



命名数据网络中基于数据请求节点的就近缓存算法

张浪, 韩敏, 郑勇, 吴婷婷, 侯睿

(中南民族大学 计算机科学学院, 武汉 430074)

摘要:为提高命名数据网络(named data networking, NDN)中数据存储节点的缓存效率和存储空间利用率,根据就近缓存思想,提出一种在数据请求节点中根据特定内容兴趣而区分缓存的数据缓存算法。该算法结合缓存节点地理位置差异性和缓存数据内容热度差异性,将热度高的数据内容优先缓存在数据请求节点周围,并根据数据被请求的频次动态设置缓存时间,使热度高的数据内容尽可能长时间地缓存在存储节点中,增大了数据就近响应概率;且节点中被替换的数据内容没有直接删除,而是向上转发并指示上游节点缓存,增加了缓存数据内容的多样性。仿真结果表明,所提算法能有效提高数据搜索命中率,降低网络请求时延以及路由传输跳数。

关键词:命名数据网络;就近缓存;缓存时间

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1673-825X(2018)01-0090-06

Consumer-based proximity caching algorithm for named data networking

ZHANG Lang, HAN Min, ZHENG Yong, WU Tingting, HOU Rui

(College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: To improve data caching efficiency and storage space utilization in named data networking (NDN) storage nodes, based on proximity caching idea, a differentiated data caching algorithm is proposed in this paper to provide differentiated caching service according to specific content for consumer nodes. The proposed algorithm combines the location difference of the cache node and the cache data content popularity difference, so that it can put the popular data content around the consumer nodes first, and the cache time is set dynamically based on the requested frequency of data. Then the data content of the high popularity can be cached in the storage node for as long as possible, thus the data proximity response probability is enlarged; instead of deleting the data in the node directly, it forwards and directs the upstream node cache, increasing the diversity of cached data content. Simulation results show the proposed algorithm can effectively achieve high cache hit ratio, reduce data response delay and the number of hops.

Keywords: named data networking; proximity caching algorithm; caching time

0 引言

随着互联网信息量的飞速增长,目前以地址,如

IP,为寻址方式的数据传输和交换方式在移动性、安全性、网络地址转换等方面出现一定制约,未来互联网的发展以及用户的需求必然以信息内容为核心而

收稿日期:2017-08-29 修订日期:2017-12-15 通讯作者:张浪 zhang_lang666@163.com

基金项目:国家自然科学基金(60841001);武汉市科技计划项目(2015010101010008,2013010501010125);中央高校基本科研业务费专项资金(CZP17042)

Foundation Items: The National Science Foundation of China (60841001); The Scientific and Technological Projects of Wuhan, China (2015010101010008,2013010501010125); The Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges, South-Central University for Nationalities (CZP17042)

不是其所存在的地址,因此,信息中心网络(information-centric networking, ICN)^[1-2]以数据信息为资源共享的特点,恰好适应了未来网络的发展趋势,目前已得到世界各国研究者的高度关注。在 ICN 中,命名数据网络(named data networking, NDN)^[3]以其分布式的信息缓存方式、耦合路由等特点被认为是 ICN 中最有效的部署方案之一。

在 NDN 中,数据信息分布式存储或缓存在 NDN 所有节点中,数据请求节点(consumer)首先发出 interest 包去探寻所需信息,interest 包中含有所需数据信息的名称,其每经过一个 NDN 路由器,依次在内容存储数据库(content store, CS)、待定兴趣表(pending interest table, PIT)和转发信息库(forwarding information base, FIB)中进行数据查找、端口登记、数据最长匹配查询并转发等处理。数据发布节点(publisher)收到 interest 包后,将对应数据信息封装成 data 包发送到 NDN 网络,data 包沿 interest 所经历路径原路返回至数据请求节点,并在所经过的每一个 NDN 路由器中将此数据信息进行缓存。因此,合理优化管理 NDN 路由器中有限的缓存资源,能有效提高 NDN 网络数据存储、转发和路由性能。

