

基于位置关联 Chord 的名址分离映射系统

穆晏如, 江凌云

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 名址分离网络中需要一个高性能、可扩展、分布式的映射解析系统, 用来管理名称和地址之间的绑定信息, 可靠有效地处理名称的位置查询。在映射系统的设计中, 结构化分布式哈希表技术是使用最广的, 为解决其中物理网络与逻辑网络的失配问题, 以及高移动场景下的高更新成本问题, 设计了一个基于位置关联 Chord 的名址分离映射系统。通过在逻辑网络中节点的路由表内添加物理网络的拓扑信息, 改变了 Chord 环的递归查找过程。此外名称与地址的绑定关系分域内域外两级管理, 域内直接绑定 IP 地址, 域外更换绑定信息为名称与网络地址, 通过增加一跳的查询将绑定信息更新范围尽可能地缩小在域内, 提高了系统的映射解析性能。经理论分析和仿真测试验证, 相较于 LISP-DHT, 基于位置关联 Chord 的映射系统的平均查询时延更小。

关键词: 网络通信; 名址分离网络; Chord; 映射系统; 分布式哈希表

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2021)04-0131-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2021.04.022

Name-address Separation Mapping System Based on Location-related Chord

MU Yan-ru, JIANG Ling-yun

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In the name-address separation network, a high-performance, scalable and distributed mapping analysis system is needed to manage the binding information between names and addresses, and to reliably and efficiently handle the location query of names. In the design of the mapping system, the structured distributed hash table technology is the most widely used. In order to solve the problem of mismatch between the physical network and the logical network, as well as the high update cost in high mobile scenarios, we design a Chord's name-address separation mapping system. By adding the topology information of the physical network to the routing table of the nodes in the logical network, the recursive search process of the Chord ring is changed. In addition, the binding relationship between name and address is managed at two levels within the domain and outside the domain. IP addresses are directly bound in the domain. The binding information is changed to the name and network address outside the domain. The scope of updating the binding information is reduced as much as possible by adding a one-hop query. In the domain, the mapping analysis performance of the system is improved. The theoretical analysis and simulation tests verify that compared to LISP-DHT, the average query delay of the location-based Chord mapping system is smaller.

Key words: network communication; name-address separation network; Chord; mapping system; distributed hash table

0 引言

信息技术飞速发展的 20 年间, 网络技术和应用的更新迭代影响着现代信息社会。其中, 互联网以其开放透明、资源共享等特性分布最广, 是现代通信网络的重要组成部分, 以其分层结构为蓝本的新型网络也在各领域发挥着重要的作用。但随着互联网与人类社会生活的深度融合, 传输和存储的成本降低, 信息爆炸式

的增长, 互联网应用层出不穷, 人们对于互联网的使用需求已不仅仅是“尽力而为”的端到端传输。传统的互联网在应对高移动等新型应用场景时暴露出许多不足, 引发了未来网络体系及其核心技术的研发热潮。

IP 地址既标识网络实体的身份, 也标识其在网络中的位置, 这样的设计为早期的互联网“会话”提供了极大的便利。但随着互联网用户激增、大量移动设备

收稿日期: 2020-01-15

修回日期: 2020-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(6187446)

作者简介: 穆晏如(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为未来网络技术; 江凌云, 副教授, 研究方向为云计算、物联网技术、网络技术与应用。

接入,IP 地址的双重身份导致核心路由器路由表项急剧扩张,传统的移动解决方案 Mobile IP 流量绕行和切换延时的弊端凸显。为了解决这些问题,Cisco 提出了名址分离的思想^[1]。通过对可寻址网络元素的实体(例如网络设备、内容、服务)进行统一的身份标识,在 IP 层之上替代 IP 地址成为“瘦腰”部分来更好地支持网络的移动性。将网络实体的身份与位置解耦后,网络实体的身份不会随着位置的变化而改变,名称与地址不再是一一对应的关系,而是可注册、可更改、可查询的灵活绑定,所以需要设计一个映射系统来管理名称和地址的绑定,为网络提供解析服务。

