

# 混合 Chord 网络中的有效关键字检索

叶晓舟<sup>1,2</sup>, 王劲林<sup>2</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 对基于分布式哈希表的 Chord 网络进行文件的精确匹配。采用反向索引方法可以实现基于关键字的检索, 但难以解决普遍关键字问题。HIKEC 是基于 IMS 的移动 P2P 文件共享服务网络架构, 采用混合 Chord 重叠网络。该文针对混合 Chord 网络, 在反向索引的基础上, 采用簇窗口映射、稀缺关键字优先查询和热点回溯等方法, 实现有效的关键字检索。仿真实验表明, 采用该方法各节点平均映射负载下降为原反向索引方法的 54.6%, 平均信令负载下降为原反向索引方法的 10.3%。

**关键词:** 关键字检索; 混合 Chord; 移动 P2P

## Efficient Keyword Search in Hybrid Chord Network

YE Xiao-zhou<sup>1,2</sup>, WANG Jin-lin<sup>2</sup>

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 2. Institute of Acoustic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**【Abstract】** DHT-based Chord network performs exact matching of files. Inverted index is proposed to implement keyword-based search in Chord while there is a big problem for common keywords. HIKEC is an IMS-based mobile P2P file sharing service architecture that implements hybrid Chord overlay network. According to the hybrid Chord network and based on inverted index. This paper implements three methods: cluster window mapping, rare keyword query first and hot spot trace-back, to realize efficient keyword search. Simulation shows that mean mapping-load, based on above methods, decreases to 54.6% of which is based on the original inverted index, meanwhile, mean signaling-load decreases to 10.3%.

**【Key words】** keyword search; hybrid Chord; mobile P2P

### 1 概述

对等网(P2P)将网络资源分布到各个结点, 如何快速有效地定位资源信息是P2P研究的主要方向之一。基于分布式哈希表(DHT)的结构化P2P网络具有扩展性好、检索效率高等特点。Chord<sup>[1]</sup>组建了一种环形的结构化P2P网络, 执行简单的操作, 即给定一个键值, 映射到一个结点。Chord一般将结点的IP地址进行一致哈希(consistent hash)生成结点ID, 将文件名或文件全文进行一致哈希生成文件ID, 执行<文件ID, 结点ID>映射。通过简单映射与路由表, Chord实现了内容信息的纯分布式和快速检索, 对稀缺文件的检索成功率高。非结构化P2P可以实现基于关键字的检索, 但是结构化DHT对文件名或文件全文的一致哈希使Chord网络不能支持基于关键字的检索, 只能进行精确匹配。反向索引(inverted index)方法<sup>[2]</sup>执行<文件关键字ID, 结点ID>映射, 通过冗余存储实现了关键字检索, 但是这种方法必然产生普遍关键字(common keywords)问题, 对于映射并承载普遍关键字的结点来说负载过大。单纯Chord网络不能提供有效的关键字检索。

HIKEC<sup>[3]</sup>是一种基于IP多媒体核心子系统(IMS)的移动P2P文件共享服务网络架构, 采用了混合Chord重叠网络模型(Napster+Chord), 保证了用户终端的简单操作和网络的扩展性, 面向移动和固定网络融合。本文针对HIKEC混合Chord网络特点, 基于反向索引, 采用簇窗口映射算法、稀缺关键字优先查询和热点回溯等方法, 可以在混合Chord网络上实现有效的关键字检索。

### 2 HIKEC 网络架构

HIKEC 是一种基于 IMS 的 P2P 文件共享服务网络架构。IMS 是基于全 IP 网络架构的多媒体业务与会话控制核心, 为

网络融合提供统一平台。HIKEC 采用 Napster + Chord 的混合 Chord 重叠网络, 如图 1 所示, 利用 IMS 的客户机/服务器模式在用户与其注册的索引服务器(SIP 应用服务器)之间实现类似 Napster 的簇架构, 索引服务器之间采用 Chord 协议建立环形网络, 实现基于 DHT 的分布式索引。HIKEC 基于 IMS 网络, 其用户实体和 SIP 应用服务器分别对应重叠网络中的用户节点和索引节点。本文只涉及 HIKEC 中的混合 Chord 重叠网络部分, 不涉及 IMS 功能实体, 因此, 后文中 HIKEC 均用混合 Chord 网络来表示。

