

技术报告

# 一个 Internet 路由器级拓扑自动发现系统

姜 誉<sup>1,2</sup>, 胡铭曾<sup>1,2</sup>, 方滨兴<sup>1,2,3</sup>, 张宏莉<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 计算机学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 国家计算机信息内容安全  
重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 国家计算机网络与信息安全管理中心, 北京 100031)

摘 要: 本文讨论了一个 Internet 路由器级拓扑自动发现系统的结构、所遇到的问题和若干关键技术, 并实现了一个针对 CERNET 的拓扑发现原型系统。实验结果表明, 发现方法可行, 发现原理适合于大规模 IP 网络, 可以拓展为一个发现全国 Internet 路由器级拓扑的系统。

关键词: Internet 拓扑; 路由器级; 发现; 网络安全; 网络管理

中图分类号: TP393.02 文献标识码: B 文章编号: 1000-436X(2002)12-0054-09

## An Internet router level topology automatically discovering system

JIANG Yu<sup>1,2</sup>, HU Ming-zeng<sup>1,2</sup>, FANG Bin-xing<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hong-li<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. National Key Laboratory on Computer Information Content Security, Harbin 150001, China;

3. China National Network Information Security Center, Beijing 100031, China)

Abstract: In this paper, we present the architecture, some issues encountered, and some key techniques in constructing an Internet router level topology automatically discovering system, and have developed a prototype system targeted at discovering the router level topology of CERNET. Experiment results show that the methods and discovery principles we take are feasible and operational on large scale IP network. Therefore, this prototype system can be developed into a system for discovering the whole Internet router level topology in China.

Key words: Internet topology; router level; discovery; network security; network management

收稿日期: 2002-01-21; 修订日期: 2002-06-11

基金项目: 信息产业部基金资助项目 (2001-研 2-B-035)

作者简介: 姜誉 (1968-), 男, 黑龙江伊春人, 哈尔滨工业大学博士生, 高级工程师, 研究方向为计算机网络与并行计算技术; 胡铭曾 (1935-), 男, 江苏江阴人, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为高性能计算机体系结构、并行计算技术与计算机网络; 方滨兴 (1960-), 男, 江西万年人, 博士, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机网络、并行计算技术与高性能计算机体系结构; 张宏莉 (1973-), 女, 吉林榆树人, 博士, 哈尔滨工业大学副教授, 主要研究方向为群机技术与计算机网络。

## 1 引言

20 世纪 90 年代以来, Internet 在世界范围内迅猛发展, 1991 年 7 月约有 53.5 万台主机连入 Internet (RFC 1296), 1996 年 7 月约有 1288.1 万台主机连入 Internet, 到 2001 年 7 月约有 12588.8 万台主机连入 Internet<sup>[1]</sup>。网络的复杂性、业务的多样性和接入的随机性使其结构不断变化, 国家层面的网络安全管理越来越需要深入了解 Internet 整体拓扑结构, 分析其结构行为, 以提出优化网络配置的合理建议。因此探测 Internet 拓扑结构成为一个新研究方向。

对 Internet 拓扑结构进行动态描述具有以下几方面应用: (1)宏观网络发展布局以及辅助网络管理: 如增加新路由器、网络扩容、从宏观层次管理规划大范围内的网络发展布局以缩小地区间差距等; (2)为仿真模拟 Internet 环境<sup>[2]</sup>、协议设计与评价提供研究基础; (3)为与拓扑结构相关的算法<sup>[3]</sup>的性能改进提供依据; (4)拓扑图可以帮助选择多镜像服务器的位置<sup>[4]</sup>、确定连接哪个 ISP 可能获得最小延迟与最大有效带宽等; (5)通过在大范围内进行网络监测, 包括对网络拓扑和网络性能(如丢包率、RTT、网络伸缩性)的监测等, 有可能发现网络异常, 分析大规模网络自动攻击(如 DDoS)的发起范围、控制病毒传播范围, 以及故障隔离(fault isolation)<sup>[5]</sup>, 为防范大规模网络攻击提供研究平台和预警手段, 使国家对全网络更具宏观控制力; (6)为 Internet 流量工程(traffic engineering)<sup>[6]</sup>和网络行为学的研究提供基础辅助依据。

