



命名数据网络中适用于区分服务的缓存策略研究

陈秋瑶, 郑 焯

(中国科学技术大学 自动化系 未来网络实验室, 合肥 230026)

摘 要: 命名数据网络(NDN)缓存策略通常较少关注内容所属的服务类型及不同服务类型的服务质量需求差异,难以应用于服务类型多样、用户需求复杂的实际场景。为充分利用有限的缓存资源,借鉴 IP 网络中的 Diffserv 模型,提出一个适用于 NDN 的缓存内容分类模型,并给出同时考虑内容分类、路由器本地流行度和内容下载时延的概率缓存算法 DiffCache。实验结果表明,该算法可实现缓存资源的动态分配,在不影响全局命中率 and 下载时延的情况下,能够准确区分每种内容类型的性能指标表现。

关键词: 命名数据网络; 缓存算法; 区分服务; 内容分类; QoS 性能

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 陈秋瑶, 郑焯. 命名数据网络中适用于区分服务的缓存策略研究[J]. 计算机工程, 2020, 46(1): 172-178.

英文引用格式: CHEN Qiuyao, ZHENG Quan. Research on caching strategy for differentiated services in named data network[J]. Computer Engineering, 2020, 46(1): 172-178.

Research on Caching Strategy for Differentiated Services in Named Data Network

CHEN Qiuyao, ZHENG Quan

(Laboratory of Future Networks, Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

【Abstract】 Named Data Network (NDN) caching strategies often pay little attention to the service types to which the content belongs, or the Quality of Service (QoS) requirements of different service types, so it is difficult to apply these strategies to real case scenarios that have various service types and complex user requirements. In order to make better utilization of limited caching resources, this paper refers to the Diffserv model in IP network and proposes a caching content classification model that can be used in NDN. Besides, this paper also presents a probability caching algorithm DiffCache that considers content classification, router local popularity and content download latency at the same time. Experimental results show that the proposed algorithm can realize dynamic allocation of caching resources and evidently distinguish the performance indicators of each content type without affecting the global hit rate and download latency.

【Key words】 Named Data Network (NDN); caching algorithm; differentiated services; content classification; Quality of Service (QoS) performance

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0053854

0 概述

根据 Cisco 的视觉网络指数 (VNI) 预测报告^[1]可知,到 2022 年全球 IP 流量将增长 5 倍,年 IP 流量将达到 4.8 ZB。为应对大规模内容分发的网络需求,一种新型的以内容为中心的网络 (Information-Centric Network, ICN) 架构被提出,该网络架构的一种主流实现方式是命名数据网络 (Named Data Network, NDN)^[3]。在 NDN 网络中,每个内容有全

球唯一命名,内容消费者根据内容名字发出兴趣包获取内容。网络中的路由节点均可缓存内容,兴趣包可在源服务器也可在路由节点上得到响应。

近年来,许多关于 NDN 的缓存研究通过设计和应用合理的缓存策略降低了服务器负载,减少了内容获取时延和网络带宽消耗,但较少关注到内容所属的服务类型以及不同服务类型的 QoS 需求差异,使得这些缓存算法难以应用在服务多样、用户需求复杂的实际场景。

基金项目: 国家重点研发计划“可重构高通量智能网络检测仪”(2018YFF01012200)。

作者简介: 陈秋瑶 (1993—),女,硕士研究生,主研方向为未来网络缓存技术; 郑焯 (通信作者),副教授。

收稿日期: 2019-01-30 修回日期: 2019-03-19 E-mail: yao930@mail.ustc.edu.cn

Diffserv 模型是在 IP 网络中广泛应用的区分服务模型。该模型根据流量特征及其服务的 QoS 要求将网络中的流量划分为 12 个种类,在路由节点中对每种流量类型规定单跳行为 PHB(Per-Hop Behavior),同时结合流量监控、队列管理功能,给不同的流量类型提供区分服务。

受 Diffserv 模型启发,本文提出一种适用于 NDN 的区分服务缓存策略。通过简化 Diffserv 模型的服务分类,建立缓存内容分类模型,并给出区分服务的概率缓存算法 DiffCache。该算法同时考虑内容分类和网络特性实现缓存资源的动态分配,使不同类型的内容具有不同的缓存命中率及下载时延,从而利用缓存资源满足不同服务的 QoS 需求。

