ICN 中基于节点权重的缓存大小分配方案研究*

徐昌彪，吕　顺†
（重庆邮电大学 测控与信息传输研究所，重庆 400065）

摘　要： 为了使路由器的缓存大小配置合理，首先综合考虑路由器的度数权重、紧密度、网络的中心度、请求影响度等度量指标，定义了一个新的度量指标，称为节点权重；然后，提出一种基于节点权重的缓存大小分配方案，将网络所需的容量按比例分配给路由器。仿真结果表明，与均匀分配相比，路由器的缓存空间利用率至少提升了 8%，命中率至少提高了 6%；与基于请求影响度的分配方案相比，路由器的缓存空间利用率至少提升 3%，命中率至少提高了 3%。

关键词： 网内缓存；信息中心网络；节点权重；缓存大小分配
中图分类号： TP393.2　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1001-3695(2017)01-0318-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2017.01.072

Research on cache size allocation scheme based on node weight in information-centric networking

Xu Changbiao, Lyu Shun†
(*Measuring-Control & Information Transmission Research Laboratory, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing* 400065, *China*)

Abstract: In order to allocate cache size of each router reasonably, this paper defined a new metric named node weight which considered several metrics (e.g., degree weight, closeness centrality, network centrality, and request influence degree). Then, it proposed a cache size allocation scheme based on node weight, to allocate router cache size proportional to node weight. Numerical experiments reveal that compared with the homogeneous assignment, the utilization rate of the router's cache space increases by 8% at least and hit rate of the router's cache space increases by 6% at least; compared with cache size allocation based on request influence degree, the utilization rate of the router's cache space increases by 3% at least and hit rate of the router's cache space increases by 3% at least.

Key words: in-networking caching; information-centric networking (ICN); node weight; cache size allocation

0　引言

随着互联网的不断发展，信息发生了爆炸式增长，用户所关注的焦点，从点到点的通信逐渐演进到对海量信息的获取，用户需求变化使得现有网络存在一系列的问题和挑战。针对传统 IP 网络存在的问题，产学两界都提出了大量的改进措施，如内容分发网络[1]（content distribution network，CDN）、对等网络[2]（peer-to-peer，P2P）等，而这些措施都是对现有问题的不断改良和优化，是一种演进式发展方式，计算机网络体系结构变得越来越复杂，而且在解决当前紧急问题的同时往往还会带来新的问题。因此，人们试图构建全新的未来互联网络，信息中心网络（ICN）[3]应运而生。

网内缓存功能是 ICN 网络最重要的特性之一，路由器的缓存空间大小配置是否合理，将对网络性能产生较大影响。而对 ICN 网络的研究，主要集中在网络体系架构[4~7]、内容的存储和替换策略[8~11]等方面的研究，在 ICN 中路由器缓存空间大小分配方面研究较少。Rossi 等人[12]提出了一系列基于网络拓扑信息的路由器缓存空间大小分配策略。根据网络拓扑信息，获得网络的中心度指标（介数、紧密度、离心率、图的中心度等指标），该系列策略中节点的缓存大小分别与节点不同的中心性度量成比例。仿真结果表明，该文的缓存分配方案比均匀的缓存大小分配方案的性能提升并不明显。Xu 等人[13]利用流行学习方法分析网络流量和用户行为的规律，根据路由器在内容分发过程中所扮演的角色，对路由器分类，然后根据节点的类别进行缓存大小的分配。但是文献[13]依赖复杂的自动学习算法，而且在新颖的 CCN 网络环境中区分缓存节点重要性也是很困难的。Cui 等人[14]定义了一个新的度量指标请求影响度（request influence degree，RID），用于反映内容请求的交付路径上路由器的重要性。节点分配的缓存大小与请求影响度 RID 成正比，提出了一种按比例分配缓存空间大小的分配方案。仿真结果表明，该分配方案与均匀分配相比，减小了路由开销和源服务器的负载。但是用户请求数是动态变化的，文中并未考虑此因素，会导致分配方案在用户需求变化时变得不合理。因此，本文综合考虑网络拓扑信息和用户需求，定义一个新的度量指标，称为节点权重，并设计基于节点权重的缓存大小分配方案 NW-CSAS（node-weight-based cache size

收稿日期： 2015-12-22；**修回日期：** 2016-02-14　**基金项目：** 国家自然科学基金资助项目(61301124)；重庆高校创新团队建设计划资助项目；重庆邮电大学科研基金资助项目(A2012-16)

作者简介： 徐昌彪(1972-)，男，教授，博士，主要研究方向为无线 TCP、IP QoS、移动 IP、IP 组播以及无线自组织网等；吕顺(1990-)，男(通信作者)，湖北洪湖人，硕士研究生，主要研究方向为未来网络、ICN 网络(185143072@qq.com).

allocation scheme)。

1　缓存大小分配方案设计

路由器的缓存空间大小配置,对网络性能具有较大影响,如果网络中各个路由器的缓存空间大小任意配置,则存在不合理性,如用户需求小的区域,可能造成缓存空间浪费;用户需求大的区域,可能路由器的缓存大小不够。为了提高网络性能和减小经济投入,为每个路由器配置合适的缓存空间大小是很有必要的,因此,本文综合考虑用户需求和网络拓扑信息设计了一种路由器的缓存大小分配方案,其是一种异构缓存空间分配方案。本文将内容分为 M 种类型,通过需求调研,获得单位时间内,用户主机 i 对各类内容的需求量 λ_{ik},$k \in M$。可以获得单位时间内,用户主机对第 k 类内容的总需求数 q_k:

$$q_k = \sum_{i \in I} \lambda_{ik} \tag{1}$$

其中,I 为网络区域中用户主机集合。第 k 类内容的平均大小为 Size_k,Size_k 的大小根据实际网络中同类内容大小取平均值。整个网络区域需要部署的缓存空间总大小为 C_t:

$$C_t = \sum_{k=1}^{M} (q_k \cdot \mathrm{Size}_k) \tag{2}$$

网络区域所需的缓存空间总大小确定后,按照一定规则分配给区域中的各个路由器。本文根据网络拓扑和用户需求设计分配规则,在考虑拓扑信息因素时,选取网络拓扑的以下度量指标:

a)度数权重 w_i。w_i 与路由器 v_i 的度和网络区域中所有路由器的度有关。路由器的度是指和该路由器相关联的链路条数,对于有向图,路由器的入度是指进入该路由器的链路条数,出度是指从该路由器出发的链路条数,本文针对无向图,因此不区分入度和出度。度数权重 w_i 的求取公式为

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{j \in V} d_j} \tag{3}$$

其中:d_i 为路由器 v_i 的度,V 为网络区域中的路由器集合,$\sum_{j \in V} d_j$ 为网络区域中所有路由器的度数之和。

b)路由器的紧密度 c_i。c_i 反映路由器 v_i 到网络区域中所有路由器的距离关系,其求取公式为

$$c_i = \frac{1}{\sum_{j \in V} h(i,j)} \tag{4}$$

其中:V 是网络区域中路由器集合,$h(i,j)$ 为路由器 v_i 到路由器 v_j 的最短径跳数。

c)网络的中心度 g_i。g_i 涉及路由器 v_i 到区域中最远路由器的距离,其求取公式为

$$g_i = \frac{1}{\max_{j \in V} h(i,j)} \tag{5}$$

其中:V 是网络区域中路由器集合,$\max_{j \in V} h(i,j)$ 为路由器 v_i 到所有路由器的最短径中的最大跳数。考虑用户需求因素时,本文使用请求影响度 RID_i 这一度量指标,反映了用户需求和节点重要度。在文献[14]中介绍了一种基于请求影响度 RID 的缓存空间大小分配方案,请求影响度 RID_j 表示网络中从其他路由器传递到路由器 j 的请求总数。本文引用该文献中的请求影响度求取公式,获得路由器 j 的请求影响度 RID_j:

$$\mathrm{RID}_j = \sum_{i \in V} \sum_{\substack{l(i \to j) \\ \in L(i \to j)}} \left(k_{ij}^{l(i \to j)} \cdot \prod_{x \in l(i \to j)} (1 - \mathrm{serv}_x)^{-1} \right) \tag{6}$$

