

非时钟同步的单向排队时延测量估计方法

古炜旋, 余顺争

(中山大学 电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 提出了一种测量和估计网络端到端单向排队时延的新方法。与消除时钟偏差和时钟频差的现有方法相比, 新方法完全不需要测量端之间的时钟同步。探测分组之间的发送和到达时间间隔在两端分别测量, 然后利用傅立叶域-时间域的迭代重构算法估计端到端单向排队时延的分布特性。仿真和分析结果表明新方法具有很好的实时性、准确性和顽健性。

关键词: 端到端测量; 单向排队时延; 时钟同步; 时延分布重构

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2007)09-0104-08

Novel approach to measure and estimate one-way queuing delay without clock synchronization

GU Wei-xuan, YU Shun-zheng

(Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A novel approach was put forward to measure and estimate end-to-end one-way queuing delay in the network. In contrast to existing methods that were based on some assumptions to remove clock offset and skew during their measurements, clock synchronization was not required in the novel approach. Intra-gaps between the two packets in each probe pair were separately measured at both ends, and the distribution of end-to-end one-way queuing delay was then estimated by exploiting a Fourier-to-time reconstruction algorithm. The approach's performance in real-time convergence, estimation preciseness, and robustness were verified by the simulation analysis.

Key words: end-to-end measurement; one-way queuing delay; clock synchronization; delay distribution reconstruction

1 引言

随着越来越多新型互联网应用的涌现, 网络性能的有效测量和准确估计已经成为网络设计和网络管理的关键。特别地, 在多媒体实时应用中, 报文的传输必须满足严格的网络时延要求, 时延是各类网络性能指标中最重要的一项参数。时延测量还

可以为可用带宽、报文丢失率等其它特性参数的测量估计提供非常有用的参考信息。因此时延估计一直是网络测量研究领域的热点。

测量往返路径时间(RTT, round-trip time)是最简单的一种时延估计方法, 如常用的 Ping 命令。RTT 测量时, 探测分组离开和到达测量端的时间都由同一个时钟记录, 所以利用这 2 个时间戳之差就

收稿日期: 2007-01-15; 修回日期: 2007-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90304011); 广东省自然科学基金资助项目(04009747); 高等教育博士计划基金资助项目(20040558043); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (90304011); The Natural Science Foundation of Guangdong Province (04009747); The Research Found for the Doctoral Program of Higher Education (20040558043); The Scientific Research Foundation for the Returned Overseas, Chinese Scholar State Education Ministry

可以直接计算探测分组在往返路径上经历的时间。虽然往返路径时延的测量简单有效,但在实际应用中,网络性能的表现却绝大多数依赖于端到端的单方向时延^[1]。例如在流媒体网络应用中,流媒体内容的报文分组都只会在服务器端到客户端的方向上传输,因此服务器端到客户端方向的时延就远比另一个方向的时延重要得多。端到端单向时延的测量还可以与最大似然估计算法结合,用于网络内部链路时延性能的推测和路径瓶颈位置的确定^[2]。一种简单的单向时延估计是把往返路径时间的测量值除以2。然而随着网络规模和复杂性的增加,往返路径的链路环境和流量负载呈现出越来越不对称的特点^[3],这种粗糙的估计方法得到的是一个误差很大的结果。

直观地,类似于往返路径时间的测量,单向时延也可以通过记录分组在源端发送和在目的端到达的时间戳进行测量。但在分布式的网络环境下,测量端之间时钟不同步的问题却使得这类单向指标的测量变得非常困难。由于存在着相互独立的计时系统,目的端和源端测量的时间差不仅仅是探测分组在单向路径上传输的时间,它还包含了2个测量端所对应的时钟偏差和频率差异。在最坏的情况下,如果目的端时钟滞后源端时钟的差别大于探测分组实际传输的端到端单向时延,那么测量结果将是一个明显错误的负值。

目前有2种时钟同步的方法。其中,网络时间协议NTP^[4]以一个固定的时间服务器作为参考点,计算其到各个测量端的往返路径时间,将测量结果除以2之后再对各个测量端之间的时钟偏差进行估计。显然,这种方法只有在往返路径时延都一致的条件下才有意义。另一种同步方案是使用全球定位系统GPS。GPS可以提供准确的时间同步信息,但是它必须利用特殊的装置来接收卫星信号,因此并不适用于Internet中大多数不具有GPS功能的普通计算机的时间同步。

本文提出一种新的端到端测量方法,它不需要在测量端之间进行时钟同步,能够有效地估计单向排队时延的分布特性。

2 相关研究

这一节主要介绍已有的单向时延测量研究工作^[5]。由于NTP和GPS同步技术存在上面所提到的局限性,现有工作大多数都是针对测量端之间时

钟不一致的2个方面,研究时钟偏差和时钟频差的测量估计技术。

2.1 时钟偏差测量方法

Luong和Biro在研究了往返方向传播时间和处理时间不一致性的基础上,提出了通过测量路径所有相邻节点对时钟偏差之和来计算两端总时钟偏差的方法^[6]。这种测量方法需要路径上所有路由器配置特殊的服务来完成相邻节点间时钟偏差相对值的交换,因此并没有获得实际的应用。

