

一种双参数拓扑推测方法*

吴辰文, 李志昌, 茹俊年

(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对采用单一性能参数推测网络拓扑结构算法的问题,如有效性与网络负载有关以及测量节点性能参数时大多需要节点间时钟的同步等,在现有的测量方法基础上,提出了一种不需要节点间时钟同步可以测量端到端时延抖动和丢包相关性的紧接分组对序列测量方法,同时设计了一种综合端到端时延抖动和丢包相关性的双参数拓扑推测算法,该算法能够适应不同的网络负载环境。最后通过 NS-2 仿真实验验证了该算法的有效性和准确性。

关键词: 网络层析成像技术; 网络拓扑推断; 紧接分组对序列; 时延抖动协方差; Manhattan 距离

中图分类号: TP393.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)06-1817-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.056

Kind of double parameters topology inference method

WU Chen-wen, LI Zhi-chang, RU Jun-nian

(Institute of Electronic & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: For the problem of the algorithm of network topology with one performance parameter, such as the validity is related to the network load and most time it needs clock synchronization between nodes when measuring the performance parameter of the node, this paper proposed a measurement method of adjacent packets sequences which didn't need clock synchronization to measure the end-to-end delay and packet loss correlation, at the same time it designed a topology inference algorithm with end-to-end delay jitter and packet loss correlation. The algorithm adapted different network load environment. Finally through NS2 simulation it verified the validity and the accuracy of the algorithm.

Key words: network tomography (NT); network topology inference; adjacent packets sequences; jitter covariance; Manhattan distance

0 引言

网络测量源于 Internet 的规模和复杂度的快速增长以及人们对于网络性能、监视、优化的需要。经历了由传统的测量到近几年来新兴研究的基于网络层析成像技术 (NT)^[1] 的测量两个阶段。基于网络层析成像技术的网络拓扑推断是网络层析成像技术的重要应用之一,它根据网络中节点间性能特性的相关性推测网络的拓扑。基于 NT 技术的拓扑推测过程主要分为三个步骤^[2]: a) 通过端到端的测量技术获得端到端的性能参数; b) 根据端到端性能参数计算节点间的相关性; c) 根据节点间的相关性推测网络的拓扑。

目前,基于 NT 技术的网络拓扑推断大致可以分为两大类。一类是基于多播测量的,要求网络中的所有节点都支持多播,常使用的性能参数有端到端的丢包率^[3~5]、端到端的链路时延^[6]、端到端的链路利用^[7]等,其优点是给原网络增加较少的测量负担,缺点是许多网络环境并不支持多播,并且路由器处理多播报文的方法有别于单播报文。另一类是现在广泛研究的基于单播测量的 NT 技术,它是第一类方法的延伸,使推测的网络环境更适合实际的网络。比较常用的端到端测量方

法有紧接分组对测量方法^[8]和“三明治”测量方法^[9]。紧接分组对测量方法获得端到端的时延时需要节点间的时钟同步,在实际应用中无法得到保证,给测量结果带来了误差,并且采用紧接分组对测量丢包率计算节点间相关性时,只有在网络负载较重时才能较好地反映节点间共享链路的特性。“三明治”测量方法可以通过计算时间抖动,避免节点间的时间同步,但只有在网络负载较轻时才能较好地反映节点对之间共享链路的特性。本文考虑到以上诸多的缺点,设计了可以同时测量端到端时延抖动和丢包相关性的紧接分组对序列测量方法,并提出了一种单播网络中采用双参数的拓扑推断算法,该算法仅需适量的计算而无须增加测量流量,可以适应不同的网络负载。

1 紧接分组对序列测量方法

紧接分组对由两个分组组成,两个分组之间的时间间隔很小,以保证两个分组在相同的链路所经历的网络状况相同,两个分组大小一致且具有不同的目的地址,不同的目的地址分别指向要测量的目标节点对^[2]。紧接分组对序列由多个紧接分组对组成,并且分组对与分组对之间的时间间隔固定。固定的时间间隔用 T_1 表示,对紧接分组对进行编号,编号从 1 开始。

