

Ad Hoc 网络性能测量分析^{*}

王伟 蔡皖东 田广利 李勇军

(西北工业大学计算机学院 西安 710072)

摘要 Ad Hoc 网络在军事和民用领域都具有广阔的应用前景。由于 Ad Hoc 网络复杂的动态特性,国内外尚未出现一种有效的网络性能测量方法。在对 Ad Hoc 网络动态特性、传统的网络测量和网络断层扫描分析的基础上,提出了基于网络断层扫描的 Ad Hoc 网络性能测量架构及若干关键问题。

关键词 动态特性,网络断层扫描,测量架构,性能推断

Analysis of the Ad Hoc Network Performance Measurement

WANG Wei CAI Wan-Dong TIAN Guang-Li LI Yong-Jun

(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University 710072)

Abstract Ad Hoc network has become increasingly important in military and commercial applications. However, the dynamic properties of the Ad Hoc network are so complicated and troublesome that Ad Hoc network performance efficient measurement method is still dubious. In this paper, on the basis of analysis of the Ad Hoc network's dynamic properties and traditional network measurement and Network Tomography technologies, an Ad Hoc network performance measurement architecture and some key problems are presented.

Keywords Dynamic property, Network tomography, Measurement architecture, Performance inference

1 引言

移动无线自组网 (Mobile Ad Hoc Network, 简称 Ad Hoc 网络) 源于战场通信以提高生存能力的战术网络。它作为一种移动通信和计算机网络相结合的新型动态网络, 是由一组带有无线收发装置的移动端节点组成的多跳、临时无中心网络。这种网络无需现有的信息基础设施 (如 Base Station) 的支持, 因而能够在任何时刻、任何地点快速、低廉地构建起一个具有可抗毁性移动通信网络。它与传统的固定网络和无线网络不同, 其地位相同的节点可以随机地以任意速度朝任何方向移动, 加上无线发射装置发送功率因消耗引起的变化、外界因素的影响以及无线电信号之间的互相干扰等动态变化, 这就导致节点之间的链路增加或消失、节点之间的群 (Cluster) 的隶属关系不断发生变化, 而造成网络无线拓扑结构频繁地变化。基于这些特性, Ad Hoc 网络无论在军事领域还是在民用领域都有着广阔的应用前景^[1]。

然而, 网络的可测量性和可维护性对网络使用分析和效能评估具有重要的价值。由于 Ad Hoc 网络固有的动态特性常常造成网络性能的动态变化, 这就需要对网络的性能指标进行提取与分析, 发现网络瓶颈及其潜在的危险, 优化网络配置, 有效地进行网络性能管理, 提供 Ad Hoc 网络服务质量的验证和控制^[2], 这是 Ad Hoc 网络性能测量的主要目的。此外, 对 Ad Hoc 网络测量进行研究亦具有重要的现实意义: (1) 由于 Ad Hoc 网络的分布性、节点移动的不确定性、节点电能和链路带宽的有限性以及无线链路的不可靠性, Ad Hoc 网络性能测试成为目前无线网络技术中的难点之一, 从而成

为制约其发展的技术瓶颈。(2) 通过对 Ad Hoc 网络的测量, 来分析和评估动态网络的运行状况和动态特性, 为及时地调整、部署和恢复受损的网络拓扑提供客观依据。(3) 通过 Ad Hoc 网络的测量, 可以为信息战态势分析和效能评估提供科学依据, 这是现代高科技作战研究的重点和难点之一。(4) 由于目前的 Ad Hoc 网络及其相关技术尚未完全成熟, 加上基于固定网络的网络测量技术难以适应动态的 Ad Hoc 网络测量和评估, 国内外至今还没有对 Ad Hoc 网络的测量进行深入地研究, 如何对 Ad Hoc 网络进行有效的测量是该领域所面临瓶颈之一^[3]。

本文在对 Ad Hoc 网络的动态性分析的基础上, 对传统网络测量方法和网络断层扫描技术做了比较, 提出了基于网络断层扫描技术的 Ad Hoc 网络测量架构 (测量的探测模式、数据采集方法和网络性能推断方法), 并对其中的一些关键问题进行了详尽的分析。

