

非结构化 P2P 网络中稀缺资源的共享机制

徐海湄^{①③} 卢显良^① 葛利嘉^{②③} 齐守青^③

^①(电子科技大学计算机学院 成都 610054)

^②(重庆大学通信工程学院 重庆 400030)

^③(解放军重庆通信学院 重庆 400035)

摘要: 非结构化 P2P 文件共享网络的应用日益广泛, 当前的网络流量主要来自于此类网络中对各类文件资源的搜索。但是目前的搜索机制只适合获取流行资源, 存在于个别节点上的稀缺资源很难被搜索到, 而用户获取稀缺资源的收益并不小于流行资源, 因此高效的搜索命中率将明显提高整个 P2P 网络的实用性。该文提出一种简单的分布式算法 NLIR, 使稀缺资源可以像流行资源一样具有较高的搜索命中率。新算法根据度数不同的节点, 其处理查询的能力, 存储能力, 搜索命中率各不相同的特点将稀缺资源的索引副本均匀地扩散到网络中, 体现了负载均衡的特性, 并且在带宽费用和存储费用都有限的约束条件下, 实现了稀缺资源高效的搜索命中率。

关键词: P2P 网络; 稀缺资源; 搜索命中率; 索引副本表; 稀缺资源索引副本扩散机制(NLIR)算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)08-2028-05

Rare Resource's Sharing Mechanism in Unstructured P2P Networks

Xu Hai-mei^{①③} Lu Xian-liang^① Ge Li-jia^{②③} Qi Shou-qing^③

^①(College of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

^②(Communication Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China)

^③(College of Chongqing Communications of People's Liberation Army, Chongqing 400035, China)

Abstract: Searching for files in popular unstructured P2P file-sharing systems contributes to much of internet traffic. While existing mechanisms can locate popular files easily, studies show they fail to find rare files existing in the system. In fact the benefit users obtained from rare resources is not less than popular resources. So high searching hit for rare resources will dramatically improve the whole P2P network's practicability. This paper proposes a simple distributed mechanism-NLIR which makes it easy to find rare files as well as popular files. According to peers' heterogeneity, it distributes rare files' index replications uniformly into the networks. Even with constraint conditions that bandwidth and storage is limited, it can achieve high hit-rate for rare resources. Both analysis and simulations demonstrate it improves the performance of the system.

Key words: P2P networks; Rare resources; Hit-rate of searching; Index-Replication Table(IRT); NLIR algorithm

1 引言

非结构化 P2P 文件共享网络的应用日益广泛, 例如 Gnutella, Emule 等。当前的网络流量主要来自于此类网络中的文件搜索与传递。但是各种搜索算法例如洪泛与随机漫步等只适合搜索流行资源。文献[1]中研究表明在 Gnutella 中, 尽管符合搜索要求的稀缺资源在网络中存在, 但是有 18% 的搜索得不到任何响应。与结构化网络例如 CAN, CHORD 等相比, 无结构化网络中稀缺资源的获得是比较困难

的。因此提高稀缺资源的搜索命中率将极大增加用户的收益, 并提高整个系统的效率。

当前该领域的研究工作主要集中在利用各种算法提高资源的搜索命中率。文献[2]中采用 Bloom Filter 技术在网络系统中扩散文件资源信息, 从而增加资源的搜索命中率。但是由于 Hash 函数的冲突特性, 随着文件扩散深度(hops)的增加, 假命中率也逐渐增加。文献[3]中采用物理学中的渗流(percolation)原理实现复杂网络中文件资源的可靠查询。但是最坏情况下, 搜索复杂度接近 $O(N)$ 。文献[4]中采用两站式索引副本复制 THIR(Two-Hops Index Replication)的方法保证稀缺资源的搜索命中率。第 1 站 (one-hop index replication)指的是每个