收稿日期: 2012-10-12; **修回日期:** 2012-11-30 **基金项目:** 兰州市科技计划基金资助项目 (2009-1-5)

作者简介: 吴辰文 (1964-), 男, 甘肃靖远人, 教授, 硕导, 主要研究方向为网络层析成像技术; 李志昌 (1988-), 男, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 主要研究方向为基于网络层析成像技术的双参数网络拓扑推断 (jikeyan@163.com); 茹俊年 (1986-), 男, 甘肃金昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为基于丢包率的网络拓扑推断。

为了减少测量流量,紧接分组对中分组的大小设计为 50 Byte,每个分组携带所属紧接分组对的编号。

图1所示为发向目的节点对 (i,j) 的紧接分组对序列,分组对序列的编号从1逐步增加到 n 。通过紧接分组对序列可以测量的端到端性能包括端到端的时延抖动和端到端的丢包相关性,在节点相关性计算与拓扑推测算法中进行了详细描述。

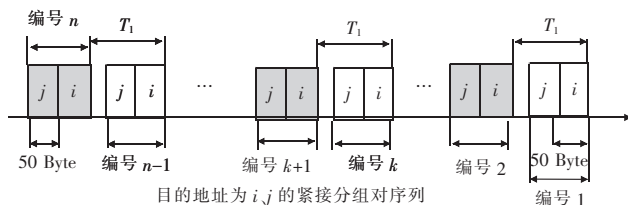


图1 紧接分组对序列测量

2 节点相关性计算与拓扑推测算法

目前,在NT技术中普遍采用二叉树 $T=(V,L)$ 来描述网络的逻辑拓扑,其中 V 代表节点集合, L 代表链路集合,一条逻辑链路可能包含一条或多条物理链路,根节点用0表示,叶节点用 $R \subset V$ 表示,树的根节点0是探测报文的发送者,所有的叶子节点是探测报文的接收者。 $\forall k \in V \setminus R \cup \{0\}$,称 k 为内部节点。除了根节点以外的每个节点 $k \in V \setminus \{0\}$,都有一个唯一的父亲节点,用 $f(k)$ 表示。

采用紧接分组对序列测量方法进行双参数网络拓扑推测算法的基本思想是对时延和丢包性能同时进行测量,然后根据测量的样本数据巧妙地计算节点对之间的时延抖动协方差和Manhattan距离^[10],最后采用时延抖动协方差和Manhattan距离的综合参数作为网络拓扑推断的依据。

2.1 时延抖动协方差

当网络负载较小或负载适中时,采用紧接分组对序列测量方法容易采集到端到端的时延抖动^[2]。图2显示了采用紧接分组对序列进行网络测量时延抖动的获取方法。

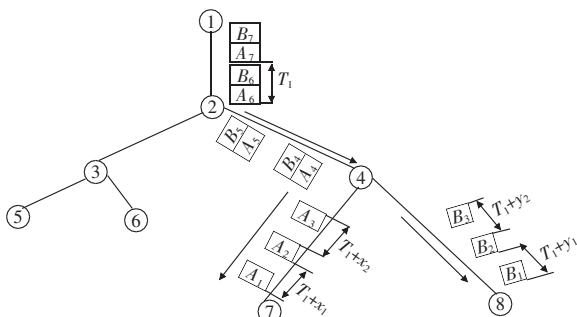


图2 时延抖动获取方法

紧接分组对之间的时间固定,通过在接收节点计算相邻分组间的时间差来确定时延抖动。图1中根节点1向目的节点对 $(7,8)$ 发送紧接分组对序列,紧接分组对序列用 (A_i, B_i) 表示,其中 i 代表编号,紧接分组对在节点对 $(7,8)$ 的共享链路紧密相邻。 A_i 分组序列相继到达节点7, B_i 分组序列相继到达节点8。由于分组 A_i 和 B_i 大小完全一致,所以在测量根节点分组 A_i 和 $A_{(i+1)}$ 及分组 B_i 和 $B_{(i+1)}$ 之间的时间间隔一致,同为 T_1 。在节点7和8记录收到测量分组的时间,然后通过计算分

