

学校编码: 10384  
学号: 23120070153489

分类号\_\_密级\_\_  
UDC\_\_

廈門大學

博 士 学 位 论 文

基于网络层析的时延估计算法研究  
Algorithms for Delay Performance  
Inference Based on Network Tomography

林俊武

指导教师姓名: 张 建 中 教 授  
专 业 名 称: 电 路 与 系 统  
论文提交日期: 2011 年 5 月  
论文答辩时间: 2011 年 月  
学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_  
评 阅 人: \_\_\_\_\_

2011 年 5 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

网络测量对认识网络行为以便更合理有效管理网络具有重要意义，但网络的分布化、不协作、异质等特点使得网络测量极具挑战性。传统的网络测量方法具有需要网络内部节点的参与协作，或需要在网络中部署测量设备，存储和分析包头信息，存在信息安全、隐私和机密问题，且增加网络负载等局限性。为此，一些研究学者把计算机层析技术原理应用于网络测量领域，从而提出了网络层析技术，它是一个新兴发展的网络测量技术，它是基于端到端的测量结果，利用统计推断技术来估计网络内部链路的性能参数，如链路的时延、丢包率等。因为它克服了传统网络测量方法的局限性，所以网络层析技术已成当前网络测量领域的一个研究热点。

时延层析是网络层析技术的一个重要研究内容，针对现有网络时延层析存在的问题，本论文在多播情况下对时延估计算法做了研究工作。现有的时延层析估计算法主要有两种模式：离散时延模式和连续时延模式。在离散时延模式中存在事先不易确定合适的量化单元的大小及计算复杂性问题，连续时延模式近年来成为时延层析研究热点，但在连续时延模式中需要事先假定各链路的时延分布函数，在事先不易正确假定各链路的时延分布情况下导致计算精度低的问题。本文所做的工作主要包括：在离散时延模式中，研究降低计算复杂性的方法，提出了一种自底向上逐层的时延估计算法，它是一种数值计算，相对于现有的 EM 算法，此方法效率比较高，但逐层计算会产生累积误差。在连续时延模式中，在现有的矩估计算法考虑了变量之间的相关性，可以提高矩估计算法的精度，但现有的矩估计算法也是采用逐层计算方式，也会产生逐层累积误差，为此我们从全局考虑，提出了连续时延模式的基于端到端数据的矩的链路时延估计算法，简化了计算过程，解决了逐层计算造成的误差问题，提高了精度。不过在连续时延模式中，事先对链路时延分布假定正确与否对精度影响很大，为此我们在事先不假定链路的时延分布情况下，研究网络时延层析的线性模型问题直接求解的方法，由于网络时延层析线性模型问题实际上是一个严重的不适定的欠定反问题，所以我们利用正则化方法解决欠定反问题的思路，研究确定正则化参数和正则化矩阵的方法，提出了一种混合算法，即利用在无偏估计类中改进最小二乘法的方法对时延层析线性模型进行初步估算，将得到的估算值

作为改进的谱修正迭代法的初始值，并对迭代的结果进行局部搜索优化后得到时延层析线性模型的最终结果，此方法在没有事先假定好链路时延分布时，精度能够改善，但受不适定问题的病态程度影响比较大。

关键词：网络层析；时延；多播

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

Network measurement is important for us to examine the action of network so that the network can be managed more reasonably and more effectively. However, because of its distributive, no corporative and heterogeneous characteristic, accurate measurement of such a network is very difficult. Traditional measurement methods have some limitations such as with the participation and collaboration of internal nodes and some devices being deployed in the network to storage and analysis packets information, leading to leak of information security, user privacy and business secrets, and additional traffics being increased for network load in the process of measurement. For the reasons, network tomography is proposed based on the principle of computer tomography. It is a newly developing measurement and inferring technology in the network, which can induce the performance about internal link in network by way of the result from the end-to-end measurements, such as delay and loss etc. Because of overcoming the limitations of traditional measurement methods, network tomography has become a hot subject in network measurement.

Delay tomography is one of the important subjects in network tomography. According to the shortcoming of existing algorithms, we mainly work on the algorithm about delay tomography in the paper. The existing algorithms mainly based on two models: discrete delay model and continuous delay model. Because of the difficulty in choosing fit bins size before and computational complexity in the discrete delay model, the continuous delay model has become a hot subject recently. But the distribution of delay on each link must be supposed before in the continuous delay model, which may lead to low accuracy if the supposed distribution is not correct.

