

内容中心网络的分层缓存策略研究

夏 磊,王 雷,张成晨,吕 威

(中国科学技术大学 自动化系网络传播系统与控制联合实验室,安徽 合肥 230027)

摘 要: 提出了一种 CCN 网络的缓存分层内容放置策略,定义了一个分层的 CCN 网络架构.在此基础上,定义了一个内容缓存价值的概念,构建一个 CCN 网络的分层缓存模型,区别不同 CCN 节点在不同层上的缓存空间大小,通过对节点自带缓存空间大小和功能的分层配置,把不同流行度内容放置在不同层 CCN 节点上,提高不同层 CCN 节点的缓存性能,使得整体 CCN 网络缓存性能最优.

关键词: 内容中心网络;缓存空间;分层缓存;缓存价值;缓存命中率;多维背包问题

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)02-0022-05

Hierarchical Caching Mechanism Study for Content-Centric Network

XIA Lei, WANG Lei, ZHANG Cheng-chen, LV Wei

(Joint Laboratory of Network Communication System and Control, Department of Automation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Content-centric Network (CCN) caching system, is a distributed caching system. In this paper, we propose a hierarchical CCN network cache placement policy. We define a layered network architecture, then define the concept of the value of a content cache, to build a network CCN hierarchical caching model. CCN distinguishes between different nodes on different layers of the cache space,. Through the hierarchical configuration node cache size and function space, the popularity of different content can be placed on different layers CCN nodes in different layers. So it improves the cache performance of the overall optimal cache performance in CCN.

Key words: content-centric network; cache size; hierarchical cache; cache value; cache hit rate; multidimensional knapsack problem

1 引言

现阶段关于 CCN 的缓存策略的研究越来越多.传统的替换策略有 LFU、LRU、FIFO 等.以上策略都仅仅针对于网络中的单节点,并没有把网络当做一个整体来考虑. CCN 网络的默认缓存放置策略是 LCE (leave copy everywhere) 策略,即在对象传输的沿途节点都缓存该对象.另外还有增加协同机制的改进策略,如 LCD (leave copy down)、MCD (move copy down)、Prob (copy with probability)^[1] 等.上述

放置策略,内容的放置仅和策略本身相关,不区分节点.文献[2-6]做了进一步研究,但对不同内容仍需提高全局缓存的性能^[7].

为了最大程度地区分不同内容在 CCN 网络中不同的放置和替换策略,本文提出了一种分层缓存的思想,提出了分层 CCN 网络的模型,区别相同内容在不同 CCN 节点上的缓存方式,提高了内容的缓存针对性,同时也提高了整体 CCN 网络缓存的性能.

收稿日期: 2015-04-05; 修回日期: 2015-05-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(WK2100100022);中科院先导专项课题“新型网络数据传输控制与处理技术”,子课题“海云协同数据分析处理系统及服务”

2 问题描述

CCN 网络的缓存从本质上是一种分布式缓存,网络中内容随机的分布在各个节点上.随着用户对内容的请求频率和相应时间的变化,节点上缓存的内容也会发生变化.本文主要是设计一种 CCN 内容的缓存放置和更新策略,针对内容的流行度,计算出全局的内容放置,并通过该策略进行内容缓存更新,使得全局的缓存价值最优.

2.1 单节点缓存空间的建模

CCN 网络中,对于一个给定的网络节点,其缓存空间是有限的.对于众多的不同流行度的内容,各个内容的缓存价值也是不同的.当剩余的缓存空间不足时,则需要删除其中的某些内容,以缓存价值大的内容.该问题是一典型的 0/1 背包问题^[4],也是一种组合优化的完全问题.可以描述为,对于给定的内容,每个内容都有自己的大小和缓存价值,在网络节点的缓存空间固定的情况下,如何选择缓存的内容,才能使得总的缓存内容的缓存价值最大.

形式化描述为,设缓存空间 $P > 0$,网络中的内容有 n 个,每个内容对应的大小为 s_i ,缓存价值为 v_i , $1 \leq i \leq n$.需要求解一个 n 元的 0-1 向量组 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,满足条件 $\sum s_i x_i \leq P$,且 $\sum x_i v_i$ 最大化, $x_i = 0$ or 1.其中 $x_i = 1$ 表示内容 i 存储在该内容节点上, $x_i = 0$ 表示内容 i 没有存储在该内容节点上.

