

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.05.009

# DHT 的分层结构多出口选择问题研究

张 泰<sup>1</sup>, 王 胜<sup>1</sup>, 柴继文<sup>1</sup>, 向 宏<sup>2</sup>, 李 可<sup>3</sup>

(1. 国网四川电科院 信息通信安全技术监督室, 成都 610000; 2. 重庆大学 信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室, 重庆 400044; 3. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 611756)

**摘 要:** 为了提高系统可靠性和查询效率, 提出了具有多管理节点(出口节点)的 DHT 分层模型, 并给出了 3 种查询算法: 最短路径选择算法、基于热土豆模型的最小化组内流量算法和出口节点负载均衡选择算法。通过仿真实验对 3 种算法在查询效率、流量分析和负载均衡 3 个维度进行了分析比较, 基于热土豆模型的最小化组内流量算法具有最高的查询效率, 但是负载均衡性能最差, 出口节点负载均衡选择算法具有最好的负载平衡性, 但查询效率最低, 最短路径算法性能则介于上述两种算法之间。同时对传统分层结构所采用的随机查询算法与基于热土豆模型的最小化组内流量和最短路径查询算法进行了性能对比。

**关键词:** 分布式哈希表; 分层结构; 查询效率; 负载均衡

中图分类号: TN914

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)05-072-09

## Multiple gateway nodes selection of DHT-based hierarchy model

ZHANG Tai<sup>1</sup>, WANG Sheng<sup>1</sup>, CHAI Jiwen<sup>1</sup>, XIANG Hong<sup>2</sup>, LI Ke<sup>3</sup>

(1. Department of Information and Communication Security and Technology, Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610000, P.R.China; 2. Key Laboratory of Dependable Service Computing in Cyber Physical Society, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China; 3. School of Information Science and Technology, Southwest Jiao Tong University, Chengdu 611756, P.R.China)

**Abstract:** A hierarchy model of multiple manager nodes based on DHT was proposed to solve the single-point problem and to improve the lookup efficiency of traditional hierarchical DHT, and then three lookup algorithms, i.e. the shortest path selection algorithm (SPSA), the minimum intra-group traffic based on hot potato algorithm (MIT\_HP) and the load balancing with gateway selection algorithm (LBGS), were proposed. Simulation experiments were carried out to analyze lookup efficiency, intra-group traffic and load balance of the three algorithms. The simulation results show that the MIT\_HP algorithm has the maximal lookup efficiency but has the worst load balance, the LBGS has the best load balance but has the worst lookup efficiency, and the performance of SPSA is between MIT\_HP and LBGS. In addition, the paper presents performance comparison between MIT\_HP and SPSA with random lookup algorithm which adopted by traditional hierarchical DHT.

**Keywords:** DHT; hierarchical model; lookup efficiency; load balance

收稿日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金青年资助项目(61402384)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (61402384).

作者简介: 张泰(1982-), 男, 博士, 主要从事电力通信方向研究, (E-mail) arcaffier@163.com。

分布式哈希表(DHT)<sup>[1-4]</sup>是一种分布式查询系统,具有查询扁平化、良好的可扩展性和可靠性<sup>[5]</sup>等优点,因此 DHT 得到了广泛的应用<sup>[6-14]</sup>。与此同时,较低的查询效率( $\log N$ ,  $N$  为系统节点)是 DHT 的缺点,因此,如何提高 DHT 的查询效率一直是研究的热点,在众多的解决方法中,层次化方法<sup>[15-22]</sup>不仅能提高查询效率,同时能减轻节点及链路上的流量负载,因而得到广泛的关注。一般来讲,层次化 DHT 结构分为 2 层:顶层和底层,其中,底层由所有分组构成,分组的构建主要遵循以下 2 个原则,其一是根据网络拓扑结构,将物理位置相近的节点放在一个分组内;其二是按照“语义(semantic)”来创建分组,这里所谓语义是指节点上所存储数据的类型,将存储相同类型数据(.mp3 或者.avi 等)的节点放在一个分组内。每个分组选出一个代理节点(proxy node)构成顶层结构(顶层拓扑一般仍然采用 DHT 连接),通常来讲,代理节点比组内其它节点具有更高的带宽和更强的处理能力,因此,代理节点又称为管理节点或者超级节点,在文章后面部分统称为管理节点。为了减轻管理节点的处理压力,同时避免单点失效问题(single point problem),一个分组需要多个管理节点。因此,这样的分层 DHT 结构可以类似看成 Internet 网络架构,每个分组可以看成是一个自治域(autonomous system, AS),顶层结构可以近似地看成是 Internet 的核心网络,因此管理节点可以看成是每个自治域(分组)的网关,负责域内域外节点的通信。分层 DHT 的查询首先在分组内进行,如果查找目标不存在于分组内,则通过管理节点到其它分组进行查找。

