

# 基于端到端数据的矩的网络时延估计算法

林俊武<sup>1</sup>, 张建中<sup>2</sup>

(1. 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005; 2. 中国海洋大学地球探测与信息技术系, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 现有时延层析算法大多考虑离散时延模式, 但算法效率比较低。为此, 提出一种连续时延估计算法, 假定链路时延为某参数的函数分布, 根据多播特征并基于端到端数据的矩, 利用非线性最小二乘法估计链路时延分布函数的参数, 并在每步迭代中用一维牛顿搜索确定最优步长, 达到快速收敛。应用 Matlab 和 NS2 仿真软件得到的数据表明, 该算法所需的存储量少, 算法简单且效率较高。

**关键词:** 网络测量; 网络层析; 时延估计; 多播; 非线性最小二乘法

## Algorithm for Network Delay Estimation Based on End-to-End Data Moment

LIN Jun-wu<sup>1</sup>, ZHANG Jian-zhong<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Department of Geo-exploration and Information Technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**【Abstract】** The up-to-date algorithms on delay tomography are based on the discrete delay mode, but it is low efficiency in this mode. This paper proposes a continuous delay mode, whose delay is distributed on a function with some parameters. According to the rule of multicast and based on end-to-end moments, the parameters can be estimated using nonlinear least squares and the best step is chosen by the one-dimension Newton search in iteration. Experimental results on Matlab and NS2 simulation show that the algorithm needs little storage and is simple with high efficiency.

**【Key words】** network measurement; network tomography; delay estimation; multicast; nonlinear least square method

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.10.010

### 1 概述

因特网规模的日益扩展使得对网络性能进行监控和测量越来越重要。针对传统的网络性能测量方法的局限性, 一些研究者提出了网络层析技术<sup>[1]</sup>, 通过端到端测量到的结果, 利用统计推断技术估计网络内部性能(包括丢包率、时延和流量等)。由于无需网络内部节点的协作, 确保用户的信息安全并能减少网络负载, 因此网络层析已成为当前网络测量领域的一个研究热点。

网络性能测量中时延性能检测是网络层析技术的一个重要研究内容。目前的研究方法主要有 2 种模式: 离散时延模式和连续时延模式。离散时延模式<sup>[2-3]</sup>是把链路时延离散成几个量化当元(bins), 然后利用迭代算法推断出在各个 bins 上的概率大小。离散时延模式的主要缺点在于: (1)在算法应用之前应该选好合适的 bins 大小, 但在内部链路的统计未知情况下这是不可能的。(2)固定的 bins 大小实际上对链路间时延有很大偏差的情况是不适用的。(3)当 bins 比较大或者网络拓扑比较大时, 这些方法计算复杂性比较大。为了克服 bins 的问题, 提出了连续时延模式<sup>[4-5]</sup>, 即假设链路时延是具有某些参数的函数分布, 利用统计推断估算出这些参数, 从而得到各个链路上的时延分布情况, 但这种模式现有的算法也大多通过离散模式算法估计分布函数的参数, 仍然存在计算复杂性。为此, 本文提出了基于矩的连续时延模式的推断算法。

### 2 时延网络层析的基本原理

具有单个源节点和多个接收节点的网络拓扑可以简化为一棵逻辑树  $T=(V, L)$ 。其中,  $V$  是节点集合;  $L$  是链路集合。 $V$  包括源节点 0、接收节点  $R$  和内节点  $I$ 。令  $p_{ij}$  表示节点  $i$

到节点  $j$  的连接路径, 2 个节点之间的直接连接(不包含中间节点)称为链路。拓扑结构如图 1 所示。

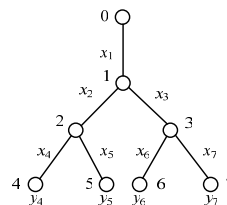


图 1 拓扑结构

当探测包经过一条链路  $l$  时, 会产生一个时间延时值  $x_l$ , 每个探测包在所有链路上时间延时值表示为一个向量  $X=(x_l \in V \setminus S)$ ; 同样, 每个探测包经过一条路径  $p$ (从源节点到叶节点)也会产生一个时间延时值, 表示为  $y_p$ , 每个探测包在所有路径上的延时值表示为一个向量  $Y=(y_p \in R)$ ;  $A=(a_{ij})$  是网络路由矩阵, 由  $|R|$  行和  $(|V|-1)$  列构成, 当从源节点 0 到叶节点  $i$  的路径上包含链路  $j$  时,  $a_{ij}=1$ ; 否则,  $a_{ij}=0$ 。这样,  $Y$  与  $X$  满足关系式:  $Y=AX$ 。由观察到的  $Y$  的数据估计出  $X$  的值, 它是个反问题。

