后研究工作, 主要研究领域为宽带网络资源管理和业务控制、无线局域网、对等网络等.