地址采用层次化的编址方式能够有效地实现路由表项的聚合,大多数的研究中仍然沿用 IP 地址。身份标识采用扁平化的名称空间可以实现自认证,同时可以避免名称空间的内部结构对移动性的限制。DNS 利用域名的层级组成树状目录结构,来完成域名到 IP 地址的解析查找,所以不适用于扁平化标识与地址的映射。此外,DNS 主要通过大量的缓存来提高解析性能,在移动场景下,名称与地址的绑定缓存失效过快,而 DNS 的更新传播需要一天或更长时间,这样会导致服务器的负载增加,查询的时延提高。所以无法沿用 DNS 构建名称与地址的映射系统。

该文提出了一种基于位置关联 Chord 的名址分离映射系统,将映射绑定信息分级管理,最大限度地减少更新流量对网络的影响,同时在 Chord 算法中嵌入位置信息便于快速查找,解决 Chord 物理网络和逻辑网络的失配问题。

1 相关工作

映射解析服务的理想状态是能够在任何时间任何地点快速准确地获得用户查找的网络实体的位置信息,为实现这一目标,主流的研究思路是将标识与地址的绑定信息复制后寻找合适的位置托管。这种思路存在两个技术难点,一是绑定信息的副本越多,用户越能够在就近的位置查询到服务的位置,但是副本过多,绑定信息的更新流量将占用大量的网络带宽,且不易同步,导致较高的误查询率。二是什位置适合托管绑定信息。基于该思路,许多研究组织进行了很多的尝试和实践。

主流的方案分为两大类,一类是非结构化副本放置方案,包括随机定位副本放置的 DMap^[2],关注需求的动态副本放置方案 Auspice^[3],以及地理感知分层聚合的 GMap^[4]。这类方案复杂度较高,容易占用大量的网络资源,而且需要借助缓存策略和搜索方法。另一类是结构化副本放置方案,主要是借助于分布式哈希表(distributed hash table,DHT)的思想,按照一定的

规则分割映射表,每个存储节点维护一部分的数据和邻居信息。其中,LISP—DHT^[5]就是利用 DHT 的组织 and 查询功能实现映射信息管理和解析的分布式系统,基于可聚合的层次 ID,将含 ID 前缀的最大值作为一个域的标识,每个域选取一个权威服务器组建 Chord^[6]环,借助 Chord 协议来实现域间的查找。

Chord 协议是一种经典的 P2P 协议,只执行一个操作:给对象分配一个 Chord ID,将其映射到一个哈希环上。在映射系统中,对象分为两类,服务器节点和需要存储的名称和地址绑定条目。将名称的 ID 映射到哈希环上后,顺时针找到最近的服务器节点,将自己的绑定条目存储到该服务器上。每个节点会维护一个 Finger 表,相当于哈希环上的路由表,其中记录了邻近节点的信息便于查询和路由。Chord 可以实现负载均衡,在节点离开和新节点加入时能保持系统稳定性。但由于 Chord 是基于 ID 的哈希值来构建环结构,与底层的物理网络脱离,会导致出现物理上的最短距离和逻辑上的最短距离不一致的现象^[7]。基于这个问题,该文提出的方案结合两级映射的思路,在 Finger 表中添加网络号,将物理位置信息嵌入逻辑网络中,同时改进了搜索方法,能够有效降低查找时延。

2 基于位置关联 Chord 的名址分离映射系统

2.1 总体设计思想

基于位置关联 Chord 的映射系统修改了 LISP—DHT 系统,让域内的所有解析服务器都映射到 Chord 环上,而不是只有一个权威解析服务器,这样可以降低单点失效的风险。如图 1 所示,下层是以地理区域划分的物理网络,上层为 Chord 结构。名址分离映射系统与域名解析系统最大的不同就是,域名与 IP 地址的绑定关系相对固定,少有变动,而名称与地址的绑定关系正好相反。

