

基于 Locator/ID 分离体系结构的域间多径路由无环问题分析

李丹^{1,2} 汪斌强² 刘强² 马海龙²

(河南陆军预备役高射炮兵师 郑州 450000)¹

(国家数字交换系统工程技术研究中心(NDSC) 郑州 450002)²

摘要 使用多径路由可以带来网络鲁棒性增强、网络利用率提高等诸多益处,但针对域间多径路由如何避免环路的相关研究却仍处于起步阶段。通过分析 AS_PATH 检测机制在多径路由条件下的不完备性,证明了针对 Locator/ID 分离体系结构,采用特定约束条件可以避免域间多径路由产生环路的结论。理论与仿真结论表明,LFGM(Loop-Free Guarantee Mechanism) 不仅能够满足多径路由的无环需求,而且与最优路径选路及等代价最优路径选路方式相比,节点将能够获取更多数量的可用路由,从而为路由选择提供了更大的可操作空间。

关键词 域间多径路由,路由环路

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Analysis for Loop-freeness of Multipath Inter-domain Routing Based on Locator/ID Decoupling Architecture

LI Dan^{1,2} WANG Bin-qiang² LIU Qiang² MA Hai-long²

(Henan Antiaircraft Artillery Reserve-duty Division, Zhengzhou 450000, China)¹

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)²

Abstract Multipath inter-domain routing has better effect in routing reliability and link utilization than traditional single-path routing policy, but how to guarantee the loop-freeness is still a new question. Through analyzing the incompleteness of AS_PATH detection mechanism, this paper proved the loop-freeness condition and offered a method based on the collaborative operation of control and data plane(LFPM). By analyzing the theoretical conclusion and simulation experiments, LFPM could guarantee the loop-freeness demand in multipath routing. Moreover, the number of available routes could be increased greatly than equal cost multipath routing method and best routing method which could provide more probability for better routing selection results.

Keywords Multipath inter-domain routing, Routing loop

1 引言

针对当前 Internet 暴露出的诸多问题, IETF 和 IRTF^[1] 提出并建议在下一代互联网设计中, 将当前 IP 地址既表示身份又表示位置的双重语义进行解耦合, 而 Locator/ID 分离已经被普遍认同为未来 Internet 体系结构的基本要素^[2-5]。其中, 作为路由系统选路依据的 Locator 存在两种不同类型的定义方式: LISP^[6], MIRO^[7], HLP^[8] 以及 HRA^[9] 建议使用 AS 级的位置标识进行域间选路, Locator 可以采用 AS 号或边界路由器等标识来表示; SHIM6^[2], HIP^[3] 和 ILNP^[10] 将 Locator 直接定义在端系统中, 而路由系统的可扩展性则通过对 Locator 的合理分配和聚合来保证。虽然两种不同定义方式下的路由体系结构均能够较好地缓解现有域间路由系统的可扩展性问题, 但第一种方式由于仅需对网络设备进行升级改造而更显优势。

随着这些具有良好可扩展性的路由体系结构的提出, 域间引入多径路由将成为可能。同时, 由于多径路由存在网络

鲁棒性强、网络利用率高等特点, 使得多径路由逐渐成为域间路由研究领域的一个新热点。文献[3, 11-14]对域间多径路由的体系结构和实施方法提出了解决方案, 但都是在假设节点可以得到多可达路径且不会发生环路的条件下进行的。文献[15-18]对域间多可达路径无环保证问题进行了分析, 但是需要为链路赋予全网一致的权值信息, 限制了域间路由对复杂策略的支持。文献[19, 20]提出选择具有等代价的多条最优路径, 但节点可使用的多可达路径数量差强人意。

本文根据域间路由基于本地策略及 AS 间商业协议关系进行报文逐跳转发的特点, 分析得到 BGP 协议用于避免环路所采用的 AS_PATH 检测机制将不再适用于域间多径路由无环需求的结论, 证明了基于 Locator/ID 分离体系并引入简单约束条件后实现多径路由无环需求的可行性。理论与仿真分析表明, 若面向 AS 级网络拓扑进行选路, 采用最优路径优先方式仅能够选用可达路径备选集中约占总数 58% 的路由, 而采用 LFGM 后, 将可以选用约占总数 91% 的可达路由来执行多径路由和流量分割。由于篇幅有限, 本文重点针对多径

到稿日期: 2010-03-09 返修日期: 2010-05-20 本文受 973 国家重点基金项目(2007CB307102)资助。

李丹(1980-), 男, 博士生, 主要研究方向为域间路由等, E-mail: rocket0623@sina.com; 汪斌强(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带信息网络; 刘强(1982-), 男, 博士生, 主要研究方向为域间路由等; 马海龙(1980-), 男, 讲师, 主要研究方向为域间路由等。

路由无环选路机制进行重点分析,而路由协议收敛时间内可能出现瞬间无环问题,将在今后的工作中结合具体协议实施方法进行着重研究。此外,为了便于描述,本文所采用的“节点”概念均代表骨干网中的一个自治域。