组之间的时间间隔与 T_1 的差来计算时延抖动,如图中的 x_1, y_1, x_2, y_2 即为时延抖动。因此可以避免节点间时间同步。

可以通过计算时延抖动协方差来衡量两个时延抖动变量间的相关程度,计算公式为

$$\begin{aligned} \text{Cov}(E_i^{(i,j)}, E_j^{(i,j)}) &= \text{Cov}(D_f^{(i,j)} + \\ D_i^{(i,j)}, D_j^{(i,j)} + D_j^{(i,j)}) &= \text{Var}(D_f^{(i,j)}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: (i,j) 为目的节点对; $f(i,j)$ 是节点 i,j 的共同父节点; $D_f^{(i,j)}, D_i^{(i,j)}, D_j^{(i,j)}$ 分别表示链路 $(0 \rightarrow f(i,j))$ 、链路 $(f(i,j) \rightarrow i)$ 和链路 $(f(i,j) \rightarrow j)$ 的时延抖动向量; $E_i^{(i,j)}, E_j^{(i,j)}$ 表示在叶子节点 i 和 j 测量得到的端到端的时延抖动向量,如图3所示。

设链路 $(0 \rightarrow f(i,j))$ 由 $L_1, L_2, \dots, L_n$ 组成,各个链路之间相互独立, $D_1^{(i,j)}, D_2^{(i,j)}, \dots, D_n^{(i,j)}$ 为各个链路的单向时延抖动向量,则有

$$\begin{aligned} \text{Var}(D_f^{(i,j)}) &= \text{Var}(D_1^{(i,j)} + D_2^{(i,j)} + \dots + D_n^{(i,j)}) = \\ \text{Var}(D_1^{(i,j)}) &+ \text{Var}(D_2^{(i,j)}) + \dots + \text{Var}(D_n^{(i,j)}) \end{aligned} \quad (2)$$

根据上面的公式可知,在树状网络拓扑中,时延抖动协方差参数模型是目的节点对在共享链路上时延抖动方差相加的和,结果表明,共享链路越多,则其相应的值也就越大,可以用于节点间的相关性计算。

由于链路之间相互独立。为了简化,节点 $f(i,j)$ 用 f 表示,内部节点与其他节点之间的时延抖动协方差可以用式(3)进行估测。

$$\begin{aligned} \text{Cov}(E_f^{(f,k)}, E_k^{(f,k)}) &= \\ \text{Max}(\text{Cov}(E_i^{(i,k)}, E_k^{(i,k)}), \text{Cov}(E_j^{(j,k)}, E_k^{(j,k)})) \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 Manhattan 距离

当网络负载较大时,背景流量影响节点间时延相关性的概率增加,并且由于丢包导致测量的时延样本减少,利用时延抖动协方差推测网络拓扑的结果变差。此时丢包率倾向于反映节点间的相关性。用随机过程 $X_A = \{X_A(k)\}, X_B = \{X_B(k)\}$ 描述节点 i 和 j 的报文接收情况,其中 k 表示紧接分组对在紧接分组对序列中的编号,如果节点 i 收到了探测包则 $X_A(k) = 1$,否则 $X_A(k) = 0$ 。假设紧接分组对序列由 N_1 组紧接分组对组成,共发送 N_2 组紧接分组对序列,则有 $|X_A(k)| = |X_B(k)| = N_1 \times N_2$ 。Manhattan距离函数 $D_{i,j}$ 为

$$D_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |X_A(k) - X_B(k)| \quad (4)$$

