

对等网络拓扑测量与特征分析*

王 勇^{1,2+}, 云晓春^{1,3}, 李奕飞⁴

¹(中国科学院 计算技术研究所,北京 100080)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

³(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

⁴(四川大学 计算机学院,四川 成都 610064)

Measuring and Characterizing Topologies of P2P Networks

WANG Yong^{1,2+}, YUN Xiao-Chun^{1,3}, LI Yi-Fei⁴

¹(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

²(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

⁴(School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-81854476, E-mail: wangyong@software.ict.ac.cn, <http://www.ict.ac.cn>

Wang Y, Yun XC, Li YF. Measuring and characterizing topologies of P2P networks. *Journal of Software*, 2008,19(4):981-992. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/981.htm>

Abstract: Measuring and characterizing the topological properties of peer-to-peer networks will benefit the optimization, management of the P2P systems. It seems infeasible to capture a complete and precise snapshot of P2P overlay networks due to the variety of P2P protocols and dynamics of the servers. Studying the details of P2P protocols and analyzing the specific P2P overlay network instance become an alternative method for this goal. In this paper, the measured Gnutella network topology is basically taken as an example. The architecture and performance of the distributed crawling system (called D-Crawler system) with feedback mechanism is presented. The properties of degree-rank distributions and degree-frequency distributions of the measured topology graphs are analyzed in detail. The small world characteristics for Gnutella network are discussed. The results show that the P2P overlay network topology characters are closely related to the P2P protocols and clients' behaviors. Gnutella network shows different characters in each tier. The top level graphs fit the power law in degree-rank distribution, but follow the Gaussian function in degree-frequency distribution. The bottom level graphs show weak power law in its degree-rank distribution, but are power law in its degree-frequency distribution. Fitting results indicate that power law could fit better for the degree-rank distribution and degree-frequency distribution of bottom level graphs, Gaussian could describe the degree-frequency distribution of the top level graphs. Gnutella overlay network has the small world property, but it is not the scale-free network, its topology may have developed over time following a different set of growth processes from those of the BA (Barabási-Albert) model.

Key words: P2P overlay network; topology measurement; power law; clustering coefficient; small world

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60403033 (国家自然科学基金)

Received 2006-09-13; Accepted 2007-01-23

摘要: 测量分析对等网络(peer-to-peer networks)拓扑特征是解决 P2P 优化、网络监管等问题的基础.对等网络是一类大规模、自组织、并且高度动态的复杂网络系统.准确、完整地测量所有对等网络拓扑面临很大困难.研究对等网络的协议特点,分析特定 P2P 拓扑实例成为认识 P2P 拓扑特性的一种可选研究方案.以 Gnutella 网络为测量对象,定义了对等网络拓扑测量系统准确性、完整性的衡量指标,设计、实现了基于正反馈的分布式 Gnutella 拓扑爬行器——D-Crawler;分析了 Gnutella 网络拓扑图的度等级分布特征、度频率分布特征以及小世界特性.实验和分析结果表明,对等网络拓扑图属性特征与其使用的协议和客户端软件行为密切相关;Gnutella 网络中不同层次的节点之间的拓扑关系表现出不同的特性:上层节点组成的子图具有度等级幂律特征,但在其度频率分布上却呈现出正态分布的特性;下层节点在度等级分布上的幂律特征表现不强烈,而在其度频率分布特征上具有明显的幂律特性.拟合结果表明:幂律能够较好地拟合度等级分布和下层节点度频率分布,然而对于上层节点度概率密度分布,Gaussian 拟合效果最好.Gnutella 网络具有小世界特性,即:较大的聚集系数和较小的特征路径长度,但它不是无尺度图,不符合 BA(Barabási-Albert)生长模型,其发展遵循一种不同于 BA 模型的生长过程.

关键词: 对等网络;拓扑测量;幂律;聚集系数;小世界

中图法分类号: TP393

文献标识码: A

主机计算、存储能力和网络带宽的不断提高,使对等技术重新成为人们关注的焦点.Internet中出现了多种基于P2P技术的覆盖网络,它们拥有强大的用户群体,影响着整个Internet的行为^[1-3].对于如此庞大的一类Internet覆盖网络,深入了解其拓扑结构性有助于准确地模拟,从而更好地设计和发展对等网络.同时,通过分析对等网络的拓扑特性,有助于网络安全和对等网络监控等技术的发展.此外,研究P2P网络特性可以验证复杂网络系统研究中已有的理论结论.通过分析单个网络图,可以了解对等网络各种拓扑特性(例如,度分布特性、网络直径等),而对多个网络图进行跟踪分析,可以获得对等网络的动态特性(例如,网络结构的变化、节点上/下线情况等).分析P2P网络的拓扑特性,需要构造网络拓扑爬行器,爬行器采用与网页爬虫类似的方法,依次询问对等网络中的每个节点,获取节点之间的邻接关系.然而,完整、准确地获取对等网络拓扑结构还存在很大困难,主要原因在于:(1) 对等网络具有极强的动态特性^[4].这要求爬行器能够快速访问网络中的节点,但爬行器的速度不仅受限于自身的网络访问能力,还与其爬行过程中交互节点的网络访问速度有关.在爬行器拓扑获取期间,网络的拓扑数据总会发生或多或少的形变;(2) P2P网络中存在一些不可达节点^[5](例如,节点在防火墙后面、在NAT(network address translation,网络地址转换)之后等).这些节点本属于P2P网络,但爬行器不能获取其邻居信息,导致获取的网络拓扑不完全.因此,对等网络拓扑爬行器设计的关键问题是寻求测量结果准确性与完整性的合理折衷.

Gnutella网络是一类典型的非结构化对等网络,拥有百万级在线用户群,用户分布广泛,测量具有代表性.此外,Gnutella网络采用了新的协议,网络呈现出新的拓扑特性,需要重新深入分析拓扑结构.本文通过分析已有的研究工作^[4-9],利用复杂网络理论和代数图论理论研究成果对Gnutella网络进行测量,分析获取的Gnutella网络拓扑图属性特征.相应的测量、分析方法可以应用于其他对等网络拓扑测量实例.

