ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.19, No.2, February 2008, pp.419−431
DOI: 10.3724/SP.J.1001.2008.00419
© 2008 by *Journal of Software*. All rights reserved.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

网络测量部署模型及其优化算法*

蔡志平+, 刘 芳, 赵文涛, 刘湘辉, 殷建平

(国防科学技术大学 计算机学院,湖南 长沙 410073)

Deploying Models and Optimization Algorithms of Network Measurement

CAI Zhi-Ping+, LIU Fang, ZHAO Wen-Tao, LIU Xiang-Hui, YIN Jian-Ping

(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-731-4575804, Fax: +86-731-4575802, E-mail: zpcai@nudt.edu.cn

Cai ZP, Liu F, Zhao WT, Liu XH, Yin JP. Deploying models and optimization algorithms of network measurement. *Journal of Software*, 2008,19(2):419−431. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/419.htm

Abstract: Network monitoring systems are deployed by Internet Service Providers (ISP) and enterprises to obtain network performance information and enhance the global network performance. A constant monitoring is also required to enforce and ensure both connectivity and security of the infrastructure. Designing and developing the infrastructure and optimization algorithms for network monitoring system have raised a great deal of interest recently. One of the key issues in this domain is to minimize the overhead in terms of deploying cost, maintenance cost and additional traffic. Due to different measurement approaches and polling infrastructure, there are many network measurement deploying models. Unfortunately, the optimization problems of these models are generally NP-hard. These optimization problems used to be solved by integer programming, designing approximation algorithms or mapping it to classic optimization problems. In this paper, the chief researches of network measurement deploying models and optimization algorithms in the world are introduced. Lastly, some open issues are presented to be further studied in the network measurement deploying models field.

Key words: network measurement; passive measurement; active measurement; integer programming; approximation algorithm

摘 要: ISP(Internet service providers)和企业部署网络监测系统以获取网络的性能数据,确保网络的安全性和连通性,最终加强和改善全局的网络性能.网络监测系统的设计和优化是目前的一个研究热点,其优化目标是最小化监测系统的部署代价和维护代价,并使得对网络的影响尽可能地小.根据测量方式和收集框架的不同,可以设计出不同的网络测量部署模型.这些模型的最优化问题通常是 NP 难的,一般采用整数规划、设计近似算法和映射到经典优化问题等方法来求取模型的优化解.总结了网络测量部署模型及其优化算法的研究现状,指出了该领域中需要进一步研究的热点问题.

关键词: 网络测量;被动测量;主动测量;整数规划;近似算法

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60603062, 60373023 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2007CB310901 (国家重点基础研究发展计划(973)); the Natural Science Foundation of Hu'nan Province of China under Grant No.06JJ3035 (湖南省自然科学基金)

Received 2006-11-21; Accepted 2007-02-15

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

为了支持不断出现的网络新应用,为用户提供更好的服务质量,Internet 服务提供商和大型企业不断建设和升级网络.网络的不断扩展使得网络的拓扑变得越来越复杂和不规则,而网络新应用的出现和网络用户的快速增长也使得网络流量越来越大.Internet 服务提供商和大型企业需要在网络内部部署一个全局的网络监测系统,实时地获取网络的性能数据,监测网络的性能和安全状况,进而加强全局网络性能.网络监测系统提供的持续不断的获取网络信息的能力对于网络管理和控制是极其重要的[1−4]:(1) 网络的流量分布和特性是设计和优化网络拓扑结构的基础;(2) 测量得到的网络性能指标是提供服务水平约定的依据;(3) 分析网络流量方式可以用来开发和维护特定的测量设备和工具;(4) 可以检测网络失效、链路瓶颈和网络异常,并且监测网络服务质量;(5) 持续不断的实时监测可以增强和确保整个网络系统的连通性和安全性,并且长期的网络监测数据可用于检测网络异常流量和非法入侵.例如,监测来自随机地址的大量突发短暂流量可以预警 DoS 攻击[5].

为了获取对全局网络的认知,国外的许多科研机构逐步建立了规模不等的测量和监测框架.例如,美国应用网络研究国家实验室(NLANR)开展的两个研究项目 AMP(active measurement project)和 PMA(passive measurement and analysis),分别在全球部署和建立了 150 多个监测器和 20 多个监测节点.AMP 采用主动测量方式测量网络回路延迟、丢包率、拓扑结构和吞吐量等性能参数,旨在测量和分析通过高速网络互联的网络节点间的性能.PMA 采用被动测量方式监测网络性能,旨在深入研究 Internet 的网络形态和健壮性,并为高性能网络提供协作服务支持.NIMI,CAIDA 和 Surveyor 等其他测量研究项目[6−8]也各自拥有分布全球的测量节点,为建立一个可扩展的 Internet 测量框架进行了很好的探索.

网络监测系统主要测量链路流量或端到端带宽、延迟、丢包率等性能参数,并据此分析网络的连通性、可靠性、稳定性和安全性.但是,测量 Internet 甚至只是测量 ISP(Internet service providers)主干网络的网络性能数据,都需要花费相当大的代价.在全局各个节点部署测量设备需要消耗相当多的人力、物力,而安装在商用网络设备上的测量设备和工具也会占用物理空间和系统资源.随着物理链路带宽的不断增大,在高速链路上采样变得越来越困难.OC-192 上的数据流量高达 10Gb/s,而数据分析更是需要处理上千兆的数据.因此,在设计全局网络监测系统时,需要尽量减少系统的部署代价和维护代价,并且对网络性能的影响要尽可能地小.

为了减少网络监测系统的部署代价和维护代价,就要求在达到监测目的的前提下,部署尽可能少的测量工具和设备.为了避免对网络带来较大的网络负荷和性能影响,则要求测量时发送尽可能少的测量包,或使测量包经过尽可能少的链路,减少测量引起的附加网络流量.网络数据的收集过程也会消耗网络带宽,影响网络性能,采用分布式的收集结构能够减少对网络的影响.因此,为了设计代价最小的网络监测系统,如何以尽可能少的测量代价获取尽可能多的网络性能信息就成为非常有意义的研究内容,这就需要最小化测量设备的数量,寻找最优的部署位置,并减少对网络性能的影响.

网络测量一般采用主动测量和被动测量两种测量方式.主动测量通过向目标链路或目标节点发送探测包来获取网络性能数据,被动测量通过接入网络的测量探针,记录和统计网络链路或节点上业务流量的信息.根据测量方式和收集框架的不同,可以设计出不同的网络测量部署模型.最近有不少学者对网络测量部署模型及其优化算法开展了大量的研究.本文第 1 节和第 2 节分别介绍被动测量和主动测量模式下的测量部署模型及其优化算法.第 3 节介绍分布式的多层收集结构.第 4 节总结解决测量部署模型优化问题的几种技术途径,并展望该领域中的研究趋势.