### 3 基于矩的时延估计算法

假设内部链路时延随机变量  $X$  在时间和空间上相互独立。所使用端到端数据的矩主要有数学期望、协方差、方差

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41074077, 40774065)

**作者简介:** 林俊武(1974—), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向: 网络信号, 信息处理; 张建中, 教授、博士

**收稿日期:** 2010-12-09 **E-mail:** linjunwu\_98@163.com

或者高阶的中心距。

基于矩的时延估计算法是先假设各链路时延满足某参数的函数分布, 根据  $Y=AX$  得到叶节点上分布函数的矩, 寻找合适的参数使得分布函数的矩与所观测到的端到端数据的矩之间的残差达到最小, 从而得到内部链路的时延平均值和时延分布情况。

假设各条链路时延  $x_i$  满足参数为  $\theta_i$  的函数分布,  $\theta_i$  可以作为一个或多个参数, 简记为向量  $\theta$ 。令  $M_i^j$  表示第  $j$  个节点上观测到的端到端数据的  $i$  阶矩, 令  $\mathcal{M}_i^j(\theta)$  表示第  $j$  个节点上给定的函数形式  $i$  阶矩,  $\theta$  是链路上时延分布的待估计参数。其目标函数如下:

$$Q(\theta) = \sum_{j=1}^R \sum_{i=1}^m [M_i^j - \mathcal{M}_i^j(\theta)]^2$$

其中,  $m$  是最高矩的阶数;  $R$  是观测的叶节点数; 寻找合适的  $\hat{\theta}$  使得  $Q(\hat{\theta})$  最小。

令  $q_i^j(\theta) = \mathcal{M}_i^j(\theta) - M_i^j$ , 则  $q(\theta) = (q_i^j(\theta))$  表示所有分布函数的矩与观测的端到端的矩之差的方程的集合。由于  $Q(\theta)$  是非线性的, 因此只能用非线性最小二乘法求解, 假设  $\theta^{(k)}$  是解的第  $k$  次近似,  $\theta^{(k)}$  将函数  $q_i^j(\theta)$  线性化, 记  $\phi_i^j(\theta)$  为  $q_i^j(\theta)$  的一阶泰勒展开式, 即:

$$\phi_i^j(\theta) = \nabla q_i^j(\theta^{(k)})^T \theta - [\nabla q_i^j(\theta^{(k)})^T \theta^{(k)} - q_i^j(\theta^{(k)})]$$

则由上式得最小二乘解为  $\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + d^{(k)}$ 。其中,  $d^{(k)} = -(A_k^T A_k)^{-1} A_k^T q(\theta^{(k)})$ ;  $A_k = (\nabla q_i^j(\theta^{(k)}))^T$ 。

为了保证每次迭代能使目标函数值下降并加快目标函数收敛, 从  $\theta^{(k)}$  出发, 沿这个方向进行一维牛顿搜索确定迭代步长  $\lambda_k$ , 使得  $Q(\theta^{(k)} + \lambda_k d^{(k)})$  最小。令  $\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}$ , 把  $\theta^{(k+1)}$  作为第  $k+1$  次近似, 以此类推, 直到得到满足要求的解。

### 4 仿真实验

为了验证此方法的有效性, 假设各链路满足参数为  $\theta$  的指数分布, 对如图 1 所示的拓扑结构进行 2 组数据仿真实验。

(1) 利用 Matlab 中随机变量函数产生 30 组满足指数分布的理论数据, 各链路参数如表 1 所示。

链路	指数分布参数 $\theta$
1	1.09
2	2.19
3	1.47
4	2.20
5	0.82
6	2.42
7	0.51

(2) 利用 NS2 仿真软件观测得到端到端实际的网络仿真数据。在 NS2 中, 链路参数配置如表 2 所示。背景流量为每个路由传输的缓冲区大小为 50 个数据包, 支持多播路由, 采用的拥塞避免算法为 Drop-Tail。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。实验中使用 CBR 模型探测包。这里考虑的是除了传输时延外的链路时延。

链路	带宽/(Mb·s <sup>-1</sup> )	时延/ms
1	20	100
2	20	100
3	20	100
4	20	30
5	15	50
6	15	50
7	12	40