其中: $N = N_1 \times N_2$, $D_{i,j}$ 仅仅反映了分组对在链路 $(f(i,j) \rightarrow i)$ 和链路 $(f(i,j) \rightarrow j)$ 上的丢包差异^[10]。

同样地,可以用式(5)对父节点 $f(i,j)$ 报文丢失情况进行推测。

$$X_f^{i,j}(k) = X_A(k) \vee X_B(k) \quad (5)$$

由于节点间的共享越多,成功传输率越小^[11],所以由此可得定义的节点对之间的Manhattan距离函数具有累减的关系。

2.3 双参数计算相关性

由式(1)(2)可知,节点对之间的共享链路越多,则节点对之间的时延抖动协方差越大,节点对之间的时延抖动协方差具有累加的关系。而通过式(4)发现,节点对之间的Manhattan距离具有累减关系,为了使两个节点相关性函数具有相同的增减性,利用式(6)对式(4)进行变换,可以把Manhattan距离转换成加性关系,其中 M 为Manhattan距离的门限值。

$$T_{i,j} = M - D_{i,j} \quad (6)$$

经过变换后,丢包率和时延差都具有了加性的关系。经过多次测量,由式(1)(4)(6)可以分别计算得到节点对 (i,k) 、 (i,j) 的时延抖动协方差和转换后的 Manhattan 距离。假设计算结果有 $\text{Cov}(E_i^{(i,k)}, E_k^{(i,k)}) < \text{Cov}(E_i^{(i,j)}, E_j^{(i,j)})$, 由于此时计算得到的时延抖动协方差和转换后的 Manhattan 距离反映的是同一共享链路且具有相同的加减性,所以计算结果也必然满足 $T_{i,k} < T_{i,j}$, 于是可以作以下分析:

$$\begin{aligned} \text{Cov}(E_i^{(i,k)}, E_k^{(i,k)}) < \text{Cov}(E_i^{(i,j)}, E_j^{(i,j)}), T_{i,k} < T_{i,j} \Rightarrow \\ \text{Cov}(E_i^{(i,k)}, E_k^{(i,k)}) + T_{i,k} < \text{Cov}(E_i^{(i,j)}, E_j^{(i,j)}) + T_{i,j} \end{aligned} \quad (7)$$

由以上分析可知,节点间的时延抖动协方差和转换后的 Manhattan 距离的相加性运算对节点间的共享链路的特性具有放大的作用。

由于不同参数的量纲不同,仅仅简单地把参数相加并不合适,所以需要标准化计算。令 $L_{i,j} = \text{Cov}(E_i^{(i,j)}, E_j^{(i,j)})$, 采用以下公式实现标准化如下所示:

$$\bar{L}_{i,j} = \frac{L_{i,j} - \min(L)}{\text{sqrt}(D(L))}, \bar{T}_{i,j} = \frac{T_{i,j} - \min(T)}{\text{sqrt}(D(T))} \quad (8)$$

