

# 基于小世界层次分布式路由模型研究

朱晓姝<sup>1,2</sup>, 周 娅<sup>1</sup>, 黄桂敏<sup>1</sup>

(1. 桂林电子工业学院计算机系, 桂林 541004; 2. 玉林师范学院职业技术学院, 玉林 537000)

**摘要:** 对等网的研究越来越受到产业界和学术界的重视, 其结构化覆盖网模型采用 DHT 算法, 具有固定的逻辑拓扑结构, 存在着无法真实反映实际物理网络拓扑、可扩展性和查找性能不高的问题。该文以 P2P 的“小世界”现象为基础, 在分析 Chord 的基础上, 以簇为基本逻辑管理单位, 构建基于小世界层次分布式路由模型 SWLDRM, 并对 SWLDRM 与 Chord 进行对比仿真实验, 仿真实验结果表明 SWLDRM 比 Chord 具有更好的查找性能和可扩展性。

**关键词:** 对等网络; 小世界; 路由模型; Chord; 簇

## Research on Distributed Route Model Based on Small World Layer

ZHU Xiaoshu<sup>1,2</sup>, ZHOU Ya<sup>1</sup>, HUANG Guimin<sup>1</sup>

(1. Department of Computer, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004;

2. Vocation & Technical School, Yulin Normal College, Yulin 537000)

**【Abstract】** P2P research focuses on academia and industry. Its structured overlay network uses distributed hash table and is specific logical topology, but it can't reflect real physical topology. So it has poor scalability and low efficiency. This paper analyzes Chord based on small world phenomena of P2P, it constructs small world layer distributed route model based on cluster as logic manage-unit. SWLDRM and Chord are simulated by some experiments, and experiment results show that SWLDRM has more search and scalable performance than Chord.

**【Key words】** P2P; Small world; Route model; Chord; Cluster

自从 1999 年 Napster<sup>[1,4]</sup> 推出后, Internet 正在从客户/服务器模型向对等网(Peer-to-Peer, P2P)模型转变。但是, 前期 P2P 存在单点崩溃、洪泛消息泛滥、可扩展性差等问题, 因此, 2001 年研究人员提出结构化覆盖网模型和分布式哈希表(Distributed Hash Table, DHT), 如 Chord 等<sup>[2]</sup>。然而, 结构化覆盖网模型也存在不足: 节点根据 DHT 构成的逻辑拓扑结构没有反映底层实际物理拓扑, 可能导致 P2P 的覆盖网逻辑拓扑与底层物理拓扑的失配, 在邻近的节点也有可能散列到相隔很远的距离, 必须经过很长的搜寻路径才能取得数据, 降低了路由的效率。为了解决这个问题, 本文根据实际网络中存在的“小世界”现象<sup>[3]</sup>, 构建 P2P 的基于小世界层次分布式路由模型(Small World Layer Distributed Route Model, SWLDRM)。

### 1 P2P 路由模型

目前, 典型的 P2P 路由模型主要有如下几种<sup>[4]</sup>: (1) 集中式目录结构模型, 它能提供较好的查找资源性能, 但是存在服务质量无法提高和单点崩溃的问题, 如 Napster 等。(2) 洪泛请求模型, 它是纯对等网络模型, 不存在单点崩溃问题, 但容易造成消息泛滥, 系统的可扩展性难以提升, 如 Gnutella 等。(3) 结构化覆盖网路由模型, 它能平衡负载, 改善网络可扩展性, 但是没有考虑网络的实际拓扑结构, 邻近的节点也有可能散列到相隔很远处, 要经过很长的搜寻路径才能获得数据, 严重降低了路由的效率, 如 Chord、CAN、Pastry、Tapestry<sup>[2]</sup>等。将 Chord、CAN、Pastry、Tapestry 4 种结构化覆盖网模型从拓扑结构、路由原理、路由性能几个方面进行比较可知, Chord 具有简单性、可靠性和性能稳定等其它结构化覆盖网络技术所不具备的特点, 并且具有更良好的可扩

