

基于 IP 网络规划与设计的抖动模型的研究

刘步中

(淮安信息职业技术学院 电子工程学院, 江苏 淮安 223003)

摘 要: 提出了一个典型的模型, 该模型考虑到包延时的相关性和串联队列的相关性, 这对端到端的抖动有重要影响。针对一个单队列的 Poisson 流量分布的抖动, 给出了一个非常易于计算的公式, 然后推广到基于串联队列的标记流的端到端抖动。通过模拟实验可以发现, 模型的分析值和模拟值基本吻合, 在大流量背景下更为精确, 更重要的是对于抖动而言该值是可信的, 这样就可以用于网络设计过程中。

关键词: 抖动模型; 流量技术; IP 网络规划

中图分类号: TP393.08 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)04-1540-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.094

Jitter model for IP network planning and design

LIU Bu-zhong

(Dept. of Electronics, Huaian College of Information Technology, Huaian Jiangsu 223003, China)

Abstract: This paper proposed a simple model for the delay jitter that was fast enough to be used in networks design algorithms. It took into account the packets delay correlation and also the correlation of tandem queues that had a significant impact on the end-to-end jitter. It presented simple formulas for the jitter of Poisson traffic in a single queue that could be calculated quickly. It then extended them to the end-to-end jitter of a tagged stream based on a tandem queueing network. It could find analytical values were simulation values are consistent by network simulation, and very accurate for Poisson traffic over a wide range of traffic loads. More importantly they yield conservative values for the jitter so that they can be used in network design procedures.

Key words: jitter model; traffic engineering; IP network planning

随着 VoIP、视频点播、远程教育、视频会议等实时流媒体应用的增多, Internet 传统的传输方式已不能满足这些实时应用的 QoS 要求。QoS 主要用来描述这些实时应用通信双方的传输质量, 它由吞吐量、延迟、延迟抖动、丢包率等参数描述。其中延迟抖动对于实时应用的 QoS 的影响尤为重要。

本文提出了针对于 Poisson 队列的流量所得到的对于抖动的计算结果, 但也同样适用于其他情形。首先本文在单节点情况下对于端到端的延时抖动提出了一种精确的表达, 单个网络节点所引起的抖动受包平均传输延迟和包平均服务时间的限制。把这个模型扩展到一个串联队列网络中, 并得到沿路径传输端到端的延时抖动的近似表达式。当与 Poisson 流量的模拟结果比较时, 同样发现模型的精确性很好。这项技术可以广泛用于网络设计工具中, 可以帮助管理人员改进网络的性能, 提供抖动和延时的 QoS 限制的网络优化。

1 抖动的定义

本文应用 IETF 关于抖动的定义, 假定 T_j 代表第 j 个数据包通过传输路径所经历的延时。在标记流 (tagged flow) 中的两个连续包的传输时间差值可以写成

$$J_j = T_{j+1} - T_j \quad (1)$$

J_j 可正可负。平均端到端延迟抖动可以通过随机变量绝对值期望来表示:

$$J = E[|T_{j+1} - T_j|] \quad (2)$$

在这种情形的网络中, 假定 $T_j(n)$ 是在节点 n 的第 j 个数

据包延迟时间, 那么通过 N 个连续节点的标记流的端到端抖动可以表示为^[1]

$$T_{[1...N]} = E[|\sum_{n=1}^N T_{j+1}(n) - T_j(n)|] \quad (3)$$

2 单队列的抖动模型

单队列的抖动模型是只考虑一种单队列的情况, 其拥有足够大的缓冲区且属于 FCFS。假定有 K 个数据包流量到达队列, 每一个数据包流都有不同的到达时间和包长度, 对其中一个特别的流 K 作研究, 称之为标记流 (tagged flow)。除非有特殊的说明, 所有的这些流都是到达速率为 λ_j 的 Poisson 队列, 所有的服务时间分布都是参数为 μ_j 的负指数分布。对于所到达的标记流的速率比其他流过大或是过小这两种情况, 提供准确的公式, 同时通过仿真对中间情况给出合适的公式。为了叙述方便, 引用如下定义: λ 为总的到达速率, $\lambda = \sum_{j=1}^K \lambda_j$; λ_k 为标记流的到达率; λ_0 为背景到达率, $\lambda_0 = \lambda - \lambda_k$ 。下面分别就标记流到达速率较小、较大, 及中间情形进行分析^[2]。

