

基于消融包列的瓶颈带宽测量和定位方法

贾民政¹, 朱元忠^{1,2}, 余镇危², 张英³

(1. 北京工业职业技术学院 信息工程系, 北京 100042; 2. 中国矿业大学(北京) 计算机科学与技术系, 北京 100083;

3. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100080)

(jzmh_2001@163.com)

摘要:分析了现有的瓶颈带宽的测量技术和定位方法,对它们的优缺点进行了比较,提出一种基于消融包列法的瓶颈带宽测量和定位方法。消融包列由测量包和定位包组成,它可以在测量瓶颈带宽的同时定位瓶颈带宽,有效地减少了测量的次数并降低了测量负载。对该方法的正确性进行了理论证明和模拟实验验证,并与其他方法进行了比较,结果表明该方法具有测量负载低、定位准确等特点。

关键词:瓶颈带宽;测量;定位;模拟实验;消融包列

中图分类号:TP393.07 **文献标志码:**A

Bottleneck bandwidth measurement and localization based on meltable packet train

JIA Min-zheng¹, ZHU Yuan-zhong^{1,2}, YU Zhen-wei², ZHANG Ying³

(1. Department of Information Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China;

2. Department of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The paper analyzed the current measurement technologies and the existing localization methods of bottleneck bandwidth. Based on the analysis and comparison of their advantages and disadvantages, the paper put forward a new method of bottleneck bandwidth measurement and localization on the basis of meltable packet train method. The method can measure bottleneck bandwidth and localize it at the same time, which reduces the times and load of measurement effectively. In addition, the paper also proves the validity of the method from the theory and simulation experiment, and points out its advantages compared with other methods.

Key words: bottleneck bandwidth; measurement; localization; simulation experiment; meltable packet train

0 引言

随着网络电视、流媒体等技术应用,人们对网络的性能越来越关注。带宽作为最重要的网络资源之一,是网络传输路径性能的主要决定因素之一,网络瓶颈与整体性能分析、容量规划等必须掌握准确的带宽数据。带宽测量作为了解网络带宽信息的一种重要手段在网络的性能分析和评价中发挥着越来越大的作用。

瓶颈带宽^[1-4]指的是两个节点之间路径上的最小的链路带宽,它表示了一条路径的最大传输速率。如果 $L_{0n} = \{l_0, l_1, l_2, \dots, l_{n-1}\}$ 表示一条从源节点0到目的节点 n 的通路, b_i 表示第 i 条链路 l_i ($0 \leq i \leq n-1$)的链路带宽,那么通路 L_{0n} 的瓶颈带宽 B_{0n} 可表示为

$$B_{0n} = \min(b_0, b_1, b_2, \dots, b_{n-1})$$

围绕瓶颈带宽测量这一课题,国内外已经开展了大量的工作,有了不少研究成果,开发了许多测量工具,但这些工具主要集中在对瓶颈带宽大小的测量上^[5-7],而对于怎样在测量的同时定位瓶颈带宽的研究相对还比较少,主要有文献[8-9]。瓶颈带宽所在的链路又称为窄链路^[2],定位瓶颈带宽也就是确定窄链路,它无论对于端系统用户还是ISP来说都

是非常有用,端系统用户可以用它来估计到目的地的网络路径的性能,ISP可以用它来快速确定网络存在的问题或管理网络的流量。虽然有的工具和算法可以用来测量每一跳的链路带宽,但是它们的测量负载往往过大。本文中提出了一种基于消融包列法的瓶颈带宽测量和定位方法,能在测量瓶颈带宽的同时定位瓶颈带宽。

1 瓶颈带宽测量技术

首先定义几个变量,它们将在本文以后的部分中用到: d_i 表示数据包在链路 l_i 的传播时延; s^k 为数据包 k 的大小; t_n^k 表示数据包 k 在经过第 $n-1$ 条链路到达第 n 个节点的时间; t_0^k 表示数据包 k 从源节点发出时的时间; q_i^k 表示数据包 k 在链路 l_i 处总的排队时间。

1.1 包对测量模型

包对^[2-3]是指两个等长的背靠背的测量数据包,该模型通过在源节点向目的节点发送包对,在目的节点测得包对的时间间隔测量瓶颈带宽,其基本测量原理如图1所示,在先进先出(First Input First Output, FIFO)排队网络中,在通路 L_{0n} 上从源节点0向目的节点 n 发送包对,如果使它们之间的发送时间间隔 $t_0^1 - t_0^0 \leq s^1/B_{0n}$,那么它们将在瓶颈带宽处产生排队,

收稿日期:2010-12-27;修回日期:2011-01-24。

作者简介:贾民政(1981-),男,山东淄博人,讲师,硕士,主要研究方向:网络性能、网络测量;朱元忠(1972-),男,山东泰安人,副教授,博士研究生,主要研究方向:网络性能;余镇危(1942-),男,上海人,教授,主要研究方向:下一代网络体系结构;张英(1953-),女,北京人,研究员,主要研究方向:计算机网络及其性能评价。

