

# 软件定义内容网络中基于分层的缓存管理

刘 静, 王 雷, 高翔宇, 王 嵩

(中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230027)

**摘 要:** 软件定义网络(SDN)和内容中心网络(CCN)是非常有前景的下一代互联网架构,而结合了二者特性的新架构—软件定义内容网络(SDCN)也已经引起了广泛关注.在基于协议无感知转发(POF)实现的 SDCN 中,通过控制器收集网络拓扑信息,构建分层存储模型,在网络总缓存空间固定的约束条件下,引入节点价值解决缓存空间分配问题.在此基础上,提出基于节点价值的缓存决策 CDV(Cache Decision based on Value),以及基于内容热度的缓存替换策略 CRP(Cache Replacement based on Popularity),实验结果表明,基于分层模型的缓存管理策略使得网络缓存性能提高.

**关键词:** 软件定义内容网络;POF;缓存管理;节点价值;分层模型;内容热度

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000—7180(2016)08—0001—04

## Hierarchical Cache Management for Software Defined Content Network

LIU Jing, WANG Lei, GAO Xiang-yu, WANG Song

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, He'fei 230027, China)

**Abstract:** An architecture combining Content-Centric Network and Software-Defined Network has attracted more attention gradually. This paper focuses on collecting topology information and constructing the hierarchical cache model of the network in SDCN based on POF. We discuss how to distribute cache capacity based on node value under the total storage budget for the network. A cache decision strategy based on node value – CDV and a cache replacement strategy based on content popularity-CRP are also proposed. Experimental results show that the cache performance in SDCN is improved.

**Key words:** SDCN; POF; cache management; node value; hierarchical model; content popularity

### 1 引言

随着用户对互联网的需求发展,内容逐渐成为用户和提供商们关注的焦点.内容中心网络 CCN(Content-centric Network),改变了原互联网中 host-host 的通信模式,以内容名称作为唯一标识.随着网络中内容的大量增长,CCN 中有限的存储空间和无限的内容容量必然存在着矛盾,所以我们需要合理规划网络缓存空间配置,设置有效的缓存策略管理内容<sup>[1]</sup>.

节点的重要性对 CCN 的缓存性能有着极大的

影响,然而由于 CCN 其分布式系统的特性缺乏对整体网络的全局认知,导致了资源的不合理配置.软件定义网络(SDN)提供了解决方案<sup>[2]</sup>.而协议无感知转发 POF(Protocol-Oblivious Forwarding)<sup>[3]</sup>,目前正在与 P4<sup>[4]</sup> 竞争作为 OpenFlow2.0 标准的主体.

内容路由节点拥有内置的内容存储模块(CS),用来缓存返回的数据包内容.节点的缓存空间大小会直接影响到整个缓存系统的性能,由于硬件设备的限制,节点的缓存空间不会无限大,如何利用有限的资源达到最优的性能成为一大挑战. Rossi<sup>[5]</sup>等人

证明在网络的核心节点分配更多的缓存空间,第一次提出了缓存空间部署的方案对于 CCN 缓存性能的影响.文献[6]中提出了在总的网络存储空间固定的约束条件下,获取内容放置的精确最优解,利用这个发现,对网络运营商如何最好地部署网络内缓存空间提供参考. CCN 提倡无处不在的网络内缓存,其设计的优劣直接制约着网络数据传输性能,但 CCN 缺乏对网络的全局认知,导致不合理的资源配置.本文在 SDCN 的网络架构下,利用控制器全局视角获取网络拓扑,并分析节点的重要性,构建分层存储模型.

缓存管理策略一直是缓存研究的重点,主要的研究方向为两个方面. (1)缓存决策,即数据包在沿原路径返回的途中哪些节点需要缓存该内容. CCN 中最常用的缓存决策为 LCE 策略,在数据包返回的沿途所有节点中缓存该内容. (2)缓存替换策略,即节点有限的缓存空间已满时,新内容到达时如何进行替换. 最常用的缓存替换策略为 LRU,即简单地剔除缓存中最近最少使用的内容. 已经有不少论文给出了关于缓存管理策略的探索<sup>[7-10]</sup>. 虽然这些缓存管理策略在不同程度上改善了网络的缓存性能,但依然没有从节点重要性以及内容热度的属性进行分析,所以本文在分层存储模型的基础上,提出基于节点价值的缓存决策 CDV (Cache Decision based on Value)以及基于内容热度的缓存替换策略 CRP (Cache Replacement based on Popularity).