1 背景介绍

对网络拓扑性质的研究有 3 个重要的里程碑:(1) 1960 年,Erdős和Rényi提出了ER随机图模型理论^[10].1999 年以前,人们主要采用基于ER模型模拟的方法研究大规模网络拓扑性质;(2) 1998 年,Watts和Strogatz^[11]在《Nature》杂志上发表文章,引入了小世界(small-world)网络模型,以描述从完全规则网络到完全随机网络的转变;(3) 1999 年,Barabási和Albert在《Science》上发表文章^[12],提出了无标度模型,指出许多实际的复杂网络的连接度分布具有幂律形式.此外,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.

Faloutsos等人^[13]采用幂律(power-law)模型来刻画Internet上自治系统级和路由器级的拓扑结构特征,并提出了度等级(degree-rank)幂律、度频率(frequency-degree)幂律和特征值等级(eigenvalue-rank)幂律.由于度频率幂律相当于考察的是度概率密度函数(probability density function),而累积分布比概率密度具有更好的统计鲁

棒性,因此,文献[14]分析了频率 f_d 的补累积分布函数(complementary cumulative distribution function) D_d 与度 d 的关系,发现 D_d 与 d 也具有幂律关系,即 $D_d \propto d^{-\rho}$,称 ρ 为度指数(degree exponent),称该幂律为CCDF(d)——Degree幂律,并使用度指数 ρ 刻画拓扑图的度分布特征。

在对等网络拓扑特性分析方面,研究还不够深入,主要的工作集中在以Gnutella为代表的非结构化对等网络测量上。Jovanovic^[15]在2001年对早期的Gnutella网络拓扑进行过测量,发现Gnutella网络拓扑节点的分布呈现幂律和小世界特性,受当时Gnutella网络发展的限制,只捕获到了1000个左右的节点,数据的说服力有限。2002年,Saroiu等人^[16]测定了加入到Napster和Gnutella网络的端用户主机的数量和分布特性,分析了两个网络中节点的带宽、文件共享的数量分布等特性,指出,加入到这两个系统中的节点存在重要的异构特性,并且缺乏互操作性,限于当时对等网络协议,文中获取的节点数目平均在11K左右,也没有详细分析网络的拓扑性质。文献[17]对Gnutella网络的节点连接度和网络流量进行了详细的分析,构造了分布式Gnutella网络爬行器,能够在几小时内获取约30K节点信息。通过分析,提出Gnutella网络的节点连接度分布符合幂律。随着Gnutella网络的不断发展,其网络特性发生了根本性变化,Stutzbach等人^[4-6]分别在2004年和2005年发表了多篇关于Gnutella网络测量的论文,针对Gnutella网络的分层特性,构造了高速拓扑爬行器。在6台Linux Box上,其构造的爬行器节点获取速度可以达到每分钟140K,分析了Gnutella网络中超级节点(ultra-peers)、叶子节点(leaf-peers)等度的连接特性,指出Gnutella网络节点度分布是不服从幂律的。2006年,Xie^[18]等人将Gnutella网络划分为Mesh和Forest两层,提出Mesh层节点的度等级分布、度频率分布以及Forest层中树的大小分布等都具有幂律性质。在国内,对等网络的测量研究还不多见。一方面,对等网络研究刚刚起步,测量对等网络还比较困难;另一方面,相应的拓扑结构特性分析理论还不成熟。哈尔滨工业大学的刘刚^[8]构造了支持Gnutella v0.4协议的拓扑爬行器,分析多次拓扑快照,总结了Gnutella网络的小世界特性,验证了网络中存在度指数幂律、特征指数幂律等特性。

综上所述,当前对P2P网络拓扑特性的认识还很不成熟,仅仅处于网络测量与数据观察层面,还没有从理论上深入分析对等网络拓扑特性。对于同一个网络拓扑图,其拓扑特性是多方面的,研究表明^[19],虽然节点度分布能够区分ER随机图(指数分布)和无标度图(幂律分布),但具有相同Degree-Rank幂律分布的无标度网络可以拥有完全不同的结构。因此,仅仅依靠节点度的幂律分布来刻画对等网络的拓扑结构特征还不够,需要与其他度量结合起来。Mitzenmacher^[20]研究了幂律和对数正态分布的模型,发现对数正态分布可以向幂律分布转化。Chou^[14]找到了等级指数 R 与出度指数 O 之间的理论关系,即: $R \approx 1/(O+1)$ 。文献[21]进一步阐述了等级指数 R 、出度指数 O 和度指数 D 三者之间的理论关系,即: $D \approx O+1, R \approx 1/D$ 。Mihail等人^[22]研究了图的特征值与节点度之间的关系,指出:在节点度具有幂律分布的图中,图的特征值 λ_i 以及节点度 d_i 的降序序列中,较大的特征值与较大的度之间存在 $d_i \approx \lambda_i^2$ 关系。文献[23]提出,无符号拉普拉斯谱能够较好地地区分相同规模的不同图。Watts^[11]等人采用聚集系数(clustering coefficient)和平均路径长度来衡量图的小世界特性。在其他方面,还有利用平均离心率、平均跳距、最大连通子图、网络直径等衡量网络拓扑的性质。

对等网络拓扑实例的特征分析研究还处于起步阶段,需要通过大量测量实际P2P覆盖网络拓扑,分析其拓扑图的共性及各自特点,从而能够深化对P2P网络拓扑结构的认识,为对等网络模拟、安全保障、协议优化、路由算法设计等提供有力的支持。

2 Gnutella 网络拓扑测量

Gnutella 的网络结构如图1所示,网络中同时存在3类节点,即:

- (1) 负责查询消息路由的超级节点,这类节点在网络中占少数;
- (2) 连接到超级节点上,能力较弱的叶子节点,叶子节点将自己共享的内容的哈希值上传到与其连接的超级节点上,不负责查询消息的转发工作;
- (3) 尚未实现超级节点功能的传统节点(legacy peers),这类节点不能与叶子节点相连,只能和网络中的超级节点建立连接。

本文把超级节点与传统节点一并称作 Gnutella 网络的上层节点,对应地,叶子节点被称作下层节点.本文将等同使用 Ultra 节点和上层节点、叶子节点和下层节点两组名称.

