

基于延迟参数的可用带宽主动估测算法

卞 静^① 王泽强^① 张光昭^②

^①(中山大学科学计算与计算机应用系 广州 510275)

^②(中山大学电子系 广州 510275)

摘 要 可用带宽是重要的网络资源,但它的实际测量存在许多困难。该文基于延迟趋势模型,提出一种端到端的可用带宽估测算法 SSP(SR_{deg} and SR_{det} Parameters),设计了反映网络传输性能的参数 SR_{deg} 和 SR_{det} ,通过端系统对参数进行计算,主动调整发送速率,从而快速估测到网络的可用带宽,达到有效利用网络资源的目的。在 NS2 平台进行了参数和 SSP 算法的性能测试实验,并与当前的带宽估测工具 Pathload 进行了比较。实验结果表明,SSP 算法估测带宽的精度和效率都高于 Pathload。

关键词 可用带宽估测,延迟趋势模型,Pathload,参数 SR_{deg} 和 SR_{det}

中图分类号: TP393.06

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1926-04

An Active Estimation Algorithm for Available Bandwidth Based on the Delay Parameters

Bian Jing^① Wang Ze-qiang^① Zhang Guang-zhao^②

^①(Department of Scientific Computation and Computer Application, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

^②(Department of Electronics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract Available bandwidth is one of the important network resources, but it difficult to measure in practice. In this paper, SSP(SR_{deg} and SR_{det} parameters), an active end-to-end available bandwidth estimation algorithm based on delay trend model, is proposed. Two parameters SR_{deg} and SR_{det} are designed which can indicate the network transmission performance changes. By calculating these parameters, the end system can adjust the transmission rate so that the available bandwidth can be estimated quickly as well as the network resources can be effectively used. The parameters are tested by NS2 simulation platform. The performance of SSP algorithm is compared with Pathload, a currently used tool on available bandwidth estimation. The simulation experiments show that the proposed algorithm SSP is more efficient and accurate than that of Pathload.

Key words Available bandwidth estimation, Delay trend mode, Pathload, SR_{deg} and SR_{det}

1 引言

在IP网络中,链路带宽^[1,2]是非常重要的网络资源,带宽高通常意味着传输链路有较大的吞吐量和较高的服务质量。对链路带宽的实时精确测量,是有效利用网络带宽资源,提高网络服务质量的保证。链路带宽测量支持网络传输性能分析,网络规划,拥塞控制,流媒体应用, QoS 保证,接纳控制,网络应用,移动计算等业务需要。

对实际运行的网络,在带宽测量时,要求探测速率不能影响到正常的业务流;检测速度要快;同时,网络技术存在差异,端到端需要协同工作,业务流使用不同的传输协议,背景流量的多样性,路由器的各自特点等,都使链路带宽的实际测量面临很大的困难和挑战。随着因特网规模的扩展,多媒体实时业务的广泛应用,对网络的传输性能和服务质量

提出了更为严格的要求。如何提供高精度的链路带宽测量值,成为下一代网络关键技术的研究热点。

本文的主要工作是研究端到端的带宽测量技术,全文结构如下:第2节介绍相关研究,典型的端到端可用带宽估测工具 Pathload 方法;第3节是本文重点,研究延迟趋势模型,设计反映网络性能变化的参数和可用链路带宽主动估测算法 SSP;第4节基于 ns2 仿真平台,进行参数和 SSP 算法的实验验证,完成 SSP 估测方法和 Pathload 估测工具的比较;最后是全文总结。

2 相关研究介绍

网络带宽是指网络上数据报文的最大传输速率。带宽越大,单位时间内能传输的数据也就越多。参照文献[2],相关定义如下。

端到端路径 由一系列存储转发节点和链路构成的从发送方到接收方之间传递数据包的一条逻辑线路。

设一个端到端路径包含 N 条链路, $i=1, \dots, N$, B_i 是链路 i 的

2005-11-16 收到, 2006-05-08 改回

国家自然科学基金(10572154)和广东省自然科学基金(011170)资助课题

链路容量, 其上承载的业务流是 C_i , 定义:

瓶颈链路 bottleneck link 为 $L_b(1 \leq b \leq N)$, 满足 $B_b = \min(B_1, B_2, \dots, B_N)$;