假设它们在后继网络中不产生排队,那么它们到达目的端时的时间间隔 $t_n^1 - t_n^0 = s^1/B_{0n}$, 瓶颈带宽 B_{0n} 可以由此得到。

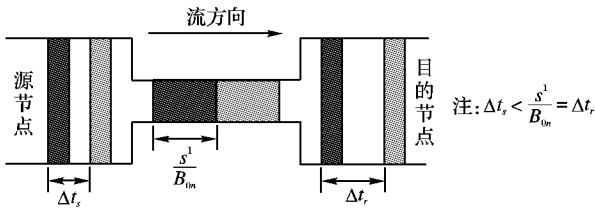


图1 包对测量模型

基于这一模型的典型工具有 Bprobe、Nettimer^[4]、Pathrate 和 Sprobe^[10] 等。

1.2 多包测量模型

多包测量模型^[3]如图2所示,由于数据包的转发时延分为排队时延、传输时延、传播时延、处理时延等几个部分。传播时延由传输媒介的物理性质所决定,对于一定的传输媒介,传播时延是固定的;传输时延是由发送数据包长与带宽共同决定的,大小等于二者的比值,处理时延一般非常小,往往可以忽略不计。所以数据包 k 在经过 $n-1$ 条链路到达第 n 个节点时的时间是

$$t_n^k = t_0^k + \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{s^k}{b_i} + d_i + q_i^k \right) \quad (1)$$

考虑到在同一业务流中的其他包的影响,排队延迟可表示为: $q_n^k = \max(0, t_{n+1}^{k-1} - d_n - t_n^k)$ 。如果假设第一个包在链路上发送不会产生排队,瓶颈链路是 l_q , 最终瓶颈带宽可表示为

$$b_q = \frac{s^{k-1}}{t_n^k + \frac{s^k - s^{k-1}}{b^{q-1}} - \frac{s^k}{b^{n-1}} - t_0^{k-1} - d^{n-1}} \quad (2)$$

从式(2)可以知道,瓶颈带宽可以从两个包的长度 s^k 和 s^{k-1} 等一些参数算出,但在实际中,必须讨论很多参数,如交叉流量的传输时间、时钟的偏移等问题。虽然该模型更贴近实际,但是却很复杂。

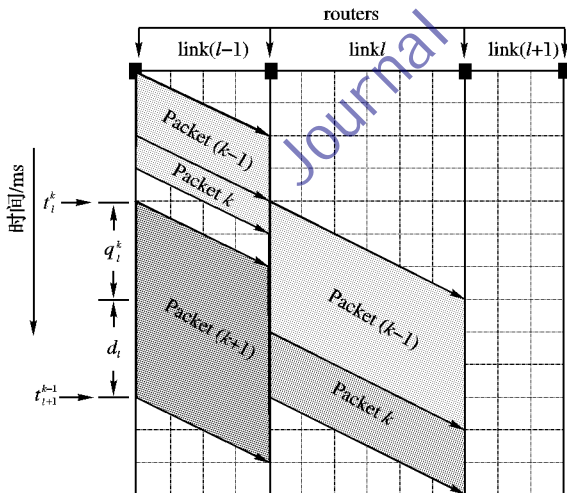


图2 多包测量模型

2 瓶颈带宽定位方法

文献[3]提到了一种逐跳测量比较的方法(以下简称方法一),该方法首先测出通路的瓶颈带宽,然后利用连续发送的 ICMP 报文发现源点至宿点的逐跳路由,这样从离源点最近一跳开始,测试源点到路由上每一跳的链路带宽,直至测试结果等于整个通路的瓶颈带宽,这时最后一跳即为窄链路。这样可以确定瓶颈的位置,但问题在于采取这种方法会给网

络带来大量的负载,而且测量速度相对较慢。

文献[8]对方法一进行了改进提到了一种类似折半查找的方法(以下简称方法二),该方法首先测出从源端到目的端的路由,记录路由集合 R 并确定该路径的瓶颈带宽,然后采用折半查找测量的方法不断更新路由集合直到定位到瓶颈带宽。

该方法虽然可以定位瓶颈带宽但是它需要在路由器处配置软件,对于普通端节点用户不太现实,而且显得相对繁琐,需要多次发送大量数据包,这无疑会增加网络的负载也会影响测量结果的准确性。文献[9]中提到了一种通路可利用带宽的定位方法,该法使用一种回归包列法确定通路可利用带宽的位置,但不能确切地测量通路可利用带宽的值。

