

AS的地理分布对Internet网络稳定性的影响

孟亚坤¹ 孙景昶²

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)¹ (四川大学计算机科学学院 成都 610225)²

摘要 探索了AS(自治域)的地理分布以及路由器的建连距离对Internet稳定性的影响。与仅关注AS网络现状和发展趋势的传统研究角度不同,侧重研究了受到经济宏观调控或者技术突破等因素影响后AS网络的性能变化,从而为制定宏观调控措施和把握网络技术导向提供了理论依据。提出了一种AS地理超图结构,弥补了传统模型中未能正确刻画AS地理分布的缺陷,并建立了地理超图和AS网络的双层网络模型。实验结果表明:AS网络的稳定性随着路由器间建连距离的增大而表现出上升趋势,然而,若AS在地理上随机分布,则路由器建连距离对网络稳定性无明显影响。

关键词 复杂网络,AS地理分布,超图,网络稳定性,坚韧度

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.008

Effect of AS's Geographic Locations on Internet's Stability

MENG Ya-kun¹ SUN Jing-chang²

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)¹

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610225, China)²

Abstract This paper analyzed how the AS's geographic locations and transmission distances affect on Internet's stability. In contrast to the traditional studies focusing on the future AS network which is based on nowadays, this paper emphasized particularly on the change of AS network's performance under the effect of the economic adjusting or the technology innovation to make adjusting measures and to lead the technological trend. A double-deck network model of geographic hypergraph and AS network was presented to simulate the geographic locations, which is not reflected in traditional models. The simulate results of our model show that Internet's stability ascends with the increase of transmission distances. However, if AS's geographic locations are random, the transmission distances has no obvious effects on Internet's stability.

Keywords Complex network, AS's geographic location, Hypergraph, Network stability, Toughness

1 引言

Internet的AS层网络是具有无尺度和高聚类等拓扑特性的网络^[1-4]。研究表明,这些拓扑特性对拥塞性和稳定性等关键的网络性能有很大影响^[5,6]。因此,大量学者都围绕着AS网络拓扑特性的产生原因和演化规律等展开研究。由于Internet网络是一个处于开放环境中的、自组织的网络系统,因此,这些研究通过测量和统计历史数据来研究AS网络在环境因素作用下的自组织演化行为,分析哪些行为导致了拓扑特性的产生,进而抽象出AS网络的演化模型,最终预测Internet网络性能的变化。可见,环境因素是决定网络拓扑并最终影响网络性能的根本要素。以往的研究从影响因素的角度考虑,可以归纳为两大类:

(1)基于经济因素的研究:1999年,Faloutsos三兄弟发现了AS网络的无尺度现象,Barabasi和Albert将其归结为经济因素“马太”效应的结果,此后又有大量学者基于经济因素提出了众多基于连接度的网络模型^[7-15]。

(2)基于地理因素的研究:众所周知,AS网络的聚类结

构主要是受地理因素的影响^[16],但是基于地理因素的研究相对较少^[16-21],并且我们发现这些研究在模型抽象方面忽略了AS的地理分布,导致了地理因素对网络性能的影响无法正确体现。

因此,本文将致力于建立一个能正确反映AS地理分布的网络模型,探索地理因素对网络性能的影响。除此之外,本文还将进行一个更重要的尝试:从新的研究角度,提出新的问题。

以往的研究主要关注在当今经济和技术环境下AS网络拓扑的现状和发展趋势。但是,这些研究却不能回答这样的问题:

1. 一旦经济上的宏观调控改变了AS的地理分布,AS网络拓扑和性能将受到何种影响?

2. 如果链路铺设、维护技术的突破使得路由器间建连的长度增加、费用减少,这会导致网络拓扑和性能发生何种变化?

与以往的研究角度不同,以上问题均是在Internet网络所处的环境因素发生较大变化的假设下,对网络拓扑和性能

的探索。研究此类问题可以为制定宏观调控措施和把握网络技术导向提供理论依据。

本文正是基于这种研究目的,针对当前在地理因素方面研究的不足,提出一个能够反映 AS 地理分布和路由器建连距离的 AS 网络模型,探索地理因素对网络稳定性的影响,尝试回答以上两个问题。

本文首先介绍 AS 网络需要考虑到的地理因素,指出以往模型的缺陷;然后,给出合理刻画地理因素的 AS 地理超图结构,并提出 AS 的地理超图和服务供求关系网络相互作用机制,建立 AS 网络和地理超图双层网络模型;最后,调节模型中的参数模拟经济和技术环境改变给地理因素带来的影响,通过实验得到 AS 网络拓扑特性随地理因素改变而发生的变化,并尝试给出地理因素对网络稳定性的影响。

2 AS 网络的地理因素

AS 间建连的地理距离和 AS 的地理分布是 AS 网络的主要地理因素。我们研究发现这两个地理因素都会影响网络性能,然而,以往研究都忽略了 AS 的地理分布,将 AS 假设为一种原子结构,仅考虑 AS 之间建立连接的地理距离阈值,将每个 AS 的作用范围局限到一个很小的固定区域,AS 之间的连接分为区域内连接和跨区域连接^[16,19],如图 1(a)所示。

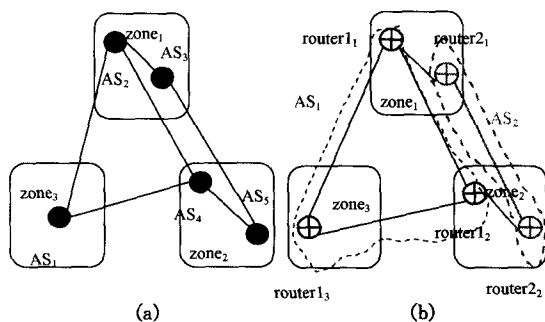


图1 传统模型刻画的 AS 地理分布与实际的差异

实际上,AS 是由路由器构成的,构成 AS 的路由器包括边界路由器和内部路由器两种,AS 之间需要通过各自的边界路由器进行连接。此外,一个 AS 的边界路由器可能分布在不同的地理区域,而不是局限在一个固定的区域^[18,22],而且只有当同一区域内具有两个 AS 各自的边界路由器时,这两个 AS 才可能建立连边^[17,18,23],如图 1(b)所示。

因此,AS 的地理分布实际上是边界路由器分布于不同地理区域的反映,下面将详细阐述路由器建立连接的地理距离阈值、AS 的边界路由器和内部路由器三者之间的联系,探讨地理因素对 AS 网络的影响。

2.1 路由器建立连接的地理距离阈值

以往的研究在考虑地理因素对网络拓扑演化的影响时,都是以地理距离作为典型的代表^[16-19,21]。研究表明,Internet 网络中存在一个阈值,75% 以上的路由器间建立连接的距离都在该阈值范围之内^[17,18]。我们假设所有路由器间建立连接的距离均不会超过该阈值。由于 AS 之间需要通过边界路由器连接,因此,AS 的边界路由器可以直接连接的 AS 个数与阈值成正比,如图 2 所示,阈值 $R_1 < R_2$,则 $routeNum(S_1) < routeNum(S_1 \cup S_2)$,其中 $routeNum(S)$ 表示区域 S 内的路由器的个数。

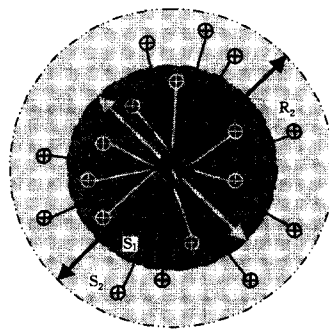


图2 路由器可连接的 AS 个数与地理距离阈值成正比

2.2 边界路由器

在一个 AS 中,直接和其他 AS 的路由器相连接的路由器被称为边界路由器。由于路由器间建连距离的阈值限制,不同 AS 间若要建立连接,必须在同一地理区域内分布有各自的边界路由器。因此,边界路由器的地理分布决定了 AS 建立连接的地理范围。

