

# 内容中心网络中基于节点相似度的协作缓存算法

方馨蔚 陈庶樵 任泽荣 江逸茗

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450000)

**摘要** 针对内容中心网络中 ALWAYS 缓存策略节点存储空间利用率低、内容访问时延大、整体网络缓存性能低下的问题,提出了一种依据节点相似度的协作缓存算法。该算法优先将兴趣包转发至最相似节点,增大相关请求的就近响应概率;同时保证在缓存决策中的同一副本在协作节点间不重复存储,在降低冗余的同时增加了缓存多样性。实验结果表明,与现有算法相比,该算法在减少路由跳数和请求时延的同时提高了缓存命中率。

**关键词** 内容中心网络,协作缓存,缓存决策,节点相似度

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.4.016

## Collaborative Caching Algorithm Based on Node Similarity in Content Centric Networking

FANG Xin-wei CHEN Shu-qiao REN Ze-rong JIANG Yi-ming

(National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract** The default ALWAYS caching scheme (caching everything everywhere) in CCN results in the low storage utilization, the large content access latency and the inefficient caching performance as well. This paper proposed a collaborative caching algorithm based on node similarity (CCANS). The interest packet is forwarded to the most similar node to increase the hit rate for correlate requests. Curbing the same duplication between collaborative nodes, the algorithm reduces the redundancy while increasing the diversity. The simulation results show that, compared with the existing algorithm, the proposed algorithm decreases the route hops, reduces the request latency and achieves higher cache hit ratio.

**Keywords** Content centric networking, Collaborative caching, Caching strategy, Node similarity

## 1 引言

随着网络需求向海量信息访问的转型,内容中心网络(Content Centric Networking, CCN)<sup>[1]</sup>得到了越来越广泛的关注。作为一种革命式的新型网络结构,CCN 以信息名字取代 IP 地址作为网络传输标识,将关注点由内容的位置(where)转向了内容本身(what);传输模式改“推”为“拉”,以用户的意愿和请求为主导;并且,CCN 对内容进行统一标识,采用“发布-请求-响应”模式,直接以内容名字进行定位、路由和传输,更加契合未来互联网的发展需求。

区别于一般缓存系统,CCN 最大的特点在于每个节点都具有缓存功能。当节点接收到兴趣包(Interest Packet)时,会根据内容名依次在内容存储器(Content Store, CS)、未决兴趣表(Pending Interest Table, PIT)和转发信息库(Forwarding Information Base, FIB)3 个功能模块中查询匹配。缓存命中后,数据包(Data Packet)沿请求路径反向逐跳转发。

目前,CCN 中普遍采用的仍然是泛滥式的沿途处处缓存(Cache Everything Everywhere, CEE)<sup>[2,3]</sup>,这种缓存方式以牺牲节点的缓存空间为代价换取缓存性能的提升,但面对有

限的缓存容量,CEE 必然会导致缓存内容更替频繁,即使是流行内容,也会在短时间内被后续内容替换,致使后续请求无法利用前期缓存,造成极大的资源浪费;并且,CEE 的缓存方式还会使得缓存链路上的内容趋于同质化,产生大量的缓存冗余。

节点间协作缓存是有效提高缓存性能的方法之一。但由于 CCN 的缓存要求线速执行<sup>[4]</sup>,复杂度高、通信需求大的协作缓存算法将不再适用;同时,节点处处缓存虽然提高了对象可用性(availability),却也抛出了如何高效转发请求的难题。因此,设计一个高效的缓存算法是发挥 CCN 性能优势的关键。

## 2 问题分析

文献[5]针对现有部分 ICN 方案需在已存在的网络基础设施上添加内容存储路由器和支 持内容名称路由等设施造成的成本开销,试图在减小开销的前提下增量部署 ICN 体系结构,实验证明通过提高边缘缓存的缓存大小以及使用简单的协作缓存策略可以定量地设计出最优缓存性能,逐步地架构部署是可行的;文献[6]提出了一种协同沿路径缓存

到稿日期:2015-06-16 返修日期:2015-08-26 本文受国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315901,2013CB329104),国家自然科学基金资助项目(61309019,61372121),国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2013AA013505)资助。

方馨蔚(1990-),女,硕士生,主要研究方向为内容中心网络、缓存管理,E-mail:fxw\_1022@sina.com;陈庶樵(1973-),男,教授,主要研究方向为宽带信息网。

