

---

电 子 科 技 大 学  
UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

# 硕士学位论文

MASTER THESIS



论文题目     **BGP 信息和 Traceroute 信息结合的 AS**  
**级网络拓扑识别方法研究**

学 科 专 业     信息与通信工程

学        号     **201221010810**

作 者 姓 名     陈路璐

指 导 教 师     于富财 副教授



分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

UDC<sup>注1</sup>\_\_\_\_\_

# 学 位 论 文

## BGP 信息和 Traceroute 信息结合的 AS 级网络拓扑识别方法研究

(题名和副题名)

陈路璐

(作者姓名)

指导教师

于富财

副教授

电子科技大学

成 都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别

硕士

学科专业

信息与通信工程

提交论文日期 2015.4.29

论文答辩日期 2015.5.25

学位授予单位和日期 电子科技大学 2015 年 6 月 日

答辩委员会主席\_\_\_\_\_

评阅人\_\_\_\_\_

注 1: 注明《国际十进分类法 UDC》的类号。



# **THE RESEARCH OF AS LEVEL TOPOLOGY IDENTIFICATION METHOD COMBINED WITH BGP AND TRACEROUTE INFORMATION**

A Master Thesis Submitted to  
University of Electronic Science and Technology of China

Major:	<b>Information and Communication Engineering</b>
Author:	<b>Chen Lulu</b>
Advisor:	<b>Yu Fucui</b>
School :	<b>School of Communication &amp; Information Engineering</b>



## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

作者签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

## 论文使用授权

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日





## 摘 要

随着网络规模的急剧发展,网络成为了当今社会最重要的基础设施之一,已成为人们生活密不可分的一部分。互联网中自治系统级(AS 级)拓扑表征了网络中各个自治系统之间逻辑上的连接关系,是网络管理、网络优化等研究的数据基础,也是构建安全网络环境的基本前提。现有的自治系统级网络拓扑识别主要依靠基于 BGP 路由信息收集的方法,通过提取 BGP 路由表中的 AS 路径属性信息得到 AS 之间的连接关系,从而获得相应的 AS 级网络拓扑,但 BGP 无法识别许多下层的 AS 连接。有学者提出用 IRR 的数据库数据来补充 BGP 路由信息得到的 AS 拓扑数据,但该方法的缺陷在于 IRR 的数据库更新速度较慢,得到的数据都非实时数据,不能满足获得全球实时网络拓扑的需求。因此本文针对上述问题,提出了一种新的 AS 级网络拓扑识别方法,具体包含以下三方面内容:

1) 提出 BGP 信息和 Traceroute 信息结合的 AS 级网络拓扑识别方法:利用 BGP 信息得到的 AS 级网络拓扑属于控制层面的拓扑,而 Traceroute 可根据数据的实际流向返回经过的中间路径,且部署的探测点主要集中于网络的下层,故可获得位于网络下层的 AS 连接。所以用 Traceroute 信息补充 BGP 信息的方法可得到较为完整的 AS 级网络拓扑。

2) 采用了一种基于最大化 Traceroute-BGP 路径对匹配的方法:利用 Traceroute 信息得到的数据是 IP 级网络拓扑数据,为得到 AS 级网络拓扑数据,本文采用一种基于最大化路径对匹配的方法,根据 BGP 路由表的源 AS 属性信息,最小化 IP 和 AS 的匹配错误率,将 IP 地址映射到相应的 AS,构建出相应的 AS 级网络拓扑。

3) 提出基于 LG 算法和 DPP 算法的 AS 连接关系推断方法:由于 AS 级网络拓扑识别的另一个方面就是了解和探究 AS 之间的连接关系。本文结合两种现有算法的优点,规避算法的弱点,对 AS 之间的连接关系进行推断,该方法在推断 AS 连接关系的正确率上有了一定程度的提高。

本文使用 IRL 的数据作为原有的 BGP 信息的路由信息得到的 AS 级网络拓扑数据,与本文提出的拓扑识别方法得到的数据进行对比,表明 BGP 信息和 Traceroute 信息结合的 AS 级网络拓扑识别方法可以得到更完整的 AS 级网络拓扑。然后使用 CAIDA 公布的理论数据和本文提出的 AS 连接关系推断方法进行对比,表明本文提出的方法可以得到更准确的 AS 连接关系。

**关键词:** 自治系统, 拓扑识别, BGP 路由信息, Traceroute 技术, AS 连接关系

## ABSTRACT

With the rapid development of the Internet network, network has become one of the most important infrastructure in today's society, and it has become an inseparable part in people's daily life. Autonomous systems (AS) level of the Internet topology represents the network logical connections between each autonomous systems, network management, network optimization research data base, and it is also the basic premise of a safe network environment. The existing network of autonomous system level topology identification rely mainly on the method through BGP routing information collection, by extracting the AS path attributes of BGP routing table information to get the connection of ASes, to obtain the corresponding grade AS network topology. But in practice, in order to obtain full global AS level network topology, the BGP information is unable to identify many of the network connection of the lower location. With international scholars putting forward using IRR database data to supplement the BGP routing information AS topology data, the disadvantage of the method is the IRR database update too slow that the data are not real-time data, it can not meet the needs of global real-time network topology. In this paper, according to the above problem, this thesis proposes a new AS level network topology identification method, the specific content includes the following three aspects:

1) Putting forward a method about the AS level topology combined with BGP information and traceroute information. BGP information is about the control plane of AS level topology, but traceroute information can reflect the actual data of the data flow, it help to obtained the AS connection in the lower place of the Internet. This method can help to get a relatively complete the AS level network topology.

2) Adopting a method based on maximization traceroute-BGP path matching: using the data obtained from the traceroute information level is IP network topology data, in order to get the AS level network topology data, this thesis adopted a method based on maximum path matching, according to the source of BGP routing tables AS attribute information, minimize the error rate of the matching to map IP addresses to the corresponding AS, building the corresponding level AS network topology.

3) Putting forward an algorithm based on connection relations of combining LG algorithm and DPP algorithm of the AS inference methods: due to the AS level

## ABSTRACT

---

topology identification, it is another way to understand the connection relationships of AS level topology, this thesis combined with the advantages of the two existing algorithms to infer the connection relationship of AS level topology, the accuracy of this method in the inference AS connections has improved to a certain extent.

In this thesis, I used the IRL data AS as the original information of BGP routing information of the AS level topology, and the proposed topology identification method, the data show that BGP information and traceroute information combined with the AS level topology identification method can get a more complete AS level topology. Then using the CAIDA theory published data and the proposed AS connection relationships, comparing the inference method show that the proposed method can get more accurate AS connection relationship.

**Keywords:** autonomous system, topology identification, BGP routing information, traceroute technology, the AS connection relationships

# 目 录

<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景及研究意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 基于 BGP 信息的拓扑识别方法 .....	3
1.2.2 基于 Traceroute 的拓扑识别方法 .....	6
1.2.3 其他 AS 级网络拓扑识别方法 .....	7
1.3 本文研究内容 .....	8
1.4 本文章节安排 .....	9
<b>第二章 AS 级网络拓扑识别方法概述 .....</b>	<b>11</b>
2.1 基于主动测量的网络拓扑识别方法 .....	11
2.1.1 基于 Ping 的拓扑识别方法 .....	12
2.1.2 基于 Traceroute 的拓扑识别方法 .....	12
2.1.3 IP-to-AS 映射问题 .....	14
2.2 基于被动测量的网络拓扑识别方法 .....	15
2.2.1 基于 SNMP 的拓扑识别方法 .....	15
2.2.2 基于 OSPF 的拓扑识别方法 .....	16
2.2.3 基于 ARP 的拓扑识别方法 .....	16
2.2.4 基于 BGP 的拓扑识别方法 .....	16
2.2.5 基于 RIP 的拓扑识别方法 .....	17
2.3 本章小结 .....	17
<b>第三章 基于数据源结合的 AS 级网络拓扑识别方法 .....</b>	<b>19</b>
3.1 问题的提出 .....	19
3.2 基于数据源结合的拓扑识别方法 .....	23
3.2.1 拓扑识别方法流程 .....	23
3.2.2 BGP 路由信息数据收集 .....	24
3.2.3 Traceroute 的数据收集 .....	25
3.2.4 Traceroute 的 IP 映射 AS 问题 .....	26
3.2.5 BGP 信息和 Traceroute 信息的结合 .....	29
3.3 AS 级拓扑识别结果分析 .....	30
3.4 本章小结 .....	35

第四章 AS 间连接关系分析算法研究 .....	36
4.1 问题的提出 .....	36
4.2 LG 和 DPP 结合的 AS 连接关系算法 .....	37
4.2.1 算法思想 .....	37
4.2.2 算法流程 .....	38
4.2.3 算法中的参数选择 .....	40
4.3 算法结果分析 .....	42
4.4 本章小结 .....	47
第五章 文章总结 .....	49
5.1 全文总结 .....	49
5.2 工作展望 .....	50
致谢 .....	51
参考文献 .....	52
硕士研究生期间的研究成果 .....	55
攻读硕士研究生学位期间参加的科研项目 .....	56

## 图目录

图 1-1 AS 级网络拓扑结构图 .....	2
图 1-2 PCH 数据收集器的全球分布图 .....	6
图 2-1 ICMP 的报文格式 .....	11
图 2-2 Traceroute 的工作原理 .....	13
图 2-3 IP 映射 AS 流程图 .....	14
图 2-4 BGP 路由表格式 .....	16
图 3-1 网络拓扑增长趋势图 .....	19
图 3-2 AS 连接关系图 .....	20
图 3-3 No-Valley（无谷）准则下的 AS 路径 .....	21
图 3-4 部署探测节点位置不同的发现连接数对比 .....	22
图 3-5 AS 级网络拓扑识别方法流程图 .....	24
图 3-6 Ark 探测点部署地理位置图 .....	25
图 3-7 IP-to-AS 映射流程图 .....	26
图 3-8 修正 IP-to-AS 匹配方式流程图 .....	29
图 3-9 不同时期不同数据源得到的 AS 拓扑连接的数量关系 .....	30
图 3-10 BGP 数据源的 AS 连接节点度分布 .....	33
图 3-11 结合 Traceroute 的 BGP 数据源的 AS 连接节点度分布 .....	33
图 3-12 BGP 数据源的 AS 网络拓扑图 .....	34
图 3-13 结合 Traceroute 的 BGP 数据源的 AS 网络拓扑图 .....	34
图 4-1 推断 P2C、C2P 和 S2S 关系的算法流程图 .....	39
图 4-2 推断 P2P 关系的算法流程图 .....	40
图 4-3 不同阈值 L 取值下的 P2C 和 S2S 关系推断正确率对比 .....	44
图 4-4 不同 $\omega$ 取值下的 P2P 关系推断正确率对比 .....	45

## 表目录

表 1-1 Route Views 项目数据收集信息.....	4
表 1-2 PCH 项目数据收集信息 .....	5
表 2-1 ICMP 报文 .....	12
表 2-2 BGP 路由表表项 .....	15
表 3-1 IRL 的所有数据收集器信息.....	25
表 3-2 Ark 部署的部分探测节点信息 .....	26
表 3-3 数据处理结果 .....	27
表 3-4 两种 AS 网络拓扑识别方法结果对比 .....	31
表 3-5 节点度较大的 AS 得到连接数对比 .....	31
表 4-1 不同数据源的推断正确率对比 .....	43
表 4-2 不同数量输入路径对不同 L 取值的 P2C 关系推断正确率对比.....	43
表 4-3 不同数量输入路径对不同 L 取值的 S2S 关系推断正确率对比 .....	44
表 4-4 三种算法的推断正确率对比 .....	46
表 4-5 不同拓扑数据的 AS 连接关系结果 .....	46
表 4-6 两种数据源得到的 AS 连接关系所占比率 .....	47
表 4-7 两种数据源的不同 AS 连接关系数量对比 .....	47





## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及研究意义

在当今这个信息技术极速发展的时代，网络已经渗透进当今社会的各行各业，并潜移默化地影响和改变了人们的生活，人们逐渐有意识地对网络结构进行识别和分析。而作为许多实践和理论网络研究的基石，互联网网络拓扑的分析和建模在近代引起了广泛的关注。网络的流量特性、性能特性、安全特性，路由、应用程序和协议的性能评价、网络在遭受攻击下的健壮性等等，都由网络的拓扑结构来决定。因此，学者们都倾向于研究各种网络识别技术来捕获网络的拓扑结构，希望能从真实数据中获得真实的网络拓扑。

所谓网络拓扑，是指网络各个实体成员间特定的连接关系。网络拓扑一般可分为物理拓扑（真实拓扑）和虚拟拓扑两种。依据网络的定义可分为三层：基于网络层的网络拓扑、基于链路层的网络拓扑和 Overlay 网络拓扑。在这三者中，对网络层网络拓扑的研究最多，所以目前很多已有的研究均是对网络层的拓扑进行分析和研究。

互联网络拓扑识别是网络测量的一个关键组成部分，是互联网络管理的基础，对网络协议的设计、网络的建模和仿真、网络算法性能优化等有着重要的意义。网络拓扑测量就是利用一些不同的方法和技术，对目标网络的逻辑拓扑进行推测和识别，测量网络的拓扑结构或者逻辑拓扑关系图，以及具有地理信息的拓扑图。可依据网络层的实体分为四个层次：AS 级(自治系统级)、PoP（Point of Presence）级、路由器级以及 IP 级的网络拓扑，这个分类实际上可认为是从宏观到微观的网络拓扑识别过程。不同的网络层实体有不同的识别方法。IP 级网络拓扑即是物理拓扑，也就是实际存在的网络拓扑，是一系列的 IP 地址的端口直接相连形成的实际拓扑；路由器级拓扑是逻辑上的拓扑，是指一个路由器对应拓扑图中的一个网络节点，可通过别名解析等技术直接将 IP 接口聚合为一个路由器来获取；PoP 即汇集点，PoP 级网络拓扑可通过路由器的聚集来获取。而本文主要研究的是 AS（Autonomous System）级网络拓扑识别，所谓 AS（Autonomous System），即自治系统，一个自治系统是一个小型的网络单位，该单位里的所有实体采用自主决定的路由协议进行路由。许多路由器组成一个自治系统，一个自治系统拥有一个全球唯一的号码，即自治系统号（ASN），相当于 IP 级网络拓扑中的 IP 地址，目前可全球分配的自治系统号（ASN）已有  $2^{32}$  个。每个路由器有两个以上的接口，每个接口拥有不同的 IP 地址，该层次结构如图 1-1 所示。AS 级拓扑就是各个自治系

统之间的连接关系，这种连接关系不是实际存在的连接，而是逻辑上的连接。自治系统（AS）级拓扑的识别与分析是一项互联网络的基础研究，识别的目的在于寻找包含 Internet 结构信息的拓扑图并探索其内在规律，从而对网络的结构和其他方面的因素的互动进行预测。

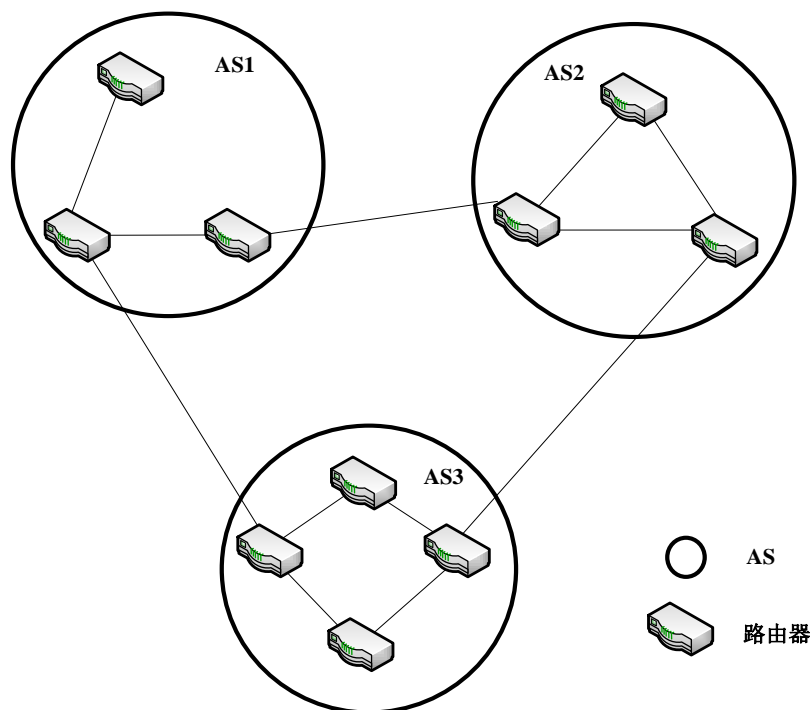


图 1-1 AS 级网络拓扑结构图

网络拓扑识别是现阶段各种网络研究的基础，所以研究网络拓扑识别技术具有关键作用，这些关键作用体现在：

- （1） 网络中的各种路由协议和算法都是依赖于网络拓扑的结构产生的，所以要想设计出高效的网络协议和算法，必然要考虑整个网络的结构特性。
- （2） 网络中的各种仿真需要建立网络拓扑模型来拟合实际网络拓扑结构，研究网络的拓扑结构能够为仿真环境的建立提供坚实的理论基础。
- （3） 对网络拓扑结构的了解能够对网络中的各个行为进行良好的预测和检测，比如网络流量的监控、网络通信及网络中的文件传输等行为的管理控制；
- （4） 网络拓扑结构的识别对于网络的安全特性和对抗网络外界的攻击能力的研究具有重要价值；
- （5） 了解网络的拓扑结构能够为网络的优化提供依据。

由此可知，网络拓扑识别是一项任重而道远的有意义的研究工作，但是随着当今社会互联网的需求增大，导致互联网规模急剧增大，网络拓扑的结构也越来越复杂，怎样才能获得完整的全球网络拓扑成为了一个异常艰巨的课题。

本文的主要工作集中于如何获得更完整更准确的 AS 级网络拓扑,在此过程中引申出其他需要解决的问题以及获得了网络拓扑之后的数据分析问题,会在本文的后面部分进行详细描述。

## 1.2 国内外研究现状

随着数学家欧拉提出七桥问题,暗示着网络的性质很大程度上由网络拓扑的结构决定,而随后数学家们提出的随机图模型成为了二十世纪六十年代到二十一世纪初的网络研究基本理论,随后学者又往深入研究,提出了典型复杂网络的概念来描述互联网的复杂巨系统,又为以后的研究指出了一个新的方向。

1999 年,Barabasi 和 Albert 揭示了 scale-free (复杂网络无标度)的特性,为解释这种复杂网络的无标度特性建立了 BA 模型<sup>[1]</sup>,这种模型具有两种特性,一是增长性,所谓增长性是指网络规模是在不断增大的,节点数也呈现递增趋势;其二就是有一种节点连接的机制,也就是指网络当中不断产生新的节点更倾向于和那些节点度较大的节点相连接,这种特性称为节点的度分布,该分布满足幂律 (power-law) 分布。研究表明,具有幂律分布的拓扑的节点度高的节点较少,低节点度的节点数量较多,并且不存在随机网络的特征标度,而具有无标度特性,所以节点度分布是否满足幂律分布,是评价 AS 级网络拓扑的一个关键指标。Raul J. Mondragon 在 2003 年也提出了另外一个网络拓扑模型,即 IG(Interactive Growth) 模型<sup>[2]</sup>,这是一种基于新节点和新连接的共同增长的模型,同样也适用于具有幂律度分布和分层结构的 AS 级网络拓扑。

随着互联网规模的不断扩大,其拓扑结构也越来越复杂,这使得获得一个完整且准确的全球互联网拓扑成为一项异常艰巨的任务。近几十年来,全世界各国的网络研究机构均纷纷开展项目从不同的角度对互联网拓扑进行探索,这些研究方法和技术各异,但都为我们最终获得网络拓扑提供了相当有用的信息。

