

从 IP 路径信息中推导 AS 边界^{*}

魏镇韩⁺, 陈 鸣, 赵洪华, 吉 梁

(解放军理工大学 指挥自动化学院, 江苏 南京 210007)

Deducing AS Borders from IP Path Information

WEI Zhen-Han⁺, CHEN Ming, ZHAO Hong-Hua, JI Liang

(Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

+ Corresponding author: E-mail: weizhenhan@hotmail.com

Wei ZH, Chen M, Zhao HH, Ji L. Deducing AS borders from IP path information. *Journal of Software*, 2010, 21(9):2387–2394. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3741.htm>

Abstract: Based on IP path information, by analyzing a general model of AS border, the concept of AS border sequence is introduced, and a series of AS border judging rules that discover the AS border division law hidden behind IP path information are proposed. Therefore, a method on judging AS borders named JBR (judging border by rules) is put forward. The experiment results show that JBR's judging time is shorter than the method named JBA (judging border by alias), which is based on alias resolution, and it has advantage on judging both border addresses and border links.

Key words: computer network; topology; IP path; AS border

摘 要: 基于 IP 路径信息,从分析 AS 边界的一般模型入手,引入了 AS 边界序列的概念,提出了一系列 AS 边界判别规则,这些规则揭示了 IP 路径信息中所隐藏的 AS 边界划分规律,由此提出了一种基于规则的 AS 边界判别方法 JBR(judging border by rules)。实验结果表明,与基于别名解析的判别方法 JBA(judging border by alias)相比,JBR 具有较快的判别速度,在边界地址及边界链路的判断上都具有优势。

关键词: 计算机网络;拓扑;IP 路径;AS 边界

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

Internet 拓扑反映了网络节点(路由器)之间的逻辑连接关系。对于一个已知的大规模网络拓扑,我们不仅需要研究一些统计特性如节点度分布、特征路径长度等等,更重要的是需要从中获取对网络结构更细致的观察。

深入理解网络结构的第 1 步是在拓扑中准确地划分出不同的 ISP 网络,即在拓扑中识别出 AS 的边界。Internet 由数以万计的 ISP 网络组成,边界路由器位于这些网络的边缘,在网络拓扑中正确判别 AS 边界路由器具有如下意义:(1) 使得研究人员能够掌握 ISP 网络之间真实的连接细节^[1],进而在一个较细粒度上了解 Internet 的构成,不准确的边界划分会导致出现虚假的网络连接;(2) 获取被 BGP 选路表所隐藏的信息,例如上游 AS 会将几个具有连续地址范围的下游 AS 的通告聚合为一个较大 AS 的通告,准确的 AS 互连信息有助于发现那些

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.90304016 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2007AA01Z418 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2008-09-11; Accepted 2009-09-03

被 BGP 选路表聚合的 AS^[1]; (3) 从国家安全角度考虑, 边界路由器属于网络重要节点, 掌握网络中尽可能多的边界路由器信息具有重要的应用意义。

AS 边界判别问题的解决需要运用 IP-to-AS 映射技术, 该技术用以判别 IP 地址所属的 AS。直觉上, 仅仅利用 IP-to-AS 映射即可识别 AS 边界。例如, 若 IP 路径中两个邻接 IP 地址分别属于不同的 AS, 则直接判断这两个地址代表了 AS 边界。然而事实并非如此, Internet 的基础设施决定了一条链路两端的地址通常具有相同的网络前缀(即属于同一网段), 如果这条链路是两个 ISP 网络之间的边界链路, 那么该边界链路两端的 IP 地址所属的网络前缀必然来源于两个邻接 AS 中的某一个, 这会造成边界路由器的接口地址有可能来源于对端 AS 的地址空间。该特点可能导致 AS 边界的误判。例如, 图 1 由上而下显示了一条穿越 AS1239 进入 AS3257 的 IP 路径片断, 只依据 IP-to-AS 映射容易将 144.223.242.150(属于 AS1239)和 213.200.82.2(属于 AS3257)误判为 AS 边界。事实上, 同属 AS1239 的两个地址 144.232.9.58 和 144.223.242.150 才是真实边界。

