

AS 路径环路的研究

张圣林^{1,2}, 刘莹^{1,2}

(1. 清华大学 网络科学与网络空间研究院, 北京 100084; 2. 清华大学 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

摘要: AS (自治域) 路径环路是指在一个 AS 路径中出现相同的 AS 号且这 2 个或多个 AS 号是不相邻的。通过对 RouteViews 中统计的全球路由数据进行处理分析, 统计了从 2011 年 6 月 1 日到 2013 年 5 月 31 日 AS 路径环路在 IPv4 和 IPv6 中每天发生的数量以及其在总路由条目中所占的比例。另外, 统计了 AS 路径环路的持续时间分布以及前缀长度的分布。根据统计的数据, 分析了 AS 路径环路发生的原因: 路由信息不一致、跨国企业、有意或无意的错误配置, 并为 BGP 的配置提供了建议。

关键词: AS 路径; RouteViews; 路径环路; IPv6

中图分类号: TP302

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)Z2-0017-06

Analysis of AS path looping

ZHANG Sheng-lin^{1,2}, LIU Ying^{1,2}

(1. Institute for Network Science and Cyberspace, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: AS (autonomous system) path looping occurs when there are two or more same AS numbers in a AS path vector and these numbers are not adjacent to each other. After processing and analyzing the global route data from RouteViews, statistics of the total number and the ratio of AS path looping conflicts were kept every day from June 1, 2011 to May 31, 2013. What's more, distribution of the duration of AS path looping conflicts and the length of prefixes where AS path looping occurs were also analyzed. On the basis of these statistics, some possible causes of AS path looping were discussed, including routing information inconsistency, multi-national companies and faulty or malicious misconfiguration. What's more, some advices were also provided for the configuration of BGP protocol.

Key words: AS path; RouteViews; path looping; IPv6

1 引言

当今 Internet 是由成千上万个不同的自治域 (AS) 组成的。在每个自治域的内部, 都部署了一种域内路由协议以优化域内路由, 比如 OSPF 协议^[1]、IS-IS 协议^[2]或者 RIP 协议^[3]。在域间, 各个自治域间的可达信息则通过 BGP 协议^[4]获得。BGP 协议作为一种路径向量协议, 是对距离向量协议的一种改进。这种改进的协议一个突出特点就是路径向量协议能够从本质上消除路由环路, 因为 BGP

协议要求路由通告信息包含 AS-PATH 属性。在 AS-PATH 属性中, 包含了到达目的前缀中的所有 AS 号。正如 RFC1771^[4]所说的那样, “这一信息 (AS-PATH 属性) 对于构建一个没有环路的 AS 连接图是完全足够的”。

如图 1 所示, 假如一条路由是从 AS0 发起, 则 AS0 发送给 AS1 的路由通告信息中所包含的 AS-PATH 属性为 (AS0)。以此类推, AS3 发送给 AS1 的路由通告信息中的 AS-PATH 属性为 (AS3, AS2, AS1, AS0)。当 AS1 接受到这条路由通告信息后,

收稿日期: 2013-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60873253); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 基金资助项目 (2009CB320500, 2009CB320501)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60873253); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320500, 2009CB320501)

发现该信息的 AS-PATH 属性中已经包含了自己的 AS 号, 就会立即把这条路由通告信息丢弃。

然而, 本文却发现 BGP 信息中的 AS 路径环路不仅存在, 而且大量 AS 路径环路异常持续时间较长。显然, 当发生 AS 路径环路时, 会增加数据分组的传输时延, 甚至会增加分组丢失率。研究表明, 当不出现拥塞时, 路由收敛过程中的数据分组循环是导致分组丢失的主要原因^[5]。因此, 研究 AS 路径环路发生的规律, 并探究其发生的原因, 能够有效地减少传输时延, 并降低因数据分组循环而导致的分组丢失率。

