

# 一种基于内容流行度和社团重要度的 ICN 缓存与替换策略

罗建桢 蔡 君 刘 燕 赵慧民

(广东技术师范学院 广州 510665)

**摘 要** 现有以信息为中心的网络(Information-Centric Network, ICN)缓存的内容的时空分布不够合理,存在无效缓存及同质化缓存等问题。对此,文中提出一种基于内容流行度和社团重要度的 ICN 缓存与替换策略,其结合内容流行度与节点的社团重要度来选择缓存节点,把具有不同流行度的内容分散缓存在社团重要度不同的节点上,使缓存内容的空间分布趋于合理,从而增加了缓存内容的多样性。同时,基于社团局部流行度来替换缓存内容的策略更有利于优化缓存内容的时间分布,实现缓存内容空间分布的动态调整。实验结果表明,所提策略能有效地减少用户请求的平均响应时间,提高缓存对象的命中率和全网的缓存差异度。

**关键词** 以信息为中心的网络,节点重要度,内容流行度,缓存

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.07.019

## Caching and Replacing Strategy in Information-centric Network Based on Content Popularity and Community Importance

LUO Jian-zhen CAI Jun LIU Yan ZHAO Hui-min

(Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

**Abstract** The temporal and spatial distribution of content in the existing information-centric networking (ICN) cache strategy is irrational, and there exists the problem of invalid caching and homogeneous caching. In light of this, this paper proposed a caching and replacing strategy in ICN based on content popularity and community importance. In this strategy, content popularity and community importance of node are combined to select caching nodes, and the contents with different popularities are cached discretely in nodes with different community importance, so as to make the spatial distribution of content be reasonable, thus improving the diversification of caching contents. Meanwhile, the replacing strategy based on local popularity in a community is propitious to optimize the temporal distribution of caching content, so that the spatial distribution of content can be adjusted dynamically. The experimental results show that the proposed strategy can effectively reduce the average response time of user interest and improve cache hit rate and cache difference in the whole network.

**Keywords** Information-centric networking, Node importance, Content popularity, Cache

## 1 引言

互联网产业的迅猛发展要求网络具有更高的传输效率。然而,以 TCP/IP 协议栈为主的现有互联网架构暴露出了一系列缺陷,如结构固化、扩展性较差、移动性支持受限等,难以满足当前互联网发展的需求。为了彻底解决以上问题,学术界开始致力于设计全新的互联网架构,如软件定义网络(Software-Defined Network, SDN)和以信息为中心的网络(ICN)等。其中,ICN 将内容缓存在更靠近用户的位置,以

降低网络资源的访问时延,极大地提高了网络的传输效率。为进一步优化 ICN 的性能,研究者们提出了软件定义的以信息为中心的网络(Software-Defined Information-Centric Network, SDICN)<sup>[1-3]</sup>,其通过集中化的配置管理和软件化的灵活控制,大大降低了 ICN 路由选择与缓存控制的配置复杂度。

相关的研究工作表明,现有的众多 ICN 缓存机制还存在缓存无效和缓存同质化等问题。缓存无效是指网络中某些缓存内容在一段时间内从未被请求过,导致其一直未发挥作用,从而浪费网络节点的存储空间。而缓存同质化是指在非协作

到稿日期:2017-10-10 返修日期:2018-01-07 本文受国家自然科学基金(61702120, 61571141),广东省自然科学基金(2017A030310591),广东省教育厅(2014KTSCX149, 2016KQNCX091),广东省科技厅科技发展专项资金(2017A090905023),广东省高等学校优秀青年教师培养计划项目(YQ2015105),广东省应用型科技研发专项资金项目(2015B010131017),广东省普通高校工程技术研究中心(2016GCZX006),广州市科技计划项目(201604016108)资助。

罗建桢(1984—),男,博士,讲师,主要研究方向为未来网络、以信息为中心的网络;蔡君(1981—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为未来网络技术、5G 分组业务网络, E-mail: caijun@gpnu.edu.cn(通信作者);刘燕(1987—),女,博士,讲师,主要研究方向为 ICN 缓存及路由;赵慧民(1966—),男,博士,教授,主要研究方向为云计算、压缩感知。