3 基于消融包列的瓶颈带宽测量和定位方法

3.1 消融包列模型

消融包列由定位包和测量包(包对)两部分组成,如图3所示,它们都是标准的 UDP 数据包,图中的数字表示每个数据包对应的 IP 包中 TTL 字段的值 m 为从源端到目的端的路由跳数,为了减少对网络流量的影响,定位包由一些较小的数据包组成(如 32 B)。假设定位包的大小为 s , 测量包的两个数据包的大小为 $s^0 = s^1$, 瓶颈带宽大小为 b_q , 消融包列中相邻定位包的发送时间间隔及测量包与定位包的发送时间间隔均应满足 $\Delta t > s/b_q$, 测量包的发送时间间隔满足 $\Delta T \leq s^1/b_q$ 。由包对模型可知消融包列中的定位包在路由器处不会彼此影响产生排队,而消融包列中的测量包将在瓶颈带宽处产生排队。

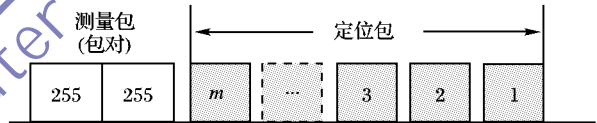


图3 消融包列

如图4所示,该模型的测量原理为:在不受到网络中其他流量干扰的情况下,在通路 L_{0n} 上从源端 0 向目的端 n 发送消融包列,数据包每经过一个路由器时,路由器将对其进行 -- TTL 操作,并判断包中的 TTL (Time To Live) 的值是否为零,如果此时 TTL 的值为 0, 路由器将丢掉该包并且向源端发回一个长度为 56 B 的 ICMP 超时报文,源端根据此 ICMP 包可得到一个往返时延,因此消融包列每经过一个路由器,路由器都将丢弃消融包列头部的定位包并向源端发送一个 ICMP 超时报文,源端都能得到一个往返时延的值。在定位包没有经过瓶颈带宽的情况下,这组往返时延的值应是平稳增加的,但当定位包经过瓶颈带宽时,往返时延的值将突然增大,也就是说在瓶颈带宽的位置定位包的往返时延变化最大处,可以以此定位瓶颈带宽。而根据消融包列模型的条件,两个测量包到达目的节点 n 的时间间隔为: $T_n^1 - T_n^0 = s^1/b_q$, 瓶颈带宽的值 b_q 可以以此得到。

在实际网络中由于存在其他流量,必然会对瓶颈带宽的测量和定位产生影响,因而有必要采取适当的技术来消除这些影响,一般采用统计和过滤的方法。

3.2 消融包列的测量方法

1) 用 traceroute 等路由测量工具,测量从源端到目的端的路由,确定从源端到目的端的路由跳数 m 的值。

2) 从源端向目的端发送消融包列,消融包列每经过一个路由器,路由器都将丢弃消融包列头部的定位包并向源端发送一个 ICMP 超时报文,源端都能得到一个往返时延的值。

3) 在收到消融包列返回的 m 个 ICMP 超时报文后,以相

邻两跳路由得到的往返时延作差值,取其中的最大值所在的路由跳数作为一个定位样本。

4) 目的端收到消融包列中的测量包对后,根据包对的到达时间间隔计算得到一个瓶颈带宽测量样本。

5) 重复上述步骤,发送 N 个消融包列,得到 N 个定位样本,对其采用统计学中的直方图估计,确定最大峰值所在的位置 k ,链路 l_{k-1} 就是瓶颈带宽所在的位置。对 N 个瓶颈带宽测量样本依据统计学中的核密度估计等方法,取密度最大的点作为瓶颈带宽的值。

该方法可以在一次测量中同时得到瓶颈带宽的测量样本和定位样本,而不需要逐段测量定位瓶颈,从而可以减少测量的次数和代价,提高测量速度;而且测量过程中定位包逐个被丢掉,减少了对瓶颈带宽测量结果的影响。

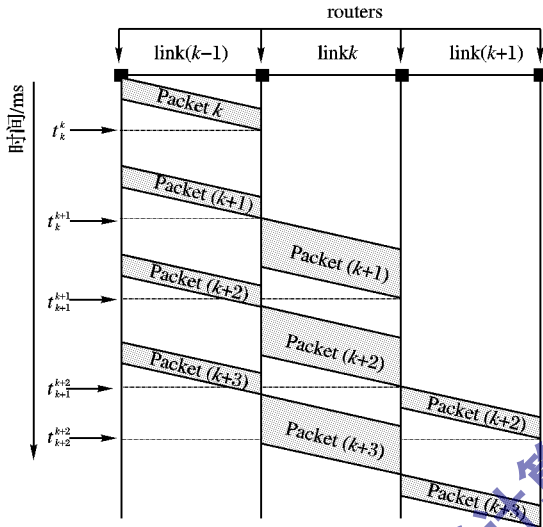


图4 消融包列模型

3.3 消融包列法定位正确性证明

定理1 假设网络中不存在其他流量,在通路 L_{0n} 上从源端向目的端发送消融包列,相邻定位包的发送时间间隔为 $t_0^k - t_0^{k-1} > s/b_q$,则对于任意的定位包 k 在任意链路 i 处的总排队时间:

$$q_i^k = 0; 0 \leq i < k \leq n-1$$

其中: s 为消融包列中定位包的大小, t_0^k 表示定位包 k 从源节点发出时的时间, b_q 为瓶颈带宽的大小。

消融包列模型中指出瓶颈带宽的位置在定位包的往返时延变化最大处。首先计算往返时延,由于处理时延一般非常小,与其他时延相比可以忽略不计。由式(1)可得定位包 k 到达路由器 k 时的时间为:

$$t_k^k = t_0^k + \sum_{i=0}^{k-1} \left(\frac{s}{b_i} + d_i + q_i^k \right)$$

路由器 k 发送的 ICMP 超时报文到达源端的时间,即往返时延为

$$r_k = t_k^k + \sum_{i=k-1}^0 \left(\frac{56 \times 8}{b_i} + d_i + \bar{q}_i^k \right)$$

其中 \bar{q}_i^k 表示定位包 k 引起的 ICMP 超时报文在链路 i 处总的排队时间。

相邻两跳路由得到的往返时延之间的差值为

$$r_k - r_{k-1} = t_0^k - t_0^{k-1} + \frac{s + 56 \times 8}{b_{k-1}} + 2d_{k-1} + \sum_{i=0}^{k-1} q_i^k - \sum_{i=0}^{k-2} q_i^{k-1} + \sum_{i=k-1}^0 \bar{q}_i^k - \sum_{i=k-2}^0 \bar{q}_i^{k-1} \quad (2)$$

对于消融包列模型由定理1可知,定位包不会在路由器处产生排队 $q_i^k = 0$,相邻定位包引起的 ICMP 超时报文的发送时间间隔也大于 s/b_q ,因而 $q_i^k = 0$ 。

因而式(2)可化简为

$$r_k - r_{k-1} = t_0^k - t_0^{k-1} + \frac{s + 56 \times 8}{b_{k-1}} + 2d_{k-1}$$

时延间隔的最大值为

$$\max_{k=1}^{n-1} (r_k - r_{k-1}) = t_0^q - t_0^{q-1} + \frac{s + 56 \times 8}{b_q} + 2d_{q-1}$$

可见, $r_k - r_{k-1}$ 的最大值受瓶颈带宽 b_q 的影响,也就是瓶颈带宽 b_q 的位置在定位包的往返延迟间隔最大处。通过计算 $r_k - r_{k-1}$ 的最大值,确定跳数 k ,就可以定位瓶颈带宽,消融包列法能够确定瓶颈带宽所在的位置。

3.4 消融包列法测量正确性证明

定理2 在通路 L_{0n} 上从源端0向目的端 n 发送消融包列使得包对的发送时间间隔 $t_0^1 - t_0^0 \leq s^1/B_{0n}$,包对与定位包的发送时间间隔大于 s/B_{0n} ,在不受网络中其他流量干扰的情况下,包对到达目的节点的时间间隔为

$$t_n^1 - t_n^0 = \frac{s^1}{B_{0n}}$$

其中: t_0^k 为消融包列中包对从源节点发出时的时间, s 为消融包列中定位包的大小, s^0, s^1 为包对的两个数据包的大小,且 $s^0 = s^1, B_{0n}$ 为通路 L_{0n} 的瓶颈带宽的大小。

当网络中无干扰流量的情况下由定理2可知瓶颈带宽的值 B_{0n} 可以由 $t_n^1 - t_n^0 = s^1/B_{0n}$ 得到,消融包列法能够测量出瓶颈带宽的大小。

当网络中存在干扰流量的情况下,假设通路 L_{0n} 上的窄链路为 $l_q (0 \leq q \leq n-1)$,即瓶颈带宽 $B_{0n} = b_q$,如果消融包列中的包对在 l_q 处产生排队而在后继网络中不产生排队,则在节点 q 到节点 n 这条通路上, $t_n^1 - t_n^0 = 0 \leq s^1/B_{qn}$,由定理2得: $t_n^1 - t_n^0 = s^1/B_{qn}$,而 $B_{qn} = b_q$,即: $t_n^1 - t_n^0 = s^1/B_{0n}$,也就是说在此种情况下,消融包列也可以精确测得到瓶颈带宽的值。对于其他情况,可以通过统计过滤等技术对测量结果进行处理,进而确定瓶颈带宽的值。

