

网络可用带宽的高精度测量算法

刘星成, 何莉, 余顺争

(中山大学电子与通信工程系, 广东广州 510275)

摘 要: 精确的网络带宽测量对于许多 Internet 应用和协议都有很重要的作用. 本文在分析网络可用带宽测量算法 IGI 的基础上, 提出了改进算法. 改进算法在准确性和跟踪可用带宽变化的能力等方面和原来算法相比有很大的改善. 另外, 针对 PTR 算法测量结果不稳定以及在网络路径的瓶颈链路的利用率较高时测量不准确的问题, 提出改进算法. 实验表明, 改进的 PTR 算法在测量时间以及测量负载增加量不大的情况下, 提高了测量的准确性, 使得测量结果更平稳, 并且能很好地跟随网络路径可用带宽的变化.

关键词: 网络可用带宽; 分组对; 主动测量; 探测间隔模型

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 01-0068-05

Algorithms of Accurate Network Available Bandwidth Measurement

LIU Xing-cheng, HE Li, YU Shun-zheng

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

Abstract: Accurate measurement of network bandwidth is crucial for many Internet applications and protocols. Based on the analysis of IGI algorithm used to measure network available bandwidth, an improved measurement algorithm has been proposed. The experiment results show that the improved algorithm outperforms the current IGI in the evaluation precision and tracing capability. On the other hand, an improved PTR algorithms has been introduced to make the measurement value more stable and more accurate, especially when the bottleneck link on the network path is under high utilization, without making the measurement time added too much and bringing too much network overload into the measured network path.

Key words: network available bandwidth; packet pair; active probing; probing gap model (PGM)

1 引言

网络测量对评估网络性能具有重要的意义, 它是最基础和最重要的网络性能参数之一. 可用带宽测量在路由选择, 服务质量和流量工程等方面发挥着重要作用^[1~6]. 网络带宽测量可分为主动探测和被动测量. 前者测量时间短, 但会增加网络流量, 对网络运行有一定的影响; 而后者记录网络中传输的数据, 离线分析获得结果, 具有测量效率高和准确性好的特点, 但测量时间往往比较长, 要耗用大量计算资源和存储资源^[7]. 可用带宽测量不同于链路容量测量, 因为链路容量在较长一段时间内保持恒定, 而可用带宽不断地变化, 除了受网络流量的变化影响外, 最终的测量结果也受一些不可预测的因素影响, 比如时钟同步等. 因此, 如何准确的测量网络可用带宽依然是一个具有挑战性的问题, 也是最近几年的研究热点之一^[3,4,10~15]. 对于像为奥运会服务的大型动态网络, 网络可用带宽的测量对路由选择、网络流量负载均衡以及网页请求重定向等具有重要的作用. 目前已有很多组织把网络测量作为其研究项目以及实验室的目标, 比如 Surveyor^[16], NIMI^[17], CAIDA^[18], SPRINT/ IPMON^[19]等.

目前已有很多文献在可用带宽测量方面做了很多有意义的工作, 这些文献可分为两类: 一类是基于探测间隔模型 (PGM), 如 Spruce^[10], IGI^[4] 和 Delphi^[11]; 另一类是基于探测速

率模型 (PRM), 如 Pathload^[3], Pathchirp^[12], PTR^[4] 和 TOPP^[13] 等. PGM 和 PRM 模型有几个前提假设^[10]: 一是网络路径上所有路由器的排队模式都是先进先出 (FIFO); 二是背景流处于平稳状态; 三是背景流的平均速率变化比较慢, 并且在单个测量周期中保持恒定. PGM 模型还增加了一条假设, 即路径上容量最小的链路 (narrow link) 同时是可用带宽最小的链路 (tight link). 这些假设对模型分析是必要的. PGM 实际上就是测量路径上容量最小的链路的平均可用带宽, 当容量最小的链路不是可用带宽最小的链路时, 会出现较大的测量误差^[4].