1 相关研究

缓存算法是 NDN 研究热点之一^[4-5],它考虑的问题是路由节点应缓存哪些内容以获得更高的缓存命中率,减少内容下载时延和带宽消耗。NDN 中较为经典的缓存策略有 LCE(Leave Copy Everywhere)^[6]、LCD(Leave Copy Down)^[7]及概率缓存 Probability^[8]。LCE 是 NDN 默认的缓存策略,实现方式是路由节点不加区分地缓存每一个到达的内容。该算法简单、速度快,但容易造成大量内容冗余。LCD 仅在命中节点的下一跳缓存内容,使请求次数多的内容更快地到达网络边缘,弥补了 LCE 中大量内容冗余的不足,但内容通常要经过几次请求才能到达网络边缘,当链路带宽不足时不能有效利用缓存减少下载时延。概率缓存 Probability 对每个到达路由节点的内容以固定概率决定是否缓存,算法简单高效,但存在随机性。

在经典缓存算法的基础上,研究者提出了基于内容流行度和致力于减少传输延迟的缓存算法^[9-10]。在 NDN 中,内容流行度可分为内容原始流行度和路由节点本地流行度。路由节点本地流行度是指由路由节点统计到的内容流行度。由于对相同内容的未满足请求会聚合在 PIT 表中,不再向上游节点转发,因此路由器本地流行度通常与内容原始流行度有所区别。文献[11]提出的 OCPCP 算法在路由节点中设置了一个阈值,当统计到某种兴趣包请求数目到达该阈值时缓存对应的数据包。文献[12]提出基于路由节点本地流行度的贪心缓存算法,将随机的网络拓扑解耦成有向无环图,图中每个节点缓存其本地流行度最高的部分内容,明显提高了缓存内容的命中率。在致力于减少传输延迟的缓存算法中,文献[13]证明了在瓶颈链路下游缓存单个内容副本能最大化缓存内容种类数量,最小化网络平均下载时延,并提出了 LAC(Latency Aware Cache)缓存算法,根据内容下载时延估计链路拥塞情况,用本次内容下载时延与 t 时刻前内容下载时延的比值来计算内容缓存概率,结合路由节点在链路中的位置做缓存决策。文献[14]提出了基于 RTT

(Round Trip Time)的缓存算法,路由器通过计算本次内容的兴趣包发出到数据包返回的时间与一个时间窗内容往返时间的均值之比得到本次内容的缓存概率,然后使用该值做概率缓存。上述算法通过优先缓存流行度高的内容或下载时间长的内容,提高了缓存命中率,减少了下载时延和带宽消耗,但是这些算法都将网络中的内容同等对待,没有考虑内容分类和区分服务,因此不能很好地适用于需要给不同服务提供不同 QoS 质量的场景。

能对不同服务类型提供区分服务的 Diffserv 模型在 IP 网络中研究较为成熟^[15-17],RFC 文档中也有详细描述^[18-19]。最早将 Diffserv 模型用于 NDN 网络的是文献[20]提出的区分服务的转发和缓存策略。缓存策略是将内容分类,由内容提供者标记内容属于哪个分类并注册到网络提供商的内容列表中。当路由节点收到一个数据包时,先检查该数据包是否在内容列表中,然后读取数据包的标记判断内容属于哪个分类,并将内容缓存到该分类对应的缓存空间中。该模型实现了区分服务的缓存,但每种类型的缓存空间大小是固定配置的,不能随各类内容数量变化动态调整,且会在数据包经过的沿路节点缓存内容,与 LCE 一样容易造成内容冗余,浪费宝贵的缓存空间。文献[21]提出的区分服务缓存算法给出每类内容的权重矩阵,利用反馈控制理论实现给不同类型的内容动态分配缓存空间,保证了不同类型内容的命中率在一个可接受范围内波动。但该算法只是保持各类服务的命中率大小,没有充分利用缓存资源来减少内容下载时延,且算法计算复杂,不能满足 NDN 对缓存处理需要快速执行的要求。

综上所述,如果能对 NDN 中的缓存内容做合理分类,把考虑到内容流行度和内容下载时延的缓存算法分别应用于不同类别的内容中,动态调整各类内容的缓存空间,将能更好地利用缓存资源满足不同服务的 QoS 需求,更贴合 NDN 未来的实际使用场景。

2 DiffCache 缓存算法

NDN 网络中的数据传输主要通过兴趣包和数据包完成。一个典型的内容请求与响应在路由节点的处理过程如图 1 所示。为使处理过程更适用于多种服务类型、多种 QoS 需求的场景,本文提出了 NDN 中的缓存内容分类模型与基于该分类模型的概率缓存算法 DiffCache。在兴趣包转发过程中,当路由节点收到未在 CS 命中的请求时,在 FIB 中添加到接口的记录,并更新该内容的请求次数与请求到达时间。当源服务器返回数据包时,根据其服务的 QoS 需求从缓存内容分类模型中找到对应分类并做标记,该标记分类将作为沿途节点做缓存决策的依据之一。路由节点接收到数据包时,根据数据包的标记分类、路由节点统计的请求次数与等待内容响应时间做概率缓存。

件、即时通信、在线游戏、在线视频购物及网络视频监控等实时性强,可归类于 NC。直播视频、网络电视需要减少延迟,且内容在一个时间段内可以重复利用,因此将其归类于 LD。长视频、短视频、网页、共享文件等内容由于缺少明确的实时性要求,可归类于 BE。Cisco VNI 预测流量类型的分类如表 2 所示。

表 2 Cisco VNI 预测流量类型的分类
Table 2 Classification of Cisco VNI predicted traffic types

缓存内容类别	对延迟的需求	服务类别
NC	—	邮件、即时通信、在线游戏、在线视频购物
DC	LD	直播视频、网络电视
	BE	网页、共享文件、长短视频、网络视频监控

与 Diffserv 模型类似,若考虑到不同用户、内容提供商的优先级等服务要求,在每个分类下可进一步细分出其他类型。

2.2 DiffCache 缓存算法

基于上述的缓存内容分类模型,DiffCache 算法同时考虑内容分类与网络特性,根据内容类别、路由节点本地流行度和内容等待时间计算出每个内容的缓存概率,由路由节点做概率缓存。算法通过给不同类别的内容以不同的缓存概率实现动态分配缓存资源,从而能更好地利用缓存资源满足不同服务的 QoS 需求。

在 DiffCache 算法中,每个内容 c 在路由节点 n 上的缓存概率 $P_{c,n}$ 由式(1)计算得出:

$$P_{c,n} = \begin{cases} 0, & c \in \{NC\} \\ \alpha \times d_c + \beta \times p_{c,n} + \gamma \times d_{c,n}, & c \in \{BE, LD\} \end{cases} \quad (1)$$

$$p_{c,n} = \min \left\{ \frac{C_{c,n}^{Count}}{T_{c,n}^{Threshold}}, 1 \right\} \quad (2)$$

$$d_{c,n} = \min \left\{ \frac{E_{c,n}^{EndTime} - S_{c,n}^{StartTime}}{T_{l,n}^{Threshold}}, 1 \right\} \quad (3)$$

其中,参数的含义与取值如下:

1) d_c 是内容在缓存内容分类模型中所属类别对应的数值,内容分类由源服务器在返回数据包时予以标记,类别对应数值由路由节点查询内容分类表获取。

2) $p_{c,n}$ 是内容 c 在路由节点 n 的本地流行度。路由节点 n 上配置有内容流行度阈值 $T_{p,n}^{Threshold}$,对不同类型的内容该阈值不同。当请求初次到达路由节点,即新建该请求的 PIT 表项时开始统计请求次数 $C_{c,n}^{Count}$,相同请求从各接口上每到达一次,请求次数加 1,直到内容得到响应。当内容 c 到达时,路由节点 n 通过式(2)确定 $p_{c,n}$ 。

3) $d_{c,n}$ 是节点 n 转发请求后等待内容 c 到达的等待时间。路由节点 n 上配置有内容等待时长阈值 $T_{l,n}^{Threshold}$,对不同类型的内容该阈值不同。当请求初次到达路由节点,即新建该请求的 PIT 表项时记录开始时间 $S_{c,n}^{StartTime}$,到内容到达路由节点时记录结束时间 $E_{c,n}^{EndTime}$,路由节点 n 通过式(3)确定 $d_{c,n}$ 。

4) α, β, γ 是对应项的权重因子,三者之和等于 1。

算法的实现需要在路由节点中增加内容分类表及在 PIT 表项中增加创建时间(记录 $S_{c,n}^{StartTime}$)、结束时间(记录 $E_{c,n}^{EndTime}$)和请求次数($C_{c,n}^{Count}$)。缓存类别权值表示例如表 3 所示, PIT 表示例如表 4 所示。

表 3 内容分类表示例
Table 3 Example of content classification representation

缓存内容类别	权值
NC	0.0
BE	0.5
LD	1.0

表 4 PIT 表示例
Table 4 Example of PIT representation

内容名字	到达接口	创建时间	结束时间	请求次数
/liveTV/video1.mpg	1 3	1 548 135 023	1 548 149 076	11
/liveTV/video2.mpg	1 2	1 548 149 174	1 548 156 432	5
/liveTV/showlist.html	2 3	1 548 149 248	1 548 237 666	30

下文用简单的示例介绍 DiffCache 缓存算法。如图 2 所示,多个用户设备以图示速率请求 NC、BE 和 LD 3 种内容(假设每种类型的内容数量为 1),路由节点 $R1$ 与 $R2$ 的链路时延是 20 ms, $R1$ 与源服务器的链路时延是 10 ms,设节点对不同类型内容的阈值均相同, $T_{p,n}^{Threshold} = 10$, $T_{l,n}^{Threshold} = 30$ ms, α, β, γ 的取值分别为 0.5、0.3、0.2,则可计算出在 $R2$ 上缓存内容 LD 的概率 $P_{LD,R2} = 0.5 \times 1 + 0.3 \times 6/10 + 0.2 \times \min \left\{ \frac{60}{30}, 1 \right\} = 0.88$,缓存内容 BE 的概率为 $P_{BE,R2} = 0.63$ 。在路由节点 $R1$ 上缓存内容 LD 的概率 $P_{LD,R1} = 0.69$,缓存内容 BE 的概率 $P_{BE,R1} = 0.44$ 。

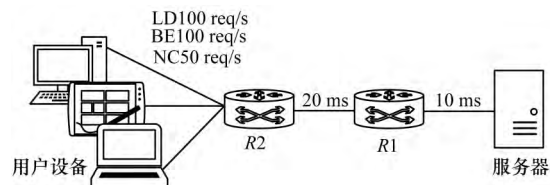


图 2 DiffCache 算法应用示例

Fig. 2 Example of DiffCache algorithm

当缓存内容分类模型的分类有扩展时,DiffCache 算法可通过调整内容类别的权值、本地内容流行度阈值 $T_{p,n}^{Threshold}$ 与内容等待时长阈值 $T_{l,n}^{Threshold}$,给予每类内容不同的缓存概率,从而实现动态缓存空间分配,更好地利用有限的缓存空间满足不同服务对延迟的 QoS 需求。

3 实验结果与分析

3.1 实验参数与设置

本文选用仿真平台 ndnSIM^[22] 验证缓存算法 DiffCache。实验环境:操作系统为 Ubuntu16.04 LTS,内存为 4 GB, CPU 为 Intel i5-4460 @ 3.20 GHz, ndnSIM 版本为 2.6。实验采用的拓扑结构是树状拓扑,树高度为 5 层,从根节点开始,每个节点随机生成 1 个 ~ 4 个叶子