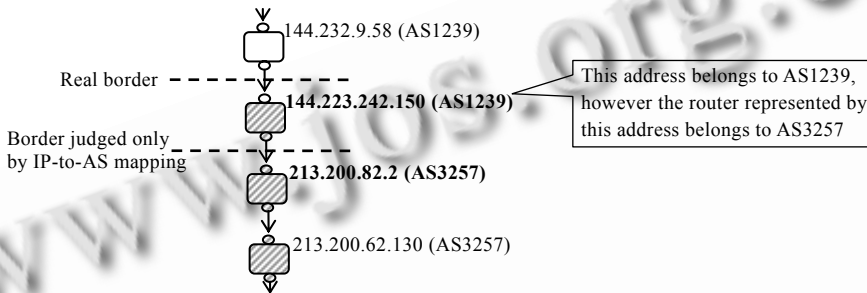


Fig.1 Error judgment caused by IP-to-AS mapping

图 1 IP-to-AS 映射造成的误判

产生上述问题的根源在于, 边界路由器的某些接口可能分属于两个或多个相邻的 AS。因此, 直接使用 IP-to-AS 映射来判断 AS 间的边界是不准确的, 需要进一步发展 AS 边界判别技术。但是, 当前关于 AS 边界判别问题的研究较为缺乏, 无法准确划分 ISP 网络边界就不能真实地研究 AS 之间的连接细节, 这阻碍了我们更有效地分析 Internet 的拓扑结构。本文对该问题进行了深入分析。

1 相关工作

AS 边界判别中, 首先需要解决的是边界路由器的确认问题, 即判别哪些路由器属于边界路由器。第 2 步需要解决的是边界路由器的归属问题, 即判断边界路由器所隶属的 AS。

对于边界路由器的确认问题, 通常的判别方法依赖于别名解析技术和 IP-to-AS 映射技术。

别名解析就是识别出哪些 IP 地址(称为别名)属于同一个路由器。典型的别名解析技术基于响应报文的源地址^[2], 其原理是向某 IP 地址发送一个具有较高端口的 UDP 探测报文, 被探测的路由器将会返回 ICMP“端口不可达”报文。若返回报文的源地址与被探测的目标地址不同, 则说明被探测路由器在响应报文中使用了出口地址作为源地址, 该出口地址与被探测的目标地址就是属于同一路由器的两个别名。该方法的优点是判断准确, 缺点是许多路由器不会对探测做出响应或并不用出口地址作为源地址, 限制了解析覆盖率。

IP-to-AS 映射技术实现了从 IP 地址到 AS 号的映射关系。通常, IP-to-AS 映射可从 BGP 路由表中得到, 做法是检查 AS 路径中针对每个前缀的最后一个 AS(称为起始 AS), 利用网络前缀和起始 AS 的对应关系即可建立 IP-to-AS 映射表。文献[3,4]提出了几种提高映射准确性的方法。

综合使用以上两种技术来确认边界路由器。首先利用别名解析工具找出属于同一路由器的接口地址, 然后利用 IP-to-AS 映射来确定这些接口是否属于同一个 AS, 若路由器拥有多个隶属不同 AS 的接口, 则判断其为边界路由器。该方法的优点是判别条件较为精确, 不会出现误判。缺点是存在漏判, 原因是: (1) 当前的别名解析技术受制于测量权限, 因此能聚合的地址并不全面; (2) 拥有多个隶属不同 AS 接口是边界路由器的充分条件而非必

要件,即使一个边界路由器,也可能所有接口都同属于一个 AS.

经上述方法判断的边界路由器,需要进一步判断其归属问题.文献[5]使用了简单的判断,即选择多数接口所映射的 AS.文献[1]指出,若边界路由器接口的映射为 $\{AS_1, \dots, AS_N\}$, 则该路由器一定属于 $\{AS_1, peer(AS_1)\} \cap \dots \cap \{AS_N, peer(AS_N)\}$, 其中, $peer(AS_i)$ 表示 AS_i 所有可能的 AS 邻居, $\{AS_i, peer(AS_i)\}$ 表示候选者集合.提出两种判别规则:(1) 交集规则:若上述所有候选者集合的交集能产生一个单元元素集合,则将路由器映射到这个单独的 AS;(2) 多数规则:若路由器有超过 4 个以上的接口,并且多于 2/3 的接口映射到一个 AS,则将路由器映射到该 AS.因为 AS 的邻居普遍较多,这导致候选者集合中存在较多候选 AS,难以通过交集获取单一 AS,因此只能解析大约 20% 的边界路由器^[1].

我们将上述方法统称为基于别名的边界判别方法 JBA(judging border by alias).其判别流程可以描述为:通过别名解析和 IP-to-AS 映射技术实现边界路由器的确认,在此基础上,根据交集或多数规则可以进一步确认路由器的归属.JBA 存在两个不足:(1) 别名解析需要进行大量的网络测量,既造成网络流量负担又较为费时;(2) 判别手段较为单一,特别是交集和多数规则过于简单,在判断路由器归属上并不理想.

