

# P2P 覆盖网中的聚类研究综述<sup>\*</sup>

郑力明<sup>1a,2</sup>, 李晓冬<sup>1b</sup>, 李小勇<sup>2</sup>, 孙伟东<sup>2</sup>

(1. 武警成都指挥学院 a. 信息技术教研室; b. 科研所, 成都 610213; 2. 国防科学技术大学 计算机学院 并行与分布处理国家重点实验室, 长沙 410073)

**摘要:** 首先对 P2P 覆盖网中的聚类技术进行了分类, 在此基础上介绍了各种典型的聚类方法并进行了对比分析; 最后指出了 P2P 覆盖网中聚类技术的未来研究趋势。

**关键词:** 对等网络; 网络聚类; 网络簇结构; 覆盖网; 网络距离

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)03-0806-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.002

## Survey on P2P overlay clustering technology research

ZHENG Li-ming<sup>1a,2</sup>, LI Xiao-dong<sup>1b</sup>, LI Xiao-yong<sup>2</sup>, SUN Wei-dong<sup>2</sup>

(1. a. Information & Technology Teaching & Researching Section, b. Research Section, Chengdu Commanding College of the CAPF, Chengdu 610213, China; 2. National Key Laboratory for Parallel & Distributed Processing, School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Firstly, this paper reviewed the classification of the clustering methods in P2P overlay, and based on which, introduced and compared many typical methods. Lastly, reviewed the future research trends of clustering methods in P2P overlay.

**Key words:** P2P; network clustering; network community structure; overlay; network distance

对于网络聚类的研究已经有较长的历史,几十年来,其重要性及与其他研究方向的交叉特性得到人们的肯定。聚类是数据挖掘、模式识别、分布式网络等研究方向的重要研究内容之一。对等网络(peer-to-peer network, P2P 网络)作为一种新兴的计算机网络结构,已经成为当前互联网研究的热点方向<sup>[1-5]</sup>。然而,随着 P2P 技术的迅猛发展、需求与应用的不拓展、用户数量的急剧增加以及交互方式的日益多样化, P2P 网络本身及其所处的网络环境均呈现出爆炸式的复杂性增长趋势。面对这种情形,当前用于构造 P2P 系统的思想、方法和技术正面临着严峻的挑战, P2P 网络安全问题也愈加突出,急需从新的角度理解网络的结构与网络行为之间的关系,进而考虑改善网络的行为,使之一方面能够真实反映和正确利用网络的结构特征,另一方面能够更好地适应这种爆炸式的复杂性增长趋势。

P2P 覆盖网是一种通过网络节点自组织形成的并构建于物理网络之上的分布式应用层网络,是由节点和逻辑链路组成的一种虚拟的网络。近年来对 P2P 覆盖网的研究已经成为 P2P 领域的研究热点之一。目前已涌现出一大批基于覆盖网的应用,如 Napster、Gnutella、OceanStore<sup>[6]</sup>、Kademlia<sup>[7]</sup> 等文件共享系统; SplitStream<sup>[8]</sup>、PROMISE<sup>[9]</sup>、Bullet<sup>[10]</sup> 等大型数据分发系统;基于分布式哈希表(DHT)的结构化 P2P<sup>[11,4,5,11,12]</sup> 应用以及内容分发网络(CDN)等。上述应用利用基于拓扑感知的相关技术,如覆盖网路由<sup>[13]</sup>、应用层组播<sup>[14,15]</sup>、拓扑聚合<sup>[16]</sup>、最近服务器选择<sup>[17-19]</sup>、拓扑感知覆盖网构建<sup>[19-21]</sup> 等,均能够显著地提高性能,因此研究拓扑感知具有明显的现实意义。

P2P 覆盖网中聚类技术的研究则是研究拓扑感知技术的关键,性能优越的聚类方法能够有效支撑覆盖网路由、应用层组播、资源有效放置、感知拓扑构建等,极大地提高了 P2P 网络的性能。因此,研究 P2P 覆盖网中的聚类方法具有深远的理论意义和现实应用价值。

### 1 P2P 覆盖网聚类方法分类

对等网络作为当前计算机网络中的重要研究领域,不仅 P2P 网络中的节点规模庞大,而且网络节点存在较大的异构性,如节点的地理位置、处理能力和网络路径等存在差异。在 P2P 网络中,通常采用的聚类方式是通过研究网络节点之间的距离来进行聚类,网络距离是一种抽象概念,通常是指网络延迟,一般以 RTT(round-trip time)表示。根据所获得的距离信息进行聚类,是一种常用的聚类研究思想。

从 P2P 网络的特殊性出发,根据网络距离信息获取方式以及聚类策略的不同,可将 P2P 网络中基于距离信息的聚类方法划分为基于参考点的方法、基于网络层协助的方法、基于等级模式的方法、基于网络坐标的方法以及基于距离抽样的方法五类。基于参考点的方法是指为了获取节点之间的网络距离信息,通过直接或间接地引入相关的辅助节点或服务器以支持距离获取的方法;基于网络坐标的方法是指利用对网络节点进行数学空间建模,通过网络坐标的形式定位坐标空间中的节点,并通过节点之间的坐标信息获得网络距离,并加以聚类的方法;基于距离抽样的方法是指在已探测网络距离的基础上,通过距离抽样的方式,利用一定的迭代搜索策略获取邻近节