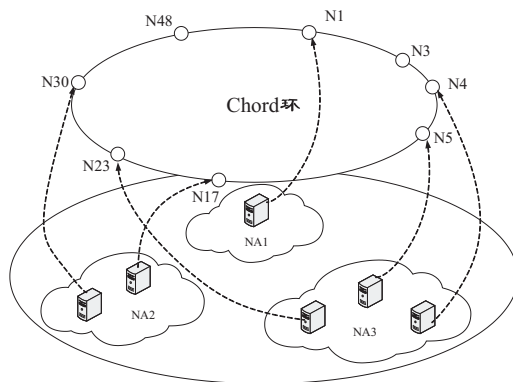


图 1 映射系统架构

在实际的移动应用场景中,局域移动仍然占据了很高的比例^[8]。由于区域网络划分之后网络地址

(network address, NA) 固定不变, 所以采用域内<ID, IP>的绑定、域间<ID, NA>的绑定方式将绑定条目的更新范围尽可能缩小。

名址分离映射系统设置副本是为了增加查询时邻近命中的概率, 增加副本的个数必然可以增大命中的概率, 但是设备移动带来的绑定条目的更新会反过来限制查询的效率。当移动大多发生在地理区域内部时, 如果区域内部映射服务器数量有限, 可以采用泛洪的方式将<ID, IP>的绑定关系传递给所有的映射服务器(如果区域范围很大、映射服务器很多, 可以另行使用 DHT 组织, 与总体架构不冲突)。同时<ID, NA>的绑定关系是相对固定的, 可以在域间适当地增加副本的个数。

当<ID, NA>的绑定条目向域外寻找托管位置时, ID 通过哈希函数固定地映射到环上的同一点, 例如 K10, 如果没有其他服务器节点的加入或退出, K10 将顺时针地托管在 N17 上。当另外的设备发起查询时, 如果在域内的映射服务器中没有查找到, 会通过同样的哈希函数计算出 K10 找到 N17。而当这台设备在跨域移动后, <ID, new NA>的绑定条目仍然会映射到 K10, 在 N17 处托管。所以 N17 可以通过统计该 ID 的查询率和跨域更新率来动态地调整域外副本的个数。

DHT 中物理网络与逻辑网络的“失配”问题会造成查询时“绕远路”^[9], 例如图 1 中 N4 与 N23 在同一个地理区域网络内, 彼此只相隔一跳的距离, 但是在 Chord 环上需要沿顺时针进行递归查找。为了解决这个问题, 对 Chord 节点的 finger 表进行了修改, 如表 1 所示。

表 1 Chord 节点路由表结构

符号	定义
$\text{finger}[i]. \text{start}$	$(n + 2^{i-1}) \bmod 2^m, 1 \leq i \leq m$
interval	$(\text{finger}[i]. \text{start}, \text{finger}[i+1]. \text{start})$
node	$\text{finger}[i]. \text{start}$ 的后继节点
successor	本节点的后继节点
predecessor	前驱节点
successor. NA	本节点的后继节点的网络地址
successor. Nodes	与后继节点同属一个网络的其他节点

由于映射服务器所属的网络地址是固定不变的, 所以通过在节点路由表中增加后继节点的网络地址, 来聚合 Chord 节点路由表, 同时跳出逻辑网络的递归搜索来避免“绕远路”的问题。

2.2 工作机制

(1) 注册: 设备新入网时, 需要向最近的映射服务器注册自己的名称地址绑定信息, 服务器收到后, 向网络中部署副本, 过程如图 2 所示。①终端连接区域内

路由器, 得到分配的 IP 地址, 成功入网。②该路由器向最近的映射服务器发送分组消息, 注册<ID, IP>的绑定信息。映射服务器收到消息后, 将该信息存储在本地缓存中, 并向区域内部的映射服务器泛洪发送(图中⑤)。③映射服务器对 ID 进行哈希计算, 得到 ID 在哈希环上的位置 K10, 修改<ID, IP>的绑定信息为<ID, NA2>。④沿顺时针找到节点 N17, 将<ID, NA2>的信息存放在 N17。注册流程中的绑定消息不设置计时器, 当终端离开该区域, 由连接的路由器主动向映射服务器发送删除报文, 该服务器经过同样的流程发送公告。

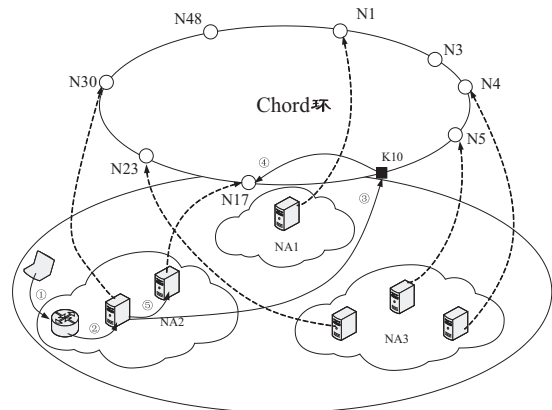


图 2 映射系统注册过程

(2) 查询解析: 当一台设备初次连接该 ID 标识的设备时, 需要向邻近的映射服务器发起解析请求, 映射服务器接收到请求后查找本地缓存, 如果存有 ID 的条目则返回 IP, 如果没有, 开始查询, 流程如图 3 所示。

