

一种 IPv6 网络可用带宽测量方法及分析

邱全杰¹ 吴中福²

(重庆大学信息与网络管理中心 重庆 400030)¹ (重庆大学计算机学院 重庆 400030)²

摘要 在分析 IPv4 网络带宽测量原理的基础上,结合下一代网络协议 IPv6,提出了一种 IPv6 网络单程不等长包对减法可用带宽测量方法。利用 IPv6 报文的流标签字段控制测试报文序列的路径,设计并编程实现了 IPv6 网络可用带宽测量原型系统。试验结果表明,方法在 IPv6 网络下具有可行性,测量误差小于 0.1M。测量结果符合实际,反映了网络可用带宽与时延的实时关联性,为网络监控和性能测量提供了有益的手段。

关键词 IPv6,可用带宽,流标签,带宽测量

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Method for Available Bandwidth Measuring and Analysis of IPv6 Network

QIU Quan-jie¹ WU Zhong-fu²

(Information and Network Management Center, Chongqing University, Chongqing 400030, China)¹

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)²

Abstract Based on the analysis of the measurement principle of IPv4 network bandwidth and with the combination of the next-generation network protocol IPv6, we put forward a one-way and different-length packet pair subtraction method for available bandwidth measuring of IPv6 network. An IPv6 network available bandwidth measuring prototype system was designed and programmed by using the flow label field of IPv6 messages to control the sequence path of tested messages. The test results show that the algorithm is feasible for IPv6 network with the measuring error less than 0.1M. The measuring results are realistic and better to reflect the real-time correlation of network available bandwidth and time delay, providing a useful means of network monitoring and performance measuring.

Keywords IPv6, Available bandwidth, Flow label, Bandwidth measuring

1 引言

随着互联网及其应用的飞速增长,当前的互联网协议 IPv4 地址短缺等缺点已经越来越突出。IPv6 作为 IETF 确定的下一代互联网协议,有望解决 IPv4 地址短缺等问题^[1]。我国已经建成了世界上最大规模的 IPv6 网络,但 IPv4 向 IPv6 的演进需要相当长的时间才能完成。网络应用特别是高清视频等业务的拓展,对网络带宽提出了较高的要求。由于链路可用带宽动态变化,背景流量呈现长相关、自相似特性以及短时突发性,使链路带宽的实际测量面临很大困难和挑战,成为下一代网络研究的关键问题^[2]。

网络带宽是指网络链路在单位时间内所能传送的数据报文的最大比特数量,即最大的传输速率,它一般可以分为瓶颈带宽和可用带宽^[3]。瓶颈带宽是指在源节点到目的节点之间处理能力最低的链路所能达到的最大数据传输速率,也就是当一条传输路径上没有其他业务流量时,该路径所能供给一个业务流最大传输速率。可用带宽为网络在不降低其他业务流传输速率的情况下能提供给一个业务流的最大传输速

率^[4]。近年来人们设计了大量的带宽测试算法和测量系统,现有的带宽测量算法或者方法广义上来分主要有 3 种:第一种是数据包对(Packet Pair)算法;第二种是变长分组(Variable Packet Size)算法;第三种是 Self Loading Periodic Streams (SLoPS)^[4-11]。

本文在分析 IPv4 网络带宽测量原理的基础上,结合下一代网络协议 IPv6,提出了一种 IPv6 网络单程不等长包对减法可用带宽测量方法。利用 IPv6 报文的流标签字段控制测量报文序列的路径,设计并编程实现了 IPv6 网络可用带宽测量原型系统。试验结果表明,方法在 IPv6 网络下具有可行性,测量误差小于 0.1M,同时与之对应的链路时延测试数据也真实地反映了网络可用带宽的实时变化和它与网络时延的关联性。

2 网络带宽测量的基本概念及原理

网络带宽不是一个单独的概念,它与网络的容量有关系。设 H 是路径上的连接个数, c_i 是第 i 个连接的容量(c_0 是源端系统的发送带宽),那么路径的容量 C 就可以表示为:

到稿日期:2010-05-13 返修日期:2010-08-31 本文受重庆市教委科技基金项目(KJ08A07),教育部科学技术研究重大项目(CNGI2008-016)资助。

邱全杰(1975-),男,博士生,助研,主要研究方向为 IPv6 网络技术、网络性能测量等, E-mail:qqj@cqu.edu.cn; 吴中福(1938-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络与通信、现代远程教育技术、计算机网络安全技术等。

$$C = \min_{i=0 \dots H} c_i \quad (1)$$

设 u_i 是在某个时间段内链路 i 的平均利用率, ($0 \leq u_i \leq 1, u_0 = 0$), 那么链路 i 的可用带宽就是 $C_i(1 - U_i)$, 该路径在这个时间段内的可用带宽可以表示为^[1]:

$$A = \min_{i=0 \dots H} c_i(1 - u_i) \quad (2)$$

定义 1 l 表示链路的跳数; d_i 表示路由器 i 到路由器 $i+1$ 之间的物理距离; v_i 表示电信号(比特流)在传输介质中的传输速度; b_i 表示第 i 条链路带宽; s^k 是第 k 个分组的长度大小; q_i^k 是分组 k 到达链路 i 的时间。

一个分组经过了 $(i-1)$ 条链路到达第 i 条路由器时, 该分组的时延为:

$$t_i^k = t_0^k + \sum_{j=0}^{i-1} \left(\frac{s^k}{b_j} + \frac{d_j}{v_j} + q_j^k \right) \quad (3)$$

式中, $\frac{s^k}{b_i}$ 是分组传输时延, $\frac{d_i}{v_i}$ 是传播时延, q_i^k 表示分组在路由器中的排队等待时延, t_0^k 表示分组 k 到达链路 0 的时刻。这里只计算了到达路由器的时间, 对于单个分组而言, 如果要计算来回时间 RTT, 还需要加上回程时延或者 ICMP 超时包的传送时延。依据公式在已知其他变量的情况下即可求出链路的带宽值 b_i , 这就是网络链路带宽测量的基本原理^[10,11]。

3 IPv6 网络带宽测量模型

定义 2 n 表示链路的数量; N_i 表示第 i 个节点; b_i 表示链路 i 的带宽; t_i^n 是第 n 个数据包在路由器 i 的时间戳; s_i^n 是在链路 i 上第 n 个数据包的大小; q_i^n 是第 n 个数据包在第 i 个路由器的排队时延; c_i^n 是时钟偏移时延; d_i 是链路 i 的长度; d^* 是链路层协议包头长度; l' 是隧道 IPv4 报头的长度。

如图 1 所示, A 为源节点, B 为目标节点, 测试路径 r 由 n 条链路组成, 即 r 上有 $(n+2)$ 个节点, 其中有 n 个中间节点。 N_i 和 N_{i+1} 为路径上的两个相邻节点, 它们之间有链路 l_i, l_i 的带宽为 b_i 。

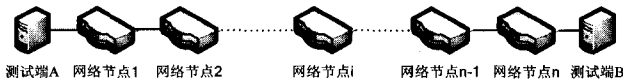


图 1 网络带宽测量端到端路径示意图

4 IPv6 网络带宽测量方法

4.1 基本思想

现有 IPv4 协议带宽的测量算法或者方法均做了一个假设: 在测量过程中, 路径固定且惟一, 既不改变路由也不存在多路转发。事实上, IP 通常被描述为无连接协议, 就像任何一个包交换网络一样, IP 设计为让每个包单独寻径以达到其目的地, 每个包都分别处理, 其结果是两个从相同数据源发往相同目的地的包可以采用完全不同的路由来穿越整个网络。所以当前 IP 网络带宽测量的前提假设很难成立。本文在深入研究下一代网络 IPv6 协议的基础上, 提出利用 IPv6 报头的流标签来解决 IPv4 中带宽测量方法路径不固定且不唯一的问题。其基本实现思想如下:

(1) 流标签把测量数据包作为一系列源地址和目的地址相同业务流的一部分, 同一个业务流中的所有数据包具有相同的流标签, 从而实现了测量数据包的路径固定与唯一;