收稿日期: 2009-07-19; 修回日期: 2009-09-24 基金项目: 国家“973”计划资助项目(2005CB321801); 国家自然科学基金资助项目(60873215, 60621003)

作者简介: 郑力明(1978-), 男, 四川南充人, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向为网络计算(ygrsun@163.com); 李晓冬(1982-), 女, 主要研究方向为网络计算; 李小勇(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为网络计算; 孙伟东(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为网络计算。

点,从而实现节点聚类的方法。整个 P2P 网络中聚类方法的分类如图 1 所示。

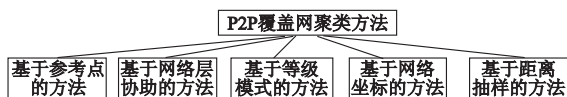


图1 P2P覆盖网聚类的方法分类

## 2 基于网络距离的聚类方法

在 P2P 覆盖网中,拓扑感知的目的在于降低覆盖网的延迟伸展率(latency stretch,定义为在逻辑覆盖网中节点间的延迟与在物理网络中对应节点间的延迟之比),从而需要可扩展地获取底层物理网络节点之间的延迟信息。可见,网络距离是实现拓扑感知的基础。利用相关的距离信息进行聚类是一种有效的重要的方式。对于距离较小的节点或者相对邻近的节点可将其划分于相应的簇中,此为基于网络距离的聚类方法的根本出发点。对于网络距离的研究,根据网络距离值或者邻近性等计算或获得方式的不同,可将基于网络距离的聚类方法分为基于参考点、基于网络层协助、基于等级模式、基于网络坐标以及基于距离抽样五种聚类方法。

### 2.1 基于参考点的方法

基于参考点的方法是为了避免进行完全测量(即对所有节点之间距离的测量),增强邻近搜索的可扩展性,主动引入一些测量参考点用于收集测量信息。这些测量参考点主要包括地标(Landmark<sup>[22]</sup>、Beacon<sup>[23]</sup>、Tracer<sup>[24]</sup>、Lighthouse node<sup>[25]</sup>、index node<sup>[26]</sup>等)、中间路由器(intermediate routers,称做Milestones<sup>[27]</sup>)、内容分发网络(CDN)中的副本服务器<sup>[19]</sup>等。这类方法一般利用测量参考点收集的信息,采用集中式的策略进行搜索。Guyton 等人<sup>[28]</sup>为这类方法提供了经典的范例。假定  $N$  个地标分别为  $B_i(1 \leq i \leq N)$ ,任意一个服务器  $S$  的坐标表示为一个  $N$  元组(由 Hotz 定义): $S = \langle s_1, s_2, \dots, s_N \rangle$ ,表示  $s_i$  到第  $i$  个地标的距离(跳数);类似地定义一个客户端  $C$  的坐标: $C = \langle c_1, c_2, \dots, c_N \rangle$ 。这样, $S$  与  $C$  之间的网络距离表示为

$$\text{avg}(S, C) = (\max(S, C) + \min(S, C)) / 2$$

其中: $\max(S, C)$ 、 $\min(S, C)$  分别定义为  $\min(s_1 + c_1, \dots, s_N + c_N)$  和  $\max(|s_1 - c_1|, \dots, |s_N - c_N|)$ 。

每个地标测量到每个服务器的距离,并且发送给三角测量服务器(triangulation server)。在搜集了每个地标的结果后,任意一个服务器  $S$  的坐标就已经确定。当客户端  $C$  需要定位最近的服务器,每个地标测量到  $C$  的距离并发送给三角测量服务器。三角测量服务器依据 avg 函数值的大小将最近的服务器返回给  $C$ 。

通过额外部署代理节点的方式以实现聚类(或距离估计)的典型方法有 IDMaps<sup>[24]</sup>方法和 Internet Iso-bar<sup>[29]</sup>方法。IDMaps 通过 tracer 维护局部 AS 图,利用 HOPS 服务器维护全局 Internet 虚拟拓扑图;Internet Iso-bar 通过 monitor 维护局部拓扑图,并通过距离的相似性分簇。原理图分别如图 2,3 所示。

2002 年 Ratnasamy 等人<sup>[19]</sup>引入装箱(Binning)思想对网络节点进行分簇,其分簇思想在于,首先选定一组参考节点,然后新加入节点探测至参考节点之间的距离,并根据探测距离值获得簇号信息;对所有节点进行相同操作,并获得所有节点的簇号信息,具有相同簇号的节点划分于同一簇中。其具体分簇原理如图 4 所示。

