

路由器级拓扑发现中的别名过滤算法

赵洪华, 白华利, 陈 鸣, 魏镇韩

(解放军理工大学 指挥自动化学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 通过别名解析可以在IP级拓扑的基础上获得路由器级拓扑. 为了提高路由器级拓扑发现的效率, 首先根据网络的结构特征归纳了IP级拓扑中不存在别名关系的条件, 提出了处理别名关系的3条定理. 其次在此基础上提出了别名过滤的思想并设计了别名过滤算法, 通过哈希技术在IP级拓扑中排除不可能存在别名的情况, 找出IP级拓扑中所有可能具有别名关系的情况. 最后用CAIDA项目中的中日韩3国因特网IP级拓扑数据对别名过滤算法进行了验证分析, 结果表明别名过滤算法能够有效减少别名解析的数量, 提高路由器级拓扑发现的效率.

关键词: 拓扑发现; 别名关系; 别名过滤算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)01-0177-06

Alias filter algorithm in router level topology discovery

ZHAO Hong-hua, BAI Hua-li, CHEN Ming, WEI Zhen-han

(Inst. of Command Automation, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract: Router level topology could be discovered from IP level topology based on alias resolution. In order to improve the efficiency of the router level topology discovery algorithm, the instances where there are alias relations are summarized. First, the conditions where there are not alias relations are concluded based on the characteristics of the network structure, and three theorems are brought forward when dealing with alias relations. Then, an alias filter algorithm called AF (Alias Filter) is put forward based on the instances and theorems, which could be used to find all of the conditions of alias relation possible by the Hash technique. Finally, the AF algorithm is verified via the IP level topologies from the Internet covering China, Japan, and Korea, which were discovered by Skitter of CAIDA. The results prove that the algorithm of AF could reduce IP addresses of alias resolution and improve the efficiency of router level topology discovery greatly.

Key Words: topology discovery; alias relation; alias filter algorithm

随着因特网规模的飞速发展, 网络结构也发生了巨大的变化. 为了更好地使用、管理和控制网络, 必须要对网络的拓扑结构有充分的了解.

路由器级网络拓扑是与IP级网络拓扑相对的拓扑结构, 它反映了路由器之间的连接关系. 在IP级网络拓扑的基础上, 通过找出属于同一台路由器的IP地址集合, 就能够将IP级网络拓扑聚合成路由器级网络拓扑. 别名解析则是这样一种找出属于同一台路由器的IP地址集合的技术.

当前别名解析机制大致分为两类, 即基于测量的方式和基于分析的方式. 其中基于测量的方式可分为下列方法:

- (1) 基于测量数据分组的返回IP地址^[1-2];
- (2) 基于测量数据分组的返回报文ID号^[3].

上述两种方法只能用于验证两个IP地址是否属于同一台路由器, 而且要求设备厂商没有对路由器作特

收稿日期: 2007-11-13

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助(90304016); 国家863计划资助(2007AA01Z418)

作者简介: 赵洪华(1979-), 男, 解放军理工大学讲师, 博士研究生, E-mail: zhuhuatian@163.com.

殊限制性设计.

基于分析的方式可分为下列方法:

(1) 基于 DNS 信息分析 IP 地址^[4]. 亚太地区特别是中国和韩国对网络设备的 DNS 命名非常欠缺,使得该方法有时无法有效工作.

(2) 基于图论的分析^[5]. 从图的角度看,具有相同后继路由的两个 IP 地址是属于同一台路由器. 该方法在判定时往往不能依据实际网络情况的差异,所以误判的几率较大.

(3) 基于对称路由^[6]. 根据测量源 IP 和测量目标 IP 之间的两个方向的 IP 路径信息来确定同一台路由器的不同 IP 地址. 在大规模网络中,获得对称路由需要较多测量点的合作,这种方法难以实施.

由于别名解析技术意在判断两个或多个 IP 地址是否属于同一台路由器的地址集合,任何两个 IP 地址似乎都有可能需要进行别名解析. 设 IP 地址的数量为 N , 如果要对任意两个 IP 地址解析,别名解析的次数为 $N \times (N - 1) / 2$, 为 $O(N^2)$ 级. 况且,每进行一次别名解析,为了获得准确结果都需要测量数次,而实践中需要判断的 IP 地址数达到几万之众的场合是非常普遍的. 盲目的别名解析所引发的测量流量将严重侵扰网络的正常运行. 因此,别名解析技术还有一个重要问题需要解决:即在进行别名解析前,首先应当确定哪些 IP 地址需要解析,哪些 IP 地址根本不需要解析,将其称之为别名过滤技术.