从整体上看,Internet 拓扑本身不提供明确的 AS 边界信息,测量或分析手段都不能有效地判别出所有 AS 边界,因此不存在完善的解决方案.但这并不妨碍我们寻求一种解决该问题的新思路.从另一个角度看,因特网拓扑由大量 IP 路径数据聚合而成,在这些 IP 路径的信息中,那些位于 AS 边界附近的地址之间应该存在一定的约束规律,若能有效地发掘这种规律就可以推导出相关的 AS 边界.基于上述思想,我们设计了一种判别方法 JBR(judging border by rules),该方法无需测量而完全基于推断规则来判别 AS 边界.

2 IP 路径中的 AS 边界信息

2.1 AS 边界的一般模型

我们的目标是在 IP 路径信息中定位 AS 边界,因此首先需要分析 IP 路径中 AS 边界的划分特点.为便于描述,首先定义如下概念:

定义 1(路径信息).

- IP 路径: $p=p_1 \dots p_n$, 即一个地址序列,其中, $n \geq 2$. $P=\{p\}$ 表示所有路径集合, $I(P)/I(p)$ 表示 P 或 p 中地址集合, $B(P)/B(p)$ 表示 P 或 p 中边界地址集合;
- L_R 表示路由器逻辑标识集合, L_{AS} 表示 AS 号集合.

定义 2(映射函数).

- $R: I \rightarrow L_R$ 表示将 IP 地址映射到逻辑路由器标识的映射函数;
- $M_I: I \rightarrow L_{AS}$ 表示将 IP 地址映射到 AS 号的函数,通过 IP-to-AS 技术构造该函数;
- $M_R: L_R \rightarrow L_{AS}$ 表示将逻辑路由器标识映射到 AS 号的归属函数.

$M_R(R(p_i))$ 未必等于 $M_I(p_i)$, 判别 AS 边界问题就是根据 P 和 M_I 推导 $B(P)$ 及其归属 $M_R(B(P))$. 直观上,若路径 $p=p_1 \dots p_i p_{i+1} \dots p_n$ 中 $M_I(p_i) \neq M_I(p_{i+1})$, 则链路 $\langle p_i p_{i+1} \rangle$ 意味着可能存在一个 AS 边界.虽然无法直接断定边界链路的确切位置,但我们希望确定出一个边界链路的候选范围.

对于转发路径中的一个地址序列 $p_1 p_2 p_3 p_4$, 若已知 $M_I(p_1)=M_I(p_2)=A, M_I(p_3)=M_I(p_4)=B$, 则图 2 显示了链路 $\langle p_1 p_2 \rangle, \langle p_2 p_3 \rangle$ 和 $\langle p_3 p_4 \rangle$ 都可能是 A 和 B 之间的边界链路.图中 $R_i=R(p_i)$. 在图 2(a)中, $p_1 \sim p_4$ 都是路由器左侧入口地址, 尽管 $M_I(p_2)=A$, 但 $M_R(R_2)=B$, 因此 R_1 和 R_2 是边界; 图 2(b)中, $p_1 \sim p_4$ 都是左侧入口地址, R_2 和 R_3 是边界; 图 2(c)中, p_1 和 p_2 是左侧入口地址, 而 p_3 和 p_4 是路由器出口地址且不同于其左侧入口地址(ICMP“TTL 超时”报文中的源地址既可能是路由器入口地址,也可能是出口地址^[6]). 此时, 尽管 $M_I(p_3)=B$, 但 $M_R(R_3)=A$, 因此, R_3 和 R_4 是边界.

图 2 描述了 IP 路径中 AS 边界划分的一般特点,体现了最普通的边界划分.基于上述分析,我们定义了边界序列的概念,代表了 IP 路径中 AS 边界的一般模型.

定义 3(边界序列).

- 对于路径 $p=p_1 \dots p_i p_{i+1} p_{i+2} p_{i+3} \dots p_n$, 若 $M_I(p_i)=M_I(p_{i+1})=A, M_I(p_{i+2})=M_I(p_{i+3})=B$, 则 $s=(p_i p_{i+1} p_{i+2} p_{i+3})_{AB}$ 称为边

界序列;

- $S=\{s\}$ 表示边界序列集合, $I(S)/I(s)$ 表示 S 或 s 中的地址集合, $B(S)/B(s)$ 表示 S 或 s 中的边界地址集合.