对理论数据和 NS2 仿真数据, 利用此方法推断得到的结果(限于篇幅只列 5 条链路)及其 95% 的置信区间如图 2~图 5 所示。在图 2 和图 3 中, 实心点为理论值, 在图中显示为一条直线, 空心点为估计值。

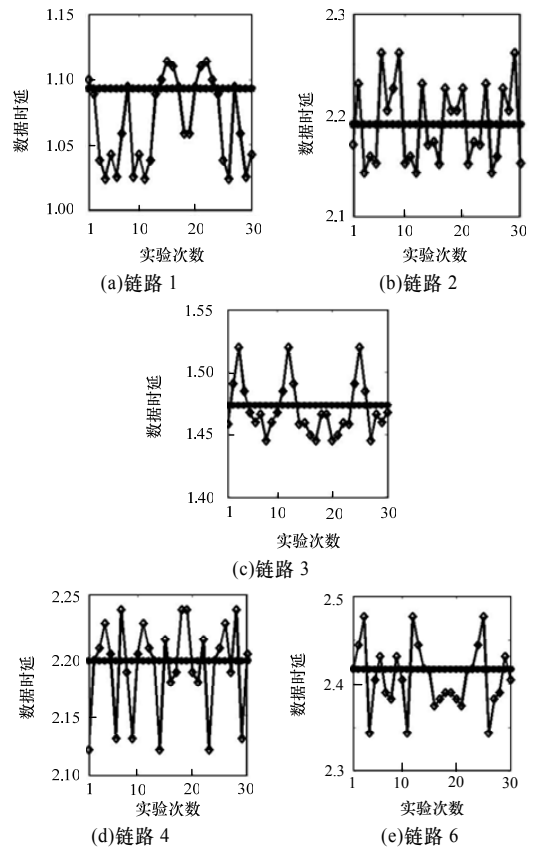


图 2 理论数据理论值与估计值时延对比

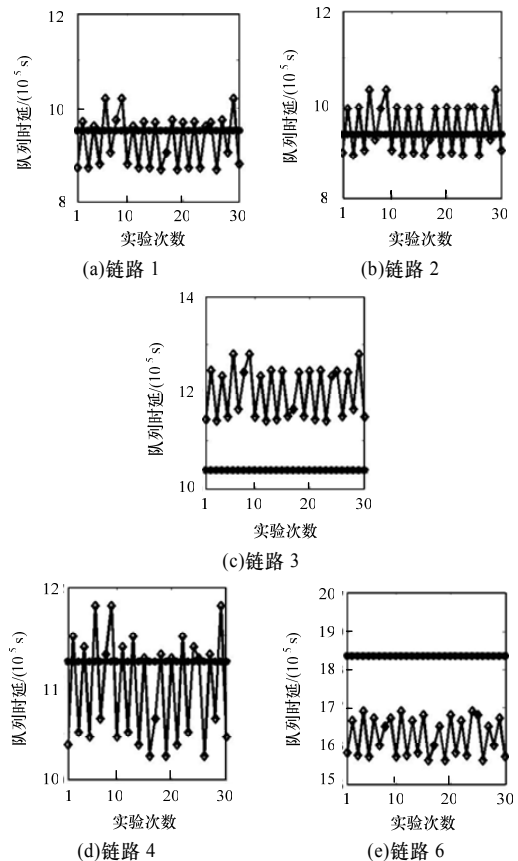


图 3 NS2 仿真数据理论值与估计值时延对比

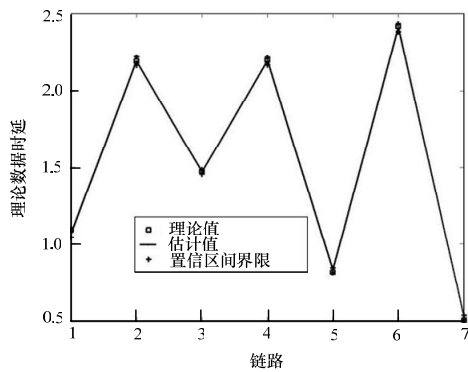


图4 理论数据各链路置信区间估计值与理论值对比

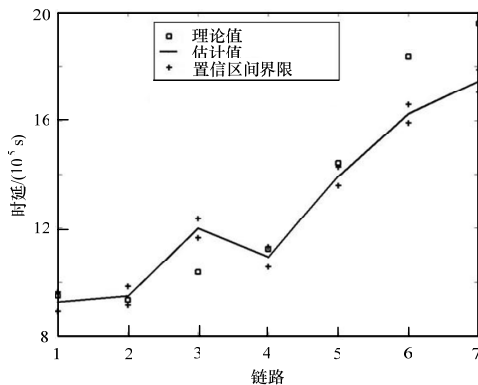


图5 NS2 仿真数据各链路置信区间估计值与理论值对比

由图2可以看出,对理论数据而言,因为各链路满足指数分布,所以利用此方法推断得到的估计值很接近理论值,而且95%的置信区间都接近理论值(见图4)。由图3可以看出,对NS2仿真数据而言,链路1、链路2和链路4得到的估计值比链路3和链路6得到的估计值更接近各自的理论值,95%的置信区间也是如此(见图5)。这是因为链路3和链路6上的队列时延不是很好地满足指数分布,数据离散度比较高导致数据的方差值变大,所以得到的估计值就会偏差比较大。

迭代步长的确定对本算法的效率影响很大,文中使用一维牛顿搜索确定迭代步长,与给定步长(步长为0.1)的算法迭

代过程如图6和图7所示。

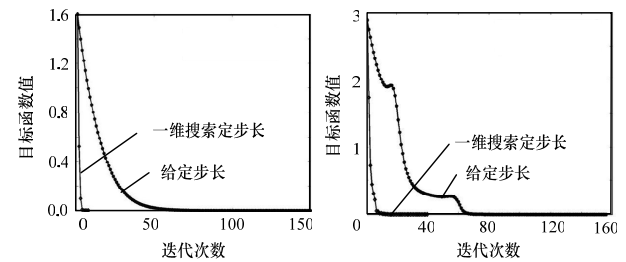


图6 理论数据迭代次数对比 图7 NS2 仿真数据迭代次数对比

## 5 结束语

本文是以连续时延模式来考虑每条链路时延分布情况,提出基于端到端数据的矩的时延估计算法。仿真实验证明了如果选定的分布函数比较符合链路时延分布情况,利用此方法推断得到的估计值很接近理论值。其不足在于未知内部链路时延实际分布情况下,不易选择合适的某参数的函数分布,只能靠先验知识。

## 参考文献

- [1] 李勇军, 蔡皖东, 王伟. 网络断层扫描技术综述[J]. 计算机工程, 2006, 32(13): 91-93.
- [2] Arya V, Duffield N G, Veitch D. Temporal Delay Tomography[C]// Proc. of the 27th Conference on Computer Communications. Phoenix, Arizona, USA: IEEE Press, 2008: 276-280.
- [3] Lawrence E, Michailidis G. Network Delay Tomography Using Flexicast Experiment[J]. Journal of Royal Statistical Society, 2006, 68(5): 785-813.
- [4] Ye Xia, Tse D. Inference of Link Delay in Communication Network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(12): 2235-2248.