式缓存网络中,各节点独立地缓存和替换内容对象,有可能导致各节点缓存相同的内容。

为了更好地解决缓存无效和缓存同质化的问题,本文在SDICN中引入复杂网络的社团结构思想,提出基于社团特性的ICN缓存与替换策略,即由网络的社团结构特征与内容对象的流行程度共同决定缓存位置,将内容对象按社团区域合理地分布在网络中,使内容对象接近潜在的用户,以达到降低用户请求时延的目的。在社团内,把具有不同流行度的内容缓存在具有不同社团重要度的节点中,以实现网络的负载均衡,避免社团中个别节点(尤其是核心节点)的负载过大。例如,流行度高的内容被缓存在社团重要度高的节点中,让社团内外的节点都能够更容易地被访问,使内容的空间分布变得合理化,有利于提高缓存内容的命中率,减少无效缓存。

## 2 相关工作

缓存技术已在Web、CDN和P2P等领域中得到了较为广泛的应用<sup>[4]</sup>,但它们的缓存策略主要针对某一具体应用,并且须配置成一个覆盖网络。同时,这些缓存策略也存在一定的局限性,如Web缓存是静态缓存,无动态路由;CDN的拓扑和管理都比较复杂,且不同的CDN之间不能互通;P2P协议封闭,缓存节点不可控,难以成为基础设施等。而ICN中的缓存是网络架构的内在组成部分,与应用无关,具有网络自适应等特性,是下一代网络新技术的研究热点。另外,传统的面向Web、CDN和P2P的缓存算法也不能直接应用于ICN中,但可为ICN缓存算法的设计提供参考。

近年来,ICN缓存问题的研究主要集中在缓存放置策略和内容替换策略两方面。缓存放置策略用于确定内容的缓存位置,可分为沿途缓存与旁路缓存两类机制。沿途缓存是指内容对象被缓存在它沿路返回途中所经过的节点上的缓存机制,包括处处缓存(Cache Everything Everywhere,CEE)和选择性缓存等。处处缓存是最原始的ICN缓存策略,所有内容对象被要求缓存在沿途所经过的所有节点上,这种缓存机制会导致严重的资源浪费<sup>[5]</sup>。为此,Eum等<sup>[6]</sup>提出了一种基于概率的选择性缓存机制,这种随机选择缓存的方法在一定程度上减少了缓存的冗余度,但存在不稳定和缓存效率低等不足。为解决这一问题,Psaras等<sup>[7]</sup>提出了一种基于加权概率的选择性缓存机制,即对象被缓存在某一节点上的概率与该节点到请求者的距离成反比。该方法提高了内容在距离请求者更近的节点上缓存的概率,但增加了边缘缓存节点的压力。为了使用户能更容易地找到内容对象,Chai等<sup>[8]</sup>提出了基于介数的选择性缓存机制,其将内容对象放置在传输路径中介数最大的节点上,进一步提高了命中率,并减少了替换次数。然而,基于介数的缓存选择机制仅使内容对象缓存在最重要的节点处,容易使高介数的节点缓存压力过大、内容替换次数大幅增加,增大了节点的计算开销。另外,介数是描述节点网络全局重要度的指标,并未考虑网络的社团性特征,高介数节点并不一定是网络中大部分用户最容易访问的位置。

旁路缓存机制需要事先收集网络的状态信息,再计算缓存放置的全局最优化方案。在国外,Wang等<sup>[9]</sup>、Sang等<sup>[10]</sup>和Sourlas等<sup>[11]</sup>分别提出了几种旁路缓存机制;ERIKSEN

等<sup>[12]</sup>为了提高缓存空间的利用率,将“热点”对象复制到低负载节点,以分散服务请求,达到消除热点的目的。在国内,葛国栋等<sup>[13]</sup>提出了基于最大内容活跃因子的路径缓存策略,首先根据内容活跃因子在转发路径上找到最大热点请求区域,然后采用一致性Hash协同缓存选择区域内的缓存节点。刘外喜等<sup>[14]</sup>利用链路的空闲带宽将内容缓存到相邻节点,并根据转发端口数的比例、下游节点的链路利用率和内容的生命周期等调整内容对象在节点上的缓存概率。该方法对缓解热门节点的缓存空间压力和热门链路的链路压力有一定的帮助,但对于提高缓存命中率和降低内容请求的时延并无明显作用。旁路缓存机制会增加额外的代价,但是以此为代价可以换取内容请求开销的大幅下降,还可以减小内容请求时延和缓存冗余,提高缓存命中率。

与现有工作不同,本文按社团区域缓存内容对象,在全网范围内合理分散缓存对象,将内容对象按其流行度缓存在社团内具有不同重要度的节点上,一方面可以实现负载均衡,另一方面可以增加社团内各节点缓存内容的多样性。

