

内容中心网络中基于差异化缓存通告的混合路由机制

葛国栋* 郭云飞 刘彩霞 兰巨龙

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

摘要: 针对内容中心网络(CCN)节点暂态缓存的高效利用问题,将数据场的思想引入到CCN转发决策中,该文提出一种基于差异化缓存通告的混合路由机制。缓存通告时,依据内容活跃等级和缓存驻留概率,执行差异化的内容通告和势能辐射;路由查找时,针对“持久稳定”的内容源和“动态可变”的临时缓存副本,分别构建全局导向和局域吸引势能辐射场,实现兴趣包请求的全局路由和局部就近应答。仿真结果表明,该机制减小了内容请求时延,提高了缓存命中率,以少量额外的开销提升了CCN网络整体的内容分发性能。

关键词: 内容中心网络; 数据场; 缓存策略; 内容路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)03-0700-08

DOI: 10.11999/JEIT140527

A Hybrid Routing Scheme Based on Differentiated Cache Advertisement in Content Centric Networking

Ge Guo-dong Guo Yun-fei Liu Cai-xia Lan Ju-long

(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: How to efficiently utilize the temporary cached replicas poses challenges to the retrieval process of Content Centric Networking (CCN). Inspired by the idea of data fields, a hybrid routing scheme based on differentiated cache advertisement is proposed. In the scheme, depending on the content popularity and resident probability, the differentiated advertisement strategy is performed to choose the advertised content and calculate the attracting potential. When a retrieve is requested, in order to realize global routing and local response to the content request, the globally oriented potential field and locally attracting potential field are constructed for the stable original content source and volatile cached copies, respectively. The simulation results show that the scheme can decrease the request latency, increase the cache hit ratio, while improving the overall performance of content delivery with a small amount of additional overhead.

Key words: Content Centric Networking (CCN); Data field; Caching strategy; Content-based routing

1 引言

随着互联网技术与应用的飞速发展,“宽带化”、“内容化”与“个性化”已经成为网络发展的主旋律,人们对于数据内容的需求日益强烈,网络应用的主体逐步向内容请求和信息服务演进转移^[1]。据Cisco VNI Mobile Forecast预测,到2014年互联网上所有内容相关的流量将占据超过97.5%的份额,传统以主机为中心的网络体系结构难以满足当前网络信息服务的发展要求。为了适应网络不断增长的数据内容访问需求,信息中心网络(Information-Centric Networking, ICN)^[2]作为一种革命式的未来互联网设计思路,让数据内容本身成为网络通信的

主体单元,将网络通信模式从关注“在哪”(地址、服务器)转变为关注“是什么”,即用户和应用通信的目的和意向,成为未来Internet设计的重要模式。其中,内容中心网络(Content Centric Networking, CCN)^[2]作为典型的ICN结构范例,在中间层用命名数据取代IP,数据传输采用“发布-请求-响应”模式,直接以内容名字进行路由,成为下一代Internet体系结构的研究热点。

在CCN设计中,采用网络内在普遍缓存(in-network Caching)的方式,在兴趣包(interest packet)沿途转发路径(on-path)所有节点上缓存应答内容,使得网络不仅是一个传输体,更是一个内容存储、服务平台。在路由转发中,当节点收到兴趣包后,依据内容名字依次在内容存储器(Content Store, CS),未决请求表(Pending Interest Table, PIT)和转发信息库(Forwarding Information Base, FIB)中进行匹配查询^[3]。应答数据包(data packet)携带请求

2014-04-22收到,2014-06-13改回

国家973计划项目(2012CB315901, 2013CB329104),国家自然科学基金(61372121)和国家863计划项目(2011AA01A103)资助课题

*通信作者: 葛国栋 gg@ndsc.com.cn

内容,依据节点 PIT 表项记录,沿相同路径进行反向传输。

对于 CCN 网络,如何在合理的代价开销下,增大节点临时缓存内容的可用性,提升缓存资源利用率,是发挥 CCN 网络内容普遍缓存优势的关键。但是,CCN 只针对稳定持久的内容源建立了路由条目,并没有考虑局域节点的暂态缓存内容,具体体现在:(1)缓存内容的可用性只局限于目标存储节点,邻近节点无法感知局部已有的缓存内容^[4];(2)路由查找时,只实现了沿途传输路径上内容副本的感知,对于传输路径以外大量的就近缓存资源无法加以利用。

2 问题分析

在 CCN 中,当沿途节点缓存了应答数据包携带的请求内容后,将面临以下两个问题:(1)如何设定临时缓存内容的可用范围,是只在沿途路径可用、还是限制在局域范围、或者向网络全局进行通告;(2)后续如何发现这些缓存资源,即缓存内容的路由查找。在缓存通告时,如果不加限制地将节点所有内容向网络全局进行通告,虽然增大了缓存资源的可用范围,但是会引入大量的额外开销,而且海量缓存信息的存储会使已有的可扩展性问题更加突出。同时,由于缓存内容的动态替换更新,缓存信息的一致性难以保持,增大了路由查找的错误率;相反,如果只将缓存内容的可用性限制在目标存储节点,虽然不会引入额外的报文通告和计算开销,却无法有效利用节点的缓存内容,限制了缓存资源后续利用率。

