

# AS 级拓扑被动测量点的测量完整性评价

苏 申,张 宇,张宏莉,方滨兴

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院,黑龙江哈尔滨 150001)

**摘 要:** 本文基于 AS 路径符合“无谷模型”这一公认的假设推导理论上的测量结果,并与实际数据进行比较.发现对于超过 90%的测量点,其 P-P 边的实际测量结果只有理论上的 30%.本文分析了被测 AS 的拓扑特征与其拓扑被发现完整性之间的关系,发现测量完整性随着被测 AS 与测量点间距离、测量点和被测 AS 邻居数量的增大而减少,与测量点的路由策略没有明显关系.

**关键词:** 自治域; 边界网关协议; 拓扑; 可见边

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2014)08-1608-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.08.023

## Qualifying the Completeness of AS Level Topology Observed on BGP Monitors

SU Shen, ZHANG Yu, ZHANG Hong-li, FANG Bin-xing

(Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** We formally prove the range limit of topology observed by a BGP monitor based on the “valley free” model. By comparing with the actual BGP data, we found that for more than 90% of monitors, the observed P-P links are less than 30% of its range limit. By analyzing the relationships between the characteristics of observed ASes and the completeness of observed topology for those ASes, we found that the completeness of the topology is impacted by the distance to the BGP monitor, its adjacency, and other factors.

**Key words:** autonomous system(AS); border gateway protocol(BGP); topology; observable links

## 1 引言

如果我们把 Internet 抽象成一个以 AS 为点,以 AS 间的邻接关系为边的无向图,那么目前这张图上有哪些点是很清楚的,但是边的完整性较差.被动 AS 级拓扑测量收集 ISP(Internet Service Provider, 互联网服务提供商)所提供边界路由器上的 BGP<sup>[1]</sup>(Border Gateway Protocol, 边界网关协议)路由表 and 更新报文,这些路由器被称作测量点.想要获得完整拓扑,需增加测量点.然而加入新测量点需要与 ISP 协商,并架设设备,是一个耗时费力的过程.因此,高效的部署测量点就尤为重要.

目前相关研究主要包括针对测量所得拓扑的整体评价,以及基于这些评价的测量点部署优化方案<sup>[2-10]</sup>.然而前者缺乏对测量所得拓扑与测量点位置关系的深入理解.这导致了部署方案缺乏理论支撑,更缺乏相应的实践检验.因此,目前提出的测量点部署优化方法并不可信.本文对单个测量点的测量结果进行详细分析,

提供了一个可用的基础理论模型并检验其有效性.基于这个模型,我们对测量点部署优化给出启发性指导.

## 2 相关工作

过去的十年中,已经有大量工作对 AS 级拓扑测量研究做出了贡献<sup>[2-10]</sup>,其中包括对测量所得拓扑特性<sup>[2-5]</sup>的研究和对测量点部署的研究<sup>[2,6,7,9,10]</sup>. Chang 等<sup>[2]</sup>首次对 AS 级拓扑完整性进行评价,将被动测量数据与 Internet Routing Registry(IRR)的数据进行比较,认为当时的拓扑数据中至少丢失了 25 - 50% 的边. Oliveira 等<sup>[3]</sup>使用路由配置和系统日志信息,比较了实际拓扑与所测拓扑之间的差距. He 等<sup>[4]</sup>考察 Internet exchange point(IXP)上参与者的连接关系,用 traceroute 进行验证.结果比被动测量拓扑多发现了 40% 的边,其中 P-P 边多了 300%. Giotsas<sup>[5]</sup>等利用 BGP 团体属性推测 IXP 参与者间的 P-P 边,发现了 18 万条对于 BGP 被动测量数据不可见的 P-P 边. Khan<sup>[6]</sup>等利用窥镜服务器进行

收稿日期:2013-05-24;修回日期:2014-03-12;责任编辑:蓝红杰

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划(No. 2011CB302605);国家 863 高技术研究发展计划(No. 2011AA010705, No. 2012AA012506);“十一五”国家科技支撑计划(原科技攻关计划)(No. 2012BAH37B00);国家自然科学基金(No. 61173145, No. 61202457);中国互联网络信息中心 CNNIC(No. K201211043)