1 被动测量部署模型

被动测量方式通过接入网络的测量探针,记录和统计网络链路或节点上业务流量的信息.被动测量无须向网络发送探测包,对网络负载和网络性能的影响较小.根据测量工具部署位置的不同,通过被动测量获取流量信息有两种方式:(1) 在路由器等网络节点上安装 RMON[9]和 NetFlow[10]等测量工具,或安装 SNMP 代理[9];(2) 在链路上安装流量采样设备.无论采取何种方式,都需要付出一定的软、硬件代价,并消耗一定的系统资源.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

在每个节点或每条链路上安装测量设备不但会带来较大的安装和维护代价,而且定期的网管数据查询和传送也会影响路由器性能并产生可观的额外网络流量.因此,被动测量部署模型的研究重点在于如何部署尽可能少的监测器(monitor)去监测全网的性能,这样一方面减少了安装和维护代价,另一方面也可以减少网管数据收集时带来的额外网络流量.在某些情况下,没有必要监测所有的网络流量,可以合理选择监测的链路或节点,降低监测器的数量.

1.1 被动测量设备部署在网络链路

当被动测量设备部署在网络链路上时,考虑如何合理选择尽可能少的检测点来监测网络流量.

用无向图 $G=(V,E)$表示网络拓扑,点集 V 和边集 E 分别代表网络中的节点和链路.流量 t 为 V 中两个节点间路径 p_t 上通过的流量,用路径 p_t 的带宽表示流量 t 的权值 w_t.那么,一条链路的负载可定义为通过这条链路的所有流量的权的总和.如果用 $k\in(0,1]$表示选定安装测量设备的链路集合所能监测流量与网络总流量的比值,那么,被动监测问题(passive monitoring problem)可以定义为:

定义 1. 对于无向图 $G=(V,E)$,$D=\{(p_i,w_i)\}$是带权的流量集合.$W=\sum_i w_i$ 是网络总流量.被动监测问题就是求需要监测的边集 $E'\subseteq E$,使得 $\sum_{i|\exists e\in E',e\in p_i} w_i \ge kW$.即在所求得的链路集 E'安装测量设备后,所能监测的流量与网络总流量的比值不小于 k.

当 $k=1$ 时,表示需要监测所有的网络流量.文献[4]指出,当 $k=1$ 时,被动监测问题等价于集合覆盖问题,具有与集合覆盖问题一样的难解性,并可利用集合覆盖问题的优化算法来解决被动监测问题.定义网络中的所有流量为集合覆盖问题中的元素,每条链路上的测量设备所能监测到的流量即为 D 的子集.那么,集合覆盖问题中的最优解即为对应的被动监测问题中的最优解.

因为集合覆盖问题是 NP 完全的,因此,被动监测问题也是 NP 完全的.采用贪婪算法,可以得到近似比为$(\ln|D|-\ln\ln|D|+o(1))$的近似解.参考集合覆盖问题的难解性[11]可知,除非 $NP\subseteq DTIME[n^{poly\log n}]$,否则对于任何 $c<1/4$,被动监测问题的近似算法的近似比不可能超过 $c\log|D|$.进一步来说,除非 $NP\subseteq DTIME[n^{O(\log\log n)}]$,否则对于任何 $\varepsilon>0$,被动监测问题的近似算法的近似比不可能超过$(1-\varepsilon)\log|D|$.

文献[4]进一步指出,如果将被动监测问题映射到最小边代价流(minimum edge cost flow)问题,并采用混合整数规划的解决方法,可以取得更好的计算时间.

1.2 代价约束的被动监测问题

网络管理者希望能在测量代价尽可能小的情况下获得尽可能多的网络信息.测量代价包括两部分:安装和维护监测器带来的部署代价以及采样网络流和数据包带来的操作代价.部署代价与网络节点或网络链路所处的地理位置和配置便利性有关,操作代价则取决于网络链路的速度和采样频率.测量回报(monitoring reward)可以定义为从监测网络流中获得的好处,显然,应该减少对网络流的重复监测.

在测量代价或部署代价受限的情况下,需要取得测量代价与测量回报之间的折衷.文献[12]研究了测量代价约束的被动监测问题.在不考虑采样频率的情况下,不同的优化目标形成不同的测量部署模型,而这些模型的优化问题都是 NP 难的.预算约束的最大覆盖问题(budget constrained maximum coverage problem)计算在部署代价约束下的最大测量回报,这个问题可以映射到预算约束的最大覆盖问题(budgeted maximum coverage problem),利用文献[13]给出的贪婪策略,可以得到一个近似比为 1–1/e 的近似算法.最小部署代价问题(minimum deployment cost problem)计算获得指定测量回报所需的最小部署代价,是预算约束的最大覆盖问题的对偶问题.最小部署代价问题可以映射到局部集合覆盖问题(partial k-set cover problem),利用文献[14]给出的近似算法,可以得到 $1+\log m$ 的近似结果,其中,m 是网络流的数量.最小部署和操作代价问题(minimum deployment and operating cost problem)的优化目标是部署代价和操作代价的总和最小.这个问题可以映射到选址问题(facility location problem),利用文献[15]给出的算法可以求得近似比为 1+2/e 的近似结果.

如果每个监测器可以独立调整采样网络流的频率,则预算约束的最大覆盖采样问题(budget constrained maximum coverage problem with sampling)的优化目标是在部署和操作总代价的约束下获取最大的测量回报.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

文献[12]中分两步来解决这个问题:首先采用贪婪策略确定在哪些链路安装监测器,然后采用梯度投影(gradient projection)方法来确定每个监测器监测哪些流.

1.3 被动测量设备部署在网络节点

在网络节点部署测量工具可以监测和收集流量信息.例如,在 Cisco 的路由器上安装 NetFlow 可以收集指定节点对之间的流量数据和包信息.部署了 NetFlow 等测量工具的路由器会产生大量的数据报文,对网络和系统性能产生较大影响.因此,应该有策略地部署测量工具,取代在每个路由器上都部署测量工具的方式.

链路检测设备只能检测到本链路的流量情况,而部署在网络节点的测量设备可以检测到与网络节点相连的每条链路的情况,并可根据收集的网络信息来减少网络设备的数量.文献[16]注意到,每个路由器都满足流守恒规律(flow-conservation law).利用流守恒规律可以减少测量工具的安装数量,从而减少安装代价和收集流量,实现低负载的链路带宽监测.

流守恒规律是指路由器流入的流量近似地等于流出的流量.尽管以下原因会导致流守恒规律的失真,比如,交换设备是数据的源或汇而不仅仅是数据转发器,多播导致输出端口的数据复制,交换设备本身的数据包延迟或丢弃,但是文献[16]等研究表明,流守恒方程所具有的相对误差小于 0.05%.在监测每条链路的实际使用带宽时,如果一个路由器与 k 条链路相连,并且已知 $k-1$ 条链路的实际使用带宽,则根据流守恒规律可以推算出剩下那条链路的实际使用带宽.

用无向图 $G=(V,E)$表示网络拓扑,点集 V 和边集 E 分别代表网络中的节点和链路,$Deg(v)$表示节点 v 的度,则基于流守恒的网络链路使用带宽的有效测量问题可以抽象为无向图中的弱顶点覆盖问题[11,12].