1 别名过滤的理论基础

1.1 别名的性质

定义 1 别名关系 R . 属于同一台路由器的两个 IP 地址具有别名关系,设一台路由器的所有 IP 地址集合为 $A, \forall i_{p_x} \forall i_{p_y} (i_{p_x}, i_{p_y} \in A \rightarrow i_{p_x} Ri_{p_y})$.

性质 1 别名关系 R 是一种等价关系.

证明 ① R 满足自反性,即 $\forall i_{p_x} (i_{p_x} \in V \rightarrow i_{p_x} Ri_{p_x})$; ② R 满足对称性,即 $\forall i_{p_x} \forall i_{p_y} (i_{p_x}, i_{p_y} \in V \wedge i_{p_x} Ri_{p_y} \rightarrow i_{p_y} Ri_{p_x})$; ③ R 满足传递性,即 $\forall i_{p_x} \forall i_{p_y} \forall i_{p_z} (i_{p_x}, i_{p_y}, i_{p_z} \in V \wedge i_{p_x} Ri_{p_y} \wedge i_{p_y} Ri_{p_z} \rightarrow i_{p_x} Ri_{p_z})$.

推论 1 设 IP 级拓扑中的所有 IP 地址集合为 V ,把每一个 IP 地址都作为集合 V 的子集,则所有 IP 地址组成 V 的最细划分. 根据性质 1,别名关系是等价关系,则别名解析问题转换为划分问题,即找出集合 V 的最粗划分.

定义 2 直接相连. 当两台路由器通过数据链路层链路相连时为直接相连.

定义 3 IP 路径(简称路径). 路径是指通过 traceroute 发现的从源 IP 到目的 IP 的 IP 地址序列,用 L_i 表示 IP 路径, $L_i = i_{p_{is}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{ix}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{id}}$. 用集合 V_i 表示路径的节点集 $V_i = \{i_{p_{is}}, \dots, i_{p_{ix}}, \dots, i_{p_{id}}\}$. 用序偶 $\langle i_{p_{ix}}, i_{p_{iy}} \rangle$ 表示路径中的一跳,其中称 $i_{p_{iy}}$ 为 $i_{p_{ix}}$ 的后继节点. 用集合 E_i 表示路径的链路(跳)集, $E_i = \{\langle i_{p_{is}}, i_{p_{i2}} \rangle, \langle i_{p_{ix}}, i_{p_{iy}} \rangle, \dots\}$.

定义 4 发散路径. 发散路径是指具有相同测量源并且中间没有相交节点的路径. 设测量源为 i_{p_s} , 路径 $L_i = i_{p_s} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{ix}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{id}}, L_j = i_{p_s} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jy}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jd}}, i_{p_s}$ 为测量源. L_i, L_j 是发散路径当且仅当 $\forall i_{p_{ix}} \forall i_{p_{jy}} ((i_{p_{ix}} \in V_i \wedge i_{p_{jy}} \in V_j \wedge i_{p_{ix}} = i_{p_{jy}}) \rightarrow i_{p_{ix}} = i_{p_{jy}} = i_{p_s})$.

当研究 IP 路径中 IP 地址的别名关系时,假定下列 3 个条件.

条件 1(惟一连接性条件) 直接相连的两台路由器之间只有一条物理连接. 设路由器 R_1 和路由器 R_2 相连,则存在 $i_{p_x} \in R_1, i_{p_y} \in R_2, i_{p_x}$ 和 i_{p_y} 相连. 如果 $(\exists i_{p_w} \in R_1) \wedge (\exists i_{p_z} \in R_2), i_{p_w}$ 和 i_{p_z} 相连,则 $i_{p_w} = i_{p_x}, i_{p_z} = i_{p_y}$.