主动测量,比 BGP 被动测量多发现了 686 个 AS 和约 11000 条新边。Gregori 等<sup>[7]</sup>提出了一个被动拓扑测量点部署最优化方案,该文章的一个基本假设是:一个测量点足以完整地测量其供应商的全部拓扑。本文的实验证明,这个假设并不总成立。

### 3 描述可见边

本节首先介绍“无谷模型”并给出可见边的相关定义,然后根据测量点上看到的 AS 路径都符合“无谷模型”这一假设论证可见边的范围,最后针对一些实际的测量点估计可见边范围。

#### 3.1 无谷模型

Gao<sup>[8]</sup>提出并证明了 AS 路径符合“无谷模型”,把 AS 邻接关系按其商业关系划分为 3 类:P-C 边(provider-customer, 供应商-客户关系)、P-P 边(peer-peer, 对等关系)和 S-S 边(sibling-sibling, 兄弟关系)。一条符合“无谷模型”的 AS 路径,是由一条上山路径、一个 P-P 边(可选)和一条下山路径组成的有向路径,上山路径的每条边由客户指向供应商,而下山路径的每条边由供应商指向客户。P-P 边只出现在上山路径和下山路径之间。如图 1 所示,为一个 AS 级拓扑示例图,其中路径“6→3→1→2→4→5”为一条符合“无谷模型”的 AS 路径,“6→3→1”为上山路径,“2→4→5”为下山路径。“无谷模型”的含义为:一个 AS 不会在其供应商或者对等 AS 之间传递流量。该模型是目前被讨论最广泛,并被普遍认可的路由模型。已经存在大量推测 AS 关系<sup>[3,9~11]</sup>的算法,本文采用文献[3]中提出的推测算法。

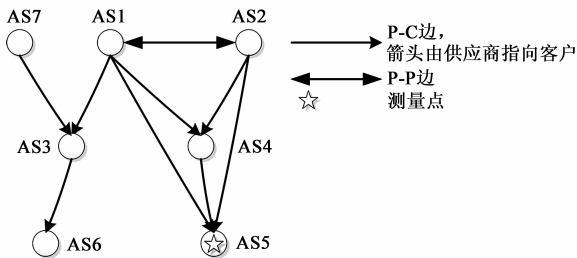


图1 AS拓扑示例

#### 3.2 可见边的定义

**定义 1** 对于一个测量点  $M$ , 如果从  $M$  所在的 AS 到另一个 AS  $A$  存在一条上山路径, 那么  $A$  就定义为  $M$  的上游 AS; 相反, 如果该路径为下山路径, 那么  $A$  就定义为  $M$  的下游 AS。其中  $M$  到  $A$  的所有上山路径的最短距离定义为  $M$  与  $A$  的上山距离。在图 1 中, 测量点位于 AS5, 其上游 AS 包括 AS1, AS2, AS4, 由  $M$  到 AS1 的上山距离为 1。

**定义 2** 测量点  $M$  的供应商树为  $M$  的所有上游 AS 和  $M$  所在的 AS 组成的集合。在图 1 中, 测量点  $M$  的供应商树为集合  $\{1, 2, 4, 5\}$ 。

**定义 3** 若一条边在以测量点  $M$  所在 AS 为原点的符合“无谷模型”的路径上, 这条边称为测量点  $M$  的可见边。一个测量点的所有可见边组成的集合称为其视界。视界的含义为, 一个测量点所有在理论上能够观测到的边的集合。图 1 中, 测量点  $M$  的视界为  $\{1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 2-4, 2-5, 3-6\}$ 。因为边  $7-3$  不在任意一条以  $M$  为起点的“无谷路径”上, 所以边  $7-3$  不在  $M$  的视界中。

一些 AS 处于 Internet 的核心地位, 被称为顶级 AS。它们给网络中的大部分节点转发流量、不存在供应商且彼此互连 P-P 边。除顶级 AS 外, 一些非盈利组织构成的 AS 也没有供应商, 由于这些 AS 的 P-C 边很少而又很难对它们统一建模, 本文不考虑这些 P-C 边。因此, 我们假设任何一个 P-C 边都在某个以顶级 AS 为起点的下山路径上。根据这个假设, 我们可以推知一个测量点的供应商树上至少包含一个顶级 AS。

