

端到端网络路径多样性的测量^{*})

黄松^{1,2} 许勇^{1,2} 张凌^{1,2} 陈宝钢²

(广东省网络重点实验室¹ 华南理工大学² 广州 510641)

摘要 端到端网络的传输可靠性依赖于它的路径多样性。本文提出了一种简单的端到端网络的路径多样性测度,目的是为各种不同的端到端网络拓扑结构提供一种定量的测量方法。端到端网络被当作源点与汇点间的有向无圈图,首先转换成分段形式,然后依次对每段按照链路被使用的概率计算多样性指数,最终将所有多样性指数的平均值作为整体的路径多样性测度。与现有的端到端网络路径多样性测度相比,本文提出的方法在分辨率、合理性、以及适用范围等方面有明显的优势。

关键词 端到端网络,路径多样性,联合熵

The Measurement of Path Diversity of End-to-end Network

HUANG Song^{1,2} XU Yong^{1,2} ZHANG Ling^{1,2} CHEN Bao-Gang²

(Guangdong Key Laboratory of Computer Network¹, South China Univ. of Tech.², Guangzhou 510641)

Abstract The reliability of a end-to-end network depends on its path diversity. A simple path diversity metric for end-to-end network is given to ease the quantitative measurement of varies network topologies. End-to-end network is modeled as a directed acyclic graph, and then transformed into a segmented form. The path diversity index of each segment is computed and the average of all these indexes is treated as the diversity of the overall network. Compared with existing path diversity metrics, our method has obvious advantage in resolution accuracy, rationality, and applicable scope.

Keywords End-to-end network, Path diversity, Joint entropy

1 引言

随着越来越多的应用被迁移到 IP 网络上,保证一致的服务水平变得越来越重要。路径多样性是互联网的重要特征之一,也是提高网络中数据传输性能及可靠性的主要方法。Overlay 和 Multi-homing 等概念和方法就是典型的利用互联网特有的路径多样性来提高传输可靠性的方法^[1~4]。虽然有许多文献提出了各种各样的方案以提高路径多样性,但缺乏一种普遍适用的路径多样性测度,因此难于对所有这些方案作出客观比较。

常用的路径多样性测量方法是对非相交(disjoint)路径进行计数,文[5]通过测量一对结点间的非相交的路径个数来表示路径多样性的大小,由于互联网上两结点之间的路径大多数是部分相交的(partially disjoint),基于完全不相交的路径计数过于严格;另一种方法采用两条路径之间的分离程度作为多样性的指标,但当两条路径的跳数相差很大时,这种测度会有比较大的偏差。因此,需要一种更加适合的测量方式对路径多样性进行定量的描述。

本文提出了一种简单的端到端(end-to-end)路径多样性测度。将端到端网络作为研究对象,是因为它是所有网络的基本构成单元,以端到端网络的路径多样性测度为起点,其结果可以用于研究其它类型的拓扑结构。

2 相关工作

目前研究比较多的路径多样性方法是 Multi-homing 和

Overlay。其中 Multi-homing 是指一个客户网络或 ISP 网络与其它的 ISP 之间通过多于一个的路径相连接^[6],Overlay 则是在网络的应用层上,利用某种协议建立起来的虚拟网络。这两种结构的目的都是在两个结点之间联立多条传输路径,或者是多条路径并行传输,或者是在原始路径拥塞或中断时能够切换到替代路径,以维持业务的正常运行。

文[7]中,针对路径多样性提出了两个测度,将 Multi-homing 提供的路径多样性进行量化,但这些测度在应用于长路径(跳数多的路径)时会出现不希望的偏差。文[8]中,通过对经过给定 Overlay 结点的直达路径和非直达路径中路由器重合的个数进行计数,作为路径多样性的测度。该文献还对 $100 \times (100+1)$ 对的源点和汇点进行了计算,但由于两条不相交路径可能共享一些路由器,如果不考虑链路重合因素,这种测度难以准确描述路径多样性。文[9]提出了一种递归算法来计算多样性测度,多样性被归一化为 0 和 1 之间的数值,单条链路的初始多样性被置为 0.5,网络拓扑的多样性通过单条链路的组合来获得。其不足之处在于随着链路组合复杂程度的增加,分辨率会不断降低;除此之外,当两条多样性测度分别为 d_1 和 d_2 的链路顺序连接时,合成的路径多样性为 $d_{1,2} = d_1 * d_2$,这在某些情况下未必符合事实,因为路径的串接未必一定会令整体路径的多样性降低。文[4]提出了一种 Multi-homing 预知(aware)的流媒体系统(MMS)。该系统采用拓扑方式的路径多样性,将一个会话流分别分配到多个可用的物理链路上,以减少路径重合的可能性,提出用 SSPO (single source path overlay)测量发送端的重合程度以及替代

