

基于 D/G/1 排队的多路径并行传输机制延迟研究^①

郑 坤^{②*} 刘 敏^{*} 李忠诚^{③*}

(^{*}中国科学院计算技术研究所网络技术研究中心 北京 100190)

(^{**}中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 为了精确描述多路径并行传输网络中的数据包平均端到端延迟,提出了一种基于 D/G/1 排队的多路径并行传输机制延迟分析模型。该模型假设数据包相互独立,并随机地选择传输路径。同时各路径的传输延迟相互独立,并且服从一般分布。与已有研究相比,该模型是基于路径为 D/G/1 排队而建立的,可适用于大多数网络场景的路径延迟分布条件,并且能够给出一个长期传输会话中的数据包平均整序延迟和端到端延迟。特别地,以指数分布这一重要概率分布为例,利用所提出的模型给出了数据包延迟的直接分析结果。仿真实验表明,该模型可以准确地估测多路径并行传输场景中的数据包延迟,能够满足多路径并行传输的算法设计和性能优化的需求。

关键词 多宿性,多路径,数据包乱序,整序延迟

0 引言

下一代无线互联网的典型特征是异构网络重叠覆盖,并且多模移动终端可为用户提供与多个网络之间的并行连接。在此环境下,端到端多路径并行传输可以充分利用网络资源,有效提高端到端传输吞吐量,平衡网络负荷。但异构多宿环境的并行传输导致严重的数据包乱序,并引发可靠传输协议的整序过程和严重的延迟开销。本文以此背景进行了研究,在分析基于 D/G/1 排队的多路径并行传输网络的基础上,提出了一种数据包平均整序延迟和端到端延迟的分析模型。该模型可准确地估测多路径并行传输中的数据包延迟,能够满足多路径并行传输的算法设计和性能优化的要求。

1 研究背景分析

下一代互联网的典型特征包括网络和终端的多宿性(multihoming)和重叠覆盖性(overlapping)。在多宿性和重叠覆盖性环境中,多路径并行传输(multipath transfer)技术能够将数据分散在多条独立的

端到端路径上同时传输,汇聚网络带宽资源,提高系统传输吞吐量和资源利用率,同时平衡网络负载。由于互联网,特别是无线网络环境具有动态变化和异构互联等性质,使顺序发送的数据包以乱序序列抵达接收端,给端到端可靠传输协议带来多种负面开销。互联网可靠传输协议如传输控制协议(TCP)、流控制传输协议(stream control transmission protocol, SCTP)均通过对乱序数据包进行重新排序,即整序(resequencing)过程,以保障数据传输的有序性。对乱序数据包的整序过程引入了时间开销(整序延迟)和空间开销(整序缓冲),其中整序延迟是累加在端到端延迟的额外开销,是许多延迟敏感型业务服务质量的关键指标。因此,建立可靠传输协议整序延迟和端到端延迟的分析模型,对提高网络传输性能、保证应用业务服务质量、优化网络协议等,均具有极其重要的研究意义。

互联网环境中数据包乱序的原因包括丢包、动态路由和多路径并行传输。这些原因使数据包端到端延迟表现出一定的随机分布,因此数据包乱序可以看做在一条路径上的随机分布和在多条异构路径上服从不同的随机分布的共同结果。传统的相关研究主要是基于单路径网络环境,此类研究假设数据

① 973 计划(2007CB310702),国家自然科学基金(60803140,60970133)和北京科技新星计划(2009B49)资助项目。

② 男,1978 年生,博士生;研究方向:下一代互联网和多宿性传输协议;E-mail:zhengkun@ict.ac.cn

③ 通讯作者,E-mail:zeli@ict.ac.cn

(收稿日期:2010-06-11)

包乱序的原因是单条路径的数据包延迟随机分布。但是基于单路径的整序延迟研究并不适用于多路径网络情况,这是因为在多路径网络中,影响数据包乱序的因素除了单条路径延迟的随机分布之外,还包括不同路径的延迟分布差异和数据包的路径选择概率。文献[1]最早针对多路径并行传输的整序延迟展开了研究,基于 M/G/1 路径得到整序延迟的统计均衡(statistical equilibrium)模型,但是没有给出整序延迟和端到端延迟的直接结果。文献[2]建立了由 2 条异构 M/M/1 排队的模型,同时还提出了固定延迟路径条件下数据流的最优路径选择算法。文献[3]基于重尾分布假设,得到了对 2 条异构的 G/M/1 的整序延迟的渐进估计(asymptotic estimation)。文献[4]引入了一个整序指标 γ , 基于路径延迟重尾分布和轻尾分布两种假设,对 K 条 M/G/1 路径整序延迟的尾分布进行渐进估计研究。Li 等人^[5]针对多信道停止并等待自动重发请求(ARQ)协议的整序延迟和整序缓冲进行了研究。以上研究均假设数据包选择路径是随机路由,或者伯努利过程。文献[6-8]考虑确定性路由机制下的平均数据包整序延迟和端到端延迟,这类研究适用于特定应用环境下的各种地址解析协议(ARP)。另外文献[9]考虑无线 Ad Hoc 网络环境下由于多路径传输的整序延迟问题。综上所述,已有的大多数多路径并行传输的延迟模型只针对特定网络环境,适用性有限。而且以上模型普遍使用的是统计均衡和渐进估计等建模方法,在精度上难以满足多路径并行传输协议对整序延迟和端到端延迟的估测要求。

针对上述情况,本研究从异构多路径并行传输中的乱序分析入手,分析数据包平均整序延迟和端到端延迟,提出了一种基于 D/G/1 路径的数据包整序延迟和端到端延迟的分析模型。数据包发送间隔为恒定常数的假设条件与目前互联网,特别与高速网络的实际环境相符合。同时,基于路径一般分布的假设条件使该模型适用于大多数网络环境。相比统计均衡模型和渐进估计模型,本文所提出的模型可以更准确地估测数据包的平均整序延迟和端到端延迟。

2 基于 D/G/1 排队的多路径并行传输延迟分析模型

一个典型的由 D/G/1 排队组成的多路径并行

传输网络拓扑图,如图 1 所示。

($\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$)为一对相互通信的主机,分别表示发送端和接收端。通信网络由 N 条独立的端到端传输路径组成,其中路径 k 的传输延迟 x_k 服从一般分布 $X_k(\cdot)$ 。

在发送端 $\mathcal{A}$,每个数据包被分配一个唯一的序列号 i , ($i \geq 0$),并按照增序序列发送。任意相邻数据包的发送间隔时间为常量 τ ,并独立地以概率 p_k 被分配到路径 k 传输,因此有 $\sum_{k=1}^N p_k = 1$ 。由于路径延迟的随机性和不同路径延迟分布的差异,使顺序发送的数据包会乱序抵达接收端 $\mathcal{B}$,在整序缓冲内排队的时间为 R 。根据以上多路径并行传输网络的假设条件,数据包 i 的发送时间为 $S_i = i \cdot \tau$,抵达接收端的时间为 $A_i = S_i + D_i$,其中 D_i 表示该数据包 i 在多路径网络中的传输延迟。

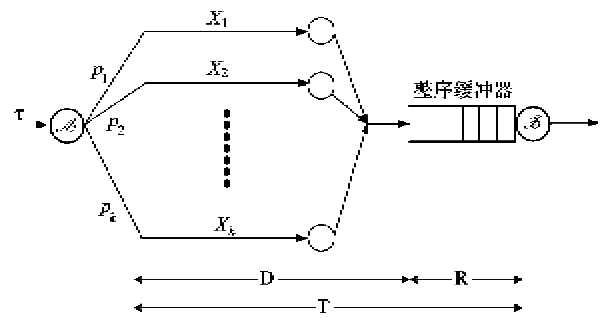


图1 多路径并行传输网络拓扑图

2.1 数据包整序延迟与端到端延迟的基本模型

在不考虑网络拓扑的一般情况下,数据包的端到端延迟 T 由网络中的传输延迟 D 和接收端的整序延迟 R 组成,即数据包 i 的端到端延迟 T_i 、整序延迟 R_i 和中间路径延迟 D_i 存在如下关系:

$$T_i = D_i + R_i \quad (1)$$

数据包 i 的整序延迟 R_i 的定义为:从数据包 i 抵达接收端开始,直至所有序列号小于等于 i 的数据包全部抵达接收端为止的时间间隔,因此有

$$R_i = \max_{0 \leq j \leq i} (A_j) - A_i \quad (2)$$

$$T_i = D_i + \max_{0 \leq j \leq i} (A_j) - A_i = \max_{0 \leq j \leq i} (A_j) - S_i \quad (3)$$

对于一个长期数据传输业务,与应用业务服务质量直接相关的是平均每个数据包的整序延迟与端到端延迟的期望,亦即数据包序列号 i 趋向 $+\infty$ 时的整序延迟和端到端延迟的极限值,因此有

$$E(R) = \lim_{i \rightarrow \infty} E(R_i) = \lim_{i \rightarrow \infty} \{E[\max_{0 \leq j \leq i} (A_j)] - EA_i\} \quad (4)$$

$$E(T) = \lim_{i \rightarrow \infty} E(T_i) = \lim_{i \rightarrow \infty} \{E[\max_{0 \leq j \leq i} (A_j)] - ES_i\} \quad (5)$$

2.2 多路径并行传输网络整序延迟与端到端延迟

在单路径网络中, 设数据包 i 在网络中的传输延迟 $D_i = x, x \sim X(\cdot)$ 表示单路径的随机延迟服从分布 $X(\cdot)$, 因此数据包 i 的传输延迟的期望满足 $E(D_i) = E(x)$ 。但在多路径并行传输网络中, 单个数据包传输延迟的期望是其经由所有路径延迟的均值, 即

$$E(D_i) = \sum_{k=1}^N p_k E(x_k) \quad (6)$$

在此, 定义数据包 i 经过路径 k 的端到端延迟、整序延迟和路径传输延迟分别为 $T_{i,k}$, $R_{i,k}$ 和 $D_{i,k}$, 这些变量根据整序延迟的定义, 满足如下关系:

$$R_{i,k} = \max_{0 \leq j \leq i} A_j - A_{i,k} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} T_{i,k} &= D_{i,k} + R_{i,k} \\ &= A_{i,k} - S_i + \max_{0 \leq j < i} A_j - A_{i,k} \\ &= \max_{0 \leq j \leq i} A_j - S_i \end{aligned} \quad (8)$$

由于 $EA_i = \sum_{k=1}^N p_k A_{i,k}$, 所以多路径并行传输网络中数据包 i 的端到端延迟和整序延迟的期望为

$$ER_i = \sum_{k=1}^N p_k R_{i,k} = E(\max_{0 \leq j \leq i} A_j) - EA_i \quad (9)$$

$$ET_i = \sum_{k=1}^N p_k T_{i,k} = E(\max_{0 \leq j \leq i} A_j) - ES_i \quad (10)$$

将 $i \rightarrow \infty$, 便获得了多路径并行传输的数据包平均整序延迟和端到端延迟。从式(9)、(10)可以看出, 求解数据包 i 的端到端延迟和整序延迟这一问题的关键在于获得 $\max(A_j)$ 的分布函数, 其中 $0 \leq j \leq i$ 。

对此问题, 展开如下分析: 根据多路径并行传输网络的假设条件, 数据包在传输过程相互独立。因此考虑一个有限的数据包传输序列: $\{0, 1, 2, 3, \dots, i\}$, 该序列中最迟抵达接收端的数据包, 其抵达时间小于等于时间 t 的事件等价于所有小于 i 的数据包抵达时间均小于等于 t 的事件, 也就是有

$$\Pr(\max_{0 \leq j \leq i} A_j \leq t) = \prod_{j=0}^{i-1} \Pr(A_j \leq t) \quad (11)$$

其中数据包 j 的抵达时间 A_j 的概率满足

$$\begin{aligned} \Pr(A_j \leq t) &= \Pr(D_j \leq t - S_j) \\ &= \int_0^{t-S_j} \sum_{k=1}^N p_k X_k(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $X_k(\cdot)$ 为路径 k 延迟的概率密度函数。

通过式(11)、(12), 得到 $\max(A_j)$ 的分布函数为

$$F_{\max(A_j)}(t) = \prod_{k=1}^N \int_0^{t-S_j} \sum_{k=1}^N p_k X_k(\xi) d\xi \quad (13)$$

对于数据包 i , 其抵达接收端时间 A_i 的分布函数为

$$F_{A_i}(t) = \int_0^{t-S_i} \sum_{k=1}^N p_k X_k(\xi) d\xi \quad (14)$$

假设 $\max(A_j)$ 的概率密度函数为 $f_{\max(A_j)}(t)$, 利用分部积分, 可以从式(13)、(14)中推出 $\max(A_j)$ 和 A_i 的期望

$$\begin{aligned} E[\max(A_j)] &= \int_0^\infty f_{\max(A_j)}(t) t dt \\ &= - (1 - F_{\max(A_j)}(t)) t \Big|_0^\infty \\ &\quad - \int_0^\infty (1 - F_{\max(A_j)}(t)) dt \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} E(A_i) &= \int_0^\infty f_{A_i}(t) t dt \\ &= - (1 - F_{A_i}(t)) t \Big|_0^\infty - \int_0^\infty (1 - F_{A_i}(t)) dt \end{aligned} \quad (16)$$

将式(15)、(16)带入到式(9)、(10)中, 最终获得数据包 i 的整序延迟 R_i 和端到端延迟 T_i 的期望。

本小节提出的基于 D/G/1 排队的整序延迟和端到端延迟模型的通用性在于, 符合图 1 拓扑的多路径并行传输网络的路径延迟概率密度函数 $X_k(\cdot)$, 可以作为模型的输入变量, 通过以上分析和推导获得数据包延迟的期望。为验证本文所提的分析模型, 在下一节以 $X_k(\cdot)$ 指数分布为例对多路径并行传输网络的数据包延迟展开分析。

3 路径延迟为指数分布示例

指数分布是一种重要的概率分布, 文献[10]给出了单路径网络延迟为指数分布的整序延迟模型。在本节, 利用本文提出的模型来分析多路径并行传输的整序延迟和端到端延迟。假设路径 k 的随机延迟满足均值为 $1/\lambda_k$ 的指数分布, 即 $x_k \sim \lambda_k e^{-\lambda_k x}$, $\lambda_k > 0$ 。

为获得数据包 i 的整序延迟和端到端延迟, 需要获得 $E\max(A_j)$ 和 $E(A_i)$ 。根据式(14)和 $X_k(\cdot)$, 得到

$$\begin{aligned} F_{D_i}(t) &= \int_0^t \sum_{k=1}^N p_k \lambda_k e^{-\lambda_k \xi} d\xi \\ &= 1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k t} \end{aligned} \quad (17)$$

$$E(A_i) = E(S_i + D_i) = i\tau + E(D_i)$$

$$\begin{aligned}
 &= i\tau + \int_0^{\infty} f_{D_i}(t)tdt \\
 &= i\tau + \sum_{k=1}^N \frac{p_k}{\lambda_k} \quad (18)
 \end{aligned}$$

为了获得 $E_{\max}(A_j)$, 首先需要计算 $\max(A_j)$ 的分布函数。根据式(13)获得

$$\begin{aligned}
 F_{\max(A_j)}(t) &= \prod_{j=0}^i \int_0^{t-j\tau} \sum_{k=1}^N p_k \lambda_k e^{-\lambda_k(\xi-j\tau)} d\xi \\
 &= \prod_{j=0}^i [1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-j\tau)}] \quad (19)
 \end{aligned}$$

利用分部积分, 并将式(19)带入式(15), 获得 $E_{\max}(A_j)$ 的期望

$$\begin{aligned}
 E_{\max}(A_j) &= - \left\{ 1 - \prod_{j=0}^i [1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-j\tau)}] \right\} \cdot t \Big|_{i\tau}^{\infty} \\
 &\quad - \int_{i\tau}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{j=0}^i [1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-j\tau)}] \right\} dt \\
 &= i\tau - \int_{i\tau}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{j=0}^i [1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-j\tau)}] \right\} dt \quad (20)
 \end{aligned}$$

将式(18)、(20)带入式(9)、(10)中, 便得到数据包 i 的平均整序延迟和端到端延迟

$$\begin{aligned}
 ER_i &= - \int_{i\tau}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{j=0}^i [1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-j\tau)}] \right\} dt \\
 &\quad - \sum_{k=1}^N \frac{p_k}{\lambda_k} \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ET_i &= - \int_{i\tau}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{j=0}^i [1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-j\tau)}] \right\} dt \quad (22)
 \end{aligned}$$

因此计算 ER 和 ET 的关键在于计算积分

$$\int_{i\tau}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{j=0}^i [1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-j\tau)}] \right\} dt \quad (23)$$

对式(23)进行分析, 注意到

$$\prod_{j=0}^i [1 - \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-j\tau)}] = \prod_{j=0}^i \left[1 - \sum_{k=1}^N p_k \frac{e^{-\lambda_k(t-i\tau)}}{(e^{\lambda_k})^{j\tau}} \right] \quad (24)$$

令式(24)为 $\text{Product}(i)$, 分别取上下限, 令

$$\lambda_{\min} = \min \{ \lambda_k, 1 \leq k \leq N \}$$

$$\lambda_{\max} = \max \{ \lambda_k, 1 \leq k \leq N \}$$

那么得到

$$\begin{aligned}
 \prod_{j=0}^i \left[1 - \frac{\sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-i\tau)}}{(e^{\lambda_{\min}})^j} \right] &\leq \text{Product}(i) \\
 &\leq \prod_{j=0}^i \left[1 - \frac{\sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-i\tau)}}{(e^{\lambda_{\max}})^j} \right] \quad (25)
 \end{aligned}$$

由不等式(25)可以看出, 对同构多路径网络, 即所有路径的延迟密度函数 $X_k(\cdot)$ 均相同, 那么式(25)左右取等号。而对于异构多路径网络, 可以求得整序延迟和端到端延迟的上下界。以上界 $\lambda_{\max}$ 为例, 令 $a = \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-i\tau)}$, $u = e^{\lambda_{\max}\tau}$, 对式(25)两边取对数, 然后泰勒展开, 得到

$$\begin{aligned}
 \ln[\text{Product}(i)] &= \ln \left[\prod_{j=0}^i \left(1 - \frac{a}{u^j} \right) \right] \\
 &= \left[-\frac{a(1-1/u^i)}{u-1} \right] - \frac{1}{2} \left[\frac{a^2(1-1/u^{2i})}{u^2-1} \right] \\
 &\quad - \frac{1}{3} \left[\frac{a^3(1-1/u^{3i})}{u^3-1} \right] - \dots \\
 &\approx -\frac{a}{u-1} - \frac{1}{2} \frac{a^2}{u^2-1} - \frac{1}{3} \frac{a^3}{u^3-1} - \dots
 \end{aligned}$$

利用关系式当 $|x| \rightarrow 0$ 时, $1+x \approx e^x$, 所以有

$$u^j - 1 = e^{j \cdot \lambda_{\max}\tau} - 1 \approx j \cdot \lambda_{\max}\tau$$

进而得到

$$\begin{aligned}
 \ln[\text{Product}(i)] &\approx \left[-\frac{a}{\lambda_{\max}\tau} \right] - \frac{1}{2} \left[\frac{a^2}{2\lambda_{\max}\tau} \right] \\
 &\quad - \frac{1}{3} \left[\frac{a^3}{3\lambda_{\max}\tau} \right] - \dots - \frac{1}{n} \left[\frac{a^n}{n\lambda_{\max}\tau} \right] \\
 &= -\frac{1}{\lambda_{\max}\tau} \left[a + \frac{a^2}{2^2} + \frac{a^3}{3^2} + \frac{a^4}{4^2} + \frac{a^5}{5^2} + \dots + \frac{a^n}{n^2} \right] \\
 &= -\frac{1}{\lambda_{\max}\tau} [Li_2(a)]
 \end{aligned}$$

其中, $Li_2(x)$ 是 Dilogarithm 函数, 在 $x \in [0, 1]$ 区间上近似直线 $y = (\pi^2/6)x$, 最后得到

$$\begin{aligned}
 \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{Li_2(a)}{\lambda_{\max}\tau} \right] \right\} dt &\approx \int_{i\tau}^{\infty} \left\{ 1 - e^{-c \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-i\tau)}} \right\} dt \quad (26)
 \end{aligned}$$

其中 $c = \pi^2/6\lambda_{\max}\tau$ 。

对于积分式(26), 可以根据多路径的延迟分布情况, 分成以下两种情况考虑。

3.1 同构路径网络

同构路径是指所有路径延迟分布函数相同。对于指数分布, 考虑当 $\lambda_i = \lambda_j$, $1 \leq i, j \leq N$ 时, 令 $\lambda^* = \lambda_i$, 式(26)可以简化并积分得到

$$\int_0^{\infty} \left\{ 1 - e^{-\lambda^* t} \right\} dt = \frac{\gamma + \Gamma(0, c) + \text{Log}(c)}{\lambda^*} \quad (27)$$

