

大型 ISP 网络拓扑多点测量及其特征分析实例*

姜 誉⁺, 方滨兴, 胡铭曾, 何仁清

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

An Example of Analyzing the Characteristics of a Large Scale ISP Topology Measured from Multiple Vantage Points

JIANG Yu⁺, FANG Bin-Xing, HU Ming-Zeng, HE Ren-Qing

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-451-86418272, E-mail: jiangyu@hit.edu.cn, http://pact518.hit.edu.cn

Received 2004-08-12; Accepted 2004-10-09

Jiang Y, Fang BX, Hu MZ, He RQ. An example of analyzing the characteristics of a large scale ISP topology measured from multiple vantage points. *Journal of Software*, 2005,16(5):846–856. DOI: 10.1360/jos160846

Abstract: A detailed understanding of the structural properties of Internet topology will benefit the further design and development of the Internet. It seems infeasible to study the whole Internet at router level due to its extremely large size and the difficulty in obtaining a whole topology at this level. Studying each national or continental Internet service provider (ISP) topology individually becomes an alternative method for this goal. In this paper, the measured China Education and Research Network topology, a nationwide ISP topology, is basically taken as an example. The results of mapping the topology from multiple vantage points are briefly presented. The properties of the degree distribution, large eigenvalues, and the spectral density of the measured topology graphs are analyzed. The characteristics of the signless Laplacian spectra (SLS), the normalized Laplacian spectra (NLS), and the clustering coefficients of the measured graphs are also presented. The results suggest that some power laws indeed hold in some large-scale ISP topologies; in contrast to the case of autonomous system level topologies, the power law fit is not the best choice for some ISP topologies in terms of the complementary cumulative distribution function of the degree; some real ISP topologies are a kind of scale-free graphs which are not consistent with the Barabási-Albert (BA) growth model; router level topologies are distinguishable in terms of the SLS or the NLS; router level Internet topology may have developed over time following a different set of growth processes from those of the BA model.

Key words: Internet topology measurement; scale-free network; topology characteristic; power law; spectrum; Laplacian eigenvalue; clustering coefficient

摘 要: 深入了解 Internet 拓扑的结构性质有利于更好地设计和发展 Internet。由于 Internet 规模巨大,以及获得

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60203021 (国家自然科学基金)

作者简介: 姜誉(1968—),男,黑龙江伊春人,博士生,高级工程师,主要研究领域为 Internet 测量,网络信息安全;方滨兴(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为网络信息安全,网络计算;胡铭曾(1935—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为网络计算,网络信息安全;何仁清(1981—),男,硕士生,主要研究领域为网络信息安全。

完整的路由器级 Internet 拓扑方面的困难,目前无法研究整个路由器级 Internet 拓扑.因此,分别研究每个国家级或跨国因特网服务供应商(Internet service provider,简称 ISP)网络拓扑结构成为了解 Internet 拓扑特征的一种可选方法.以中国教育科研网为例,简要描述了多点测量其路由器级拓扑结构的测量结果.分析了该实例拓扑图的节点度分布特征、较大特征值的有关性质以及谱密度分布特征.分析了该实例拓扑图的无符号拉普拉斯谱(SLS)、规格化拉普拉斯谱(NLS)以及群集系数等度量特征.分析结果表明,大型 ISP 拓扑确实具有某些幂律特征;不同于自治系统级拓扑的情形,对 ISP 拓扑的节点度补累积分布来说,幂律分布未必拟合得最好;ISP 拓扑是一种无标度图,但不符合 Barabási-Albert(BA)生长模型;SLS 和 NLS 具有区分不同的路由器级拓扑结构的能力;Internet 路由器级拓扑的发展可能遵循一种不同于 BA 模型的生长过程.

关键词: Internet 拓扑测量;无标度网络;拓扑特征;幂律;谱;拉普拉斯特征值;群集系数

中图分类号: TP393 文献标识码: A

Internet 在社会、经济、科研等各个领域中的作用日益增强.像报纸、电视、广播一样,Internet 成为人们了解、获取信息的重要渠道之一.社会的需求使 Internet 的结构发生了巨大的变化.深入了解 Internet 拓扑的结构性质有助于准确地模拟、从而更好地设计和发展 Internet^[1].然而,由于 Internet 规模巨大,同时,在获得完整的路由器级 Internet 拓扑方面存在着极大的困难,目前来看,研究完整的路由器级 Internet 拓扑是不现实的.因此,分别研究每个国家级或跨国 ISP(Internet service provider)网络拓扑结构就成为了解 Internet 拓扑特征的一种可选方法.如同世界地图集一样,每个国家级 ISP 拓扑是整个 Internet 拓扑的一部分,它们的集合(包括 Internet 交换点在内)就构成了 Internet 的全貌.

本文以路由器级 Internet 拓扑多点测量实践^[2,3]为基础,对中国教育和科研计算机网(China Education and Research Network,简称 CERNET)进行测量,其中,CERNET 是国家级的大型 ISP,拥有数百万个 IP 地址,网络覆盖全国大、中城市,在 Internet 连通性方面发挥着重要作用,对它的测量具有代表性.通过分析已有研究工作^[4-8],应用代数图论理论研究结果^[9],对 CERNET 拓扑测量实例进行结构分析,同时也分析从多个测量点所观察到的拓扑子图与合并图(union)之间结构特征的变化.相应的方法可以应用于分析其他的国家级 ISP 拓扑测量实例.

本文第 1 节介绍研究背景.第 2 节简要描述多点测量 CERNET 拓扑实例的测量结果.第 3 节分析该实例拓扑图节点度的分布特征.第 4 节分析该实例拓扑图的谱密度、规格化拉普拉斯谱、无符号拉普拉斯谱等不同特征值集合的分布特征.第 5 节分析群集系数(clustering coefficient)等其他度量特征.最后总结全文.

1 背景介绍

1999 年以前,人们主要采用 Erdős-Rényi(ER)随机图模型理论基于模拟的方法对大规模网络拓扑性质进行分析.1999 年,Faloutsos 等人^[4]首次采用幂律(power-law)来刻画自治系统级和路由器级 Internet 拓扑结构特征,并提出了 degree-rank 幂律、frequency-degree 幂律以及 eigenvalue-rank 幂律.这一发现激发了人们的极大兴趣,引发了许多分析研究工作.但目前拓扑特征刻画的研究主要是针对自治系统级拓扑进行的,原因是,自 1997 年起出现大量的 BGP 路由表数据对研究人员开放.Oregon 大学的 Route-view 计划就是典型的例子.相关研究主要有文献[10-14]等.其中文献[14]采用类似于文献[4]的方法,对 1997 年 11 月至 2002 年 2 月的总共 1 253 个自治系统级拓扑图进行了分析,进一步验证了 degree-rank 幂律以及 eigenvalue-rank 幂律的存在性.其中,文献[4]考察了拓扑实例的前 20 个特征值,文献[14]考察了拓扑实例的前 100 个特征值.另外,由于 frequency-degree 幂律相当于考察的是频率 f_d 的概率密度函数(probability density function,简称 PDF),而累积分布比概率密度的统计鲁棒性更好,因此,文献[14]考察了频率 f_d 的补累积分布函数(complementary cumulative distribution function,简称 CCDF) D_d 与度 d 的关系,发现 D_d 与 d 也具有幂律关系,即 $D_d \propto d^{-\alpha}$ (“ \propto ”表示“正比于”),称 α 为度指数(degree exponent).称该幂律为 CCDF(d)-degree 幂律,并用度指数 α 代替出度指数 α 来刻画拓扑图的度分布特征.除了刻画自治系统级拓扑特征之外,在复杂网络的生长过程方面,人们也进行了一定的研究和探索^[6,8,15-17].

目前,国内外关于国家级或跨国 ISP 拓扑结构特征的研究还不多见,一方面原因在于多点采集 ISP 拓扑数据

比较困难,另一方面原因在于相应的分析理论还不成熟.除了文献[4]讨论了 Pansiot-Grad 数据集^[18]的幂律特征以外,Broido 等人^[19]基于 skitter 的数据分析了路由器接口(IP地址)级拓扑图的度分布特征,发现韦布尔(Weibull)分布对节点度的补累积分布拟合效果更好.Spring 等人^[20]对其所测量的 10 个不同的大 ISP 拓扑的节点度补累积分布拟合发现,对有些 ISP 来说,Weibull 分布拟合得好,少数是简化的对数正态(lognormal)分布拟合得好,大多数是帕雷托(Pareto)分布拟合得好.但前两种分布是对 CCDF 全部数据拟合,而 Pareto 分布只是对其尾部的拟合.因此无法与前两种分布比较拟合效果.Magoni 等人^[21]对 3 个不同规模的路由器级拓扑实例验证了 degree-rank 幂律和 frequency-degree 幂律.最新研究^[17]表明,虽然节点度分布能够区分 ER 随机图(指数分布)与无标度图(幂律分布),但具有相同 degree-rank 幂律分布的无标度图可以有完全不同的结构.因此,仅依靠节点度的幂律分布来刻画无标度图的结构特征还不够,需要与其他度量结合起来.

哈尔滨工业大学于 2000 年底开展了面向国家级 ISP 拓扑测量的研究.在单点测量国家级 ISP 拓扑实践^[22]的基础上,设计了多点测量国家级 ISP 拓扑的分布式体系结构 DRIMA(distributed router-level Internet mapping architecture),并对 CERNET 拓扑进行了多点测量实践^[2,3].本文在此基础上进一步对该测量实例进行特征分析.

在分布函数、拓扑性质表征参数的关系方面,Mitzenmacher^[5]研究了幂律与对数正态分布的模型,发现二者有密切的联系,对数正态分布可以向幂律分布转化.Chou^[23]找到了等级指数 \mathcal{R} 与出度指数 \mathcal{O} 之间的理论关系: $\mathcal{R} \approx 1/(\mathcal{O}+1)$. Siganos 等人^[14]进一步描述了等级指数 \mathcal{R} 、出度指数 \mathcal{O} 以及度指数 \mathcal{D} 之间的理论关系: $\mathcal{D} \approx \mathcal{O}+1$, $\mathcal{R} \approx 1/\mathcal{D}$. Mihail 等人^[24]则发现,在节点度具有幂律分布的图中,图的特征值以及节点度降序序列中较大的特征值与较大的度之间存在着近似关系: $d_i \approx \lambda_i^2$. Dam 等人^[9]的比较研究表明,无符号拉普拉斯谱在区分不同图(相同规模)方面具有较好效果.其他还有对平均离心率、平均路径长度、平均跳距、最大团规模等平均或最大度量的讨论.另外,Watts 等人^[25]采用群集系数(clustering coefficient)度量来表征图中节点的群集情况.

可以说,对 Internet 拓扑实例的特征分析研究还刚刚开始,需要通过大量的对实际拓扑测量实例的分析,以期能够从多个不同侧面深化对 Internet 拓扑结构的认识.

2 多点测量路由器级拓扑

利用多点测量国家级 ISP 拓扑的分布式体系结构 DRIMA^[2,3],我们于 2003 年 4 月从广州、银川和哈尔滨等 3 个测量源点对 CERNET 拓扑结构进行了测量.通过对测量数据的整理和处理,生成包含省会级和地市级城市的地理分布图,并与同期 CERNET 网管中心提供的骨干网拓扑地理分布图^[26]进行了对比,发现测量的拓扑图基本反映了实际网络的拓扑分布.我们注意到,虽然银川是一个测量源点,但却没有发现银川与乌鲁木齐之间的链路,这可能是由于该链路是备份链路,或者是由于 CERNET 网络在银川市内的路由器当时没有相应的路由配置所致,因为所有通向乌鲁木齐的探测路径都首先到达了西安市.我们也发现了同期北京与沈阳之间所存在的两条并行链路,它们起到了很好的负载平衡作用^[3].

选择广州、银川和哈尔滨这 3 个测量点形成了一个三角形,分别从 3 个不同的方向进行测量,目的是为了能够获得一个较好的 CERNET 骨干网视图.每个测量点的测量目标都是 17 824 个 IP 地址,分别随机选取于同一个地址块列表,该地址块列表由地址掩码前缀长度为 24 的地址块组成,覆盖了当时 CERNET 所管理的所有端网络(stub network).这种对指定的测量范围采用端网络全覆盖的探测目标选取方法^[2]有助于降低测量中可能存在的抽样误差^[27].上述 3 个测量点所观察到的路由器级拓扑子图及合并图的节点数(不包括测量路径中的叶柄^[22]地址、私有地址(10.0.0.0/8,172.16.0.0/12,192.168.0.0/16)以及主机地址)和边数(包括虚边^[22])见表 1.在此基础上,本文进一步对上述测量实例的拓扑特征进行分析.

Table 1 The summary information of the router level topology graphs derived from the DRIMA dataset

表 1 DRIMA 数据集的路由器级拓扑图概要信息

Probing source	# of nodes (N)	# of edges (E)	Avg-deg ($2E/N$)
Union	2 624	3 010	2.29
Guangzhou	2 066	2 233	2.16
Yinchuan	2 051	2 204	2.15
Harbin	1 788	1 917	2.14

3 节点度分布特征

本节我们分别分析多点测量得到的路由器级 CERNET 拓扑测量实例有关的度分布特征.它们既反映了该实例拓扑的结构特征,也可用于将来观察 CERNET 拓扑特征随时间推移的对比分析.

3.1 degree-rank分布特征

由 3 个测量点所观察到的拓扑子图及它们的合并图的 degree-rank 分布以及幂律拟合情况如图 1 所示.两个坐标轴都是对数坐标.从图中可以看出,节点度与其降序序列中的等级之间符合幂律分布,其相关系数绝对值 ACC(absolute value of the correlation coefficient)都在 0.965 以上.

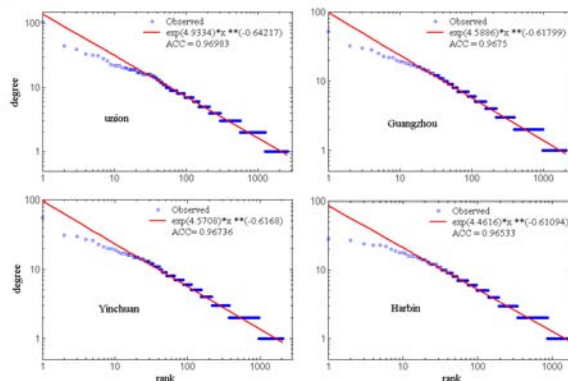


Fig.1 The degree-rank power law fitness of the measured topology graphs (in log-log plot)

图 1 测量拓扑图的 degree-rank 幂律拟合(对数坐标)

另外我们观察到,合并图中的节点个数大于任何一个子图中的节点个数,同时,3 个测量点的子图中节点度小于平均度的节点个数所占比重介于 80.9%~81.6%之间,而合并图中相应的比重为 78.3%.说明合并图的平均度有所上升,与表 1 的结果一致.

对节点度分布高度扭曲(highly skewed)的图 G 来说,删除 G 中度等于 1 的节点及其关联的边,得到图 G' ,则 G' 是 G 的子图.重新计算 G' 中每个节点的度.如果 G' 仍然是度分布高度扭曲的,则我们继续用幂律进行拟合,得到相应的等级指数.这个过程可以迭代进行直到图中不再包含 1 度节点.我们发现,在子图 G' 与 G 最小度相等且 degree-rank 幂律成立的情况下,如果最小度与次小度节点个数之比增大(减小),则等级指数的绝对值也会增大(减小),即等级指数变小(大).上述 3 个子图的最小度与次小度节点个数的比值都小于合并图中对应的比值,合并图的等级指数 α 则下降了至少 4%,即 α 反映了拓扑图节点度分布的变化.

3.2 degree的概率密度分布特征

由于在对数坐标下,节点度的概率密度分布与相应的频率分布是上下平移的关系,因此,我们不考察节点度的 frequency-degree 分布,而是考察其概率密度分布,目的是为了观察节点度的概率密度更符合哪种分布.

我们运用最小二乘法原理,分别采用幂律(power law)分布、帕雷托(Pareto)分布、对数正态(lognormal)分布和韦布尔(Weibull)分布,在对数坐标下进行拟合.根据残差平方和判断拟合程度的好坏,残差平方和越小,拟合程度就越好.这 4 种分布的概率密度及其补累积分布函数见表 2.其中 Φ 是标准正态分布的累积分布函数.

Table 2 Four probability density functions and their complementary cumulative distribution functions

表 2 4 种概率密度函数及其补累积分布函数

Function name	Probability density function (PDF)	Complementary cumulative distribution function (CCDF)
Power law	$f(x) = Cx^\alpha \quad (C>0, \alpha<-1)$	$F'(x) = -\frac{C}{\alpha+1} x^{\alpha+1}$
Pareto ($\beta=1$)	$f(x) = \alpha x^{-\alpha-1} \quad (\alpha>0)$	$F'(x) = x^{-\alpha}$
Lognormal (2-parameter)	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}x^2} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$	$F'(x) = \Phi\left(-\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)$
Weibull (2-parameter)	$f(x) = (c/b)(x/b)^{c-1} e^{-(x/b)^c}$	$F'(x) = e^{-(x/b)^c}$

上述拓扑测量实例的节点度概率密度、这4种概率密度函数曲线拟合情况及相应拟合函数的形状(shape)参数如图2所示。两个坐标轴都是对数坐标。从残差平方和的大小来看,幂律拟合效果最好,Weibull分布拟合效果最差。同时我们看到,相应的ACC都在0.954以上。因此,对于该实例拓扑图来说,frequency-degree幂律成立。

这里的Pareto分布实际上是一种条件更严格的幂律分布,在对数坐标系下,幂律分布的直线斜率和截距由形状(shape)和标度(scale)两个参数决定,而Pareto分布的直线斜率和截距都由形状参数决定。因此,幂律分布比Pareto分布拟合得更好。