其中:V 是网络区域中内容请求源路由器的集合;$l(i \to j)$ 是路由器 v_i 到路由器 v_j 的一条随机路径;$L(i \to j)$ 是路由器 v_i 到路由器 v_j 所有路径的集合;serv_x 是路由器 x 的服务率,即内容请求在路由器 v_i 命中或者在待定请求表(pending interest table, PIT)中找到相同条目的概率;$k_{ij}^{l(i \to j)}$ 为单位时间内,路由器 v_i 沿路径 $l(i \to j)$ 传递给路由器 v_j 的各类内容请求总数。以图 1 的简单拓扑介绍路由器的请求影响度的求取。设定路由器 1 和 4 为内容请求源,各路由器的服务率标注在图上。假定单位时间内,到达路由器 1 的各类内容请求总数为 q_1,到达路由器 4 的各类内容请求数为 q_4,则路由器 5 的请求影响度为

$$\mathrm{RID}_5 = (1 - \mathrm{serv}_1) \cdot (1 - \mathrm{serv}_2) \cdot (1 - \mathrm{serv}_3) \cdot q_1 + (1 - \mathrm{serv}_4) \cdot (1 - \mathrm{serv}_3) \cdot q_4$$

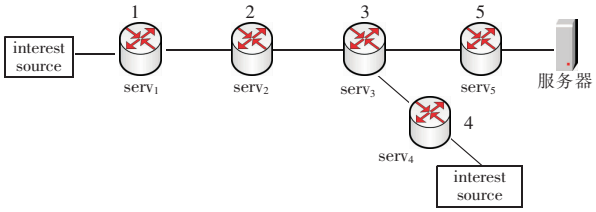

图 1　介绍 RID 求取的拓扑

从路由器 1 到路由器 5 只有一条路径 1→2→3→5,从路由器 4 到路由器 5 只有一条路径 4→3→5,分别对着两条路径求取请求转移量。综合考虑上述各度量指标,使用加权表达式表示,该表达式使用 $X(i)$ 表示,$X(i)$ 称为路由器 v_i 的权重指标,$X(i)$ 的加权表达式为

$$X(i) = \alpha \cdot w_i + \beta \cdot c_i + \gamma \cdot g_i + \mu \cdot \mathrm{RID}_i \tag{7}$$

其中:$0 \leqslant \alpha, \beta, \gamma, \mu \leqslant 1$,且 $\alpha + \beta + \gamma + \mu = 1$。

为内容路由器 v_i 配置的缓存大小 $C(v_i)$ 为

$$C(v_i) = C_t \cdot \frac{X(i)}{\sum_{j \in V} X(j)} \tag{8}$$

其中:V 是网络中路由器集合。

2　仿真分析

为了验证本文提出的路由器缓存空间大小分配方案的合理性和高效性,本文在 Ubuntu12.04 LTS 64 bit 操作系统下,采用基于 NS-3 的 ndnSIM 仿真器进行性能评估,网络拓扑如图 2 所示。在仿真中,将内容类型分为 $M = 4$ 类,且第 k 类内容的平均大小为 Size_k,Size_k 的大小为实际网络中同类内容的大小取平均值,本文只是为了验证方案合理性。为了简单起见,设定 $\mathrm{Size}_1 = 10$ M,$\mathrm{Size}_2 = 30$ M,$\mathrm{Size}_3 = 100$ M,$\mathrm{Size}_4 = 50$ M;用户主机 i 对第 k 类内容的请求服从参数为 λ_{ik} 的泊松分布,该参数由随机生成器随机生成,且满足到达路由器 i 的请求总数服从参数为 λ_i 的泊松分布,$\lambda_i = 50$ req/s。求取节点权重时,涉及四个权重系数,反映各度量指标对节点权重的影响程度,其中请求影响度与请求数相关,因其是动态变化的,无法确定未来的变化,为了减小请求的变化对分配的影响,故其权重系数设置得小些,而与网络拓扑相关的度量指标在拓扑给定的情况下为固定值,故将其权重系数设置得大些。经过多组测试发现,$\alpha = \beta = \gamma = 0.3$,$\mu = 0.1$ 时仿真效果最好。请求转发方式采用洪泛模式,仿真时间为 500 s。使用基于节点权重的缓存大小分配方案(node-weight-based cache size allocation scheme, NW-CSAS)为各路由器配置缓存空间大小,配置完成后,为了验证路由器的缓存空间大小分配方案的合理性,在拓扑和用户请求相同的情况下,与缓存大小均匀分配方案(homogeneous cache