### 1.2.1 基于 BGP 信息的拓扑识别方法

(1) Route Views<sup>[3]</sup>项目:是由 Oregon (俄勒冈)大学开展的项目,这个项目设计的初衷是作为一个工具从不同位置为网络运营商获得实时信息,从而对全球路由系统从几个不同的角度来解释。目前,其在全球拥有共 16 个数据采集点,共与 232 个 AS 建立 BGP 会话。其 Update 报文的存档间隔是 15 分钟,BGP 路由表的存档间隔是 2 小时。

表 1-1 罗列出了该项目的数据收集器和数据收集点的基本信息,这些数据收集器从其对等方接收 BGP 报文,周期性地备份收集的所有 BGP 路由表和 BGP 更新

报文，但不向对等方通告任何前缀，公众可通过 Route Views 项目所提供的官网查询和下载公布的 BGP 路由表信息，通过提取 BGP 路由表中的有用信息来获得各个 AS 之间的连接信息，从而获得 AS 级网络拓扑数据。

表1-1 Route Views 项目数据收集信息

数据收集器	所属地区	FEEDER 总数
route-views.routeviews.org	俄勒冈，美国	30
route-views2.routeviews.org	俄勒冈，美国	33
route-views3.routeviews.org	俄勒冈，美国	21
route-views4.routeviews.org	俄勒冈，美国	15
route-views6.routeviews.org	俄勒冈，美国	12
route-views.eqix.routeviews.org	弗吉尼亚，美国	14
route-views.jinx.routeviews.org	内罗毕，肯尼亚	2
route-views.linx.routeviews.org	伦敦，英国	23
route-views.nwax.routeviews.org	俄勒冈，美国	15
route-views.isc.routeviews.org	帕洛阿尔托，美国	13
route-views.wide.routeviews.org	东京，日本	4
route-views.saopaulo.routeviews.org	圣保罗，巴西	231
route-views.sydney.routeviews.org	悉尼，澳大利亚	8
route-views.telxatl.routeviews.org	亚特兰大，美国	16
route-views.sg.routeviews.org	新加坡，新加坡	1

由于数据收集器数量和覆盖范围的有限，该方法得到的 AS 级拓扑数据不尽完善，只反映了全球的部分 AS 级网络拓扑信息，但该项目的研究成果依然受到很多其他机构的青睐。NLNR 用 Route Views 的数据做 AS 路径的可视化，而基于被动测量的网络拓扑识别方法在得到 IP 级拓扑数据之后，常用该项目的 BGP 路由表数据作为 IP 级拓扑转换 AS 级拓扑的依据。

(2) RIS<sup>[4]</sup>项目：RIS (Routing Information Service) 是由 RIPE NCC 开展的项目，RIPE NCC 是一个管理 Internet 资源的非盈利性组织，旨在管理欧洲、中东和中亚地区的互联网注册信息资源，支持互联网基础设施在其服务地区的基础协调。该项目开始于 2001 年，从全球不同位置收集并存储路由信息，目前共建有 17 个数据采集点，其中 4 个现在已经停止运行。共与 333 个 AS 建立 BGP 会话。其 Updata 报文的存档间隔是 5 分钟，BGP 路由表的存档间隔是 8 小时。

公众可通过 RIPEstat 访问 RIS 数据，RIS 的所有可用信息是“一站式”的网络数据资源，包括全球唯一的地址空间（IPv4 和 IPv6）和自治系统编号 ASN，并使用单个部件显示路由和其他信息，路由信息包括路由状态、历史路由信息、宣告的前缀、邻居 AS 等等。

（3）PCH<sup>[5]</sup>项目：PCH（Packet Clearing House）也是一个非盈利研究机构，旨在支持操作和分析领域内的互联网流量交换、路由和全球网络的发展，于 1994 年最初成立于美国西海岸，但它的主要研究项目——互联网路由拓扑归档的数据库，以及网络拓扑测量开始于 1997 年。这个归档路由数据来自所有主要用于学术和商业研究的互联网服务提供商，旨在帮助理解互联网的动态特性和拓扑，学者可通过其数据库下载实时数据进行网络拓扑测量的研究和分析工作。

表 1-2 PCH 项目数据收集信息

数据收集器	所属地区	AS 编号	IP
RRC00	阿姆斯特丹，荷兰	12654	193.0.4.28
RRC01	伦敦，英国	12654	195.66.225.241
RRC03	阿姆斯特丹，荷兰	12654	195.69.144.69
RRC04	日内瓦，瑞士	12654	192.65.185.40
RRC05	维也纳，奥地利	12654	193.203.0.123
RRC06	东京，日本	12654	202.249.2.143
RRC07	斯德哥尔摩，瑞典	12654	194.68.123.147
RRC10	米兰，意大利	12654	217.29.66.6
RRC11	纽约，美国	12654	198.32.160.99
RRC12	法兰克福，德国	12654	80.81.192.152
RRC13	莫斯科，俄罗斯	12654	193.232.244.114
RRC14	帕罗奥图，美国	12654	198.32.176.6
RRC15	圣保罗，巴西	12654	187.16.216.23
RRC16	米兰，意大利	12654	198.32.124.171

截止 2013 年，PCH 主要项目已经包括建设和支持世界上超过三分之一的大约 350 个互联网交换点（IXP），操控和保护全球互联网基础设施和电话通讯系统，实现网络研究的数据收集器部署在超过 36 个国家和地区，包括美洲、欧洲、亚太地区和非洲。图 1-2 为 PCH 项目数据收集器的全球部署分布图。

（4）Topology Map<sup>[6]</sup>项目：加州大学洛杉矶分校（UCLA）的互联网研究实验

室 (IRL) 一直在开展与互联网相关的大规模分布式系统及互联网路由基础设施等方面的研究, 其大部分研究项目受美国政府的资助。Topology Map 是 IRL 开展的众多与互联网相关的项目之一, 通过实时收集全世界所有公开的 BGP 路由数据 (包括 Route Views、RIR RIS、PCH 和 Internet2) 并对其进行处理, 得到对网络研究者有用的信息, 并实时公布。Topology Map 项目为当今很多学术研究提供拓扑数据的历史存档, 所公布的数据有: 每天 (每个月) 中观测到的 IPv4 的 AS 连接、每天 (每个月) 中观测到的 IPv6 的 AS 连接、AS 之间的连接关系 (p2p、p2c、c2p) 以及 IP 前缀的原 AS。因为融合了所有 BGP 采集点的数据, 此项目所得到的 AS 级拓扑是现今使用 BGP 被动测量方式下所能获得的最全面的 AS 级拓扑。



图 1-2 PCH 数据收集器的全球分布图

### 1.2.2 基于 Traceroute 的拓扑识别方法

基于 Traceroute 的 AS 级网络拓扑识别, 就是使用 Traceroute 进行大规模测量直接获得 IP 级拓扑, 再以此为基础推断路由器级、AS 级以及 PoP 级网络拓扑。

(1) CAIDA<sup>[7]</sup>: 即互联网分析合作组织, 是一个为了增进对全球互联网设施的工程设计和维护的合作, 由一些商业、政府和研究机构联合形成的组织。CAIDA 成立于 1996 年, 总部设于加州大学圣地亚哥分校, 在美国军方、情报部门和政府的资助下, CAIDA 在互联网拓扑测量和分析等方面开展了大量的研究和开发工作, 有关拓扑测量方面的研究的核心理念是采用基于 Traceroute 的主动测量来获得互联网拓扑数据, 通过在全球范围内部署探测节点, 对整个可路由的 IP 空间进行探测, 获得大量 IP 路径, 最后得到 IP 级拓扑。1998 年, CAIDA 部署 Skitter 主动探测设施来完成这一任务, 收集到了大量数据。到 2008 年, CAIDA 用 Ark (大规模分布式主动测量设施) 代替 Skitter, Ark 在包含了之前 Skitter 所部署的探测点的同时继续扩建, 至今已在全球拥有 96 个探测节点。

首先, Ark 将整个可路由的地址空间划分为 /24 前缀空间, 并在每个测量周期

内随机选取/24 前缀中的一个 IP 地址，以此构成一个 IP 地址列表作为本周期内探测的目的地。Ark 对所有探测节点进行分组（现有 3 个组），每个组之间独立完成测量，并将探测任务动态地分配给每个组员。Ark 使用优秀的探测工具 Scamper，其支持基于 TCP、UDP 以及 ICMP 的探测方式。

Ark 部署的探测点探测到的数据可直接获得 IP 级拓扑，而为了得到 AS 级拓扑，CAIDA 使用了 BGP 路由表来完成 IP-to-AS 的映射。首先，从 Route Views 所提供的路由表中提取 AS 路径列表。

(2) DIMES<sup>[8]</sup>项目：DIMES 项目是由以色列的特拉维夫大学主持的项目，开始于 2004 年，由以色列科学基金会资助。DIMES 采用分布式的架构来测量互联网拓扑的结构及其演化，它的探测节点与 CAIDA 的不同，不再是少量的以探测为唯一任务的特定节点，而是自愿参与这个项目的大量个人主机，每个主机上以后台程序的形式运行一个轻量级的测量代理，通过使用基于 UDP 和 ICMP 的 Traceroute 及 Ping 来探测由中心服务器指定的目的地址，这样满足了拓扑测量中探测节点位置多样性的要求，可以得到更多的拓扑信息。到 2006 年，DIMES 已在全球拥有了 26899 个探测点，覆盖 128 个国家。

(3) IPlane<sup>[9]</sup>项目：IPlane 是由美国华盛顿大学开展的项目，目的在于通过构建带有标签的互联网拓扑，结合相应路径的性能测试结果，有效地预测互联网任意两个主机间得路径及其各项性能参数，通过准确地预测端到端路径性能，提升覆盖网络服务的用户体验。IPlane 在多个 PlaneLab 节点及 Traceroute 服务器上使用 Traceroute 对互联网拓扑进行测量，获得 IP 级拓扑，以此为基础可推断出路由器级以及 AS 级拓扑。

以上的测量方法得到的均是 IP 级拓扑，要得到 AS 级网络拓扑，则采用了 BGP 路由表来完成 IP-to-AS 的映射。首先，从 Route Views 所提供的路由表中提取 AS 路径列表，每条路径中最右边的 AS 即是这条路径所对应的目的地所属 AS，以此为基础便可将 IP 路径转换为 AS 路径，从而得到 AS 级拓扑。这样得到的 AS 级拓扑会引入很多误差，其原因诸如源 AS、AS 聚合等。为克服这一误差，CAIDA 正在致力于计划将 IP 路径转换为路由器路径，再将路由器分配到特定 AS 用以得到 AS 路径，最后得到 AS 级网络拓扑。

### 1.2.3 其他 AS 级网络拓扑识别方法

(1) 基于 IRR 的 AS 级网络拓扑识别：互联网路由注册（IRR）<sup>[10]</sup>是一组全球分布的路由策略注册数据库，其注册信息由人们自愿填写，可以查询公布的注册路由的地址信息等，包含了基于 BGP 和 Traceroute 测量没有探测到的路径信息，

可通过查询 IRR 数据库获取 AS 路径,从而获得全球 AS 级网络拓扑。但由于不是所有的用户都会公布自己的注册信息,再加上数据库已经很长一段时间没有更新,导致该数据库已不能满足测量实时拓扑的需求。

(2) 基于 WHOIS 数据库的 AS 级网络拓扑识别: WHOIS<sup>[11]</sup>是用来查询域名对应的 IP 地址以及所有者等信息的传输协议,早期的 WHOIS 查询多以命令列界面(command line)存在,简单说,WHOIS 就是一个用来查询注册域名的详细信息的数据库。RIPE 的 WHOIS 数据库覆盖了现有阶段的绝大多数拓扑信息,跟 IRR 数据库类似,可根据查询 WHOIS 数据库来获取 AS 路径。

(3) The Internet Topology Zoo 项目: The Internet Topology Zoo<sup>[12]</sup>项目是由澳大利亚的阿德莱德大学(The University of Adelaide)主持的项目,由澳大利亚政府资助,该项目的发起人认为现有拓扑测量方式无法得到准确的拓扑,需要从新的角度思考这个问题。不同于主动或者被动测量,该项目致力于从网络运营者所公布的数据中获得该网络的拓扑,一般情况下的网络运营商会发布许多关于其网络的各种形式的信息,甚至在一些法律约束的文档中描述他们的网络,例如公司的年度汇报等等。通过收集这些信息,便可以得到该网络的准确拓扑。该项目迄今为止已收集到 250 个网络拓扑,并对其进行了统计分析、绘制以及其他研究。

### 1.3 本文研究内容

本文研究的是 AS 级网络拓扑识别,主要通过收集全球实际网络测量的数据,对数据进行筛选和合并,并用特定的方法将数据进行转化和处理,从而恢复出相对实际情况比较接近的 AS 级网络拓扑图。但是在实际的实现过程中,有部署的网络探测点不够全面的情况,也有用基于 Traceroute 的数据源得到 IP 级拓扑数据之后的 IP-to-AS 的映射问题导致得到的 AS 级拓扑数据不完整和不准确的情况,还有在得到 AS 级拓扑数据之后的分析方法不完善的情况,因此,以上三个问题形成了本文的研究重心。

本文针对以上三种问题提出了对应的完善方案。主要思路是,首先利用现有的基于 BGP 的被动测量方法,通过收集 BGP 路由信息得到该识别方法下的 AS 级网络拓扑,然后利用基于 Traceroute 的主动测量方法,通过收集 CAIDA 部署的主动测量平台 Ark 数据得到 IP 级拓扑数据,并以此为基础,使用基于路径对匹配的 IP-to-AS 算法,将 IP 以尽可能最低的错误率映射到相应的 AS,得到相应的 AS 级拓扑数据,最后用 Traceroute 的信息作为补充,将 Traceroute 得到的数据对 BGP 得到的数据进行补充和修正,得到比较完整的全球 AS 级网络拓扑。其主要内容和创新如下:



(1) 提出 Traceroute 信息和 BGP 信息结合的 AS 级网络拓扑识别方法：由于基于 BGP 的被动测量和基于 Traceroute 的主动测量方法看待问题的层面不一样导致两种方法得到的 AS 级拓扑均有不完整很片面的问题，而现有的 AS 级拓扑测量的方法均是采用单一的数据源进行的拓扑测量，且均是采用基于 BGP 的被动测量方法对 AS 级网络拓扑进行识别，要获取完整的网络拓扑信息单靠单一的数据源是不够的，所以本文提出一种用 Traceroute 信息补充 BGP 测量的方法，将两种测量方法结合起来使用的拓扑测量方法来解决这一问题，提出了一套新的 AS 级拓扑测量流程，对现有的基于 AS 级拓扑测量方法进行了改进和创新。

(2) 提出结合 LG 算法和 DPP 算法的 AS 连接关系算法：在得到 AS 级网络拓扑之后进行对 AS 连接的分析过程中，分析 AS 连接之间的关系是研究互联网性能、健壮性和演化过程至关重要的指标，由于 AS 之间的连接关系涉及到商业机密，所以并没有相应的数据库查询 AS 之间的连接关系，学者只能通过理论上的推断对 AS 连接关系进行推测。而现有的 AS 连接关系算法只能获得 (1) 中得到的 AS 连接的部分关系，且正确率存在一定的缺陷。本文提出一种基于现有两种算法的 AS 连接关系算法，该算法能够很好地结合 LG 算法和 DPP 算法的优点，同时得到的结果也能满足推断 AS 连接关系的全面性和准确性。

本文将两种层面的数据源结合起来使用的这种 AS 级网络拓扑识别方法，能一定程度上提高得到 AS 级网络拓扑的完整性和准确性，而在此流程中使用到的 AS 连接关系算法，更是在现有研究的基础上提高和完善，为今后的研究奠定了一定程度上的基础。

## 1.4 本文章节安排

总共将全文分为五个章节，具体每一章节的内容安排如下：

第一章，首先介绍 AS 级网络拓扑识别的研究意义和相关背景。后面则描述了 AS 级网络拓扑识别的研究现状，提出了现有研究的不足和缺陷，明确了本文的主要研究目标和创新点。

第二章，重点介绍了现有的 AS 级网络拓扑识别方法的有关知识。首先根据测量方法的不同将 AS 级网络拓扑测量方法分为主动式和被动式，分别对各种不同的网络拓扑识别方法进行详细介绍。在介绍基于主动测量的网络拓扑识别方法时，强调了这种方法得到的拓扑是实际的网络拓扑，即 IP 级的网络拓扑，要得到本文的 AS 级拓扑，必然要在 IP 级的基础上进行 IP 到 AS 的映射，所以在这一部分进行了 IP 到 AS 的映射方法介绍。

第三章，介绍 BGP 信息和 Traceroute 信息结合的 AS 级网络拓扑识别方法。

在本章中首先阐述了本文要解决的问题和相应的理论基础，然后提出了 BGP 信息和 Traceroute 信息结合的 AS 级网络拓扑识别方法的思想 and 流程，并按照流程进行了实际数据的收集和处理工作，最后得到了相应的 AS 级网络拓扑连接的数据，对数据信息分析，得到了相应的结论，验证了该方法的可行性，并与现有的基于 BGP 的方法进行了对比研究。

第四章，介绍 AS 级网络拓扑数据的一种研究方法，即对 AS 级网络之间的连接关系进行了讨论。本章首先引入了 AS 连接关系的概念，说明了解 AS 之间连接关系的主要性，然后阐述了现有的问题，提出将现有的 LG 算法和 DPP 算法结合的 AS 连接关系推断算法，并用第三章得到的 AS 连接数据进行验证，与 CAIDA 公布的权威数据进行对比，得到相应结论。

第五章，主要是对全文进行总结，并且对以后的工作做出展望。

## 第二章 AS 级网络拓扑识别方法概述

目前网络拓扑识别主要依靠分析网络测量获得的数据，以发现目标网络间有意义的网络元素和它们的连接关系。但由于互联网的规模过于庞大，要完整地测量出全球的 AS 级网络拓扑无疑是一项巨大的工程，不同的测量方法得到的 AS 级网络拓扑也不尽相同，这既是方法决定的，也跟相关研究机构和项目部署的探测点和数据收集点有密不可分的关系。主要的测量方法可分为主动式和被动式，这两大类的测量方法不尽相同，本章将对现有的这两大类 AS 级网络拓扑识别方法进行详细描述。

### 2.1 基于主动测量的网络拓扑识别方法

目前现有的一些基于主动测量的 AS 级网络拓扑识别主要是基于 ICMP 协议的拓扑识别方法，主要包括 Ping 技术和 Traceroute 技术等。首先介绍 ICMP 的基本原理和具体的网络拓扑识别方法。

作为 TCP/IP 的一个子协议，ICMP<sup>[13]</sup>（Internet Control Message Protocol，互联网控制报文协议）是配合 IP 协议使用的，通常是在路由器和主机之间传递控制消息。ICMP 的报文格式图 2-1 所示，ICMP 包的包头长为 8 字节，其中前 4 字节是固定格式，包含 8 位类型字段，8 位代码字段，以及 16 位校验和，后 4 个字节根据包的类型不同来取不同的值。

在网络拓扑识别中，ICMP 的功能主要有四类：一是用 ICMP 请求、回应报文实现 Ping 的功能；二是用 ICMP 实现广播 Ping；三是用 ICMP 的子网地址掩码请求和应答报文获得目标网络的子网掩码；最后一个是利用设置 ICMP 报文的 TTL 字段来获取探测点到目标 IP 地址的路径信息，也就是 Traceroute 技术采用的方法。

类型	代码	校验和
不同类型和代码不同的内容		

图 2-1 ICMP 的报文格式

ICMP 报文包含差错报文和查询报文，Ping 和 Traceroute 使用了其中的部分报

文，这些报文的类型表 2-1 所示。

表 2-1 ICMP 报文

类型 (TYPE)	代码 (CODE)	描述 (DESCRIPTION)	报文类别
0	0	回显应答 (ping 应答)	询问
3	0	网络不可达	差错
	1	主机不可达	差错
	3	端口不可达	差错
8	0	回显请求 (ping 请求)	询问
11	0	传输期间 TTL 为 0	差错