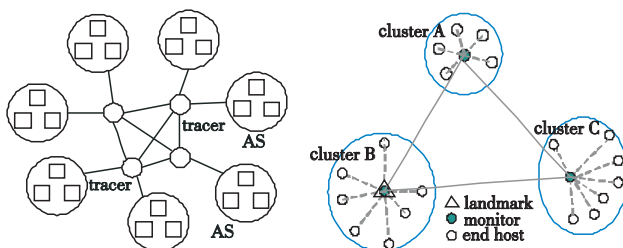


图2 IDMaps拓扑结构

图3 Internet Iso-bar拓扑结构

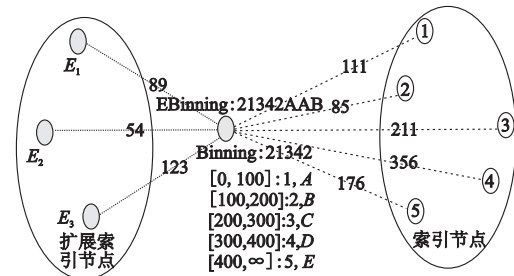


图4 Binning分簇原理示意图

Beaconing 使用少量的地标实现邻近搜索,划分簇结构。系统中的每个节点周期性地测量与地标之间的距离并反馈给地标,地标维护这些距离信息。欲加入系统的目标节点  $T$  测量与每个地标  $B$  之间的距离  $d$  并反馈给地标  $B$ ,  $B$  将离它自己  $d \pm \delta$  的节点返回给目标节点,并以此获得多个结果。最后,对交集进行处理,找出  $K$  个最近邻,从而实现分簇。其局限性在于 TIV 问题,是由于其破坏了欧式空间中的三角不等性原理。其原理示意图如图 5 所示。

惠普实验室的 Sharma 等人 2006 年提出的 Netnavigator 方法通过探测小数量的地标节点和中间路由器来检测最近的节点。该方法的创新之处在于通过增加探测节点路径上的 milestones 信息来避免如 Binning 等方法中的错误分簇(false clustering,源于具有相同地标向量的节点为邻近节点所致)问题,因此提高了局部网络特征信息的精度。其检测原理如图 6 所示。

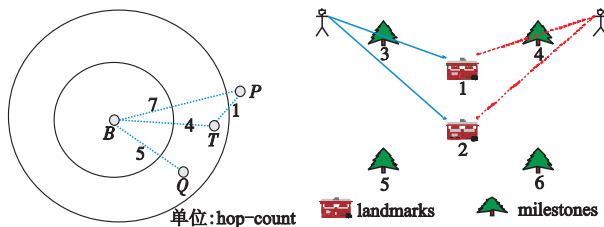


图5 Beaconing方法原理示意图

图6 Netnavigator方法原理示意图

CRP 是一种基于 CDN 重定向的相对网络定位方法,并不关注准确的网络拓扑信息,而是基于如下假设:若 CDN 中两台主机的请求经常被导向相同的邻近服务器集合,则它们很可能相对比较邻近,即位于相同簇中。CRP 根据大规模内容分发网络收集的重定向信息,计算节点的重定向向量(redirection vector);然后通过比较节点重定向向量之间的相似性来估计其邻近性。其原理如图 7 所示。其缺点在于查询节点需要集中式处理节点重定向向量并且精确性在一定程度上依赖于副本服务器的实际位置。

综上所述,各种基于测量参考点的方法对比如表 1 所示。

### 2.2 基于网络坐标的方法

网络坐标方法目前已成为距离预测技术研究的主流方法,它通过将网络中的节点映射到一定的几何空间中,利用坐标来定位网络中的节点在几何空间中的位置,并且根据节点的坐标信息来计算节点间的距离。利用坐标计算方式预测网络距离

的是 2002 年卡内基·梅隆大学的 Ng 等人<sup>[22]</sup>提出的 GNP 方法。自从该方法提出以后,网络坐标计算正式成为距离预测技术研究的热点,从而也为网络节点的精确聚类提供了可靠的依据。GNP 将 Internet 建模为一定维度的几何空间(图 8),将网络中的主机节点映射为欧氏空间中的点,通过绝对坐标计算方法来预测网络距离。其坐标计算分为两步:首先计算地标节点的坐标,然后依据地标节点的坐标和至地标的探测距离计算普通节点的坐标。坐标计算的实质为求解估计误差与实际测量误差的一般多维全局最小化问题,目前有很多方法可进行近似求解,GNP 中利用 simplex downhill 方法<sup>[30]</sup>计算其坐标。GNP 方法采用网络坐标的方式预测距离,与非坐标预测方法相比,大大减少了探测的开销以及实际部署开销,预测精度也较高。然而,它也面临着诸如集中式地标带来的单点失效以及非线性计算开销较大等问题。

表 1 不同的基于参考点的聚类方法之间的对比

scheme	infrastructure required	permissible metric	accuracy	query latency	control overheads
triangulation-based	Unicast-only, deployment of few beacons	any	moderate	low	high
IDMaps	Unicast-only, deployment of some trackers	any	moderate	low	low
Internet Iso-bar	Unicast-only, deployment of a few monitors	any	moderate	low	low
Beaconing	Unicast-only, deployment of few beacons	any	moderate	low	high
Netvigatator	Unicast-only, deployment of few milestones	any	high	low	high
CRP	Unicast-only, existence of CDN	any	high	low	low