紧凑链路 tight link 为 $L_t(1 \leq t \leq N)$, 满足 $B_t - C_t = \min(B_1 - C_1, B_2 - C_2, \dots, B_N - C_N)$

可用链路带宽 available bandwidth 为 $A_i = B_i - C_i$

从定义中可看到: 瓶颈链路带宽反映的是网络的静态特征, 可用链路带宽反映的是网络实际传输的链路特征, 因此带宽测量的实质应该是可用链路带宽的测量。

可用链路带宽估测工具 Pathload 介绍 Pathload 是典型的端到端主动带宽估测工具^[1], 基于自载周期流 SLoPS 方法 (Self-Loading Periodic Streams), 通过运用 PCT (Pairwise Comparison Test) 和 PDT (Pairwise Difference Test) 来判断数据包单向延迟 OWD (One-Way Delay) 趋势, 进而判断发送速率 R 与可用链路带宽 A 之间的关系。

定义第 i 个包的单向延迟 OWD 为第 i 个包到达接收端的时间 t_{r_i} 与在发送端发送的时间 t_{s_i} 之差

$$D_i = (t_{r_i} - t_{s_i}) \quad (1)$$

设 $D[i]$ 是检测期内延迟的数组, K 为数组的长度, 则

$$S_{\text{pct}} = \frac{\sum_{i=2}^K I(D_i, D_{i-1})}{K-1}, \quad S_{\text{pdt}} = \frac{D_K - D_1}{\sum_{i=2}^K |D_i - D_{i-1}|}$$

其中 $I=1$, 若 $D_i > D_{i-1}$; 否则 $I=0$ 。

当 $S_{\text{pct}} > 0.66$ 且 $S_{\text{pdt}} > 0.45$ 或者 $S_{\text{pct}} > 0.54$ 且 $S_{\text{pdt}} > 0.56$ 时, 判决延迟趋势大于 0, 即 OWD 序列呈现出一个增长趋势, 使紧凑链路上第 j 个包的队列延迟大于第 i 个包的相应延迟 ($i < j$), 这表明 $R > A$, 此时 SLoPS 算法减小当前发送速率; 当 $S_{\text{pct}} < 0.54$ 且 $S_{\text{pdt}} < 0.45$ 时, 判决延迟趋势小于 0, 即 OWD 序列不会呈现出一个增长趋势, 数据流不会在紧凑链路上造成过载, 这表明 $R < A$, 此时 SLoPS 算法增大当前发送速率。如此迭代下去, 直到检测区间小于预先给定的阈值 ω , 即认为当前网络可用带宽在此区间范围。

Pathload 工具的优点是能够根据网络中当前数据包的延迟情况来动态逼近网络的可用链路带宽, 在现有带宽测量工具中, 精度较高。该算法最大的缺点在于用时过长, 计算量大。

3 基于延迟参数的可用带宽主动估测算法 SSP

针对 Pathload 存在的问题, 本文基于延迟参数计算, 提出 SSP 算法, 可以快速估测到网络的可用带宽。

3.1 延迟趋势模型

设一个端到端路径包含了 N 条链路, 链路容量为 $B_i (i=1, \dots, N)$, 发送端在时间间隔 $[a, b]$ 内以已知速率 R 发送包大小为 S_k 的探测包 k , 则该路径的传输时延为^[3]

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_k}{B_i} + d_i^k + A_i \right) = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{B_i} \right) S_k + \sum_{i=1}^N d_i^k + \sum_{i=1}^N A_i$$

其中 S_k/B_i 、 d_i^k 、 A_i 分别为探测包在第 i 条链路上的传输时延、在第 i 个路由器上的排队时延和处理时延。

假定路由器的处理时延固定, 则 $\sum_{i=1}^N \frac{1}{B_i}$ 、 $\sum_{i=1}^N d_i^k$ 均为常数。

因此 D 只与 S_k 和探测包在路由器上的排队时延有关, 而排队时延与网络的拥塞状况有关, 反映了检测期内网络的流量水平。可以证明: 当发送速率 R 大于链路可用带宽时, 探测包在路由器上的排队时延 $\sum_{i=1}^N d_i^k$ 呈增长趋势^[3]。因此, 可以通过数据包的端到端时延变化情况来调节探测的发包速率 R , 使之接近可用带宽值。