缓存内容的替换策略是ICN缓存技术必须解决的另一个问题,但这方面的研究成果不多。目前,ICN中较为常用的替换策略主要有LRU(Least Recently Used)或LFU(Least Frequently Used),它们的特点是原理简单、容易实现。然而,这两种替换策略存在内容对象在时间上分布不合理的问题:在热门时间里,每个节点都缓存到相同的对象,而热门时间过后,该内容对象在各节点上又几乎同时消失,此后访问该内容时仍会产生较大的网络时延,从而抑制了网络的整体性能。本文提出基于社团局部流行度的缓存内容替换策略,充分利用局部流行度更能体现社团内的用户兴趣的优势,尽量保留社团中的热点内容,而优先替换社团中的冷门内容。

## 3 缓存与替换策略

本文首先引入复杂网络的社团划分算法来分析SDICN的网络结构特征,将网络拓扑划分为若干区域,以便于按区域缓存内容对象;然后提出一种网络社团特性的缓存放置策略,使缓存内容的空间分布更趋于合理,有利于均衡网络负载,避免社团核心节点负载过大,解决ICN缓存效率不高和控制不灵活等问题;同时,根据内容流行度提出一种内容替换策略,以优化内容的时间分布,实现内容空间分布的动态调整。

### 3.1 基本概念

在阐述所提出的缓存策略之前,首先介绍社团、节点重要度、社团重要度和内容流行度等基本概念。

#### 3.1.1 社团

Internet网络结构具有明显的社团特性<sup>[12]</sup>,即整个网络由若干个社团构成,社团内部节点之间的连接相对紧密,社团之间节点的连接相对稀疏。准确识别网络中的社团结构,对了解网络结构与分析网络特性具有极其重要的意义。目前,已有大量研究成果解决了社团识别问题,如由Newman和Gievan提出的GN算法<sup>[15]</sup>、标签传播算法<sup>[16]</sup>。本节结合本文的SDICN缓存应用场景,以交换机为节点、以它们之间的物理连接为边来构建网络,再以Newman等<sup>[17]</sup>提出的网络模块度为目标函数,应用优化算法,将网络划分为不同的社团。

网络模块度的定义如式(1)所示:

$$Q = \sum_{c=1}^{N_c} \left( \frac{m_c}{M} - \frac{d_c^2}{4M^2} \right) \quad (1)$$

其中,  $N_c$  表示网络中社团的数目,  $M$  表示网络中连接的总数,  $m_c$  表示社团  $c$  内节点之间的连接数,  $d_c$  表示社团  $c$  内所有节点的度数之和。

### 3.1.2 节点重要度

节点重要度是节点对网络社团结构特征影响程度的量化指标, 表示为:

$$P_{IN}(k) = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{v_{ik}^2}{v_i^T v_i} \quad (2)$$

其中,  $N_c$  表示网络中的社团数目,  $v_i$  表示网络邻接矩阵的第  $i$  个特征向量,  $v_{ik}$  表示特征向量中的第  $k$  个元素。  $P_{IN}(k)$  的值越大, 节点  $k$  在其所属的社团中越重要, 即社团内外的其他节点将越容易访问到该节点。

### 3.1.3 社团重要度

社团重要度是一个社团  $c$  对整个网络社团结构特征影响程度的量化指标, 表示为:

$$P_{IC}(c) = \sum_{k \in c} P_{IN}(k) \quad (3)$$

### 3.1.4 内容流行度

在一定时间周期内, 用  $R(x)$  表示本周期内内容  $x$  被用户请求的次数, 则内容  $x$  的全局流行度的计算如下:

$$Popu(x) = \frac{R(x)}{\sum_{x'} R(x')} \quad (4)$$

针对 ICN 内容的局部流行度较难确定的问题, 本文将内容的局部流行度定义在社团结构内部, 提出了一种基于社团的 ICN 局部内容流行度的确定方法。在一定时间周期内, 统计内容  $x$  在一个社团  $j$  内被用户请求的次数, 用  $Popu_j(x)$  表示在当前统计周期内对内容  $x$  的访问频率, 用  $R_j(x)$  表示本周期内对内容  $x$  的访问次数, 则内容  $x$  的流行度的计算方式如下:

$$Popu_j(x) = \frac{R_j(x)}{\sum_x R_j(x')} \quad (5)$$

局部流行度更能体现特定群体内(本文特指特定社团内的用户)的用户兴趣。根据局部流行度替换缓存内容, 更有利于使社团内部节点缓存的内容在时空分布上趋于合理。

## 3.2 缓存决策策略

芮兰兰等<sup>[18]</sup>的研究成果表明, 对内容对象的请求在空间和时间上存在局部性现象, 即某节点在某时刻对一个内容对象的请求很大可能会触发附近节点在未来一段时间产生一系列相同的请求。进一步考虑到同一社团内的用户往往具有相似的兴趣, 当社团中某一节点发起对某一内容对象的兴趣请求时, 很有可能在短时间内社团中其他用户请求该内容对象的概率也较大。因此, 本文根据局部性现象的特点, 将内容对象缓存于请求该内容对象的节点所在的社团中, 以期降低社团潜在用户的请求时延。

确定需要缓存内容对象的社团后, 还需进一步确定该社团内应执行缓存的具体节点。选择缓存节点的原则是将内容对象合理地分布在社团内的不同节点上, 如将流行度高的内容缓存在节点重要度高的节点中, 而将流行度低的内容缓存在节点重要度低的节点中。根据节点重要度的定义可知, 节

点重要度高的节点更容易被网络中的其他节点访问, 因此缓存在这类节点中的内容对象更容易被社团内部及外部的其他节点访问到, 这样可以提高缓存的命中率, 减少无效缓存。但是, 如果大量内容都缓存在节点重要度高的节点中, 将导致其流量处理压力过大, 从而降低网络性能。为此, 本文将访问概率较低的低流行度内容缓存在节点重要度较低的节点上, 以达到负载均衡的目的。

为了确定内容对象在社团内部的缓存位置, 首先计算社团  $c$  中节点  $i$  被选择用于缓存内容对象的概率:

$$p_c(i) = \frac{1}{\Delta} \left( \frac{Popu(x)}{P_{IC}(c)} + \frac{P_{IC}(c)}{Popu(x)} \right)^{-1} \\ \left( \frac{Popu(x)}{P_{IN}(i)} + \frac{P_{IN}(i)}{Popu(x)} \right)^{-1} \quad (6)$$

其中,  $P_{IC}(c)$  为社团  $c$  的社团重要度;  $\Delta$  为归一化因子, 即  $\Delta = \sum_{i \in c} p_c(i)$ 。

由式(6)可知, 当且仅当  $P_{IC}(c) = P_{IN}(i) = Popu(x)$  时,  $p_c(i)$  具有最大值。换言之, 在社团重要度大的社团中, 节点重要度大的节点被选择的概率较大; 而在社团重要度小的社团中, 节点重要度小的节点被选择的概率较大。因此, 本文按照以下方法选择内容对象的缓存位置:

$$i^* = \arg \max_{i \in c} (P_c(i)) \quad (7)$$

为了提高缓存空间的利用率和缓存内容的多样化, 本文规定每个内容对象在一个社团中只缓存一次。

本节所提出的缓存决策策略的工作流程如下:

- 1) 选择发起兴趣包的用户所在节点的社团作为缓存内容对象的候选社团  $c$ ;
- 2) 判断  $c$  中的节点是否已缓存了兴趣包对应的内容对象  $x$ , 若已缓存, 则算法执行结束;
- 3) 根据式(6)计算内容对象  $x$  在  $c$  中各节点的缓存概率;
- 4) 根据式(7)在  $c$  中选择最佳缓存节点  $i^*$ ;
- 5) 将内容对象  $x$  缓存于所选节点  $i^*$ 。

## 3.3 内容替换策略

当节点的剩余缓存空间不足以存放新内容时, 内容替换策略将根据节点的社团重要度和内容的局部流行度选择节点中原有的内容对象进行替换。为了将流行度不同的内容对象更加合理地分发给网络节点上, 以更高效地利用节点的缓存空间, 本文对不同的节点采用动态的替换匹配策略: 在社团重要度高的节点, 优先替换缓存队列中流行度低的内容对象; 而在社团重要度低的节点, 优先替换缓存队列中流行度高的内容对象。另外, 全局流行度较高的内容被网络用户请求的概率也较高, 而当其在某社团中的局部流行度较小时, 说明它在以后的时间中被该社团节点请求的概率较高, 因而应该尽量保留这一部分内容对象; 而对于全局流行度较低而局部流行度较高的内容, 它在社团中被再次请求的概率较低, 因而这一类内容对象理应被优先替换。为实现这一动态调整策略, 本文引入全局流行度与局部流行度的比率作为替换对象的选择依据之一。