4 模型仿真验证与分析

4.1 仿真环境

为了验证基于消融包列的瓶颈带宽测量和定位方法的有效性,本文采用 NS^[11] 模拟工具建立了实验环境,对其进行了模拟验证。实验采用的拓扑如图5所示,从源节点到目的节点共有7条链路对应的带宽分别为 {100, 80, 30, 10, 60, 20, 100}, 单位为 Mbps,在链路3处瓶颈带宽为 10 Mbps,在链路5处次瓶颈带宽为 20 Mbps。路由器采用 FIFO 排队规则。每个路由器配有一台干扰流量生成器,用于模拟网络背景流量^[12],干扰流量的生成时间之间的间隔采用泊松分布。

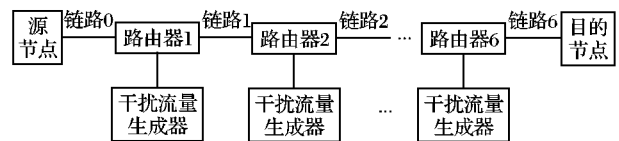


图5 测量拓扑图

4.2 可行性验证

1) 网络中没有干扰流的情况。采用消融包列法在源节点得到定位包在路由器各跳处的往返时延间隔分布,如图6(图6中同一次测量结果用同一图示表示)。因为没有干扰

流量所以不需要采用任何过滤技术,往返时延间隔最大值在跳数4处,即瓶颈带宽在链路3处。在目的端点得到的瓶颈带宽分布,如图7,测得瓶颈带宽为10 Mbps。在没有干扰流的情况下,消融包列法可以准确地测量和定位瓶颈带宽。

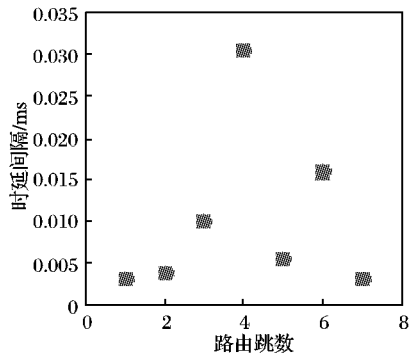


图6 无干扰流条件下往返时延间隔分布

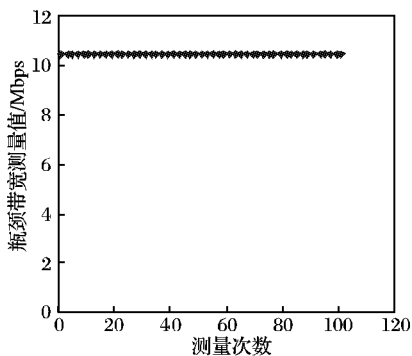


图7 无干扰流条件下瓶颈带宽分布

2)网络中干扰流量较小的情况。干扰流量生成器以平均间隔5 ms,发送平均大小为750 B的数据包,干扰流量占瓶颈带宽的比例 $v \approx 35\%$,在此情况下得到的定位包往返时延间隔分布,如图8(图8中同一次测量结果用同一图示表示)。可见受干扰流量的影响,定位包在路由器各跳处的往返时延间隔变化较大。在采用直方图估计过滤^[13]后得到瓶颈带宽定位,如图9,从图中可以看出受干扰流量的影响消融包列在次瓶颈带宽处发生了排队,因而次瓶颈带宽表现得比较显著,但仍可以确定瓶颈带宽在链路3处,在目的端点得到瓶颈带宽分布,如图10,采用核密度估计噪声过滤法^[14]后得到瓶颈带宽估计,如图11,其中核函数采用高斯函数^[13],核带宽 $h = 0.1$,测得瓶颈带宽为10 Mbps。

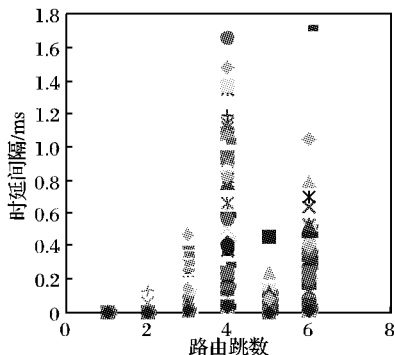


图8 小干扰流条件下的往返时延间隔分布

3)网络中干扰流量较大的情况。干扰流量生成器以平均间隔3 ms,发送平均大小为750 B的数据包,干扰流量占瓶颈带宽的比例 $v \approx 60\%$,在此情况下得到的定位包往返时延间隔分布,如图12(图12中同一次测量结果用同一图示表示)。可见随着干扰流量的增大,定位包在路由器各跳处的

往返时延间隔的变化也增大。在采用直方图估计过滤后得到瓶颈带宽定位,如图13,虽然受到干扰流量的影响,但消融包列法仍可以确定瓶颈带宽在链路3处,在目的端点得到瓶颈带宽分布,如图14,可见随着干扰流量的增大,包对之间的时间间隔被压缩或拉长的几率也增加,瓶颈带宽分布图中的噪声变多,采用核密度估计噪声过滤法后得到瓶颈带宽估计,如图15,其中核函数采用高斯函数,核带宽 $h = 0.1$,测得瓶颈带宽为10 Mbps。