1 研究现状

目前的 IP 网络数据传输大多基于 C/S 模式,数据传输的中间节点没有缓存功能,因此,请求时延和路由跳数较大,这是目前 IP 网络的弊端。而 NDN 采用沿途缓存方式(cache everything everywhere, CEE)有效提高了信息搜索和获取速度,提高了效率,但 CEE 会出现节点缓存趋于同质化,缓存内容可能出现大量重复从而导致信息冗余等问题;文献[4]提出只在数据信息命中节点的直接下一跳缓存应答数据包(leave copy down, LCD),避免内容的重复缓存,但并没有考虑数据请求节点的影响,而且被替换出来的 data 包再次请求时只能转发到数据发布节点进行响应;文献[5]提出一种随机单点缓存方法(randomly copy one, RCOne),即在沿途路径随机选择单个节点进行内容数据缓存,减少了信息冗余;文献[6]提出一种基于概率的缓存方法 Procache(copy with probability),依据节点距离数据源距离和路径的剩余缓存能力,计算节点对应的缓存概率,这是对零缓存和全缓存的一种折中算法,但 RCOne 和 Procach 均没有考虑请求内容的流行度问题;文献[7]提出一种根据请求内容的流行度以及存储节点

的位置来计算缓存时间的缓存方法,但此流行度是静态的;文献[9]同样提出一种依据内容流行度以指数方式逐步增加沿途缓存的方案(WAVE),但没有考虑缓存驻留时间,只是对 LCD 进行了有限改进;文献[8]提出一种基于节点介数的缓存方案,其原理是通过计算网络拓扑路径上介数最大的节点(最重要的节点)来进行数据缓存,这会造成了介数最大节点负载过重、频繁替换缓存、其他节点被闲置等问题。

可见,以上方案在考虑数据请求节点与数据发布节点的距离、请求内容的热度,以及动态改变数据包的缓存时间等问题上尚存在一定局限。鉴于此,本文提出一种基于数据请求节点的就近缓存算法(consumer-based proximity caching algorithm, CPCA),该算法依据数据请求节点的不同,根据内容热度的变化趋势,将热度高的内容动态推进到数据请求节点周边,并且使热度高的内容能长时间缓存,同时将热度低的内容推到数据发布节点周边,有效提高了数据信息的首跳命中率,减少了请求时延和平均跳数。

2 CPCA 算法原理

CPCA 算法中规定数据从数据请求节点到数据发布节点的传输方向为上游方向,相反则为下游方向,同时本文称与数据请求节点直连的 NDN 路由器为请求路由器。根据算法需要,CPCA 改进了 NDN 网络中 data 包的格式,如图 1 所示。

类型 (Type)	内容名字 (Content name)	缓存标志 位(CI)	缓存时间 (CT)	剩余缓存 时间 (CRT)	签名信息 (Signature)	数据 (Data)

图 1 改进的 data 包格式

Fig. 1 Improved data packet format

图 1 中,类型(Type)字段表明了该 data 包的业务类型;内容名字(content name)字段记录了该 data 包所承载的数据信息的名称;缓存标志位(caching index, CI)字段为缓存标志位,初始化为 0,当其为 1 时,指示 NDN 路由器缓存该 data 包(实际上缓存的是 data 包中所承载的数据信息,为简单起见,本文简述为缓存 data 包);缓存时间(caching time, CT)字段记录的是该 data 包的缓存时间,单位为秒;缓存剩余时间(caching remain time, CRT)字段记录的是该 data 包的剩余缓存时间,当其为 0 时,该 data 包可被替换;签名信息(Signature)字段记录的是签名信息,如发布者 ID 等;Data 字段为该 data 包承载

的数据信息;此外将 NDN 路由器中 CS 的剩余存储空间大小记为(remain caching size, RCS), data 包的大小记为 DS(data packet size)。

