

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H04L 12/56 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510032275.4

[45] 授权公告日 2008 年 11 月 12 日

[11] 授权公告号 CN 100433704C

[22] 申请日 2005. 10. 21

[21] 申请号 200510032275.4

[73] 专利权人 湖南大学

地址 410082 湖南省长沙市麓山南路

[72] 发明人 黎文伟 张大方 杨金民 谢高岗

[56] 参考文献

WO01/86867A2 2001. 11. 15

KR10 - 2005 - 0059959A 2005. 6. 21

Asymmetric Routing. Starsman, R. S. MIL-COM 97 Proceedings, Vol. 2 . 1997

On Routing Asymmetry in the Internet. Yihua He 等. Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM '05. IEEE, Vol. 2 . 2005

审查员 刘玲斐

[74] 专利代理机构 长沙正奇专利事务所有限责任公司

代理人 马 强

权利要求书 2 页 说明书 7 页

[54] 发明名称

一种网络路由拓扑对称性的定量评估方法

[57] 摘要

本发明涉及计算机网络性能测试与监控技术，为一种网络路由拓扑对称性定量评估方法。该方法是通过规定的编辑操作和比对得分对两网络主机间的正向路由序列和逆序反向路由序列的转发实体元素进行逐个比对，计算其最大比对得分作为两网络主机间的路由对称度，在此基础上，进行归一化处理，计算两网络主机间的归一化路由对称度，实现任意主机对的路由对称程度比较。本发明可以客观地评价不同网络主机的路由拓扑对称程度，充分发现互联网的路由对称性时空特征，对网络测量、网络建模、网络管理等极具意义，还可用于推测互联网的动态演变规律。

1. 一种网络路由拓扑对称性的定量评估方法,其特征是,包括以下步骤:

(1) 获取主机对 H_A 、 H_B 间的正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} :

$$R_{A-B} = \{H_A, u_1, u_2, \dots, u_m, H_B\}, \quad \forall u_k \in S, \quad 1 \leq k \leq m$$

$$R_{B-A} = \{H_B, v_1, v_2, \dots, v_n, H_A\}, \quad \forall v_k \in S, \quad 1 \leq k \leq n$$

其中 S 为所有转发实体集合;

(2) 将正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} 所包含的端主机删除, 获得新的路由序列 RR_{A-B} 和 RR_{B-A} :

$$RR_{A-B} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}, \quad \forall u_k \in S, \quad 1 \leq k \leq m$$

$$RR_{B-A} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \quad \forall v_k \in S, \quad 1 \leq k \leq n$$

(3) 将序列 RR_{B-A} 逆序重排得到去除了端主机的逆序反向路由序列 RR'_{B-A} :

$$RR'_{B-A} = \{v_n, v_{n-1}, \dots, v_1\}, \quad \forall v_k \in S, \quad 1 \leq k \leq n$$

(4) 对路由序列 RR_{A-B} 和 RR'_{B-A} 的转发实体元素逐个进行比对操作计算, 各编辑操作的得分函数 $p(x, y)$ 定义如下:

i) 匹配操作 $Mat(a, a)$: 路由序列 RR_{A-B} 和 RR'_{B-A} 同一位置的元素相同, 其得分函数 $p(a, a)=1$;

ii) 删除操作 $Del(a, -)$: 从序列 RR_{A-B} 删除元素 a , 或在序列 RR'_{B-A} 对应的位置插入空元素, 其得分函数 $p(a, -)=-1$;

iii) 替换操作 $Rep(a, b)$: 以序列 RR'_{B-A} 中的元素 b 替换序列 RR_{A-B} 中对应位置的元素 a , 其得分函数 $p(a, b)=0$, 其中 $a \neq b$;

iv) 插入操作 $Ins(-, b)$: 在序列 RR_{A-B} 插入空元素, 或删除序列 RR'_{B-A} 中对应位置的元素 b , 其得分函数 $p(-, b)=-1$;

定义了比对时各编辑操作及其得分函数后，路由序列 RR_{A-B} 和 RR'_{B-A} 的比对得分 $Score$ 等于将 RR_{A-B} 两两比对转化为 RR'_{B-A} 所用的所有编辑操作的得分总和，即：

$$Score(RR_{A-B}, RR'_{B-A}) = \sum_{i=1}^t p_i(x, y)$$

其中， $t = \max(m+2, n+2)$ ；

得到其最大比对得分作为主机对 H_A 、 H_B 间的正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} 的路由对称度 RS ：

$$RS(H_A, H_B) = \max \{ Score(RR_{A-B}, RR'_{B-A}) \} ;$$

(5) 计算主机对 H_A 、 H_B 间的正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} 的归一化路由对称度 NRS ：

