软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2017,28(Suppl.(2)):70−80

E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel: +86-10-62562563

内容中心移动边缘网络用户移动感知缓存机制*

蔡岳平, 陈文鑫, 樊欣唯, 罗 森, 邱 娅, 谭 兵

(重庆大学 通信工程学院,重庆 400030)

通讯作者: 蔡岳平, E-mail: caiyueping@cqu.edu.cn

摘 要: 为了提高内容中心移动边缘网络的缓存性能,提出了一种基于用户移动性感知和节点中心性度量的内容中心移动边缘网络缓存机制(user mobility-aware and node centrality based caching,简称 UMANCC).UMANCC 机制利用边缘节点计算节点中心性、缓存空闲率以及小区内用户逗留时间.移动边缘网络控制器综合各边缘节点的信息,计算各边缘节点的重要性并进行排序,最后根据排序结果选择内容缓存节点.仿真实验结果表明:与传统缓存机制 LCE 及 Prob 相比,UMANCC 有效减少用户获取内容的平均跳数高达 15.9%,提高边缘节点缓存命中率至少 13.7%,减少进入核心网流量高达 32.1%,有效地提高了内容中心移动边缘网络的内容分发性能.

关键词: 内容中心网络;移动边缘网络;缓存;移动性感知;节点中心性

中文引用格式: 蔡岳平,陈文鑫,樊欣唯,罗森,邱娅,谭兵.内容中心移动边缘网络用户移动感知缓存机制.软件学报,2017,28(Suppl.(2)):70−80. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17020.htm

英文引用格式: Cai YP, Chen WX, Fan XW, Luo S, Qiu Y, Tan B. User mobility-aware caching mechanism in content-centric mobile edge networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017,28(Suppl.(2)):70−80 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17020.htm

User Mobility-Aware Caching Mechanism in Content-Centric Mobile Edge Networks

CAI Yue-Ping, CHEN Wen-Xin, FAN Xin-Wei, LUO Sen, QIU Ya, TAN Bing

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To improve the cache performance of content-centric mobile edge networks, a user mobility-aware and node centrality based caching mechanism, UMANCC, is proposed. UMANCC utilizes edge nodes to calculate the node centrality, idle rate of cache and cell sojourn time of users. A mobile edge network controller collects aforementioned information of edge nodes, and ranks each node base on the calculated importance factor of nodes. The caching node is selected according to the ranking result. Simulation results show that compared with the traditional caching mechanisms such as LCE and Prob, UMANCC effectively reduces the average number of hop count of fetching contents by up to 15.9%; it improves the hit ratio of cache at edge nodes by at least 13.7%, and it reduces traffic flowing into core networks by up to 32.1%. It greatly improves the performance of content distribution in content-centric mobile edge networks.

Key words: content-centric networking; mobile edge network; caching; mobility aware; node centrality

1 引 言

互联网作为信息时代的代表产物以其前所未有的信息交换和资源共享能力,颠覆了现代人生产生活的方式.但是随着网络业务的复杂化和网络规模的指数级增长,现有网络架构在可扩展性、移动性等方面的问题越发凸显.由于无线网络连接速率提高,移动网络用户对稳定、高质量的网络服务需求也随之提高,这种需求加速了移动网络服务流量的增长,进一步加剧了网络负担.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61301119); 教育部留学归国人员启动基金(1020607820140002)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61301119); Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education, China (1020607820140002)

收稿时间: 2017-06-30; 采用时间: 2017-10-20

为了解决现有网络架构的不足,业界提出全新的未来网络架构——信息中心网络(information-centric networking,简称 ICN).其中,内容中心网络(content-centric networking,简称 CCN)[1,2]架构作为 ICN 架构之一,具有里程碑意义.

网内缓存是 CCN 架构的关键技术之一,与之密切相关的缓存策略已经成为研究热点.在目前的网络中,缓存技术已经得到广泛应用.如 CDN,缓存内容通过服务器放置在网络边缘节点,并直接向内容请求者提供服务[3].CCN 则要求网络节点全部具备缓存能力,实现任意节点缓存.网内缓存以存储能力补充通信能力,提高内容传输效率,缩短内容获取时间,减少核心网络流量,提高带宽利用率,最终节省设备成本和能耗.缓存技术决定了系统的性能和实际使用价值.本文定义应用 CCN 技术的移动边缘网络为内容中心移动边缘网络(content-centric mobile edge networks,简称 CCMEN).CCMEN 中,节点具有潜在的移动性,会导致网络拓扑发生变化.