假设节点  $i$  的缓存空间大小为  $N$  (即该节点最多可以缓存  $N$  个对象), 节点  $i$  的社团重要度记为  $P_{IN}(i)$ , 节点  $i$  所属社团  $c$  的重要度为  $P_{IC}(c)$ , 则节点中内容对象  $x$  被替换的概率被定义为:

$$p_i(x) = \frac{1}{\Omega} \frac{Popu_j(x)}{Popu(x)} \left( \frac{P_{IN}(i)}{Popu(x)} + \frac{Popu(x)}{P_{IN}(i)} \right) \quad (8)$$

其中,  $\Omega = \sum_{x \in x_i} p_i(x)$ ,  $x_i$  表示缓存在节点  $i$  上的内容对象  $x$ 。由式(8)可知,在内容  $x$  的全局流行度与  $P_{IN}(i)$  比较接近时,  $p_i(x)$  的值较大。因此,根据式(8)计算的概率可以实现动态替换匹配策略,据此,将要被替换的内容对象为:

$$x^* = \arg \max_x p_i(x) \quad (9)$$

本节所提出的内容替换策略的工作流程如下:

- 1) 根据式(8)计算社团节点中各缓存对象  $x$  被替换的概率;
- 2) 根据式(9)选择最佳的被替换对象  $x^*$ ;
- 3) 删除对象  $x^*$ , 并将新的内容对象缓存于删除对象  $x^*$  所释放的空间中。

## 4 仿真实验

### 4.1 实验环境

为了评估所提出的 ICN 缓存策略及对象替换算法,在 ndnSIM 仿真平台<sup>[19]</sup>上整合了 openflow 模块<sup>[20]</sup>,通过 openflow 协议在控制器收集节点的状态信息,并计算网络的社团结构。在仿真实验中,采用 GT-ITM<sup>[21]</sup>生成 100 个节点的随机网络拓扑,所有节点的缓存容量一致,统一设置为 100 个内容对象,链路带宽为 1000 Mbps,设置 1 个内容提供服务器,其余节点作为用户接入。用户总数量为 5000,用户的请求频率为 10 次/s。假设用户的内容请求模式服从 Zipf 分布<sup>[22]</sup>,即受欢迎程度排在第  $k$  的内容被请求到的概率为  $p(k) = \omega k^{-\alpha}$ ,其中  $\alpha$  为 Zipf 参数 (Zipfparameter),  $\omega$  为归一化因子。实验中用到的各仿真参数及其取值如表 1 所列。将本文所提方案标记为 CBP(Community-characteristic Based Policy),其实验结果将与 CEE<sup>[5]</sup>,OPT(基于概率的缓存策略)<sup>[6]</sup>和 MDG(基于最大度数)<sup>[8]</sup>等进行比较。

表 1 仿真实验的参数设置

Table 1 Parameters setting in simulation experiment

仿真参数	参数值
节点数	100
链路带宽/Mbps	1000
请求者数量	5000
用户请求频率/(次/s)	10
链路延时/ms	1
节点缓存容量	100

### 4.2 评价指标

ICN 缓存的主要目的是减轻服务器的负载,降低用户对内容请求的延迟,减少网络流量和网络堵塞。相应地,本文采用量化网络服务质量和用户体验的指标来评价实验结果。

平均响应跳数 (Average Hop Count, AHC): 用户到缓存命中节点的平均跳数,用于衡量缓存策略对改善用户请求的响应速度的程度。

缓存命中率 (Cache Hit Rate, CHR): 由节点缓存内容响应兴趣包请求的概率,用于衡量缓存内容的利用率。

平均空置时长 (Average Idle Time, AIT): 网络中的所有缓存对象在某一时刻被空置时间的平均值。一个节点上某缓存内容的空置时间是指当前时刻与该缓存内容最近一次被命中的时间差。

内容差异度 (Cache Difference Rate, CDR): 缓存中所有

内容的种类数量与网络中由服务器所产生的内容种类总数量的比值,用于衡量缓存策略对内容多样化的影响。

内容替换率 (Cache Replacement Rate, CRR): 单位时间内的内容对象替换的操作次数占请求总次数的比值。对于一个空间分布合理的缓存策略,发生内容替换的概率应该比较小。