展性和较高的查找效率<sup>[5]</sup>。

Chord 采用相容哈希算法计算节点的标识符和关键词的标识符<sup>[6]</sup>: 使用 SHA-1 给每个节点和关键词分配标识符, 标识符由 m 位构成, 节点的标识符通过 SHA-1 散列该节点的 IP 地址得出, 关键词的标识符则通过 SHA-1 散列关键词得到, 标识符按顺时针方向排在 Chord 逻辑环上。例如, 假设某个关键词 k, 它会分配到 Chord 环中标识符等于或大于 k 的节点 m, m 称为 k 的后继节点, 记为 successor(k)。由于标识符有 m 位, 因此 Chord 环上节点标识符按顺时针方向排放的顺序是从 0 到  $2^m-1$  (按  $2^m$  取模)。

在 Chord 环中关键词查询定位过程如下:

(1) 对于简单的关键词查询定位, 每个节点只须知道它的后继节点。

(2) 对于扩充的关键词查询定位, 每个节点要维护一张不超过 m 项的路由表, 也称指针表。在节点 n 的路由表中, 第 k 个指针项  $n.finger[k].node = n.finger[k].node = successor(n + 2^{k-1}) \bmod 2^m$ ,  $1 \leq k \leq m$ 。

表 1 是节点 8 的路由表, 节点 8 的第 1 个指针项  $(8 + 2^{1-1}) \bmod 2^6 = 9$ , 指向后继节点 14。图 1 描述了节点 8 查找关键词 54 时, 路由表指针项的指向过程: (1) 查找本地路由表, 找到最接近关键词 54 的指针指向节点 42; (2) 请求节点 42 继续查询; (3) 节点 42 查找指针表, 找到最接近关键词 54 的指针指向节点 51; (4) 节点 51 找出关键词 54 的后继节点是

**基金项目:** 广西省自然科学基金资助项目(桂科自 0447091)

**作者简介:** 朱晓姝(1973—), 女, 硕士生、讲师, 主研方向: 计算机网络; 周 娅, 副教授; 黄桂敏, 博士、副教授

**收稿日期:** 2005-08-05 **E-mail:** chaibianfang@163.com

节点 58, 将节点 58 返回给节点 8。图 2 描述了节点 8 查找关键词 54 的查找路径。

表 1 节点 8 的路由表

指针项	节点的标识符
$8+2^{1-1}$	N14
$8+2^{2-1}$	N14
$8+2^{3-1}$	N14
$8+2^{4-1}$	N21
$8+2^{5-1}$	N32
$8+2^{6-1}$	N42

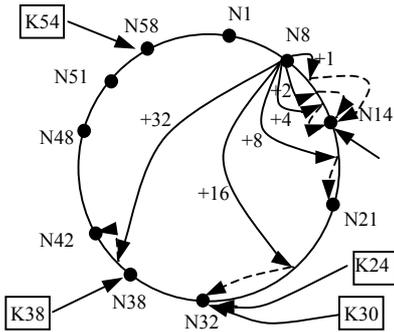


图 1 节点 8 查找路由表过程

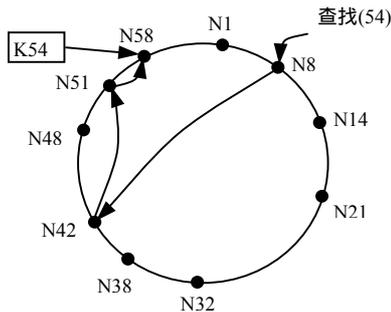


图 2 节点 8 查找关键词 54 的路径

## 2 SWLDRM 模型

在实际网络中少数节点有较高的度,多数节点的度较低,度较高的节点同其它节点的联系比较多,这种现象称为小世界现象。P2P也具有典型的小世界特性<sup>[7]</sup>,P2P的小世界特性可以看成无向连通图,图中任意两个节点连接距离不超过常数度间隔,即随机两个节点间的平均最短距离约是常数跳,这意味着P2P中任何节点存储的信息能通过少量的链接跳数查找到。遵循“小世界”特性和幂规律分布,我们构建的SWLDRM模型建立在互联网上的一个逻辑层,位于Chord的上层,根据节点的类聚性将节点聚集成簇,以簇为基本逻辑管理单位。在Chord环形拓扑结构基础上,根据节点功能分为2个层次:超级节点层,普通节点层。