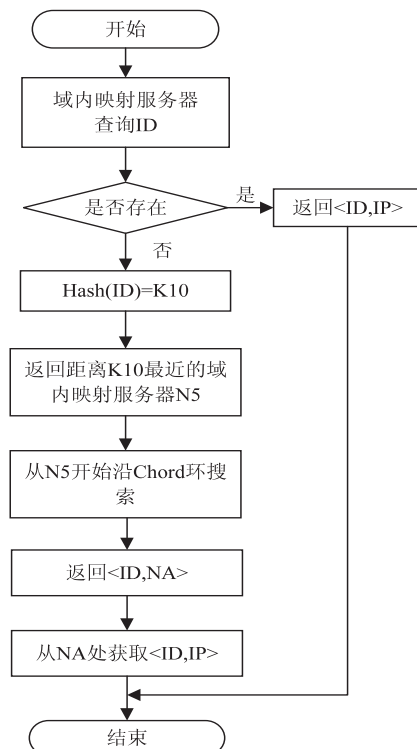


图 3 映射解析流程

步骤 1: 该映射服务器向本域内的其他映射服务器发起查询请求, 如果存有 $\langle \text{ID}, \text{IP} \rangle$, 则返回结束解析过程, 没有, 转步骤 2;

步骤 2: 计算 $\text{hash}(\text{ID})$, 得到 K_{10} , 在本域内查找逻辑网络中距离 K_{10} 最近的服务器节点, 本例中为 N_5 , 转步骤 3;

步骤 3: 遍历 N_5 的 Chord 节点路由表, 逐条搜索, 如果命中 (即如果存在 N_{10} , 则 K_{10} 应当存储在 N_{10} 上), 则返回 $\langle \text{ID}, \text{NA} \rangle$, 否则在整张表中找到与 K_{10} 逻辑最接近的服务器节点, 并返回该节点的网络地址 $\text{RNA}(\text{Relay NA})$, 访问 RNA , 从 RNA 中查找在逻辑网络中距离 K_{10} 最近的服务器节点, 重复步骤 3, 直到查找到托管 K_{10} 的节点 N_{17} 为止, 从 N_{17} 处获取 $\langle \text{ID}, \text{NA} \rangle$ 并返回, 转步骤 4;

步骤 4: 从 NA 中获取 $\langle \text{ID}, \text{IP} \rangle$, 返回查询结果, 缓存在本机并设置 TTL , 结束解析过程。

(3) 移动更新: 当设备在区域内移动时, $\langle \text{ID}, \text{IP} \rangle$ 的绑定关系会发生变化, 离开入网的路由器时, 由路由器主动地向映射服务器注销该绑定条目。在区域内的另一处重新入网时, 同样由接入路由器负责向映射服务器注册, 映射服务器在区域内泛洪广播该绑定条目, 因为 $\langle \text{ID}, \text{NA} \rangle$ 的绑定关系没有发生变化, 所以不向域外发送。当设备跨域移动时, 离开本区域时由接入路由器主动申请注销绑定, 然后新的区域内按照 (1) 的步骤重新注册入网。

(4) 域间缓存: 设置绑定信息副本的目的是为了提高邻近命中的几率, 当大量的域间解析请求到达 N_{17} 查询 K_{10} 时, 说明域外对于此 ID 的连接需求较大, N_{17} 可以沿 Chord 环顺时针传送 $\langle \text{ID}, \text{NA} \rangle$ 的绑定信息, 增大缓存面积, 便于更多的查询请求在邻近命中。同时为发送的副本信息设置 TTL 。当大量的 K_{10} 更新请求到达 N_{17} 时, 表明此 ID 处于较高频率的移动状态, 应该适当减少副本的 TTL , 而且如果再向 Chord 环中持续地增加副本个数会影响查询一致性, 导致查询解析出错。所以域外的副本个数应该与此 ID 的查询率成正比, 与此 ID 的更新率成反比。设此 ID 为 i , i 的域外副本个数为 r , 查询率为 q_i , 更新率为 u_i , 则关系如式 (1) 所示, 其中 μ 是调控参数。