定义 2. 假定无向图 $G=(V,E)$满足对任意 $v\in V$ 有 $Deg(v)\geq 2$,称 $S\subset V$ 是图 G 的弱顶点覆盖集,当且仅当执行以下操作能使 E 中所有边可以被标记:

(1) 标记所有与 S 中顶点相关联的边;

(2) 若某个顶点 v 的 $Deg(v)-1$ 条相关联的边已被标记,则标记剩下的那条相关联的边;

(3) 重复第(2)步直到不能再标记新的边为止.

包含顶点个数最少的弱顶点覆盖集称为最小弱顶点覆盖集.最小顶点覆盖集一定是弱顶点覆盖集,但不一定是最小弱顶点覆盖集,而最小弱顶点覆盖集包含的顶点个数也会小于最小顶点覆盖集包含顶点的个数.以图 1 为例,图 $G=(V,E)$中包含 7 个节点,11 条边.由图 1 可知,图 G 的最小顶点覆盖集为$\{v_1,v_2,v_3,v_4\}$,最小弱顶点覆盖集合为$\{v_1,v_2\}$,分别如图 1(a)和图 1(b)所示.在这个例子中,以最小顶点覆盖集作为部署节点,可以少部署 42.9%的测量设备;而以最小弱顶点覆盖集作为部署节点,可以减少部署测量设备的比例达到了 71.4%.

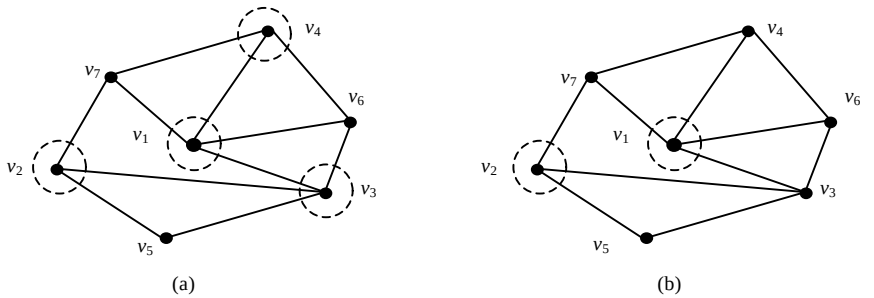


Fig.1 Vertex cover set vs. weak vertex cover set

图 1 顶点覆盖集和弱顶点覆盖集

文献[17,18]证明了无向图中的弱顶点覆盖问题是 NP 完全的,并且利用贪婪策略给出了一种近似比为 $2(1+\ln d)$的近似算法,算法的时间复杂性为 $o(|V|^2)$,其中,$d=\max_{v\in V}\{Deg(v)\}$.文献[19]和文献[20]分别给出了一种近似比为 $1+\ln d$ 和 2 的近似算法,其时间复杂性不超过 $o(|V|^2(|E|+|V|))$.采用原始对偶方法,我们同样给出了一种近似比不大于 2 的近似算法[21],其时间复杂性为 $o(|V||E|)$.为了研究弱顶点覆盖问题的难解性,我们给出了一种

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

从顶点覆盖问题到弱顶点覆盖问题的近似归约[21].顶点覆盖问题是一个经典的 NP 难问题,长期以来,大量的研究和努力都未能找出近似比小于 2 的近似算法[11],所以根据近似归约,要想找到弱顶点覆盖问题的一个近似比小于 2 的近似算法也是非常困难的.

除了利用节点的流守恒性质,挖掘其他网络信息可以进一步减少监测器的数目和网管数据收集时产生的网络流量.例如,在 IP 网络中利用 OSPF 协议的链路状态信息或 MPLS 中的标记交换路径信息,可以计算得到网络流中数据包的路由路径,从而获取节点连接链路之间的相互关系.据此对流入流出路由器的网络流进行划分,就可以对每个节点建立多个约束方程,从而减少监测器的数量[16].基于最大流划分的弱顶点覆盖问题也是 NP 难的,利用原始对偶方法能够得到近似比为 2 的近似算法[22].

2 主动测量部署模型

主动测量方式通过向目标链路或目标节点发送探测包来测量链路或端到端的延迟、带宽和丢包率等网络性能参数.主动测量也被用于测试网络的连通性和定位链路、节点失效.CAIDA[7,23]和 Surveyor[8]等许多基于主动测量的研究项目开展了针对 Internet 网络特性的研究和网络测量、分析、可视化工具的研发[23−25],同时也有不少针对网络测量部署模型的研究来帮助 ISP 监测网络性能,为用户提供更好的服务.

主动测量的代价主要包括部署代价和测量代价两部分.部署代价包括测量站的软件、硬件代价,一般相对比较固定.测量代价主要是指网络测量包的多少,测量包的数量和穿越的网络路径越多,对网络性能的影响越大,测量代价也就越大.

有大量的文章研究如何部署尽可能少的测量站(beacon)去获取全网的性能参数[16,26−33].文献[16]和文献[28]分别提出了基于一个测量站(或称为网络操作中心 network operation center)的测量解决方案.为了检测不在路由树上的链路,测量站利用 IP 源路由(IP source routing)选项来指定探测包的路由路径.但是基于安全考虑,路由器一般禁止 IP 源路由选项[29],所以,单点测量并非普遍适用的测量方案.另外,从收集代价来考虑,单点测量可能会引起测量站节点或相邻链路的过载.因此,更多的研究集中于部署多个测量站的分布式测量方案.

2.1 有约束的测量站部署

IDMaps 是美国国家科学基金会 NSF 资助的一个大型研究项目,其研究目的是提供一种大规模网络距离估计服务[34,35].项目需要确定测量工具 Tracers 部署的数量和位置,文献[31]研究了两个问题:第 1 个问题是给定测量站与目标节点的最大距离,求在满足最大距离约束下的覆盖全网所需测量站的数量;第 2 个问题是给定测量站的数量,确定测量站的分布,使测量站与目标节点之间的最大距离最小.有两类解决方案来解决这两个问题:第 1 类解决方案是基于 k 层良分隔树(k-hierarchically well-separated trees)的算法[36];第 2 类解决方案更加直接,因为第 2 个问题可映射到 k 中心问题(k-center problem)[11],而 k 中心问题存在近似比为 2 的近似算法,该算法略作改动还能应用于解决第 1 个问题.

文献[31]的研究假设了测量站的数量或测量站与目标节点的最大距离,而事先确定这些约束是非常困难的,所以,更多的研究集中在一般的测量站部署问题上.

2.2 一般的测量站部署

一般的测量站部署问题定义如下:

定义 3. 给定网络 $G=(V,E)$,假定在当前路由协议下每个节点 $u\in V$ 能测量到的链路集合 $T_u\subset E$,测量站部署问题就是确定数量最少的测量站集合 $S\subset V$,使得 $\cup_{u\in S}T_u=E$.

为了选择尽可能少的测量站,首先要确定每个测量站能测量到的链路集合(称为可测边集 monitorable edge set).可测边集越大,所需的测量站就越少.测量站采用 IP 源路由协议可测量到所有的链路,也即是它的可测边集可以等于整个链路集合.在这种情况下,部署一个测量站就能完成所有的测量任务,但就如上文所述,IP 源路由协议不是普遍适用的.