Tsuru、Takine和Oie的研究工作着重于对往返路径具有不同带宽条件下的时钟偏差进行测量^[7]。他们假设在测量过程中往返2个方向上的传播时延、传输时延和误差因素等都是相同的。然而,这样的假设前提在实际网络环境中很难得到保证。

最近的研究是Gurewitz、Cidon和Sidi在文献[8]中提出的时延估计方法。这种方法依赖于多个节点对之间的单向时延测量值,利用整个网络的拓扑条件代替单一条件对全局目标函数进行优化求值。文献[8]作者在最小平方误差的基础上提出了改进的最大熵目标函数,对确定性时延的估计方法做了详细的讨论。该方法的局限性在于不能够对单独的路径进行测量,而是需要在包含有 E 条链路并由 N 个节点连接着的网络中选择合适的 $(N-1)$ 条链路和 $E-(N-1)$ 条循环路径,通过事先发送的ICMP探测分组测量每一跳的单向时延,再进行计算估计。

2.2 时钟频差测量方法

根据时钟频差与单向时延测量结果的线性关系,Moon在文献[9]中提出了一种基于线性规划的频差估计方法。此后,Wang等人^[10]改进Moon的方法,提出了根据收集到的报文分组记录进行实时频差测量的RTSE算法。

与线性规划的基本思想不同,Zhang等人^[11]提出了基于凸包的时钟频差估计算法。该算法以落在拟合直线上的时延测量点数目最大化为优化目标,在计算复杂度、稳定性和测量精度方面与基于线性规划的方法基本一样。然而凸包集合点在实际计算中很不均匀,给同步测量带来较大的误差。

王洪波等人提出了一种消除时钟频差和时钟重置的新方法^[12]。他们首先对模糊聚类得到的频差估计值进行纠斜处理,然后采用最小滤波方法去除数据噪声,再利用“滑动检测窗口”机制检测出所有的时钟重置点,最后使用线性规划或凸包方法估计全局最优的时钟频差值,纠正单向时延的测量数

据。

由于频差值对时钟不同步的影响远比偏差值小,所以上述只考虑时钟频差而忽略时钟偏差的测量方法并没有从根本上解决单向时延测量的时钟不同步问题。

3 非时钟同步的端到端单向排队时延测量与估计

与端到端单向时延测量方法的众多研究相比,有关单向排队时延及其分布特性测量和估计方法的研究却非常少。事实上,排队时延除了反映网络拥塞程度以外,在互联网应用中还具有非常关键的作用。例如,利用时延测量值进行网络主机定位时,排队时延的估计可以有效地缩减置信区间的范围,减小误差,提高主机定位的准确程度^[13];VoIP应用为了补偿语音分组的时延差异,要求根据时延分布函数对应的丢包率,动态地调整抖动缓冲区的大小,在丢包率和传输时延之间寻求恰当的折中;排队时延的有效估计还可以弱化链路容量测量方法的约束条件,减少探测分组的发送数量,加快收敛速度^[14]。因此,本文提出测量和估计单向排队时延分布特性的方法,是现有研究工作的一个重要补充。

单向指标测量最大的难点在于两端时钟的不同步。如果把报文分组每一次发送和到达的时间戳关联在一起进行研究,始终无法克服这个问题。现有方法以观察到的时钟偏差和频差现象作为研究目标,试图通过测量两端时钟差异的程度来消除不同步的影响,然而如上一节所述,都存在着比较大的局限性,无法对单向时延进行直接的测量和估计。要实现非时钟同步的端到端测量,就必须把发送端和接收端的时间测量值分开考虑,只研究两端分别独立测量的时间信息。由于在两端可以最直接被利用的时间测量值是相邻分组之间发送和到达的时间间隔,因此基于这种指导思想,本文分析了探测分组输入时间间隔与输出时间间隔的关系,推导出单向排队时延的描述形式,再进一步寻求排队时延分布特性的估计方法。

3.1 单向排队时延

任意一个报文分组在多跳路径传输过程中经历的端到端单向时延都包含有确定性和随机性两部分。

确定性的时延部分包括路径各条链路上传播时间和传输时间之和。传播时间是指信号从链路一

端传到另一端所需要的时间,它只跟链路的物理性质和距离长度有关。一般地,信号在铜缆或光纤链路上传输的速度是光速的三分之二。传输时间是把一个报文分组的所有比特传输至链路上的时间,它跟链路容量及分组的大小有关。由于传输路径的链路状况在每次测量期间都不会改变,而且我们发送的探测分组都具有相同的报文大小,因此在端到端单向时延里面,确定性时延是一个固定不变的部分。