(CERC),即在请求时将沿途节点的状态、对象请求频率等信息都携带在请求报文里,命中节点依据这些状态信息计算出最优缓存位置和需要替换的对象集;文献[7]提出了一种基于哈希的全局显式协同缓存策略,通过内容名计算出哈希值,再由对应的缓存节点对内容的请求和响应进行判断,但是该方案计算量大,执行复杂度高,且相同内容域内仅缓存一份,造成用户端的访问时延增加;文献[8]提出一种邻域之间协作缓存的方法,通过定期交换缓存信息,不重复存储内容,以降低邻域的缓存冗余,且针对本地无法响应的请求可执行邻域协同响应;文献[9]提出了另一种基于哈希的邻域协同机制(CINC),其通过哈希函数确定每个邻居缓存节点负责缓存的 chunk 号,避免同一个 chunk 在邻域范围内的重复存储;文献[10]提出了一种隐式协同方案,依据内容的流行度和离服务器的距离来计算内容的缓存年龄(age),将流行内容推送到网络边缘,但该方案假设内容流行度是静态参量,忽略了其动态变化;文献[11]提出了一种依据内容流行度来动态调整节点缓存内容数目的关联决策算法(WAVE),内容的缓存数目随内容访问次数的增加以指数速度递增,但内容复制到网络边缘的速度慢。

以上方案在不同程度上实现了内容的优化存储,但还存在不足之处:(1)缓存协同机制复杂度高,在降低缓存冗余和增加内容多样性的同时,低复杂度的隐式缓存协同策略更适应网络缓存的高度动态性;(2)缓存策略缺乏对请求关联性的考虑。目前的缓存理论模型仍然假设请求遵循独立参考模型(Independent Reference Model, IRM)<sup>[12]</sup>,无法体现请求的关联性。针对上述不足,本文提出了一种基于节点相似度的协作缓存算法(Collaborative Caching Algorithm based on Node Similarity, CCANS)。节点获取兴趣包后依据节点相似度大小选择请求转发方向,实现内容的快速获取。该策略通过节点间的协作降低缓存冗余,减小节点的内容替换率。

### 3 基于节点相似度的协作缓存算法

CCANS 属于一种隐式的协同缓存算法,各个节点之间仅需要交互少量的相似度更新报文。本算法没有引入复杂计算,仅在报文转发路径和减少缓存副本上设计了新策略。算法的主要思想包括以下两个方面:(1)根据内容请求具有局域相似性(temporal locality)<sup>[13]</sup>,CCANS 在兴趣包上行请求时不遵循 CCN 一般转发策略,而是由与邻居节点间的相似程度决定转发路径,增大相似内容就近响应的概率,减少用户端时延;(2)在缓存决策中,遵循相同协作内容不重复缓存的策略,使得相似节点能保留更多的缓存空间,减少冗余的同时增加缓存多样性。

#### 3.1 相关参数设定

在内容中心网络中,空间上一定区域内的用户短时间内可能会对某一类内容集中请求,具有较大程度上的局域相似性。在给定时间段  $t$  到  $t+\delta$  范围内,同一用户连续请求的多个数据块 chunk 可能来源于同一个内容对象,区域内的不同用户请求的内容可能具有高度的连续性和相关性。为了体现内容请求的局域分布特征,减少兴趣包洪泛引起的链路负载压力,以及偶然请求“冷门”资源导致的用户端时延问题,本文提出了内容相似度的概念。

区别于传统 IP 网络,内容中心网络的一大特点就是信息

名字是数据索引的唯一标识,整个网络基于名字的最长前缀匹配进行路由。由于对可聚合性的要求,信息名字采用层次化的命名技术<sup>[14]</sup>,类似于 URL,例如/Grammy.com/videos/award.mp4/v2/s3。这些所属层次关系恰巧表征了内容的兴趣点,利用这些兴趣特征可以定量描述两个内容的相似程度。

通过节点上存储的内容信息,获取用户的兴趣趋向。如果两个节点上缓存的大部分内容的层次化命名是相同或者相似的,就可以认为这两个节点间的相似性很高,因此按照内容的相关性进行聚类可以得到按节点相似性进行聚类的结果,进而在用户连续请求时可以优先考虑用户的兴趣点向相关节点转发兴趣包。

定义 1(内容相似度  $\rho_{sim}$ ) 表征内容之间的相似程度,是判断两个内容相关或连续的度量标准。

假设  $\exists c_\alpha, c_\beta \in \{c\}^n, \forall i=1, \dots, n, c_\alpha, c_\beta$  的内容名可以被分别描述成  $f_1/f_2 \dots /f_m$  和  $g_1/g_2 \dots /g_n$ 。层次关系中每一个用定界符分开的词元  $f_1, f_2, \dots, f_m; g_1, g_2, \dots, g_n$  都表征该内容的一个兴趣点,因此内容相似度  $\rho_{sim}(c_\alpha, c_\beta)$  可以定义为  $c_\alpha, c_\beta$  层次化命名中相同的词元个数。内容名长度定义为层次化命名中所有兴趣点或词元的数目,即  $|L_\alpha| = m, |L_\beta| = n$ 。例如以下的两个内容名/org/sigcomm/2013/ccn/lmi.pdf/v1/s0 和/org/infocom/2014/ccn/ctg.pdf/v1/s2,它们均是由数字和字符构成的,每个词元都描述了该内容。从内容名可以看出,这两个内容虽然大目录不同,来自于不同的国际会议,但都是基于 ccn 的学术论文,相关性较高。一个内容名的层次结构体现了对该内容的归类,但并不局限于仅相同目录下的内容具有高相似性。这里把隐含的信息考虑进内容相似度的计算,使得更多的内容相互间建立相关性联系,从最大范围内提高节点相似度的准确性。