Ratnasamy<sup>[3]</sup>最早提出利用分层思想来提高 CAN 的查询效率,Ratnasamy 提出利用网络标志(network landmark)测算的方法来计算系统节点到测试节点的时延,将具有相似时延结果的节点划分为一组。Garces<sup>[15]</sup>借助 IP 网络的路由方式实现了 2 层 DHT 结构,顶层和底层均通过 Chord 连接,每个分组由一个管理节点管理。管理节点负责组内节点与外部节点的通信。对于每个分组拓扑结构,作者提出可以根据节点数目的规模来选择星型连接、集中式连接和 DHT 连接,当分组内节点数目较少时,可以采用集中式或者星型连接方式,当节点数目较大时,可以采用 DHT 连接方式。HIERAS<sup>[16]</sup>利用(distributed binning scheme, DBS)方法将物理拓扑上距离相近的节点划分为一个分组,与其它分层结构不同的是,HIERAS 的每一个节点同时属于所有的分组,查询采用从下至上的方式进行,如果在所有分组内均未查找到目标则在顶层全局进行查找,HIERAS 虽然提高了查询效率,但同时也增加了每个节点的开销。Canon<sup>[18]</sup>采用类似域名解析系统(domain name system, DNS)的分层结构,底层由系统所有节点构成,每个中间层节点为一个分组并采用 DHT 连接方式,除了查询本地化优化之外,这种基于树形的分层结构能够有效利用缓存和多播技术来提高系统的查询效率。Cyclone<sup>[19]</sup>虽然与 Canon 具有相同的树形分层结构,但是 Cyclone 具有垂直和平行 2 个平面的层次化结构,同时为了实现负载均衡,Cyclone 对节点 ID 的定义采用与 IP 地址命名相同的规则,对于一个  $n$  比特的节点 ID,前  $p$  个比特表示节点的 ID,后面  $n-p$  的比特表示节点所在分组的 ID。

然而,对分层 DHT 的传统研究多数集中在分层结构的构建和流量分析方面,极少关注在多管理节点结构下分层 DHT 查询效率和节点负载均衡问题,因此,提出了基于 DHT 的多管理节点分层结构,在多管理节点结构下针对分层 DHT 结构的查询效率和节点负载均衡做了一些研究。

## 1 多管理节点模型及出口选择策略

为了避免单点失效问题和减轻分组管理节点的压力,提高系统的可靠性和健壮性,一个分组应该具有多个管理节点。图 1 给出了多管理节点分组结构,如图所示,分组  $i$  有 3 个管理节点,分别为 MN1、MN2 和 MN3。这里需要特别说明的是,多管理节点分层模型的底层和顶层拓扑均采用 Chord 结构。对分组内部的节点来说,多个管理节点意味着当它们与外部节点通信的时候,有多个出口可以选择。特别的,对于图 1 分组  $i$  中的节点来说有 3 个出口可供选择,而采用何种出口选择策略对系统的性能会产生不同的影响,研究将从“查询效率”、“最小化系统流量”和“负载均衡”3 个维度来考察不同的出口选择策略对系统性能的影响。注意,为了描述方便,“管理节点”和“出口节点”将交替出现。

### 1.1 最短路径选路算法

为了最大化系统的查询效率,提出了最短路径选择算法(shortest path selection, SPSA),SPSA 是一种贪婪算法,总是选择距离目的地址最近的出口节点,如图 2 所示,分组  $i$  中有节点对  $k_1, k_2$  发出查询(注意,此时查询目标  $k_1, k_2$  不存在于本地分组内),此时,基于 SPSA 算法思想,由于距离  $k_1$  最近的出口节点为出口 2,距离  $k_2$  最近的出口节点为出口 3,因此,分组内对  $k_1$  进行查询的所有节点都将选择出口 2,对  $k_1$  进行查询的所有节点将选择出口 3,代码见表 1。