2.3 内部路由器

在一个 AS 中,不与其他 AS 直接相连的路由器被称为内部路由器。内部路由器的作用是将一个 AS 的所有边界路由器连接起来,由于路由器间建连距离的阈值限制,边界路由器相距越远,则需要越多的内部路由器将其连接起来,相应的链路连接和维护花费的代价也越大。另外,AS 希望用尽量少的边界路由器向尽量多区域的其他 AS 提供服务。因此,一个 AS 相邻的边界路由器间的距离越大,单个边界路由器可以提供服务的区域就越广,如图 3 所示。

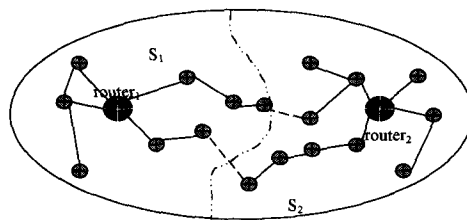


图3 某固定区域内的边界路由器互连示意图

$router_1$ 和 $router_2$ 都是 AS_0 的边界路由器,可以将椭圆区域内所有和 $router_1$ 或 $router_2$ 连接的边界路由器分为两部分:(1)和 $router_1$ 合作关系更密切的划归为区域 S_1 ;(2)和 $router_2$ 合作关系更密切的划归为区域 S_2 。若仅在椭圆区域设置 $router_1$,则原来和 $router_2$ 相连的边界路由器如果仍希望和 AS_0 建立服务供求关系,只能通过 $router_1$ 和 AS_0 相连,此时可以看成是 $router_1$ 覆盖了整个椭圆区域。可见,在一个固定的区域,一个 AS 设置的边界路由器的个数与单个边界路由器覆盖的区域范围成反比。

综上,AS 需要在相邻边界路由器间的地理距离和覆盖的区域范围间做出权衡。下面的分析中将引入 AS 边界路由器的区域扩张模式来刻画这种权衡。

3 地理超图结构

根据第 2 节的描述,可以认为一个 AS 的服务区域是其所有边界路由器建连区域的集合,则 AS 网络中所有 AS 的服务区域集合是边界路由器建连区域的集簇。在运筹学和优化等领域中,通常用超图理论来研究与集簇相关的组合优化问题。因此本文提出地理超图结构来刻画 AS 网络的地理分布。

3.1 定义

将全世界有限的地理面积划分为 N 个区域 $ZONE = \{zone_1, zone_2, \dots, zone_n\}$, 令实际地理位置上相邻的地理区域编号相邻。

定义 Internet AS 层网络的地理超图 $G = (AS_1, AS_2, \dots, AS_m)$ 为 $ZONE$ 上的一个有限子集簇, 使得

$$(1) AS_i \neq \emptyset (i=1, 2, \dots, m)$$

$$(2) \bigcup_{i=1}^m AS_i = ZONE$$

在地理超图 G 中, 我们将 $ZONE$ 的元素 $zone_1, zone_2, \dots, zone_n$ 称为节点, 集合 $AS_1, AS_2, \dots, AS_m$ 称为边。我们不考虑类似于一般图中孤立点的节点。地理超图结构的图形表示如图 4 所示。

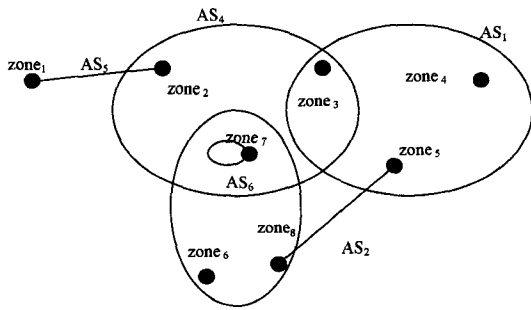


图 4 地理超图结构的图形示例

3.2 地理因素的超图表示

地理超图体现了 3 个关键的地理因素：

(1) 路由器间建立连接的地理距离阈值: 地理超图的节点个数反映了地理距离阈值, 设第 2 节中介绍的阈值为 l , 单个地理区域的面积与 l 成正比, 因此, 划分的地理区域的个数 (即地理超图的节点个数) 与 l 成反比。