为从边界序列中合理地推断边界地址,这里提出 3 个基本假设:(1) 上述边界序列中存在一个 A 和 B 之间的边界,某些异常情况(例如 IP-to-AS 的不准确性)可能导致具有上述形式的边界序列实际上并不存在任何边界或存在非 A,B 间的边界,我们忽略这种情况;(2) 分属 A,B 的两个边界地址直接相邻;(3) 边界序列中仅存在两个 A,B 间的边界地址,我们假设大多数情况下分组不会连续穿越两个属于 A (且都是 B 的对等方)的边界路由器之后进入 B ,也不会在离开 A 后连续穿越两个属于 B (且都是 A 的对等方)的边界路由器.作为真实情况的一种简化,上述假设通常是成立的,提供了边界推断的基础.

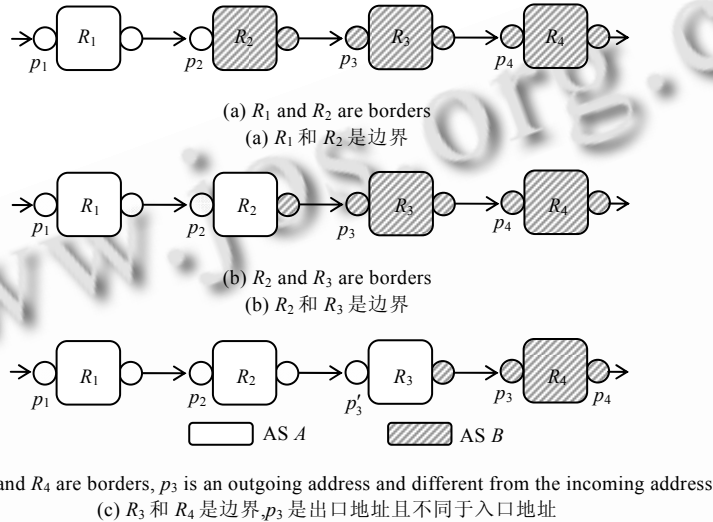


Fig.2 Different border is possible with same addresses sequence

图 2 相同的地址序列可能有不同的边界划分

2.2 判别规则及流程

基于边界序列的概念,AS 边界判别问题可进一步描述为:已知 P 和 M_i ,通过构造 S ,推导 $B(S)$ 及其归属 $M_R(B(S))$.构造边界序列集合 S 的目的是从 IP 路径集合 P 中提取潜在的 AS 边界.一个边界序列中含有 3 条潜在的边界链路,每个 IP 地址都可能是边界地址.基于 3 个基本假设,通过考察边界序列之间以及边界序列与其他 IP 路径之间的制约关系来推断边界地址.下面的扇形规则揭示了推断边界地址的第 1 个规律,其中, N_S 表示拓扑测量中的源点数量.

扇形规则 1. 对于 K 个边界序列 $s^{(t)} = (p_i, p_{i+1}, p_{i+2}, p_{i+3})_{AB}, t \in \{1, \dots, K\}$,若 $K > 2 \times N_S$,且其中任意两个不同的边界序列 $s^{(x)}$ 和 $s^{(y)}$ 均有 $p_{i+2}^{(x)} \neq p_{i+2}^{(y)}$,则 $B(S) = B(S) \cup \{p_i, p_{i+1}\}$,且 $M_R(B(p_i)) = A, M_R(B(p_{i+1})) = B$.

证明:基于假设可知,在 K 个边界序列中共存在 K 条边界链路,如果这些边界序列的前两个地址 p_i 和 p_{i+1} 均相同,那么相关边界在各自边界序列中将具有一致的位置,满足以下 3 种情况之一:

- (1) K 个边界序列中唯一的边界链路是 $\langle p_i, p_{i+1} \rangle$;
- (2) 边界序列 $s^{(t)}$ 中的边界链路是 $\langle p_{i+1}, p_{i+2}^{(t)} \rangle, t \in \{1, \dots, K\}$;
- (3) 边界序列 $s^{(t)}$ 中的边界链路是 $\langle p_{i+2}^{(t)}, p_{i+3}^{(t)} \rangle, t \in \{1, \dots, K\}$.

如果相关边界不能满足上述 3 种情况之一,那么某些边界序列中必然存在两个连续属于 A 的边界地址.例如,设 $s^{(x)} = (p_i, p_{i+1}, p_{i+2}^{(x)}, p_{i+3}^{(x)})_{AB}$ 中的边界链路为 $\langle p_{i+1}, p_{i+2}^{(x)} \rangle$,若 $s^{(y)} = (p_i, p_{i+1}, p_{i+2}^{(y)}, p_{i+3}^{(y)})_{AB}$ 中边界链路为 $\langle p_{i+2}^{(y)}, p_{i+3}^{(y)} \rangle$,则说明 $s^{(y)}$ 连续穿越了两个属于 A (且都是 B 的对等方)的边界路由器 $R(p_{i+1})$ 和 $R(p_{i+2}^{(y)})$ 之后进入 B ,该情况违反了第 3

条假设.因此,边界位置将满足以上 3 种形式中的一种.