本文的重点是对 IGI (initial gap increasing) 算法^[4] 进行有效的改进, 通过在实际网络中进行实验, 然后把测量结果与 MRTG^[7] 工具进行比较. 实验表明, 改进的算法具有更高的测量准确性, 更快的测量速度, 更小的网络负载, 测量结果更平稳, 并且能跟随背景流的快速动态变化. 本文的另外一个重点是改进 PTR (packet transmission rate) 算法^[4]. 相对于现有的 PTR 算法, 改进的 PTR 算法虽然在测量时间以及测量负载方面有所增加, 然而其测量准确性有很大的提高, 并且能够快速跟踪网络负载的变化, 尤其在网络路径中瓶颈链路的利用率较高时, 改善很明显.

2 IGI 算法和 PTR 算法

IGI 算法采用主动探测方式测量可用带宽^[4]. 在此算法

收稿日期: 2005-10-20; 修回日期: 2006-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90304011, No. 60673086, No. 60403045); 广东省自然科学基金 (No. 04009739); 广东省科技计划项目 (No. 2006B50101003); 珠海市科技计划项目 (No. PC20041100)

中,发送端连续地发送探测分组对,接收端测量经过一个路由器后分组对之间的间隔,如图 1 所示。现假设,探测分组对和背景流经过相同的路由器, g_l 是探测分组对的初始间隔, g_B 是探测分组在瓶颈链路上传输时间, g_o 是探测分组对在背景流的作用下经过路由器后的间隔, B_c 是背景流的强度。探测分组对经过路由器后间隔的增大是由背景流的作用引起的。

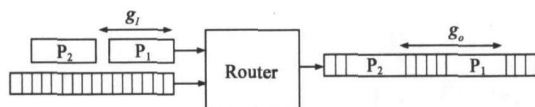


图 1 探测分组和竞争流通过路由器

假设两个背靠背分组 P_1 和 P_2 到达路由器,在 P_1 离开路由器之后 P_2 到达之前,路由器的队列非空,如图 1 所示。假定背景流 B_c 是恒定的,那么 P_1 与 P_2 经过路由器后的间隔可以写成:

$$g_o = g_B + B_c g_l / B_o \quad (1)$$

其中 B_o 是瓶颈链路的容量。为了通过估计背景流的强度 B_c 进一步计算可用带宽,初始间隔 g_l 必须满足上面的条件。式 (1) 表明背景流的强度 B_c 可以通过初始间隔 g_l 、输出间隔 g_o 以及探测分组在瓶颈链路上的传输时间 g_B 计算出来。然而,背景流的强度为常数的假设在实际网络中往往难以成立。为了解决这个问题,许多文献采用由多个分组构成的分组序列进行探测的方法来获得网络可用带宽^[20,21]。分组序列中前后两个分组构成一个分组对。直观上看来,应特别注意分组序列中经过路由器后间隔增大的分组对。特别地,假设分组序列中有 M 个分组对的间隔加大, K 个分组对的间隔不变,而 N 个分组对的间隔缩小,那么背景流可以通过式 (2) 计算出来:

$$\frac{B_o}{M} \frac{\sum_{i=1}^M (g_i^+ - g_B)}{\sum_{i=1}^M g_i^+ + \sum_{i=1}^K g_i^- + \sum_{i=1}^N g_i^-} \quad (2)$$

其中,分组对间隔 $G^+ = \{g_i^+ | i = 1, \dots, M\}$, $G^- = \{g_i^- | i = 1, \dots, K\}$ 和 $G^- = \{g_i^- | i = 1, \dots, N\}$ 分别表示分组序列中分组对经过路由器后间隔增加、不变以及减少的集合。这个算法叫 IGI (initial gap increasing) 算法,相应的式 (2) 称为 IGI 方程。从平均意义的角度讲,获得路径的背景流强度后,在路径的容量已知或者利用现有的路径容量测量工具^[2,8,9]测量后获得的情况下,路径的可用带宽等于路径的容量减去路径的背景流强度。