CPCA 的主要思想是①当 data 包到达相应的请求路由器时或其 CI 字段值为 1 时,进入该路由器的 CS 进行缓存;②当请求路由器缓存容量达到上限,新到来的 data 包替换节点中已经缓存的 data 包,如果没有可替换状态的 data 包,则选择 CRT 值最小的

data 包进行替换,如果有可替换的 data 包,则依据 LRU(least recently used)原则从可替换状态的 data 包中选择一个 data 包进行替换,将被替换出来的 data 包 CI 置为 1,指示上游节点进行缓存,上游节点执行相同的替换算法,直到 data 包能够进入 CS 进行缓存;③当 data 包进入 CS 时,CRT 字段的值更新为该 data 包的当前 CRT 字段的值加上 CT 后的值。

图 2 给出了 CPCA 算法的流程图。

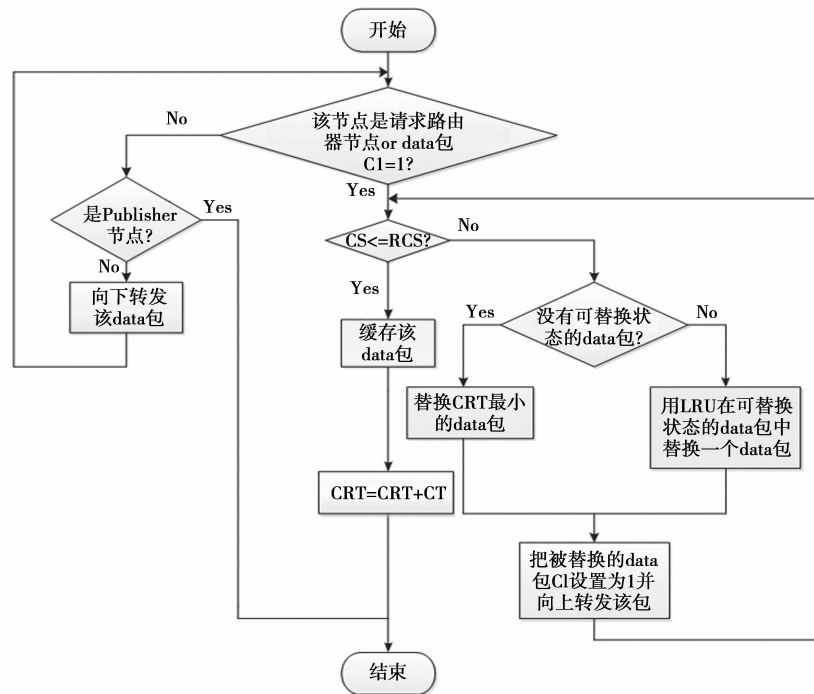


图 2 CPCA 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart of CPCA

同时给出 CPCA 算法和缓存过程伪代码,如下所示。

Algorithm 1 CPCA

```

1 if 该节点是数据发布节点 then
2   删除该 data 包
3 else if 该节点是对应请求节点或者该 data 包缓存标志
   位为 1 then
4   缓存该 data 包
5 else
6   将该 data 包转发至下游节点
7 end if

```

Algorithm 2 Caching

```

1 symbol ← true
2 while symbol is true do
3   if DS <= RCS then
4     把该 data 包插入到节点的 CS 中
5     CRT ← CRT + CT

```

```

6     更新该 data 包的剩余缓存时间
7     symbol ← false
8   else
9     if 没有可替换状态的 data 包 then
10      选择一个剩余缓存时间最小的 data 包
11    else
12      用 LRU 原则从 CS 中选择一个 data 包
13      CI ← 1
14      将该 data 包向上游节点转发
15      symbol ← true
16    end if
17  end if
18 end while

```

3 仿真与性能分析

为了验证 CPCA 算法的有效性,本文利用 Matlab 配合 C++ 代码进行了模拟仿真实验。首先基

于改进的 Salama^[10]算法用 Matlab 随机生成一个具有 50 个节点的 NDN 网络拓扑,如图 3 所示。不失一般性,本文假设该 NDN 网络中的数据信息有 1 000 个,每个信息内容大小设为 1 MByte, NDN 中间路由器缓存容量皆设为 50 MByte,链路带宽为 100 Mbit/s,在网络中设置了一个数据发布节点负责内容的存储和发布,在网络边缘设置有 8 个数据请求节点发出 interest 请求。Interest 包的到达服从参数 λ 为 10 的泊松过程,请求概率服从 Zipf 分布^[11],仿真时间设为 100 s,采样周期为 1 s,仿真开始时所有 NDN 中间路由器无缓存,缓存替换采用 LRU 规则。