^{*})研究受到“973”项目(2003CB314805)的资助。黄松 工程师,博士生,主要研究方向为网络与信息安全;许勇 副教授;张凌 教授,博导;陈宝钢 博士生。

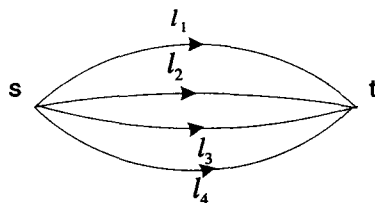
路径的重合程度。SSPO 的值在 0 和 1 之间,其中 0 代表没有任何重合,1 则代表 100% 重合。其不足之处在于整个计算需要依赖路径拓扑的生成树,其结果未必唯一。

此外,现有的多样性测度大多假定所有分支被使用的概率相等,对于概率不相等的情形则很少提及。

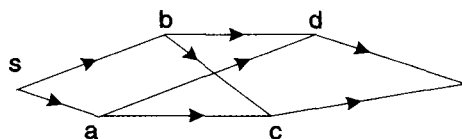
3 路径多样性测度

3.1 多样性

多样性实质上是指某一种或某一类属性所呈现出的广泛范围内的变化和不同。本质上,多样性是一组对象的属性在某种距离空间中的分布,而多样性测度是这种分布的定量表达,因此用基于概率的方法来描述多样性大小是比较适合的。假设一个端到端网络的模型可以用一对结点间的有向无圈图



(a) 拥有多条并行路径的单跳网络



(b) 拥有非相关路径的多跳网络

图 1

在图 1(a)中给出了一个简单的例子,在源点和汇点之间包括 4 条直达的非相关路径 l_1, l_2, l_3, l_4 。假定每次使用其中的一条路径,且四条路径被选中的概率相等,满足如下概率分布:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 0.25 \quad (3)$$

由式(2)得到网络 G_{s-t} 的多样性指数:

$$D(G) = \log_2 4 = 2 \quad (4)$$

对于图 1(b)中的端到端网络,其拓扑结构相对比较复杂,不存在直达路径,每条路径之间都有中间结点,路径存在部分重合与交叉,不能用单一的多样性指数准确表达,因此需要先变换为一种合适的形式,再进行计算。

3.2 分段的有向无圈图

端到端网络有各种拓扑结构,为简化起见,仅考虑能够抽象成有向无圈图的端到端网络,记为 G_{s-t} 。首先将 G_{s-t} 转化成相应的类哈斯图 QHD(Quasi-Hasse Diagram),即借鉴哈斯图的思想,对任意给定的有向无圈图 G_{s-t} 进行规范化,以利于后续的分析。具体方法如下:

1) 在有向无圈图 G_{s-t} 中,找出其入度为 0 的结点集 X_1 ,将它们在第一层水平排放,在 G_{s-t} 中去除与 X_1 及与 X_1 关联的边;

2) 接下来考虑有向无圈图 $G_{s-t} - X_1$,找其中剩余部分中入度为 0 的结点集 X_2 ,将这些结点在第一层之上的第二层水平排开,并在 $G_{s-t} - X_1$ 中去除 X_2 及与 X_2 关联的边;

3) 重复执行类似第 2) 步的操作,直到 G_{s-t} 中所有的点和边都被去除;

4) 最后,针对 G_{s-t} 中每一条弧,在 QHD 中相应地添加一条边,需要注意的是 QHD 的边可能跨越几个层;