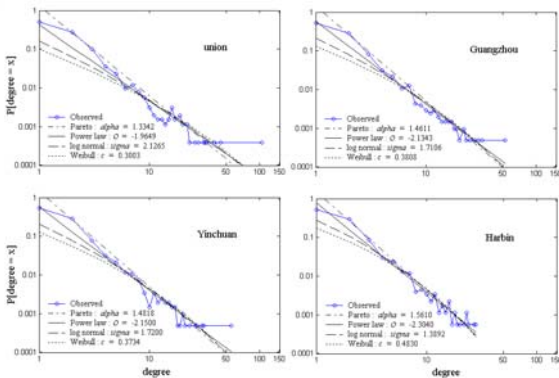


Fig.2 The PDF of the measured topology graphs and each of the four PDFs fitness (in log-log plot)
图2 测量拓扑图的节点度概率密度及4种概率密度函数的拟合情况(对数坐标)

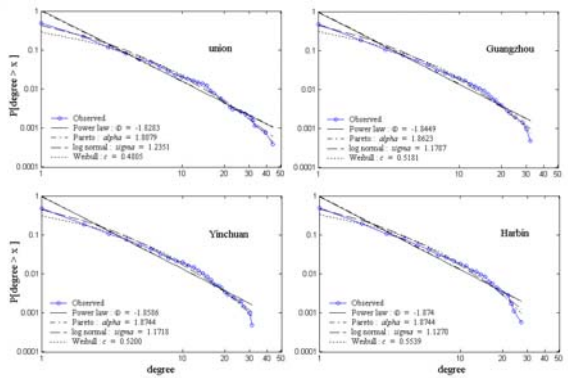


Fig.3 The CCDF of the measured topology graphs and each of the four CCDFs fitness (in log-log plot)
图3 测量拓扑图的节点度补累积分布及4种补累积分布函数的拟合情况(对数坐标)

3.3 CCDF(d)-degree分布特征

分别采用这4种CCDF对上述拓扑测量实例的节点度CCDF在对数坐标下进行拟合(不包括最右侧CCDF值为0的点),拟合结果以及相应拟合函数的形状参数如图3所示。通过比较残差平方和我们发现,与文献[14]不同,这时Weibull分布拟合效果最好,Lognormal分布拟合效果稍差,而Power law和Pareto分布的拟合效果最差。这说明,对于某些ISP拓扑的节点度CCDF来说,Weibull分布和Lognormal分布可能比幂律分布拟合效果更好。这与文献[19]的结论类似.Spring等人^[20]的研究也表明,对ISP拓扑来说,其节点度CCDF不一定符合幂律分布。

3.4 小结

从拓扑数据采集的角度来说,对指定的测量范围采用端网全覆盖的探测目标选取方法有助于降低测量中可能存在的抽样误差,从而保证了测量结果的有效性。节点度分布符合degree-rank幂律和frequency-degree幂律,说明Internet拓扑结构是极不均匀的,大量节点具有较小的度,具有很高的度的节点个数则非常少。也就是说,相对于正则图,Internet拓扑的节点度分布是高度扭曲的(highly skewed)。因此,一般意义的最大、最小以及平均度量不能准确地刻画Internet拓扑的结构特征,幂律指数可能是一种较好的选择^[4]。

通过测量与分析我们发现,大型 ISP 网络结构确实满足 degree-rank 幂律和 frequency-degree 幂律性质,本次测量结果验证了文献[4]中的幂律关系。但是,其节点度的补累积分布 CCDF 却并非如此。图 1~图 3 表明,在对数坐标下,前两种分布都有长尾(long-tailed)的特点,而 CCDF 却有重尾(heavy-tailed)的趋势。观察这 4 个实例的节点度 CCDF 在对数坐标下的图像我们看到,它们都有某种程度的线性变化趋势,但尾部出现非线性趋势。通过计算对数坐标下 4 个实例的节点度 CCDF 数据相关系数,我们发现,它们都在 0.9662 以上,据此也可以认为 CCDF(d)-degree 幂律成立。然而,从残差平方和来看,虽然它们的值都比较小(在 5 以内),但幂律拟合的残差平方和是 Weibull 分布拟合的残差平方和的 4~5 倍,产生这种情况的原因可能是由于数据量比较小(不同的度值不超过 30 个)、在该范围内各拟合函数值之间差距不大的缘故。

另外,从上述分析我们看到,自治系统级拓扑节点度补累积分布符合幂律分布^[14],而路由器级拓扑节点度补累积分布未必符合幂律分布。这从实践的角度说明,路由器级拓扑与自治系统级拓扑是两个不同层次的拓扑,因此,其某些拓扑特征也不同。

4 特征值分布特征

一个无向图 G 可以用一个对称的邻接矩阵 A 来表示。图 G 中的节点 i 和 j 之间有边关联,则 $A_{ij}=A_{ji}=1$,否则 $A_{ij}=0, A_{ji}=0$ 。一个图的特征值就是指其邻接矩阵的特征值。代数图论研究发现,图的特征值与图的许多基本拓扑性质密切相关。因此,考察图的特征值分布特征对于了解图的拓扑性质具有重要意义。

我们对上述 CERNET 拓扑测量实例的降序序列特征值分别采用幂律进行拟合后发现,尽管它们的规模各不相同,但对每个图来说,至少前 300 个特征值及其序号之间符合幂律分布,相应的 ACC 至少为 0.9757,特征指数介于 -0.3623 和 -0.3568 之间,变化幅度不超过 1.5%(前 100 个特征值的拟合情况更好)。此外,我们也考察了前 100 个较大的特征值 λ_i 和 d_i ,发现关系 $d_i \approx \lambda_i^2$ 基本成立。限于篇幅,这里省略相应的图像及其拟合情况。

本节我们主要分析上述路由器级测量实例拓扑图的谱密度(spectral density)、无符号拉普拉斯谱 SLS (signless Laplacian spectrum)以及规格化拉普拉斯谱 NLS(normalized Laplacian spectrum)的分布特征。

4.1 谱密度

我们知道,图 G 的谱(spectrum)就是该图邻接矩阵 A 的特征值集合。图的谱密度就是该图邻接矩阵 A 的特征值密度,一般记为 $\rho(\lambda)$ 。对于一个有限系统, $\rho(\lambda)$ 可以写成关于特征值的 δ 函数的和:

$$\rho(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(\lambda - \lambda_i).$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时,它收敛于一个连续函数。这里, λ_i 是该图邻接矩阵特征值降序序列中的第 i 个特征值^[7]。谱密度反映的是图的特征值的分布规律。