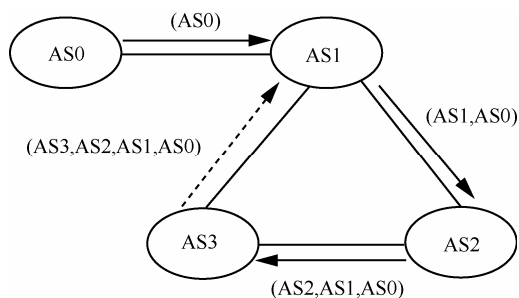


图 1 AS 路径环路示意

IPv6 是新一代的 Internet 协议^[6], 一些网络服务提供商已经率先部署了支持 IPv6 协议的网络设备。研究 IPv6 网络中 AS 路径环路的规律及其原因, 则能够为 IPv6 中 BGP 路由器的部署提供建议。

D. Pei 等^[7]首次对 AS 路径向量的循环问题做了研究。文章从理论的角度阐述了 AS 路径环路产生的原因, 并分析了环路解除的过程以及环路的持续时间。文章认为, 由于物理条件的限制和协议机制导致的时延, 减缓了路由更新传播的过程, 从而引起各个节点的路由信息不一致, 进而导致收敛过程中出现带有环路的 AS 路径。各个节点路由信息的不一致是否会导致 AS 路径环路, 取决于各个节点在选择替代路径时避免环路的能力。BGP 的最小路由广播时间间隔 (MRAI) 是导致循环持续的主要因素, 且循环持续时间可能与收敛时间相同。最后, 以仿真的方式, 说明了短暂循环的持续时间与 BGP 的路由收敛时间相匹配, 且短暂循环的持续时间与 BGP 的最小路由广播间隔(minimum route advertisement interval timer)成线性相关关系。文章对持续时间较短的 AS 路径环路做出了解释, 但是并没有涉及持续时间较长的 AS 路径环路。

R. Mahajan 等^[8]介绍了 AS 路径环路的一个例子: Internet 中的一个关键 AS 有意地引入 AS 路径

环路, 以达到某种策略目标。然而这一行为是大多数管理人员所认为没必要的。同样的, X. Shi^[9]也介绍了一个有意的错误配置导致 AS 路径环路的例子: 华盛顿大学和佐治亚理工学院实施了一个重编路由实验, 该实验使用 AS 47065, 并导致了 AS 路由环路的产生。

通过对 2011 年 6 月 1 日到 2013 年 5 月 31 日长达 728 天 8TB 的 RouteViews^[10]数据进行处理, 本文首次系统地长时间的全球路由数据中的 AS 路径环路规律进行了分析。本文分析了 IPv4 和 IPv6 中每天 AS 路径环路异常的数目及其所占的比例, 并统计了 AS 路径环路异常的持续时间分布和前缀长度的分布。所谓 AS 路径环路异常, 是指 RouteViews 中监测到的路由条目 (包含目的前缀、AS 路径、邻居 AS 号等信息) 中包含带有环路的 AS 路径。

根据总结的 AS 路径环路的规律, 本文探究了 AS 路径环路产生的原因。硬件限制与路由算法引起路由更新时的路由信息不一致, 这是导致短暂 AS 路径环路的主要原因。至于持续时间较长的 AS 路径环路, 则可能是跨国公司导致的。错误的配置会引起短暂的或者长期的 AS 路径环路, 这些错误的配置可能是故意的, 也可能是无意的。

根据推测的 AS 路径环路发生的原因, 本文还对 BGP 路由器的监测机制做出了相应的建议。

总之, 本文的贡献如下: 1) 在对 RouteViews 中的全球路由数据分析后, 本文统计了 AS 路径环路的规律; 2) 在此规律基础上, 本文总结了导致 AS 路径环路的原因; 3) 最后, 本文对 BGP 路由监测做出了建议。

2 研究方法

一个前缀 (地址) 的路由包括一个 AS 路径, 本文对 AS 路径进行分析, 找出那些包含了循环的 AS 路径的路由条目, 并对每天包含 AS 路径环路的路由条目的数量、比例、持续时间以及前缀长度等特性进行了研究。