文献[5]对于节点缓存利用的必要性和可行性进行了分析,指出在控制平面的路由决策中,必须结合节点的暂态缓存;文献[6]提出了一种命名数据网络(Named Data Networking, NDN)的路由缓存策略(Neighbor Cache Explore routing strategy, NCE),通过发送探测报文获取指定邻居范围内的缓

存内容,实现局部缓存资源利用;文献[7]提出了一种基于势能的目标识别路由方法(Cache Aware Target identification, CATT),将节点存储的内容副本进行局部范围通告,实现缓存资源的可用性;文献[8]为了利用网络中可用的内容资源,对稳定内容源建立路由表,采用确定性的路由转发方式。对于未知的节点缓存内容采用泛洪式的 exploration 探测方法进行发现;文献[9]为了实现缓存资源的可用性,对比了主动通告和被动服务两种模式的优劣,提出了一种基于流行度的主动通告策略。

以上方案的不足之处主要体现在:(1)不加选择地将节点缓存内容全部进行通告,不但加剧 FIB 表项的扩展性问题,通告内容的可用性也无法保证;(2)在缓存资源利用时,探测或通告范围是固定不变的,没有结合缓存内容的差异化特征来区分对待;(3)路由查找独立决策,缺乏对局域缓存资源的考虑。为此,在 CCN 中提出了一种基于差异化缓存通告的混合路由机制(a Hybrid Routing scheme based on Differentiated Cache Advertisement, HRDCA)。依据内容源“持久稳定”和临时缓存内容“动态可变”的差异化特征,结合数据场^[10]的思想,对于稳定内容源构建全局导向的长程势能场,实现请求兴趣包的全局路由;对于动态的临时缓存副本建立局域吸引的短程辐射场,对于内容请求进行局部吸引,提升缓存内容整体利用率。

3 基于差异化通告的混合路由机制

图 1 给出了 HRDCA 的基本工作流程。主要包括:(1)差异化缓存通告;(2)多样化内容存储;(3)混合式路由查找 3 个部分。当节点接收到兴趣包后,首先查询 CS 和 PIT 表项,当没有对应的缓存内容和请求条目时,依据 HRDCA 的混合路由查找策略进行兴趣包转发。当下行数据包携带应答内容返回时,执行局域的多样化内容存储策略,减小缓存冗余,增大缓存通告内容的有效性。

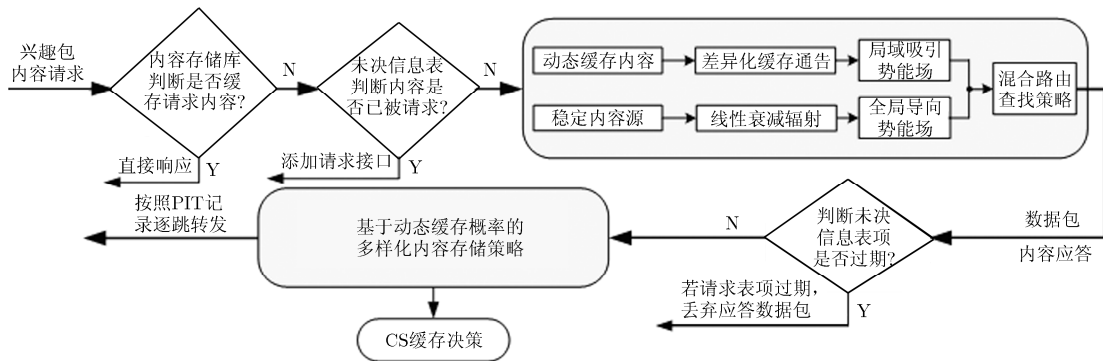


图1 HRDCA 基本工作流程

3.1 差异化缓存通告

由于网络中内容数量巨大,加之缓存内容的“动态挥发”特性,随时可能被替换淘汰。如果将节点所有缓存内容向网络不加限制地盲目进行洪泛通告,势必会引入大量的缓存通告和存储代价开销,而且通告内容的可用性也无法得以保证。特别是对于一些流行程度低的冷门缓存资源,由于其请求频度很低,在节点上的驻留时间很短,反而会引入较大的缓存缺失概率,导致兴趣包重发,增大了内容请求时延。为此,在局域吸引势能场建立时,需要对不同缓存内容执行差异化通告,针对性的选取目标通告内容,差异化的设置内容辐射范围,减小局域辐射引入的额外通告和存储开销,增大通告内容的可用性。

