

中国 Internet 路由级跳数测量与分析^{*}

马建国¹, 席明贤¹, 林益民¹, 李幼平²

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院 信息与电子工程学部, 北京 100084)

摘 要: 采用分布式主动测量技术在七个测量源点对抽样的 6 476 活动主机同时展开测量。测量共返回 32 893 条有效测量数据, 数据分析之后得出中国 Internet 路由级跳数分布图; 计算出未加权平均跳数是 14. 938 89 和加权平均跳数值为 15. 613 73。

关键词: 跳数测量; 网络测量; 因特网特征

中图分类号: TP393. 03 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2008) 07-2112-03

Chinese Internet router-level hop count measurement and analysis

MA Jian-guo¹, XI Ming-xian¹, LIN Yi-min¹, LI You-ping²

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang Sichuan 621010, China; 2. Dept. of Information & Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physical, Beijing 100080, China)

Abstract: Measured sampled 6 754 active hosts at 7 measure sources with technology of distributed active measurement at the same time. The measurement returned 32 893 effective datas totally. After analyzing these datas, gave the Chinese Internet router-level hop count distribution and calculated the un-weighted average hop count was 14.938 89 and the weighted average hop count was 15.613 73.

Key words: hop count measurement; network measurement; Internet properties

随着 Internet 规模的持续扩大和结构的日益复杂, Internet 已成为一种高度异构的、开放的复杂系统, 给 Internet 的管理和分析带来了一系列的困难。网络测量^[1]作为了解和认知互联网的基本手段, 多年来一直是网络研究的重点领域之一。通过网络测量可以获得 Internet 各种重要的性能参数, 这些测量参数正是人们理解和分析 Internet 内在本质的基础。Load Kelvin^[2]曾经在一次演讲中说: “当我们可以测量并且用数字表达我们谈论的东西的时候, 我们才算得上对此有所了解; 如果我们不能测量或者是不能用数字表达所谈论的东西, 那么我们对它的了解就是贫乏不足的。”

跳数^[3]是数据包从源端到达目的端所必须通过的路由器个数, 跳数测量是网络测量的一部分, 是理解网络行为简单有效的途径。目前, 国外已有多个组织和大学对 Internet 跳数展开了研究工作, 并取得一定的成果。但是我国还没有研究机构专门针对跳数展开测量与研究。鉴于这种情况, 网络测量研究小组在李幼平院士、马建国教授的指导下进行了此次跳数测量与研究工作。目的是了解中国 Internet 路由级的跳数分布情况, 同时为互补结构网络与 Internet 的性能对比研究提供数据资料。

1 网络测量、跳数测量的分类

网络测量^[1]就是遵照一定的方法和技术, 利用软件和硬件工具来测量或验证表征网络性能指标的一系列活动的总和。网络测量主要分为拓扑测量和性能测量两大类; 网络测量的方

法主要分为主动测量和被动测量两种。

跳数测量属于网络拓扑测量的范畴, 是研究和分析网络可达性与网络距离的主要途径之一。跳数测量的分类主要根据测量的层次来划分, 分为数据链路层、路由级层、自治域层、网页层。跳数测量的方法分为两类: 基于 SNMP 的方法和基于 ICMP 的方法。前者主要通过访问 MIB 库进行拓扑关系的获取, 由于权限的关系, 适合于在具有管辖权的网络范围内进行跳数测量, CAIDA 的 skitter 就是采用此方式进行测量的; 后者主要通过 traceroute 原理实现, 可用于 Internet 上的大规模网络测量。

2 相关研究

目前, 国际上成立了许多与跳数测量有关的科研机构, 对 Internet 跳数展开研究和测量的组织有: CAIDA(cooperative association for Internet data analysis)、NIMI(national Internet measurement infrastructure) 等。CAIDA 利用布置在全球的多个 skitter 进行主动测量, 得出互联网平均跳数为 13. 11 跳^[4,5]。Bradley Huffaker 等人在文献[6] 中给出他们的跳数测量结果如表 1 所示; 在文献[7 ~15] 中介绍了近几年国内外网络测量相关的研究项目及拓扑测量的研究方法。