随机性的时延部分是指链路的排队时延之和。链路上负载着的背景流使得每一个到达链路节点的报文分组都必须在输出接口队列中排队等候。只有当目前正在传输的和此前已经排队等候的分组完成了全部任务后,新到达的分组才能够被处理发送出去。分组在不同的链路节点上经历的排队时延都不相同,文献[15]的研究表明,排队时延受背景流量方差特性的影响远远大于受流量自相似特性的影响。随机性的排队时延是单向时延中变化的部分。

假定 $d^{(j)}$ 表示第 j 个探测分组在传输路径上总的端到端单向时延, $c^{(j)}$ 和 $v^{(j)}$ 分别表示固定和变化的2个时延部分。那么, $d^{(j)} = c^{(j)} + v^{(j)}$,并且对每一次测量期间的任意2个分组 j 和分组 l 都有 $c^{(j)} = c^{(l)}$ 。固定时延 $c^{(j)}$ 可以利用现有的一些方法(如文献[8]提出的全局目标函数优化方法)进行测量,而本文的工作是在不需要考虑 $c^{(j)}$ 的情况下估计动态变化的单向排队时延 $v^{(j)}$ 。

3.2 非时钟同步的端到端测量方法

假设发送一串探测分组对,在第 i 组分组对内,2个探测分组的发送时间间隔为 Δ_i^{in} ,并且所有探测分组对内的发送间隔都相等: $\Delta_1^{\text{in}} = \Delta_2^{\text{in}} = \dots = \Delta_i^{\text{in}} = \dots = \Delta^{\text{in}}$ 。这一串探测分组经过多跳链路的传输后,由于经历了各不相同的单向时延,在接收端的分组对内到达时间间隔也不相同: Δ_1^{out} 、 Δ_2^{out} 、 \dots 、 Δ_i^{out} 、 \dots 其中第 i 组分组对内2个探测分组之间的到达时间间隔可以由式(1)计算

$$\begin{aligned} \Delta_i^{\text{out}} &= \Delta_i^{\text{in}} - d_i^{(1)} + d_i^{(2)} = \Delta_i^{\text{in}} - (c_i^{(1)} + v_i^{(1)}) + \\ &\quad (c_i^{(2)} + v_i^{(2)}) = \Delta^{\text{in}} + (v_i^{(2)} - v_i^{(1)}) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, $d_i^{(1)} = c_i^{(1)} + v_i^{(1)}$ 和 $d_i^{(2)} = c_i^{(2)} + v_i^{(2)}$ 是指第 i 组分组对内第1个和第2个探测分组的端到端单向时延。从式(1)可以看出,探测分组对内2个分组到达时间间隔与发送时间间隔之差就恰恰是它们在传输路径上经历的单向排队时延之差,即

$$x_i = \Delta_i^{\text{out}} - \Delta^{\text{in}} = v_i^{(2)} - v_i^{(1)} \quad (2)$$

注意到 Δ_i^{out} 和 Δ_i^{in} 是分别在接收端和发送端测量的时间间隔, 因此 x_i 表示的是一个准确的时间差测量值, 并不依赖于两端时钟的同步与否。

如果 Δ^{in} 设置得足够大, 使得分组对内的 2 个探测分组不在链路的同一个输出队列中出现, 那么测量期间这一串探测分组经历的端到端单向排队时延就是独立并且同分布的随机变量。令 $f_X(x)$ 和 $f_V(v)$ 分别表示 x_i 和 $v_i^{(1)}$ (或 $v_i^{(2)}$) 的概率密度函数 PDF, 则有

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_V(v+x)f_V(v)dv = \int_0^{+\infty} f_V(t+x)f_V(t)dt \quad (3)$$

显然, 式(3)同时也是 f_V 关于 x 的自相关函数, 因此由自相关定理可以得到

$$\mathfrak{F}[f_X(x)] = F_X = |\mathfrak{F}[f_V(t)]|^2 = |F_V|^2 \quad (4)$$

其中, $\mathfrak{F}[f] = F$ 表示对函数 f 进行傅立叶变换, $|F|$ 是傅立叶变换相应的幅度值。

式(1)~式(4)表明, 无论发送端和接收端之间的时钟是否同步, 只需要在两端分别测量每一组分组对内 2 个报文之间的发送和到达时间间隔, 就可以得到路径端到端单向排队时延概率密度函数的傅立叶变换幅度值

$$|F_V| = \sqrt{F_X} \quad (5)$$

3.3 时延分布重构估计算法

在端到端测量的基础上, 从傅立叶变换幅度值 $|F_V|$ 出发, 重构原始的时间域概率密度函数 $f_V(t)$, 从而获得单向排队时延分布的估计。这类傅立叶域-标准域的重构估计问题普遍存在于图像处理领域。譬如, 含有干扰噪声的图像先以傅立叶变换域的形式记录。然后通过滤除异常频率的干扰信号, 把图像的主要成分从噪声中分辨出来。最后再利用傅立叶相位重构的方法, 将图像信息从傅立叶域恢复至原始的图像坐标域。