与 IGI 算法相对应, PTR (packet transmission rate) 算法是在算法收敛时直接计算到达接收端的探测分组速率,并把它作为可用带宽的估计。文献 [3, 12, 13] 也应用了类似的算法去估计可用带宽,这些算法都是基于探测速率模型 (PRM)。PTR 算法可用式 (3) 表示:

$$\frac{(M + K + N)s}{\sum_{i=1}^M g_i^+ + \sum_{i=1}^K g_i^- + \sum_{i=1}^N g_i^-} \quad (3)$$

其中, s 表示探测分组的大小。

3 算法改进

3.1 IGI 算法的改进

式 (2) 表明,为了获得可用带宽必须计算传输后间隔改变的分组的数量。然而,式 (2) 的变量 M 可能为 0,这将导致测量失败,这一点在实验中得到进一步证实。另外,IGI 算法总需要寻找转折点,在此点探测流将耗尽瓶颈链路的可用带宽,这将不可避免地影响网络的正常工作,因为实际网络中竞争流未必总是恒定的。因此,有必要对 IGI 算法进行改进。一个直观的改进是反方向搜索转折点,根据误差互补理论,这可以使测量结果更准确,所消耗的时间也不会明显增加。但是,这种改进会使链路的拥塞进一步加剧,所以需要更有效的测量算法。

下面进一步分析上述 IGI 测量模型来寻找更有效的算法。假定先发一个探测分组对,该分组对的时间间隔为 t_s ,在接收端收到该分组对的时间间隔为 t_r (参见图 1)。还假定 IGI 模型要求的两探测分组到达和离开路由器期间相应的队列非空的条件满足,那么, t_r 就是第二个探测分组和在 t_s 时间内进入队列中的竞争流通过该瓶颈链路所用的时间。因此,传输竞争流本身所用的时间是 $t_r - t_s$,竞争流的速率相应为 $(t_r - t_s) B_o / t_s$,此处的 B_o 为瓶颈链路的容量。依此可以计算出可用带宽:

$$ABW = (2t_s - t_r) B_o / t_s \quad (4)$$

分析上式可知,计算 ABW 的参数只有 3 个,且 B_o 已知,因此,需要确定的参数是两个时间值。实现时,在发送端预先设置分组对间隔 t_s ,在接收端,可以对接收到的相应探测分组对分别打上时间戳 (timestamp),接收程序测量竞争流和第一个探测分组传输所用的时间,该时间即为 t_r 。

为了使可用带宽测量结果有更高的准确性,需要重复测量过程,求出统计平均值。实际上,虽然网络链路的可用带宽存在瞬时值,但实际测量出该值的时刻总是落后于瞬时值产生的时刻,因此,某个时间段内的平均值是有意义的。但对测量平均值的要求是统计时间短、测量精度高。前者是为了使测量过程尽量少影响网络的正常运行,减轻网络的负担。另外,在一些应用中,如网络负荷的平衡,活动网站流量的重定向以及根据动态带宽的变化初步判断网络是否存在非法入侵等,希望测量过程能迅速反映带宽的变化。综合考虑这些因素,可以取重复次数 $N = 100$ 。此外,重复的测量过程需要不断发送分组对,分组对的产生可以采用文献 [20, 21] 中的流生成方法,使得不同的分组对先后到达呈 Poisson 分布,以尽量减小探测分组对对网络的影响。

3.2 PTR 算法的改进

基于 PGM 模型的可用带宽测量算法都有一个共同的特点,即要事先获得网络路径中瓶颈链路的容量。链路容量估计是否准确直接影响可用带宽测量的准确性。探测分组的大小以及网络路径上的背景流都会对测量结果有影响^[2,8,9]。而基于 PRM 的可用带宽测量算法由于直接利用探测分组的速率作为可用带宽的估计,不需要事先获得瓶颈链路的容量,减少了可能出现的误差,但相对于基于 PGM 的测量算法,一般在测量过程中引入更多的探测分组。