3.1.1 通告内容选取 在通告内容选择方面,需要结合不同缓存内容的差异化特性,一方面提升通告内容的持久性和可用性,同时尽量减小额外产生的通告开销。由于内容请求的幂律分布特征^[1](Zipf 或 Mandelbrot-Zipf 分布),大部分内容请求都集中在少数流行资源上,即 80%的内容请求只与 20%的内容相关。内容的流行程度越大,请求频率越高,在节点缓存中的驻留概率越大,对应的缓存时间越长。为此,依据内容流行度大小,只选取缓存内容中的流行资源进行局域通告,建立局域吸引势能,增大通告内容的可用性。在 HRDCA 中,依据内容请求的累加概率分布($\sum p(i)$)函数,将节点缓存内容划分为不同活跃等级,执行不同的缓存通告决策。第 1 等级记为“hot”等级,定义为最活跃热门内容,在缓存通告时,其可用性将得到优先保证;第 3 等级为“cold”等级,定义为不活跃的冷门内容,不进行局域缓存通告,减小额外通告开销;其余内容划分为第 2 “warm”等级,主要为中间活跃内容。当内容总数 $N=10000$, Zipf 指数 $\alpha=1.0$ 时,前 75 项内容请求的累加概率就达到 0.5,划分为“hot”等级;第 76 项到第 1411 项内容请求的累加概率达到了 0.8,为“warm”等级;其余内容(1412-10000)划分为“cold”等级。而且,随着 Zipf 指数 α 的增大,第 1 和第 2 等级包含的内容对象会更加集中,大量的“cold”等级内容将不执行局域通告,有效减小了缓存通告数量和额外开销。

3.1.2 辐射范围设置 在辐射范围设置方面,结合内容请求分布的局域性特征,将内容的通告范围限制在有限的局域跳数之内,减小内容通告产生的报文开销。在 HRDCA 中,依据缓存内容所属的活跃等级,执行差异化的区分通告,对于不同活跃等级的内容设置不同的辐射范围。缓存内容的活跃等级越

高,驻留时间越长,对应的通告范围越大。对于第 1 等级内容,取较大的通告范围,例如 3 跳;对于第 3 等级内容,不进行通告,辐射范围为 0;对于第 2 等级内容,取较小的通告区域,例如 1 跳邻居范围。当内容总数 $N=10000$, Zipf 指数 $\alpha=1.0$ 时,HRDCA 只对流行程度最大的前 75 项内容进行局域大范围通告,大量非流行的冷门资源(1412-10000)辐射范围将设置为 0。图 2 给出了缓存内容通告报文(Cache Advertisement Packet, CAP)的具体格式。



图 2 缓存内容通告报文 CAP

其中,报文类型字段表示报文类型,时间戳字段用来记录报文的发送时间。CAP 可以一次通告多个内容副本,并且为不同内容设置不同的通告范围,每通告一跳,通告范围减 1,直到为 0 结束。

3.2 多样化内容缓存

在 CCN 中,采用的是沿途全部缓存方式,应答内容在沿途路径上所有节点都将进行存储,致使节点缓存内容趋于同质化,导致大量缓存冗余。节点存储内容的同质化,将大大降低差异化缓存通告的必要性,因为相同内容的互相冗余通告不会带来任何收益。为此,为了保证内容通告的有效性,减小缓存冗余,增大局域内容存储的多样性,提出了一种基于动态缓存概率的局域多样化内容存储策略。

(1)内容请求:内容请求者 v_c 发送兴趣包请求,通过兴趣包逐跳地上行传输,依次记录并更新传输路径长度 l ,每当兴趣包到达下一跳节点,传输跳数加 1。最终,当兴趣包到达内容提供者 v_p 后, l 记录的就是沿途节点的个数,即传输路径长度。

(2)数据应答:当 v_p 发送数据包进行应答时,依据 l 首先计算沿途节点的初始缓存概率: $p=1/l$ 。当数据包到达第 1 跳节点时,首先检查:(a)该节点 CS 是否包含该应答内容;(b)该节点是否处于其他邻居节点的通告辐射范围,即存储了该应答内容的缓存通告信息。若条件(a)和条件(b)任一项成立,直

接进行数据包下行转发,在该节点不执行内容存储。若不成立,将以概率 p 随机决定在该节点是否缓存内容。如果缓存,将 p 重置为 0,避免后续节点的冗余存储;否则, p 将不断累加更新: $p = p + 1/l$,以增大后续节点的缓存概率。随着数据包逐跳的下行传输,节点的缓存概率将不断增大。同时,通过判断条件(a)和条件(b)的成立,避免了应答内容的冗余重复缓存,增大了缓存通告的有效性。表 1 给出了算法的具体流程。