偏差缩减算法是其中一个广泛应用的相位重构方法, 它有时也被称作一般化的 Gerchberg-Saxton 算法^[16]。假设在第 k 次迭代中 f_V 的估计值是 g_k , 那么重构算法可以表示为下面 4 个简单的步骤:

1) 对 g_k 进行傅立叶变换, 得到 G_k

$$G_k = \mathfrak{F}[g_k] = |G_k| \exp(j\theta_k) \quad (6)$$

2) 用式(5)测量的结果 $|F_V|$ 代替 G_k 的傅立叶幅

度值 $|G_k|$, 得到 G'_k 。即以 $|F_V|$ 作为傅立叶变换域的约束条件, 计算 F_V 的一个估计值 G'_k

$$G'_k = |F_V| \exp(j\theta_k) \quad (7)$$

3) 对 G'_k 进行傅立叶反变换, 得到 g'_k

$$g'_k = \mathfrak{F}^{-1}[G'_k] \quad (8)$$

4) 以合适的概率密度函数特性作为时间域的约束条件, 对 g'_k 作相应的修正, 得到下一次迭代的新估计值 g_{k+1}

$$g_{k+1} = C\{g'_k\} \quad (9)$$

式(6)~式(9)中, θ_k 表示对应傅立叶变换的相角值, $C\{g'_k\}$ 表示根据 PDF 约束条件对 g'_k 所作的修正。重构算法的关键是确定初始迭代的估计值 g_1 , 以及选择合适的概率密度函数时间域约束条件。

由排队理论^[17]可知, 报文分组在单服务台排队系统的逗留时间 S 符合下面的概率分布

$$P(S > t) = e^{-\mu(1-\rho)t}, \quad t \geq 0 \quad (10)$$

其中, μ 和 ρ 分别是排队系统的服务率和利用率。式(10)表明, 分组逗留时间 S 服从参数为 $\mu(1-\rho)$ 的指数分布, 也即服从参数 $\alpha=1$ 、 $\beta=\mu(1-\rho)$ 的伽马分布。对于包含有 H 个节点的传输路径, 探测分组在每个节点逗留的时间 S_1 、 S_2 、 \dots 、 S_H 为独立的随机变量。如果它们服从参数分别为 (α_1, β) 、 (α_2, β) 、 \dots 、 (α_H, β) 的伽马分布, 那么 $\sum S_h$ 就是一个参数为 $(\alpha=\sum \alpha_h, \beta)$ 的伽马分布。由于探测分组的逗留时间 S 是排队时间 W 和服务时间 B 两者之和, 选择伽马分布的概率密度函数作为迭代重构算法中 f_V 的初始估计值 g_1

$$g_1(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha) \beta^{-\alpha}}, \quad t \geq 0 \quad (11)$$

g_1 的 2 个分布参数 α 和 β 与传输路径的跳数、服务率和利用率有关。尽管在测量期间并不知道这些信息, 但是下一节的讨论结果证明, 重构算法通过傅立叶域和时间域的约束条件调整迭代过程中分布参数的估计, 使得初始估计值的参数设定对最终迭代结果的影响很小。

根据概率密度函数的特性, 选取相应的时间域约束条件, 完成式(9)的修正计算。首先, 在每一次迭代过程中 g_{k+1} 都是排队时延 PDF 的一个估计结果, 所以它必须符合概率密度函数时间域积分等于 1 的要求。也就是说, 可以把概率密度函数在时间坐标的规范性作为其中一个最显著的约束条件, 对

估计函数的曲线幅度进行调整。

另一方面,在利用每一组探测分组对内时间间隔测量值进行迭代估计时,重构算法是以离散化傅立叶变换的形式处理的。对于所求解的排队时延概率密度函数 f_V ,其离散傅立叶变换的幅度值表示为

$$|F_m| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} f_n \exp(j2\pi mn/N) \right| \quad (12)$$