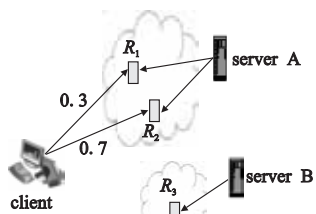


图7 CRP分簇原理示意图

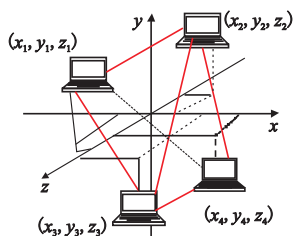


图8 Internet的几何空间模型

与 GNP 不同,2003 年韩国首尔国立大学的 Lim 等人<sup>[23]</sup>提出的 ICS 以及波士顿大学 Tang 等人<sup>[31]</sup>提出的虚拟地标(virtual landmark)方法采用相对坐标方法计算网络坐标。在 ICS 和 virtual landmarks 中,普通节点首先获得到地标节点的距离矩阵信息并以距离向量形式表示,向量的维度等于地标节点的数目;其次在基于 Lipschitz 嵌入的基础上采用 PCA(principle component analysis)技术来降低维度以提高计算效率。

Lipschitz 嵌入是欧式嵌入的一种特殊类型,对于任意节点  $i$  的坐标向量  $x_i \in R^n$ ,则  $x_i$  的第  $j$  个元素为  $i$  到地标  $j$  的距离。Lipschitz 嵌入的本质是以距离作为坐标的元素,其结果的精确性源于在度量空间中的两个相近的节点具有到其他对象的相似距离<sup>[23]</sup>。此外,针对 PIC 提出的精度不一致性问题,2006 年美国普渡大学的 Zhang 等人以及 2007 年南京大学 Xing 等人分别提出了 Hierarchical method<sup>[32]</sup>和 HNDF<sup>[33]</sup>方法。

Hierarchical method 采用一种层次式方法利用多个地标集合计算多个坐标集,每一个坐标和地标集合对应不同的距离范围。例如一个节点使用一个坐标来估计到远节点的距离,而另

一个坐标来估计到近节点的距离。如若发现一组坐标对近距离预测精确,而另一组对远距离是精确的,则根据感兴趣的范围综合选择合适的坐标集合以最高的整体预测精度。HNDF 提出另一种层次式的预测方法,它将 Internet 划分成多个独立的区域(如 edge、core、region、dual 等),在各个区域内分别采用最近地标选择策略计算坐标,最后节点间的预测距离通过累加不同区域内的距离得出。

最典型的是 2006 年宾夕法尼亚大学的 Mao 等人<sup>[34]</sup>提出的 IDES 方法,该方法通过采用 SVD(singular value decomposition)和 NMF(non-negative matrix factorization)两种矩阵分解技术来建模子优化和非对称路由策略;为每个节点赋予一个入向量和出向量,根据出向量和入向量的内积确定网络距离。该方法摆脱了对称性和三角不等性的约束,然而它假设距离矩阵中存在大量线性相关的向量,即利用分簇性原理,当出现错误分簇时,IDES 的预测精度会明显降低。

此外,不少研究人员还提出了一些模拟物理过程的坐标计算方法,如 BBS(big-bang simulation)<sup>[35-37]</sup>、Vivaldi<sup>[38]</sup>、PCoord<sup>[39,40]</sup>等。BBS 方法模拟了粒子在由于嵌入误差所产生的力场中的爆炸行为,它将网络中的所有节点视做一个粒子集合,粒子之间可能相互吸引或者排斥,可能由于力场的作用加速,也可能由于摩擦力作用而减速。Vivaldi 方法则模拟了节点在嵌入误差产生的弹簧力场作用下的运动过程,它假定任意两个节点之间都存在一根弹簧,通过节点间弹力的作用来修正节点的坐标。PCoord 方法则在坐标更新的过程中引入摩擦力机制来提高坐标的收敛速度,从而提高坐标的精确性和可用性。综合以上各种基于网络坐标的聚类方法,从方法对应的主要技术、地标分布性、分簇的精确性、计算开销、TIV 问题的解决以及安全性检测方面归纳为表 2。

表 2 不同的网络坐标聚类方法的对比

properties	main technique	centralized	embedding type	accuracy	physical process	compute cost	solving TIV	security
GNP	absolute coordinate simplex downhill	yes	Euclidean	moderate	no	big	no	ignore
ICS	PCA and Lipschitz embedding	yes	Lip-schitz	moderate	no	small	no	ignore
virtual landmark	PCA and Lipschitz	yes	Lip-schitz	moderate	no	small	no	ignore
lighthouse	Gram-Schmidt, vector base translation	yes	Euclidean	moderate	no	small	no	ignore
BBS	simulate particle explosion	no	Euclidean/Hyperbolic	rate	yes	medium	yes	ignore
Vivaldi	Simulate spring force field and piggy-back communication	no	Euclidean/with high vector	high	yes	small	yes	ignore
PIC	improve GNP with different landmark selection strategies active exchange information;	no	Euclidean	high	no	small	no	check
PCoord	sample weight, force of friction, Damping mechanism matrix	no	Euclidean	moderate	yes	big	no	ignore
IDES	factorization; SVD and NMF	no	Euclidean	high	no	small	yes	ignore
Hierarchical method	multi-coordinates	no	Euclidean	high	no	big	no	ignore
HNDF	divide Internet into many different regions	no	Euclidean	moderate	no	big	no	ignore