条件 2(无环路条件) 在一条 IP 路径中,不存在环路. 设路径为 $L = i_{p_1} \rightarrow i_{p_2} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_x} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_y} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_d}$, 则 $\forall i_{p_x} \forall i_{p_y} (i_{p_x}, i_{p_y} \in V \wedge i_{p_x} Ri_{p_y} \rightarrow i_{p_x} = i_{p_y})$.

条件 3(单向惟一性条件) 两台路由器之间的 IP 路径,在一个方向不存在两条或两条以上平行的路径. 设路径经过路由器 R_1 到路由器 R_2 , 路径 $L_i = i_{p_{i1}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{ix}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{iy}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{id}}, L_j = i_{p_{j1}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jx}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jy}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jd}}, (i_{p_{ix}}, i_{p_{iy}} \in R_1) \wedge (i_{p_{jx}}, i_{p_{jy}} \in R_2) \rightarrow i_{p_{ix}} Ri_{p_{jx}} \wedge i_{p_{iy}} = i_{p_{jy}}$.

根据上述条件,可以得到如下 3 条定理.

定理 1 在一条 IP 路径中不存在别名关系.

证明 设路径为 $L = i_{p_1} \cdots \rightarrow i_{p_x} \rightarrow \cdots \rightarrow i_{p_y} \rightarrow \cdots \rightarrow i_{p_d}$, 假设存在两个 IP 地址具有别名关系, 则有 $i_{p_x} Ri_{p_y} \wedge (i_{p_x}) \neq (i_{p_y})$, 这与条件 2 矛盾.

定理 2 发散路径之间不存在别名关系.

证明 设发散路径的起始点为 i_{p_x} , 路径集为 $L = \{L_1, \dots, L_i, \dots, L_j\}$, 节点集为 $V = \{V_1 \cup \dots \cup V_i \cup \dots \cup V_j\}$, 边集 $E = \{E_1 \cup \dots \cup E_i \cup \dots \cup E_j\}$. 假设存在两个节点 $i_{p_{ix}}$ 和 $i_{p_{iy}}$ 分别为链路 L_i 和 L_j 的节点, $i_{p_{ix}} Ri_{p_{iy}} \wedge i_{p_{ix}} \neq i_{p_{iy}}$, 设 $i_{p_{ix}} \in R_2 \wedge i_{p_{iy}} \in R_2$, 令 i_{p_x} 为路由器 R_1 . 根据条件 3, R_1 和 R_2 在方向 R_1 到 R_2 不存在两条或两条以上平行的路径, 则 $i_{p_{ix}} = i_{p_{iy}}$, 与假设矛盾.

定理 3 具有相同后继 i_{p_c} 的两个 IP 地址 i_{p_x} 和 i_{p_y} , 如果 i_{p_x} 和 i_{p_y} 与后继 i_{p_c} 直接相连, 则是别名关系, 即 $i_{p_x} Ri_{p_y}$.

证明 令 i_{p_c} 为路由器 R_c 的 IP 地址, 即 R_c 的一个接口. i_{p_x} 为路由器 R_x 的 IP 地址, i_{p_y} 为路由器 R_y 的 IP 地址, R_x 和 R_c 之间有一条链路, R_y 与 R_c 之间有一条链路, 而 R_c 只有一个接口与 R_x 和 R_y 连接, 只能有一条连接, 只有当 R_x 和 R_y 是一台路由器时才能满足条件, 则 $i_{p_x} Ri_{p_y}$.

1.2 IP 级拓扑中的别名情况

IP 级拓扑通过 traceroute 测量获得, 并且由 IP 路径组成, 在 IP 路径中存在别名关系的情况归纳为 3 种. 为明确起见, 后面讨论别名关系 R 时, 均是指不同 IP 地址之间的别名关系.

(1) IP 路径中存在对称路段的情况. 设路径 $L_i = i_{p_{ix}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{ix}} \rightarrow i_{p_{iy}} \rightarrow i_{p_{iz}} \rightarrow i_{p_{iw}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{id}}$, 路径 $L_j = i_{p_{jx}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jx}} \rightarrow i_{p_{jy}} \rightarrow i_{p_{jz}} \rightarrow i_{p_{jw}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jd}}$, 其中 $i_{p_{ix}} Ri_{p_{jz}}, i_{p_{iz}} Ri_{p_{jy}}$ (参见图 1), 定义这种情况为对称别名. 判断两条路径是否有对称路段, 可以根据两条路径中的 IP 地址的网络标识, 在网络中两个直接相连的路由器的端口 IP 地址通常具有相同的 30 比特网络标识.

