

内容中心网络中能耗优化的隐式协作缓存机制

伊 鹏 李 根* 张 震

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

摘 要: 综合考虑内容中心网络(CCN)的能耗优化及性能提升, 该文提出一种内容中心网络中能耗优化的隐式协作缓存机制。缓存决策时, 利用缓存节能量作为判决条件优先在用户远端节点缓存, 并利用数据包携带最近上游缓存跳数信息进行隐式协作, 减轻用户近端节点缓存空间的竞争压力, 提高邻近节点缓存的差异性。缓存替换时, 选取缓存节能量最小的缓存内容加以替换, 达到最优的能耗优化效果。仿真结果表明, 该缓存机制在性能上获得较优的缓存命中率及平均路由跳数, 同时有效降低了网络能耗。

关键词: 内容中心网络; 缓存机制; 能耗优化; 隐式协作

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)04-0770-08

DOI: 10.11999/JEIT170635

Energy Optimized Implicit Collaborative Caching Scheme for Content Centric Networking

YI Peng LI Gen ZHANG Zhen

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Taking into account the energy optimization and performance enhancement of the Content Centric Networking (CCN) comprehensively, an energy optimized implicit collaborative caching scheme for CCN is proposed. In terms of the caching decision, energy saving account is utilized as the judgement, which is carried out on consumer's remote nodes preferentially, and the data packet is utilized to carry the information of recent upstream caching hops, so as to realize the implicit collaboration, thus reducing the caching space competition pressure of the consumers' near nodes, improving the caching difference between nearby nodes. As for the caching replacement, the caching content with the minimum energy saving account is selected to be replaced, achieving the optimal energy consumption optimization effect. Simulation results show that, the caching scheme achieves better cache hit ratio and average routing hops, meanwhile, it reduces the network energy consumption effectively.

Key words: Content Centric Networking (CCN); Caching scheme; Energy optimization; Implicit collaboration

1 引言

互联网发展至今, 已成为全球的信息基础设施。然而, 随着网络用户数量持续上升, 功能业务需求日益多样化, 传统基于 IP 端到端的网络架构难以适应当前网络中大流量内容分发的网络主要业务, 体现出流量效率低下^[1,2]、可扩展性差的缺点。针对网络架构与业务需求失配的不足, 目前已有 P2P, CDN 等基于 IP 架构叠加覆盖网络的内容分发机制, 但其无法克服 IP 本身缺陷, 进一步加剧了现有网络的复杂性, 并且只能针对特定业务的内容进行存储, 适用范围有限, 不利于互联网的进一步持续发展^[3]。

基于以上现状, 内容中心网络(Content Centric Networking, CCN)^[4]作为一种能够提供高效内容分发的全新网络架构, 受到学术界和业界的广泛关注。CCN 利用全网所有节点动态缓存全网通用的内容, 使得内容提供者泛在化, 并以内容名称代替传统网络的 IP 地址进行路由寻址, 直接表达用户需求。用户向网络中发送带有内容名称的兴趣包(interest)进行内容请求, 在每个路由节点中依次在内容存储器(Content Store, CS)、未决请求表(Pending Interest Table, PIT)和转发信息库(Forwarding Information Base, FIB)中进行最长前缀匹配查找实现路由转发, 内容源服务器或缓存有相应内容的 CCN 节点将数据包(data)沿相反路径发送回内容请求者完成内容响应。

在 CCN 中, 高效利用全网缓存为用户提供服务能够有效提高网络性能。然而, 默认的返回路径处

收稿日期: 2017-06-30; 改回日期: 2017-12-13; 网络出版: 2018-01-23

*通信作者: 李根 2275596985@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61372121, 61521003)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61372121, 61521003)

处缓存(Leave Cache Everywhere, LCE)^[5]的缓存决策与“最近最少使用(Least Recently Used, LRU)”原则的缓存替换易导致邻近缓存相似性过大,即存在大量的缓存冗余,且缓存替换率过高,缓存可用性较差。

近年来,面向缓存系统性能提升的缓存机制已有大量研究。文献[6]提出一种依概率的缓存机制 ProbCache,数据包返回路径上节点的缓存概率随着与用户距离的减小而增大,从而将内容更多地缓存在邻近用户的节点,但易导致邻近用户节点的缓存资源竞争激烈,缓存替换率过高而难以充分利用。文献[7]提出一种基于年龄的协作式缓存 ABC,将流行度高且位于用户邻近的节点的内容设置较大的年龄值,若数据包沿途的某节点无缓存到期则不在该节点缓存,保证流行度高的缓存有足够长的逗留时间,但易造成缓存更新不够及时,缓存有效性难以保证。文献[8]提出一种基于逗留时间的缓存决策策略 ST-LRU,选取逗留时间最长的节点进行缓存,并结合 LRU 原则进行缓存替换,有效地选取了内容流行度较高的内容进行缓存,并降低了内容复制次数,但该机制在兴趣包和数据包中增加了逗留时间字段,并增加了读取和比较相邻节点逗留时间的计算代价。文献[9]提出一种内容流行度与节点中心度匹配的缓存机制,缓存决策时,返回路径节点依据该内容的流行度排名是否高于节点中心度决定是否缓存,该机制优化了网络缓存资源分配的合理性,但默认全网的缓存流行度已知,未考虑内容在不同节点的流行度并不均衡的分布特性。文献[10]提出基于概率的启发式缓存机制,利用兴趣包和数据包统计网络状态信息,综合考虑内容热度和缓存放置收益进行缓存,提高缓存空间利用率以及缓存服务效率,但该机制需要在 CS 和 PIT 中增加收益等字段的存储和计算开销。

