

AS关系快速推断算法

魏镇韩, 陈 鸣, 赵洪华

(解放军理工大学指挥自动化学院 南京 210007)

【摘要】准确的AS商业关系有助于深入研究因特网的结构及其网络行为,通常只能利用推断来获取AS关系。该文概述了几种AS关系推断算法,分析了各种方法的优缺点。定义了一种基于选路行为表征AS节点传输能力的新测度。该测度比节点度更适于描述AS节点在传输能力上的等级。基于该测度提出了一种快速推断算法,该算法通过比较节点的等级来推断AS关系。试验结果显示该算法与Dimitropolous算法在推断结果上具有良好的 consistency,能够快速有效地推断基本AS关系。

关键词 自治系统; 边界网关协议; 计算机网络; 拓扑

中图分类号 TP393.06

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.024

AS Relationships Quick Inference Algorithm

WEI Zhen-han, CHEN Ming, and ZHAO Hong-hua

(Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology Nanjing 210007)

Abstract Accurate knowledge of the autonomous system (AS) commercial relationships will contribute to research Internet structure and network behaviors intensively. Usually the AS relationships are obtained only by inference. Several algorithms on AS relationships inference are summarized and their advantages and disadvantages are discussed. A new metric is defined, which represents the transmission capability of an AS node based on its routing behaviors. The metric is more suitable to describe the level of AS nodes on transmission capability than the node degree. Based on the metric, a quick inference algorithm is presented which infers AS relationships by comparing the level of nodes. The experiment results show this algorithm has good consistency with Dimitropolous's algorithm on the inference results, and the basic AS relationships can be inferred quickly and efficiently by this algorithm.

Key words autonomous system; border gateway protocol; computer networks; topology

因特网由数以万计的自治系统(autonomous system, AS)以一种松散连接的方式构成。在这些AS之间需要使用边界网关协议BGP交换可达性路由信息。BGP允许ISP使用各自的选路策略,策略通常由AS间商业关系及AS所采用的流量工程机制所决定。准确掌握AS之间的关系有助于理解因特网的选路行为以及深入分析网络服务的体系架构^[1]。

AS关系一般归为提供者-客户关系(provider-to-customer, p2c)、客户-提供者关系(customer-to-provider, c2p)、对等关系(peer-to-peer, p2p)和同胞关系(sibling-to-sibling, s2s)4类。在p2c关系或c2p关系中,一个客户AS需要向提供者AS支付它们之间的任意流量;在p2p关系中,两个AS互相免费交换它们之间的流量,包括它们客户间的流量,但是不交换那些流经其提供者或对等AS的流量;在s2s关系中,因为同属一个组织,因此两个AS交换它们之间

的任意流量。AS的关系由ISP之间的商业协议决定,一般不对外公布,需要通过技术手段来推断。然而,因特网与生俱来的异构性、自组织性和非集中性,都对AS关系的推断带来了技术挑战。

1 相关工作

文献[2]最早描述了AS关系的推断问题。在AS级拓扑图中,如果将每条边标记出AS商业关系的类型,则一条有效的AS路径必须遵循valley-free特性,即一个p2c边之后只能是p2c(或s2s)边;一个p2p边之后只能是p2c(或s2s)边。在此基础上,文献[2]提出了一种线性时间的AS关系推断算法LG,该算法基于以下假设:提供者的节点度要大于客户的节点度,算法通过遍历所有AS路径,基于度值大小对每条链路进行投票以确定AS关系。

文献[3]利用数学公式将AS关系推断转化为一

个组合优化问题: 给定一个源自AS路径集合 P 的无向图 G , 为每条边分配合适的边类型(p2c或p2p)以使得集合 P 中的有效路径最大化, 称之为最大化关系类型(MaxToR)问题, 推测MaxToR是NP-完全问题, 并给出了一个解决算法。该算法采用迭代剪除叶节点的方法为图中每个AS节点赋予一个等级标记, 然后根据等级标记而不是节点度推断AS关系。