Bejerano 等研究者[29,37]认为,测量站的可测边集就是其路由树所包含的所有链路,也就是这个测量站发送

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的探测包可达的链路集合,称为简单测量(simple measure).测量站发送的探测包沿着缺省的 IP 路径到达链路的端点就能测量到该链路或端到端的网络信息.如图 2 中左图所示,测量站 A 的可测边集为$\{(A,B),(A,C)\}$.Horton 等其他研究者[32]则认为测量站在选择探测包路由路径上可以具备更大的灵活性,称为灵活测量(locally-flexible measure).测量站可以选择探测包发送出去后经过的第 1 条链路,也即探测包既可以沿着当前 IP 路由到达目的地,也可以经由测量站的任何一个相邻节点的路由树到达目的地.如图 2 中右图所示,从测量站 A 发送的探测包可以通过链路(A,C)直接到达测量目的地 C,也可以通过节点 B 的路由到达 C.这样,测量站 A 的可测边集为$\{(A,B),(A,C),(B,C)\}$.

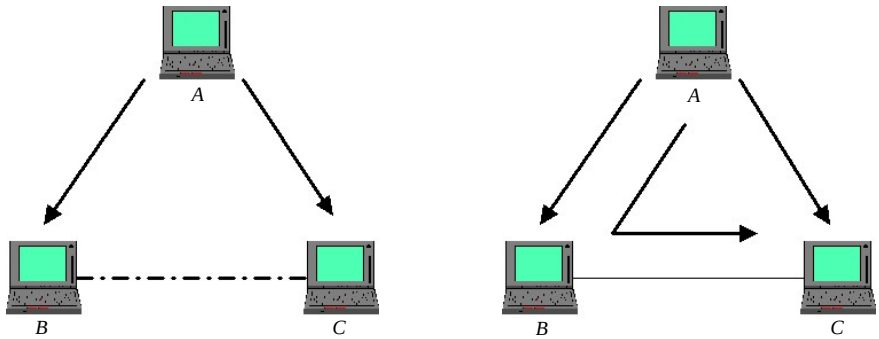


Fig.2 Simple measure vs. locally-flexible measure

图 2 简单测量和灵活测量

无论采用简单测量还是灵活测量,在已知测量站的可测边集的情况下,求取数量最少的测量站都是 NP 难的.这两个问题都可以映射到集合覆盖问题.利用集合覆盖问题的贪婪算法,可以得到近似比为 $1+\ln|E|$的近似结果.简单测量假定测量站的路由树中的所有链路都在可测边集中,对路由树的改变缺乏鲁棒性,所以只适用于静态路由.灵活测量并不考虑当前采用的路由协议,把可测边集定义成任何能监控到的链路.但文献[32]并没有提供计算可测边集的机制,并且可能导致所需测量站的数目相当大.

文献[37]研究的测量站部署问题基于多播路由,文献[29,33]的研究则基于最短路径树路由.为了消除路由协议差异对模型的影响,文献[30]定义了确定可测边集的概念.

定义 4. 如果在任何可能的路由配置下,一条链路都可以被测量站测量到,那么,条边称为这个测量站的确定可测边(deterministically monitorable edge),该测量站的所有确定可测边的集合称为它的确定可测边集.

实际上,在任何可能的路由协议下,测量站发送的探测包都能通过一条边到达这条边的一个端点,那么,条边就属于这个测量站的确定可测边集.在简单测量中,测量站 u 的确定可测边为从 u 出发到节点 v 的任何路径的公共边,也即从 u 到 v 必须经过的一条链路.在灵活测量中,测量站 u 的确定可测边为从 u 出发经过 u 的一条直接相邻边后到达节点 v 的必经链路.利用深度优先算法可以分别计算出简单测量和灵活测量中任何节点的确定可测边集,其时间复杂性分别为 $o(|V|(|E|+|V|))$和 $o(|V|^2(|E|+|V|))$[30].

确定了每个节点的确定可测边集后,测量站部署问题同样可以映射到集合覆盖问题,利用贪婪策略可以得到近似比为 $1+\ln|E|$的近似算法.

利用网络特性可以进一步地提高算法的性能和效率.文献[32]定义了节点 arity 的概念.

定义 5. 如果从节点 u 的 m 条相邻边出发,存在到达节点 v 的不通过节点 u 的路径,则称节点 u 对于节点 v 的 arity 为 m.节点 u 对于所有节点的最大 arity 称为节点 u 的 arity.

如果一个节点的 arity 大于等于 2,则称这个节点为高 arity 节点.因为获取未知的任意网络的拓扑结构并不容易,所以文献[32]建议可以选取每个高 arity 节点作为测量站,虽然通常情况下这并非最优的解决方案.文献[30]证明了最优的测量站集合是高 arity 节点集合的子集,因为大部分网络中超过一半的节点的 arity 为 1,所以将候选测量站限制在高 arity 节点中可以提高算法的效率.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2.3 测量分配

测量站的数量和位置确定下来以后,我们就需要优化测量分配(probe assignment)方案,也就是确定链路由哪一个测量站来负责测量.

定义 6. 给定网络 $G=(V,E)$中的测量站集合 $S\subset V$ 和待测链路集合 $P\subset E$.假定测量站 $s\in S$ 可测量到的所有链路为 T_s,称探测包集合 $A\subset\{m(s,u)|s\in S,u\in V\}$为测量分配,当且仅当对任何一条边 $e(u,v)\in P$ 都存在 $s\in S$,使得 $e\in T_s$ 且 $m(s,u)\in A,m(s,v)\in A$.

主动测量带来的附加网络流量对网络性能有影响,测量分配可能有多个优化目标,如探测包经过的链路数目最小,或探测包的数量最少.这些优化问题都是 NP 难的[16,29].在采用源路由协议的情况下,这些优化问题可以映射到选址问题(facility location problem),并且存在近似比为 $o(|P|)$的近似算法[10,16].

在采用最短路径树协议时,为了测量一条链路,需要向链路的两个端点发送两个探测包,其中一个探测包经过这条链路.对于每一条链路,选择使这两个探测包的代价之和最小的测量站,可以得到一种近似比为 2 的近似算法[29].这种算法经过改进可以用来检测链路的失效.

2.4 容错的测量站部署和测量分配

当链路失效或路由动态时,可能导致一些链路无法检测到,这就需要寻找容错的测量站部署和测量分配方案[38].如果一条链路 f 失效,定义路由改变后每个节点 $s\in V$ 的路由树为 $T_{s,f}$.

定义 7. 网络 $G=(V,E)$中的测量站集合 $S\subset V$ 称为容错的,当且仅当如果任何一条链路 $f\in E$ 失效,对于其他任何链路 $e\in E$ 都存在测量站 $s\in V$,使得 $e\in T_{s,f}$.

定义 8. 给定网络 $G=(V,E)$和测量站集合 $S\subset V$,在不超过 $k-1$ 条链路失效的情况下,测量站集合 S 仍然能够检测到网络中的任何链路,此时称测量站集合 S 为 k 容错的.