节点 最终共有 96 个节点。根节点为源服务器, 58 个叶子节点为用户, 其余 37 个节点为路由节点。链路带宽为 10 Mb/s, 链路延迟为 10 ms。节点的内容请求速率均服从泊松分布, 请求速率 λ 为 10 req/s。类别为 NC 的内容流行度服从均匀分布, 即很少重复请求相同内容, 内容总数约为 1 200。类别为 BE 和 LD 的内容流行度服从 Zipf-mandelbrot 分布, Zipf 参数取值为 0.7, 每种类型的内容总数为 1 000。各路由节点的缓存大小相同, 且取值范围约为内容总数的 0.01 到 0.1, 即 20 个到 200 个。在 DiffCache 算法中, α 、 β 、 γ 的取值分别为 0.5、0.3 和 0.2; LD 类型内容的流行度阈值 $T_{p,n}^{\text{Threshold}}$ 为 30, 等待时长阈值 $T_{t,n}^{\text{Threshold}}$ 为 60 ms; BE 类型内容的流行度阈值 $T_{p,n}^{\text{Threshold}}$ 为 40, 等待时长阈值 $T_{t,n}^{\text{Threshold}}$ 为 80 ms。缓存替换算法采用 LRU(Least Recently Used)。实验时间为 120 s, 取 60 s 之后的数据进行统计。

由于文献 [20] 的缓存算法结合了相应的转发算法, 单独实验缓存算法进行比较的结果不准确, 文献 [21] 所提的算法涉及权重矩阵计算与反馈控制, 计算复杂, 不满足 NDN 中缓存需要快速执行的要求, 本文采用 NDN 中经典的缓存策略 LCE、LCD 和 Probability 作为对照组, 其中 Probability 设置的缓存概率为 0.7。

3.2 结果分析

图 3 和图 4 是 4 种缓存策略的路由节点平均命中率和内容下载时延。

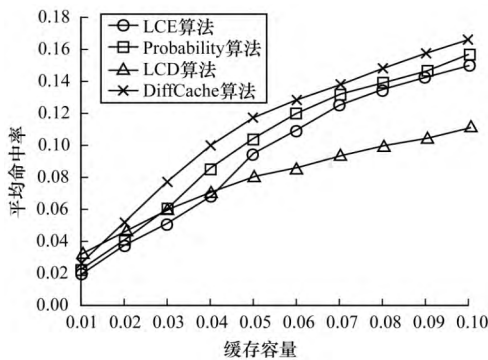


图 3 平均命中率随缓存容量的变化

Fig. 3 Average hit rate varying with cache capacity

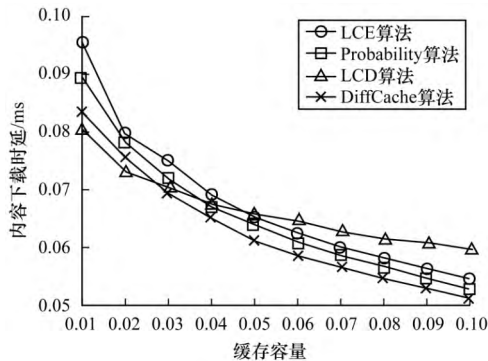


图 4 内容下载时延随缓存容量的变化

Fig. 4 Average download latency varying with cache capacity

从图中可以看到, 随着缓存空间的增加, 各算法的缓存命中率均增大, 内容下载时延减少, 其中 DiffCache 算法的命中率增幅达 7.34 倍, 下载时延减少约一半。由于 DiffCache 算法将缓存空间分配给了可重复利用的 LD 及 BE 类型内容, 因此即使少缓存了部分内容, 总体命中率与内容下载时延仍稍优于其余 3 种算法。在下载时延方面, 当缓存空间较小时, LCD 算法略优, 但是当缓存空间增大到内容总数的 0.03 时, DiffCache 表现逐渐优于 LCD 算法。当缓存空间为内容总数的 0.1 时, DiffCache 算法对比 LCD 算法减少了 15.38%, 这是由于 DiffCache 算法优先缓存下载延时大的内容, 能更快地将下载时间长的内容缓存在边缘节点, 而 LCD 算法可能由于内容替换过快, 使得内容难以移动到用户附近。

图 5 和图 6 是 LD 类型内容的缓存命中率与下载时延, 图 7 和图 8 是 BE 类型内容的缓存命中率和下载时延, 可以看到 2 种类型内容的评价指标均好于另外 3 种算法, 且 LD 和 BE 类型在内容评价指标上有明显区分, 当缓存空间较小时, LD 类型内容的命中率比 BE 类型约高 8.77%, 下载时延比 BE 类型减少了约 11.43%。随着缓存空间的增大, 不同类型的内容间的命中率及下载时延区分更明显。图 9 和图 10 是在实验过程中 LD 类型及 BE 类型在路由节点的缓存中所占比例。