随着网络高速发展的同时,网络能耗占据全球能耗比例持续逐年增长,且目前的能耗优化提升速度远远跟不上网络规模及性能需求的提升,如果任由此继续发展,会在不久的未来面临严重的能源危机。

针对内容中心网络的能耗优化,目前已有研究表明,通过缓存机制的优化能够有效减小用户获取内容的能耗^[11]。文献[12]将全网最小化能耗的优化问题建模为整数线性规划问题,并利用遗传算法进行了求解,以此来找到最优的缓存放置策略,但该算法是一种离线策略,无法在实际网络运行中使用。文献[13]考虑了内容对象的流行度随网络区域和时间的推移而变化的特性,提出一种离线解决方案

EE-OFD,通过全局信息建模优化获取最大能耗收益,在此基础上提出一种在线的分布式方案 EE-OND,通过节点对全局能耗收益的估计进行缓存决策。文献[14]提出一种综合优化能耗和时延的分布式缓存机制 EV,将缓存决策转化为两条判定准则,即缓存该内容能否消耗更少的能量及缓存空间已满时替换当前节省能量最少的内容,但该策略并未考虑节点间协作,每个节点的决策缺乏配合。文献[15]提出一种基于非合作博弈的缓存能耗优化方法,通过非合作博弈模型的纳什均衡解保证每个节点获取局部最优解的同时得到全局能耗最优的缓存配置方法,但该机制仅考虑了系统能耗,而未考虑与性能的权衡。文献[16]提出一种能效感知的概率性缓存机制 E²APC,利用能耗判决条件选定缓存节点后综合节点中心度和内容流行度设置缓存概率,达到缓存系统性能与能耗优化的平衡,但该机制在性能上只考虑了内容流行度和节点中心度,且未考虑节点间配合。文献[17]提出基于 CCN 节点休眠的能耗优化算法,提出基于生成树的集中式解决方案,并提出基于对偶分解和基于交替方向乘子的分布式能耗优化算法,但该机制仅适用于允许 CCN 节点休眠的环境下。

上述面向性能及能耗优化的缓存机制研究的不足体现在:(1)单纯优化能耗或缓存系统性能,未综合考虑能耗优化及性能提升;(2)默认内容流行度已知,未考虑内容的流行度在不同节点的差异性;(3)节点间缺乏配合,邻近用户缓存资源的竞争压力过大且存在缓存冗余。针对上述问题,本文提出面向能耗优化的隐式协作缓存机制(Energy Optimized Implicit Collaborative Caching scheme, EOICC)。在缓存决策时,在数据包中添加最近上游缓存跳数信息,用于每个返回路径节点计算缓存换取的传输和处理能耗的节能量,优先上游节点缓存,减轻邻近用户节点缓存资源的竞争压力,降低缓存替换率,自适应地减少缓存冗余的发生。在缓存替换时,选取缓存节能量最少的缓存进行替换,提高节约能耗的效果。相比于现有研究,本文的主要贡献如下:

(1)将现有的 CCN 传输过程的能耗模型进行改进,更真实地刻画了每个节点的缓存决策对网络消耗的存储、传输和处理能耗的影响。

(2)在数据包中引入最近上游缓存跳数信息,实现节点间的轻量级隐式协作,以极少量的开销减少缓存冗余的发生,提高邻近缓存差异性,并且自适应地均衡返回路径的缓存替换率,减轻邻近用户缓存的竞争压力,保证缓存性能与能耗优化的平衡。

2 模型分析

2.1 网络模型

将 CCN 的网络拓扑建模为无向连通图 $G = (V, E)$, 其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为网络中 CCN 节点的集合, E 为网络中链路的集合。对于节点 v_i , 其缓存容量为 M_i 。设定 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ 为网络中的内容集合, 其中内容 c_j 的兴趣包大小为 r_j , 数据包大小为 s_j 。

定义 1 节点内容流行度 $\lambda_i^j(t)$: 定义为 t 时刻内容 c_j 在节点 v_i 上的内容请求到达速率, 表征 t 时刻内容 c_j 在节点 v_i 的需求程度。借鉴文献[18], 节点内容流行度的计算是通过在 t 时刻之前一定长度的时间段设置滑动窗口, 划分为若干个时隙, 统计每个时隙的节点内容请求到达数量, 并对各个时隙的新近性引入衰减因子后进行累加, 拟合出当前的请求到达速率。

$$\lambda_i^j(t) = \frac{\sum_{k=0}^K (1-\varphi)^k \cdot p_i^j(t-k\Delta t)}{\sum_{k=0}^K (1-\varphi)^k} \quad (1)$$