- [5] Dinwoodie I H, Eric A. Moment Estimation in Delay Tomography with Spatial Dependence[J]. Performance Evaluation, 2007, 64(7/8): 613-628.

编辑 顾逸斐

(上接第31页)

- [3] Ma Yufei, Zhang Hongjiang. Contrast-based Image Attention Analysis by Using Fuzzy Growing[C]//Proc. of the 11th ACM International Conference on Multimedia. New York, USA: ACM Press, 2003: 374-381.
- [4] 张鹏, 王润生. 基于视点转移和视区追踪的图像显著区域检测[J]. 软件学报, 2004, 15(6): 891-898.
- [5] Wang Zheshen, Li Baoxin. A Two-stage Approach to Saliency Detection in Images[C]//Proc. of ICASSP'08. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE Press, 2008: 965-969.
- [6] 曾志宏, 周昌乐, 林坤辉, 等. 目标跟踪的视觉注意计算模型[J]. 计算机工程, 2008, 34(23): 241-243.

- [7] Sun Yaoru, Robert F. Object-based Visual Attention for Computer Vision[J]. Artificial Intelligence, 2003, 146(1): 77-123.
- [8] 邵静, 高隽, 赵莹, 等. 一种基于图像固有维度的感知物体检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 810-815.
- [9] 赵训坡, 王璐, 胡占义. 一种基于感知物体的场景分析注意机制[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(2): 281-288.
- [10] 邹琪, 罗四维, 郑宇. 利用多尺度分析和编组的基于目标的注意计算模型[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 559-562.
- [11] Feng Songhe, Xu De, Yang Xu. Attention-driven Salient Edge(s) and Region(s) Extraction with Application to CBIR[J]. Signal Processing, 2010, 90(1): 1-15.

编辑 任吉慧