2 域间多径路由无环问题分析

域间节点之间通过路由协议实现互联互通,而路由协议存在的实质在于探寻并得到一个可以到达每个远端节点的有向无环图。如何在保持当前 Internet 路由系统基于目的地址逐跳转发技术优势的同时避免多径路由出现环路,已经成为域间多径路由研究领域的重要组成部分。本文通过对 AS_PATH 检测机制局限性的理论分析,逐步证明出特定约束条件下域间多径路由可以满足无环需求的结论。

2.1 AS_PATH 检测机制分析

BGP 作为 Internet 的域间路由协议,一直被人们广泛使用。与域内路由协议所不同的是,BGP 更多地考虑了 AS 间商业关系的私密性和 AS 策略的多样性,这使得路由更新报文中通常仅包含路径曾穿越过的 AS 信息(位于 AS_PATH 属性字段中)。若 BGP 得到去往同一目的节点的多条偏好相同的路径,则通过 Tie-Breaking 法则遴选出一条最优路径以供使用,并将该路径信息继续通告给位于下游的邻居节点。

在解决路由环路的问题上,BGP 采用 AS_PATH 属性检测机制来实现环路避免。若路由器发现自己拥有的 AS 号码出现在邻居通告的路由信息中,则认为使用邻居通告的这条新路由将会导致路由环路,路由器将直接对该路由做过滤处理。由于所有 BGP 路由器都只把本地没有环路且最优的可达路径通告给下游 AS,使得源节点发往目的节点的报文将始终沿中间节点的最优路径方向传递。在 BGP 路由协议收敛条件下,该检测机制可以达到避免环路的要求。

然而,在基于目的地址逐跳转发的模式和执行域间多径路由的条件下,无环保证机制将变得更为复杂。如何保证节点在执行报文转发时,报文不会兜圈子或直接从下游节点返回到本地节点成为根本的问题所在。为了更加清晰地描述多径路由下环路避免这一复杂问题,本文首先通过简单的示例进行说明。示例所使用的简单网络拓扑图如图 1 所示。

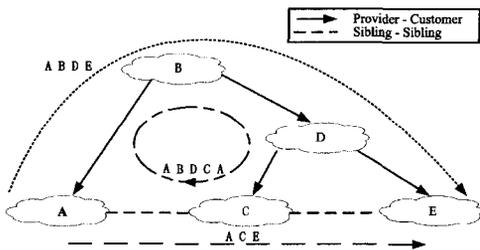


图 1 AS_PATH 检测机制局限性示例

按照图 1 所示的网络拓扑结构及节点关系,在各节点分别执行完 AS_PATH 检测机制以后,节点 A 可以获得去往节点 E 的两个可达下一跳(B,C),节点 D 可以获得去往 E 的 3 个可达下一跳(B,C,E),节点 C 也可以获得去往 E 的 3 个可达下一跳(A,D,E)。以节点 C 为例,若不采用特殊机制,A 发往 E 的报文会有一部分通过 D 转发给 C。由于 C 同样会认为 D 也是去往 E 的可达下一跳,则仍然会将这部分报文中的一些重新发给 D,从而在 C 和 D 之间构成直连环路。此外,由于 A 也是 C 去往 E 的可达下一跳,因此 A 通过 B 发往

E 的一部分报文在经由 C 转发时,其中一部分报文又会兜圈子重新回到 A,从而产生环路。

2.2 基于 Locator/ID 分离体系的域间多径路由环路问题

图 1 给出了采用 AS_PATH 检测的方式不能满足域间多径路由的无环需求的特例,以下将在考虑 AS 间商业协议关系的基础上,从更为一般的角度分析得到 AS_PATH 检测机制在域间多径路由条件下失效的原因。

本文根据 Gao^[21]对商业协议关系的定义方法,采用如下简称:Provider-Customer 关系(简称 P-C 关系)、Customer-Provider(简称 C-P 关系)、Peer-Peer 关系(简称 P-P 关系)、Sibling-Sibling 关系(简称 S-S 关系)。同时,使用关系函数 $relation\langle A, B \rangle$ 表示节点 A 与节点 B 之间的商业协议关系。此外,为了便于描述,本文将更靠近所需分析节点的节点称为上游节点。也就是说,在研究路由通告过程时,更靠近目的节点的节点称为上游节点,而在研究报文转发相关问题时将更靠近源节点的节点称为上游节点。

引理 1 在域间路由系统中,若节点 D 的可达信息沿不同路径通告到节点 S,且任意两条路径不同时包含存在 P-C 或 P-P 关系的上下游节点,则除节点 D 外,路径中的所有节点均可以使用这些多可达路径将报文传递给节点 D。

证明:为了体现一般性,本文选取任意两条可达路径进行分析,记为路径 $P_{b \rightarrow s}^1$ 和路径 $P_{b \rightarrow s}^2$ 。假设 v^j 为路径 $P_{b \rightarrow s}^1$ 中第 i 个节点, p^l 为路径 $P_{b \rightarrow s}^2$ 中第 l 个节点,则有: $\bigcup_{i=1}^n v^i \subseteq P_{b \rightarrow s}^1, \bigcup_{l=1}^m p^l \subseteq P_{b \rightarrow s}^2, \{v^i = p^l = D, v^m = p^m = S\} \subseteq P_{b \rightarrow s}^1 \cap P_{b \rightarrow s}^2$ 。网络拓扑情况如图 2 所示。