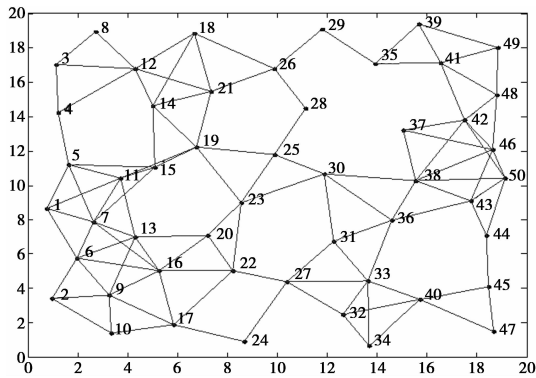


图 3 实验拓扑图

Fig. 3 Experimental topology

将 CPCA 算法与目前 NDN 中采用的缓存方法、Procache 和 WAVE 进行对比分析,评价指标采用缓存命中率(cache hit ratio, CHR)^[12]、平均路由跳数(average route hop, ARH)^[13]和平均请求时延(average request delay, ARD)^[14]。CHR 表示 NDN 网络中 interest 包在中间路由器被成功响应的概率;ARD 表示节点发送 interest 包到接收到对应的 data 包所产生的平均时延;ARH 表示成功获得响应的 interest 包所传输的平均距离,以路由跳数计算。设所有数据请求节点发出的 interest 包数量总和为 m ,数据发布节点响应数据包的总数为 n ,一个采样周期内共发出了 j 个 interest 请求,其中,第 i 个 interest 包得到响应的路由跳数为 X_i ,响应时延为 T_i 。3 种评价指标计算公式如下

$$CHR = 1 - n/m \quad (1)$$

$$ARH = \sum_{i=0}^j X_i/j \quad (2)$$

$$ARD = \sum_{i=0}^j T_i/j \quad (3)$$

图 4 给出了 4 种方案 CHR 指标对比,从图 4 中

可以看到,在运用 CPCA 的 NDN 中,数据请求节点的首跳命中率和缓存命中率皆高于其余 3 种方案。主要原因在于传统 NDN 采用沿途缓存方法(cache everything everywhere, CEE),该方法是将原路返回的 data 包全部缓存在其经过的每一个 NDN 路由器上,因此,造成了大量的缓存冗余,且路由器中的缓存替换操作频繁,增加了其处理开销;Procach 根据路由器节点与用户节点间的距离来计算节点的缓存概率,越靠近用户的节点其缓存概率就越高,因此,用户周围节点缓存替换频繁,而网络核心处节点的缓存空间利用不高;WAVE 根据信息内容的请求频率以指数增长的方式增加沿途缓存信息内容的个数,但其指数式的增长方式使得用户周围节点频繁替换缓存内容,且节点间的交互报文也增加了网络负载。CPCA 优先考虑在数据请求节点进行缓存,增大了首跳命中率和内容请求的就近响应率;通过动态设置 data 包的缓存时间,使热度越高的信息内容缓存时间越长,且被替换的 data 包没有被直接删除,而是向上一跳缓存,增大了缓存命中率,减小了数据发布节点的负载。