网络中的满足 k 容错的测量站集合的优化问题是 NP 难的,这个问题可以映射到局部多集合覆盖问题(partial multi-set cover),采用贪婪策略可以得到近似比为 $\ln|E|$的近似算法[29].以上的研究虽然考虑到 k 条链路失效的情况,但是假定同时只有 1 条链路失效,而在网络链路失效故障中,多条链路同时失效的情况占不小的比例[39].文献[40]研究了可以检测多条链路同时失效的测量站部署和测量分配问题.为了减少测量代价,分两步来确定尽可能少的网络探测包和测量站:首先采用极大代数方法在多项式时间内得到最优的测量分配,然后利用一个基于贪婪策略的近似比为 2 的近似算法来确定测量站的部署位置.

3 分布式收集框架

当测量设备检测到网络性能数据后,网络监控中心需要将所有性能数据收集起来,完成进一步的分析、处理和存储工作.在传统的集中式收集框架中,中心管理站(central manager)或者网络控制中心(network operations center)负责收集、统计和分析整个网络的状态信息,而分散在网络中的各个测量站或监控节点(monitoring node)完成本地网络信息的监测和管理.为了进一步降低收集过程对网络带宽和管理站性能的影响,大型网络中的监测系统可以设计成分布式的 3 层结构,如图 3 所示.在中心管理站与监控节点之间设置一些收集节点(aggregating node),每个收集节点负责查询和收集一部分监控节点的信息,并把这些信息发送到中心管理站[41].收集节点只负责收集邻近节点的信息,从而可望减少流量和带宽消耗;中心管理站只需处理收集节点发送过来的信息,也能减轻性能负担.当网络发生变化时,只需增加和变更部分收集节点就能保持对全网的监测能力,因此,3 层收集框架具有很好的可扩展性.

为了收集实时的网络性能数据,收集过程需要一个稳定而可靠的低延迟路由.在布置收集节点和中心管理站时要考虑链路或者端到端的性能约束.链路约束包括可用带宽、瓶颈带宽等带宽约束,而端到端性能约束包括延迟、路由跳数、丢包率和延迟抖动的约束.这些重要的网络性能指标也是设计 3 层结构的主要依据.

假定网络用图 $G=(V,E)$表示,用 $p(u,v)$来表示节点 u 和 v 之间的性能指标.为了更直观地理解模型,我们不妨把所有提供网络性能数据的监控节点称为数据源.用 x_{ij} 来表示网络中收集节点与数据源之间的指派关系,$x_{ij}=1$

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

表示节点 v_i 作为收集节点负责收集数据源节点 v_j 的网络信息,否则,x_{ij}=0.定义指示变量 y_i,如果节点 v_i 是收集节点,则 y_i=1;否则,y_i=0.性能约束的分布式网络监测模型的优化问题可以统一表述为:给定带权的网络 $G=(V,E)$,确定在 G 中的指派关系 X,满足以下条件:

- 所有的数据源都有所属的收集节点;
- 收集节点的总代价最小;
- 数据源到所属收集站之间的性能指标不能超过性能约束值$\delta(u,v)$.

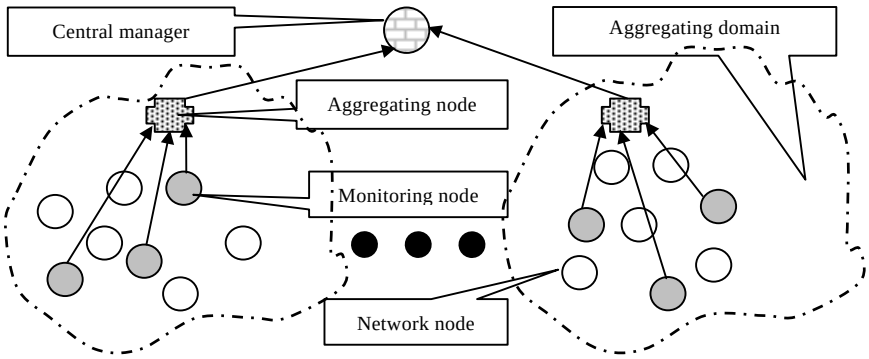


Fig.3 Distributed aggregating infrastructure

图 3 分布式收集框架

用整数规划表述以上优化问题,优化的目标是

$$\text{Minimize}\sum_{i=1}^{|V|}\omega_i y_i \tag{1}$$

满足如下限制条件:

$$\sum_{i=1}^{|V|}x_{ij}=1(\forall v_j\in V) \tag{2}$$

$$x_{ij}\le y_i(\forall v_i,v_j\in V) \tag{3}$$

$$p(v_i,v_j)x_{ij}\le\delta(v_i,v_j)(\forall v_i,v_j\in V) \tag{4}$$

$$x_{ij}\in\{0,1\}(\forall v_i,v_j\in V) \tag{5}$$

$$y_i\in\{0,1\}(\forall v_i\in V) \tag{6}$$

第 1 个约束条件保证了每个数据源有且仅有 1 个收集节点负责收集;第 2 个约束条件保证了数据源的数据由收集节点负责收集;第 3 个条件保证了数据源和所属收集节点之间满足性能约束.当考虑端到端性能约束时,$\delta(u,v)$可能是一个固定的常数;当考虑链路性能约束时,$\delta(u,v)$就会与 u 和 v 之间的路径相关,甚至还会受到该路径上的其他流的影响.

在分布式收集框架中,从数据源到收集节点和从收集节点到中心管理站的路径上都会产生不小的收集流量.为了避免形成网络瓶颈,影响正常的数据流量,收集流量不应超过路径上的链路带宽,并且占用链路带宽的比例不宜过大.因此,通过每条链路的收集流量受到链路带宽的约束.带宽约束的分布式收集框架的优化问题是 NP 难的,文献[42]提出了求解优化解的一些启发式策略.可以分 3 步来确定尽可能少的收集节点:1) 如果仍然有数据源没有选定收集节点来负责,则采用贪婪策略增加收集节点;2) 新增收集节点以后,在满足性能约束的条件下为其添加尽可能多的数据源;3) 对数据源和收集站之间的指派关系进行重新分配,以减少带宽占用率.循环执行以上步骤直到所有数据源的数据都能被收集.其中,选取收集节点的贪婪策略可以基于如下 3 种原则:收集负载最大、能够覆盖数据源最多和随机选取.文献[42]中的模拟仿真结果表明,选取当前能够覆盖数据源最多的节点作为收集节点是较优的一种方法.

为了收集实时的网络性能数据,收集过程需要一个稳定而可靠的低延迟路由.链路延迟或路由跳数的限制

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

决定了收集节点负责查询和收集的监控节点的数量是有限的.我们研究了延迟约束的分布式收集模型,模型的优化问题也是 NP 难的[41].延迟约束的分布式收集模型可以映射到集合覆盖问题,并利用贪婪算法得到近似比为 1+ln|*V*|的近似结果.我们还利用仿真模拟讨论了选取延迟约束值的一些经验结果.