### 2.1.1 基于 Ping 的拓扑识别方法

Ping 程序<sup>[14]</sup>的主要功能不仅包括记录探测目的节点的往返时延 (RTT)，还包括检测目的主机的可达性问题，基于 Ping 的网络拓扑识别主要利用了 ICMP 报文中的两个报文类型：一个是 Ping 请求，一个是 Ping 应答报文。

Ping 以异步的形式收到和发送 ICMP 数据包，源主机发送 ICMP 回送请求报文（类型：8，代码：0），若终点已加电，则响应 ICMP 回送应答报文。目的端在收到 ICMP 数据包之后，复制 ICMP 回显应答报文中经过的 IP 地址到地址清单中，同时将 ICMP 回显应答报文返回过程中经过的 IP 地址也复制到该地址清单中，这样，地址清单就可以获得从源到目的中间经过的所有 IP 地址。

但是使用 Ping 存在一些不可忽视的问题。当对一个不活动的或者不存在的主机进行 Ping 时，为了减轻丢包问题对测量结果的影响，一般的发送时间为 2 到 3 个 Ping 包的使用时间，但这样一来代价就会增大；而如果使用广播 Ping，一些网络中的主机并不会对广播 Ping 响应，甚至不会转发广播包。所以，对于目前的复杂的网络环境，基于 Ping 的测量方法并不实用。

### 2.1.2 基于 Traceroute 的拓扑识别方法

在 UNIX 中的 Traceroute<sup>[15]</sup>，也就是对应 Windows 中的 Tracert 程序，都是用来跟踪一个分组从源点到终点的路径。Traceroute 使用了 ICMP 报文的两个报文（超时报文和终点不可达报文）和 UDP 服务来找出一个分组的路由。图 2-2 可以说明程序 Traceroute 的工作原理。

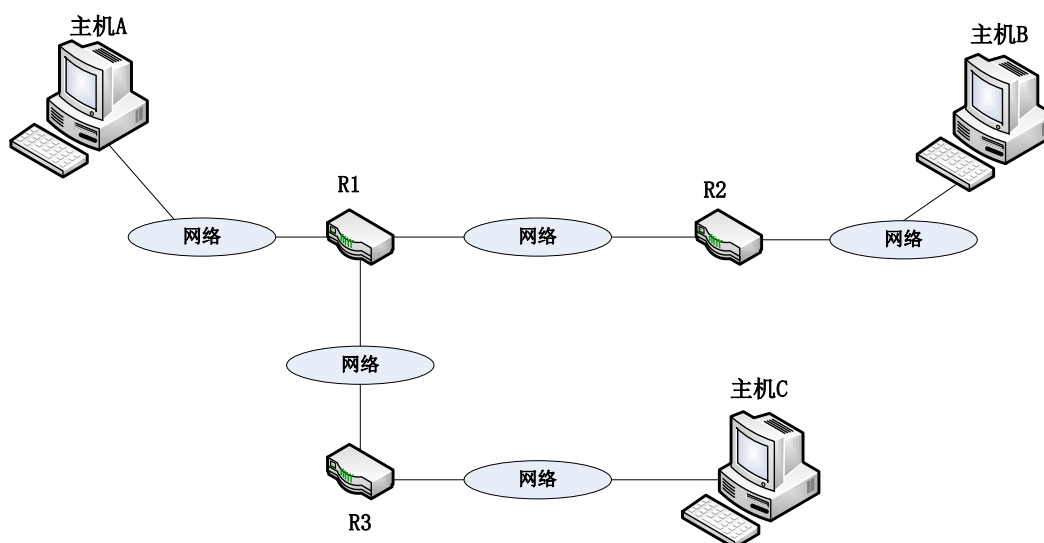


图 2-2 Traceroute 的工作原理

只要给出这个拓扑图，就知道分组从主机 A 到主机 B 要经过路由器 R1 和 R2，但是在大多数时间，实际是不知道拓扑结构的。在 A 和 B 之间可能会有很多路由器。Traceroute 使用 ICMP 报文和 IP 分组的生存时间（TTL）字段就可以找到这一条路由。

1、Traceroute 使用以下步骤找到路由器 R1 的地址和主机 A 到路由器 R1 之间的往返时间。

(1) 主机 A 的程序 Traceroute 使用 UDP 向终点 B 发送一个分组，这个报文被封装成 IP 分组，其 TTL 为 1。这个程序记录该分组的发送时间；

(2) 路由器 R1 收到这个分组，把 TTL 值减到 0，路由器 R1 丢弃这个分组。但是路由器 R1 要发送一个超时 ICMP 报文（类型：11，代码：0），表示 TTL 值为 0 而该分组被丢弃；

(3) 主机 A 的程序 Traceroute 收到这个 ICMP 报文，利用封装 ICMP 的 IP 分组的源地址找到路由器 R1 的地址，这个程序记录下该分组的到达时间。步骤（1）的时间和这个时间之差就是往返时间。

Traceroute 技术就是重复步骤（1）到（3）三次，以便得到往返时间更好的平均值。第一个往返时间可能会比第二或第三个大得多，因为程序 ARP 找到路由器 R1 的物理地址需要花费时间，对于第二和第三个往返时间，ARP 可使用高速缓存中的地址。

2、Traceroute 重复前面的步骤找出路由器 R1 的地址，以及主机 A 和路由器 R2 之间的往返时间。但是，这一步设置 TTL 为 2，因此路由器 R1 转发这个报文，而路由器 R2 丢弃它，并发送 ICMP 超时报文。

3、重复前面的步骤找到主机 B 的地址，以及主机 A 和主机 B 之间的往返时间。当主机 B 收到这个分组时，就把 TTL 值减 1，但并不丢弃这个报文，因为现在报文已经到达了它最后的终点。此时 Traceroute 采用另一种策略将 ICMP 报文发回给主机 A，UDP 的目的端口被设置为 UDP 协议不支持的一个端口，但主机 B 收到这个分组时，它找不到可以接收交付的应用程序，于是它丢弃了这个分组，并向主机 A 发送一个 ICMP 终点不可达报文（类型：3，代码：3），因为路由器不检查 UDP 首部，所以路由器 R1 和 R2 中并没有发生此情况。Traceroute 记录了到达的 IP 数据报的目的地址，并记下往返时间，收到代码为 3 的终点不可达报文就表示整个路由已经找到，就不会再发送更多的分组。

### 2.1.3 IP-to-AS 映射问题

用以上两种测量方法得到的数据均为 IP 地址数据，要对 AS 级网络拓扑进行识别，就必须进行 IP 转化为 AS 的步骤。一般通过查询 BGP 路由表，找到 IP 地址和所属 AS 的对应关系，然后再将 IP 链路映射为 AS 关系的路径<sup>[16]</sup>。图 2-3 是具体流程图。

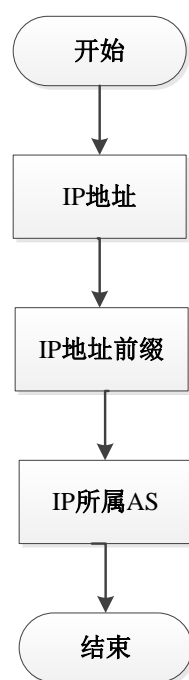


图 2-3 IP 映射 AS 流程图

从流程图可知，大体步骤有两步。第一步：IP 地址→最佳 IP 地址前缀。对于每一个 IP 地址，按照 IP 地址所在的子网映射到它的最佳 IP 地址前缀，但是存在各种各样的原因导致一个 IP 地址同时匹配多个 IP 地址前缀的情况，此时则选取最

长的 IP 地址前缀匹配长度对应的 IP 地址前缀作为这个 IP 地址相应的 IP 地址前缀。举个例子，如果 IP 地址 192.112.39.8 同时和 IP 地址前缀 192.112.0.0/15 和 192.116.32.0/19 匹配，则取最长匹配前缀的 192.116.32.0/19 作为其最佳匹配。

第二步：最佳 IP 地址前缀→所属 AS。这一步骤主要是需要将上一步得到的最佳 IP 地址前缀对应到相应的所属 AS，实际就是 IP 地址映射到 AS 的过程。现有的最常用的方法就是利用 BGP 路由表项的信息内容完成该过程。BGP 路由表的表项由 Network、Next Hop 和 Path 等部分组成，如表 2-2 中的例子所示。只需要 IP 地址前缀和 AS 路径信息，即对应表中的 Network 和 Path 部分。例如表 2-2，就是一个 BGP 路由表的例子，Origin(AS\_PATH)分别为 3292 和 14608，实际就是源地址经过的下一跳 IP 对应的 AS，此处的下一跳 IP 即是表中对应的 Next\_hop 部分。

表 2-2 BGP 路由表表项

NETWORK	NEXT HOP	METRIC	PATH
6.1.0.0/20	83.88.48.13	0	3292 7018 4755 9829
24.233.128.0/17	209.161.175.4	0	14608 4323 1668 10796

## 2.2 基于被动测量的网络拓扑识别方法

常见的基于被动测量的 AS 级网络拓扑识别方法主要包括基于 SNMP 的拓扑识别、基于 ARP 的拓扑识别、基于 RIP 的拓扑识别、基于 OSPF 的拓扑识别和基于 BGP 的拓扑识别方法等等。

### 2.2.1 基于 SNMP 的拓扑识别方法

SNMP，即简单网络管理协议<sup>[17]</sup>，它使用 TCP/IP 对网络中的设备进行管理、维护和监视。它包括几个管理模型：管理器和代理、SMI（管理信息结构）、MIB（管理信息库）以及 SNMP。一些通用规则例如命名对象和定义对象类型以及将对象进行编码等都由 SMI 定义。

基于 SNMP 的被动测量方法简单来说就是通过查询 MIB 维护和保存的路由表，从而提取路由表中的有用信息得到相应的网络拓扑。利用此方法的网络测量过程和算法比较简单，易于操作，MIB 的信息保持随时更新，所以总是能反映网络的最新情况，但是此方法也有局限。能运用此方法的前提是设备必须支持 SNMP 协议，但不是所有的设备都支持该协议，并且不同厂家的设备相应的 MIB 有所不同，和标准的 MIB 略有出入，所以在获取 MIB 中的路由表的过程中会有所不同，直接

影响最后得到的网络拓扑。

## 2.2.2 基于 OSPF 的拓扑识别方法

OSPF（开放最短通路优先）协议<sup>[18]</sup>是工作在一个自治系统（AS）中的一种域内路由选择协议，它使用链路状态路由算法，使用一个属于集团内部的路由协议来控制一个自治系统。OSPF 维护一个从可用路由器和链路状态信息构造的网络信息，可作为网络层的路由表，数据包完全基于 IP 数据包中的目的 IP 地址。基于 OSPF 的被动测量就是通过查询 OSPF 维护的这个数据库，来获取网络中的路由信息，从中提取有用的网络拓扑数据从而恢复出网络拓扑。

由于 OSPF 是一种动态路由协议，能够实时监视网络的情况，所以用这种测量方法得到的数据能够反映实时网络的状态，能够很好地描述真实的网络拓扑，但是这种测量方法却不能收集到局域网中的网桥和主机的路由信息，因为 OSPF 是域内路由选择协议，不适合于自治系统之间的路由选择。

## 2.2.3 基于 ARP 的拓扑识别方法

地址解析协议（ARP）<sup>[19]</sup>解决 IP 地址到物理地址（MAC 地址）的映射，ARP 管理一个自己的 ARP 映射表（ARP 缓存表），地址解析协议反映了网络中主机的 MAC 地址和 IP 地址之间的映射关系。ARP 缓存表中存有路由器或者交换机与各个物理接口相连的以太局域网中的网络设备，然后再分析出网络中的其他路由器和交换机，就可以得到整个以太网的拓扑结构。但是基于 ARP 的网络测量方法只能适用于一般规模的局域网的拓扑测量，无法测量网络规模过大的网络中的所有网络设备，所以一般的网络拓扑测量不会使用该方法。

## 2.2.4 基于 BGP 的拓扑识别方法

边界网关协议（BGP）<sup>[20]</sup>是一个使用路径向量路由选择的域间路由选择协议，是唯一一个用来处理 Internet 大小的网络协议，主要用以和自治系统之间交换可达信息和路由信息。BGP 路由表的格式和内容如图 2-4 所示。

Network	Next_hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
---------	----------	--------	--------	--------	------

图 2-4 BGP 路由表格式

在利用 BGP 识别 AS 网络拓扑时，主要就是收集 BGP 的路由表信息，从这个路由表中提取出有用信息，有用的信息包括 Network 和 Path 这两个部分。Network



对应这条路由中的源 IP 地址前缀，Path 就是源到目的中间经过的路径，但是 BGP 路由表中的 Path 是对应的 AS 路径，没有以 IP 地址的形式输出。例如表 2-2 中的第一行数据，6.1.0.0/20 是源 IP 地址前缀，83.88.48.13 是源 IP 到目的地址经过的下一个 AS 的 IP 地址，{3292 7018 4755 9829}就是这一路由下的一个 AS 路径，而需要注意的是，这一跳 AS 路径是从 Next\_hop 这一 IP 地址开始记录的，也就是 3292 是 83.88.48.13 所在的 AS，9829 是目的 AS。基于 BGP 的拓扑识别方法是目前采用最广泛的 AS 级网络拓扑识别方法，原因在于该方法发展成熟且操作简便，只需要部署足够的数据收集器就可获得相应的 BGP 路由表数据，从中再提取出相应的 AS 路径数据，但是该方法的局限性在于看待网络拓扑的角度，BGP 信息是控制层信息，位于网络的上层，无法获取出于网络下层的网络连接，而网络中下层的连接也是十分丰富的，所以要获取更完善的 AS 级网络拓扑，需要寻求一种新的方法来弥补这一方法的缺陷。

### 2.2.5 基于 RIP 的拓扑识别方法

RIP，即路由信息协议<sup>[21]</sup>，是一个自治系统（AS）中使用的域内的路由选择协议，也是一个基于距离向量的路由选择协议，直接实现距离向量路由选择。RIP 的定时计时器可以控制报文的发送，协议中规定这个计时器必须设置为 30 秒，到计时器从 30 减到 0 时，RIP 节点就会发送包含自身信息的全部路由表报文到自己的相邻节点，要是达到截止期计时器的时间（180 秒）没有收到更新报文，则认为这个路由器已经过期，表示终点不可达。通过这样不断向自己的邻居发送路由表，可以获取到整个网络的路由表，从而从路由表中提取出网络拓扑数据信息，测量出整个网络拓扑。

但是 RIP 也面临和 ARP 一样的问题，即只适用于小规模的网络。RIP 规定其网络中所经过的链路数量不能超过 15，所以并不适合于大规模网络的测量。

## 2.3 本章小结

在本章中，主要介绍了目前 AS 级网络拓扑测量的方法，主要从主动测量和被动测量两个方面分别介绍了现有的一些主流方法，并评估了各个方法的优缺点。值得注意的是，基于主动测量的方法实际就是利用一些探测点，主动向目的地址发送数据包，通过分析返回的报文信息来获得从源到目的地址经过的路径，这个方法得到的路径实际是 IP 级别的路径信息，要获得 AS 的拓扑数据，需要从 IP 级别转化为 AS 级别，但是目前大多数学者并不常用这种方法来获得 AS 级拓扑，原因在于 IP 到 AS 的映射不准确的问题，主要是由于路由过滤、路由聚合、多源 AS

和 IXP 的原因导致 BGP 路由表中的源 AS 不准确，第三章将就这个问题进行具体的讨论。而基于被动测量的方法实际上就是通过不同网络中的协议获取路由表，从路由表中提取路径信息，只是由于收集数据的数据采集点有限和网络协议适用的网络规模有限，用这种方法获得全球的 AS 级网络拓扑同样存在局限。

两类测量方法有所不同，但均没有错误，只是两种方法看待问题的角度不一样。主动测量反映的是数据实际经过的链路，而被动测量反映控制层面上期望数据经过的路径，如果能结合两种层面的测量方法，那就可以从多角度获得数据，得到更完整的 AS 级网络拓扑，这就是一个需要进一步讨论的问题。

## 第三章 基于数据源结合的 AS 级网络拓扑识别方法

第二章中提到的各种 AS 级网络拓扑测量方法均是目前研究学者使用的主要几个常用方法,而基于主动测量的方法中的基于 BGP 的 AS 级网络拓扑识别方法,由于数据易于大规模获取且方法简便易行,可从 BGP 路由表中直接提取出 AS 路径信息,所以,该方法是目前获取 AS 级网络拓扑最常用的方法。基于 BGP 路由表信息方法的一个优势在于它们获取到的连接信息被认为是可靠的,如果一个 AS 连接在 BGP 路由表项中出现,则几乎可以肯定这个连接的存在。然而,要发现更完整的全球 AS 网络拓扑,基于 BGP 路由信息的方法看待问题的视角是有局限性的,由于 BGP 提供的信息是控制层信息,根据它的路由策略,它反映在 BGP 路由层面上期望数据经过的链路,所以收集 BGP 路由表的数据收集器一般是在网络中比较上层的位置,这就导致无法发现更多下层的连接,这个问题会在下文中进行详细讨论。

在本章中,首先介绍本文采用的一种补充基于 BGP 路由信息测量的方法,然后具体介绍该方法的思想 and 流程,利用基于 Traceroute 的网络测量方法来补充基于 BGP 路由信息方法的不足,最后得到 AS 拓扑数据,并将该数据结果与用单数据源(BGP 数据源)得到的数据进行对比,得出相应结论。

### 3.1 问题的提出

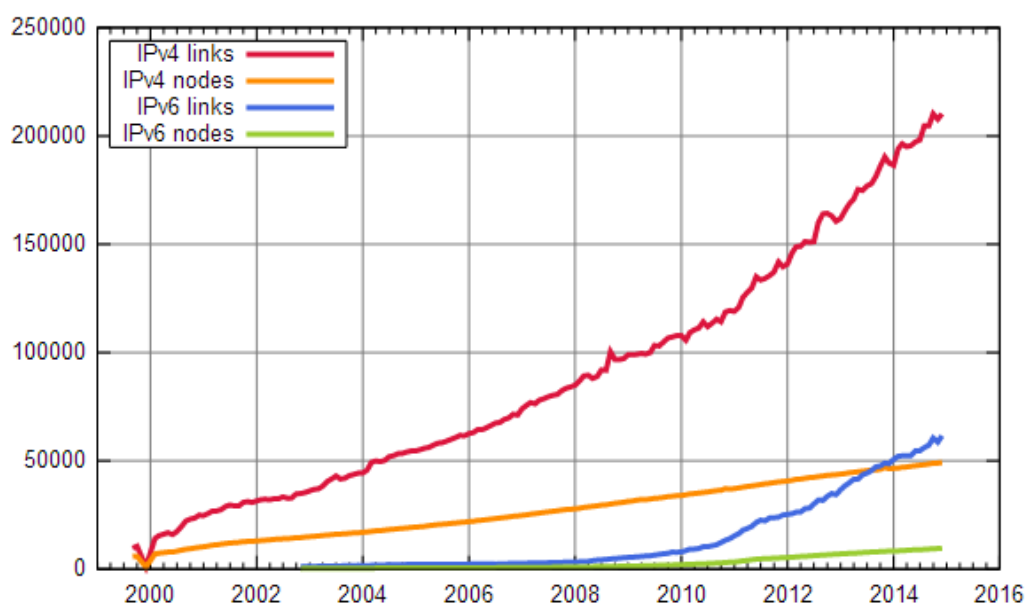


图 3-1 网络拓扑增长趋势图

根据第一章已经介绍的基于 BGP 路由信息收集的 AS 网络拓扑识别方法，有一个相对最全面方法的就是 Topology Map 的项目，它可实时收集全世界所有公开的 BGP 路由表数据（包括 Route Views、RIPEs RIS、PCH 和 Internet2），包含上百个数据收集器，分布在世界各地，图 3-1 是该项目在官网上公布的从 2000 年到目前为止网络拓扑的增长趋势图，网络的规模呈现逐步递增的趋势。而 Yi Hua<sup>[24]</sup>的研究中指出，相比实际的 AS 级网络拓扑，利用这种 BGP 路由信息收集的方法仍然缺失 25%-50%左右的 AS 连接，说明用这一方法得到的拓扑仍然不是完备的。如果要深究其原因，就必须引入两个概念，即 AS 的连接关系和 No-Valley（无谷）准则。