定义 2(节点相似度 NodeSim) 假设有  $m$  个网内节点  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ ,节点上缓存的总内容集合为  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ,节点的兴趣特征可以由节点上缓存的内容来表征,类似一组兴趣向量,从基于不同节点缓存相似内容的角度出发,进行节点间的相似度测量,这些缓存的内容名可以近似构成一个兴趣向量空间。利用余弦相似度函数,以  $r_1, r_2$  两节点为例,节点间的相似度函数可以定义如下:

$$NodeSim(r_1, r_2) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x(r_1, c_i) x(r_2, c_j) \rho_{sim}(c_i, c_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x(r_1, c_i) |L_i|)^2 \sum_{j=1}^N (x(r_2, c_j) |L_j|)^2}} \quad (1)$$

其中,  $x(r_1, c_i) = x(r_2, c_j) = \{0, 1\}$ ,表示节点  $r_1, r_2$  是否分别缓存过内容  $c_i, c_j, \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x(r_1, c_i) x(r_2, c_j) \rho_{sim}(c_i, c_j)$  表示两个节点缓存相似内容的层次化命名的相似度,  $\sum_{i=1}^N (x(r_1, c_i) |L_i|)^2 \sum_{j=1}^N (x(r_2, c_j) |L_j|)^2$  则表示两个节点所有已缓存内容长度平方和的内积。NodeSim( $r_1, r_2$ )反映了在统计时间内,节点  $r_1, r_2$  上缓存内容的关联关系,其取值越大,即兴趣相似度越大,  $r_1, r_2$  节点相似度越高。若对  $r_1, r_2$  发送兴趣包请求,两个节点上数据块请求序列之间的内容相关性越强。该方法不仅从相同缓存内容的角度进行相似度测量,还考虑了相似内容隐含的相关性信息。

定义 3(节点相似收敛度  $\epsilon$ ) 用于表征节点相似度 NodeSim 的收敛程度。对于任意相邻节点  $r_i, r_j$ ,要求满足

$NodeSim(r_i, r_j) \geq \epsilon$ 。ε取值越高,表明节点相似度的取值越高。

### 3.2 协议交互机制

为了邻居节点间的信息交互和协作缓存,本文设计了邻居相似度信息表(SimLists),表1列出了节点 $r_0$ 上SimLists的单元结构。SimLists的主要功能为:当节点CS无法响应请求,需要向邻居节点发起协作缓存时,SimLists可为节点提供邻居信息,通过查询表项获取相似度最高的邻居节点,记为 $R_{max}$ ,并向其转发协作兴趣报文CIP。

表1 邻居相似度信息表(SimLists)

邻居节点标识	节点相似度	缓存空间是否已满	时延/ms	端口
$r_1$	$NodeSim(r_0, r_1)$	Y/N	$latency_{r_1}$	1
$r_2$	$NodeSim(r_0, r_2)$	Y/N	$latency_{r_2}$	2

其中,邻居节点标识是识别节点的唯一标识;节点相似度是用来判断是否转发协作兴趣报文以及向哪个邻居节点转发的重要指标;缓存空间是否已满是在进行数据包接收时判断是否执行缓存替换策略的依据;时延的记录便于后续性能的计算比较;端口号则为转发提供便利。这些信息都是“轻量级”的,并不会占用过多带宽而影响通信。

由定义3,对任意节点 $r_i, r_j$ ,其满足 $NodeSim(r_i, r_j) \geq \epsilon$ 。节点相似度需要满足该条件才能够写入SimLists,过低的相似度意味着两节点缓存的内容没有相关性或者关联性较弱。对弱相关的节点转发协作兴趣请求,相较于直接按照FIB进行兴趣包转发,并没有获得较大的性能提升,甚至会无目的地消耗协作兴趣请求的次数,导致时延增加。

因为用户兴趣的不断变化和连续请求,以及节点间的协作缓存,需要充分利用最相似邻居节点的缓存内容以减少用户端时延,为此设计了两类新报文:相似度更新报文和协作缓存报文。