4 总结与展望

4.1 总 结

建立一个全局的网络监测系统对 ISP 和企业来说是非常重要的.网络测量部署模型研究如何部署尽可能少的测量节点和收集节点,以获取尽可能多的网络性能数据.网络测量部署模型的主要优化目标包括:(1) 部署尽可能少的测量节点或者收集节点;(2) 获取尽可能多的网络性能数据;(3) 对网络的影响尽可能地小.另外也要考虑:(1) 测量或收集过程满足链路的性能约束;(2) 监测系统要求具备一定的健壮性和容错能力.

网络测量部署模型的优化问题通常属于 NP 难问题,不能在多项式时间精确求解.解决优化问题一般采用如下 3 种方法:

(1) 映射到经典优化问题,利用经典优化问题的难解性结论和近似算法.用带权的有向图或无向图将测量部署模型建模以后,测量部署模型的优化问题往往可以映射成经典的优化问题.例如,把测量设备在链路约束或代价约束下所能测量到的链路或网络流信息作为测量设备所能覆盖的元素子集,许多优化问题都可以映射成集合覆盖问题.从而可以知道这些优化问题都是 NP 难的,而利用贪婪算法可以得到 1+ln*n* 的近似解.经常利用的经典优化问题还包括顶点覆盖问题、*k* 中心问题、选址问题和网络流问题等.文献[12,16,21,31]的研究中都使用了这种解决方法.

(2) 采用整数规划描述和解决优化问题.用整数规划可以清晰地描述带有约束的优化问题,且网络测量部署模型的优化问题通常都是 0-1 整数规划问题,文献[4,12,42,43]都利用整数规划来描述问题.整数规划的求解方法包括割平面算法、分解算法、分支定界算法等精确算法,理论上可以找到问题的最优解.但由于整数规划问题本身就是 NP 完全的,要得到整数规划问题的最优解,这些算法常常需要以问题大小的指数函数为界的计算时间,从而使算法的实用价值大为降低.有些研究者挖掘优化问题本身的特性,适当地放宽规划问题的约束条件,可以求得较为理想的结果.例如,文献[4]采用混合规划求得的解要优于贪婪算法求得的近似解,但是其模拟实验中网络规模较小;当网络规模很大时,整数规划的求解器需要花费很长的计算时间.另外一种研究趋势是利用基于随机搜索的智能算法求取组合优化问题的全局最优近似解.这些智能算法包括人工神经网络、遗传算法、进化规划、模拟退火、禁忌搜索等.随机搜索算法从一系列的初始点开始作随机搜索,而且可以并行进行,因而有可能避开局部最优点;此外还具有无需目标函数的连续、梯度等信息的优点.

(3) 设计启发式算法求取近似解.在测量部署模型的研究中,有些模型不能映射到经典优化问题,或者现有的近似算法不够理想.研究者都竭力挖掘网络测量部署模型本身的特性,设计更高效和更优化的近似算法.文献[16,19−21,27,42]都提出了自己的启发式策略,得到了近似比更低的优化解.在启发式策略中,用得最多的是贪婪策略:用测量设备去测量尽可能多的链路和流量,并优先选择测量效率高的测量设备,直到达到测量目的为止.贪婪策略直观、有效,算法实现也较为简单,但在很多情况下并不能求得最优化的结果.网络测量部署模型的优化问题并非单纯的图论问题,挖掘网络流量和拓扑等特性,能够大幅度提高优化算法的效率和实用性.例如,文献[16]利用流守恒规律减少测量设备的数量;文献[32]利用网络重要节点连通度大的特点,优先在骨干节点上安装设备,提高算法效率.这些研究为网络测量部署模型的设计提供了很好的典范,挖掘网络特性提高模型效率和实用性也成为测量部署模型研究的趋势和方向.

目前,网络测量部署模型和优化算法的研究仍然存在以下几个方面的不足:(1) 多数为针对特定场景下的测量部署模型的研究,很少研究从网管的角度综合考虑能够达到多种测量目的的部署模型;(2) 当网络拓扑变化或升级时,很少考虑如何调整原有的监测系统,并继续保持系统的优化性;(3) 有些算法复杂度过高,实用性较差;(4) 算法的有效性大多通过模拟仿真来测试,在大规模网络拓扑和实际网络中的效率和实用性还有待验证.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.2 展 望

网络测量对于检测链路故障与网络瓶颈、服务质量保障、流量工程与资源管理等都有非常重要的意义.学术界和工业界加强了对网络测量的研究.除了 SIGCOMM[44],INFOCOM[45],SIGMETRICS[46]等国际顶尖学术会议每年发表网络测量方向的研究成果以外,2000 年以后,每年还召开两个高水平的国际网络测量专业会议:IMC(Internet Measurement Conference)[47]和 PAM(Passive and Active Measurement Conference)[48].

网络测量部署模型及其优化算法是网络测量研究的核心问题之一.目前的研究成果表明,针对不同的测量方式和收集框架,可以设计较为合理的测量部署模型和优化算法,有效降低部署和测量代价,减少测量对网络性能的影响.网络测量部署模型及其优化算法领域在以下几个方面还有待进一步研究.

4.2.1 测量部署模型的通用性和扩展性

现有网络测量部署模型的研究均针对特定的测量目的和测量要求.部署网络测量框架需要花费较大的代价,因此,如何利用现有的测量框架或者设计通用的测量框架来获取多种网络性能数据,以满足多种测量要求,是值得研究的一个问题.

例如,文献[49−51]研究了结合主动和被动的测量方式,较为有效地解决了主动测量影响网络性能和被动测量复杂的问题,而且在测量端到端延迟和丢包率方面均能取得比主动测量更为准确的结果.新的测量方式必然涉及到新的测量部署模型,因此可以考虑充分利用现有的研究成果,或者扩充现有的测量部署模型.例如,为了测量网络瓶颈,文献[52]提出了新的测量工具,如何在现有的模型框架下部署新的测量工具,是值得深入研究的.

4.2.2 网络演化

在网络升级或者网络拓扑发生变化时,可能新增一些网络节点和链路,而一部分原有的网络节点和链路可能被拆除,这时就需要调整监测系统的结构,重新布置监控节点和收集节点,以保证监测系统仍然可以覆盖到所有节点,收集到所有必需的网络信息.对于网络管理者而言,更新网络监测系统的费用和代价是非常值得关注的指标,他们希望用尽可能小的代价更新网络监测系统.文献[53]和我们均开展了这方面的研究[54],提出了一些启发式算法,取得了一定的研究成果.但是,如何合理地对网络演化的趋势进行建模和分析是研究的难点,也决定了部署模型的实用性和适用性.如何均衡网络演化后的多个优化目标,也是非常值得研究的问题.

4.2.3 采样策略

因为在高速链路(OC-48,OC-192,OC-255)中数据包流量非常大,因此有必要减少采样数据的数量.采样设备的采样能力与价格成正比,采样能力越好的测量设备越贵,因此,减少采样数据的数量,能够减少处理和存储采样数据所消耗的系统资源,也能减少采样设备的部署代价.

采样设备的采样能力与价格不同,每个采样设备采样每个包的代价也就不同.因此,可以把测量设备的部署代价和采样每个包的代价综合考虑,合理部署测量设备和设定采样频率.文献[12,55,56]均对采样策略进行了研究.但是,置信区间和方差会影响采样的准确率,如果能在部署代价、测量代价和测量准确率等多个优化目标之间获得权衡,则也是非常有意义的.

