

智慧标识网络中基于族群协作的缓存机制

李海峰¹, 权伟¹, 承楠², 张宏科¹, 沈学民²

(1. 北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室, 北京 100044;

2. 加拿大滑铁卢大学电气与计算机工程学院, 安大略 滑铁卢 N2L 3G1)

摘要: 智慧标识网络 (SINET, smart identifier network) 是一种新型网络架构, 其通过动态协作服务资源、功能族群以及物理组件, 有效提高了网络可扩展性、资源利用率和服务质量, 为工业物联网发展提供了一种有效手段。为了提高资源受限网络中的传输效率, SINET 在部分网络组件中引入缓存, 可降低资源受限节点流量冗余带来的带宽浪费。针对智慧标识网络架构, 提出了一种基于族群协作的缓存机制 (C2Cache, crowd-based collaboration cache)。C2Cache 通过感知网络实际拓扑, 动态创建与优化缓存功能族群, 并以族群为单元执行最大收益缓存 (MBC, maximum benefit cache) 算法, 同一族群中优先缓存收益排名靠前的网络内容, 从而实现缓存效率的最大化。通过自主研发的实验床模拟系统 EmuStack, 对 C2Cache 进行了性能分析与评估, 实验结果表明, 对比 LCE、Random、ProbCache、LCD 和 Greedy 主流缓存机制, C2Cache 可有效提高缓存命中率, 从而大幅度降低平均访问时延。在测试网络场景下, 性能提升 15%~30%。

关键词: 智慧标识网络; 网络缓存; 基于族群的协作; 最大收益缓存

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00078

Crowd-based collaboration caching mechanism in smart identifier network

LI Haifeng¹, QUAN Wei¹, CHENG Nan², ZHANG Hongke¹, SHEN Xuemin²

1. National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Technologies, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo, Waterloo N2L 3G1, Canada

Abstract: Smart identifier network (SINET) is an innovative network architecture. Through dynamic collaboration of service resource, function groups and physical components, the network scalability, resource utilization and service quality were effectively improved by SINET, and an effective solution for the development of industrial Internet of things (IIoT) could be provided. To promote content delivery in resource-constrained IIoT, caching function was introduced in network components by SINET, and the bandwidth waste caused by traffic redundancy in resource-constrained node could be reduced. Therefore, how to efficiently cache content became an important research topic. Based on SINET architecture, a crowd-based collaboration cache (C2Cache) mechanism was proposed in this scheme. According to the actual network topology, the caching function group was dynamically created and optimized by C2Cache, and a function group as crowd minimum unit to execute the maximum benefit cache (MBC) algorithm was defined to maximize the caching space efficiency. With the self-developed emulation system, named EmuStack, the performance of C2Cache was evaluated. The experimental results show that, comparing with LCE, Random, Prob Cache, LCD and Greedy caching mechanisms, the cache hit rate can be improved effectively, then the average access time can be reduced significantly by C2Cache. In the simulated network scenario, the performance increases 15% to 30%.

Key words: smart identifier network, in-network cache, crowd-based collaboration, maximum benefit cache

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61602030, No.91638204); 国家重点研发计划资助项目 (No.2016YFE0122900); 中央高校基本科研业务费资助项目 (No.2016RC036)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61602030, No.91638204), The National Key Research and Development Program of China (No.2016YFE0122900), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2016RC036)

1 引言

随着互联网的快速发展,越来越多具有独立标识的物理单元实现连接,以进行信息传递和交换,为工业物联网发展提供了重要基础保障^[1-3]。近年来,新的互联网应用层出不穷,如高清视频、在线游戏、虚拟现实等,应用模式由“以主机为中心的数据传输”转变为“以信息为中心的内容分发”,使得互联网所承担的内容分发压力越来越大^[4]。传统基于 IP 的网络架构具有三重绑定的网络特性,难以适应应用模式转变带来的应用需求,导致资源利用率低、能耗高、可扩展性差、用户访问时延差、用户体验差等问题凸显^[5]。为了解决上述问题,世界各国纷纷对新型互联网体系架构展开研究。近几年,一些代表性的未来网络架构相继出现,如软件定义网络(SDN)^[6-7]、位置与标识分离网络(LISP)^[8]、信息中心网络(ICN)^[9-10]。SDN、LISP、ICN 从不同方面改进了传统网络的设计,克服了现有互联网部分弊端,但是三重绑定的原始设计依旧存在。为了彻底解除三重绑定、全面克服现有互联网面临的困难,北京交通大学的下一代互联网互联设备国家工程实验室提出了智慧标识网络(SINET, smart identifier network)^[11-12]体系,旨在从根本上解除三重绑定的设计限制,有效提高网络灵活性、智慧性。采用“以信息为中心”的思想,在网络组件(具有路由、交换功能)中引入缓存,大幅度降低了网络带宽消耗与服务获取时延,目前在铁路运维检修专网等工业专网环境中得到应用^[13-14]。