2 分层存储模型

2.1 节点价值

网络拓扑结构是影响网络负载分布的主要因素之一. 节点在整个网路中的重要性程度,通常是通过节点的中心性度量来表示的. 在对网络的分析中,节点的中心性度量倾向于表示为通过该节点的最短路径条数,定义为节点价值. 节点价值描述了节点在网络中可能承载的流量. 节点价值越大,流经它的数据越多,意味着它更容易成为网络的瓶颈,所以应当对承担了网络更多流量的中心节点赋予更高的价值,分配越大的缓存空间.

网络拓扑中任意两个节点  $j, k$  之间最短路径数为  $\sigma_{jk}$ ,其中经过节点  $i$  的最短路径数为  $\sigma_{jk}(i)$ ,则节点  $j, k$  经过节点  $i$  的最短路径的比例为  $\sigma_{jk}(i)/\sigma_{jk}$ . 故节点  $i$  的节点价值  $\text{value}(i)$  的定义如式(1):

$$\text{value}(i) = \sum_j^N \sum_{k \neq j}^N \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}} \tag{1}$$

节点的价值越大,其重要性越大,因为它的负载很大,需要处理大量的数据. 因此,这种类型的节点在设计时应当分配更大的缓存空间.

2.2 分层存储模型

大规模网络中节点价值越大,相对的缓存能力要求也越高,配置较大的缓存空间较为合理. 但昂贵的硬件设备不可能满足每个节点的大容量缓存,所以在网络总缓存空间  $C$  一定的约束条件下,如何为各节点合理分配缓存空间尤为重要. 当 SDCN 中的内容路由由节点接入网络时,需要向控制器发送硬件信息,同时控制器通过拓扑发现协议获取整个网络的拓扑信息,进而计算网络各节点的节点价值. 根据节点价值进行网络划分,构建分层存储模型,越高层的节点配置越大的缓存空间.

以图 1 中的简单拓扑为例,展示节点价值的计算以及如何构建分层存储模型. 示例拓扑中共包含 11 个节点. 根据节点价值的计算公式,可以计算出各节点的价值,如表 1 所示,其中边缘节点的价值皆为自身发起的最短路径.

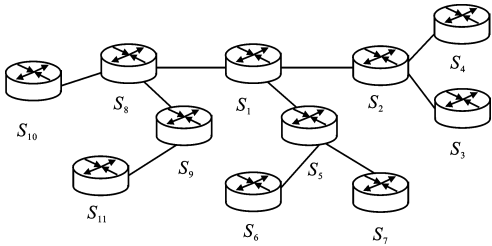


图 1 简单示例拓扑

表 1 示例拓扑中的节点价值

| 节点              | 节点价值 | 排名 | 缓存空间 |
|-----------------|------|----|------|
| S <sub>1</sub>  | 43   | 1  | C/3  |
| S <sub>2</sub>  | 27   | 8  | C/9  |
| S <sub>3</sub>  | 10   | 2  | C/21 |
| S <sub>4</sub>  | 10   | 5  | C/21 |
| S <sub>5</sub>  | 27   | 9  | C/9  |
| S <sub>6</sub>  | 10   | 3  | C/21 |
| S <sub>7</sub>  | 10   | 4  | C/21 |
| S <sub>8</sub>  | 33   | 6  | C/9  |
| S <sub>9</sub>  | 19   | 7  | C/21 |
| S <sub>10</sub> | 10   | 10 | C/21 |
| S <sub>11</sub> | 10   | 11 | C/21 |

由于网络的规模较小,这里仅作为分层存储模型的示例,故可将该网络分为三层,构建存储模型如图 2 所示. 第一层包含排名前 10% : S<sub>1</sub>;第二层包

含排名 10~40% :  $S_8, S_2, S_5$ ; 第三层包含排名 40%~100% :  $S_3, S_4, S_6, S_7, S_9, S_{10}, S_{11}$ . 由于层次划分原则导致越高层的节点越少, 这里我们可以尝试对每层均分缓存空间, 每层节点再均分该层的空间大小, 保证总的缓存空间一定, 可得空间分配方案表 1 中所示.