(2) AS 的地理分布: 地理超图中边包含的节点表示 AS 边界路由器分布的地理区域。

(3) AS 在地理上的扩张方式: 在现实中, 为了获得更大的经济利益, AS 会在更多的地理区域内放置边界路由器以进行扩张。我们将考虑两种扩张形式:

① 随机扩张: AS 在整个世界范围内随机选择地理区域放置边界路由器。在地理超图中表现为: 代表 AS_i 的边 E_i 随机选择超图中的节点作为 E_i 的新节点, 如图 5(a) 所示, AS 扩张的新区域 $zone_5$ 与旧区域不相邻;

② 近邻扩张: AS 只选择在地理位置上与之紧邻的区域放置边界路由器。在地理超图中表现为: 边 E_i 只选择与 E_i 上节点编号相邻的节点作为 E_i 的新节点, 如图 5(b) 所示, AS 新扩张的区域 $zone_4, zone_5$ 都和原作用范围内的区域相邻。

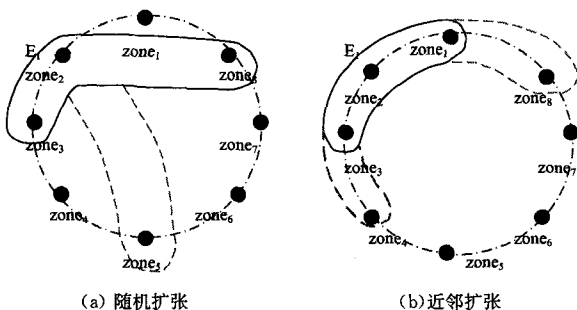


图 5 E_i 的两种扩张方式示意图

近邻扩张权衡了相邻边界路由器间的地理距离和单个边界路由器的覆盖区域范围; 然而随机扩张则表示 AS 的地理

分布可能受到了某种宏观调控的影响。

4 AS 网络和地理超图的相互作用

与以往关注 AS 网络特性产生机制的研究不同, 本文认为 AS 网络不是一个孤立的网络系统, 而是一个处在开放环境中的、和环境其他多种网络系统相互作用的网络。各种客观因素对 AS 网络拓扑特性的影响是网络系统间的相互作用的重要体现。地理因素对 AS 网络的影响, 可以认为是地理超图和 AS 网络相互作用的结果。我们认为, AS 网络和地理超图之间的相互作用主要表现在以下两个方面:

第一, 地理超图限定了 AS 网络中 AS 节点建立连接可选的 AS 集合。在实际中, 只有当同一区域内具有两个 AS 各自的边界路由器时, 这两个 AS 才能建立连边^[17, 18, 23]。因此, AS 网络中允许相互建连的 AS 节点集是由超图中顶点 $zone_i$ 的邻接边集所决定的。

第二, AS 网络中 AS 节点的度值决定了地理超图中边所包含节点个数。在现实中, AS 会进行扩张以获得更大的经济利益, 具体表现为在更多的地理区域内放置边界路由器。然而, 设置边界路由器并用内部路由器将其连接起来是需要花费大量链路铺设和维护代价的。经济实力越强的 AS, 越有可能进行扩张, 又由于经济实力是由 AS 节点的度值反映的^[15], 因此, 在 AS 网络中的大度值节点在地理超图中的对应边可能包含更多的 $zone$ 节点。

5 模型建立

基于地理超图和 AS 网络相互作用机制, 本文建立 AS 网络和地理超图双层网络模型如下:

(1) 初始化

地理超图: 初始地理超图包含 n 个节点 $zone_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和 n_0 条边 $AS_i = \{zone_i\} (i=1, 2, \dots, n_0)$ 。

AS 网络: 初始 AS 网络是包含 n_0 个 AS 节点的完全图。

(2) 在每个时间步 h

a. 增加一个新的 AS 节点

地理超图: 新增边 AS_i , 随机选择节点 $zone_j$, 使得 $zone_j \in AS_i$;

AS 网络: 新增节点 AS_i , 在 $zone_j$ 中随机选择 m 个节点 $\{AS_t | t=1, 2, \dots, m \wedge AS_t \neq AS_i\}$ 与 AS_i 建连。

b. 增加 n 条内部边

地理超图: 执行步骤 c ($p=1$), 选择边 AS_i 和节点 $zone_j$, 使得 $zone_j \in AS_i$, 令 $\Omega = \{AS_t | AS_t \cap AS_i \neq \emptyset\}$;

AS 网络: 在 Ω 中随机选择 n 个节点 $\{AS_t | t=1, 2, \dots, n \wedge AS_t \neq AS_i\}$ 与 AS_i 建连。

c. 以概率 p 进行 AS 节点的地理区域扩张 (p 为可调参数)

AS 网络: 根据概率 $q = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$ 选择节点 AS_i , 其中 k_i 表示 AS_i 的度值;

地理超图:

若本次建模采取随机扩张的方式: 随机选择节点 $zone_j$, 使得 $zone_j \in AS_i$;

若本次建模采取近邻扩张的方式: 在 $Z = \{zone_t | zone_t \in AS_i \vee zone_{t-1} \in AS_i \vee zone_{t+1} \in AS_i\}$ 中随机选择节点 $zone_j$, 使得 $zone_j \in AS_i$ 。

(3) 重复步骤 (2), 直至地理超图满足 3.1 节的定义, 并且 AS 网络达到所需规模。

6 模拟实验和结果分析

6.1 模拟实验

本节将分析在 AS 对地理区域的随机扩张和近邻扩张两种情况下,地理区域的个数 $zoneNum$ 对网络特性及网络稳定性的影响。其中,随机扩张刻画了 AS 边界路由器设置受到的某种宏观调控的影响;近邻扩张考虑了内部路由器的维护代价和链路铺设代价; $zoneNum$ 与距离阈值成反比,而距离阈值又反映了路由器链路铺设技术水平,因此, $zoneNum$ 减小表示路由器间链路铺设技术提高。