本文主要分析了 RouteViews 在观测点 route-views4 中所观测到的数据, 并对其进行分析, 得到 BGP 路由和 AS 路径信息。route-views4 观测点是 Quagga 公司观测到的数据, 该观测点位于美国的俄勒冈州大学, 能够检测到最为广泛的数据。且在该监测点获得的数据不仅包含了 IPv4 的路由

数据, 也包括了 IPv6 的路由数据, 这对于分析 IPv4 与 IPv6 的差异是有必要的。本文借鉴前人的方法^[11,12], 对 RouteViews 中的数据进行处理分析。具体的, 本文首先统计了 IPv4 和 IPv6 中每天包含 AS 路径环路的路由条目的数量以及其在全部路由条目中所占的比例。然后, 为了进一步确定 AS 路径环路发生的原因, 本文还分析了 IPv4 和 IPv6 中所有 AS 路径环路异常的持续时间(以天为单位)。最后, 本文分别分析了 IPv4 和 IPv6 中发生 AS 路径环路的前缀的长度分布。

3 统计结果

按照 BGP 协议的描述^[4], AS 路径环路不应该出现, 但是本文却在 IPv4 中统计到了 177 851 个不同的 AS 路径环路异常, 在 IPv6 中统计到了 698 个不同的 AS 路径环路异常。另外, 按照文献[7]的描述, 全部或者绝大部分的 AS 路径环路异常的持续时间不会超过一天。但本文检测到 IPv4 中持续时间超过一天的 AS 环路异常的比例为 50.31%, IPv6 中持续时间超过一天的 AS 环路异常的比例为 65.76%, 这大大超出了预料。

3.1 AS 路径环路数量

图 2 显示了从 2011 年 6 月 1 日到 2013 年 5 月 31 日这 728 天(由于观测点 RouteViews 在 2012 年 7 月 16 日到 2012 年 7 月 18 日并未统计数据, 因此本文在总结规律时省略以上 3 天)内 IPv4 和 IPv6 中每天发生 AS 路径环路异常的数目。总共检测到 IPv4 中不同的 AS 路径环路异常的数量为 177 851, IPv6 中不同的 AS 路径环路异常的数量为 698。

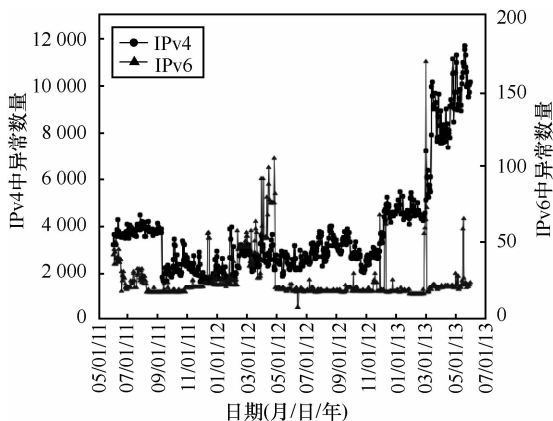


图 2 AS 路径环路数量随时间变化情况

图 3 则给出了这一期间 IPv4 和 IPv6 中每天发生 AS 路径环路异常的百分比。由图可以看出, 在

IPv6 中, 除了个别日期数量激增外, AS 路径环路所占的比例较为稳定。IPv4 中发生 AS 路径环路的比率比 IPv6 中高。

表 1 给出了 IPv4 和 IPv6 中每年 AS 路径环路异常出现次数以及比例的中位数。从表 1 可以看出, 在 IPv4 中, 从数量上来看, 2011 年和 2012 年 AS 路径环路出现的次数比较稳定, 2013 年出现的次数猛增。从比例上来看, 2012 年较 2011 年 AS 环路出现的比例有所下降, 这与总的路由规模增大有关。虽然路由条目有所增加, 但 2013 年 AS 环路出现的比例依然有较大增幅。在 IPv6 中, 这 3 年 AS 路径环路出现的次数较为稳定, 但由于总的路由规模增大, 其所占的比例逐渐减小。