文献[4]和[5]各自独立证明了MaxToR问题确实是NP-完全的, 且都观察到MaxToR问题不能有效推断p2p关系, 并提出了各自的MaxToR问题的解决算法BPP和EHS, 推断结果在减少无效路径方面优于SARK算法。但文献[5]证明了BPP算法推断结果在真实性方面劣于SARK算法。文献[6]将MaxToR问题转换为一个可满足性问题, 并利用随机游走方法计算AS关系。

文献[7]指出了MaxToR问题的限制, 即单目标优化问题只关心最大化有效路径的比例, 因此无法提供一个确定性的解答, 因为某些链路能以不同方式归类, 但却产生同样数量的有效路径, 可能会将异常路径作为有效路径, 产生不正确的结论。文献[7]指出, 通过分析AS路径的方法推断s2s关系是非常困难的, 解决方案是首先检索因特网路由注册机构(internet route registrie, IRR)数据库中的注册信息排除s2s关系的边, 然后将AS关系推断问题转换为多目标优化问题, 既考虑有效路径数量的最大化, 又考虑相邻AS节点之间的度值差异, 采用节点度对边进行初步定向, 然后通过解决最大化二元可满足性问题(Max2SAT)推断AS关系。这种基于AS节点度的多目标优化方法的推断结果更符合实际。

文献[8]提出了一种计算AS节点等级的模型IDAVM(inter-domain access volume model), 该模型定义了拓扑中边的访问量(access volume), 并构造出基于访问量的矩阵, 通过计算矩阵的特征向量表示各个AS的节点等级, 并根据等级值推断AS关系。该方法给出了分析AS关系的另一种解决思路, 优点是通过对矩阵运算获取AS的等级值, 避免了启发式算法的模糊性, 缺点是计算全球拓扑矩阵的特征向量计算量较大。

上述方法中LG算法实现较为简单, 但是准确性不如后来的方法, 而其后的算法相对复杂。虽然MaxToR算法和IDAVM提供了较严格的推断手段, 但是计算量较大, 限制了其使用。因此需要一种既简洁又有效的推断方法。

2 AS关系的快速推断

2.1 衡量节点“大小”

通过衡量AS节点的“大小”等级, 可以确定节点之间的相互关系。在实际网络中, AS节点的等级体现在传输能力的高低上。在某些AS关系推断算法中, 通常利用节点度快速衡量节点的等级。节点度表示了节点的邻居数量, 其局限是仅从图论的角度描述了节点在图中的等级, 不能有效体现节点实际的传输能力。对于实际网络系统而言, 节点的传输能力通过具体的选路行为刻画更为合适。因此需要寻找新的测度。

设 v_x 和 v_y 是节点 v_i 的邻居, 若 (v_x, v_i, v_y) 是一条AS路径 $p=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 当中的一段子路径, 则称节点 v_i 为其邻居 v_x 和 v_y 提供了实际的传输服务。需要注意的是, 由于 v_i 具有自治的域间选路策略, 因此并非 v_i 的所有邻居之间都能经由 v_i 可达。将 $\{v_x, v_y\}$ 定义为 v_i 的一个转接集合, 由此定义一个表征传输能力的新测度链路转接量LCQ(link connecting quantity), 节点 v_i 的LCQ定义为 v_i 的所有不同转接集合的数量。

LCQ表示了节点为其邻居之间提供实际传输服务的转接数量, 与节点度相比更好地体现了实际网络中节点的传输能力, 并且易于计算。

图1显示了全球因特网AS拓扑中节点度和LCQ在对数坐标下的CCDF(补累积分布函数)曲线图。图中横坐标表示节点的度值或LCQ值。拓扑源于RouteViews^[9]路由表数据, 日期为2007-04-01; 因stub节点的LCQ值为0, 故特指定为0.001, 以在对数坐标系中显示。

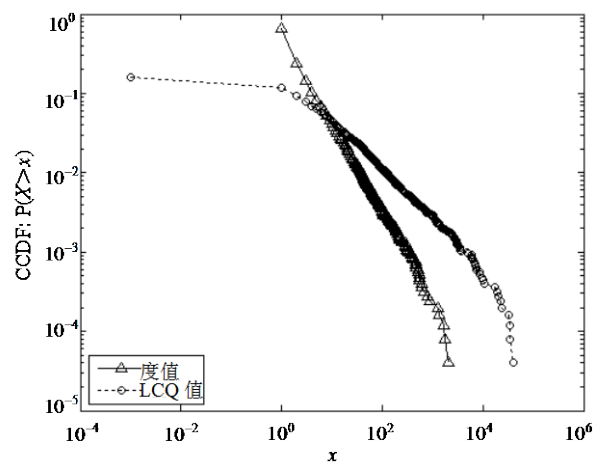


图1 节点度和LCQ值的CCDF图

从图1中可以看出, 两种分布都存在高方差, 相对于度分布, LCQ分布的优势在于范围跨度较大(其取值范围为 $0 \sim 10^4$, 而度值取值范围为 $1 \sim 10^3$), 曲

线衰减较慢,这说明LCQ能体现出节点之间更为明显的区别,更适合于表征AS在网络中的“大小”,因此采用LCQ比采用节点度可以更准确地判断节点之间的商业关系。

2.2 AS关系推断算法

推断算法的基本思想是:具有较高LCQ值的AS节点为提供者,具有较低LCQ值的AS节点为客户,若两个节点的LCQ值差异不大,则为对等关系。由于s2s关系所占比例很小且难于利用AS路径信息判断^[6],因此该算法忽略此关系的判断,相关推断可采用文献[7]的方法,即通过检索IRR数据库中注册信息确认s2s关系。

基本推断过程是:为每条链路设置3种关系类型(p2c、p2p和c2p)计数器,遍历每条AS路径,根据推断规则判断路径中每条链路的类型,并将其相应类型计数器累计加1。遍历完成后,通过确认规则最终判断每条链路的关系类型。

遍历一条AS路径 p 时,首先定位具有最大LCQ值的节点 v_{\max} ,然后计算节点 v_{\max} 和相邻节点 v_i 的差异函数 $d(v_{\max}, v_i)$ 。该函数反映两个节点在传输能力上的差异,根据函数值是否超过某一阈值 C_1 判断相关边的类型(p2c、p2p或c2p):若两个节点的LCQ值差异度较大,则两者为p2c或c2p关系;若两个节点的LCQ值差异度不大,则两者为p2p关系。继而根据valley-free特性做如下推断:路径 p 中若存在位于 v_{\max} 左侧的链路(除去与之直接相连的链路),则都推断为c2p类型,若存在位于 v_{\max} 右侧的链路(除去与之直接相连的链路),则都推断为p2c类型。差异函数定义为:

$$d(v_{\max}, v_i) = \alpha \frac{\text{lcq}(v_{\max})}{\text{lcq}(v_i)} \ln \text{lcq}(v_{\max}) \ln \text{lcq}(v_i)$$

式中 α 是常数因子,取值为0.01;lcq表示节点LCQ值的计算函数,lcq(v)表示节点 v 的LCQ值。在相同倍数条件下,具有较高LCQ值的相邻节点之间的差异度大于那些LCQ值较小的相邻节点之间的差异度,因此在上式中,将相邻节点LCQ值的自然对数的乘积作为权重系数。

推断算法如图2所示。算法输入是AS路径集合 P ,算法输出是拓扑中所有链路的关系集合 R 。算法分为推断(infer)阶段,确认(confirm)阶段2个部分。

第1阶段,首先从集合 P 中提取链路集合,并建立一个LCQ散列表用于检索任意节点的LCQ值。遍历每条AS路径($v_1 v_2 \dots v_n$),寻找路径中LCQ值最大的节点 v_i 作为顶层AS节点(即一条路径中的最高提供

者),通过差异函数判断该节点与其相邻节点之间的关系。除了两条与顶层AS节点直接相连的链路外,路径中位于 v_i 左侧的一系列链路都为c2p关系,而位于 v_i 右侧的一系列链路都为p2c关系。对于某条已判断关系的链路 $\langle v_i v_j \rangle$,其相应的关系计数器(c2p_ct、p2p_ct或p2c_ct)累计加1。显然,如果链路集合中存在 $\langle v_i v_j \rangle$ 的逆链路 $\langle v_j v_i \rangle$,则需要通过synchronize函数同步处理其关系计数器,即若 $\langle v_i v_j \rangle$ 判断为p2c关系,其关系计数器p2c_ct加1,而其逆链路 $\langle v_j v_i \rangle$ 的关系计数器c2p_ct也必须同步地加1。

第2阶段,对于每条链路,考察相关3个关系计数器的值,具有最大值的计数器指示了最终的推断关系。p2c关系的判别准确性往往高于p2p关系,也即p2c关系较之p2p关系更易于准确地判别^[9],可以认为p2c计数器的数值较之p2p关系计数器的数值更具有判别意义,因此需要将p2p关系计数器的值乘以一个权重系数 $1/C_2$ (其中 $C_2 > 1$)。

设AS路径集合中共有 N 条连续链路。两个阶段的算法时间复杂性皆为 $O(N)$,因此算法可以在线性时间内完成推断。

```

AS推断算法
输入: AS路径集合P
输出: 相邻节点之间的关系集合R
Phase 1: Infer
1 initialize link set and LCQ hash table(lcq_ht)from P;
2 for each  $p=(v_1 v_2 \dots v_n)$  in P{
3 find the  $i$  such that  $lcq(v_i)=\max\{lcq(v_j), 1 \leq j \leq n\}$ 
4 if  $lcq(v_{i-1})=0$  or  $d(v_i, v_{i-1}) > C_1$ 
5  $\langle v_{i-1} \rangle.c2p\_ct++;$ 
6 else  $\langle v_{i-1} v_i \rangle.p2p\_ct++;$ 
7 synchronize( $\langle v_i v_{i-1} \rangle$ );
8 for  $k=0$  to  $i-2$  do
9  $\langle v_i v_{i+1} \rangle.c2p\_ct++;$ 
10 if  $lcq(v_{i+1})=0$  or  $d(v_i, v_{i+1}) > C_1$ 
11  $\langle v_i v_{i+1} \rangle.p2c\_ct++;$ 
12 else  $\langle v_i v_{i+1} \rangle.p2p\_ct++;$ 
13 synchronize( $\langle v_{i+1} v_i \rangle$ );
14 for  $k=i+1$  to  $n$  do
15  $\langle v_k v_{k+1} \rangle.p2c\_ct++;$  }
Phase 2: Confirm
1 for each link= $\langle v_i v_{i+1} \rangle$  in link set {
2  $c2p\_ct=\text{link}.c2p\_ct;$ 
3  $p2p\_ct=\text{link}.p2p\_ct/C_2;$ 
4  $p2c\_ct=\text{link}.p2c\_ct;$ 
5 if p2c_ct has the max value
6 link is p2c;
7 else if p2p_ct has the max value
8 link is p2p
9 else if c2p_ct has the max value
10 link is c2p;

```

图2 AS关系推断算法

3 试验分析

为验证上述算法的有效性,基于RouteViews^[9]提供的BGP路由表数据进行推断。数据集取自2007-04-01当天66个AS中的121个BGP路由器的路

由表,共包括1 950 340条不同的AS路径。算法包含两个参数, C_1 是影响推断结果的全局性参数,而 C_2 只影响少数链路的类型判断,是局部性的参数。下列实验中, C_2 皆取40。

