

基于隶属度的自治系统级拓扑发现

史海涛，程光

(东南大学 计算机科学与工程学院, 南京 210096; 江苏省计算机网络重点实验室, 南京 210096;
东南大学计算机网络和信息集成教育部重点实验室)

摘要: 基于 BGP 路由表进行 AS 级拓扑发现是当前使用的主要方法之一, 结合 BGP updates 可以获得更加完整的拓扑信息。但是 BGP updates 时间长度的选取是一个难题, 另外, 该方法也很难保证结果的准确性。本文提出一种基于隶属度的 AS 级拓扑发现方法, 将边和节点分为存在和不存在两个状态, 从 BGP 路由表和 BGP updates 中得到边和节点并计算其存在性的隶属度, 然后将隶属度带入拓扑中进行分析研究。这是第一次将隶属度引入到拓扑发现中。

关键词: 自治系统; 边界网关协议; 网络拓扑; 隶属度

1. 引言

Internet 由几万个自治系统构成。如果把这些自治系统看作一个个节点, 把自治系统间的互联看作相应节点间的边, 则由这些节点和边构成的图就是自治系统级拓扑图。建立自治系统级的拓扑图在研究 Internet 的结构模型, 网络协议的改进, 网络行为预测以及网络仿真等方面都有重要意义。

自治系统(AS)是由于技术、网络管理、行政和商业上的原因被划分到一个组的网管的集合。每一个自治系统都有一个 16 位的编号做其标识。在每个自治系统内部运行的路由协议被称为内部网关协议(IGP), 而在各自治系统之间的路由协议被称为外部网关协议(EGP), 外部网关协议中最常使用的就是边界网关协议(BGP)。

基于 BGP 路由表构建拓扑图是一种常用的方法。从 Internet 中设置的观测点中获得 BGP 路由表快照, 提取其中 as_path 信息, 在 as_path 中相邻的自治系统之间存在着一条边, 而在 as_path 中出现的自治系统就是拓扑中存在的节点。该方法的局限性在于通过几个观测点的路由表所得的拓扑图是不完全的。首先观测点所得路由表只是从该点所能到达的路由信息, 并不是整个互联网的信息; 其次路由表中只存放最优的路由, 其他的路由都被丢弃, 所以丢失了很多的互联信息。

使用 BGP updates 和路由表结合的方法在一定程度上可以提高获取的连接信息量, 但是 BGP updates 的选取有一个重要的问题需要解决: 究竟应该选取多长时间的数据量。随着时间的增长, 拓扑图中的边和节点的数量会增加, 但是时间越长, 现实中已经消失的边和节点出现的可能性又会增大。另外这种判断方法本身还存在着另一个问题: 根据时间来判断在拓扑图中边和节点是否存在, 在选定的时间段内出现的边和节点就认为存在, 而在选定的时间段之外出现的边和节点就认为不存在, 这种判断方法不够精确。假设选取时间段为 60 天, 60 天内出现的边或者节点可能已经消失, 而 60 天之前的边或节点可能仍然存在。而且, 该方法认为在第 60 天出现的边在当前拓扑中肯定存在, 而第 61 天出现的边一定不存在, 这显然是不合理的。

基金项目: 下一代网络热点异常自适应抽样测量方法研究, BK2008288, 江苏省自然科学基金
基于自治治理模型的网络管理与安全研究, 2009CB320505, 国家 973 计划

作者简介: 史海涛, 1985 年, 男, 硕士研究生, 研究方向: 网络测量, htshi@njnet.edu.cn;
程光, 1973 年, 男, 副教授, gcheng@njnet.edu.cn

本文提出一种基于隶属度的 AS 级拓扑发现方法。该方法将边和节点分为存在和不存在两个状态，从 BGP 路由表和 BGP updates 得到边和节点并计算其存在性的隶属度，然后将隶属度带入拓扑中进行分析研究。

2. 相关工作

Govindan 等人的研究[1]通过收集 21 天的路由更新数据得到自治系统级拓扑，这是在该领域最早的研究工作之一。后来有一系列的自治系统拓扑研究，基本方法都是读取 BGP 路由表进行拓扑发现。Chang 等人[2]中检验了 RouteView 项目^[3]收集的路由表快照，研究其中包含的拓扑完整性。他们发现该路由表快照比较完整的覆盖了 Tier-1 型自治系统的互联信息，但是更低级的自治系统互联信息覆盖率不高。文章研究结果表明，路由表快照丢失了很大一部分的自治系统拓扑数据。文章[4]中 CAIDA 使用另一种方法进行 AS 级拓扑发现。他们用从 25 个源点向上千个目的地址发送 traceroute 的方法收集中间路由器的 IP 地址，然后将 IP 地址映射到各自的注册自治系统上，由此推断自治系统级的拓扑。[5]中采用 BGP Trace Collectors, Route Servers, Looking Glasses 和 Internet Routing Registries 等多种数据源结合的方式获得更加完整的拓扑图。