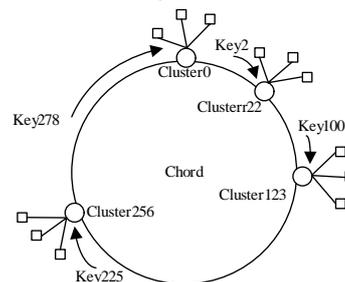


图1 混合 Chord 重叠网络架构

用户结点将本地文件进行哈希, 向索引结点注册文件信息列表, 向索引结点发起检索并根据检索结果与对等结点进行共享文件的 P2P 交换。在用户结点看来, 用户消息截止于索引结点, 用户结点的加入、离开和检索对于自身来说都是

**基金项目:** 国家发改委下一代互联网示范工程 2005 项目“视频多媒体点播系统”(CNGI-04-15-2A)

**作者简介:** 叶晓舟(1980 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 信号与信息处理; 王劲林, 研究员

**收稿日期:** 2007-06-30 **E-mail:** yexz@dsp.ac.cn

简单的  $O(I)$  操作，终端特别是移动终端避免了复杂的路由算法和信令带宽消耗。

索引结点将所在簇的文件列表分别映射到 Chord 网络上相应的索引结点，本地既保存来自其他索引结点的映射文件列表，同时也保存所在簇用户的注册文件列表。以冗余存储为代价，保证检索首先在簇内进行，可以充分利用用户结点的位置信息，使文件交换尽量在临近的结点间进行。只有在本地检索不充分的情况下，才利用 Chord 在映射结点上二级检索。 $N$  个索引结点组成的 Chord 网络中，索引结点的加入或离开需要  $O(\log^2 N)$  条消息来维护网络拓扑，但是由于索引结点可以看作永久性静态结点，因此网络拓扑维护消耗带宽可以忽略。

### 3 关键字检索

#### 3.1 反向索引

基于 DHT 的 Chord 网络执行 <文件 ID, 节点 ID> 映射，通过简单路由实现文件的快速检索。节点 ID 由节点 IP 进行一致哈希获得，而文件 ID 通过对文件名或文件全文进行一致哈希获得，因此，用户在检索过程中只能执行文件名或文件全文的精确匹配，但是大多数情况下用户不知道文件精确信息，需要执行基于关键字或关键字集合的检索。一种解决方法是通过网站公布文件 ID 和关键字集合等文件相关信息，用户在网站上通过关键字检索到文件 ID，进一步在 Chord 网络中定位文件，但是这种方法回归到网站中心服务器模式。

为了能够在混合 Chord 网络中实现关键字检索，本文采用反向索引 (inverted index) 方法，即获取文件的关键字，对文件关键字进行哈希，并根据文件关键字哈希值映射到相应索引结点，由 <文件 ID, 节点 ID> 映射转变为 <关键字 ID, 节点 ID> 映射。例如 6 个文件 {a.mp3, b.mp3, c.mp3, ab.mp3, bc.mp3, cd.mp3}，其关键字分别为 {a, b, c, d, mp3}，关键字一致哈希后分别映射到索引节点 {C1, C2, C3, C5, C4}，如图 2 所示。反向索引是一种冗余方式，各个关键字的映射索引节点都要保存文件信息，如图 2 中 C1 和 C2 分别保存了文件“ab.mp3”。关键字一般可通过文件名自动分析获取，也可以从音视频文件的版权信息等获取。在混合 Chord 网络中，文件信息首先注册到本地索引节点，然后索引节点根据关键字哈希值执行 Chord 映射。文件中的不同关键字可能会映射到相同的索引节点，不需要重复保存文件信息。为了加速文件检索，用户希望使用关键字集合缩小检索范围，本文使每个映射索引节点保存文件的所有关键字信息，用户只需向关键字集合中某一个关键字所映射的索引节点发送查询请求，即可在该索引节点执行关键字集合检索，不需要递归检索，减少了用户发送的查询请求数目，加速查询响应。

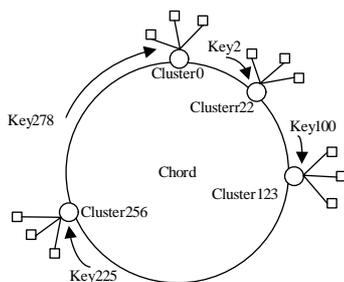


图 2 反向索引方法

反向索引不可避免地引入了普遍关键字问题，如图 2 中的关键字“mp3”具有普遍性，其映射结点 C4 将面临大量文

件信息存储和信令带宽负载。文件关键字统计特性呈现长尾分布<sup>[4]</sup>，处于头部的关键字普遍存在，而处于尾部的关键字很少出现。Chord 假设每个节点平等，长尾分布的关键字则使采用反向索引的 Chord 节点负载不均衡。混合 Chord 网络由于索引节点的存在，一定程度上平衡了映射负载，但是普遍关键字造成的大量存储和信令带宽消耗仍难以解决。本文采用簇窗口映射算法解决普遍关键字问题。