3.2 算法参数定义

设在一个检测期间, 接收端一共接收到 N 个数据包, 由式(1), 第 i 个数据包的传输时延(与 OWD 等值)为 D_i , SR_{avg} 、 SR_{min} 、 SR_{max} 分别是 N 个数据包的平均、最小和最大传输时延, 则参数定义为

$$SR_{\text{deg}} = (SR_{\text{avg}} - SR_{\text{min}}) / (SR_{\text{max}} - SR_{\text{min}}) \quad (2)$$

$$SR_{\text{det}} = (SR_{\text{avg}} / SR_{\text{max}}) - (SR_{\text{min}} / SR_{\text{avg}}) \quad (3)$$

参数 SR_{deg} 可以反映当前网络的总体流量水平, 取值范围是 $[0, 1]$ 。系统的总体流量水平越高, SR_{deg} 的值就越接近 1。利用该参数值可以判断当前网络发送速率与可用带宽的关系: 当发送速率大于或者等于可用带宽时, 其值大于阈值, 当发送速率小于可用带宽时, 其值小于阈值。实验中, 该阈值为 0.45。

参数 SR_{det} 反映了当前发送速率与可用链路带宽的关系: 当检测包的发送速率接近于当前网络的可用带宽时, 网络基本处于满负荷状态, 此时 N 个数据包的平均传输时延与其最大传输时延和最小传输时延将十分接近。实验中, 此参数值取为 0.017。当 SR_{deg} 的值大于 0.45, 即表明当前发送速率大于或等于可用带宽的情况下, 可以通过观察 SR_{det} 的值是否小于 0.017 来提前中止迭代, 提高测量速度。

3.3 SSP 算法设计

SSP 算法采用分组对 PP 包 (Packet Pair) 主动测量技术^[4]来探究网络的全局信息。设带宽迭代区间为 $[R_{\text{min}}, R_{\text{max}}]$, SSP 算法首先发送 5 个探测 PP 包对, 每个包的大小为 S_p , D_i^1 、 D_i^2 分别为第 i 个包对的第一个和第二个包的到达延迟, 则每包对在链路上的发送速率为

$$R_i = \frac{S_p}{D_i^2 - D_i^1}, \quad i=1, \dots, 5 \quad (4)$$

R_i 的最大值即为 R_{max} 的初始化值。

以 $R_{\text{now}} = (R_{\text{max}} + R_{\text{min}}) / 2$ 发送 100 个数据包, 接收端收到后, 计算当前的 SR_{deg} 和 SR_{det} 的值。

若 $SR_{\text{deg}} > 0.45$, 则将 R_{now} 赋值给 R_{max} , 利用式(5)选取

新的发送速率直到满足判定条件;

若 $SR_{deg} < 0.45$, 则将 R_{now} 赋值给 R_{min} , 利用式(5)选取新的发送速率直到满足判定条件;

为使估测更加准确, 本文利用指数加权方法设计了发送速率的调节公式:

$$R_{now} = R_{max}(1 - SR_{deg}^2) + R_{min}SR_{deg}^2 \quad (5)$$

若 $SR_{deg} > 0.45$ 并且 $SR_{det} < 0.017$, 说明当前的发送速率与可用链路带宽十分接近, 则当前的 R_{now} 值即为可用链路带宽的估算值。实验中, SR_{deg} 值在 0.55 上下有小幅波动, 为得到更为精确的结果, 本文对最后得到的可用带宽估测值进行了修正。设链路可用带宽估测值为 E_A , 则

$$\text{当 } SR_{deg} \geq 0.55 \text{ 时, } E_A = R_{now}[1 - (SR_{deg} - 0.55)];$$

$$\text{当 } 0.45 < SR_{deg} < 0.55 \text{ 时, } E_A = R_{now}[1 - (0.55 - SR_{deg})]$$

4 参数和 SSP 算法实验验证

实验的拓扑结构采用经典的“哑铃”型, 如图 1 所示, 有一个探测数据包的发送端(SSP)和一个 CBR 流的发送端, Bottleneck 为网络瓶颈链路, 通过调整 CBR 流的发送速率来调节可用带宽的变化。探测包的大小是 300byte, 每收到 100 个探测包就进行一次参数的计算。