3. 基于隶属度的拓扑建立方法

首先定义两个概念：实际拓扑和观察拓扑。观察拓扑指的是根据已有数据可以观察到的 AS 级拓扑；实际拓扑指的是 Internet 的真正的拓扑，包括可观察部分和没有被观察到的部分。一般来说，实际拓扑要比观察拓扑更加稳定。我们的目标是通过观察拓扑得到尽可能准确的实际拓扑，这也是所有 AS 级拓扑发现的共同目标。这里准确的含义有两条：

1. 要获得尽可能全面的拓扑信息；

2. 要尽量减少错误的拓扑推断，即避免将一个不存在的边或节点错误地判断为存在于当前的实际拓扑中。

想要实现上述目标面临的主要困难是：观察拓扑中不存在的边或节点可能存在于当前的实际拓扑中；一个节点或边从观察拓扑中消失了，它仍可能存在于当前的实际拓扑中。BGP 路由表中只保存着最优的路径，而其他的从邻居节点获得的路径都已经被丢弃了。BGP updates 中包含了所有被宣告的路径，所以使用 BGP updates 是一种有效的丰富拓扑信息的方法。但是从前面分析可知，过去某个时刻的观察拓扑中存在的边或节点在当前实际拓扑中是否存在是不确定的，因此我们引入模糊数学理论来处理该判断过程，以利用模糊理论在处理不确定问题上的优越性。

为了确定边或节点的存在性隶属度函数，我们做如下假设：

1. 存在性与距离时间成反比。边或节点最近一次出现的时间越早，它的存在性越小。这个假设很直观。另外，传统的结合 BGP 路由表和 BGP updates 进行拓扑发现的方法总是选取最近一段时间的 BGP updates，认为这些数据中包含的拓扑信息仍然存在于实际拓扑中，该方法本质上也是基于这个假设。
2. 假设边或节点最近一次出现时间距离当前时间大于等于 Δt_1 ，令其存在性为 0；边或节点最近一次出现时间距离当前时间小于 Δt_2 ，令其存在性为 1。这个假设也是很直观的。如果边或节点的最近一次出现时间距离当前时间很短，即该边或节点出现在了最近的观察拓扑中，则可以认为该边或节点仍然存在于当前的实际拓扑中，令其存在性为 1；相反，如果边或节点最近一次出现时间距离当前时间很长，即该边或节点在观察拓扑中已经消失了很久，则认为它已经不存在于当前的实际拓扑中，令其存在性为 0。

基于以上假设，可以得到任意时间出现的边或节点的存在性隶属度函数为：

$$s_i = \begin{cases} 0 & \Delta t \geq \Delta t_1 \\ 1 - \Delta t / \Delta t_1 & \Delta t_2 < \Delta t < \Delta t_1 \\ 1 & \Delta t \leq \Delta t_2 \end{cases}$$

根据该隶属度函数和出现时间，可以计算出任意一条边或一个节点在特定时间 t 的隶属度 s_t ，取同一边或节点在所有出现的时间区间中最大隶属度作为其在拓扑中的存在性隶属度，即：

$$s = \max(s_1, s_2, \dots, s_t)。$$

按照上述方法计算 Δt_1 时间段内出现的所有边和节点的隶属度，就可以得到基于隶属度的 AS 级拓扑。

4. 拓扑建立的实验

使用上述方法进行网络拓扑发现实验。首先是数据源的选取，这里选择 RouteViews 项目中的一个观测点 Linx(archive.routeviews.org/route-views.linx/)上从 2008 年 8 月到 2008 年 12 月的 BGP 路由表和 BGP updates。本次实验选择 Δt_1 为 5 个月， Δt_2 为 1 个月，时间粒度为 1 个月。计算节点和边的个数的方法是：