表 1 基于动态缓存概率的局域多样化内容存储策略

初始化: 内容名字(C), $l = 0, p = 0$
内容请求过程: 发送内容请求
(1) foreach (对于兴趣包上行请求的沿途节点 v_n)
(2) if CS 包含请求内容 C then
(3) 发送数据包直接进行响应;
(4) else $l = l + 1$;
(5) 按照 FIB 表项执行兴趣包下一跳路由转发;
数据响应过程: 接收内容应答
(6) 计算节点缓存概率 $p = 1/l$;
(7) 依据 PIT 表项的逐跳记录发送数据包进行响应;
(8) foreach (对于数据包下行响应的沿途节点 v_n)
(9) if ((CS 包含请求内容 C) (节点存储缓存通告信息)) then
(10) v_n 不执行内容存储;
(11) 直接依据 PIT 表项执行数据包下行转发;
(12) $p = p + 1/l$;
(13) else 依据 p 确定节点 v_n 是否缓存内容;
(14) if v_n 缓存应答内容 C then
(15) $p = 0$, 按照 PIT 执行数据包下行转发;
(16) else $p = p + 1/l$, 按照 PIT 执行数据包下行转发;

3.3 混合路由查找

图 3 给出 HRDCA 的路由查找过程。当节点接收到内容请求后,首先确定在该节点周围是否存在局部吸引势能。如果存在就近缓存内容,则依据最大的局域吸引势能确定下一跳转发节点,实现内容请求的就近应答。若节点周围不存在临时缓存内容的辐射,按照全局导向势能场执行兴趣包的下一跳转发。

3.3.1 全局导向 将内容源中存储的内容对象看作是稳定的点电荷,由于内容源相比临时缓存内容,稳定性高,可用性可长久保证。为此,对于稳定内容源,构建全局导向长程势能场。在前向转发表 FIB 中,添加势能信息选项(Potential Information Field, PIF),当节点接收到内容源通告报文时,在 PIF 中添加接口对应的势能值大小。由于数据源稳定性高,

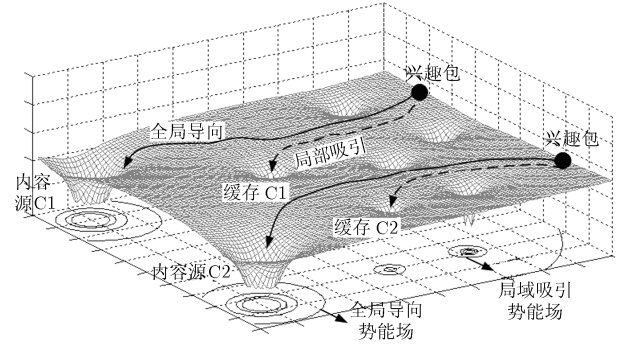


图 3 混合路由查找过程

FIB 中的势能导向信息无需进行频繁更新。势能值的大小可以依据内容通告报文传输的路由跳数来计算,随着路由跳数的增加线性衰减。对于内容 C,在节点 v_i 处的全局导向势能值为

$$Q(v_i) = -\frac{Q_C}{\text{dist}(v_i, v_p)} \quad (1)$$

其中, v_p 为内容源节点, Q_C 为初始势能导向值, $\text{dist}(v_i, v_p)$ 为 v_i 与 v_p 的之间的路由跳数。

3.3.2 局域吸引

(1)吸引势能计算: 由于临时缓存内容的动态更新特性,随时可以被替换淘汰,不适于建立全局的导向势能场。为此,结合 2.1 节提出的差异化缓存通告,对于节点缓存内容建立局部辐射的短程势能场,并采用具有快速衰减特性的高斯势函数^[10]来计算局部吸引势能。在高斯势函数中,任一场点 x 处的势能值为

$$\psi(x) = m_i \cdot e^{-\frac{\|x - x_i\|^2}{\sigma^2}} \quad (2)$$

其中, $\|x - x_i\|$ 为对象 x_i 到场点 x 的网络距离, m_i 为对象 x_i 的质量, σ 为影响因子,用于控制节点的力程。HRDCA 中,将每个缓存内容看作是具有固定电荷的动态质点,各缓存内容质量 m_i 相等(设为单位质量 1),并依据缓存内容在节点上的驻留概率(P_{reside})来确定内容的辐射强度。缓存内容在节点上的驻留概率越大,缓存内容的可用性越能得到保证,对应的局域吸引力越强。为此,将驻留概率 P_{reside} 作为影响因子 σ ,计算缓存内容的局域吸引势能。节点 v_c 上的缓存内容在 v_n 处产生的吸引势能值大小为

$$\psi(v_n) = \begin{cases} \psi(v_n) = 1, & v_n = v_c \\ \psi(v_n) = e^{-\frac{\|v_n - v_c\|^2}{P_{\text{reside}}}}, & v_n \neq v_c \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\|v_n - v_c\|$ 表示节点间的距离,以路由跳数计算。文献[12]基于马尔科夫模型推导了 CCN 网络节点缓存缺失概率: $\pi_{N+1} = (\mu/(\lambda + \mu))^N$ 。其中, λ 为内容请求到达率, μ 为缓存内容位置下降率, N 为节点的存储空间。则缓存内容在节点上的驻留概率