由于标准的哈斯图对原有的偏序集作了精简,省略了传递关系中所蕴涵的覆盖关系;而此处,我们保留了原图中所有的边,因此,称为类哈斯图(QHD)。显然,QHD 与原图 G_{s-t} 保持着同构关系,将有向无圈图 G_{s-t} 转换成相应的 QHD 后,

来表示。由单条链路组成的路径,显然不存在任何多样性,因为任何部位的中断肯定导致整条路径的功能失效;对于包含多条并行非相交(disjoint)路径构成的单跳(single-hop)端到端网络,我们可以假定每条路径被选中用于传输数据的概率满足一种概率分布:

$$P_{s-t} = \{P_i | 0 \leq P_i \leq 1, \sum_{i=1}^N p_i = 1\} \quad (1)$$

借鉴信息熵的计算公式,源点与汇点之间路径多样性的大小可以表示成:

$$D(G) = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \quad (2)$$

式(2)中, $D(G)$ 代表有向无圈图 G 的多样性指数, p_i 是第 i 条可用的完全非相关路径被选中的概率。

结点的个数以及结点之间的邻接关系和方向都不发生变化。

3.3 多样性测度的计算

当一个有向无圈图被转换成相应的 QHD 之后,所有的结点都被分配到不同的层次上。分层的数目取决于从源点到汇点路径的最大跳数。接下来,针对每一层分别计算边和结点的多样性指数。

对于一个 QHD 有 N 段的端到端网络,其每一段的链路、每一层的结点被使用的状态(源点与汇点所在层除外)可以视为随机变量,这些随机变量的概率分布,决定了该段的路径多样性大小。图 2 中的 s_1, s_2, s_3 等各处的多样性指数本质上是这些随机变量的分段联合熵(Joint Entropy)。

从 s 到 t 的 N 个状态组成一个随机序列,显然,由于 s_{i+1} 处的概率分布至多只和上一级即 s_i 处的分布相关,因此,该随机序列是一个 Markov 链。

给定二元随机变量的联合熵的定义分别如下:

$$\begin{aligned} H(XY) &= - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M p(x_i y_j) \log_2 p(x_i y_j) \\ &= H(X) + H(Y|X) \end{aligned} \quad (5)$$

如果给定图 2 中各个结点所连接分支的概率分布,则 s_1 至 s_3 各处的多样性指数如下:

$$\begin{aligned} D(s_1) &= H(s_1) \\ D(s_2) &= H(s_2) = H(s_2 s_1) = H(s_1) + H(s_2 | s_1) \\ D(s_3) &= H(s_3) \end{aligned}$$

整个端到端网络的路径多样性程度可以各个随机变量的联合熵表示:

$$|D_{s-t}| = H(s_1 s_2 s_3) = H(s_1) + H(s_2 | s_1) + H(s_3 | s_2) \quad (6)$$

若图 2 中每一个结点的所有出度都有相等的机会被选中,其概率被显式地标注在每条有向边的旁边,假设每条边的带宽足以承受可能的数据流量,则路径的多样性 s_i 计算如下:

$$\begin{aligned} D(s_1) &= H(s_1) = 2 \\ D(s_2) &= H(s_2) = 2.5 \end{aligned}$$

$$D(s_3) = H(s_3) = 1$$

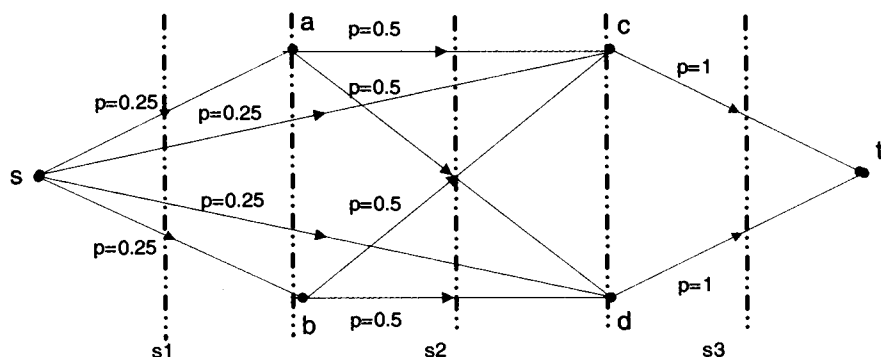


图2 以QHD表示的有向无圈图

从而获得整个端到端网络的路径多样性矢量如下:

$$D_{s-t} = \{s_1, s_2, s_3\} = \{2, 2.5, 1\} \quad (7)$$

$$|D_{s-t}| = H(s_1) + H(s_2 | s_1) + H(s_3 | s_2) = 2.5 \quad (8)$$

显然,有

$$|D_{s-t}| = H(s_1 s_2 s_3) \leq H(s_1) + H(s_2) + H(s_3) \quad (9)$$

只有当 $s_i, i=1, 2, 3$ 相互独立时, (9) 式的等号才成立。

计算端到端网络的路径多样性 G_{s-t} , 依赖于预先获知该网络的拓扑结构信息。尽管物理层的拓扑结构信息一般难于从外部获得, 但越来越多的技术和工具如 traceroute, Rocketfuel 等^[3], 可以用来探测网络的拓扑结构。在文[10]中, Rocketfuel 被用于推测 ISP 网络的精确的拓扑结构图。

3.4 单条链路可任意分段

上述计算过程用到了一个隐含假定, 即: 一条跨越多个层次的链路, 可以视为任意条子链路串接而成; 或者说, 将一条链路分割成若干条子链路的串接, 不改变它的多样性程度 $|G_{s-t}|$ 。增加分段的原因, 是为了方便将跨越多个层次的单链路在按照 QHD 进行分段, 便于计算每段的多样性指数。

3.5 路径多样性测度与网络连通度

网络连通度是另一种常用的体现网络容错能力和鲁棒性的指标, 一般用点连通度 (node connectivity) 与边连通度 (edge connectivity) 来描述。其中, 边连通度是指把图 G 变为非连通图或平凡图至少要删除的边数目, 记作 $\lambda(G)$; 点连通度则是将图 G 变为非连通图或平凡图至少要删除的点数目, 记作 $\kappa(G)$ 。对于端到端的有向无圈图来讲, 两种连通性都是描述了完全中断传输路径的难度。

路径多样性测度与网络连通度都是衡量网络鲁棒性的某种指标, 但两者还是有区别的, 首先, 本文路径多样性 D_{s-t} 主要针对端到端的有向无圈网络 (End-to-end Directed Acyclic Network), 而连通度的范围要更广泛一些, 可以适用于任何有向或无向网络; 其次, 连通度是一个标量, 侧重于对网络整体鲁棒性的描述, 而 D_{s-t} 则是要计算各个多样性指数, 对于多跳路径来说, 除了 $|D_{s-t}|$ 用于描述整体的路径多样性之外, D_{s-t} 还提供了从源点到汇点的路径多样性的变化过程。

3.6 与不相关路径数目的关系

从式(8)可以看出, $|D_{s-t}|$ 的值与整个网络的所有不相关路径 (包括部分重叠的路径) 数目的对数是一致的, 图2中的所有的不相关路径总数为6, 而:

$$|D_{s-t}| = 2.5 < \log_2 6 = 2.58 \quad (10)$$

之所以比6的对数稍小, 是由于所有路径没有达到等概率分布。与其它基于不相关路径数目的多样性测度相比, $|D_{s-t}|$ 考虑了各条链路的使用概率, 因此更精确。

3.7 与其它路径多样性测度的比较

以下就路径多样性测度 $|D_{s-t}|$ 和文[9]中提出的测度进行一些比较, 并列出一个类似文[9]中表1的表格如下:

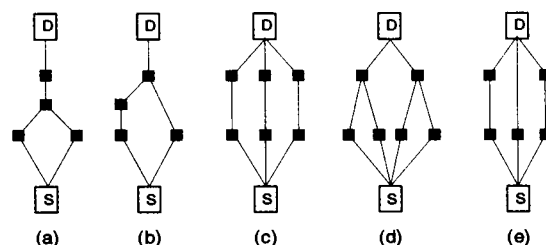


图3 几种路径多样性示例

表1 不同测度下的路径多样性比较

路径多样性测度	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
$ D_{s-t} $	0.429	0.714	1.585	1.6	1.585
$d[9]$	0.19	0.31	0.58	0.61	0.72
$d'[9]$	0.375	0.375	0.875	0.61	0.875