其中, K 为观测的时隙数量, $p_i^j(t-k\Delta t)$ 为第 k 个时隙的内容请求到达次数, Δt 为时隙长度, φ 为衰减因子, 用于表征之前时隙对当前的影响程度, 一般地, 令 $\varphi = 2/(K+1)$ 。

2.2 能量消耗模型

在 CCN 中, 不考虑内容源服务器存储能耗的前提下, 能耗主要包含 3 部分, 即缓存能耗、传输能耗和处理能耗, 将三者累加即为一个传输过程的总能耗。建模中用到的符号及对应意义如表 1 所示。

表 1 符号及对应意义

符号	意义
M_i	节点 v_i 的缓存容量
r_j	内容 c_j 的 Interest 包大小
s_j	内容 c_j 的数据包大小
$\lambda_i^j(t)$	t 时刻内容 c_j 在节点 v_i 的节点内容流行度
$H_{i,j}$	从节点 v_i 到缓存有内容 c_j 的最近上游节点的路由跳数
$E_{i,j}^c$	内容 c_j 在节点 v_i 的缓存能耗
$E_{i,j}^{\text{th}}$	节点 v_i 缓存内容 c_j 时, 传输 c_j 的传输能耗与处理能耗之和
$E_{i,j}$	节点 v_i 缓存内容 c_j 时, 传输 c_j 消耗的总能量
$\bar{E}_{i,j}$	节点 v_i 不缓存内容 c_j 时, 传输 c_j 消耗的总能量
$E_{i,j}^{\text{sv}}$	节点 v_i 不缓存 c_j 时传输 c_j 的总能耗与缓存 c_j 时的总能耗之差
ΔE	不同内容的缓存节能量之差
P_c	CCN 路由器单位时间缓存 1 bit 内容消耗的能量 (J/(s.bit))
P_t	链路传输 1 bit 内容消耗的能量(J/bit)
P_h	CCN 路由器处理 1 bit 内容消耗的能量(J/bit)

针对节点 v_i , 缓存内容 c_j 经过 τ 时间长度消耗的能量, 即缓存能耗 $E_{i,j}^c = P_c s_j \tau$ 。 v_i 缓存内容 c_j 条件下, 传输 c_j 的传输能耗与处理能耗之和设为 $E_{i,j}^{\text{th}}$, 则此时传输 c_j 的总能耗为 $E_{i,j} = E_{i,j}^c + E_{i,j}^{\text{th}}$ 。

若节点 v_i 不缓存内容 c_j , 此时无缓存能耗, 总能耗即为传输能耗与处理能耗之和。将传输能耗与处理能耗之和按节点 v_i 的上游与下游分类, 其中下游的能耗与 v_i 缓存内容 c_j 条件下一致, 即为 $E_{i,j}^{\text{th}}$ 。上游的能耗即不缓存内容 c_j 条件下所需额外跳数带来的传输和处理能耗。设 t 时刻经过 τ 时间段内容 c_j 到达节点 v_i 的次数为 $N_{i,j}^{\tau}(t)$, 则不缓存条件下的总能耗为

$$\bar{E}_{i,j} = E_{i,j}^{\text{th}} + H_{i,j} (P_t + P_h) (r_j + s_j) N_{i,j}^{\tau}(t) \quad (2)$$

其中, $H_{i,j}$ 为节点 v_i 不缓存内容 c_j 时所需的额外跳数, 其计算方式在 3.2 节详细介绍。节点 v_i 不缓存 c_j 时传输 c_j 的总能耗与缓存 c_j 时的总能耗之差, 定义为缓存节能量 $E_{i,j}^{\text{sv}}$, 表达式为

$$\begin{aligned} E_{i,j}^{\text{sv}} &= \bar{E}_{i,j} - E_{i,j} \\ &= H_{i,j} (P_t + P_h) (r_j + s_j) N_{i,j}^{\tau}(t) - P_c s_j \tau \end{aligned} \quad (3)$$

3 EOICC 机制

本文提出的 EOICC 机制综合考虑缓存决策与缓存替换。缓存决策时, 将能耗节省量作为判决条件优先在用户远端节点缓存, 利用数据包携带最近上游缓存跳数信息进行隐式协作, 减轻用户近端节点缓存空间的竞争压力, 提高邻近缓存差异性; 缓存替换时, 替换掉缓存节省能量最小的已缓存内容, 达到最优的能耗优化效果。

3.1 缓存决策与替换的实现

3.1.1 缓存空间已满的情况 内容 c_j 的数据包返回路径上到达每个 CCN 节点时, 每个节点需要判断是否缓存 c_j 。针对返回路径上的节点 v_i , 当缓存空间已满时, 需同时考虑决策和替换。此时, 首先计算 c_j 的缓存节省能量 $E_{i,j}^{\text{sv}}$, 以及节点 v_i 已缓存的所有内容中最小的缓存节省能量及其对应内容, 以内容 c_k 和缓存节省能量 $E_{i,k}^{\text{sv}}$ 表示; 然后将内容 c_k 与 c_j 的缓存节省能量相减与 0 相比较, 若其值大于 0, 即以 c_j 替换掉 c_k 能够减小内容 c_j 与 c_k 传输的总能耗, 从而获得最大的能耗收益。下面列出具体表达式:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{i,k}^{\text{sv}} - E_{i,j}^{\text{sv}} = H_{i,k} (P_t + P_h) (r_k + s_k) N_{i,k}^{\tau}(t) \\ &\quad - P_c s_k \tau - H_{i,j} (P_t + P_h) \\ &\quad \cdot (r_j + s_j) N_{i,j}^{\tau}(t) + P_c s_j \tau \end{aligned} \quad (4)$$