(2) 确定源主机 $h1$ 到目的主机 $h2$ 的一条路径, 记下沿途

路径上路由器的 IPv6 地址及统计出跳数(借助常用的 tracer6 工具);

(3) 依据获得的路由器 IPv6 地址, 利用 IPv6 数据报头的流标签项, 在源主机 $h1$ 和目的主机 $h2$ 的路径上建立起一条固定的测量数据报传输路径, 确保发送到沿途每一个路由器的两个数据报文(报文组)能够沿着同一条路径传输;

(4) 根据预先设定的跳数值, 即在 IPv6 协议报头中写入的跳数值, 发送不同跳数的报文组(2 个长度不同的报文), 利用 ICMPv6 报文返回记录的 IPv6 地址和时间戳, 将测量报文到达两个路由器的延迟相减, 此时得到的不是绝对时间, 而是相对时间, 即分别是源节点和目的节点的两个数据包到达的时间之差;

(5) 依据方法推导带宽公式, 可以计算出一条路径上所有链路 $1 \dots i$ 的带宽。瓶颈带宽则为所有值的最小 $\min(i)$, 可用带宽则为最大 $\max(i)$ 。

4.2 方法

根据式(3), 考虑到各种链路层协议和时钟偏移带来的误差, 可以得出时延计算的另外一个公式:

$$t_{i+1}^{n-1} = t_i^{n-1} + \frac{d_i}{v_i} + \frac{s_i^{n-1} + d^*}{b_{i,i1}} + q_i^{n-1} + c_i^{n-1} \quad (4)$$

$$t_{i+1}^n = t_i^n + \frac{d_i}{v_i} + \frac{s_i^n + d^*}{b_{i,i2}} + q_i^n + c_i^n \quad (5)$$

特别是在 IPv6 网络中存在诸如 IPv6 over IPv4 等隧道的情况下, 更有一般的计算公式:

$$t_{i+1}^{n-1} = t_i^{n-1} + \frac{d_i}{v_i} + \frac{s_i^{n-1} + d^* + l'}{b_{i,i1}} + q_i^{n-1} + c_i^{n-1} \quad (6)$$

$$t_{i+1}^n = t_i^n + \frac{d_i}{v_i} + \frac{s_i^n + d^* + l'}{b_{i,i2}} + q_i^n + c_i^n \quad (7)$$

假设发送的两个数据报文 $s^{n-1} < s^n$, 即式(7)减去式(6)得到:

$$t_{i+1}^n - t_{i+1}^{n-1} = \left(t_i^n + \frac{d_i}{v_i} + \frac{s_i^n + d^* + l'}{b_{i,i2}} + q_i^n + c_i^n \right) - \left(t_i^{n-1} + \frac{d_i}{v_i} + \frac{s_i^{n-1} + d^* + l'}{b_{i,i1}} + q_i^{n-1} + c_i^{n-1} \right) \quad (8)$$

此时, 令 Δt_{i+1}^{n-1} 为相邻的两个数据包 n 和 $n-1$ 到达路由器 $i+1$ 的时间差, 即 $\Delta t_{i+1}^{n-1} = t_{i+1}^n - t_{i+1}^{n-1}$; 同时令 $\Delta c_i^{n,n-1} = c_i^n - c_i^{n-1}$; $\Delta q_i^{n,n-1} = q_i^n - q_i^{n-1}$; 则有:

$$\Delta t_{i+1}^{n-1} = \Delta t_i^{n,n-1} + \frac{s_i^n + d^* + l'}{b_{i,i2}} - \frac{s_i^{n-1} + d^* + l'}{b_{i,i1}} + \Delta c_i^{n,n-1} + \Delta q_i^{n,n-1} \quad (9)$$