The main contents in the paper are as follows. In the discrete delay model, we work on decreasing the computational complexity and proposed a high efficiency algorithm, which infer delay layer-by-layer from bottom to up. It is a kind of numerical calculation, so its efficiency is high comparing with the existing EM algorithm, but it can produce

accumulative error because of its layer-by-layered calculation.

In the continuous delay model, we make an improvement on the existing moment method by taking the correlation between variables into it and improve its accuracy, but it can also produce accumulative error because of its layer-by-layered calculation. Therefore, from overall consideration, we propose a delay estimation algorithm based on end-to-end moment. The accuracy can be improved by solving the error problem caused by its layer-by-layered calculation.

But in continuous delay mode, the accuracy is impacted on whether the assumption on link delay distribution before is correct or not. For the reasons, we make researches on the direct method to solve the linear model in delay tomography. Because the linear model is a serious ill-posed inverse problem, according to the ideas about regularization method solving ill-posed inverse problem, we work on the method in choosing regularization parameters and regularization matrix, and we proposed a mixed algorithm, which the outcome from the improved least square algorithm in the unbiased estimation is made to initial value for the improved spectrum iterative algorithm, in the end, local optimized search algorithm is make use to improve its accuracy. This method can improve the accuracy when the assumption on link delay distribution before is not correct, but it can be impacted by the degree of ill-posed problem.

Key words: network tomography; delay; multicast.

## 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 网络层析研究意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.3 研究内容及结构安排 .....	8
<b>第二章 网络层析原理</b> .....	<b>11</b>
2.1 网络测量 .....	11
2.1.1 网络测量的基本要素 .....	11
2.1.2 网络测量的分类 .....	12
2.1.3 网络测量的性能指标 .....	14
2.2 网络层析 .....	16
2.2.1 基本原理 .....	16
2.2.2 逻辑拓扑结构 .....	18
2.2.3 数学模型 .....	19
2.2.4 时延层析原理 .....	20
2.2.5 数据测量和收集 .....	21
2.2.6 反演推断技术 .....	23
2.3 本章小结 .....	26
<b>第三章 基于离散模式时延估计算法</b> .....	<b>27</b>
3.1 离散时延模式介绍 .....	27
3.2 离散时延模式主要算法 .....	28
3.2.1 极大似然估计 .....	28
3.2.2 EM 算法 .....	29
3.2.3 EM 算法复杂性 .....	32
3.2.4 EM 算法适用性 .....	34
3.3 逐层算法 .....	34
3.3.1 逐层算法基本原理 .....	34
3.3.2 仿真实验 .....	38
3.4 本章小结 .....	42
<b>第四章 基于连续模式时延估计算法</b> .....	<b>43</b>
4.1 连续时延模式主要算法 .....	43
4.1.1 CGF 时延估计算法 .....	43
4.1.2 混合模型的 EM 算法 .....	44
4.1.3 矩估计算法 .....	46
4.2 改进的矩估计算法 .....	50
4.2.1 基本原理 .....	50
4.2.2 仿真实验 .....	53
4.3 基于端到端数据的矩的时延估计算法 .....	57
4.3.1 基本原理 .....	58

4.3.2 算法推导.....	58
4.3.3 仿真实验.....	61
4.4 本章小结.....	70
<b>第五章 基于正则化方法网络时延层析算法.....</b>	<b>71</b>
<b>5.1 时延层析欠定反问题.....</b>	<b>71</b>
5.1.1 不适定问题.....	72
5.1.2 不适定问题正则化思想.....	73
<b>5.2 处理病态问题常用方法.....</b>	<b>74</b>
5.2.1 岭估计.....	75
5.2.2 广义岭估计.....	80
5.2.3 在无偏估计类中改进最小二乘估计的方法.....	80
5.2.4 谱修正迭代法.....	84
<b>5.3 基于正则化方法网络时延层析混合算法.....</b>	<b>85</b>
5.3.1 非负最小二乘法.....	86
5.3.2 改进的谱修正迭代法.....	86
5.3.3 混合算法.....	88
5.3.4 仿真实验.....	89
<b>5.4 几种算法比较.....</b>	<b>92</b>
<b>5.5 本章小结.....</b>	<b>95</b>
<b>第六章 结论和建议.....</b>	<b>96</b>
6.1 结论.....	96
6.2 建议.....	97
参考文献.....	99
攻读学位期间发表的学术论文.....	107
致谢.....	108