基于 PRM 模型的现有 PTR 算法在背景流量比较恒定以及在瓶颈链路的利用率不高的情况下具有较高的准确性和较快的收敛速度,并且对网络的影响较小.然而,当网络路径上的背景流变化较大以及在瓶颈链路的利用率较高等恶劣网络环境下,现有的 PTR 算法有较大的测量误差,并且测量结果出现较大的起伏,即测量平稳性不好.

要提高 PTR 算法的测量准确度,需要准确地判断测量过程中的探测分组发送间隔与到达接收端的间隔是否匹配.现有的 PTR 算法仅仅根据到达接收端的一个探测分组序列判断接收端分组间隔与发送端的分组间隔是否相等,即是否达到转折点.然而,背景流的瞬时突发性使得单个探测分组序列不能够准确地反映此时的探测分组发送间隔是否满足算法收敛的条件,所以有必要连续发送几个分组序列判断是否达到转折点.选择好合适的初始间隔 $init_gap$,并把它作为探测分组发送间隔,发送 k 个分组序列(一个分组序列由 n 个大小为 s 以及间隔为 $init_gap$ 的分组构成).为避免连续地发送分组序列造成链路拥塞,分组序列之间有一段小的发送间隔 T ,网络可以在此期间传输完路由器队列中的探测分组以及背景流,避免前一个探测分组序列对后面的探测分组序列的测量造成影响.由于探测分组在网络的利用率较高时,往往出现部分丢失的情况,所以如果把探测分组在接收端间隔之和与探测分组刚离开发送端的间隔之和进行比较将出现较大的误差,因为前者可能因为探测分组存在丢失的情况,而后者没有探测分组丢失的情况发生.因此,我们使用探测分组平均间隔代替探测分组间隔之和,排除丢失的探测分组对间隔之和的影响.如果分组序列中丢失的探测分组占的比例较大,那么认为此次测量无效,需要重新测量.在接收端,先计算第 i 个分组序列到达接收端的平均间隔 $avg_dst_gap(i)$,然后计算 k 个分组序列到达接收端的平均间隔之和 $\sum_{i=1}^k avg_dst_gap(i)$,与 k 个分组序列的发送间隔之和 $\sum_{i=1}^k avg_src_gap(i)$ 进行比较,判断此时探测分组发送间隔是否满足算法达到转折点的条件.如果是肯定的,那么探测结束,并且使用式(5)计算网络路径的可用带宽

$$PTR_ABW = \frac{s * 8 * k}{\sum_{i=1}^k avg_dst_gap(i)} \quad (5)$$

其中 s 为探测分组的大小, k 为对应每个探测分组发送间隔的分组序列数量.

如果没有达到转折点,那么在 $init_gap$ 的基础上,增加 gap_step ,从而通过增加探测分组发送间隔降低发送速率. $init_gap$ 以及 gap_step 的选取影响到算法的收敛时间, $init_gap$ 越大, gap_step 越小,那么需要经过多次循环才能使探测分组发送间隔与探测分组到达接收端的间隔相匹配. gap_step 一方面影响收敛速度,另一方面与测量的精度相关.如果 gap_step 较大,那么一次调整 $init_gap$,就可以较大地改变探测速率,使得快速到达转折点,但此时获得的可用带宽将比较粗略.为了使得在转折点处,发送间隔与接收间隔匹配得更

好, gap_step 可以适当地小一些.不同于现有的 PTR 算法,我们选取 $init_gap = g_B$,而 $gap_step = g_B/20$.比如, g_B 对应的测量速度为 10Mbps,那么 gap_step 对应改变量为 0.5Mbps.另外,我们用式(6)确定算法是否收敛,即是否达到转折点.

$$\max \left(\frac{\sum_{i=1}^k avg_src_gap(i) - \sum_{i=1}^k avg_dst_gap(i)}{\sum_{i=1}^k avg_src_gap(i)}, \frac{\sum_{i=1}^k avg_dst_gap(i)}{\sum_{i=1}^k avg_src_gap(i)} \right) < \quad (6)$$

在实验中 设置为 0.1.