#### (1) 相似度更新报文

相似度更新报文(Similarity Update Packet, SUP)针对SimLists用于向其他节点通告本地缓存内容信息,报文格式如图1所示。这里假定单位时间内网内所有缓存的变化量是一定的,因而可以以时间为单位进行度量。定义每隔时间段 $\gamma$ ,节点会向外发送SUP报文。由定义1和定义2,根据接收到的SUP报文中缓存内容列表 $C_i$ 的信息,重新计算节点相似度,动态地调整SimLists的内容。

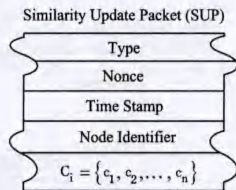


图1 相似度更新报文格式

其中,Type字段是报文类型;Nonce表示随机数;Time Stamp为时间戳,用来记录SUP的发送时间;Node Identifier为节点标识; $C_i$ 字段则表示节点缓存内容列表,用以计算节点相似度。

#### (2) 协作缓存报文

为了区分协作缓存是请求还是应答数据,实现基于节点相似性的交互,设计了协作兴趣报文(Cooperative Interest

Packet, CIP)和协作数据报文(Cooperative Data Packet, CDP)。CIP与CDP的具体格式与CCN中的Interest Packet和Data Packet相同,工作机制也大体相同,区别可以简单归纳为在按FIB转发前增加了是否协作缓存的判断机制。如图2所示,分别在Interest Packet和Data Packet报文中添加了跳数计数Count字段和缓存标识符Symbol字段。其中,Count字段用于对节点发送CIP请求协作的次数进行计数,若超过最大跳数 $threshold_h$ ,则直接按照FIB进行兴趣包转发。这里的最大跳数 $threshold_h$ 是根据网络拓扑的结构和规模事先设定的,一旦CIP的转发次数超过了最大跳数,将不再转发协作请求,该字段能够保证在最短的时间内用最少的跳数找到能提供内容响应的目标节点。Symbol字段则用于标记协作响应的内容,使得下行链路上的节点只转发而不缓存数据包,避免相同内容在协作节点上重复存储,减少冗余的同时增大了局域内容的多样性。

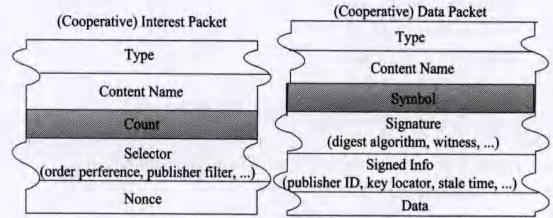


图2 (协作)兴趣和(协作)数据报文格式

### 3.3 算法执行流程

CCANS避免了大量的复杂计算和集中化决策,节点依据收到的报文格式和跳数计数来决定是否转发协作请求,依据接收到的报文格式和缓存标识符来决定是否缓存应答数据。表2列出了算法的执行流程,具体执行以下3种策略:

(1)当缓存节点接收到Interest Packet报文时,存在两种可能:该节点可能位于网络边缘,即直接与用户请求端相连,此时若该节点CS中存储了该内容,则直接返回Data Packet,否则查询邻居相似度信息表SimLists,向相似度最大的节点 $R_{max}$ 转发协作兴趣报文CIP,同时跳数计数Count加1;第二种情况是CIP转发次数Count已经超过最大跳数 $threshold_h$ 或者节点相似度均低于收敛度 $\epsilon$ ,上一跳节点直接按照FIB进行Interest Packet报文转发,这时说明用户请求了“冷门”内容,或者是相似节点组成的“小社区”内没有存储有关联的新内容。若某内容在连续几个最高相似度的节点上都无法响应,那么该内容可能与用户之前请求的内容关联性较弱,在“小社区”内存在的概率较小,此时直接按FIB转发Interest Packet,从源服务器或者上游节点处获取内容以减少延迟。并且,对节点相似收敛度 $\epsilon$ 的设置排除了存储内容差异度较大的节点,减少了不相关节点对协作缓存的干扰。

(2)当缓存节点接收到CIP报文时,说明该节点与上一跳节点相似度最高。若节点缓存CS中包含请求内容,则发送CDP进行响应;否则,查找未决兴趣表PIT是否有该内容条目,若有,则在响应条目中增加端口,若PIT中没有该内容,接下来首先考察是否满足 $Count \leq threshold_h$ 。设定 $threshold_h$ 值,其一是为了防止局域节点以相似度为度量形成闭环,请求无法向其他节点转发,缓存内容无法响应,从而引起请求报文的失效;其二是用于判断协作缓存是否遇到了“坏情况”,这里的“坏情况”是指大部分响应完成时协作转发

的次数超过了按 FIB 直接寻址的跳数,协作变得毫无意义。其次,判断 SimLists 是否为空,因为在相似度过低的节点间进行协作缓存只能是盲目请求数据的过程。根据定义 3,必须满足  $NodeSim(r_i, r_j) \geq \epsilon$ ,若 SimLists 不存在这样的相似节点,则终止协作,直接按照 FIB 进行 Interest Packet 转发。