传统的网络拓扑发现主要特点: (1)针对局域网, 是在一个对网络中的全体设备具有管理和配置权的管理域范围内进行的, 一般主要基于 SNMP、RMON 和 MIB。SNMP 及 MIB 具有信息丰富的特点, 同时结合 ICMP、DNS 等<sup>[7]</sup>进行网络拓扑发现方便、准确、周期短, 但其前提是需要相关设备支持 SNMP 及 MIB, 同时需要具有对这些设备的管理访问权; (2)根据应用的需要在局域网内发现第三层拓扑(路由器级)或第二层拓扑(路由器、网关、交换机等包含数据链路层设备的互连)。而对 Internet 来说, 一方面 Internet 中设备数量庞大, 另一方面我们的目的是从宏观角度观察其拓扑, 因此, 发现其第二层拓扑既没有必要也不可能。

Internet 拓扑发现是一项非常有挑战性的工作, 其原因主要是: 首先, Internet 规模巨大, 结构复杂, 适合于局域网的方法和技术不适合于广域网。其次, Internet 在本质上具有动态性, 协议版本升级、设备更新、新主机接入等; 同时 Internet 流量也具有突发性, 不再像传统的电信业务流量那样符合 Poisson 模型<sup>[8]</sup>。第三, Internet 本身具有很强的异构性, 其各个部分是在不同的时期由不同的部门或团体所建, 具有分散式管理的特点, 不同的 ISP 具有不同操作和安全策略, 发现 Internet 拓扑需要跨越不同的网络和不同的管理域, 获得拓扑信息受到大量的接入限制, SNMP 协议不适用。试验表明: 在跨越多管理域情况下, 基于 SNMP 的网络发现能力很低<sup>[2]</sup>, 相应的拓扑搜索算法在广域网以及处理大规模数据时遇到很大的问题。第四, 零知识, 即人们对 Internet 拓扑结构本身了解甚少, 其本质的动态性也使人们不能作较多的前提假设, 只能依靠探测手段。

一个物理网络拓扑可以对应多个不同抽象级别的逻辑拓扑, 对 Internet 进行拓扑发现时, 就存在路由器级、AS 级(RFC 1930)等不同抽象级别的逻辑拓扑, 其研究的粒度、方法和应用范围各有不同。本文重点是研究获得 Internet 路由器级整体逻辑拓扑, 因此不讨论 AS 级拓扑。

## 2 相关研究工作

Internet 路由器级拓扑是指拓扑图中结点代表一个主机或路由器, 或者是主机和路由器的端口 IP 地址, 两点相连表示相互之间经过一跳可达。1988 年, Van Jacobson 开发了 traceroute

应用程序，它可以返回从源 IP 地址到目的 IP 地址所经过的路由信息，其初衷是用于发现点对点的路由连接状况。1996 年，Jack Rickard 首先提出了利用 traceroute 来反映网络拓扑结构的思想<sup>[9]</sup>。此后，以 Cheswick B 等进行的 IMP(Internet mapping project)和 CAIDA(cooperative association for Internet data analysis)的 skitter 为代表开始了这方面的研究工作。

IMP 开始于 1998 年夏天，其长期目标是获得并保存 Internet 拓扑数据，以反映其随时间变动的增长情况，这些数据也可用于路由变化问题、DDoS 攻击以及图论等方面的研究。他们取得了一些拓扑发现成果，发布了一些 Internet 地图，地图以树状结构采用着色方式显示，美观、漂亮。但正如作者所说，目前只是从一定程度反映其拓扑结构，实用性尚不是很强<sup>[10]</sup>。

skitter 结合 traceroute 和 ping，主动探测转发(forward)路径，记录 RTT，跟踪低频持久的路由变化，可视化网络连接。1998 年 7 月 4 个 skitter 开始运行，现在已经有 18 个 skitter 对 4 种不同的目标集、超过 66 万个目的地址(覆盖全球可路由网络前缀的 52% 以上)进行探测<sup>[11]</sup>。需要说明的是 skitter 计划的目标是研究 Internet 基础设施中的关键组成部分，其工作主要集中在发现 AS 级拓扑、拓扑图可视化(visualizing)和 Internet 测量(Internet measurement)等方面。

南加州大学的 Mercator<sup>[12]</sup>采用 UDP 报文进行有限跳(limited-hop)的主动测量，对目的 IP 地址采用启发式猜测方法。在有限跳的情况下，该启发式方法有助于性能的提高<sup>[13]</sup>。Mercator 也使用松散源路由来辅助发现交叉链接和进行路由器端口合并。但是，一方面源站选路速度较慢，自动确定采用那些 IP 进行源路由也比较困难，另一方面源站选路有可能使网关崩溃，支持源路由的路由器不到 10%，无法在大规模拓扑发现中使用源路由反映交叉链接和进行端口合并<sup>[12]</sup>。Cornell 大学的 Octopus<sup>[2]</sup>项目试验了 SNMP、broadcast ping 以及 zone transfer 机制，结果表明，由于种种原因这三种方法在 Internet 上都不可取。

