P2P逻辑网络拓扑结构仿真分析

冯朝胜[1,2,3] 冯 林[1] 卿 昱[2] 袁 丁[1]
(四川师范大学计算机科学学院可视化计算与虚拟现实四川省重点实验室 成都 610101)[1]
(中国电子科技集团公司第30研究所 成都 610041)[2]
(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)[3]

摘 要 在深入分析P2P网络协议的基础上,给出了P2P网络仿真系统的设计,并在此基础上实现了该系统。为了确定P2P逻辑网络的拓扑结构,基于开发出的仿真系统进行了大规模仿真实验,仿真实验主要对P2P逻辑网络的三大特征参数进行了考查。实验表明,仿真出的P2P网络都有较小的平均路径长度和较大的聚类系数,而度分布都为指数分布。根据P2P逻辑网络特征参数的特点并利用复杂网络理论确定,P2P逻辑网络是一个度分布为指数分布的小世界网络。

关键词 P2P逻辑网络,拓扑结构,仿真
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Analysis on Topology of P2P Logical Network with Simulation Experiments

FENG Chao-sheng[1,2,3] FENG Lin[1] QING Yu[2] YUAN Ding[1]
(Visual Computing & Virtual Reality Key Laboratory of Sichuan Province, School of Computer Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)[1]
(The No. 30 institute of China Electronic Technology Corporation, Chengdu 610041, China)[2]
(School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)[3]

Abstract A system for simulating the P2P(peer-to-peer) network was designed and implemented, based on deep analysis on its protocols. Large scale simulation experiments were performed so as to identify the topology of the logical P2P network. The results of all experiments demonstrate that the logical P2P network is a network with small average path length, big cluster coefficient, and its degree follows the exponential distribution. It is easily derived from these features in applying the complex network theory that the P2P logical network is a small-world one with the exponential degree distribution.

Keywords P2P logical network, Topology, Simulation

1 引言

当前,确定对等网络的拓扑结构是对等计算研究的一个热点。从理论上讲,一旦明确了对等网络的拓扑结构,就可以根据复杂网络理论[1]研究网络的性能、健壮性和对抗故障及病毒攻击的能力。当然,针对应用网络得到的理论结果是否正确,还需要在应用中去验证;然而,很多时候要做到这一点却是很难的。比如验证一个病毒传播模型是否正确,显然就不能将病毒放到实际的网络中去验证,更实际、更可行的做法是将病毒放到仿真的网络中去检验,而要正确仿真出某个网络,前提是要明确该网络的拓扑结构。为此,大量研究人员对P2P网络的拓扑结构进行了深入研究并取得了一些成果[2-4],然而他们的研究关注的是P2P覆盖网络的拓扑结构,却忽视了对P2P逻辑网络拓扑结构的研究。出现这种情况主要有两个原因:一是错误地将P2P逻辑网络当作P2P覆盖网络;二是无法获取网络中每个节点的邻居信息(常为节点的私密信息)。

P2P逻辑网络的拓扑结构对病毒,特别是蠕虫在其上的传播有着巨大影响。根据复杂网络理论[1],在蠕虫采取随机攻击的情况下,无尺度网络比其它网络有更强的抵御病毒的能力;而在蠕虫采用目标攻击的情况下,无尺度网络则显得要脆弱得多。

鉴于P2P逻辑网络拓扑结构的重要性,本文在深入分析P2P网络协议的基础上,采用仿真的方法对P2P逻辑网络的

到稿日期:2011-01-16 返修日期:2011-04-12 本文受国家自然科学基金项目(60873075),四川省科技厅应用基础项目(2010JY0125),四川省教育厅重点课题(10ZA007),可视化计算与虚拟现实四川省重点实验室课题(J2010N05),西南交通大学信息编码与传输四川省重点实验室开放研究基金课题(2010-05)资助。

冯朝胜(1971-),男,博士后,副教授,硕士生导师,CCF高级会员,主要研究方向为网络与信息安全,E-mail:csfenggy@126.com;冯 林(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向为信息安全、智能信息处理;卿 昱(1970-),女,硕士,研究员,主要研究方向为网络安全;袁 丁(1967-),男,博士,教授,主要研究方向为信息安全。

拓扑结构进行了深入研究。根据对仿真出的 P2P 逻辑网络的 3 个特征参数的分析，明确了 P2P 逻辑网络的拓扑结构。本文主要贡献如下：

- 廓清了 P2P 逻辑网络和 P2P 覆盖网络概念。
- 设计和实现了 P2P 网络仿真系统。
- 明确了 P2P 逻辑网络的拓扑结构。

2 P2P 逻辑网络

P2P 逻辑网络是基于网络节点邻居关系形成的网络。形成邻居有两种方式：一种是基于实际的 TCP 连接，一种是基于最近联络的节点信息（包括实际的）。基于实际的 TCP 连接形成的逻辑网络实际上就是覆盖网络。为了提高查询效率，一些 P2P 网络节点将最近访问的节点地址信息存放起来（常存放在 cache 里）。下载文件时，节点首先检查最近访问节点是否有该文件。如有，就从这些节点上下载；否则，就发出查询信息。在 Gnutella[5] 网络中，每个节点都和其它多个节点建立了 TCP 连接，基于这些连接就形成了覆盖网络。与此同时，节点还保存了最近访问节点的地址信息，同它们形成了邻居关系，基于这种邻居关系同样可能形成网络。图 1 示意了逻辑网络和物理网络间的关系[6]。

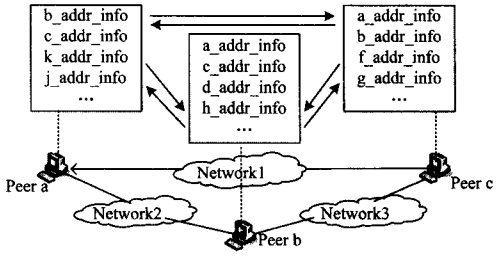

图 1 逻辑网络与物理网络的关系

3 P2P 网络仿真系统设计

3.1 P2P 网络协议抽象

尽管不同的 P2P 网络有着不同的协议，但其中的节点却有着相同的基本行为模式：上线、下线、查询和下载。Gnutella 节点通过和网络中的节点或引导节点的连接来维持在线状态，而 eMule 节点则通过和查询服务器保持连接来保持在线。查询时，Gnutella0.4 通过洪泛法查询文件，Gnutella0.6 由引导节点代理所有叶子节点实现文件动态查询，eMule[7] 则通过文件查询服务器实现文件查询。无论哪种查询方式，如果网络中有该文件，就会返回给请求节点一个与请求文件相匹配的节点列表，该列表是拥有该文件的所有节点集合的子集。从查询的发起和结果的获取来看，整个查询过程对于请求节点是透明的。整个查询过程无论细节如何，都可以看成是由查询服务器来完成的。从这个意义上讲，所有的文件共享协议都具有很大的相似性。

3.2 P2P 网络仿真系统的设计

基于以上对 P2P 网络协议的分析，给出了 P2P 网络仿真系统的设计，如图 2 所示。整个仿真系统包括初始化、执行仿真和输出 3 大部分。

初始化包括如下功能模块。

导入配置模块负责将仿真参数从配置文件读入系统并对配置文件进行解析。

导入拓扑模块负责导入网络的物理拓扑结构。

初始化网络模块主要包括 4 个子模块：创建网络节点、分配文件、构建网络拓扑和初始化节点。创建网络节点包括创建物理节点（如果需要）和逻辑节点，逻辑节点包括对等节点和查询服务器节点。

创建事件调度器模块负责事件调度器的构建和激活。事件对象本身的构建实际上由初始化节点状态模块实现。

启动仿真由执行网络协议和启动事件调度器两部分组成。执行网络协议用于基于周期方式的仿真，在每个周期基于概率来调用节点上线、下线、查询和下载几个模块。启动事件调度器用于基于离散事件的仿真。

输出模块主要负责输出平均最短路径、聚类系数和度分布这 3 个网络特征参数。

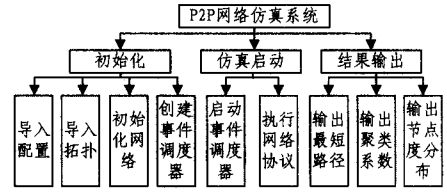

图 2 P2P 网络仿真系统功能模块图

4 仿真及分析

4.1 实验说明

根据复杂网络理论，网络拓扑结构主要由度分布、簇系数和平均路径长度这 3 个最基本的网络特征参数决定[1]，因此仿真实验主要考查这 3 个参数。表 1 给出了本文实验的参数默认值及其概率分布。考虑到 eMule 是当前最流行的 P2P 网络，仿真实验主要针对 eMule 网络。

表 1 仿真实验参数

N	网络中节点总数，N=2000
$N_{on}(t)$	t 时刻网络中的在线节点数。$N_{on}(0)=1000$
$N_{off}(t)$	t 时刻网络中的离线节点数。$N_{off}(0)=1000$
λ_{on}	上线率。对数正态分布。$\lambda_{on}=0.005$
λ_{off}	下线率。对数正态分布。$\lambda_{off}=0.005$
λ_{d}	下载率。指数分布。$\lambda_{d}=0.003$
FileKinds	文件种类数。FileKinds=1000
F_{on}，F_{off}	分别代表初始化时在线和离线文件数。Fon=2500，Foff=2500
AVSeeds	平均种子数。正态分布。AVSeeds=20

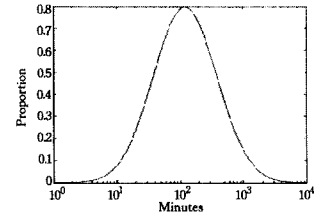

图 3 对数正态分布

已有研究[8,9]表明，P2P 网络中文件流行程度和节点流行程度呈现出 Zipf 分布（$p(x)=cx^{-\gamma}$），所以在初始化时基于 Zipf 分布来为文件分配文件名；之后，再基于该分布将文件分配到节点上。为了保证仿真的准确性，仿真参数值尽量选取最近网络测量[8-11]获取的相关值，用户行为模型也尽量采用最近相关研究给出的概率模型；如果没有给出，则主要采用均

匀分布模型和正态分布模型。根据网络测量，eMule 网络用户平均在线时间约为 200min。相应地，下线率约为 0.005，概率分布为对数正态分布。图 3 给出了均值为 200、方差为 100 的对数正态分布情况。由于跟踪离线用户的困难性，因此还没有研究给出离线平均时间及其概率模型。

假设用户每天都会上线和下线，如果每次在线 200min，那么其离线时间为 1240min，即上线率约为 0.0008。网络中在线节点数、离线节点数的变化满足如下方程：

$$\frac{dN_{on}(t)}{dt}=\lambda_{on}N_{off}(t)-\lambda_{off}N_{on}(t)$$

$$\frac{dN_{off}(t)}{dt}=-\lambda_{on}N_{off}(t)+\lambda_{off}M_{on}(t)$$

在网络节点上线和下线到达平衡状态，即 $\frac{dN_{on}(t)}{dt}=0$，$\frac{dN_{off}(t)}{dt}=0$ 的情况下，在线节点和离线节点数分别为：

$$\widetilde{N}_{on}=\frac{\lambda_{on}N}{\lambda_{on}+\lambda_{off}}$$

$$\widetilde{N}_{off}=\frac{\lambda_{off}N}{\lambda_{on}+\lambda_{off}}$$

根据上式容易算出，在在线时间为 200min 和离线时间为 1240min 的情况下，在线节点和离线节点分别约为 280 个和 1720 个(共有 2000 个节点)。由于 280 个在线节点使网络规模显得太小，为了保证一定的网络规模(1000 个左右)，本文给出的是下线率为 0.005 的实验结果。根据文献[12]，eMule 在线用户要平均隔 300min 才下载一个文件，故下载率取为 0.003。根据下载经验，刚打开客户端 P2P 软件时，下载文件的概率很大，随着时间推移下载概率会迅速降低，而这正是指数分布的特征，故下载率采用指数分布。

4.2 仿真结果说明

图 4、图 5 表明，无论是随机选择种子方式，还是优先选择种子方式，在 3000min 后，抛开最大子网中的节点剩余的节点数几乎都仅比子网个数少 1，这表明剩下的节点都为独立节点，即意味着仅出现一个节点数较多且节点数相对稳定的连通网络。图 6、图 7 表明，两种方式生成网络的聚类系数和平均路径长度在 3000min 后保持相对稳定。既然 3000min 后网络拓扑结构相对稳定，那么 3000min 后获取的逻辑网络拓扑结构就能较准确反映网络的实际情况。取 3000min 时刻的逻辑网络拓扑结构作为研究对象。

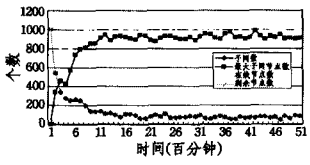

图 4 基于随机种子选择方式的网络形成

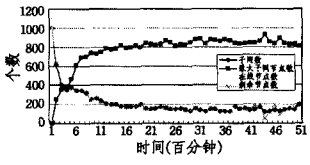

图 5 基于优先种子选择方式的网络拓扑形成

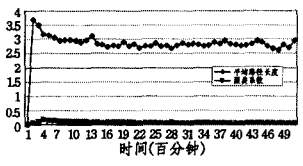

图 6 网络形成中的网络特征参数(随机种子选择方式)

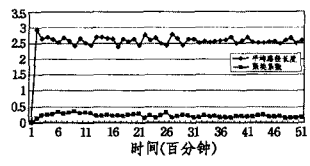

图 7 网络形成中的网络特征参数(优先种子选择方式)

图 8—图 11 在双对数坐标系下考查了不同在线时间分布、种子选择方式和平均种子数对度分布的影响。如果网络节点的度分布为幂律分布，在双对数坐标系下度分布曲线为一条向右倾斜的直线[1]。然而，在图中没有出现一条直线，这表明无论哪种情况，网络节点的度分布都不是幂律分布。

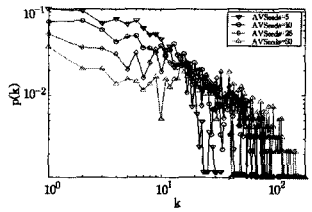

图 8 度分布(在线时间：一致分布；随机选择种子)

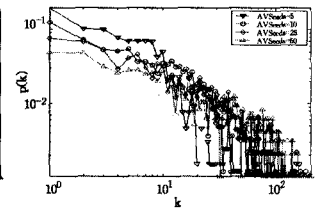

图 9 度分布(在线时间：一致分布；优先选择种子)

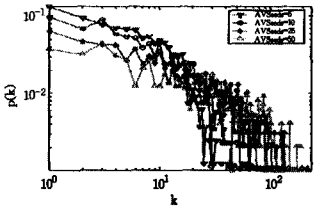

图 10 度分布(在线时间：对数正态分布；随机选择种子)

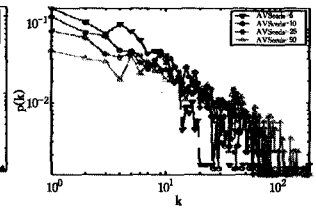

图 11 度分布(在线时间：对数正态分布；优先选择种子)

图 12—图 15 在半对数坐标系下考查了不同在线时间分布、种子选择方式和平均种子数对度分布的影响。在所有的图中，度的分布都围绕着一条右斜的直线，而这正是指数分布的特征[1]。因此，P2P 逻辑网络节点的度分布是指数分布。

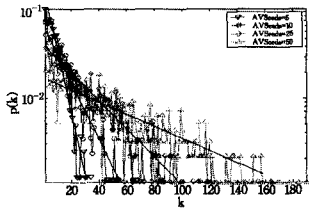

图 12 度分布(在线时间：一致分布；随机选择种子)

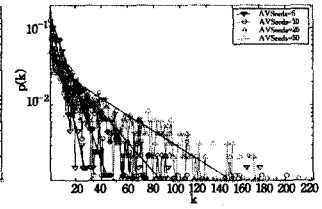

图 13 度分布(在线时间：一致分布；优先选择种子)

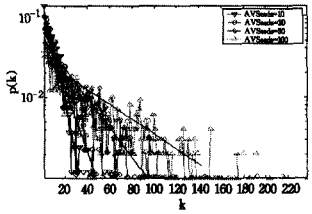

图 14 度分布(在线时间：对数正态分布；随机选择种子)

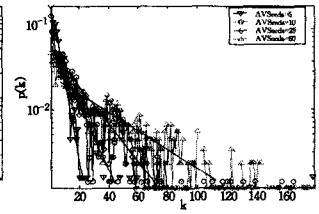

图 15 度分布(在线时间：对数正态分布；优先选择种子)

图 16 考查了种子选择方式和在线时间分布对度分布的影响。在该图中，优先种子选择方式对应的度分布曲线在右下部出现了较大的“波动”，而随机种子选择方式对应的度分布曲线却没有出现这种情况，表明种子选择方式对度分布的影响较大。在随机种子选择方式下，在线时间分布对度分布的影响很小；但在优先种子选择方式下，均匀分布对应分布曲线保持了直线走势，而对数正态分布对应的分布曲线走势尽

管也是直线，但有部分点出现了偏离。

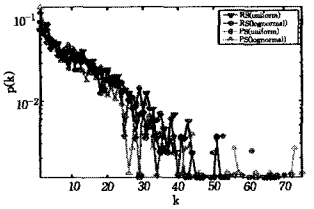

图 16　两种方式形成的网络度分布比较

图 17 考查了种子数对两种方式下形成的网络的平均路径长度(AVL)、聚类系数 C 和最大子网节点数在网络中所占比例数(SubNet)的影响。图例中第一个字母为"R"代表随机选择，"P"代表优先选择。从图中可以看出，在网络规模不变的情况下，种子节点越多，形成的网络包含的节点数就越多，即网络规模越大。随着种子数的增加，随机选择方式的网络平均路径明显变短，而优先选择方式的平均路径长度变化不大。总的来看，优先选择方式的聚类系数比随机选择方式大。大量实验结果表明，两种方式形成的网络的平均路径长度增加的速度远远小于网络规模按对数方式增长的速度。比如，在种子数取 25 的情况下，按随机方式和优先方式形成的规模为 1000 的网络的平均路径长度分别为 2.54 和 2.65，形成的规模为 2000 的网络平均路径长度分别为 2.78 和 2.68。因此，基于两种方式形成的网络都具有小世界效应[1]。

根据仿真形成的逻辑网络的平均路径长度、聚类系数和度分布，并结合复杂网络相关理论[1]，可以确定，P2P 逻辑网络是度分布为指数分布的小世界网络。

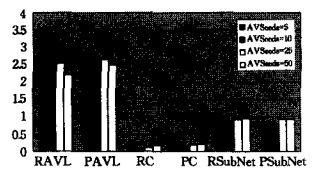

图 17　不同种子数对网络形成的影响

结束语　P2P 逻辑网络的拓扑结构对网络的性能、健壮性和病毒的传播都有重要影响，因而一直是 P2P 网络研究的重点和热点。尽管如此，迄今为止还是没有明确 P2P 逻辑网络的拓扑结构。混淆 P2P 逻辑网络与覆盖网络以及研究中采用的测量方法难以在极短的时间内获取网络中所有节点的相关信息，是无法确定 P2P 逻辑网络拓扑结构的主要原因。鉴于此，本文首先廓清了 P2P 逻辑网络和 P2P 覆盖网络的关系；在此基础上，考虑到仿真的方法能及时快速地获取网络中所有节点的信息，采用仿真的方法研究了 P2P 逻辑网络的拓扑结构。在深入分析 P2P 网络协议的基础上，设计并实现了 P2P 网络仿真系统。为了正确地确定 P2P 逻辑网络的拓扑结构，基于开发出的仿真系统进行了大规模仿真实验。仿真实验主要对网络的 3 大特征系数进行考查。仿真出的 P2P 逻辑网络都有较小的平均路径长度和较大的聚类系数，而度分布都为指数分布。根据这 3 个网络特征参数的特点并利用复杂网络理论可以确定，P2P 逻辑网络是一个度分布为指数分布的小世界网络。

参 考 文 献

[1] 汪小帆，李翔，陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京：清华大学出版社，2006

[2] Ripeanu M, Foster I, Iamnitchi A. Mapping the Gnutella Network: Properties of Large-scale Peer-to-Peer Systems and Implications for System Design[J]. IEEE Internet Computing Journal (special issue on peer-to-peer networking), 2002, 6(1): 50-57

[3] Liang J, Kumar R, Ross K W. The KaZaA overlay: A measurement study[C] // Proc. of the 19th IEEE Annual Computer Communications Workshop. Florida, 2004

[4] Stutzbach D, Rejaie R. Characterizing the Two-tier Gnutella Topology [C] // ACM SIGMETRICS. Extended Abstract, June 2005

[5] The Gnutella Protocol Specification v0.4 Document Revision1.2 [EB/OL]. http://www.clip2.com

[6] 王跃武，荆继武，向继，等. 拓扑相关蠕虫仿真分析[J]. 软件学报，2008，19(6)：1508-1518

[7] eMule website[EB/OL]. http://www.emule-project.net/

[8] 蒋君. eMule 系统中的覆盖网络研究[D]. 上海：上海交通大学，2008

[9] Stutzbach D. Measuring and Charactering Properties of Peer-to-Peer System[D]. America: University of Oregon, 2006

[10] Ilie D. On Unicast QoS Routing in Overlay networks[D]. Sweden: Blekinge Institute of Technology(BTH), 2008

[11] 刘斯伟. 基于测量的 eMule/Kad 网络 k 桶特性研究[D]. 北京：北京交通大学，2008

[12] Thommes R, Coates M. Epidemiological Modeling of Peer-to-Peer Viruses and Pollution[C] // Proceedings of IEEE INFOCOM. April 2006

(上接第 112 页)

[7] 谭德荣，严新平. 变权值加快收敛的路径寻优实时算法[J]. 交通运输工程学报，2004，4(1)：118-120

[8] 胡腾波，叶建桅. GIS 时变权值网络最短路径算法研究[J]. 计算机与现代化，2008，11：22-24

[9] Huang Yi-bing. An improved dijkstra algorithm for the graphs of Shortest-Path tree[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2002, 17(4): 50-55

[10] 雷东升，诸彤宇. 一种基于实时路况信息的动态路径规划算法[J]. 计算机科学，2008，35(4)：28-30

[11] 王涛，李伟生. 低代价最短路径树的快速算法[J]. 软件学报，2004，15(5)：660-665

[12] 孙知信，高艳娟，王文鼐. 更新最短路径树的完全动态算法[J]. 吉林大学学报：工学版，2007，37(4)：860-864

[13] Cormen T H, Leiserson C E, Riverst R L, et al. 算法导论[M]. 北京：机械工业出版社，2007：357-359

[14] Shin S-H, Lee S-C, Kim S-W, et al. Efficient Shortest Path Finding of k-Nearest Neighbor Objects in Road Network Databases [C]// SAC'10. 2010：1661-1665