2.1 到达速率较小的情形

假定 $\lambda_k < \lambda_0$, 在这种情况下, 流 k 的两个数据包就会被许多其他流的数据包分隔开, 此时可以忽略两个连续包的传输延迟之间的相互关系。假定 T_{j+1} 和 T_j 是两个独立的随机变量 (因为 T_j 是数据包在队列的逗留时间), 它们是带有参数为 $\eta = u - \lambda$ 的负指数分布。指数分布具有如下性质: 假定 X_1 和 X_2 是两个连续独立同分布的随机变量, 其分布函数为 f , 且仅

当 f 为指数分布时随机变量 $|X_1 - X_2|$ 的分布也为 f 。由于 T_{j+1} 和 T_j 是独立同分布,那么 $|T_{j+1} - T_j|$ 也与之同分布。通过以上分析可得如下命题:当标记流的到达率较小时,抖动公式^[3]如下:

$$J = E[|T_{j+1} - T_j|] = \frac{1}{\eta}, \eta = \mu - \lambda \quad (4)$$

2.2 到达速率较大的情形

接下来考虑 $\lambda_k \approx \lambda$ 的情形。在这种情形中可忽略其他的数据流,仅考虑队列中只有一个数据流。前面所提及的命题显然已不再适用,因为两个连续数据包的逗留时间很明显不独立了,必须考虑到两个连续包之间传输时间之间的相互关系。

首先引入如下定义: t_n 为数据包 n 的到达时间; $I_n = t_n - t_{n-1}$ 为间隙时间; r_n 为数据包 n 的离开时间; W_n 为数据包 n 的等待时间; S_n 为数据包 n 的服务时间; T_n 为数据包 n 的传输时间,且 $T_n = W_n + S_n$ 。可以得到

$$W_{n+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } r_n \leq t_{n+1} \\ W_n + S_n - (t_{n+1} - t_n) & \text{if } r_n > t_{n+1} \end{cases} \quad (5)$$

所以得到

$$T_{n+1} - T_n = \max(S_{n+1} - T_n, S_{n+1} - I_{n+1}) \quad (6)$$

随机变量 T_n, S_{n+1}, I_{n+1} 是独立的,并且这三个随机变量中任一个的分布对于所有的 n 都是一样的,可以得到

$$J = E[|T_{j+1} - T_j|] = \int_0^\infty I(i) \left\{ \int_0^\infty S(s) \left[\int_0^\infty |s-x| T(x) dx + |s-i| \int_i^\infty T(x) dx \right] ds \right\} di \quad (7)$$

此表达式完全是通用的,现在假定分布是指数的,也即

$$T(x) = \eta e^{-\eta x}, S(s) = \mu e^{-\mu s}; I(i) = \lambda e^{-\lambda i} \quad (8)$$

计算式(7)并且得到

$$J = \eta \mu \lambda (A + B) \quad (9)$$

其中:

$$A = \frac{1}{\mu^2} \left(\frac{1}{\lambda \eta} - \frac{1}{\eta \mu} \right) \quad (10)$$

$$B = \frac{1}{\mu^2} \frac{1}{\eta \mu} \quad (11)$$

代入得到 $J = \frac{1}{\mu}$ 。可以得到下面命题:如果标记流到达率较大时,它的抖动可以由式(12)给出:

$$J = E[|T_{j+1} - T_j|] = \frac{1}{\mu} \quad (12)$$

2.3 中间情形

除了标记流以外的流量称为背景流,背景是一个由其他数据流组成的参数为 λ_0 的Poisson流,整个流量负载 ρ 的值为

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda_k + \lambda_0}{\mu} \quad (13)$$

带有参数 λ_k 的Poisson分布的标记流 K 抖动为 $J^k, J^k = E[|T_i^k - T_{i-1}^k|]$,其中 T_i^k 是流 k 第 i 个数据包的延迟。

在这种情况下,本文仅提出了在轻负载下的近似情形,标记流的两个连续包为 P_i 和 P_{i+1} ,相应的延时为 T_i 和 T_{i+1} 。轻负载的假设可以规定为:在一个轻负载的系统中,当流 K 的包 P_{i+1} 到达队列时 P_i 已经离开系统。考虑到到达队列为带有参数 λ_k 的Poisson队列,包 P_i 和 P_{i+1} 之间的平均时间为 $\tau_k = \frac{1}{\lambda_k}$ 。轻负载的假设可表示为

$$P_r\{T_i > \tau_k\} \approx 0 \quad (14)$$

文献[4]给出了这种情形下,标记流在单节点所产生的端到端的抖动可近似为

$$J^k \approx \frac{1}{\eta} f(\tau_k, \eta) \quad (15)$$

其中: $f(\tau_k, \eta) = 1 - e^{-\eta \tau_k} (\eta \tau_k + e^{-\eta \tau_k})$ (16)

在这个方程中,表达式 $1 - f(\tau_k, \eta)$ 可以看做是流 k 的两个连续包之间相关性的估计值^[5]。

对式(15)分析可以发现:如果 $\lambda_k \approx 0$ 那么 $\tau_k \approx \infty$,可以得到 $J^k \approx \frac{1}{\eta}$,这符合到达速率较小情况下所提出的结论。当标记流占主导地位,即 $\lambda_k \approx \lambda$,这样 $\eta \tau_k \approx (1 - \rho)\rho$ 。在此情况下,可以得到: $J \approx \frac{1}{\eta} [1 - e^{\frac{(\rho-1)}{\rho}} (\frac{1-\rho}{\rho} + e^{\frac{\rho-1}{\rho}})]$ 。考虑 ρ 的两个极端值。如果 $\rho \approx 0$,可以看到指数值会非常小,那么 $J \approx \frac{1}{\eta}$ 。换句话说当 ρ 很小时,抖动不取决于标记流的比例。如果 $\rho \approx 1$ 那么 $\eta \tau_k \approx 0$,在展开指数到一阶后,可以得到 $J \approx \frac{1}{\mu}$ 。也就是说:如果 ρ 很小,那么整个流量就会很小, J 相对而言对标记流所占比例不敏感;而当 ρ 很大时,才会对标记流的比例更敏感^[6]。这种情况在表1中得到表示。

2.4 验证

假定数据包的大小分布是指数的且平均大小为1 KB, C 是链路的通信能力,单位是bps。数据包的平均服务时间为 $\frac{1}{\mu} = \frac{L}{C}$ 。在实验中假定链路的最大传输能力为 $C = 622$ Mbps, X 轴代表标记流的权重为 $\frac{\lambda_k}{\lambda}$, Y 轴为抖动值规格化为最大值的 $\frac{1}{\eta}$ 。

模型通过比较图1中的模拟结果可以得到验证,三条曲线规定为 ρ 的值为0.1,0.5,0.9。在每一种情况下, λ_k 的值从0增加到 λ ,而其他流作相应减小以使 λ 保持常数。每两条曲线分别显示了分析结果和模拟结果^[7]。

对于较低负载的情形,即 $\rho = 0.1$ 时,模型对 λ_k 的权重非常不敏感,但是事实上,随着 λ_k 的增加,抖动的值有一点减少。对于中和高负载而言,即 $\rho = 0.5, \rho = 0.9$ 时,分析值和仿真值对于较小的权重时吻合情况一般,但当权重较大时,可以看到趋于重合,所以对较高权重的吻合情况很好。但重要的是这样的模型是保守的,它给出的抖动值要比实际值稍高。

表1 J 的极限值

ρ	0	λ
0	$1/\eta$	$1/\eta$
0	$1/\eta$	$1/\mu$

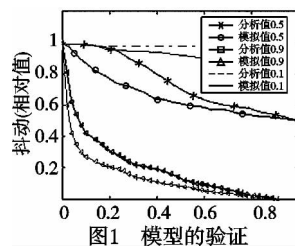


图1 模型的验证

3 多节点情形

多节点的抖动是在每一个节点的几个数据流的多路复用以及在一节节点的到达时间和其前一节点的服务时间之间的相关性,沿着一条路径对于抖动的估计要比单节点复杂得多。

计算标记流 K 通过 N 个节点的端到端的抖动,其他的数据流同样称之为背景流量,正如图2中所表示的网络。在每一个节点,标记流 K 在FCFS原则下多路复用。假定 $\lambda_k^{(n)}$ 为在节点 n 的数据流 K 的数据包到达率, $\lambda_0^{(n)}$ 为同一节点背景流量的到达率。所有数据包的服务时间是参数为 μ 的负指数分布。

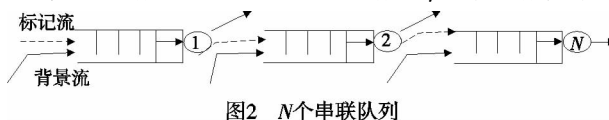


图2 N 个串联队列

假定 $T_j(n)$ 为数据包 j 通过节点 n 的延迟, 标记流 K 的路径抖动由式(3)给出, 很明显

$$J_{[1 \dots N]}^k \leq \sum_{n=1}^N J_n^k \quad (17)$$

其中, J_n^k 是由式(16)所给出的节点 n 上流 K 的抖动。路径上各节点的抖动总和大于路径的真正抖动值。直接计算式(3)并不容易, 但是可以用一个简单的近似值来得到抖动函数。

3.1 串联队列中的相关性

对于两个串联队列(tandem queue), 第二队列的延迟取决于第一个队列的服务时间, 这个相关性对第二队列的抖动有所影响, 也对端到端的抖动有影响。在图3中给出了对两个串联队列所引起的抖动所作的一些仿真。可以看到, 第二队列的抖动比第一队列要低, 同时也可以看到当标记流速率增加时, 两个队列抖动增加的区别。下面对于多节点情形给出了一个分析模型, 该模型充分体现了串联队列间的抖动相关性。

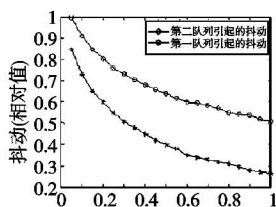


图3 串联队列间的相关性对标记流的影响

3.2 分析模型

从图3及分析可假定第二队列抖动有如下形式:

$$J_2^k = K(\lambda_k^{(n)}, \eta_2) \frac{1}{\eta_2} f(\tau_k + J_1^k, \eta_2) \quad (18)$$

其中, $K(\lambda_k^{(n)}, \eta_2)$ 取决于第二个队列入口处的延迟相关程度。 J_1^k 是由式(15)给出的第一队列的抖动。如果可以估计出延时的相关性, 问题就可以得到解决了。

假定 $q_i^{(n)}$ 为流 K 在队列 n 的第 i 次到达时队列的占有率。应用指数分布的无记忆性的特性, 流 K 的节点延时可以通过式(6)表示为

$$T_n^{(k)} = \sum_{m=1}^{q_i^{(n)} + 1} s_n^m \quad (19)$$

其中, s_n^m 为队列 n 中第 m 个数据包的服务时间。

$q_i^{(n)}$ 的自相关函数由文献[8]给出:

$$E[q_i^{(n)} q_{i+1}^{(n)}] = \int_0^\infty R_q^{(n)}(t) g^{(n)}(t) dt \quad (20)$$

其中, $g^{(n)}(t)$ 是带参数 $\lambda_k^{(n)}$ 的指数分布, $R_q^{(n)}(t)$ 是在时间间隔 t 的自相关函数。对于 $R_q^{(n)}(t)$ 的粗略估计由文献[5]给出:

$$R_q^{(n)}(t) \approx \frac{L_n^2 + R_n^2 e^{-\frac{\mu}{R_n} t}}{L_n^2 + R_n^2} \quad (21)$$

其中, 队列长度的均值为 $L_n = \frac{\rho_n}{(1-\rho_n)}$, 均方为 $R_n^2 = \rho/(1-\rho_n)^2$ 。

下面可以从式(20)(21)得到流 K 的数据包的自相关函数:

$$E[q_i^{(n)} q_{i+1}^{(n)}] = \frac{1}{L_n^2 + R_n^2} \left(L_n^2 + \frac{\lambda_k^{(n)} R_n^2}{\lambda_k^{(n)} + \frac{\mu}{R_n}} \right) \quad (22)$$