**定理 1** 一条边是一个测量点  $M$  的可见边, 当且仅当此边是 P-C 边或者是  $M$  的供应商树上 AS 的一个邻接的 P-P 边。

**证明** 先证充分性。假设结论不成立, 那么此边 (AB) 设为是一个 P-P 边, 且  $A$  与  $B$  都不在  $M$  的供应商树上。根据定义 3, 存在一条以  $M$  所在 AS 为原点的“无谷路径”, 不妨设为“ $L, \dots, A, B$ ”, 其中  $L$  为  $M$  所在 AS。因为 AB 为 P-P 边, 则“ $L, \dots, A$ ”为上山路径, 所以  $A$  是  $M$  的上游 AS, 即  $A$  在  $L$  的供应商树上, 与假设矛盾。

再证必要性。当 AB 是 C-P 边 (不妨设  $A$  为客户), 考虑  $A$  上一个测量点的供应商树, 根据假设这个供应商树至少应该包含一个顶级 AS  $X$ 。同理,  $M$  的供应商树也应该包含一个顶级 AS  $Y$ 。A 到  $X$  存在一条经过  $B$  的上山路径为“ $A, B, \dots, X$ ”, 也就是说“ $X, \dots, B, A$ ”为下山路径。 $M$  所在 AS  $L$  到  $Y$  的上山路径为“ $L, \dots, Y$ ”, 其中  $L$  为  $M$  所在 AS。因为顶级 AS 间互连 P-P 边。那么“ $L, \dots, Y, X, \dots, B, A$ ”为一条“无谷路径”。

当 AB 是 P-P 边, 且  $A$  与  $B$  至少有一个在  $M$  的供应商树上, 不妨设  $A$  在  $M$  的供应商树上。那么从  $M$  所在 AS  $L$  到  $A$  存在一条上山路径“ $L, \dots, A$ ”, 则“ $L, \dots, A, B$ ”为“无谷路径”。

综上所述, 当 AB 是 C-P 边或者 AB 是  $M$  供应商树上的 P-P 边, AB 是  $M$  上的测量边。

证毕。

#### 3.3 视界的估计

本文采用的测量数据来自被动测量项目 Routeviews<sup>[12]</sup> 和 RIPE NCC<sup>[13]</sup>, 包括了 339 个 AS 中的 478 个测量点上的路由表和路由更新报文。其中, 77 个 AS 中的 109 个测量点包含完整的路由表, 38 个测量点位于 14 个顶级 AS 中。数据收集从 2012 年 1 月 1 日到 2012 年 12

月 31 日。

为评价拓扑发现完整性,本节推测每个测量点的视界,以便与实际测量结果进行比较。

首先,根据文献[3]中提出的算法推断 AS 邻接关系类型.这个算法可以概括为:位于顶级 AS 中的测量点观测到的 AS 路径除第一跳外都属于 P-C 边.本文应用此方法,共得到 110137 条 P-C 边.由于 BGP 存在误配置的情况,在顶级 AS 中的测量点可能看到“有谷路径”.BGP 误配置一般存在时间都比较短<sup>[14]</sup>,且修改后不会再出现.为减小其对拓扑关系推断的影响,本文过滤掉只出现一次,且时间小于 1 天的 AS 路径.过滤后共得到 99375 条 P-C 边.之前一些研究的一个共识是,通过长期积累路由表,可以发现 Internet 中 AS 级拓扑中的大多数 P-C 边.所以本文用上述方法得到的 P-C 边作为对视界中 P-C 边的估计。

然后,根据供应商树的定义和推测到的 P-C 边,计算每个测量点的供应商树.为了避免错误地扩展供应商树,本文将一个 AS 包含在测量点的供应商树中,仅当在实际 BGP 数据中看到一条从测量点所在 AS 到这个 AS 的上山路径.图 2 显示了根据实际 BGP 数据计算得到的测量点的供应商树的大小,其中 97% 的供应商树规模小于 40,这些供应商树覆盖了 359 个 AS,其中包括所有顶级 AS 和 287 个与顶级 AS 相邻的 AS。