表 1 Bradley Huffaker 的测量结果

IPv4 list	LIP = 15.3 ±4. 2, LAS = 4. 1 ±1. 3
DNS list	LIP = 14.5 ±4. 2, LAS = 4. 4 ±1. 3

近年来, 随着 Internet 的快速发展, 我国 Internet 用户数量

收稿日期: 2007- 04- 28; 修回日期: 2007- 10- 18 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60272014); 国家“863”计划资助项目(2005AA121520)

作者简介: 马建国(1957-), 教授, 博导, IEEE 会员, 主要研究方向为信息共享技术、网络测量技术、复杂网络理论; 席明贤(1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为网络测量与分析、复杂网络理论研究、高性能计算技术(aaron_tju@ yahoo. com. cn); 林益民(1980-), 男, 讲师, 主要研究方向为网络测量、复杂网络理论; 李幼平(1935-), 工程院院士, 教授, 博导, 主要研究方向为信息共享技术、网络融合技术、复杂网络理论等。

已位居世界第二,但是我国针对 Internet 展开测量和研究的科研机构相对较少,明显与我国 Internet 的蓬勃发展速度不相符。国内的中国科学院计算所、国防科学技术大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等单位在基于 ICMP 的 IP 拓扑探测力面的技术比较成熟。但是除了哈尔滨工业大学计算机科学与技术工程系实现了一个大规模网络拓扑测量之外,目前还未见有其他方面 Internet 的大规模网络测量与分析的相关报道。中国科学院计算所的张国庆与英国 University College London 的周石分别在 2003 年和 2005 年对中国 Internet 的 AS 级的网络拓扑结构展开测量^[16,17];哈尔滨工业大学的姜誉博士在其博士论文^[18]中对 Internet 拓扑测量给出了一个较为全面的综述,还讨论了 Internet 路由级测量中的几个要解决的问题和 IXP 对 AS 级拓扑生成的影响。目前只有世界网络 Linkwan^[19]在北京、上海设立了两个测量服务器。到目前为止,国内还未见有科研机构对中国 Internet 路由级跳数进行大规模网络测量与分析的文献及相关报道。

3 关键问题

3.1 测量工具

目前对网络跳数展开测量有多种方法,主要有基于 ICMP 的 traceroute 程序和基于分析 BGP 路由信息的方法。本研究小组在测量中采用了基于 ICMP 开发的 traceroute 程序。具体来说,跳数测量工具是通过类似 tracert 的程序,每隔一定时间进行一次。该程序主动向目标主机发送 ICMP 探测包,然后等待 ICMP 的响应包,由此来记录经过的每个路由节点的信息,从而实现跳数测量功能。Traceroute 程序的探测距离(30 跳)作为最大探测跳数,最大的 RTT 为 1 000 ms,同时当连续 3 跳出现等待超时就终止本条路径的探测,既不影响探测效率,也不影响路径的准确性。测量软件中核心代码如下:

```
ttl = 1 ( to the first router)
while( don 't get UDP port unreachable)
    send packet with ttl
    get response
    if( time exceeded)
        get the hops
    else //UDP port unreachable
        break
    ttl ++
end while
```

3.2 测量源点的选择

为了叙述方便,给出如下定义:

(k, m) - tr 跳数测量^[18]。将从 k 个小同的源点分别向 m 个不同的目标采用无源路由的 traceroute 机制进行转发路径测量跳数的方法统称为 $((k, m)$ - tr 跳数测量。

在进行 (k, m) - tr 测量时,选择测量源点是一个很关键的问题。因为我国 Internet IP 地址范围巨大,直接针对整个 Internet 路由级主机进行跳数测量将耗费大量的人力物力及浪费网络资源,并且存在许多不可预测的问题。因此在此次测量中只设置了 7 个测量源点进行跳数测量。而且巴黎大学的 J. L. Guillaume 和 M. Latapy 教授的研究结果^[20]表明,合理地选择小规模测试源点集和目的源点集也能得到很好的测量结果;L. D. Asta^[21]等人还通过大量的数学论证了这一观点。

3.3 测量目标地址集的选择

跳数测量目标的选取对 Internet 跳数测量的结果有着重要的影响,如果测量目标选择不恰当,可直接导致测量的不完全性。例如,研究小组最开始从我国各 IP 段随机抽取测量目标