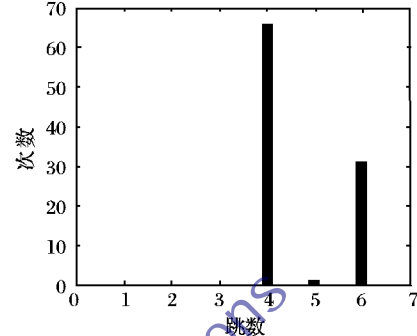


图9 小干扰流条件下的瓶颈带宽定位

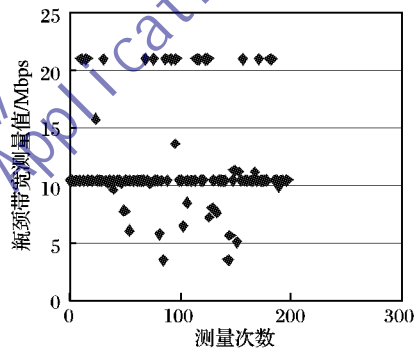


图10 小干扰流条件下的瓶颈带宽分布

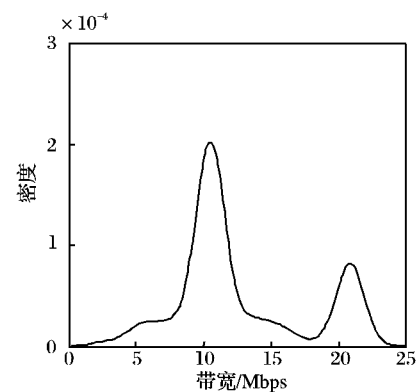


图11 小干扰流条件下的瓶颈带宽估计

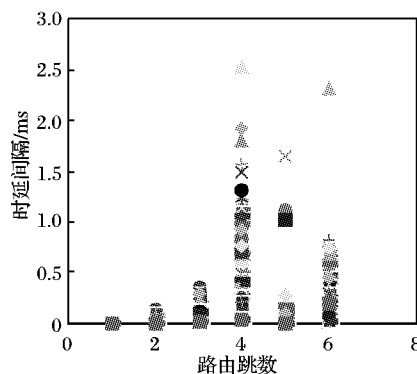


图12 大干扰流条件下的往返时延间隔分布

从以上的实验可以看出,虽然受到网络中干扰流量的影

响,但是消融包列法仍然可以准确地测量和定位瓶颈带宽,这也证明了消融包列法的正确性、可行性。

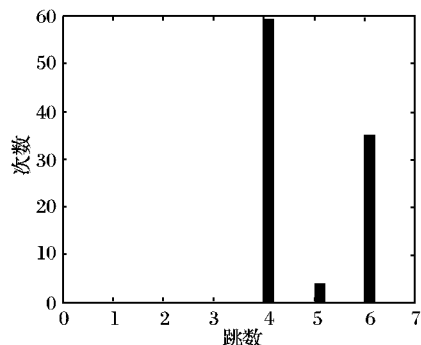


图13 大干扰流条件下的瓶颈带宽定位估计

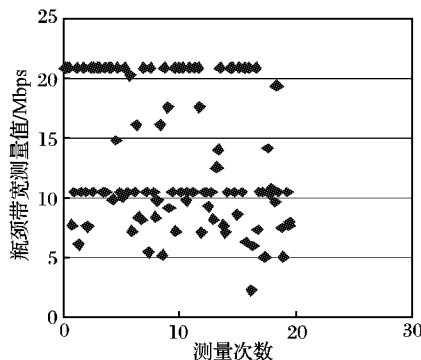


图14 大干扰流条件下的瓶颈带宽分布

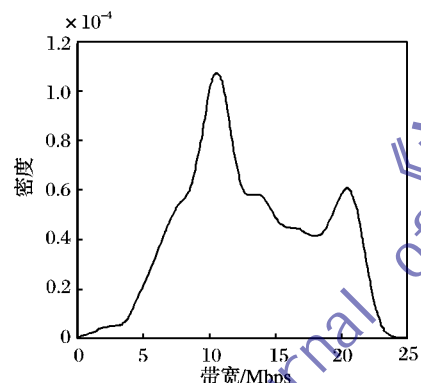


图15 大干扰流条件下的瓶颈带宽估计

4.3 性能验证

对消融包列法和方法二进行了模拟实验,对它们的测量负载和定位准确率进行了比较分析。

定义测量负载为完成一次瓶颈带宽测量和定位需要发送和接收的数据包字节数。模拟实验结果如图16所示,可见在路径跳数不同的情况下消融包列法的测量负载要远远小于方法二的测量负载。

定义定位准确率为在瓶颈带宽的测量和定位中正确定位的次数与总次数的比值。模拟实验结果如图17所示,可见当网络中干扰流量较小时消融包列法和方法二都具有较高的定位准确率;随着干扰流量的增大,虽然这两种方法的定位准确率都出现下降的趋势,但消融包列法的定位准确率要高于方法二的定位准确率。