本文根据 Gnutella v0.6 协议特性设计了基于正反馈的分布式对等网络拓扑获取系统——D-Crawler.系统

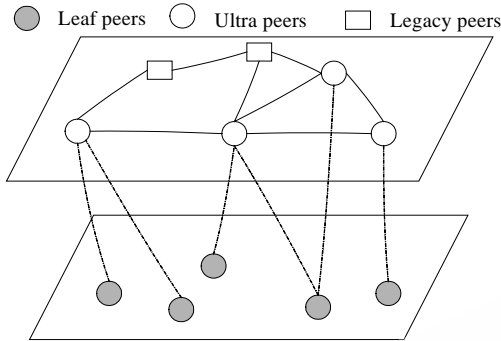


Fig.1 The two tier system of Gnutella network

图 1 Gnutella 网络的两层结构

包括拓扑信息采集、数据分析、系统输出反馈这三个部分.其中,拓扑信息采集并行采集网络中的节点及邻接关系数据,存入网络拓扑数据总表;数据分析部分根据网络拓扑总表,通过数据后处理剔除测量过程中引入的部分误差数据,提取 Gnutella 网络拓扑上层节点度概率密度分布特征和节点度排名信息,将结果发送给系统输出反馈模块;后者根据上层节点度排名信息,调整拓扑信息采集部分的网络入口节点集合,同时,计算测量系统连续两次快照数据的稳定性指数 S (本文后面加以说明)作为判定拓扑数据是否“有效”的依据.当稳定性指数 S 满足用户设定的阈值时,输出网络拓扑关系数据(标识获取的网络拓扑总表为“有效”).各部分

之间的逻辑关系如图 2 所示.

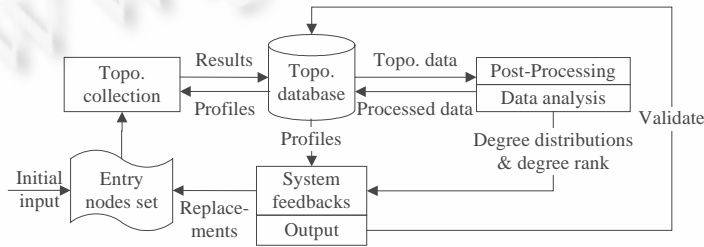


Fig.2 The framework of D-Crawler system

图 2 D-Crawler 系统逻辑结构

通常情况下,数据获取时大约 40% 左右的超级节点不能与 D-Crawler 直接建立连接.其原因有两个:(1) 节点被 D-Crawler 访问时已经下线,不在 Gnutella 网络内,这种节点约占 2%~3%;(2) 节点处于防火墙背后或由于其他原因(例如节点忙碌)拒绝 TCP 连接请求,约占 25%~34%.另外,在数据获取期间,大约有 1% 的节点状态发生了改变(由叶子节点转变为超级节点,或相反).基于上述原因,在作进一步拓扑特性分析之前,还需要对获取的数据进行后处理,主要包括:(1) 忽略网络中拒绝连接的节点;(2) 获取的拓扑图转化为无向拓扑(节点间的 TCP(transfer control protocol)连接是双向的);(3) 忽略叶子节点中,声称自己是另一个超级节点的邻居的节点;(4) 忽略叶子节点中,声称自己是另一个叶子节点的父亲节点.数据后处理中,第 2 类操作影响 5% 的拓扑数据,第 3 类和第 4 类操作共影响的数据不超过 1%.

D-Crawler 能够在单台 P4 CPU 2.8GHz/512M RAM 的机器上以 16K/分钟的速度访问 Gnutella 网络中的节点,节点地址信息的获取速度为 100K~160K/分钟.通过两台机器并行,能够在 15 分钟内获得超过 1.5M 节点信息.2005 年 11 月~2006 年 3 月期间,本文在网通网上获取了几百个 Gnutella 网络拓扑快照.表 1 比较了当前 4 个主要的 P2P 网络拓扑爬行器与本文 D-Crawler 系统节点获取速度和硬件资源需求,从表中可以看出, D-Crawler 系统能够利用较少的硬件资源,在短时间内获得大量的节点数据,节点信息获取速度较高.

本文定义了拓扑图快照完整性和准确性衡量指标.

定义 1. 设 N_{max}, E_{max} 分别表示网络中节点和边的总数; n, e 为测量系统当前获取节点、边的数量,定义拓扑数据完整性指数 ϵ 为

$$\varepsilon = \frac{\frac{n}{N_{\max}} + \frac{e}{E_{\max}}}{2}$$

ε 描述了测量系统在某一时刻获取的拓扑数据占网络总体的比例.实验分析表明,当爬行时间大于 30 分钟时,新增边、点获取速度非常小(小于 0.3K/分钟).因此在实际应用中,选择测量系统 30 分钟获取的节点和边的总数分别作为 N_{\max}, E_{\max} .

定义 2. 同时做两次反向爬行(back-to-back crawling),获取拓扑图 $G_0=\{V_0, E_0\}, G_1=\{V_1, E_1\}$.定义 G_0, G_1 的点差异集合 $V_d=\{v|v \in (V_0-V_1) \text{ 或 } v \in (V_1-V_0)\}$,边差异集合 $E_d=\{e|e \in (E_0-E_1) \text{ 或 } e \in (E_1-E_0)\}$.

定义 3. 设 δ_e 为集合 E_d 中元素个数, δ_v 为 V_d 中元素个数, N, E 分别为 G_0, G_1 节点数和边数的均值.定义拓扑数据形变指数 δ 为

$$\delta = \frac{\delta_e + \delta_v}{\frac{E}{N}}$$

δ 反映测量系统运行期间,拓扑图微观结构变化情况.测量系统越准确, δ 值越小.

定义 4. 设 x, y 分别为 G_0, G_1 上层节点度排名前 K 的节点分布序列,则拓扑数据稳定性指数 S 定义为

$$S = \left| \frac{K \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[K \sum x^2 - (\sum x)^2] \cdot [K \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \right|$$

拓扑数据稳定性指数 S 衡量连续两次快照拓扑图 G_0, G_1 节点度分布序列的相似程度,从而比较拓扑图在宏观结构上的一致性. S 越大,说明测量系统获取的拓扑图越稳定,数据越可靠.

Table 1 Comparison of different crawling systems

表 1 爬行器系统性能比较

System name	Crawling duration	Nodes achieved	PCs required
D-Crawler	10~15 minutes	1.5M~3M	2 clients, 1 server
Cruiser ^[4]	7 minutes	700K~1.0M	6 clients, 1 server
Crawler ^[7]	30 minutes	100K~200K	1 pc
Jovanovic ^[15]	NA	1K	NA
Saroiu ^[16]	About 192 hours	About 1.2M	1 pc

本文使用定义 1~定义 4 提出的衡量方法,通过屏蔽 D-Crawler 系统的反馈功能模拟传统的拓扑爬行器,分析拓扑爬行器测量结果的准确性和完整性.图 3 显示了使用反馈功能和不使用反馈功能时,系统获取的拓扑数据完整性和准确性的比较.从图中可以看出:使用反馈功能后,系统具有较好的节点信息获取速度,能够在短时间内获得较高的完整性指数 ε .同时,形变指数 δ 和稳定性指数 S 比较分析显示:D-Crawler 系统获取的拓扑数据具有更好的准确性,数据稳定.

通过对上百个 Gnutella 网络拓扑快照数据的分析,本文随机选取 3 组拓扑快照,观察到的节点数、边数和网络状态等统计信息见表 2.在此基础上,进一步对这 3 组测量实例的拓扑特性进行分析.

Table 2 The overall information of Gnutella snapshots

表 2 Gnutella 网络拓扑数据概要信息

	2005-11-25	2005-12-10	2005-12-20	Average
Total	1 758 761	1 729 613	1 727 945	1 738 773
Utral peers	463 885	466 810	465 959	465 551
Utral peers (%)	26.38	26.99	26.97	26.78
Leaf peers	1 294 876	1 262 803	1 261 986	1 273 221
Leaf peers (%)	73.62	73.01	73.03	73.22
Successful connections	73 941	71 842	71 374	72 385
Successful connections (%)	58.86	60.07	58.92	59.28
Ave. degree of utral peers	74.01	74.02	74.28	74.10
Ave. degree of leaf peers	1.38	1.38	1.38	1.38

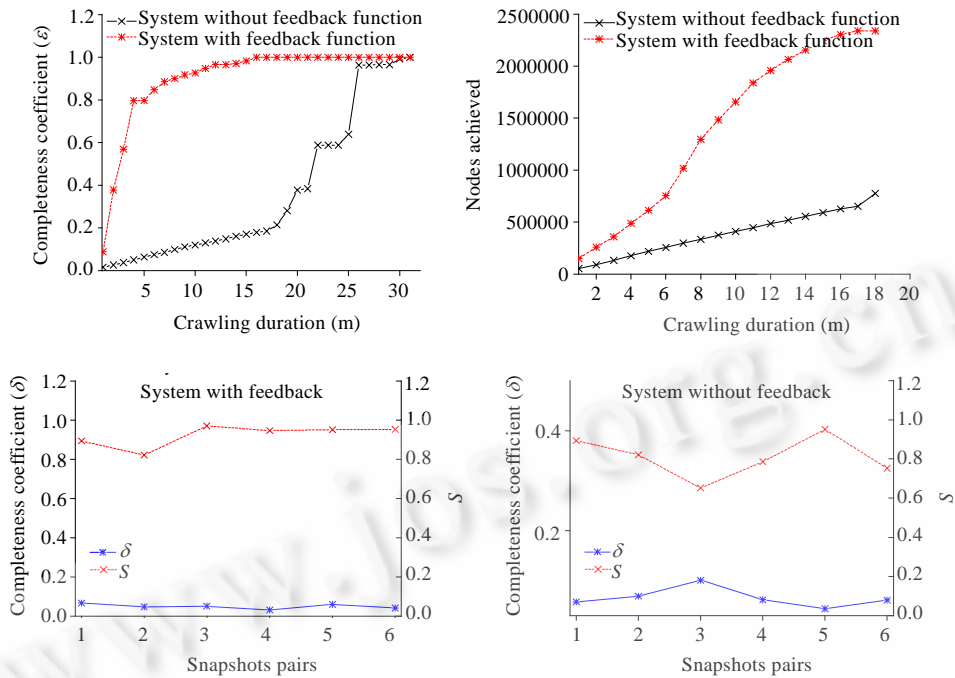


Fig.3 Topology accuracy and completeness of the systems with and without feedback
 图3 使用反馈功能和不使用反馈功能系统获取的拓扑数据准确性和完整性对比

3 节点度分布特征

节点的度分布特征能够反映 Gnutella 网络的拓扑特性,同时可以用于观察 Gnutella 网络拓扑特性随时间推移的对比分析.本节从度等级分布和度频率密度分布两个侧面分析 Gnutella 网络的度分布特性.

3.1 度等级分布(degree-rank distribution)特征

Gnutella 网络分为上/下两层节点(见第 2 节),各层中的节点实现的功能、采取的连边策略都不相同,需要分别考察上层节点之间的度等级分布、叶子节点的度等级分布以及两层之间的度等级分布.图 4 显示了这 3 种度等级分布特征和拟合情况(两个坐标轴均为对数坐标).从图中可以看出:(1) Gnutella 网络中上层节点的度(ultra to ultra peers)与其降序序列中的等级之间分三段符合幂律分布,各段的相关系数绝对值 ACC(absolute correlation coefficient value)都在 0.944 以上;(2) 网络中 Ultra 节点对叶节点度数(ultra to leaf peers)与其降序序列中的等级之间分两段符合幂律分布,各段的相关系数绝对值 ACC 均在 0.915 以上;(3) 叶节点连接的 Ultra 节点度(leaf to ultra peers)与其降序序列中的等级之间分三段符合幂律分布,但是只有中间一段拟合得较好(ACC=0.97437),两端的相关系数绝对值 ACC 均小于 0.87.

图 4 的叶节点度等级分布(leaf to ultra peers)显示,排名前 100 的节点度数均在 1 000 以上,根据 Gnutella 协议对叶子节点的定义,作为一般用途的叶子身份客户端,其连接的超级节点数目较少.经过单节点身份确认,图中出现度数大于 1 000 的叶子节点,其主要原因是:(1) Gnutella 网络由于其协议开放的特性,成为非结构化 P2P 网络研究的天然测试床,这些超大度数的叶子节点是 P2P 网络中实验用途的监测节点;(2) Gnutella 网络的动态特性使得叶子节点上/下线频繁,出现网络拓扑的时间堆叠现象.以往的研究工作表明^[4-7],可以通过缩短爬行器的爬行时间来减少网络拓扑的数据变形.在分析网络动力特性时,应该忽略这些测试节点.