1、AS 连接关系：所谓 AS 的连接关系，即是两个 AS 之间的商业关系，这个关系决定了 AS 间的路由策略，这一关系随着互联网的商业化发展应运而生，不同管理机构的 AS 通过商业合作关系共同路由互联网的流量。也就是说，这里将 AS 网络拓扑抽象为每个 AS 为节点，AS 与 AS 之间连接的边为有向图，如图所示，二者之间的关系可以分为以下几类：

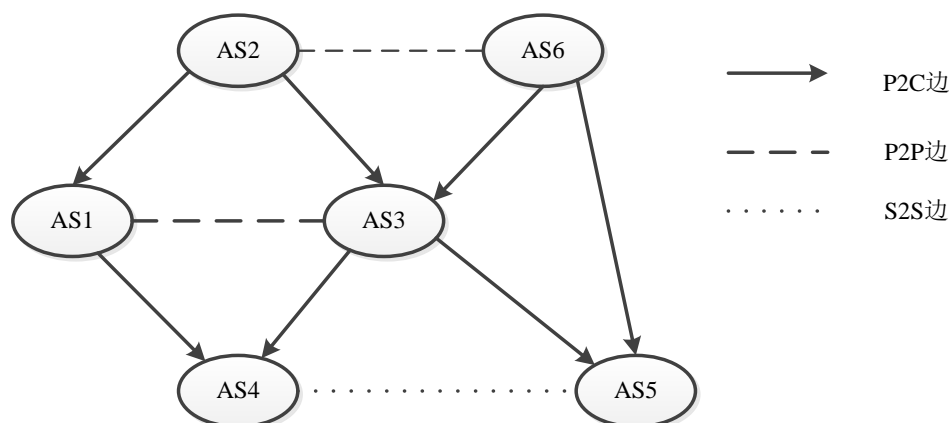


图 3-2 AS 连接关系图

（1）P2C（Provider to Customer）：提供商和顾客的关系，作为提供商的 AS 为顾客 AS 提供流量传输服务；

（2）C2P（Customer to Provider）：顾客和提供商的关系，跟 P2C 中的两 AS 关系相反；

（3）P2P（Peer to Peer）：对等关系，这种关系中的两个 AS 为各自的客户提供流量传输服务；

（4）S2S（Sibling to Sibling）：兄弟关系，双方 AS 一般属于同一注册机构，互相为各自提供流量传输服务。

获得 AS 之间的连接关系，可以了解网络的体系结构，也可以深入地理解 AS

级网络的拓扑特性，也可为本所研究的完整的 AS 级拓扑提供理论依据。

2、No-Valley 准则：即无谷准则，最先由 Gao<sup>[14]</sup>在 2001 年提出，该准则用于自治系统（AS）间的路由策略，这个准则估计 P2C 和 P2P 关系的路由信息交换方向。这个准则有四个小项：

准则一：一条 AS 路径中最多只有一条 P2P 连接；

准则二：一条 AS 路径中，如果有一条 P2C 连接，它后面就不可能是 C2P 连接，只可能是 P2C 或 S2S 连接；

准则三：P2C 连接后不可能是 P2P 连接；

准则四：P2P 连接后不可能是 C2P 连接，只可能是 P2C 或 S2S 连接。

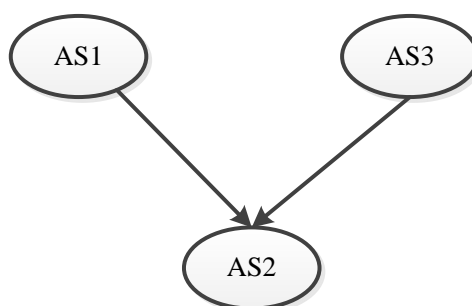


图 3-3 No-Valley（无谷）准则下的 AS 路径

例如，图 3-3 中假设 AS1 和 AS2 是 P2C 关系，AS2 和 AS3 是 C2P 关系，那这条路径{AS1, AS2, AS3}就是一条无效路径，因为 P2C 连接之后不可能是 C2P 连接，这就是 No-Valley（无谷）准则这个名字的由来。

根据这个准则，可以得出以下推论：

推论一：P2C 关系中，提供商 AS 向自己的顾客 AS 公开其所有的路由连接信息，顾客 AS 向提供商 AS 公开自己下层的路由连接信息；

推论二：P2P 关系中，二者共享自己所有下层的路由连接信息，但是不共享同层或者上层的路由连接信息。

有了上面的 No-Valley（无谷）准则以及推导出来的结论，便可以分析基于 BGP 路由信息测量的方法的不足。图 3-4 是我们能发现的八种因探测点的部署不同而导致发现连接数有差别的情况。

图 3-4 中空点为部署的探测节点，实线表示可以探测到的连接，虚线表示没有探测到丢失的连接，每条连接标注了 AS 连接的类型，双向线代表 P2P 连接，单向线则代表 C2P 连接。图中（1）（2）表示所有边都能被探测点探测到；图（3）中由于 P2P 连接只能共享其下层路由连接信息，所以同层和上层的均探测不到，图（4）中由于 C2P 连接中提供商 AS 只能得到顾客 AS 下层的路由连接信息，所

以剩下的两条连接也是探测不到的，剩下几个图也可根据 No-Valley（无谷）准则和相应的推论可以推断出来。

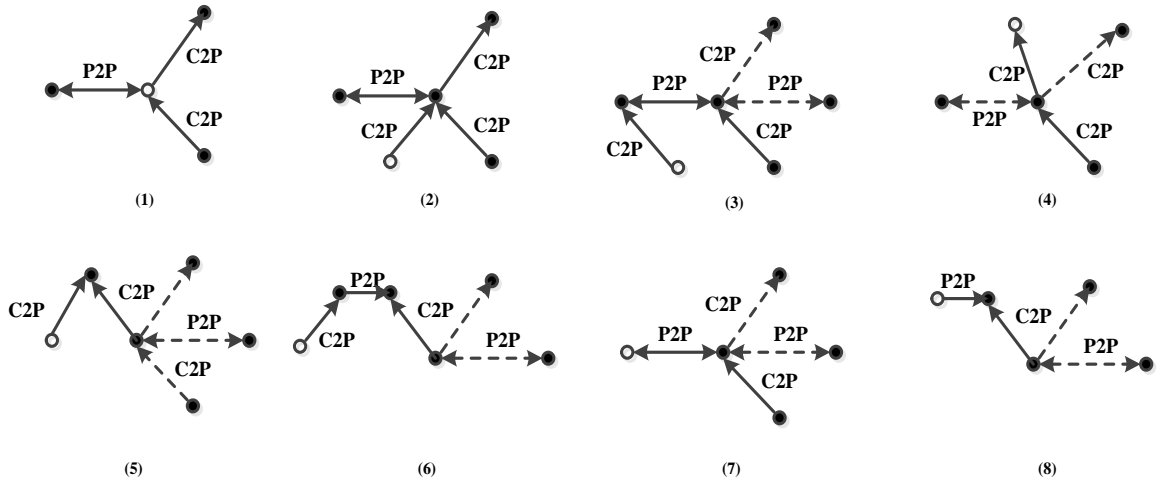


图 3-4 部署探测节点位置不同的发现连接数对比

由以上结论可以看出，探测点的部署跟发现拓扑的 AS 连接有很大的关系，而基于 BGP 路由信息收集的被动测量方法，本身是在控制层面上收集 BGP 路由表，所以数据收集器都是部署在 AS 级网络比较上层的位置，这样一来，下层的 AS 连接，特别是具有 P2P 连接关系的 AS 连接探测不到，这样得到的 AS 级网络拓扑必然不够完善。如果能引入位于 AS 级网络比较下层的探测节点，弥补基于 BGP 路由信息方法的不足，那么就会得到相对较完整的 AS 级拓扑。

基于 Traceroute 的方法正好满足这样的需求。这种方法属于数据层面，反映数据实际的经过的链路，也就是说，该方法的探测点是位于网络中比较下层的位置的。但是这方面现有的研究比较落后，之所以没有用该方法对基于 BGP 的方法进行补充，主要原因在于 Traceroute 得到的是 IP 级网络，要得到 AS 级网络必然要经历 IP-to-AS 的映射，但是由于多 AS 前缀（MOAS-prefix）、无法映射（No-mapping）、无响应（No-response）等原因，这个映射存在很大的不准确性，研究学者们对这方面进行了很多深入的研究。本文采用一种到目前为止最为准确的 IP-to-AS 的映射方法，从而使基于 Traceroute 主动测量的方法补充基于 BGP 被动测量的方法变得可行。

由于两种测量方法在理解问题的层面上不一样，所以可以利用上一节介绍的方法，分别得到两种方法的 AS 拓扑数据后，在进行修正、补充和合并。

Topology Map 项目的互联网研究实验室（IRL）是目前为止使用 BGP 被动测量方式下最全面的方法，所以使用该项目下收集到的数据作为 BGP 方法得到的数

据，基于 Traceroute 主动测量方法的所有探测节点的探测数据，采用 CAIDA 的 Ark 部署的探测点探测到的数据，得到 IP 级网络拓扑数据，再采用基于路径对匹配的 IP-to-AS 映射算法的到 IP-to-AS 映射表，从而得到 Traceroute 的 AS 拓扑数据。

其中，由于两种方法部署的探测点有同属一个 AS 的情况，在这种情况下需要对两种数据进行对比、修正和合并，最后将 Traceroute 的 AS 拓扑数据作为补充 BGP 的 AS 拓扑数据，从而得到较完整的 AS 拓扑。

## 3.2 基于数据源结合的拓扑识别方法

在本节中，将详细介绍该方法的具体实现过程，然后将所得数据与现有的基于 BGP 信息的方法进行对比和分析。

### 3.2.1 拓扑识别方法流程

该方法的流程图如图 3-5 所示。输入分别为 Traceroute 的 AS 数据以及 BGP feeder（BGP 数据收集器）数据，其中 Traceroute 的 AS 数据根据 CAIDA 部署的主动探测设施 Ark 收集来自全球的 IP 地址以及 IP 连接，然后通过 IP-to-AS 的映射，映射到 AS 级别上，得到 Traceroute 的 AS 数据；BGP 数据是收集 IRL 公布的部署在全球的 BGP 数据收集器的数据，从 BGP 路由表中提取出来 BGP 的 AS 数据。具体过程可分为以下几步：

首先判断两种方法的探测点是否属于同一个 AS：如果属于不同的 AS，则直接将 Traceroute 的数据补充进 BGP 的数据集里；如果属于同一个 AS，则判断路径是否具有相同源目的地址：要是不同源目的地址，则直接补充进 BGP 数据集；如果是相同源目的地址，比较二者的 AS 路径是否一致，不一致则用 BGP 的数据替换，以 BGP 的数据为准；合并所有情况下得到的数据得到最后的 AS 拓扑数据。

其中需要补充的是，其中 Traceroute 的 AS 数据是根据 Ark 探测点收集到的原始 IP 拓扑的数据，根据 IP-to-AS 的映射过程得到的，具体的实施方案将在下文中进行详细解释。

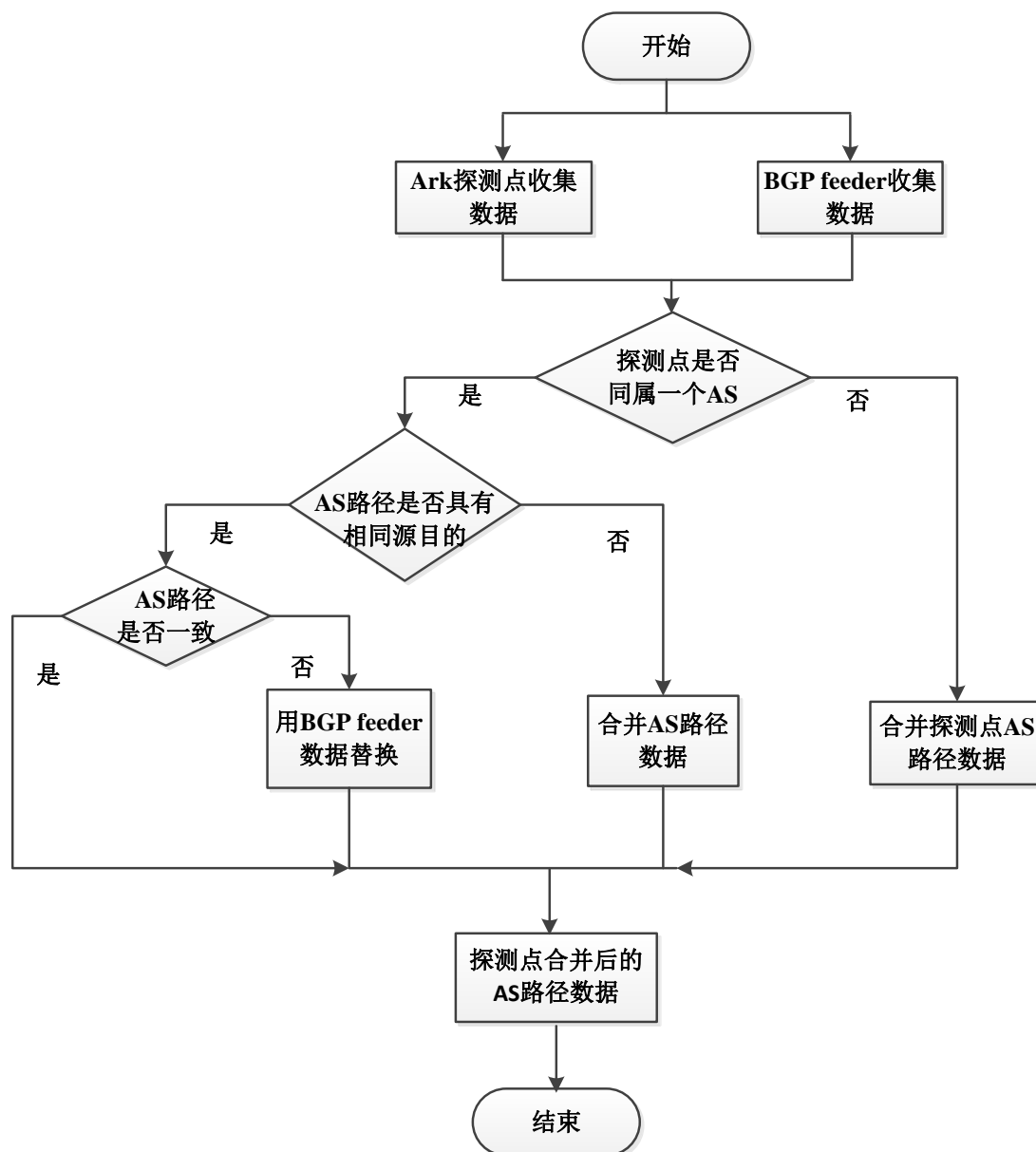


图 3-5 AS 级网络拓扑识别方法流程图

### 3.2.2 BGP 路由信息数据收集

本章采用的 BGP 实验数据来自 Topology Map 项目的互联网研究实验室 (IRL), IRL 收集了现有的所有全球部署的 BGP 数据收集器上的数据, 包括 Route Views、RIPE RIS、PCH 和 Internet2 等全球比较知名的网络测量项目, 选用的数据为 2014 年 7 月的网络测量数据, 这些数据收集器遍布全球各大洲, 目的地址涵盖了全球网络活动较活跃的地区。表 3-1 是 IRL 包含的所有网络测量项目拥有的所有数据收集器信息, 数据收集器管理的所有 BGP feeder 的具体信息在第一章已介绍过, 此处就不再赘述。IRL 的基于 BGP 的数据源总共收集到 42448 个 AS 节点



和 151156 条 AS 连接。

表 3-1 IRL 的所有数据收集器信息

网络测量项目	数据收集器数量
Route Views	15
RIPE RIS	17
PCH	14
Internet2	9

3.2.3 Traceroute 的数据收集

本章收集的 Traceroute 实验数据来自 CAIDA 网络测量系统中的 Ark 部署的探测节点返回的数据，数据选择于 BGP 数据同时间段，即 2014 年 7 月间的数据，便于进行对比。

Ark 部署了大约 106 个探测节点，分布于全球各大洲，图 3-6 是所有 Ark 探测节点部署地理位置的分布图，展示了部署在全球各大洲的各个 Ark 探测节点，可以看出欧洲和北美洲是探测节点部署相对密集的位置。表 3-2 是部分探测节点的信息，展示了各个探测节点的名称、所在地区、所属 AS 和属于哪个组织管理等。使用 Ark 探测节点收集到的数据都是 IP 级的网络连接数据，要得到 AS 级网络拓扑连接数据，必须进行 IP 到 AS 的映射。



图 3-6 Ark 探测点部署地理位置图

表 3-2 Ark 部署的部分探测节点信息

探测点名称	所属地区	所属 AS	所属组织
ams-nl	阿姆斯特丹, 荷兰	AS1103	SURFnet
amw-us	爱荷华, 美国	AS2698	爱荷华州立大学
bcn-es	巴塞罗那, 西班牙	AS13041	巴塞罗那大学
bed-us	康科德, 美国	AS7922	私人所属
bma-se	斯德哥尔摩, 瑞典	AS49770	Acreo
cmn-ma	卡萨布兰卡, 摩洛哥	AS30983	CNRST
dub-ie	都柏林, 爱尔兰	AS1213	HEANet
nrt-jp	东京, 日本	AS7660	APAN
Syd-au	悉尼, 澳大利亚	AS7575	AARNet

### 3.2.4 Traceroute 的 IP 映射 AS 问题

本小节主要解决 Traceroute 的 IP 数据映射为 AS 数据的问题, 采用方法的主要思想是以最初的从 BGP 路由表提取的 IP 前缀对应源 AS 的原始 IP-to-AS 映射表为初始值, 用动态规划算法计算匹配错误率最小情况下的最佳匹配方式, 最后再在该匹配下考虑 MOAS (多个前缀映射到同一 AS) 的情况对匹配方式进行修正, 得到最终的 IP-to-AS 映射表。具体算法流程如图 3-7:

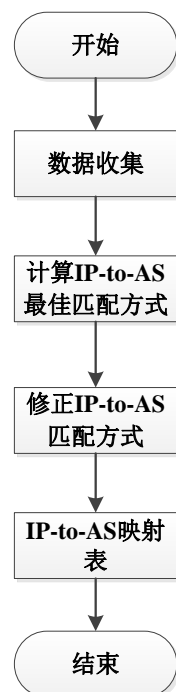


图 3-7 IP-to-AS 映射流程图

(1) 数据收集：主要是两方面的工作，一方面是收集 BGP 路由表信息，从 BGP 路由表中提取初始 IP-to-AS 映射表，作为该算法的初始值；另一方面是收集两种数据源（BGP 和 Traceroute）同属一个 AS 的连接信息，也就是收集 Traceroute 以及对应的 BGP 路由表，再处理为 Traceroute-BGP 路径对，算法的目的就是要纠正初始的 IP-to-AS 映射表错误，最大化这个路径对的匹配数量。CAIDA 有 4 个 Ark 部署的探测点能在 IRL 上找到对应的 BGP 路由表，本节采用的仍然是 2014 年 7 月的 BGP 路由表和 Traceroute 数据作为依据，查找 Traceroute 这 4 个探测点在 BGP 路由表中对应的目的地址的 IP 前缀，对应的 AS\_PATH 就是 Traceroute 对应的 BGP 的 AS 路径，这个路径和 Traceroute 的 IP 路径即构成了 Traceroute-BGP 路径对，表 3-3 是数据处理之后的结果。