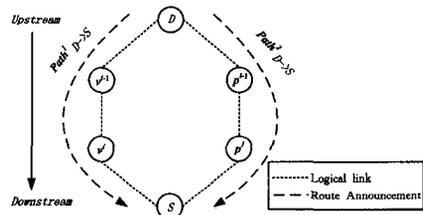


图 2 节点连接关系图

假定 $P_{b \rightarrow s}^1$ 和 $P_{b \rightarrow s}^2$ 同时存在具有 P-P 或 P-C 关系的上下游节点,且最靠近 D 的两对相邻节点分别记为 $\langle v^{i-1}, v^i \rangle$ 和 $\langle p^{l-1}, p^l \rangle$,即 $relation\langle v^{i-1}, v^i \rangle = \{P-C \vee P-P\}$, $relation\langle p^{l-1}, p^l \rangle = \{P-C \vee P-P\}$ 。按照 Valley-free 条件^[21],若 S 可以获得这两条路径,则位于 v^i 下游的任意相邻节点之间的关系只可能为 $relation\langle v^{j+x_1}, v^{j+x_1+1} \rangle = \{P-C \vee S-S\}$ ($0 \leq x_1 < n-i$)。同理可得, $relation\langle p^{j+x_2}, p^{j+x_2+1} \rangle = \{P-C \vee S-S\}$ ($0 \leq x_2 < m-l$)。

根据关系函数 $relation\langle A, B \rangle$ 的反意性, $relation\langle p^l, p^{l-1} \rangle = \{C-P \vee S-S\}$ 。由于 $S \in P_{b \rightarrow s}^1 \cap P_{b \rightarrow s}^2$,当节点 S 收到通过 $P_{b \rightarrow s}^1$ 传递过来的路由更新后,在不违反 Valley-free^[21]条件的前提下,S 允许将经由 $P_{b \rightarrow s}^1$ 去往 D 的可达信息继续向位于 $P_{b \rightarrow s}^2$ 中的节点 p^{m-1} 及后续节点进行通告,直到可达信息抵达节点 p^l ($1 < l \leq m$)。节点 p^l 根据 Valley-free^[21]条件将不能选择向其 Provider (p^{l-1}) 继续通告该可达信息。如此一来,由于 p^l 抑制了路由的进一步通告,节点 p^{l-x} ($1 \leq x \leq l-1$) 将无法得到经由 $P_{b \rightarrow s}^1$ 去往 D 的可达路径。同理,位于 $P_{b \rightarrow s}^1$ 中的节点 v^{i-y} ($1 < y \leq i-1$) 也将丧失

经由 $P_{b \rightarrow s}^2$ 去往 S 的可达路径。

反之,若 $P_{b \rightarrow s}$ 或 $P_{b \rightarrow s}^2$ 仅有一条路径中的上下游节点对存在 P-P 或 P-C 关系(假定为 $P_{b \rightarrow s}$),则另一条路径($P_{b \rightarrow s}^2$)中的任一上下游节点仅可能存在 $relation\langle p^{l-1}, p^l \rangle = \{C-PVSS\} (1 < l \leq m)$ 。若经过 $P_{b \rightarrow s}$ 去往 D 的可达信息抵达 S 并继续向位于 $P_{b \rightarrow s}^2$ 的节点通告时,由于任意相邻节点均只可能存在 $relation\langle p^l, p^{l-1} \rangle = \{P-CVSS\} (1 < l \leq m)$, $P_{b \rightarrow s}^2$ 中所有节点都可获得 $P_{b \rightarrow s}^2$ 和 $P_{b \rightarrow s}$ 两条去往 D 的可达路径。同理, $P_{s \rightarrow D}^1$ 中所有节点在获得路径 $P_{b \rightarrow s}$ 之外,也将可以同时获得通过 $P_{b \rightarrow s}^2$ 去往 D 的可达路径。两条可达路径中的上下游节点的关系将从 $\{C-PVSS\}$ 最终过渡为 P-C。引理得证。

引理 2 若节点 S 在满足引理 1 所述条件下获得了去往节点 D 的多条可达路径,且多可达路径除节点 S 和 D 外仍存在相交节点,则 AS_PATH 属性检测无法保证多径路由的无环需求。

证明:为了体现一般性,本文假定 S 获得去往 D 的两条可达路径,且两条路径除节点 S 和 D 外存在相交节点 N ,即: $\{v^i = p^i = D, v^j = p^j = N, v^m = p^m = S\} \subseteq P_{s \rightarrow D}^1 \cap P_{s \rightarrow D}^2$ 。这样一来,若 $P_{s \rightarrow D}^1$ 和 $P_{s \rightarrow D}^2$ 满足引理 1 所述条件,则位于节点 N 上游的节点 $v^i (1 < i \leq i')$ 及 $p^j (1 < j \leq j')$ 均可以得到去往节点 D 的两条路由,分别记为 P^1, P^2 。其中, $\{v^x | 1 \leq x \leq i'\} \in P^1, \{v^y, p^y | i+1 \leq x \leq i', 1 \leq y \leq j'\} \subseteq P^2$ 。