其中: $\min()$ 为最小值函数; $\text{sqrt}()$ 为求平方根函数; $D(L)$ 、 $D(T)$ 分别表示 L 、 T 的方差。

最后两个参数结合在一起,采用新的参数 $\Omega_{i,j}$ 计算两个节点间的相关性,公式为

$$\Omega_{i,j} = \alpha \bar{L}_{i,j} + \beta \bar{T}_{i,j} \quad (9)$$

式(9)中的参数 α 、 β 为系数因子,可以根据网络的实际负载(通过样本丢包率的均值进行确定^[11])进行选择。

2.4 拓扑推测算法

紧接分组对序列单播测量双参数网络拓扑推测算法的基本思想是根据在网络边缘节点测量得到的时延抖动和丢包序列,利用式(1)(4)(6)估计出各叶节点共享路径上探测包的时延抖动协方差和变换后的 Manhattan 距离。依据丢包率判断网络负载,合理选择 α 、 β 值,利用式(9)计算 $\Omega_{i,j}$ 值。最大 $\Omega_{i,j}$ 对应的节点对互为兄弟节点,以此作为拓扑重构中判断各节点关系的依据。从叶节点集合出发判断出互为兄弟节点的节点并通过式(3)和(5)计算父节点与其他节点间的时延抖动协方差和父节点的报文丢失情况。利用父节点替换这些节点,构成一个新的有限集合。通过一系列的迭代运算,从而推测出整个逻辑拓扑。下面详细描述了网络拓扑推测的算法:

- 对叶节点进行二元组划分 $\langle i, j \rangle$, 其中 $i, j \in R$;
- 按划分次序进行紧接分组对序列方法探测,同时对到达的时延和丢包情况进行采集;
- for each $\langle i, j \rangle$, 计算 $L_{i,j}$ 、 $T_{i,j}$, 最后计算 $\Omega_{i,j}$;
- 令 $R' = R, L' = \emptyset$;
- while $|R| > 1$ do
在计算结果中查找 $\Omega_{i,j}$ 的最大值,并标志其对应的节点对 i, j ;

构造 $f(i, j)$ 节点;

依据式(3)和(5)计算 $L_{f,k}$ 和 $X_f(k)$;

令 $R' = R - \{i, j\} \cup \{f(i, j)\}$;

$L' = L' \cup \{f(i, j), i\} \cup \{f(i, j), j\}$;

f) 输出 $T = (V, L)$ 。

3 NS-2 仿真

通过 NS-2 环境进行仿真,仿真实验采用较为普遍的二叉树状拓扑结构,如图4所示。

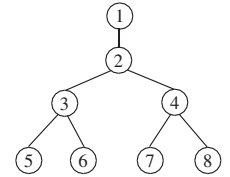
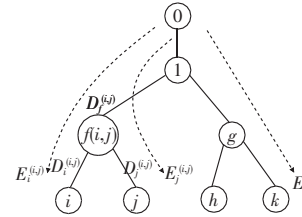


图3 时延抖动与共享链路之间的关系 图4 仿真实验网络拓扑图

背景流量以 TCP 为主同时包含适当的 UDP, UDP 流量采用符合 Pareto 分布的开关型模型, TCP 流量的实现通过建立 TCP 代理, 配对的接收代理是 TCP SINK。UDP 流量的实现由 UDP 代理及接收代理 Null 配合实现, 采用发送时间受控的可变速率 CBR 数据包来模拟网络负载情况, 假定网络内部节点采用随机检测 (RED) 丢包策略, 内部节点缓冲区大小为 20, 内部链路带宽为 1 Mbps, 链路时延为 15 ms; 其他链路的带宽均为 500 kbps, 时延为 10 ms。紧接分组对序列中两个紧接分组对之间的时间间隔为 10 ms, 紧接分组对内分组之间的时间间隔为 0.1 ms, 紧接分组对序列由 50 个紧接分组对组成。分别在不同网络负载下进行多次仿真实验。

实验中根据丢包率在区间 $[0 \sim 0.01]$ 、区间 $[0.01 \sim 0.1]$ 、区间 $[0.1 \sim 0.2]$ 分别使 α 、 β 为对应 $\langle 0.9, 0.1 \rangle$ 、 $\langle 0.5, 0.5 \rangle$ 和 $\langle 0.2, 0.8 \rangle$ 中值, 采用了树编辑距离^[7]作为评价推断拓扑的有效性参数, 其代表推断树与原拓扑树之间转换的最小开销。用横坐标表示背景流量, 纵坐标表示树编辑距离, 分别采用时延和丢包率单参数算法与综合时延抖动协方差和丢包相关性双参数算法进行比较, 仿真结果如图5、6所示。