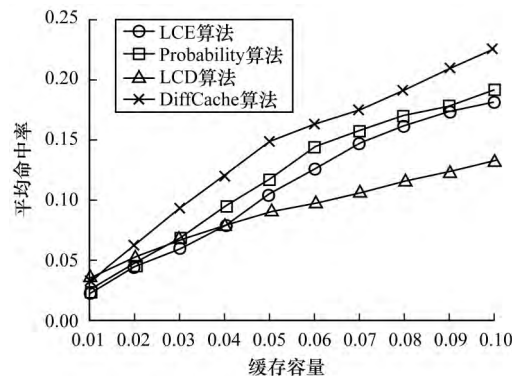


图 5 LD 类型平均命中率随缓存容量的变化

Fig. 5 Average hit rate of LD types varying with cache capacity

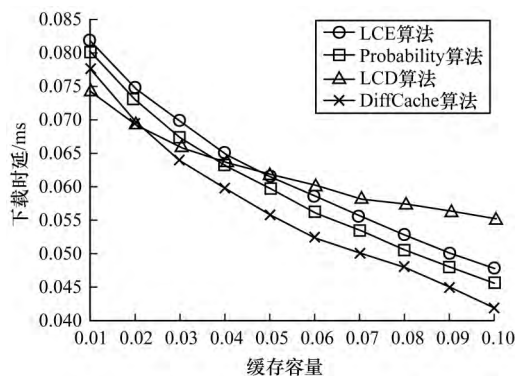


图 6 LD 类型下载时延随缓存容量的变化

Fig. 6 Download latency of LD types varying with cache capacity

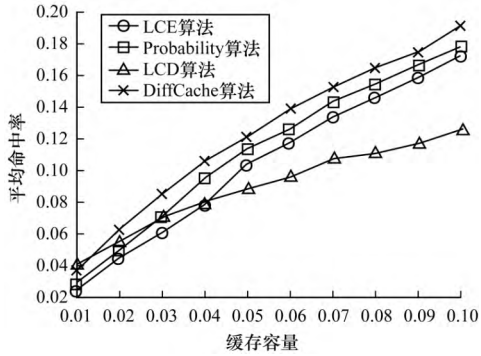


图 7 BE 类型平均命中率随缓存容量的变化
Fig.7 Average hit rate of BE types varying with cache capacity

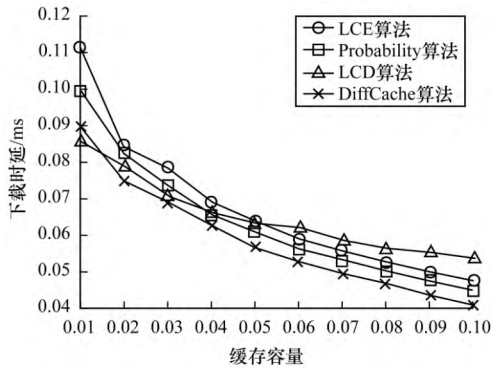


图 8 BE 类型下载时延随缓存容量的变化
Fig.8 Download latency of BE types varying with cache capacity