$$NRS = 2 \times RS(H_A, H_B) / (m+n)$$

NRS 取值在 0 到 1 之间，当主机对正向路由序列和反向路由序列完全对称时 NRS 取 1，当主机对正向路由序列和反向路由序列完全不对称时 NRS 取 0。

一种网络路由拓扑对称性的定量评估方法

技术领域

本发明涉及计算机网络性能测试与监控技术，进一步是指一种定量的网络路由拓扑对称性特征评估方法。

背景技术

对于互联网任意一对主机 H_a 、 H_b ，路由拓扑对称性是指：从主机 H_a 到主机 H_b 的数据包转发路由是否与从主机 H_b 到主机 H_a 的数据包转发路由经过相同但次序正好相反的转发实体。若是，则主机 H_a 、 H_b 之间路由对称；否则，路由不对称。这里转发实体可以是路由器、自治域 (Autonomous System, AS) 等。根据转发实体的具体所指，有路由器级、AS 级等不同层次的路由拓扑对称性划分，以揭示互联网在不同层次的路由对称性特征和它们的相互关系。若遵循最短路径优先的基本路由选择算法，网络中任意主机对路由拓扑应对称。但在互联网中路由不对称现象较为普遍。导致路由不对称的原因较多，负载平衡、策略路由、流量工程、网络拓扑变化等都可能产生不对称路由。而 ISP 出于自身网络性能和效率的考虑，往往尽可能早地将来自其他 AS 的数据包转发出去，也导致出现路由器级甚至 AS 级的不对称路由。此外，即使所有节点都遵循最短路径优先的路由选择算法，也可能因为链路在两个转发方向被赋予了不同的开销 (cost) 而产生不对称路由。

路由不对称影响网络性能以及 TCP 等基于反馈机制的协议性能。测量和分析路由对称与否对网络测量、网络建模、网络管理等极具意义。路由对称性是互联网的基本属性之一，测量和分析互联网的路由对称性也可以推测互

联网的动态演变规律。

虽然深入分析和研究互联网的路由对称性对加深人们对互联网行为的认识和理解等极有帮助，但由于缺乏定量评估方法，路由对称性没有如同网络性能、流量特征等其它网络基本属性一般得到充分研究。在《IEEE/ACM Transaction on Networking》1997年10月，第5卷，第5期，第601-615页的《End-to-End Routing Behavior in the Internet》一文中，仅是定性地总结路由对称性。这些工作难以区分不同的路由对称类型，无法客观的评价路由对称程度，不同主机对的路由对称性程度也难以比较。

发明内容

本发明要解决的技术问题是，针对现有技术存在的缺陷，提出一种网络路由拓扑对称性的定量评估方法，它可对网络路由拓扑对称性进行定量评估，实现定量比较多个主机对的路由对称程度。

本发明的技术解决方案是，所述网络路由拓扑对称性的定量评估方法，包括以下步骤：

1. 获取主机对 H_A 、 H_B 间的正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} ：

$$R_{A-B} = \{H_A, u_1, u_2, \dots, u_m, H_B\}. \quad \forall u_k \in S, \quad 1 \leq k \leq m$$

$$R_{B-A} = \{H_B, v_1, v_2, \dots, v_n, H_A\}. \quad \forall v_k \in S, \quad 1 \leq k \leq n$$

其中 S 为所有转发实体集合， u_1, u_2, \dots, u_m 和 v_1, v_2, \dots, v_n 分别表示路由序列 R_{A-B} 和路由序列 R_{B-A} 所包含的转发实体元素， m 表示路由序列 R_{A-B} 所包含的转发实体元素个数， n 表示路由序列 R_{B-A} 所包含的转发实体元素个数；

2. 将正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} 所包含的端主机删除，获得新的路由序列 RR_{A-B} 和 RR_{B-A} ：

$$RR_{A-H} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}. \quad \forall u_k \in S, 1 \leq k \leq m$$

$$RR_{H-A} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}. \quad \forall v_k \in S, 1 \leq k \leq n$$

3. 将序列 RR_{H-A} 逆序重排得到去除了端主机的逆序反向路由序列 RR'_{H-A} :

$$RR'_{H-A} = \{v_n, v_{n-1}, \dots, v_1\}. \quad \forall v_k \in S, 1 \leq k \leq n$$

4. 对路由序列 RR_{A-H} 和 RR'_{H-A} 的转发实体元素逐个进行比对操作计算, 得到其最大比对得分作为主机对 H_A 、 H_B 间的正向路由序列 R_{A-H} 和反向路由序列 R_{H-A} 的路由对称度 RS :

$$RS(H_A, H_B) = \max \{Score(RR_{A-H}, RR'_{H-A})\}.$$

5. 计算主机对 H_A 、 H_B 间的正向路由序列 R_{A-H} 和反向路由序列 R_{H-A} 的归一化路由对称度 NRS :

$$NRS = 2 \times RS / (m+n)$$

NRS 取值在 0 到 1 之间, 当主机对正向路由序列和反向路由序列完全对称时 NRS 取 1, 当主机对正向路由序列和反向路由序列完全不对称时 NRS 取 0。