2.2 CCN 网络分层缓存模型

CCN 网络的常用缓存放置策略是 LCE (leave copy everywhere)、LCD (leave copy down)、MCD (move copy down)、Prob (copy with probability) 等.上述策略中把 CCN 的网络节点在内容转发和缓存过程中发挥的作用同一化.但是实际网络中,考虑到不同节点的性能不同,占用的带宽也不同,承担的转发和存储的作用也不同,因此分层次的缓存策略更适合 CCN 网络.

本文把网络独立成上述分层模型, $j = 1 \sim m$,如图 1 所示.针对单节点的缓存模型,选择缓存内容,每个内容的缓存价值不变,使得单个节点的缓存价值总和最大.本节的分层缓存模型,当用户节点请求任意内容时,离用户节点越近的节点上有缓存,获取内容的效率越高.另一方面,流行度越高的内容在网络中的缓存价值越高,占用的总体缓存存储空间也会越多,在网络中的分布也会越广.不同内容在不同节点上缓存时对应的最主要区别是缓存价值的不同.同一内容在不同网络层中的缓存价值不同,从而

差异化各个节点的缓存空间,同时使得网络中所有节点的缓存价值总和最大.

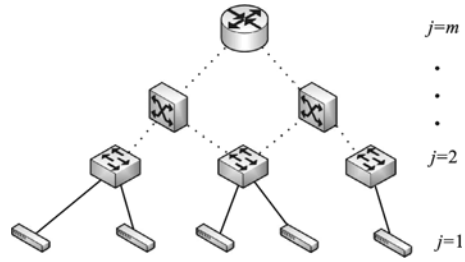


图 1 网络分层模型

假设 CCN 网络中有 m 的节点,把网络也分为了 m 层. m 越大,离用户节点越远.第 1 层靠近用户节点,第 m 层靠近服务节点.此时,修改缓存价值为 v_{ij} ,表示内容 i 在节点 j 上的缓存价值.相应的模型调整为,对于 n 个内容, m 个节点的 CCN 网络,求解一个 $n \times m$ 的 0-1 向量组 $\{x_{00}, x_{01}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nm}\}$, $x_{ij} = 1$ 表示内容 i 存储在缓存节点 j 上, $x_{ij} = 0$ 表示内容 i 并未存储在缓存节点 j 上,满足条件 $\sum_j \sum_i x_{ij} s_i \leq \sum_j P_j$,使得 $\sum_j \sum_i x_{ij} v_{ij}$ 最大,其中 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$.该问题是基于 3.1 节中的多维 0/1 背包问题.

2.3 缓存价值的定义

数据内容的缓存价值 v_{ij} 是上述模型的核心,本文的缓存价值主要基于以下思想:

- (1) 不同内容的缓存价值不同,流行度越高的内容对应的缓存价值越高;
- (2) 不同大小的内容缓存价值不同,越大的内容对应的缓存价值越小;
- (3) 数据被缓存在网络的不同层中的内容,对应的缓存价值不同.离用户节点越远的内容缓存价值越低.

本文假设网络中数据内容的流行度稳定不变,网络拓扑和分层情况也不变.对于任意一数据内容 i ,其流行度是为 $p(i)$,大小为 s_i ,当该内容存储在网络的 j 节点上时,定义内容缓存价值 $v_{ij} = p(i) \times \beta_j \times \frac{1}{s_i}$, β_j 分别为数据内容分层系数.

3 基于分层缓存价值的缓存替换策略

从上面的内容缓存价值的定义,可以看出缓存价值和内容流行度成正比,和内容大小成反比,和分层系数成正比.定义这样一个缓存价值的概念是在进行缓存决策时,不单纯考虑内容返回路径以及其

上下游节点的缓存状态,同时参考该内容在这一节点上进行缓存的价值.在解决上述多维 0/1 背包问题时,考虑到 CCN 网络用户兴趣包驱动的特性,可以在数据包返回的路径节点上,执行缓存替换算法,使得单个节点的缓存价值最大化,从而实现全局最优.