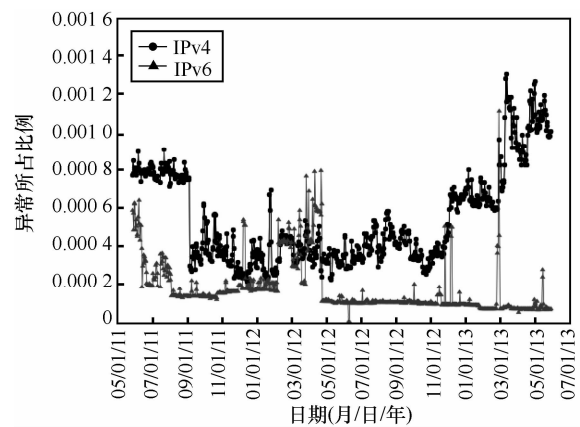


图 3 AS 路径环路所占比例随时间变化情况

表 1 AS 路径环路异常中位数

年份	中位数 (IPv4 中数量)	中位数 (IPv4 中比例)	中位数 (IPv6 中数量)	中位数 (IPv6 中比例)
2011	2 346	4.92×10^{-4}	15	1.69×10^{-4}
2012	2 324	3.75×10^{-4}	13	1.13×10^{-4}
2013	7 202	8.69×10^{-4}	14	7.72×10^{-5}

3.2 AS 路径环路持续时间

对上述数据做进一步的处理, 得到 AS 路径环路异常在 2011 年 6 月 1 日到 2013 年 5 月 31 日的持续时间分布。AS 路径环路异常的持续时间, 是指该异常在 2011 年 6 月 1 日到 2013 年 5 月 31 日这一时间段内出现的天数, 而不管该异常是否中断过。图 4 显示了 IPv4 和 IPv6 中 AS 路径环路持续时间的 CCDF 图。从图中可以看出, 在 IPv4 中, 49.69% 的 AS 路径环路异常只出现一次或者持续时间少于一天。在 IPv6 中, 这一比例只有 34.24%。对于这些冲突, 可以用文献[7]中的理论解释, 即物理硬件的限制和路由机制的缺陷导致了路由更

新广播的延迟, 并进一步导致了各个节点的路由信息不一致, 从而在收敛的过程中产生了 AS 路径环路。

表 2 列出了各个持续时间段的期望值, 从表中可以看出, 除去那些因为路由信息不一致导致的持续时间少于一天的 AS 路径环路异常, 无论在 IPv4 中还是在 IPv6 中, 剩余的异常持续时间的期望值都较高。另外, 在 IPv4 中和 IPv6 中, 分别有 2 个 AS 路径环路异常的持续时间超过了 728 天, 即超过了所统计数据的周期。

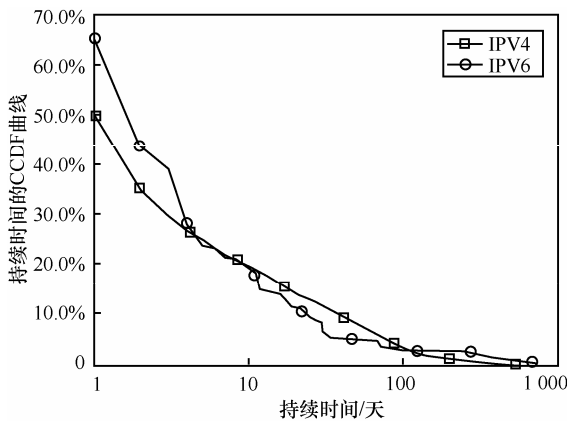


图 4 AS 路径环路持续时间的 CCDF

表 2 AS 路径环路异常持续时间期望值

IP 版本	大于 0 天	大于 1 天	大于 9 天	大于 29 天
IPv4	13.7	26.2	59.5	89.2
IPv6	17.6	26.3	78.0	158.9