另外,测量结果显示,叶子节点连接 Ultra 节点度中,度数不大于 2 的节点比例介于 82.17%~84.31%之间,这与表 2 中叶节点的平均度数统计结果相一致.而上层节点中,度数在 30~100 之间的节点所占比例约为 62%.结合

图 4 中上层节点度等级分布可以看出,上层节点度排列得比较平缓,说明上层节点的度分布得比较均匀.有关 Gnutella 网络的节点度分布特性参见第 3.2 节.实验还发现,对不同的网络拓扑快照,在幂律成立的情况下,如果排名靠后的节点个数的比例增大(减少),则等级指数的绝对值也会增大(减少),等级指数变小(变大),即等级指数 R 反映了网络拓扑图节点度分布的变化情况.

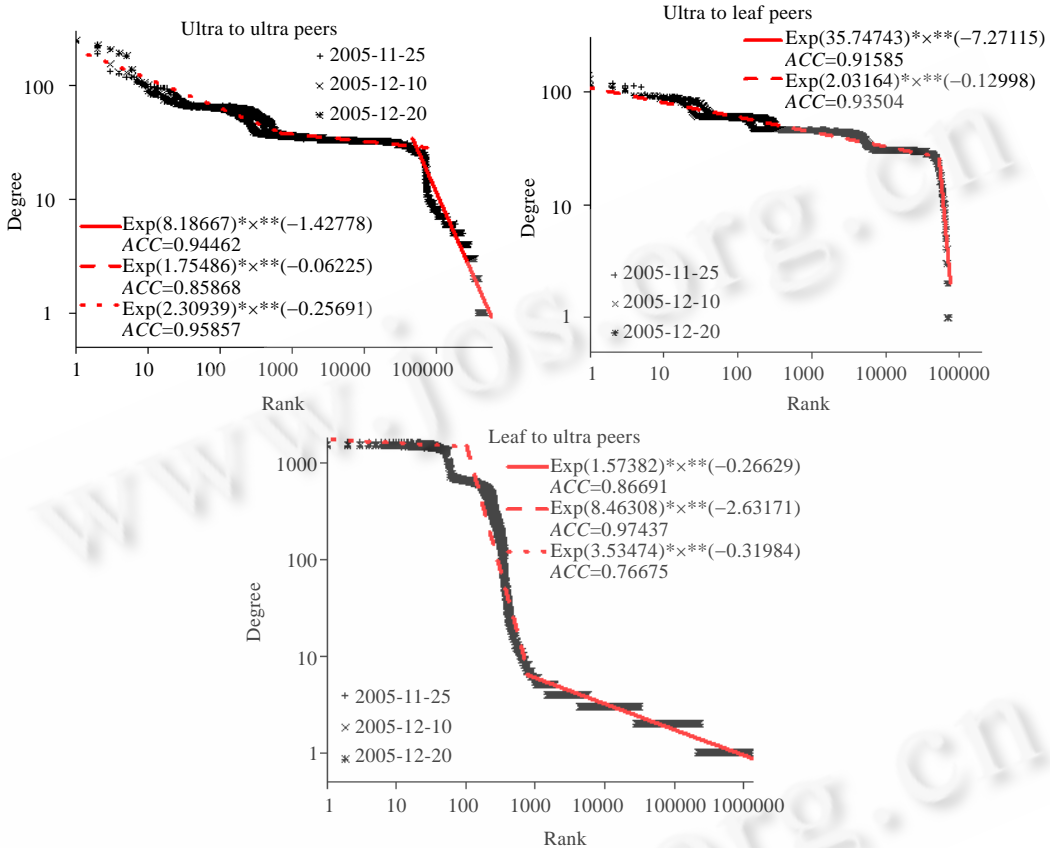


Fig.4 The degree-rank power law fitness of the measured topology graphs (in log-log plot)

图 4 快照拓扑图的 Degree-Rank 幂律拟合(对数坐标)

3.2 度的频率分布(frequency-degree distribution)特征

刻画 Gnutella 网络拓扑度频率分布特性,需要分别研究上层节点、上层节点与叶子节点之间的度分布特性.为了观察 Gnutella 网络节点度分布符合哪种分布模型,本节考察节点度的概率密度分布(概率密度分布和频率分布曲线是平移的关系),采用幂律分布、高斯(Gaussian)分布、双指数(double exponential)分布和韦布尔(Weibull)分布.运用最小二乘原理,根据残差平方和来判断拟合程度,残差平方和越小,拟合程度越好.表 3 列出了 4 种分布的概率密度函数 PDF(probability distribution function)及其补累积分布函数 CCDF(complementary cumulative distribution function).

图 5 显示了 Gnutella 网络测量实例的上层节点度概率密度分布、上/下层之间节点度概率密度分布以及上述 4 类函数的拟合情况.图中数据显示:(1) 叶节点连接父亲节点(leaf to ultra peers)的度概率分布具有较强的幂律特性,在对数坐标下,从绝对相关系数 ACC 来看,幂律拟合效果最好(ACC=0.9885),韦布尔拟合较差;(2) Ultra 节点对叶节点(ultra to leaf peers)度概率密度呈“钟型”分布,在线性坐标下,高斯分布能够达到较好的拟合效果(ACC=0.9368),双指数分布拟合次之.通过考察 Gnutella 网络中不同版本的客户端邻居维护策略,约占总数 70%

的 Limewire 客户端软件有意限制了客户端连接的叶子节点总数,是呈现这种“钟型”分布的重要因素;(3) 上层节点之间(ultra to ultra peers)的度概率密度分布呈现“双峰正态分布”特性,在线性坐标下,使用两个高斯分布函数可以很好地拟合($ACC=0.9976$),双指数分布函数拟合得也比较好($ACC=0.8623$).通过分析不同版本的度分布情况,发现这种“双峰正态分布”是由于 Limewire 软件客户端在 32 周围的正态分布与 Bearshare 软件客户端在 25 周围的正态分布叠加的结果.