网络缓存的引入有效提高了网络性能,进一步优化了缓存系统性能,各类缓存机制得到了广泛研究^[15-19]。文献[15]提出一种大规模接入汇聚网络的抵近式缓存技术,首次实现了存储与传输的一体化及用户与内容在路由器层面的“零距离”接触。文献[16]提出一种针对公路车联网的智能缓存与检索机制,有效减少了车联网中的网络负载,降低了用户访问时延。文献[17]提出了一种针对以用户为中心的集群移动网络的协作边缘缓存机制,其对文件传输时延进行了分析优化,传输时延比最大命中率缓存机制减少了 35%。文献[18]针对两级移动异质网络提出了一种经济、高效的缓存部署方案,在满足文件传输速率需求的条件下,使得网络容量最大化。文献[19]分析了三层无线异构网络中的内容缓存与传递问题,对节点位置与内容访问过程进行了

建模,分析了吞吐量与时延性能等,并考虑了媒体内容异构性、节点密度与缓存能力对缓存收益的影响。这些缓存机制在一定程度上提高了缓存系统的专用性,减少了缓存冗余,从而提高了缓存命中率、节省了网络带宽。然而,上述缓存机制考虑的因素单一、静态,无法适应动态网络环境,如物联网中链路速率大小的变化、流量经济成本的变化等,因此,不能很好地适应不同网络环境。

本文针对 SINET 架构的特点,提出了一种基于族群协作的缓存机制(C2Cache, crowd-based collaboration cache)。C2Cache 充分利用了 SINET 特性:1) SINET 采用“以信息为中心”的设计思想,实现了“资源与位置分离”,并将网络内容唯一命名,缓存在沿路网络组件中;2) SINET 同时采用“控制与数据分离”的设计思想,实现了“控制与数据”、“控制与存储”的分离,使缓存系统具有更高的灵活性与可编程性。SINET 具备感知缓存状态的能力,能够动态、实时感知网络缓存状况、链路吞吐量等。通过资源管理器(RM, resource management),SINET 可控制缓存系统的存储行为。基于 SINET 缓存架构,C2Cache 根据实际网络环境,自动组建缓存功能族群,并以族群为最小单元运行最大收益缓存算法,进而实现缓存系统效率最大化。通过使用自主研发的实验床模拟系统 EmuStack^[20]进行性能分析与评估,实验结果表明,C2Cache 可有效提高缓存命中率(测试环境下提升 15%~30%)、大幅度减少用户访问时延。

2 相关工作

网络节点通过协作可大大提高网络工作效率^[21]。根据网络组件缓存系统是否协作,将缓存机制分为两类:1) 非协作缓存机制,如将副本缓存在所有路由器的 LCE (leave copy everywhere)、随机选择一个路由器进行缓存的 Random、将副本缓存在下一跳路由器的 LCD (leave copy down)^[22]、将副本移到下一跳路由器的 MCD (move copy down)、随机概率缓存内容 Prob (p) (probability); 2) 协作缓存机制,如以特定概率缓存内容 ProbCache (probabilistic cache)^[23]、基于生存时间的协作缓存机制 AgeCache (age-based cache)^[24]、延时感知的缓存机制 GreedyCaching^[25]。