4.2.4 挖掘网络信息

挖掘网络信息能够大幅度提高测量部署模型和优化算法的效率和实用性.文献[16,32]的研究就是很好的例证.其优点主要体现在两个方面:1) 利用网络信息为测量部署模型加上更多的约束条件,优化求解结果,如文献[16]的研究;2) 利用网络信息和经验结果,缩小备选集合的范围,如文献[32]的研究.文献[12,16,32,57]的研究都表明了部署的测量节点和收集节点绝非越多越好,部署很少数量的测量节点已经能够达到很高的测量覆盖率.因此,挖掘网络信息成为提高测量部署模型和优化算法的效率和实用性的有效途径.但是,对网络信息的挖掘仍然取决于对特定网络场景和应用背景的深入分析.

4.2.5 动态可移动测量

大部分的测量部署模型研究都是针对已知的网络拓扑,计算得到最优或近似最优的网络测量框架.但是,这样的优化结果是静态计算得到的,测量节点和收集节点部署完成后就不会或很少再作变更.对于动态的大型网络中,最理想的解决方案是测量节点或者收集节点能够根据目标监测节点的变化,动态计算和移动到它们的最

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

佳部署位置.

测量节点或收集节点应该部署在最合理的位置,以减少网络的附加流量和响应时间.优化位置的计算问题是 NP 难的.现有的近似算法需要提前获知整个网络拓扑,并且无法保证能够在确定时间内求得优化解,因此,在大型网络或者移动环境下实用性不高.文献[58,59]利用移动 Agent 的技术来解决这个问题.移动 Agent 通过标准的网络管理接口获取路由信息,每个移动 Agent 负责测量或收集网络的一部分区域.当网络状态发生改变时,执行测量任务的移动 Agent 能够根据需要克隆出新的 Agent,并且移动到最优的部署位置.移动 Agent 技术成为解决移动或者动态网络环境下测量部署模型问题的一个有效技术手段.但是,移动 Agent 有可能只获取到本地的路由信息,而如何实现移动 Agent 与现有网络设备的无缝链接也是一个难点.更为重要的是,移动 Agent 可能带来安全性和可靠性方面的问题,因此,移动 Agent 能否实用和推广,仍有待深入研究.

References:

[1] Asgari A, Trimintzios P, Irons M, Pavlou G, Egan R, den Berghe SV. A scalable real-time monitoring system for supporting traffic engineering. In: Proc. of the IEEE Workshop on IP Operations and Management. IEEE Communication Society, 2002. 202−207.

[2] Zhang HL, Fang BX, Hu MZ, Jiang Y, Zhan CY, Zhang SF. A survey of Internet measurement and analysis. Journal of Software, 2003,14(1):110−116 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/110.htm

[3] Lin Y, Cheng SD, Wu HY, Jin YH, Wang WD. The achievement of end-to-end performance measurement technology in IP networks. Acta Electronica Sinica, 2003,31(8):1227−1233 (in Chinese with English abstract).

[4] Chaudet C, Fleury E, Guérin Lassous I, Rivano H, Voge ME. Optimal positioning of active and passive monitoring devices. In: Proc. of the CoNEXT 2005. New York: ACM Press, 2005. 71−82.

[5] Moore D, Shannon C, Brown D, Voelker GM, Savage S. Inferring Internet denial-of-service activity. ACM Trans. on Computer System, 2006,24(2):115−139.

[6] Paxson V, Mahdavi J, Adams A, Mathis M. An architecture for large-scale Internet measurement. IEEE Communications, 1998, 36(8):48−54.

[7] Claffy K, Monk TE, McRobb D. Internet tomography. Nature, 1999. http://www.nature.com/nature/webmatters/tomog/tomog.html

[8] Kalidindi S, Zekauskas MJ. Surveyor: An infrastructure for Internet performance measurements. In: Proc. of the INET'99. IEEE Communication Society, 1999.

[9] Stallings W. SNMP, SNMPv2, SNMPv3, and RMON 1 and 2. 3rd ed., Boston: Addison-Wesley Professional, 1998.

[10] Cisco System. NetFlow services and application. Cisco System White Paper, 1999.

[11] Hochbaum DS. Approximation Algorithm for NP-Hard Problems. Boston: PWS Publishing Company, 1997.

[12] Suh K, Guo Y, Kurose J, Towsley D. Locating network monitors: Complexity, heuristics and coverage. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2005. IEEE Communication Society, 2005. 351−361.

[13] Khuller S, Moss A, Naor J. The budgeted maximum coverage problem. Information Processing Letters, 1999,7(1):39−45.

[14] Slavik P. Improved performance of the greedy algorithm for the minimum set cover and minimum partial cover problems. Electronic Colloquium on Computational Complexity, 1995,2(53).

[15] Chudak F, Shmoys D. Improved approximation algorithms for the uncapacitated facility location problems. ACM SIAM Journal on Computing, 2003,33(1):1−25.

[16] Breitbart Y, Chan CY, Garofalakis M, Rastogi R, Silberschatz A. Efficiently monitoring bandwidth and latency in IP networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2001. IEEE Communication Society, 2001. 933−942.

[17] Liu XH, Yin JP, Tang LL, Zhao JM. Analysis of efficient monitoring method for the network flow. Journal of Software, 2003,14(2): 300−304 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/300.htm

[18] Liu XH, Yin JP, Lu XC, Zhao JM. A monitoring model for link bandwidth usage of network based on weak vertex cover. Journal of Software, 2004,15(4):545−549 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/545.htm

[19] Zhang Y, Zhu H. Approximation algorithm for weighted weak vertex cover. Journal of Computer Science and Technology, 2004, 19(6):782−786.

[20] Zhang Y, Zhu H. An approximation algorithm for weighted weak vertex cover problem in undirected graphs. In: Chwa KY, Munro JI, eds. Proc. of the COCOON 2004. LNCS 3106, Berlin: Springer-Verlag, 2004. 143−150.

[21] Cai ZP, Yin JP, Liu XH, Liu F, Lü SH. Efficiently monitoring link bandwidth in IP networks. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM 2005. IEEE Communication Society, 2005. 354−358.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[22] Liu XH, Yin JP, Cai ZP. The analysis of algorithm for efficient network flow monitoring. In: Proc. of the IEEE Workshop on IP Operations and Management. IEEE Communication Society, 2004. 29−33.

[23] Cooperative association for Internet data analysis (CAIDA). http://www.caida.org/

[24] Active measurement project (AMP). http://amp.nlanr.net/

[25] IP Performance Metrics Working Group. http://www.ietf.org/html.charters/ ippm-charter.html

[26] Cohen R, Raz D. The Internet dark matter—On the missing links in the AS connectivity map. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2006. IEEE Communication Society, 2006.

[27] Oliveira R, Lad M, Zhang B, Pei D, Massey D, Zhang L. Placing BGP monitors in the Internet. Technical Report, TR 060017, CS Department, UCLA, 2006.