(3)当节点接收到 CDP 报文,即 Symbol 值为 1 时,不对该内容进行存储,直接按照 PIT 转发 CDP 报文。若接收到的是 Data Packet 报文,表明命中节点并没有参与协作缓存,即命中节点可能离限定跳数的协作范围较远,或者转发链路上存在大量节点相似度低于收敛度  $\epsilon$  的节点。此时,节点缓存该内容,若节点缓存已满,先执行缓存替换策略。

表 2 基于节点相似度的协作缓存算法

初始化: Content Name( $c_i$ ), Count, threshold $_h$ , Symbol
发送请求过程: Interest Packet 或者 Cooperative Interest Packet(CIP)
1. For each(Router from Content Consumer to Content Server)
2. if CS 包含请求内容 $c_i$ then
3. if 接收到 Interest Packet 报文 then
4. 发送 Data Packet 进行响应;
5. if 接收到 CIP 报文 then
6. 发送 CDP 进行响应;
7. 设置标志位 Symbol=1,下行节点不再缓存该内容;
8. else
9. if 接收到 Interest Packet or CIP and Count $\leq$ threshold $_h$ then
10. 查询 SimLists 表;
11. If SimLists 表不为空 then
12. 向 $R_{max}$ 发送 CIP 报文;
13. Count++;
14. else 按照 FIB 直接进行 Interest Packet 转发;
15. else 按照 FIB 直接进行 Interest Packet 转发;
接收响应过程: Data Packet 或者 Cooperative Data Packet(CDP)
16. For each(downstream Router)
17. if 接收到 CDP 报文,即 Symbol=1 then
18. 对该内容不进行缓存,直接转发 CDP;
19. if 接收到 Data Packet 报文 then
20. if CS 空间已满 then
21. 执行节点缓存替换策略;
22. 在 CS 中缓存 $c_i$ ;
23. 继续下行转发 Data Packet 报文;

## 4 仿真与性能分析

### 4.1 仿真环境与参数设置

本节利用 ndnSIM<sup>[15]</sup> 仿真平台对 CCN 网络中不同缓存策略的性能进行对比分析,包括 CEE、WAVE 和 CCANS 策略,并利用 MATLAB 对仿真数据进行处理。ndnSIM 仿真器是基于 NS3 的一个 NDN 仿真模块,已实现对 NDN 基本数据单元结构和路由转发流程的模拟。网络拓扑采用 GT-ITM 生成随机的 50 个路由由节点的网络拓扑,CS 初始为空,  $M=2000$  个相同大小的内容存储在服务器中,每个内容划分为 100 个 chunk,大小为 10kB。节点缓存容量一致,CS 设为 200MB,链路带宽为 100Mbps。设置 2 个内容源服务器 OCS,其余节点作为用户接入。内容请求到达服从 Zipf-Mandelbrot 分布,第  $i$  个内容的请求概率为:  $p(i) = \frac{C}{i^\alpha}$ ,  $C = (\sum \frac{1}{i^\alpha})^{-1}$ 。节点请求到达服从泊松分布,  $\lambda=20$  个/秒。仿真时间为 300s,采样周期  $T=5$ s,缓存替换策略采用最近最少使用策略 LRU。

### 4.2 性能分析

考虑 4 个关键性的评价指标:平均路由跳数、平均请求时

延、缓存命中率和代价开销。

#### (1)平均路由跳数

平均路由跳数  $\eta(t)$ :请求被命中时传输的平均距离,这里以经过的跳数计算。

$$\eta(t) = \frac{\sum_{r=1}^Q h_r(t)}{Q} \quad (2)$$

其中,  $h_r(t)$  为  $t-1$  到  $t$  时间内的兴趣包命中请求内容所经过的跳数,  $Q$  为网络中发送的总的兴趣包请求数。图 3 给出了当  $\alpha=1.0, \lambda=20$  时,各方案  $\eta(t)$  随节点缓存 CS 大小的变化趋势。一开始 CS 缓存空间为零,兴趣包都要发送至源服务器进行响应,各方案差别不大。随节点缓存容量逐渐增大,内容被缓存在沿途节点上,不同的方案按照缓存策略的不同,平均路由跳数减少幅度出现差异。CCANS 依据请求相关性,将请求转发到最相似节点上,增加了请求就近命中的概率,减少了内容请求的路由传输距离。由图可知,CCANS 策略取得了较稳定的性能提升。相比 WAVE 策略,平均路由跳数减少了 0.2 跳;相比 CEE 策略,性能提升更为明显,平均路由跳数减少 0.7 跳。