这一统计结果很意外, 因为按照文献[7]的解释, AS 路径环路异常无论如何也不可能会有这么长的持续时间。

3.3 AS 路径环路前缀分布

图 5 描述了 IPv4 和 IPv6 中 AS 路径环路异常中前缀长度的分布。在 IPv4 中, 前缀长度 24 占据了主导地位。显然, 这与前缀长度 24 的前缀占据了 BGP 路由表的大部分有关。而在 IPv6 中, 由图可知, AS 路径环路和私有 AS 号泄露的前缀大部分集中于 13 与 48 之间。根据 IANA 公布的 IPv6 单播地址分配情况^[13], 其分配给各个区域性 Internet 注册管理机构的前缀介于 12 和 23 之间。这样, 各个 ISP 所分配得到的前缀长度均大于 12, 即 IPv6 中 AS 路径环路异常的前缀分布与长度大于 12 的前缀占据了所有 IPv6 地址空间的绝大部分有关。

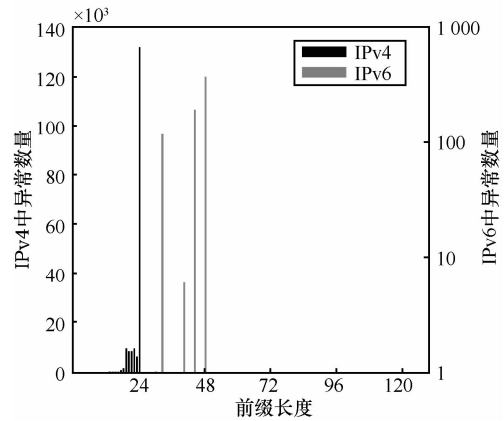


图 5 AS 路径环路中前缀分布

4 异常原因分析

4.1 路由信息不一致

文献[7]分析了短暂 AS 路径环路产生的原因, 即硬件与软件原因导致了路由广播时延, 进而引起了各个 AS 之间的路由信息不一致, 并最终导致 AS 路径环路的产生。

图 6 所示为路由信息不一致导致 AS 路径环路的简单案例。在该案例中, AS2 与 AS3 的路由终点为 AS0。AS2 与 AS3 都可以通过 AS1 最短到达 AS0, 即 AS2 到达 AS0 的最短路径为(AS2, AS1, AS0), AS3 到达 AS0 的最短路径为(AS3, AS1, AS0)。当路径(AS1, AS0)中断时, AS1 向其邻居 AS, 即 AS2 和 AS3 广播其路由故障。AS2 检查其路由表, 发现一个可替换的路径, 即(AS2, AS3, AS1, AS0), 并开始将数据分组转发给 AS3。同时, AS2 也会将这一路由信息广播给它的邻居 AS。同样, AS3 使用新的路径(AS3, AS2, AS1, AS0), 并将其广播给 AS3 的邻居 AS。这样, 数据分组就会在 AS2 和 AS3 之间循环, 即产生了 AS 路径环路。同时, 路由信息广播被路由信息处理时间、路由信息广播时间以及最小路由广播间隔延迟了, 这就导致了路由信息的不一致: AS2 不知道 AS3 的下一跳变成了 AS2, 而 AS3 不知道 AS2 的下一跳变成了 AS3。当 AS2 接收到 AS3 的新路径(AS3, AS2, AS1, AS0)时, 它会立即丢弃这一路由信息, 并将路径改为(AS2, AS1, AS4, AS5, AS0), 从而解除了 AS 路径环路。

以上案例只是简单介绍了在 2 个 AS 之间发生环路的情况。在 Internet 这种大型的网络拓扑结构中, 会发生更为复杂的 AS 路径环路, 且环路的规模也会更大。但根据文献[7]的论证, 由于路由信息

不一致而导致的 AS 路径环路时间不会超过一天, 意即 IPv4 中至多 49.69% 和 IPv6 中至多 34.24% 的 AS 路径环路可以归结为物理条件以及路由机制的限制导致 AS 路由信息不一致。