(2) IP 路径中存在相同后继的情况. 两条路径 $L_i, L_j, (\exists < i_{p_x}, i_{p_y} > \in E_i) \wedge (\exists < i_{p_w}, i_{p_z} > \in E_j) (i_{p_z} = i_{p_y}, i_{p_x} \neq i_{p_w}) \rightarrow i_{p_x} Ri_{p_w}$, 定义这种情况为三角别名(参见图 2).

(3) 两条平行路径中存在别名的情况. IP 路径 $L_i = i_{p_{ix}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{ix}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{id}}, L_j = i_{p_{jx}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jy}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jd}}$, 存在 $i_{p_{ix}} \in E_i, i_{p_{jy}} \in E_j, i_{p_{ix}} Ri_{p_{jy}}$, 定义这种情况为平行别名(参见图 3).

2 别名过滤算法

针对指定区域的 IP 级拓扑数据, 路由器级拓扑发现主要是对指定区域 IP 地址的别名关系进行过滤, 为此设计了别名过滤 (AF) 算法, 然后对过滤后别名关系进行验证.

2.1 别名过滤算法

用集合 V 表示指定区域内的所有节点的集合, 别名过滤是根据别名关系对 V 进行划分, 最终结果为 V 的最粗划分.

对于每一个节点用一个 6 元组表示 (num, sour, local, next, des, rttl), 其中 num 表示路径号, sour 表示测量源, local 表示本跳 IP, next 表示下一跳 IP, des 表示目标节点, rttl 表示距离目标节点 des 的跳数.

初始状态把每一个节点作为一个集合, 别名过滤根据上节所讨论的 3 种情况作集合的合并操作. 为了便

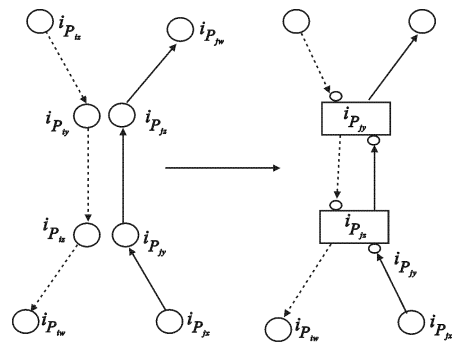


图 1 IP 路径中存在对称路段的别名关系

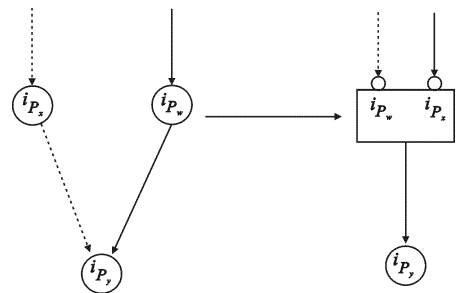


图 2 IP 路径中具有相同后继的别名关系

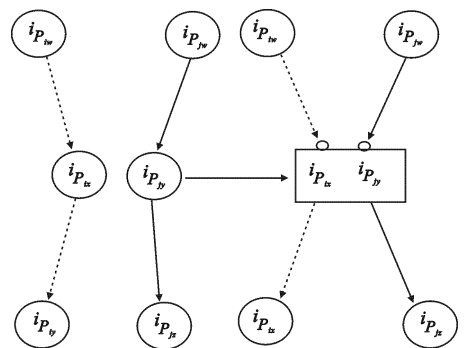


图 3 平行路径中的别名关系

于计算,IP 地址采用整数表示,别名过滤算法分为两步:第 1 步过滤出对称别名关系和三角别名关系,第 2 步过滤出平行别名关系.其中第 1 步的描述如下.

输入:指定地区的路径集 L ,节点集 V .

输出:节点集 V 的最粗划分.