在国内外学者的研究下,如今已涌现出大量网内缓存技术的相关算法,其中,缓存放置策略对于缓存节点的选择有重要影响,较为典型的有:LCE(leave copy everywhere)是 CCN 的默认缓存策略,数据包在返回路径的所有节点上均被缓存.能够充分利用缓存容量,提高了缓存普遍性,但却会导致网络中存在大量冗余缓存,降低了网络缓存多样性.Prob(copy with probability),即在沿路返回的节点上,以一个固定概率 p 进行缓存,p 根据缓存内容具体情况进行修改.基于节点介数中心性的缓存决策策略(Betw)[4]引入节点的介数中心性概念,通过计算社会网络节点的介数中心性,对节点在网络中的信息控制能力进行排序,并根据排序结果对缓存放置位置进行决策.PCBCS (popularity and centrality based caching scheme)[5]根据内容流行度与节点中心性匹配的选择性缓存进行决策,相比于上面的缓存策略,PCBCS 在考虑内容流行度的基础上加入了网络的中心性量化,将路由器相关联的链路条数作为其中心性,并根据流行度对缓存进行评价,决策是否进行缓存.编码缓存(coded caching)[6]相比于传统缓存能够在多用户多缓存场景下降低缓存瓶颈.但缓存编码策略中存在如异步请求与动态网络、协议开销、状态同步、计算能力限制等多种问题.PHY-cache[7]在 5G 无线网络中应用基于物理层的缓存方案.通过在 BS 处适当缓存一些流行内容,所提出的 PHY 缓存可以将 RAN 的拓扑从不利拓扑(例如,中继或干扰拓扑)机会性地转换为更有利的 MIMO 广播拓扑,并提升频谱效率.结果显示,物理层缓存可以显著提高频谱效率.Zeydan 等人提出一种分布式内容缓存和交付策略[8],同时考虑流行度分布、多样性存储能力以及用户移动性,结果表明,该策略可以明显降低内容检索延迟,在小区基站视频投递问题上有较好效果.SAVING(socially aware vehicular information- centric networking)[9]则提出可以利用智能交通工具的缓存、计算与通信能力,借助车联网应用,促进城市环境中的内容快速投递.本文分析了网络边缘节点属性与用户的移动性,提出基于用户移动性感知和节点中心性度量的内容中心移动边缘网络缓存机制(user mobility-aware and node centrality based caching,简称 UMANCC).

本文的贡献总结如下:

提出一种基于用户移动性感知与节点中心性度量的内容中心移动边缘网络缓存机制 UMANCC,用于降低内容获取跳数,提高缓存命中率,降低核心网流量,从而提高边缘网络性能.

本文第 2 节对节点属性、用户移动性进行介绍与分析.第 3 节介绍 UMANCC 缓存机制.第 4 节建立仿真模型并进行仿真实验,对仿真结果进行分析.第 5 节对本文的主要内容进行总结.

2 边缘节点属性与用户移动性分析

由于传统缓存放置策略对于用户移动性缺乏感知,用户在移动后原有请求得不到响应,或在原位置的响应无法传达到新位置,导致传统缓存策略在用户发生节点移动后性能下降.因此,需要在缓存策略中引入用户的移动性,使网络能够进行移动感知.缓存策略中的缓存放置问题是本文的研究重点.

缓存放置问题解决节点放置位置以及其放置位置选择的依据问题,对应的输出结果可以具体化为具有优先级的缓存节点列表.定义该优先级为节点在内容缓存方面的重要性度量,简称重要性.本节将对边缘节点属性与用户移动性进行详细介绍.

2.1 边缘节点属性分析

在 CCMEN 中,边缘节点往往为基站,在无线接入场景中,边缘节点同时充当接入点(access point,简称 AP)功能.CCMEN 中的节点具有三原色,即通信、缓存、计算三大能力[10],三者在未来网络中具有重要地位.尤其是计算与缓存能力,在传统网络中作为移动系统的通信功能的补充,在主流设计中仅起到次要作用.但在 CCMEN 网络中,内容缓存是网络的组成部分,并且允许用户使用无线网络,通过网络内缓存和命名内容进行无主机的内容投递,使得计算与缓存能够在整个网络中得到应用.因此,边缘节点应当重点讨论 3 种属性:通信能力、计算能力以及缓存能力.

2.1.1 通信能力

在 CCMEN 中,使用网络节点的中心性作为其通信能力的表征.

(1) 度中心性

度中心性定义为一个节点的入边数.度被视作节点获取网络内容的直接程度,如果网络有向,则需要分别定义节点的入度与出度[5].度中心性直接度量网络节点的中心性,它衡量节点的邻居个数.从实际意义出发,一个节点的度中心性越强,则其对信息的传播能力越强.在一个 n 节点的图 $G(V,E)$ 中,节点 v_i 的度中心性为

$$C_D(v_i)=\frac{\deg(v_i)}{n-1} \tag{2.1}$$

其中, $\deg(v_i)$ 为该节点的邻居个数.在实际边缘网络中,一个边缘节点的邻居节点组成主要为用户,因此度中心性直接映射为用户数量.为避免网络规模造成的影响,在一个域内的节点度需要作归一化处理,修改后的度中心性可以进行如下表示:

$$C_D(v_i)=\frac{\deg(v_i)}{\sum_{i=1}^{n}\deg(v_i)} \tag{2.2}$$

一个边缘节点上连接用户数量越多,则表明其传播信息能力更强.而其上的缓存被命中,从而内容被消耗的概率越高,因此,更应当优先对其进行缓存放置与更新.