Table 3 Four PDFs and their CCDFs

表 3 4 类概率密度函数及其补累积分布函数

Function's name	PDFs	CCDFs
Power law	$f(x) = Cx^\alpha, C > 0, \alpha < -1$	$F'(x) = -\frac{C}{\alpha+1}x^{\alpha+1}$
Gaussian	$f(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right\}$	$F'(x) = \Phi\left(-\frac{x-x_0}{\sigma}\right)$
Double exponential	$f(x) = \frac{1}{2\beta} \exp\left\{-\left \frac{x-x_0}{\beta}\right \right\}$	$F'(x) = \begin{cases} 1 - \frac{e^{-x-x_0}}{2}, & x < x_0 \\ \frac{e^{-(x-x_0)}}{2}, & x \geq x_0 \end{cases}$
Weibull	$f(x) = \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\gamma-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\gamma\right\}$	$F'(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\gamma}$

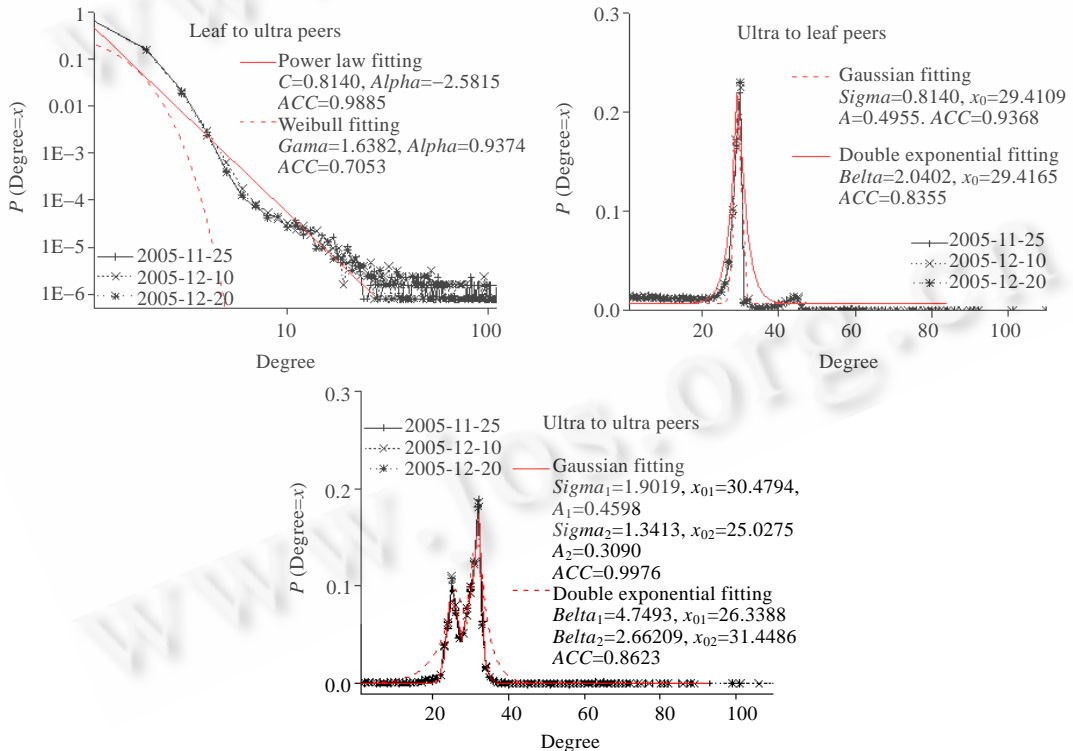


Fig.5 The PDF fitness of the measured topology graphs

图 5 快照拓扑图的度频率分布与拟合

Ultra 节点承担 Gnutella 网络主要的消息路由功能,是整个网络的骨架,观察结果(2)和观察结果(3)与文献 [5,6]是一致的,说明 Gnutella 网络节点度分布得比较均匀,节点之间的地位比较“平等”,主要受客户端软件邻居维护策略的影响.

3.3 小 结

对等网络具有很强的动态特性,对拓扑数据的采集时间有较严格的要求.随着时间的延长,采集的数据会出现不同程度的变形,选择合适的采集时间有助于减少数据的畸变.节点的度等级分布特征和度频率分布特征说明,Gnutella 网络上/下层网络的特性存在很大差异,Ultra 节点组成的上层网络度分布具有比较明显的正态分布特性,反映了整个上层网络拓扑结构比较均匀,节点之间拥有比较“平等”的度关系.然而,Leaf 节点连接 Ultra 节点的网络拓扑结构是极不均匀的,大量节点具有较小的度,拥有很高度数的节点个数则很少.从而在分析 Gnutella 网络拓扑结构时,一般意义的最大、最小以及平均度量能够刻画上层的 Ultra 节点之间组成的拓扑网络,但是对于叶节点组成的网络,使用幂律指数是一种较好的选择.

测量分析结果显示,Gnutella 网络整体的度频率分布不满足幂律性质,这验证了文献[5]的结论.但是,叶节点的度频率分布、网络的度等级分布等却大不相同,叶节点的度频率分布有长尾(long-tailed)的特点,同时可以看到,拓扑的度等级分布是分段符合幂律性质的,这与 Internet 的度等级分布特性也不一样.

4 小世界(small world)特性

对无向图 G 中的节点 v ,设其度为 d_v ,其 d_v 个邻接点之间实际的边数为 E_v ,最多有 $K_v=d_v(d_v-1)/2$ 条边,则节点 v 的聚集系数 C_v 定义为 $C_v=E_v/K_v$.图 G 的聚集系数 C 定义为所有节点的聚集系数的平均值,表示为

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

根据定义,对所有的节点 v 有 $0 \leq C_v \leq 1$.特别地,1度节点的聚集系数为0,2度节点的聚集系数为1(两个邻居间有连接)或者为0(两个邻居之间没有连接).图 G 的聚集系数 C 满足 $0 \leq C \leq 1$.在朋友关系(friendship)网络中,聚集系数的直观意义为: C_v 反映了节点 v 的朋友之间也是朋友的程度(朋友之间联系紧密程度), C 则衡量了整个朋友圈子的联系紧密程度^[11].

给定一个无向图 G ,其特征路径长度定义为网络中所有节点到其他节点最短路径长度的平均值 L ,它是一个从全局角度出发描述任意两点间距离的特征参数.

同时拥有大聚集系数(clustering coefficient)和小的平均距离这两个统计特征的网络,是具有小世界特性的网络.给定图 G ,可以通过比较 G 对应的随机图(具有相同的点数和边数,节点之间随机连接) G_{random} 的聚集系数 C_{random} 和平均特征路径长度 L_{random} ,定性地衡量图 G 的小世界特性,即:当图 G 的聚集系数 C 远大于 C_{random} ,并且图 G 的平均特征路径长度 L 与 L_{random} 相近时,则认为图 G 是具有小世界特性的.