在非协作缓存机制方面,LCE、Random、LCD、MCD 与 Prob (p) 是经典的非协作缓存机制。LCE 缓存网络组件转发的所有内容,内容在原始服务器

到请求客户端的整个转发路径上都被缓存。因此，LCE 网络存在大量缓存冗余。为减少缓存冗余，Random 随机选择内容转发路径的任一网络组件缓存，LCD 则只在已缓存内容的下一层缓存系统中缓存此内容，其他网络组件只进行转发。相比于 LCE，LCD 比较“保守”，其内容经过多次请求才能扩散到接入网的网络组件中。但是，LCD 通过这种方式有效减少了缓存冗余，提高了缓存空间利用率。与 LCD 类似，MCD 也只将被请求内容缓存在响应此内容的下一层网络组件中。与 LCD 不同，MCD 删除上游网络组件缓存的对应内容，使网络中只保存一份内容副本（内容原始服务器上的内容始终不会被删除），进一步减少了缓存冗余。另外，Prob (p) 采用随机概率的方式在内容转发路径上选择网络组件缓存。整个转发路径的网络组件都可能被选中为缓存节点，被选中的概率为 p 。

在协作缓存机制方面，文献[23]提出一种减少网络缓存冗余、提高沿路缓存效率的概率缓存机制 ProbCache。受硬件资源约束，网络组件缓存系统空间有限，当缓存空间满后，旧内容将被新内容替换。从内容被缓存到最后被替换的时间间隔称为内容的驻留时间。显然，内容驻留时间越长，越有可能被用户访问，从而产生缓存收益。反之，内容驻留时间太短，缓存的内容将在被访问前删除，产生存储与计算资源浪费。ProbCache 缓存机制让缓存系统以一定概率 p 缓存转发内容，以 $1-p$ 的概率不缓存转发内容。其通过减少缓存内容的方法，提高缓存系统中缓存内容的驻留时间，使驻留时间达到预期，进而增加缓存命中率。ProbCache 考虑了内容驻留时间、内容缓存位置对缓存放置决策的影响，具有一定优势，也存在缺陷。1) 优势：以一定概率丢弃内容，减少缓存冗余，提高了已缓存内容的驻留时间，从而提高了缓存收益；将内容大概率地缓存到邻近用户的缓存节点，节省了网络传输带宽；2) 劣势：ProbCache 缓存机制只是静态、僵化地设置内容驻留时间值，不能动态考虑不同内容的请求频率对内容驻留时间的影响。随着内容请求模式的改变，内容驻留时间的设定将不再准确，导致大量存储与计算资源浪费。

Ming 在文献[24]中提出了一种基于内容生存时间的隐式协作缓存机制 AgeCache。AgeCache 根据“内容的流行度”、“缓存节点与原始服务器的距离”计算内容缓存系统的生存时间 age 。AgeCache

缓存机制假定内容数据分组格式中含有 age 字段，当内容从原始服务器发送到网络组件时，该字段被初始化为 $init_age$ 。其表示内容在网络组件的缓存系统中驻留 $init_age$ 后过期。缓存内容转发到下一跳时，生存时间将被重新计算。计算公式为 $age=age+age*weight$ ，其中，权重因子 $weight$ 与用户流行度成正比。可见，随着内容在网络组件之间转发、离原始内容服务器越来越远，内容的生存时间将线性增大。这种线性关系与 ProbCache 的线性关系类似。两者都是利用与原始服务器的距离影响缓存行为，ProbCache 使用距离影响缓存概率，而 AgeCache 使用距离影响缓存时间。通过这种方法，AgeCache 有效地将流行内容缓存在边缘网络组件中，同时可充分利用中间缓存系统的缓存空间。但是，在缓存空间满时，AgeCache 要求：若已缓存的内容生存时间没有结束，则不对新的内容缓存。这种机制对内容生存时间 age 的计算极为严格。作为隐式协作缓存机制 AgeCache，对内容流行度进行准确计算极为困难。不准确的流行度将严重影响生存时间计算的正确性，最终，将严重影响其在实际场景中的性能表现。