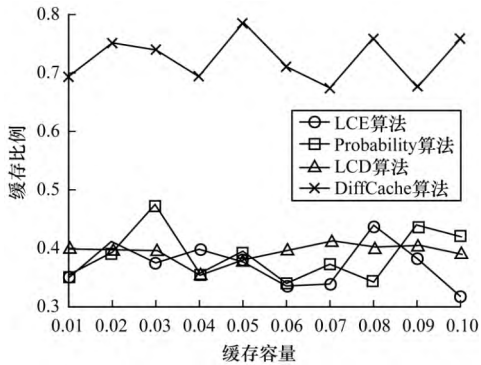


图 9 缓存中的 LD 类型占比
Fig.9 Proportion of LD types in cache

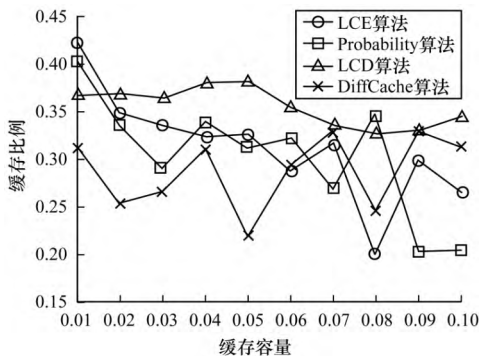


图 10 缓存中的 BE 类型占比
Fig.10 Proportion of BE types in cache

在 DiffCache 算法中 LD 类型的内容缓存所占比例约为 71.2% , BE 类型的内容缓存所占比例约为 28.8% , 与其他 3 种算法相比 , DiffCache 实现了在不同类型的内容间动态分配缓存。

本文通过简化 Diffserv 模型的服务分类 , 建立一个新的缓存内容分类模型 , 根据 NDN 上不同内容的流量特征及其服务的 QoS 要求 , 将内容分为无需缓存 (No Cache , NC) 、尽力而为 (Best Effort , BE) 及减少延迟 (Less Delay , LD) 类。然后 , 提出区分服务的概率缓存算法 DiffCache , 即对这 3 类内容根据内容提供商的推荐分类、路由器本地流行度及内容等待响应时间计算出不同缓存概率 , 路由节点对到达的内容做概率缓存。该算法同时考虑内容分类和网络特性 , 实现了缓存资源的动态分配 , 使不同类型的内容具有不同的缓存命中率及下载时延 , 从而能更好地利用缓存资源满足不同服务的 QoS 需求 , 且算法复杂度低 , 执行速度快 , 扩展性好。

4 结束语

本文借鉴 IP 网络中区分服务的 Diffserv 模型 , 提出一个用于 NDN 的缓存内容分类模型 , 并基于该模型设计分类缓存算法 DiffCache。该算法同时考虑内容分类和网络特性 , 结合内容提供商指定的分类、路由节点统计的本地流行度及路由节点记录的下载时间 , 对每个到达路由节点的内容分配不同的缓存概率。仿真结果表明 , 与经典 NDN 缓存算法相比 , DiffCache 算法在不影响全局命中率和内容下载延时的情况下 , 能准确区分每种内容类型的性能指标表现 , 从而能更好地利用缓存资源满足不同服务对于延迟的 QoS 需求。本文的缓存内容模型只是简单地将缓存内容分为 3 类 , 下一步将研究更精细的缓存内容分类模型 , 以更好地适应网络变化的情况。

参考文献

- [1] VNI Cisco. Cisco visual networking index: forecast and methodology 2017-2022 white paper [EB/OL]. [2018-11-26]. <https://www.useit.com.cn/thread-21421-1-1.html>.
- [2] AHLGREN B , DANNEWITZ C , IMBRWANDA C , et al. A survey of information-centric networking [J]. IEEE Communications Magazine 2012 50(7) : 26-36.
- [3] ZHANG L , AFANASYEV A , BURKE J , et al. Named data networking [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review 2014 44(3) : 66-73.
- [4] DIN I U , HASSAN S , KHAN M K , et al. Caching in information-centric networking: strategies , challenges , and future research directions [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials 2018 20(2) : 1443-1474.
- [5] ZHANG Tiankui , SHAN Siyang , XU Xiaogeng , et al. Survey on caching techniques of information centric networking [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications 2016 39(3) : 1-15. (in Chinese)