初始化: $V = \emptyset$

For (every $L_i \in L$) Do

```

Begin
  While ( $L_i$  没有分析完) do
    Begin
      从  $L_i$  中取出节点  $v_x$ ,根据  $L_i$  的信息生成 6 元组  $s_x$ ,生成集合  $X = \{v_x\}$ ;
      把 6 元组  $s_x$  插入数据库和 Hash 表;
      If ((Hash 表中存在 6 元组  $s_y$ )  $\wedge$  ( $s_y.next = s_x.next$ )  $\wedge$  ( $\{s_y.\} \cap \{s_x.pre\} = \emptyset$ )  $\wedge$  ( $\{s_y.\} \cap \{s_x.next\} = \emptyset$ )) then
        Begin
           $s_y$  的集合  $Y = Y \cup X$ ;
          更新  $V$  中的集合  $Y$ ;
          Continue;
        End
      else if ( $v_x$  不是最后一跳  $\wedge$  Hash 表中存在 6 元组  $s_y, s_y.next = s_{y+1}$  与  $s_x.next = s_{x+1}$  具有相同的 30 位网络号  $\wedge \{s_{y+1}.pre\} \cap \{s_{x+1}.pre\} = \emptyset$ ) then
        Begin
          令  $v_a$  表示  $s_x$  的前一跳,设  $v_a$  的集合  $A, v_y$  的集合为  $Y$ ;
          if  $\exists v_i (v_i \in Y \wedge v_i R v_a)$  then
            Begin
               $V = (V - A - Y)$ ;
               $Y = A \cup Y$ ;
              把  $Y$  加入到集合  $V$ ;
              令  $v_b$  表示  $s_y$  的前一跳,设  $v_b$  的集合  $B$ ;
               $V = (V - B)$ ;
               $B = B \cup X$ ;
              把  $B$  加入到集合  $V$ ;
            End;
          Continue;
        End
    End
  End
End;

```

上述工作找出了对称别名和三角别名的两种情况. AF 算法的第 2 步是发现 IP 路径的平行别名关系,根据上述定理,采用以下原则来过滤:

(1) 一条 IP 路径中不存在别名关系.

(2) 同一测量源的发散路径中的节点没有别名关系. 设基于测量源 s 的路径集为 L_s , AF 算法的第 1 步 1 所找到的具有别名关系节点的路径集为 L_1 , 则发散路径 $L = L_s - L_1$.

(3) 除边界节点外,不属于同一个 ISP 的节点没有别名关系. 根据 ICANN 发布的 IP 信息分配文件可以获得指定地区内不同 ISP 的 IP 地址段.

(4) 距离相同目标节点的 rttl 相差大于 3 的节点不存在别名关系. 笔者认为到达同一目标节点的路径

中的 i_{p_1} 和 i_{p_2} , 如果 i_{p_1} 与 i_{p_2} 属于一台路由器, 则这两个 IP 与目标节点的 rttl 相差不大于 3.

不同地区的节点间不存在别名关系, 通过从 ICANN 获得的 IP 地址信息和从 ISP 获得的 IP 地址信息, 可以通过地理关系对 IP 进行划分, 划分成不同地区的 IP 地址集合, 还可以采用经验原则推断节点所属的城市.

别名验证是对所有 AF 算法过滤的结果集调用 Ally^[3] 程序进行验证, 最后输出的结果为具有别名关系的 IP 地址集合.

2.2 算法性能分析

AF 算法需要分析所有的 IP 地址, 把所有 IP 地址存储在内存中, 所需的空间复杂度为 $O(N)$. AF 算法在过滤时每遇到一个新的 IP 地址, 都会与已存在的 IP 地址作别名过滤的查找和比较. 笔者采用 Hash 函数作查找和比较运算, 每个 IP 地址查找和运算的时间为常数, 设为 k , 则 N 个 IP 地址所需的时间为 Nk , 因此 AF 算法的时间复杂度和空间复杂度均为 $O(N)$. 通过 AF 算法, 过滤出可能有别名关系的 IP 地址, 把具有别名关系的 IP 地址组成集合.