令 L 表示本文算法推断的链路集合, $L(p2c)$ 表示判断为p2c或c2p类型的链路集合(下面用p2c统一指代p2c和c2p关系), $L(p2p)$ 表示判断为p2p类型的链路集合。显然, $L=L(p2c)\cup L(p2p)$ 。

不同 C_1 值下本文算法所推断的p2c链路在整个推断链路中的比例曲线如图3所示。其中 x 轴表示 C_1 值,取值区间为[8,96],取值间隔为8; y 轴表示推断的p2c链路在整个 L 中的比例,即 $|L(p2c)|/|L|$ 。显然, $L(p2c)$ 的比例随 C_1 值的增加而递减。该曲线也暗示, $L(p2p)$ 的比例随 C_1 值的增加而增加。

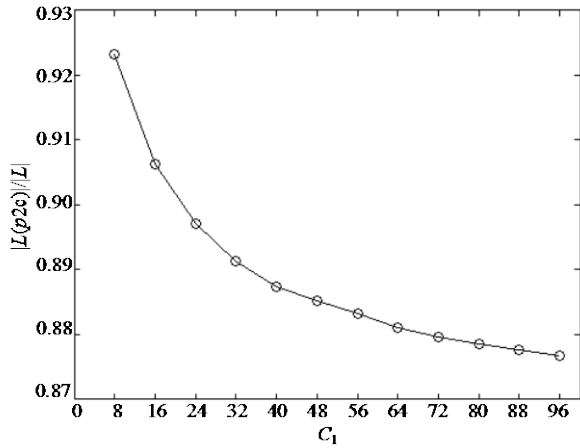


图3 p2c链路在整个推断集中的比例

如何验证推断结果的准确性是一个难题,多数文献的方法是利用已推断的关系集合计算AS路径集合中有效路径的比例^[2,4-6],比例较大暗示推断的准确性也较高。在不同 C_1 值下根据算法结论所计算的有效路径比例曲线如图4所示。可看出,有效路径的比例随 C_1 值的增加而递减,当 C_1 取值小于8时,有效路径比例达到99%以上。

然而,这种验证方法未必能得到正确结论^[7]。另一种方法是向有关ISP进行问卷调查,以验证推断结果的准确性,该方法可信度较高但难于操作。Dimitropoulos通过这种方法有效地证实了推断平均准确率达到94.2%^[7],其中p2c(c2p)链路的推断准确率为96.5%, p2p链路的推断准确率为82.8%。

可通过对比两种算法的推断结果以间接评估本文算法的有效性。Dimitropoulos推断数据集由CAIDA^[10]组织提供,日期取自2007-04-02。该推断数据集是由Dimitropoulos算法通过计算在4月2日之前天数的抽样Routeview数据中所获取的,但具体的

抽样日期及抽样数据无法确定。尽管Dimitropoulos算法处理的Routeview数据集与本文算法处理的数据集略有不同,但试验结论表明两者处理的AS路径数据本身是基本一致的,总体上不影响比较。

评估的总体思想是比较两种算法获取结论中一致性结论的比例。令 D 表示Dimitropoulos算法推断的链路集合, $D(p2c)$ 表示判断为p2c或c2p类型的链路集合, $D(p2p)$ 表示判断为p2p类型的链路集合, $D(s2s)$ 表示判断为s2s类型的链路集合。显然, $D=D(p2c)\cup D(p2p)\cup D(s2s)$ 。