4 实验结果

4.1 IGI 改进算法的实验结果

利用改进的 IGI 测量方法即式(4)进行实验.实验环境是瓶颈带宽为 10Mbps 的某 Internet 网,探测分组对长度为 1500Bytes.实验表明,该方法测量时间还不到 1 秒,测量速度大大提高.在测量准确性方面,本实验采用与 MRTG^[7]测量结果对比的方法来加以说明.同时,为方便对比,也采用现有的 IGI 算法进行测量.MRTG 是利用 SNMP 来收集路由器管理信息库(MIB)的数据,记录转发的流量.虽然它报告的时间间隔长达 5 分钟,但它是迄今用来检测可用带宽的最准确的工具,其缺点是非实时的离线测量.在测量过程中,为便于与 MRTG 对比,利用 IGI 和改进的 IGI 算法测量数据时也采用 5 分钟的间隔报告一次测量结果.图 2 描述了典型的测量数据,在截取的 4 小时数据测量中有 1 小时主动加入了 2Mbps 的竞争流.

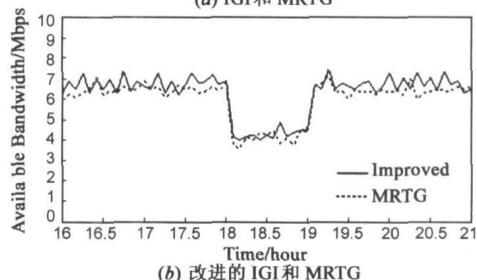
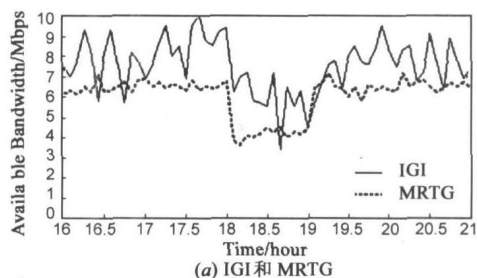


图 2 IGI 和改进的 IGI 算法分别与 MRTG 测量结果的比较

从图 2 中可以看出,若以 MRTG 测量结果作为标准数据,则 IGI 算法(图(a)实线)测得的数据大部分时间内是偏大的,同时,其数据离散性大,表现为测量数据的不稳定,跳跃性大.与此形成对比的是改进的 IGI(图(b)实线),其测量结果基本与 MRTG 测量结果相吻合,且大部分时间稳定在 MRTG 曲线上.另外,在主动加入竞争流后,IGI 算法虽然也能反映可用带宽的变化,但是,没有改进的 IGI 算法反映得那么快速与准确.