## Contents

<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 Meaning of Network Tomography.....	1
1.2 Current Situation of Network Tomography.....	2
1.3 Contents and Structure of Thesis.....	8
<b>Chapter 2 Network Tomography .....</b>	<b>11</b>
2.1 Network Measurement .....	11
2.1.1 Basic Elements in Network Measurement.....	11
2.1.2 Class in Network Measurement.....	12
2.1.3 Performance Index in Network Measurement.....	14
2.2 Network Tomography.....	16
2.2.1 Basic Principle.....	16
2.2.2 Logic Network Topology.....	18
2.2.3 The Model of Network Tomography.....	19
2.2.4 Network Delay Tomography.....	20
2.2.5 Data Measurement and Collection.....	21
2.2.6 The Inference of Delay Tomography.....	23
2.3 Summary of This Chapter.....	26
<b>Chapter 3 Algorithms for Discrete Delay Model.....</b>	<b>27</b>
3.1 Introduction of Discrete Delay Model.....	27
3.2 The Main Algorithms in Discrete Delay Model.....	28
3.2.1 Maximum Likelihood Estimation.....	28
3.2.2 EM Algorithm.....	29
3.2.3 The Complexity of EM Algorithm.....	32
3.2.4 The Adaption of EM Algorithm.....	34
3.3 Layer-by-Layer Delay Algorithm.....	34
3.3.1 Basic Principle.....	34
3.3.2 Simulations.....	38
3.4 Summary of This Chapter.....	42
<b>Chapter 4 Algorithms for Continuous Delay Model.....</b>	<b>43</b>
4.1 The Main Algorithms for Continuous Delay Model.....	43
4.1.1 CGF Delay Algorithm.....	43
4.1.2 Mixed Model with EM Algorithm.....	44
4.1.3 The Moment Estimation Algorithm.....	46
4.2 The Improved Moment Estimation Algorithm .....	50
4.2.1 Basic Principle.....	50
4.2.2 Simulations .....	53
4.3 Delay Estimate Algorithm Based on End-to-End Moments.....	57
4.3.1 Basic Principle.....	58

4.3.2 Induce of Algorithm.....	58
4.3.3 Simulations.....	61
<b>4.4 Summary of This Chapter.....</b>	<b>70</b>
<b>Chapter 5 Method in Delay Tomography Based on Regularization...71</b>	
<b>5.1 The Ill-posed Inverse Problem in Delay Tomography.....71</b>	
5.1.1 Ill-posed Problem.....	72
5.1.2 Regularization Method.....	73
<b>5.2 Methods for Ill-posed Problem.....74</b>	
5.2.1 Ridge Estimation.....	75
5.2.2 Generalized Ridge Estimation.....	80
5.2.3 Algorithm of Improved LS in Unbiased Estimation Class .....	80
5.2.4 The Iterative Algorithm.....	84
<b>5.3 Mixed Methods in Delay Tomography based on Regularization.....85</b>	
5.3.1 Non-Negative Least Square.....	86
5.3.2 The Improved Iterative Algorithm.....	86
5.3.3 Mixed Algorithm.....	88
5.3.4 Simulations.....	89
<b>5.4 Comparisons on Algorithms.....92</b>	
<b>5.5 Summary of This Chapter.....95</b>	
<b>Chapter 6 Conclusions and Propositions.....96</b>	
6.1 Conclusions.....	96
6.2 Propositions .....	97
<b>References.....99</b>	
<b>Published Papers.....107</b>	
<b>Acknowledges.....108</b>	

## 第一章 绪论

### 1.1 网络层析研究意义

网络技术是 20 世纪发展最为迅速的技术之一，今天的网络已经成为现代社会发展和人们日常生活不可或缺的重要部分。网络用户数不断增多，显指数增长的趋势，据统计，截止 2010 年底，中国网民规模人数已达到 4.57 亿[1]，同时，不断出现的网络新业务使得网络类型越来越多，网络的结构也日益复杂，作为当代信息社会的重要基础设施，网络已经是一个真正意义上的复杂巨系统，并且网络最大的特点就是开放性，这种开放性的特点使得今天的网络成为一个高度异构、分布化的、缺乏统一和集中管理的复杂系统，这样导致越来越难以全面了解和掌握网络内部的运行行为，以及难以预测它未来的发展趋势，因此如何管理和维护这样的一个复杂系统的正常运行已变得越来越重要了，它成为网络管理者和供应商所面临的一个极为迫切的问题。而要对这样复杂的网络系统进行掌控就必须要了解网络内部运行环境、网络应用及服务的实际工作状况，要了解网络内部运行环境及其工作状况就必须对网络内部一些性能参数（比如丢包率、时延、带宽、流量等等）进行观测和跟踪。目前获得第一手网络行为指标和参数的最有效手段就是网络测量技术，它是深入认识网络行为和了解网络的运行状况的十分有效的途径，但网络的分布化、不协作、异质等特点使得网络测量极具挑战性。