2008-09-09 收到, 2009-04-20 改回

国家自然科学基金(10577007)和重庆市重点自然科学基金(CSTC, 2007ba2017)资助课题

节点存储所有直接邻居的稀缺资源索引副本。第 2 站指的是每个超级节点都存储两步(two hops)之内的超级节点的索引副本。

大量研究证实 Internet 与无结构化 P2P 网络中节点的度符合幂律分布^[4-6]。文献[4]中指出一个随机选择的节点具有度为 k 的概率为 $p(k) = ck^{-r}$, $2 < r < 3.475$; 当网络节点总数为 N 时, k_{\max} 为 $N^{1/r}$; $N^{1/r-\delta} \leq k \leq N^{1/r}$ 的节点为超级节点; 并且计算出系统中超级节点数量为 $\Omega(N^{(r-1)/r - \partial + \delta})$, 其中 $\delta \in (0, 1/r)$, $r \in (2, 3.475)$, $\partial \in (0, 0.425)$ 。文献[4]中的 THIR 机制将文件索引副本存储和查询请求的处理主要由 $\Omega(N^{(r-1)/r - \partial + \delta})$ 个超级节点承担, 并且证明了只要遍历超级节点, 搜索命中率接近 100%。但是 THIR 机制中超级节点负载过重, 而度分布在 $[2, N^{1/r-\delta}]$ 中的大部分节点却处于空负载状态。能否将超节点的范围扩大, 把节点分成几级, 根据每一级的节点数量, 负载能力与搜索命中率, 将稀缺资源的副本合理分配, 使负载达到均衡, 稀缺资源可以像流行资源一样容易地被搜索到呢?

针对文献[4]中的缺陷, 本文提出一种新的基于层次的两站式稀缺资源索引副本分配机制 NLIR (New Layered two-hops Index Replication): 第 1 站是每个节点都将所有直接邻居的稀缺资源索引副本存储在自身的索引副本表 IRT 中, 第 2 站是按照节点的异构性将其分为不同的级别, 不同级别的节点分配不同数量的副本数, 在带宽费用与存储费用有限的现实环境中保证高效的搜索命中率。

2 索引副本表

对于稀缺资源, 本文采用提示性搜索的方法, 由稀缺资源共享节点发布索引副本信息, 并在网络中传播和维护这些信息。为了叙述方便, 引入如下概念:

索引副本表 IRT(Index Replication Table), 即每个节点为各个节点汇聚过来的稀缺文档按照主题关键字建立的索引表。假设覆盖网的拓扑图如图 1 所示, 字母表示每个节点拥有的稀缺资源, 每个节点将索引副本信息首先传递给直接邻居, 则节点 1 的索引副本表如表 1 所示。

IRT 的作用有两个: 一是当一个节点加入到 P2P 系统中时, 它负责用随机漫步方法扩散自身拥有的稀缺资源索引副本到直接邻居或者远程节点, 更新它们的 IRT; 二是节点收到查询后, 快速检索本地 IRT, 看是否有结果。因此 IRT 实现了分布式索引副本的存储与查询。

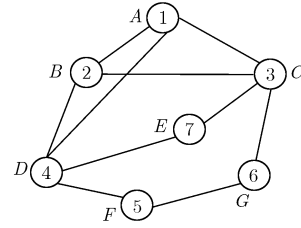


图 1 P2P 网络拓扑图

表 1 节点 1 的索引副本表 IRT

节点	稀缺资源	
	关键字	文件属性
1	A	A 的属性
2	B	B 的属性
3	C	C 的属性
4	D	D 的属性

3 稀缺资源索引副本的扩散机制 NLIR

如果每个稀缺资源的索引副本加载到每个节点的 IRT 中, 则搜索命中率必定可以达到 100%, 但是网络节点存在异构性, 大部分节点存储能力和处理查询的能力都有限, 而传递索引副本所需要的网络带宽也是非常珍贵的, 扩散多少索引副本, 怎样扩散索引副本才能实现稀缺资源的搜索命中率最高呢?

定义 1 按照度 k 的不同将节点分级别 3 级:

3 级节点: $0 < k_3 \leq K_{\max} / 3$;

2 级节点: $k_{\max} / 3 < k_2 \leq 2 / 3 K_{\max}$;

1 级节点: $2 / 3 k_{\max} < k_1 \leq K_{\max}$ 。

引理 1 文件索引副本的搜索命中率 h (hit probability)与其所在节点的度 k 成正比: $h_i \propto k$; 用随机漫步方法扩散索引副本到不同级别节点的步数 l 与节点的数量 $p(k) = ck^{-r}$ ($2 < r < 3.475$) 成反比: $l_i \propto 1/p(k_i)$ 。

定理 1 经过随机漫步到达一个 i 级节点的步数 $O(1/p_i)$ 符合以下关系:

$$O(1/p_1) > O(1/p_2) > O(1/p_3)$$

证明 因为 $p_k = ck^{-r}$, $2 < r < 3.475$ 并且

$$\sum_{k=a}^b f(k) > \int_a^{b+1} f(k)dk > \int_a^b f(k)dk$$

所以

$$p_1 = \sum_{k=2/3\max}^{\max} ck^{-r} > \int_{2/3\max}^{\max} ck^{-r} dk = c \frac{(3/2)^{r-1} - 1}{(r-1)k_{\max}^{r-1}}$$

$$= \frac{c_1}{k_{\max}^{r-1}}, \quad c_1 = c \frac{(3/2)^{r-1} - 1}{r-1}$$

同理可得

$$p_2 = \sum_{1/3 \max}^{2/3 \max} ck^{-r} > \int_{1/3 \max}^{2/3 \max} ck^{-r} dk$$

$$= c \frac{3^{r-1} - (3/2)^{r-1}}{(r-1)k_{\max}^{r-1}} = \frac{c_2}{k_{\max}^{r-1}}, \quad c_2 = c \frac{3^{r-1} - (3/2)^{r-1}}{r-1}$$

$$p_3 = \sum_1^{1/3 \max} ck^{-r} > \int_1^{1/3 \max} ck^{-r} dk = c \frac{k_{\max}^{r-1} - 3^{r-1}}{(r-1)K_{\max}^{r-1}}$$

当 $r=2$ 时,

$$\begin{cases} p_1 > c \frac{0.5}{k_{\max}} \\ p_2 > c \frac{1.5}{k_{\max}} \\ p_3 > c \frac{k_{\max} - 3}{k_{\max}} \end{cases}$$

由上面推理得出 $1/p_1 > 1/p_2 > 1/p_3$, 因此由引理 1 得 $O(1/p_1) > O(1/p_2) > O(1/p_3)$ 。 证毕

由定理 1 可知经过随机漫步 $O(1/p_1) = O(k_{\max}^{r-1}/c_1)$ 后可以到达一个 1 级节点, 经过 $O(1/p_2) = O(k_{\max}^{r-1}/c_2)$ 步后可以到达一个 2 级节点, 经过 $O(1/p_3) = O(1)$ 步后可以到达一个 3 级节点, 显然 $l_1 > l_2 > l_3$ 。因此稀缺资源的源节点扩散索引副本到不同级别的节点的带宽费用是不同的。网络中带宽很容易成为一个瓶颈。当带宽有限时候, 分配多少个副本到达各级节点上才能保证未来的搜索命中率最高呢?

定理 2 不同级别的节点的索引副本的搜索命中率 h_i (hitprobability) 符合以下关系: $h_1 > h_2 > h_3$ 。

证明 在 NLIR 机制中, 每个节点都将所有直接邻居的稀缺资源副本加载到自己的 IRT 中, 当有搜索请求到来时, 首先查询本地 IRT, 无应答时转发搜索请求到的邻居节点。节点的度越大, 意味着 IRT 中的稀缺资源越多, 搜索命中率越大, 因此 $h_1 > h_2 > h_3$ 。 证毕

设在 P2P 系统中的 i 级节点上存放 x_i 个索引副本, 每一级节点上的副本搜索命中率为 p_i , 则 x_i 个节点同时失效的概率为 $(1-p_i)^{x_i}$, 因此总的搜索命中率为 $1 - \prod_{i=1}^n (1-p_i)^{x_i}$, 设 c_i 表示索引副本扩散到 i 级节点上的带宽费用, 总的花费限定为 C , m_i 表示每个索引副本所占据的存储费用, 总的存储费用限定为 M ; 因此系统问题转化为求搜索命中率 H 最大问题:

$$\left. \begin{aligned} \max H &= 1 - \prod_{i=1}^n (1-p_i)^{x_i} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n c_i x_i &\leq C \\ \sum_{i=1}^n m_i x_i &\leq M \\ x_i &\geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)是一个非线性规划问题, 如何求解呢? 首先将式(1)转变为求解式(2):

$$\left. \begin{aligned} \min \prod_{i=1}^n (1-p_i)^{x_i} \\ \sum_{i=1}^n c_i x_i &\leq C \\ \sum_{i=1}^n m_i x_i &\leq M \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当 n 比较大时, (2)时求解是比较困难的, 但是把(2)看成一个多阶段决策问题, 就可以用动态规划方法求解。用动态规划方法求解的基本思想是: 首先求解部分问题的最优解, 再求更大部分问题的最优解。用 $f_i(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示分配 x_i 个副本到第 i 级节点上的同时失效率, $F_k(x)$ 表示将 x 个副本全部分配到前 K 级节点上所得到的最小失效率, 则由最优原理可以导出如下函数递归方程:

$$\left. \begin{aligned} F_1(x) &= f_1(x) = (1-p_1)^x \\ F_k(x) &= \min_{0 \leq x_k \leq x} \{f_{x_k}(x_k) \cdot F_{k-1}(x-x_k)\} \\ &\quad k = 2, 3, \dots, n \\ \sum_{i=1}^k c_i x_i &\leq C \\ \sum_{i=1}^k m_i x_i &\leq M \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(3)即可递推地求出 $F_n(x)$ 。

4 NLIR 的应用实例及分析

实例 1 设 P2P 系统中的节点按照定义 1 分为三级, 由定理 1, 定理 2 计算按照随机漫步方式扩散稀缺文件 a 的索引副本到系统中的带宽耗费以及在每一级节点上索引副本的搜索命中率, 如表 2 所示。

假定每一个索引副本的带宽消耗不能超过 20 units, 根据式(3)。

表 2 3 级节点上的索引副本状态

节点级别	带宽消耗	搜索命中率
1	11 单位	0.8
2	7 单位	0.6
3	2 单位	0.3

$$\left. \begin{aligned} F_1(x) &= f_1(x) \\ F_2(x) &= \min_{0 \leq x_2 \leq x} \{f_2(x_2) \cdot F_1(x - x_2)\} \\ F_3(x) &= \min_{0 \leq x_3 \leq x} \{f_3(x_3) \cdot F_2(x - x_3)\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)是递归的, 故先计算 $F_1(x)$, 再计算 $F_2(x), F_3(x)$ 。

$$F_1(x) = f_1(x) = 1 - 0.8 = 0.2;$$

$$\begin{aligned} F_2(x) &= \min_{0 \leq x_2 \leq x} \{f_2(0) \cdot F_1(x), f_2(1) \cdot F_1(x-1), f_2(2) \cdot F_1(x-2)\} \\ &= \min\{0.2, 0.08, 0.16\} = 0.08; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_3(x) &= \min_{0 \leq x_3 \leq x} \{f_3(0) \cdot F_2(x), f_3(1) \cdot F_2(x-1), f_3(2) \cdot F_2(x-2), f_3(3) \cdot F_2(x-3), f_3(4) \cdot F_2(x-4), f_3(5) \cdot F_2(x-5)\} \\ &= \min\{0.08, 0.056, 0.078, 0.054, 0.046, 0.0672\} \\ &= 0.046 \end{aligned}$$

此时 $x_1 = 1, x_3 = 4, x_2 = 0$; 即当 $x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 4, F_3(x) = 0.046$ 时式(1)式中的搜索命中率达到最大值 $1 - 0.046 = 0.954$, 这说明在带宽费用有限的情况下, 只要合理分布 5 个索引副本: 1 个分配在 1 级节点上, 4 个分配到 3 级节点上, 搜索命中率可以达到 95.4%。

因此在带宽有限、节点异构的情况下, 可以通过合理发布有限个索引副本在各个级别的节点上, 达到稀缺资源高效的搜索命中率, 同时实现了负载均衡。

实例 2 在实例 1 中假定扩散索引副本的带宽消耗忽略不计, 计算最少扩散多少个副本就可以保证搜索命中率达到 90% 以上?

根据式(2)得

$$\left. \begin{aligned} \prod_{i=1}^3 (1 - p_i)^{x_i} &\leq 1 - 0.9 \\ \text{Min } X &= x_1 + x_2 + x_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(5)式得 $x_1 = 2, x_2 = x_3 = 0$, 这说明在扩散索引副本的带宽费用不计的情况下, 只扩散 3 个索引副本到一级节点就可以保证搜索命中率达到 90% 以上。此时索引副本的分配方案完全等同于文献[4]

中的 THIR 机制。因此 THIR 机制是 NLIR 机制在不考虑扩散索引副本到系统中的带宽费用时的一个特例。

5 仿真实验

5.1 网络拓扑的生成

NLIR 与 THIR 机制皆适合在幂律网络上实现, 而幂律分布特性由网络增长和择优连接机制产生^[7]。因此本文采用 BRITE^[8] 生成符合幂律的无结构化 P2P 拓扑结构。

5.2 算法比较

背景设置: 系统由 1000 个节点组成, 随机选择 50 个节点, 每个节点放置一个稀缺资源, 然后随机选择搜索点, 对稀缺资源发起查询, 每个实验做 10 次, 取平均值。实验分为两组进行:

第 1 组 扩散索引副本的耗费限定为 100 步(带宽限制), 最多只能分散 40 个副本(存储限制)。用 NLIR 扩散索引副本到系统中, 然后用洪泛方法搜索稀缺资源, 比较应用 NLIR 算法前后的搜索命中率。

由实验结果图 2 看出应用 NLIR 前后的搜索成功率差别很大, 当 TTL (Time To Live) = 3 时, 搜索成功率从 12% 提高到 54%。这是因为利用 NLIR 算法后将索引副本均匀的分布在网络各处, 稀缺资源就可以像流行资源一样很容易地被搜索到。

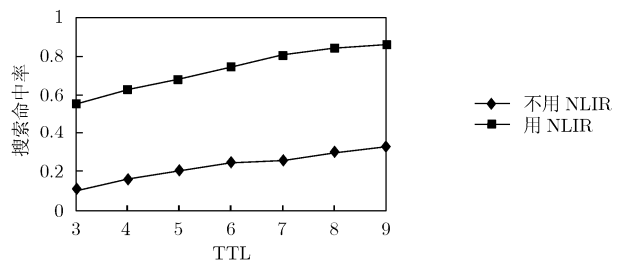


图2 搜索成功率随TTL的变化图

第 2 组 用 NLIR 算法与文献[4]中的 FIRS 算法将稀缺资源扩散 40 个索引副本到系统中(不考虑扩散的带宽费用), 再用随机漫步方法搜索资源, 比较两者的搜索命中率。

从图3中可以看出, NLIR 的查询成功率在 TTL 较小的时候明显高于 FIRS 算法, 这是因为 NLIR 充分利用了各级节点存储副本, 而 FIRS 只利用超级节点存储副本, 而到达一个超级节点要经过 $O(N^\theta)$, $\theta \in (0, 0.425)$ 步^[4]。随着 TTL 的增大, 两者搜索成功率趋于一致, 这是因为随着搜索深度的加大, 漫游到超级节点的机率趋于 1。

6 结束语

为了提高非结构化 P2P 文件共享网络中稀缺资

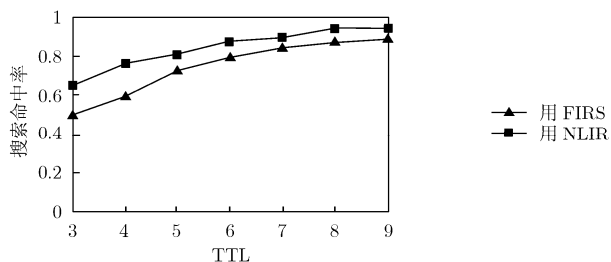


图 3 搜索成功率随 TTL 的变化图

源的搜索命中率, 本文在已有的搜索算法基础上, 提出了改进算法 NLIR, 其中带宽费用和副本数量成为两个可调控因子: 网络拥挤时, 根据当前的剩余带宽扩散多个索引副本到各级节点上, 网络处于轻度负载的情况下, 则只需扩散少量的索引副本到超级节点上就可以保证高效的搜索命中率。相对于 FIRS^[4], NLIR 避免了有目的地攻击超级节点易导致的系统瘫痪问题, 体现出了负载均衡特性。另外 NLIR 在约束条件下实现高效的搜索命中率, 更容易在工程中实现。

参 考 文 献

- [1] Loo Boon Thau, Hellerstein Joseph M, and Hubsch Ryan, *et al.* Enhancing P2P file-sharing with an internet-scale query processor[C]. The 30th conference on VLDB, Toronto, Canada, 2004: 432-443.
 - [2] Zhang Yi-ming, Lu Xi-cheng, Zheng Qian-bing, and Li Dong-sheng. An efficient search algorithm for Large-scale P2P systems [J]. *Journal of Software*, 2008, 19(2): 1473-1480.
 - [3] Sarshar Nima, Boykin Oscar, and Roychowdhury VWani. Scalable percolation search on complex networks [J]. *ELSEVIER Theoretical Computer Science*, 2006, 355(1): 48-64.
 - [4] Krishna P, Puttaswamy N, Alessandra Sala, and Zhao Ben Y. Searching for rare objects using index replication[C]. IEEE INFOCOM, Phoenix, AZ, 2008: 1723-1731.
 - [5] Das T, Nandi S, and Ganguly N. Community based search on Power-Law Networks[C]. IEEE Communication Systems Software and middleware workshops, Bangalore, India, 2008: 279-282.
 - [6] Sarshar N and Roychowdhury V P. Multiple power-law structures in heterogeneous complex networks [J]. *Physics Review E*, 2005, 72(020101): 1-11.
 - [7] Barabasi A L, Albert R, and Jeong H, *et al.* Power-law distribution of the world wide web[J]. *Science*, 2000, 287(5461): 2115a.
 - [8] BRITE [OL]. <http://www.cs.bu.edu/brite>, 2008-08-28.
- 徐海湄: 女, 1974年生, 博士生, 研究方向为对等网络技术、分布式计算技术、P2P资源定位技术。
- 卢显良: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式计算、网络通信技术、对等网络技术。
- 葛利嘉: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为超宽带无线网络、扩频技术、网络通信技术。
- 齐守青: 男, 1974年生, 讲师, 研究方向为网络通信技术与通信对抗技术。