文献[25]提出一种有效降低访问时延的缓存机制 GreedyCaching，其核心思想是：根据内容请求频率把内容按流行度降序排列，缓存系统只缓存流行度相对较高的内容。图 1 为 GreedyCaching 示例说明，以图 1 为例，假设有内容服务器 S1；缓存路由器 R1、R2；用户 U1、U2、U3。假定 3 个用户同时请求内容 A 与 B，请求速率分别为 $v_A=0.6$ 与 $v_B=0.4$ 。假设所缓存网络组件只能同时缓存一个内容 A 或 B，则根据 GreedyCaching 缓存机制思想：缓存网络组件 R1 的内容流行度为 $A=1.2$ 、 $B=0.8$ ，因此，R1 处缓存 A；缓存网络组件 R2 处的内容流行度为 $A=0.6$ 、 $B=1.2$ ，因此，R2 处缓存内容 B。可见，GreedyCaching 通过动态计算内容请求流行度，将最流行的内容缓存在最靠近请求的缓存路由器中，充分利用全网缓存系统空间，减少了缓存冗余，提高了缓存利用率。GreedyCaching 成功的关键在于内容相对流行度的正确估计。然而，GreedyCaching 的流行度估计算法与路由协议紧耦合，在多内容服务器、多用户等复杂环境下，这种方式存在较大的挑战。同时，与路由紧耦合的设计严重限制了缓存机制与路由协议的灵活性，也导致 GreedyCaching 部署难度加大。

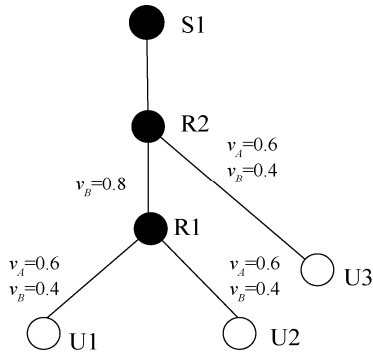


图 1 GreedyCaching 示例说明

3 SINET 缓存体系架构

C2Cache 建立在 SINET 缓存体系架构的基础上，SINET 缓存机制结合了“控制与数据分离”与“资源与位置分离”的思想。控制平面逻辑集中，使得网络具有更好的灵活性、编程性，SINET 通过在 RM 上部署内容索引应用，支持以信息为中心的数据传输方式，实现控制与数据分离。每个服务内容都有全网唯一的身份标识，身份标识与位置无关，通过唯一标识可获取缓存在任意网络组件缓存系统中的网络内容，从而节省网络带宽、降低内容访问时延、增强用户访问体验。

图 2 展示了 SINET 缓存机制运行流程，主要包含两个过程：内容的查询与转发、内容的存储与注册。

1) 内容的查询与转发：首先，用户发送内容请求分组到接入网的网络组件 N2（如图 2 步骤①所示），N2 查询自身缓存系统是否存储请求内容，若有存储，则直接返回（如图 2 步骤②所示）；若无存储，则将请求转发给 RM（如图 2 步骤③所示）。RM 收到内容请求后，查询内容索引数据库，判断其他网络组件中是否缓存该内容。若找到，则将离

用户最近的网络组件如 N3 的信息返回给 N2（如图 2 步骤④所示）。网络组件 N2 缓存此条记录信息，并根据此记录信息请求网络组件 N3（如图 2 步骤⑤所示）；若找不到，则让网络组件 N2 直接访问原始内容服务器（如图 2 步骤⑥所示）。

2) 内容的存储与注册：SINET 中每个自治域维护（逻辑上的）一个 RM，用于管理网络资源、控制网络组件存储与转发行为。在网络组件缓存新的网络内容前（如图 2 步骤⑦所示），该网络组件需要向 RM 发送相应的服务注册请求（如图 2 步骤⑧所示）。RM 在收到内容注册请求后，首先进行安全、版权等检查，若内容认定为不安全或没有版权，则拒绝注册请求。若满足相应检查条件，则根据本自治系统的缓存管理算法，自主决策是否接受此内容的注册请求：若拒绝注册请求，则相应的网络组件对此内容只进行转发，不进行缓存；若接受注册请求，则 RM 进一步处理请求。如果该服务所有者是新用户，则为其生成一组“公—私钥对”，增强安全性并保护用户隐私。