其中,下标 m 和 n 分别表示傅立叶域和时间域的离散取值点,原来的下标 V 和 v 已经省略。显然,式(12)是一组方程,而目标是求解满足给定一组傅立叶幅度值 $|F_m|$ 的 N 点离散函数 f_n 。傅立叶变换的性质表明,实函数 f_n 的傅立叶幅度值具有两边对称的特点,所以上式方程组中有效方程的数目为 $N/2$ 而未知变量的数目为 N 。一般地,在只有傅立叶幅度值的单独条件下是很难确定这 N 个未知变量的,然而,由排队理论^[17]和实际情况可知,只要系统利用率小于1,排队的报文分组就总是能够被处理发送出去,而不会在队列中无限期地等候,说明在每一次测量期间,探测分组排队时延超过足够长时间以后的概率都近似为0。于是,在计算 $|F_m|$ 的时候采用“过采样”(oversampling)的方法,使其包括一部分较长排队时延所对应的傅立叶变换幅度值,从而直接确定这部分排队时延在时间域的分布概率,减少式(12)方程组中未知变量的比例。虽然式(12)不是严格的线性方程组,还是选取2作为过采样的倍数,以0值对 N 个求解变量中的1/2进行估计,使得未知变量的数目与有效方程的数目保持一致。通过实验发现,2倍以上过采样的估计结果与2倍过采样的估计结果几乎完全相同,这与文献[18]的结论一致。由于高倍过采样的方法只增加了式(12)中非独立方程线性组合的数目,对提高估计的准确性没有实质意义,所以没有采用。

如上分析,假定重构算法式(8)步骤中, g'_k 时间域 t 的取值范围是 $[0, T]$,那么由时间域约束条件对式(9)所作的具体修正可表示为

$$g_{k+1}(t) = \frac{g''_k(t)}{\int_0^T g''_k(t) dt}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (13)$$

其中

$$g''_k(t) = \begin{cases} g'_k(t), & 0 \leq t \leq T/2 \\ 0, & T/2 < t \leq T \end{cases} \quad (14)$$

另外,通过计算下面的时间域偏差值来确定重构算法的迭代过程

$$E_k = \frac{\int_0^T |g_{k+1}(t) - g'_k(t)| dt}{\int_0^T |g'_k(t)| dt} \quad (15)$$

随着迭代次数的增加,式(15)的偏差计算值会不断减小,而且一般地,偏差值最开始几次迭代的缩减速度会比后面的快很多^[16]。当偏差减小到一个较小值并开始收敛时,重构算法对排队时延概率密度函数的估计也趋于收敛。在下一节仿真网络的测量估计中,选择了 $(E_k < 0.2, E_k - E_{k-1} < 0.001)$ 作为迭代停止的条件。

上述讨论表明,新方法没有局限于传统方法对单个分组发送和到达时间戳关联测量的研究思路,而是利用相邻分组在两端分别独立测量的时间间隔信息,推导单向排队时延的分布关系,实现非时钟同步的端到端单向测量,再通过傅立叶域至时间域的重构迭代过程,估计排队时延的概率密度函数。由此,新方法总结如下:

① 按照设定的间隔 Δ^m 发送探测分组对,在接收端测量探测分组对内的到达时间间隔 Δ_i^{out} ,根据式(2)计算探测分组在传输路径上经历的单向排队时延之差 x_i ;

② 估计测量数据 $\{x_i\}$ 的概率密度函数 $f_X(x)$;

③ 对函数 $f_X(x)$ 进行傅立叶变换,得到 F_X ,由式(5)计算单向排队时延的傅立叶幅度值 $|F_V|$;

④ 以伽马分布概率密度函数作为初始值,选择时间域的约束条件和修正方法,通过偏差缩减的迭代过程式(6)~式(9),重构时间域的端到端单向排队时延概率密度函数 f_V 。

4 仿真与讨论

采用 NS2 仿真工具来验证新的测量估计方法的有效性。与真实网络环境的实验相比,NS2 仿真平台更有利于搭建多种链路组合的测量路径,而且由于没有直接测量单向排队时延分布特性的现有方法相比较,利用 NS2 可以提取准确的仿真数据,进而验证新方法的测量估计结果。

4.1 仿真环境

图1是一个比较典型的仿真拓扑:发送端和接收端之间由9个路由器组成一个10跳的测量路径。路径上各段链路的容量和传播时延都不尽相同,以此来模拟一个高速骨干网连接低速接入网的网络环境。

radix-2 FFT 算法^[20] (计算复杂度为 $M \lg M$, M 为离散点数), 对每 10s 采集的测量数据进行概率密度函数的重构估计所耗费的时间都不超过 1s。也就是说, 当次测量数据的迭代估计不影响下次测量数据的采集, 表明重构算法具有很好的实时应用性。

然后讨论新方法在估计端到端单向排队时延分布特性方面的准确性。NS2 仿真环境下可以直接测量所有探测分组在传输路径上总的单向时延和确定性时延, 进而计算出探测分组单向排队时延的真实 PDF, 与测量估计的结果进行比较。其中的一组比较如图 3 所示。