其中， ΔE 为时间 τ 的函数。为消除其中的变量，在式(4)中除以 τ ，然后令 $\tau \rightarrow 0$ ，这样不会影响其与 0 的比较，即得

$$\begin{aligned} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\tau} &= H_{i,k}(P_t + P_h)(r_k + s_k) \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{N_{i,k}^\tau(t)}{\tau} \\ &\quad - H_{i,j}(P_t + P_h)(r_j + s_j) \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{N_{i,j}^\tau(t)}{\tau} \\ &\quad + P_c(s_j - s_k) \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{N_{i,k}^\tau(t)}{\tau}$ 表示 t 时刻内容 c_k 在节点 v_i 的到达速率，可用节点内容流行度 $\lambda_i^k(t)$ 进行拟合，

$$\begin{aligned} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{N_{i,j}^\tau(t)}{\tau} &\text{同理，即得} \\ \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\tau} &= H_{i,k}(P_t + P_h)(r_k + s_k)\lambda_i^k(t) \\ &\quad - H_{i,j}(P_t + P_h)(r_j + s_j)\lambda_i^j(t) \\ &\quad + P_c(s_j - s_k) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中的值均为网络中能够获取的常量，将其值与 0 比较作为是否进行缓存替换的准则。下面分情况进行讨论：

(1) 当 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\tau}$ 的值小于 0 时，即以缓存 c_j 替换 c_k 不能够减小 c_j 与 c_k 传输的总能耗，此时不在节点 v_i 进行缓存，直接将数据包向下游转发；

(2) 当 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\tau}$ 的值大于 0 时，即以缓存 c_j 替换 c_k 能够减小 c_j 与 c_k 传输的总能耗，此时在节点 v_i 进行缓存，然后将数据包向下游转发。

3.1.2 缓存空间未满足的情况 当缓存空间未满足时，缓存空间未成为限制缓存的因素，为充分利用缓存空间，通过比较缓存节省能量进行缓存替换不能获得最大的能耗收益。当内容 c_j 的数据包到达返回路径上的节点 v_i 时，将待决策的内容 c_j 与最小的缓存节省能量的已缓存内容 c_k 独立，分别考虑对其进行缓存能否节省该内容传输的能耗。参考 3.1.1 节的方法，分别将内容 c_j 与 c_k 的缓存节省能量除以 τ ，然后令 $\tau \rightarrow 0$ ，以内容 c_j 为例，表达式为

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,j}^{sv}}{\tau} = H_{i,j}(P_t + P_h)(r_j + s_j)\lambda_i^j(t) - P_c s_j \quad (7)$$

式(7)中的值均为网络中能够获取的常量。为获得最大的能耗收益，将 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,j}^{sv}}{\tau}$ 、 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,k}^{sv}}{\tau}$ 和 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\tau}$ 值分别与 0 进行比较，作为判断是否缓存及替换的准则。分情况讨论如下：

(1) 当 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,j}^{sv}}{\tau} > 0$ 且 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,k}^{sv}}{\tau} > 0$ 时，内容 c_j 与 c_k 的缓存均能够节省各自传输的总能耗，此时直接将

内容 c_j 进行缓存，然后将数据包向下游转发。

(2) 当 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,j}^{sv}}{\tau} > 0$ 且 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,k}^{sv}}{\tau} < 0$ 时，内容 c_k 的缓存使自身传输耗费更多能耗，此时以内容 c_j 替换 c_k 的缓存，然后将数据包向下游转发。

(3) 当 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,j}^{sv}}{\tau} < 0$ 且 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\tau} > 0$ 时，内容 c_j 的缓存使自身传输耗费更多能耗，但以缓存 c_j 替换 c_k 能够减小 c_j 与 c_k 传输的总能耗，此时以内容 c_j 替换 c_k 的缓存，然后将数据包向下游转发。

(4) 当 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E_{i,j}^{sv}}{\tau} < 0$ 且 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\tau} < 0$ 时，内容 c_j 的缓存使自身传输耗费更多能耗，且以缓存 c_j 替换 c_k 不能减小 c_j 与 c_k 传输的总能耗，此时不缓存内容 c_j ，直接将数据包向下游转发。

3.2 最近上游缓存跳数的计算

在文献[15]和文献[16]中，缓存所节省的传输和处理能耗的计算都是与从内容源服务器获取内容响应相比较，而不是与到达上游最近缓存相比较，其原因是缓存机制的设计中缓存只有自身节点可见。对于特定内容，路径上节点无法感知上游是否已缓存该内容，因此只能通过内容发布时全网通告的到内容源的最短路由跳数计算，这样不甚合理，并且导致节点的独立决策缺乏配合，易造成缓存冗余；由于距离内容源更大的跳数带来传输能耗的降低，使得用户邻近节点缓存空间竞争过于激烈，缓存内容无法得到充分利用。