RM 的任务之一是找到距离用户所需缓存内容最近的网络组件，网络组件与用户的距离有多种度量，包括跳数、带宽、负载、时延及可靠性等。跳数度量通过网络组件之间的跳数衡量网络距离，跳数越小，则距离越近；带宽度量通过链路带宽的高、低反映距离，带宽越大，则距离越近；负载度量则通过沿路链路负载情况反映距离，负载越小，则距离越近；时延度量是指经过一条路径所花费的时间，时延越小，则距离越近；可靠性是指链路发生故障的可能性，可能性越小，则距离越近。各种距离度量方式有各自的优点，RM 选择一种或一种以上的距离度量方式进行邻近网络组件的选择。

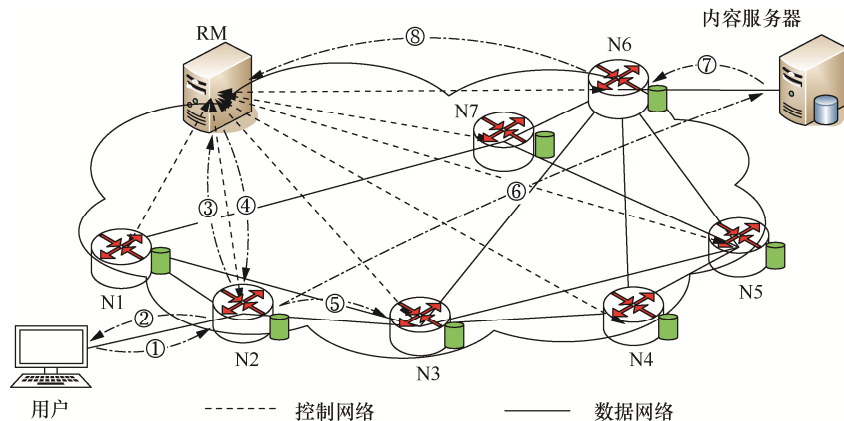


图 2 SINET 缓存机制运行流程

网络组件在缓存内容时，是否向 RM 发起注册请求的行为可配置。RM 的缓存管理模块对自治域的网络组件的缓存行为进行管理，包括网络组件的选择、内容冗余消除等。其中，网络组件的选择可通过配置 RM 是否发起注册请求实现，注册请求的发起可压缩、批量进行。网络组件在缓存内容前，向 RM 注册内容，RM 有权选择接受或拒绝注册请求，从而选择此网络组件是否缓存该内容，进而可全局最优部署内容缓存位置，使缓存系统收益最大化。若有配置注册行为，网络组件只有向 RM 注册内容成功后，才可缓存此内容；若没有配置注册行为，网络组件可根据本地的缓存策略决定是否缓存相应内容。

4 基于族群的缓存机制

基于上述 SINET 缓存体系架构，提出了一种基于族群协作的缓存机制 C2Cache。C2Cache 根据实际网络拓扑与链路状况组建缓存功能族群，实现缓存机制与实际网络状况的自主适应，各网络资源协同工作，最大化地减少链路流量经济成本。每个缓存族群协同运行改进的最大收益缓存算法，局部最优空间利用效率，使整网缓存收益最大化，进而有效地减少网络带宽的消耗，提高用户体验。

C2Cache 更充分地利用了缓存空间与实际网络的特征。现阶段，受硬件技术限制，缓存系统的空间非常有限，特别是物联网中互联设备上有更严格的硬件约束。因此，如何有效利用有限的缓存空间是缓存机制设计的关键。网络缓存机制的本质是利用廉价存储资源的消耗换取昂贵带宽资源的消耗。局域网中的节点间链路带宽大、流量相对廉价，如何有效利用廉价的局域网流量与局域网缓存资源换取昂贵的外网流量成为缓存机制设计的另一个关键。举例说明：图 3 为 C2Cache 创建缓存族群示例，如图 3(a)所示，网络组件 R1 与内容服务器 S1 处在运营商有偿提供的千兆链路上，网络组件 R2、R3 以及用户 U1~U5 处在同一局域网的万兆链路中。假设网络组件中缓存系统的缓存容量为一个请求内容；用户 U1 以频率 $\lambda/2$ 请求内容 C1，用户 U2~U5 以频率 λ 请求内容 C2。若在缓存系统中运行基本 Greed 缓存算法，则根据最大流量节省原则，R2 与 R3 都缓存 C2，丢弃 C1。因此，对于后续的 C1 请求，网络组件 R2 需要消耗昂贵而缓慢的运营商网络流量到 R1 或 S1 中获取内容 C1，产生昂贵的流量费