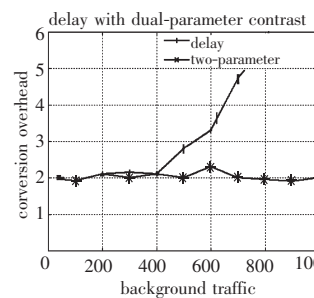


图5 单参数时延与综合参数比较

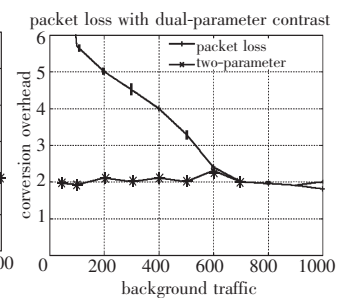


图6 单参数丢包率与综合参数比较

图5显示了采用时延单参数与时延抖动协方差和丢包相关性综合参数推断网络拓扑时的差异。不难看出, 当网络负载小于 400 kbps (负载较轻) 时, 时延单参数推测的结果较为准确。当网络负载大于 400 kbps (负载适中) 时, 推测的结果开始变坏。当网络负载大于 600 kbps (负载开始变重) 时, 推测的结果最差, 误差最大。图6显示了采用丢包相关性单参数与时延抖动协方差和丢包相关性综合双参数推测网络拓扑时的差异, 只有当网络负载大于 600 kbps (负载开始变重), 采用丢包相关性性能参数的方法推测的结果较好。而采用时延抖动协方差和丢包相关性综合参数推测方法在不同的网络负载情况下推测的结果都较为准确, 能够适应不同负载的网络环境, 比采用单一参数的拓扑推测方法推测网络拓扑的效果好。

整参数为 $b_s = 0.10 \text{ KB}$, $T_s = 0.10 \text{ s}$, r_s 和 R_s 不变,则会出现方法3求得的 $D_{\text{all,max}}$ 为最大的情况(限于篇幅,本文未列出相关数据)。这说明方法3与方法2求得的 $D_{\text{all,max}}$ 大小关系不稳定,与WSN的配置参数紧密相关。由于方法1与方法2采用了相同的数据流服务分配机制,故方法1计算结果能被方法2包络。

4 结束语

本文深入分析了TFA法与SFA法在数据流服务分配机制上存在的差别,指出这两种方法计算结果不存在可比性,并指出现有SFA法应用于WSN存在较大局限性。本文提出的改进SFA法,是一种与现有TFA法数据流服务分配机制相匹配的单数据流端到端延迟上界求解方法。公式推导与数值计算结果均表明,本文的改进SFA法求解结果能够被TFA法求解结果包络,符合物理意义且更精确。下一步研究重点在于如何确定节点最大调度延迟并进行实验研究,以验证利用网络微积分在WSN中求解延迟上界的准确性。

参考文献:

- [1] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [2] HAJELA R, GARIMELLA R, SABNANI D. LCSD: leveling clustering and sectoring with dissemination nodes to perform energy efficient routing in mobile cognitive wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 177-182.
- [3] IAKYILDIZ I, MELODIA T, CHOWDHURY K. A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2007, 51(4): 921-960.
- [4] CHANG C S, CRUZ R, BOUDEC J L, et al. A min, + system theory for constrained traffic regulation and dynamic service guarantees [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2002, 10(6): 805-817.
- [5] LeBOUDEC J L, THIRAN P. A theory of deterministic queueing systems for the Internet [C]// LNCS, vol 2050. Berlin: Springer-Verlag,

2001.