国内关于 IP 网络拓扑发现算法<sup>[14, 15]</sup>主要是基于 SNMP 协议，通过访问 MIB，结合 ICMP 等协议，在局域网或一个管理域等小范围内构造网络拓扑，有些还考虑发现链路层拓扑。文献[16, 17]简要讨论了基于 IP 协议拓扑搜索原理，未涉及在多管理域中进行拓扑发现所可能遇到的问题。国内尚未见到有关 Internet 路由器级和 AS 级拓扑发现的研究成果报道。可以看出，目前进行 Internet 路由器级拓扑发现主要是利用所有路由器都支持的 ICMP、UDP 协议，进行主动探测。

绘制出我国的 Internet 拓扑结构图可以成为世界 Internet 拓扑结构图的一部分，同时又具有自主知识产权。Internet 的规模、异构性及本质动态性使得手工搜集和维护其拓扑结构图几乎是不可能的，这就需要一个能够自动发现 Internet 拓扑的系统。正是在这种背景下，我们开展了本课题的研究工作，对 Internet 拓扑结构进行动态描述，并根据流量的变化分析其性能，为加强网络宏观管理、提高网络利用率、防范大规模网络攻击等提供一个技术平台。

### 3 系统构成

我们的 Internet 路由器级拓扑自动发现系统由三部分构成：(1)数据收集子系统；(2)拓扑图生成子系统；(3)拓扑图显示子系统。其结构如图 1 所示。

数据收集子系统采用多机多进程并行收集 CERNET 的结点连接数据，规范化后存入路径总表；拓扑图生成子系统根据路径总表及 IP 地理信息等辅助信息表生成相应的拓扑连接关系，形成具有一定格式的拓扑图文件，然后发送给拓扑图显示子系统；拓扑图显示子系统结合地理位置信息，以中国地图为背景，显示网络拓扑结构图。该图能够反映出 CERNET 的 IP 的分布密度和连接情况。数据收集和拓扑图生成平台为 Linux 环境，采用 Oracle 数据库存储

路径总表，拓扑图显示平台为 Windows NT。

不同层次的拓扑可以由结点和边具有不同含义的图结构来表示。比如，物理层拓扑图中，结点可以表示物理设备，如主机、网桥等，边表示通过某种物理介质(双绞线、光纤等)互连；链路层拓扑图中，结点仍代表物理设备，但边可以表示令牌环、ATM、帧中继等；IP 层拓扑图中，结点表示主机、路由器，或者是它们的 IP 地址，边表示相互之间经过 1 跳可以到达；AS 级拓扑图中，结点表示一个 AS，边则表示两个 AS 之间存在对等连接。我们研究的是 Internet 路由器级逻辑拓扑，结点表示路由器的端口 IP 地址，不包括主机 IP 地址，边表示相互之间经过 1 跳(实边)或 2 至 3 跳(虚边)可以到达。