传统的网络测量方法主要基于面向网络内部节点的或者基于面向网络内部链路的两种方式。面向网络内部节点的网络测量方法首先需要在每个网络内部节点上放置一种简单网络管理协议（Simple Network Management Protocol, SNMP）或者远端网络监控（Remote Network Monitoring, RMON）代理，通过 SNMP 或 RMON 来收集网络内部节点的相关信息，然后对收集到的信息进行分析并统计出网络内部性能，这种方法缺点在于它不仅代价昂贵，而且不具有可扩展性，因此在实际大型网络中，这种方法往往是难以实现；面向网络内部链路的网络测量方法主要是通过 Internet 控制报文协议（Internet Control Message Protocol, ICMP）探测包进行链路监测来得到网络内部性能，这种方法的特点是需要存储转发路由、以无防火墙存在的假设为前提，以及需要路由器之间的协作，但基于商业和竞争等因素来考虑，任何一个组

织或商业机构通常都不愿意与其它组织或商业机构共享其网络状态，这样导致每个组织或商业机构都只能拥有自身内部局部的信息，无法从全面深入地进行研究，从而极大地限制了对大规模网络内部拓扑结构以及其内部动态的性能状况进一步研究和探测，同时，在测量中，服务器和路由器在收集和传递统计数据过程中也会消耗大量带宽，这样会增加网络内部的负载。综上所述，传统的网络测量方法很明显具有一定的局限性。

为了弥补传统的网络测量方法的不足，人们在不断寻找其它途径来研究网络的整体性能及其变化规律，其中，当前备受国际学术界关注、最有前途的大规模网络测量技术就是网络层析技术(Network Tomography)。

网络层析的概念是 Vardi[2]根据其与计算机层析成像 CT(Computer Tomography)技术的相似性最先提出来的，借用医学、地震学、地质勘探等领域成功应用的成熟理论和方法应用于网络通信领域而提出的网络层析技术[3-7]，它是一种新兴发展的前沿技术，是基于一种端到端的技术来获取网络中那些不能直接观测到的信息，利用统计理论和反演理论推断网络各种性能参数，具有开销少、无需内部节点协助的特点，保证了用户隐私和信息安全，减少了测量信息量的传输等优点。与现有网络测量方法不同的是，网络层析只需使用网络中的一组节点，无需大量节点的协作即可完成对整个网络各种状态的推测，克服了传统网络测量方法的不足，具有非常重要的研究意义，网络层析近年来成为科研人员关注的热点。

链路时延是网络内部性能参数中的重要参数之一，时延的大小可以反映网络内部的运行状况，而且时延变化对网络电话 VoIP、网络视频会议以及远程医疗等实时交互具有重要意义，同时时延也是表征网络内部负载特征一个重要的性能指标，所以网络时延层析已成为网络层析技术研究领域的一大研究热点。

## 1.2 国内外研究现状

网络性能测量[8-12]主要包括收集网络测量数据以及对网络测量数据进行分析两个过程，然后根据分析结果对网络的总体运行状况作出一个恰当的评估。目前，关于网络测量的研究工作大部分都集中于测量工具和测量系统的研究。基于研究的体系结构不同，可以将当前的网络性能测量系统分为两种基本类型：测量工具和网络测量基础设施。测量工具主要针对某一种网络参数或者网络性能状况而开发的，

其目的性很强，但是功能相当单一。根据测量工具所获取的参数不同，可以将单一功能的测量工具具体分为拓扑发现、网络性能测量、流量监测以及路由探测等几大类测量工具。下面简要介绍目前主要的网络测量工具[13]。

(1)、流量监测的工具具体可细分为硬件的（如 DatGeneral Network Sniffer）和软件的（tcpdump, SNMP 等）、实时的和非实时的以及侵扰式的和非侵扰式的。实时的流量监测工具是指在测量过程中边收集流量数据边分析数据，并即时显示流量信息，而非实时的流量监测工具是指在测量过程中先将收集到的信息存储起来后再进行分析；侵扰式的流量监测工具是指在收集信息时测量工具本身会产生一些流量，从而影响到被测的网络流量，而非侵扰式的流量监测工具则是被动式的，这种工具只负责观测和记录网络流量信息，不会对被测网络产生额外的流量信息。目前有关流量监测的主要技术有：