4.2 PTR改进算法的实验结果

在本节中我们通过实验比较现有的 PTR 算法和改进的 PTR 算法在网络负载处于动态变化时的性能。

我们搭建的实验网的拓扑如图 3 所示,其中 P_s 为探测分组发送端, P_d 为探测分组接收端, f_s 和 f_d 分别是背景流 f 的发送端和接收端,分别对应于一个局域网,而节点 M 监控路由器 R_1 和 R_2 之间的链路 L 的背景流的变化以及 P_s 发送的探测流的强度。虽然用模型的方式也能产生符合 Internet 流的统计特性的背景流^[22,23],然而为了使实验环境更贴近实际情况,实验采用的背景流来自 WIDE 骨干网的一条连接日本和美国的网络路径上实际采集的流^[24]。 f_s 运行流重放工具 Tpreplay^[25],把采集的数据流重放到实验网上。节点 M 运行 snmpget^[26],通过查询路由器 R_1 的管理信息库(MIB),获得链路 L 上背景流的强度,进而获得 L 的实际可用带宽,同时也是网络路径的实际可用带宽。snmpget 和 MRTG 类似,都是通过查询路由器 MIB 来获得路由器接口的流量强度,不同之处是 MRTG 采用每 5 分钟记录一次数据,而 snmpget 可以根据需要设置查询 MIB 的时间间隔。在本实验中,节点 M 查询 MIB 的间隔是 1 分钟。由于 snmpget 记录的是数据链路层的背景流量,我们将根据网络的传输媒介的特点,将测量的链路层的数据转化为网络层的流量强度。

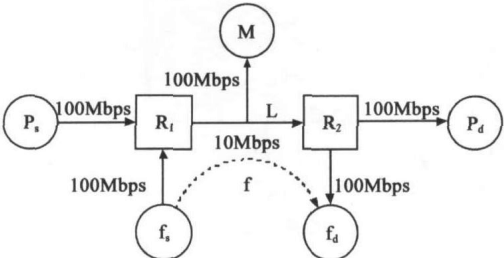


图 3 实验拓扑

现有的 PTR 测量工具可参见文献[4],各参数按照默认值进行设置。改进的 PTR 算法,每个分组序列包含 60 个 600B 的探测分组,分组序列的发送间隔 T 设置为低于 $500\mu s$,对于每个发送间隔,发送的分组序列的数量 k 设置为 5。探测分组的大小建议设置为背景流分组的平均大小。实验表明,这样设置进行测量是可行的。

实验过程中,链路 L 上的利用率开始为 0.54 左右,持续一个小时后,增加背景流,使得 L 的利用率为 0.82 左右,再经过一个小时,减少背景流,使得链路 L 的利用率为 0.63 左右。在 3 个小时的实验中, P_s 和 P_d 持续运行 PTR 算法,测量结果如图 4(a)所示。在相同的环境下,用改进的 PTR 算法即 Improved PTR 算法进行测量,测量结果如图 4(b)所示。从图中可以看出,无论链路 L 的利用率是高还是低,现有的 PTR 算法的测量结果都高估了网络路径可用带宽,并且测量的起伏比较大。而形成鲜明对比的是,改进的 PTR 的测量结果在链路处于不同的利用率时,测量结果都比较平稳,在利用率较低时,测量准确性很高,表现为 Improved PTR 对应的可用带宽估计曲线与 snmpget 对应的真实可用带宽曲线几乎吻合。在利

表 1 在瓶颈链路处于不同背景流强度时
PTR 算法和改进的 PTR 算法的性能比较

利用率	0.54		0.82		0.63	
算法	Improved PTR	PTR	Improved PTR	PTR	Improved PTR	PTR
测量时间/s	3.58	1.91	18.20	5.20	5.26	1.91
探测流强度/kbps	4.58	1.20	9.22	1.58	6.19	1.27
测量的动态性/Mbps	0.41	0.51	0.14	0.64	0.21	0.43
测量误差/%	2.52	10.67	32.82	83.30	2.79	20.17