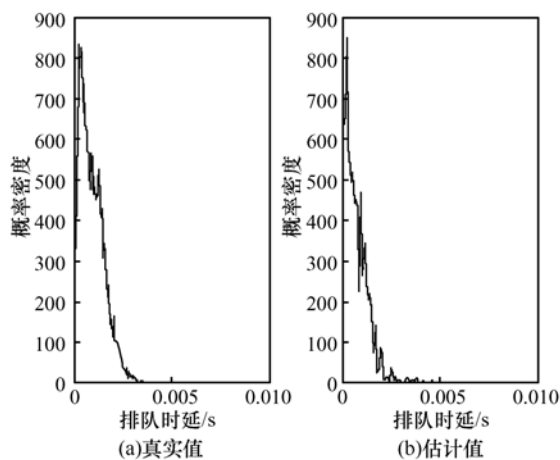


图 3 端到端单向排队时延概率密度函数真实值与估计值的比较

图 3 中, 排队时延 PDF 的估计值和真实值很相近, 表现出相同的分布特点。由这 2 个 PDF 计算出对应的累积分布函数 CDF, 把结果画在图 4 中。

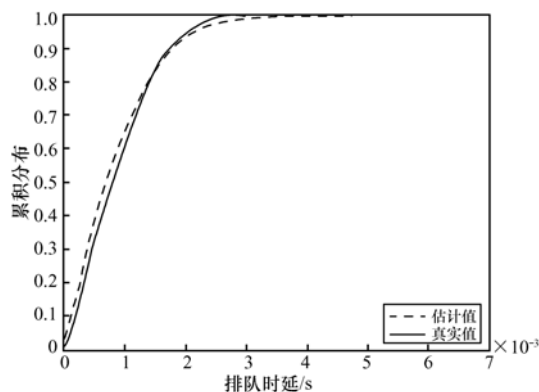


图 4 端到端单向排队时延累积分布函数真实值与估计值的比较

由上可见, 两条 CDF 曲线也基本保持一致。图 3、图 4 的结果都表明, 新方法能够有效地估计端到端单向排队时延的分布特性。

接下来进行 30min 的仿真, 其中每一个 10min

内的背景流量都与前一个 10min 内的有明显不同。在此期间持续测量, 利用重构迭代算法估计的 PDF 计算单向排队时延的期望值, 与真实的排队时延平均值进行比较, 如图 5 所示。

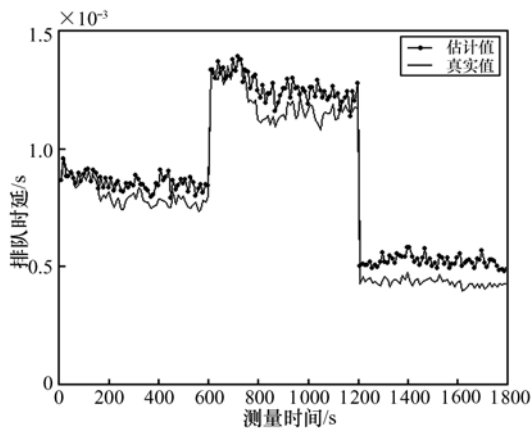


图 5 端到端单向排队时延真实值与估计值的比较

图 5 的结果令人满意。在路径拥塞程度明显不同的 3 个阶段里, 新方法都能够有效地做出测量估计, 准确地反映端到端单向排队时延随背景流量变化而改变的过程。

最后看一下初始迭代 g_1 的参数估计对重构算法最终结果的影响。如前所述, 初始迭代伽马概率密度函数 g_1 的分布参数 α 和 β 与传输路径的跳数、服务率和利用率有关, 而且假设在测量期间我们都不清楚这些信息。引入一个路径跳数 H 、报文大小 P 和利用率 U 的参数组合 (H, P, U) 来表示不同的 α 和 β 初始设定, 将不同的参数组合代入重构算法对测量结果进行迭代, 并在图 6 画出相应的排队时延估计过程。需要注意的是, 这里的参数组合只表示不同的初始估计设定, 并没有任何实际对应的网络意义。

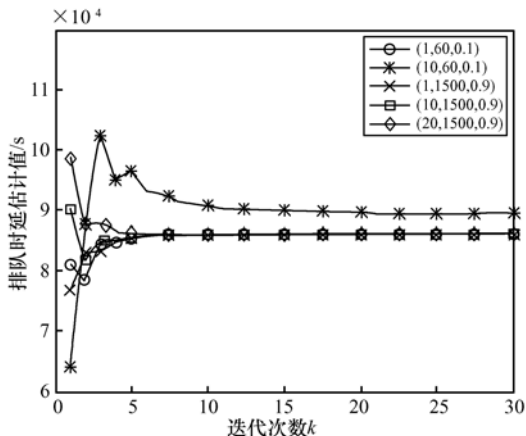


图 6 不同初始参数设定下端到端单向排队时延的迭代估计过程

从图6可以看出,不同的伽马分布初始参数设定都得到了非常相近的迭代估计结果。为了进一步验证重构算法的适用性,假设原始的 f_v 按照正态分布或瑞利分布,仍然以伽马分布PDF作为初始设定进行迭代,得到相应的概率密度函数估计结果,如图7所示。