为 $P_{\text{reside}} = \sum_{i=1}^N \pi_i = 1 - \pi_{N+1}$ 。

(2)转发接口选择: 对于特定内容对象, 在局部范围可能存在多个缓存副本, 分布在不同的存储节点上, 不妨设为 k 个, 对应的缓存节点集合为 $V(C) = \{v_c^1, v_c^2, \dots, v_c^k\}$ 。这 k 个缓存内容都将在节点 v_n 产生吸引势能 $\psi(v_n)$, 记为 $\psi(v_n) = \{\psi(v_n^1), \psi(v_n^2), \dots, \psi(v_n^k)\}$ 。当 v_n 接收到兴趣包后, 由于 v_n 同时处于多个缓存内容的局域吸引场中, 为了提升目标缓存内容的可用性, 增大缓存命中率, 选择驻留概率最大的通告内容作为转发目标。 v_n 在 $\psi(v_n)$ 中选择最大局域吸引势能对应的邻居接口($\text{neighbor}(v_n)$)转发内容请求, 确定下一跳路由节点 v_{next} :

$$v_{\text{next}} = \max \{ \psi(v_n) \mid v_{\text{next}} \in \text{neighbor}(v_n) \} \quad (4)$$

4 仿真及性能分析

4.1 仿真环境与参数设置

采用 ndnSIM^[13]进行仿真与性能分析, 该工具对于 CCN 基本数据单元结构和路由转发流程均已实现, 并提供了开放的源码和运行实例。在 GT-ITM 下采用 Locality 模型生成 30 个路由节点的平面网络拓扑。网络中内容对象总数 N 为 10000 个, 大小设为 10 kByte。节点缓存容量一致, CS 均设为 100, 链路带宽 100 Mbit/s。在网络中设置 2 个内容服务器, 负责内容对象的存储和发布, 各服务器随机存储 5000 个内容。其余节点作为用户接入节点, 发布内容请求, 内容请求到达服从 $\lambda=50$ 个/s 的泊松过程^[13], 请求概率服从 Zipf 分布^[11], 第 i 个内容的请求概率为: $p(i) = C/i^\alpha$, $C = \left(\sum_i \frac{1}{i^\alpha} \right)^{-1}$ 。仿真时间设为 200 s, $Q_C=1$, 初始节点缓存状态为空, 无任何内容副本存储, 缓存替换策略为最近最少使用策略 (Least Recently Used, LRU)。HRDCA 中, 依据内容请求的累加概率 ($\sum p(i)$) 来划分内容活跃等级, 将累加概率到达 0.5 时包含的内容对象划分为第 1 等级热门内容, 0.5~0.8 区间包含的内容划分为第 2 等级, 其余内容为第 3 “cold” 等级, 各等级内容对应的辐射范围设为 (h, w, c) 。

4.2 性能分析

将本文提出的 HRDCA 与文献[2] CCN, 文献[6] NCE 和文献[7] CATT 进行对比分析, 性能评价指标包括: 平均请求时延 (Average Request Delay, ARD), 缓存命中率 (Cache Hit Ratio, CHR) 以及额外开销对比。

4.2.1 平均请求时延 平均请求时延 ARD: 节点发送请求兴趣包到接收到应答数据包之间的平均延迟。图 4 分别给出了 $\alpha=1.0$, $h=2, w=1, c=0$ 和 $\alpha=1.2$, $h=3, w=2, c=0$ 时, 各方案的 ARD 对比,

采样时间间隔 T 和缓存内容通告间隔 T_A 设为 2 s, NCE 的探测范围 Scope 和 CATT 内容通告范围 m 设为 2 跳。仿真初始阶段, 由于网络所有节点存储状态为空, 发送的兴趣包请求都需要转发至内容服务器进行响应, ARD 较大。随着内容的不断存储, 缓存内容的响应概率逐渐增加, ARD 随之减小。

在 CCN 中, 内容请求只能利用沿途路径上的缓存资源, 对于沿途路径以外的局域缓存内容无法加以利用, ARD 明显大于其他方案; 对于 NCE 和 CATT, 在缓存资源探测和内容通告决策时, 缺乏对于缓存内容差异化特征的考虑, 无法保证通告内容的可用性, 增大了缓存内容缺失概率, 缺失内容需要重新进行路由转发, 导致 ARD 增大; 对于 HRDCA, 依据缓存内容的活跃度和驻留概率来选取目标通告内容、设定内容辐射范围, 实现缓存内容的差异化通告和辐射, 提升了局域缓存资源的可用性, 使兴趣包请求尽可能在局部实现就近应答, ARD 最小。