用率较高时,虽然稍微高估了可用带宽,但也有较高的准确性。在跟随链路的背景流变化方面,改进的 PTR 算法明显好于现有的 PTR 算法。

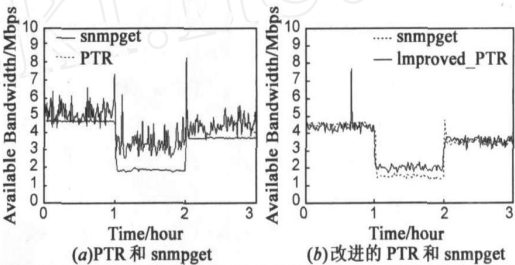


图 4 PTR 和改进的 PTR 算法分别与 snmpget 测量结果的比较

在链路 L 处于三个不同的背景流强度下,更详细的性能统计数据如表 1 所示。在表中,利用率指瓶颈链路 L 的利用率;测量时间指测量算法在一次测量过程中从发送探测分组到计算出测量值所用的时间,探测流强度是指测量程序在持续探测可用带宽期间的探测流的平均强度。测量的动态性指测量值的均方差,这个指标用于衡量算法的测量平稳性;测量误差指估计值和实际值的差值的绝对值除以真实值,再乘以 100%。从表中可以看出,现有的 PTR 算法的测量时间以及探测流的强度都小于改进的算法,说明现有的 PTR 算法对网络的影响较小。然而,在测量的动态性以及测量准确度方面,改进的 PTR 算法远远好于现有的 PTR 算法。在瓶颈链路处于高利用率(这里指 0.8 以上)时,原有的 PTR 算法的测量结果远远高于真实可用带宽,而改进的 PTR 算法在高利用率时能取得良好的测量结果。

5 结论

本文讨论了 IGI 算法在因特网上的应用。在分析算法的缺点后,提出了改进的算法。通过与 MRTG 的测量结果进行比较,表明改进的算法在测量准确性以及跟踪可用带宽变化的能力等方面均有明显的提高。本文还改进了 PTR 算法,使得在测量时间以及探测流强度改变不大的情况下,改善了测量的平稳性,极大地提高了测量的准确度,尤其在网络路径的瓶颈链路的利用率较高时,取得比较大的改进。

参考文献:

[1] Suman Banerjee, Ashok Agrawala. Estimating available capacity of a network connection[A]. IEEE Int'l Conference on Networks[C]. Singapore, Sept. 2000. 131 - 138. "NetDyn: Network Measurements Tool" also available[Online]. <http://www.cs.umd.edu/suman/netdyn/>.
[2] Kevin Lai, Mary Baker. Nettimer: A tool for measuring bottle-