$$n = \sum_{i=1}^x s_i \quad (x \text{ 表示总的边或节点数})$$

4.1 与基于 BGP 路由表的拓扑发现方法的比较

首先将基于隶属度的拓扑发现方法与基于 BGP 路由表的拓扑发现方法进行比较。观察下面的表 1 可以看到，综合使用 5 个月的 BGP updates 数据可以有效的提高获得的拓扑信息量，其中节点、边和平均度数分别增加了 916.2，13981.4 和 0.780，增加的比例分别为 3.03%、23.45%和 19.81%，其中 BGP 路由表数据是 12 月 31 日 19 时 47 分采集的。使用基于 BGP 路由表的拓扑发现方法由于选用的当前的 BGP 路由表，可以满足拓扑信息的准确性;但是该方法丢失了大量的拓扑信息，不能满足全面性的要求。使用本文提出的方法可以很大程度的丰富当前拓扑图,对于互联网的 AS 级拓扑的理论研究有很大参考价值。

表 1 基于隶属度拓扑与基于 BGP 路由表拓扑

	Node	Li nk	平均度数
基于 BGP 路由表	30287	59613	3.937
最近 5 个月数据	31203.2	73594.4	4.717
增加值	916.2	13981.4	0.780
增加比例	3.03%	23.45%	19.81%

实际上，基于隶属度进行拓扑发现也可以提供和传统的结合 BGP 路由表与 BGP updates 进行拓扑发现相同的研究结果。表 2 中显示了在过去 5 个月出现过的所有边和节点个数。从中可以看到节点个数比当前月的节点个数多了 1351 个，增加比例是 4.46%，边的个数多出了 19161 条，增加比例达到了 32.14%。这个结果也是传统的结合 BGP 路由表与 BGP updates 进行拓扑发现所获得结果。

表 2 增加的拓扑信息

	Node	Li nk
基于 BGP 路由表	30287	59613
最近 5 个月数据	31638	78774
增加值	1351	19161
增加比例	4.46%	32.14%

为了使上面的结果更加直观，实验中选取了一个有代表性自治系统 AS7717，画出了与其相邻的自治系统及其之间的连接边。可以看出图 2 与图 1 相比包含了更多的拓扑信息。

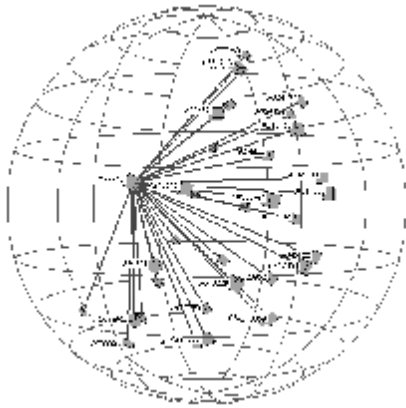


图 1 使用 BGP 路由表得到的拓扑图

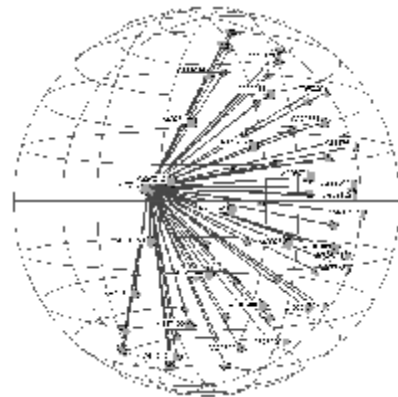


图 1 使用 5 个月数据得到的拓扑图

4.2 与传统的结合 BGP 路由表与 BGP updates 的拓扑发现方法进行比较

虽然传统的方法可以获得大量的拓扑信息，能够很好的满足拓扑的全面性要求，但是却不能避免错误的拓扑推断，可能会将不存在的边或节点错误地判断为存在于当前的实际拓扑中。根据上面的分析可以看出，本文提出的方法可以得到使用传统方法能获得的所有拓扑信息，并且由于隶属度的引入，可以提高结果的准确性。