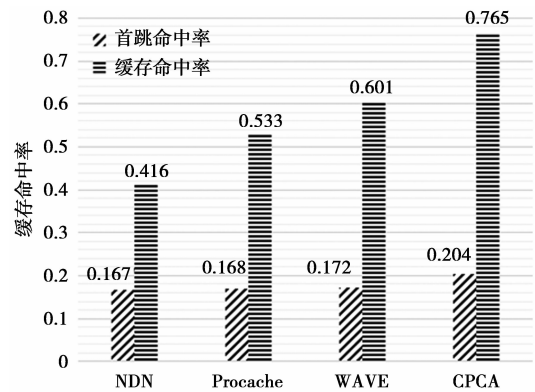


图 4 4 种方案的 CHR 比较

Fig. 4 CHR comparison of the four schemes

图 5 给出了 4 种方案的 ARD 指标对比,从图 5 中可以看到,在运行 4 种缓存算法的 NDN 网络中,ARD 指标曲线走势皆逐渐减小,并趋于平缓,这是因为开始阶段是数据信息在 NDN 路由器中缓存积累的阶段,待一段时间后,NDN 路由器中的数据信息量达到一定规模,便趋于稳定。同时可以看到,CPCA 在整个过程中的 ARD 指标比其余 3 种方案皆具有优势,证明 CPCA 能够有效缩短 interest 包的搜索时间,提高数据信息对象的命中率。

图 6 给出了 4 种方案的 ARH 指标对比,从图 6 中可以看到,和图 5 相似,4 种算法运行的 NDN 网络中,ARH 指标皆逐渐降低,最后趋于平缓。主要

原因在于 NDN 路由器的缓存逐渐趋于饱和,获取信息的路由跳数便有所减少。同样可以看到,CPCA 算法在整个路由过程中,所经历的路由平均跳数较其余 3 种方案皆有明显的减少,主要取决于 CPCA 能够根据数据信息的请求频率,把热度较高的数据信息尽可能缓存于数据请求节点附近,且为了减小缓存冗余,相同数据信息不重复缓存,这样就在很大程度上减少数据请求的路由跳数。

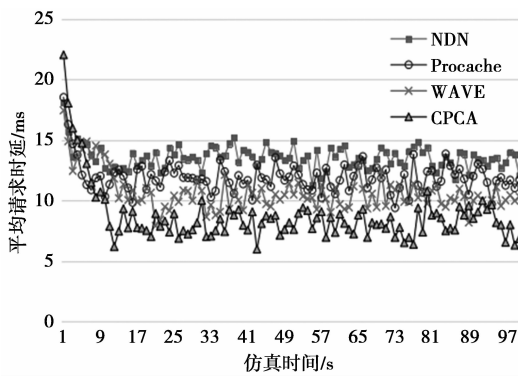


图 5 4 种方案的 ARD 比较

Fig. 5 ARD comparison of the four schemes

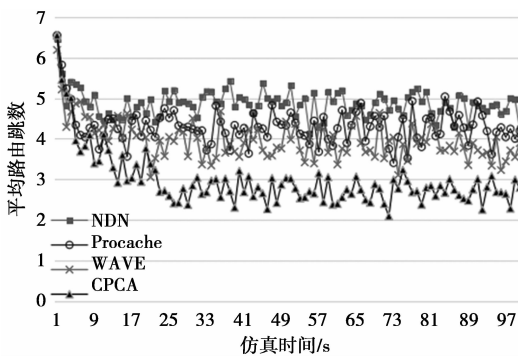


图 6 4 种方案的 ARH 比较

Fig. 6 ARH comparison of the four schemes

图 7 给出了在 NDN 路由器配备 100 M,150 M 和 200 M 等不同容量缓存情况下,CPCA 的 ARH 指标性能。从图 7 中看到,ARH 随着缓存容量的增加而有所减少,证明缓存的增加能够有效增大 interest 包请求的命中率,减少平均路由跳数。

4 结 论

优化的内容缓存能有效提高 NDN 的数据信息搜索效率,发挥 NDN 网络的优势。本文针对现有缓存算法的局限,考虑到了首跳命中的重要性以及内容热度对缓存的影响,提出了基于数据请求节点的就近缓存算法。该算法重点在数据请求节点的上一