假设 AS_PATH 检测机制可以满足域间多径路由的无环需求,则由于 P^1, P^2 不会重复出现相同的节点,节点 v^i 和节点 p^j 都将认为通过 P^1 和 P^2 转发数据不会产生环路。这样一来,若节点 v^{i-1} 经由 P^1 转发报文,而节点 v^i 又选择了经由 P^2 转发报文,则该报文将始终在节点 $\langle v^{i-1}, v^i \rangle$ 之间兜圈子,从而产生环路。由于与假设相悖,引理得证。

根据引理 2 的结论,在使用 AS_PATH 检测机制的同时,仍需要引入特殊的约束条件以防止直连环路的产生。根据引理 2 分析显然可知,若路由器数据平面执行报文转发时,引入不允许直接将收到的报文直接转发回上一跳节点的约束条件,则可以避免直连环路的产生。本文将这一约束条件记为约束条件一。然而,引入仅以此约束条件来应对多径路由条件下的环路问题仍然是不完备的。

2.3 域间多径路由无环条件分析

引理 1 和引理 2 证明了保持 AS_PATH 检测机制不变,并在数据平面引入不允许直接向来时端口转发报文的条件以后,仍然存在多径路由发生环路的可能。考虑到 AS 间商业协议的私密性以及部署本地策略的灵活性,本文考虑在不改变路由更新所包含的信息及 AS_PATH 检测机制的基础上,通过在控制平面路由计算过程中引入新的约束来对多可达路径进行遴选,同时协同前述数据平面报文转发方面的约束条件来避免环路的产生。

为了便于描述,本文将路径途经的节点数量简称为路径长度,并采用函数 $Length(p)$ 来表示路径 p 的长度,采用 SP_x 表示节点 x 去往目的节点 D 的最短路径。考虑到节点根据本地策略执行路由选择,最优路径可能并不具备物理拓扑上的最短路径长度,本文特对节点控制平面施加约束条件,记为约束条件二。

约束条件二 路由器仍沿用 AS_PATH 属性检测机制,

但路由计算过程中,只能选择路径长度大于或等于最优路径长度的路径作为多径路由的备选路径。

根据约束条件二的描述,节点的最优路径也是其最短路径。在此基础上,我们证明了如下引理:

引理 3 在引入约束条件一、二之后,若节点 n_k 由于使用去往 D 多条可达路径而产生了环路,则 n_k 去往 D 的多条可达路径至少存在两个相交节点 x 和 y ,使得 x 除最短路径 SP_x 外仍具有至少一条经过 n_k 和 y 去往目的节点 D 的可达路径 $Path_l$ 。

证明:若 n_k 去往 D 的所有可达路径只存在唯一交点(假定为 x),则按照 AS_PATH 检测机制, x 显然不会再次选择经由 n_k 和自己去往目的节点的其他路径,加之不允许向来时端口转发的约束条件直接制约了直连环路的产生, n_k 即使存在多可达路径也不会导致环路的发生。因此,若节点 n_k 由于使用去往 D 多条可达路径而产生了环路,则多可达路径中必存在两个或以上的相交节点。

换句话说,若发生环路, n_k 去往目的节点 D 的多条可达路径中至少有 3 个节点在拓扑图中形成了三角形形状,本文将这 3 个节点分别记为 $x, y, z (\{x, y, z\} \cap D = \emptyset)$,其网络拓扑关系如图 3 所示。

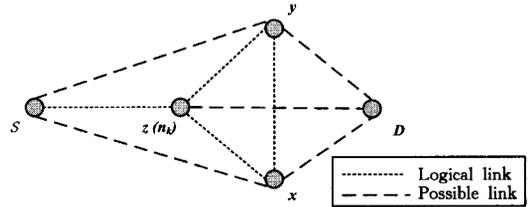


图 3 满足约束条件一、二的环路产生条件

在 3 个节点同时满足引理 1 所述条件时, x 可以获得依次经由 z 和 y 去往目的节点 D 的可达路径(记为 $Path_y$),同理 y 也可以获得分别经由 z 和 x 去往目的节点 D 的可达路径(记为 $Path_x$)。如此一来, x 若收到 z 通过 y 发往目的节点 D 的报文,仍可以在不违反约束条件一、二的情况下选择通过 $Path_y$ 将报文重新发还给 z ,从而构成环路。引理得证。

引理 3 证明了环路的产生是由于多可达路径中存在满足引理 1 所述条件且具备三角形拓扑连接关系的节点,然而在基于目的节点逐跳转发的方式下,如何才能保证下游节点按照上游节点所期望的方向转发数据成为需要突破的又一难题。经分析,本文证明了如下定理:

定理 1 在节点 n_k 去往目的节点 D 的可达路径中,若下游的所有节点 $n_{k+i} (1 \leq i)$ 只能选择路径长度小于 $length(SP_k) - i + 2$ 的可达路径,则各节点遵循约束条件一、二可以避免环路的产生。