接下来,估计每个测量点的供应商树上 AS 的邻接的 P-P 边.此前的研究表明,当一个 AS 内布置了测量点且能采集完整的路由表,通过长时间累积路由表可以发现这个 AS 的所有邻接的 P-P 边<sup>[3]</sup>.不幸的是,本文采用的数据集中只有 109 个采集完整路由表的测量点,所以本文对供应商树上 AS 的 P-P 边的估计只考虑布置了测量点的 AS 的 P-P 边。

## 4 可见边的发现完整性分析

本节把每个测量点的测量结果与上一节中得到的视界进行比较,讨论测量点对其视界的测量是否完整,进而对测量点部署方案给出启发性指导。

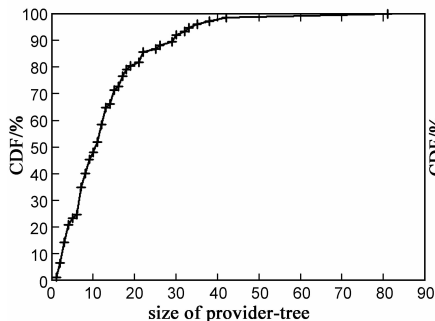


图2 供应商树的规模

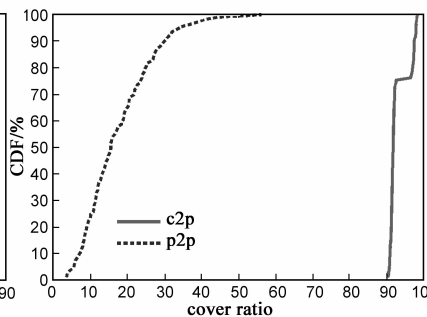


图3 单测量点对可见边的覆盖率

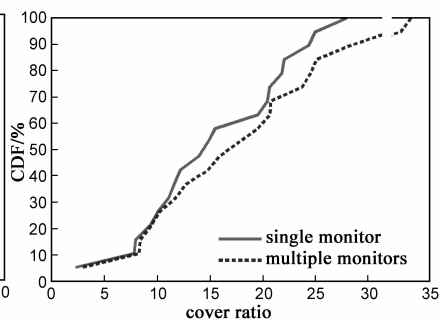


图4 单AS多测量点对可见边的覆盖率

首先,对单个测量点分别计算 P-C 边和 P-P 边的覆盖率(cover ratio),并在图 3 中画出它们的累积分布曲线.本文中覆盖率表示测量点上的测量结果(P-C 边或供应商树上的 P-P 边)在估计的视界中的比例,一个测量点的测量结果指的是通过累计这个测量点的路由表和更新报文获得的 AS 级拓扑.如图, P-C 边(曲线“c2p”)的覆盖率普遍超过 90%;供应商树上 P-P 边的覆盖率很低,对于超过 90% 的测量点,其供应商树上的 P-P 边(曲线“p2p”)覆盖率低于 30%,而且覆盖率最高只有 56%.考虑到估计的视界只是实际视界的一个子集,所以一个测量点对其供应商树上的 P-P 边覆盖率很低.由于对 P-C 边的估计过程中只排除了大约 10% 的 P-C 边,本文认为测量点对其视界中的 P-C 边覆盖率较高。

因为一个 AS 内的路由存在多样性<sup>[15]</sup>,所以接下来考察在同一个 AS 内增加测量点是否有助于提高供应商树上的 P-P 边的覆盖率.把同一个 AS 内存在的多个测量点的测量结果合并,计算它们对其共同供应商树上 P-P 边的覆盖率.图 4 曲线“multiple monitors”为这个覆盖率的累积分布曲线.对应的曲线“single monitor”是这些测量点单独计算的覆盖率的累积分布曲线.这两条曲线差别并不大,可见同一个 AS 内多个测量点的综合结果比单个测量点略好,但是覆盖率提高很小,不超过 5%。