需要注意的是,在后两种情况中, K 个边界地址 $p_{i+2}^{(1)}, \dots, p_{i+2}^{(K)}$ 代表了 B 或 A 的多个路由器.这是因为在整个测量过程中,一个路由器最多向 N_S 个源点返回响应报文,所有响应报文中最多可能出现 N_S 个不同的源地址,因此当 K 值 $> 2 \times N_S$ 时,地址 $p_{i+2}^{(1)}, \dots, p_{i+2}^{(K)}$ 至少代表了 3 个路由器.

第(2)种情况中,边界地址 $p_{i+2}^{(1)}, \dots, p_{i+2}^{(K)}$ 代表了 B 的多个路由器.对于 A 的边界路由器 $R(p_{i+1})$ 来说,同时连接 B 的多个边界路由器是不必要的,因此可以排除该情况;第(3)种情况中,边界地址 $p_{i+2}^{(1)}, \dots, p_{i+2}^{(K)}$ 代表了 A 的多个路由器,这些边界路由器其大部分接口地址应该映射到 A ,这些路由器在响应探测报文时不可能全都使用映射为 B 的接口地址作为源地址,因此也可以排除该情况.

综上所述,当多个边界序列具有相同的链路 $\langle p, p_{i+1} \rangle$ 且其后继地址呈扇形拓扑时,可推断 $\langle p, p_{i+1} \rangle$ 为 A 和 B 之间的边界链路.证毕. \square

扇形规则 2. 对于 K 个边界序列 $s^{(t)} = (p_i^{(t)} p_{i+1}^{(t)} p_{i+2}^{(t)} p_{i+3}^{(t)})_{AB}, t \in \{1, \dots, K\}$,若 $K > 2 \times N_S$,且其中任意两个不同的边界序列 $s^{(x)}$ 和 $s^{(y)}$ 均有 $p_{i+1}^{(x)} \neq p_{i+1}^{(y)}$,则 $B(S) = B(S) \cup \{p_{i+2}, p_{i+3}\}$,且 $M_R(B(p_{i+2})) = A, M_R(B(p_{i+3})) = B$.

类似于第 1 条扇形规则的分析,该规则表明,当多个边界序列具有相同的链路 $\langle p_{i+2}, p_{i+3} \rangle$ 且其前趋地址呈扇形拓扑时,可以推断 $\langle p_{i+2}, p_{i+3} \rangle$ 为 A 和 B 之间的边界链路.

扇形规则可从以下现象得到形象的解释:途经 A 中不同路由器的多个探测分组汇聚到边界路由器,穿越边界链路后进入 B (扇形规则 2);经过边界链路到达 B 的多个探测分组被分散转发到不同的路由器(扇形规则 1).

对于无法应用扇形规则的边界序列,根据某些路径信息可以排除其中一条链路,同时确认某个地址为边界地址.下面的排除规则揭示了确认边界地址的第 2 个规律.

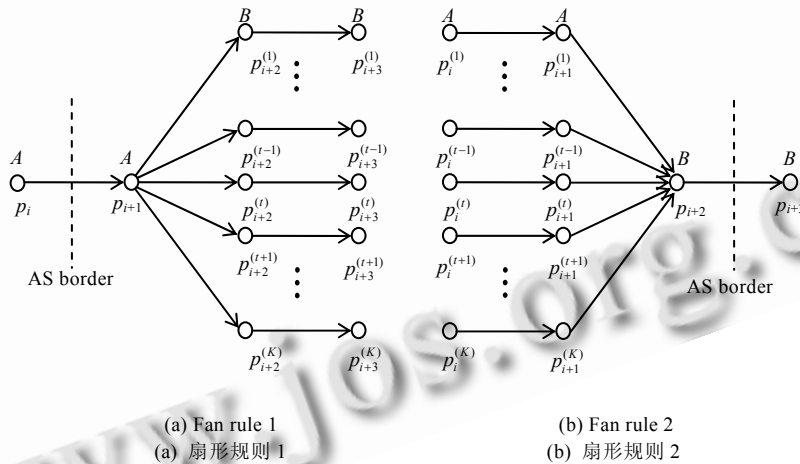


Fig.3 Illustrations of fan rules, the circle represents the interface of address

图 3 扇形规则的图示,圆圈表示地址接口

排除规则 1. 对于边界序列 $s = (p_i p_{i+1} p_{i+2} p_{i+3})_{AB}$,若存在路径片段 $p_i p_{i+1} p_j$,其中, $M_i(p_j) = A$ 且 $p_j \neq p_{i+2}$,则排除 $\langle p_i, p_{i+1} \rangle$ 为 A, B 之间的边界链路,同时确认 $p_{i+2} \in B(s)$.