2 Ad Hoc 网络性能动态性的分析

节点移动性作为 Ad Hoc 网络动态性的最显著的特征, 在表面上导致网络拓扑频繁的变化, 而在本质上会影响到网络的各项性能指标, 如吞吐量、传输时延、丢包率和带宽。从而造成网络性能的动态性 (复杂性), 这种动态性体现在网络测量时采集到的数据和网络链路的对应关系 (拓扑状况)。Ad Hoc 网络节点的移动是造成网络拓扑变化的主要因素 (其它因素如节点的失效、自然环境的变化等), 这种移动性常常是通过一定的移动模型来描述。在对 Ad Hoc 网络的性能进行评估时, 采用最贴近实际、最易实现的移动模型是研究的

^{*} 航天科技创新基金 (无统一编号)。王伟 博士研究生, 主要方向为计算机网络、网络信息安全等; 蔡皖东 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机网络、分布式计算、多媒体通信、网络信息安全与对抗等学科方向的研究; 田广利 博士研究生, 主要从事计算机网络、网络信息安全等的研究; 李勇军 博士研究生, 主要从事计算机网络、网络信息安全等的研究。

基础,这也是成功的关键。目前,Ad Hoc 网络常采用的移动模型有 Random Walk Mobility Model、Random Waypoint Mobility Model(RWPMM)、Random Direction Mobility Model 等等^[4]。这些移动模型均存在一定的局限性,尤其是它们的拓扑结构的变化还不能用数学模型来表示。其中 RW-PMM 是研究 Ad Hoc 网络最常采用的移动模型,其网络节点位置的分布近似于均匀分布。在这个模型中,每个移动节点被随机地放置在仿真区域。每个移动节点在某一位置逗留一个指定的暂停时间(Pause Time,PT)后,便随机地选择另一方向,并以一个从最小和最大速度之间均匀选择的速度向新的位置移动。在到达目的地后,节点在一个指定的暂停时间内停止运动,之后节点再次选择一个随机的目的地并重复整个过程。在此模型中,Ad Hoc 网络性能动态性表现在以下几点。

(1)节点密度:在仿真区域中,节点密度的变化依赖于平均速度和 PT,它的增加意味着源端到目的端之间的路径的增多,网络拓扑变得复杂,从而使网络内部节点之间存在多路径,节点之间的通信更能够得到保障,但同时也会出现频繁的交叉通信^[5]。这无疑对网络的吞吐量、网络时延和丢包率都会带来很大的影响。

(2)节点移动(速度):节点移动速度变化是 Ad Hoc 网络动态性的核心,它的大小会使网络的节点密度产生变化,从而导致网络拓扑频繁的变化,较高的节点移动速度更能使网络拓扑趋于均匀分布^[6]。尤其是节点的相对速度(节点之间移动所造成的位置变化是相对的)对网络拓扑的影响更为显著。其结果是节点之间的有效路径生存时间缩短,造成了通信过程中吞吐量的下降、网络时延和丢包率急剧增加。

(3)节点 PT:节点速度和间隔时间之间存在着复杂的关系,在快速移动的节点和较长的 PT 场景下的网络拓扑较节点移动慢速、PT 短的场景下更趋于稳定。仿真表明,当网络节点的 PT 达到一定值时,网络变得相当稳定^[7]。这种情况下的 Ad Hoc 网络如同固定网络一样,其网络时延和丢包率处于相对的稳定状态。当 PT=0 时,节点的运动形式为布朗运动。

(4)节点电能:移动设备常采用电池作为能源,而电池生命是有限的。节点的电能愈高其传输数据的能力愈强^[8]。随着时间的推移,节点的电能会有所下降,当电能水平降低到一定的程度时,节点就退出网络,这无疑对网络的性能造成影响。