别名验证是在 AF 算法的基础上进行的, 对每个集合中的任意两个 IP 地址作验证. 由于 AF 算法已经过滤掉大量的 IP 地址, 并对有可能存在别名关系的 IP 地址作了划分, 因此别名验证时产生的附加流量要远远小于未作 AF 算法时产生的附加流量. 设 AF 算法过滤出的 IP 地址数量为 m , 当 m 个 IP 地址组成一个集合时, 别名验证次数和产生的流量最大为 $m \times (m - 1) / 2$, 为 $O(m^2)$ 级, 当 m 个 IP 地址组成 $m/2$ 个集合, 每个集合只有 2 个 IP 地址时, 别名验证次数和产生的流量最小为 $m/2$, 为 $O(m)$ 级. 由于 m 远远小于 N , 因此经过 AF 算法, 别名验证次数和所产生的附加流量大大减少.

对比其他别名解析的过程, 笔者对别名的处理排除了不存在别名关系的节点, 大大压缩了需要进行别名解析的节点数量, 提高了别名解析的效率. 与其他别名解析方法类似, 也会存在别名关系漏判的情况.

3 算法的验证

3.1 获取 IP 级网络拓扑数据

为了对上述算法进行验证, 笔者从 CAIDA 的 Skitter^[6] 项目获得 IP 级网络拓扑数据, 该数据是 CAIDA 对全球因特网做 traceroute 测量所获得的真实数据. 由于每天得到的最新测量数据都有几百兆字节之多, 必须首先选取感兴趣的 IP 级网络拓扑数据. 其基本步骤如下:

(1) 从 Skitter 的测量服务器下载最新的数据文件.

(2) 从 ICANN(Internet Corporation for Assigned Names and Numbers) 下属 5 个区域性 IP 地址分配机构 ARIN, RIPENCC, APNIC, LACNIC 和 AFRINIC 获取有关国家或地区的最新地址分配文件.

(3) 对每条 Skitter 数据记录根据国家或区域信息提取相关的 IP 路径. 一条 Skitter 数据记录包含 14 个字段, 其中 3 个字段含有地址信息, 分别是源 IP、目的 IP 和中间各跳的序列, 这 3 个字段表示了一条完整的 IP 级路径.

(4) 分解每条区域 IP 路径, 形成节点和链路信息, 把区域内的路径信息分解为节点和链路信息.

由于这样得到的 IP 路径仍不能完全满足上述条件, 因此笔者采用下面原则处理特殊情况的 IP 路径:

(1) 对于目标地址不可达的 IP 路径, 只保留所发现的 IP 路径部分. 设测量源为 i_{p_s} , 测量目标地址为 i_{p_d} , IP 发现的最后一跳 i_{p_x} , 如果 $i_{p_x} \neq i_{p_d}$, 则只保留路径 $i_{p_s} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_x}$.

(2) 对于 IP 路径中存在匿名路由器的情况, 删除匿名路由器及两端的节点. 设路径 $L = i_{p_s} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_x} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_y} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_d}$, 其中 i_{p_x} 和 i_{p_y} 之间为匿名路由器, 则只保留路径 $i_{p_s} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_x}$ 和 $i_{p_y} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_d}$.

(3) 对于存在循环路由的 IP 路径, 删除循环部分的链路. ① 在一条路径中存在循环路由的情况, $L_i = i_{p_{is}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{ix}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{ix}} \rightarrow i_{p_{iy}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{id}}$, 则只保留路径 $L_i = i_{p_{is}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{ix}} \rightarrow i_{p_{iy}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{id}}$. ② 两条路径中存在循环路由的情况, 设 $L_i = i_{p_{is}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_x} \rightarrow i_{p_y} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{id}}$, $L_j = i_{p_{js}} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_y} \rightarrow i_{p_x} \rightarrow \dots \rightarrow i_{p_{jd}}$, 存在路径 $i_{p_x} \rightarrow i_{p_y}$ 和路径 $i_{p_y} \rightarrow i_{p_x}$, 只保留 $i_{p_x} \rightarrow i_{p_y}$ 或 $i_{p_y} \rightarrow i_{p_x}$.

(4) 对于具有欧几里德性质的路径, 只保留最长的一部分. 设路径中存在 $i_{p_x} \rightarrow i_{p_y} \rightarrow i_{p_z}$ 和 $i_{p_x} \rightarrow i_{p_z}$, 则只保留 $i_{p_x} \rightarrow i_{p_y} \rightarrow i_{p_z}$ 部分.