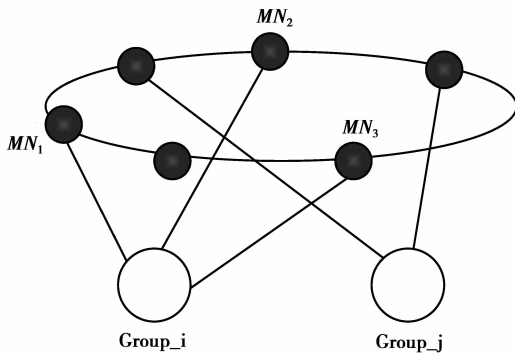


图 1 多管理节点模型

Fig.1 Multiple manager-node model

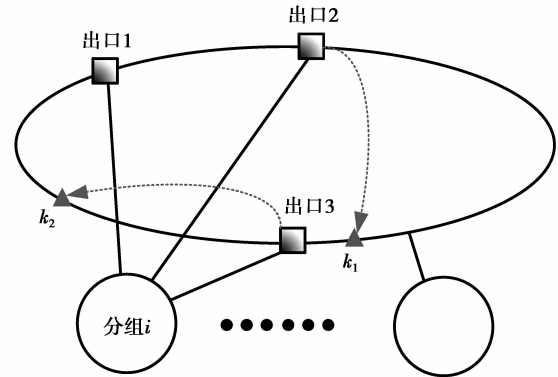


图 2 最短路径选择算法

Fig.2 Shortest path selection algorithm

表 1 SPSA 算法伪码

Table 1 Pseudocode of shortest path selection algorithm

SPSA 算法的伪码

SPSA 算法的伪码	
$N = \{N_1, \dots, N_m\}$ // 一个分组的管理节点的集合 //	
$L = \{l_1, \dots, l_m\}$ // 管理节点当前的负载 //	
$T = \{\rho_1, \dots, \rho_m\}$ // 管理节点负载门限值 //	
SPSA (Source, Destination, N, L, T)	
1	inquiry (SourceID, DestinationID);
2	Pick up the node $j$ from $N$ that nodeID $j$ is more close to destinationID than any other node of $N$ ;
	Node = Node - node $j$ ;
	// 在出口节点集合 $N$ 中找最接近目标 ID 的节点 //
3	check the load of node $j$
	if $l_j > \rho_j$
	goto setp 2
	else forward the message to $N_j$
	// 如果当前节点过载则返回第二步, 如果当前所选节点不过载, 则选择当前节点转发 //
4	end

### 1.2 基于热土豆模型的最小化组内流量算法

在业务量工程相关问题中,“hot-potato<sup>[23-24]</sup>”路由算法的基本思想是通过对比一系列对等条件,把去往域外的流量从最近的出口导出域外,从而减轻域内各链路上的流量负载,达到提高链路利用率和网络性能的目的。图 3 所示为“hot-potato”模型, A、B 和 C 分别代表 3 个路由器, 其中 B 和 C 为边界路由器, 路由器 A 和 B 之间的代价为 9, A 和 C 之间的代价为 12, 因此, 在 hot-potato 模型下, 通过 A 去往域外的流量将选择边界路由器 B。

根据“Hot-potato”模型思想,笔者提出“基于热土豆的最小化组内流量”算法:MIT\_HP (minimum intra-group traffic based on hot potato algorithm)。算法的基本思想:分组内的每个节点在其路由表中维护到所有出口节点的路由代价(hops),当存在去往分组外的查询是,当前节点总是选择距离自己最近(路由代价最小)的出口节点。由于查询的突发性和随机性,可能导致某些出口节点在短时间内收到大量的查询,大量的突发流量将导致查询排队队列的增加,甚至阻塞出口节点,降低网络吞吐量。因此,每个出口节点都将设置一个负载门限值,节点在选择出口节点时首先判断出口节点是否过载,如果判断所选择的出口节点过载,就选择除了当前出口节点之外,路由代价最小的出口节点。MIT\_HP 算法如图 4 所示,代码如表 2。