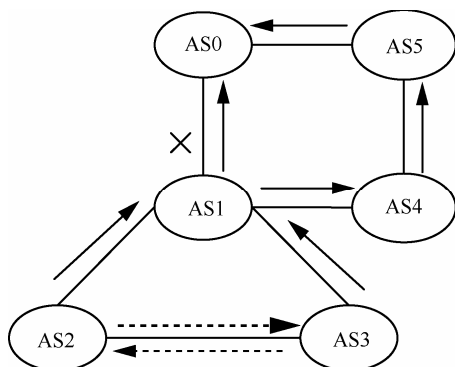


图 6 路由信息不一致

4.2 跨国公司

一些跨国公司在全球各地设有交换点, 但这些交换点的 AS 号是相同的。当不同国家之间的交换点相互通信时, 可能会穿过一个或者多个 AS, 这样从 BGP 的角度看就出现了 AS 路径环路。比如 NTT 通信公司在美国的多个城市以及德国的法兰克福和日本的东京都设有交换点, 且这些交换点的 AS 号都是 2914。当位于美国城市芝加哥的交换点需要与位于德国的法兰克福交换数据分组时, 需要跨过多个 AS。从 BGP 的角度出发, 这就产生 AS 路径环路。正常情况下, 这条 AS 路径不应该被宣告出去, 但是网络管理员的一些疏忽可能会导致该 AS 路径环路被宣告出来。

4.3 错误配置

当 AS 中的路由器突然失效, 以至于不能检测 AS-PATH 属性中是否包含本 AS 号时, 就会出现 AS 路径环路。因此网络管理员的一些无意或者有意错误配置, 甚至 BGP 路由器遭受网络攻击暂时失效时, 会引起 AS 路径环路。

2011 年 8 月 18 日, 华盛顿大学和佐治亚理工学院实施了一个重编路由实验^[10], 该实验使用 AS 47 065。在这次实验中, 实验人员为前缀 184.164.255.0/24 宣告了一个 AS 路径环路 (47 065, x, 47 065) 以使得 AS x 不能接受这条路由, 且相关的流量不再经过 AS x。在此次实验中, 显然管理员有意地错误配置路由器, 使得 AS 路径环路被宣告出去。

从图 2 和图 3 可以看出, 2013 年 3 月 1 日 IPv6

中 AS 路径环路数量和所占比例猛增, 一天内 AS 路径环路异常数量达到了 163 个, 其中, 152 个异常是由于 AS 6167 引起的。经过确认, 是由于 AS 6167 的网络管理员错误配置导致的 AS 路径环路。

5 给 ISP 的建议

根据 BGP 协议的规定^[4], AS 中的路由器会检查路由通告信息中的 AS-PATH 属性, 以确定该属性中是否会包含本 AS 号, 从而确保 AS 路径环路不会发生。但是, 对 RouteViews 中的数据分析后, 本文发现 AS 路径环路不仅存在, 而且数量和比例特别是 IPv4 中的数量和比例呈增长趋势。而 AS 路径环路不仅会增加数据分组延迟, 更有可能增大分组丢失率。为此, 如何避免 AS 路径环路, 应当成为 ISP 关注的问题。

当路由通告信息到达 AS 中的路由器时, 为了提高效率, 路由器只会监测该 AS-PATH 属性中是否包含本 AS 号。但这样即使路径中已经包含了一个或者多个 AS 路径环路, 该路由器也不会丢弃这条路由通告信息。因此, 本文建议 AS 中的路由器在监测 AS-PATH 属性时, 不仅监测该属性中是否包含了本 AS 号, 也监测该 AS 路径中是否已经有环路。如果有环路, 立即将该路由通告信息丢弃。这样, 即使由于路由信息不一致、跨国公司以及有意或者无意的错误配置产生了一些包含 AS 路径环路的路由通告信息, 也会及时地被下一个接受该信息的 AS 中路由器丢弃。另外, 监测 AS-PATH 属性中是否包含 AS 路径环路所需要的开销几乎可以忽略不计, 是简单可行的。

6 结束语

本文通过对从 2011 年 6 月 1 日到 2013 年 5 月 31 日这 728 天的 RouteViews 中的数据进行处理, 统计并分析了 AS 路径环路规律。本文不仅统计了每天 IPv4 和 IPv6 中以上 AS 路径环路异常发生的数量和所占比例, 还分析了异常持续时间的分布规律。另外, 本文还对发生异常的前缀的分布做出了统计。针对以上规律, 本文分析了几个可能导致 AS 路径环路的原因。硬件条件和路由机制的限制导致了各个 AS 中的路由信息不一致, 是导致短暂 AS 路径环路的主要因素。而跨国公司则可能会导致长时间的 AS 路径环路。另外, 有意或者无意的 BGP 路由器的错误配置可能会导致短暂或者较长时间的 AS 路径环