$$r = \mu \frac{q_i}{u_i} \quad (1)$$

2.3 查询效率分析

设映射服务器节点数为 N , 逻辑网络为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_N\}$, $1 \leq i \leq N$ 。其中 l_i 代表 Chord 环上的节点, 且 $l_1 \leq l_2 \leq \dots \leq l_i \leq \dots \leq l_N$, 即 l_2 是 l_1 的后继节点, l_N 是 l_1 的前驱节点, 其他关系类似。设物理区域网络的个数为 M , $M \leq N$, 物理网络为 $G = \{g_1, g_2,$

$\dots, g_j, \dots, g_M\}$, $1 \leq j \leq M$ 。其中 g_j 表示一个网络的网络地址 NA 。由于哈希函数是随机映射关系, 所以不失一般性, 假设服务器节点均匀地分布在各区域网络中, 每个区域网络中有 n 个服务器节点, 其中 $n = N/M$ 。在不考虑域间缓存的情况下, 假设 l_{j1} ($1 \leq j1 \leq N$) 查找存储 K^α 映射绑定条目的服务器节点, l_{j1} 在物理区域 p_j 上, 其中 p_j 上的逻辑网络节点集合为 $\{l_{j1}, l_{j2}, \dots, l_{jn}\} \subseteq L$, $l_{j1} \leq l_{j2} \leq \dots \leq l_{jn}$ 。根据查询解析流程可得, 如果 K^α 在 p_j 中没有命中托管服务器节点, 则会搜索 l_{jn} 的 Chord 路由表, 查找与 K^α 最邻近的节点所在的物理网络, 并重复以上流程。Chord 算法中指出, 一个节点对顺时针方向上越靠近自己位置的 Chord 区域, 了解的节点数目越多^[10]。所以可得, 整个查找 K^α 的过程中, 物理区域网络上的路径是单向的^[11], 而且是可以收敛的, 从这个方面来说, 位置关联 Chord 优于原始 Chord。

在经典 Chord 算法中, 稳定状态下的一个 N 个节点的系统, 每个节点只维护 $O(\log N)$ 其他节点的信息, 最大查询路径长是 $O(\log N)$, 而平均查询路径长则为 $\frac{1}{2} \log N$, 平均路径长是判断 DHT 系统的查询效率高低的指标之一, 通过对该指标的分析可以衡量映射系统的查询效率^[12]。在基于位置关联 Chord 的映射系统中, 每个节点维护 $O(\frac{M \log N}{N})$ 其他物理区域的信息, 域间查询的平均查询路径长为 $\frac{M \log N}{2N}$, 加上两端区域内的 1 或 2 跳的路径长, 总体的跨域查询平均路径长如式 (2) 所示。从公式中可以看出, 通过关联物理网络, 能够有效地减少平均查询路径长。

$$H_{\text{aver_Outer}} = \frac{M \log N}{2N} + 2 \quad (2)$$

如果查询是发生在区域内的, 则只需 1 跳或 $\frac{\log n}{2}$ 的路径长 (域内也采用 Chord 方式)。此外, 加上缓存的命中, 实际的查询路径长会更小。对于查询时延的分析, 由于介质传输时延和搜索处理时延需要具体情况具体分析, 所以采用仿真测试的方法进行分析。

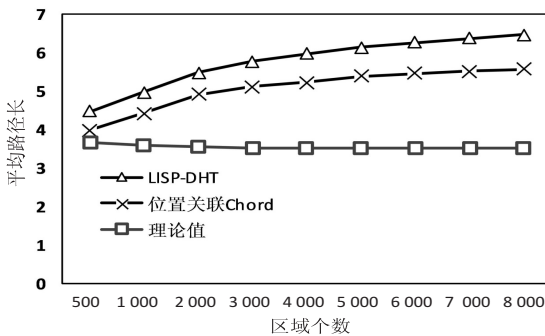
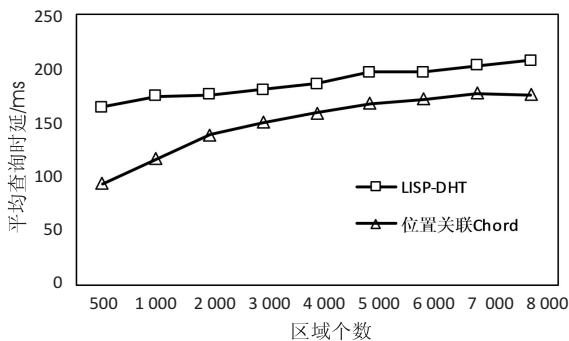
3 仿真测试