其中 γ 为欧拉常数, $\Gamma(0, c)$ 为 Gamma 函数。

因此,联合式(20)、(21)、(22)和(27),得到同构网络下平均数据包的整序延迟和端到端延迟为

$$E(T) = \frac{\gamma + \Gamma(0, c) + \text{Log}(c)}{\lambda^*} \quad (28)$$

$$E(R) = \frac{\gamma + \Gamma(0, c) + \text{Log}(c)}{\lambda^*} - \frac{1}{\lambda^*} \quad (29)$$

3.2 异构多路径网络

异构路径是指路径延迟分布函数不同。对于指数分布,考虑当路径延迟均值 $1/\lambda_k$ 差异较小,并且在同一数量级时,可认为如下近似关系式

$$\begin{aligned} k_1 e^{-\lambda_1 x} + k_2 e^{-\lambda_2 x} + k_3 e^{-\lambda_3 x} + \dots + k_N e^{-\lambda_N x} \\ \approx e^{-(k_1 \lambda_1 + k_2 \lambda_2 + k_3 \lambda_3 + \dots + k_N \lambda_N) x} \end{aligned} \quad (30)$$

将式(30)带入式(26)中,得到异构多路径网络环境下的平均端到端延迟为

$$\begin{aligned} E(T) &= \int_{i\tau}^{\infty} \{1 - e^{-c \sum_{k=1}^N p_k e^{-\lambda_k(t-i\tau)}}\} dt \\ &\approx \int_{i\tau}^{\infty} \{1 - e^{-c \sum_{k=1}^N p_k \lambda_k(t-i\tau)}\} dt \\ &= \frac{\gamma + \Gamma(0, c) + \text{Log}(c)}{\sum_{k=1}^N p_k \lambda_k} \end{aligned} \quad (31)$$

$$E(R) = \frac{\gamma + \Gamma(0, c) + \text{Log}(c)}{\sum_{k=1}^N p_k \lambda_k} - \frac{1}{\sum_{k=1}^N p_k \lambda_k} \quad (32)$$

4 仿真实验

本文以路径延迟为指数分布为例,通过实验对所提出的模型进行评估。仿真环境是基于 Matlab7.0 构建的一个多路径并行传输网络环境,并使用 Mathematica7 协助模型计算和分析。

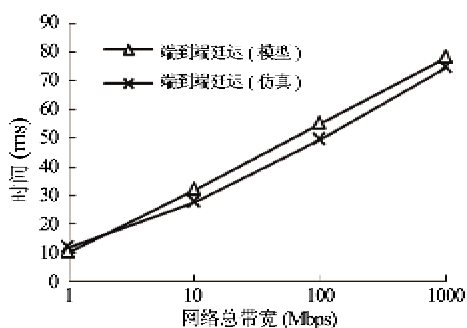
为验证本文所提出的模型的准确性,采用文献[10]中的验证方法,在不同的网络总带宽环境下,对数据包的平均端到端延迟进行统计测量,将测量结果与模型估测结果相比较。仿真实验分别考虑了同构多路径和异构多路径两种网络环境。在同构多路径网络中,各路径的延迟均服从相同参数的指数分布。在异构多路径网络中,各路径延迟变量相互独立,分别服从不同参数的指数分布。仿真中长期传输会话的运行时间设置为 10000s。

4.1 同构路径网络仿真与模型分析结果

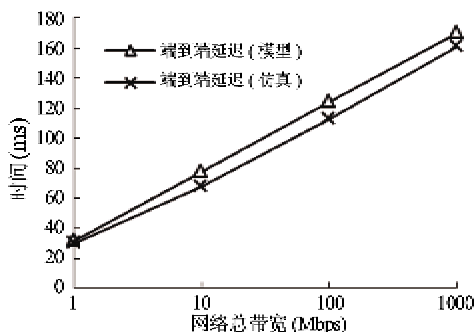
图 2 给出了同构路径网络环境下数据包平均端到端延迟的仿真结果和模型分析结果与网络总带宽之间的关系。在图 2(a)和(b)中,路径延迟的均值分别为 10ms 和 20ms。可以看出随着网络总带宽的增加,数据包的平均端到端延迟也随之相应提高,这是由于高带宽使数据包乱序更加严重,导致数据包整序延迟和端到端延迟相应提高。从图 2 可以看出仿真结果和模型推导结果基本吻合,表明本文所提出的模型在同构多路径并行传输网络环境中具有较高的准确性。