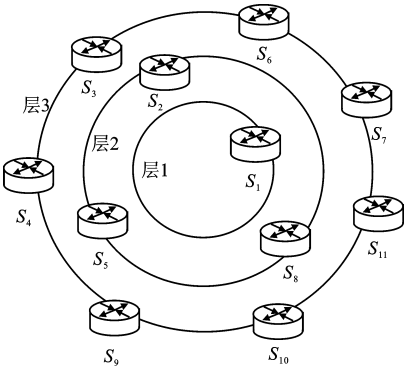


图 2 基于节点价值的分层存储模型

3 基于分层存储模型的缓存管理策略

通过 SDCN 中控制器的全局视角计算网络中各节点的价值, 并根据节点价值分配不同的缓存空间. 在分层存储模型下根据节点价值的不同来选取何处缓存, 进而取代简单的处处缓存. 同时在网络存储空间不足时, 本文通过指数平滑算法预测内容热度, 剔除冷门内容, 保证热点内容在网络中的缓存, 最大化满足用户的请求需求.

3.1 基于节点价值的缓存决策 CDV

第一节描述了内容网络中不同的缓存决策, 虽然从不同程序上改善了系统的缓存性能, 但没有从节点的重要性角度进行分析, 根据节点价值的差距, 区别核心节点和普通节点的缓存部署, 从而优化系统的缓存性能.

本文提出了基于节点价值的缓存决策 CDV, 不同于 LCE 中数据包在返回路径上的所有节点中进行内容缓存. 节点价值高的节点往往处理更多的流量以及拥有较大缓存空间, 所以优先在其空间上缓存内容. CDV 策略中兴趣包中在请求的过程中, 携带沿途价值最大的节点的信息, 响应数据包则将内容缓存到该节点上. 如图 2 的拓扑中, 由节点  $S_{10}$  发起请求, 设定内容存储在  $S_4$  上, 其余节点上皆无缓存, 则兴趣包和数据包的路径如图 3 所示. 兴趣包沿途记录价值最大的节点  $S_1$ . 兴趣包在  $S_4$  上命中时, 响应数据包携带应缓存节点的信息沿原路径返回, 并只在节点  $S_1$  上进行缓存, 最终数据包返回到请求

节点  $S_{10}$ .

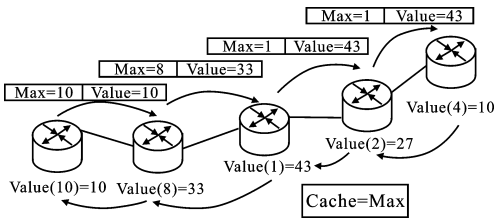


图 3 兴趣包和数据包的路径示例

3.2 基于内容热度的缓存替换策略 CRP

随着网络中内容的指数增长, 有限的缓存空间无法满足, 所以如何在缓存空间不足时进行有效的缓存替换也是一个重要的挑战. 内容网络中常见的缓存替换方案为 LRU, 即最近最少使用替换策略. 大量的研究表明, 网络中的约 80% 的请求落在 20% 的流行内容中, 那么使网络中尽量缓存访问量大的流行内容将能满足绝大多数的请求. 所以本文从内容热度的角度出发, 提出在缓存空间不足的情况下, 优先剔除热度最小的内容.

这里将节点所接收的请求流分段成不同的统计周期. 内容路由节点除了维护 CS, PIT, FIB 之外, 还需要额外维护一个内容热度的统计表 PT (Popularity Table). PT 表由三元组 <内容名, 热度, 周期内访问量> 构成, 如表 2 所示. 统计周期中包含  $N$  个请求, 每个节点设置一个全局计数器 Counter, 用于统计从本周期开始到当前总的访问请求数, 然后统计 PT 中各文件的访问次数, 并将统计结果作为历史记录保存, 通过式 (2):

$$P_{i+1} = \partial V_i + (1 - \partial) P_i \tag{2}$$

进行下一周期流行度的估计, 各节点 PT 表更新算法如下.

- 1: Counter = Counter + 1
- 2: Visit(i) = Visit(i) + 1
- 3: if Counter = N
- 4:   Counter = 0
- 5:   for items in PT
- 6:      $P_{i+1} = \partial V_i + (1 - \partial) P_i$
- 7:     visit = 0
- 8: End if

表 2 内容热度统计表 PT

| Name                | Popularity | Visit |
|---------------------|------------|-------|
| /ivy/images/p3. mpg | $P_i$      | $V_i$ |

指数平滑法重视近期数据影响, 但也不忽视远期数据作用, 从而提高了预测精度. 它也符合离目前愈近的数据, 对未来预测影响愈大的原则.