证明:反证.如图 4(a)所示,设 $\langle p_i, p_{i+1} \rangle$ 为 A 和 B 的边界链路,则路由器 $R(p_i)$ 属于 A ,而路由器 $R(p_{i+1})$ 属于 B .考虑 $R(p_{i+1})$ 之后的 $R(p_j)$:

- (1) 若 $R(p_j)$ 属于 A ,则出现 AS 选路回路 $A-B-A$,矛盾;
- (2) 若 $R(p_j)$ 不属于 A ,因为拥有映射为 A 的接口 p_j ,则必然也是边界路由器,可能属于 B 也可能属于第三方 ISP.只在特殊情况下,一条路径中连续 3 个映射到 A 的接口地址 $p_i p_{i+1} p_j$ 才有可能代表 3 个边界路由器(其中两个不属于 A),因此可将该情况作为异常因素排除.

综上,排除 $\langle p_i p_{i+1} \rangle$ 为边界链路,潜在的边界只能是 $\langle p_{i+1} p_{i+2} \rangle$ 或 $\langle p_{i+2} p_{i+3} \rangle$,无论哪个是边界链路,都必有 $p_{i+2} \in B(s)$. 证毕. \square

该规则表明,边界序列 s 中若链路 $\langle p_i p_{i+1} \rangle$ 是 A, B 之间的边界链路,则在任何一条包含该链路的 IP 路径中,此链路之后都不会出现属于 A 的后继地址;反之即可排除该链路为边界链路,同时确认 s 中 p_{i+2} 是边界地址.

排除规则 2. 对于边界序列 $s = \langle p_i p_{i+1} p_{i+2} p_{i+3} \rangle_{AB}$,若存在路径片段 $p_j p_{i+2} p_{i+3}$,其中, $M(p_j) = B$ 且 $p_j \neq p_{i+1}$,则排除 $\langle p_{i+2} p_{i+3} \rangle$ 为 A, B 间的边界链路,同时确认 $p_{i+1} \in B(s)$.

类似于排除规则 1,该规则表明,边界序列 s 中若链路 $\langle p_{i+2} p_{i+3} \rangle$ 是 A, B 之间的边界链路,则在任何一条包含该链路的 IP 路径中,此链路之前都不会出现属于 B 的前趋地址;反之即可排除该链路为边界链路,同时确认 s 中 p_{i+1} 边界地址. 图 4(b)显示了该规则的例子.对于边界序列 $s = \langle p_i p_{i+1} p_{i+2} p_{i+3} \rangle_{AB}$,若前两条排除规则同时成立,则可进一步推导得出 $\langle p_{i+1} p_{i+2} \rangle$ 为边界链路.

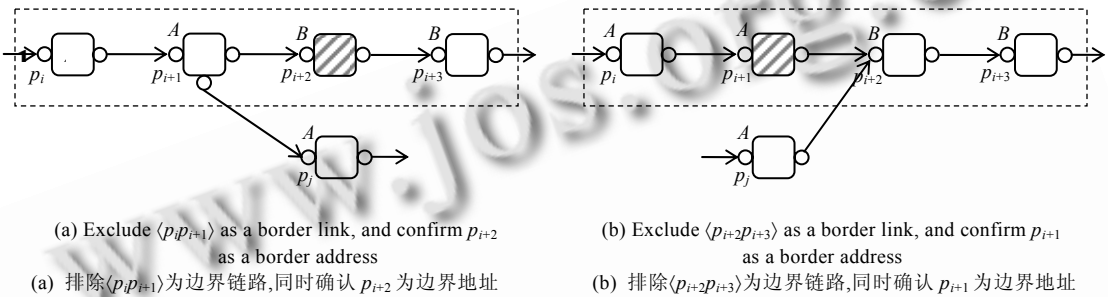


Fig.4 Illustrations of excluding rules

图 4 排除规则的图示

至此,我们得到了一系列推断规则,这些规则是对路径信息的总结和归纳,具有普遍意义.整个判别流程分为 3 步:

- (1) 预处理.构造 IP-to-AS 映射函数,同时从路径集合 P 中构造边界序列集合 S ;
- (2) 初步确认边界地址集 $B(S)$ 及其归属.遍历 S 中的边界序列 s ,利用扇形规则初步确认 $B(S)$ 和确认归属函数;
- (3) 进一步扩展 $B(S)$ 并确认其归属.再次遍历 S ,对于不能应用扇形规则的边界序列 s ,使用排除规则进一步扩展 $B(S)$ 和确认归属函数.