基于上述不足，本文的 EOICC 机制扩展了数据包结构，在其中加入最近上游缓存跳数信息，即对于某一特定内容，该节点到其上游最近缓存的路由跳数。扩展后的兴趣包和数据包结构如图 1 所示。

最近上游缓存跳数的计算方式是对于内容 c_j ，若在某个节点实现缓存命中，则将最近上游缓存跳数置为 0，数据包回传过程中若经过一个节点不进行缓存，则将最近上游缓存跳数加 1，若缓存则重置为 0。对于返回路径上的节点 v_i ，将最近上游缓存跳数记录为 $H_{i,j}$ ，用于式(6)，式(7)中进行缓存决策。

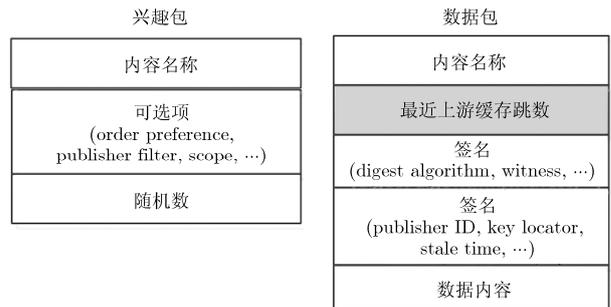


图1 扩展后的兴趣包和数据包结构

若 $H_{i,j}$ 为空, 表示上游节点均未缓存该内容, 即数兴趣包上行至内容源服务器获得内容响应, 此时令 $H_{i,j}$ 等于节点 v_i 到内容源服务器的最短路由跳数进行计算。

3.3 EOICC 机制的分析

3.3.1 复杂度分析 在数据包返回路径的每个节点进行缓存决策及替换时, 需满足线速处理的要求, 才能保证处理时延不会影响内容的传输速度^[19]。在本路由机制中, 每次缓存决策与替换的复杂度来源于从该节点中所有已缓存内容中筛选出缓存节省能量最小的内容。设节点中能够缓存的内容总数量为 N , 则筛选过程的时间复杂度为 $O(N)$; 对节点内容流行度的计算、缓存节省能量的计算和缓存节省能量的对比过程的复杂度均为常数时间复杂度, 即 $O(1)$, 因此 EOICC 机制的时间复杂度为 $O(N)$ 。对于空间复杂度, 每个数据包携带有该内容的最近上游缓存跳数信息用于缓存决策及替换, 该信息只需要在节点中短暂存储, 缓存决策结束后即可删除, 因此空间复杂度即为常数时间复杂度, 即 $O(1)$, 并且不存在其他的额外信息需要存储, 因此 EOICC 机制的空间复杂度为 $O(1)$ 。综上, EOICC 机制能够以较小的时间和空间复杂度执行, 不会产生较大的处理时延并且占用较少的存储资源。

3.3.2 定性分析 在运行此缓存机制的过程中, 假设节点 v_i 上游邻近节点缓存了 c_j , 则此时的 $H_{i,j}$ 较小, 在 v_i 缓存 c_j 降低传输和处理能耗换取的能耗收益较小, 当缓存空间已满时, 缓存节省能量的差值以较大的概率大于 0, 即不满足缓存替换条件, 缓存空间未小时同理; 随着数据包向下游转发, 最近上游缓存跳数值逐渐增大, 传输和处理能耗的收益增大, 此时会以更大的可能性满足缓存条件, 在某节点进行缓存后, 下游节点又会以较大的概率不满足缓存条件, 如此循环, 直至返回内容请求的用户。

该缓存机制的优势如下: (1) 缓存内容在返回路径的位置分布更加均匀, 增大了邻近缓存的差异性, 降低缓存冗余; (2) 在考虑内容在节点中流程序度的同时优先考虑了上游缓存, 通过上游缓存降低下游缓存的收益, 降低用户邻近节点缓存空间的竞争, 使得全网的缓存替换率更加均匀, 提高缓存可用性, 实现性能与能耗优化的平衡。

4 仿真及性能分析

利用基于 NS-3 的仿真平台 ndnSIM^[20]将本文提出的 EOICC 机制与处处缓存的 LCE 机制、依概率的 ProbCache 机制及综合优化能耗和时延的 EV 机制进行定量分析对比, 仿真结果验证了 EOICC 机

制在能耗节省率(Energy Saving Ratio, ESR)、缓存命中率(Cache Hit Ratio, CHR)及平均路由跳数(Average Routing Hops, ARH)方面的优势。

4.1 仿真环境

利用 GT-ITM 下的 Locality 模型构建路由节点个数为 50 个, 连接概率为 0.3 的网络拓扑。网络中设置两个内容源服务器进行内容的存储与发布, 其中每个内容源服务器存储 10000 个大小均为 10 kB 的不同的内容块。假设每个路由节点的缓存容量相等, 用户请求到达速率服从 $\lambda = 10$ 个/s 的泊松过程, 网络中每条链路带宽相等, 均为 10 MB/s, 不同内容的请求概率服从 Zipf 分布, Zipf 参数 α 刻画内容请求的集中程度。设单位缓存功率 P_c 为 10^{-9} J/(s·bit), 单位数据处理功耗 P_h 为 2×10^{-8} J/bit, 单位数据传输功耗 P_t 为 1.5×10^{-9} J/bit^[12]。