表 3-3 数据处理结果

TRACEROUTE 探测点	探测点所属 AS	路径对数量
lax-us	AS2152	282695
she-cn	AS4538	243658
nrt-jp	AS7660	280572
jfk-us	AS6939	312943

(2) 计算 IP-to-AS 的最佳匹配方式：首先定义  $A$  为 AS 集合， $P_A$  是映射到 AS ( $A$ ) 的 IP 前缀集合，假设给出一个路径对  $(p, q)$ ， $p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$  是一个  $P_A$  中的 IP 地址序列， $q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_m)$  是一组 AS 的序列， $A$  的函数  $a: \{1, 2, 3, \dots, n\} \rightarrow \{1, 2, 3, \dots, m\}$  是  $p$  和  $q$  的匹配方式。对于任何一个 IP 地址  $p_i$  和 AS  $q_j$ ，定义  $c(p_i, q_j)$  为  $p_i$  与  $q_j$  的匹配错误值， $q_j \in A(P_A(p_i))$ ， $P_A(p_i)$  是  $p_i$  匹配的最长匹配  $P_A$ ，匹配则指为 0，不匹配则值为 1。如果  $a$  是  $(p, q)$  的最佳匹配方式，

$$C(a, p, q, h) = \sum_{i=1}^h c(p_i, q_{a(i)}) + (a(h) - |\{a(i) : 1 \leq i \leq h\}|) \quad (3-1)$$

其中， $1 \leq h \leq n$ 。式 (3-1) 定义为最佳匹配的开销，这个公式表示一个路径对在当前匹配方式  $a$  下的开销，等于这个路径对上匹配错误的 IP 以及没有匹配到的 AS 的总和，该步骤的核心就是计算出开销最小的情况下 IP-to-AS 的匹配方式  $a$ 。

计算匹配方式  $a$  时我们采用了动态规划算法，动态规划用于求解决策过程中的最优化数学方法，运用分治思想，通过组合子问题的解而解决整个问题。简单来说，就是给出问题的初始状态和转移状态，通过不断迭代循环，得到最优解。定义  $B(p, q, i, j)$  为最佳匹配方式下  $C(a, p, q, h)$  的最小值，这个动态规划的初始状态定

义为:

$$B(p, q, 1, j) = c(p_1, q_j) + j - 1, 1 \leq j \leq m \quad (3-2)$$

$$B(p, q, i, 1) = \sum_{h=1}^i c(p_h, q_1), 1 \leq i \leq n \quad (3-3)$$

递归关系为:

$$B(p, q, i, j) = c(p_i, q_j) + \min_{1 \leq h \leq j} \{B(p, q, i-1, h) + \max(0, j-1-h)\} \quad (3-4)$$

其中,  $2 \leq j \leq m$  和  $2 \leq i \leq n$ 。最后得到的结果就是使开销最小的情况下  $j$  的取值, 即:

$$a(n) = \arg \min \{B(p, q, n, j) : 1 \leq j \leq m\} \quad (3-5)$$

其中,  $\arg \min$  指使  $B(p, q, n, j)$  最小时  $j$  的取值, 即  $a(n) = j$  为最佳匹配方式。但是这个过程中得到的结果是 Traceroute-BGP 路径对只有 85% 左右的匹配度, 即只有大约 85% 左右的 Traceroute 路径是和 BGP 路径完全匹配的。因此, 为了提高匹配的准确度, 还需要引进一些判定条件来判断匹配的路径对。

(3) 修正 IP-to-AS 的匹配方式: 定义  $S_x$  为 IP 地址的集合, 对应  $P_A$  中的前缀为  $x$ ,  $n_x$  是  $S_x$  中匹配 AS 的 IP 的数量, 而  $n_{x(y)}$  是  $S_x$  中匹配 AS 的  $y$  的数量,  $z_0$  为  $n_{x(y)}$  的最小值,  $z_1$  是  $n_{x(y)}$  的最大值, 定义  $x$  与  $z_0$  的匹配比率为:

$$r_0 = n_{x(z_0)} / n_x \quad (3-6)$$

$x$  与  $z_1$  的匹配比率为:

$$r_1 = n_{x(z_1)} / n_x \quad (3-7)$$

将 (2) 中得到的匹配方式为初始值, 应用一下规则对其中的匹配方式进行修正改进:

准则一: 如果  $|A(x)| = 2$ , 且  $r_0 < 0.1$ , 则从  $A(x)$  中丢弃  $z_0$ , 即此情况下丢弃一个 IP 映射到多个 AS (MOAS) 的情况;

准则二: 如果  $A(x)$  是一个 IP 对应一个 AS 的情况, 且  $r_1 \geq 0.55$ , 则替换  $A(x)$  的匹配方式为  $z_1$ , 即  $A(x) = z_1$ ;

准则三: 如果  $A(x)$  是一个 IP 对应一个 AS 的情况, 且  $0.2 < r_1 < 0.55$ , 增加  $z_1$  为  $A(x)$  匹配方式, 使二者称为一个匹配对;

准则四: 如果  $|A(x)| \geq 2$  且  $r_1 \geq 0.1$ , 则将  $z_1$  添加进  $A(x)$ 。

利用以上准则, 该过程的基本流程如图 3-8:

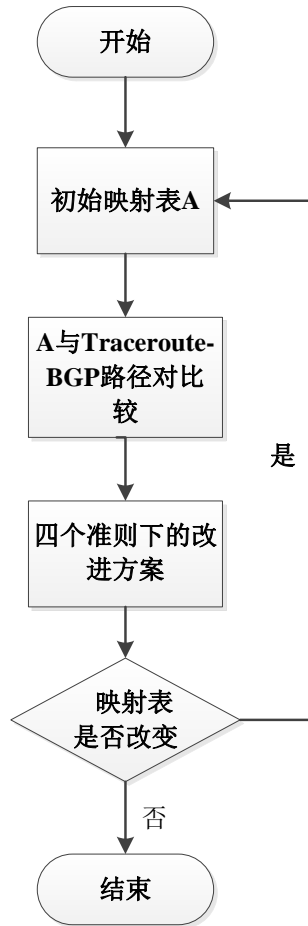


图 3-8 修正 IP-to-AS 匹配方式流程图

利用动态规划加改进准则的迭代方法使现有的 IP-to-AS 映射的 BGP-TraceRoute 路径对误匹配率从 15%降低到 5%以下，使 IP 到 AS 的映射达到尽可能地准确，从而为接下来的工作奠定良好的基础。

### 3.2.5 BGP 信息和 Traceroute 信息的结合

前面得到的 BGP 数据源信息和 Traceroute 数据源信息分别都是各个探测点上的数据，这一小节主要就是根据前面的方法流程图，将每一个探测点的数据进行对比分析。比如两种数据源具有同属于一个 AS 的探测点，如果同属一个探测点探测到的数据如果是具有相同源目的的路径，则对比两种数据源，以 BGP 数据源信息为准，这样更进一步纠正了 IP-to-AS 的映射准确性；不具有相同源目的的路径，或者是来自不同 AS 探测点的数据，都假设在是正确的情况下，全部合并为本文所需要的数据信息。也就是说，这一步骤主要就是数据的对比和合并的过程，得到的结果格式为：源地址、目的地址、经过的中间路径，例如{2698 20115 *q* 2698 2495 11164}，*q* 为一个分隔符，2698 是源 AS，20115 是对应的目的 AS，从源到目的中

间经过了{2698 2495}、{2495 11164}和{11164 20115}三条路径。

### 3.3 AS 级拓扑识别结果分析

本章得到的数据都是全球范围内的 AS 拓扑的数据，该数据反映了 AS 之间的连接情况，通过对数据进行统计和分析，得到了相应的数据结果。图 3-9 是收集不同时期的三种数据得到的 AS 级拓扑连接信息的数量关系对比。

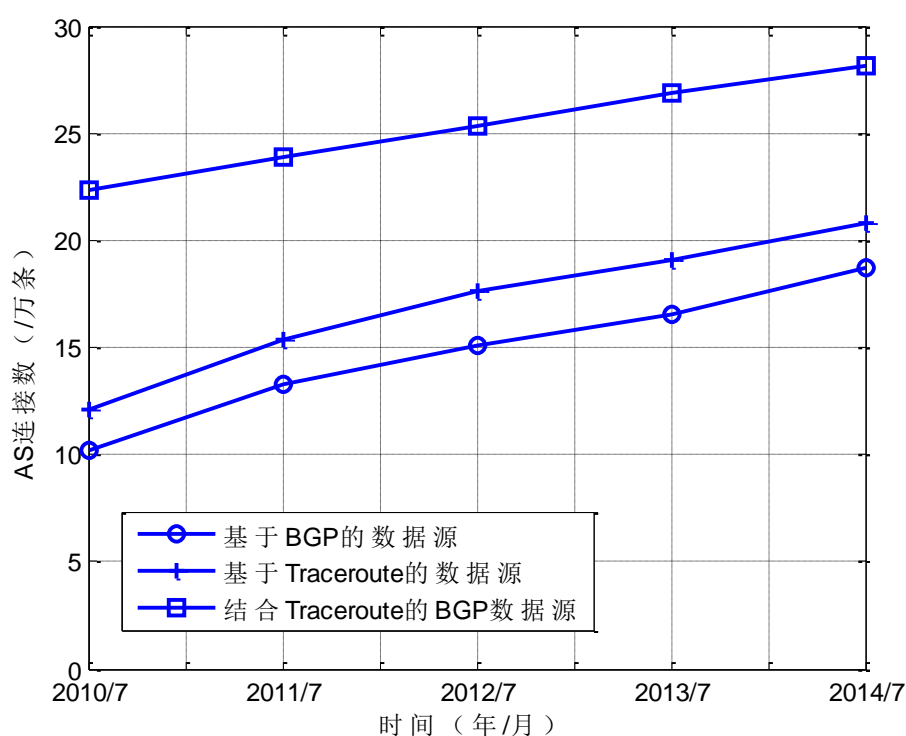


图 3-9 不同时期不同数据源得到的 AS 拓扑连接的数量关系

由上图可以看出，随着时间的增长，拓扑呈现了快速增长的趋势，并且不同数据源得到的 AS 连接数量有差别。基于 BGP 数据源的方法是现有的较常用的方法，但 BGP 数据源发现的拓扑信息有限，相比较 Traceroute 而言很多连接没有发现，而结合 Treacroute 信息的 BGP 数据源在得到的连接数上有了很大的提高。为了方便对比，下文中采用的数据均是来自 2014 年 7 月的数据。

表 3-4 中是两种方法得到的 AS 级拓扑数据的粗略比较，可以发现结合 Traceroute 信息的 BGP 数据源在节点数方面跟 BGP 数据源数量相同，这是因为 Traceroute 数据源得到 AS 拓扑的方法本质上也是利用了 BGP 的路由策略，IP-to-AS 的映射也是建立在 BGP 理论之上的，所以，不可能发现 BGP 没有发现的 AS；但由于两种数据源的探测点所在的网络层次不同，结合 Traceroute 信息的 BGP 数据

源能够发现更多的下层的 AS 连接，这一理论从表中数据得到验证，这种数据源得到的拓扑连接数远远多于 BGP 数据源得到的 AS 连接数；紧接着，定义平均节点度  $\bar{k} = 2m/n$ ，其中， $m$  为 AS 的连接数， $n$  为 AS 节点数。这一概念可粗略分析拓扑的连接特点，平均节点度越高，说明网络拓扑之间的连接越紧密，这是分析拓扑特征的一个基础概念，往下对网络拓扑更详细的分析均建立在平均节点度的基础上。结合 Traceroute 信息的 BGP 数据源能发现比 BGP 数据源更多的连接，所以该数据源的平均节点度更高，节点的连接程度更紧密。

表 3-4 两种 AS 网络拓扑识别方法结果对比

相关参数	BGP 数据源	结合 TRACEROUTE 信息的 BGP 数据源
节点数 ( $n$ )	42448	42448
连接数 ( $m$ )	151156	252649
平均节点度 ( $\bar{k}$ )	7.12	11.90

表 3-5 节点度较大的 AS 得到连接数对比

AS	BGP 的 AS 连接	新发现的 AS 连接	AS 连接增长率
AS3549	1721	102	5.93%
AS6461	1084	93	8.58%
AS12389	713	80	11.22%
AS10026	767	72	9.39%
AS12713	112	37	33.04%
AS15169	220	34	15.45%
AS25074	314	31	9.87%
AS10310	179	31	17.32%
AS15133	122	30	24.59%
AS8075	182	29	15.93%
AS10429	112	23	20.54%
AS16509	152	22	14.47%
AS32934	108	19	17.59%

表 3-4 是从两种数据源中找到的几个节点度较大的 AS 连接数对比，第一列是

AS 节点对应的 AS 编号,第二列是用 BGP 数据源得到的相应的 AS 节点的连接数,第三列是用结合 Traceroute 信息的 BGP 数据源新发现的 AS 连接数,最后还有一个连接数增长率的对比,表中由新发现的 AS 连接数从大到小排序。根据表中的数据可以看出,用结合 Traceroute 信息的 BGP 数据源,得到 AS 的连接数都是增长的,说明用这种方法可以得到更多的 AS 连接,只是由于发现的连接数量不同,得到的连接增长率也不相同。例如 AS15169,该 AS 所属为 Google,用本章提到的方法得到的连接比原来多了 34 条,AS 连接数的增长率达到了 15.45%;而新发现连接数最多的 AS3549,所属 Level3 GBLX,原先已有 1721 条连接,新发现了 102 条连接,连接的增长率由于基数比较大,所以只达到了 5.93%;而 AS12713 的 AS 连接增长率最高,达到了 33.04%。

图 3-10 和图 3-11 是两种方法得到的不同 AS 连接节点度分布示意图。节点度分布是网络拓扑的一个重要特征,定义为  $P(k) = n(k)/n$ ,其中  $n$  是 AS 节点的总数, $n(k)$  为节点度为  $k$  的节点总数, $P(k)$  即为得到的节点度分布。研究学者们已经发现了 AS 级网络拓扑的节点度分布服从幂律分布的特性,而本文用实际数据得到的拓扑节点度分布情况图 3-10 和 3-11 所示,图中的点状离散曲线分别是两种方法得到的节点数据,直线是拟合离散曲线得到的函数,基于 BGP 的数据源得到的 AS 拓扑节点度分布大致服从  $y = 1.74 \times x^{-1.15}$  的幂律分布,而结合 Taceroute 信息的 BGP 数据源得到的拓扑节点度分布则服从  $y = 2.96 \times x^{-1.15}$  的幂律分布。二者均服从幂律分布,只是系数不同,主要是由于结合 Taceroute 信息的 BGP 数据源方法能发现网络下层的 AS 连接,而网络下层通常均是节点度较小的节点,所以该方法得到的节点度分布系数比 BGP 数据源得到的系数大,说明发现的节点度较小的 AS 节点数量较多,这也印证了前面理论的正确性。

最后,将得到的 AS 级网络拓扑用圆盘可视化的形式显示,图中每个节点表示一个 AS,每个连线表示与它所连的 AS 的节点度。节点的位置部署跟节点所在地理位置相关,且节点位置越中间表示节点度越高,图 3-12 和 3-13 所示。图 3-12 是 BGP 数据源得到的 AS 级网络拓扑,图 3-13 是结合 Traceroute 信息的 BGP 数据源得到的 AS 级网络拓扑,由于拓扑数据较大,该可视化只显示了部分节点,每个节点为了方便比较,随机取出其中的同一个节点,即 AS3549,节点度的大小通过连接的颜色表示,图中色表越往下说明节点度越大,而观察两图可明显看出图 3-13 中红色连接的数量远远大于图 3-12,说明图 3-13 的连接数多于图 3-12,同样也印证了本文的方法能得到更多 AS 连接的结论。