通过调节地理区域数 $zoneNum$,可以得出其对网络特性的影响,如图 6 所示。

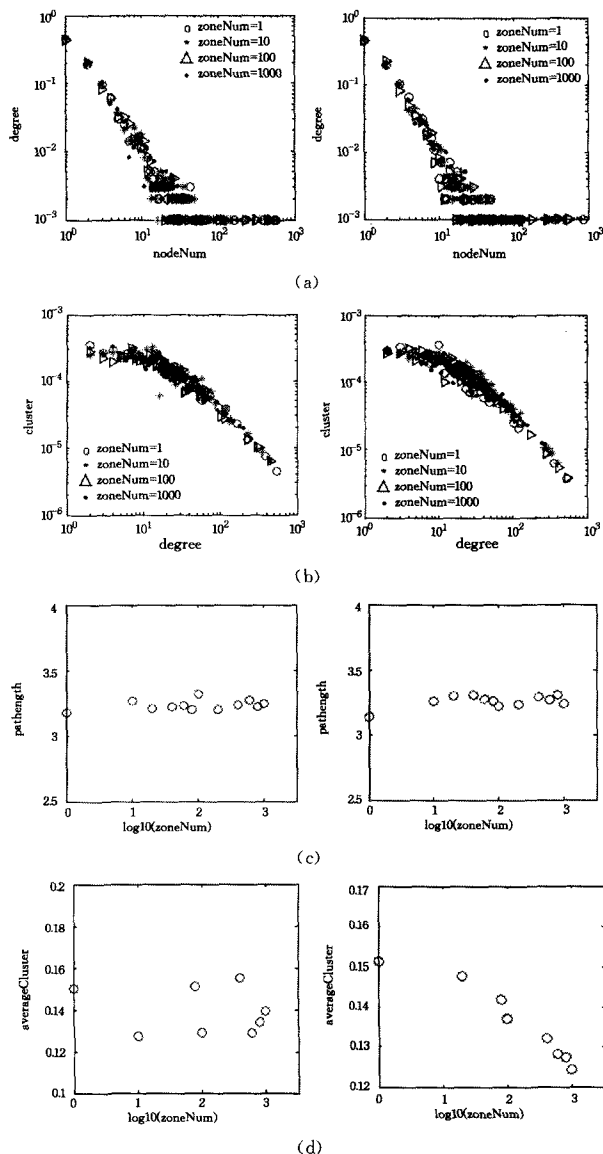


图 6 区域数 $zoneNum$ 对网络特性的影响

图 6 中左侧一列表示 AS 采取随机扩张方式,右侧一列表示 AS 采取近邻扩张方式。其中,图 6(a)为 $zoneNum$ 对度分布的影响;图 6(b)为 $zoneNum$ 对度和聚类系数相关性的影响;图 6(c)为 $zoneNum$ 对特征路径长度的影响;图 6(d)为 $zoneNum$ 对平均聚类系数的影响。

从图 6 中可以看出,对于网络的度分布、度和聚类系数相关性以及特征路径长度这些特性,无论 AS 是采取随机扩张还是近邻扩张, $zoneNum$ 对它们几乎没有明显的影响。对于

网络的平均聚类系数,当 AS 采取随机扩张时, $zoneNum$ 对其无明显影响;当 AS 采取近邻扩张时,随着 $zoneNum$ 增加,网络平均聚类系数呈现出衰减的趋势。

6.2 结果分析

由于 $zoneNum$ 与路由器建连距离阈值成反比,因此我们得出:在采取近邻扩张的方式下,路由器建连距离阈值对网络平均聚类系数具有明显的影响。我们认为网络的平均聚类系数是反映网络稳定性的一个重要参数,为了证明这个结论,我们引入了一个公认的用来刻画网络稳定性的参数——网络坚韧度的概念^[24],并试图通过网络平均聚类系数和坚韧度的关系来简要地说明 AS 间建立连接的地理距离对网络稳定性的影响。

首先给出网络坚韧度的定义:

设图 $G=(V, E)$,其中 V 表示节点集合, E 为 G 的边集合。设 S 为点集合的一个子集。 $G-S$ 表示从 G 中移去 S 集合中的点后所得到的图,用 $w(G-S)$ 来表示 $G-S$ 连通分支数,用 $|S|$ 表示点的个数。在此基础上,定义网络 G 的坚韧度 $t(G)$ 如下:

$$t(G) = \min\{|S|/w(G-S) : S \text{ 为 } G \text{ 的点割集}\} \quad (1)$$

以往的研究指出,网络坚韧度越大,网络的稳定性就越高^[24]。

我们认为,假设 $|S|=1$,即网络中只包含一个割点 v_i ,则网络的坚韧度 $t(G)$ 和节点 v_i 的聚类系数 C_i 之间近似服从一种正比关系,具体表现为:

$$t(G) \propto C_i \quad (2)$$

如图 7 所示,对于图(a)中左侧的网络,割点 v_i 的聚类系数为 0.17,网络坚韧度为 0.33;对于图(b)中左侧的网络,割点 v_i 的聚类系数为 0.33,网络坚韧度为 0.5。