仿真中各缓存机制均采用随机转发的路由机制, LCE 机制与 ProbCache 机制的缓存替换默认使用 LRU, 且仿真数据均为网络处于稳态下的统计。仿真中参考的性能指标如下:

(1) 能耗节省率(ESR): 某种缓存机制下完成一定数量内容请求及数据回传所消耗的能量, 与直接从内容源获取相同内容的能耗相比, 能量减少的比例。

(2) 缓存命中率(CHR): 某种缓存机制下完成一定数量内容请求, 从 CCN 路由节点的缓存中获得内容响应的数量与内容请求总数的比值。

(3) 平均路由跳数(ARH): 某种缓存机制下完成一定数量内容请求, 每个兴趣包实现缓存命中或到达内容源获取内容需要传输的平均跳数。

下面以缓存容量大小与 Zipf 参数 α 的值作为仿真中的自变量, 用于验证缓存机制对缓存容量及用户访问偏好的适应性。

4.2 仿真结果及分析

4.2.1 缓存容量的适应性 缓存容量表征每个节点中存储的内容数量。当缓存容量较小时, 缓存容量的增大能够使更多的内容请求在邻近节点中获得响应, 随着缓存容量进一步增大, 热门内容在网络的缓存分布趋于稳定。因此, 4 种缓存机制的能耗节省率和缓存命中率均随缓存容量的增大而逐渐增大, 然后趋于平缓; 平均路由跳数随缓存容量的增大而减小, 然后趋于平缓。以下的仿真结果中设定 Zipf 参数 $\alpha = 1.2$, 将 4 种缓存机制的各项性能指标进行了对比。

图 2(a)为能耗节省率随缓存容量的变化。LCE 机制的能耗节省率最低, 这是缓存冗余及过高的缓存替换率导致其缓存利用不充分造成的; ProbCache 机制相比于 LCE 机制降低了缓存冗余, 但用

户邻近节点的缓存竞争仍然比较激烈，能耗节省率的提升有限；EV 机制能够选取缓存能耗小于传输及处理能耗的节点进行缓存，且替换掉节省能量最少的缓存，使得能耗节省率的提升较明显；EOICC 机制在考虑缓存内容节能效果比较的同时进行了节点间隐式协作，减轻下游节点的缓存压力，均衡缓存替换率，因此能耗节省率在缓存容量变化中均保持最高。

图 2(b)为缓存命中率随缓存容量的变化。LCE 机制中上行链路的缓存相似性过大，更多的兴趣包需上行到内容源服务器获得内容响应，因此缓存命中率最低；ProbCache 机制在一定程度上降低了路径上缓存的相似性，缓存命中率有所提高；EV 机制未考虑节点间协作，靠近用户节点的缓存空间竞争激烈导致缓存替换率较高，因此缓存命中率与 ProbCache 机制近似；EOICC 机制利用最近上游缓存跳数信息进行隐式协作，避免了同一内容缓存过多副本，且缓存替换率更加均衡，因此缓存命中率最高。

图 2(c)为平均路由跳数随缓存容量的变化。LCE 机制的上行链路缓存可用性差，导致其平均路由跳数最大；ProbCache 机制与 EV 机制的上行链路缓存可用性有所提高，使得平均路由跳数有所减小，且二者比较近似；EOICC 机制通过缓存协作进一步提高了缓存可用性，因此平均路由跳数最小。

4.2.2 用户访问偏好的适应性 Zipf 参数 α 的值反映了内容请求的集中程度。当 α 较小时，用户的内容请求比较分散，有限的缓存空间无法适应多样化的内容请求，未实现多次的缓存命中即被替换，从而无法发挥作用；当 α 较大时，用户请求更多地集中在热门内容，流行内容的请求能够实现更多次的缓存命中。因此，随着 α 的增大，4 种缓存机制的能耗节省率和缓存命中率均增大，平均路由跳数均减小。以下的仿真结果中设定缓存容量为 500 个内容块的条件下，将 4 种缓存机制的各项性能指标进行了对比。

图 3(a)为能耗节省率随 Zipf 参数 α 的变化。LCE 机制的能耗节省率最低，ProbCache 机制有所提高，EV 机制提高的比率更大，而 EOICC 机制在 α 选取的范围内均保持了最高的能耗节省率。以 $\alpha = 1.2$ 为例，4 种缓存机制的能耗节省率分别为 32.7%、37.9%、44.1%和 57.0%。

图 3(b)为缓存命中率随 Zipf 参数 α 的变化。LCE 机制的缓存命中率最低，ProbCache 机制与 EV 机制的缓存命中率有所提高，且两者比较近似，EOICC 机制在 α 选取的范围内缓存命中率保持最高。 $\alpha = 1.2$ 时，4 种缓存机制的缓存命中率分别为 40.8%、50.5%、54.2%和 60.8%。