具体替换算法如下:

Algorithm 1: Cache Value Maximize for Cache Node

```

1. Input
2. Content: A data packet within CCN
3. Begin
4. For each node along path, do
5.     for each content within cache node
6.         set value  $v_{ij}$  for content
7.         if cache is full
8.             check history content within cache space
9.             drop the least valuable content item
10.        end if
11.    end for
12. end for
13. End

```

该算法简称为 CVX 算法,在内容缓存价值是已知时是线性执行的,满足 CCN 对缓存的线性要求,可以作为 LRU、FIFO 等的一个改进,并有效执行.

4 性能分析

4.1 算法可行性分析

考虑 CCN 缓存线速执行问题,分析该算法在 CCN 节点中的可行性.本文提出的缓存价值中有两个内容的属性概念:内容大小和内容的流行度.一般而言,网络中的 n 个内容,对于每个内容 i ,都会一定的概率被用户访问到.这样就有一个内容集合 $C = \{c_i \mid i = 1 \ 2 \ \cdots \ n\}$, c_i 按照流行级别进行了编号,每个内容被访问的概率为 p_i ,对于任意的 $1 \leq i \leq j \leq N$,有 $p_i \leq p_j$,并且称 p_i 为 c_i 的流行度, $P = \{p_i \mid i = 1, 2, \cdots, n\}$ 为内容集合 C 的流行度分布.这样对于 CCN 网络中的所有内容,流行度 p_i 可以设计为一个稳定的值,在数据包发布的过程中,作为一个数据包 Signed Info 的一个属性值.另外内容大小也是一个固定的值,不随数据包传输而变化.下面就是分层缓存系数的设置 β_i . 分层网络树中,层与层之间最主要的差别直观上体现在节点对应的子节点的数目,越上层节点的子节点,以及子节点的子节点数目会越多,也正是这些子节点的流量成为父节点流量

的来源.仿照图的边权重的概念,定义一个节点权重 $w(v)$,该节点权重也即分层缓存系数 β_i . 默认最底层叶子节点的节点权重为 1,上一层父节点的权重取决于下面子节点的个数,为下一层子节点权重之和.

图 2 中共有 11 个节点 1~11,其中 1~5 为叶子节点,节点权重为 1,节点 6 的权重为节点 1 和节点 2 之和,为 2,同理,节点 7 权重为 1,节点 8 为 2,节点 9 为 3,节点 10 为 2,节点 11 为 5.

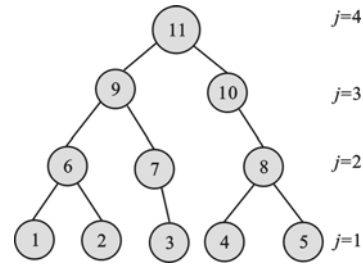


图 2 层网络示意图

这样在一个拓扑相对固定的网络中,节点的权重保持相对稳定.如果相比于同层节点的其他节点,该高层节点的子节点以及子节点的子节点数目很多,对应于该节点的节点权重也越大,如节点 9 和 10,这样同一内容在该节点上的缓存价值也就越大,说明该内容在进行替换时优先级越高.另外,对应于相同大小的不同内容,沿路径进行缓存时,流行度越高的内容缓存价值越大,在替换时优先级也最高.而相同流行度的不同内容,内容越小越容易替换其他内容.当然由于不同层节点之间的缓存权重也有可能相同,这样替换时的优先级就取决于流行度了.

综上所述,该缓存替换策略是一个可以实现在 CCN 路由器节点以及整个 CCN 网络中的策略.父节点 CCN 路由器可以收集子节点的权重信息,并根据节点权重和缓存价值的计算,和内容大小和流行度一样,加入数据包的 Signed Info 信息中,这些信息在一定时间内是相对稳定的.可以有效地实现内容基于流行度的合理分布,并且同时考虑内容大小对缓存替换的影响.