最近研究表明,多数生物网络、人类社会中的关系网络(例如演员之间的合作关系)、电力传输网、Internet 上的 WWW 网络等都呈现小世界特性.Jovanic 等人文献[15]中指出,2000年,其测量的 Gnutella 网络也具有小世界特性.本节将再次验证在 Gnutella 网络节点数和边数都不断增长的情况下,网络呈现出小世界特性.

图 6 显示了 3 次 Gnutella 拓扑快照数据的上层节点之间最短路径概率密度分布情况,坐标均为线性坐标.由于 Gnutella 网络拓扑数据庞大(节点个数大于 1.5M),计算整个网络的特征路径的时间和空间复杂度非常高,故对每一个拓扑快照数据,随机选择了 500 个节点代表整个网络计算其特征路径长度.从图 6 可以看出,在 Gnutella 网络拓扑图中,超过 63.3%的节点之间的最短路径长度为 4,最短路径长度分布服从正态分布规律.因此,可以使用所有节点的平均路径长度,即网络的特征路径长度来刻画 Gnutella 网络节点间最短路径特征.

表 4 列出了 3 次 Gnutella 网络快照的上层节点之间的聚集系数范围 $C_{gnutella}$ 以及平均特征路径长度 $L_{gnutella}$,同时也列出了与各次快照拓扑图对应的随机图的聚集系数范围 C_{random} 和特征路径长度的均值 L_{random} .此外,表中还包含了文献[15]于 2000 年测量的 Gnutella 网络数据和 3 类典型的具有小世界特性的网络拓扑图数据^[24].从表中可以看出,3 次测量的 Gnutella 网络拓扑图满足 $C_{gnutella} \gg C_{random}$,且 $L_{gnutella} \approx L_{random}$,亦即 Gnutella 网络具有小世界特性.另外还可以看出,Gnutella 网络的聚集系数比文献[16]的测量结果有所增长,这表明 Gnutella 网络在不断长大的同时,变得越来越紧密.这一现象不利于在 Gnutella 网络中使用洪泛消息路由机制,当洪泛消息的 TTL=2 时,Gnutella 网络比其对应的随机网络更容易产生冗余消息.如何建立具有较小的聚集系数的非结构化对等网络

是目前的一个热点问题.

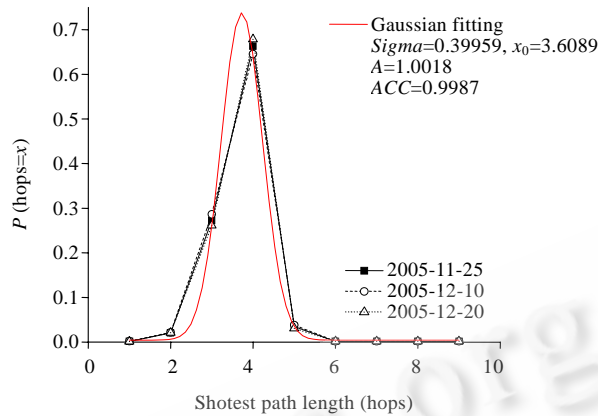


Fig.6 The PDF fitness of the shortest path length

图 6 快照拓扑图的最短路径分布与拟合

Table 4 Small world characteristics

表 4 小世界特性

Name	$C_{Gnutella}$	C_{random}	$L_{Gnutella}$	L_{random}
Gnutella network	0.03~0.05	0.00013~0.00017	3.68~4.36	3.93~4.27
Original Gnutella ^[15]	0.02~0.03	0.002~0.006	3.30~4.42	3.66~5.54
Movie actors	0.79	0.00027	3.65	2.99
Power grid	0.08	0.005	18.7	12.4
C. Elegans	0.28	0.05	2.65	2.25

此外,文献[25]指出,对于采用 BA(Barabási-Albert)模型生成的无尺度网络(scale free network),其聚集系数将随着网络规模的扩大而减小.但是,通过本次测量结果与文献[15]测量结果比较,随着 Gnutella 网络节点规模的扩大,其聚集系数也相应增大.这从另一个层面上验证了本文第 3 节中上层节点度分布不符合幂律特性的结论,也就是说,Gnutella 网络的发展遵循的不是 BA 模型描述的生长过程.

5 结论与展望

测量对等网络是进一步分析 P2P 网络拓扑特性的基础.由于对等网络的多样性和高度的动态特性,在测量技术上存在很大困难.同时,测量对等网络受到 Internet 实际链路状态的影响,当 Internet 网络状态不稳定时,会导致测量的对等网络数据发生强烈振荡,使得测量的数据不能准确反映实际的对等网络拓扑结构.

深入分析 P2P 网络拓扑结构特征有利于进一步认识对等网络,为对等网络模拟、安全事件控制、路由协议优化等奠定基础.本文的主要贡献是:定义了对等网络拓扑测量系统准确性、完整性衡量指标,设计实现了基于正反馈的分布式 Gnutella 拓扑爬行器——D-Crawler;进而分析了网络中各层节点拓扑的度等级分布、度频率分布等度量特征,同时分析验证了 Gnutella 网络中的小世界特性.测量分析显示:

(1) 基于正反馈机制的 D-Crawler 系统能够利用较少的硬件资源快速地获取 Gnutella 网络拓扑快照图,数据完整、准确;

(2) Ultra 之间的度等级分布符合三段幂律性质,度频率分布不服从幂律特性,呈“钟型”分布;

(3) Ultra 节点对叶节点的度等级分布符合两端幂律性质,度频率也呈“钟型”分布;

(4) 叶节点连接的 Ultra 节点数目的度等级分布比较不规则,呈三段幂律特性,其中,度数很大的叶节点主要是 Gnutella 网络中用于测试目的的节点,其度频率分布具有幂律性质;

(5) Gnutella 网络拓扑是具有小世界特性的,但不同于 Internet 拓扑,其发展不遵循 BA 模型的生长过程.

对等网络测量和拓扑特性分析受到越来越多的关注,还有很多未知等待人们进一步去发现,相应的理论研

究亦有待深入.如何发现不同种类、规模的对等网络拓扑各自的特性和共同属性、如何选择合理的模型参数才能更好地刻画对等网络拓扑特性、P2P 网络的动力学方面有什么特点、P2P 网络面对不同攻击策略时表现出怎样的脆弱性等等.回答这些问题,还需要分析实际的对等网络测量数据,结合数据挖掘、复杂网络理论、代数图论、网络动力学原理以及社会经济因素等,总结归纳出对等网络的典型特征参数,建立对等网络拓扑数据库和拓扑模型库,形成一套对等网络拓扑特征分析理论,为对等网络的发展和网络安全服务.