为了计算抖动, 取

$$K(\lambda_k^{(n)}, \eta_n) = 1 - E[q_i^{(n)} q_{i+1}^{(n)}] \quad (23)$$

这样在多节点的情况下, 标记流的端到端的抖动可以近似由以下命题得到: 标记流通过 N 个网络节点的端到端的抖动可以近似由下面公式得到

$$J_{[1 \dots N]}^k \approx \frac{1}{\eta_1} f(\tau_k, \eta_1) + \sum_{n=2}^N \frac{1}{\eta_n} K(\lambda_k^{(n)}, \eta_n) f(\tau_k^{(n)}, \eta_n) \quad (24)$$

其中: $\eta_n = \mu(1 - \rho_n)$, $\tau_k^{(n)} = \tau_k + \sum_{i=2}^n J_{i-1}^k$, $\lambda_k^{(n)} = \frac{1}{\tau_k^{(n)}}$, $f(\tau_k^{(n)}, \eta_n)$ 由式(16)给出^[9]。

3.3 模型的验证

可以通过比较分析结果和模拟结果来估计式(24)的正确性。通过计算四个串联队列的抖动估计, 每一个有一个不同的负载 ρ_n , 它可以看做标记流的影响因素的函数。两条标记为端到端抖动的曲线代表了从路径的起点到终点的抖动。标记为“分析”的曲线是用式(24)得到的结果, 另一个是用模拟度量得到的结果。观察图4和5可以得出下面重要的结论, 对于 Poisson 流量而言, 分析模型对于在一个大范围的流量负载的情况下有非常好的近似。正如在前面所提及的, 任何基于这个模型的度量工具将会产生一个保守的设计, 实际的抖动将会比计划的抖动要低。

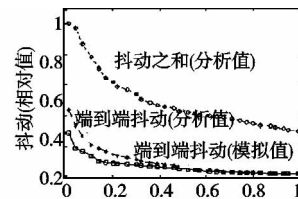


图4 ρ 分别为 0.3、0.5、0.5、0.8 的四个串联队列的抖动值和到达速率的对比

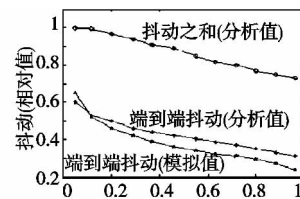


图5 ρ 分别为 0.6、0.7、0.7、0.9 的四个串联队列的抖动值和到达速率的对比

4 结束语

本文提出了一个对于 Poisson 流量的端到端抖动的分析计算, 并与模拟值进行比较, 实验结果比较满意, 这说明抖动计算可以交互或是直接用于网络设计算法中。本文已经给出了通过单节点和通过多个节点的串联队列抖动的简单公式。本文表明在单一网络的情况下, 抖动是有界的, 可以通过数据包的平均服务时间和平均传输时间来表示, 同时表明了随着数据包沿着路径向前推进, 抖动减少。抖动对于 Poisson 流量而言还是比较精确的, 更重要的是分析值要比实际值大, 这表明基于它们的设计工具将会设计出一个保守的解决方案, 这会很容易达到 QoS 的要求。

参考文献:

- [1] CHUNG J, SOO H. Jitter analysis of homogeneous traffic in differentiated services networks [J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(3): 130-132.
- [2] BURN O, BOOKSTALL C, GARCIA J. Analytical approximation of the jitter incurred by CBR traffics in IP networks [J]. Telecommunication System Journal, 2006, 33(1-3): 23-45.
- [3] DEMICHELIS C, CHIMENTO P. RFC 3393, IP packet delay variation metric for IP performance metrics (IPPM) [S]. [S. l.]: IETF, 2002.
- [4] 杨春德, 杨孝田. 一种时延受限的最优时延抖动路由算法 [J]. 计算机工程, 2009, 35(14): 125-127.
- [5] 周康, 袁楷, 吴宇红. VoIP 系统中时延抖动的研究与实现 [J]. 电子科技, 2007(1): 51-56.
- [6] 徐勋业, 熊中柱, 王志军. VoIP 语音时延的分析和研究 [J]. 光通信研究, 2007(139): 11-15.
- [7] 王海兰. 网络延迟和抖动研究及在多媒体传输中的应用 [D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- [8] ALSHAER H, ELMIRGHANI J. Expedited forwarding end-to-end delay and jitter in DiffServ [J]. International Journal of Communication Systems, 2008, 21(8): 815-841.
- [9] 黎敏, 邓少波. 基于延迟抖动流媒体传输 QoS 机制 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 33(5): 490-495.