用，并且极大地降低了用户体验。若使用 C2Cache 缓存机制，C2Cache 将根据网络拓扑特点，自动将 R2 与 R3 组建为缓存功能族群，R2 与 R3 在行为逻辑上表现为单一缓存系统，如图 3(b)所示。这时，同样运行最大收益缓存算法，内容 C1 将被缓存在 R2，C2 将被缓存在 R3。用户 U1~U5 后续访问内容 C1 与 C2 都直接在局域网中获取，由于局域网链路带宽大、距离短，访问时延得到有效减少，用户体验也得到显著提升。另外，访问 C1 与 C2 不再消耗昂贵的运营商流量，经济成本也得到降低。可见，C2Cache 通过感知网络拓扑信息组建缓存功能族群，可以有效减少缓存冗余、提高缓存空间利用率、减少经济成本、提升用户体验。

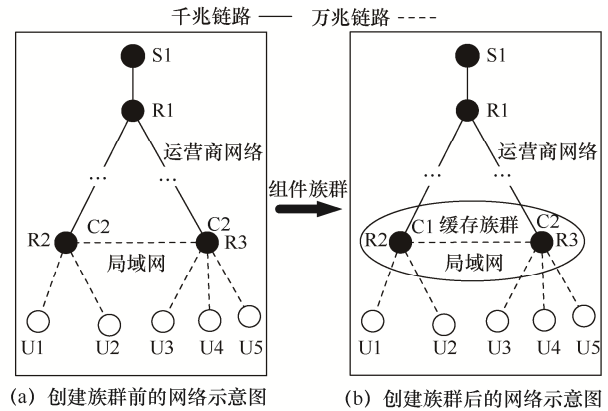


图 3 C2Cache 创建缓存族群示例

在智慧协同网络中，RM 可以动态感知链路特性与链路状态，利用 RM 掌握的网络信息，缓存算法中的缓存收益 profit 可通过式(1)计算

$$\text{profit} = K \times \text{popularity} \times \text{size} \quad (1)$$

其中， K 为 RM 返回的常量系数，popularity 为实测的内容流行度，size 为内容的大小。 K 的计算如式(2)所示

$$K = \frac{K_1}{B} + K_2 C + K_3 D + 1 \quad (2)$$

其中， K_1 、 K_2 与 K_3 是大于等于零的常量系数，通过人工进行配置。 B (bandwidth) 代表接收请求的网络组件到拥有请求内容的网络组件的整条路径中链路的最小带宽， C (cost) 为上述路径的流量经济代价， D (distance) 为上述路径中网络组件距离。可将 K_1 、 K_2 与 K_3 中的某个系数设为零，以降低系统实现的难度。

RM 掌握全局信息，当网络组件向 RM 查询请

求内容时，RM 在返回缓存内容网络组件地址的同时，返回一个动态计算的 K 值。网络组件缓存系统再通过式(1)计算并统计内容的缓存收益，进行缓存收益排名。这种方式使缓存机制具备感知实际网络特征的能力，从而使缓存的内容更具有实际意义。

C2Cache 运行流程示意图如图 4 所示，以图 4 为例，阐述 C2Cache 缓存机制的运行步骤，具体如下。

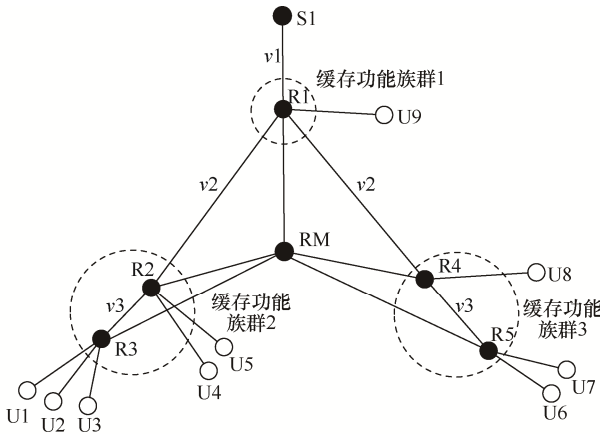


图 4 C2Cache 运行流程示意图

步骤 1 RM 根据网络状态如链路速率、链路流量费用等，将网络组件 R1~R5 分为不同的缓存功能族群，如 R1 为缓存功能族群 1，R2 与 R3 为缓存功能族群 2，R4 与 R5 为缓存功能族群 3。