### 4.3 结果分析

#### 4.3.1 用户请求响应

当 Zipf 参数发生改变时,用户请求的响应跳数也会受到影响。图 1 显示了用户请求的平均跳数随 Zipf 参数取值增大的变化趋势。从整体上来讲,本文提出的 CBP 方案具有较低的响应均值,且随着 Zipf 参数的增大而大致呈下降趋势。

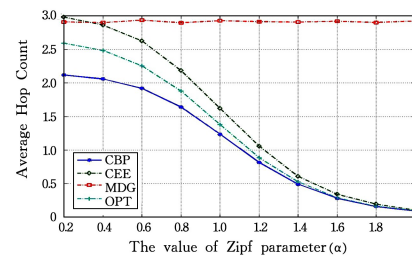


图 1 Zipf 参数对平均响应跳数的影响

Fig. 1 Impact of Zipf parameter on average response hops

#### 4.3.2 缓存利用率

缓存策略的缓存命中率随着 Zipf 参数增大而变化的趋势如图 2 所示。当 Zipf 参数在 0.2~2.0 的范围内变化时,4 种方案的缓存命中率都呈上升趋势,其中 CBP, CEE 和 OPT 增加的幅度较大,而 MDG 的缓存命中率的变化幅度较小,从而说明 CBP, CEE 和 OPT 对 Zipf 参数的变化比较敏感。实验结果还显示, CBP 方案的缓存命中率在所有实验方案中都比其他 3 种方法高,说明本文提出的缓存策略能合理地选择放置缓存对象的节点,且能够合理地替换节点中已存在的缓存对象,使网络中的缓存利用率得到明显提高。

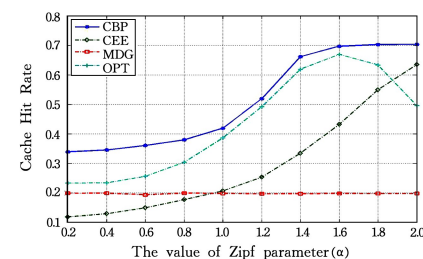


图 2 Zipf 参数对缓存命中率的影响

Fig. 2 Impact of Zipf parameter on cache hit rate

缓存的平均闲置时间是体现缓存利用率的另一个指标,如图 3 所示。

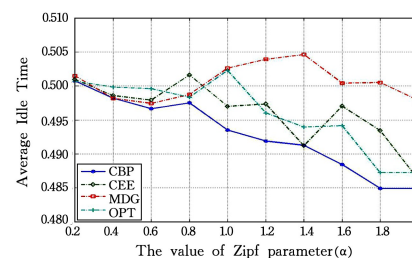


图 3 Zipf 参数对缓存的平均闲置时间的影响

Fig. 3 Impact of Zipf parameter on average idle time of cache

从总体上看,随着 Zipf 参数的增大,CBP 方案下的平均闲置时间呈现逐渐减小的趋势,且比其他 3 种方案都低。可见,CBP 方案减少了网络中的无用缓存对象,缩短了整个网络的缓存闲置时间,提升了缓存的利用率。

#### 4.3.3 缓存替换策略的效果

为了评价不同缓存替换策略的作用效果,本文比较了 4 种不同缓存方案下的缓存差异率,如图 4 所示。其中,CBP 是本文所提出的缓存策略与所提出的替换策略结合的方案,CBP+FIFO(LRU,RAND)表示本文所提出的缓存策略与“先进先出”FIFO(“最近最少使用”LRU、“随机缓存”RAND)替换策略结合的方案。结果表明,CBP 方案的缓存差异率最大,且 Zipf 参数的改变对缓存差异率具有较大的影响。当 Zipf 参数较小时,用户所访问内容的种类较多,大大超出了网络中的缓存容量,因此造成较多的缓存内容被替换,而保留在缓存节点中的内容只占内容总量的一小部分,从而造成缓存差异度也随之降低。当 Zipf 参数较大时,用户访问的内容种类较少,只集中在其中一小部分,由于其总量不会太大,造成的缓存替换操作较少,因此这些被访问过的内容基本被保留在缓存节点中,从而使缓存差异度较大。

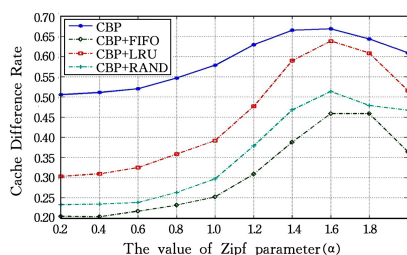


图 4 Zipf 参数对缓存差异率的影响

Fig. 4 Impact of Zipf parameter on cache difference rate

如图 5 所示,相比之下,CBP 的缓存替换率比其他 3 种方案都低。主要原因是,CBP 缓存放置策略和替换策略能将内容对象合理地分布在整个网络中,大大减少了缓存内容的替换操作。