4.2.2 缓存命中率 缓存命中率 CHR: 网络中节点缓存内容响应兴趣包请求的概率。图 5 分别给出了 $\alpha=1.0, h=2, w=1, c=0$ 和 $\alpha=1.2, h=3, w=2, c=0$ 时, 整个仿真时间 $T=200$ s 内, 各方案的 CHR 对比。由于 CCN 和 NCE 采用的是沿途全部缓存方式, 应答内容的重复冗余存储将导致缓存内容的频繁替换, 降低了缓存驻留概率和利用率。对于 NCE 和 CATT, 不加选择地盲目式内容通告, 无法保证通告内容的有效性。特别是对于大量非流行通告资源, 由于驻留时间过短, 加剧了缓存查找缺失概率; HRDCA 按照内容的活跃等级, 选取通告目标内容, 确定辐射范围, 有效地保证了通告内容的有效性, CHR 分别达到了 0.421 和 0.502。

4.2.3 代价开销对比 相比 CCN, NCE, CATT 和 HRDCA, 为了实现局域缓存资源的利用, 都不同程度地引入了额外代价开销, 主要包括缓存通告开销, 节点存储开销, 下面对 HRDCA 开销进行定量分析。

(1)缓存通告开销(C_A): 在局域吸引势能场构建时, 缓存内容通告引入的开销, 定义为缓存通告报文 CAP 与其传输距离的乘积, 大小取决于 CAP 报文长度、通告频率和路由传输跳数, 代价单位取数据大小(bit)与传输跳数(hop)的乘积。单位时间内缓存通告开销 C_A 为

$$C_A = f_{\text{CAP}} \cdot \sum (S_{\text{CAP}}^1 \cdot d_1 + S_{\text{CAP}}^2 \cdot d_2 + \dots + S_{\text{CAP}}^{\text{max}} \cdot d_{\text{max}}) \quad (5)$$

其中, f_{CAP} 为 CAP 通告频率, max 表示缓存内容的最大辐射范围。 S_{CAP}^1 表示首跳缓存通告消息长度,

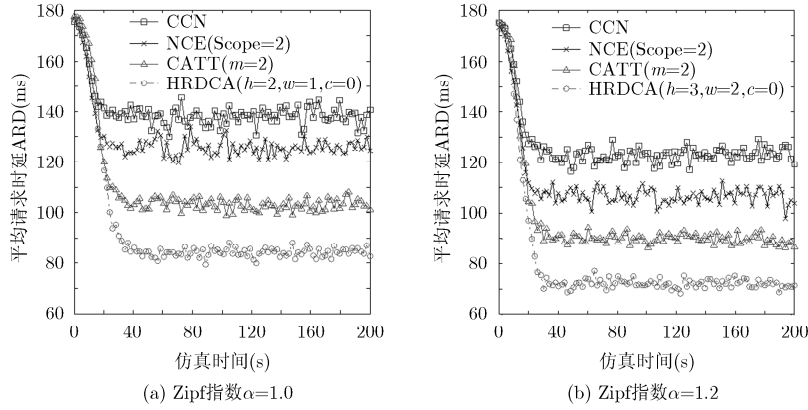


图4 平均请求时延 ARD 对比

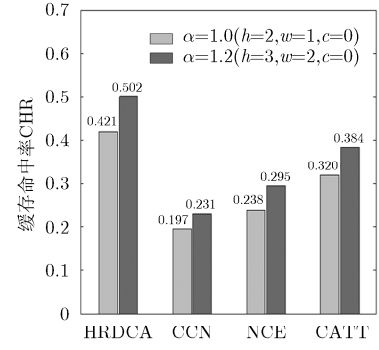


图5 缓存命中率 CHR 对比

d_1 为通告跳数。当邻居节点接收到 S_{CAP}^1 后, 将通告范围(Scope)减 1, 并删除通告范围为 0 的内容信息, 得到第 2 跳缓存通告消息的长度 S_{CAP}^2 , d_2 为对应的路由跳数。依次类推, 直到 CAP 中通告范围全部为 0 结束。

(2)节点存储开销(C_C): 在 HRDCA 中, 相比 CCN 方案, 在建立局域吸引势能场时, 当节点接收到 CAP 报文后, 需要记录相应的内容名字, 到达接口信息, 以及每个接口对应的吸引势能值大小, 引入了额外的存储代价。其大小取决于存储的内容名字、接口信息和势能值的长度和数量, 代价单位为 bit。

$$C_C = \sum_{i=1}^l \left\{ L_i^n + \left[\sum_{j=1}^m \left(L_{i,j}^f + \sum_{k=1}^n L_{i,j,k}^p \right) \right] \right\} \quad (6)$$