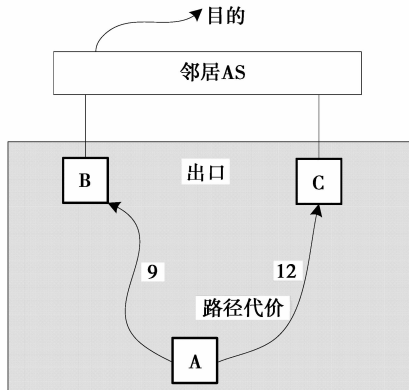


图 3 热土豆模型

Fig.3 “hot-potato”model

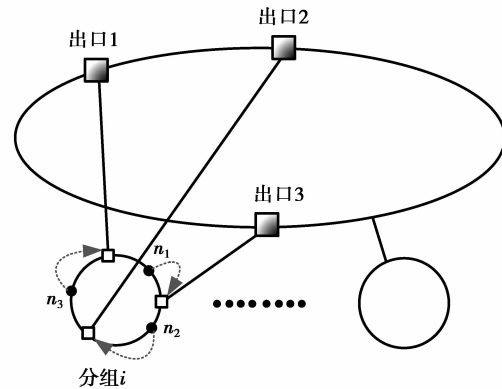


图 4 MIT\_HP 算法示意图

Fig.4 the picture of MIT\_HP

表 2 算法 MIT\_HP 的伪码

Table 2 Pseudocode of minimum intra-group traffic based on hot potato algorithm

算法 MIT_HP 的伪码	
$N = \{N_1, \dots, N_m\}$	// 一个分组的管理节点的集合 //
$L = \{l_1, \dots, l_m\}$	// 管理节点当前的负载集合 //
$T = \{\rho_1, \dots, \rho_m\}$	// 管理节点负载门限值 //
MIT_HP(SourceID, DestinationID, NodeID, L, T, H)	
1. Compute(Node_ID, N_ID)	
for $i = 1$ to length (N)	
Invoking Chord_lookup function (Node_ID, N_ID)	
$H = \{h_1, h_2, \dots, h_r, h_i < h_{i+1}\}$	
// 计算当前节点到各个出口节点的距离并按照从小到大顺序排列,用集合 H 表示 //	
2. For ( $i=1, i < \text{length}(H), i++$ );	
If $l_i < \rho_i$	
Forward the inquiry to this N	
Else forward the inquiry to $MN_{i+1}$	
// 如果所选择出口节点的负载过载,则选择下一个出口节点转发 //	

### 1.3 出口节点负载均衡选择算法

在某种意义上,系统具有较好的负载均衡意味着系统公平性越好。基于此,从系统负载均衡和出口节点公平性角度出发,提出了 2 种算法:LBGS\_1(Load balancing with gateway selection\_1)和 LBGS\_2(Load balancing with gateway selection\_2),LBGS\_1 算法思想很简单,节点转发消息时,在本地路由表中随机地选择一出口节点,为了保证管理节点的公平性,LBGS\_2 算法在每一次选择出口的时候,选择负载最小的出口节点(可以统计节点消息计数来计算节点负载的高低),代码如表 3。

表 3 LBGS\_1 和 LBGS\_2 算法的伪码

Table 3 Pseudocode of load Balancing with Gateway Selection\_1 algorithm and Load Balancing with Gateway Selection\_1 algorithm

LBGS_1 和 LBGS_2 算法的伪码
Count_set//管理节点收到的查询 messages 计数的集合//
Count_j//管理节点 j 收到的查询 messages 计数//
1. LBGS_1 (sourceID, destinationID, M_list)
2. For each query i
Randomly select a node j from M_list and send the message to it
Count_j = Count_j + 1;
end
3. LBGS_2 (sourceID, destinationID, M_list, Count set)
4. Select the minimum count_j from Count_set and send the message to manage node j
Count_j = Count_j + 1;
end

为了比较 2 种算法的公平性,采用公式(1)来考察。

$$FI = \frac{\left| \sum_{j=1}^{M\_list} Count_j \right|^2}{n \sum_{j=1}^{M\_list} Count_j^2}, \quad (1)$$

函数 FI(jain's fairness index)是一个被广泛认同用来衡量系统公平性的函数,从公式(1)可以得到,FI 的取值范围为(0,1],当 FI 的值为 1 时,说明系统具有最好的公平性,反之 FI 值越小,表明系统公平性越差。