设路径集合 P 中共有 n 条连续链路,对 P 执行一次遍历即可构造边界序列集合 S ,因此步骤(1)计算的时间复杂度为 $O(n)$;对 S 分别执行两次遍历即可推断相关边界,因为 S 中包含的链路数远少于 P ,所以后两步计算的时间复杂性皆不大于 $O(n)$. 综上所述, JBR 能在线性时间内完成推断.

3 实验分析

美国 Sprint 公司是我国接入国际互联网的重要服务商,其下属网络 SprintLink(AS1239)是全球顶级 ISP 网络,我们分析了 SprintLink 与邻接自治系统的边界.原始数据集取自 CAIDA 在 11/13/2007~11/16/2007 之间使用 skitter 工具针对 97 万个目标地址所测量的 IP 路径数据.首先从原始数据中提取位于 AS1239 范围内的路径集合 P 以及边界序列集合 S ,表 1 列举了所提取的 AS1239 数据.IP-to-AS 映射表通过分析 BGP 路由表来建立,相关数据取自 RouteViews 在 11/13/2007~11/18/2007 之间收集的 66 个 BGP 路由器的路由表.

Table 1 AS1239 data measured by skitter

表 1 Skitter 测量的 AS1239 数据

Number of IP paths	Number of addresses	Number of neighbors	Number of border sequences
304 822	21 771	600	74 628

3.1 JBR准确性的验证

正因为缺乏 AS 边界的获取手段,所以 JBR 的验证是个难题.尽管 JBA 判断准确,然而别名解析技术的解析局限性使得 JBA 能够识别的边界数量较少,不适合用于验证.在某些情况下,路由器接口的域名蕴含了网络边界信息,可用于识别或验证 AS 边界.例如,SprintLink 客户(customer)网络的接入路由器通常命名为 *sl-customer-number-sprintlink.net*,该路由器必然是此客户的边界路由器,与其相连的隶属 AS1239 的路由器也必然是对应的边界路由器.需要注意的是,这并不是一个通用的 AS 边界识别方法,因为某些 ISP 并不经常使用域名,同时域名的命名也没有统一的规范,并非所有域名都能提供明确的边界信息.

表 2 列举了 JBR 推断结论的验证结果.JBR 从原始数据集中推断 AS1239 及其邻接边界地址 171 个,边界链路 33 条.根据域名可验证 66.1%的边界地址是正确的,5.8%的边界地址推断错误.由于域名解析的不完全性以及某些域名没有包含明显的边界信息,28.1%的边界地址未能确定其是否正确.我们发现,所有的误判来自排除规则,大部分是异常 traceroute 路径造成的.这些路径在穿越 A 和 B 的边界路由器后再次进入 A 的路由器,形成 AS 级选路回路 A-B-A.这使得排除规则误将上述异常路径作为判别条件,导致了错误结论.文献[7]讨论了出现上述异常路径的几种原因.这也从另一方面提示我们,若能预先排除上述异常路径,将能进一步提高 JBR 准确性.

Table 2 Validation of JBR's results

表 2 JBR 结论的验证

	Total number	Number/ Percentage of correct (%)	Number/ Percentage of unsure (%)	Number/ Percentage of error (%)
Border addresses	171	113/66.1	48/28.1	10/5.8
Border links	33	22/66.7	11/33.3	0/0

3.2 JBR与JBA的比较

利用 CAIDA 提供的 *iffinder* 别名解析工具对 P 中的 IP 地址进行别名解析,共发现别名组 700 对,可聚合路由器节点 549 个.根据 IP-to-AS 映射从中可判别出 59 个边界路由器(共含 98 个边界地址).

表 3 比较了 JBA 和 JBR 两种方法的判别结果.JBR 发现的边界地址数多于 JBA,而在各自判断出来的边界地址中,JBR 能确认相应路由器归属的数量多于 JBA.JBA 与 JBR 共同判别出的边界地址交集较少,数据表明,大部分 JBA 所能判别的边界地址并未包含在 S 集合中,这直接造成 JBA 与 JBR 的交集中不可能存在较多的共同地址.