其中, L^n , L^f 和 L^p 分别表示内容名字、接口信息和吸引势能值的长度, l, m, n 分别为对应的存储数量。

(3)内容请求开销(C_R): 定义为内容请求过程中, 兴趣包和数据包分别与其传输距离的乘积之和, 大小主要取决于内容请求传输的路由跳数, 代价单位为数据大小(bit)与传输跳数(hop)的乘积。

$$C_R = (S_{\text{int}} + S_{\text{dat}}) \cdot d \quad (7)$$

其中, $S_{\text{int}}, S_{\text{dat}}$ 分别表示内容请求和数据应答报文长度, d 为对应的路由传输跳数。

表 2 给出了 $\alpha=1.0$, NCE 的探测范围和 CATT

内容通告范围 m 取值为 2 跳时, 各方案的代价开销对比。在 CCN 中没有相应的局域缓存内容发现机制, 所以不会引入额外的缓存通告开销 C_A 和节点存储开销 C_C 。但是, 在内容请求时, 由于无法利用沿途传输路径以外的就近缓存内容, 对应的内容请求开销 C_R 最大。在 HRDCA 中, 采用差异化的缓存内容选择和通告, 相比 NCE 和 CATT 盲目式的全部通告方式, 有效减小了额外引入的通告开销 C_A 和节点存储开销 C_C , 增大了通告内容的有效性。HRDCA 通过少量额外 C_A, C_C 的付出, 增大了内容请求的就近响应率, 换取了 C_R 的大幅下降。

表 3 给出在 $\alpha=1.2$, NCE 的探测范围和 CATT 内容通告范围 m 为 3 跳时, 各方案的额外开销对比。随着 α 的增大, 内容请求更加集中在少数的流行资源上, 流行内容的有效集中使 HRDCA 引入的额外开销 C_A 和 C_C 大幅减小。但是, 对于 NCE 和 CATT, 随着通告范围的增大, 引入了更多 C_A 和 C_C 。

4.3 适应性讨论

图 6 给出了 ARD 随 Zipf 指数 α 的变化趋势。当 α 取值较小时, 内容请求分布不能有效集中, 在 α 取值为 0.2 和 0.4 时, 最大流行内容的请求概率仅为 0.0005 和 0.0024, 多样化的内容请求和存储将导致有限存储空间高频率的替换更新, 增大了 ARD。随着 α 的增大, 内容请求的集中性和局域性不断加强, 流行资源在缓存中的驻留概率和响应率明显增大,

表 2 代价开销对比 ($\alpha=1.0$)

开销	CCN	NCE(2)	CATT(2)	HRDCA	
				(3,2,0)	(2,1,0)
C_A	0	1230×10^5	1194×10^5	403×10^5	246×10^5
C_C	0	362×10^5	395×10^5	137×10^5	51×10^5
C_R	61328×10^6	54995×10^6	48773×10^6	37330×10^6	40849×10^6

表 3 代价开销对比 ($\alpha = 1.2$)

开销	CCN	NCE(3)	CATT(3)	HRDCA	
				(3,2,0)	(2,1,0)
C_A	0	2811×10^5	2480×10^5	151×10^5	82×10^5
C_C	0	796×10^5	942×10^5	81×10^5	23×10^5
C_R	54661×10^6	48550×10^8	42975×10^8	31996×10^6	34148×10^6

请求时延逐步减小。特别是当 α 取值位于 0.8 到 1.2 区间时, 内容请求的集中性显著增大, 累加概率为 0.8 包含的内容数量从 3894 项减小到 189 项, ARD 大幅下降。但是, 随着 α 的取值的进一步增大 ($\alpha > 1.2$), 流行资源对应的内容分布已无显著变化, ARD 下降趋势逐渐减缓。

图 7 给出了在 $\alpha = 1.0$ 时, 各方案 ARD 随节点缓存容量的变化趋势。随着节点缓存容量(CS)的不断增大, 更多的请求内容可以被存储在中间节点上, 提高了缓存命中率 CHR, 各方案对应的 ARD 不断减小。当节点缓存空间较小时, HRDCA 采用动态缓存概率的多样化存储策略, 有限减小了垂直请求路径上缓存冗余, 增大了缓存空间利用率。在局域吸引势能场建立时, 依据内容活跃等级和缓存驻留概率, 执行差异化的内容通告和势能计算, 提升了通告内容的可用性, 减小了额外引入的节点存储开

销。HRDCA 充分发挥和利用了节点有限的缓存空间, 对应 ARD 最小, 对于缓存容量的变化具有良好的适应性。

5 结束语

为了实现节点临时缓存资源的有效利用, 结合数据场的思想, 在 CCN 中提出了一种基于差异化缓存通告的混合路由机制。针对“持久稳定”的内容资源和“动态可变”的临时缓存副本, 分别构建了全局导向和局域吸引势能辐射场, 实现内容请求的全局路由和局部就近应答。HRDCA 增大了缓存内容命中率, 以少量额外开销换取了内容请求性能的显著提升, 仿真结果和对比分析显示了其有效性。后续研究工作包括: (1)将 HRDCA 扩展到移动 ICN 环境中, 解决请求者和数据源的移动性问题; (2)在不同网络和仿真参数条件下对于 HRDCA 性能和开销进行分析验证。