跳 NDN 路由器中进行缓存,且把内容热度低的数据不断推送到内容源服务器数据发布节点周围,把热度高的数据拉到请求节点周围,仿真结果显示,所提算法有效提高 NDN 缓存命中率,降低数据获取时延。本文提出的方法在用户请求差异度较大时有良好的性能,但在用户请求差异度不大时,相邻节点间可能会存在一定的数据信息重复缓存,在今后的研究中将考虑相邻节点间的协作来进行缓存优化,进一步提升该算法的性能。

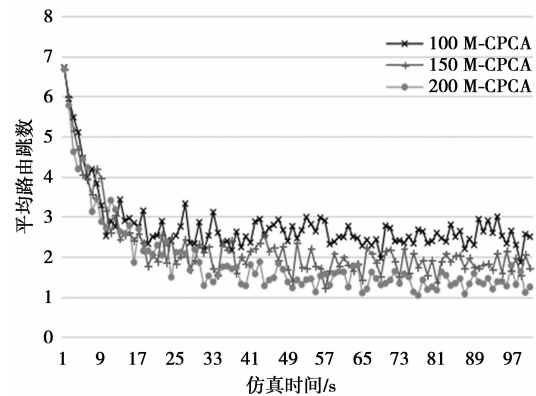


图 7 不同缓存容量大小情况下的 ARH

Fig. 7 ARH in different cache capacity sizes

参考文献:

- [1] ZHANG M, LUO H, ZHANG H. A survey of caching mechanisms in information-centric networking [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(3): 1473-1499.
- [2] 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.
- [3] ZHANG L, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
- [4] BERNARDINI C, SILVERSTON T, FESTOR O. A comparison of caching strategies for content centric networking [C]// 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, CA: IEEE, 2015: 1-6.
- [5] 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 (ICN' 12). New York, NY, USA: ACM, 2012: 49-54.
- [6] PSARAS I, CHAI W K, AND PAVLOU G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks [C]//

Proceedings of the second edition of the ICN workshop on Information-centric networking (ICN' 2). New York, NY, USA: ACM, 60.

- [7] MING Z X, XU M W, AND WANG D. Age-Based cooperative caching in information-centric networks [C]// Computer Communications Workshops. Orlando, FL: IEEE, 2012: 1-8.
- [8] CHAI W K, HE D, PSARAS I, et al. . Cache “less for more” in information-centric networks[C]// International Conference on Research in Networking. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 27-40.
- [9] CHO K, LEE M, PARK K, et al. . WAVE: popularity-based and collaborative in-network caching for content-oriented Networks [C]// 2012 Proceedings IEEE INFOCOM Workshops. Orlando, FL: IEEE, 2012: 316-321.
- [10] SALAMA H F, REEVES D S, VINIOTIS Y. Evaluation of multicast routing algorithms for real-time communication on high-speed networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(3) :332-345.
- [11] 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). Turin: IEEE, 2015: 1-6.
- [12] AOKI M, SHIGEYASU T. Effective content management technique based on cooperation cache among neighboring routers in content-centric networking [C]// 2017 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA). Taipei: IEEE, 2017: 335-340.
- [13] ZHANG Z, MA H, LIU L. Cache-aware named-data forwarding in internet of things [C]// 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, CA: IEEE, 2015: 1-6.
- [14] KIM D, KO Y B. On-demand anchor-based mobility support method for named data networking [C]// 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Bongpyeong, South Korea: IEEE, 2017:19-23.

作者简介:



张 浪(1993-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事信息中心网络缓存优化调度等方面的研究。E-mail: zhang_lang666@163.com。



韩 敏(1995-),女,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事于下一代网络体系结构、网络安全等方面的研究。E-mail: hanmin_stu@163.com。



郑 勇(1995-),男,湖北天门人,硕士研究生,主要从事于信息中心网络,路由优化等方面的研究。E-mail: smile_luffy@126.com。



吴婷婷(1993-),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事信息中心网络中名称查找方法等方面研究。E-mail: 27121203@qq.com。



侯 睿(1977-),男,湖北武汉人,教授,主要从事下一代互联网体系结构、光交换技术等方面研究。E-mail: hourui@mail.scuec.edu.cn。

(编辑:刘 勇)