SNMP[14]是在 1998 年开发的一个简单网络管理协议，现在已经被广泛地应用于网络流量监测，它已成为流量监测的一个标准的、被动的、数据收集的协议。

IETF(Internet Engineering Task Force)开发的 IPFIE[15](IP Flow Information Export)工具，它着重于对数据进行收集，在某一点上被动地观察 IP 流量信息，并经过过滤、分类、抽样等过程处理后，输出流量的统计数据，以便供收集和分析。

RMON[16](Remote Network Monitoring)是 IETF 制定的一种用于支持远程、异构网络体系的流量监测标准，它主要是对 SNMP 网络管理体系的重要补充。

(2)、随着网络用户数的不断增加、网络应用的不断发展，导致网络负载加重、网络性能明显下降，这就需要对网络的内部性能参数（主要包括丢包率、时延、带宽等参数）指标进行提取与分析，以便对网络内部性能和网络行为进行改善和提高。目前网络性能测量工具主要是基于 IP/ICMP 协议上对网络内部性能进行测量，ping[17]工具就是通过向网络发送 ICMP 数据包来探测网络的连通性以及测量网络延迟参数，Traceroute[18]工具则是通过改变 IP 报头中的 TTL 字段来测量到目的地的路径和延迟，很多其他测量工具和测量体系结构也大都在 ping 工具和 traceroute 工具的基础上进行性能测量。

(3)、网络拓扑发现是指利用网管协议或者网络所提供的工具，通过拓扑算法来推断网络中所有主机、路由器和节点之间的连接关系，从而得到完整的网络拓扑图。网络拓扑结构发现可以采用多种工具或者协议，比如基于 SNMP 协议的、基于

ARP 协议的以及基于 OSPF 的网络拓扑搜索等等，国外的网络拓扑结构发现工具大都是基于 SNMP 协议上来实现的，这种方法也是最有效的网络拓扑发现方法，但是需要有权限的许可。CAIDA 组织开发的 skitter[19]工具就是通过收集路径信息和性能属性来得到网络的拓扑结构。

由于单一测量工具只能在少数点上进行网络测量，这样的测量工具对于日益庞大和复杂的网络系统已经无法满足测量需求了，所以一些研究机构和国家开始着手构建网络测量基础设施以满足网络测量的日益增长的需求，测量基础设施是指专门针对网络测量需要而建立各种的网络测量体系结构。目前，主要的网络测量基础设施有：

(1)、国家互联网测量基础设施 (National Internet Measurement Infrastructure, NIMI) [20]是由美国国家科学基金会 (NSF) 和国防部高级研究计划署 (DARPA) 共同资助的网络测量项目，其主要目标是要测量全球的互联网，其目的是建立一个总体可扩展的网络测量基础框架，而不是只针对某种特定分析目的的特定测量，其设计原则是建立一定的测量基础框架，支持测量工具的发布和运行、测量数据的采集和分析，以及对自身的维护和控制，以便使测量工具在整个互联网范围内都适用。NIMI 结构主要包括：测量探针 (NPD)、客户测量点 (Measurement Point of Client, MOPC)、联系配置中心 (Configuration Point of Contact, CPOC) 和数据分析中心 (Data Analysis Center, DAC)。NIMI 具有安全性、可扩展性、灵活性等优点，但也还存在很多问题，如 NPD 测量软件需要更新等。

(2)、互联网数据分析组织 (Cooperative Association for Internet Data Analysis, CAIDA) [21]开发了专门用于网络测量、分析和可视化的工具，展开了对网络流量性能、模拟分析和可视化的相关理论和方法的系统研究，CAIDA 组织还归纳了目前国际上重要的检测 Internet 性能的测量体系结构项目。

(3)、美国应用网络研究国家实验室 (The National Laboratory for Applied Network Research, NLANR) [22]的运营和分析小组 MOAT 为了实现高性能链接网络的行为特征化，开发了网络分析基础结构 NAI (Network Analysis Infrastructure)，用于收集测量数据，并集合测量工具与方法，然后分析测量结果并进行可视化。主要包括两个核心项目：PMA (Passive Measurement and Analysis Project) 和 AMP (Active Measurement Project)。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库