图 3(c)为平均路由跳数随 Zipf 参数 α 的变化。LCE 机制的平均路由跳数最大，ProbCache 机制与

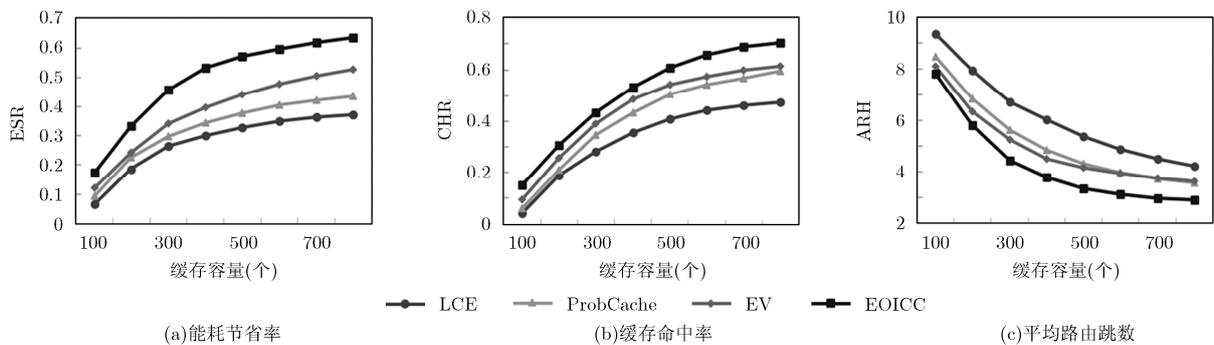


图 2 缓存机制对缓存容量的适应性

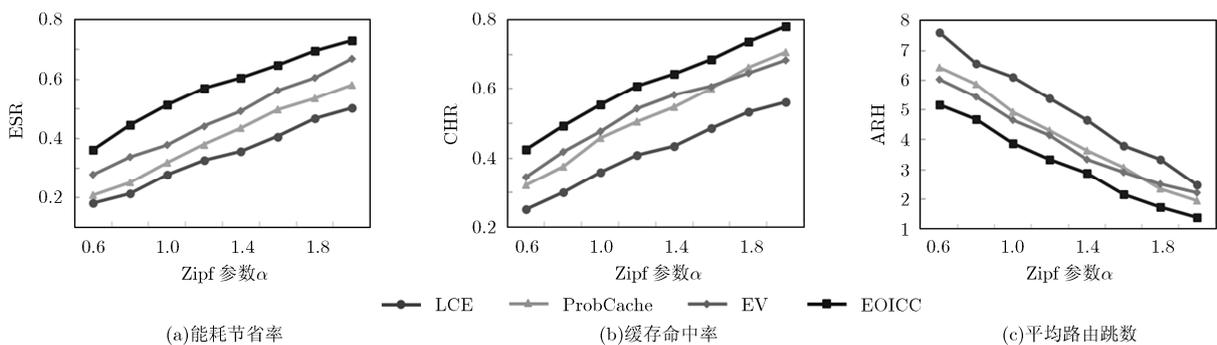


图 3 缓存机制对缓存容量的适应性

EV 机制的平均路由跳数有所减小且比较近似, 而 EOICC 机制一直保持了最小的平均路由跳数。 $\alpha = 1.2$ 时, 4 种缓存机制的平均路由跳数分别为 5.38, 4.31, 4.15 和 3.34。

5 结束语

为权衡内容中心网络能耗及缓存系统性能的优化, 本文首先将 CCN 缓存系统能耗模型进行了改进, 然后对该模型进行了分析, 提出一种面向能耗优化的隐式协作缓存机制。在缓存决策时, 优先考虑上游节点, 利用最近上游缓存跳数信息进行隐式协作, 减轻下游节点的缓存压力, 均衡缓存替换率; 在缓存替换时, 选取缓存节能量最少的缓存进行替换, 提高节约能耗的效果。未来的工作如下: (1) 研究本文提出的 EOICC 机制运行在不同的网络拓扑、内容请求模型下验证其性能优势; (2) 将 EOICC 机制与路由机制、缓存容量配置策略相配合, 从整体上进一步提高网络能耗及性能优化效果。