## 2 仿真结果与分析

对于传统分层结构,平均查询效率为

$$1/2\log N + 1/2\log S + 1/2\log N = \log N + 1/2\log S, \quad (2)$$

而多节点分层结构的平均查询效率为

$$1/2\log N + 1/2\log(S/r) + 1/2\log N = \log N + 1/2\log(S/r), \quad (3)$$

式(2)和(3)中, $N$ 为分组中节点数目, $S$ 为顶层节点数目, $r$ 为分组出口节点数目,由此可见,多出口分层模型的查询效率要高于传统分层模型。

研究侧重分析了在多出口模型下 3 种算法在查询效率、负载均衡和节点公平性 3 个维度考察算法的差异。

前面分别给出了最短路径选择算法、基于热土豆模型的最小化组内流量算法和出口节点负载均衡选择算法,3 种算法从不同的角度考察分层系统的性能。研究给出 3 种算法的性能分析。实验仿真环境如下:分层拓扑结构分组节点数分别为 2 000 和 4 000,分组数量为 100,每个分组的管理节点数目分别为 3,4,5,查询服从 Zipf 分布。仿真数据分别考察了系统的查询效率、组内流量和出口节点负载均衡。

图 5 所示为分组内部节点数目为 2 000,管理节点数目为 3,查询服从 Zipf 分布,当 Zipf 参数不同时,MIT\_PH、SPSA 和出口节点负载均衡选择算法(LBGS\_1)对系统查询延迟的影响。从图中可以看到,LBGS\_1 算法查询效率最低,MIT\_HP 算法的性能上要优于 SPSA 算法,似乎与算法分析预期不符合,但是通过对实验仿真环境和仿真数据仔细分析后不难得出结论,出现这种情况的原因是 SPSA 仅能保证在顶层取得查询延迟最小,底层(组内)的情况较复杂,其查询延迟受到查询分布和节点数目二者的共同影响,在提出的实验环境中,分层拓扑结构组内的节点数目要远远多于顶层节点数(顶层节点数量为 300~500,而组内节点数目为 2 000~4 000),MIT\_HP 算法能保证底层组内查询延迟最小,因此从查询效率贡献上来讲,MIT\_HP 算法要优于 SPSA 算法。

图 6 所示为 MIT\_HP 算法与 SPSA 算法流量对比,由于 MIT\_HP 算法总是从最近的出口节点导出查询消息,因此较 SPSA 具有较低的流量,图中能清晰地反映这一规律。

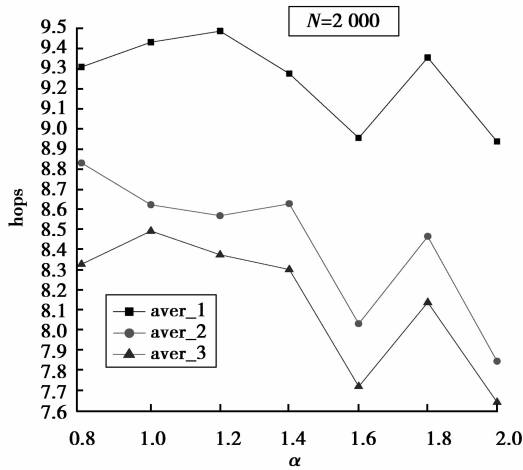


图 5 3 种出口选择算法查询效率对比

Fig.5 The comparison of lookup efficiency of the three selection algorithms

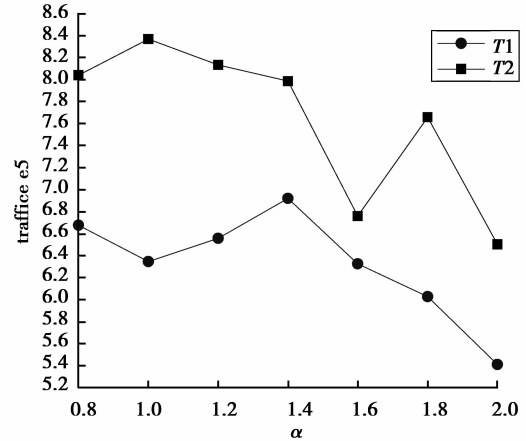


图 6 MIT\_HP 与 SPSA 流量对比分析

Fig.6 The comparison of traffic of MIT\_HP and SPSA

表 4 给出了 3 种出口选择算法下分组内流量比较,从表中可以看出,MIT\_HP 算法总是具有最小的分组内流量(count 3 表示)。

表 4 3 种出口选择算法分组内流量对比

Table 4 The comparison of intra\_group traffic of the three algorithms

alpha	count1	count2	count3
0.8	1.05E+06	1.10E+06	861 732
1.0	1.05E+06	1.09E+06	861 732
1.2	1.08E+06	1.06E+06	861 732
1.4	1.05E+06	1.03E+06	861 732
1.6	1.05E+06	0.974 96	86173 2
1.8	1.05E+06	1.08E+06	861 732
2.0	1.05E+06	1.03E+06	861 732