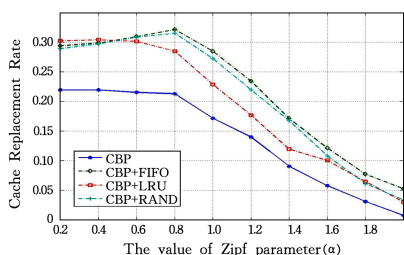


图 5 Zipf 参数对缓存替换率的影响

Fig. 5 Impact of Zipf parameter on cache replacement rate

**结束语** ICN 不但把内容对象缓存在距离用户近的节点上,还考虑如何将内容对象合理地分布在整个网络中,以达到减少用户请求的响应时间、降低缓存内容替换概率的目的。本文提出基于内容流行度和社团重要度的 ICN 缓存与替换策略,一方面结合内容流行度和节点重要度选择内容对象的缓存节点,另一方面根据局部内容流行度和所在节点的重要度共同选择要替换的内容对象,从而使缓存内容在空间和时间上合理分布,进而提升网络传输效率和缓存利用率。

## 参考文献

- [1] BACHER F,RAINER B,HELLWAGNER H. Towards controller-aided multimedia dissemination in Named Data Networking [C] // 2015 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW). New York:IEEE,2015:1-6.
- [2] XIULEI W,MING C,CHAO H, et al. SDICN: A software defined deployable framework of information centric networking [J]. China Communications,2016,13(3):53-65.
- [3] CHARPINEL S,SANTOS C A S,VIEIRA A B, et al. SDCCN: A Novel Software Defined Content-Centric Networking Approach[C] // 2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). New York:IEEE,2016:87-94.
- [4] ZHANG G Q,LI Y,LIN T, et al. Survey of in-network caching techniques in information-centric networks[J]. Journal of Software,2014,25(1):154-175. (in Chinese)  
张国强,李杨,林涛,等. 信息中心网络中的内置缓存技术研究[J]. 软件学报,2014,25(1):154-175.
- [5] GHODSI A, SHENKER S, KOPONEN T, et al. Information-centric networking: seeing the forest for the trees[C] // Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. ACM,2011.
- [6] EUM S, NAKAUCHI K, MURATA M, et al. CATT: potential based routing with content caching for ICN[C] // Proceedings of the Second Edition of the ICN Workshop on Information-Centric Networking. ACM,2012:49-54.
- [7] SAINO L, PSARAS I, PAVLOU G. Hashing routing scheme for information-centric networking [C] // Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking. ACM,2013:27-32.
- [8] CHAI W, HE D, PSARAS I, et al. Cache less for more in information-centric networks(extended version)[J]. Computer Communications,2013,36(7):758-770.
- [9] WANG Y, LEE K, VENKATARAMAN B, et al. Advertising cached contents in the control plane: Necessity and feasibility [C] // Proceedings of 2012 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. IEEE,2012:286-291.
- [10] SANG S, BI J, WU J. Collaborative caching based on hash-routing for information-centric networking [J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review,2013,43(4):535-536.
- [11] SOURLAS V, FLEGKAS P, PASCHOS G, et al. Storage planning and replica assignment in content-centric publish/subscribe networks[J]. Computer Networks,2011,55(18):4021-4032.
- [12] ERIKSEN K A, SIMONSEN I, MASLOV S, et al. Modularity and extreme edges of the Internet [J]. Physical Review Letters, 2003,90(14):148701-148704.
- [13] GE G D, GUO Y F, LIU C X, et al. Collaborative caching and routing scheme based on local request similarity in Named Data Networking[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2015,37(2):435-442. (in Chinese)  
葛国栋,郭云飞,刘彩霞,等. 命名数据网络中基于局部请求相似性的协作缓存路由机制[J]. 电子与信息学报,2015,37(2):435-442.