4.2 异构路径网络仿真与模型分析结果

为了评估本文所提出的模型在异构路径网络中的性能,特别是路径选择概率对平均端到端延迟的影响,设计了一组基于两条异构路径的实验,其中路径#1 和#2 的延迟均值分别为 10ms 和 20ms。图 3 分别显示出当路径#1 和#2 的选择概率不同时端到端延迟,其中路径#1 的选择概率为 p_1 , 路径#2 的选择概率即为 $p_2 = 1 - p_1$ 。



(a) 各路径延迟均值 $1/\lambda = 10\mu\text{s}$

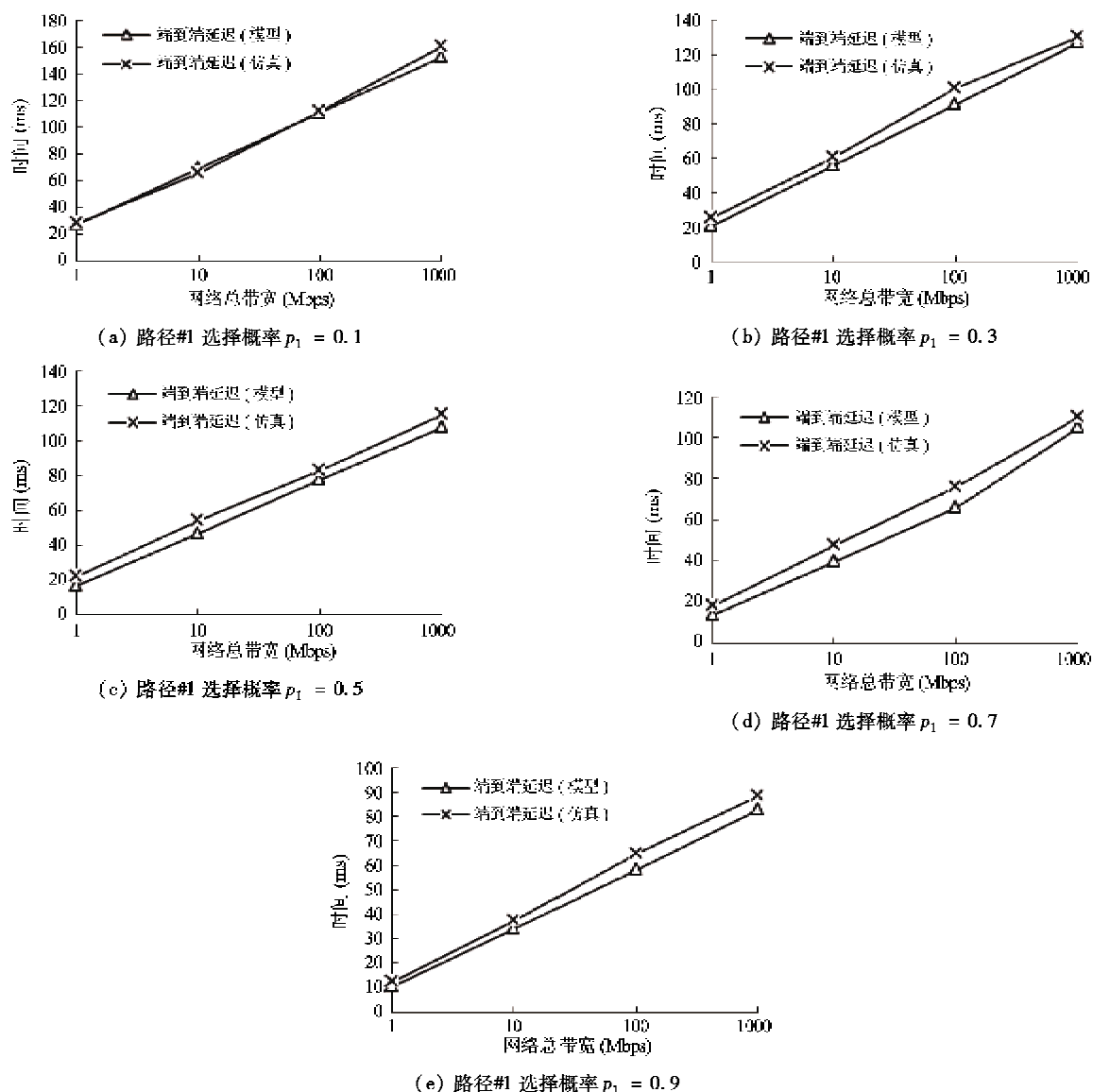


(b) 各路径延迟均值 $1/\lambda = 20\mu\text{s}$

图 2 同构路径环境中系统仿真和模型计算结果

从图 3 可以看出仿真结果和模型分析结果共同反映了数据包端到端延迟随着总带宽的增加而提高

这一趋势。从总体上看仿真结果和分析结果基本吻合,误差较小。从图3(a)-(e)可以看出, p_1 的增加

图3 $\lambda_1 = 1/10$, $\lambda_2 = 1/20$, 不同总带宽下的端到端延迟曲线

说明数据包被分配至路径#1 上传输的比例增加,也使端到端延迟逐渐趋向路径#1 的延迟,即 10ms。

5 结 论

本文提出的基于 D/G/1 排队的多路径并行传输机制延迟分析模型形式化了数据包的路径选择概率以及路径延迟分布对数据包延迟的影响。与已有研究相比,该模型假设路径延迟分布为一般分布,使其具有广泛的适用性,并且能够给出整序延迟和端到端延迟的直接结果。本文还针对路径延迟为指数分布为示例,给出了一个长期会话中数据包的平均整序延迟和端到端延迟的直接分析结果。仿真实验表明,本文所提出的模型可以准确反映多路径并行

传输场景中的数据包延迟,能够满足多路径并行传输协议设计、性能优化算法的要求。

后续工作我们将考虑互联网网络流量模型,特别是网路流量自相似性,对多路径并行传输机制延迟的影响。我们还将对数据包整序过程中的整序缓冲大小进行分析,建立多路径并行传输的整序缓冲的直接分析模型。

参考文献

- [1] Jean-Marie A, Gun L. Parallel queues with resequencing. *Journal of the Association for Computing Machinery (JACM)*, 1993, 40(5): 1188-1208
- [2] Gogate N, Panwar S P. On a resequencing model for high speed networks. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications*, Toronto, Can-

- ada, 1994. 40-47
- [3] Lelarge M. Packet reordering in networks with heavy-tailed delays. *Mathematical Methods of Operations Research*, 2008, 67: 341-371
- [4] Han Y A M, Makowski. Resequencing delays under multipath routing-asymptotics in a simple queueing model, In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications, Barcelona, Spain, 2006. 1240-1251
- [5] Li J, Zhao Y Q. Resequencing analysis of stop-and-wait ARQ for parallel multichannel communications. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17: 817-830
- [6] Leung K C, Li V O K. A resequencing model for high-speed packet-switch networks. *Computer Communications*, 2009, 33(4): 443-453