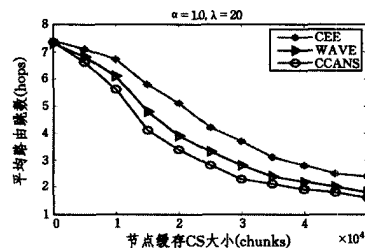


图 3 平均路由跳数随节点缓存大小的变化趋势

#### (2)平均请求时延

平均请求时延  $\gamma(t)$ :网络中所有节点发送兴趣包到接收数据包应答的平均时延。

$$\gamma(t) = \frac{\sum_{r=1}^Q \omega_r(t)}{Q} \quad (3)$$

其中,  $\omega_r(t)$  为单个内容的请求时延。图 4 给出了  $\alpha=1.0, \lambda$  分别为 10 和 20 时的平均请求时延对比。

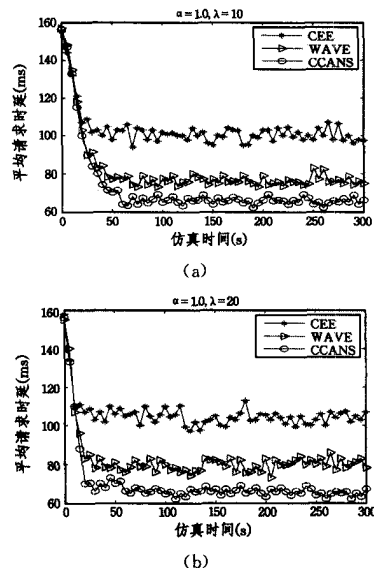


图 4 平均请求时延变化趋势的对比

仿真初始阶段,CS 都为空,兴趣包需要转发至源端获取

响应,时延大。随仿真时间增加,链路上节点的响应概率增大,平均请求时延减少。从图4中可以看出,由于CEE的泛滥式缓存导致节点内容更替频繁,因此平均请求时延最大;WAVE策略中请求次数越多的内容缓存数量也越多,但它没有考虑请求的关联性;而CCANS依据内容请求的局域相似性,动态改变转发方向至最相似节点,有效减少了请求时延。随着 $\lambda$ 的提升,节点接收数据包应答速率加快,平均请求延迟的下降速率也加快。

### (3) 缓存命中率

缓存命中率体现了所有兴趣包中通过网内缓存获得数据包响应的比例。缓存命中率 $\varphi(t)$ 的公式如下:

$$\varphi(t) = \frac{\sum_{r=1}^Q v_r(t)}{Q} \quad (4)$$

其中, $v_r(t)$ 为一个二值函数,值为1表示请求在节点缓存处命中,值为0表示请求在源服务器得到响应。网内缓存命中率越高,兴趣包在靠近请求端获得响应的概率就越大,减轻源服务器负载的同时,内容传输跳数也得以减少,降低了带宽消耗。

$$v_r(t) = \begin{cases} 1, & \text{请求 } r \text{ 在节点缓存处命中} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

图5给出了 $\alpha=1.0$ , $\lambda$ 分别为10和20时3种方案缓存命中率的对比。可以看出,CEE由于链路上处处缓存,同质化缓存现象严重,缓存命中率明显要低于WAVE和CCANS;WAVE针对内容请求次数的多少进行缓存决策,提高了流行内容往边缘缓存的收敛速度,但忽视了请求的关联性和节点之间的协作关系;CCANS充分利用了空间上节点间存储内容的差异,通过节点间协作,只在最相似节点之间转发兴趣包,且相同副本在协作节点间不重复存储,增大了缓存多样性和网内节点的缓存命中率。

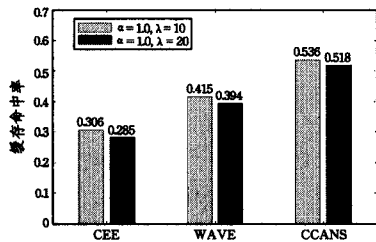


图5 缓存命中率对比

### (4) 代价开销

由于CCANS通过节点间协作来提升缓存性能,引入了额外的代价开销。其中,额外开销主要包括两部分:相似度更新(SUP)开销和节点存储开销。

相似度更新开销( $C_i'$ ):由于节点交互过程中引入了相似度更新报文(SUP),节点需要定期向相邻一跳节点发送自身存储内容的命名集合,带宽消耗不容忽视。为定量分析,定义 $C_i'$ 为报文SUP与其传输跳数(这里以邻居个数衡量)的乘积。其大小取决于SUP的更新频率、报文长度以及邻居节点个数,单位为bits。

$$C_i' = f_{SUP} \cdot S_{SUP} \cdot \sum(N_1 + N_2 + \dots + N_m) \quad (6)$$

其中, $f_{SUP}$ 为报文SUP的更新频率, $S_{SUP}$ 为报文长度, $N$ 表示邻居节点的个数。SUP报文只在邻居节点间通告,因此这里不以路由跳数为度量,而考虑邻居节点数。当节点接收到SUP报文后,计算节点相似度,若 $NodeSim \geq \epsilon$ ,在SimLists列表中记录相关信息。