表 5 给出了 3 种算法下管理节点的负载公平性的对比情况,其中,FI\_1 为 LBGS\_1 公平性函数值,FI\_2 为 SPSA 算法得到的公平性函数取值,FI\_3 为最 MIT\_HP 得到的公平性函数取值。可以看到,采用 LBGS\_1 取得最好的公平性,FI 取值接近于 1,意味着每个管理节点上的负载几乎相同。这里特别要说明的是,在基于热土豆模型最小化组内流量算法下,由于组内每个节点的查询数量没有发生变化(仅仅是查询目标发生变化),而算法选择出口总是选择距离自己最近的出口节点,因此,FI\_3 的值保持不变。

表 5 3 种出口选择算法管理节点负载均衡对比

Table 5 The comparison of load-balancing of manager mode of the three algorithms

alpha	FI_1	FI_2	FI_3
0.8	0.999 4	0.603 3	0.605 8
1.0	0.999 8	0.598 7	0.605 8
1.2	0.998 7	0.587 3	0.605 8
1.4	0.999 6	0.540 3	0.605 8
1.6	0.995 8	0.525 1	0.605 8
1.8	0.998 9	0.553 1	0.605 8
2.0	0.997 5	0.540 3	0.605 8

图 7 所示为 3 种算法的查询效率对比,实验仿真环境为:分组节点数为 4 000,管理节点数为 5,查询分布服从 Zipf 分布(参数变化)。图中 av\_1、av\_2 和 av\_3 分别表示 LBGs\_1、MIT\_HP 和 SPSA 3 种算法,从图中可以清楚地看到,LBGS\_1 算法具有最低的查询效率,MIT\_HP 和 SPSA 算法的查询效率相近,随着管理节点数目的增加,最短路径算法对整个系统的查询效率贡献越来越多,在这种情况下,SPSA 算法较 MIT\_HP 算法有较高的查询效率,这和前面的分析相符合。

图 8 和图 9 所示为 3 种算法下系统顶层流量和分组内部流量的分析对比,这里分组节点数为 4 000,管理节点数为 5,查询分布服从 Zipf 分布(参数变化)。图中 T11、T22 和 T33 分别表示 SPSA、MIT\_HP 和 LBGs\_1 3 种算法所产生的流量。从图中可清晰地看出,最短路径查询算法总能使得系统顶层产生最小流量,而对于底层来说,MIT\_HP 能取得最小流量。

图 10 给出了传统查询算法和多出口模型下查询算法的一个对比,图中,  $S_1$  表示传统查询算法查询效率的理论值,  $S_2$  为其仿真值;  $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  分别为出口节点为 3,4,5 的时候多出口模型下查询效率的仿真值。从图中可以清楚地看到,多出口模型下的查询效率要明显高于传统分层查询效率。

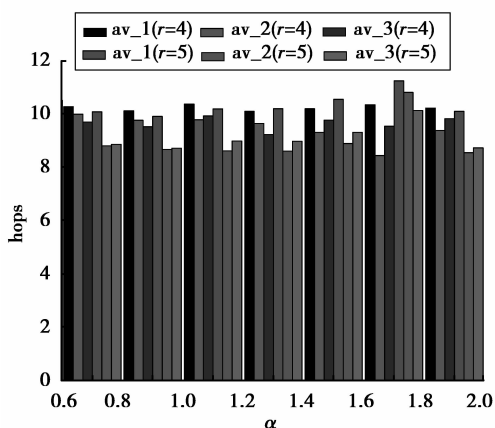


图 7  $N=4\ 000, r=4,5$  查询效率对比分析  
Fig.7 The comparison of lookup efficiency when  $N=4\ 000, r=4,5$

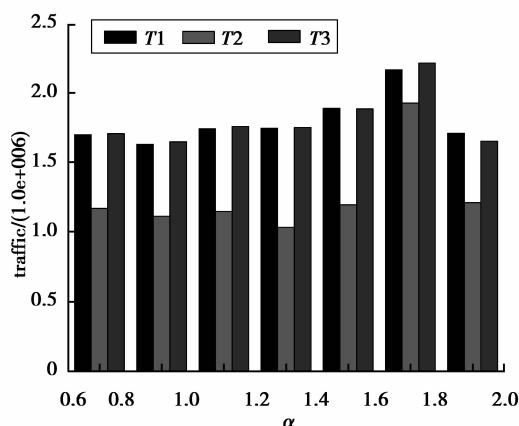


图 8  $N=4\ 000, r=5$  顶层流量对比分析  
Fig.8 The comparison of top hierarchy traffic when  $N=4\ 000, r=5$

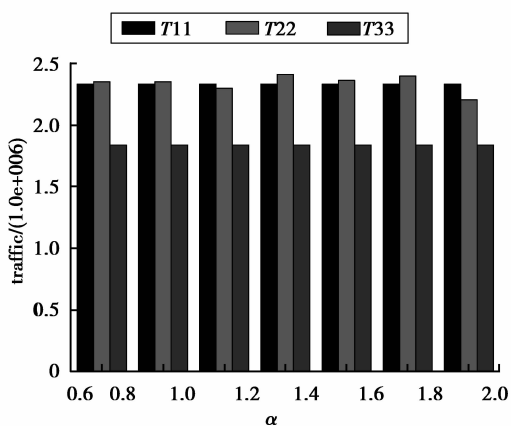


图 9  $N=4\ 000, r=5$  底层流量对比分析  
Fig.9 The comparison of low hierarchy traffic when  $N=4\ 000, r=5$

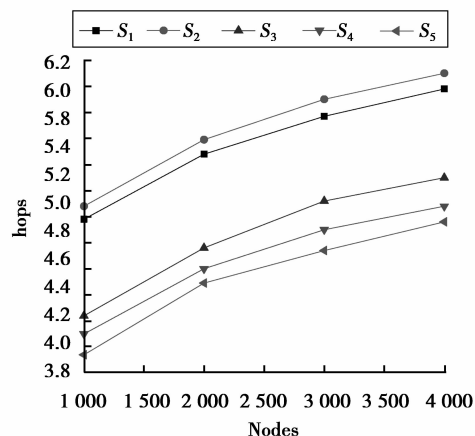


图 10 传统算法查询效率 v.s 多出口模型查询效率  
Fig.10 The lookup efficiency of traditional model v.s. multiple manager

表 6 对具有多出口分层 DHT 结构与传统分层 DHT 结构进行了一个简单的对比,在可靠性、出口节点负载、分组内部流量和查询效率方面,所提结构均优于传统分层结构。

表 6 多出口分层模型与传统分层结构的对比

Table 6 the performance comparison of multiple manager node hierarchy model with traditional hierarchy model

	多出口分层模型	传统分层结构
可靠性	高	低
出口节点负载	低	高
分组内部流量	低	高
查询效率	高	低

### 3 结 语

传统分层 DHT 结构以管理节点构成顶层,底层由各个分组构成。在此基础上,提出了具有多个管理节点(管理节点)的分层 DHT 模型。传统分层 DHT 结构在系统构建以及流量分析和查询效率上做了一定研究,但是忽略了对于多管理节点结构的相关研究。具有多出口分层 DHT 结构首先能够增加系统的可靠性,解决单点失效的问题,其次,多管理节点对于分组来说意味着有多个出口节点可以选择。研究提出具有多个管理节点的分层结构并分别从查询效率,负载流量和负载均衡 3 个方面进行了分析,进而提出了 3 种出口选择算法:最短路径出口选择算法、基于热土豆模型的最小化组内流量算法和出口节点负载均衡选择算法。