(5)节点的物理环境:环境的变化会导致无线通信和业务流的动态和不可预测,如无线信号传输信号损耗、多径衰落和干扰等^[9]。

这些因素的动态变化常常相互交织在一起,使节点之间的链路频繁地产生或消亡,还使链路性能表现出不对称性^[10],从而导致 Ad Hoc 网络性能的强动态性,这也是网络性能测量更趋于困难的主要原因。

3 Ad Hoc 网络性能测量的分析

3.1 传统网络测量方法和网络断层扫描方法

尽管国内外学术界和研究机构对传统网络测量技术进行了大量的研究,但这些网络测量技术基于网络基础架构和网络内部的测量机制,与网络体系结构和网络协议密切相关^[11]。这些测量技术难以适应 Ad Hoc 网络环境下的网络性能测量,它们需要网络内部单元之间的协作而存在诸多缺

陷:首先,它会给网络带来潜在的负载;其次,它需要额外的通信和内部的协作而对网络造成很大的开销;第三,出于安全等方面的考虑,它对网络内部的访问常常被 ISP 所限制;最后,这些测量方法无不建立在有线网络基础之上(如网络链路是静态的等等),而无法应用到 Ad Hoc 网络的测量之中。

近年来,国际上提出一种新的网络测量技术,称为网络断层扫描(Network Tomography, NT)^[12],将医学上的断层扫描(CT)思想引入到网络测量中,根据网络外部(即网络端点或边界)的测量来分析和推断网络的内部性能和拓扑结构。在 NT 技术中,使用路径(Path)和链路(Link)概念来描述网络内部节点之间的连接关系,路径是指两个节点之间的间接连接,它们之间包含一个或多个间接节点;链路是指两个节点之间的直接连接,它们之间不包含间接节点。NT 网络测量分成两个阶段:一是数据测量阶段,建立测量模型,在网络端点或边界上观测和采集测量数据,它使用逻辑树形图来描述介于根节点(单一源节点)和多个叶节点(目的节点)之间经网络不同内部节点所进行的一对多通信。二是数据分析阶段,建立统计分析模型,运用统计学理论对大量的测量数据进行分析 and 评估,推断出网络性能。这种网络外部测量方法相对于传统的网络内部测量方法有很大的优点:通过测量端到端的通信行为来推断网络内部性能,无需任何网络内部单元的协作,这不但降低了由于测量所带来的网络负载,并可实现与被测网络内部结构和协议无关的测量^[13],这对于拓扑动态变化的 Ad Hoc 网络来说,无需考虑源节点和目的节点之间的中间节点的变化。显然,NT 代表着网络测量技术发展的方向,这无疑为 Ad Hoc 网络性能的测量带来了希望。

3.2 基于 NT 的 Ad Hoc 网络的测量架构

利用 NT 技术,Ad Hoc 网络性能测量的基本方法可采用链路级测量^[14]:在网络边界上测量接收到的报文数量和报文延时,利用统计分析模型推断链路报文丢失率和延时。Ad Hoc 网络的测量问题可近似地描述为线性模型 $Y=A\theta+\epsilon$, 其中的 Y 是个度量向量(如端到端的延迟), A 是一个路由矩阵,而 θ 是待估的参数向量(如平均延迟), ϵ 是误差向量。为了简化,常忽略 ϵ 并用关于待估参数 θ 的向量函数 X 代替上式中的 θ ,即: $Y=AX$ ^[12]。

在链路级测量中,首先将根节点(源节点)和多个叶子节点(目的节点)之间的一对多通信关系抽象成一个逻辑树,然后在网络边界节点上观测它们之间的通信行为并采集有关测量数据,如报文是否成功到达、到达报文数量和时延等,报文丢失和时延具有一定的随机性,因此这些测量数据并不能直接作为链路性能参数,还要利用统计学方法对测量数据进行统计分析,从而推断出网络内部链路延时和报文丢失率等网络性能。根据叶节点得到的测量值以及节点间的关联关系,可以推测 Ad Hoc 网络内部每个节点的性能值。用 $X_{s,j}$ 表示节点 j 处的性能测量值, V 表示所有节点集合,测量所得测量值集合为 $X_s=(X_{s,j})_{j \in V}$ 。 $a=(a_j)_{j \in V}$ 为网络中每个节点需要估测的性能参数。定义 $p(x,a)=P\{X_s=x\}$, 则有 $p(x^1, x^2, \dots, x^n; a) = \prod_{m=1}^n p(x^m; a) = \prod_{x \in \Omega} p(x; a)^{n(x)}$, x^1, x^2, \dots, x^n 为 n 次测量结果, Ω 是所有可能测量结果的集合, $n(x)$ 是测量结果中测量值为 x 的次数。需要推测的性能参数值就可以表示为 $\hat{a} = \arg \max_a \prod_{x \in \Omega} p(x; a)^{n(x)}$ 。