#### 3.2 簇窗口映射算法

HIKEC 采用 Napster + Chord 混合重叠网络，用户与索引节点一侧形成 Napster 簇，簇中索引节点具有天然的统计能力和统计信息，可以对文件关键字数目进行统计并进而采取过滤措施。设定簇关键字统计上门限  $f_h$ ，簇上所有统计计数值大于  $f_h$  的关键字被判定为普遍关键字。假设有新文件注册到索引节点 C1，文件包含关键字集合  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ ；C1 执行本地数据库统计，获取对应关键字的计数值集合  $V = \{v(k) | k \in K\}$ ；C1 对非普遍关键字集合  $U = \{k | v(k) < f_h, k \in K\}$  执行 Chord 映射，过滤普遍关键字集合  $P = \{k | k \in K, k \notin U\}$  即不产生映射。对于簇中到达门限  $f_h$  的关键字，由于不再产生新的映射，随着已映射用户或文件的离开，由该簇产生并映射到 Chord 环上的关键字文件信息会随之减少。为了保证 Chord 环上有充足的关键字文件信息，设定簇关键字统计下门限  $f_l$ ，从而与上门限  $f_h$  共同形成簇窗口。当簇上某一关键字统计超过上门限  $f_h$  成为普遍关键字后，该簇保证至少有  $f_l$  个包含该关键字的文件列表被映射到 Chord 中。假设簇 C1 中的关键字“a”成为普遍关键字，那么其他簇的用户至少可以在混合 Chord 网络中检索到  $f_l$  个 C1 簇包含关键字“a”的文件信息。当判断为普遍关键字的统计计数值在  $f_h$  处上下振荡时，仍判断为普遍关键字，映射保持于  $f_l$ ；当统计降低到  $f_l$  之下时，该关键字被判断为非普遍关键字，恢复所有 Chord 映射。以下为文件(关键字)注册和离开时簇窗口映射算法的伪代码：

```

//新文件注册(关键字 key)
statistics[key]++;
if (statistics[key]>fh || common[key]==TRUE)
{ common[key] = TRUE; }
else
{ common[key] = FALSE;
mapping(key); }
//文件离开(关键字 key)
statistics[key]--;
if (statistics[key]>fh)
{ common[key] = TRUE;
keep_fl_map(key); }
elseif (common[key]==TRUE && statistics[key]>fl)
{ keep_fl_map(key); }
else
{ common[key] = FALSE;
delete(key);
}

```

#### 3.3 稀缺关键字优先查询

索引节点采用冗余方式，保存反向索引映射到其上的所有文件关键字信息，因此，用户可以在一个索引节点上完成对该文件关键字集合的检索。但是，由于采用了簇窗口映射算法，携带普遍关键字的文件信息很可能不会保存到其普遍

关键字的映射索引节点上。如果用户查询关键字集合中包含普遍关键字,并且用户向该普遍关键字映射的索引节点发送查询请求,就会降低检索成功率。利用索引节点的关键字统计信息提高用户检索成功率。在用户使用关键字集合进行检索时,根据本地簇索引节点上的关键字统计信息进行排序,向计数值最少的关键字映射索引节点发送查询请求,即稀缺关键字优先查询。例如,用户使用 $\{k_1, k_2, k_3\}$ 关键字集合进行检索,本地索引节点根据关键字统计信息排序  $v(k_2) < v(k_1) < v(k_3)$ ,则本地索引节点将向 Chord 环上映射  $k_2$  的索引节点发送用户查询请求。

### 3.4 热点回溯

混合 Chord 网络中可能会出现簇热点问题。所谓簇热点问题是指某些文件被某一簇独有并爆发式增长,文件中所有关键字在本簇都成为普遍关键字,那么这些热点文件将执行上述普遍关键字的映射规则,而如果此时其他簇上该文件是稀缺文件,就会造成其他簇用户不能从混合 Chord 网络中获得该文件的充分信息,使热点簇形成热点文件孤岛。这时,可以采用热点回溯机制避免热点问题。由于簇窗口协议保证了普遍关键字至少有  $f_l$  个文件信息映射到 Chord 环中,用户查询可以获得  $f_l$  个文件信息并回溯到文件源索引节点即热点簇,进而对热点簇进行二次检索获取更多的文件信息。回溯机制要求文件注册时包含源索引节点信息。