路。在此基础之上, 为了避免或者减少 AS 路径环路, 本文还为 ISP 的 BGP 路由管理提出了建议。

参考文献:

[1] MOY J. RFC 2328: OSPF version 2[EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2328>

[2] ORAN D, RFC 1142: OSI IS-IS intra-domain routing protocol[EB/OL]. <http://tools.ietf.org/rfc/rfc1195.txt>.

[3] MALKIN G. RFC 2453: RIP version 2[EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2453.txt>.

[4] EKHTER Y, LI T, RFC 1771: border gateway protocol 4[EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc1771.txt>.

[5] PEI D, WANG L, MASSEY D, *et al.* A study of packet delivery performance during routing convergence[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Dependable Systems and Networks[C]. San Francisco, USA, 2003.

[6] DEERING S, HINDEN R. RFC 2460: Internet protocol, version 6 (IPv6) Specification[EB/OL]. <http://tools.ietf.org/html/rfc2460>.

[7] PEI D, ZHAO X, MASSEY D, *et al.* A study of BGP path vector route looping behavior[A]. Proceedings Internet Conference on Distributed Computing Systems[C]. Tokyo, Japan, 2004. 720-729.

[8] MAHAJAN R, WETHERALL D, ANDERSON T. Understanding BGP misconfiguration[A]. Proceedings of the 2002 SIGCOMM[C]. Pittsburgh, PA, 2002.

[9] SHI X, XIANG Y, WANG Z, *et al.* Detecting prefix hijackings in the Internet with argus[A]. Proceedings of the 2012 ACM Conference on Internet Measurement Conference[C]. Boston, USA, 2012.

[10] University of oregon route views project[EB/OL]. <http://www.routeviews.org/>

[11] ZHAO X, PEI D, WANG L, *et al.* An analysis of BGP multiple origin AS (MOAS) conflicts[A]. Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop[C]. Burlingame, USA, 2001.

[12] CHIN K. On the characteristics of BGP multiple origin AS conflicts[A]. Telecommunication Networks and Applications Conference[C]. Christchurch, New Zealand, 2007.

[13] IPv6 global unicast address assignments[EB/OL]. <http://www.iana.org/assignments/IPv6-unicast-address-assignments/IPv6-unicast-address-assignments.xhtml>.

作者简介:



张圣林 (1989-), 男, 山东滨州人, 清华大学博士生, 主要研究方向为下一代互联网体系结构。



刘莹 (1973-), 女, 甘肃天水人, 博士, 清华大学副研究员, 主要研究方向为下一代互联网体系结构、多播路由算法研究、多播路由协议设计、高性能路由器体系结构。

(上接第 16 页)

参考文献:

[1] 赵叶红等. NAT 环境下基于连接跟踪信息的策略路由[J]. 计算机应用, 2006,26(7):1549-1551.

ZHAO Y H, *et al.* Policy routing based on connection tracking information in NAT[J]. Journal of Computer Applications, 2006,26(7): 1549-1551.

[2] 张焕杰等. 基于 Linux 系统的校园网多出口策略路由实现[J]. 通信学报, 2006,27(z1):130-133.

ZHANG H J, *et al.* Policy routing on Linux for multi-homing campus network[J]. Journal on Communications,2006,27(z1):130-133.

[3] Linux advanced routing & traffic control HOWTO [EB/OL]. <http://lartc.org/howto/index.html>, 2012.

作者简介:



张焕杰 (1975-), 男, 安徽淮北人, 中国科学技术大学高级工程师, 主要研究方向为网络安全、网络管理等。



夏玉良 (1975-), 男, 安徽岳西人, 中国科学技术大学工程师, 主要研究方向为软件开发、数据库等。