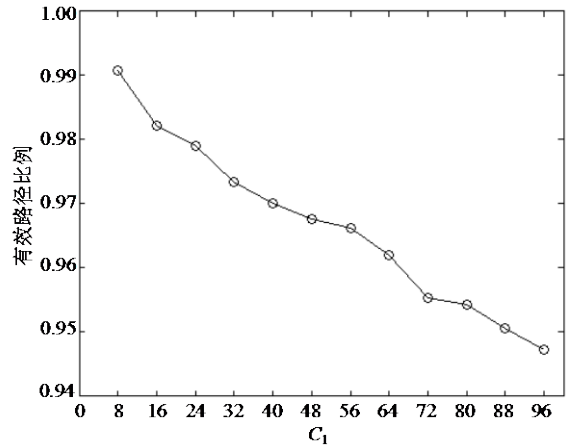


图4 根据推断结果计算的有效路径比例曲线图

令 B 表示两种算法各自推断链路集合的交集,它代表了两种算法各自所处理的原始Routeview数据集的交集,即 $B=L\cap D$, $|B|=51,692$,是本文进行一致性评估的基础。令 $B(p2c)$ 表示两种算法判断一致的p2c或c2p链路集合,即 $B(p2c)=L(p2c)\cap D(p2c)$; $B(p2p)$ 表示两种算法判断一致的p2p链路集合,即 $B(p2p)=L(p2p)\cap D(p2p)$ 。

通过以下两种方式比较两种推断结果。

(1) 对于不同的 C_1 值,对比两种算法推断一致的链路数量,即 $|B(p2c)|$ 和 $|B(p2p)|$,其链路数量变化曲线如图5所示。

图5中, x 轴表示 C_1 值,图5a和图5b中的 y 轴分别表示 $|B(p2c)|$ 和 $|B(p2p)|$ 。可看出,随着 C_1 值的增加, $|B(p2c)|$ 有小幅下降,当 $C_1=96$ 时, $|B(p2c)|$ 较 $C_1=8$ 时下降了1%;而 $|B(p2p)|$ 则相对明显上升,当 $C_1=96$ 时, $|B(p2p)|$ 较 $C_1=8$ 时上升了69%。该图说明,随着 C_1 值的增加, p2p链路的一致性显著增加,而p2c链路的一致性略有下降。

(2) 对于不同的 C_1 值,对比两种算法中推断一致的p2c链路在各自推断的p2c链路中的比例,即 $|B(p2c)|/|L(p2c)|$ 和 $|B(p2c)|/|D(p2c)|$;对比两种算法中推断一致的p2p链路在各自推断的p2p链路中的比

例, 即 $|B(p2p)|/|L(p2p)|$ 和 $|B(p2p)|/|D(p2p)|$, 其链路数量变化曲线如图6所示。

图6中, x轴表示 C_1 值, y轴表示所占比例。图6a显示了 $|B(p2c)|/|L(p2c)|$ 和 $|B(p2c)|/|D(p2c)|$ 比例曲线; 图6b显示了 $|B(p2p)|/|L(p2p)|$ 和 $|B(p2p)|/|D(p2p)|$ 比例曲线。