研究在不同实验条件下对 3 种算法进行了仿真分析。首先,将 MIT\_HP 算法和 SPSA 算法与随机选择算法进行了对比分析,证明了所提出的 2 种算法在查询效率上要优于传统查询算法;其次,分析了 MIT\_HP 算法和 SPSA 算法在性能上的差异;最后,对 3 种算法在负载流量和系统公平性做了分析对比。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Stoica I, Morris R, Nowell D L, et al. Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for internet applications[J]. IEEE Journal of Transactions on Networking, 2003, 11(1): 17-32.
- [ 2 ] Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems[C]//In Proc. of IFTP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms (Middleware), Heidelberg. Germany: IEEE, 2001: 329-350.
- [ 3 ] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A scalable content-addressable network[C]//In Proc. of ACM Sigcomm Conference. San Diego: IEEE, 2001, 162-171.
- [ 4 ] Manku G, Bawa M, Raghavan P. Symphony: Distributed hashing in a small world[C]//In Proc. of 4th Usenix Symposium on Internet Technologies and Systems. Seattle: IEEE, 2003, 1-10.
- [ 5 ] 王华东,廖利.平衡理论的 P2P 网络分布式信任模型[J].重庆大学学报自然版,2014,37(6):104-111.  
WANG Huadong, LIAO Li. The distributed trust mode of P2P network based on Balanced theory[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(6): 104-111. (in Chinese)
- [ 6 ] Li L, Zhang C, Wang Y, et al. Reliable and scalable DHT-based SIP server farm[C]//In Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference. New Orleans: IEEE, 2008, 1-6.
- [ 7 ] Fiedler J, Kupata T, Magedanz T, et al. Reliable VoIP services using a peer-to-peer intranet[C]//In Proc. of IEEE International Symposium on Multimedia, San Diego. California: IEEE, 2006:121-130.
- [ 8 ] Matuszewski M, Garcia-Martin M A. A distributed IP multimedia subsystem (IMS)[C]//IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Helsinki: IEEE, 2007: 1-8.
- [ 9 ] Doi Y, Wakayama S, Ishiyama M, et al. On scalability of dht-dns hybrid naming system[J]. Technologies for Advanced Heterogeneous Networks II, 2006: 16-30.
- [10] Mathy L, Iannone L, Bonaventure O, et al. LISP-DHT: towards map identifiers onto locators[C]//In Proc. of 2008 ACM



- CoNEXT Conference, [S.L.]: IEEE, 2008: 61-71.
- [11] Luo H B, Qin Y, Zhang H K. A DHT-based identifier-to-locator mapping approach for a scalable Internet[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(12): 1790-1802.
- [12] Tarkoma S, Ain M, Visala K. The publish/subscribe Internet routing paradigm(PSIRP): Designing the future Internet architecture[J]. Towards the Future Internet, 2009.
- [13] Fotiou N, Nikander P, Trossen D, et al. Developing information networking further: From PSIRP to PURSUIT[J]. Broadband Communications Networks, and Systems, 2012: 1-13.
- [14] Lagutin D, Visala K, Tarkoma S. Publish/subscribe for internet: PSIRP perspective[M]. [S.L.]: Valencia FIA book 4, 2010.
- [15] Garces-Erice L, Biersack W E, Ross W L, et al. Hierarchical peer-to-peer systems[J]. Parallel Processing Letters, 2003, 13(4): 643-657.
- [16] Xu Z, Min R, Hu Y. HIERAS: a DHT based hierarchical p2p routing algorithm[C]// In Proc. of IEEE International Conference on Parallel Processing. Kaohsiung: IEEE, 2003: 187-194.
- [17] Ratnasamy S, Handely M, Karp R, et al. Topologically-aware overlay construction and server selection[C]// In Proc. of IEEE Conference on INFOCOM. New York: IEEE, 2002, 1190-1199.
- [18] Ganesan P, Gummadi K, Garcia-Molina H. Canon in G major: designing DHTs with hierarchical structure[C]// In Proc. of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Tokyo: IEEE, 2004, 263-272.
- [19] Artigas M S, Lopez P G, Ahullo J P, et al. Cyclone: A novel design schema for hierarchical dhTs[C]// In Proc. of IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing. Konstanz: IEEE, 2005, 49-56.
- [20] Faycal M, Serhrouchni A. CAP: a context-aware peer-to-peer system[J]. OTM: On the Move to Meaningful Internet Systems 2007: 950-959.
- [21] Faycal M, Serhrouchni A. NETPOPPS: a network provider oriented peer-to-peer system[C]// In Proc. of IEEE NTMS'08 New Technologies, Mobility and Security, Tangier. [S.L.]: IEEE, 2008, 1-6.
- [22] Xie H, Yang Y R, Krishnamurthy A, et al. P4P: provider portal for applications[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2008, 38(4): 351-362.
- [23] Teixeira R, Shaikh A, Griffin T, et al. Dynamics of hot-potato routing in IP networks[C]// In Proc. of ACM Sigmetrics, [S.L.]: IEEE, 2004.
- [24] Teixeira R, Griffin T, Shaikh A, et al. Network sensitivity to hot-potato disruptions[C]// In Proc. of ACM Sigcomm '04. Portland: IEEE, 2004.