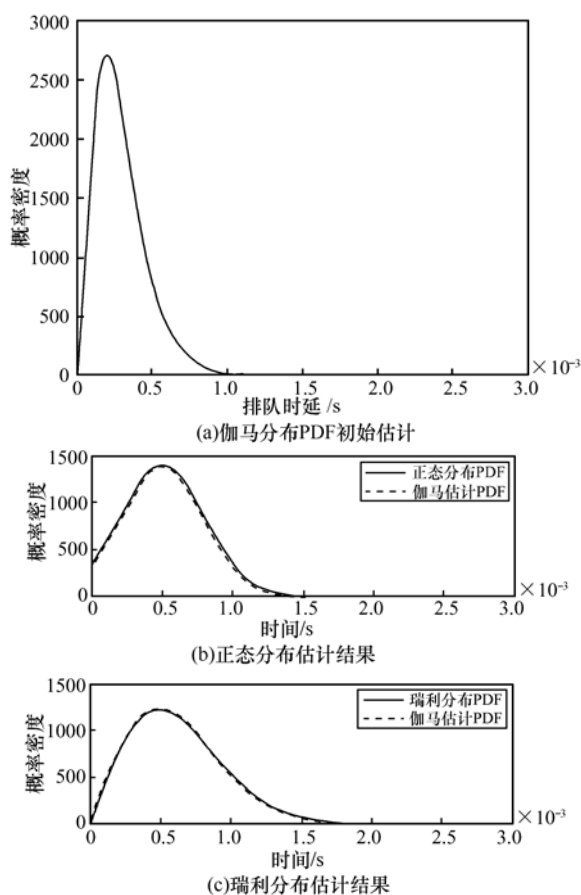


图7 以伽马分布PDF为初始迭代,对正态分布和瑞利分布PDF的重构估计结果

图7表明,即使排队时延概率密度函数不符合严格的伽马分布,但是以伽马PDF作为初始设定的迭代估计算法仍然能够很好地重构原始PDF的分布特点。在每一次迭代步骤中,重构算法都会利用傅立叶域和时间域的约束条件对估计结果进行修正,初始参数的设定对最终结果的影响并不大,所以,本文的新方法具有良好的顽健性。

5 结束语

本文提出了一种非时钟同步的端到端单向排队时延主动测量估计方法。与现有方法相比,它不需要发送端与接收端的时钟同步。新方法通过在发送端和接收端分别测量探测分组对内报文分组之间的时间间隔,得到端到端单向排队时延概率密度函数

的傅立叶幅度值,然后通过偏差缩减的迭代重构算法,估计时间域的概率密度函数,最后计算得到排队时延的分布特性。以伽马分布的概率密度函数作为重构算法的初始估计函数,提出了规范性的时间域约束条件和“过采样”的时间域修正方法。由于该测量估计算法主要采用快速傅立叶变换与反变换计算,收敛速度快,总的计算量小,所以适合于实时应用。仿真结果表明,本文的测量估计方法在快速收敛的同时能够准确地反映排队时延的分布特性,并且对初始参数的设定具有很好的顽健性。

参考文献:

- [1] ALMES G, KALIDINDI S, ZEKAUSKAS M. A one-way delay metric for IPPM [EB/OL]. http://www.ietf.org/rfc/rfe_2679.txt. RFC 2679, 1999.
- [2] 林宇, 程时端, 邬海涛等. IP网端到端性能测量技术研究的进展[J]. 电子学报, 2003, 31(8): 1227-1233.
LIN Y, GHENG S D, WU H T, *et al.* The achievement of end-to-end performance measurement technologies in IP networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(8): 1227-1233.
- [3] PAXSON V. End-to-end internet packet dynamics[J]. IEEE/ACM Transactions on Networks, 1999, 7(3): 277-292.
- [4] MILLS D L. Improved algorithms for synchronizing computer network clocks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networks, 1995, 3(3): 245-254.
- [5] MACGREGOR M H, DITTRICH A, SULLIVAN K. Precise measurement of one-way delays in an NTPv3 environment [A]. SPECTS 2004 [C]. San Jose, 2004. 438-446.
- [6] LUONG D, BIRO J. Partial methods versus end-to-end measurements[EB/OL]. <http://citeseer.ist.psu.edu/382657.html>. 2004.
- [7] TSURU M, TAKINE T, OIE Y. Estimation of clock offset from one-way delay measurement on asymmetric paths [A]. SAIW 2002[C]. New Jersey, 2002. 126-133.
- [8] GUREWITZ O, CIDON I, SIDI M. One-way delay estimation using network-wide measurements [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2710-2724.
- [9] MOON S B, SKELLY P, TOWSLEY D. Estimation and removal of clock skew from network delay measurements [A]. IEEE INFOCOM 1999 [C]. New York, 1999. 227-234.
- [10] WANG J, YANG J, XIE G, *et al.* On-line estimating skew in one-way delay measurement [A]. PDCAT 2003 [C]. Chengdu, 2003. 430-436.
- [11] ZHANG L, LIU Z, XIA C. Clock synchronization algorithms for network measurements[A]. INFOCOM 2002[C]. 2002. 160-169.
- [12] 王洪波, 林宇, 金跃辉等. 一个消除单向时延测量中时钟频差和时钟重置的新方法[J]. 电子学报, 2005, 33(4): 584-589.