IP 地址进行测量实验,但是在小规模实验之后发现,抽样出来的大部分测量目标主机是处于非活动状态的,主要原因是该主机不存在或该主机屏蔽测量。因此考虑从全国的网吧地址中抽样测量目标地址集。网吧的主机基本上处于活动状态,而且基本上不屏蔽基于 ICMP 的测量工具。笔者选用的 2006 年 5 月 29 日发布的纯真 QQWry IP 地址数据库^[22],该数据库包含 10 万条左右 IP 地址信息,由全国各地网民维护,实时更新。抽样的原则^[18]是使测量过程具有覆盖完全、低负载、高效和弱感知性。研究小组根据此原则编写了一套 IP 地址筛选程序,从 QQWry 数据库的 10 万余条记录中筛选出活动主机 6 476 个,抽样后得到的测量目标集的完备性的证明在文献[18] 中有详细的论述。

4 实验及结果分析

笔者于 2006 年 6 月开始对中国的 Internet 路由级跳数情况展开测量。这次测量选择了七个城市作为测量源点,分别是绵阳、兰州、青岛、杭州、深圳、沈阳、北京。为了提高测量效率和节约测量时间,在每个测量源点的主机上将 6 476 个目标主机分为 12 个进程同时测量,此次测量共返回 32 893 个有效记录。在对测量记录进行整理之后,得出中国 Internet 路由级平均跳数为 14.939 的结果,并且给出了中国的 Internet 路由级跳数样本分布图,如图 1 所示。从图中可以看出我国 Internet 路由级跳数主要分布在 14 ~17 跳之间,有 17 510 个样本记录,占样本的 53.233 2%。

为了进一步研究中国的 Internet 路由级跳数概率分布图情况,在第一次测量的基础上分时段多次对测量目标集的地址进行测量,得出中国 Internet 路由级跳数概率分布图,如图 2 所示。

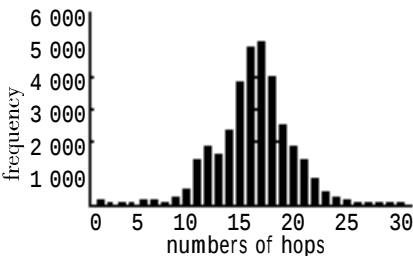


图 1 中国 Internet 路由级跳数样本分布图

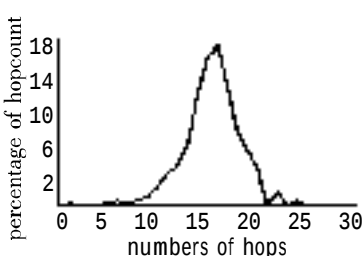


图 2 中国 Internet 路由级跳数概率分布图

5 修正结果

在测量过程中采用的是用一个测试源点代表一个大区域进行测试。由于不同地区的主机数量不同,其对测量结果的贡献也不同,有必要对测量数据进行加权处理才能更有效地反映真实的 Internet 跳数分布情况和平均跳数。根据 CNNIC(中国 Internet 络信息中心) 2006 年 1 月发布的“第 17 次中国互联网络发展状况统计报告”^[23]的中国 IP 地址,按地域分布的情况如表 2 所示。

表 2 按地域划分的 IPv4 地址

省份	比例 / %	省份	比例 / %	省份	比例 / %
广东	10.4	北京	10.1	江苏	8.1
浙江	7.8	上海	6.5	山东	5.8
四川	4.3	河南	4.2	辽宁	4.0
湖北	3.1	河北	3.0	福建	2.8
重庆	2.8	黑龙江	2.8	湖南	2.6
安徽	2.5	江西	2.4	天津	2.3
吉林	2.2	陕西	1.7	云南	1.7
广西	1.5	山西	1.5	海南	1.5
贵州	1.1	新疆	1.0	甘肃	0.7
内蒙古	0.7	宁夏	0.4	青海	0.3
西藏	0.2				

按地域分布对测量记录进行归类整理,分为绵阳、兰州、青岛、杭州、深圳、沈阳、北京七个测量源点区域,每个区域代表的 IP 地址都有一些共性。每个测量源点区域所代表的地区和 IP 地址比率如图 3 所示。

