

Internet 自治系统级拓扑发现系统的研究与实现

袁之昊^{1,2}, 顾乃杰^{1,2}, 任开新^{1,2}, 刘小虎^{1,2}, 毕坤^{1,2}

(1. 中国科学技术大学计算机科学与技术系, 合肥 230027; 2. 安徽省计算与通信软件重点实验室, 合肥 230027)

摘要: Internet 由多个自治系统相互连接而成, AS 间的互联结构体现了 Internet 的宏观结构。研究 AS 间的连接关系可以辅助分析网络特性。该文研究了 Internet AS 级拓扑发现, 实现了一个 Internet AS 级拓扑发现系统。该系统分析 BGP 路由表得到 Internet AS 级拓扑并直观显示出来。分析了 AS 级拓扑的度分布属性, 分析结果显示生成的拓扑具有幂律分布特性。

关键词: 自治系统; 拓扑发现; BGP 表; 拓扑显示; 幂律分布

Research and Implementation of Internet AS-level Topology Discovery System

YUAN Zhihao^{1,2}, GU Naijie^{1,2}, REN Kaixin^{1,2}, LIU Xiaohu^{1,2}, BI Kun^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027;

2. Anhui Province Key Laboratory of Computing and Communication Software, Hefei 230027)

【Abstract】 Internet consists of many autonomous systems and the interconnection of the ASes reflect the macrostructure of the Internet. Research on the interconnection among ASes can help analyze the characteristics of the network. This paper focuses on the discovery of AS-level Internet topology. It implements an Internet topology discovery system which analyzes BGP tables to get the AS-level topology then display it directly. By analyzing degree distribution properties in the topology, the inherent power-law distribution property of the derived topology can be seen.

【Key words】 autonomous system; topology discovery; BGP table; topology display; power-law distribution

1 概述

Internet 规模不断扩大, 结构日益复杂, 准确获取 Internet 的互联结构(拓扑)变得更加困难, 而 Internet 拓扑信息可以应用在网络监测和诊断、路由协议行为研究、网络性能优化和网络安全实施等方面。Internet 被划分为多个独立的管理域, 称为自治系统(autonomous system, AS)。每个 AS 由具有相同路由策略的一组路由器和其它网络设备及相互连接构成, 由一个管理机构控制运作。AS 间通过外部网关协议(exterior gateway protocol, EGP)来交换路由信息, 目前广泛采用的是边界网关协议(border gateway protocol, BGP)。根据拓扑层次的特点, Faloutsos 等^[3]将 Internet 拓扑划分为 AS 级拓扑和路由器级拓扑。AS 拓扑体现了 Internet 的宏观结构, 对 AS 拓扑进行研究能从宏观上把握 Internet 的互联结构。

目前, 国外对 AS 拓扑进行了很多研究, 采用的方法分为两类: 基于 BGP 信息的方法和基于 Traceroute 探测的方法。基于 BGP 信息的方法采用分析 BGP 路由表中的路径属性或 BGP 更新报文来构造 AS 级拓扑图。例如, 美国 Oregon 大学的 Route Views 项目^[4]较早开展了 Internet AS 级拓扑研究; H Chang 等^[1]基于 BGP 表进行了 AS 路径推断的研究。基于 Traceroute 机制的方法首先采用 traceroute 探测得到 IP 级转发路径, 然后通过将 IP 地址映射到相应的 AS 得到 AS 级拓扑。CAIDA 的 Skitter 项目以及 Z. Mao 等^[2]采用主动探测与 BGP 信息结合的方式构造出较完整的 AS 级拓扑图。CERNET 的 BGP VIEW 项目和哈尔滨工业大学在国内较早开展了拓扑发现相关研究。在拓扑的分布特性研究方面, Faloutsos 等^[3]的研究表明 Internet AS 级拓扑

具有幂律分布特性。

由于基于 BGP 更新报文的方法需要与 AS 建立对等连接, 而基于 Traceroute 的方法需进行 IP 地址到 AS 的转换, 此过程有较大误差, 因此从实用性角度, 本文采用基于 BGP 分析的方法构建一个 Internet AS 级拓扑发现系统。

该系统包含拓扑生成和拓扑显示两个模块: 拓扑生成模块对 BGP 表进行处理, 分析 BGP 表的路径属性, 提取出 AS 间连接信息生成 Internet AS 级拓扑; 显示模块将生成的拓扑显示出来。此外分析了 AS 级拓扑的节点度分布, 结果显示幂律分布特性。