已有研究表明,ER 随机图的谱密度收敛于一个半圆,且半圆的底边部分呈指数分布^[28]。有研究^[7,29]表明,采用 Barabási-Albert(BA)模型建模过程^[8]生成的无标度(scale-free)图的谱密度收敛于一个对称的连续函数,该函数的中部呈三角形,两侧边缘部分呈幂律分布。另外,有些研究人员认为^[8],Internet 拓扑结构可能是按 BA 模型生长方式形成的。

上述拓扑测量实例合并图的谱密度分布如图 4 所示。为清晰起见,两个坐标轴都用 $[Np(1-p)]^{1/2}$ 重新标度,其中 N 是图中的节点个数, Np 是平均度。

从图中我们观察到,它的中部并不是一个三角形,而是在 $\lambda=0$ 的两侧各有两个尖峰。其边缘部分呈波动衰减,如图 4 中嵌入的大图所示。对谱的边缘部分拟合表明,其边缘部分只是近似呈幂律分布,如图 4 中右上角嵌入的

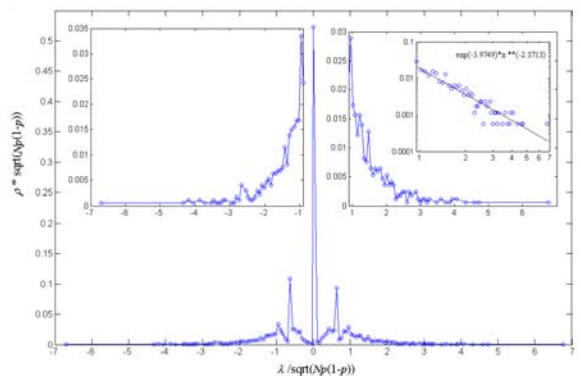


Fig.4 The spectral density of the measured topology union graph

图 4 测量拓扑合并图的谱密度

小图所示(对数坐标).相应的幂指数为-2.37,相关系数绝对值为 0.937(数据规模为 45).

上述观察表明,某些实际的 ISP 拓扑图不是 ER 随机图(节点度呈指数分布,谱密度呈半圆形,边界部分呈指数衰减),而是一种无标度图(节点度呈幂律分布),但不是符合 BA 模型的无标度图(谱密度中部呈三角形,边界部分呈幂律衰减).另外,从 Pansiot-Grad 数据集得出的路由器级拓扑图的谱密度分布与图 4 类似,在 $\lambda=0$ 两侧各有两个尖峰.

这些结果说明,Internet 路由器级拓扑结构的发展可能遵循一种不同于文献[8]中所描述的 BA 模型的生长过程.我们的研究与 Chen 等人^[6]的研究从不同的角度得出类似的结论.

4.2 无符号拉普拉斯谱(SLS)

一个图 G 的无符号拉普拉斯矩阵 $|L|$ 定义为 $|L|=D+A$,其中 D 是描述 G 的节点度的对角矩阵, A 是 G 的邻接矩阵.无符号拉普拉斯谱(SLS)就是 $|L|$ 的特征值集合^[9].代数图论理论比较研究表明,在 D, A, I (单位矩阵)、 J (全 1 矩阵)的各种线性组合(A 的系数非零)中,SLS 是区分不同的图(相同规模)迄今为止效果最好的谱^[9].也就是说,SLS 可能刻画图的某种拓扑性质.

我们分析上述测量实例拓扑图的 SLS 分布特征,如图 5 所示.特征值降序排列, λ_i 的序号 i 已按 $(i-1)/(N-1)$

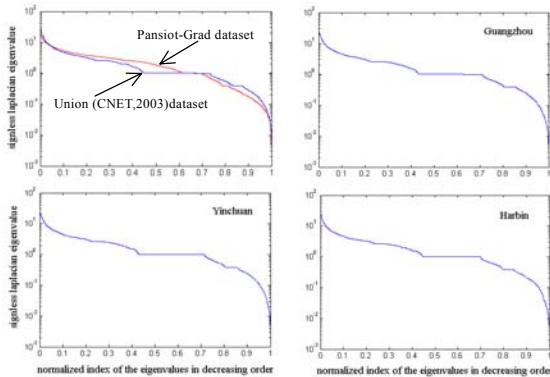


Fig.5 The signless Laplacian spectra of the measured topology graphs (in semi-logarithm plot)
图 5 测量拓扑图的无符号拉普拉斯谱(半对数坐标)

进行规格化,其中 N 是图中的节点个数.对该测量实例拓扑来说,尽管不同子图的规模不同,平均度不同,但 SLS 分布却非常相似,特征值等于 1 的重数都较高,而且都具有趋势极为相似的重尾(heavy tails)特征.采用幂律拟合发现,每个子图中所有大于 1 的特征值(798 个以上)与其降序序列的序号之间都符合幂律分布,特征指数很接近,相应的 ACC 都不低于 0.972.

另外,从图 5 中与 Pansiot-Grad 数据集拓扑图的 SLS 分布对比来看,SLS 能够表征不同测量范围路由器级拓扑的特征.Pansiot-Grad 拓扑图的规模、平均度、测量时间及测量范围都不同于 CERNET 拓扑测量实例图.

4.3 规格化拉普拉斯谱(NLS)

一个图 G 的规格化拉普拉斯矩阵 \mathcal{L} 定义为 $\mathcal{L}=D^{-1/2} \times L \times D^{-1/2}$,其中 L 是 G 的拉普拉斯矩阵(导纳矩阵,matrix of admittance), $L=D-A$, D 和 A 的含义同上.NLS 就是 \mathcal{L} 的特征值集合^[11].规格化拉普拉斯特征值介于 0 和 2 之间,升序排列为 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N$, λ_i 的序号为 i .

我们分析上述测量实例拓扑图的 NLS 分布特征,如图 6 所示. λ_i 的序号 i 已按 $(i-1)/(N-1)$ 进行规格化.