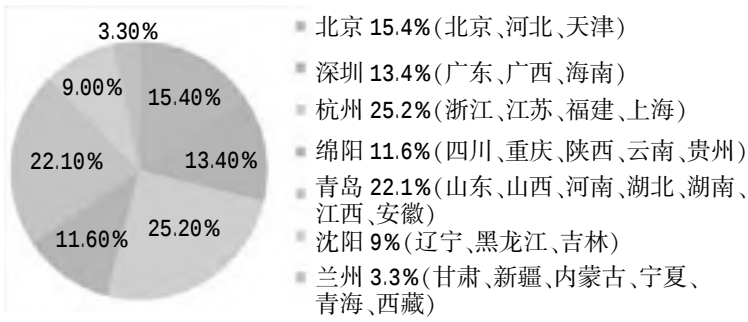


图 3 测量源点所代表的地区和 IP 地址比率

假设要测某个区域的跳数情况,区域在某个时刻 T 的所有活动主机的数量是 N 。将区域 A 内所有活动主机的数量 N 看做集合 X 和集合 Y ,集合 X 作为源点集,集合 Y 作为目标点集。从集合 X 中的所有节点出发,到集合 Y 中的所有节点的测量组合集就是所考察的区域 A 的跳数样本。权值计算过程(图 4)如下: $S_1 + S_2 + S_3 = N$; 从集合 X 中的 $S_1、S_2、S_3$ 子集中选择一个测量源点 A 到集合 Y 中的 $S_1、S_2、S_3$ 三个子集中的活动主机集 $N_1、N_2、N_3$ 作为一次测量。从集合 X 中的测量源点 A 出发到集合 Y 的 $(N_1 + N_2 + N_3)$ 集中的任一个主机的测量权值为 $P = (P_i \times P_j \times S_i) / N_j$ 。其中: P_i 代表该区域 IP 地址所占的比率; P_j 代表测量目标区域 IP 地址所占的比率; S_i 代表测量源点的主机个数; N_j 代表测量目标的活动主机数。因此每个测量源点对应目标地址集中每个省市的测量权值就可以计算出来。例如绵阳测量点的个数为 1,在有效记录中辽宁的主机数量为 217,于是就有 217 个测量对;每个测量对的测量权值为 $P = (0.116 \times 0.04 \times 1) / 217 = 0.000\ 021\ 8$ 。其中: 0.116 是绵阳代表的地区占大陆地区主机数量的比例; 0.04 是辽宁省占大陆地区主机数量的比例,依次可以得到对以绵阳为测量源点到全国其他各省市的权值。因此就可以算出绵阳区域出发测量的跳数 $\bar{H}_1 = \sum_{k=1}^n P_k (H_1 + H_2 + \dots + H_n)$ 。其中: P_k 为测量源点到全国其他各省市的权; $H_1、H_2、H_n$ 为测量源点到目标地址集的跳数。其他六个测量源的跳数也可按照计算得到。算出的加权平均跳数 $\bar{H} = \sum_{k=1}^6 P_k (\bar{H}_1 + \bar{H}_2 + \dots + \bar{H}_7) = 15.613\ 73$; 加权方差为 $S^2 = \sum_{i=1}^n P_i (H_i - \bar{H})^2 = 9.638\ 959$; 加权标准差为 $S = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_i (H_i - \bar{H})^2} = 3.104\ 667$ 。

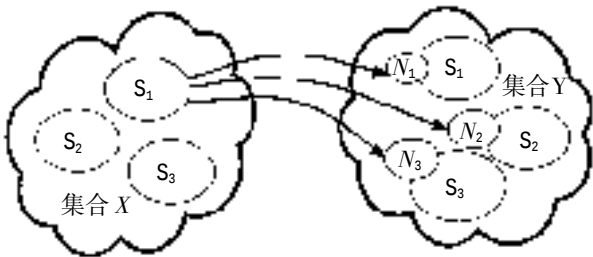


图 4 权值计算

6 结束语

跳数测量是网络拓扑研究的一个重要组成部分,通过此次测量对我国 Internet 的内在特性有了进一步的认知。随着网络测量的相关理论和测量技术的发展,人们对网络的认知会越来越深入,从而不断地推动网络技术向前发展。

网络测量中还有许多关键技术值得研究。例如,网络性能指标量化与模型化分析的问题;对网络未来状况进行趋势预

测;对海量测量数据进行数据挖掘和分析;测量过程的可视化以及由测量所引起的堵塞问题等都是需要进一步研究的内容。

参考文献:

[1] 谈杰,李星.网络测量综述[J]. 计算机应用研究,2006,23(2): 5- 7.