3.2.1 测量的探测模式

由于主动测量对网络性能测量过程的可控性比较高,灵

活、机动,易于进行端到端的性能测量,更能体现出 NT 技术的优越性。因而 Ad Hoc 网络性能测量可采用主动探测的模式,即成组地连续发送探测包,每组探测包之间的时间间隔远远小于各组之间的时间间隔,这种时间间隔就是离散(Dispersion),它是由源节点来决定的。通过上面的分析,所采用的探测模式为包对(Packet Pair, PP)技术^[15]。当探测包经过 Ad Hoc 网络的每条路径时,在连续探测包之间的离散就会因有限的链路容量的限制以及与其它数据包所产生的交叉通信(竞争)而变化。接收者收到探测包后,就打上时戳并计算出当前的离散值。

3.2.2 数据采集方法

常用的抽样方法有周期抽样、随机附加抽样和泊松抽样。周期抽样的缺点是测量容易具有周期性、具有很强的可预测性、会使被测网络陷入一种同步状态。随机附加抽样的优劣取决于分布函数,其缺点是由于抽样不是以固定间隔进行,从而导致频域分析复杂化。泊松抽样的时间间隔符合泊松分布,它具有能够实现对测量结果的无偏估计、测量结果不可预测、不会产生同步现象等优点。但因指数函数的无界性,使得泊松抽样会造成很长的抽样间隔。为此,针对 Ad Hoc 网络性能的动态性,尤其是链路的动态变化,需要根据网络节点的移动模型来设定一个最大间隔值(阈值),以加速抽样过程的收敛。

3.2.3 性能推断方法

在 NT 问题推断中,常采用的推断理论和方法包括极大似然估计(Maximum Likelihood Estimation, MLE)^[16]、期望最大值(Expectation Maximum, EM)算法^[17]、最大似估计(Maximum-Pseudo Likelihood Estimation, MPLE)^[18]和 Bayesian 推断方法^[19],这些推断理论和方法各有优缺点。其中,MLE 方法是推断的理论基础,它仅能够对简单的网络进行 NT 测量,而对于实际的网络环境该方法是无能为力的;EM 方法是对 MLE 的扩展而成为 NT 推断问题的一种基本的工具,但对于复杂的网络还是显得力不从心;MPLEA 方法在 EM 方法的基础上进行了必要的优化,因而成为大规模网络 NT 测量的发展方向;Bayesian 方法虽然克服了 EM 和 MPLEA 方法的冗长的步骤,但对于待测量网络相关先验信息的缺乏及其测量的准确性使得该方法缺乏成熟的表现。