3.2 别名解析结果

Skitter 项目在 2007 年 7 月 16 日发布的对中国大陆、韩国和日本测量的因特网 IP 级拓扑中包含的 IP 地址数量分别为 2 9 131, 46 936 和 47 516. 笔者先应用 AF 算法, 对过滤后每个地区的 IP 地址集进行了 3 次别名关系的验证. 由于不同时间网络状况的不同, 取其中响应节点数量最多的一次作为结果. 分析结果包括从 Skitter 获取的 3 个国家拓扑的 IP 地址数量, 确认的具有别名关系的 IP 地址数量所占的比例和在确认别名关系时不响应的 IP 地址数量参见表 1.

表 1 中日韩三国的别名解析的处理结果

国家	处理时间	IP 地址总数	具有别名关系的 IP 地址数量/所占比例	不响应的 IP 地址数量/所占比例
中国大陆	7 小时 04 分	29 131	2 412/(8.28%)	3 360/(11.53%)
韩国	4 小时 41 分	46 936	1 666/(3.55%)	4 655/(9.92%)
日本	5 小时 12 分	47 516	1 665/(3.50%)	3 818/(8.04%)

进行别名解析处理所耗费的时间主要用于别名关系验证, 而用于 AF 算法的时间很少. 如果不先用 AF 算法进行处理, 处理的时间将会大大延长. 以 IP 地址数量最少, 所用时间最长的中国 IP 级拓扑为例, 设每次对两个 IP 地址验证所用的时间为 10 ms (实际验证时间通常要大于此时间), 如果要达到和笔者所提算法同样的效果则所需的时间 $T = 29\ 131 \times 29\ 130 \times 10 / (1\ 000 \times 60 \times 60) = 2\ 357\text{ h}$; 如果按实际测量中节点不响应的时间和实际测量时间计算, 则所用时间还会大大增加, 测量产生的附加流量更是不可估量.

表 1 中不响应的 IP 地址是在过滤时发现具有别名关系的, 但在进行验证时却不响应的 IP 地址. 路由器不响应别名解析的原因多种多样, 安全考虑可能是最主要的原因.

由表 1 可见, 中国的 IP 级网络拓扑中具有别名关系的 IP 地址最多, 确认的和非确认的具有别名关系的 IP 地址数量都要大于日本和韩国. 例如已经确认的具有别名关系的 IP 地址所占比例, 中国为日本或韩国两倍多, 而不响应的 IP 地址所占比例也要大于日本和韩国. 在已确认的别名关系中, 别名关系集合所包含的 IP 地址数量不同, 例如在韩国的 IP 地址中, 最大的一个别名关系集合含有 24 个 IP 地址, 而中国和日本分别为 6 个和 8 个, 如果所有的 IP 地址都响应, 则结果还要发生变化. 当然, 上述分析结果根据测量方法和被测目标对象的不同也会有所不同.

表 2 中分别列出了通过 AF 和别名验证得到的中国、日本和韩国别名关系的具体结果. 一般而言, 在一个别名关系中包括的 IP 地址数量较少, 则表明该网络的结构较简单, 连接关系较少.

表 2 中日韩三国的别名关系情况

国家	别名关系	数 据							
中国	别名关系集合包含的 IP 地址数量	2	3	4	5	6	7	8	9
	别名关系集合的数量	837	144	58	10	4			
日本	别名关系集合包含的 IP 地址数量	2	3	4	5	6	7	8	9
	别名关系集合的数量	670	73	12	6	1	2	1	
韩国	别名关系集合包含的 IP 地址数量	2	3	4	5	6	7	8	9
	别名关系集合的数量	500	63	26	26	28	4	1	1

4 结束语

为了提高路由器级拓扑发现的效率, 笔者提出了别名过滤的思想. 在严格的理论分析基础上, 提出了一种别名过滤算法. 通过用来自 CAIDA 的 Skitter 测量中国、日本和韩国 3 个国家的因特网 IP 级拓扑, 验证分析表明了别名过滤技术的有效性, 也表明了利用别名过滤算法可以高效地从 IP 级网络拓扑得到路由器级的网络拓扑.

参考文献:

- [1] Ramesh G, Hongsuda T. Heuristics for Internet Map Discovery [C]//IEEE INFOCOM. Tel Aviv: IEEE, 2000: 1371-1380.