4 实验与分析

SDCN 系统中利用控制器获取网络信息,实现分层存储模型和缓存管理策略. 构建网络规模为 50 的实验网络. 随机在网络节点上放置 2 000 个文件,仿真执行 3 000 s,PT 表的替换周期为 50 次访问,每个节点的缓存大小为 C,PT 表的大小为 2 C. 无差异模型下每个节点的缓存大小相同为 C. 在分层缓存模型中,总的缓存空间限制为 50 C,基于网络规模将网络划分为三层,每层的缓存空间为 50 C/3.

我们使用平均缓存命中率和平均跳数来展示系统的缓存性能. 平均缓存命中率指的是网络拓扑中在节点缓存中产生内容命中的请求数占有用户请求总数的比重;平均跳数表示平均每个内容请求命中时所经过的总跳数.

本次实验根据是否采用分层存储模型,以及缓存决策和缓存替换策略的不同,产生四种对比情景,如表 3 所示. (其中采用分层存储模型的网络各节点的缓存大小,根据 50 C 的限制进行划分)

表 3 四种不同的实验情景

| 方法        | 分层存储模型 | 缓存决策 | 缓存替换策略 |
|-----------|--------|------|--------|
| LCE_LRU   | 否      | LCE  | LRU    |
| LCE_CRP   | 否      | LCE  | CRP    |
| H_LCE_CRP | 是      | LCE  | CRP    |
| H_CDV_CRP | 是      | CDV  | CRP    |

实验结果如图 4、图 5 所示,随着缓存空间的增加,平均缓存命中率和平均跳数的性能有明显的提高,但受到现实中的硬件限制,不可能无限地扩展缓存空间,说明本文在总缓存空间一定的限制条件下,构建分层存储模型是十分有意义的. 其中通过 LCE\_CRP 与 LCE\_LRU 的对比,验证了本文提出的基于内容热度的缓存替换策略的有效性;H\_CDV\_CRP 与 H\_LCE\_CRP 的对比,验证了本文提出的基于节点价值的缓存决策的有效性.

如图 4 所示,可以看到分层存储模型下的缓存管理策略的平均缓存命中率明显高于无差异模型. 说明分层存储模型明显提高缓存命中率,改善了系统的缓存性能. 图 5 展示了 4 种情景下的平均跳数随着节点缓存 C 的变化而逐渐降低,其中 H\_CDV\_CR 依然比无差异模型的缓存策略优秀,但是却比 H\_LCE\_CRP 略高,这是由于 CDV 策略将多数流行内容存储在核心节点上,需要消耗略多的跳数来

完成缓存命中.

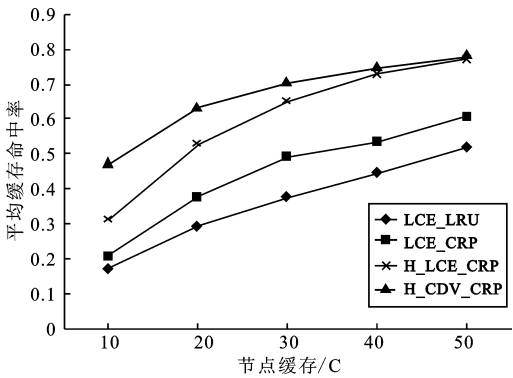


图 4 平均缓存命中率

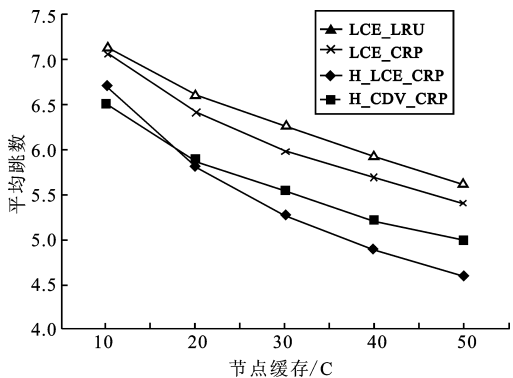


图 5 平均跳数

5 结束语

在基于 POF 实现的 SDCN 环境下,通过控制器对网络拓扑信息的收集,计算节点价值及构建分层存储模型. 在总缓存空间有限的约束条件下,动态分配节点的缓存空间. 在此基础上提出基于节点价值的缓存决策 CDV 以及基于内容热度的缓存替换策略 CRP. 实验结果表明,分层存储模型对于网络存储空间的划分提供了有效的方案,且相比于经典的缓存决策和缓存替换策略,基于分层模型的缓存管理策略大大提高了网络的缓存效率,验证本文提出的缓存管理策略在软件定义内容网络中的有效性. 在未来的工作中,将加入节点连通度对节点价值的影响,并考虑用户访问行为习惯来刻画网络中内容热度变化趋势.