- [7] Krishnan R, Silvester J A. Choice of allocation granularity in multipath source routing schemes. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications, San Francisco, USA, 1993. 322-329
- [8] Tsoukatos K P, Makowski A M, Asymptotic optimality of the round-robin policy in multipath routing with resequencing. *Queueing Systems*, 2006, 52(3): 199-214
- [9] Wang Y, Panwar S, Lin S, et al. Wireless video transport using path diversity: multiple description vs. layered coding. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Rochester, USA, 2002. I-21-I-22
- [10] Xia Y, Tse D. Analysis on packet resequencing for reliable network protocols. *Performance Evaluation*, 2005, 61: 299-328

Research on the D/G/1 queues-based delays over multipath transfer

Zheng Kun^{***}, Liu Min^{*}, Li Zhongcheng^{*}

(^{*} Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(^{**} Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

To accurately analyze the average end-to-end delay of packets in a multipath transfer scenario, this paper proposes a novel analytical model for resequencing and end-to-end delays over multiple independent paths based on D/G/1 queues. The model assumes each packet to be transmitted in a stochastic routing, and the delay distribution of each path is general and independent mutually. In contrast to the previous researches, the proposed model takes a more general assumption on the path delay and adapts to most of scenarios. Specifically, the exponential distribution was taken as an important example in the study, and the average resequencing delay and end-to-end delay were derived. The simulation results show that the proposed model can give an accurate estimation on the resequencing delays, and can meet the requirements of the algorithms and protocols for parallel transmission.

Key words: multihoming, multipath, packet reordering, resequencing delay