综上,测量点对其视界内的 P-P 边覆盖率低,但对于其直接邻接的 P-P 边覆盖率高.那么如果在一个 AS 的下游 AS 上设置测量点,这个 AS 的邻接的 P-P 边是否能够被完整发现?图 5 为一个 AS 的下游 AS 上的测量点对这个 AS 的邻接的 P-P 边的覆盖率.其中,横坐标为一个 AS 的下游 AS 中测量点数量,纵坐标为对这个 AS 邻接的 P-P 边的覆盖率.如图 5,很多 AS 的邻接的 P-P 边能够被其下游 AS 上的测量点完整发现.然而存在一些 AS,其下游 AS 上存在数十个测量点,但覆盖率依然很低(低于 40%).因此本文认为,一个 AS 的下游 AS 上的测量点可以显著改善其直接邻接的 P-P 边的完整性,但是无法保证改善的程度。

本节的讨论表明,被动测量点对其视界范围内的 P-P 边的覆盖率很低,同时也在同一个 AS 内增加测量点的收益也很小.想要获得更加完整的 AS 级拓扑,需要在尽可能多的 AS 内增加测量点.需要获得某一个 AS 的完整的邻接关系,只能在这个 AS 内设置测量点.

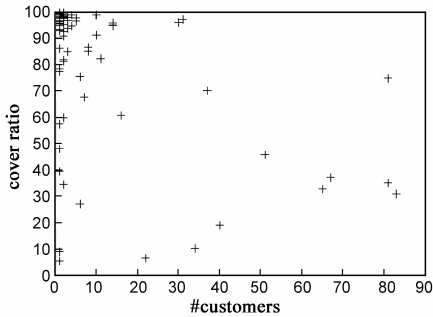


图5 下游AS对本地P-P边的覆盖率

## 5 影响完整性的因素

本节进一步讨论哪些因素影响了拓扑测量的完整性.因为不完整部分主要是视界中的 P-P 边,所以本节对覆盖率的定义为每对“测量点-被测点”中测量点对被测点(测量点的一个上有 AS)的 P-P 边的覆盖率.讨论的思路为:首先分析哪些原因会导致覆盖率受影响;然后通过实验来验证.

### 5.1 测量点与被测量点的距离

因为 BGP 协议只给邻居传送最佳路由,相当一部分更新报文在传播的过程中,如果其更改的路由没被选为最佳路由,就会被丢弃,所以距离测量点越近的 AS,其更新报文影响测量点路由表的概率越高,因而拓扑发现的完整性就越高.图 6 显示了测量点与被测量点在不同距离下的覆盖率的累积分布曲线(由于距离为 3 跳或 3 跳以上的“测量点-被测点”的对数只占很小的比例,所以此图忽略它们).测量点对自己所在 AS 的覆盖率普遍较高(曲线“0 hop”),而距离测量点越远,覆盖率越低.因为距离相同的“测量点-被测点”对覆盖率相差悬殊,所以距离不是影响覆盖率的决定性因素.

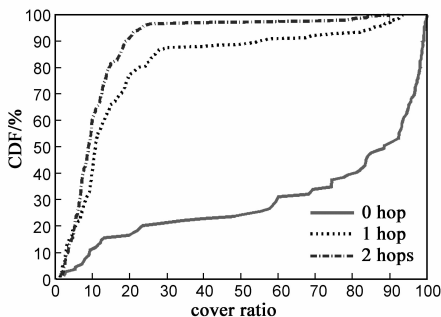


图6 测量点与被测量点间距离对覆盖率的影响

### 5.2 测量点的路由策略

若测量点的路由策略偏好选择来自某一邻居的路

由,则会导致覆盖率的差异.本文对每个测量点计算每个供应商的稳定前缀的个数.当一个前缀选择来自某个邻居 AS 的路径时间超过一个阈值,我们就认为这个前缀是该邻居 AS 的稳定前缀.本文假设由于软硬件故障、配置错误导致的链路拥塞会在 1 天内解决,所以将阈值设为 1 天.稳定前缀的个数,可以表现测量点对于选择某个邻居 AS 的路由的倾向性.