4.4 消融包列法的优势

从仿真对比中可以看出,消融包列法在瓶颈带宽测量和定位中具有如下优势:

1)测量负载小。测量负载的高低表明了测量对网络资源的消耗多少,如果资源消耗过大将直接影响到网络的性

能。在保证测量准确性的前提下,测量负载越低表明测量方法越好。通过理论计算和模拟实验都可以得出与方法二相比消融包列法有较小的测量负载。

2)定位准确性高。方法一、方法二通过逐次对瓶颈带宽测量值比较定位瓶颈带宽,每次测量得到的瓶颈带宽的值本身就不是一个准确值,再通过比较定位瓶颈带宽,定位的准确性也随之降低,而且这两种方法因为每次要判断是否定位到瓶颈带宽,所以定位速度也较慢。消融包列法不需要逐次进行比较判断,定位时取的是相邻两跳的往返时延差值的最大值,而不是一个精确的计算值,避免了忽略传播时延带来的误差,在测量结束后分别对测得的定位数据和瓶颈带宽测量数据采用统计学的方法进行判断,实验结果表明定位准确性高。

3)不需要在中间路由器配置软件。基于消融包列法的瓶颈带宽测量和定位方法只需在源节点和目的节点配置软件,而不需要中间路由器的支持,对于普通用户来说更有实际意义。

4)不需要时钟同步。端到端测量时测量主机间时钟同步是端到端测量重要的技术基础,也是测量误差的来源之一。时钟的行为复杂,实现时钟同步非常困难,虽可以利用GPS或PSTN、CDMA等借助外部时钟源来实现测量主机间同步^[15],但费用昂贵且在测量主机数量大时难于实现,无法满足大规模端到端测量的需要。消融包列法在定位时使用相邻两跳的往返时延的差值,无需确定定位包的发送时间,避免了时钟同步问题。

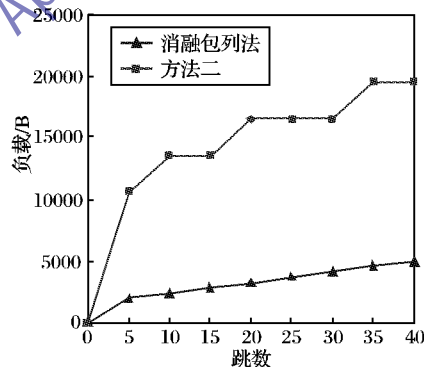


图16 测量负载

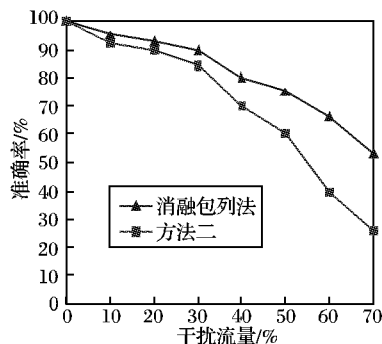


图17 定位准确率

5 结语

随着网络规模日益扩大,网络行为变得越来越复杂,网络测量对于评估网络性能也显得越来越重要。目前,对网络测量的研究才刚刚开始,而网络瓶颈带宽的测量是网络测量的一个重要内容。

本文研究了现有的瓶颈带宽测量和定位方法,结合包对模型和包列的思想提出了基于消融包列的瓶颈带宽测量和定

(下转第1947页)

况下,三种算法的定位精度随着信标节点数目的增加而升高,当信标节点数目超过25时,定位精度渐趋稳定。但本文所提出的改进算法要比传统的DV-Hop算法平均定位误差小很多,相对文献[10]的改进算法平均定位误差也有所降低,且受信标节点数目改变的影响较小,定位精度变化不大,能较高效地完成节点定位。

从图3和图4中可知,在不同的通信半径下,三种算法随着信标节点个数的增加,定位覆盖率都有提高。且在相同的信标节点数的情况下,本文的改进算法相比传统的DV-Hop算法及文献[10]的改进算法定位覆盖率更高。

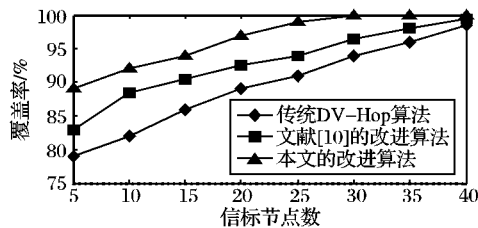


图4 三种算法在不同信标节点数的定位覆盖率 ($R = 25$)