Table 3 JBR vs. JBA

表 3 JBR 与 JBA 的比较

	Border addresses	Confirmed on domain	Border links
JBR	171	45	33
JBA	98	10	0
$JBR \cap JBA$	4	—	0

实验结果表明,JBR 在边界链路的判别上明显优于 JBA.由于 JBR 没有采取 JBA 那种将路由器作为孤立对象来研究的思路,而是考察了边界路由器在 IP 路径中体现的邻接关系,充分发掘了 IP 路径中隐含的边界信息,因而在边界地址和边界链路的判别效率上优于 JBA.JBR 具备两个优点:① 无需测量,判断耗时少.上述实验中,*iffinder* 探测两万个地址需运行近一个小时,而 JBR 只需要 1~2 分钟就能通过分析 IP 路径得到推断结论;② 基于路径中边界地址的内在关系,能够更加有效地判别边界地址以及边界链路.

除了 IP-to-AS 映射,JBR 只依赖 IP 路径进行推断.路径越多,从中获取的地址关联信息就越丰富,也就越容易推断边界.因此,JBR 在实际应用中往往需要大量路径数据.这些数据的获取门槛并不高,自行测量或下载 CAIDA 数据均可,因此 JBR 具备较好的实用性.在一个经由测量获取的网络拓扑中,边界地址的真实数量是不知道的,难以直接分析 JBR 的完整性.表 1 显示,AS1239 存在 600 个邻居,这可作为一个评估参考值.相对于这个数值可看出,无论是 JBR 还是 JBA,其推断的边界地址都是相当有限的.

4 结 语

为深入理解因特网拓扑的组成结构,需要在拓扑中准确地划分出相应的 ISP 网络.然而,这个看似简单的问题却不容易解决.网络拓扑由 IP 路径聚合而成,在这些 IP 路径信息中,位于 AS 边界的地址之间存在一定的约束规律,正确地识别这种规律有助于 AS 边界的判别.基于上述认识,本文提出了一种基于规则的 AS 边界判别方法 JBR.实验结果表明,同基于别名的方法 JBA 相比,JBR 无需测量,判别速度快,在边界地址及边界链路的确认上都具有一定优势.JBR 的主要贡献是揭示了 IP 路径信息中所隐藏的 AS 边界划分规律.尽管在判别的完整性方面不够完善且存在轻微的误判,JBR 仍不失为一个较好的 AS 判别方法.同时必须指出,AS 边界判别仍是一个有待解决的问题.

References:

- [1] Chang H, Jamin S, Willinger W. Inferring AS-level Internet topology from router-level path traces. In: Fahmy S, Park K, eds. Proc. of the SPIE ITCOM 2001, Vol. 4526. Washington: SPIE Press, 2001. 196–207.
- [2] Govindan R, Tangmunarunkit H. Heuristics for Internet map discovery. In: Sidi M, Sengupta B, eds. Proc. of the IEEE INFOCOM 2000, Vol.3. New York: IEEE Press, 2000. 1371–1380.
- [3] Mao ZM, Rexford J, Wang J, Katz R. Towards an accurate AS-level traceroute tool. In: eldmann A, Zitterbart M, Crowcroft J, Wetherall D, eds. Proc. of the ACM SIGCOMM 2003. Karlsruhe: ACM Press, 2003. 365–378.
- [4] Mao ZM, Johnson D, Rexford J, Wang J, Katz R. Scalable and accurate identification of AS-level forwarding paths. In: Li VOK, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM 2004, Vol.3. Hong Kong: IEEE Press, 2004. 1605.
- [5] Tangmunarunkit H, Govindan R, Shenker S, Estrin D. The impact of routing policy on Internet paths. In: Sengupta B, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM 2001, Vol.2. Anchorage: IEEE Press, 2001. 736–742.
- [6] Amini L, Shaikh A, Schulzrinne H. Issues with inferring Internet topological attributes. Computer Communications, 2004,27(6): 557–567. [doi: 10.1016/j.comcom.2003.08.021]
- [7] Augustin B, Cuvelier X, Orgogozo B, Viger F, Timur F, Latapy M, Magnien C, Teixeira R. Avoiding traceroute anomalies with Paris traceroute. In: Almeida JM, Almeida VAF, Barford P, eds. Proc. of the IMC 2006. Rio de Janeiro: ACM Press, 2006. 153–158.



魏镇韩(1976—),男,天津人,博士,工程师,主要研究领域为网络测量,分布式计算.



赵洪华(1979—),男,博士,讲师,主要研究领域为计算机网络.



陈鸣(1956—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络,网络测量.



吉梁(1981—),男,助理工程师,主要研究领域为计算机网络.