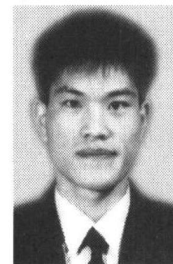
- neck link bandwidth [A]. Proceedings of the USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems [C]. San Francisco, USA, Mar. 2001. 122 - 133. Available [Online]. <http://mosquitonet.stanford.edu/~laik/projects/nettimer/>
- [3] M Jain, C Dovrolis. Pathload: A measurement tool for end-to-end available bandwidth [A]. Proc of Passive and Active Measurements workshop (PAM '02) [C]. Fort Collins, CO, USA, Mar. 2002. 14 - 25.
- [4] Ningning Hu, Peter Steenkiste. Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Aug. 2003, 21(6): 879 - 894.
- [5] 林宇, 邬海涛, 王重钢, 等. 一种非对称链路带宽测量算法 [J]. 电子学报, 2002, 30(12A): 2066 - 2070.
- [6] 张文杰, 钱德沛, 栾钟治, 等. Bing 算法估测网络带宽的研究与实现 [J]. 小型微型计算机系统, 2004, 125(5): 833 - 835.
- [7] T Oetiker, D Rand. Multi Router Traffic Grapher [M]. [Online] <http://people.ee.ethz.ch/~oetiker/webtools/mrtg/>.
- [8] K Harfoush, A Bestavros, J Byers. Measuring bottleneck bandwidth of targeted path segments [R]. Technical Report BUCS-TR-2001-016, Boston University, USA, Computer Science Department, July 2001.
- [9] V Jacobson. Pathchar: A Tool to Infer Characteristics of Internet Paths [M]. Presented at the Mathematical Sciences Research Institute (MSRI), Berkeley, California, USA, [Online] <ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/1997>, Apr. 1997.
- [10] J Strauss, D Katabi, F Kaashoek. A measurement study of available bandwidth estimation tools [A]. Proc ACM Internet Measurement Conference (IMC) [C]. Miami Beach, Florida, Oct. 2003.
- [11] V Ribeiro, M Coates, R Riedi, et al. Multifractal cross traffic estimation [A]. Proc ITC Specialist Seminar on IP traffic Measurement, Modeling, and Management [C]. Monterey, California, Sept. 2000.
- [12] V Ribeiro, R Riedi, R Baraniuk, et al. PathChirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths [A]. Workshop on Passive and Active Measurement (PAM) [C]. La Jolla, California, USA, April 2003.
- [13] B Melander, M Bjorkman, P Gunningberg. A new end-to-end probing and analysis method for estimating bandwidth bottlenecks [A]. Proc Global Internet Symposium [C]. San Francisco, CA, USA, Nov. 2000. 415 - 420.
- [14] X Liu, K Ravindran, B Liu, et al. Single-hop probing asymptotics in available bandwidth estimating: A sample-path analysis [A]. Proc of the 4th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement (IMC) [C]. Taormina, Sicily, Italy, October 2004. 300 - 313.
- [15] J Navratil, R L Cottrell. ABWE: A practical approach to available bandwidth estimation [A]. Workshop on Passive and Active Measurement (PAM) [C]. La Jolla, California, USA, April 2003.
- [16] The Surveyor Website [M]. [Online] <http://www.advanced.org/surveyor>.
- [17] The National Internet Measurement Infrastructure (NIMI) [M]. [Online] <http://www.ncne.org/networking>.
- [18] The Cooperative Association for Internet Data Analysis (CAIDA) [M]. [Online] <http://www.caida.org>.
- [19] C Fraleigh, C Diot, B Lyles, et al. Design and deployment of a passive monitoring infrastructure [A]. Proc Passive and Active Measurements (PAM) [C]. Amsterdam, April 2001.
- [20] C Dovrolis, P Ramanathan, D Moore. What do packet dispersion techniques measure? [A]. Proc IEEE INFOCOM [C]. Anchorage, AK, USA, Apr. 2001. 905 - 914.
- [21] M Jain, C Dovrolis. End-to-end available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput [A]. Proc ACM SIGCOMM Symp on Communication Architectures Protocols [C]. Pittsburgh, PA, USA, Aug. 2002. 295 - 308.
- [22] 胡严, 张光昭. 重尾 ON/OFF 源模型生成自相似业务流研究 [J]. 电路与系统学报, 2001, 6(3): 72 - 76.
- [23] X Liu, Y Hu, L Zhang. Design of a deterministic interleaver for turbo codes and its applications in self-similar traffic streams [J]. Chinese Journal of Electronics, Apr. 2004, 13(2): 342 - 345.
- [24] K Cho, K Mitsuya, A Kato. Traffic data repository at the WIDE project [A]. Proc USENIX 2000 Annual Technical Conference: FREENIX Track [C]. San Diego, CA, USA, June 2000. 263 - 270.
- [25] Tcpreplay [DB/OL]. <http://tcpreplay.synfin.net/trac/>.
- [26] snmpget [DB/OL]. <http://www.net-snmp.org/tutorial/tutorial-5/commands/snmpget.html>.

作者简介:



刘星成 男, 1964 年生, 分别获得华中理工大学工学学士、工学硕士学位和中山大学理学博士学位, 曾先后于英国 Southampton 大学和美国 Oregon 州立大学留学, 现为中山大学电子与通信工程系副教授, 中国电子学会和中国通信学会高级会员, 主要研究兴趣为: 计算机网络安全、信息与编码技术和移动通信。

E-mail: isslxc@mail.sysu.edu.cn



何莉 男, 1982 年生, 中山大学电子与通信工程系博士生, 主要研究兴趣为: 网络服务质量和网络安全。

E-mail: engineerheli@126.com