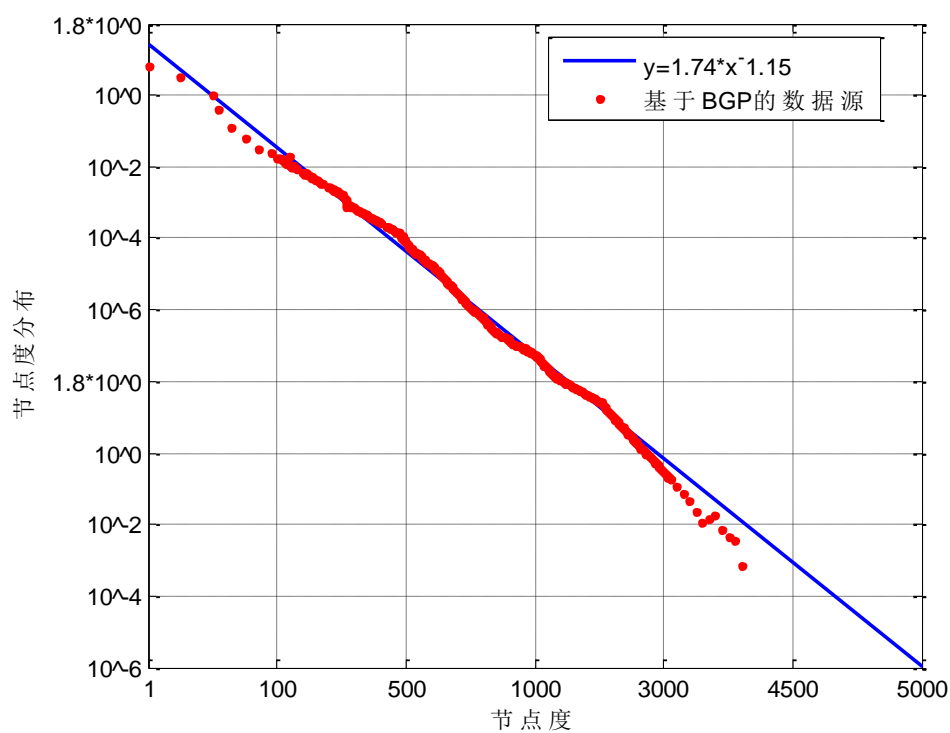


图 3-10 BGP 数据源的 AS 连接节点度分布

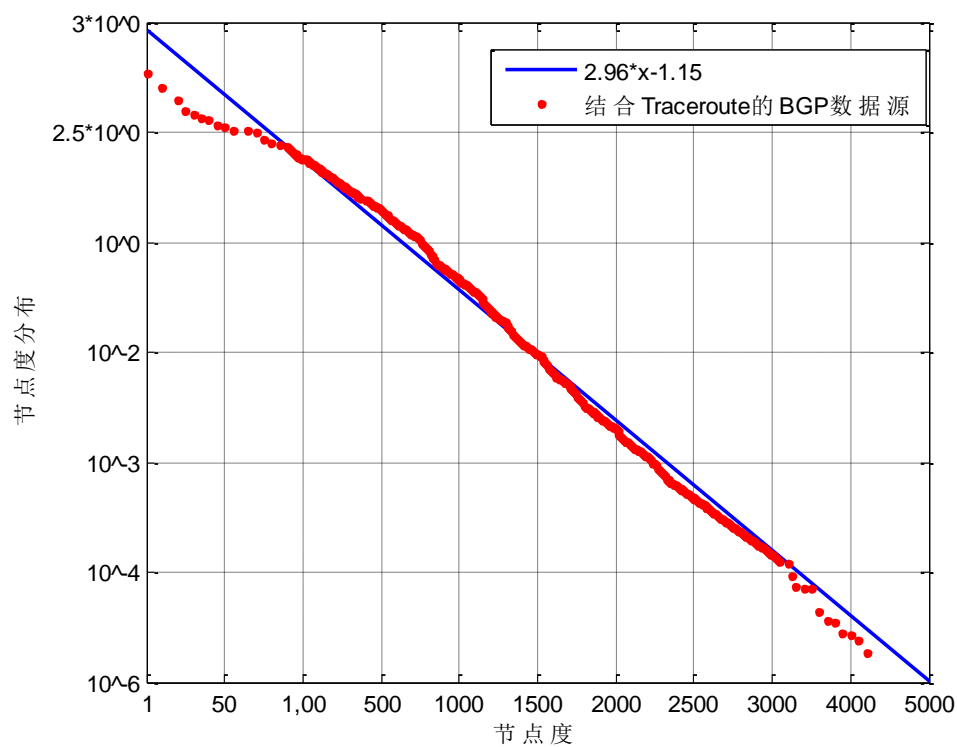


图 3-11 结合 Traceroute 的 BGP 数据源的 AS 连接节点度分布

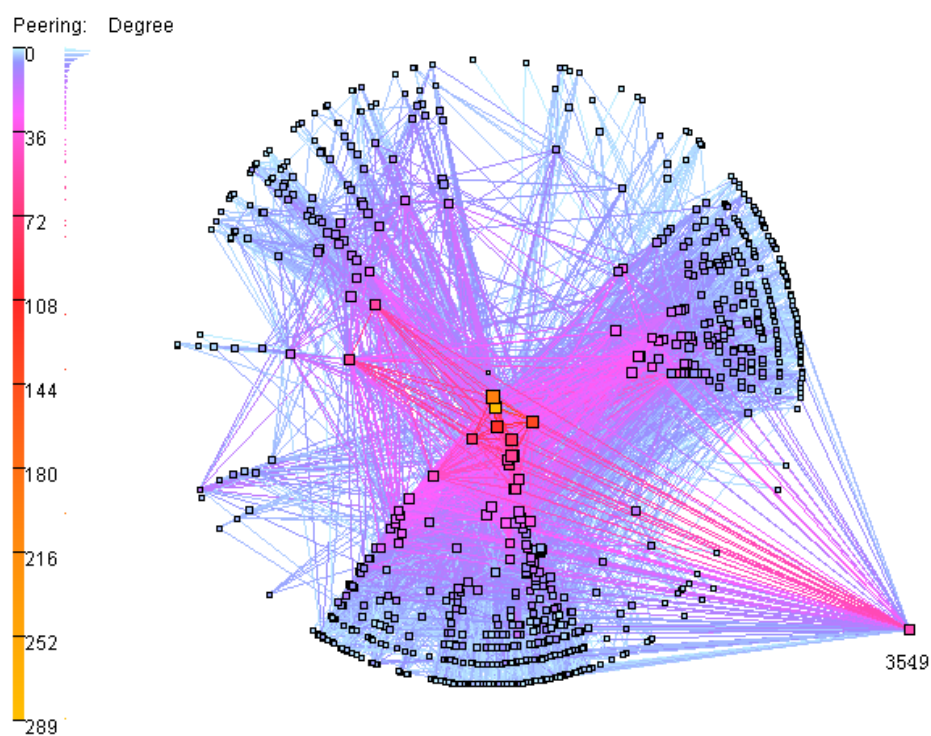


图 3-12 BGP 数据源的 AS 网络拓扑图

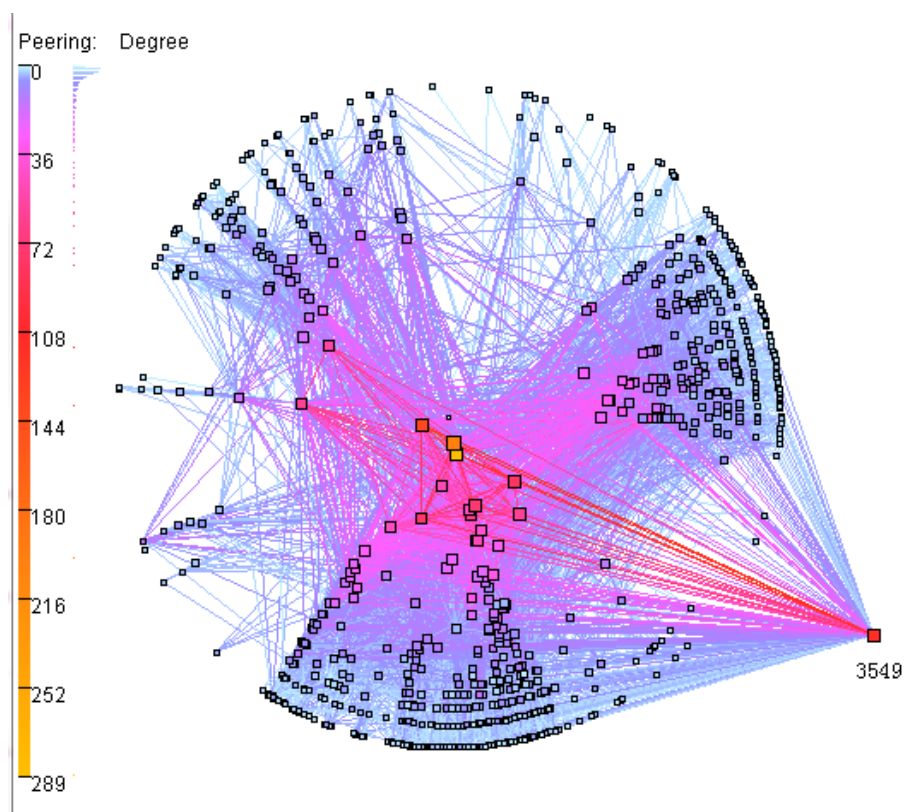


图 3-13 结合 Traceroute 的 BGP 数据源的 AS 网络拓扑图

### 3.4 本章小结

在本章中，主要提出了 BGP 信息和 Traceroute 信息结合的 AS 级网络拓扑识别方法。首先分析了用单一的 BGP 数据源得到 AS 网络拓扑方法的不足，然后分析了用 Traceroute 信息补充 BGP 信息的可行性，随后提出了该方法的具体思想和流程，最后根据这个流程详细介绍了该方法的具体做法。

具体来说就是先大量收集全球的 BGP 拓扑路径数据和 Traceroute 的 IP 级拓扑路径数据，然后采用一种精确的 IP-to-AS 的映射方法把 IP 级拓扑映射到 AS 级别，得到 Traceroute 的 AS 拓扑数据，最后将两种数据通过对比和合并，最终得到基于结合 Traceroute 的 BGP 信息方法的 AS 级拓扑数据。

最后，本章对得到的拓扑数据进行分析和对比，从节点数、连接数、平均节点度、节点度分布、拓扑可视化等角度对数据进行分析，说明了该方法的可行性，从而得到了更完整的 AS 级网络拓扑。

## 第四章 AS 间连接关系分析算法研究

### 4.1 问题的提出

第三章已经提到了 AS 连接关系的问题, 所谓 AS 连接, 并不是指两个 AS 间路由信息的完全可达, 而是二者之间的路由输入输出策略, 这一策略受 AS 之间的关系制约, 有学者称这个关系为商业关系, 两个 AS 之间通过公共网络接入点连接, AS 之间的路由规则由 BGP (边界网关协议) 控制, 这个域间的路由协议的一个重要特点就是允许每个 AS 选择自己的最佳路由策略并宣告路由信息, 决定这个路由策略的最重要因素便是 AS 各个管理域之间的连接关系。也就是说, 这里将 AS 网络拓扑抽象为每个 AS 为节点, AS 与 AS 之间连接的边为有向图, 二者之间的关系可以分为三类, 分别为 P2P (对等)、P2C (提供商和顾客)、C2P (顾客和提供商) 以及 S2S (兄弟) 几种关系, 关于这几种关系的具体说明在第三章中的第一节中提到。这个 AS 间关系的概念早在 1999 年便提出, AS 连接关系对于了解 Internet 网络结构有很重要的作用, 可以更深入地了解网络拓扑之间的连接, 但由于这种关系涉及到商业机密, 所以并不是所有的信息都是透明公开的, 研究学者只能通过各种推断算法对这一网络拓扑特征进行研究。

Gao 是较早进行 AS 连接关系推断研究的学者之一, 她用 No-Valley (无谷) 准则为理论依据, 用 AS 节点度描述 AS 的规模给出了三个推断 AS 连接关系的算法 (简称 LG 算法)。No-Valley (无谷) 准则用于自治系统 (AS) 间的路由策略, 这个准则估计 P2C 和 P2P 关系的路由信息交换方向。关于这个准则的说明同样在第三章第一节中详细描述, 此处就不再赘述。这以准则的意义就是说, 一条有效的 AS 路径中至多只有一个 P2P 关系路径对; P2C 关系中, 提供商 AS 向自己的顾客 AS 公开其所有的路由连接信息, 顾客 AS 向提供商 AS 公开自己下层的路由连接信息; P2P 关系中, 二者共享自己所有下层的路由连接信息, 但是不共享同层或者上层的路由连接信息。

根据以上理论, Gao 从 BGP 路由表来推断 AS 间的连接关系, 而 BGP 路由表的数据主要来自 RouteViews。然后结果与 AT&T 内部数据进行对比, 表明这种推断具有一定的正确率, 但是在推断 P2P 关系时, 由于推断依据是根据 AS 规模判断, 若规模相当的两个 AS 之间的差异值小于某个阈值, 就推断为 P2P 关系, 这种推断方法对于节点度差异较小的两个路径对之间会出现推断错误的情况, 所以推断正确率较低。

DPP 算法对 AS 连接关系的推断问题对 NP-complete 的推断进行了证明并给出了近似解, 使用图论中的理论描述 AS 之间的连接关系, 即  $(u_i, u_{i+1})$  这一路径对, 如果  $u_i$  到  $u_{i+1}$  是有向边, 则说明前者是后者的提供商, 无向边代表 P2P (对等) 关系, 双向边则是 S2S (兄弟) 关系。而一条路径中的有效路径是指符合 No-Valley (无谷) 准则的 AS 路径, 即路径中两个相邻 AS 不可能是 P2C 和 C2P 关系 (客户 AS 的左右两边都是它的提供商 AS), 再此基础上有学者提出了 TOR 问题 (Type of Relationship Problem), 即给定一个无向图  $G$  和路径集合  $P$  并对无向图的一些边进行定向, 让路径集合中的无效路径最少, 然后将 TOR 问题转化为了 MAX2SAT (极大 2 判定) 的满足问题, 并计算出了该问题的近似最优解, 用这种方法得到的近似最优解可以为 AS 连接关系提供判断依据, DPP 算法就是依赖该理论进行 AS 连接关系的推断, 这一算法的优点在于有利于推断 P2P 关系的准确性, 但是推断 P2C 和 S2S 关系时, 特别是 S2S 关系的推断准确性很低。

因此, 本章在结合了现有理论研究的基础上, 提出了一种结合 LG 算法和 DPP 算法优点的算法, 下文简称 LD 算法, 使 AS 连接的几种关系在推断准确性上有了一定的提高。

## 4.2 LG 和 DPP 结合的 AS 连接关系算法

### 4.2.1 算法思想

根据 BGP 的路由策略, 首先得到以下几个路由规则:

- (1) 顾客 AS 会向自己的提供商 AS 公布自己的以及自己顾客的所有路由信息, 但不会公布自己的对等 AS 或者自己的其他提供商 AS 的路由信息;
- (2) 提供商 AS 会向自己的顾客公布自己的所有路由信息, 包括自己的对等 AS 路由信息;
- (3) 对等 (P2P) 关系中的两个 AS, 会向对方公布自己下层, 也就是自己顾客 AS 的路由信息, 但不会公布自己的提供商 AS 或自己的其他对等 AS 的路由信息;
- (4) 兄弟 (S2S) 关系中的两个 AS, 会向对方公布自己的、自己顾客 AS 的以及自己提供商 AS 的所有路由信息。

而对于一条 AS 路径  $(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$ , 符合以下条件, 便是说它是 No-Valley 的:

- (1) 如果  $(u_i, u_{i+1})$  是 P2C 连接, 则对于  $i < j < n$ ,  $(u_j, u_{j+1})$  一定是 P2C 连接或者 S2S 连接;
- (2) 如果  $(u_i, u_{i+1})$  是 P2P 连接, 则对于  $i < j < n$ ,  $(u_j, u_{j+1})$  一定是 P2C 连接或

者 S2S 连接。

本章的算法思想，就是根据以上 BGP 路由策略、No-Valley 准则以及 Gao 的 AS 节点度，基于一种假设，即提供商 AS 的规模通常比顾客 AS 的规模大，这个规模体现为 AS 的度大小，也就是说，首先找到 AS 路径中的最大节点度，将这个 AS 定为顶级提供商，那么根据前面的理论，则顶级提供商 AS 之前的 AS 路径可推断为 C2P 或者 S2S 的关系，顶级提供商 AS 之后的路径推断为 P2C 或 S2S 关系，也就是遍历所有的 AS 路径对，判断是否有流量传输关系，如果传输是双向的，那就可推断为 S2S 关系，若是单向的，则是 P2C 或者 C2P 关系。前面的理论表明一条 AS 路径中有且最多仅有一个 P2P 路径对，所有一条 AS 路径中的 P2P 边只有可能出现在顶级提供商 AS 或者顶级提供商 AS 的邻居 AS 路径，根据这个推断找到候选路径对，根据 DPP 算法计算出来的权重和阈值，判断候选路径对的连接关系，最后由于没有任何数据库公布现有的 AS 连接关系，本文利用 CAIDA 公布的比较权威的 AS 连接关系进行对比，假设 CAIDA 的 AS 连接关系是准确的，用本文的算法得到的结果对比分析得出结论。

#### 4.2.2 算法流程

图 4-1 是推断 P2C、C2P 以及 S2S 关系的算法流程图。AS 路径为  $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ ，计算每个 AS 的度，找到最大 AS 度  $a_j$ ， $1 \leq j \leq n$ ，作为顶级提供商 AS，然后遍历整个 AS 路径文件，分别统计顶级提供商 AS 左边和右边的 AS 路径对，对于  $i \in [1, j-1]$ ，统计  $\{a_i, a_{i+1}\}$  出现的数量，对于  $k \in [j, n]$ ，统计  $\{a_k, a_{k+1}\}$  的数量，路径中出现  $\{a_i, a_{i+1}\}$ ，则说明  $a_{i+1}$  为  $a_i$  提供流量传输服务，即是 C2P 关系，出现  $\{a_{i+1}, a_i\}$ ，则说明  $a_i$  为  $a_{i+1}$  提供流量传输服务，即是 P2C 关系；同理，出现在最大度后面的路径对  $\{a_k, a_{k+1}\}$ ，说明  $a_k$  为  $a_{k+1}$  提供流量传输服务，即 P2C 关系，而出现  $\{a_{k+1}, a_k\}$ ，则说明  $a_{k+1}$  为  $a_k$  提供流量传输服务，即 C2P 关系；二者都出现说明二者互相为双方提供流量传输服务，既是 S2S 关系。但考虑由于路由策略的问题收集到的 AS 路径对可能不在实际路径中时，此处设了一个阈值  $L$ ，也就是有相应连接关系路径对的数量， $L$  是一个很小的常数，如果不足  $L$  条路径对，就推断路径对  $\{a_i, a_{i+1}\}$  之间是有流量传输服务的；如果多于  $L$  条说明  $\{a_i, a_{i+1}\}$  中  $a_i$  为  $a_{i+1}$  提供流量传输服务，那就忽略小于  $L$  条的  $\{a_{i+1}, a_i\}$  中  $a_{i+1}$  为  $a_i$  提供流量传输服务，认为  $a_{i+1}$  是提供商， $a_i$  是顾客。理论上讲，这个阈值越小，被忽略的路径对越少，那么得到的 AS 连接关系越准确。

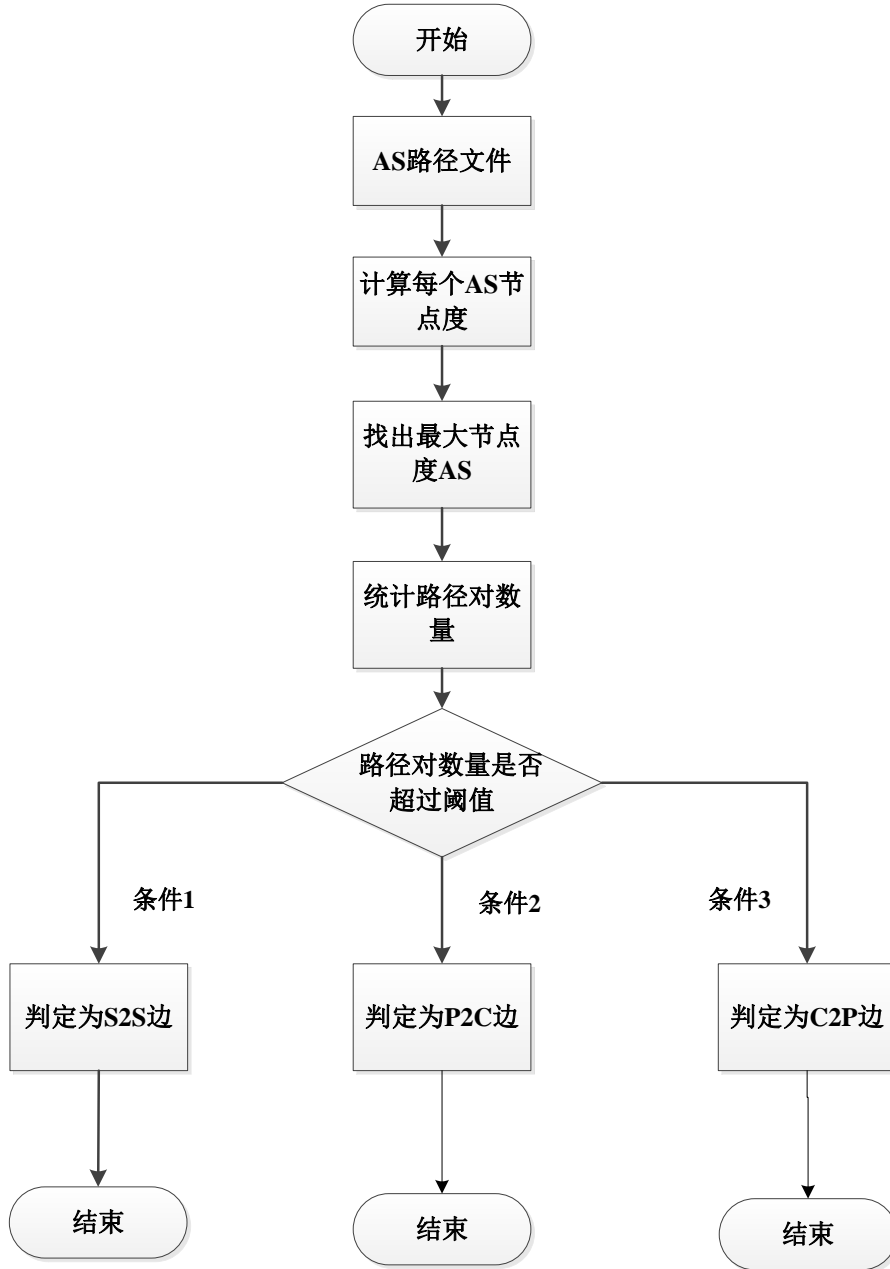


图 4-1 推断 P2C、C2P 和 S2S 关系的算法流程图

其中,图 4-1 设置条件 1 为统计的  $\{a_i, a_{i+1}\}$  路径对数量大于  $L$  条并且  $\{a_{i+1}, a_i\}$  路径对数量也大于  $L$  条, 或者  $\{a_i, a_{i+1}\}$  路径对数量小于等于  $L$  条并且  $\{a_{i+1}, a_i\}$  路径对数量大于 0 条, 则判定路径对  $\{a_i, a_{i+1}\}$  为 S2S 关系, 即如公式 (4-1) 所示。

$$\begin{aligned} &Num(a_i, a_{i+1}) > L \ \& \ Num(a_{i+1}, a_i) > L \\ &\text{或} \ Num(a_i, a_{i+1}) \leq L \ \& \ Num(a_{i+1}, a_i) > 0 \end{aligned} \quad (4-1)$$