2 AS 级拓扑发现系统概述

该系统包含拓扑生成和拓扑显示两个部分, 图 1 显示了系统框架。

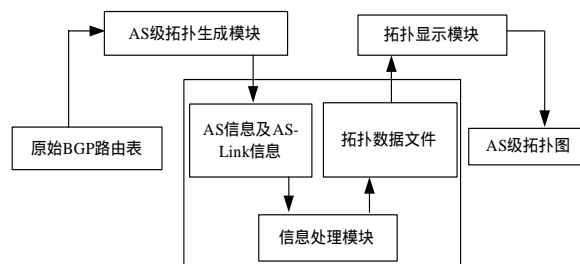


图 1 AS 级拓扑发现系统框架

作者简介: 袁之昊(1980 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 计算机网络; 顾乃杰, 教授; 任开新, 讲师; 刘小虎、毕坤, 博士研究生
收稿日期: 2006-07-20 **E-mail:** zhuyuan@mail.ustc.edu.cn

系统以原始 BGP 表为输入, 拓扑生成模块对 BGP 表进行处理, 分析 BGP 表的路径属性, 提取出 AS 间连接信息, 经过信息处理生成拓扑数据文件, 即 Internet AS 级拓扑, 拓扑显示模块将拓扑显示出来。

2.1 拓扑生成模块

2.1.1 BGP 路由表简介

本文分析的路由表来源于 Oregon 大学的 Route Views 项目^[4]。通过分析 BGP 表, 提取出对分析 AS 间互连关系有用的信息。BGP 路由表主要内容如表 1 所示。

表 1 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
24.223.128.0/17	209.161.175.4	0	14608 4323 1668
			{11060,12262}
193.27.5.0	209.123.12.51	0	8001 701 1299 1299
			20804 29254
...

表 1 中第 1 列 Network 为目标地址, 多使用 CIDR 编址, 为前缀/长度形式, 如 6.1.0.0/20, 前缀为 6.1.0.0, 长度为 20。第 2 列 Next Hop 为 AS 路径中的边界路由器的 IP 地址。第 3 列 Metric 为路由度量值。第 4 列 Path 为 AS 路径(AS-PATH), AS-PATH 定义了 BGP 协议里 Update 报文路由时所经过的 AS 列表, 前后相连的两个 AS 构成一个 AS 邻接对(AS-Link)。

AS-PATH 的顺序和流量的方向相反, 最后一个 AS 为路由来源自治系统即产生路由流量的自治系统。AS-PATH 属性中包含了自治系统间路由更新的发送路径, 体现了自治系统的连接关系和路由更新策略。下面以表 1 第一个条目为例来说明 AS-PATH。由 Network 可知, 其对应自治系统为 AS9829, 这条路径从 AS9829 开始, 依次经过 AS4755, AS7018, 最后到达 AS3292。通过分析 AS 邻接对, 可以得到 AS 间互连关系, 如(3292 7018 4755 9829)可以划分为 3 个 AS 邻接对(3292 7018)、(7018 4755)和(4755 9829)。

表 1 中第 2 个条目的 AS 路径为(14608 4323 1668 10796 {11060,12262}), 其中含有聚合路径。聚合路径产生的目的是为了减少全球路由表中路由的数量将多条具有相同前缀的路由按照公共前缀进行合并。在 AS-PATH 属性中, 聚合表现为花括号对所包含的一组 AS 号码列表(AS 集合), 需要把聚合的 AS 连接关系还原。经过还原处理的结果是:(14608 4323 1668 10796 11060)、(14608 4323 1668 10796 12262)。

表 1 中第 3 个条目的 AS 路径为(8001 701 1299 1299 20804 29254), 其中含有冗余 AS 号码。冗余 AS 号码的产生目的是为了改变路由效果而添加的重复 AS 号码。经过过去除冗余号码处理, 结果为:(8001 19151 852 11260)。

2.1.2 拓扑分析算法

文中 AS 级拓扑采用无向图 $G=(V,E)$ 表示。其中, $V(G)$ 表示图 G 的节点集, $E(G)$ 表示 G 的边集。G 中的每个节点代表一个自治系统, 节点之间的边代表自治系统之间的连接关系。由 2.1.1 可知, AS 间的连接信息可以通过分析 BGP 路由表的 AS 路径获得, AS 级拓扑分析算法如下所示:

```

Algorithm TopologyAnalyze
1 Load an original BGP table;
2 While (not EOF)

```

```

3 {
4 Get a line;
5 Extract AS-PATH;
6 Process aggregate paths, get AS-PATH';
7 Process redundant AS numbers, get AS-PATH'';
8 Extract AS-Link(form Edge set E) from AS-PATH'', also get AS
number (form Node set V);
9 Move to next line;
10 }
11 Store V and E to construct Internet AS-Level Topology.