注: (a)~(e)分别对应于图3中的网络拓扑结构。

从图3和表1中的比较可以看出, $|D_{s-t}|$ 与测度 d (d')^[9] 的值虽然不等, 但变化的趋势是一致的。两者之间的不同主要在于:

1) 在取值范围方面, d (d') 的值介于 0~1 之间, $|D_{s-t}|$ 可以取介于 0 到无穷大之间的任何值, 显然, 从表达的精度方面, $|D_{s-t}|$ 能够更加细致地体现不同拓扑结构的多样性差异;

2) 对于由单条链路串接成的路径, d (d') 的值都是从 0.5 开始递减, 而 $|D_{s-t}|$ 始终保持为 0, 显然, $|D_{s-t}|$ 更接近于人们的直观感觉;

3) 对于多图 (multigraph), 相邻结点之间存在多于一条的并行路径, 这种情形下, 测度 d (d') 究竟如何计算, 在文[9]中并没有明确说明; 而对于 $|D_{s-t}|$ 来讲, 多图与简单图在计算步骤上没有区别, $|D_{s-t}|$ 能准确地描述多图与简单图在路径多样性程度方面的差异;

4) 当结点连接的支路被使用的概率不相等时, $|D_{s-t}|$ 能够准确表达出这种概率分布的不同, 而测度 d 或 d' 则不能。

3.8 影响路径多样性的因素

根据 $|D_{s-t}|$ 的计算方法可知, 影响一个端到端网络路径多样性的因素主要有以下几点:

1) 并行路径的绝对数目: 当并行路径的绝对数目增加时, $|D_{s-t}|$ 增大;

(下转第68页)

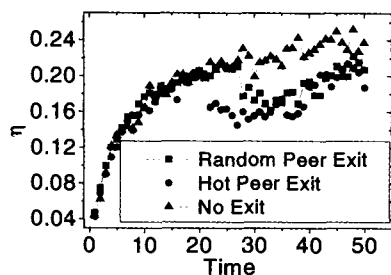


图4 节点退出、加入系统对P2ST的搜索效率的影响

结论 为提高非结构化P2P系统搜索效率,提出了一种基于K叉带权搜索树的P2P搜索模型P2ST。P2ST构建了服务于搜索的K叉带权树,定义和计算综合的查询命中率评估值,并按评估值动态调整节点在树中的位置,命中率大的节点向树的上层移动,且新节点从叶节点加入,因此命中率大且状态稳定的节点处于树的较上层,节点在树中有规律地分布使搜索具有明确的方向性。采用缓存上层节点、建立搜索结果摘要索引和发起节点索引、复制部分过热资源、为叶节点增加远程邻居等方法进一步提高搜索效率。分析和仿真结果表明:提出的搜索模型能大量减少无效流量;与同样采用缓存和索引等策略的OriginP2P和K-WalkerP2P相比具有更高的搜

索效率和更小的时延,且维护搜索树的开销很小。

参考文献

- 1 Matei R, Iamnitchi A, et al. Mapping the Gnutella Network. IEEE Internet Computing, 2002, 6: 50~57
- 2 Leibowitz N, Ripeanu M, et al. Deconstructing the Kazaa network. In: WIAPP 2003, 2003, 112~120
- 3 Xin Liu, et al. A category overlay infrastructure for peer-to-peer content search. In: IEEE IPDPS'05, 2005
- 4 Chen SyuYang, T Wen-Hsien, et al. A Multilayer Topic-Group based P2P Network. IEEE AINA, 2006
- 5 Stephane B, et al. Exploiting local popularity to prune routing indices in peer-to-peer systems. DEXA'05, 2005
- 6 Kumar A, Xu J. Efficient and scalable query routing for unstructured peer-to-peer networks. INFOCOM 2005
- 7 Chen Wen-Tsuen, Chao Chi-Hong, et al. An Interest-based Architecture for Peer-to-Peer Network Systems. IEEE AINA, 2006
- 8 Cohen E, Shenker S. Replication strategies in unstructured peer-to-peer networks. In: Proceedings of ACM SIGCOMM'02, 2002
- 9 Liu Yunhao, Liu Xiaomei, et al. Location-aware topology matching in P2P systems. INFOCOM 2004, 2004, 2220~2230
- 10 Calvert K, Zegura E. GT-ITM: Georgia Tech Internetwork topology models. <http://www.cc.gatech.edu/fac/Ellen.Zegura/graphs.html>
- 11 冯国富, 毛莺池, 等. PeerRank: 一种无结构P2P资源发现策略. 软件学报, 2006(5)