### 2.3 基于距离抽样的方法

基于距离抽样的方法,通过随机选取一些节点作为邻居,

并且根据距离远近将其部署在某种数据结构中。采用邻近搜索贪心策略,通过不断追溯当前最近邻的邻居来发现更近的点,直至结束。

Meridian<sup>[41]</sup>利用基于直接测量形成的松散结构的同心环状覆盖网结构,结合 Gossip 协议来交换节点间的信息,以迭代转发查询匹配信息的方式来定位最优的邻近节点。从某种意义上说,Meridian 设计了一种“小世界”,通过不断追溯当前最近邻的邻居的贪心路由方式,以  $O(\log N)$  的跳数寻找到最近邻。尽管 Meridian 考虑了同心环成员多样化的问题,仍然难以避免搜索过程陷入局部最优。其查询原理如图 9 所示,client 节点向覆盖网节点 A 发出请求,寻找目标节点 T 的最近邻。A 先探测与 T 的距离  $d$ ,然后要求离自己  $(1-\beta)d \rightarrow (1+\beta)d$  之间的环成员节点探测与 T 的距离,并反馈给 A,查询将转发给当前最近邻。

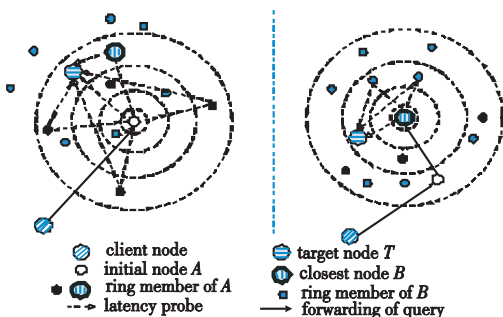


图9 Meridian查询原理图

Mithos<sup>[42]</sup>在覆盖网构造阶段,新节点通过接触 bootstrap node 得到自己的候选邻居,然后获取这些候选邻居的直接邻居,探测到所有这些邻居的延迟以寻找更近的邻居,同时作为新的候选邻居。这个过程迭代进行,直至没有进展。当然,上述过程容易陷入局部最优。Castro 等人提出一种在 Pastry 中寻找邻近种子节点(seed node)的分布式算法 PNS-CG。它充分利用由 Pastry 节点维护的叶集和路由表,沿着路由表各层自底向上进行搜索,不断向最近的节点逼近。这种方法不需要额外的维护开销。

### 3 未来研究趋势

P2P 覆盖网中的聚类方法,对于覆盖网路由、应用层组播、拓扑聚合、最近服务器选择、拓扑感知覆盖网构建等 P2P 优化技术具有强烈的支撑作用,对提高 P2P 网络的性能具有直接的、重大的理论意义和应用价值。本文从 P2P 覆盖网中聚类方法的特殊性出发,从 P2P 网络的角度探讨 P2P 网络中的聚类方法,将相关技术的优缺点进行对比并对于具体应用具体分析,是研究聚类方法的重点,也是计算机学科中 P2P 网络研究中的关键技术。根据 P2P 覆盖网的特殊性,利用 P2P 网络独有的特点,根据 P2P 覆盖网的相关度量属性进行有效聚类是研究 P2P 覆盖网的重点手段。目前 P2P 网络中的聚类研究已取得不小的进步,但是同样存在不少需要解决的问题,主要包括如下几个方面:

a) 网络嵌入模型的研究。Internet 建模能对聚类提供有效支持,目前很多聚类方法都使用了相关的模型。然而,对 Internet 建模是一项复杂的任务,因为现实 Internet 环境中存在诸如高度动态性<sup>[43]</sup>、网络节点不可达性<sup>[44]</sup>以及 TIV 等特征。目前虽然已有欧式空间、双曲空间以及 Lee 等人<sup>[45]</sup>提出的混合空间等嵌入模型用于 P2P 聚类的建模计算,但是这些模型均

不能很精确地描述现实 Internet 的特征。因此,研究如何对 Internet 环境建模,寻找一种最优的空间模型是数学界和计算机界共同需要解决的问题。

b) 高效稳定的聚类方法研究。由前面分析可知,要实现高效稳定的网络聚类方法,需要考查技术的可扩展性、计算开销、通信开销、精确性、稳定性、收敛性、安全性等诸多方面。而与之密切相关的研究主要包括坐标类型选择、计算过程模拟、分簇算法、现实部署性等。在网络坐标计算方法中,采用非线性方法进行绝对坐标计算其收敛性好,但是开销大;采用线性方法进行相对坐标计算其计算开销小,却需要节点的分簇性假设;采用模拟物理过程的方法如 Vivaldi,其计算和通信开销小,但是收敛速度慢且不能保证能够收敛到稳定状态,不便于实际应用。在基于参考点的方法中,代理节点或者服务器节点部署的数目、方式以及开销等现实部署性问题,以及寻找最优的分簇算法仍然值得深究。

c) 安全性方面的研究。安全性方面的研究主要针对于基于网络坐标的聚类方法,当前许多对网络坐标安全性的研究<sup>[46-50]</sup>表明,网络坐标系统在面对实际 Internet 时是很脆弱的,极易遭受来自各方面的攻击。网络的动态性和异构性等复杂特征使得恶意节点的攻击形式多样化,使得对网络坐标安全性的研究是极其复杂。为此 Kaafar 等人<sup>[46,48,49]</sup>在最近几年内进行了尝试,他们将恶意节点的攻击分为扰乱(disorder)、隔离(isolation)、排斥(repulsion)、系统控制(system control)四种情形来考察坐标系统的安全性,并提出利用检查员基础设施(surveyor infrastructure)来检测恶意节点的行为,此方法在一定程度上增强了坐标系统的安全性。然而,安全性研究目前还处在研究的初级阶段,由于坐标安全性研究的复杂性和必要性,决定了对这方面的研究将是一个长期的过程。

### 4 结束语

P2P 网络中的聚类技术研究作为 P2P 网络中新兴的热点研究领域,是一个融合了复杂系统、计算机、数学、物理学、生物学、社会学等多个学科的技术研究。从整体上讲,目前在 P2P 网络中的聚类技术研究还不够成熟,尚未建立起一套完整的理论体系和方法体系,而且从技术理论的完善到真正聚类系统可靠的部署应用还距离甚远。本文回顾了当前学术界在 P2P 网络中聚类技术研究领域的主要研究成果,从 P2P 网络自身的特殊性方面介绍了 P2P 网络中的聚类技术研究的多种方法和关键技术,在分类的基础上分析比较了各种具有代表性的聚类方法,最后指出了未来研究的趋势。

#### 参考文献:

- [1] ROWSTRON A, DRUSCHEL P. Pastry: scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems[C]//Proc of the 18th IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms. 2001.
- [2] CLARKE I, SANDBERG O, WILEY B, et al. Freenet: a distributed anonymous information storage and retrieval system [C]//Proc of Workshop on Design Issues in Anonymity and Unobservability. 2001: 339-344.
- [3] KNUTSSON B, LU Hong-hui, XU Wei, et al. Peer-to-peer support for massively multiplayer games[C]//Proc of the 23rd Annual Conference on Computer and Communications Societies. 2004:34-44.
- [4] STOICA I, MORRIS R, LIBEN-NOWELL D, et al. Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for Internet applications[J]. IEEE/

- ACM Trans on Networking, 2003, 11(1):17-32.
- [5] RATNASAMY S, FRANCIS P, HANDLEY EA M. A scalable content-addressable network[C]//Proc of Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM Press, 2001:149-160.
- [6] KUBIATOWICZ J, WEIMER W, WELLS C, *et al.* OceanStore: an architecture for global-scale persistent storage[J]. *ACM SIGPLAN Notices*, 2000, 35(11):190-201.
- [7] MAYMOUNKOV P, MAZIERES D. Kademia: a peer-to-peer information system based on the XOR metric[C]//Proc of IPTPS. 2002: 53-65.
- [8] CASTRO M, DRUSCHEL P, KERMARREC A M, *et al.* Split-Stream: high-bandwidth content distribution in a cooperative environment[C]//Proc of IPTPS. 2003:298-313.
- [9] HEFEEDA M, HABIB A, BOTEV B, *et al.* PROMISE: peer-to-peer media streaming using CollectCast[C]//Proc of the 11th ACM International Conference on Multimedia. 2003:45-54.
- [10] KOSTIC D, RODRIGUEZ A, ALBRECHT J, *et al.* Bullet: high bandwidth data dissemination using an overlay mesh [J]. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 2003, 37(5):282-297.
- [11] ZHAO B Y, HUANG Ling, STRIBLING J, *et al.* Tapestry: a resilient global-scale overlay for service deployment [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(1):41-53.
- [12] MALKHI D, NAOR M, RATAJCZAK D. Viceroy: a scalable and dynamic emulation of the butterfly[C]//Proc of the 21st ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. 2002:183-192.
- [13] REWASKAR S, KAUR J. Testing the scalability of overlay routing infrastructures[C]//Proc of the 5th Workshop on Passive and Active Network Measurement. 2004:33-42.
- [14] CHU Yang-hua, RAO S G, SESHAN S, *et al.* A case for end system multicast[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(8):1456-1471.
- [15] LIEBEHERR J, NAHAS M, SI Wei-sheng. Application-layer multicasting with delaunay triangulation overlays [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(8):1472-1488.
- [16] AWERBUCH B, SHAVITT Y. Topology aggregation for directed graphs [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2001, 9(1):82-90.
- [17] JAMIN S, JIN Cheng, KURC A R, *et al.* Constrained mirror placement on the Internet[C]//Proc of the 20th Annual Joint Conference on IEEE Computer and Communications Societies. 2001:31-40.
- [18] THEILMANN W, ROTHERMEL K. Dynamic distance maps of the Internet [C]//Proc of the 19th International Conference on IEEE Computer and Communications Societies. 2000:275-284.
- [19] RATNASAMY S, HANDLEY M, KARP R, *et al.* Topologically-aware overlay construction and server selection[C]//Proc of the 21st International Conference on IEEE Computer and Communications Societies. 2002.
- [20] WINTER R, ZAHN T, SCHILLER J. Topology-aware overlay construction in dynamic networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Networking. 2004.
- [21] WANG Wen-jie, JIN Cheng, JAMIN S. Network overlay construction under limited end-to-end reachability[C]//Proc of the 24th International Conference on IEEE Computer and Communications Societies. 2005:2124-2134.
- [22] NG T S, ZHANG Hui. Predicting internet network distance with coordinates-based approaches[C]//Proc of the 21st International Conference on IEEE Computer and Communications Societies. 2002:170-179.
- [23] LIM H, HOU J C, CHOI C H. Constructing Internet coordinate system based on delay measurement[C]//Proc of ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. 2003:129-142.
- [24] FRANCIS P, JAMIN S, JIN Cheng, *et al.* IDMaps: a global Internet host distance estimation service[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2001, 9(5):525-540.
- [25] PIAS M, CROWCROFT J, WILBUR S, *et al.* Lighthouses for scalable distributed location[C]//Proc of the 2nd International Conference on P2P System. 2003:278-291.
- [26] NG T S, ZHANG Hui. A network positioning system for the Internet [C]//Proc of USENIX Annual Technical Conference. 2004:11.
- [27] SHARMA P, XU Zhi-chen, BANERJEE S, *et al.* Estimating network proximity and latency[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2006, 36(3):39-50.
- [28] GUYTON J D, SCHWARTZ M F. Locating nearby copies of replicated Internet servers[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1995, 25(4):288-298.
- [29] CHEN Yan, LIM K H, KATZ R H, *et al.* On the stability of network distance estimation [J]. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 2002, 30(2):21-30.
- [30] NELDER J A, MEAD R. A simplex method for function minimization [J]. *The Computer Journal*, 1965, 7(4):308-313.
- [31] TANG Li-ying, CROVELLA M. Virtual landmarks for the Internet [C]//Proc of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2003:143-152.
- [32] ZHANG Rong-mei, HU C, LIN Xiao-jun, *et al.* A hierarchical approach to Internet distance prediction [C]//Proc of the 26th IEEE Conference on Distributed Computing Systems. 2006:73.
- [33] XING Chang-you, CHEN Ming. HNBP: a novel network distance prediction mechanism [C]//Proc of the 27th IEEE Conference on Distributed Computing Systems. 2007.
- [34] MAO Y, SAUL L K, SMITH J M. IDES: an Internet distance estimation service for large networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(12):2273-2284.
- [35] SHAVITT Y, TANKEL T. Big-bang simulation for embedding network distances in Euclidean space[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2004, 12(6):993-1006.
- [36] SHAVITT Y, TANKEL T. On the curvature of the Internet and its usage for overlay construction and distance estimation[C]//Proc of the 23rd International Conference on IEEE Computer and Communications Societies. 2004:384.
- [37] SHAVITT Y, TANKEL T. On Internet embedding in hyperbolic spaces for overlay construction and distance estimation [EB/OL]. (2005). <http://www.eng.tau.ac.il/~tankel/pub/HypEmp05v2.pdf>.
- [38] DABEK F, COX R, KAASHOEK F, *et al.* Vivaldi: a decentralized network coordinate system[C]//Proc of Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2004:15-26.
- [39] LEHMAN L, LERMAN S. PCoord: network position estimation using peer-to-peer measurements[C]//Proc of the 3rd IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. 2004:15-24.
- [40] LEHMAN L, LERMAN S. A decentralized network coordinate system for robust Internet distance[C]//Proc of the 3rd International Conference on Information Technology: New Generations. 2006.
- [41] WONG B, SLIVKINS A, SIRER E G. Meridian: a lightweight network location service without virtual coordinates[C]//Proc of Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2005:85-96. (下转第 828 页)

- [9] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless mesh networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2007, 6(12):432-444.
- [10] RANIWALA A, CHIUH T. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network [C]//Proc of the 24th IEEE Conference on Computer Communications. Miami:IEEE, 2005:2223-2234.
- [11] KODIALAM M, NANDAGOPAL T. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks [C]//Proc of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Cologne:ACM Press, 2005:73-87.
- [12] MARINA M, DAS S. A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks [C]//Proc of the 2nd International Conference on Broadband Networks. 2005:381-390.
- [13] ALICHERY M, BHATIA R, LI Li. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks [C]//Proc of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Cologne:ACM Press, 2005:58-72.
- [14] RAMAN B. Channel allocation in 802.11-based mesh networks [C]//Proc of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications. 2006:1-10.
- [15] DRAVES R, PADHYE J, ZILL B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks [C]//Proc of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2004:114-128.
- [16] DAS A K, VIJAYAKUMAR R, RAY S. Static channel assignment in multi-radio multi-channel 802.11 wireless mesh networks: issues, metrics, and algorithms [C]//Proc of Global Telecommunications Conference. 2006.
- [17] RAMACHANDRAN R, BELDING E, ALMEROOTH K, *et al.* Interference-aware channel assignment in multi-radio wireless mesh networks [C]//Proc of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications. 2006:1-12.
- [18] MENG Xiang-rui, TAN Kun, ZHANG Qian. Joint routing and channel assignment in multi-radio wireless mesh networks [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2006:3596-3601.
- [19] CHEN Ying-yu, LIU Shang-chun, CHEN C. Channel assignment and routing for multi-channel wireless mesh networks using simulated annealing [C]//Proc of Global Telecommunications Conference. 2006:1-5.
- [20] KYASANUR P, VAIDYA N. Routing and interface assignment in multichannel multi-interface wireless networks [C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2005:2051-2057.
- [21] TANG Jian, XUE Guo-liang, ZHANG Wei-yi. Interference-aware topology control and QoS routing in multi-channel wireless mesh networks [C]//Proc of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. 2005:68-77.
- [22] RANIWALA A, GOPALAN K, CHIUH T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks [J]. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 2004, 8(2):50-65.
- [23] BREZEZINSKI A, ZUSSMAN G, MODIANO E. Enabling distributed throughput maximization in wireless mesh networks: a partitioning approach [C]//Proc of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York:ACM Press, 2006:26-37.
- [24] BHATIA R, KODIALAM M. On power efficient communication over multi-hop wireless networks: joint routing, scheduling, and power control [C]//Proc of the 23rd IEEE Conference on Computer Communications. 2004:1457-1466.
- [25] LIN Xiao-jun, SHROFF N B. Joint rate control and scheduling in multihop wireless networks [C]//Proc of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control. 2004:1484-1489.
- [26] KOMPELLA S, MAO Shi-wen, HOU Y T, *et al.* On path selection and rate allocation for video in wireless mesh networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2009, 17(1):212-224.
- [27] AVALLONE S, AKYILDIZ I F, VENTRE G. A channel and rate assignment algorithm and a layer-2.5 forwarding paradigm for multi-radio wireless mesh networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2009, 17(1):267-280.
- [28] KOZAT U C, KOUTSOPOULOS I, TASSIULAS L. A framework for cross-layer design of energy-efficient communication with QoS provisioning in multi-hop wireless networks [C]//Proc of the 23rd IEEE Conference on Computer Communications. 2004:1446-1456.
- [29] CHENG Ho-ting, ZHUANG Wei-hua. Novel packet-level resource allocation with effective QoS provisioning for wireless mesh networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2009, 8(2):694-700.
- [30] LIU Te-huang, LIAO Wan-jiun. Interference-aware QoS routing for multi-rate multi-radio multi-channel IEEE 802.11 wireless mesh networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2009, 8(1):166-175.
- [31] HU Hong-lin, ZHANG Yan, CHEN H H. An effective QoS differentiation scheme for wireless mesh networks [J]. *IEEE Network*, 2008, 22(1):66-73.
- [32] CHEN L W, TSENG Y C, WANG Y C, *et al.* Exploiting spectral reuse in routing, resource allocation and scheduling for IEEE 802.16 mesh networks [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2009, 58(1):301-313.
- [33] YUAN Jun, LI Zong-peng, YU Wei, *et al.* A cross-layer optimization framework for multihop multicast in WMNs [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(11):2096-2103.

(上接第 810 页)

- [42] WALDVOGEL M, RINALDI R. Efficient topology-aware overlay network [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2003, 33(1):101-106.
- [43] STUTZBACH D, REJAIE R. Capturing accurate snapshots of the Gnutella network [C]//Proc of the 24th International Conference on IEEE Computer and Communications Societies. 2005:127-132.
- [44] STUTZBACH D R R. Characterizing today's Gnutella topology, CIS-TR-04-02 [R]. Eugene: University of Oregon, 2004.
- [45] LEE S, ZHANG Zhi-li, SAHU S, *et al.* On suitability of Euclidean embedding of internet hosts [C]//Proc of the Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York:ACM Press, 2006:157-168.
- [46] KAAFAR M A, MATHY L, TURLETTI T, *et al.* Real attacks on virtual networks: vivaldi out of tune [C]//Proc of SIGCOMM Workshop on Large-Scale Attack Defense. 2006:139-146.
- [47] LEDLIE J, GARDNER P, SELTZER M. Network coordinates in the wild [C]//Proc of USENIX NSDI. 2007.
- [48] KAAFAR M A, MATHY L, BARAKAT C, *et al.* Securing Internet coordinate system: embedding phase [C]//Proc of Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2007:61-72.
- [49] KAAFAR M A, MATHY L, TURLETTI T, *et al.* Virtual networks under attack: disrupting Internet coordinate systems [C]//Proc of ACM CoNEXT Conference. New York:ACM Press, 2006.
- [50] COSTA M, CASTRO M, ROWSTRON R, *et al.* PIC: practical Internet coordinates for distance estimation [C]//Proc of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems. 2004:178-187.