针对 Ad Hoc 网络的动态性特点,相比之下,Bayesian 推断方法因其快速推断而更适合于 Ad Hoc 网络的测量。若用 D 表示观测到的数据(如包的传输和丢失), θ 表示未知的模型参数(如网络中链路的丢失率)。由于 θ 的先验信息不是确定的值,而只能是一个分布,即 θ 是在参数空间中取值的随机变量。Bayesian 推断是基于 D 、 D 的分布 $P(D|\theta)$ 及关于 θ 的先验分布 $P(\theta)$,其目标就是确定 θ 的后验分布 $P(\theta|D)$ 。这个后验分布的所有特征都适合于 Bayesian 推断(如矩、分位数等),它们可表示为 θ 函数的后验期望。 D 和 θ 的联合分布为 $P(D, \theta) = P(D|\theta)P(\theta)$,可得 $P(\theta|D)$ 和 θ 的函数 $f(\theta)$ 的后验期望值分别是: $P(\theta|D) = \frac{P(\theta)P(D|\theta)}{\int_{\theta} P(\theta)P(D|\theta)d\theta}$ 及 $E(f(\theta)|D) = \frac{\int_{\theta} f(\theta)P(\theta)P(D|\theta)d\theta}{\int_{\theta} P(\theta)P(D|\theta)d\theta}$ 。其中, $P(D) = \int_{\theta} P(\theta)P(D|\theta)d\theta$ 是样本的边缘分布,积分区域是 θ 的取值范围。

对于动态变化的 Ad Hoc 网络性能测量,为了克服 Bayesian 推断的缺点,尚需要在模拟试验的基础上获得一些所需的先验信息并在推断的准确性上进行一些改进,从而获

得适合于 Ad Hoc 网络测量的快速、准确的推断方法。

3.3 Ad Hoc 网络的测量面临的关键问题

Ad Hoc 网络和 NT 技术都是当前研究的热点,其本身尚有许多技术问题有待于研究和发展^[20,21]。因此,基于 NT 的 Ad Hoc 网络性能测量技术面临着下面的关键问题。

(1)测量点的部署问题:不同于固定网络,动态性是 Ad Hoc 网络测量的“灵魂”,Ad Hoc 网络测量的所产生的一系列问题都是基于此而产生的,这种动态性的一个直观表现就是网络的拓扑变更所产生的“网络分割”现象。因此,如何恰当地部署测量点的位置和数量对于 Ad Hoc 网络的测量是至关重要的^[22]。另外,由于单点测量的能力及其采集的信息有限,加上网络的动态变化种种因素,因而必须采用分布式多点测量以获得更多的链路信息,综合出全局网络数据及多路径的交叉拓扑信息,利用有效的性能模型及相关的推断方法提高网络性能测量的准确性。

(2)网络的额外负荷问题:由于主动测量方法会对网络产生一些额外的负荷,尤其是源节点对多个目的节点发送探测包时势必加大网络的负担。为了尽可能地减少这种额外负荷对 Ad Hoc 网络测量带来的负面影响,应该采取策略:一方面,在使用 PP 探测模式进行端到端主动测量时,针对特定的网络模型部署合适的测量点,尽可能地减少网络的额外负荷;另一方面,考虑将主动测量方法和被动测量方法相结合的测量策略。

(3)数据分析及预处理问题:在有线网络中,常常假设在测量期间网络的链路容量、交叉通信以及路由都是不变的。但在 Ad Hoc 网络中,网络性能测量不是即刻就能够完成的,对数据采集阶段所得到的网络度量离散值需要进行分析 and 预处理,这就要求将所采集到的数据和网络的拓扑变化加以对应。此外,还要研究在网络测量期间探测通信所产生的各种动态变化^[23](如在此期间所产生的交叉通信现象),尤其是在数据采集期间,这些变化会影响到 Ad Hoc 网络推断的结果,而现有的各种测量方法还无法对此做出合理的处置。为此,就需要采取一种补偿机制的方法来修正这种变化对测量结果产生的影响。例如对于可用带宽的测量,因链路的可用带宽的测量依赖于链路容量的估计,变化的链路容量将会给可用带宽的估计带来误差。一条路径的容量 C 是由该路径上的 H 条链路中具有最小链路容量决定的,即 $C = \min_{i=1,2,\dots,H} (C_i)$ 。链路 i 的利用率(单位时间所传输的 bit 数除以链路容量) $u_i \in [0, 1]$ 。那么,源端到目的端的可用带宽 $A = \min_{i=1,2,\dots,H} (C_i * (1 - u_i))$ 。此时,如果源端以 A 速率发送探测包到目的端,由于 Ad Hoc 网络链路的动态特性会导致包的丢失发生。因此,为了对丢失率做出补偿,源端到目的端的实际可用带宽应该是 $A^* = \min_{i=1,2,\dots,H} (C_i * (1 - u_i)) * (1 - L_{path})$ 。当以相应于可用带宽 A 发送探测包时, L_{path} 用来描述因整个路径上发生交叉通信而产生的探测包丢失率。