现在讨论式(9)中右边的第二和第三式子的分母 $b_{i,i1}$ 和 $b_{i,i2}$ 分别代表数据包 $n-1$ 在 $t1$ 时刻通过链路 i 时刻的实时带宽和数据包 n 在 $t2$ 时刻通过链路 i 的实时带宽。如果 $t1$ 与 $t2$ 时间间隔足够小, 则有 $b_{i,i1} = b_{i,i2}$, 这里两个数据包中间可以有其他数据包, 只假设在 $t1$ 与 $t2$ 时间链路 i 的传输速度不变, 即是网络带宽不变或者有一个平均传输带宽, 这个假设是合理的, 即是:

$$\bar{b}_i^{t1,t2} = b_{i,i1} = b_{i,i2}$$

式中, $\bar{b}_i^{t1,t2}$ 为链路 i 在 $t1$ 到 $t2$ 时间段内的平均传输带宽。由式(9)可以得出:

$$\Delta t_{i+1}^{n-1} = \Delta t_i^{n,n-1} + \frac{s_i^n + d^* + l'}{b_{i,i2}} - \frac{s_i^{n-1} + d^* + l'}{b_{i,i1}} + \Delta c_i^{n,n-1} + \Delta q_i^{n,n-1} \quad (10)$$

有:

$$\Delta t_{i+1}^{n-1} - \Delta t_i^{n-1} = \frac{1}{b_{i+1,i2}}(s_i^n - s_i^{n-1}) + \Delta c_i^{n,n-1} + \Delta q_i^{n,n-1} \quad (11)$$

在现有带宽测量及测量方法中,数据包的排队时延都是忽略了,也没有考虑系统时间偏差和链路层协议等对带宽测量的影响,然而这些因素对实际测量的影响是存在的。如果考虑了对数据包的处理时延,两个数据包到达后的处理时延相减后,数值更小,所以可以忽略。由此带来的误差会比忽略数据包的处理时延本身要小得多,那么上式中的 $\Delta q_i^{n,n-1} \approx 0$ 。尽管一条路径上的各个路由器或者主机的系统时间不一定准确,而且可以用软件或者 GPS 的办法来校正时间,但还是不能确保时间的绝对准确和一致,因此在做了减法之后,最后参与计算的时间是同一台主机或路由器相对的时间是相当小的,完全可以忽略掉,所以 $\Delta c_i^{n,n-1} \approx 0$ 。至于链路层协议带来的影响,通过减法,把 d^* 减掉了,所以就不存在它对测量带宽的影响了。所以上式变为:

$$\Delta t_{i+1}^{n-1} - \Delta t_i^{n-1} = \frac{1}{b_{i+1,i2}}(s_i^n - s_i^{n-1}) \quad (12)$$

即:

$$b_{i+1,i2} = \frac{s_i^n - s_i^{n-1}}{\Delta t_{i+1}^{n-1} - \Delta t_i^{n-1}} \quad (13)$$

$$b_{i,i1} = \frac{s_i^n - s_i^{n-1}}{\Delta t_{i+1}^{n-1} - \Delta t_i^{n-1}} \quad (14)$$

从最后推导出的式(14)中可以看到,参与计算的不是绝对时间 t ,而是相对时间 Δt ,而且分别是源节点和下一个节点上的两个相邻数据包到达的时刻或者时间戳时间之差。另外,从这个式子可以较容易地计算出链路 i 的带宽,因为只需要知道发送到链路 i 的数据包对的大小和它们到达链路上路由器 i 和 $i+1$ 的时间差。更重要的是,只需利用 ICMP 报文来返回关心的两个测量数据包到达链路上路由器 i 和 $i+1$ 的时间戳时间,不必关心 ICMP 报文自身到达的时间。所以,单程方法明显减小了由于回程报文返回的路径与测量报文路由路径不一致的问题。

4.3 方法分析

在常用的机制中,由源主机发送探测包到各个路由器,直到目的节点。这个方式可以先通过一些工具如 `tracert` 命令,找出从 H1 到 H2 这条路径上的所有路由器的 IP 地址,然后在探测包中写入这些路由器的 IP 地址,由特定的 ICMP 数据报返回想要的时间信息。然后逐一求出该路径上每一条链路的带宽。在这里约定:

$\Delta t_{i,i}^{n,n-1}$ 代表数据包 n 和数据包 $n-1$ 在 $t1$ 时间段内到达路由器 i 的时间差,根据式(14),第一条链路的带宽为:

$$b_{0,i1} = \frac{s_0^n - s_0^{n-1}}{\Delta t_{i,i}^{2,1} - \Delta t_{0,i}^{2,1}} \quad (15)$$

表示在源节点 A 发送数据包 s_0^n 和数据包 s_0^{n-1} 到路由器 1 后,由 ICMP 报文分别记录它们到达路由器 1 的时间,然后返回该时间用来计算链路 0 的带宽。在 $t2$ 时间段里,发送数据包 s_1^n 和数据包 s_1^{n-1} 到路由器 2,同样,取回路由器 2 的两个时间戳,reply2 回到 A,由此,可以根据得到的两对时间算出链路 1 的带宽。

$$b_{1,i1} = \frac{s_1^n - s_1^{n-1}}{\Delta t_{i,i}^{2,1} - \Delta t_{1,i}^{2,1}} \quad (16)$$

能够通过测量直接得到的是 $\Delta t_{i,i}^{2,1}$ 和 $\Delta t_{0,i}^{2,1}$,利用式(16):

$$b_{0,i2} = \frac{s_0^n - s_0^{n-1}}{\Delta t_{i,i}^{2,1} - \Delta t_{0,i}^{2,1}} \quad (17)$$

即有:

$$\Delta t_{i,i}^{2,1} = \frac{s_0^n - s_0^{n-1}}{b_{0,i2}} + \Delta t_{0,i}^{2,1} \quad (18)$$

把式(18)代入式(17)的分母中,则有:

$$b_{1,i2} = \frac{s_1^n - s_1^{n-1}}{\Delta t_{i,i}^{2,1} - \Delta t_{1,i}^{2,1}} = \frac{s_1^n - s_1^{n-1}}{\Delta t_{i,i}^{2,1} - \Delta t_{0,i}^{2,1} - \frac{s_0^n - s_0^{n-1}}{b_{0,i2}}} \quad (19)$$

由此可见,通过简单的代换,利用已有的值,就可以计算出 $b_{1,i2}$ 的值。

再来求解链路 2 的带宽:

$$b_{2,i3} = \frac{s_2^n - s_2^{n-1}}{\Delta t_{i,i}^{2,1} - \Delta t_{2,i}^{2,1}} \quad (20)$$

可以通过测量直接得到的是 $\Delta t_{i,i}^{2,1}$ 和 $\Delta t_{0,i}^{2,1}$,利用式(15)和式(19),可以推导出求 $b_{2,i3}$ 的公式:

$$b_{2,i3} = \frac{s_2^n - s_2^{n-1}}{(\Delta t_{i,i}^{2,1} - \Delta t_{0,i}^{2,1}) - (s_2^n - s_2^{n-1}) \left(\frac{1}{b_{1,i2}} + \frac{1}{b_{0,i2}} \right)} \quad (21)$$

由于带宽测量是在短时间内完成的,在测量过程中网络带宽值应保持稳定,也就是说各链路的带宽在测量过程中基本保持不变,即有:

$$b_{1,i3} \approx b_{1,i2} \approx b_{1,i1} \approx b_{1,i}$$

$$b_{0,i3} \approx b_{0,i2} \approx b_{0,i1} \approx b_{0,i}$$

式中, t 为完成一次测量的时间段,将式(21)推广到任意一条路径上的任何一条链路的带宽计算,则有:

$$b_{i,t} = \frac{s_i^n - s_i^{n-1}}{(\Delta t_{i,i}^{n,n-1} - \Delta t_{0,i}^{n,n-1}) - (s_i^n - s_i^{n-1}) \left(\frac{1}{b_{i-1,t}} + \dots + \frac{1}{b_{0,t}} \right)} = \frac{s_i^n - s_i^{n-1}}{(\Delta t_{i,i}^{n,n-1} - \Delta t_{0,i}^{n,n-1}) - (s_i^n - s_i^{n-1}) \sum_{j=0}^{i-1} \frac{1}{b_{j,t}}} \quad (22)$$