```

算法的具体描述如下。首先载入原始 BGP 表(第 1 行), 判断文件是否结束(第 2 行), 如没有结束, 读取文件的一行(第 4 行), 提取出 AS 路径(第 5 行), 进行聚合路径处理(第 6 行), 进行冗余号码处理(第 7 行), 提取出 AS-Link(第 8 行), 文件读指针移到下一行(第 9 行), 然后转到第 2 行, 如果文件结束则跳出循环, 最后将得到的节点信息和连接信息存储以构造拓扑(第 11 行)。

经过以上处理, 获得了 AS 号码信息以及 AS 互连关系信息。经过信息处理将 AS 节点集和 AS-Link 信息综合得到 Internet AS 级拓扑。

2.2 拓扑显示模块

文中采用了仿 3D 的形式将 Internet AS 级拓扑图在平面上进行显示。处理过程如图 2 所示。

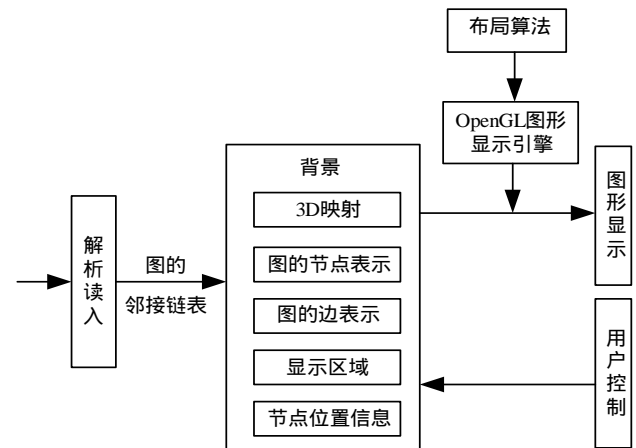


图 2 拓扑显示模块流程

首先读取上一节处理程序获得的拓扑文件, 将其转换为内存中的邻接列表形式, 然后根据显示模块的基本配置(包括映射方式、结点表示、显示区域等)和用户控制得到对应的显示参数, 采用布局算法并利用图形显示引擎将拓扑图显示出来。

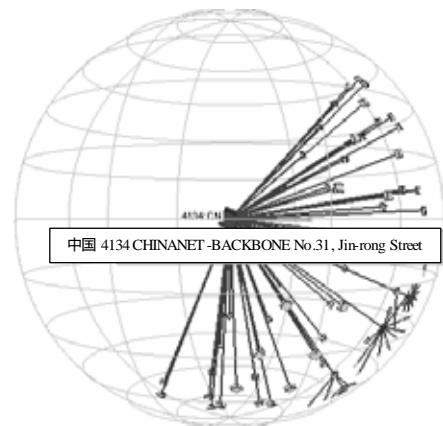


图 3 大陆地区的自治系统拓扑

将AS拓扑图映射到3D球面上,可以使视图具有三维立体感,比在平面上直接显示的效果要好。采用“鱼眼视图”^[5]区域性显示,从而可以选择感兴趣的区域的拓扑,将其显示在屏幕中央区域,而其余的视图将会相应进行调整,在这个显示过程中始终将多数的显示资源分配给使用者当前注意力所集中的区域,具有良好的视觉效果,显示效果如图3所示。

拓扑显示模块不仅可以显示全球拓扑图,还可以显示按国家/地区属性划分成的不同国家/地区的拓扑图,图中显示了中国大陆地区的AS拓扑图,图中的每个结点代表了一个AS,显示的节点信息中数字为AS号码,英文为相应的国家/地区的缩写,例如,CN代表中国大陆地区。

3 拓扑数据分析

以Oregon大学公布的2005年10月的BGP表作为拓扑发现系统的输入,将得到的拓扑图进行分析,此拓扑图中节点数(即AS数)为20476个,自治系统号码从0~65535,连接数为82883,最大度为2970,最小度为1,平均度为8。对拓扑中的节点度分布进行分析,结果体现出AS级拓扑中具有幂律分布特性。

3.1 节点度与等级关系

在图 $G=(V,E)$ 中,将每个节点 v 按其度值 d_v 降序排列,将 v 在该序列中的序号记为 r_v ,则有 $d_v \propto r_v^R$,称 R 为等级指数,称该幂律为节点度—等级幂律^[3]。

图4为拓扑中节点度与其等级之间的对数关系图。其中X轴代表等级(Rank),Y轴代表节点度(Degree),可以看出分布曲线可以很好地进行线性拟合,拟合函数为

$$f(x) = e^{10.30} \cdot x^{-0.97}$$

体现了幂律特性。

从图4中可以看出Rank值在1~20之间的节点具有较大的节点度,这些节点通常代表了核心AS,即一些处于核心交换位置的自治系统。Rank值20~2000的节点具有较好的线性分布特征。从图4曲线的尾部可以看出还存在大量度值较小的节点。