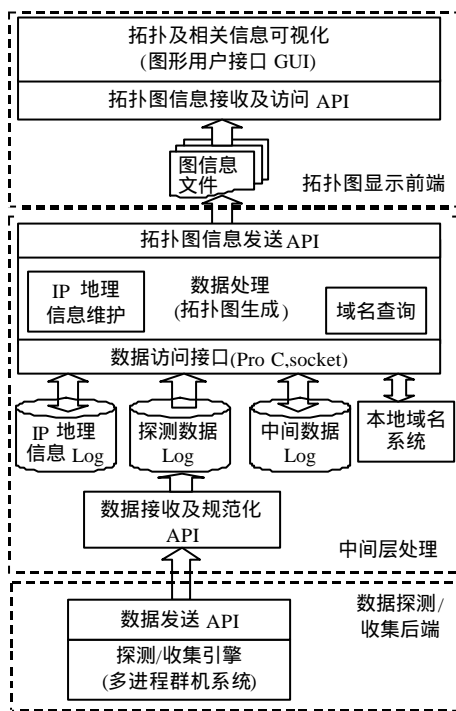


图 1 Internet 拓扑自动发现原型系统结构

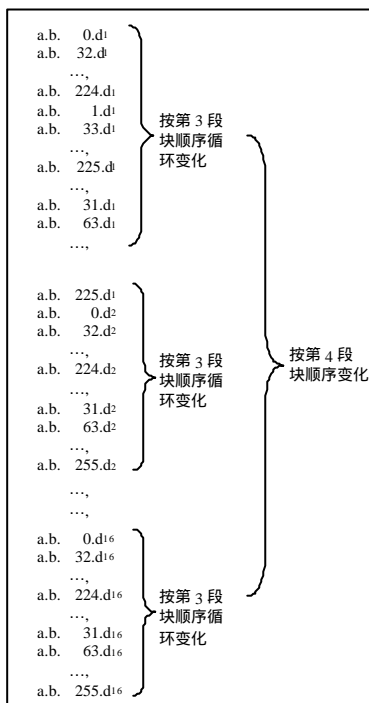


图 2 地址探测序列示意图

### 4 关键技术

#### 4.1 数据采集子系统

数据采集子系统利用 traceroute 机制，采用 UDP 报文对 CERNET 的地址范围进行路由追踪。

(1) 并行路由追踪。待探测地址数量很大，记地址形式为 a.b.c.d，设每个 a.b.c/24 平均划分为 2 个子网，去除 IP 地址 \*.0、\*.127、\*.128、\*.255，仍有约 449.2 万个 IP，显然不能采用串行方式，因此我们采用多机多进程方式。对地址范围进行处理之后，共有 71 个 a.b/16 形式的不同地址段，4 台结点机采用接收者启动算法，每个进程对一个 a.b/16 地址范围进行探测，数据并行与任务并行相结合。

(2) 隐藏探测踪迹，避免误认为大规模攻击。对大规模地址进行探测很容易被入侵检测系统误认为攻击行为。为此，我们将每个 a.b/16 地址范围均匀分为 8 块，每个 a.b.c/24 均匀分为 16 块，每块随机取一个地址，然后按第三段块优先进行顺序探测，探测序列如图 2 所示，

其中第四段的数值是在每段中随机选择的。这时，假设一次 trace 成功所用时间为 0.5min，则 a.b.0.d 与 a.b.1.d 间隔至少为  $0.5 \times 8=4\text{min}$ ，而 a.b.c.d<sub>1</sub> 与 a.b.c.d<sub>2</sub> 间隔至少为  $0.5 \times 256=128\text{min}$ ，即 2h 左右。这样，即使对设有 IP 陷阱<sup>[18]</sup>的情况下也不易感知，从而在一定程度上隐藏了探测踪迹。

(3) 提高 trace 性能。我们发现，当对一个目的地址 trace 时，若连续 3 跳超时，其后各跳基本都将超时返回，继续增大 TTL 发探测包意义不大，所以连续 3 跳超时就终止此次探测，缩短探测时间，克服了文献<sup>[12]</sup>中有限跳带来的不足。虽然探测目的地址不同，但不同探测路径上的 IP 地址有一定的重复性，因此在探测过程中不进行域名反解析，而是整个地址范围探测完毕后，求出无重复 IP 地址集，再对其完成域名反解析，极大地提高了整体性能。

(4) IP 地理信息提取。在拓扑图生成中需要知道探测到的各个路由器 IP 所在地理位置，以便获得地理覆盖图。我们通过静态辅助信息表、域名匹配、whois 查询等多种不同方法，确定 IP 地址所在城市，对此我们将另文讨论。

#### 4.2 拓扑图生成子系统

我们先给出两个定义。

定义 1 边权——拓扑图中边的权重定义为该边在路径总表中出现的次数。

定义 2 边分界指数 b——用于拓扑图中边的聚类。总共分 n 类，则 b 定义为

$$b = \lg(\text{最大边权})/n$$

(1) 去“叶柄”技术。由全部路径构成的有向图的根是从探测点向外出发所经过的第一个网关 IP。把由所有结点和边组成的有向图看作一片树叶的话，那么从该网关 IP 出发的一段公共路径就是该树叶的叶柄，如图 3(a)所示，它是所有路径的必经之路，所以该路径上的边权也最大(跨网探测时这段公共路径比较长)。将该“叶柄”画在图中既没有必要，影响图的美观性，又影响层分界指数的计算，从而影响其他边的显示效果。因此需要去除“叶柄”，如图 3(b)所示。我们先从路径总表中找到公共路径 P，然后将出现在 P 中的结点排除于图外 (P 的末节点除外)。

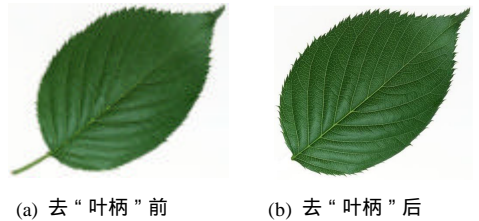


图 3 去“叶柄”示意图

(2) 图归约技术。从路径总表生成的拓扑总图是路由器 IP 图，而城市覆盖图反映的是城市之间的连接关系，因此需要把同一城市的路由器 IP 结点合并成为一个代表该城市的结点，即需要对该图按边进行归约。形式化如下：