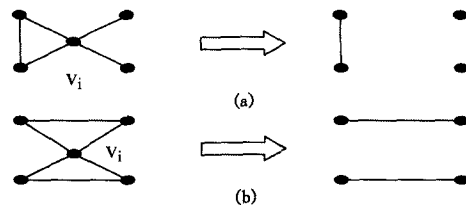


图 7 聚类系数和网络坚韧度的关系

在此基础上,我们可以得出如下结论:当 $|S| \geq 1$ 时,网络的坚韧度 $t(G)$ 和网络的平均聚类系数 $\bar{C}$ 之间也服从一种正比的关系,即

$$t(G) \propto \bar{C} \quad (3)$$

下面给出简要的证明过程:

设 $\forall S = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}, k \geq 1$ 。则:

$$\begin{aligned} \because w(G-S) &\propto \sum_{i=1}^k w(G-v_i) \propto k \frac{1}{\bar{C}} \\ \therefore \frac{|S|}{w(G-S)} &\propto \frac{k}{k \frac{1}{\bar{C}}} \propto \bar{C} \end{aligned}$$

又由于 S 具有任意性,因此有

$$t(G) = \min\{|S|/w(G-S)\} \propto \bar{C} \quad (4)$$

即网络的坚韧度和网络的平均聚类系数成正比。

由于网络的坚韧度和网络的稳定性成正比,而网络的平均聚类系数和 AS 间建立连接的地理距离成正比,因此我们可以得到如下结论:随着 AS 间建立连接的地理距离增大,网络的稳定性表现出上升的趋势。根据本文实验结果的启示,我们可知:(1)施加宏观调控,使得 AS 的边界路由器的地理

(下转第 59 页)

- [6] 武畅,李玉柏,彭启琮,等.可设置仲裁优先程度的 NOC 路由节点设计[J].电子科技大学学报,2008,37(5):645-648
- [7] Benny V H. Numerical solution of polling systems for analyzing networks on chips[C]// Proceedings of NSMC 2010. Williamsburg, USA, 2010; 90-93
- [8] 管旭光,杨银堂,朱樟明.用于片上网络的准时延不敏感全异步仲裁器[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2011,38(3):83-89
- [9] 杨延飞,朱樟明,周端,等.用于片上网络的延时无关异步动态优先仲裁器[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2012,39(1):42-48
- [10] Lu C H, Chiang K C, Hsiung P A. Round-based priority arbitra-

tion for predictable and reconfigurable Network-on-Chip[C]// International Conference on Field-Programmable Technology, 2009(FPT 2009). 2009

- [11] Liu Qian-lin, Zhao Dong-feng, Zhao Yi-fan. An efficient priority service model with two-level-polling scheme [J]. High Technology Letters, 2011, 17(3): 245-251
- [12] Bao Li-yong, Zhao Dong-feng, Zhao Yi-fan. A Priority-based Polling Scheduling Algorithm for Arbitration Policy in Network on Chip [J]. Journal of electronics (China), 2012, 29(1/2): 120-127
- [13] Guan Zheng, Zhao Dong-feng, Zhao Yi-fan. A Discrete Time Two-level Mixed Service Parallel Polling Model [J]. Journal of electronics (China), 2012, 29(1/2): 103-110

(上接第 42 页)

分布趋于随机,则 Internet 网络稳定性不再受地理因素影响;(2)提高链路铺设和维护技术水平,使得路由器间建立距离增大,铺设维护代价减小,不仅能够提高效益,而且还能够增强整个 Internet 网络的稳定性。