节点存储开销( $C_i^*$ ):相比CCN,节点需要额外记录SimLists列表中的对应表项,为协作请求时转发兴趣包提供依据。 $C_i^*$ 取决于SimLists列表所存储的各表项信息的长度,单位为bits。

$$C_i^* = \sum_{i=1}^n (L_i + L_{NS} + L_c + L_l + L_f) \quad (7)$$

其中, $L_i$ 、 $L_{NS}$ 、 $L_c$ 、 $L_l$ 和 $L_f$ 分别表示节点标识、相似度、空间容量、时延和端口的长度, $n$ 为对应的存储数量。

内容请求开销( $C_i$ ):为了区分协作报文和一般请求报文,将 $C_i$ 分为两部分: $C_i^c$ 和 $C_i^d$ 。将其定义为内容请求过程中,(协作)兴趣包和(协作)数据包分别与其传输距离的乘积和。

$$C_i = C_i^c + C_i^d = (S_{CIP} + S_{CDP}) \cdot h + (S_{Int} + S_{Dat}) \cdot h' \quad (8)$$

其中, $S_{CIP}$ 和 $S_{CDP}$ 表示协作兴趣包和协作数据包的报文长度, $S_{Int}$ 和 $S_{Dat}$ 表示兴趣包Interest Packet和数据包Data Packet的报文长度, $h$ 和 $h'$ 则分别为对应的路由传输跳数。

表3给出了 $\alpha=1.2$ 时,3种方案的代价开销对比。其中,CEE没有采用任何协作机制,节点除兴趣包和数据包外并没有存储其他数据,因此没有产生额外的节点间通告开销和节点存储开销。但是,CEE无法利用传输路径以外其他节点上的存储资源,节点内容替换率高,导致内容请求开销大大增加。WAVE策略通过在数据报头设置缓存建议标记,来便于下一跳节点判断是否缓存该数据,这种类似LCD的隐式缓存策略无需知道其他节点的信息,额外开销小,但是对象复制到网络边缘的速度慢,且同CEE一样,无法实现请求的就近响应。CCANS将节点相似度引入请求决策中,增加了相似度更新报文SUP的通告和SimLists表项的记录,引入了额外开销。从表3可以看出,由于SUP的定期广播带来的带宽消耗,相似度更新开销 $C_i'$ 要远大于节点存储开销 $C_i^*$ 。相比CEE和WAVE,CCANS虽然产生了额外开销 $C_i'$ 和 $C_i^*$ ,但大大降低了内容请求开销 $C_i$ 。CCANS通过小量的 $C_i'$ 、 $C_i^*$ 额外代价,增大了内容请求的就近响应概率,换取了 $C_i$ 的下降。

表3 代价开销对比表( $\alpha=1.2$ )

方案	CEE	WAVE	CCANS
开销			
$C_i'$	0	0	$1147 \times 10^5$
$C_i^*$	0	0	$254 \times 10^3$
$C_i$	$4003 \times 10^8$	$2921 \times 10^8$	$2241 \times 10^8$

结束语 本文针对CCN中如何提高网内节点缓存资源利用率的问题,结合内容请求的局域相似性,从协作缓存的角度出发,提出了一种基于节点相似度的协作缓存算法。在内容请求过程中,将请求优先转发到相似度最高的节点上,增大内容就近响应的概率;在缓存决策时,针对协作缓存的数据资源,不重复存储内容副本,提高缓存多样性。对3种方案4个指标的对比表明,本文提出的CCANS策略性能均有提升。如何在维持水平方向上协作缓存的同时,进一步控制垂直方向上的冗余量,优化缓存性能,将是下一步研究的内容。

### 参考文献

[1] Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, et al. Networking named content[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies (CoNEXT'09). New York, NY, USA: ACM, 2009: 1-12

(下转第96页)