条件 2 为统计的  $\{a_i, a_{i+1}\}$  路径对数量小于  $L$  条且  $\{a_{i+1}, a_i\}$  路径对数量也小于  $L$  条, 则判定为 P2C 关系, 即如 (4-2) 所示。

$$Num(a_i, a_{i+1}) > L \&\& Num(a_{i+1}, a_i) < L \quad (4-2)$$

条件 3 为统计的  $\{a_i, a_{i+1}\}$  路径对数量小于  $L$  条且  $\{a_{i+1}, a_i\}$  路径对数量大于  $L$  条，则判定为 C2P 关系，即如公式 (4-3) 所示。其中，以上三式中， $i \in [1, j-1] \cup [j, n]$ 。

$$Num(a_i, a_{i+1}) < L \&\& Num(a_{i+1}, a_i) > L \quad (4-3)$$

图 4-2 是推断 P2P 连接关系的流程图，首先输入还是原先的 AS 路径文件，AS 路径为  $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ ，筛选出用前面的方法推断出来的路径对，保留还未推断的路径对，因为根据前面的理论可知，P2P 连接在一条路径里面有且仅有一条路径对，且最有可能出现在顶级提供商 AS 或者顶级提供商的邻居 AS 之间，且根据 Gao 的理论可知，P2P 连接关系中的两个 AS 规模相当，不会出现较大的差异，也就是说，二者的度不会存在很大的差异，该流程中引入了权重  $g(a_{i+1}, a_i)$  和阈值  $\omega \in [0, 1]$ ，若  $g(a_{i+1}, a_i) < \omega$  时，就认为二者 AS 的差异较大，不是 P2P 关系，判定为 C2P 关系；当  $g(a_{i+1}, a_i) > \omega$ ，认为二者 AS 差异小，判定为 P2P 关系。具体的参数选择将在下文详细介绍。

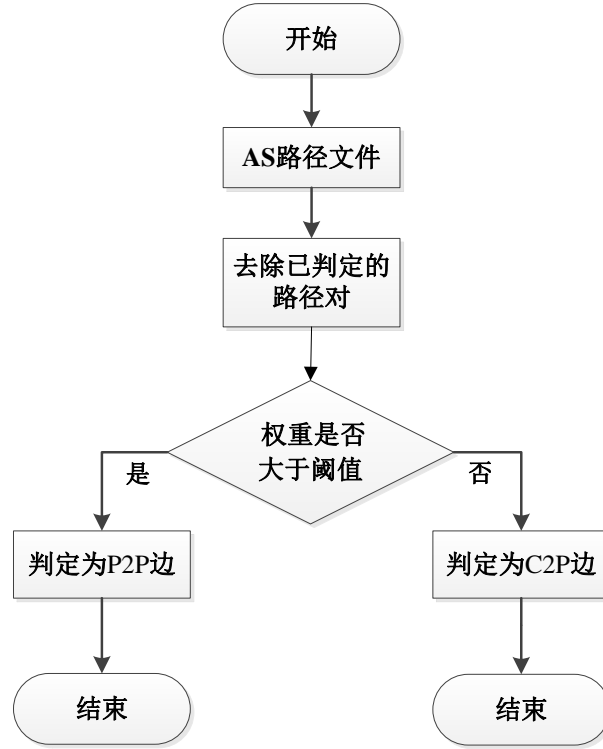


图 4-2 推断 P2P 关系的算法流程图

#### 4.2.3 算法中的参数选择

以上算法流程中，在推断 P2C 和 S2S 关系时引入了参数  $L$ 。 $L$  是一个很小的



常数, 如果不足  $L$  条路径对, 就推断路径对  $\{a_i, a_{i+1}\}$  之间是有流量传输服务的; 如果多于  $L$  条说明  $\{a_i, a_{i+1}\}$  中  $a_i$  为  $a_{i+1}$  提供流量传输服务, 那就忽略小于  $L$  条的  $\{a_{i+1}, a_i\}$  路径对, 认为  $a_{i+1}$  是提供商,  $a_i$  是顾客。由于可能存在 BGP 路由配置错误等异常情况, 可能导致返回的路径对有误, 所以引入参数  $L$  来减小异常情况引起的路径对错误。比如,  $u$  和  $v$  是两个 AS, 二者都是  $w$  的提供商, 但是  $w$  由于 BGP 路由配置错误导致它的路由宣告了  $w$  在  $u$  和  $v$  之间有流量的传输, 在  $u$  的路由表项中, 出现了  $(u, w, v)$  的 AS 路径条目。假设  $v$  是这三个 AS 中的最高节点度, 如果不设置参数  $L$  就会导致推断出  $u$  和  $w$  是 C2P 的关系, 显然该推断是错误的。所以, 引入参数  $L$  是必要的, 可以帮助忽略一些错误配置的路径对。

在推断 P2P 关系时, 考虑到 P2P 连接只可能出现在最高节点度 AS 和它的邻居 AS 之间, 且规模相当, 所以比较最高节点度 AS 和邻居 AS 度的比值, 比值小于某个给定参数的, 就说明二者是 P2P 关系, 否则就不是 P2P 关系。这种方法推断的结果对于找到候选的 P2P 连接路径对很有效, 但在筛选出候选 P2P 连接对之后, 如果剩下的路径对度差别很小, 就很难判断这些路径对中究竟哪条才是 P2P 连接关系。DPP 算法已经指出将 TOR (Type of Relationship) 问题 (目的在于最大化有效边的数量) 转化为 MAX2SAT 问题, MAX2SAT 问题也就是说存在一种取值可以使句子数目最大同时使句子集中, 主要引入了相对节点度梯度的概念, 也就是对于一个 AS 路径对  $\{a_i, a_{i+1}\}$ , 相对节点度梯度就可定义为  $(a_{i+1} - a_i) / a_{i+1}$ , 其中,  $a_{i+1}$  是二者之中节点度较大的一个 AS,  $a_i$  是度较小的那一个 AS, 但是如果用相对节点度梯度来衡量两个 AS 之间的关系, 会出现与实际差别很大的情况, 我们已有的 AS 路径文件得到的 AS 的节点度实际上只是真实 AS 节点度的一种近似, 对节点度较大的 AS 估计较为准确, 但对于度较小的 AS 节点的估计又一定的偏差, 所以为了增加对 AS 度估计的准确度, 添加一个对数因子, 这个函数为:

$$f(a_{i+1}, a_i) = \frac{|a_{i+1} - a_i|}{a_{i+1} + a_i} \log(a_{i+1} + a_i) \quad (4-4)$$

当两个 AS 的度差别很明显时, 该权重  $f$  的值较大, 差别不明显该权重值较小。这个函数实际上是 DPP 算法中推断 C2P 算法中所用到的权重, 所以引入权重  $g(a_{i+1}, a_i)$ , 描述两个 AS 的度差异, 度越接近, 权重  $g$  越大, 反之则越小。

$$g(a_{i+1}, a_i) = 1 - cf(a_{i+1}, a_i) \quad (4-5)$$

其中,  $c$  为归一化系数,

$$c = \frac{1}{\max_{i \in R} f(a_{i+1}, a_i)} \quad (4-6)$$

$R$  为候选的 P2P 连接的 AS 路径对的集合。

根据这个权重对候选的路径对进行判断排除，选定一个阈值  $\omega \in [0,1]$ ，当  $g(a_{i+1}, a_i) < \omega$  时，就认为二者差异较大，不是 P2P 关系，当  $g(a_{i+1}, a_i) > \omega$ 。二者差异小，推断为 P2P 关系。

### 4.3 算法结果分析

本章的 LD 算法采用的数据是第三章的结合 Traceroute 信息的 BGP 数据源得到的 AS 级拓扑数据，也就是 CAIDA 的 Ark 的所有探测点数据以及 IRL 的所有 BGP 数据收集器数据，再用第三章的方法进行处理、修正和合并。收集的数据为 2014 年 7 月期间的所有 AS 级拓扑路径数据，包括 42448 个 AS 节点和 252649 条 AS 路径对。数据格式为：源 AS、目的 AS、经过的中间路径，例如 {2698 20115 q 2698 2495 11164}，q 为一个分隔符，2698 是源 AS，20115 是对应的目的 AS，从源到目的中间经过了 {2698 2495}、{2495 11164} 和 {11164 20115} 三条路径。首先将该拓扑数据文件处理为格式为源 AS、中间路径、目的 AS 的形式，也就是将上面的数据处理为 {2698 2698 2495 11164 20115} 的形式，作为该算法的输入文件。

该算法得到的结果是 AS 路径对对应的连接关系文件，而与之进行对比的本文采用 CAIDA 公布的 AS 关系数据，CAIDA 收集了一些商业机构公布的各个 AS 的连接关系，对于没有公布连接关系的 AS，采取一套自己的方法进行推断，大致过程是：先推断 C2P 和 P2C 的连接关系，再推断 P2P 连接关系，二者可能有重合的地方，即有些连接可能即推断为 P2C 关系，又推断为 P2P 关系，此情况下采取了一些推测方法具体推断准确的连接关系，最后通过域名查询服务，即 WHOIS 数据库查询属于同一组织的 AS，即推断为 S2S 关系。CAIDA 并没有公布具体的推断方法，但是业内都将其公布的数据作为评判推断算法准确性的基准，说明了 CAIDA 数据的权威性。本文也采用 CAIDA 的数据（称为 KC 数据）跟 LD 推断算法得到的结果进行分析对比。

表 4-1 是用不同数据源得到的推断结果，其中，在推断 P2C 关系和 S2S 关系时，设定系数  $L$  为 1，即考虑所有在路径文件中出现了的路径对，最大程度减小因忽略路径对结果的影响，而在推断 P2P 关系时采用的  $\omega$  为 0.7。根据表中数据可以得到，LD 算法的推断正确性都较高，但根据数据的不同，推断结果略有差别。简单来说，就是输入的路径对数量越多，这种推断算法的准确性越高。这也说明了输入路径对数量越多，参数  $L$  产生的影响越小，甚至可以忽略不计。对于参数对算法准确率的影响将在下文中详细描述。

表 4-1 不同数据源的推断正确率对比

输入数据源	AS 路径对数量	P2C 路径对推断正确率	S2S 路径对推断正确率	P2P 路径对推断正确率
BGP 数据源	151156	93.8%	88.3%	88.6%
Traceroute 数据源	175896	94.1%	88.8%	89.2%
结合 Traceroute 的 BGP 数据源	252649	96.5%	90.3%	92.8%

根据算法的流程, 参数不同导致算法输出的 AS 连接关系的准确性不同, 首先在推断 P2C 和 S2S 关系时, 有一个参数  $L$ , 也就是  $\{a_i, a_{i+1}\}$  路径对的数量,  $L$  数量不为零, 表明  $a_i$  为  $a_{i+1}$  提供流量传输服务, 但由于可能出现 BGP 的配置错误导致不符合 BGP 选择性路由规则的情况, 所以必然需要忽略一些路径对, 参数  $L$  就是这样一个阈值, 如果不足  $L$  条路径对, 就推断路径对  $\{a_i, a_{i+1}\}$  之间是有流量传输服务的; 如果多于  $L$  条说明  $\{a_i, a_{i+1}\}$  中  $a_i$  为  $a_{i+1}$  提供流量传输服务, 那就忽略小于  $L$  条的  $\{a_{i+1}, a_i\}$  中  $a_{i+1}$  为  $a_i$  提供流量传输服务, 认为  $a_{i+1}$  是提供商,  $a_i$  是顾客。理论上讲, 输入的路径对数量越多,  $L$  参数对结果的影响越小; 输入的路径对数量越少,  $L$  参数对结果的影响就越大。

表 4-2 和表 4-3 分别统计了输入路径对数量不同,  $L$  取不同值的情况的 P2C 和 S2S 推断的准确率结果。表 4-2 是 P2C 关系推断的准确率结果, 表 4-3 是 S2S 关系推断的准确率结果, 通过表中数据可以看出, 输入路径对数量越多, 对 P2C 和 S2S 关系推断的准确率越高, 但是阈值  $L$  取值不同对准确率却没有很大的影响, 不同  $L$  取值下的 AS 连接关系准确率没有产生很大的影响, 结果没有很大的变化, 这一结果表明了本文收集的数据是足够多的, 输入越多, 参数对结果的影响越小, 所以为了方便起见, 下文中均采用  $L=1$  来对 P2C 和 S2S 进行推断。

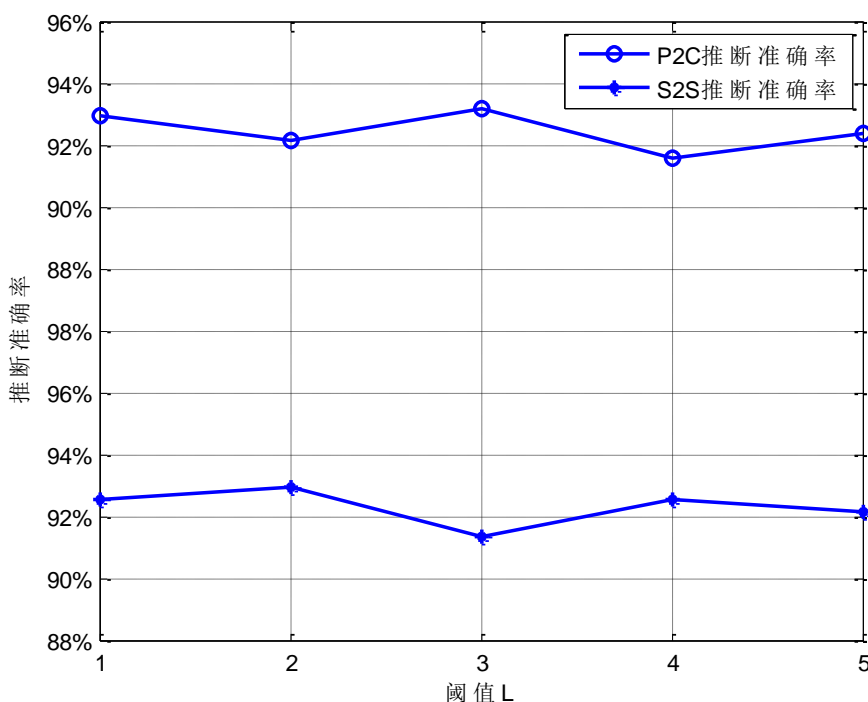
表 4-2 不同数量输入路径对不同  $L$  取值的 P2C 关系推断正确率对比

输入路径对数量	L=1	L=2	L=3	L=4	L=5
151156	93.8%	93.5%	92.8%	92.4%	92.9%
175896	94.1%	94.3%	93.8%	94.0%	93.7%
252649	96.5%	96.1%	96.6%	95.8%	96.2%

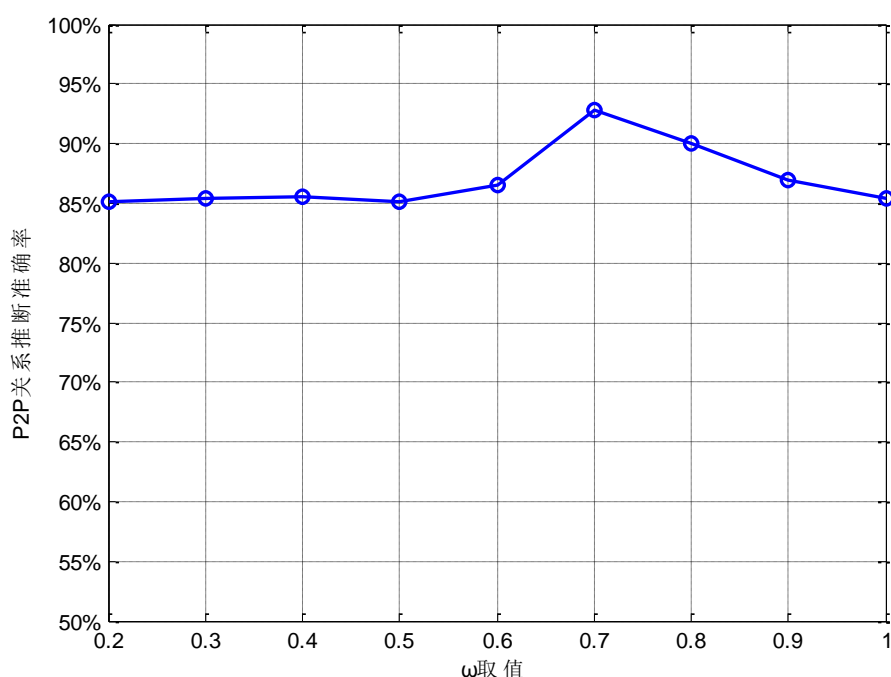
表 4-3 不同数量输入路径对不同  $L$  取值的 S2S 关系推断正确率对比

输入路径对数量	$L=1$	$L=2$	$L=3$	$L=4$	$L=5$
151156	88.3%	88.5%	87.9%	88.1%	88.4%
175896	88.8%	89.1%	88.3%	88.5%	88.7%
252649	90.3%	90.5%	89.7%	90.3%	90.1%

图 4-3 是阈值取不同值的情况下的 P2C 和 S2S 连接关系推断准确率的对比图。图中使用的输入数据是第三章中得到的结合 Traceroute 的 BGP 数据源的数据，共 252649 个 AS 路径对，从图中可以更形象地看出由于输入数据比较大，所以阈值  $L$  对结果的影响并不大，所以根据实际数据得到的结果，之后都取  $L=1$ 。

图 4-3 不同阈值  $L$  取值下的 P2C 和 S2S 关系推断正确率对比

在推断 P2P 关系时用到的参数是  $\omega$ ，该阈值用于在候选的 P2P 路径对中得到权重  $g$  之后判断路径对是否属于 P2P 连接关系的参照值， $\omega \in [0,1]$ 。当  $g(a_{i+1}, a_i) < \omega$  时，就认为两个 AS 差异较大，是 C2P 关系。当  $g(a_{i+1}, a_i) > \omega$ ，二者差异小，推断为 P2P 关系。因此， $\omega$  的取值和推断 P2P 关系的准确率息息相关。图 4-4 是  $\omega$  不同取值情况下 P2P 连接关系推断准确率结果对比图， $\omega$  在 0 到 1 之间取值，可以看出在  $\omega = 0.7$  左右时得到的推断结果准确率最高，达到了 92.8%，取其它值的结果推断准确率都小于  $\omega = 0.7$  的准确率。

图 4-4 不同  $\omega$  取值下的 P2P 关系推断正确率对比

本文采用的是结合 Gao 的算法和 DPP 算法的算法，以下简称 LD 算法，该算法旨在解决 Gao 的算法对于推断 P2P 关系准确率低的问题以及 DPP 算法推断 P2C 和 S2S 关系准确率低的问题，所以表 4-4 对三种算法进行了对比。理论上讲，输入的 AS 连接数越多，得到的推断结果应该更准确，所以表中的输入路径对数量都是采用的第三章的结合 Traceroute 的 BGP 数据源数据，LG 算法即是 Gao 提出的基于 AS 节点度的 AS 关系推断算法，这种方法得到的 P2C 和 S2S 路径对的正确率较高，但推断 P2P 路径对的正确率很低，不符合当前推断 AS 关系的需求；而 DPP 算法即是 2003 年研究学者提出的算法，这种算法推断 P2P 关系时正确率可以得到保证，但是推断其他两种关系时结果较差，只能在 80% 左右，而本文采用的结合 LG 算法和 DPP 算法的 LD 算法，既可以弥补 LG 算法在推断 P2P 关系时正确率太低的情况，也弥补了 DPP 算法推断 P2C 和 S2S 关系的正确率问题，可以达到比较好的效果，正确率均可以达到 90% 以上，这为探究 AS 连接之间存在的关系提供了一个较为可靠的工具。

表 4-5 和表 4-6 是用这种推断 AS 关系的方法得到的两种不同数据源的 AS 连接关系数据结果和各种 AS 连接关系占总连接数的比率情况。表格中统计了两种数据源的 AS 连接关系情况，一个是结合 Traceroute 的 BGP 数据源数据，即是运用第三章提出的方法得到的较为完善的拓扑数据，另一个是最常用的基于 BGP 的数

