

# 网格中一种小世界网络的分布式构造方法

李 静<sup>1,2</sup>, 陈蜀宇<sup>3</sup>, 吴长泽<sup>1</sup>

(1. 重庆大学计算机学院, 重庆 400030; 2. 重庆教育学院计算机与现代教育技术系, 重庆 400067;

3. 重庆大学软件学院, 重庆 400030)

**摘 要:** 如何有效地进行资源定位是影响网格和对等网性能的重要因素, 已有的一些资源查找算法引入了小世界原理来提高定位效率和降低网络负载, 但没有较好解决小世界网络的构造问题. 在 Kleinberg 小世界模型的基础上, 提出了一个小世界网络的构造方法 SSWCP (Scalable Small World Construction Protocol), 并给出了该方法的数学分析和实现. 该方法是分布式的, 不必拥有全局知识, 每个结点只需维护局部视图, 即可使资源定位具有小世界特征所带来的优化的时间复杂度. 分析和实验结果表明, 该方法具有良好的扩展性, 可以提高资源查找的效率.

**关键词:** 网格; 对等网; 小世界; 分布式

**中图分类号:** TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 02-0413-04

## A Distributed Construction Approach of Small World Network in Grid

LI Jing<sup>1,2</sup>, CHEN Shu yu<sup>3</sup>, WU Chang ze<sup>1</sup>

(1. Faculty of Computer, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Department of Computer and Modern Education Technology, Chongqing Education College, Chongqing 400067, China;

3. Faculty of Software Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** How to effectively locate resources is a very important factor affecting the performance of Grid and P2P environment. Some resource discovery methods have been already proposed, which utilizes Small World phenomena. In this paper, on the base of Kleinberg Small World model, this paper proposes an efficient decentralized construction approach SSWCP (Scalable Small World Construction Protocol), which uses partial view instead of global knowledge of network. Through analysis and simulations, we show that SSWCP is scalable to very large network sizes and large numbers of resources.

**Key words:** Grid; P2P; small world; distributed

## 1 引言

在网格和对等网络中, 由于资源的广域分布和动态性, 以及现有 Internet 存在的带宽和延迟限制以及网络的不可靠性, 广域范围内的资源定位将在很大程度上影响网格和对等网络的性能. 已有的一些资源查找方法难以适应广域资源规模. 泛洪法在最坏的情况下遍历所有结点, 其时间复杂度和对网络带宽造成的影响都不能容忍; 集中查找算法用一个信息结点专门存放所有资源结点的位置信息, 将会形成性能瓶颈和单点失效的问题; 路由转发算法<sup>[1]</sup>中路由表占用空间较大; 分布式哈希表 (DHT) 算法<sup>[2,3]</sup>利用杂凑的方式, 将数据和结点运算成一个键值, 利用键值来完成数据的放置与维护. 但由于这些算法并没有考虑网络实际拓扑结构, 因而即使是邻近的两个结点仍有可能经过很长的搜寻路径才能取得数据, 严重降低了路由的效率.

为提高资源定位效率, 同时使系统具有灵活性、可扩展性, 一些文献<sup>[4-7]</sup>借鉴社会学领域的小世界原理,

提出在广域网中构造小世界模式, 使资源定位具有小世界特征所带来的优化的时间复杂度. 1967 年美国人 Stanley Milgram 做了这样一个实验: 任何两个美国人, 平均通过 6 层关系就能找到自己想到的人<sup>[8]</sup>. 实验表明: 在没有全局知识的情况下, 人们能自主地发现任意两人之间较短的相识链. 这就是小世界现象.

小世界模型经过了三次发展历程. 最早的一次是 Pool 和 Kochen 模型<sup>[9]</sup>的建立, 接下来是 Watts 和 Strogatz 模型<sup>[10]</sup>和 Kleinberg 模型<sup>[11]</sup>. 其中比较成熟的是 Kleinberg 模型<sup>[11]</sup>. Kleinberg 提出如果将  $n \times n$  个结点放入一个二维网格中并且每个结点都有一些短链和仅一条长链, 采用贪婪路由能够以平均  $O(\log_2 n)$  跳在任何一对结点间传送消息, 前提是源点必须知道整个网络的结构信息.

如何构建一个小世界模型, 最关键的技术是“短链”和“长链”的选取. 现有关于应用小世界原理进行资源定位的文献对如何选择“短链”和“长链”, 没有深入研究. 本文在 Kleinberg 对小世界现象的研究基础上提出来一

种新的小世界构造方法. 相对于其他小世界构造方法, 它明确提出来了一个“短链”和“长链”的选取算法. 这个算法是分布式的, 避免了全局的知识; 维护开销小, 具有良好的可扩展性, 能平滑地适应拥有大规模结点的网格或对等网络环境; 并证明了算法的可靠性; 最后, 通过仿真实验进一步证明了该算法的正确性和有效性.

## 2 构造方法与维护

### 2.1 构造方法

基本协议包括结点加入协议和结点退出协议两部分. 结点上的局部视图随着结点加入和退出以一种完全分布的方式自动演变.

首先介绍结点加入协议. 结点加入协议按以下步骤进行:

(1) 引导结点: 当一个新结点  $N$  希望加入网络时, 它首先要与网络中的一个已知成员结点联系, 并获取该结点地址信息, 该结点将充当新加入结点的引导结点. 在 SSWCP 中, 新结点  $N$  通过向周围的结点广播发送网络查询消息的方法发现物理距离较近的网络成员结点. 其他成员结点在接收到该消息后, 将返回一个应答消息, 应答消息中还应包含该成员结点的身份信息. 为了降低网络开销, 该广播消息的初始化存活值 (TTL) 将基于网络规模设置为一个较小值, 仅当无任何结点返回应答时, 再将该 TTL 值逐倍增大. 新结点的局部视图一开始仅仅包括它的引导结点.

(2) 新结点加入: 当一个结点收到一个新的加入申请, 它把这个新结点 ID 转发给自己局部视图中的所有结点. 它还另外生成  $c$  个额外的新加入申请, 并把它们转发给在自己局部视图中随机选择的  $c$  个结点.  $c$  是一个用来决定容忍结点失效程度的参数.

(3) 转发的加入申请: 当一个结点收到一个转发的加入申请时, 只要这个申请以前没有收到过, 它会以概率  $P$  把那个新结点加入自己的局部视图. 概率决定于申请结点与当前结点距离的大小和局部视图的大小. 如果申请结点与当前结点相邻, 我们取  $P = \frac{1}{v}$ , 这就是短链;

反之, 我们取  $P = \frac{1}{d^v}$ , 这就是长链, 其中  $d$  为申请结点与当前结点间的曼哈顿距离,  $r$  是底层拓扑的维度,  $v$  是局部视图的大小. 如果它并没有保留这个新结点, 它会把这个申请转发给一个从它自己的局部视图 OutList 中随机选择的结点. 这些转发的申请被邻居结点或者接受或者继续转发, 直到有一个结点保留它.

(4) 出表和入表: 每个结点维护两个列表, 一个 OutList 和一个 InList. 其中 OutList 记录这个结点所连接到的另外的结点, 即转发消息所至的结点, 也就是短链和长

链, 在本文中, 我们又称之为局部视图. 记录的信息包括结点标识、IP 地址、当前状态等; InList 记录这个结点从哪些结点接收消息, 即被哪些结点列在 OutList 中. 如果结点  $i$  决定接受结点  $j$  的加入请求, 它把结点  $j$  的 ID 放入它的 OutList. 同时, 它发送一个消息给结点  $j$ , 让  $j$  把结点  $i$  的 ID 放入自己的 InList.

从以上协议可以看出, 当一个结点加入系统时, 它仅仅需要一开始处理这个新加入申请的结点的局部视图 OutList 的信息. 我们把加入概率  $P$  设置为局部视图的大小的减函数, 是为了获得更平衡的局部视图规模. 因为这种概率加入与结点在底层拓扑的位置相关, 并且更趋向保留短距离的结点, 这正是 Kleinberg 模型的本质体现. 对于这个协议, 它有一个很好的性质: 如果新结点通过给一个在已有结点中随机选择的结点发送申请的方法加入系统, 这个系统能够最终自动收敛到结点的 OutList 大小为  $(c+1)\log(n)$  的状态. 其中,  $n$  是系统中所有结点的数目,  $c$  是一个设计参数, 用来指定结点生成的额外新申请的数目. 随着  $n$  的增长,  $\log(n)$  的增长越来越趋于平缓, 这样, 这个协议是可扩展的. 另外, 我们知道随机图的直径为  $\log(n)^{1/2}$ , 而结点的局部视图大小为  $(c+1)\log(n)$ , 两者的可比性也从一定程度上说明了局部视图大小的合理性.

其次, 介绍结点退出协议. 退出协议的关键是要保持列表的上述可扩展性. 设要退出的结点为  $n_0$ . 在它的 OutList 中有结点  $x(1), \dots, x(m)$ , InList 中有结点  $y(1), \dots, y(m')$ . 退出时,  $n_0$  将通知结点  $y(1), \dots, y(m' - c - 1)$  用结点  $x(1), \dots, x(m' - c - 1)$  的信息以概率  $P = \frac{1}{d^v}$  代替  $n_0$  的位置 (如果  $m' - c - 1 > m$ , 折回到  $x(1)$  起), 如果它并没有保留这个新结点, 它会把这个申请转发给一个从它自己的局部视图 OutList 中随机选择的结点. 这些转发的申请被邻居结点或者接受或者继续转发, 直到有一个结点保留它. 其余  $y(m' - c), \dots, y(m')$  则只是在 OutList 中简单删除  $n_0$  即可.

### 2.2 路由表维护与主动置换机制

SSWCP 的路由表维护主要考虑短链和长链的维护. 局部视图的及时更新对于系统路由性能是重要的. 为提高局部视图中长短链的有效利用率, 可设定两种软状态: 有效和无效, 并周期性进行软状态更新. 应该注意的是, 如果长短链的状态为无效, 不要立即将它从局部视图中去掉, 因为网格和对等网络环境的高度动态性并不是随机的, 也具有一定的规律, 有不少结点可能暂时失效, 但在较短的时间间隔后又能恢复功能. 比如网格中某结点可能本地负载暂时加重, 不能提供异地服务, 但很快又高峰回落. 不立即掉除失效的结点, 给予其机会再度恢复, 可以有效减少结点频繁进出的开销. 除了正

常的周期更新外, 还可以利用主动置换机制. 所谓主动置换机制是指每当新结点加入时, 随机选择局部视图中的一条链接, 将其删除, 修改加入概率为  $P = \frac{1}{d^r(v-1)}$  (如果是相邻结点, 则改为  $P = \frac{1}{v-1}$ ), 从而在每次新结点加入时都会增加更新概率, 导致了失效长链或短链将以一定概率被当前的活动结点更新, 而更新后的长短链是活动的. 周期更新可以大大提高长短链的有效性, 特别在主动置换机制的作用下, SSWCP 更能够适应动态网络环境下的路由表维护.

### 3 分析

SSWCP 是自组织的, 因为结点局部视图的大小会自然的收敛到一个值, 这个值是系统中结点个数的函数, 但事先并不需要任何结点知道全部结点个数, 因此它是完全分布式的.

定理 1 结点的 OutList 大小收敛到为  $(c+1)\log(n)$  的状态

随着系统重复执行结点加入和退出过程, 任意一结点  $s (s \in N)$  的局部视图大小将最终收敛到为  $(c+1)\log(n)$  的状态 ( $n = |N|$ ).

证明: 为了分析这个协议的均值情况, 我们模拟这个系统成一个随机有向图, 图结点表示网络结点. 如果结点  $j$  在结点  $i$  的 OutList 中, 那么存在一个有向弧  $(i, j)$ . 当一个新结点加入时, 协议的动作就是随机加入一些弧. 如果新结点向一个出度为  $h$  的结点发出订阅申请, 那么  $h + c + 1$  个弧被加入系统. 其中, 新结点有一个出度为 1 的新弧. 收到加入申请的结点会把申请转发给它的邻居结点们, 产生了  $h$  个新弧, 另外, 新产生的  $c$  个额外申请又会产生  $c$  个新弧. 如果使用  $E[M_n]$  表示当系统结点数为  $n$  时系统中弧数目的期望, 那么每个结点的出度的期望是  $\frac{E[M_n]}{n}$ . 假设新结点向随机选择的结点发出申请, 那么有:

$$E[M_n] = E[M_{n-1}] + \frac{E[M_{n-1}]}{n-1} + c + 1 \quad (1)$$

从(1)式, 我们可以得出  $E[M_n] \approx (c+1)n\log n$ . 那么每个结点出度的期望是  $(c+1)\log n$ .

结点退出时递归过程的分析同上, 仍可得出  $E[M_n] \approx (c+1)n\log n$ , 这样就能保证系统中视图的一致性. 证毕.

Kleinberg 模型提出结点  $S$  应以  $d^{-r}$  的概率选取长链彼端  $T$ , 其中  $d = \|S - T\|$  是  $S$  和  $T$  两结点间的曼哈顿距离,  $r$  是底层拓扑的维度. 要证明 SSWCP 中每个结点维护的局部视图中长链是符合 Kleinberg 小世界分布的特征的, 因此才会具有这个小世界模型在查找目标时优

化的时间复杂度.

定理 2 局部视图长链符合 Kleinberg 小世界分布的特征

SSWCP 系统中执行结点加入过程, 任意一结点  $s (s \in N)$  将在有限步内以与  $\|s - t\|^{-r}$  成比例的概率将结点  $t$  保留为  $s$  的长链 ( $t \in N \cap t \neq s$ ).

证明: 新结点加入概率为  $P = \frac{1}{d^r(v-1)}$ , 其中  $d = \|s - t\|$ ,  $v$  是局部视图大小, 而我们已经证明了局部视图大小将最终收敛到为  $(c+1)\log(n)$  的状态, 当  $n$  一定时, 可以将  $v$  看作一个常数. 因此  $P \propto \|s - t\|^{-r}$ . 证毕.

### 4 仿真实验

我们通过 SSWCP 仿真实验得出结论. 原型系统是用 Java 编写, 并在 Linux 平台下测试. 利用 PLOD<sup>[13]</sup> 算法生成初始网络拓扑, 参数设为  $\alpha = 1.0$ , 结点度均值为 7, 用于模拟具有 power-law 特征的大规模网络.

#### 4.1 CAN 与 SWCAN 查找资源的比较

实验 1 运行在仿真网络上, 在其中引入了 CAN 算法<sup>[2]</sup>. 以 2 维 CAN 为基础, 把 CAN 中利用 SSWCP 方法称之为 SWCAN, 并比较 CAN 与 SWCAN 查找资源的平均路径长度. 结点数从 64 到 4096 变换, 实验结果如图 1 所示.

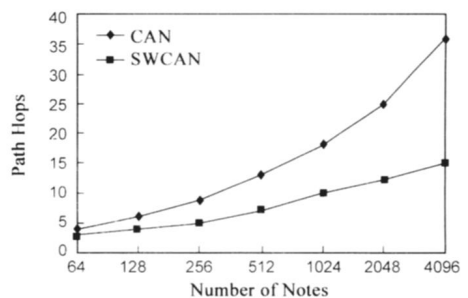


图 1 CAN 与 SWCAN 发现资源的平均路径长度

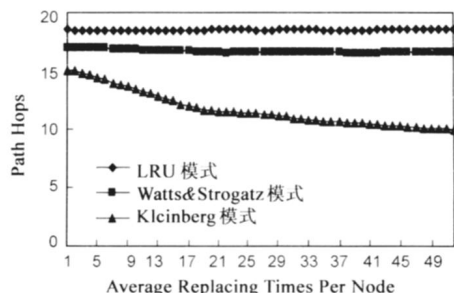


图 2 三种长链置换策略的比较

实验结果表明, 在 CAN 中引入 SSWCP 方法较大程度上缩短了发现资源的平均路径长度, 提高了查找效率, 具有小世界的特征, 与定理 2 相一致.

#### 4.2 长链置换保留策略的比较

在 SSWCP 中采用了 Kleinberg 模式作为其长链置换

策略. 实验 2 拟证明采取这种模式的优越性. 在 2 维 SWCAN 中, 网络结点数为 1024 个, 结点保留长链时, 变换三种不同的长链置换模式: 最近最少使用 (LRU) 模式、Watts&Strogatz 模式和 Kleinberg 模式. 图 2 显示了运用不同长链置换策略后系统查询消息平均路径跳数统计情况.

LRU 模式是无向性置换更新长链, 不可能导致整体性能的优化, 因而对于路径长度的改进几乎不起作用. 而 Watts & Strogatz 模式由于长链的建立没有考虑所选结点在拓扑中的位置, 不能够形成小世界的聚集现象, 因而不能够收敛于小世界网络, 改进性能有限. 只有 Kleinberg 模式能够较好地捕获网络结点的拓扑特征, 从而较好地减少了路由的路径长度. 因而, SSWCP 采用 Kleinberg 模式作为其长链置换策略, 是最佳的方案.

## 5 结论

在网格或对等网中, 小世界原理的应用可以提高资源定位效率, 同时使系统具有灵活性、可扩展性. 本文提出小世界构建方法 SSWCP 协议只需要每个结点维护整个系统所有结点的局部视图, 而不需要每个结点知道整个系统成员的全局信息, 这提高了协议的可扩展性, 同时又保持了 Kleinberg 小世界模型的高效性, 是在网格或对等网环境中构建小世界模型的一个可行的方法.

### 参考文献:

- [1] 李伟, 徐志伟, 卜冠英, 等. 网格环境下一种有效的资源查找方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(11): 1546-1549.  
Li Wei, Xu Zhiwei, Bu Guanyin, et al. An effective resource locating algorithm in Grid environments[J]. Journal of Computer, 2003, 26(11): 1546-1549. (in Chinese)
- [2] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A scalable content addressable network[A]. Proc of ACM Sigcomm[C]. New York, CA: ACM Press, 2001. 161-172.
- [3] Stoica I, Morris R, Karger M D, et al. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications[A]. Proc of ACM Sigcomm[C]. New York, CA: ACM Press, 2001. 149-160.
- [4] Adriana I, Foster I. Interest aware information dissemination in small world communities[A]. 14th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing [C]. Raleigh, USA: IEEE, 2005. 5-14.
- [5] 尚尔凡, 都志辉. 基于虚拟组织和小世界模型的高效网格服务定位机制[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(12): 1743

- 1747.

- Shang Erfan, Du Zhihui. Efficient Grid service location mechanism based on virtual organization and the small-world theory [J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, 40(12): 1743-1747. (in Chinese)
- [6] Li M, Lee W C, Sivasubramaniam A. A small world overlay network for semantic based search in P2P systems[A]. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols[C]. IEEE, 2004. 228-238.
  - [7] Ken Y K, John C S, David K Y. Small world overlay P2P network[A]. 2004 Twelfth IEEE International Workshop on Quality of Service[C]. Montreal, Canada: IEEE, 2004. 201-210.
  - [8] Milgram S. The small world problem[J]. Psychology Today, 1967, 67(1): 60-67.
  - [9] Sola Pool I, Kochen M. Contacts and influence[J]. Social Networks, 1978, 1(1): 5-51.
  - [10] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
  - [11] Kleinberg J. The small world phenomenon: an algorithmic perspective[R]. Cornell Computer Science, Tech Rep, 2000. 99-1776.
  - [12] Pittel B. On spreading a rumor[J]. Siamj Appl Math, 1987, 47: 213-223.
  - [13] Palmer C, Steffan J. Generating network topologies that obey power law[A]. Proceeding of GLOBECOM[C]. San Francisco: IEEE, 2000. 434-438.

### 作者简介:



李 静 女, 1974 年生于重庆, 重庆大学博士生. 研究方向为网格. E-mail: li.jing1@163.com



陈蜀宇 男, 1963 年生于重庆, 教授, 博士, 博士生导师. 研究方向为网格和网络安全.