### 2.1 基本概念

**定义 1** 网络拓扑的低平均跳数和高聚类系数现象,称为小世界特性<sup>[8]</sup>。

**定义 2** 对无向连通图 G,定义其平均最短跳数为  $H(G)$ ,  $H(G)$ 是 H 中任意两个节点间最短路径的和与连接图中所有可能连接对的比值,  $H(G)$ 称为网络平均最短跳数,即

$$H(G) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{a,b \in D} P(a,b)$$

在  $H(G)$ 中,  $G=(D, B)$ 表示一个小世界网络的连接图。在 G 中有 N 个向量,  $|D|=N$ ,  $P(a,b)$ 表示向量 a 和 b(a,b ∈ D)之间的最短路径长度(跳数)。

**定义 3** 给定节点 d ∈ D,  $A_d$ 是 d 的本地聚类系数,则

$$A_d = \frac{|E(\lambda_d)| * 2}{l_d(l_d - 1)}$$

其中  $A(G)$ 称为图 G 的聚类系数,描述了图 G 的紧密程度,

$$A(G) = \frac{1}{N} \sum_{d \in D} A_d$$

在  $A_d$ 中,  $l_d$ 为节点 d ∈ D 连接的总链接数,而节点 d 的邻居是一组节点  $\lambda_d = \{i : P(i,j)=1\}$ 。

**定义 4** 在同一个簇内邻居节点的链接,称为近链接。

**定义 5** 超级节点与不同簇的任一节点的链接,称为远链接,一个簇的远链接总数记为 s。

**定义 6** 簇内包含节点最大数,称为簇大小,记作 M。

**定义 7** 相同簇内两个节点间最大的散列空间距离 L,称为簇直径。

**定义 8** 逻辑上位于簇中顺时针方向的第 1 个节点,称为超级节点,每个簇内只有 1 个超级节点。超级节点与簇内所有其他普通节点保持链接,并随机地与其它簇中任一节点建立链接。

**定义 9** 簇内不是超级节点的节点,称为普通节点。每个普通节点建立一个与超级节点的链接,也可与簇内其它普通节点建立链接。

### 2.2 SWLDRM 结构

SWLDRM 建立在 Chord 的网络层之上,它由 4 个部分组成:节点加入算法,节点离开算法,稳定性算法,对象查找算法,如图 3 所示。SWLDRM 逻辑拓扑结构为环状层次形,图 4 是 M=3, L=2, s=2 的 SWLDRM 模型逻辑拓扑示例。

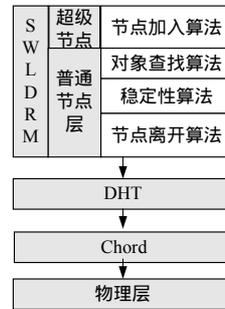


图 3 SWLDRM 层次结构

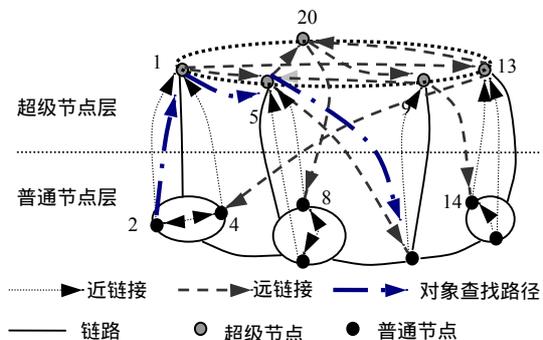


图 4 SWLDRM 逻辑拓扑示例

### 2.3 SWLDRM 算法描述

下面主要介绍SWLDRM的节点加入算法、稳定性算法、

对象查找算法。首先定义算法中各变量含义： $h(n)$ 为节点编号， $L$ 为节点间的距离， $M$ 为簇大小， $s$ 为一个簇的远链接数， $H(G)$ 是平均最短跳数， $A_d$ 表示聚类系数， $t$ 是簇的个数。

### (1)节点加入算法

当节点  $n$  加入网络时，使用相容哈希函数散列得到节点编号  $h(n)$ ，然后与其前继节点  $p$  和后继节点  $s$  分别建立链接。 $p$  和  $s$  上的关键词分别为  $h(p)$ 、 $h(s)$ ，满足  $h(p) < h(n) < h(s)$ 。 $n$  在找到  $p$  和  $s$  后，执行如下节点加入步骤：

1)节点 $n$ 分别确定与 $p$ 、 $s$ 间的距离。 $L_1$ 表示 $n$ 与 $p$ 间的距离， $L_2$ 表示 $n$ 与 $s$ 间的距离， $L_1=h(n)-h(p)$ ， $L_2=h(s)-h(n)$ 。

2)查询其前继节点 $p$ 和后继节点 $s$ 的簇大小 $M_p$ 、 $M_s$ 。

如果 $M_p > M$ ， $M_s > M$ ( $M$ 为网络中簇大小的最大值)，则节点 $n$ 建立一个新的簇；否则，转到b。

如果 $L_1 > L$ ， $L_2 > L$ ，则节点 $n$ 建立一个新的簇；如果 $L_1 < L < L_2$ ，则节点 $n$ 加入 $p$ 所在的簇，反之加入 $s$ 所在的簇。

3)节点 $n$ 判断自己是超级节点，还是普通节点。

如果节点 $n$ 建立一个新的簇，或者加入后继节点所在的簇(该后继节点为超级节点)，则节点 $n$ 为超级节点；

否则节点 $n$ 为普通节点。

4)建立近链接和远链接。

如果 $n$ 是普通节点，则建立与超级节点的近链接。否则，转到b。

如果 $n$ 是超级节点，则它需要建立与簇内所有普通节点的近链接，并建立 $s$ 个与其它簇内节点的远链接( $s < t$ )。

为了保持低的平均最短跳数 $H(G)$ 和高的聚类系数 $A_d$ ，超级节点在建立远链接时基于距离依赖概率密度函数  $p(x) = \frac{1}{x \ln(t)}$ ， $x \in (1, t)$ ，其中 $x$ 为超级节点产生的随机变量，确定 $x$ 后，超级节点与簇 $x$ 中的任一节点建立远链接。

### (2)稳定性算法

稳定性算法可以处理节点失效，恢复和维持网络中的连接，具体步骤如下：

1)每个节点周期性地向邻居节点发送探测消息，确认它们是否仍然存在。

如果同簇的普通节点没有回应该消息，则发送节点关闭连接，通知超级节点，将簇大小 $M$ 减1。否则，转到。

如果邻居超级节点没有回应该消息，则节点执行查找算法查找新的超级节点。

2)对于超级节点失效的情况，将超级节点的远链接复制到它的后继节点。当某个超级节点失效时，算法首先确认发现失效，然后执行对象查找算法找到原超级节点的后继节点，该后继节点成为新的超级节点。

3)新超级节点发送探测消息确认旧超级节点失效。如果失效被证实，新的超级节点开始接管超级节点的职责，对簇内每个普通节点发声明消息。

### (3)对象查找算法

对象查找算法可以处理节点的查找定位，具体步骤如下：

1)如果节点 $n$ 要查找节点 $w$ ，则 $n$ 向簇内连接的其它节点发送查找消息；如果这些节点中某一节点存储有查找内容，则发送应答消息，查找成功结束。否则转到2)。