以下对本发明做出进一步说明。

本发明通过规定的编辑操作和比对得分对两网络主机间的正向路由序列和逆序反向路由序列的转发实体元素进行逐个比对, 计算其最大比对得分作为两网络主机间的路由对称度, 在此基础上, 进行归一化处理, 计算两网络主机间的归一化路由对称度, 以实现任意主机对的路由对称程度比较。

因此, 本发明包括正向路由序列和反向路由序列的削减, 路由序列转发实体比对的编辑操作定义, 编辑操作的比对得分规定, 路由对称度的定义以及归一化路由对称度的定义和计算。

1. 对于互联网的任意主机对 H_A 、 H_B , 从主机 H_A 到 H_B 的路由可以表示为一转发实体序列:

$$R_{A-B} = \{H_A, u_1, u_2, \dots, u_m, H_B\}. \quad \forall u_k \in S, 1 \leq k \leq m \quad (1)$$

从主机 H_B 到 H_A 的路由亦可以表示为一转发实体序列:

$$R_{B-A} = \{H_B, v_1, v_2, \dots, v_n, H_A\}. \quad \forall v_k \in S, 1 \leq k \leq n \quad (2)$$

其中 S 为所有转发实体集合。转发实体可以是路由器、AS 等。将从主机 H_A 到 H_B 的路由称为正向路由，而将从主机 H_B 到 H_A 的路由称为反向路由。

主机 H_A 、 H_B 的反向路由逆序重排如下并称之为逆序反向路由:

$$R'_{B-A} = \{H_A, v_n, v_{n-1}, \dots, v_1, H_B\}. \quad \forall v_k \in S, 1 \leq k \leq n \quad (3)$$

任意两主机 H_A 与 H_B 间正向路由 R_{A-B} 与逆序反向路由 R'_{B-A} 的起始位置和结束位置都同为端主机 H_A 与 H_B 。而包含端主机的路由序列人为地夸大了路由序列的相似程度，需将路由序列 R_{A-B} 和 R'_{B-A} 中的端主机 H_A 与 H_B 去掉后进行比对。

去掉端主机后的正向路由如下所示:

$$RR_{A-B} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}. \quad \forall u_k \in S, 1 \leq k \leq m \quad (4)$$

去掉端主机后的反向路由如下所示:

$$RR_{B-A} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}. \quad \forall v_k \in S, 1 \leq k \leq n \quad (5)$$

去掉端主机后的逆序反向路由如下所示:

$$RR'_{B-A} = \{v_n, v_{n-1}, \dots, v_1\}. \quad \forall v_k \in S, 1 \leq k \leq n \quad (6)$$

2. 定量评价主机对 H_A 、 H_B 的路由拓扑对称性程度实际是序列 RR_{A-B} 和 RR'_{B-A} 的相似度定量比较，本发明提出了路由对称度概念来定量评估路由拓扑对称程度。序列的两两比对是对两条序列进行编辑操作，通过元素匹配和替换，或者插入和删除元素，使得两条序列达到相同长度，并使两条序列中相同的元素尽可能地一一对应。主机对 H_A 、 H_B 间的两路由序列 R_{A-B} 和 R'_{B-A} 的相似度可以通过将其中一序列(如 R_{A-B})的各个元素经过若干编辑操作，使其转换为另一序列(如 R'_{B-A})所需的开销来评价。转换开销越小则序列 R_{A-B} 和 R'_{B-A} 越相似。

为此，定义序列转换的编辑操作如下。

1) 匹配操作 $\text{Mat}(a, a)$ ：路由序列 R_{A-B} 和 R'_{B-A} 同一位置的元素相同。

2) 删除操作 $\text{Del}(a, -)$ ：从序列 R_{A-B} 删除元素 a ，或在序列 R'_{B-A} 对应的位置插入空元素。

3) 替换操作 $\text{Rep}(a, b)$ ：以序列 R'_{B-A} 中的元素 b 替换序列 R_{A-B} 中对应位置的元素 a 。

4) 插入操作 $\text{Ins}(-, b)$ ：在序列 R_{A-B} 插入空元素，或删除序列 R'_{B-A} 中对应位置的元素 b 。

3. 为定量评价路由序列 R_{A-B} 和 R'_{B-A} 的相似度，需要定义编辑操作的代价或得分。匹配操作意味着两路由序列在对应位置是相似的，故其得分可取 1；替换操作意味着两路由序列在对应位置不相似，其得分取 0；而删除操作和插入操作在两路由序列对应位置删除元素或插入空元素，意味着两序列不相似程度更大，故惩罚性的取 -1。各编辑操作的得分函数 $p(x, y)$ 定义如下。