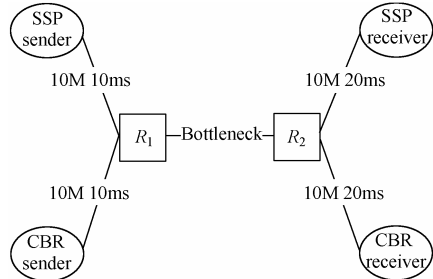


图 1 拓扑结构图
Fig.1 Simulation topology

4.1 参数测试

实验中, 瓶颈链路带宽为 1.5Mbps, 分别测试可用带宽在 500kbps、800kbps、1Mbps 时的参数性能; 改变瓶颈链路带宽为 2.5Mbps, 分别测试可用带宽在 1.5Mbps、2Mbps、2.3Mbps 时的参数性能。图 2 给出 SR_{deg} 参数分别在可用带宽为 1Mbps、2Mbps 下变化的整体和局部情况。从实验结果可看到, 0.45 是发送速率是否接近可用带宽的判断值, 因此 SSP 算法取 0.45 作为阈值。从图 2 可看到 SR_{deg} 值在 0.55 处的小幅波动现象, SSP 算法为此对最后得到的可用带宽估测值进行了修正。

SR_{det} 参数实验如图 3 所示。结果表明, 当网络的发送速率略大于当前网络可用链路带宽时, SR_{det} 参数值小于 0.017。所以当 SR_{deg} 的值大于 0.45, 即表明当前发送速率大于或等于可用带宽时, 可以通过观察 SR_{det} 的值是否小于 0.017 来提前中止迭代, 提高探测的速度。

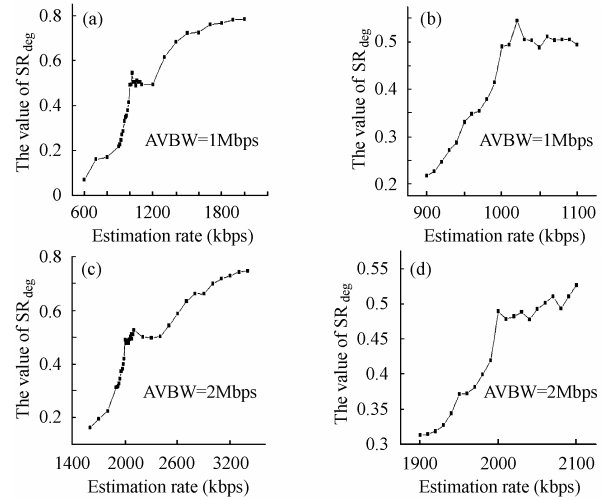


图 2 (a) SR_{deg} 参数图 (b) SR_{deg} 局部参数图

(c) SR_{deg} 参数图 (d) SR_{deg} 局部参数图
Fig.2 (a) Entire curve of SR_{deg} (b) Local curve of SR_{deg}
(c) Entire curve of SR_{deg} (d) Local curve of SR_{deg}

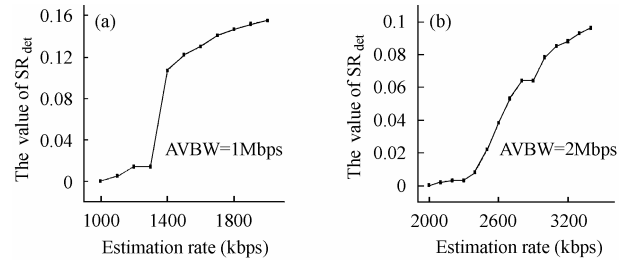


图 3 SR_{det} 参数图

Fig.3 Curve of SR_{det}

4.2 SSP 算法估测实验以及与 Pathload 的比较

在图 1 仿真拓扑结构上, 分别运行 SSP 算法和 Pathload 算法。每个探测流都包含 100 个数据包, 每个数据包的大小是 300byte, 带宽初始迭代区间是 $[64, B_b]$, B_b 是当前链路的瓶颈链路带宽, 实验取值为 1.5Mbps。CBR 背景流从 100kbps 每次以 100kbps 的幅度增加, 从而调整可用带宽值从 1400kbps 线性减小到 200kbps。每调整一次 CBR 流的大小, 分别运行 Pathload 算法和 SSP 算法。两种算法的可用带宽估测结果如图 4 所示, 图 5 为两种算法的估测用时结果。