如图 7 所示,横坐标为同一个测量点的不同供应商的稳定前缀个数(dominant ratio)的比值(最多的供应商比最少的供应商),纵坐标为测量点对这两个供应商的 P-P 边的覆盖率(cover ratio)的比值(最多比最少).无论稳定前缀比为多少,覆盖率的比值几乎平均分布在 1 上下.也就是说,即使备用供应商也有可能比优先级最高的供应商覆盖率高(对应图中稳定前缀比值较大,但是覆盖率比值小于 1 的点).由此可见,测量点的路由策略对被测量点上 P-P 边的覆盖率没有直接影响.

### 5.3 测量点与被测点的邻居个数

同一个 AS 上不同邻居的路由存在竞争.被测量点的 P-P 边和客户越多,它的某个邻居在被测量点上选为最佳路由的概率就越低.同理,测量点的邻居越多,那么被测量点从某个邻居学来的路由在测量点上被看到的概率就越低.下面,本文分别对测量点和被测点的邻居个数对覆盖率产生的影响进行定量分析.

为了讨论被测点的邻居数量对覆盖率的影响,本文对每对“测量点-被测点”的覆盖率做累积分布曲线.如图 8 所示,“all”为所有实例,“big peers”代表去掉被测点对等 AS 个数小于 1000 的实例后的覆盖率累积分布曲线,“big customers”代表去掉被测点客户数量小于 1000 的实例后的覆盖率累积分布曲线.当被测点客户个数大于 1000 时,超过 95% 的实例覆盖率小于 30%;而当被测点对等 AS 数量大于 1000 时,其覆盖率累积分布曲线与包含所有实例的覆盖率累积分布曲线几乎一致.因此,当被测点的客户较多时,覆盖率偏低.

与此类似,图 9 讨论测量点的邻居数量对覆盖率的影响.其中,“all”为所有实例,“big peers”代表去掉测量点对等 AS 数量小于 1000 的实例后的覆盖率累积分布曲线,“big customers”代表去掉测量点客户数量小于 1000 的实例后的覆盖率累积分布曲线.当去掉测量点客户数量和对等 AS 数量较少的实例后,低覆盖率的实例比例明显变大.例如,对于所有实例,覆盖率低于 30% 的实例只占 77%;而对于对等 AS 数量大于 1000 的实例,这个比例占 86%;对于客户数量大于 1000 的实例,这个比例超过 95%.因此,当客户个数和对等 AS 个数较多时,覆盖率会受影响而较低.

综上所述,测量完整性随测量点与被测点的距离、测量点的邻居数量、被测点的客户数量的增大而减小.

但是,测量点的路由策略对测量完整性没有直接影响.本节的讨论对于测量点部署的指导意义在于:首先,具体的指出测量点无法完整测量其所在 AS 的供应商的邻接关系,这否定了文献[7]的假设.其次,想要获得尽

量完整的 AS 拓扑,测量点的选择就要考虑 AS 的拓扑属性.比如,对于规模较大的 AS,要在尽量多的下游 AS 上布置测量点,且这些测量点的邻居数量应尽量少.