该文采用 OMNET++^[13] 进行仿真实验, 包括在该环境下开发的 INET 框架^[14] 和 Oversim 框架^[15], 使用 C++ 语言编写。OMNET++ 是一个离散时间仿真环境, 主要应用于模拟通信网络领域, 是广泛普及的网络仿真平台^[13], 因其拥有丰富的 GUI 能够清楚地显示网络拓扑和连接信息而被广泛使用。OMNET++ 提供了用于描述实际系统结构的工具, 包括分层式嵌入模块、灵活的模块参数等。模块可以复用、可以嵌套, 嵌套的

深度没有限制,这些都可以通过 NED^[13] 语言描述。INET 框架是一个开源的通信网络仿真包,由密歇根大学开发的一个 AS 级拓扑产生器,该框架包括从物理层到应用层的网络协议,主要用于互联网的仿真^[15]。Oversim 是建立在 INET 框架上的 P2P 协议仿真框架,包含了 Chord、Pastry 协议的实现,具有灵活性、可扩展性、不同的路由模式等特点^[15]。

为验证方案,仿真实验测试在不同的映射服务器节点个数和地理区域个数下,映射系统的平均查询路径长和平均查询传播时延。设置初始区域个数为 20,初始节点个数为 500,域内传播时延 10 ms,域间传播时延 50 ms,缓存调控系数 μ 为 2,更新率默认为 $\frac{1}{10}$ (次/秒)。取 10 000 个 16 bits 的 ID,每个节点按照时间间隔服从参数为 1 s 的泊松分布发起查询,每个节点发送 1 000 次查询,近似模拟实际查询场景^[16]。

设置区域个数为 20,依次增加映射服务器节点规模,可得平均查询路径长与平均查询时延,如图 4、图 5 所示。与理论分析结果一致,随着 N 的增加,平均查询路径长逐渐增大,而且查询时延与查询的跳数相关,也呈增长趋势。由于位置关联 Chord 在逻辑节点的路由表中增加了物理拓扑的信息,域间的查询是单向的,提高了查询效率。从图 4 中可以看出,实际的位置关联 Chord 的查询路径长与理论值存在一定的差距,这是由于在理论分析时,默认域内的服务器节点均匀地分布在 Chord 环上,这在实际的应用环境中是比较难达到的理想状态。

图4 $M=20$ 平均查询路径长测试图5 $M=20$ 平均查询时延测试

设定系统中映射服务器节点个数为 2 000,逐渐增加区域的个数,可得映射解析性能,如图 6、图 7 所示。从图中可以看出,LISP-DHT 方案随着区域个数的增加,查询路径长没有太大的变化,但查询会有更大的概率跨域进行,域间的传输时延比域内的传输时延大 40 ms,所以查询时延有增加的趋势。位置关联 Chord 方案随着区域个数的增加,每个节点路由表中保存的区域相关信息更多,更加能够快速命中映射条目,提高系统查询解析的性能。