(下转第118页)

- 信学报, 2004, 25(5): 175-181.
- ZHAO X W, ZHANG P, WANG T. Robust transmission of adaptive multi-rate speech transcoding[J]. Journal on Communications, 2004, 25(5): 175-181.
- [5] 夏志进, 杨铭, 崔慧娟等. 多禁止符号算术编码高效错误检测算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45 (7): 935-938.
- XIA Z J, YANG M, CUI H J, *et al.* Efficient arithmetic code error detection algorithm with multiple forbidden symbols[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(7): 935-938.
- [6] ANAND R, RAMCHANDRAN K, KOZINTSEV I V. Continuous error detection (CED) for reliable communication [J]. IEEE Trans Commun, 2001, 49 (9): 1540-1549.
- [7] GRANGETTO M, COSMAN P, OLMO G. Joint source/channel coding and MAP decoding of arithmetic codes [J]. IEEE Trans Commun, 2005, 53 (6): 1007-1016.
- [8] GRANGETTO M, MAGLI E, OLMO G. Robust video transmission over error-prone channels via error correcting arithmetic codes [J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7 (12): 596-598.
- [9] GRANGETTO M, SCANAVINO B, OLMO G. Joint source- channel iterative decoding of arithmetic codes [J]. IEEE Commun Society, 2004, 886-890.
- [10] ANDERSON J B, MOHAN S. Source and Channel Coding [M]. Norwell, MA, Kluwer, 1991. 289-390.
- [11] HOWARD P G, VITTER J S. Analysis of arithmetic coding for data compression [J]. Information Processing and Management, 1992, 28: 749-763.
- [12] PETTIJOHN B D, HOFFMAN M W, SAYOOD K. Joint source/channel coding using arithmetic codes [J]. IEEE Trans Commun, 2001, 49 (5): 826-836.
- [13] HAGENAUER J. Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications [J]. IEEE Trans Commun, 1998, 36 (4): 389-400.

作者简介:



刘军清 (1974-), 男, 湖北宣恩人, 博士, 三峡大学电子工程系副教授, 主要研究方向为联合信源信道编码理论及其在视频图像压缩传输中的应用、高清晰度电视等。



李天昊 (1975-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, AMD 研发中心资深工程师, 主要研究方向为视频编码新技术、高清晰度电视等。

(上接第 111 页)

- WANG H B, LIN Y, JIN Y H, *et al.* A new approach for removing clock skew and resets from one-way delay measurement[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(4): 584-589.
- [13] BAMBA G, STEVE U, ARTUR Z, *et al.* Leveraging buffering delay estimation for geolocation of Internet hosts[A]. IFIP Networking 2006[C]. Coimbra, 2006. 319-330.
- [14] 赵金, 陈鸣. 网络非对称链路带宽的测量[J]. 电子科技大学学报, 2002, 31 (4): 404-408.
- ZHAO J, CHEN M. Measuring asymmetric link bandwidth[J]. Journal of UEST of China, 2002, 31(4): 404-408.
- [15] 宋丽华, 陈鸣, 仇小锋. 网络流量特征对排队性能影响的仿真分析与比较 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (1): 25-28.
- SONG L H, CHEN M, QIU X F. Simulation & comparison of impact of traffic characteristics on queuing performance[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(1): 25-28.
- [16] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-246.
- [17] ADAN I, RESING J. Queuing theory [EB/OL]. <http://www.cs.duke.edu/~fishai/misc/queue.pdf>. Eindhoven University of Technology, 2001.
- [18] MIAO J, SAYRE D, CHAPMAN H N. Phase retrieval from the magnitude of the Fourier transforms of nonperiodic objects [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15 (6): 1662-1669.
- [19] MAWI working group traffic archive[EB/OL]. [http:// tracer.csl.sony.co.jp/mawi/](http://tracer.csl.sony.co.jp/mawi/).
- [20] ROBERT D P. Very fast computation of the radix-2 discrete Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1982, 30 (4): 595-607.

作者简介:



古炜旋 (1979-), 男, 广东广州人, 中山大学博士生, 主要研究方向为计算机网络与通信。

余顺争 (1958-), 男, 江西南昌人, 中山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络与通信。