证明:假定 $length(SP_k) = len$,则按照约束条件一、二所述条件, n_k 下游的第 1 个节点 n_{k+1} 存在的最短路径长度将不会大于 $len - 1 + 1 = len$,而 n_{k+1} 由于无法直接返回 n_k ,则经由其他节点返回 n_k 的路径的长度势必要大于 $len + 1$,因此若 n_{k+1} 仅能选择则长度不大于 $length(SP_k) - 1 + 2$ 的路径,则势必不会选择一条再次经由 n_k 去往目的节点的路由。

假定 n_k 下游的第 i 个节点记为 n_{k+i} ,由于 n_{k+i} 根据约束条件二将不允许直接选择位于上游的邻居节点,则 n_{k+i} 若选择经由上游任一节点 $j (1 \leq j < i)$ 转发报文,则所选择的路径长度必然不小于节点 j 的最短路径长度加一,即: $length$

$(SP_j)+1=len-j+1+1 \geq len-i+2$ 。因此,若 $n_{k+i}(1 \leq i)$ 只能够选择路径长度小于 $length(SP_k)-i+2$ 的可达路径,则可以避免节点 n_{k+i} 选择经由上游节点去往目的节点的路径。

同理,假定若 n_k 下游的第 $i+1$ 个节点记为 n_{k+i+1} ,若 $n_{k+i+1}(1 \leq i)$ 只能够选择路径长度小于 $length(SP_k)-(i+1)+2$ 的可达路径,则可以避免节点 n_{k+i+1} 选择经由上游节点去往目的节点的路径。定理得证。

3 基于数据与控制平面协同的域间多径路由无环保证方法(LFGM)

根据引理 1—引理 3 及定义 1 的证明结论,满足约束条件一、二的节点选择通过任一一路径长度与最优路径长度相差小于 2 的路径转发数据,都将避免由于引入域间多径路由而产生的环路问题。若网络中各个节点均按照此约束条件执行路由由遴选和判决,则域间多可达路径下的无环需求可以得以满足。

据此,本文提出一种基于数据平面与控制平面的合作式域间多径路由的无环保障方法(LFGM: Loop-freeness Guarantee Mechanism)。LFGM 通过在数据平面引入不允许向来时端口转发的约束条件来保证报文不会在相邻节点间兜圈子,同时在控制平面计算路由时引入路径长度统计和对比机制,以保证本地节点转发报文不会对上游节点造成环路。LFGM 与传统路径矢量协议和数据转发过程的主要区别可以概括为以下 5 个部分。

3.1 路由表项引入新属性

传统的 BGP 路由表为每条表项维护“Origin 属性”,“AS-Path 属性”,“下一跳属性”,“本地优先属性”,“MED 属性”和“Community 属性”以供路由计算使用。为了更好地体现本地对于多个可达路由的偏好程度,本文为每个路由表项增加“Weight 属性”,以便于后续数据平面执行合理的流量分割,同时,引入“Path Len”属性,用于指示经由该路径去往目的节点途径的节点个数。

3.2 控制平面实施新的路由遴选机制

在传统 BGP 协议中,路由器接到邻居传递来的路由更新时,会首先遴选掉不符合本地策略的路由,而可用路由则将按照 Tie-breaking 法则遴选出一条最优路径以供使用。针对定义 1 所述结论,本文对上述 BGP 协议的路由遴选机制进行了修改,以支持多径路由条件下的无环需求,其主要过程如图 4 所示。

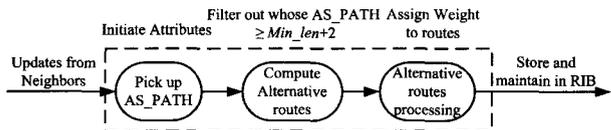


图 4 域间多径路由遴选机制

修改后的路由遴选机制将主要体现为 3 个步骤:步骤一,路由器对邻居的路由更新(r_n)应用本地策略,对可用路由实施初次遴选,并对路径长度($Length(r_n)$)进行提取;步骤二,路由器进一步根据本地偏好,选则一条最优路径。其他大于最优路径长度(Min_len)且相差小于 2 的路径将被计算出来作为备选路径以供使用。步骤三,备选集(Π_{cand}^i)中所有路径都将根据本地策略而被赋予本地意义的偏好权值(Weight),并储存于路由表。域间多径无环路由遴选算法如图 5 所示。

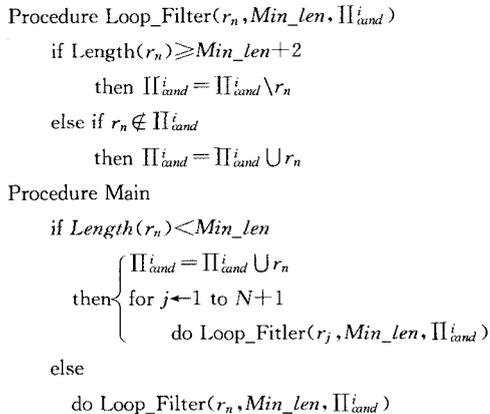


图 5 多径路由遴选算法

由图 5 可知,多径无环路由由遴选算法的复杂度主要由两部分构成。其中,第一部分为最优路由选择过程的复杂度,而第二部分则为路由器将所有备选路由与最优路由进行比较,遴选掉不符合定理 1 条件路由的算法复杂度。若新路由为本地最优路由,则对备选集中所有表项重新执行遴选算法,由于每条表项均需与最优路径进行比较,因此若假设备选路径集的表项数量为 N ,则算法的复杂度为 $O(N)$;反之,若新路由并非本地最优路由,则仅需要与最优路径进行比较即可,算法的复杂度为 $O(1)$ 。综上可得,采用 LFGM 机制对多径路由实施遴选的最坏算法复杂度为 $O(N)$ 。