(2) 紧密中心性

节点的紧密中心性在网络中可直观地理解为空间中两个节点的距离紧密程度,也可以抽象地推广到没有具体距离度量的拓扑空间中,反映两个节点连通的紧密程度.其计算公式为

$$C_C(v_i)=\sum_{t\in v_i}2^{-d_G(v_i,t)} \tag{2.3}$$

其中, $C_C(v_i)$ 表示节点 v_i 的紧密中心性, $d_G(v_i,t)$ 表示 G 中节点 v_i 到节点 t 的最短路径长度,在移动边缘网络中,讨论边缘节点与用户节点的测地距离更有意义.节点的紧密中心性反映了节点与其他节点的紧密程度,在实际场景中,用户距离边缘节点越近,无线信道越稳定,可支持的上下行速率也越高,从而反映出节点的潜在通信能力越强.

用户节点与边缘节点的距离可以通过多种形式进行反映.

(a) 当使用用户节点与边缘节点的实际距离时,往往需要知道用户的位置信息,结合已知的边缘节点位置,进行精确的测地距离计算.

(b) 当用户位置不可知时,则可以使用用户节点的接收信号强度指示(received signal strength indication,简称 RSSI)来表征距离.孙佩刚等人[11]利用 RSSI 作为用户定位算法基础,结果表明,RSSI 能够作为用户与基站的距离表征,在不添加额外基础设施的条件下,即能实现较高精度与实时性的距离测算.由于 RSSI 的裸数据值往往以 dBm 为单位,为负值,因此作为距离表征时需要取绝对值.计算结果进行归一化,避免网络规模大小的干扰.

2.1.2 计算能力

节点的计算能力反映了节点对数据流进行快速处理、转发、路由的能力,具有高计算能力的节点可以进行更为高效的数据传输,甚至实现对单用户的服务.因此,如果对节点的计算能力进行讨论,能够在一定程度上提高缓存放置的性能.

Liu 等人[10]使用参与到数据流处理过程的节点数目作为节点性能的衡量(degree of computing,简称 DoC),

而这一结论实际上已经在节点度中心性中得到反映.

2.1.3 缓存能力

节点的缓存能力主要通过缓存容量与空闲缓存容量进行计算.缓存容量决定节点缓存能力上限:节点缓存容量大,可以通过储存更多不同文件的缓存增加缓存命中概率;节点缓存容量小,则无法完整缓存文件,降低了缓存命中率.体现在用户端的效果即网络时延不稳定,点播流媒体视频时频繁卡顿.而空闲缓存容量则是节点在不刷新旧缓存的前提下进行缓存的能力.对于空闲缓存容量大的节点,优先进行缓存,提高了缓存利用率.

以上反映缓存能力的两点需要综合考虑,因此使用缓存空闲率 $I(v_i)$ 表征节点的综合缓存能力,计算公式如下:

$$I(v_i)=\frac{I_{free}(v_i)}{I_{tot}(v_i)} \tag{2.4}$$

其中, $I_{free}(v_i)$ 为该节点的空闲缓存容量, $I_{tot}(v_i)$ 为该节点的总缓存容量.

2.2 用户移动性分析

在CCMEN中,用户具有潜在的移动性.移动性分为空间分布属性与时间分布属性两类[12],其中,空间分布属性细分为用户移动轨迹、用户的小区变化方向、用户的社交集群;时间分布属性分为用户间连接时间、用户小区内逗留时间、用户的运动周期等.

其中,用户小区内逗留时间(T_{soj})为用户在边缘节点小区覆盖范围停留的时间.用户小区内逗留时间可以作为用户移动性的重要表征,理由如下.

(a) 当通信速率一定时,T_{soj} 与用户下载缓存文件大小成正比;

(b) 当小区覆盖距离一定时,T_{soj} 可以间接反映用户小区间的移动速率,相比于小区内移动速率,小区间移动速率更能表征用户移动性的影响;

(c) 节点内用户停留时间越长,则缓存内容被“消耗”的概率越高,更需要对缓存进行刷新.

3 缓存机制

3.1 UMANCC工作机制

通过以上分析,选取以下指标作为评价节点重要性参数.

- 紧密中心性:反映节点与其他节点的密集程度,在无线边缘通信中,距离与节点通信速率挂钩;
- 计算能力:反映节点的综合计算性能;
- 缓存空闲率:反映节点的综合缓存能力;
- 小区内逗留时间:间接反映用户的移动性,参数获取简单,计算复杂度小.

对边缘节点的属性进行数学表达,记节点的中心性度量为 $S(v_i)$, 缓存空闲率为 $I(v_i)$, 计算能力为 $Z(v_i)$, 有:

$$S(v_i)=(\alpha\cdot C_D(v_i)+(1-\alpha)\cdot C_C(v_i)) \tag{3.1}$$

$$I(v_i)=I_{free}(v_i)/I_{tot}(v_i) \tag{3.2}$$

$$Z(v_i)=1 \tag{3.3}$$

其中,α为控制因子,控制节点度中心性与节点紧密中心性的权重,出于公平考量,取α=0.5,即不偏袒任一中心性.在实际应用中,根据实际网络,α需要进行修改.边缘节点对中心性度量、缓存空闲率进行计算,网络控制器定期获取这 3 个度量并进行计算.

然后,对小区内逗留时间进行数学表达:

$$T_{soj}(v_i)=Clamp(T_{sojavg}(v_i),T_{th}) \tag{3.4}$$

其中, $T_{sojavg}(v_i)$ 为节点 v_i 内用户平均逗留时间,由各节点进行维护,其具体计算方案在下文给出详细讨论. T_{th} 为逗留时间阈值,为防止某一节点内用户平均逗留时间过长而导致该节点的重要性无限制增长,需要设置逗留时间阈值.对超过阈值时间的节点,进行钳位(clamp)操作,即切去超过阈值的部分,只承认阈值内节点的移动

性. T_{th} 由控制器综合考量所有节点的 $T_{sojavg}(v_i)$ 后得出.

最后由控制器综合节点信息,进行节点重要性的计算.

$$P(v_i)=I(v_i)\cdot Z(v_i)\cdot\frac{S(v_i)}{sum(S(v_i))}\cdot\frac{T_{soj}(v_i)}{sum(T_{soj}(v_i))} \tag{3.5}$$

得到重要性度量结果后控制器对各边缘节点进行排序,并根据结果对选取的边缘缓存节点发出主动缓存指令.

3.2 UMANCC算法实现

3.2.1 节点端

节点端计算自身节点中心性度量 $S(v_i)$、缓存存空闲率 $I(v_i)$ 以及用户平均逗留时间 $T_{sojavg}(v_i)$, 下面分别进行讨论.

(1) 节点中心性度量

由式(3.1)可知,要计算 $S(v_i)$, 必须求得 $C_D(v_i)$ 与 $C_C(v_i)$, 又由式(2.2)、式(2.3)可知,需要分别获取该边缘节点小区内连接用户数 $\deg(v_i)$ 与各用户的距离度量 $d_G(v_i,t)$. 边缘节点处可以直接获取.

(2) 缓存空闲率 $I(v_i)$

对于边缘节点来说, $I(v_i)$ 是实时可知的.在实际设备中, $I(v_i)$ 可以通过查询设备缓存硬盘空间得到.在运行过程中, $I(v_i)$ 随着运行时间的增加而减小,在所有节点的 $I(v_i)$ 为 0,即存储空间全部被占用后,该参数不再作为节点选择考量,因此全部置 1.

(3) 用户平均逗留时间 $T_{sojavg}(v_i)$

在边缘移动网络中,用户的移动性通过用户小区内逗留时间加以反映.使用最小二乘法拟合,计算用户的移动周期信息,具有机器学习特性,以避免节点的平均逗留时间发生突变.

为了避免部分节点的逗留时间过长影响公平性, T_{th} 控制阈值计算十分重要. T_{th} 对用户平均逗留时间进行削锋滤波,控制用户跨小区移动对节点的重要性影响. T_{th} 取值越高,则用户跨小区移动的影响有所增强,反之,影响减弱. T_{th} 需要综合考虑所有节点的信息后给出,以保证公平性,故在控制器端采用大津法(OTSU)对输入信息进行最大类间方差分割,以获取阈值.

3.2.2 控制器端

移动边缘网络控制器负责收集节点信息,根据式(3.5)计算后对节点重要性进行排序,并输出前 K 个节点,K 由运营商根据实际网络规模进行指定,本文中取网络边缘节点的一半进行缓存,即 $K=n/2$. 算法复杂度为 $O(n)$, 可以直接使用控制器内置计算单元进行计算.下面是对 UMANCC 算法控制器端的伪代码描述.

算法 1. UMANCC 缓存算法.

输入: $I(V)$:节点缓存空闲率

$S(V)$:节点度中心性度量

$Z(V)$:节点计算能力

$T_{sojavg}(V)$:用户平均逗留时间

输出: $Ch(V)$:缓存节点集

```
Tth=OTSU(Tsojavg);    //使用大津法计算阈值
FOR(i=1;i≤n;i++)    //限幅滤波处理
    IF( Tsojavg(vi) > Tth )
        Tsoj(vi) ← Tth ;
    ELSE
        Tsoj(vi) ← Tsojavg(vi) ;
    END IF
```

```
END FOR
IF(I(V)==0);   //缓存空闲率全为 0 则排除该因素
    I(V)=1;
END IF
FOR(i=1;i≤n;i++)
    P(vi) ← I(vi)×S(vi)/sum(S)×Tsoj(vi)/sum(Tsoj(vi));
END FOR
P′ ←sort(P(V));   //对缓存优先级进行排序
FOR(j=1;j≤K;j++)
    FOR(i=1;i≤n;i++)
        IF P(vi) == P′(j)
            Ch←vi;   //选出前 K 个节点作为缓存节点
            BREAK;
        END IF
    END FOR
END FOR
RETURN Ch(V);   //输出缓存节点集
```

4 UMANCC 算法性能评价

4.1 实验设置

硬件环境:Intel(R) Core(TM) i7-640m CPU @2.8GHz,8G RAM.

软件环境:Ubuntu 16.04 LTS 64bit,ndnSIM 2.3,Matlab 2016a.

首先搭建合适的移动场景,实验选取最常用的无线接入网络作为移动边缘网络实现模型.与 LCE、Prob(0.7)、Prob(0.3)进行比较,主要指标为内容获取平均跳数、缓存命中率、内容源节点平均接收请求次数.

4.1.1 拓扑设置

设置一个深度为 8,固定节点数为 17,移动节点(即用户设备)数为 100 的随机树状拓扑.其中,固定节点中的边缘节点(承担基站与 AP 功能)自西向东间隔 200m 放置,通信覆盖半径 110m.移动节点初始随机放置于边缘节点覆盖范围内.图 1 所示为固定节点拓扑连接示意图,图 2 所示为移动节点放置示意图.

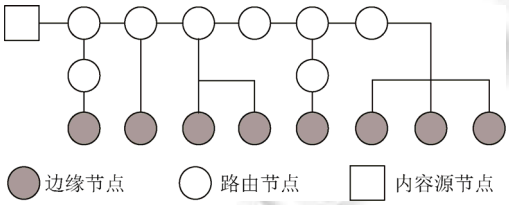

Fig.1 Fixed nodes placement diagram in mobile scenarios

图 1 移动场景固定节点放置示意图

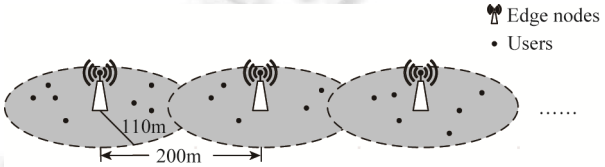

Fig.2 The mobile node placement diagram in mobile scenarios

图 2 移动场景移动节点放置示意图

4.1.2 CCMEN 实现

设置总内容数 U=10000 个文件,单文件大小为 1chunk.用户请求内容符合 Zipf 参数 s=0.7 的 Zipf 分布;用户请求过程满足泊松分布,其中,请求速率λ=100,即每秒发送 100 次兴趣包.用户符合随机游走模型(random walk model),即以随机速度、随机方向进行移动,在遇到边界后反方向折返.速度变化范围为 0~16m/s,表征步行至乘车速度.所有节点设置为具有相同缓存容量,容量根据仿真需要进行具体设置.

内容源节点响应所有请求,并对每次请求回送 1KByte 大小的对应编号内容,其余节点根据缓存放置策略进行缓存放置.为符合实际,节点缓存容量应远小于网络上的内容总量,故设置节点容量不超过 2 000 chunk. UMANCC 算法仅讨论边缘节点缓存策略,故仿真中网络内节点使用 Prob(0.3)缓存策略进行设置.表 1 给出主要的实验参数设置.

Table 1 Parameters in simulation experiment

表 1 仿真实验参数设置

参数	默认值	变动范围
固定节点数	17	–
用户数量	100	–
内容数量	10 000	–
节点缓存容量	均匀分布: μ=1000	200~2000
选取边缘缓存节点数	4	–
用户移动模型	随机游走	–
用户请求模式	Zipf 分布: s=0.7	–
用户请求过程	泊松分布: λ=100	–

4.2 仿真结果

4.2.1 瞬时跳数分析

为了验证策略对网络时延性能的影响,选取内容获取的瞬时跳数与平均跳数进行分析.跳数的降低意味着不同节点间排队、处理、发送等造成时延的因素有所减少,而传播时延也因传播路径变短而减少.因此,对内容获取跳数的分析可以作为网络时延性能的间接体现.

以瞬时跳数 $hop(t)$ 为分析对象.

定义瞬时跳数为

$$hop(t)=\frac{\sum_{r=1}^{Q} hop_r(t)}{Q},\qquad t>1 \tag{4.1}$$

其中, $hop_r(t)$ 为第 r 个用户节点在 t–1 至 t 时间内请求内容所经过的平均跳数,Q 为该时间段内总请求次数.较低的平均跳数可以说明缓存内容接近用户,且流向网络中心的流量减少.横轴变化量为相对缓存容量 R,给出 R 的定义如下:

$$R=\frac{I_{tot}}{U} \tag{4.2}$$

其中, I_{tot} 为节点缓存能力总量,U 为总内容数大小.