设结点 IP 图为  $G = (V_{IP}, E_{IP})$ ，归约后的城市覆盖图为  $G' = (V_C, E_C)$ ，则有

$$V_C = \{c \mid \exists v_{ip} \in V_{IP} \text{ 使 } \text{City}(v_{ip}) = c\}$$

$$E_C = \{(v_{c1}, v_{c2}) \mid \exists (v_{ip1}, v_{ip2}) \in E_{IP} \text{ 使 } \text{City}(v_{ip1}) = v_{c1} \text{ 且 } \text{City}(v_{ip2}) = v_{c2}\}$$

(3) 边权对数聚集。边权大小能够反映路由路径的频度，呈现不同的分布，需要在拓扑图中反映出“骨干”路由路径，因此应将相近的边聚集起来。我们根据边分界指数对边权进行对数聚类，有利于考察其可能的幂律分布<sup>[19]</sup>性质。

(4) “限点剪枝分层”技术。拓扑图中结点和边分布过于密集不利于图的美观性。“限点”是指在拓扑图上限制结点个数，从而将其分为若干层来显示，突出“骨干”。“剪枝”是从路由器 IP 拓扑全图开始逐步剪掉边权小于给定值的孤枝(其一个结点的度为 1 的边)，逐渐体现

出“团”。这样，拓扑图层次清晰，也保证了连通性，是比较理想的策略。

我们生成的拓扑图中的“骨干”路由是一种相对表示，与实际的主干路由没有对应关系，但可用来反映实际路由承载情况，有利于评价对比带宽容量，为带宽扩容提供一定的依据。

#### 4.3 拓扑图显示子系统

Internet 路由器级拓扑图庞大、复杂，因此，我们采用可缩放、可拖动的层级式显示方式，以彩色中国版图为背景，绘制各级拓扑图。

(1) 鼠标消息驱动。以鼠标消息驱动方式在各级子图之间切换，用栈来存储相关信息。

(2) 可拖动的图形图像显示技术。由于屏幕显示区域有限，需要实现鼠标拖动图形图像移动。为保证背景图像和所绘制的拓扑子图图形能够同步移动，定义一个内存设备环境，使之与显示器设备环境相一致，将所有对图形图像的操作都放在该内存设备环境中，然后再进行内存设备环境到显示器设备环境的复制。当发出移动消息时，系统根据内存设备环境计算复制到显示器设备环境中时的原点坐标，从而刷新客户区的内容，达到拖动显示效果。

(3) IP 结点分布算法。城市覆盖图可以由城市坐标映射表得到每个城市在图中的坐标，IP 逻辑图没有这样的位置信息。所以，IP 逻辑图需要采用某种结点分布算法为图中每个结点分配坐标。首先，对拓扑图从度最大的结点开始遍历，生成树状结构。然后，从树根开始分配坐标，子结点按顺时针方向依次排列在以父结点为圆心的圆或半圆上，一圈排满后，半径加大排另一圈，原则是度较大的子结点远离圆心，度较小的子结点接近圆心。

(4) 图形准平面化技术。绘制 IP 逻辑拓扑图时容易出现两点连线经过其他点，即点线重叠的情况，影响视觉效果。为此，确定图中每个点的坐标位置后，在画每条边之前，先判断两点直接连线上是否有其他点。如果没有其他点，则直接连线；如果有，则在两点间作弧，继续判断该弧是否经过其他点，如果经过，就改变圆弧半径再作弧，再判断，直至要作的弧上没有除两 endpoint 以外的其他点。在拓扑图画完之后，辅之以鼠标拖动人工调整布点的方法。

(5) ToolTip 显示技术。拓扑图上每一点都带有一些附加信息，如 IP 地址、域名、所在城市、所属单位等。这些信息不可能全部同时显示在屏幕上，但它们又是用来了解网络拓扑的不可或缺的信息，因此采用 VC++ 的 ToolTip 功能。当鼠标指针移动到图中某个结点上时，在该点附近自动显示与该结点相关的信息，鼠标指针移走则信息自动消失。