(上接第54页)

2) 并行路径的概率分布平均度: 当并行支路被使用的可能性趋向等概率时, $|D_{s-r}|$ 增大;

3) 路径分段数目: 当并行路径数目保持不变时, 增加不相关的分段数目, 会令 $|D_{s-r}|$ 增大。

结束语 本文讨论了一种端到端网络路径多样性的测度, 目的在于为各种不同的拓扑结构提供定量测量和比较方法。该测度基于链路被使用的概率分布, 采用了类似信息熵的计算方式, 其特点总结如下:

1) 适用于可以抽象为有向无圈图的一类端到端网络, 在给定拓扑结构和链路使用的概率分布的情况下, 测度是唯一的;

2) 计算之前需要预先知道网络的拓扑结构, 并将该拓扑结构转换成相应的QHD表示;

3) 将沿源点到汇点的分段路径视为随机过程, 根据各段链路被使用概率的分布计算每段的多样性指数, 并用所有分段随机变量的联合熵 $|D_{s-r}|$ 作为衡量整个网络多样性的大小。

路径多样性是体现网络容错能力、抗攻击能力的重要指标, 也是抵御未知类型攻击的主要手段之一, 本文提出的路径多样性测度可以用来对各种不同的端到端网络的路径多样性进行比较, 以利于设计出鲁棒性高的网络拓扑结构, 提高抵抗攻击的能力。需要注意的是, 由于一般的端到端网络包含多个层次, 各个层次的拓扑结构会有差别, 因此, 对各个层次的路径多样性需要分别进行计算。

参考文献

- 1 Andersen D, Balakrishnan H, Kaashoek F, Morris R. Resilient overlay networks. ACM Press New York, NY, USA, 2001
- 2 Han J H, Jahanian F. Impact of path diversity on multi-homed and

overlay networks. In: 2004 International Conference on Dependable Systems and Networks, Proceedings. Los Alamitos: IEEE Computer Soc, 2004, 29~38

- 3 Tang C, McKinley P K. Improving multipath reliability in topology-aware overlay networks. In: Distributed Computing Systems Workshops, 2005. 25th IEEE International Conference on, 2005, 82~88
- 4 Habib A, Chuang J. MMS: A multihomed-aware media streaming system. In: S. Chandra and C. Griwodz, eds. Multimedia Computing and Networking 2006, vol. 6071, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (Spie), Bellingham; Spie-Int Society Optical Engineering, 2006, 7106~7106
- 5 Teixeira R, Marzullo K, Savage S, Voelker G M. Characterizing and measuring path diversity of internet topologies. In: Proceedings of the 2003 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems, 2003, 304~305
- 6 Smith P. BGP multihoming techniques. NANOG 23, 2001
- 7 Akella A, Maggs B, Seshan S, Shaikh A, Sitaraman R. A measurement-based analysis of multihoming. In: Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, 2003, 353~364
- 8 Han J, Watson D, Jahanian F. Topology aware overlay networks. In: IEEE Infocom 2005. the Conference on Computer Communications, Vols 1-4, Proceedings, Ieee Infocom Series, K. Makki and E. Knightly, Eds. Los Alamitos: Ieee Computer Soc, 2005, 2554~2565
- 9 de Launois C. Leveraging internet path diversity and network performances with IPv6 multihoming. <http://www.info.ucl.ac.be/people/delaunoi/diversity/>, 2004
- 10 Teixeira R, Marzullo K, Savage S, Voelker G M. In search of path diversity in ISP networks. In: Proceedings of the 2003 ACM SIGCOMM conference on Internet measurement, 2003, 313~318