从图 3 可知,各策略瞬时跳数在仿真初期处于极大值,但由于部分边缘节点离源节点较近,瞬时跳数最高也未达到拓扑数深度 8.

瞬时跳数随时间的增加而有所下降,表明链路中各节点开始根据放置策略对内容进行缓存.其中, UMANCC 策略性能最优.不仅能够快速降低请求跳数,而且随着仿真时间的延长,平均请求跳数相比仍然保持在最低的状态.

4.2.2 平均跳数分析

根据以上仿真结果可知,仿真时长较长时,瞬时跳数趋于稳定.但是由于用户存在移动性,网络拓扑随时发生变化,因此瞬时跳数仍存在一定的波动性.更大规模的网络拓扑仿真能够降低这种不稳定性产生的干扰.

根据以上结论,可以对节点的平均跳数进行分析.图 4 给出 4 种策略在 R 变化条件下,平均跳数的变化

趋势.

通过分析平均跳数随 R 的变化情况可知:

• 当 R=0.01 时,LCE=4.72,而 $UMANCC$=4.25,平均跳数降低 0.47.当 R=0.1 时有最大差距为 0.49 跳.此时,UMANCC 相对于 LCE、Prob(0.7)、Prob(0.3),分别相对降低平均跳数 15.9%、11.5%、5.6%.

• 当 R 进一步增大时,各策略性能开始趋近,这是由于节点缓存能力增强所致,流行内容能够被节点完整缓存而不必刷新,各种策略的优势被缓存能力补齐.并且,由于网络拓扑较小,可优化空间也较小,平均跳数达到接近 2 跳之后已经难以再进行有效优化.

• UMANCC 策略在缓存容量较大时,由于引入节点移动性排名,用户停留时间较长的节点快速进行缓存刷新,从而保证该节点的缓存仍然能够有效满足用户需求.而排名靠后的边缘节点缓存更新速度较慢,如果缓存容量继续增加,则这些节点的缓存能力无法得到有效利用,从而导致平均跳数下降趋势快速减缓.

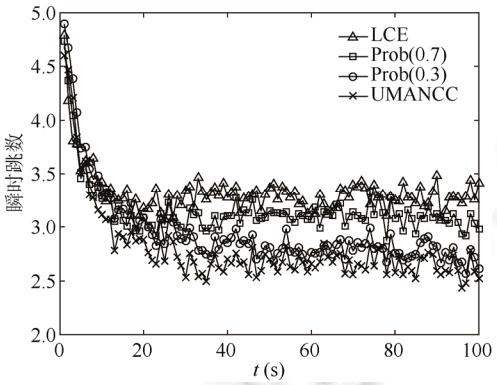

Fig.3 Analysis of instantaneous number of hops, R=0.1

图 3 瞬时跳数分析, R=0.1

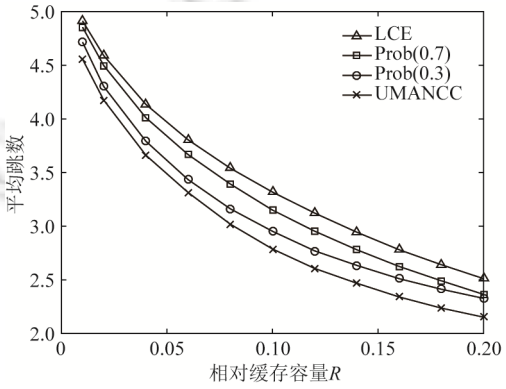

Fig.4 Analysis of average number of hops

图 4 平均跳数分析

4.2.3 缓存命中率分析

ndnSIM 的 Cache Tracer 以节点为单位,记录该节点(记为 v_i)上接收到的兴趣包请求命中数 $Ch_{hit}(v_i,t)$ 与请求失败数 $Ch_{miss}(v_i,t)$. 根据缓存命中率定义,可知节点 v_i 的瞬时缓存命中率为

$$Ch_{hr}(v_i,t)=\frac{Ch_{hit}(v_i,t)}{Ch_{hit}(v_i,t)+Ch_{miss}(v_i,t)} \tag{4.3}$$

则一组节点的平均缓存命中率为

$$Ch_{hr}^{avg}(v_i,t)=\sum_{i=1}^{N}Ch_{hr}(v_i,t) \tag{4.4}$$

分别考察内容源节点的平均接收请求次数、网络内节点、网络边缘节点的缓存命中率.内容源节点接收到的请求次数越低,则源节点请求负载越低,对应网络内缓存性能提高,流向核心网络的流量减少.考察网络内节点的缓存命中率,可以明确网络内部的缓存性能,网络内缓存命中率越高,则对应网络内节点缓存利用率越高.考察网络边缘节点缓存命中率,可以说明网络边缘节点的缓存性能,边缘节点缓存命中率越高,则用户获取所需内容经过的平均跳数越小,QoE 越高.