## 5 结果分析

目前我们是对全国教育网进行拓扑发现的，系统运行在北京。获得的拓扑全图(未按城市归约之前)中包含 1611 个节点(对应路由器端口 IP)，2939 条边(包括虚边)。图 4 是 CERNET 网管中心 2001 年 5 月份提供的教育网主干拓扑逻辑分布图；图 5 是同期系统探测所生成的 CERNET 全国省会级城市的网络覆盖图；图 6 是地市级城市网络覆盖图；图 7 是选取的一个城市(广州市)IP 逻辑拓扑图。将图 5 与图 4 对比可以看出：发现拓扑图基本反映出实际拓扑连接关系。但我们也注意到，在图 5 中没有大连-上海、南京-上海、南京-武汉、武汉-广州、成都-广州等 5 条主干路径，其原因在于单点探测。一般来说单点进行路由采集不可能发现三角形结构，得到交叉路径。所以，为获得较完整的网络拓扑图应采用分布式多点 trace 的方法(需要注意的是发现了北京-西安-成都这个三角形结构，这可能是由于北京某个主干路由器配置了动态路由或具有负载平衡的静态路由所致，因此只是在特定网络状态下才有可能发现三角形结构)。

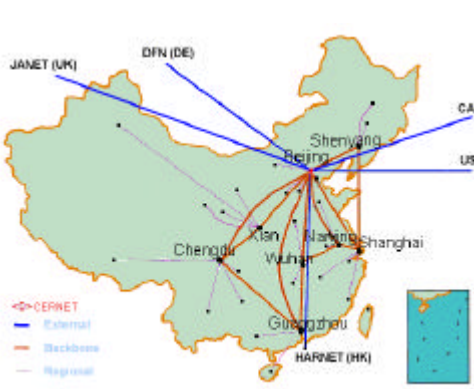


图 4 CERNET 主干网拓扑图

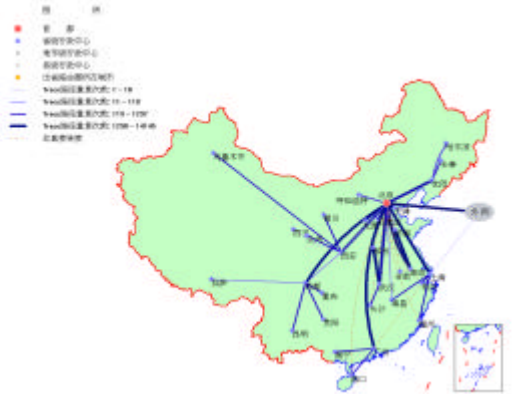


图 5 CERNET 级网拓扑图(省会级城市覆盖图)

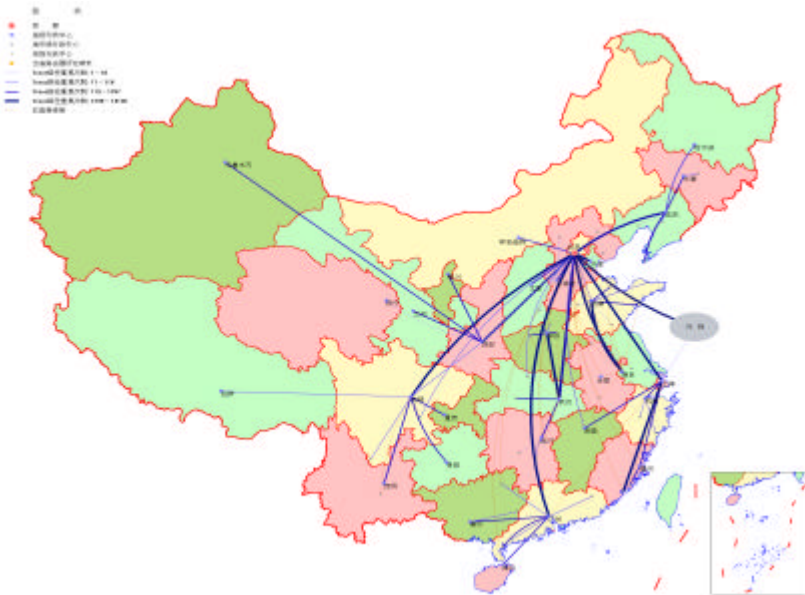


图 6 CERNET 级网拓扑图(地市级城市覆盖图)

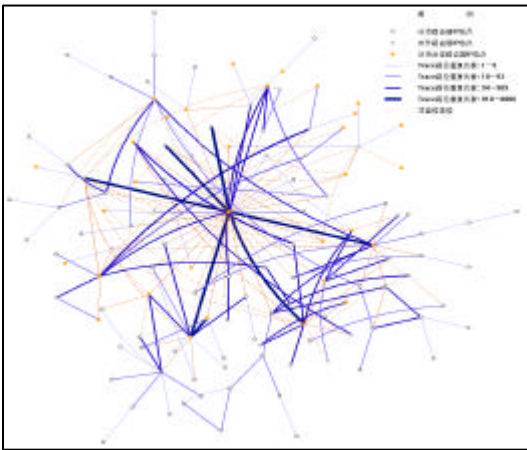
主动探测不可避免地增加网络负载,我们来分析一下该系统运行时网络负载的增加情况。设每次 trace 平均为 20 跳,每跳发送 3 个各 32byte 的 UDP 报文,返回 3 个各 56byte 的 ICMP 响应报文,一次 trace 为 30s,则每秒网络中最多增加 $(32+56) \times 20 \times 71/1024=122\text{Kbyte}$ (占用总带宽)的报文,最多增加  $6 \times 20 \times 71/30=284$  个包,而这些流量是分布到全国的,每秒平均通往每个目的地址的路径上的包最多为  $6 \times 20/30=4$  个,并且由于 traceroute 存在丢包超时等待,再加上并不是对每个地址都进行 trace,实际增加的流量要小于上述相应的值,因此对网络影响不大。为减小负载强度,我们还适当增加延迟,将一轮探测周期控制在 3 天左右。