从图中我们看到,虽然 4 个测量实例拓扑图的规模各不相同,但 NLS 分布却极其相似,都呈 3 个台阶状分布(不同于文献[11]中自治系统级拓扑图的 NLS 只有一个台阶的分布),而且重数较大的特征值的位置(台阶)相同,分别是 0.292 893,1.0 和 1.707 107(其中 0.292 893 和 1.707 107 相对于 2 是互补的).即它们都在特定特征值点上有很高的重数.同时,对该拓扑测量实例来说,平均度高的子图其规格化拉普拉斯特征值等于 1 的重数也高.这可能是因为每

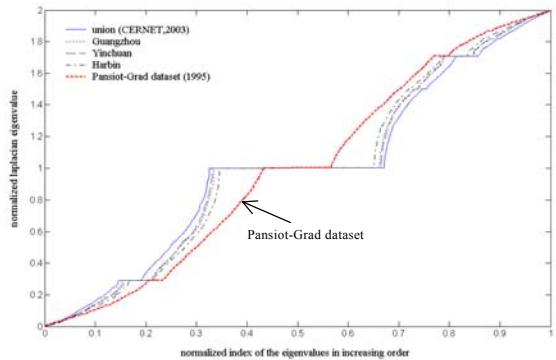


Fig.6 The normalized Laplacian spectra of the measured topology graphs
图 6 测量拓扑图的规格化拉普拉斯谱

个源的探测目标都覆盖了测量范围内以最小用户地址分配单位表示的所有端网.此时,NLS 反映了子图与合并图之间的变化.另外,对 SLS 和 NLS 来说,特征值等于 1 的重数变化具有趋同性.

图 6 中较重的虚线表示的是 Pansiot-Grad 拓扑图的 NLS 分布情况,这说明,NLS 不但能够表征不同测量范围自治系统级拓扑的特征^[11],也能够表征不同测量范围路由器级拓扑的特征.

4.4 小结

从分析结果可以看出,大型 ISP 网络结构确实满足 eigenvalue-rank 幂律性质,本次测量结果验证了文献[4]和文献[14]中的 eigenvalue-rank 幂律关系,而且,对 ISP 拓扑来说,该幂律关系可能不是只对少量的特征值成立.此外,节点度分析表明,某些实际的 ISP 拓扑图不是 ER 随机图,而是一种无标度图,但谱密度分析表明,某些实际的 ISP 拓扑图不是符合 BA 生长模型的无标度图.综合有关自治系统级拓扑发展的结论^[6],我们认为,这种不考虑设计因素、具有自组织临界状态(self-organized criticality,简称 SOC)特点的 BA 生长模型不适合于描述自治系统级或路由器级 Internet 拓扑的发展过程.相对地,具有优化设计特点的 HOT(highly optimized tolerance)生长模型^[15]与 Internet 拓扑发展机制更吻合.HOT 模型权衡了产出、资源消耗和耐风险力等因素.而成本、性能、结构优化等因素在 Internet 拓扑发展过程中具有极为重要的影响.文献[16]在 Internet 文件长度分布特征形成机制方面进行了研究.这是 HOT 模型分析实例的另一个好例子.

无符号拉普拉斯谱(SLS)分析表明,对于同一个 ISP 拓扑来说,在采用端网全覆盖的探测目标选取方法^[2]的情况下,不同测量点所观察到的子图的 SLS 分布的形态可能区别不大.对于规格化拉普拉斯谱(NLS)也具有类似的特点.另外,SLS 分析和 NLS 分析为它们在区分不同的路由器级拓扑结构方面的能力提供了实验支持.

5 群集系数

设无向图 G 的节点 v 的度为 d_v ,即 v 有 d_v 个邻接节点,这些邻接节点之间最多有 $K_v=d_v(d_v-1)/2$ 条边,实际的边数记为 E_v ,则节点 v 的群集系数 C_v 定义为 $C_v=E_v/K_v$.图 G 的群集系数 C 则定义为所有节点的群集系数的平均值,即

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i.$$

根据定义^[25],对所有节点 v ,有 $0 \leq C_v \leq 1$.特别地,1 度节点的群集系数为 0,2 度节点的群集系数或者为 1,或者为 0.图 G 的群集系数满足 $0 \leq C \leq 1$.在朋友关系(friendship)网络中,群集系数的直观意义为: C_v 反映了节点 v 的朋友之间(小集团内)也是朋友的程度, C 则度量了小集团的平均群集程度^[25].

本文中我们进一步将度值 d 的平均群集系数 C_d 定义为

$$C_d = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_j,$$

这里, $n = |\{j: j \in V(G), \text{degree}(j) = d\}|$.其直观意义为: C_d 反映了相同规模的小集团的平均群集程度.不同的 C_d 则反映了不同规模小集团的相对群集程度.

上述 CERNET 测量实例拓扑图的节点度 d 及其平均群集系数 C_d 之间的关系如图 7 所示.每个图像中嵌入的小图是相应拓扑图中节点的群集系数 C_v 的分布(对数坐标.不包括群集系数为 0 的节点.同度节点中相同的 C_v 用一个点表示).

从嵌入的小图(对数坐标)中我们看到,一方面,同度节点的不同群集系数至多为 6 个,说明图中存在大量相似的小集团;另一方面,众多的非零群集系数在对数坐标下总体上沿斜率为-2.2 左右的线性带状分布.

从主图(线性坐标)中我们看到,一方面,度值较高的节点其群集系数较低,说明该高度节点较为重要,在其邻

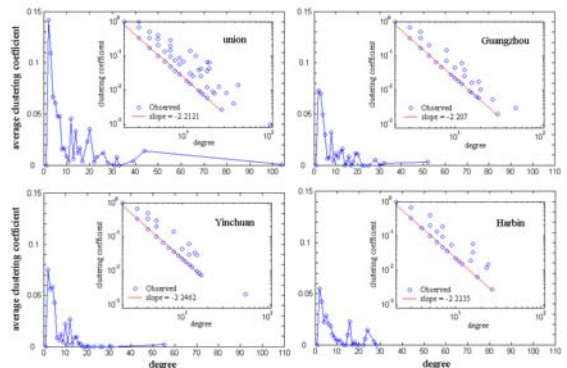


Fig.7 The distribution of the clustering coefficients of the measured topology graphs
图 7 测量拓扑图的群集系数分布

接节点之间提供了捷径(shortcut);另一方面,不同度值的群集系数 C_d 波动较大,反映了不同规模小集团的相对群集程度的高低.