结束语 AS 网络是一个处在开放环境中,并和环境中的其他多种网络系统相互作用的网络。各种客观因素对 AS 网络拓扑特性的影响是网络系统间的相互作用的重要体现。因此,本文提出地理超图结构来刻画 AS 网络的地理环境因素,进而提出地理超图和 AS 网络相互作用的机制,建立了 AS 的双层网络模型。该模型弥补了以往模型未能正确刻画 AS 地理分布的缺陷,使探索地理因素和 AS 网络性能的联系成为可能。另外,与仅关注 AS 网络现状和发展趋势的传统研究角度不同,本文侧重研究受到经济宏观调控或者技术突破等因素影响后 AS 网络的性能变化,为制定宏观调控措施和把握网络技术导向提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1999, 29(4): 251-262
- [2] Siganos G, Faloutsos P, Faloutsos C. Power laws and the AS-level Internet topology[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(4): 514-524
- [3] Bu T, Towsley D. On Distinguishing between Internet Power Law Topology Generators[J]. IEEE INFOCOM, 2002, 2: 638-647
- [4] Klemm K, Eguiluz V M. Highly Clustered Scale-Free Networks [J]. Physical Review E, 2002, 65(3)
- [5] Zoltán Toroczkai, Bassler K E. Jamming is limited in scale-free systems[J]. Nature, 2004, 428(15)
- [6] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Attack an error tolerance in complex networks[J]. APRIL, 2000, 406: 387-482
- [7] Winick J, Jamin S. Inet-3. 0: Internet topology generator [R]. Technical report CSE-TR-456-02, Department of EECS, University of Michigan, 2002
- [8] Albert R, Barabasi A L. Topology of evolving networks: Local events and universality[J]. Phys. Rev. E, 2004, 70: 066108
- [9] Medina A, Lakhina A, Matta I, et al. BRIT: An approach to universal topology generation[C]// Proceedings of MASCOTS. Washington, 2001: 346-353
- [10] Bu T, Towsley D. On distinguishing between Internet power law topology generators [C] // Proceeding of INFCOCOM. New-

York, 2002, 2: 638-647

- [11] Zhou S, Mondragon R J. Accurately modeling the Internet topology[J]. Phys. Rev. E, 2004, 70: 066108
- [12] Zhou S, Mondragon R J. Towards modeling the Internet topology-the interactive growth model[J]. Teletraffic science and engineering, 2003, 5: 121-130
- [13] Park S T, Pennock D M, Giles C L. Comparing static and dynamic measurements and models of the Internet's topology[C]// Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 2004, 3: 1616-1627
- [14] Sagy B, Mira G, Avishai W. An incremental super-linear preferential Internet topology model[C]// Proc 5th Annual Passive and Active Measurement Workshop. LNCS 3015, 2004: 53-62
- [15] Wang Xiao-ming, Loguinov D. Wealth-Based Evolution Model for the Internet AS-Level Topology[C]// Proceeding of INFOCOM. New York, 2006
- [16] Sagy B, Mira G, Avishai W. A geographic directed preferential Internet topology model[J]. Arxiv, CS, 2005, NI/0502061
- [17] Lakhina A, Byers J W, Crovella M, et al. On the geographic location of Internet resources (short abstract) [C] // Proc. SIGCOMM Internet Measurement Workshop(IMW'02). 2002: 249-250
- [18] Lakhina A, Byers J W, Crovella M, et al. On the geographic location of Internet resources[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21: 934-948
- [19] Yook S H, Jeong H, Barabasi A L. Modeling the Internet's large-scale topology [J]. Proc. Nat. Acad. Sci., 2002, 9(21): 13382-13386
- [20] Sterbenz J P G, Çetinkaya E K, Hameed M A, et al. Evaluation of network resilience, survivability, and disruption tolerance: analysis, topology generation, simulation, and experimentation [J]. Telecommunication systems, 2013, 52(2): 705-736
- [21] Willinger W, Roughan M. Internet Topology Research Redux [OL]. http://sigcomm.org/education/ebook/SIGCOMMBook201301_chapter1.pdf
- [22] Aditya A, Shuchi C, Arvind K, et al. On the Scaling of Congestion in the Internet Graph [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(3): 43-56
- [23] Tangmunarunkit H, Doyle J, Govindan R, et al. Does AS size determine degree in AS topology[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2001, 31(5): 7-10
- [24] Chvatal V. Tough graphs and hamiltonian circuits [J]. Discrete Math, 1973, 5: 215-228