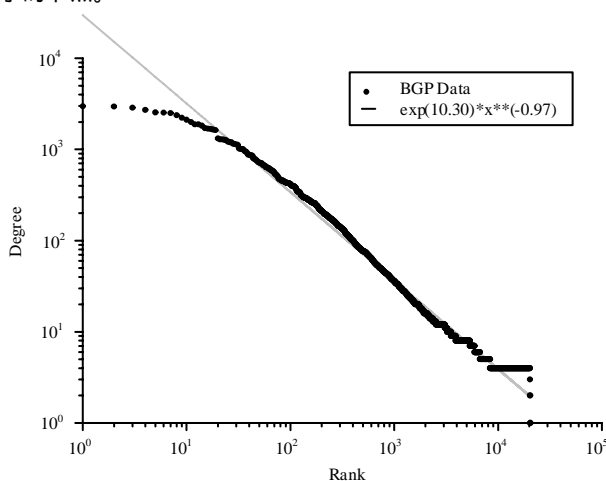


图4 节点度—等级对数分布

3.2 节点度补累积函数与节点度关系

节点的度值与该度值在图中出现的概率也存在幂律关系,文中采用补累积分布函数 $D_d = P(x > d) = 1 - P(x \leq d)$ 描

述,其中 D_d 为度 d 的补累积分布函数^[3],取值范围为0~1^[3]。

图5是拓扑图中节点度和节点度补累积函数的对数关系图,其中X轴代表节点度(Degree),Y轴代表节点度的补累积分布函数(CCDF)。同样可以看出实际数据的分布曲线可以很好地与曲线 $f(x) = e^{0.45} \cdot x^{-0.97}$ 拟合,体现了幂律特性。

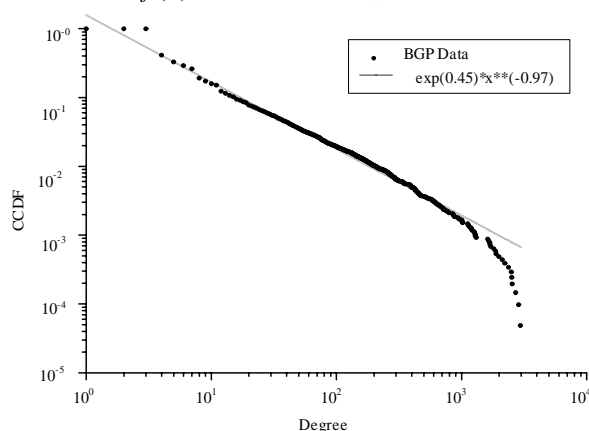


图5 节点度补累积分布函数—节点度对数分布

从图5中可以看出,度值在1~3之间的节点所占的比重是比较小的,约1%左右,10~1000之间具有很好的线性分布特征,极少数的节点(约占0.1%)具有大于1000的度值,正如图5中所示,这些节点是核心AS。这些情况对AS发展具有指导意义,即包括处于末端位置的叶子AS的多数AS具有中小规模连接度,仅有极少数的AS处于核心地位。

4 总结和展望

本文介绍了实现的一个Internet自治系统级拓扑发现系统,该系统主要包含拓扑生成和拓扑显示两个部分,拓扑生成模块分析原始BGP路由表来获取AS连接信息,生成InternetAS级拓扑图,并通过显示模块将其直观地显示;其次,对生成的拓扑图进行了分析,分析结果体现了AS级拓扑节点度分布具有幂律特性。

基于BGP路由表中AS-Path属性的分析而得到的是BGP路由控制报文所体现的策略路径,今后可以结合Traceroute探测得到具体的转发路径信息。此外,可以结合分析AS间商业关系来得到更多的商业信息。分布特性、拓扑模型以及如何获得更加完全的数据集合也是需要进一步研究的课题。

参考文献

- 1 Chang H, Govindan R, Jamin S. Towards Capturing Representative AS-level Internet Topologies[J]. Computer Networks, 2004, 44(11): 737-755.
- 2 Mao Z, Johnson D, Rexford J. Scalable and Accurate Identification of AS-level Forwarding Paths[C]//Proc. of INFOCOM'04. 2004: 605-1615.
- 3 Siganos G, Faloutsos M, Faloutsos P. Power Laws and the AS-level Internet Topology[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2003, 11(4): 514-524.
- 4 Route Views Project. University of Oregon[EB/OL]. 2004-10. <http://www.routeviews.org/>.
- 5 Munzner T. Exploring Large Graphs in 3D Hyperbolic Space[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1998, 18(4): 18-23.