- 张天魁,单思洋,许晓耕,等.信息中心网络缓存技术研究综述[J].北京邮电大学学报,2016,39(3):1-15.
- [6] JACOBSON V, SMETTERS D K, THORNTON J D, et al. Networking named content [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York, USA: ACM Press, 2009: 1-12.
- [7] LAOUTARIS N, CHE H, STAVRAKAKIS I. The LCD interconnection of LRU caches and its analysis [J]. Performance Evaluation, 2006, 63(7): 609-634.
- [8] TARNOI S, SUKSOMBOON K, KUMWILAISAK W, et al. Performance of probabilistic caching and cache replacement policies for content-centric networks [C]//Proceedings of the 39th Conference on Local Computer Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 99-106.
- [9] HUANG Sheng, CHEN Shenglan, TENG Mingnian, et al. A dynamical probability caching policy based on response time of data in named data networking [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(2): 271-274. (in Chinese)
黄胜,陈胜蓝,滕明隄,等. NDN中一种基于数据响应时间的动态概率存储策略[J].小型微型计算机系统, 2015, 36(2): 271-274.
- [10] WU HaiBo, LI Jun, ZHI Jiang. Probability-based heuristic content placement method for ICN caching [J]. Journal on Communications, 2016, 37(5): 62-72. (in Chinese)
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.
- [11] ZHANG Guoyin. An optimal cache placement strategy based on content popularity in content centric network [J]. Journal of Information and Computational Science, 2014, 11(8): 2759-2769.
- [12] BANERJEE B, KULKARNI A, SEETHARAM A. Greedy caching: an optimized content placement strategy for information-centric networks [J]. Computer Networks, 2018, 140: 78-91.
- [13] CAROFIGLIO G, MEKINDA L, MUSCARIELLO L. LAC: introducing latency-aware caching in information-centric networks [C]//Proceedings of the 40th Conference on Local Computer Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 422-425.
- [14] YOKOTA K, SUGIYAMA K, KURIHARA J, et al. RTT-based caching policies to improve user-centric performance in CCN [C]//Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 124-131.
- [15] JANUSZ G, JAJSZCZTK A, STANKIEWICZ R. Quality of service terminology in IP networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3): 153-159.
- [16] LIN Na, GUAN Xueming. Dynamic Resource Management in DiffServ Network [J]. Computer Engineering, 2009, 35(18): 67-68. (in Chinese)
林娜,关学铭.区分服务网络中的动态资源管理[J].计算机工程, 2009, 35(18): 67-68.
- [17] LONG Keping, BAI Gang, CHENG Shiduan, et al. Implementing mechanisms and TCP performance in diffServ capable IP networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(11): 1540-1545, 1548. (in Chinese)
隆克平,白刚,程时端,等.区分服务结构及其TCP性能分析[J].电子学报, 2001, 29(11): 1540-1545, 1548.
- [18] BLAKE S, BLACK D, CATLSON M A. An architecture for differentiated services [EB/OL]. [2018-12-21]. <http://tools.ietf.org/html/rfc2475>.
- [19] BABIARZ J, CHAN K. Configuration guidelines for diffServ service classes [EB/OL]. [2018-12-21]. <http://tools.ietf.org/html/rfc4595>.
- [20] KIM Y, BI J. Differentiated forwarding and caching in named-data networking [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 60: 155-169.
- [21] HUO Rui, XIE Renchao, ZHANG Hengyang, et al. What to cache: differentiated caching resource allocation and management in information-centric networking [J]. China Communications, 2016, 13(12): 261-276.
- [22] MASTORAKIS S, AFANASYEV A, ZHANG L. On the evolution of ndnSIM: an open-source simulator for NDN experimentation [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2017, 47(3): 19-33.

编辑 索书志

(上接第171页)

- [11] PAPPAS N, KOUNTOURIS M, JEON J, et al. Network-level cooperation in energy harvesting wireless networks [C]//Proceedings of Global Conference on Signal and Information Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 383-386.
- [12] KURS A, KARALIS A. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [13] MORRIS K. Highly resonant wireless power transfer: safe, efficient, and over distance [EB/OL]. [2018-09-15]. <http://www.witricity.com/pdfs/highly-resonant-power-transfer-kesler-witricity-2013.pdf>.
- [14] KHRIPKOV A, HONG W, PAVLOV K. Integrated resonant structure for simultaneous wireless power transfer and data telemetry [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 1659-1662.
- [15] SHI Lei, HAN Jianghong, HAN Dong, et al. The dynamic routing algorithm for renewable wireless sensor networks with wireless power transfer [J]. International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2014, 74: 34-52.
- [16] JIANG Wenxian, MIAO Haixing, WANG Tian, et al. Delay-constrained mobile energy charging in wireless sensor networks [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1216-1223. (in Chinese)
蒋文贤,穆海星,王田,等.时延受限的无线传感网中移动式能量补充[J].西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1216-1223.

编辑 陆燕菲