### 3.5 文件信息表

为了实现有效的关键字检索,在索引节点构建索引信息表和映射信息表。索引信息表包含文件名称、所有关键字、映射真值、用户统一资源指示符(URI)等;映射信息表包含文件名称、映射关键字、其他关键字、用户 URI 等。其中,用户 URI 包括用户名或 IP 地址以及所属域(源索引节点);映射真值表明文件中该关键字是否产生 Chord 映射;文件名可以用于进行文件的精确匹配。以文件 John Lennon-Imagine. mp3 为例说明,其注册到本地索引节点 cluster123 上的索引信息表如表 1 所示,其关键字映射真值由簇窗口映射算法决定,表中,  $F, T, E$  为映射真值。文件中关键字“Imagine”映射到索引节点 cluster256 的映射信息表如表 2 所示,可以根据用户源索引节点信息实现热点回溯。索引节点根据索引信息表生成关键字统计信息,根据统计信息和映射真值执行簇窗口映射算法。

表 1 文件在 cluster123 的索引信息表

文件名	关键字				用户
	John	Lennon	Imagine	mp3	
John Lennon-Imagine.mp3	F	T	T	F	music@cluster123

表 2 文件在 cluster256 的映射信息表

文件名	映射关键字	关键字			用户
John Lennon-Imagine.mp3	Imagine	John	Lennon	mp3	music@cluster123

## 4 仿真实验

通过仿真实验验证簇窗口映射的有效性。仿真条件如下:共设 100 个索引节点和 2 000 个不同的关键字,每个索引节点映射 20 个不同关键字,关键字统计按照 Pareto 长尾分布;将用户节点和文件的加入、离开简化为关键字的加入和离开;每个索引节点上的关键字按照均值为 400/s 的泊松分布加入混合 Chord 网络,每个关键字注册持续时间按照均值为 200 s

的泊松分布;设定  $f_h$  和  $f_l$  分别为 20, 10。图 3 所示为网络稳定后(2 000 s 后)各个索引节点上保存的关键字映射负载对比。采用反向索引方法的各节点间关键字映射最大负载为结点 51 的 257 221 个;而采用簇窗口映射算法的各节点负载稳定在 86 000 左右,降至原最大负载的 33.4%,平均映射负载下降为原反向索引方法的 54.6%。关键字的混合 Chord 映射表现为用户文件的注册信令,图 4 为网络稳定后各个索引节点上的注册信令负载对比。采用反向索引方法的索引节点最大注册信令计数为 1 781 003,最小为 144 266;采用簇窗口映射算法的索引节点最大注册信令计数为 112 648,最小为 54 707,平均信令负载下降为原反向索引方法的 10.3%。可见,采用簇窗口映射算法后既平衡了各索引节点映射存储和信令负载,又有效降低了索引节点存储空间和信令带宽消耗。

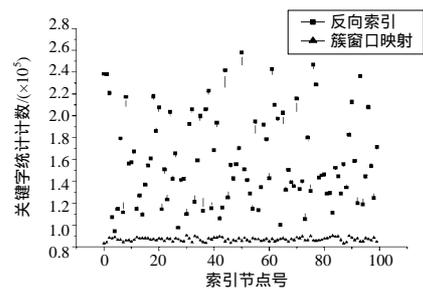


图 3 各节点关键字映射负载对比

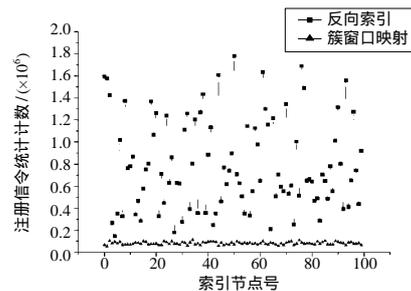


图 4 各节点注册信令负载对比

## 5 结束语

针对混合 Chord 网络(HIKEC),利用索引节点的统计信息和统计能力,基于反向索引实现关键字检索,采用稀缺关键字优先查询提高关键字集合检索成功率,采用热点回溯机制避免热点问题。实验表明,簇窗口映射算法可以均衡索引节点负载并有效降低负载存储空间和信令带宽消耗。通过上述方法在混合 Chord 网络中提供有效的关键字检索。

### 参考文献

- [1] Stoica I, Morris R, Liben-Nowell D, et al. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Protocol for Internet Applications[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 17-32.
- [2] Reynolds P, Vahdat A. Efficient Peer-to-Peer Keyword Searching[C]//Proc. of ACM/IFIP/USENIX International Middleware Conference. Rio de Janeiro, Brazil: [s. n.], 2003: 21-40.
- [3] Ye Xiaozhou, Zhang Jiandong, Wang Jinlin. Architecture of HIKEC: An IMS-based Mobile P2P File Sharing Service[C]//Proc. of International Conference on Communication Technology. [S. 1.]: IEEE Press, 2006: 1122-1125.
- [4] Zipf G. Selective Studies and the Principle of Relative Frequency in Language[M]. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1932.