据源得到的拓扑数据,也就是第三章的利用 IRL 收集到的 BGP 路由表的拓扑数据。

表 4-4 三种算法的推断正确率对比

不同算法	AS 路径对数量	P2C 路径对推断 正确率	S2S 路径对推断 正确率	P2P 路径对推断 正确率
LG 算法	252649	93.8%	88.9%	67.9%
DPP 算法		81.6%	80.7%	90.4%
LD 算法		96.5%	90.3%	92.8%

这两种数据均作为输入运用本章提到的方法得到的结果,发现两种数据源得到的结果几乎是一致的,即 AS 级拓扑数据中,90%左右的路径对都是 P2C 的连接关系,8%左右的路径对是 P2P 的连接关系,只有 1%左右的路径对是 S2S 的连接关系,说明各个 AS 之间的连接是提供商和顾客的关系占主导地位,AS 之间更倾向于提供和被提供的关系。

表 4-5 不同拓扑数据的 AS 连接关系结果

AS 网络拓扑数据 (连接数/条)	基于 BGP 的数据源 (151156)	结合 TRACEROUTE 的 BGP 数据源 (252649)
P2C 关系的 AS 连接	136040	227687
P2P 关系的 AS 连接	13015	21936
S2S 关系的 AS 连接	2101	3026

表 4-7 是两种数据源不同 AS 连接关系的对比结果。从表中可以看到,用结合 Traceroute 的 BGP 数据源得到的 AS 连接中,具有 P2C、P2P 和 S2S 连接关系的 AS 连接数都较现有的基于 BGP 的数据源得到的连接数多,说明这种方法确实能够发现更多的 AS 连接。接着,比较两种数据源不同 AS 连接关系的数量可以发现,三种不同连接关系的连接数量均有很大提高,其中对于 P2P 连接关系,结合了 Traceroute 的 BGP 数据源能发现比原来基于 BGP 数据源多 68%左右的连接,这印证了第三章提到的现有的基于 BGP 方法的弊端能通过本文的方法得到弥补,能够得到更多的 P2P 连接;而由于 P2C 连接关系在 AS 连接中占据主导地位,所以发现的 P2C 连接关系的连接必然也会出现发现更多连接数的情况,根据表格中的数据表明多了 67%左右的 P2C 连接;S2S 连接关系则在原来 BGP 数据源的基础上多了 44%左右。这样的结果表明了本文采用的 AS 拓扑识别方法是能够发现更多的连接的,特别是能发现更多的处在网络下层的 P2P 连接,这为以后的更深层次研究

提供了一定的启发。

表 4-6 两种数据源得到的 AS 连接关系所占比率

数据源	P2C 关系连接 所占比率	P2P 关系连接 所占比率	S2S 关系连接 所占比率
基于 BGP 的数据源	90.00%	8.61%	1.34%
结合 Traceroute 的 BGP 数据源	90.12%	8.68%	1.20%

表 4-7 两种数据源的不同 AS 连接关系数量对比

AS 连接类型	基于 BGP 的数据源 (连接数)	结合 TRACEROUTE 的 BGP 数据源 (连接数)	增长比率
P2C 连接关系	136040	227687	67.37%
P2P 连接关系	13015	21936	68.54%
S2S 连接关系	2101	3026	44.03%

#### 4.4 本章小结

本章主要讨论了有关 AS 连接关系的问题，这个连接关系是由 BGP 协议控制的 AS 之间的路由输入输出策略，也可称为商业关系，因为这种 AS 关系实际上是有偿的，由于商业关系中的保密性，没有专门的数据库供研究学者查询，所以目前的 AS 连接关系都是通过推断得到的。本章提出了一种结合 Gao 的算法和 DPP 算法的 AS 连接关系推断方法，旨在解决 P2C、S2S 和 P2P 关系推断的正确率低的问题。

首先，按照 Gao 的理论，将 AS 之间的关系问题转化为 AS 的规模问题，即假设 AS 之间的连接关系跟 AS 的规模有密切的关系，AS 的规模越大，可推断为这个 AS 更可能在 AS 连接关系中作为提供商的角色，规模的大小用 AS 节点度来描述，所以通过循环和遍历每一条 AS 路径，统计出每个 AS 的节点度，找到最大度的 AS，即为顶级提供商；然后根据 No-Valley 准则，可推导出有效路径的概念，从而推断出在顶级提供商之前的 AS 之间更有可能是 C2P 的关系，而顶级提供商之后的 AS 之间更有可能是 P2C 关系，互相为对方提供流量传输服务的，即是 S2S 关系，一方 AS 始终只接受另一方的流量传输而不为对方提供流量传输的，推断为 C2P 关系，反之为 P2C 关系；P2P 关系根据 Gao 的理论可知规模一定是相当的，

而且最有可能出现在顶级提供商或者顶级提供商的邻居之间,且一条 AS 路径中一定只有一个 P2P 路径对,根据这个理论,首先找到候选的 P2P 路径对,根据相应的理论找到一个描述两个 AS 规模的权重概念,设定相应阈值判断是否是 P2P 关系,在阈值之间的是 P2P 关系,不在该范围的则判定为 C2P 关系。

最后,根据得到的数据结果,对该方法进行正确率等方面的具体分析,并和已有算法进行对比分析,说明该方法的高正确率和可行性,得到更完整、更具准确性的 AS 连接关系,为 AS 网络拓扑的分析提供了一个较为可靠的工具。



## 第五章 文章总结

### 5.1 全文总结

随着信息技术的极速发展，互联网规模越来越大，复杂程度也越来越高，网络已经成为社会各行各业离不开的工具，为了更好地利用好这一工具，了解网络结构成为了研究网络的基础。网络拓扑是网络结构的最基本网络参数，在网络中的各个方面都有这十分重要的作用，因此对网络拓扑结构的识别成为了研究学者们关注的热点。

网络拓扑的识别，可以通过网络测量实现。网络测量，即是按照网络的某种规律，用实际数据来描述网络拓扑。网络测量包括各个层面的网络测量，例如 IP 级网络、路由器级网络还有自治系统级网络，IP 级网络拓扑反映了实际的网络拓扑结构，路由器级和 AS 级均是逻辑拓扑，各个层面的拓扑结构均是许多研究学者研究的重点，本文主要对自治系统级的网络拓扑进行研究。现有的网络测量方法包括主动测量方式和被动测量方式，这两种方式在看待数据的层面上略有差异，主动测量方式实际上就是基于 Traceroute 技术的测量，这是基于数据层面的方式，换句话说就是反映数据实际经过的链路，即数据层的路径，实际上是从网络下层看待整个网拓扑的角度反映网络拓扑的结果，这种方法得到网络拓扑的方法比较复杂，其中需要进行 IP-to-AS 的映射；采用最多的方法是被动测量方式，一般采用基于 BGP 的测量，由于 BGP 是一个域间路由协议，恰好管理的是各个自治系统（AS）之间的路由，反映的就是 AS 层面的网络拓扑，可通过获取路由器上返回的 BGP 路由表信息得到 AS 路径的信息，从而得到 AS 级网络拓扑的数据。但 BGP 是控制层面的信息，反映在 BGP 路由的层面上期望和数据经过的路径，且 BGP 所连接的边界网关路由器会根据 BGP 的路由策略只向采集点通告其最佳路由，也就是说，基于 BGP 的测量实际是从网络上层的角度看待整个网络拓扑结构，但从上层看下层必定导致不完整性，用基于 BGP 的测量反映的网络拓扑存在很大的不完整性。

针对这种不完整性，本文采用了一种用 Traceroute 技术补充 BGP 测量的方式得到较为完整的 AS 级网络拓扑。首先收集全球的 Traceroute 探测点的数据，得到 Traceroute 的 IP 路径数据，根据 IP 路径数据，用一种基于最大化路径对匹配的方法使 IP-to-AS 的映射最准确，最大限度地减小因映射导致得到的拓扑数据的错误，然后再收集全球的 BGP 数据收集器的 AS 路径数据，结合 Traceroute 的 AS 路径数据，进行对比和修正，由于 Traceroute 的 IP-to-AS 映射可能仍然存在一些错误，与 BGP 的 AS 路径数据进行对比时，相同的路径以 BGP 的 AS 路径数据为准，然后

将两种数据合并，得到较为完整的全球 AS 级网络拓扑。得到全球 AS 级网络拓扑之后，与现有的基于 BGP 的测量方法进行对比，验证了本文采用的方法确实能够得到更多下层的网络连接，能够在一定程度上完整全球 AS 级网络拓扑。

接下来的工作是进一步研究前面得到的 AS 级网路拓扑数据。由于理论上讲得到的拓扑数据比基于 BGP 的 AS 拓扑多了很多网络下层的连接，那么对应的就是 AS 连接关系中的 P2P 关系，也就是多的部分大多数应该是 P2P 关系的，这里引入了 AS 连接关系的概念，AS 之间分为 P2C、P2P 和 S2S 三种连接关系，各种关系之间流量传输的方式各不相同，想要了解各个 AS 之间的关系，由于这属于商业机密，没有公开的数据库查询，研究学者只能通过各种推断方法推断 AS 连接关系，本文结合现有的两种算法的优点，得到一种推断正确率较高的方法，从而从得到的 AS 拓扑数据进行连接关系的推断，得到的最终结果达到了本文的初衷。

## 5.2 工作展望

通过研究学者们现有的 AS 级网络拓扑测量的成果，本文主要研究的是 AS 级网络拓扑的测量问题和数据分析问题，但由于网络的复杂程度很高，研究的难度增大，所以还有以下几个问题需要以后进一步探索：

（1）多数据的融合问题。由于全球 AS 级网络的庞大，仅仅依靠两种数据源对 AS 级网络拓扑进行测量是远远不够的，现在的方法只能得到相对完整的 AS 级网络拓扑，要得到更完整的网络拓扑需要解决多种数据源融合的问题。不仅需要 Traceroute 和 BGP 数据源的融合，还需要其他不同测量方法的融合，这个是一个很复杂的问题，多数据源融合的实现可以大大提高网络拓扑测量的完整性。

（2）对 AS 级网络拓扑数据的分析，本文从 AS 连接关系的角度试图找到一种推断最为准确的方法来展示各个 AS 之间的连接关系，进一步揭示网络的连接特性。但是这种推断方法也是有局限性的，由于参照数据是 CAIDA 公布的 AS 关系数据，该数据本身也不能保证是百分之百正确的，为了方便对比只能假设是完全正确的，这就带来了一定的局限性。另外，对 AS 级网络拓扑数据的研究还需要从多角度进行，这也是今后研究的主要方向。

## 致谢

短短的三年即将过去，我的研究生生活也将告一段落，这三年里收获颇多。首先感谢教研室的胡光岷教授，感谢胡老师给我们提供这样一个学习氛围浓厚的环境，正是这样的一个环境让我们能充满激情地度过三年学习时间，也正是这样的环境能够促使人有更大的进步。

其次，还要感谢我的导师于富财老师。于老师在我写毕业论文的过程中提供了很多有建设性的意见，让我能够顺利完成毕业论文；同时还要感谢教研室的姚老师、鲁老师和费老师，他们让我能在实际的项目中得到锻炼，使我从一个写代码的菜鸟成长到对这个领域有一定体会的入门者。

感谢陪伴我在科大度过那么多年的小伙伴们，特别是朱婧、邓嘉、王倩等等，有了你们的陪伴研究生生活过得充实而有趣，使枯燥的学术生活变得充满趣味，也让我收获到了珍贵的友谊，这是人生中的一大宝贵财富。特别还要感谢教研室的蒋晴博士，在写毕业论文的过程中她给予了我很多宝贵的意见，也是通过对她的请教让我能够很快理解并掌握关于毕业论文的很多重要基础知识，在此十分感谢她能抽出时间解决我的疑问。

还要感谢生我养我的父母，正是爸爸妈妈从下对我的严格要求，才培养了我面对困难能力坚持下去的毅力，感谢父母的严厉，也感谢他们尊重我的每一个决定，这些都包含了父母对子女不图回报的爱。

最后感谢百忙之中抽空评阅我论文的各位老师，你们辛苦了！

## 参考文献

- [1] Y. Xu, H. Zhao. An Improves BA Model for Router-level Internet Macroscopic Topology. IAENG Internet Journal of Computer Science, 2009, Vol 36, Iss 2: 122-128
- [2] S. Zhou. Towards Modelling The Internet Topology Interactive Growth Model. International Teletraffic Congress: Teletraffic Science and Engineering series, 2003, vol. 5: 121
- [3] Route View. University of Oregon Route Views Projects. <http://www.routeviews.org/>
- [4] RIPE NCC. RIPE Network Coordination Center. <http://www.ripe.net/>
- [5] PCH.Packet Clearing House. <https://www.pch.net/home/index.php>
- [6] IRL.Internet Reach Lab. <http://irl.cs.ucla.edu/topology/>
- [7] CAIDA. Cooperative Association for Internet Data Analysis[EB/OL].<http://www.caida.org/>
- [8] DIMES. <http://www.netdimes.org/new/>
- [9] Iplane. An Information Plane for Distributed Services. <http://iplane.cs.washington.edu/>
- [10] Reseaux ip europeenne(ripe). <http://www.ripe.net>
- [11] Internet Routing Registries. <http://www.irr.net/>
- [12] The Internet Topology Zoo. <http://www.topology-zoo.org>
- [13] J. Postel. Internet Control Message Protocol[S]. IETF RFC 792. 1981. 9
- [14] S. Hares,C. Wittbrodt.Essential Tools for the OSI Internet(Ping,Traceroute)[S]. IETF 1574, 1981
- [15] Traceroute. <ftp://ftp.ee.lbl.gov/traceroute.tar.gz>[EB/OL]. 2011
- [16] 张国强, 张国清, 范晶. 中国大陆 AS 级拓扑的测量与分析. 通信学报, 2007,28(10):93-101
- [17] J. Case. Protocol Operations for version 2 of the Simple Network Protocol(SNMPv2)[S]. IETF RFC 1448. 1993. 4
- [18] J. Moy. OSPF Version 2[S]. IETF RFC 2328. 1998. 4
- [19] C. Plummer. An Ethernet Address Resolution Protocol[S]. IETF RFC 826. 1982. 11
- [20] Y. Rekhter. A Border Gateway Protocol 4(BGP-4)[S]. IETF RFC 1771. 1995. 3
- [21] G. Malkin. RIP Version 2 Carrying Additional Information[S]. IETF RFC 1388. 1993. 1
- [22] 秦艳峰, 罗军勇, 寇晓蓁. 网络拓扑信息获取技术研究. 微计算机信息,2006,22(5):127-130
- [23] L. X. Gao. Inferring Autonomous System Relationships in the Internet, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.9, No. 6, 2001, 733-745
- [24] Y. H. He,G. Siganos, M. Faloutsos, et al. Lord of the Links:A Framework for Discovering Missing Links in the Internet Topology, ACM TRANSACTIONS on Networking, VOL 17, NO.

- 2, April 2009
- [25] B. Cheswick, H. Burch, S. Branigan, Mapping and visualizing the Internet [C], ACM USENIX Annual Technical Conference San Diego CA, June 2000, 18-23
- [26] 张宇. 大规模网络拓扑测量与分析研究[D]. 哈尔滨工业大学,2009,17-19
- [27] P. Mahadevan, D. Krioukov. The Internet AS-Level Topology Three Data Sources and One Definitive Metric[C]. ACM SIGCOMM, Volume 36, Number 1, January 2006
- [28] Y. Zhang, R. Oliveira. A Framework to Quantify the Pitfalls of Traceroute in AS-Level Topology Measurement[C]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(9): 1822-1836
- [29] H. Bradley, H. Young, K. Dmitri. AS Relationships: Inference and Validation. ACM SIGCOMM Computer Communication Review[C], Vol. 37, No. 1, 2007
- [30] 吴玲, 黄宝惠, 魏镇韩. 因特网 AS 级拓扑测量和分析的进展[J]. 软件导刊, 2009, 8(7): 4-6
- [31] A. Khan, T. Kwon. AS-level Topology Collection through Looking Glass Servers[C]. ACM Proceedings of the 2013 conference, 2013: 235-242
- [32] 赵海, 王莉菲, 李超. AS 级 Internet 拓扑分析[N]. 通信学报, 2008, 29(7): 51-61
- [33] Gregori, Enrico, Imbrota. On the Incompleteness of the AS-Level Graph: a Novel Methodology for BGP Route Collector Placement[C]. 2012 ACM conference (IMC'12), 2012, 253-264
- [34] Khan, Akmal, Kwon. AS-Level Topology Collection through Looking-Glass Servers[C]. Internet Measurement Conference: Proceedings of the 2013 conference (IMC'13), 2013, 235-242
- [35] Bush, R. Steve, Maennel. Olaf, et al. Internet Optometry: Assessing the Broken Glasses in Internet Reachability[C]. Internet Measurement Conference (IMC'09), 2009, 242-253
- [36] G. Siganos, M. Faloutsos. A Systematic Framework for Unearthing the Missing Links: Impact and Measurements. Proceeding of the 4th USENIX Symposium on Network Systems Design and Implementation. 2007: 187-200
- [37] H. Chang, S. Jamin, W. Willinger. To Peer Or Not to Peer: Modeling the Evolution of the Internet's AS-Level Topology[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2006. 2006: 1-12
- [38] 宰家斌, 杨立身, 刘晓虎. 大规模网络拓扑发现方法分析研究[J]. 计算机仿真. 2008, 25: 130-133
- [39] Y. Hyun, A. Broido, K. Claffy. Traceroute and BGP AS path incongruities. CAIDA, 2003
- [40] B. B. Zhang, J. Bi, Y. Y. Wang. Revisiting IP-to-AS Mapping for AS-Level Traceroute. CONEXT 2011 Student Workshop. 2011
- [41] B. C. Zhang, R. Liu, D. Massey, et al. Collecting the Internet AS-Level Topology. SIHCOMM Computer Communication Review, 2005, 35(1): 53-61

- [42] Z. Shi, Mondragon. Analyzing and Modelling the AS-Level Internet Topology[J]. Computer Science-Networking and Internet Architecture. 2003: 386-398
- [43] B. Huffaker, D. Plummer, D. Moore, et al. Topology Discovery by Active Probing[J]. Proceeding of the 2002 Symposium on Applications and the Internet(SAINT) Workshops. 2002: 90-96
- [44] B. Donnet, P. Raoult, T. Friedman. Efficient Algorithms for Large-scale Topology Discovery[C]. Proceeding of the 2005 ACM SIGMETRICS international conference on measurement and Modeling of computer systems. 2005: 327-338
- [45] M. Boguna, F. Papadopoulos, D. Krioukov. Sustaining the Internet with Hyperbolic Mapping[J]. Nature Communications, Sep 2010: 3-9
- [46] Gregori, Enrico, Imbrota. On the Incompleteness of the AS-Level Graph: a Novel Methodology for BGP Route Collector Placement[C]. 2012 ACM conference(IMC'12), 2012, 253-264
- [47] B. Cheswick, H. Burch, S. Branigan, Mapping and visualizing the Internet [C], ACM USENIX Annual Technical Conference San Diego CA, June 2000, 18-23
- [48] Y. H. He, G. Siganos, M. Faloutsos, et al. Lord of the Links: A Framework for Discovering Missing Links in the Internet Topology, ACM TRANSACTIONS on Networking, VOL 17, NO. 2, April 2009
- [49] R. Cohen, D. Raz. The Internet Dark Matter: on the Missing Links in the AS Map[C]. IEEE INFOCOM, April 2006: 1-12

## 硕士研究生期间的研究成果

[A1] 电子科技大学研究生新生入学三等奖学金，2012 年

[A2] 电子科技大学研究生二等奖学金，2013 年

[A3] 电子科技大学研究生三等奖学金，2014 年

[A4] 费高雷，陈路璐，胡光岷. 主动和被动测量结合的自治系统级网络拓扑识别方法，专利申请号或专利号：201210424858.0

## 攻读硕士研究生学位期间参加的科研项目

[B1] 横向项目< GeoMoutain 构造解释软件研制>

[B2] 国家自然科学基金项目< 多源信息融合的互联网拓扑反演研究>