3.3 数据平面禁止向上一跳 AS 转发报文

一般情况下,为了加速报文查表速度和本地流量统计,当前域间路由器通常会在接收到 IP 数据包后,直接剥离报文中封装的不定长的物理层信息和二层帧信息,同时在自定义格式且长度固定的包头中填入入端口号,并封装在 IP 报文头部。如此一来,转发查表时将直接可以从固定位置提取目的 IP 地址,而不必重新分析每个 IP 包来得到目的 IP。该处理机制使得路由器不仅可以简化处理流程,同时也可以方便地得到与各端口连接的 AS 情况。

根据约束条件二及定义 1 的结论,本文针对域间路由器数据平面的数据转发过程进行了如下调整:若报文经过转发查表得到的出端口与入端口连接为同一 AS,无论出端口连接的下一跳具备多高的 Weight,报文都将被不会被转发。若除该出端口外无其他可用路径,路由器进行丢包处理。

3.4 仅通告最优路由给域间邻居节点

通告所有可达路径给邻居节点不仅会带来频繁的路由更新消息,同时也会加大路由协议的计算复杂度和收敛时间。因此,本文认为采用通告最优路由给邻居节点的方式通告路由更新更为可行。若本地 AS 对去往特定目的 AS 的可达路径数量有具体需求,则可通过一定方式与邻居 AS 进行协商以获取更多所需要的可达路径。由于篇幅有限,本文对此不做具体阐述。

3.5 报文主要处理过程

从定理 1 所述结论可知,若需满足域间多径路由的无环需求,则流量可通过路径长度小于 $length(SP_k)-i+2$ 的路径实施转发。因此,本文建议报文首部携带剩余可用跳数信息,该信息可使用类似 IPv6 扩展选项或 IPv4 的保留字段进行携带。终端及路由器对报文的处理过程概略如下:

对于本地流量,终端及路由器处理过程如下:

1)终端封装数据包,并将剩余可用跳数信息置为 Null。报文经域内路由转发至出口路由器处理;

2)边界路由器接收到剩余可用跳数信息置为 Null 的报文后,查表得到去往目的终端的最短路径长度,并将报文剩余可用跳数置为 $length(SP)$;

3)出口路由器根据可用路径偏好属性执行转发策略,将报文发往下一跳节点,同时将剩余可用跳数置为 $length(SP)-1$ 。

对于过境流量,路由器的处理过程如下:

1)路由器提取报文携带的剩余可用跳数信息;

2)在所有路径长度小于剩余可用跳数加 2 的可用路径中执行流量分割;

3)路由器根据出端口判断下一跳节点是否仍属于本地自治域,若属于则将报文发往下一跳节点,同时保持剩余可用跳数不变;否则,将剩余可用跳数减一后发往下一跳节点。

4 仿真实验

本文前述部分从理论上证明了采用 LFGM 机制可有效避免使用域间多路由所产生的环路问题,而 LFGM 与其他多径路由无环避免机制方法相比,是否可以得到更多的备选

路径,从而为多径路由选择提供更大的选择空间,成为本节研究的重点。

在研究方法的选择上,本节首先对当前 Internet 实际拓扑情况下的 BGP 路由表项的数量进行统计分析,然后又进一步对比了采用 Locator/ID 分离技术并面向 AS 级选路时,采用等价多路径避免环路产生的机制和采用 LFGM 执行路由判决所得到的多可达路径总数存在的差别。

4.1 仿真数据采集

本文采用的仿真数据来源于 2009 年 11 月 20 日 Route-Views2.oregon-ix.net 发布的 MRT 格式存储文件,并采用 VC++ 作为仿真工具将该文件所包含的 39 个不同 AS 中的 RIB 信息进行分别提取,得到这些观测点上基于前缀方式的 BGP 路由表大小。随后,通过分析观测点路由表中各条路由所含的 AS_PATH 信息,推断出本地与远端 AS 可能存在的 AS 级网络拓扑关系,并以此作为后续仿真的原始数据。