2)节点 $n$ 检查自身状态，如果是超级节点，则通过远链接向与目标节点 $w$ 距离最近的节点发送查找消息。如果是普通节点，则向所在簇超级节点发送查找消息，超级节点再通过远链接向与目标节点 $w$ 距离最近的节点发送查找消息。这两步交替执行下去，直到找到目标节点。

## 3 仿真实验

为了分析 SWLDRM 性能，本文从对象查找平均逻辑跳数、网络聚类系数两个方面，将 SWLDRM 与 Chord 进行对比仿真实验，仿真实验在 Redhat Linux 9 平台上实现，实验

参数设置为：假设网络中有  $N$  个节点，每个节点分配 1 个关键词，每个节点执行 100 次查找操作，查找时间是 10s，查找目的关键词是随机选取网络中可用的关键词。使用 NS-2 来构建 SWLDRM 模型与 Chord 模型，仿真实验数据与结果分析如下：

### (1)对象查找性能仿真

SWLDRM 中  $M=50$ ， $L=1\ 000$ ， $s=16$ ，Chord 的路由表为 16 位。图 5、图 6 分别为节点数  $N=2\ 000$ ， $N=5\ 000$  时，SWLDRM 与 Chord 的查找路径经过的逻辑链接跳数曲线。

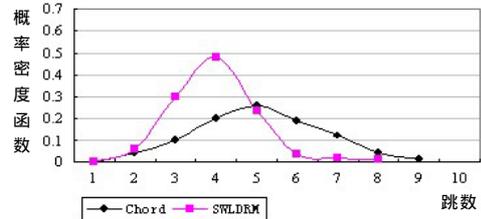


图 5 N=2 000 概率密度函数

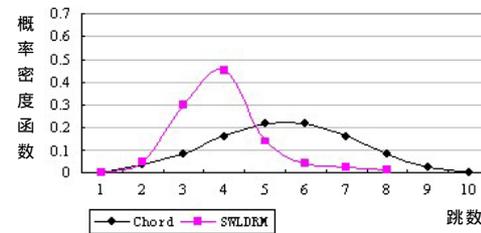


图 6 N=5 000 概率密度函数

可以看出， $N=2\ 000$  时，SWLDRM 查找成功的平均经过跳数是 3.48，Chord 查找成功的平均经过跳数是 4.52； $N=5\ 000$  时，SWLDRM 查找成功的平均经过跳数是 3.69，Chord 查找成功的平均经过跳数是 5.31。SWLDRM 比 Chord 经过的平均跳数小，能更快地查找找到目标，查找性能更好。随着节点数增加，SWLDRM 比 Chord 性能更稳定。

### (2)聚类系数仿真

SWLDRM 中  $M=50$ ， $L=1\ 000$ ， $s=\log(N)$ ，Chord 的路由表为  $\log(N)$  位。 $N=1\ 000$ ， $N=2\ 000$ ， $N=3\ 000$ ， $N=4\ 000$  时，分别计算 SWLDRM 模型与 Chord 模型的聚类系数，仿真实验结果见表 2。

表 2 Chord 与 SWLDRM 聚类系数仿真结果

节点数 $N$	Chord	SWLDRM
1 000	0.298 182 19	0.570 587 22
2 000	0.268 331 76	0.659 660 29
3 000	0.252 452 14	0.688 012 31
4 000	0.248 468 73	0.706 522 86

可以看出，当  $N=1\ 000$ ， $N=2\ 000$ ， $N=3\ 000$ ， $N=4\ 000$  时，SWLDRM 比 Chord 具有更高的聚类系数，SWLDRM 网络拓扑连接更紧密，能更好地反映小世界特性。随着节点数增加，Chord 的聚类系数呈下降趋势，处理瞬间拥塞负载能力降低；而 SWLDRM 的聚类系数增大，有更强的处理瞬间拥塞负载能力。

## 4 小结

本文应用 P2P 的小世界现象具有较高的聚类系数和较小的平均跳数特性，在分析 Chord 的基础上构建 SWLDRM。

(下转第 139 页)