目前我们没有考虑防火墙、策略路由等情形对拓扑图的影响,需要进一步研究。在拓扑图显示方面尚需要进一步优化。

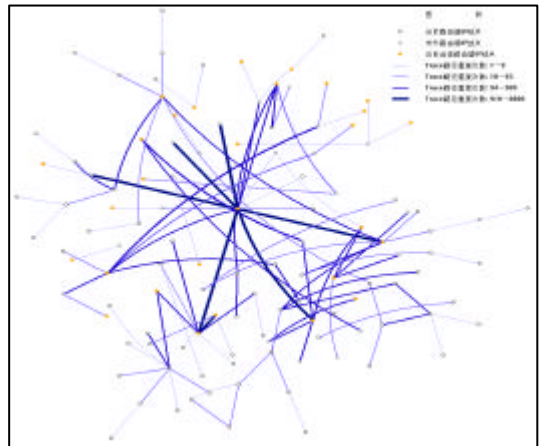
我们生成的拓扑图中,不包括主机 IP 地址,只包含路由器端口 IP 地址,边表示相互之间经过 1 跳(实边)或 2 至 3 跳(虚边)可以到达。这样考虑的原因是:(1)路由器返回的是数据包的入口 IP 地址(参见文献[20],从网络 1 对网络 3 进行 trace,则输出的路由器 IP 地址为 if1,if3。



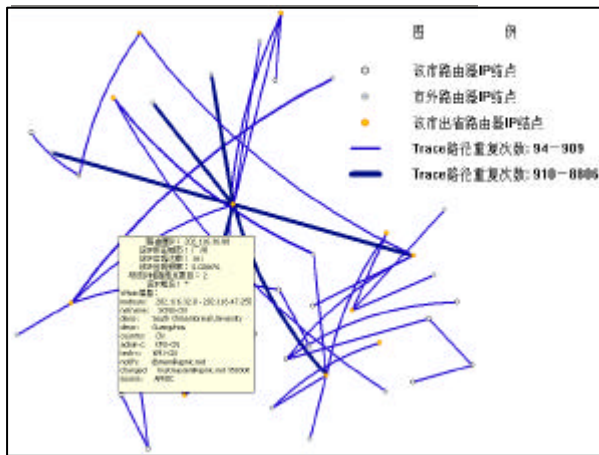
反过来，输出的 IP 地址为 if4,if2。if2 与 if3 的网络号相同，而 if1 与 if4 的网络号则不同)。单点探测时，拓扑图基本呈现为树状结构，在静态路由情况下，对一个路由器来说得到的端口 IP 基本是唯一的，因此可以代表该路由器。多点探测时需要考虑路由器多端口合并问题，文献[11]中给出了一种合并方法，但合并仍不完全。(2)如果将主机 IP 也表示在图中，则这些 IP 一定对应的是叶结点，这不仅会使图中的结点个数猛增，影响显示效果，而且也不利于观察路由器之间的连接关系。另外，考虑拨号上网、NAT、DHCP、多接口(multi-homed)主机、移动计算等情形，无论主机 IP 如何改变或位置变动，对应连接的拨号服务器或路由器位置一般不变。因此，我们生成的拓扑图只包含全部探测到的路由器端口 IP，使相应的拓扑图对于拨号上网、NAT、DHCP、多接口主机、移动计算等情形也有意义。(3)由于探测路径中存在中间跳丢包的情形，为反映探测可达性，采用虚边的方法连接存在无响应间隔的两个 IP。