总结和展望 尽管 Ad Hoc 网络具有诱人的应用前景,但它的诸多动态特性使得 Ad Hoc 网络性能测量成为制约其发展的瓶颈之一。基于网络内部单元协作的传统网络测量技术难以适应 Ad Hoc 网络的测量,而基于端到端的 NT 作为网络测量技术的先进思想,对动态网络的测量指引了方向。一个现实的例子就是国外的相关研究机构利用 NT 技术已经对传感器网络的测量进行了初步的研究^[24]。NT 技术为 Ad Hoc 网络测量问题的解决提供了新的理论框架和研究思路。

(下转第 91 页)

个“内部关联”：项目—>教师，论文—>项目；这分别是对文档内同层元素之间，和不同层元素之间参引联系的概念建模。进一步地，为了更准确地从 XUML 生成 XML schemas，可以在建立的 XUML 模型中指定各种 stereotypes(如《element》,《keyref》),以及 tagged values(如{ordered},{约束_1})。项目类上方的{4},指示在生成学院元素时,将项目元素放在 sequence 组的第 4 位。

从这个例子可以看出,所谓 XML 概念模式,实际上是企业概念模式的一种层次化视图,即从特定角度,对企业信息结构的一种看法。XML 概念模式通常是企业概念模式的一个局部视图。

当设计了 XUML 概念模型之后,逻辑设计就相对比较简单了。我们设计了一个 XUML2XSD 算法,该算法根据一组映射规则,自动将 XUML 模型转换成 XML 模式说明(XSD)。有了 XUML 图和 XUML2XSD 算法,用户可以不必精通 WXS 语言,就能设计高质量的 XML 模式。

结束语 本文提出了一种基于 UML2 的 XML 概念模型——XUML。通过隐藏关于实现的细节,强调语义相关的概念,XUML 能更清晰地描述 XML 的概念模式。它最重要的特征是能支持“一般的,非对称的聚集联系”,这一特征对 XML 概念建模十分重要;就我们目前所知,其它 XML 概念模型还没有说明这样的特征。XUML 能明确地表示包含语义和业务组件概念,能在多级上下文中说明数据依赖。

(上接第 73 页)

鉴于此,本文在对 Ad Hoc 网络的诸多动态特性分析的基础上,通过对传统网络测量技术和 NT 技术的比较,提出了基于 NT 技术的 Ad Hoc 网络性能测量架构,并指出其中所要解决的几个关键问题。由于 NT 技术和 Ad Hoc 网络本身正处于日益发展之中,因而基于 NT 技术的 Ad Hoc 网络测量需要进一步应用到具体网络环境中进行研究。