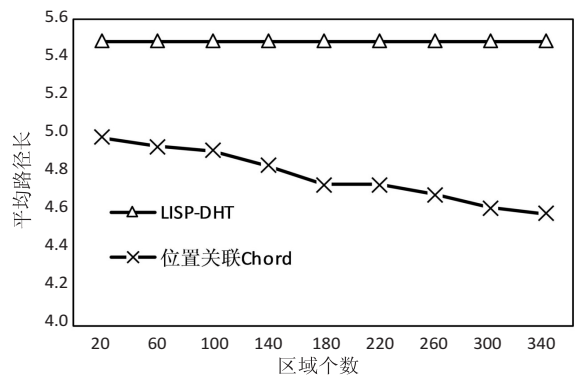


图6 平均查询路径长测试

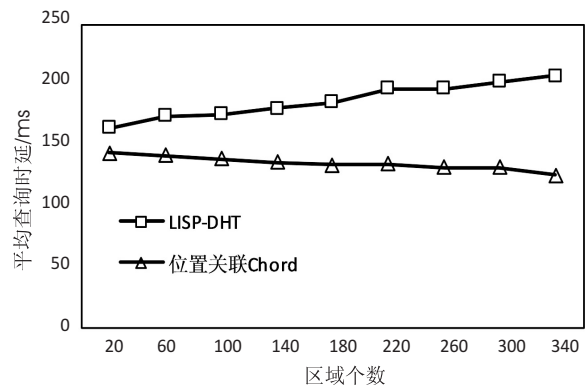


图7 平均查询时延测试

4 结束语

设计了一个基于位置关联 Chord 的名址分离映射系统,通过在逻辑网络中节点的路由表内添加物理网络的拓扑信息,改变了 Chord 环的递归查找过程,在查询时一个物理网络只经过一次,有效地避免了逻辑网络与物理网络失配导致的“绕远路”问题。此外,名称与地址的绑定关系分域内域外两级管理,域内直接绑定 IP 地址,域外更换绑定信息为名称与网络地址,通过增加一跳的查询将绑定信息更新范围尽可能地缩小在域内。采用查询率与更新率的比值动态调控缓存个数,维持在一定更新成本下的查询效率。并且通过理论分析和仿真实验证明了此映射系统的性能优于 LISP-DHT。提高的查询性能是通过增加路由表信息换来的,表项可以聚合,不会对存储造成压力,但是会对系统的可扩展性造成一定的影响,希望后续的研究

工作能够尽量地解决这一问题。

参考文献:

- [1] 李世钊, 张 炜, 王建兵, 等. 一种名址分离网络设计与实现[J]. 通信技术, 2015, 48(11): 1310–1314.
- [2] VU T, BAID A, ZHANG Y, et al. Dmap: a shared hosting scheme for dynamic identifier to locator mappings in the global internet [C]//2012 IEEE 32nd international conference on distributed computing systems. Macau, China: IEEE, 2012: 698–707.
- [3] SHARMA A, TIE X, UPPAL H, et al. A global name service for a highly mobile internetwork [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(4): 247–258.
- [4] HU Y, YATES R D, RAYCHAUDHURI D. A hierarchically aggregated in-network global name resolution service for the mobile Internet[R]. [s.l.]: [s.n.], 2015.
- [5] MATHY L, IANNONE L. LISP-DHT: towards a DHT to map identifiers onto locators [C]//Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT conference. Madrid: ACM, 2008: 61.
- [6] STOICA I, MORRIS R, KARGER D, et al. Chord: a scalable peer-to-peer lookup service for internet applications [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2001, 31(4): 149–160.
- [7] 张 泰. 结构化 P2P 网络关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [8] 周粤娴. 基于 LISP 的移动性支持机制研究与实现[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [9] 陈 旭. 一种名址分离网络设计与实现研究[J]. 信息通信, 2016(7): 67–68.
- [10] 章小宁, 余腾腾, 邱 恺, 等. 名址分离网络中一种新的双层映射系统研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2357–2363.
- [11] 王翠翠, 延志伟, 耿光刚. 互联网名址体系安全保障技术及其应用分析[J]. 网络与信息安全学报, 2017, 3(3): 34–42.
- [12] 李 鉴, 王邦礼. IP 网络中名址分离机制实现研究[J]. 信息安全与通信保密, 2012(4): 67–69.
- [13] VARGA A, HORNIG R. An overview of the OMNeT++ simulation environment [C]//Proceedings of the 1st international conference on simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops. Marseille, France: ICST (institute for computer sciences, social-informatics and telecommunications engineering), 2008.
- [14] HOU Jie, LIU Yaping, GONG Zhenghu. Performance analysis of a seamless mobility support scheme in the locator/identifier separation network [C]//International workshop on computer science for environmental engineering and ecoinformatics. Kunming, China: Springer, 2011: 159–165.
- [15] BAUMGART I, HEEP B, KRAUSE S. OverSim: a flexible overlay network simulation framework [C]//IEEE global internet symposium. Anchorage: IEEE, 2007.
- [16] 李志臻. 新型互联网服务标识解析映射系统的研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.