- [14] LIU W X, YU S Z, HU X, et al. Selective caching in content-centric networking[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(2): 275-288. (in Chinese)  
刘外喜, 余顺争, 胡晓, 等. CCN 中选择性缓存机制的研究[J]. 计算机学报, 2014, 37(2): 275-288.
- [15] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community Structure in Social and Biological Networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 99(12): 7821-7826.
- [16] RAGHAVAN U N, ALBERT R, KUMARA S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2007, 76(3 Pt 2): 036106.
- [17] NEWMAN M E. Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices[J]. Physical review E, 2006, 74(3 Pt 2): 036104.
- [18] RUI L L, PENG H, HUANG H Q, et al. Popularity and Centrality Based Selective Caching Scheme for Information-centric Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 38(2): 325-331. (in Chinese)
- 芮兰兰, 彭昊, 黄豪球, 等. 基于内容流行度和节点中心度匹配的信息中心网络缓存策略[J]. 电子与信息学报, 2015, 38(2): 325-331.
- [19] ALEXANDER A, MOISEENKO I, ZHANG L X. ndnSIM: NDN simulator for NS-3 Named Data Networking (NDN) Project [R]. 2012.
- [20] openflow[EB/OL]. <https://www.nsnam.org/docs/release/3.13/models/html/openflow-switch.html>.
- [21] ZEGURA E, CALVERT K. Georgia tech Internet topology models[EB/OL]. <http://www.cc.gatech.edu/projects/gtitm>.
- [22] BRESLAU L, CAO P, FAN L, et al. Web caching and Zipf-like distributions: evidence and implications[C] // 18th Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York: IEEE, 2002: 126-134.
- [23] ZHAO G F, XING Y, DUAN J, et al. Time-driven ICN caching mechanism in internet of things[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 30(1): 68-74. (in Chinese)  
赵国峰, 邢媛, 段洁, 等. 物联网中时间驱动的 ICN 缓存机制研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018, 30(1): 68-74.

(上接第 98 页)

- [2] WEN T, YU H F, LI L M. The road to network virtualization [J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(3): 2-7. (in Chinese)  
温涛, 虞红芳, 李乐民. 网络虚拟化的过去、现在和未来[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(3): 2-7.
- [3] CUI H Y, GAO W J, LIU J, et al. A virtual network embedding algorithm based on virtual topology connection feature[C] // IEEE 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Atlantic, 2013: 1-5.
- [4] HU Y X, LAN J L, WU J X. Research on resource reconfiguration model of substrate carrier network based on hardware virtualization [J]. Journal on Communications, 2011, 32(12): 36-42. (in Chinese)  
胡宇翔, 兰巨龙, 邬江兴. 基于固件虚拟的承载网络资源重构模型研究[J]. 通信学报, 2011, 32(12): 36-42.
- [5] XU Z, LIANG W, XIA Q. Efficient virtual network embedding via exploring periodic resource demands[C] // 39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Edmonton, Canada: IEEE, 2014: 90-98.
- [6] CAO B, LANG W Q, LI Y. Virtual network reconfiguration in wireless network virtualization based on maximum revenue [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2016, 28(5): 620-627. (in Chinese)  
曹宾, 郎文强, 李云. 基于最大收益的无线虚拟网络重映射算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(5): 620-627.
- [7] QU H, ZHAO J H, GUO S L, et al. Resource reconfiguration method based on minimum cost for network virtualization [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014, 37(5): 114-118. (in Chinese)  
曲桦, 赵季红, 郭爽乐, 等. 基于最小代价的虚拟网络重配置方法[J]. 北京邮电大学学报, 2014, 37(5): 114-118.
- [8] HU Q, WANG Y, CAO X. Survivable Network Virtualization for Single Facility Node Failure: A Network Flow Perspective [J]. Optical Switching & Networking, 2013, 10(4): 406-415.
- [9] XIAO A L, WANG Y, MENG L M, et al. Virtual network embedding approach to survive multiple node failures [J]. Journal on Communications, 2015, 36(4): 1-8. (in Chinese)  
肖蔼玲, 王颖, 孟洛明, 等. 面向多节点故障的生存性虚拟网络映射方法[J]. 通信学报, 2015, 36(4): 1-8.
- [10] PENG L M. A topology-awareness virtual network reconfiguration algorithm [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(5): 110-115. (in Chinese)  
彭利民. 一种拓扑感知的虚拟网络重构算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 110-115.
- [11] LIU H. Research on green resource allocation management [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)  
刘慧. 绿色化资源分配机制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [12] XIAO A, WANG Y, MENG L, et al. Topology-Aware Remapping to Survive Virtual Networks against Substrate Node Failures[C] // IEICE 15th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS). 2013: 406-411.
- [13] LI L. Research on virtual network embedding algorithms in service-oriented future Internet architecture [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)  
李澜. 面向服务的未来互联网体系虚拟网络映射方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.