[28] Walz J, Levine B. A hierarchical multicast monitoring scheme. In: Proc. of the NGC on Networked Group Communication. ACM Press, 2000. 105−116.

[29] Bejerano Y, Rastogi R. Robust monitoring of link delays and faults in IP networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2003. IEEE Communication Society, 2003. 134−144.

[30] Kumar R, Kaur J. Efficient beacon placement for network tomography. In: Proc. of the ACM SIGCOMM IMC. ACM Press, 2004. 181−186.

[31] Jamin S, Jin C, Jin Y, Raz D, Shavitt Y, Zhang L. On the placement of Internet instrumentation. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2000. IEEE Communication Society, 2000. 295−304.

[32] Horton J, Lopez-Ortiz A. On the number of distributed measurement points for network tomography. In: Proc. of the ACM SIGCOMM IMC. ACM Press, 2003. 204−209.

[33] Breitbart Y, Dragan F, Gobjuka H. Effective network monitoring. In: Proc. of the IEEE ICCCN 2004. IEEE Communication Society, 2004. 394−399.

[34] Francis P, Jamin S, Paxson V, Zhang L, Raz D, Jin Y. An architecture for a global Internet host distance estimation service. In: Proc. of the IEEE INFOCOM'99. IEEE Communication Society, 1999. 210−217.

[35] Francis P, Jamin S, Jin C, Jin Y, Paxson V, Raz D, Shavitt Y, Zhang L. IDMaps: A global Internet host distance estimation service. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2001,9(5):525−540.

[36] Bartal Y. Probabilistic approximation of metric space and its algorithmic applications. In: Proc. of the 37th Annual IEEE Symp. on Foundations of Computer Science. IEEE Communication Society, 1996. 184−193.

[37] Adler M, Bu T, Sitaraman B, Towsley D. Tree layout for Internet network characterizations in multicast networks. In: Proc. of the NGC 2001. Springer-Verlag, 2001. 189−204.

[38] Reddy A, Govindan R, Estrin D. Fault isolation in multicast trees. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2000. ACM Press, 2000. 29−40.

[39] Markopoulou A, Iannaccone G, Bhattacharyya S, Chuah C, Diot C. Characterization of failures in an IP backbone. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2004. IEEE Communication Society, 2004. 7−11.

[40] Nguyen H, Thiran P. Active measurement for multiple link failures diagnosis in IP networks. In: Proc. of the Passive and Active Measurement Workshop (PAM 2004). Springer-Verlag, 2004. 185−194.

[41] Lin YJ, Chan MC. A scalable monitoring approach based on aggregation and refinement. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002,20(4):677−690.

[42] Li L, Thottan M, Yao B, Paul S. Distributed network monitoring with bounded link utilization in IP networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2003. IEEE Communication Society, 2003. 1189−1198.

[43] Cai ZP, Yin JP, Liu XH, Liu F, Lü SH. Distributed network monitoring model with link constraints. Journal of Computer Research and Development, 2006,43(4):601−606 (in Chinese with English abstract).

[44] SIGCOMM. http://www.sigcomm.org/

[45] INFOCOM. http://www.ieee-infocom.org/

[46] SIGMETRICS (Int'l Conf. on measurement and modeling of computer systems). http://www.sigmetrics.org/

[47] IMC (Internet measurement Conf.). http://www.imconf.net/

[48] PAM (passive and active measurement Conf.). http://www.pamconf.org/

[49] Aida M, Miyoshi N, Ishibashi K. A scalable and lightweight QoS monitoring technique combining passive and active approaches. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2003. IEEE Communication Society, 2003. 125−133.

[50] Ishibashi K, Kanazawa T, Aida M. Active/Passive combination-type performance measurement method using change-of-measure framework. Computer Communications, 2004,E87-B(1):132−141.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[51] Cai ZP, Yin JP, Liu XH, Lü SH, Liu F. Passive calibration of active measuring latency method. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11):9−12 (in Chinese with English abstract).

[52] Hu NN, Li L, Mao ZMM, Steenkiste P, Wang J. A measurement study of Internet bottlenecks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2005. IEEE Communication Society, 2005. 1689−1700.

[53] Thottan M, Li L, Yao B, Mirrokni VS, Paul S. Distributed network monitoring for evolving IP networks. In: Proc. of the 24th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems. IEEE Communication Society, 2004. 712−719.

[54] Cai ZP, Yin JP, Liu F., Liu XH. Distributed monitoring model with bounded delay. Journal of Software, 2006,17(1):117−123 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/117.htm

[55] Duffield N, Lund C, Thorup M. Learn more, sample less: Control of volume and variance in network measurement. IEEE Trans. on Information Theory, 2005,51(5):1756−1775.

[56] Choi B, Park J, Zhang ZL. Adaptive random sampling for traffic load measurement. In: Proc. of the IEEE ICC 2003. IEEE Communication Society, 2003. 1552−1556.

[57] Bar-Ford P, Bestavros A, Byers J, Crovella M. On the marginal utility of network topology measurements. In: Proc. of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop. ACM Press, 2001. 291−302.

[58] Liotta A, Pavlou G, Knight G. Active distributed monitoring for dynamic large-scale networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2001). IEEE Communication Society, 2001. 1544−1550.

[59] Liotta A, Pavlou G, Knight G. Exploiting agent mobility for large scale network monitoring. IEEE Network, 2002,16(3):7−15.

附中文参考文献:

[2] 张宏莉,方滨兴,胡铭曾,姜誉,张树峰.Internet 测量与分析综述.软件学报,2003,14(1):110−116. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/110.htm

[3] 林宇,程时端,邬海涛,金跃辉.王文东.IP 网端到端性能测量技术研究的进展.电子学报,2003,31(8):1227−1233.

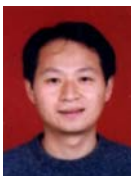
[17] 刘湘辉,殷建平,唐乐乐,赵建民.网络流量的有效测量方法分析.软件学报,2003,14(2):300−304. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/300.htm

[18] 刘湘辉,殷建平,卢锡城,赵建民.基于弱顶点覆盖的网络链路使用带宽监测模型.软件学报,2004,15(4):545−549. http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/545.htm

[43] 蔡志平,殷建平,刘湘辉,刘芳,吕绍和.链路约束的分布式网络监测模型.计算机研究与发展,2006,43(4):601−606.

[51] 蔡志平,殷建平,刘湘辉,吕绍和,刘芳.网络延迟主动测量数据的被动测量校准方法.电子学报,2005,33(11):9−12.

[54] 蔡志平,殷建平,刘芳,刘湘辉.延迟约束的分布式演化网络监测模型.软件学报,2006,17(1):117−123. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/117.htm



蔡志平(1975－),男,湖南益阳人,博士,讲师,主要研究领域为计算机网络测量,优化算法,信息安全.

刘湘辉(1973－),男,博士,主要研究领域为无线网络,网络安全.

刘芳(1976－),女,博士,讲师,主要研究领域为信息安全.

殷建平(1963－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为算法设计与分析,人工智能,模式识别,信息安全.

赵文涛(1973－),男,副教授,主要研究领域为网络安全.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn