

# 一种基于协同缓存的内容中心网络能耗优化策略

许慧青 王高才 闵仁江

(广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)

**摘要** 当前大多内容中心网络(Content-Centric Network,CCN)缓存决策策略研究都没有综合考虑请求热点、网络能耗、内容流行度和节点协同等相关要素。因此提出一种基于内容流行度的协同缓存策略来优化内容中心网络的能耗。该策略将CCN的一个自治区域网络中的所有内容路由器节点当作一个协同缓存组,并把协同缓存组中每个节点的缓存容量分为两部分,一部分用于自身节点和其他节点协同缓存内容;另一部分用于自身节点独立缓存本地最流行的内容,以提高协同缓存组中内容副本种类的多样性,从而减少网络中内容的重复传输,实现网络能耗的优化。建立相关的能耗优化模型,采用一种改进的遗传算法求解出该协同缓存组能耗优化问题的最优解。实验结果表明,与相关文献中的缓存决策策略相比,所提策略可以有效地降低CCN的能耗,提高其可扩展性,进而指导CCN的演化和部署。

**关键词** 内容中心网络,能耗优化,协同缓存,遗传算法

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.08.014

## Energy-consumption Optimization Strategy Based on Cooperative Caching for Content-centric Network

XU Hui-qing WANG Gao-cai MIN Ren-jiang

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract** Now most researches about caching decisions of CCN(Content-Centric Networking) don't synthetically consider these related elements such as request hot, network energy consumption, content popularity, nodes cooperation and so on. This article proposed an energy-efficient caching strategy based on coordinated caching. This strategy regards the content routers in an autonomous domain as a cooperative cache group, and divides the cache capacity of every node in collaborative cache group into two sections, one for cooperative caching content and the rest for independently caching the local most popular contents, to improve content replicas diversity in cooperative caching group and reduce duplication of content transmission, enabling to minimize network energy consumption. We established relevant energy consumption model and used an advanced genetic algorithm (GA) to solve the optimization energy problem in this cooperative cache group. The results show that the proposed strategy to contrast current strategies can effectively reduce the energy consumption of CCN, which can improve its scalability and guide the evolution and deployment of CCN.

**Keywords** Content-centric network, Energy consumption optimization, Cooperative caching, Genetic algorithm

## 1 引言

当前 Internet 通过以主机为中心的通信模式进行内容传输,即用户访问某一项内容时,需要请求一个具体的主机。随着网络流量的爆炸性增长,网络中的用户只关注内容本身而不关注内容的具体位置。因此,这种由内容发送者驱动的端到端通信模式已无法满足内容接收者驱动获取海量信息的通信模式。Internet 设计之初是用来实现网络内主机之间的连接,从根本上不能支持以内容为中心的数据分发方式(用户只关心内容是什么,不关心从何地获取内容)。因此,我们需要采用一些合适的方案来应对当今互联网所出现的挑战。

在一定程度上,“覆盖网”(Overlay Network)如 Peer-to-Peer(P2P)、内容分发网络(CDNS)等解决了用户只关心内容本身的问题,但无论是由 ISP 或者内容服务提供商在边缘路由器构造大量缓存为用户提供内容服务的 CDNS,还是 P2P 的分布式缓存机制,从网络的角度来看都依然是以主机为中心的通信模式。Overlay Network 中的节点缺乏内容缓存能力,因此这些网络在内容分发上依然会产生很高的花费和能耗,不能实现网络资源的最优化使用。

与此同时,学术界提出了以信息为中心的信息中心网络(Information Centric Network, ICN),该网络是能适应未来 Internet 的高级网络体系结构。在 ICN 中,诸如 DONA<sup>[1]</sup>,

到稿日期:2016-07-13 返修日期:2016-11-07 本文受国家自然科学基金:移动环境下基于博弈论的能量感知协同内容分发策略研究(61562006),基于可调度性的网络演算的绿色网络能耗优化研究(61262003),广西自然科学基金杰出青年基金(2013GXNSFGA019006),广西自然科学基金(2016GXNSFBA380181)资助。

许慧青(1989-),男,硕士生,主要研究方向为 CCN 网络性能评价,E-mail:huazhekazhai@163.com;王高才(1976-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为计算机网络技术、系统性能评价和随机方法;闵仁江(1991-),男,硕士生,主要研究方向为 CCN 信息处理。

CCN<sup>[2]</sup>, NetInf<sup>[3]</sup>和 PSIRP<sup>[4]</sup>等都旨在使用命名数据的体系结构而不是数据的物理位置来重新设计 Internet。CCN 是这类设计中最有前途的架构之一,具有很高的研究价值和应用价值,它的一个重要特征是具有广泛的网络内置缓存(In-network Caching)。CCN 中所有的内容路由器都有自己的内容缓存空间,内容副本(replicas)可以存储在网络内的任意一个节点中,而不像 Overlay Network 只把内容放置在网络的边缘。CCN 中每个内容路由器可以通过缓存内容副本来缩短用户请求和响应之间的距离,从而降低网络分发延迟和网络负载。

目前 CCN 的缓存决策策略大都没有综合考虑请求热点、网络能耗、内容流行度和节点之间的协同等因素。节点在缓存内容时忽略了节点之间的协同,导致网络中出现缓存的内容冗余、内容种类的多样性较低以及节点中的内容被频繁替换的情况。我们从一个域的角度来研究 CCN 的缓存系统,在上述情形下域中用户访问节点的缓存命中率不会很高,当用户访问节点出现缓存未命中时,该节点就要从域中其他节点或者域外的某个节点处获取访问内容,从而增加了网络开销。域中节点之间的协同缓存可以很好地改善域中内容种类数不丰富的状况,把用户的请求限制在域中,从而减小用户获取内容的距离跳数,进而降低网络能耗。因此,合适的协同缓存决策策略将有效地实现 CCN 的节能。

本文第 2 节总结了当前 CCN 的研究现状和本文所研究的内容;第 3 节简单介绍了 CCN 的架构,给出了 CCN 的网络模型和 CCN 的内容流行度模型;第 4 节根据 CCN 的特点,提出一种基于协同缓存的能耗优化策略来减小网络能耗,并建立 CCN 的能耗模型和能耗优化模型;第 5 节采用一种改进的遗传算法求解出 CCN 的能耗优化问题,并通过实验分析能耗模型中的不同参数对最优协同缓存深度的影响;最后进行总结与展望。

## 2 CCN 的相关研究工作

近些年,学术界把目光投向了 CCN 的研究,其中大多数研究者关注诸如信息命名、内容路由、网内缓存、网络安全性等基本问题。CCN 中的节点不仅具有内容路由的功能,还具有缓存内容的能力,因此其网络内缓存是研究的重点内容之一。文献[5]回顾并总结了近年来国际上在内容中心网络的网内缓存领域的缓存内容块的大小规划、缓存内容与应用无关的缓存空间共享机制、节点缓存内容的决策策略、网络内缓存内容的可用性以及网络内缓存的理论模型等,分析了网络内缓存的新特征以及所面临的新挑战。文献[6]指出在使用 LRU 算法的 CCN 中,如果多跳缓存节点的首个缓存节点发生用户内容请求缺失,则此请求在当前节点的下游节点也很难被缓存命中,即出现缓存退化的现象;并根据这种缓存退化的情况设计出一种基于预过滤的缓存替换算法。方馨蔚等人<sup>[7]</sup>提出了一种依据节点相似度的协作缓存算法。这种算法按照节点与兴趣包之间的相似度把兴趣包转发到相似度最接近的那个节点,从而实现快速获取内容。

绿色内容中心网络同样引起了学术界的注意,相关研究大多集中于网内缓存的内容放置策略和替换算法,从而实现

内容中心网络能耗的最优化。目前实现绿色内容中心网络的研究可以分为集中式的网内缓存解决方案<sup>[8-12]</sup>和分布式的网内缓存解决方案<sup>[13]</sup>。文献[9]从花费和能耗的角度出发,对在边界和核心网络中部署 CCN 的可行性进行了研究。文献[10]指出了在不同的缓存硬件技术和链路传输条件下节点缓存内容要比内容经过链路传输更节能的情形,以指导 ICN 的演化和部署。文献[11]在对比其他内容分发网络架构的基础上,对 CCN 的能耗收益做了初步评估。文献[12]在文献[11]的基础上对 CCN 进行了更为深刻的能耗研究,强调了不同的存储技术对 CCN 能耗的影响。

以上几种网内缓存解决方案都是通过集中式的存储方式来优化全网络能耗,但这种集中式的网内缓存解决方案在异构网络环境中是很难实现的。文献[13]提出内容路由器只需要根据本地缓存和节点间的传输能耗信息来做出缓存决策的分布式网内缓存解决方案,并用非合作博弈理论表述了此分布式网内缓存解决方案所出现的能耗优化问题,证明了在所提出的分布式网内缓存解决方案中存在网络能耗与节点内容放置和替换的纳什均衡。然而非合作博弈理论认为每个参与者都是理性的,每个节点只关注本地的网络信息,这就有可能出现网络内的节点之间缺少协同,很多节点会缓存相同的内容,导致网络内出现内容副本冗余的现象。

本文针对非协同缓存的网内缓存决策策略、集中式的网内缓存决策策略以及当前分布式网内缓存解决方案在内容中心网络能耗方面的不足,提出一种基于协同缓存的能耗优化策略,并研究协同缓存方式对 CCN 能耗的影响。CCN 中的节点使用协同缓存机制构成一个协同缓存组,把内容缓存在更靠近用户的“云”中,用户直接访问“云”来获取想要的内容。这种机制通过减少网络内所有用户访问内容的路径数来优化整个网络的能耗。根据“云”和用户请求的特点,文中构建出 CCN 的网络、能耗模型和协同缓存组所存在的能耗优化问题。针对所提出的能耗优化问题,采用一种改进的遗传算法进行求解,并分析出在不同内容流行度和节点容量等情形下协同缓存深度对网络能耗的影响,以此来更好地推动内容中心网络的发展。

## 3 CCN 架构及网络模型

CCN 是一类 Clean-State 设计的未来互联网体系结构,这种体系结构的外形与当今的 TCP/IP 网络体系结构很相似,都是沙漏模型。它们之间最大的不同就是 CCN 的“瘦腰”是通过内容块(Content Chunk)替代 TCP/IP 中的 IP。CCN 用内容块命名取代了物理实体的命名。在 CCN 中,节点都有缓存内容的能力,可以用来缓存经过网络的数据,从而缩短其他用户访问同样数据的响应时间,也可大大减少网络中的流量负载。

本文考虑一个自治区域网络,网络中所有的内容路由器构成一个“云”,如图 1 所示。“云”可以为所有连接到此网络的终端用户请求提供内容响应。由于“云”中的内容路由器数量和总容量有限,会导致一些用户的请求无法得到满足。图 1 中的 S 表示源服务器,存储所有的内容对象。当“云”中内容无法满足用户请求时,S 可以为用户提供相应的内容。在

这里,  $S$  不是一个简单的内容服务器, 而是一系列源内容服务器的抽象。

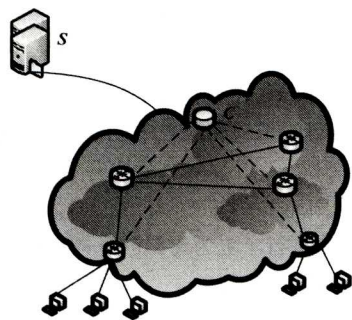


图1 内容中心网络的“云”网络模型

假设图1中的自治区域网络中有  $n$  个 CCN 路由器节点, 即有  $n$  个内容路由器节点, 分别记为  $r_1, \dots, r_n$ 。用无向联通图  $G=(V, E)$  来表示该网络, 其中  $V=(V_1, V_2, \dots, V_n)$  表示网络节点的集合,  $e \in (u, v)$  表示网络中节点之间连边的集合。在网络的稳定状态下, 假设互联网中一共有  $M$  种内容,  $M$  远远大于节点的存储容量  $c$ , 用集合  $M$  表示互联网中的内容。自治区域网络选择  $m$  种内容进行内容副本 (replicas) 缓存。自治区域网络中的内容集合为  $O=(o_1, o_2, \dots, o_m)$ 。参考内容流行度模型, 设稳定状态下的自治区域网络的内容流行度分布服从 Zipf 分布。在  $M$  种不同内容中, 排名为  $k$  的文件被请求的可能性为  $f$ , 可表示如下:

$$f(k; M, \alpha) = \frac{1/k^\alpha}{\sum_{i=1}^M (1/i^\alpha)}, k=1, \dots, M \quad (1)$$

其中,  $\alpha \in (0, 1)$  是一个常数, 称为 Zipf 的特征指数, 表示网络中用户访问内容的集中程度。

为了便于解释和研究, 假设自治区域网络中所有内容路由器节点的缓存容量相同并且内容块的大小都是一致的, 大小分别为  $c$  和  $s$ 。最近一些研究如文献[2, 14]等表明, 以上这两种假设在内容中心网络中也是合理的。由式(1)可知, 访问排名前  $k$  的内容被请求的概率可表示如下:

$$F(k; M, \alpha) = \frac{\sum_{i=1}^k (1/i^\alpha)}{\sum_{i=1}^M (1/i^\alpha)}, k=1, \dots, M \quad (2)$$

## 4 协同缓存的能耗优化策略及能耗模型分析

### 4.1 CCN 网络能耗优化策略

广泛的网络内缓存是内容中心网络的重要特点, 网络中的节点通过把内容副本缓存在距离用户更近的地方来减小用户请求的响应时间和网络中的传输负载。与传统 Internet 相比, 内容中心网络需要缓存更多的内容, 所以会产生更多缓存内容的能耗; 互联网中的内容数量要远远大于内容中心网络中所有节点的缓存容量, 这会导致用户在访问本地节点时出现内容缺失的情况, 此时受访问的本地节点需要从其他节点或者内容源获取内容, 从而必然产生内容的传输能耗。本文所选取的自治区域网络中的路由器都有缓存内容的能力, 域中路由器以非协同缓存和协同缓存的方式来缓存内容副本。自治区域网络中的节点使用非协同缓存方式, 即域中的路由器根据本地用户的请求和节点的本地信息独立地缓存内容副

本。使用这种方式的域内路由器不会考虑其他内容路由器对自己的影响, 所以不会出现路由器之间由于协同所产生的花费。与此相对应, 使用协同缓存方式的域内路由器不仅要知道本地用户请求和本地节点的信息, 还会考虑域内路由器之间的协同。对于使用协同缓存方式的自治区域网络, 域中所有的内容路由器构成一个协同缓存组, 组内的每个路由器的缓存分成两个部分, 一部分用于独立地放置本地最流行的内容, 另外一部分用于与缓存组其他的节点协同放置内容。引入参数  $x \in [0, c]$  来表示每个节点用于与其他节点协同缓存内容的数量, 也称为协同缓存深度, 剩余的  $c-x$  用于本节点以非协同缓存方式独立地缓存本节点最流行的内容。自治区域网络通过这种协同缓存方式可以减少域内节点缓存副本的冗余现象, 提高域内缓存副本的多样性。

本文描述了一个域内协同缓存组的网络模型, 在该自治区域网络内, 域中的所有节点都可以接受用户请求并进行内容响应, 同时以协同缓存的方式构成协同缓存组。组内节点缓存内容副本, 给用户提供服务。内容路由器节点接收到用户请求时, 首先会查看自身节点的缓存内容是否能满足用户请求, 如果自身节点有所要请求的内容, 则响应用户请求; 如果自身节点没有对应的请求内容, 则查找协同缓存组中其他任意节点所缓存的内容, 若缓存组中某一节点有请求内容的副本, 则此节点为用户返回请求内容; 当协同缓存组中的所有节点都没有对应的内容副本时, 由源内容服务器  $S$  返回相应的请求内容。

我们根据自治区域网络的特点, 提出一种基于内容流行度的协同缓存方式来实现网络能耗最优化的策略。该策略中网络节点的缓存分为两个阶段:

(1) 域中所有节点根据本地用户的请求统计出本地内容流行度排名前  $k$  的内容, 本文假设所有节点在缓存本地最流行内容时是一致的, 则所有节点放置的本地最流行内容是本地排名为前  $c-x$  的内容。

(2) 对于协同缓存组中的  $n$  个节点, 每个节点使用  $x$  的容量以协同缓存方式缓存内容, 此时网络中有  $nx$  种协同缓存内容。经过以上两个阶段之后, 自治区域网络中一共有  $c+(n-1)x$  种内容, 则还有  $M-c-(n-1)x$  种内容需要从内容源  $S$  获取。在这个策略中, 用户从内容源  $S$  获取内容产生的能耗远比用户从本地或者协同缓存组获取内容所产生的能耗大。因此, 协同缓存深度  $x$  是影响自治区域网络能耗的关键因素, 若要实现自治区域网络能耗的最优化则需找出自治区域网络中的最优缓存深度。

### 4.2 CCN 能耗模型

根据 CCN 的网络模型, 可以得出整个 CCN 的能耗  $E_m^{ccn}$  主要由 4 个部分组成: 用户访问源服务器  $S$  产生的传输能耗  $E_s^{ccn}$ 、协同缓存组中传输内容产生的传输能耗  $E_r^{ccn}$ 、内容路由器缓存内容产生的缓存能耗  $E_m^{ccn}$  和节点之间用于协同缓存产生的协同能耗  $E_c$ 。

#### (1) CCN 的缓存能耗 $E_m^{ccn}$

借鉴文献[15]中的能量比例模型, 在给定的观察时间  $t$  内, 如果自治区域网络中内容  $O_k$  的副本数量为  $n_k$ , 内容  $O_k$  的大小为  $s_k$  bit, 则对应的缓存能耗为:

$$E_m^{ccn}(n_k) = \omega_{c,a} n_k s_k t \quad (3)$$

其中,  $w_{ca}$  是缓存能效, 该值的大小依赖于节点所使用的缓存硬件。

### (2) CCN 的传输能耗 $E_{cn}^{tr}$

本文假设 CCN 中的任意节点或用户只从单个节点来获取任意一项内容, 为了便于讨论, 在表 1 中给出了 CCN 能耗模型中的一些关键参数。根据 CCN 的网络模型, 网络中的传输能耗  $E_{cn}^{tr}$  可以分成 3 个部分, 协同缓存组中的对等内容路由器之间进行内容传输所产生的能耗。协同缓存组中一个节点从其他对等路由器获取某项内容需要耗费一跳或多于一跳的距离。这里引入协同缓存组中对等路由器之间的平均访问跳数  $H_r$  [8], 可以表示为:

$$H_r = A(n/n_k)^\mu, \mu > 0 \quad (4)$$

其中,  $n_k$  代表内容  $k$  在协同缓存组存放的数量。

协同缓存组中一个节点从另外一个节点获取内容  $k$  所产生的传输能耗可估计为:

$$E_{ik}^r(n) = \lambda_{ik} s [(1 + H_r)(p_d^r + p_d^{roadm}) + H_r p_d^{wdm}] \quad (5)$$

用户请求本地节点所产生的传输能耗可以表示为:

$$E_{ik}^u = \lambda_{ik} s [3p_d^r + p_g^r + 2p_d^r] \quad (6)$$

自治区域网络中用户从内容源获取内容所产生的传输能耗可表示为:

$$E_{isk}^s = \lambda_{ik} s p_d^s d_s \quad (7)$$

表 1 能耗模型中用到的符号及其含义和值

符号	含义	值
$n$	自治区域网络中的节点数	多值
$M$	网络中所有内容的种类数	多值
$t$	观察时间	3600s
$w_{ca}$	缓存能效	$2.50 * 10^{-9}$ watt/bit
$p_d^r$	协同缓存组单个路由器的能耗密度	$1.7 * 10^{-8}$ J/bit
$p_d^{roadm}$	单个 RODAM 的能耗密度	$1.95 * 10^{-11}$ J/bit
$p_d^{wdm}$	单个 WDM 的能耗密度	$5 * 10^{-9}$ J/bit
$p_d^e$	单个交换机的能耗密度	$8.21 * 10^{-9}$ J/bit
$p_g^r$	单个网关的能耗密度	$1.38 * 10^{-7}$ J/bit
$p_d^s$	本地路由器的能耗密度	$2.63 * 10^{-8}$ J/bit
$p_d^s$	从内容源获取单个内容的能耗密度	多值
$d_s$	自治区域边界节点到内容源的跳数	多值
$\lambda_{ik}$	节点 $i$ 上内容 $k$ 的请求速率	多值

### (3) CCN 的协同能耗 $E_c$

自治区域网络中的节点采用协同缓存的方式来缓存内容, 这会产生计算能耗、通信能耗以及其他能耗。协同缓存组中的每个节点协同缓存完内容之后, 要告知其他节点本节点所缓存的协同内容, 让协同缓存组中的其他节点也能够访问到协同缓存内容。这些通信能耗对于整个自治区域网络的能耗来说是不能忽略的。通信能耗占据了整个协同能耗的绝大部分, 这里认为协同通信所产生的能耗等于自治区域网络的协同能耗。通信能耗与每个节点的缓存深度有关, 是一个关于  $x$  的函数。整个网络所产生的协同能耗可表示为:

$$E_c = w * n * x \quad (8)$$

其中,  $w$  表示单个节点针对一项内容期望的通信能耗。另外, 假设所有节点用于协同通信的能耗都是一致的。

### 4.3 CCN 能耗优化模型的建立

根据 CCN 的网络模型和能耗模型, 构造出自治区域网络的能耗优化模型。假设整个互联网中存在  $M$  种内容, 并且内

容数量远大于整个自治区域网络的所有节点的缓存容量, 所以在自治区域网络的稳定状态下, 假设每个节点都缓存了大小为  $c$  的内容, 即每个节点用全部的容量来缓存内容。则协同缓存组中缓存内容的能耗为:

$$E_{cn}^{cm} = w_{cn} n c s t \quad (9)$$

协同缓存组的所有节点以协同缓存的方式缓存了排名从  $c-x+1$  到  $c-x+nx$  的  $nx$  种内容, 则每个节点剩余的  $c-x$  用于本节点以非协同缓存方式独立缓存本地最流行的内容。由式(2)可以得到自治区域网络的平均内容请求能耗:

$$E(x) = [F(c-x+nx; M, \alpha) - F(c-x; M, \alpha)] * \sum_{k=c-x}^{c+(n-1)x} \sum_{i=1}^n E_{ik}^u(1) + [1 - F(c-x+nx; M, \alpha)] * \sum_{k=c+nx}^M \sum_{i=1}^n E_{isk}^r + \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^n E_{ik}^s + E_{cn}^{cm} \quad (10)$$

为了简化推导, 根据式(2)的特点, 可以将其近似于:

$$F(k; M, \alpha) \approx \frac{\int_1^x t^{-\alpha} dt}{\int_1^M t^{-\alpha} dt} = \frac{x^{1-\alpha} - 1}{M^{1-\alpha} - 1}, \alpha \in (1, 0) \quad (11)$$

在实际中, 自治区域网络的缓存、传输能耗与自治区域网络中的协同能耗有可能是不一致的。这里引入权重参数  $\beta \in [0, 1]$ , 将协同缓存组的所有能耗表示为:

$$E_a(x; \beta, w) = \beta E(x) + (1 - \beta) E_c \quad (12)$$

协同缓存组能耗最小化的最优化问题可以表述为:

$$\min E_a(x; \beta, w) \quad (13)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq x \leq c, c \in N$$

## 5 模型求解及实验结果分析

本文使用一种基于物种选择、采用自适应惩罚策略和基于构造优化方向的交叉算子来处理约束问题的遗传算法, 求解出协同缓存组能耗最小化的最优化问题, 即求解出每个节点实现网络能耗最优化的最优协同缓存深度  $x$ ; 并根据本文所使用的整体能耗模型对比了自治区域网络在使用和未使用协同缓存策略时所产生的能耗, 分析了在不同的内容流行度和不同的节点缓存容量的情况下协同缓存深度对整个网络能耗的影响。

### 5.1 能耗最优化问题的遗传算法求解

使用一种改进的遗传算法 [16] 来求解式(13)。首先把适应度函数设计为:

$$F(x) = E_a(x; \beta, w) + \rho(x - c) \quad (14)$$

其中,  $\rho$  为惩罚因子。根据式(13)可知此种群的个体数为  $c$ , 设种群可行点个数为  $p_1$ , 则种群不可行点个数为  $c - p_1$ , 将可行域标记为  $\tau$ , 标准差函数为  $std$ , 则惩罚因子  $\rho$  为:

$$\rho =$$

$$\begin{cases} \frac{\frac{1}{p_1} \sum_{x \in \tau} E_a(x; \beta, w) - \frac{1}{c - p_1} \sum_{x \notin \tau} E_a(x; \beta, w)}{\frac{1}{c - p_1} \sum_{x \notin \tau} x - c}, & p_1 > c * 0.1 \\ \frac{std(f(x))}{std(x - c)}, & x \notin \tau, p_1 \leq c * 0.1 \end{cases} \quad (15)$$

首先找出种群最优种子 $\bar{x}$ ,使得:

$$\bar{x} = \min F(x_i) \quad (16)$$

根据种子到 $\bar{x}$ 的距离将剩余种群分为种群1和种群2。用界限值 $L_k$ 界定种群,到 $\bar{x}$ 的距离小于或者等于 $L_k$ 的种子进入种群1,距离大于 $L_k$ 的种子进入种群2。可以用两个适应度函数来表示种子选择,按适应度函数 $F_1$ 选择种子进入种群 $pop1$ 和 $pop2$ ,并按适应度函数 $F_2$ 将种群种子排序。记 $norm$ 为欧氏距离函数, $\epsilon$ 为计算精度, $popsize, popsize1, popsize2$ 分别为总种群大小、种群1大小和种群2大小, $k$ 为进化代数。

$$F_1: \begin{cases} pop1 = \{x | norm(x, \bar{x}) \leq L_k\}, & L_k > \epsilon \\ pop2 = \{x | norm(x, \bar{x}) > L_k\}, & L_k > \epsilon \\ pop1 = \{x | norm(x, \bar{x}) > L_k\}, & L_k \leq \epsilon \\ pop2 = 0, & L_k \leq \epsilon \end{cases} \quad (17)$$

$$L_k = \min(\max(norm(x, \bar{x})) * 0.5, \frac{\rightarrow}{norm(x, \bar{x})} * (popsize * 0.45)) \quad (18)$$

其中, $\frac{\rightarrow}{norm(x, \bar{x})}$ 为 $norm(x, \bar{x})$ 数组的升序序列。两个种群按适应度函数 $F(x)$ 进行排序后分别按照轮盘赌方法进入交配池。轮盘赌选择的概率公式为:

$$Q(i) = \frac{q(1-q)^{i-1}}{1-(1-q)^n} \quad (19)$$

其中,种群1和种群2的交配池的大小 $n_1$ 和 $n_2$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} n_1 = popsize * 0.5, n_2 = popsize * 0.5, & L_k > \epsilon \\ n_1 = popsize * 0.5, n_2 = 0, & L_k \leq \epsilon \end{cases} \quad (20)$$

式(13)的求解步骤表示如下。

- step1 确定种群规模 $c$ ,初始化种群。
- step2 根据式(15)求出惩罚因子;求出最优可行点为当前最优种子,并计算出其他种子到当前最优种子的欧氏距离。
- step3 按照式(17)计算欧氏距离,并划分种群。
- step4 分别对种群1和种群2按照式(15)计算惩罚因子,形成新的适应度。
- step5 使用式(20)计算交配池规模,并用轮盘赌方法产生种子并进入1到2个交配池;把种群2的重复种子置于交配池的后部,并统计重复种子的个数。
- step6 选取其中一个种群进行交叉和变异运算。
- step7 检验进化结束,否则将两个种群混合,返回step2。

### 5.2 实验数据和结果分析

使用 Matlab 模拟自治区域网络处于稳定状态时网络中每个节点请求到达率为 3 次/s 的泊松分布的情形;并在观察在时间  $t=3600s$  的情况下评价路由器节点容量  $c$ 、表示用户访问内容集中度的参数  $\alpha$ 、协同权重参数  $\beta$  对自治区域网络的最优化协同缓存深度的影响。图 2—图 4 表示采用协同缓存策略的自治区域网络根据不同参数所产生的能耗变化,其中  $x$  轴表示每个节点用于协同缓存的容量占本节点容量的比例,  $y$  轴表示在观察的时间段内自治区域网络所消耗的能量(单位:J)。

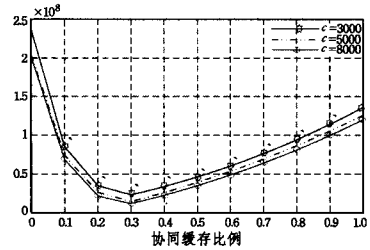


图 2 协同缓存组中节点的不同容量所产生能耗的比较

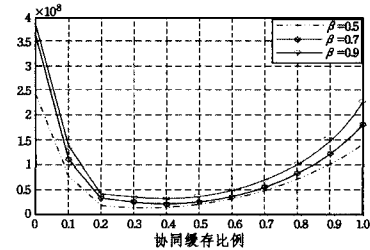


图 3 不同的协同权重参数所对应的能耗比较

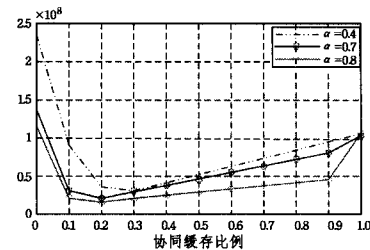


图 4 不同内容流行度指数对能耗的影响

图 5 示出了自治区域网络采用网络内普遍缓存的决策策略即 Cache Everything Everywhere(CE<sup>2</sup>)时,在不同 Zipf 指数和域中节点的缓存容量条件下自治区域网络所产生的能耗。图中  $x$  轴表示不同的 Zipf 指数和域中节点的缓存容量,  $y$  轴表示在观察的时间内自治区域网络所产生的能耗(单位:J)。根据图 5 可知,采用 CE<sup>2</sup> 策略的自治区域网络在不同的节点缓存容量条件下所产生的最小能耗是在节点缓存容量  $c=8000$  时取得,约为  $1.17 \times 10^8 J$ ;与图 2 相比较,可以发现采用协同缓存策略的自治区域网络在不同的节点缓存容量条件下所产生的最小能耗也是在节点缓存容量  $c=8000$  时取得,约为  $0.23 \times 10^8 J$ 。图 4 和图 5 分别表示不同的 Zipf 指数对采用 CE<sup>2</sup> 策略和采用协同缓存策略的自治区域网络能耗的影响。可以知道,当  $\alpha=0.8$  时,采用 CE<sup>2</sup> 策略和协同缓存策略的自治区域网络所产生的能耗是最少的,分别约为  $4.02 \times 10^7 J$  和  $1.13 \times 10^7 J$ 。通过图 2、图 4 与图 5 的比较可以发现,采用协同缓存策略的自治区域网络的最小能耗要远远少于采用 CE<sup>2</sup> 策略的自治区域网络的最小能耗。显然,所提出的基于协同缓存的内容中心网络的能耗优化策略在网络节能方面要好于 CE<sup>2</sup> 策略。这是由于采用 CE<sup>2</sup> 策略的自治区域网络中的节点之间没有协同缓存内容,域中内容种类的多样性较低,导致用户请求的缓存命中率下降;而且,网络会出现更多的用户请求节点缓存命中缺失,从而增加自治区域网络用户或者节点从内容源获取内容的次数,故用户或者节点从内容源获取内容所产生的能耗远高于用户或者节点从协同缓存组中获取内容所产生的能耗。

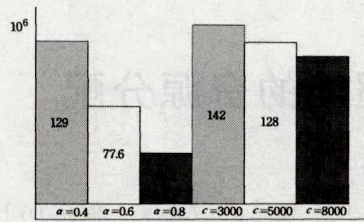


图 5 采用  $CE^2$  策略的自治区域网络不同参数所对应的能耗

从图 2 看出,随着节点缓存容量的增加,协同缓存组的能耗会减小。我们研究自治区域网络处于稳定状态下情形,如果节点的容量较小,路由器节点缓存本地最流行内容过少,协同缓存组中的协同缓存内容同样过少,协同缓存组中的内容种类的多样性下降,从而增加了本地节点和协同缓存组其他节点的缓存缺失次数,导致自治区域网络能耗过高。节点的缓存容量大小不同并没有导致最优协同缓存深度的变化,在这 3 种情形下都是在协同缓存深度达到 0.3 时自治区域网络能耗最小,此时网络中的内容种类多样性最为合理,节点的本地内容和协同组所缓存的内容可以满足大部分用户请求,减少了用户访问内容源的次数,实现了自治区域网络能耗的最优化。

我们研究了协同权重参数对协同缓存组能耗的影响。观察图 3 可以发现,协同缓存组的能耗随着权重参数的增大而增加,但是三者的变化趋势却没有明显的改变。通过比较自治区域网络中的传输能耗、内容缓存能耗以及用于网络中节点之间协同所产生的能耗可以发现,网络中的主要能耗由传输能耗和缓存内容能耗组成,由协同所产生的能耗只占总能耗很小的一部分,所以无论协同权重参数如何变化,三者的变化趋势在整体上是近似一致的。受此启发,我们研究协同缓存组能耗时也可以更多地关注网络中产生的传输能耗和缓存能耗,通过使用更好的缓存放置方法、替换算法和缓存硬件技术来减小这两方面的能耗,从而减小整个网络的能耗。

图 4 关注了不同的 Zipf 指数对协同缓存组能耗的影响。Zipf 指数有一个很重要的特点,即表示用户访问内容的集中程度。我们可以观察到,Zipf 指数越小,协同缓存组产生的能耗越大,这是由于 Zipf 指数越小表示用户请求的内容越不集中,在相同的观察时间内会导致用户请求内容的多样性比较分散,使得网络能耗变大;同时,不同的 Zipf 指数也会导致最优缓存深度发生改变,当  $\alpha$  等于 0.7 和 0.8 时最优的协同缓存比例约为 0.2,这说明了用户请求内容越集中,协同缓存组所需要的内容的多样性越低,协同缓存组中节点用于协同缓存的比例也越低。

综合上述情况,自治区域网络使用协同缓存的方式可以有效降低自治区域的网络能耗,并且存在最优的协同缓存深度使得网络能耗达到最优,这对部署 CCN 有很好的指导意义。

**结束语** 本文针对当前 CCN 缓存决策策略的研究都没有综合考虑请求热点、网络能耗、内容流行度和节点协同等要素的情况,提出一种基于内容流行度的协同缓存能耗优化策略。此时,CCN 中的节点同时考虑了本地的最流行内容和

网络中节点之间的协同,提高了协同缓存组中内容副本种类的多样性,减少了网络内容的重复传输,最优化了 CCN 能耗。根据协同缓存组的特点,建立相关的能耗优化模型,并采用一种改进的遗传算法来求解该协同缓存组能耗优化问题的最优解。实验结果表明,与现有的缓存决策策略相比,本文提出的策略可以有效地降低 CCN 的能耗并提高其可扩展性。

在未来的工作中,将设计一个更符合实际情况的能耗模型,找出影响 CCN 能耗的关键因素并对其优化,从而推动 CCN 的发展。最终目的即是针对绿色 CCN 提出一个更符合实际的网络情形并实现网络能耗最优的缓存放置和替换策略。

## 参考文献

- [1] KOPONEN T, CHAWLA M, CHUN B G, et al. A data-oriented (and beyond) network architecture[J]. *Acm Sigcomm Computer Communication Review*, 2007, 37(4): 181-192.
- [2] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, et al. Networking named content [C] // *ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technology (CONEXT 2009)*. Rome, Italy, December, 2009: 117-124.
- [3] DANNEWITZ C, KUTSCHER D, OHOLMAN B, et al. Network of Information (NetInf)-An information-centric networking architecture [J]. *Computer Communications*, 2013, 36(7): 721-735.
- [4] LAGUTIN D, VISALA K, TARKOMA S. Publish/subscribe for Internet: PSIRP perspective [C] // *Towards the Future Internet-Emerging Trends from European Research*. 2010: 75-84.
- [5] 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.
- [6] WANG Y G, LI Z Y, WU Q H, et al. Performance Analysis and Optimization for In-Network Caching Replacement in Information Centric Networking [J]. *Journal of Computer and Research and Development*, 2015(9): 2046-2055. (in Chinese)  
王永功, 李振宇, 武庆华, 等. 信息中心网络内缓存替换算法性能分析与优化 [J]. *计算机研究与发展*, 2015(9): 2046-2055.
- [7] FANG X W, CHEN S Q, REN Z R, et al. Collaborative Caching Algorithm Based on Node Similarity in Content Centric Networking [J]. *Computer Science*, 2016, 43(4): 81-85, 96. (in Chinese)  
方馨蔚, 陈庶樵, 任泽荣, 等. 内容中心网络中基于节点相似度的协作缓存算法 [J]. *计算机科学*, 2016, 43(4): 81-85, 96.
- [8] LEE U, RIMACI, KILPER D, et al. Toward energy-efficient content dissemination [J]. *Network IEEE*, 2011, 25(2): 14-19.
- [9] PERINO D, VARVELLO M. A reality check for content centric networking [C] // *ACM Sigcomm Workshop on Information-centric Networking*. ACM, 2011: 44-49.