(a) 包含虚边



(b) 直接可达



(c) 只包含前二级边权

图 7 广州市 IP 逻辑拓扑图

## 6 结论

大范围内对 Internet 进行拓扑测量，开展基础性的研究工作，开发高级探测技术，本质



上与发展高级路由和交换能力的需要是一样的。在信息产业部的支持下,我们通过改造 traceroute,采用单点主动测量的方法对中国教育科研网(CERNET)进行了拓扑结构的探测,绘制出了包含每个地级城市的分层次 CERNET 拓扑图,基本反映出了实际的路由分布状态。通过分析 traceroute 的实现,将并行方法引入到网络拓扑发现中,效果令人满意。本文提出的路由器级拓扑图中不包含主机的思想有助于提高系统的适应性以及拓扑图的可视化效果。引入地理信息的城市覆盖图丰富了逻辑拓扑图的表达手段。下一步我们将采取多点探测的方法,将本系统拓展成为自动发现全国 Internet 拓扑结构的系统。同时,在无踪迹、无损伤探测、拓扑图层次化、路径合并、路由器端口合并、性能表征等方面进行更深入的研究。

致谢:在系统开发过程中,得到唐剑琪博士、王巍博士、王伟平硕士、崔祥硕士以及杜跃进博士、王丽宏博士、陈逊训博士等的帮助和支持,在此一并表示感谢。

### 参考文献:

- [1] Internet domain survey [EB/OL]. <http://www.isc.org/ds/>, December 2001.
- [2] SIAMWALL A R, SHARMA R, KESHAV S, Discovering Internet Topology [R]. Technical Report, Computer Science Department, Cornell University, July 1998.
- [3] MILLER N, STEENKISTE P. Collecting network status information for network-aware applications [A]. Proc of IEEE INFOCOM 2000 [C]. Tel-Aviv, Israel, March 2000. 641-650.
- [4] QIU L, PADMANABHAN V N, VOELKER G M. On the placement of web server replicas [A]. Proc of IEEE INFOCOM 2001 [C]. Anchorage, Alaska, April 2001. 1587-1596.
- [5] REDDY A, ESTRIN D, GOVINDAN R. Large-scale fault isolation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(5):733 - 743.
- [6] JAMIN S, JIN C, JIN Y, *et al.* On the placement of internet instrumentation [A]. Proc of IEEE INFOCOM2000(I) [C]. Tel-Aviv, Israel, March 2000. 295-304.
- [7] LIN H, LAI H, LAI S. Automatic link layer topology discovery of IP networks [A]. 1999 IEEE International Conference on Communications (II) [C]. Vancouver, BC, Canada, June 1999. 1034-1038.
- [8] PAXSON V, FLOYD S. Wide area traffic: the failure of poisson modeling [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1995, 3(3):226-244.
- [9] RICKARD J. Mapping the internet with traceroute [J]. Boardwatch magazine, 1996, 10(12).
- [10] CHESWICK B, BURCH H, BRANIGAN S. Mapping and visualizing the Internet [A]. Proc of the 2000 USENIX Annual Technical Conference [C]. San Diego, California, USA, June 2000. 1-12.
- [11] HUFFAKER B, PLUMMER D, MOORE D, *et al.* Topology discovery by active probing [EB/OL]. <http://www.caida.org/outreach/papers/2002/SkitterOverview/>. Jan. 2002.
- [12] GOVINDAN R, TANGMUNARUNKIT H. Heuristics for Internet map discovery [A]. Proc of IEEE INFOCOM 2000(III) [C]. Tel-Aviv, Israel, March 2000. 1371-1380.
- [13] DANESH A, RUBIN S H, SMITH M H, *et al.* Mapping the Internet [A]. Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference [C]. Vancouver, BC, Canada, July 2001. 687-692.
- [14] 徐斌, 钱德沛, 陆月明等. 一种基于抽象点的网络拓扑自动生成算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2001, 22(4):411-414.
- [15] 徐大海, 刘新, 王奇等. 网络拓扑自动搜索算法研究 [J]. 计算机应用, 1999, 19(2):4-6.
- [16] 徐斌, 王磊, 陆月明等. 基于 IP 协议 TTL 的网络拓扑搜索算法 [J]. 微型机与应用, 2000, 19(7):31-32.
- [17] 张勇, 张德运, 李钢. 网络拓扑发现的主动探测技术的研究和实现 [J]. 小型微型计算机系统, 2000, 21(8):792-794.
- [18] 陈硕, 安常青, 李学农. 分布式入侵检测系统及其认知能力 [J]. 软件学报, 2001, 12(2):225-232.
- [19] FALOUTSOS C, FALOUTSOS P, FALOUTSOS M. On power-law relationships of the Internet topology [A]. Proc of the ACM SIGCOMM'99 [C]. MA, USA, Sept 1999. 251-262.
- [20] STEVENS W R 著, 范建华, 胥光辉, 张涛等译. TCP/IP 详解 卷 1: 协议 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 75.