4.2 路由表项数量对比分析

通过对各个观测点 RIB 信息的提取和整理,这些 Internet 中实际运行的域间路由器所具有的 BGP 路由表数量如图 6 所示。

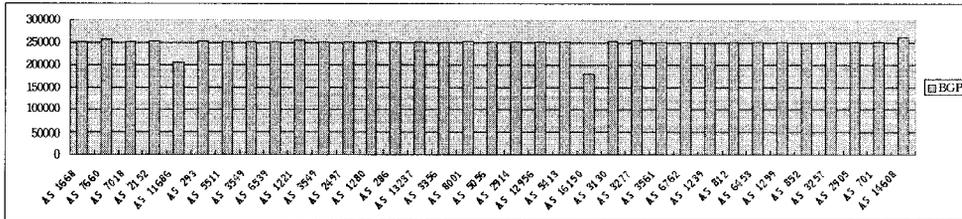


图 6 BGP 路由表数量

由于维护多可达路径较之最优路径优先将耗费更多的存储和计算开销,因此域间多可达路径更适合在采用 Locator/ID 分离技术并面向 AS 级选路的域间路由系统中实现。结合 Locator/ID 分离体系结构,本文首先从所有路由的 AS_

PATH 属性信息中过滤掉重复出现的 AS 号,即统计得到路径途径的 AS 序列信息,然后通过计算得到观测点到达远端 AS 的所有 AS 级可达路径,其可达路径总数如图 7 所示。

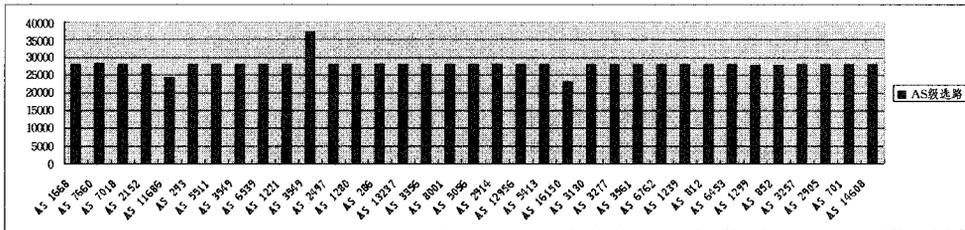


图 7 面向 AS 级选路的路由表数量

通过对两种体系结构下路由表大小的对比,我们可以清楚地发现,采用 Locator/ID 分离技术并面向 AS 级选路将大大缓解路由可扩展性问题,即使选择所有可得的多径路由建立路由表,其表项的数量也仅占 BGP 路由表的 8% 左右。

4.3 基于 Locator/ID 分离体系的域间多径路由备选路径数仿真分析

通过对各观测点面向 AS 级选路情况的统计分析,本文同样得到了各观测点与远端 AS 间可达路径分布的平均情况,如图 8 所示。其中,观测点与远端 AS 间仅存在一条可用路径的表项约占总数的 58.36%,存在两条不同路径的表项约占总数的 24.87%,存在 3 条不同路径的表项约占总数的约 8%,存在 4 条及以上可达路径的表项约占总数的 8.77%。

在此基础上,本文结合观测点到远端 AS 存在的多可达

路径长度的分析结果,对等价价最优路径选路方式^[19,20]可使用的路径总数进行了分析。从各个观测点计算结果的平均情况来看,若按等价价最优路径的方式^[19,20]对所有可得的多可达路径实施遴选,由于这些路径需要具有相同的 AS_PATH 长度,因此将仅有约占 30.21% 的表项可供使用。

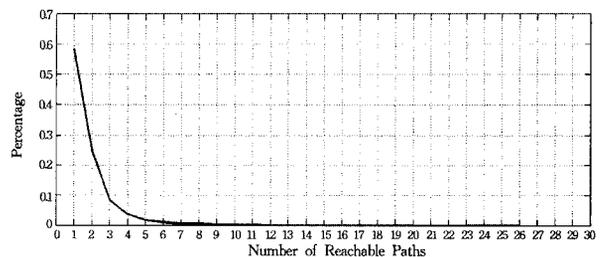


图 8 观测点多可达路径数量分布情况

相反,如果采用本文提出的无环保障机制 LFGM 遴选多可达路由,由于具有较长路径长度的路由通常不会得到更高的本地偏好^[18],若将当前所有可达路径中 AS_PATH 长度最短的路径作为最优路径,则与最短 AS_PATH 长度相差二以内的多可达路径将达到总数的 79.22%,它们都可作为备选路由而被使用。

如果再将以上两种机制与最优路径优先选路方式相比较,则可以发现:采用等价最优路径方式可以使得备选路由数量总数上升约 12.57%,而采用 LFGM 方法不仅可以满足域间多径路由无环需求,同时还可使得备选路由总量较之最优路径选路上升约 32.99%。而这些多可达路径可用总数的增长,都将直接有助于提升自治域之间的空间连通性,并最终有助于提升域间路由的可靠性等指标。

结束语 多径路由可以较好地解决路由可靠性问题,同时也将为执行更为合理的域间流量工程提供更为有效的支持。针对现有域间多径路由方法仍缺乏有效合理的无环保障机制的问题,本文在分析仅采用 AS_PATH 检测机制无法满足域间多径无环需求的基础上,证明了域间节点引入特定约束条件后可以避免环路产生的结论,并提出一种数据平面与控制平面相互配合以防止多径路由产生环路的方法(LFGM)。理论及仿真分析表明,采用 LFGM 可使节点获得更多不会产生环路的可达路径。LFGM 没有改变 BGP 语义,仅对 BGP 协议的路由遴选机制和路由器数据转发过程进行了适当调整,这将为域间多径路由的实现和部署提供更为有效的支撑。