参考文献

- [1] 张伟哲, 张宏莉, 许笑, 等. 内容寻址网络中路径缓存定向多播路由算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(11): 1762-1766. doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2010.11.018.
ZHANG Weizhe, ZHANG Hongli, XU Xiao, et al. A directional multicast routing algorithm based on path redundancy in content addressable network[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(11): 1762-1766. doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2010.11.018.
- [2] 张伟哲, 许笑. 基于内容寻址网络的分布式信息采集通信量优化算法[J]. 通信学报, 2011, 32(9): 87-95. doi: 1000-436X(2011)9A-0087-09.
ZHANG Weizhe and XU Xiao. Inter-crawler communication optimization algorithms of distributed web crawling system based on the content addressable network[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(9): 87-95. doi: 1000-436X(2011)9A-0087-09.
- [3] PASSARELLA A. A survey on content-centric technologies for the current Internet: CDN and P2P solutions[J]. *Computer Communications*, 2012, 35(1): 1-32. doi: 10.1016/j.comom.2011.10.005.
- [4] XYLOMENOS G, VERVERIDIS C N, SIRIS V A, et al. A survey of information-centric networking research[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(2): 1024-1049. doi: 10.1109/SURV.2013.070813.00063.
- [5] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, et al. Networking named content[J]. *Communications of the ACM*, 2012, 55(1): 117-124. doi: 10.1145/1658939.1658941.
- [6] PSARAS I, CHAI W K, and PAVLOU G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks[C]. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking*, Helsinki, Finland, 2012: 55-60. doi: 10.1145/2342488.2342501.
- [7] MING Zhongxing, XU Mingwei, and WANG Dan. Age-based cooperative caching in information-centric network[C]. *Proceedings of the 31th IEEE International Conference on Computer Communications*, Orlando, FL, USA, 2012: 1-8. doi: 10.1109/INFCOMW.2014.6193504.
- [8] 王国卿, 黄韬, 刘江, 等. 一种基于逗留时间的新型内容中心网络缓存策略[J]. 计算机学报, 2015, 38(3): 472-482. doi: 10.3724/SP.J.1016.2015.00472.
WANG Guoqing, HUANG Tao, LIU Jiang, et al. A new cache policy based on sojourn time in content-centric networking[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2015, 38(3): 472-482. doi: 10.3724/SP.J.1016.2015.00472.
- [9] 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, 2016, 38(2): 325-331. doi: 10.11999/JEIT150626.
RUI Lanlan, PENG Hao, HUANG Haoqiu, et al. Popularity and centrality based selective caching scheme for information-centric networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 325-331. doi: 10.11999/JEIT150626.
- [10] 吴海博, 李俊, 智江. 基于概率的启发式 ICN 缓存内容放置方法[J]. 通信学报, 2016, 37(5): 62-72. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016093.
WU Haibo, LI Jun, and ZHI Jiang. Probability-based heuristic content placement method for ICN caching[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(5): 62-72. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016093.
- [11] FANG Chao, YU F R, HUANG Tao, et al. A survey of energy-efficient caching in information-centric networking[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(11): 122-129. doi: 10.1109/MCOM.2014.6957152.
- [12] CHOI N, GUAN K, KILPER D C, et al. In-network caching effect on optimal energy consumption in content-centric networking[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Ottawa, Canada, 2012: 2889-2894. doi: 10.1109/ICC.2012.6364320.
- [13] LLORCA J, TULINO A M, GUAN K, et al. Dynamic in-network caching for energy efficient content delivery[C]. *Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Computer Communications*, Turin, Italy, 2013: 245-249. doi: 10.1109/INFCOM.2013.6566772.
- [14] FANG Chao, YU F R, HUANG Tao, et al. A game theoretic approach for energy-efficient in-network caching in content-centric networks[J]. *China Communications*, 2014, 11(11): 135-145. doi: 10.1109/cc.2014.7004531.

- [15] WANG Guoqing, HUANG Tao, LIU Jiang, *et al.* In-network caching for energy efficiency in content-centric networking[J]. *Journal of China Universities of Posts & Telecommunications*, 2014, 21(4): 25-31. doi: 10.1016/S1005-8885(14)60312-5.
- [16] 罗熹, 安莹, 王建新, 等. 内容中心网络中能效感知的概率性缓存机制[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(8): 1843-1849. doi: 10.11999/JEIT151244.
- LUO Xi, AN Ying, WANG Jianxin, *et al.* Energy-efficiency aware probabilistic caching scheme for Content-Centric Networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(8): 1843-1849. doi: 10.11999/JEIT151244.
- [17] FANG Chao, YU F R, HUANG Tao, *et al.* A distributed energy-efficient algorithm in green Content-Centric Networks [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, London, UK, 2015: 5546-5551. doi: 10.1109/ICC.2015.7249206.
- [18] 张果, 胡宇翔, 黄万伟, 等. 基于流行内容感知和跟踪的协同缓存策略[J]. 通信学报, 2017, 38(2): 132-142. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.11.020.
- ZHANG Guo, HU Yuxiang, HUANG Wanwei, *et al.* A strategy based on dynamical content popularity for cache management[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(2): 132-142. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.11.020.
- [19] 方馨蔚, 陈庶樵, 江逸茗, 等. 一种内容中心网络中的热区控制及内容调度缓存算法[J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1182-1188. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.05.022.
- FANG Xinwei, CHEN Shuqiao, JIANG Yiming, *et al.* The hotspot control and content dispatch caching algorithm in content-centric networking[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(5): 1182-1188. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.05.022.
- [20] MASTORAKIS S, AFANASYEV A, MOISEENKO I, *et al.* NdnSIM 2.0: A new version of the NDN simulator for NS-3[R/OL]. <http://named-data.net/techreports.html>. 2015.
- 伊 鹏: 男, 1977年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为新型网络体系结构.
- 李 根: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为新型网络体系结构.
- 张 震: 男, 1985年生, 博士, 讲师, 研究方向为新型网络体系结构.