参考文献:

[1] 闵二龙, 陈震, 许宏峰, 等. 内容中心网络 CCN 研究进展探析[J]. 信息安全, 2012, 12(2): 6-10.  
[2] McKeown N. Software-defined networking[J]. INFOCOM keynote talk, 2009, 17(2): 30-32.

知识词典. 语义检索的实现主要是利用词典中的同义关系和相关关系对用户输入的关键词进行语义扩展,进一步得到检索结果.

本文研究在抽取概念时,没有考虑各词项之间的复杂关系. 并且抽取出来的概念仍然不够精确,有些概念与关键词之间的关系不够密切. 对于领域知识词典的构建方法还需进一步研究. 另外,知识库的构建不是一蹴而就的,需要经过反复的更新迭代才能达到令人满意的效果. 因此,下一步工作还需要对微生物知识库进行持续的扩充.

## 参考文献:

- [1] Song Wanli, Ni Lixian. Semantic query and reasoning system based on domain ontology[C]// International Symposium on Computers & Informatics. France, Atlantis Press, 2015.
- [2] Remi S, Varghese S C. Domain ontology driven fuzzy semantic information retrieval[C]// International Conference on Information and Communication Technologies. Holland, Procedia Computer Science, 2015.
- [3] Miriam Fernández, Iván Cantador, Vanesa López, et al. Semantically enhanced information retrieval: an ontology-based approach[J]. Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2011, 9

(4):434-452.

- [4] Debajyoti Mukhopadhyay, Aritra Banik, Sreemoyee Mukherjee, et al. A domain specific ontology based semantic web search engine[C]// International Workshop on MSPT Proceedings. Jeonju, 2007.
- [5] Lai Lienfu, Wu Chaochin, Lin Peiying, et al. Developing a fuzzy search engine based on fuzzy ontology and semantic search [C] // International Conference on Fuzzy Systems. Taiwan, IEEE, 2011.
- [6] Tao Tengyang, Zhao Ming. An ontology-based information retrieveval model for vegetables E-commerce[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 5 (11): 800-807.
- [7] Xutang Zhang, Xin Hou, Xiaofeng Chen, et al. Ontology-based semantic retrieval for engineering domain knowledge[J]. Neurocomputing, 2013, 116 (20): 382-391.
- [8] Xin Hou, Ong S K, Nee A Y C, et al. GRAONTO: a graph-based approach for automatic construction of domain ontology[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 11958-11975.

## 作者简介:

陈 航 男, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为知识库、知识图谱. E-mail: chenhang@buaa.edu.cn.

(上接第4页)

- [3] Song H. Protocol-oblivious forwarding: Unleash the power of SDN through a future-proof forwarding plane [C] // Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking. China, Hongkong, ACM, 2013: 127-132.
- [4] Bosshart P, Daly D, Gibb G, et al. P4: Programming protocol-independent packet processors [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 87-95.
- [5] Rossi D, Rossini G. On sizing CCN content stores by exploiting topological information [C] // INFOCOM Workshops. USA, Florida, Orlando, 2012: 280-285.
- [6] Wang Y, Li Z, Tyson G, et al. Optimal cache allocation for content-centric networking [C] // Network Protocols (ICNP), 2013 21st IEEE International Conference on. Germany, Göttingen, IEEE, 2013: 1-10.
- [7] Dong L, Zhang Y, Raychaudhuri D. Enhance content broadcast efficiency in routers with integrated caching [C] // Computers and Communications (ISCC), 2011 IEEE Symposium on. Greece, Kerkyra, IEEE, 2011:

320-322.

- [8] 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.
- [9] Rossi D, Rossini G. Caching performance of content centric networks under multi-path routing (and more) [R]. Relatório técnico, Telecom ParisTech, 2011.
- [10] Psaras I, Chai W K, Pavlou G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks [C] // Proceedings of the second edition of the ICN workshop on Information-centric networking. Finland, Helsinki, ACM, 2012: 55-60.

## 作者简介:

刘 静 女, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为未来网络. E-mail: ljsmile@ustc.edu.cn.

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

高翔宇 男, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为未来网络、SDN.

王 嵩 男, (1975-), 讲师. 研究方向为未来网络.