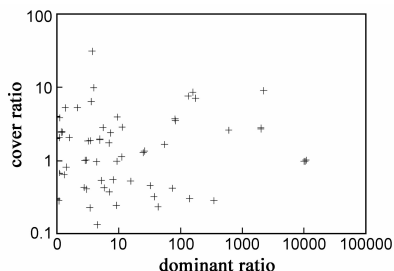


图7 测量点的路由策略对覆盖率的影响

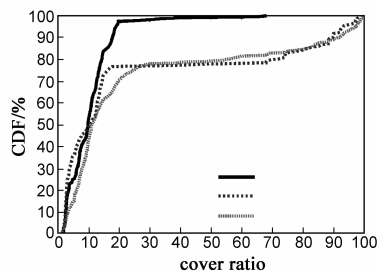


图8 被测点的覆盖率

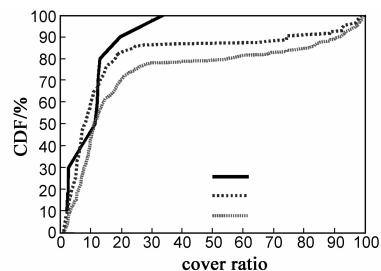


图9 测量点的覆盖率

## 6 结论

本文提出了“可见边”的概念以表示一个测量点的理论测量结果,并证明“可见边”包括所有的 P-C 边和供应商树上的 P-P 边.通过实验比较,本文发现对于单个测量点,其 P-C 边发现较完整,但是客户-供应商树上的 P-P 边完整性较差.在同一个 AS 内增加测量点可以改善测量结果,但是帮助很小.在不同的 AS 内增加测量点可以显著改善测量结果,但下游 AS 上的测量点无法完全取代本地 AS 对本地拓扑完整性的贡献.此外,本文分析了影响拓扑完整性的因素,被测量点到测量点的距离、测量点的邻居数量以及被测点的客户数量都会影响拓扑完整性.

### 参考文献

- [1] 徐格,熊勇强,吴建平.边界网关协议 BGP-4 的安全扩展[J].电子学报,2002,30(2):271-273.  
Xu Ke, Xiong Yongqiang, Wu Jianping. Security extension for border gateway protocol BGP-4[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(2): 271-273. (in Chinese)
- [2] Chang H, et al. Towards capturing representative AS-level Internet topologies[A]. Proceedings of the SIGMETRICS[C]. Marina del Rey, California, USA, 2002. 280-281.
- [3] Oliveira R, Pei D, Willinger W, Zhang B, Zhang L. The (in) completeness of the observed Internet AS-level structure[J]. IEEE/ACM TON, 2010, 18(1): 109-122.
- [4] He Y, Siganos G, Faloutsos M, Krishnamurthy S. Lord of the links: A framework for discovering missing links in the Internet topology[J]. IEEE/ACM TON, 2009, 17(2): 391-404.
- [5] Giotsas V, Zhou S, Luckie M, Claffy K. Inferring multilateral peering[A]. Proceedings of the CoNEXT[C]. Santa Barbara, USA, 2013. 247-258.
- [6] Khan A, Kwon T, Kim H, Choi Y. AS-level topology collection through looking glass servers[A]. Proceedings of the IMC[C]. Barcelona, Spain, 2013. 235-242.

- [7] Gregori E, Improta A, Lenzini L, Rossi L, Sani L. On the incompleteness of the AS-level graph: a novel methodology for BGP route collector placement[A]. Proceedings of the IMC[C]. Boston, USA, 2012. 253-264.
- [8] Gao L. On inferring autonomous system relationships in the Internet[J]. IEEE/ACM TON, 2001, 9(6): 733.
- [9] Dimitropoulos X, Krioukov D, Fomenkov M, Huffaker B, Hyun Y, Claffy K, Riley G. AS relationships: inference and validation[J]. SIGCOM CCR, 2007, 37(1): 29-40.
- [10] Luckie M, Huffaker B, Dhamdhere A, Giotsas V, Claffy K. AS relationships, customer cones, and validation[A]. Proceedings of the IMC[C]. Santa Barbara, USA, 2013. 243-256.
- [11] 郭虹,兰巨龙,汪涛,刘洛琨.基于核数分层的 AS 关系拓扑建模[J].电子学报,2011,39(11):2627-2734.  
Guo Hong, et al. Agglomerative hierarchical clustering based algorithm for network topology inference[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 2627-2734. (in Chinese)
- [12] Route Views Project, [http://www.routeviews.org/\[DB/OL\]](http://www.routeviews.org/[DB/OL]). 2013-05-24
- [13] RIPE NCC, [http://www.ripe.net/\[DB/OL\]](http://www.ripe.net/[DB/OL]). 2013-05-24.
- [14] Mahajan R, Wetherall D, Anderson T. Understanding BGP misconfiguration[A]. Proceedings of the Sigcomm[C]. Pittsburgh, USA, 2002. 3-16.
- [15] Mühlbauer W, Feldmann A, et al. Building an AS-topology model that captures route diversity[A]. Proceedings of the Sigcomm[C]. Pisa, Italy, 2006. 195-206.

### 作者简介



苏申男,1985 年生于黑龙江哈尔滨.哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院博士.研究方向为 BGP、无线传感器网络.

E-mail: sushen@pact518.hit.edu.cn