4.2 实验验证

本文实验的硬件环境是基于 PC 机上安装的一个 Ubuntu14.04 虚拟机,虚拟机的配置是虚拟内存大小为 1 GB,虚拟硬盘空间为 20 GB.在该虚拟机上安装 ccnsim 仿真器.通过 ccnsim 的拓扑构建模块,构建出一个如图 3 所示的 4 层 CCN 网络.

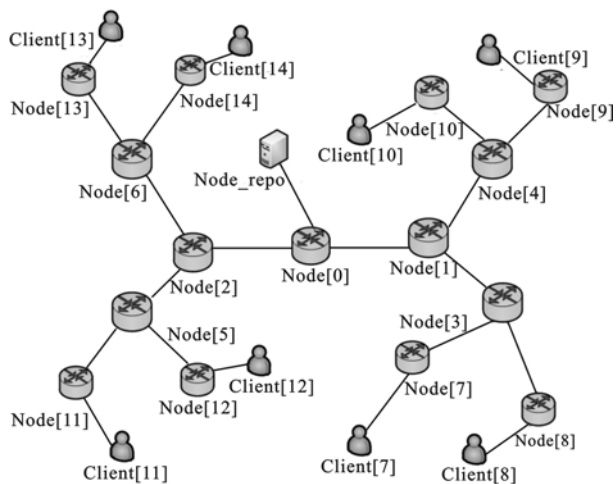


图3 网络仿真拓扑图

上述四层树结构的网络拓扑,总共有15个节点,分别为Node[0],Node[1],...,Node[14]。其中Node[0]直接和内容源节点Node_repo相连,并且整个网络中只有一个内容源节点。和用户Client相连的节点有8个,分别为Node[7],Node[8],Node[9],Node[10],Node[11],Node[12],Node[13],Node[14],连接情况分别为Node[7]和Client[7],...,Node[14]和Client[14]相连。

在图3所示的网络拓扑中,分别测试了FIFO、LRU算法和本文提出的CVX算法。该CCN网络的一些参数配置如表1所示。

下面分别给出了三种缓存策略对应的缓存命中率 p_{hit} ,以及Client节点发出interest包到请求到缓存数据时经历的跳数和hdistance情况(见图4、图5)。

表1 实验网络参数配置

参数名称	参数意义	参数设置值
Node_repos	和内容源服务器相连的节点名称	0
Num_repos	网络中内容源服务器的个数	1
Node_clients	和用户相连接的节点名称	7,8,9,10,11,12,13,14
Num_clients	网络中用户节点个数	8
Lambda	用户节点请求泊松过程的到达率	1
RTT	网络内容往返时间	2
Flie_size	网络中文件的平均chunk大小	1
Objects	网络中内容源服务器内容的数量	10^4
Alpha	内容流行度Zipf的影响参数	0.8
FS	Interest包转发策略	Spr(最短路径转发)
C	节点缓存空间chunk大小	10^2
Ds	缓存决策策略	LCE
Rs	缓存替换策略	FIFO、LRU、CVX

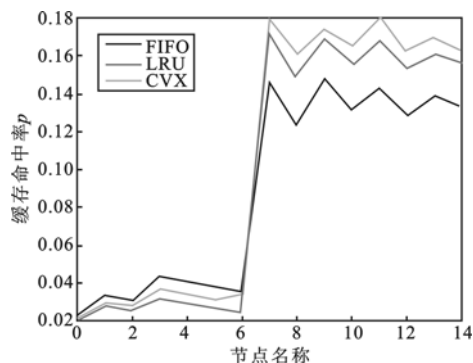


图4 三种不同缓存策略各节点命中率的对比

分析图4可以得出,上述分层缓存系统,对应三种缓存策略,非叶子节点node[0],node[1],node

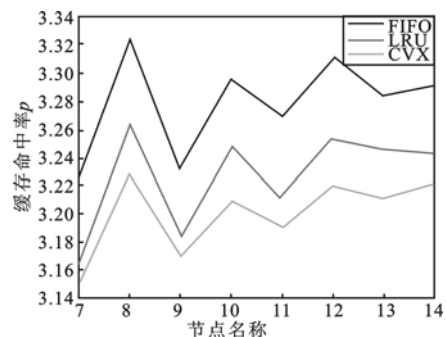


图5 三种不同缓存策略 interest 包经历跳数对比

[2],node[3],node[4],node[5],node[6]的缓存命中率比较低,其中节点越接近根节点,缓存命中率越低。整个缓存系统中根节点node[0]的缓存命中率