观察图 5 中内容源节点平均接收请求次数可以发现,随着 R 的增加,流向源节点的缓存请求均有所下降.但是,UMANCC 策略下降速度最快,LCE 下降缓慢.在 R=0.2 时每秒仍平均接收 356 次请求,而 UMANCC 策略下,源节点每秒仅接收 234 次请求,说明流向网络核心的流量大幅减小.在 R=0.1 的条件下,UMANCC 相对于 LCE、Prob(0.7)、Prob(0.3)分别降低源节点平均接收请求次数 32.1%、26.6%、15.1%.

图 6 给出上述条件下 4 种策略网内路由节点的缓存性能随缓存容量大小 R 的变化趋势.分析可知:

• 随着 R 的增加,缓存命中率均有所增加,UMANCC 策略性能居于 Prob(0.3)和 Prob(0.7)之间.网内缓存命中率说明网内节点的缓存能力提升能够增加网络中内容的多样性.在边缘节点缓存未命中的兴趣包在网内节点中尝试缓存命中时,网络中内容多样性越高,则缓存命中概率也越高.

• 由于在网内使用 Prob(0.3)策略,流行内容在网内节点以概率缓存,降低了网络内缓存内容的冗余度,同时也限制了 UMANCC 算法在网内缓存的性能,变化趋势与之相似.

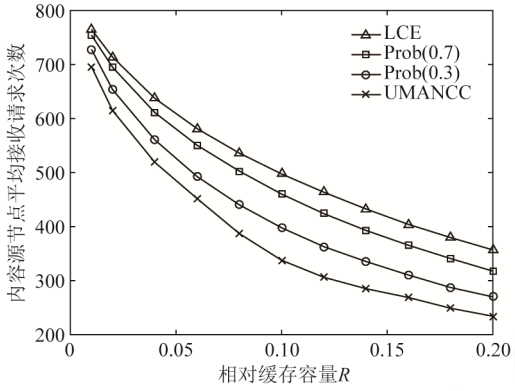

Fig.5 Analysis of the average number of requests received by the content source node

图 5 内容源节点平均接收请求次数分析

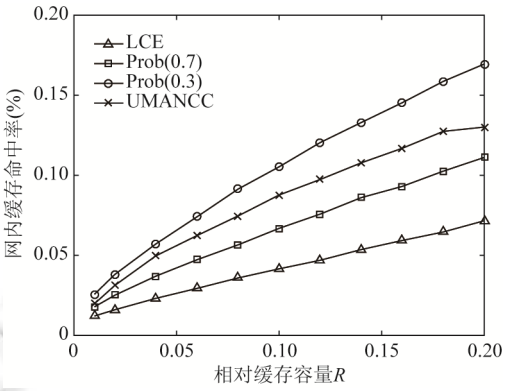

Fig.6 Analysis of node cache hit ratio in network

图 6 网络内节点缓存命中率分析

图 7 对比了 4 种缓存策略在 R 变化情况下,CCMEN 边缘节点上缓存命中率的变化情况.分析可知:

• 当 R=0.01 时,UMANCC 性能相对最优,缓存命中率较 LCE 提高 0.92%.

• 随着 R 的增大,各策略性能开始发生变化.当 R<0.06 时,Prob 策略性能整体优于 LCE.当 R>0.06 时,Prob(0.3)性能快速趋平,这是由于其缓存利用率较低所致.边缘节点失去缓存部分内容的机会,因而不得不向网络内转发请求.

• 当 R=0.1 时,UMANCC 相对于 LCE、Prob(0.7)、Prob(0.3)分别提高边缘节点缓存命中概率 13.7%、27.5%、22.9%.说明在相对缓存容量较小的情况下,UMANCC 以其引入的用户移动性提高了缓存的利用效率,利用网络边缘节点的聚合特性,在用户较多的节点上使用流行内容进行快速的缓存刷新,减少了用户冗余请求.

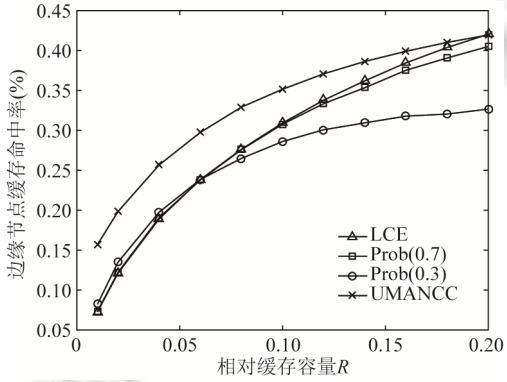

Fig.7 Edge node cache hit ratio analysis

图 7 边缘节点缓存命中率分析

5 结 论

为了提高内容中心移动边缘网络 CCMEN 的缓存性能,本文提出一种基于用户移动性感知和节点中心性度量的内容中心移动边缘网络缓存机制 UMANCC.UMANCC 分析提取边缘节点与用户节点的基本属性,对边缘节点属性提出通信、计算和缓存三大能力,对用户节点提出用户小区内逗留时间作为用户移动性表征.UMANCC 利用控制器的全局视角获取网络边缘节点的中心性度量、缓存空闲率、平均逗留时间等参数,并分别进行归一化处理,综合计算得出边缘节点在内容缓存方面的重要性并加以降序排序,最后根据排名顺序选择缓存节点进行主动缓存.