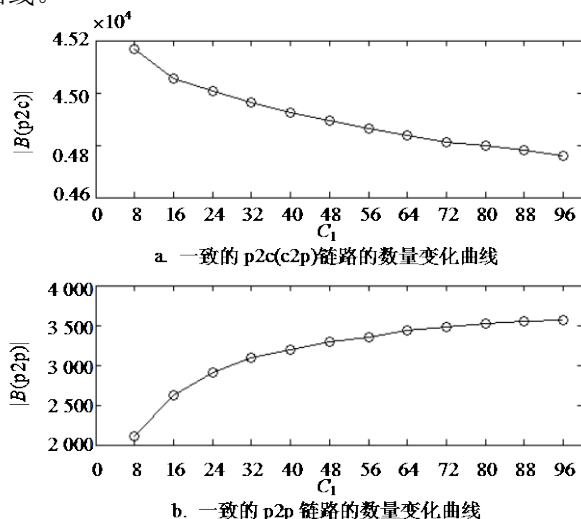


图5 一致链路的数量变化曲线图

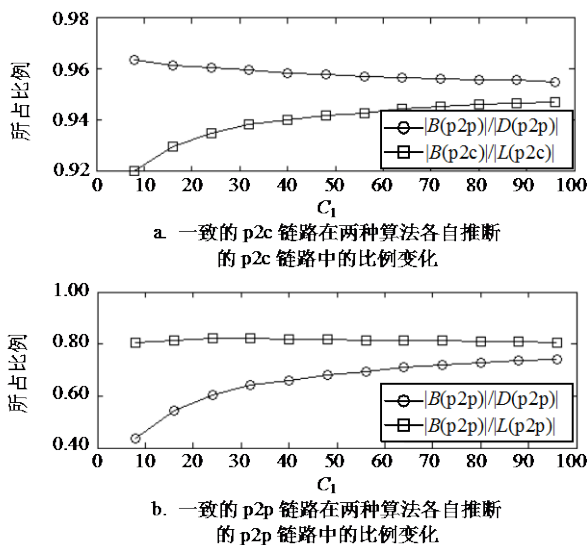


图6 一致链路在各自推断链路中所占比例的变化曲线图

对于Dimitropoulos算法, 随着 C_1 值的增加, $|B(p2c)|/|D(p2c)|$ 曲线相对稳定, 起伏低于1个百分点, 而 $|B(p2p)|/|D(p2p)|$ 曲线则显著上升近30个百分点。对于本文算法, 虽然 C_1 值增加, $|B(p2c)|/|L(p2c)|$ 和 $|B(p2p)|/|L(p2p)|$ 曲线都较为稳定, 起伏皆低于3个百分点。

图6说明, 随着 C_1 值的增加, 两种算法推断结果的一致性总体上得到加强并趋于稳定。当 $C_1=96$ 时, $|B(p2p)|/|D(p2p)|=73.9%$, $|B(p2p)|/|L(p2p)|=80.6%$;

$|B(p2c)|/|D(p2c)|=94.7%$, $|B(p2c)|/|L(p2c)|=95.5%$ 。说明两种算法p2c链路的判断一致性很高, 约为95%, 而p2p链路的判断一致性约为74%~80%。

综上所述可知: 随着 C_1 值的增加, 两种算法的推断结果具有良好的一致性。Dimitropoulos算法采用了大量问卷调查这一有效验证方式, 其结果较为准确可信, 代表了该问题的最新研究成果。通过与之比较, 可认为本文算法亦具有一定的准确性。

与以往算法相比, 本文算法具有两个优点:

(1) 计算快捷, 诸如Dimitropoulos或Wang等算法虽然也能获取较准确的结果, 然而计算复杂, 例如Dimitropoulos中的算法需要解决NP-完全问题, Wang算法需要进行大矩阵运算, 本文算法在线性时间内即可获取结果; (2) 结果准确, 诸如LG等算法虽然也能在线性时间内获得结果, 然而结论准确性不如Dimitropoulos算法, 本文算法能获取与Dimitropoulos算法较为一致的结论。以往推断算法都无法同时保证准确和快速这两个优点。

4 结论

准确掌握AS之间的商业关系在全球因特网结构、性能和健壮性等研究方面起着关键性作用。本文考察了推断AS关系的技术方法, 分析了现有技术并指出它们的限制和不足, 提出了一种表征节点传输能力的新测度——链路转接量LCQ, 与节点度相比, 它更能体现实际网络行为对于节点等级的影响, 且计算简单。在此基础上, 本文提出了一种线性时间的AS关系推断算法, 试验验证了该算法具备一定的准确性。

参考文献

- [1] 叶娅兰, 曾家智, 杨国纬. 基于角色和服务元的网络体系结构[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(1): 113-116.
YE Ya-lan, ZENG Jia-zhi, YANG Guo-wei. Role based and service unit based network architecture[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005, 34(1): 113-116.
- [2] GAO L X. On inferring autonomous system relationships in the Internet[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(6): 733-745.
- [3] SUBRAMANIAN, L, AGARWAL S, REXFORD J, et al. Characterizing the internet hierarchy from multiple vantage points[C]//Proc of IEEE INFOCOM 2002. New York, Hilton: IEEE Press, 2002, 2: 618-627.

(下转第292页)