[2] THOMPSON W, KELVIN L. Popular lectures and addresses[M] // Bartlett ' s Familiar Quotations. 14 th ed. Boston: Little Brown&lo, 1968: 723.

[3] RFC 文档[EB/OL]. (1993- 01) [2006- 06- 12]. <http://oss.org.cn/man/develop/rfc/RFC1393.txt>.

[4] CAIDA. Skitter [EB/OL]. (1999-10-08) [2007- 04- 19]. <http://www.caida.org/tools/measurement/skitter/RSSAC/>.

[5] BEGTASEVOC F, VAN M P. Measurements of the hop count in Internet[C] //Proc of Passive and Active Measurement. 2001.

[6] HUFFAKER B, FOMENKOV M, PLUMMER D J, et al. Distance metrics in the Internet[C] //Proc of IEEE International Telecommunication Symposium. 2002.

[7] PAXSON V. End-to-end routing behavior in the Internet[J]. IEEE / ACM Trans on Networking, 1997, 5(5): 601-615.

[8] MAHADEVAN P, KROVKOV D, FOMENKOV M. The Internet AS level topology: three data sources and one definitive metric[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(1): 16-26.

[9] NLNR[EB/OL]. [2006-06-16]. <http://moat.nlanr.net/>.

[10] RIPE Network Coordination Center. Routing information service[EB/OL]. (2005) [2006-06-16]. <http://www.ripe.net/>.

[11] University of Oregon. Route views project[EB/OL]. [2006-06-16]. <http://www.routeviews.org/>.

[12] University of Michigan. Topology project[EB/OL]. [2006-06-16]. <http://topology.eecs.umich.edu/>.

[13] ISMA Workshops. Internet statistic and metrics analysis[EB/OL]. (2005) [2007- 01-12]. <http://www.caida.org/outreach/isma/9602/>.

[14] LAKHINA A, BYERS J W, CROVELLA M, et al. Sampling Biases in IP topology measurements [C] //Proc of the 22nd Annual Joint Conference on Computer and Communication Societies. 2003: 332-341.

[15] BI Jing-ping, WU Qi, LI Zhong-cheng. Measuring the Internet using public traceroute servers[C] //Proc of the 28th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 303-304.

[16] ZHOU Shi. MONDRAGON R J. Analyzing and modelling the AS-level Internet topology[EB/OL]. (2003-06-30) [2006-06-16]. <http://arxiv.org/abs/cs.NI/0303030>.

[17] ZHOU Shi, ZHANG Guo-qiang, ZHANG Guo-qing. The Chinese Internet AS-level topology [EB/OL]. (2005-11-29) [2006-12-04]. <http://arxiv.org/abs/cs.NI/0511101>.

[18] 姜誉. Internet 路由器级拓扑测量与分析技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

[19] Linkwan[EB/OL]. [2006-06-16]. <http://www.linkwan.com/gb/broadmeter/tracemap/traceroute.htm#China>.

[20] GUILLAUME J L, LATAPY M. Relevance of massively distributed explorations of the Internet: simulation results [C] //Proc of the 24th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2005: 1084-1094.

[21] DALL 'ASTA L, HAMELIN-HAMELIN L, BARRAT A, et al. A statistical approach to the traceroute-like exploration of networks: theory and simulations[C] //Proc of the 1st International Conference on Combinatorial and Algorithmic Aspects of Networking. 2004: 13-14.

[22] QQWry[EB/OL]. [2006-06-16]. <http://www.cz88.net>.

[23] CNNIC. 第 17 次中国互联网络发展状况统计报告[EB/OL]. (2006-07) [2007-04-16]. <http://www.cnnic.cn/uploadfiles/pdf/2006/7/19/103651.pdf>.