参考文献

- Karapantelakis T, Iacovidis G. Experimenting with Real Time Applications in an IEEE 802.11b Ad Hoc Network. In: The IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary (LCN'05), 2005, 1: 554~559
- Habib A, Fahmy S, Bhargava B. Monitoring and controlling QoS network domains. International Journal of Network Management, 2005, 15: 11~29
- Awerbuch B, Holmer D, Rubens H. The Pulse Protocol: Mobile Ad hoc Network Performance Evaluation. In: Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS'05), 2005, 206~215
- 赵金晶, 朱培栋. Ad Hoc 网络移动模型及其应用. 计算机工程与科学, 2005, 27(5): 15~17
- Nilsson A. Performance Analysis of Traffic Load and Node Density in Ad hoc Networks. In: Proc. European Wireless, 2004
- Li N, Hou J C. Topology control in heterogeneous wireless networks: problems and solutions. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2004, 1(1): 233~243
- Li N, et al. Design and analysis of a MST-based distributed topology control algorithm for wireless ad-hoc networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2005, 4(1): 1195~1206
- Rodoplu V, Meng T H. Growth of Ad Hoc Networks. Global Telecommunications Conference, 2003, 5(1): 2819~2823
- Agarwal A, Kumar P R. Capacity Bounds for Ad Hoc and Hybrid Wireless Networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(3): 71~81
- D.S. J. De Couto Daniel Aguayo Benjamin A. Chambers Robert Morris. Effects of Loss Rate on Ad Hoc Wireless Routing. [Technical Reports]. MIT-LCS-TR-836. MIT Laboratory for Computer Science, March 2002
- Feng Ling, Chang E, Dillon T. A Semantic Network-Based Design Methodology for XML Documents. ACM Transactions on Information Systems, October 2002, 20(4): 390~421
- Daum B. Asset Oriented Modeling (AOM). <http://www.aomodeling.org>. 2005
- Dobbie G, Wu X, Ling T W, Lee M L. ORA-SS: An Object-Relationship-Attribute Model for Semistructured Data. [Technical Report TR21/00]. National University of Singapore, 2000
- Lóscio B F, Salgado A C, Galvão L R. Conceptual Modeling of XML Schemas [C]. Proceedings of WIDM03, ACM Press, 2003. 102~105
- Embley D W, Liddle S W, Reema Al-Kamha. Enterprise Modeling with Conceptual XML. In: Proceedings of ER 2004, LNCS 3288, Springer-Verlag, 2004. 150~165
- Carlson D. Modeling XML Applications with UML. Addison-Wesley Professional, 2001
- Rumbaugh J, Jacobson I, Booch G. The Unified Modeling Language Reference Manual (2nd Edition). Addison-Wesley, Reading, MA, 2004
- OMG. UML Profile for Relationships Specification. <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/2004-02-07>
- 吕淑琴, 黄涛. 基于 SNMP 协议的网络性能分析. 电脑与信息技术, 2005, 1(1): 60~62
- Castro R, Coates M, Liang G, et al. Network Tomography: Recent Developments. Statistical Science, 2004, 19(3): 499~517
- Duffield N G, Presti F L. Network Tomography From Measured End-to-End Delay Covariance. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(6): 978~992
- Samar P, Wicker S B. On the Behavior of Communication Links of a Node in a Multi-Hop Mobile Environment. In: Proc. MobiHoc, 2004
- Kang Seong-ryong, Liu Xiliang, Dai Min, et al. Packet-Pair Bandwidth Estimation: Stochastic Analysis of a Single Congested Node. In: 12th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'04), 2004. 316~325
- Lawrence E, Michailidis G, Nair V N. Maximum Likelihood Estimation of Internal Network Link Delay Distributions Using Multicast Measurements. In: Proceedings of the 37th Conference on Information Sciences and Systems (refereed). 2003
- Tsang Y, Coates M, Nowak R. Passive Unicast Network Tomography using EM Algorithms. In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Salt Lake City, Utah, 2001, 3: 1469~1472
- Liang G, Yu B. Maximum Pseudo Likelihood Estimation in Network Tomography. IEEE Trans Signal Processing, 2003, 51(8): 2043~2053
- Padmanabhan V N, Qiu Lili, Wang H J. Passive network tomography using Bayesian inference. In: Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement, New York: ACM Press, 2002. 93~94
- Bettstetter C, Hartmann C. Connectivity of Wireless Multihop Networks in a Shadow Fading Environment. ACM/Springer Wireless Networks, 2005, 11(5): 571~579
- Simon G, Stéger J, Hága P, et al. Measuring the Dynamical State of the Internet: Large Scale Network Tomography via the ETOMIC Infrastructure. The European Conference on Complex Systems / ECCS, 2005
- Kwak B-J, et al. On the Scalability of Ad Hoc Networks: a traffic analysis at the center of a network. IEEE Communications Letters, 2004, 8: 503~505
- Aguayo D, Bicket J, Biswas S, et al. Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(4): 121~132
- Zhao J, Govindan R, Estrin D. Sensor Network Tomography: monitoring wireless sensor networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2002, 32(1): 64~64