5 IPv6 网络带宽测量方法实现及结果分析

IPv6 报文协议流标签字段把单个包作为一系列源地址和目的地址相同业务流的一部分,同一个流中的所有数据包具有相同的流标签,IPv6 的流标签可以实现路径的固定与唯一;确定源主机 h1 到目的主机 h2 的一条路径,记下沿路径上路由器的 IPv6 地址及统计出跳数(利用常用的 `tracert` 工具);依据获得的路由器 IPv6 地址,利用 IPv6 数据报头的流标签项,在源主机 h1 和目的主机 h2 的路径上建立起一条固定的测量数据报传输路径,以确保发送到沿途每一个路由器的两个数据报文(报文组)能够沿着同一条路径传输;根据预先设定的跳数值,发送不同跳数的报文组(2 个长度不同的报文),利用 ICMPv6 返回记录的 IPv6 地址和时间戳;依据前述推导的带宽公式计算出一条路径上所有链路 $1 \dots i$ 的带宽。瓶颈带宽则为所有值的 $\min(i)$,可用带宽则为 $\max(i)$ 。

最后,利用 PC 机分别作为测试的两端,接入 cernet2 网络,利用带宽测量及测量方法,编程实现了 IPv6 两端可用带宽测量的原型系统。其实现流程如图 2 所示。

在图 3 中,横轴表示测试的时间,纵轴表示可用带宽(测量结果),单位为 Mbit/s。在图 4 中,横轴表示测试的时间,纵轴表示延迟时间(测量结果),单位为 ms。测量过程中,在信源节点连续发送 1 组(2 个)小于 10byte 的报文,时间间隔为 30 秒,连续发 400 组。并在两端通过开启高清视频应用、文件下载等方式调整背景流量,检验可用带宽的测量结果

(下转第 121 页)

协同攻击。针对攻击流位置的不同,通过分析在加入保护流前后被攻击流的吞吐量和延时,最终指出保护流的合理位置。通过仿真可以看出,在适当的位置加入保护流可以有效地抵抗攻击流发动的攻击,达到保护正常通信流的效果。

参考文献

[1] Gupta V. Denial of Service Attacks at the MAC Layer in Wireless Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of MILCOM, 2002; 7-10
 [2] Zhou Yihong, Wu Dapeng, Nettles S M. On MAC-layer denial of service attacks in IEEE 802. 11 ad hoc networks; analysis and counter measures[J]. International Journal of Wireless and Mo-

bile Computing, 2006, 1(3/4): 268-275
 [3] Tran T M C, Scheuermann B, Mauve M. Detecting the Presence of Nodes in MANETs[C]//Proceedings of the ACM MOBILCOM. New York, NY, USA, 2007; 43-50
 [4] Mahajan R, Rodrig M, Wetherall D, et al. Analyzing the MAC Level Behavior of Wireless Networks in the Wild[C]//Proceeding of ACM SIGOCOM. Pisa, Italy, 2006
 [5] 任伟, 金海. 802. 11 移动 Ad Hoc 网络中针对 MAC 层的分布式拒绝服务攻击[J]. 计算机安全, 2005, 10: 17-20
 [6] 任伟, 刘腾红, 金海. 移动 Ad Hoc 网络中针对拥塞的 RoQ DDoS 攻击及其防御[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(11): 1927-1932

(上接第 86 页)

线变化图。从图 3 可以看出,对于 IPv6 网络利用 IPv6 流标签进行路径控制,采用单程不等长包对的减法带宽测量方法对一条固定路径上的带宽进行测量,其误差可小于 0. 1M。数据表明,该测量结果真实有效。