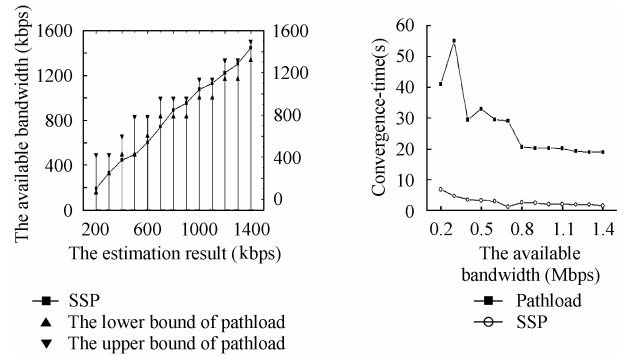


图 4 SSP 与 Pathload 估测可用带宽比较图

Fig.4 AVBW-estimation comparison of SSP with path load

图 5 SSP 与 Pathload 可用带宽估测用时比较图

Fig.5 Convergence time comparison of SSP with pathload

图 4 中, 对每个实际可用带宽, Pathload 算法给出的是带有上下界的估测区间范围, SSP 算法则给出带宽估测的确定值。令 TEB 为可用带宽测量值, AB 为实际可用带宽值, 按文献[4]给出的公式:

$$Accuracy = |(TEB - AB) / (TEB + AB)| \quad (6)$$

得到 SSP 算法估测度在 0.06 以下, 而 Pathload 算法则为 0.08^[4]。SSP 算法较好地逼近了实际可用链路带宽值, 比 Pathload 算法精确度大为提高。实验中同时发现(图 5), SSP 算法的估测时间远远小于 Pathload 算法的估测时间。相对于每种算法, 当可用带宽较小时, 算法的估测时间相对要大, 这是因为可用带宽小, 源端的发送探测速率也会小, 导致端到端的估测用时增大; 当可用带宽较大时, 算法的估测时间相对要小, 这是因为可用带宽大, 源端的发送探测速率快速加大, 减小了端到端的估测用时。在高速、宽带网络下, SSP 的带宽估测优势将更加明显。

实验结果表明, SSP 算法比 Pathload 算法具有复杂度低, 精确度高, 用时少的优势。

5 结束语

本文基于延迟趋势模型, 设计了可用带宽估测参数 SR_{deg} 和 SR_{det} , 基于这些参数值的变化, 提出能够主动估测网络可用链路带宽的 SSP 算法。算法的主要思想是通过发送探测数据包, 在接收端进行参数计算, 调整下一个周期的发送速率, 直到参数达到阈值, 此时的发送速率即是网络的可用链路带宽值。在 ns2 平台的仿真实验结果表明, SSP 算法精度高, 用时少, 达到良好的估测性能, 尤其在高速、宽带网络下,

SSP 的带宽估测优势将更加明显, 为有效利用网络资源、支持 QoS 服务和多媒体实时应用提供了保证。

参 考 文 献

- [1] Jain M, Dovrolis C. End-to-end available bandwidth: measurement, methodology, dynamics and relation with TCP throughput. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(4): 537-549.
- [2] Hu Ningning, Steenkiste P. Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(6): 879-894.
- [3] Liu Q, Hwang J N. End-to-end available bandwidth estimation and time measurement adjustment for multimedia QoS. ICME 2003, Baltimore, USA, 2003, III: 373-376.
- [4] Yegyalakshmi Easwaran, Miguel A Labrador. Evaluation and application of available bandwidth estimation techniques to improve TCP performance. 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, Tampa, USA, 2004: 268-275.
- [5] ns2: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

卞 静: 女, 1965 年生, 副教授, 研究领域为信息采集、信息传输与信息处理技术。

王泽强: 男, 1982 年生, 硕士生, 研究领域为信息传输与信息处理技术。

张光昭: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为微波技术、多媒体通信、计算机网络。