size allocation scheme,HCSAS)以及文献[14]提出的基于请求影响度的缓存空间大小分配方案(request-influence-degree-based cache size allocation scheme,RID-CSAS)进行性能比较。

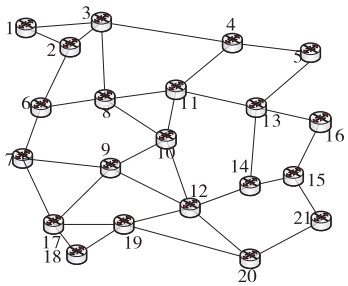

图2 仿真拓扑

均匀分配缓存空间的方案中,将 C_t 均匀分配给网络中的各路由器,即各路由器的缓存空间大小为 C_t/N,N 为整个网络中路由器的数目。文献[14]提出的基于 RID 的缓存空间大小分配方案,是一种异构缓存空间分配方案,根据路由器 v_i 的请求影响度 RID_i 按比例分配缓存空间。本文通过路由器中缓存空间的利用率 $p_u(i)$ 和路由器的命中率 $p_h(i)$ 两个性能指标来评估分配方案的合理性。$p_u(i)$ 为路由器 v_i 的缓存空间利用率,其求取公式为

$$p_u(i)=\frac{1}{n}\left(\sum_{j=1}^{n}\frac{\sum_{k=1}^{M}(\mathrm{num}_{ijk}\cdot \mathrm{Size}_k)}{c(v_i)}\right) \tag{9}$$

其中,n 为统计次数,一个单位时间进行一次统计;num_{ijk} 为路由器 v_i 处,第 j 个单位时间中第 k 类内容的命中数,即在路由器中命中或在待定请求表(pending interest table,PIT)中找到相同的条目;Size_k 为第 k 类内容的平均大小;$c(v_i)$ 为路由器 v_i 的缓存空间大小,由 NW-CSAS 方案分配。

$p_h(i)$ 为路由器 v_i 的命中率,其求取公式为

$$p_h(i)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{\sum_{k=1}^{M}\mathrm{num}_{ijk}}{\sum_{k=1}^{K}\mathrm{Sum}_{ijk}} \tag{10}$$

其中:n 为统计次数;num_{ijk} 为路由器 v_i 处,第 j 次统计中第 k 类内容的命中数;Sum_{ijk} 为路由器 v_i 处,第 j 次统计中第 k 类内容请求总数。图 3 表示在网络拓扑、用户主机的内容请求相同时,NW-CSAS 与 RID-CSAS 方案,以及 HCSAS 方案的路由器资源利用率比较情况。从图 3 可知,NW-CSAS 方案因综合考虑了用户需求和网络拓扑信息,各路由器的资源利用率比 HCSAS 方案至少提升了 8%,比 RID-CSAS 方案至少提升了 3%,使得路由器的缓存空间更加高效地被使用。

图 4 显示在网络拓扑、用户主机的内容请求相同时,NW-CSAS 与 RID-CSAS 方案,以及 HCSAS 方案的路由器命中率比较情况。从图 4 的显示可知,NW-CSAS 方案,各路由器的命中率比 HCSAS 方案至少提升了 6%,比 RID-CSAS 方案至少提升了 3%。