最低. 叶子节点 $\text{node}[7], \text{node}[8], \dots, \text{node}[14]$ 由于和用户节点直接相连, 缓存命中率较高. 比较这三种缓存策略, 在非叶子节点 $\text{node}[0], \text{node}[1], \text{node}[2], \text{node}[3], \text{node}[4], \text{node}[5], \text{node}[6]$ 中, LRU 的缓存命中率最低, CVX 其次, FIFO 最高; 而在叶子节点 $\text{node}[7], \text{node}[8], \dots, \text{node}[14]$, FIFO 的缓存命中率最低, FIFO 其次, CVX 最高. 可以看出, 对于 CCN 分层缓存系统, 常见的缓存替换策略, FIFO、LRU 等在不同层节点体现出的性能是不同的. 本文提出的 CVX 缓存策略, 可以保证高层非叶子 CCN 节点对缓存替换命中率要求的前提下, 提高和用户接入节点相连接的叶子节点的缓存命中率. 这样有两个好处: 第一, 从整体上提高了整个系统的缓存命中率, 并且叶子节点缓存命中率的提高可以保证用户请求的及时性; 第二, 牺牲了高层节点的缓存命中率, 但相比而言, 命中率的减少是有限的, 相比于 LRU, 命中率上是领先的.

总结各个缓存策略下, 用户发出 interest 包后, 在 interest 包得到 CCN 节点或者内容源节点响应时, 该包所经历的跳数 h_{distance} . 可以发现, 对于所有叶子节点, CVX 策略的跳数最少, LRU 其次, FIFO 跳数最高. 在现有的缓存策略下, 跳数 h_{distance} 最少在 3 跳以上, 不多于 3.5 跳. 对于整个缓存系统, 如果没有 CCN 节点内缓存, 经历的跳数均为 4 跳, 所以缓存替换策略对跳数的减少是相当可观的, 并且可以有效减少网络中的流量, 而 CVX 比其他两种策略更优.

5 结束语

本文提出了一种 CCN 网络的分层缓存的思想, 基于单一节点 0/1 背包问题的扩展, 区别对待相同内容在 CCN 网络的不同节点上的缓存价值, 建立了一个多维 0/1 背包问题. 通过实验模拟可以得出, 该

策略可以改善 CCN 网络各层节点的缓存命中率, 减少网络的整体流量, 也是对整个 CCN 网络性能的一种提高.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Dong L, Zhang Y, Raychaudhuri D. Enhance content broadcast efficiency in routers with integrated caching[C] // Computers and Communications (ISCC), 2011 IEEE Symposium on. Kerkyra, IEEE, 2011: 320-322.
- [3] 刘外喜, 余顺争, 蔡君, 等. ICN 中的一种协作缓存机制[J]. Journal of Software, 2013, 24(8): 1947-1962.
- [4] 董利利, 王勇, 董永强, 等. NDN 中基于蚁群替换算法的邻居协作缓存管理策略[J]. 电信科学, 2014, 30(9): 45-52.
- [5] Liu W X, Yu S Z, Gao Y, et al. Caching efficiency of information-centric networking[J]. IET networks, 2013, 2(2): 53-62.
- [6] Cho K, Lee M, Park K, et al. WAVE: Popularity-based and collaborative in-network caching for content-oriented networks [C] // Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2012 IEEE Conference on. Orlando, IEEE, 2012: 316-321.
- [7] Afanasyev A, Moiseenko I, Zhang L. ndnSIM: NDN simulator for NS-3[R]. Los Angeles, University of California, 2012.

作者简介:

夏磊男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为未来网络.
E-mail: xlei@mail.ustc.edu.cn.

王雷男, (1972-), 博士, 副教授. 研究方向为未来网络、云计算环境中内容存储分发以及分布式系统优化.

张成晨男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为未来网络.

吕威男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为未来网络.