参 考 文 献

- [1] Meyer D, Zhang L, Fall K. Report from the IAB workshop on routing and addressing[S]. RFC4984, Sep. 2007
- [2] Nordmark E, Bagnulo M. Shim6: level 3 multihoming shim protocol for IPv6[S]. Internet Draft, Oct. 2007
- [3] Moskowitz R, Nikander P. Host identity protocol (HIP) architecture[S]. RFC 4423, May 2006
- [4] Zhang X, Francis P, Wang J, et al. Scaling global IP routing with the core router-integrated overlay[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Network Protocols, 2006:147-156
- [5] Bonaventure O. Reconsidering the Internet Routing Architecture [S]. Internet Draft, Mar. 2007
- [6] Farinacci D, Fuller V, Oran D. Locator / Id separation protocol

(上接第 115 页)

周期管理,避免了各种管理异常情况的发生。

参 考 文 献

- [1] 徐志伟,冯百明,李伟. 网格计算技术[M]. 北京:电子工业出版社,2004
- [2] Sandhu R, Coyne E, Feinstein H, et al. Role-Based Access Control Model[J]. IEEE Computer, 1996, 29(2): 38-47
- [3] Keahey K, Welch V. Fine-Grain Authorization for Resource Management in the Grid Environment[C]//Proceedings of Grid 2002 Workshop, 2002
- [4] Liu Limin, Xu Zhiwei. A Layered Grid User Expression Model in Grid User Management[C]//Grid and Cooperative Compu-

(LISP)[S]. Internet Draft, Jan. 2007

- [7] Xu Wen, Rexford J. MIRO: Multi-path Interdomain Routing[C]//Proceedings of SIGCOMM, 2006:171-182
- [8] Subramanian L, Caesar M, Cheng Tien Ee, et al. HLP: A Next Generation Inter-domain Routing Protocol[C]//Proceedings of the 2005 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, 2005:13 - 24
- [9] Xu X, Guo D. Hierarchical Routing Architecture (HRA)[C]//Next Generation Internet Networks, 2008:92-99
- [10] Atkinson R. ILNP Concept of Operations[S]. Internet Draft, June 2008
- [11] He Jiayue, Rexford J. Toward internet-wide multipath routing [J]. Network, IEEE, 2008, 22(2): 16-21
- [12] Wang Yi, Avramopoulos L, Rexford J. Morpheus: making routing programmable[C]//Proceedings of the 2007 SIGCOMM workshop on Internet network management, 2007:285-286
- [13] Saucez D, Donnet B, Iannone L, et al. Interdomain traffic engineering in a locator/identifier separation context[C]//Internet Network Management Workshop, 2008:1-6
- [14] Banner R, Orda A. Multipath Routing Algorithms for Congestion Minimization[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions, 2007, 15(2):413-424
- [15] Enyedi G, Retvari G. A Loop-Free Interface-Based Fast Reroute Technique [C] // Next Generation Internet Networks, April 2008:39-44
- [16] Shi Lei, Fu Jing, Fu Xiaoming. Loop-Free Forwarding Table Updates with Minimal Link Overflow[C]//Proceedings of the ICC '09, IEEE, 2009:1-6, 14-18
- [17] Fu Jing, Sjodin P, Karlsson G. Loop-free updates of forwarding tables[J]. Network and Service Management, IEEE Transactions, 2008, 5(1):22-35
- [18] Van Beijnum I, Crowcroft J, Valera F, et al. Loop-Freeness in Multipath BGP through Propagating the Longest Path[C]//Proceedings of the ICC', June 2009:1-6
- [19] Systems C. BGP best path selection algorithm, Document ID: 13753 [EB/OL]. <http://www.cisco.com/application/pdf/paws/13753/25.pdf>, May 2006
- [20] Soricelli J M. Juniper™. Networks Certified Internet Specialist Study Guide[OL]. www.juniper.net/training/certification/JN-CIS_studyguide.pdf, 2004
- [21] Xia J, Gao L. On the evaluation of AS relationship inferences[C]//Proceedings of the GLOBECOM '04, Nov. 2004, 3:1373-1377

ting PT2, 2004, 3033:1055-1058

- [5] 王诚,张祖昶. 基于信任度的网络安全访问模型的研究[J]. 南京邮电大学学报, 2009, 29(3):46-49.
- [6] 张建凤,徐艳丽,等. 网格环境下基于上下文和角色的访问控制[J]. 计算机科学, 2008, 35(11):13-16
- [7] 陈艳杰,李俊. 网格 Portal 应用研究[J]. 河南师范大学学报, 2009, 3(73):68-72
- [8] 陈博,迟学斌,武虹. 计算网格 Portal 的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(9):37-41
- [9] 王伟,殷国富,张雪平. 基于 Microsoft. NET 的有限元应用网格门户研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(3):55-58
- [10] Yu Jia, Buyya R. A taxonomy of scientific workflow systems for grid computing[J]. ACM SIGMOD Record, 2005, 34(3):44-49