下面以新增边为例，详细讨论两种方法的区别。这里新增的意思是，该边或节点在以后的月份中没有出现过，假如在 9 月出现一条边 (AS2365,AS8421)，该边在以后的月份 (10、11、12 三个月) 中都没有出现，则该边称为新增边。如图 3 所示，在选取的数据中，每个数据都对最终拓扑做出了贡献，都有自己的新增边。传统的结合 BGP 路由表与 BGP updates 的拓扑发现方法认为每一条新增边都仍然存在于当前拓扑中，如 8 月的新增边数为 2089，其中的每一条边和当前 (12 月) 观察的一条边对拓扑图的贡献相同，并没有考虑随着时间的推移，过去的连接边可能已经消失的情况，这显然是不合理的。最近一次出现时间越早的边或节点在当前的实际拓扑中存在的可能性越小。使用本文提出的方法获得的基于隶属度的新增边数明显较少。越早出现的新增边存在的隶属度越小，在当前的拓扑图中贡献也越小，这是符合实际情况的。例如 8 月出现的一条新增边存在的隶属度为 0.2，对于拓扑的贡献远小于当前 (12 月) 出现的一条边，它在当前拓扑中仍然存在的可能性要远小于当前出现的边。本质上来说，传统的结合 BGP 路由表与 BGP updates 使用最近的几个月数据进行拓扑发现，也是基于越早出现的新增边仍然存在的可能性越小，最近出现的新增边仍然存在的可能性更大这个假设前提的。只是传统的方法认为在选择的时间段内出现的边和节点都一定存在于当前的实际拓扑中，这是不精确的。

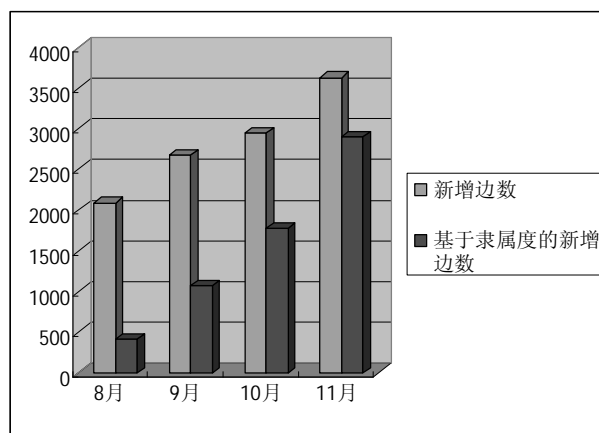


图 3 每月新增边数

5. 小结

当前使用 BGP 路由表和 BGP updates 相结合进行自治系统级拓扑发现的方法在时间段长度的选取上存在困难, 另外该方法也难以确保拓扑的准确性。基于隶属度的自治系统级级拓扑发现利用模糊数学处理不确定性问题的优势, 可以有效的克服原方法的缺点。

实验使用的 Δt_1 选取为 5 个月, Δt_2 为 1 个月, 这两个数据的选取没有精确的推导, 是不准确的。 Δt_1 和 Δt_2 决定了边或节点的隶属度, 需要详细的计算, 以便使得上述隶属度函数与实际更加接近。另外, 上述实验只选取了 RouteViews 项目中的一个观测点的数据, 该数据对于构建 Internet 的自治系统级拓扑是不完整的。要想建立一个较为完整的基于隶属度的 AS 级网络拓扑就需要结合其他的数据。可以使用的数据包括: 其他的 RouteViews 项目观测点数据, RIPE, route servers, looking glasses, routing registry 等。这些都是以后需要进一步研究的。

参考文献

- [1] R. Govindan and A. Reddy. An analysis of Internet inter-domain topology and route stability[C]. In Proc. of IEEE INFOCOM. April 09 - 11, 1997:85.
- [2] H. Chang, R. Govindan, S. Jamin, S. J. Shenker, and W. Willinger. Towards capturing representative AS-level Internet topologies. Computer Networks[J]. Apr, 2004,44(6):737-755.
- [3] The Route Views Project. <http://www.routeviews.org/>, 1997.
- [4] CAIDA's macroscopic topology AS adjacencies. http://www.caida.org/tools/measurement/skitter/as_adjacencies.xml, June 2004.
- [5] Beichuan Zhang, Raymund Liu, Daniel Massey and Lixia Zhang. Collecting the Internet AS-level Topology[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review archive, January 2005,35(1):53-61.

AS-level Topology Inference Based on Degree of Membership

Shi Haitao, Cheng Guang

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096; Jiangsu Province Key Laboratory of Computer Network Technology, Nanjing 210096; Key Laboratory of Computer Network and Information Integration, Southeast University, Ministry of Education)

Abstract: AS-level topology inference based on the BGP tables is one of the most popular methods at present. Though more information of the topology can be gotten, it's difficult to decide the amount of the BGP updates. And the accuracy of the result is not satisfying. This paper presents a new method based on degree of membership. Nodes and edges will be divided into two states: non-existent and the existence. After calculating the degree of membership from the BGP updates, we analyze the topology with the degree of membership. It's the first time that the degree of membership has been introduced into the research of topology.

key words: AS; BGP; Topology; Degree of Membership