1) 匹配操作 $\text{Mat}(a, a)$ ： $p(a, a)=1$ 。

2) 删除操作 $\text{Del}(a, -)$ ： $p(a, -)=-1$ 。

3) 替换操作 $\text{Rep}(a, b)$ ： $p(a, b)=0$ ， $(a \neq b)$ 。

4) 插入操作 $\text{Ins}(-, b)$ ： $p(-, b)=-1$ 。

4. 定义了比对时各编辑操作的得分函数后，路由序列 R_{A-B} 和 R'_{B-A} 的比对得分 Score 等于将 R_{A-B} 两两比对转化为 R'_{B-A} 所用的所有编辑操作的得分总和，即：

$$\text{Score}(R_{A-B}, R'_{B-A}) = \sum_{i=1}^t p_i(x, y) \quad (7)$$

其中， $t = \max(m+2, n+2)$ 。

随选取的编辑操作不同，路由序列 R_{A-B} 和 R'_{B-A} 可以有不同的比对结果，亦即有不同的比对得分。但必定存在一个最大的比对得分，这个最大比对得分反映了路由序列 R_{A-B} 和 R'_{B-A} 的相似程度，也即主机对 H_A 、 H_B 间的正向路由 R_{A-B} 与反向路由 R_{B-A} 的对称程度。

故以路由序列 RR_{A-B} 和 RR'_{B-A} 的最大比对得分衡量主机 H_A 与 H_B 间的正向路由 RR_{A-B} 与反向路由 RR_{B-A} 的对称程度。对于任意主机对 H_A 、 H_B ，其路由对称度 RS 是去除端主机后的正向路由序列 RR_{A-B} 和逆序反向路由序列 RR'_{B-A} 的最大比对得分。亦即：

$$RS(H_A, H_B) = \max \{ \text{Score}(RR_{A-B}, RR'_{B-A}) \}. \quad (8)$$

5. 路由对称度可定量地评估两主机间正向路由序列和反向路由序列的路由拓扑对称程度，但在比较路由长度不同的多个主机对路由对称程度时存在局限，因此，进一步定义归一化路由对称度以定量评估多个主机对的路由对称程度。

归一化路由对称度 NRS 为路由对称度 RS 以正向路由 RR_{A-B} 与反向路由 RR_{B-A} 的长度进行归一化处理的结果。亦即：

$$NRS = 2 \times RS / (m+n) \quad (9)$$

易知对于任意主机对，归一化路由对称度 NRS 取值都在 0 到 1 之间，当主机对正向路由序列和反向路由序列完全对称时 NRS 取 1，当主机对正向路由序列和反向路由序列完全不对称时 NRS 取 0。显然归一化路由对称度 NRS 消除了路由长度对路由对称比较的影响，可以用其定量比较多个主机对的路由对称程度。

由以上可知，本发明为一种网络路由拓扑对称性的定量评估方法，可对网络路由拓扑对称性进行定量评估，实现定量比较多个主机对的路由对称程

度，以充分发现互联网的路由对称性时空特征；它对网络测量、网络建模、网络管理等极具意义，还可用以推测互联网的动态演变规律。

具体实施方式

实施本发明方法时，先以路由探测工具 traceroute 获得网络主机对 H_a 、 H_b 间的正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} 。然后：

1. 设获得的正向路由序列 R_{A-B} 为 $\{H_a, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, H_b\}$ ，获得的反向路由序列 R_{B-A} 为 $\{H_b, R8, R7, R9, R4, R3, R2, R1, H_a\}$ 。其中， $R1, R2, \dots, R9$ 为不同的路由器，正向路由序列 R_{A-B} 含 8 个路由器，反向路由序列 R_{B-A} 含 7 个路由器。

2. 正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} 所包含的端主机删除，获得新的路由序列 RR_{A-B} 为 $\{R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8\}$ 和 RR_{B-A} 为 $\{R8, R7, R9, R4, R3, R2, R1\}$ 。

3. 将序列 RR_{B-A} 逆序重排得到去除了端主机的逆序反向路由序列 RR'_{B-A} 为 $\{R1, R2, R3, R4, R9, R7, R8\}$ 。

4. 对路由序列 RR_{A-B} 和 RR'_{B-A} 的转发实体元素逐个进行比对操作计算，得到其最大比对得分 5 作为主机对 H_a 、 H_b 间的正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} 的路由对称度 RS 。

5. 按式(9)所示，计算主机对 H_a 、 H_b 间的正向路由序列 R_{A-B} 和反向路由序列 R_{B-A} 的归一化路由对称度 $NRS=2 \times 5 / (8+7) \approx 0.667$ 。