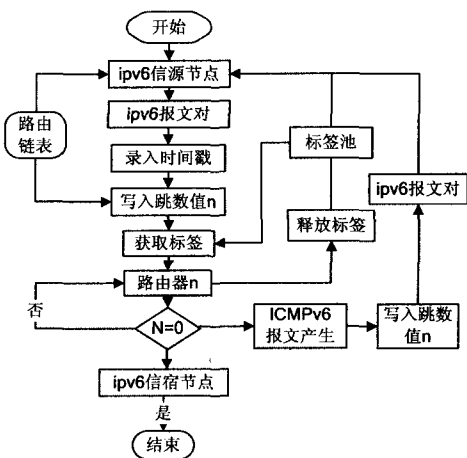


图 2 端到端带宽测量方法实现的流程图

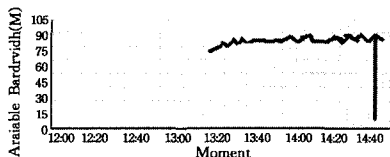


图 3 端到端可用带宽测量结果

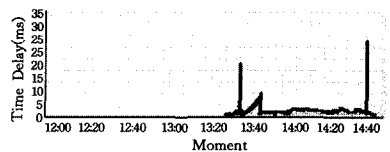


图 4 端到端时延测量结果

从图 3 和图 4 可以看出(由于篇幅有限,这里只列出代表性的一个对比图),在一定的时间内,一条链路可用带宽值是比较稳定的。但是在 fri 08:00 左右时刻,网络可能有突发流量产生,导致可用带宽值短时间大幅度减少,出现尖刺现象,与此同时,网络延迟大幅度加大。这与实际网络运行是吻合的,说明该时刻,网络传输能力减弱,网络出现了一定的拥塞。此时通过对网络背景流量抓包的分析,发现是网络突发了近 20M 的异常流量,进一步分析得知,该链路的源主机开启了一路接近 20M 的高清视频点播,即时关闭该点播,网络恢复

正常,拥塞现象得到改善。

结束语 本文提出了基于 IPv6 协议的单程不等长包对的减法带宽测量方法,结合 IPv6 报头的新字段流标签实现了测量报文序列的路径控制,编程实现了原型系统。特别是利用减法,消除了链路层、时差等因素对可用带宽测量结果精确性的影响。通过可用带宽与时延的实时对比,验证了两者之间的必然关联性,这对网络运行与维护中如何主动降低网络拥塞、重要应用带宽预留和网络性能监测有一定的实际价值。

参考文献

[1] Hung Li-che, Chen Yaw-chung. Parallel table lookup for next generation internet [C] // Proceedings-International Computer Software and Applications Conference. 2008; 52-59. Proceedings-32nd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference. COMPSAC, 2008
 [2] 卞静, 周保良, 张光昭. 可用带宽测量算法 PathPCQ 设计[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(3): 14-16
 [3] 刘敏, 李忠诚, 石晶, 等. IPv6 网络中基于优先级的可用带宽测量方法[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(8): 1361-1367
 [4] 张文杰, 钱德沛, 栾钟治, 等. Bing 算法测量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
 [5] 施金洋, 林宇, 金跃辉, 等. 基于减法模型的端到端瓶颈带宽测量方法[J]. 北京邮电大学学报, 2004(z1): 10-15
 [6] Strauss J, Katabi D, Kaashoek F. A measurement study of available bandwidth estimation tools[A] // Proc ACM Internet Measurement Conference (IMC) [C]. Miami Beach, Florida, Oct. 2003
 [7] Liu Min, Shi Jing-lin, Li Zhong-cheng, et al. A new end-to-end measurement method for estimating available bandwidth[C] // The 8th IEEE International Symposium on Computers and Communications. San Francisco: IEEE Press, 2003; 1393-1400
 [8] Lai K, Baker M. Measuring link bandwidths using a deterministic model of packet delay[C] // SIGCOMM 2000. Stockholm: ACM Press, 2000
 [9] Liu Min, Li Zhong-cheng, Guo Xiao-bing. An end-to-end available bandwidth estimation methodology[J]. Journal of Software, 2006(01)
 [10] Saroiu S, Krishna G P, Steven D. Gribble SProbe: a fast technique for measuring bottleneck [J/OL]. http://sprobe.ce. Washington. Edu/sprobs. Ps, 2007-03-24
 [11] Liu Min, Shi Jing-lin, Li Zhong-cheng. A new end-to-end measurement method for estimating available bandwidth[M]. San Francisco: IEEE Press, 2003