References:

- [1] Kaya OS. A glance at peer to peer systems. Technical Report, TR-CTIT-05-21, University of Twente, 2005. 1381–3625.
- [2] Wang CG, Li B. Peer-to-Peer overlay networks: A survey. Technical Report, HongKong University of Science and Technology, 2003. <http://comp.uark.edu/~cgwang/Papers/TR-P2P.pdf>
- [3] Sen S, Wang J. Analyzing peer-to-peer traffic across large networks. *ACM/IEEE Trans. on Networking*, 2004,12(2):219–232.
- [4] Stutzbach D, Rejaie R. Capturing accurate snapshots of the Gnutella network. In: *Proc. of the Global Internet Symp.* 2005. 127–132. <http://www.postel.org/gi2005/>
- [5] Stutzbach D, Rejaie R. Characterizing today's Gnutella topology. Technical Report, CIS-TR-04-02, University of Oregon, 2004.
- [6] Stutzbach D, Rejaie R. Characterizing the two-tier Gnutella topology. In: *Proc. of ACM SIGMETRICS*. ACM Press, 2005. <http://www.cse.cuhk.edu.hk/~sigm2005>
- [7] Liu G. Measurements, modeling and analysis of peer-to-peer networks [Ph.D. Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/846.htm>
- [9] 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.
- [10] Aiello W, Chung F, Lu LY. A random graph model for massive graphs. In: *Proc. of the ACM STOC 2000*. Portland: ACM Press, 2000. 171–180. <http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/stoc/stoc2000.html>
- [11] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998,393(6684):440–442.
- [12] Barabasi AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999,286:509–512.
- [13] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationship of the Internet topology. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1999,29(4):251–262.
- [14] Chou H. A note on power laws of Internet topology. 2000. <http://arxiv.org/abs/cs.NI/0012019>
- [15] Jovanovic MA. Modeling large-scale peer-to-peer networks and a case study of Gnutella [MS. Thesis]. University of Cincinnati, 2001.
- [16] Saroiu S, Gummadi PK, Gribble SD. A measurement study of peer-to-peer file sharing systems. In: Kienzle M, Shenoy P, eds. *Proc. of the Multimedia Computing and Networking (MMCN 2002)*. San Jose, 2002. <http://www.cs.washington.edu/homes/gribble/papers/mmcn.pdf>
- [17] Ripeanu M, Foster I, Iamnitchi A. Mapping the Gnutella network: Properties of large-scale peer-to-peer systems and implications for system design. *IEEE Internet Computing Journal Special Issue on Peer-to-Peer Networking*, 2002,6(1):50–57.
- [18] Xie C, Pan Y. Analysis of large-scale hybrid peer-to-peer network topology. In: Kero T, ed. *Proc. of the 49th Annual IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM 2006)*. San Francisco, 2006. <http://www.comsoc.org/confs/globecom/2006/about.html>
- [19] Li L, Alderson D, Willinger W, Doyle J. A first-principles approach to understanding the Internet's route-level topology. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 2004,34(4):3–14.
- [20] Mitzenmacher M. A brief history of generative models for power law and lognormal distributions. *Internet Mathematics*, 2003,1(2): 226–251.
- [21] 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.

- [22] Mihail M, Papadimitriou CH. On the eigenvalue power law. In: Rolim JDP, Vadhan S, eds. Proc. of the Randomization and Approximation Technoques: 61th Int' l Workshop (Random 2002). LNCS 2483, Beilin: Springer-Verlag, 2002. 254–262.
- [23] Dam E, Haemers WH. Which graphs are determined by their spectrum? Linear Algebra and Its Applications, 2003,373:241–272.
- [24] Watts DJ. Networks, dynamics and the small world phenomenon. American Journal of Sociology, 1999,105(2):493–527.
- [25] Albert R, Barabási A. A statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics, 2002,74(1):47–97.

附中文参考文献:

- [7] 刘刚.对等网络的测量、模型化与分析[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [8] 姜誉,方滨兴,胡铭曾,何仁清.大型 ISP 网络拓扑多点测量及其特征分析实例.软件学报,2005,16(5):846–856. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/846.htm>



王勇(1976—),男,四川江油人,博士,讲师,主要研究领域为对等网络测量,信息安全.



李奕飞(1977—),女,硕士,主要研究领域为信息安全.



云晓春(1971—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为计算机网络,信息安全.

第9届国际青年计算机会议 (ICYCS 2008)

征文通知

第9届国际青年计算机会议(ICYCS 2008)的主题是“计算机与通信前沿”(Computer and Communications Frontiers,CCF).计算技术与通信服务的结合正在极大地改善着人类的生产与生活.基于之前多届ICYCS国际学术会议的成功经验,ICYCS 2008将为计算机科学与技术及相关学科的科学家和工程师提供一个论坛,以交换和讨论他们的经验教训、创新思想、研究成果以及计算机在各行业中的应用情况.ICYCS 2008将包括特邀报告、论文发表、专题讨论和研讨会(Workshop)等.

ICYCS 2008 诚邀计算机科学与技术及相关学科中原始的、未经发表的研究成果.感兴趣的主体包括,但不限于如下:

理论计算机科学	计算机体系结构	计算机软件	计算机网络	计算机工程
计算机安全	计算机与通信	生物信息学	人工智能	计算机应用

大会论文要求使用英语写作并且遵循IEEE标准会议格式.论文要求通过ICYCS2008会议网站<http://www.csu.edu.cn/ICYCS2008/>提交.论文第一作者要求年龄不超过45岁.录用的论文要求版面限制为6页(或者最多8页但要超出对超出的版面另外收费).优秀论文经过进一步修订后将在*Journal of Computer Science and Technology*(专刊,SCI和EI源刊)和《软件学报》(增刊,EI源刊)发表.程序委员会将为大会及每一个研讨会评选一篇优秀论文奖.

论文提交截止日期: 2008年5月1日

录用通知发出日期: 2008年7月1日

正式论文提交截止日期: 2008年8月1日

联系人: 王国军,刘明,陈志刚

联系电话: 0731-8877711,8876677,8830797

E-mail: csgjwang@mail.csu.edu.cn; x-info@mail.csu.edu.cn; czg@mail.csu.edu.cn