- [6] SCHMITT J B, ROEDIG U. Sensor network calculus: a framework for worst case analysis [C]//Proc of International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. 2005: 141-154.
- [7] SCHMITT J B, ROEDIG U. Worst case dimensioning of wireless sensor networks under uncertain topologies [C]//Proc of the 3rd IEEE International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc, and Wireless Networks, Workshop on Resource Allocation in Wireless Networks. 2005.
- [8] SCHMITT J B, ZDARSKY F A, ROEDIG U. Sensor network calculus with multiple sinks [C]//Proc of the IFIP Networking 2006, Workshop on Performance Control in Wireless Sensor Networks. 2006: 6-13.
- [9] KOUBA A, ALVES M, TOVAR E. Modeling and worst-case dimensioning of cluster-tree wireless sensor networks [C]//Proc of the 27th IEEE Real-time Systems Symposium. 2006: 412-421.
- [10] 李翠, 巨永锋. 基于网络微积分的WSN属性界限研究[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(10): 34-37.
- [11] LENZINI L, MINGOZZI E, STEA G. Delay bounds for FIFO aggregates: a case study [C]//LNCS, vol 2811. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 31-40.
- [12] LENZINI L, MARTORINI L, STEA G. A methodology for deriving per-flow end-to-end delay bounds in sink-tree DiffServ domains with FIFO multiplexing [C]//LNCS, vol 3280. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 604-614.
- [13] SCHMITT J B, ZDARSKY F A, FIDLER M. Delay bounds under arbitrary multiplexing: when network calculus leaves you in the lurch [C]//Proc of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications. 2008: 1669-1677.
- [14] KIEFER A, GOLLAN N, SCHMITT B J. Searching for tight performance bounds in feed-forward networks [C]//LNCS, Vol 5987. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 227-241.
- [15] ZHANG Lian-ming, YU Jian-ping, DENG Xiao-heng. Modelling the guaranteed QoS for wireless sensor networks: a network calculus approach [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011, 2011(1): 82-95.

(上接第1819页)

4 结束语

结合多种性能参数进行网络拓扑推测, 仅需适量的计算, 不会随着网络规模的增加复杂性急剧增加, 即可实现不同网络负载的拓扑推测。通过NS-2仿真验证了该算法推测逻辑网络拓扑的正确性、有效性和优越性。下一步研究需要把算法推广到网状或者更复杂的拓扑结构中。

参考文献:

- [1] CASTRO R, COATES M, LIANG G, et al. Network tomography: recent developments [J]. *Statistical Science*, 2004, 52(3): 499-508.
- [2] 赵洪华, 陈鸣. 基于网络层析成像技术的拓扑推断[J]. *软件学报*, 2010, 21(1): 133-146.
- [3] 李贵山, 蔡皖东. 一种快速网络拓扑推断方法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(20): 11-12.
- [4] CACERS R, DUFFIELD N, HOROWITZ J, et al. Loss based inference of multicast network topology [EB/OL]. [2007-01-20]. <http://www.kiskeya.net/ramon/work/pubs/cdc99.pdf>.

- [5] 吴文佳, 张建中, 张元鹏. 基于丢包率的多播网络拓扑推断算法[J]. *计算机工程*, 2010, 36(1): 124-126.
- [6] LAWRENCE E, MICHAILIDIS G, NAIR V. Network delay tomography using flexi cast experiment [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 2006, 68(3): 785-813.
- [7] 李勇军, 蔡皖东, 王伟, 等. 基于端到端链路利用的网络拓扑发现算法研究[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(2): 837-843.
- [8] SHIH M, HERO A O. Hierarchical inference of unicast network topologies based on end-to-end measurement [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2007, 55(5): 1708-1718.
- [9] CASTRO R, COATES M, GADHIK M. Maximum likelihood network topology identification from edge-based unicast measurements [C]//Proc of ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM Press, 2002: 11-20.
- [10] 李勇军, 蔡皖东, 王伟, 等. 基于Manhattan距离的网络拓扑推断方法研究[J]. *计算机科学*, 2006, 33(11): 31-33.
- [11] 赵洪华, 陈鸣, 仇小锋, 等. Tomography技术中的多参数网络拓扑推断[J]. *北京邮电大学学报*, 2008, 31(4): 24-28.