另外,我们知道,谱密度 $\rho(\lambda)$ 的第 k 个矩 M_k 可以写为 $M_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\lambda_j)^k$. 从拓扑观点来看, NM_k 就是图中从起点经过 k 步再回到起点的闭路(closed walks)个数. 当 $k=3$ 时, NM_3 就是图中所包含的三角形的个数. M_3 则可以看出是按图的规模规格化的三角形的个数. 群集系数 C 与 M_3 密切相关. 图的规模相同时, 三角形越多, 图的群集系数也就越大. 上述测量实例的路由器级和路由器接口级拓扑图的群集系数 C 以及相应的规格化三角形个数 M_3 见表 3. 我们观察到, 随着 M_3 的增大, C 也增大, 基本呈线性变化. 另外, 接口合并也使群集系数增大.

Table 3 The clustering coefficient (C) and the third moment (M_3) of the spectral density of the measured topology graphs derived from the DRIMA dataset

表 3 DRIMA 数据集测量拓扑图的群集系数以及谱密度的第 3 个矩

Probing source	Router level graphs			Interface level graphs		
	Size (N)	C	M_3	Size (N)	C	M_3
Union	2 624	0.054 871	0.345 274	2 866	0.049 241	0.297 278
Guangzhou	2 066	0.029 251	0.153 921	2 261	0.027 377	0.135 338
Yinchuan	2 051	0.028 917	0.143 345	2 242	0.024 181	0.112 400
Harbin	1 788	0.021 743	0.124 161	1 961	0.017 159	0.079 551

Albert 等人^[8]的研究表明,对于采用 BA 模型生成的无标度网络,其群集系数随网络规模的增大而减小.然而,表 3 的数据表明,无论是路由器级还是接口级的测量实例拓扑图,其群集系数都随网络规模的增大而增大.类似于谱密度分析结果,这里从另一个角度对上述“Internet 路由器级拓扑结构的发展可能遵循一种不同于 BA 模型的生长过程”这一观点提供了实验支持.

6 结论和展望

Internet 拓扑结构测量是进一步分析 Internet 拓扑特征的基础. 目前跨管理域的路由器级拓扑测量主要采用 traceroute 机制. 然而, traceroute 机制本身所测量的只是活动路由, 备份路由一般不会出现在测量拓扑中, 除非测量过程中备份路由成为活动路由. 也就是说, 测量得到的是选路(routing)拓扑, 而不是物理拓扑, 尽管在许多情况下选路拓扑与物理拓扑是一致的. 同样地, 我们的测量一般也不包含备份路由. 因此, 尽管我们测量所生成的路由器级拓扑合并图中包含有 2 624 个节点以及 3 010 条边, 但这并不意味着测量的完全性. 另外, traceroute 机制无法避免链路层设备的影响.

尽管如此, 对拓扑实例的结构特征进行分析有利于对 Internet 拓扑的结构特征进行深入了解, 从而为更好地模拟 Internet 奠定基础. 本文从多点测量大型 ISP 网络拓扑结构入手, 分析了一个大型 ISP 拓扑实例的节点度分布、谱密度分布、无符号拉普拉斯谱、规格化拉普拉斯谱以及群集系数等度量特征. 分析结果表明, 大型 ISP 拓扑的节点度分布确实具有幂律性质. 但不同于自治系统级拓扑的情形, 对 ISP 拓扑的节点度分布累积分布来说, 幂律分布未必拟合得最好. 另外, Internet 路由器级拓扑的发展可能遵循一个不同于 BA 模型的生长过程.

Internet 拓扑结构特征分析受到学术界广泛关注, 人们在揭示 Internet 拓扑特征方面已经做了许多工作. 然而, 无论是自治系统级还是路由器级的 Internet 拓扑特征分析研究都还刚刚开始, 相应的分析理论还不成熟, 究竟哪些参数能够最好地刻画 Internet 拓扑结构的性质尚不清楚, 自治系统级拓扑与路由器级拓扑除了节点粒度、连接关系涵义以及拓扑层面等方面不同之外, 其拓扑特征还有哪些本质区别等等, 这些都需要通过大量的对实际拓扑测量实例而不是综合(synthesized)拓扑的分析, 结合数据挖掘、代数图论、复杂网络统计动力学理论以及网络部署中的经济因素等等, 归纳总结出典型的特征参数, 形成一套 Internet 拓扑特征分析理论, 为 Internet 的发展服务.

References:

- [1] Floyd S, Kohler E. Internet research needs better models. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003,33(1):29-34.