- network in monitoring system based on ZigBee[C]//Advanced Research and Technology in Industry Applications. Ottawa, ON; IEEE, 2014; 181-183
- [8] Bao Jun, Wu Jian-de, Wang Xiao-dong, et al. Design of pipeline displacement detecting system based on ZigBee wireless sensor networks[C]//Control and Decision Conference. Changsha; IEEE, 2014; 5057-5060
- [9] Jin Chun. ZigBee technology base and case analysis [M]. Beijing; National Defence of Industry Press, 2008(in Chinese)  
金纯. ZigBee 技术基础及案例分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
- [10] Yue Tao, Li Xiang-yang, Cheng Bo. Performance of Coexisted WiFi and ZigBee Networks[C]//Distributed Computing Systems Workshops. Philadelphia, PA; IEEE, 2013; 315-320
- [11] Liu Yuan-jian, Zhang Min-sheng, Cao Jing, et al. Simulation and Analysis of 900 MHz Radiowave Propagation Characteristics in the Indoor Complex Environment[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013, 33(2); 37-41(in Chinese)  
刘尧健, 张敏胜, 曹京, 等. 室内复杂环境 900MHz 电波传播特性的仿真与分析[J]. 南京邮电大学学报, 2013, 33(2); 37-41
- [12] Yin Fu-rong, Wang Peng-fei, Liu Yuan-jian. Study on the Radio Wave Propagation in Indoor Environments with Metallic Furniture [J]. Journal of China Institute of Electronics, 2014, 9(2); 209-216(in Chinese)  
殷福荣, 王鹏飞, 刘尧健. 室内带金属家具环境的电波传播特性研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(2); 209-216
- [13] Petar M, Mladen V, Zeljko B. Wireless InSite Software Verification via Analysis and Comparison of Simulation and Measurement Results [J]. International Convention, 2012, 21(25); 776-781
- [14] Cao Jing. Study on the Propagation Characteristics of UWB Signal in Indoor Complex Environment Based on TD-UTD[D]. Nanjing; Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013(in Chinese)  
曹京. 基于 TD-UTD 的室内复杂环境 UWB 信号传播特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013
- [15] Yin Fu-rong, Wang Peng-fei, LIU Yuan-jian. Study on the Radio Wave Propagation in Indoor Environments with Metallic Furniture [J]. Journal of CAEIT, 2014, 9(2); 209-216
- [16] Shen Zhen. Research on the MIMO Channel Characteristic Based on Ray-Tracing Method [D]. Nanjing: PLA University Science and Technology, 2008(in Chinese)  
申振. 基于射线追踪法的 MIMO 信道特性研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2008
- [17] Ma Run. Simulation of the Radio Propagation in Laboratory House with Applications In Home-Network [D]. Beijing; Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010(in Chinese)  
马润. 室内无线信道的传播模型及其在家庭网中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010
- [18] Linden D S. A wideband omnidirectional loaded genetic antenna for receiving vertical, horizontal, right-hand and left-hand circular polarizations[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu, HI; IEEE, 2007; 777-780

(上接第 85 页)

- [2] Liu Wai-xi, Yu Shun-zheng, Hu Xiao, et al. Selective Caching in Content-Centric Networking[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 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, 2013, 37(2); 275-288
- [3] Xylomenos G, Ververidis C, Siris V, et al. A survey of information-centric networking research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2); 1024-1049
- [4] Psaras I, Chai W K, Pavlou G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks[C]//Proc. of the 2nd ICN Workshop on Information-Centric Networking. 2012; 55-60
- [5] Fayazbakhsh S K, et al. Less pain, most of the gain; Incrementally deployable ICN[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4); 147-158
- [6] Tang X, Chanson S T. Coordinated en-route Web caching[J]. IEEE Trans. on Computers, 2002, 51(6); 595-607
- [7] Wang S, Bi J, Wu J P. Collaborative caching based on hash-routing for information-centric networking[C]//Proc. of the ACM SIGCOMM. 2013; 535-536
- [8] Wang J M, Zhang J, Bensaou B. Intra-AS cooperative caching for content-centric networks [C] // Proc. of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking (ICN 2013). 2013; 61-66
- [9] Li Z, Simon G. Time-Shifted TV in content centric networks: The case for cooperative in-network caching[C]//Proc. of the 2011 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2011; 1-6
- [10] Ming Z, Xu M, Wang D. Age-Based cooperative caching in information-centric network [C] // Proc. of the IEEE INFOCOM Workshop on NOMEN. 2012; 268-273
- [11] Cho K, Lee M, Park K, et al. WAVE: Popularity-Based and collaborative in-network caching for content-oriented networks[C]//Proc. of the IEEE INFOCOM Workshop on NOMEN. 2012
- [12] Zhu Yi, Mi Zheng-kun, Wang Wen-nai. A cache probability replacement policy based on content popularity in content centric networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(6); 1305-1310
- [13] Liu Wai-xi, Yu Shun-zheng, Cai Jun, et al. Scheme for Cooperative Caching in ICN[J]. Journal of Software, 2013, 24(8); 1947-1962(in Chinese)  
刘外喜, 余顺争, 蔡君, 等. ICN 中的一种协作缓存机制[J]. 软件学报, 2013, 24(8); 1947-1962
- [14] Zhang Li-xia, Estrin D, Burke J. Named data networking(NDN) project; PARC NDN-0001[R]. 2010
- [15] Afanasyev A, Moiseenko I, Zhang L X. ndnSIM; NDN simulator for NS-3; NDN-0005[R]. NDN, 2012