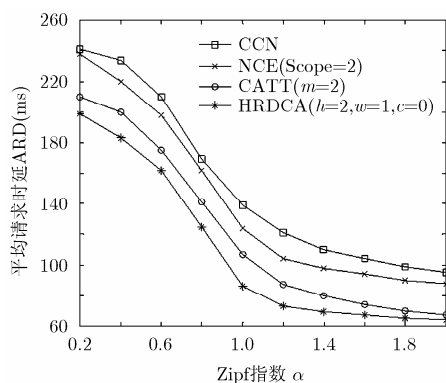
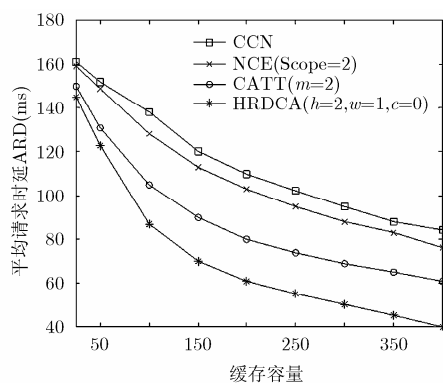
图 6 平均请求时延 ARD 随 Zipf 指数 α 的变化趋势

图 7 平均请求时延 ARD 随缓存容量的变化趋势

参考文献

- [1] Trossen D, Sarela M, and Sollins K. Arguments for an information-centric internetworking architecture[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 2010, 40(2): 26-33.
- [2] 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*, Rome, Italy, 2009: 1-12.
- [3] 崔现东, 刘江, 黄韬, 等. 基于节点介数和替换率的内容中心网络网内缓存策略[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(1): 1-7.
- [4] Cui Xian-dong, Liu Jiang, Huang Tao, et al.. A novel in-network caching scheme based on betweenness and replacement rate in content centric networking[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(1): 1-7.
- [4] Chiocchetti R, Perino D, Carofiglio G, et al.. INFORM: a dynamic interest forwarding mechanism for information centric networking[C]. *Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking*, Hong Kong,

- China, 2013: 9–14.
- [5] Wang Y G, Lee K, Venkataraman B, *et al.*. Advertising cached contents in the control plane: necessity and feasibility[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops, Orlando, USA, 2012: 286–291.
- [6] 叶润生, 徐明伟. 命名数据网络中的邻居缓存路由策略[J]. 计算机科学与探索, 2012, 6(7): 593–601.
Ye Run-sheng and Xu Ming-wei. Neighbor cache explore routing strategy in NDN[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2012, 6(7): 593–601.
- [7] Eum S, Nakauchi K, Murata M, *et al.*. CATT: potential based routing with content caching for ICN[C]. Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking, Helsinki, Finland, 2012: 49–54.
- [8] Chiocchetti R, Rossi D, Rossini G, *et al.*. Exploit the known or explore the unknown? Hamlet-like doubts in ICN[C]. Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking, Helsinki, Finland, 2012: 7–12.
- [9] Dai H C, Lu J Y, Wang Y, *et al.*. A two-layer intra-domain routing scheme for named data networking[C]. Proceedings of the IEEE Globe Telecommunications Conference, Anaheim, USA, 2012: 2815–2820.
- [10] 淦文燕, 赫南, 李德毅, 等. 一种基于拓扑势的网络社区发现算法[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2241–2254.
Gan Wen-yan, He Nan, Li De-yi, *et al.*. Community discovery method in networks based on topological potential[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(8): 2241–2254.
- [11] Kim Y and Yeom I. Performance analysis of in-network caching for content-centric networking[J]. *Computer Networks*, 2013, 57(13): 2465–2482.
- [12] Psaras I, Clegg R G, Landa R, *et al.*. Modelling and evaluation of CCN-caching trees[C]. Proceedings of IFIP TC 6 Networking Conference, Valencia, Spain, 2011: 78–91.
- [13] NS-3 based Named Data Networking (NDN) Simulator[OL]. <http://ndnsim.net>, 2013.
- 葛国栋：男，1985年生，博士生，研究方向为新型网络体系结构设计、内容中心网络。
- 郭云飞：男，1963年生，硕士，教授，博士生导师，研究方向为新型网络体系结构设计、移动互联网。
- 刘彩霞：女，1974年生，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为内容中心网络、移动互联网。
- 兰巨龙：男，1962年生，博士，教授、博士生导师，研究方向为可重构柔性网络和高性能路由。