- [2] Jiang Y, Fang BX, Hu MZ, Zhang HL, Yun XC. A distributed architecture for Internet router level topology discovering systems. In: Fan PZ, Shen H, eds. Proc. of the 4th Int'l Conf. on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT'2003). New York: IEEE Press, 2003. 47–51.
- [3] Jiang Y, Fang BX, Hu MZ. Mapping router-level Internet topology from multiple vantage points. *Telecommunications Science*, 2004,20(9):12–17 (in Chinese with English abstract).
- [4] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1999,29(4):251–262.
- [5] Mitzenmacher M. A brief history of generative models for power law and lognormal distributions. *Internet Mathematics*, 2003,1(2): 226–251.
- [6] Chen Q, Chang H, Govindan R, Jamin S, Shenker SJ, Willinger W. The origin of power laws in Internet topologies revisited. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2002. New York: IEEE Press, 2002. 608–617.
- [7] Farkas IJ, Derényi I, Barabási A, Vicsek T. Spectra of 'real-world' graphs: Beyond the semicircle law. *Physical Review E*, 2001,64 (2):1–12.
- [8] Albert R, Barabási A. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002,74(1):47–97.
- [9] Dam E, Haemers WH. Which graphs are determined by their spectrum? *Linear Algebra and its Applications*, 2003,373:241–272.
- [10] Magoni D, Pansiot J-J. Analysis of the autonomous system network topology. *ACM Computer Communication Review*, 2001, 31(3):26–37.
- [11] Vukadinovic D, Huang P, Erlebach T. On the spectrum and structure of Internet topology graphs. In: Unger H, Böhme T, Mikler A, eds. Proc. of the Innovative Internet Computing Systems (I2CS). LNCS 2346, Berlin: Springer-Verlag, 2002. 83–95.
- [12] Gkantsidis C, Mihail M, Zegura E. Spectral analysis of Internet topologies. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2003. New York: IEEE Press, 2003. 364–374.
- [13] Medina A, Matta I, Byers J. On the origin of power laws in Internet topologies. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2000,30(2):18–28.
- [14] Siganos G, Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. Power laws and the AS-level Internet topology. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003,11(4):514–524.
- [15] Carlson JM, Doyle J. Highly optimized tolerance: A mechanism for power laws in designed systems. *Physical Review E*, 1999, 60(2):1412–1427.
- [16] Fabrikant A, Koutsoupias E, Papadimitriou CH. Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power laws in the Internet. In: Widmayer P, Triguero F, Morales R, Hennessy M, Eidenbenz S, Conejo R, eds. Proc. of the ICALP. LNCS 2380, Berlin: Springer-Verlag, 2002. 110–122.
- [17] Li L, Alderson D, Willinger W, Doyle J. A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 2004,34(4):3–14.
- [18] Pansiot J, Grad D. On routes and multicast trees in the Internet. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1998,28(1): 41–50.
- [19] Broido A, Claffy KC. Internet topology: Connectivity of IP graphs. In: Fahmy S, Park K, eds. Scalability and Traffic Control in IP Networks (Proc. of the SPIE ITCOM Vol. #4526). Washington: SPIE Press, 2001. 172–187.
- [20] Spring N, Mahajan R, Wetherall D. Measuring ISP topologies with rocketfuel. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2002,32(4):133–145.
- [21] Magoni D, Pansiot J-J. Internet topology modeler based on map sampling. In: Proc. of the 7th IEEE Symp. on Computers and Communications (ISCC 02). New York: IEEE Press, 2002. 1021–1027.
- [22] Jiang Y, Hu MZ, Fang BX, Zhang HL. An Internet router level topology automatically discovering system. *Journal of China Institute of Communications*, 2002,23(12):54–62 (in Chinese with English abstract).
- [23] Chou H. A note on power laws of Internet topology. 2000. <http://arxiv.org/abs/cs.NI/0012019>
- [24] Mihail M, Papadimitriou CH. On the eigenvalue power law. In: Rolim JDP, Vadhan S, eds. Proc. of the Randomization and Approximation Techniques: 6th Int'l Workshop (Random 2002). LNCS 2483, Berlin: Springer-Verlag, 2002. 254–262.

- [25] Watts D, Strogatz S. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998,393(6684):440-442.
- [26] CERNET Topology. 2003. <http://www.edu.cn/20010101/21585.shtml>
- [27] Lakhina A, Byers JW, Crovella M, Xie P. Sampling biases in IP topology measurements. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2003. New York: IEEE Press, 2003. 332-341.
- [28] Mehta ML. *Random Matrices*. 2nd ed., New York: Academic Press, 1991.
- [29] Goh KI, Kahang B, Kim D. Spectra and eigenvectors of scale-free networks. *Physical Review E*, 2001,64(5):1-5.

附中文参考文献:

- [3] 姜誉,方滨兴,胡铭曾. 多点测量 Internet 路由器级拓扑. *电信科学*,2004,20(9):12-17.
- [22] 姜誉,胡铭曾,方滨兴,张宏莉. 一个 Internet 路由级拓扑自动发现系统. *通信学报*,2002,23(12):54-62.

敬告作者

《软件学报》创刊以来,蒙国内外学术界厚爱,收到许多高质量的稿件,其中不少在发表后读者反映良好,认为本刊保持了较高的学术水平.但也有一些稿件因不符合本刊的要求而未能通过审稿.为了帮助广大作者尽快地把他们的优秀研究成果发表在我刊上,特此列举一些审稿过程中经常遇到的问题,请作者投稿时尽量予以避免,以利大作的发表.

1. 读书偶有所得,即匆忙成文,未曾注意该领域或该研究课题国内外近年来的发展情况,不引用和不比较最近文献中的同类结果,有的甚至完全不列参考文献.

2. 做了一个软件系统,详尽描述该系统的各个方面,如像工作报告,但采用的基本上是成熟技术,未与国内外同类系统比较,没有指出该系统在技术上哪几点比别人先进,为什么先进.一般来说,技术上没有创新的软件系统是没有发表价值的.

3. 提出一个新的算法,认为该算法优越,但既未从数学上证明比现有的其他算法好(例如降低复杂性),也没有用实验数据来进行对比,难以令人信服.

4. 提出一个大型软件系统的总体设想,但很粗糙,而且还没有(哪怕是部分的)实现,很难证明该设想是现实的、可行的、先进的.

5. 介绍一个现有的软件开发方法,或一个现有软件产品的结构(非作者本人开发,往往是引进的,或公司产品),甚至某一软件的使用方法.本刊不登载高级科普文章,不支持在论文中引进广告色彩.

6. 提出对软件开发或软件产业的某种观点,泛泛而论,技术含量少.本刊目前暂不开办软件论坛,只发表学术文章,但也欢迎材料丰富,反映现代软件理论或技术发展,并含有作者精辟见解的某一领域的综述文章.

7. 介绍作者做的把软件技术应用于某个领域的工作,但其中软件技术含量太少,甚至微不足道,大部分内容是其他专业领域的技术细节,这类文章宜改投其他专业刊物.

8. 其主要内容已经在其他正式学术刊物上或在正式出版物中发表过的文章,一稿多投的文章,经退稿后未作本质修改换名重投的文章.

本刊热情欢迎国内外科技界对《软件学报》踊跃投稿.为了和大家一起办好本刊,特提出以上各点敬告作者.并且欢迎广大作者和读者对本刊的各个方面,尤其是对论文的质量多多提出批评建议.