仿真实验结果表明,在 CCMEN 的无线接入网络场景下,UMANCC 与 LCE、Prob 等策略横向对比中,UMANCC 能够减少用户获取内容的平均跳数高达 15.9%,在相对缓存容量较低的情况下有效提高 CCMEN 中边缘节点缓存命中率至少达 13.7%,部分提高网络内部节点缓存命中率,降低流向内容源节点的流量多达 32.1%,有效地提升了网络整体性能.

该机制应用于移动边缘网络,可以应对移动流量快速增长而带宽资源受限的困难处境,在最小程度影响现有网络的前提下提高移动用户的网络业务体验.

References:

[1] Jacobson V, Smetters DK, Thornton JD, Plass M, Briggs N, Braynard RL. Networking named content. In: Proc. of the Int'l Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies. ACM, 2009. 1−12.

[2] Xylomenos G, Ververidis CN, Siris VA, Fotiou N, Tsilopoulos C, Vasilakos X, Katsaros KV, Polyzos GC. A survey of information-centric networking research. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014,16(2):1024−1049.

[3] Cui XD. Research on in-network caching schemes for content centric networking [Ph.D. Thesis]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014 (in Chinese with English abstract).

[4] Chai WK, He DL, Psaras I, Pavlou G. Cache "less for more" in information-centric networks. In: Proc. of the Int'l IFIP TC 6 Conf. on Networking. Springer-Verlag, 2012. 27−40.

[5] Rui LL, Peng H, Huang HQ, Qiu XS, Shi RC. Popularity and centrality based selective caching scheme for information-centric networks. Journal of Electronics & Information Technology, 2016,38(2):325−331 (in Chinese with English abstract).

[6] Maddah-Ali MA, Niesen U. Coding for caching: fundamental limits and practical challenges. IEEE Communications Magazine, 2016,54(8):23−29.

[7] Han W, Liu A, Lau VKN. PHY-Caching in 5G wireless networks: Design and analysis. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(8):30−36.

[8] Zeydan E, Bastug E, Bennis M, Bennis M, Kader MA, Karateoe IA, Er AS, Debbah M. Big data caching for networking: moving from cloud to edge. IEEE Communications Magazine, 2016,54(9):36−42.

[9] Sheng M, Xu C, Liu J, Song JJ, Ma X, Li JD. Enhancement for content delivery with proximity communications in caching enabled wireless networks: Architecture and challenges. IEEE Communications Magazine, 2016,54(8):70−76.

[10] Liu H, Chen Z, Qian L. The three primary colors of mobile systems. IEEE Communications Magazine, 2016,54(8):15−21.

[11] Sun PG, Zhao H, Luo DD, Zhang XD, YIN ZY. Research on RSSI-based location in smart space. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7):1240−1245 (in Chinese with English abstract).

[12] Wang R, Peng X, Zhang J, Letaief KB. Mobility-Aware caching for content-centric wireless networks: modeling and methodology. IEEE Communications Magazine, 2016,54(8):77−83.

附中文参考文献:

[3] 崔现东.内容中心网络网内缓存策略研究[博士学位论文].北京:北京邮电大学,2014.

[5] 芮兰兰,彭昊,黄豪球,邱雪松,史瑞昌.基于内容流行度和节点中心度匹配的信息中心网络缓存策略.电子与信息学报,2016,38(2): 325−331.

[11] 孙佩刚,赵海,罗玎玎,张晓丹,尹震宇.智能空间中 RSSI 定位问题研究.电子学报,2007,35(7):1240−1245.

蔡岳平(1980－),男,江苏丹阳人,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为云计算数据中心网络,光通信网络,软件定义网络,未来互联网.

陈文鑫(1995－),男,学士,主要研究领域为内容中心移动网络.

樊欣唯(1992－),女,硕士,CCF 学生会员,主要研究领域为内容中心网络,网络功能虚拟化.

罗森(1993－),男,硕士,CCF 学生会员,主要研究领域为数据中心网络.

邱娅(1993－),女,硕士,主要研究领域为云计算数据中心网络,未来互联网.

谭兵(1995－),男,硕士,主要研究领域为软件定义网络,未来互联网.