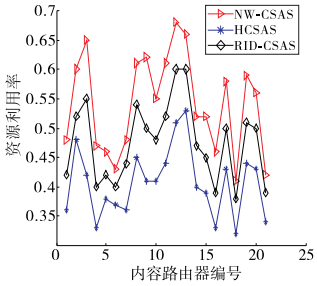

图3 路由器的资源利用率

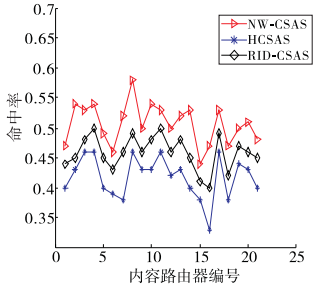

图4 路由器的命中率

3 结束语

ICN 是一种全新的网络体系架构,网内缓存功能是其最重要的特性之一。合理配置路由器的缓存空间大小,对网络性能有较大的影响,也可以节约网络成本。因此,本文提出了一种基于网络拓扑和用户需求的异构缓存空间大小分配方案,通过度的中心度、路由器的紧密度、网络的中心度、请求影响度等度量指标,使用归一化表达式表示节点权重,通过节点权重分配缓存空间大小。仿真结果表明,本文设计的缓存空间大小分配方案,比均匀分配和均匀请求影响度的分配方案,在缓存空间利用率和命中率等性能指标上,均有一定提升。在未来的工作中,可以使用一种混合线性编程方法,设计异构缓存大小分配的最优模型,使得缓存性能得到进一步提升。

参考文献:

[1] Liste M. Content delivery network (CDN) a reference guide[EB/OL]. (2001-04-10)[2013-01]. http://whitepapers. information-week. com/detail/RES/ 995990181_212. html.

[2] Rhea S, Godfrey B, Karp B, *et al*. OpenDHT: a public DHT service and its uses [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005, 35(4): 73-84.

[3] Xylomenos G, Ververidis C N, Siris V, *et al*. A survey of information-centric networking research [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(2): 1024-1049.

[4] Koponen T, Chawla M, Chun B G, *et al*. A data-oriented (and beyond) network architecture[C]//Proc of the 2007 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2007: 181-192.

[5] Jacobson V, Smetters D K, Thornton J D, *et al*. Networking named content[C]//Proc of the 5th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM Press, 2009: 1-12.

[6] Zhang Lixia, Afanasyev A, Burke J, *et al*. Named data networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.

[7] Dannewitz C, Kutscher D, Ohlman B R, *et al*. Network of information (NetInf)-an information-centric networking architecture[J]. Computer Communications, 2013, 36(7): 721-735.

[8] Wang Wei, Sun Yi, Guo Yang, *et al*. CRCache: exploiting the correlation between content popularity and network topology information for ICN caching[C]//Proc of the IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE Press, 2014: 3191-3196.

[9] Salah H, Schiller B, Strufe T. CoMon: a system architecture for improving caching in CCN[C]//Proc of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops. New York: IEEE Press, 2014: 213-214.

[10] Lim Sunghwa, Ko Youngbae, Jung Guehwan, *et al*. Inter-chunk popularity-based edge-first caching in content-centric networking [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(8): 1331-1334.

[11] Podlipning S, Boszormenyi L. A survey of Web cache replacement strategies [J]. ACM Computing Surveys, 2003, 35(4): 374-389.

[12] Rossi D, Rossini G. On sizing CCN content stores by exploiting topological information[C]//Proc of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops. New York: IEEE Press, 2012: 280-285.

[13] Xu Yuemei, Li Yang, Lin Tao, *et al*. A novel cache size optimization scheme based on manifold learning in content centric networking[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 37: 273-281.

[14] Cui Xiangdong, Liu Jiang, Huang Tao, *et al*. A novel metric for cache size allocation scheme in content centric networking[C]//Proc of National Doctoral Academic Forum on Information and Communications Technology. Britain: IET, 2013: 1-6.