型的应用场景还有待继续挖掘,如应用于个人服务等;此外,该信任模型中间接信任关系的非传递性和非对称性也有待进一步优化。

### 参考文献

- [1] STEPHEN M. Formalising trust as a computational concept [D]. Scotland: University of Stirling, 1994.
- [2] ABDUL-RAHMAN A, HAILES S. Supporting trust in virtual communities[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, 2002, 6007.
- [3] GAN Z B, DING Q, LI K, et al. Reputation-based Multi-Dimensional Trust Algorithm[J]. Journal of Software, 2011, 22(10), 2401-2411. (in Chinese)  
甘早斌, 丁倩, 李开, 等. 基于声誉的多维度信任计算算法[J]. 软件学报, 2011, 22(10): 2401-2411.
- [4] DONG H T, JENNINGS N R, SHADBOLT N. Developing an integrated trust and reputation model for open multiagent systems[C]// Proceedings of the 7th International Workshop on Trust in Agent Societies. 2004: 65-74.
- [5] ZHOU R F, KAI H. Gossip-based reputation aggregation for unstructured peer-to-peer networks[C]// International Parallel and Distributed Processing Symposium. 2007: 1-10.
- [6] TANG W, HU J B, CHEN Z. Research on a Fuzzy Logic-based Subjective Trust Management Model[J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(10): 1654-1659. (in Chinese)  
唐文, 胡建斌, 陈钟. 基于模糊逻辑的主观信任管理模型研究[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(10): 1654-1659.
- [7] LI D Q, WU X C, GUO R M. Electronic Commerce Transaction Trust Model Based on Two Layers Nodes and Objective Risk [J]. Computer Science, 2016, 43(5): 117-121. (in Chinese)  
李道全, 吴兴成, 郭瑞敏. 一种基于二层节点和客观风险的电子商务交易信任模型[J]. 计算机科学, 2016, 43(5): 117-121.
- [8] TEACY W T L, LUCK M, ROGERS A, et al. An efficient and versatile approach to trust and reputation using hierarchical bayesian modeling[J]. Artificial Intelligence, 2012, 193: 149-185.
- [9] ZHANG S W, LIN H F, LIU X X, et al. Trust Propagation Based on Probability[J]. Computer Science, 2014, 41(8): 90-93. (in Chinese)  
张绍武, 林鸿飞, 刘晓霞, 等. 基于概率的信任传播模型[J]. 计算机科学, 2014, 41(8): 90-93.
- [10] KAWSER W N, TONNY S K, AMJAD H, et al. A fuzzy and probabilistic logic based representational model of certain trust model[C]// International Conference on Informatics, Electronics & Vision. 2012: 1000-1005.
- [11] CERUTTI F, KAPLAN L M, NORMAN T J, et al. Subjective logic operators in trust assessment: an empirical study[J]. Information Systems Frontiers, 2015, 17(4): 743-762.
- [12] SU Z Y, LI M C, FAN X X, et al. LT Trust: a trust management model based on hybrid strategy[J]. Journal of Chinese Computer System, 2014, 35(7): 1464-1469.
- [13] XU J, ZHONG Y S, WAN S P. Incentive Adaptive Trust Model Based on Integrated Intuitionistic Fuzzy Information[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016, 38(4): 803-810. (in Chinese)  
徐军, 钟元生, 万树平. 一种集成直觉模糊信息的激励自适应信任模型[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 803-810.
- [14] XIE Y H, HE Y J, XIANG Y. A Secure Grid Trust Model Based on Trust and Reputation[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2016, 21(3): 69-73. (in Chinese)  
解云虹, 何永健, 向阳. 一种基于信任和信誉的安全网格信任模型[J]. 西安邮电大学学报, 2016, 21(3): 69-73.
- [15] XIA L, LI W, LU Y, et al. A Trust Model for the Inter-Domain Routing System[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(4): 845-860. (in Chinese)  
夏怒, 李伟, 陆悠, 等. 一种面向域间路由系统的信任模型[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(4): 845-860.
- [16] HOOGENDOORN M, JAFFRY S W, VAN MAANEN P P, et al. Design and validation of a relative trust model[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 57: 81-94.
- [17] WILENSKY U. Netlogo[OL]. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.
- [18] XIONG L, LIU L. PeerTrust: supporting reputation-based trust for peer-to-peer electronic communities[J]. IEEE Transactions on Knowledge Data Engineering, 2004, 16(7): 843-857.
- (上接第 81 页)
- [10] BRAUN T, TRINH T A. Energy Efficiency Issues In Information-Centric Networking[M]// Energy Efficiency in Large Scale Distributed Systems. 2013: 271-278.
- [11] GUAN K, ATKINSON G, KILPER D C, et al. On the Energy Efficiency of Content Delivery Architectures [C]// IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2011: 1-6.
- [12] CHOI N, GUAN K, KILPER D C, et al. In-network caching effect on optimal energy consumption In content-centric networking[C]// IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2012: 2889-2894.
- [13] FANG C, YU F R, HUANG T, et al. An energy-efficient distributed in-network caching scheme for green content-centric networks[J]. Computer Networks, 2014, 78: 91-96.
- [14] BICKSON D. The emule protocol specification[J]. Emule Project, 2005, 4(1): 17-30.
- [15] BARROSO L A, HÖLZLE U. The Case for Energy-Proportional Computing[J]. Computer, 2007, 40(12): 33-37.
- [16] LIANG X M, ZHU C, YAN D H. Novel genetic algorithm based on species selection for solving constrained non-linear programming problems [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(1): 185-189. (in Chinese)  
梁昔明, 朱灿, 颜东煌. 基于物种选择的遗传算法求解约束非线性规划问题[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(1): 185-189.