4 结语

为了提高传统DV-Hop算法对未知节点的定位精度和覆盖率,本文通过对算法进行理论分析,有针对性地对该算法进行了改进。通过仿真实验可以得出,与传统DV-Hop算法相比,改进的DV-Hop算法保持了原有算法简单、网络生存能力强等优势,并在定位的覆盖率和未知节点的定位精度方面表现出更优越的性能。与此同时,改进的DV-Hop算法在计算的复杂性上有一定的增加,算法的开销也相应提高。因此,如何在提高定位精度和覆盖率的前提下降低计算的复杂性,将是我们下一步的研究方向。

(上接第1938页)

位方法,通过发送一个由定位包和测量包组成的消息包列,在测量中同时完成瓶颈带宽的定位,减少了测量负载。通过理论分析和模拟验证证明了该方法的正确性、可行性,分析了该方法与其他方法相比具有的优势。然而由于实验条件的关系,本文没有在真实的网络环境中进行测量验证,在实际网络中大规模的瓶颈带宽测量和定位仍有很多问题值得研究;另外对于瓶颈带宽的测量和定位在实际中的应用也有待于进一步深入研究,以便为提高应用的性能、网络的性能服务。

参考文献:

- [1] CARTER R L, CROVELLA M E. Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks[J]. *Performance Evaluation*, 1996, 27/28: 297-318.
- [2] LAI K, BAKER M. Measuring link bandwidths using a deterministic model of packet delay[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2000, 30(4): 283-294.
- [3] 毕经平. Internet行为测量与分析研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002: 21-27.
- [4] LAI K, BAKER M. Nettimer: A tool for measuring bottleneck link bandwidth[C]// *Proceedings of the USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems*. Berkeley: USENIX Association, 2001: 123-134.
- [5] BAIOCCHI A, VACIRCA F. TCP fluid modeling with a variable capacity bottleneck link[C]// *IEEE INFOCOM 2007*. New York:

参考文献:

- [1] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] KIM S, KO J G, YOON J, *et al.* Multiple-objective metric for placing multiple base stations in wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing*. New York: IEEE, 2007: 627-631.
- [3] NICULESCU D, NATH B. DV based positioning in Ad Hoc networks[J]. *Journal of Telecommunication Systems*, 2003, 22(1/2/3/4): 267-280.
- [4] NICULESCU D, NATH B. Ad Hoc Positioning Systems (APS) [C]// *Proceedings of 2001 IEEE Global Telecommunications Conference*. New York: IEEE, 2001: 2926-2931.
- [5] 刘艳文, 王福豹, 段渭军, 等. 基于DV-Hop定位算法和RSSI测距技术的定位系统[J]. *计算机应用*, 2007, 27(3): 516-519.
- [6] YASSINE F, SAFA H. A hybrid DV-Hop for localization in large scale wireless sensor network[C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Technology, Application and Systems*. New York: ACM, 2009: 1-6.
- [7] 姚忠孝, 俞立, 董齐芬, 等. 基于移动信标的DV-Hop无线传感器网络定位算法[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(10): 1504-1509.
- [8] BETTSTETTER C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multi-hop network[C]// *ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM, 2002: 80-91.
- [9] 嵇玮玮, 刘中. DV-Hop定位算法在随机传感器网络中的应用研究[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(4): 970-974.
- [10] 刘明, 包亚萍, 刘汉义. 无线传感器网络中一种改进的DV-Hop算法[J]. *微计算机信息*, 2009, 25(10): 128-129.
- [11] 于宁. 无线传感器网络定位优化方法[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- [12] IEEE, 2007: 1046-1054.
- [6] 李雯, 潘乔, 朱畅华, 等. 一种适用于IPv6的高效瓶颈带宽测量方法[J]. *计算机工程*, 2007, 33(22): 142-144.
- [7] 王乐晓, 张延园, 赵晓楠. 高速网络带宽测量方法研究[J]. *计算机工程*, 2010, 36(15): 103-107.
- [8] 周晓祥, 熊齐邦. 通路瓶颈带宽的定位与测量[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(28): 187-190.
- [9] HU N, LI L, MAO Z, *et al.* Locating internet bottlenecks: algorithms, measurements, and implications[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2004, 34(4): 41-54.
- [10] PRASAD R S, MURRAY M, DOVROLIS C, *et al.* Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools[J]. *IEEE Network*, 2003, 17(6): 27-35.
- [11] The network simulator-ns-2[EB/OL]. [2010-11-25]. <http://www.isi.edu/nsman/ns/>.
- [12] 尚研峰, 黄玉清, 陈馨. 分段计算密度的瓶颈带宽测量方法[J]. *计算机工程与设计*, 2007, 28(15): 3608-3610.
- [13] ANDREW, WEBB R. 统计模式识别[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [14] EDWAN T, GHITA B V, WANG X G. DSP-based bottleneck bandwidth estimation[J]. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2009, 17(3): 538-547.
- [15] 王冀鲁, 张勇, 余镇危, 等. MANET可用带宽测量和定位方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(15): 85-89.