步骤 2 用户发送内容请求，请求相应内容。如 U1 请求内容 C1，R3 网络组件查询自身缓存系统是否缓存该内容：若存在，则直接返回相应内容；若不存在，则进行步骤 3。

步骤 3 解析请求分组，若目的地址字段非空，则直接转发到相应网络组件；否则，将请求转发给 RM。同时，检索自身缓存收益预测表，若找到相应内容，则统计、更新族群缓存收益预测信息；否则，新建此内容缓存收益预测条目，并将值设置为零。

步骤 4 RM 接收内容请求后，查询内容索引数据库，若找到相应内容，则将离用户最近的网络组件或服务器地址返回给上述网络组件，同时返回计算收益系数 K 的值。网络组件缓存此条记录信息，根据此记录填充请求分组的网络组件地址字段，并将请求分组转发到相应网络组件或内容服务器。若拥有请求内容的网络组件与请求内容的网络组件属于同一个族群，则将 K 值直接设置为零，即不进行缓存。

步骤 5 请求内容转发到下一跳，网络组件依次

进行步骤 1 到步骤 3，直到转发到缓存有请求内容的网络组件。

步骤 6 内容到达时，网络组件查询缓存收益表，若找到相应条目且缓存收益在前 C 名 (C 为缓存空间大小)，则缓存该内容，并向 RM 注册此内容；否则，只对该内容进行转发。

通过控制返回的 K 值是否为零，C2Cache 可控制族群中缓存系统是否缓存某网络内容，进而使族群的所有缓存系统协同工作，有效提高缓存空间效能，提升用户体验。C2Cache 中同一族群的所有缓存系统只保留一份缓存副本，以族群内高速廉价的链路带宽为代价，降低缓存冗余，节省族群外昂贵、低速的链路带宽。同时，通过调节式(2)中 K_1 、 K_2 与 K_3 值的大小，C2Cache 可有效调节网络系统资源包括存储资源、链路资源等的分配，进而提高网络服务质量。

5 性能测试与评估

使用实验床模拟系统 EmuStack^[20]对 C2Cache 其他方面的性能进行分析评估，包括缓存命中率与访问时延。表 1 列出了性能分析实验参数，其中，广域网链路速率是指用户专用链路速率，并非指整个链路带宽。

表 1 性能分析实验参数

性能测试参数	设定值
网络拓扑	Tier
用户数量	300
广域网链路时延	10 ms
广域网链路速率	100 Mbit/s
广域网链路价格	1 /GB
城域网链路时延	5 ms
城域网链路速率	1 Gbit/s
城域网链路价格	0.1 /GB
局域网链路时延	1 ms
局域网链路速率	10 Gbit/s
局域网链路价格	0
内容数据分组数量	80 000 000
相对缓存大小	0~2%
Zipf(a,n)分布中 α 参数	0.6、0.9

实验拓扑基于 Tier Program^[26]生成，性能分析实验的网络拓扑图如图 5 所示。实验拓扑由 3 种类

型的网络组件组成，分别为广域网网络组件、城域网网络组件与局域网网络组件。

作为对比，本实验同时对 LCE、Random、ProbCache、LCD 与 Greedy 缓存机制的性能进行测试。在评估前，首先对各缓存机制进行预热操作，本实验总共发送 80 M 的内容请求，前 10 M 的请求用于缓存机制的预热，后 70 M 的内容请求用于缓存机制的性能测试评估。请求内容的概率 p_i 服从 Zipf-like 分布： $p_i = C/R(i)^{\alpha}$ ，其中， C 为归一化因子， α 为内容 i 的流行度排名， α 为偏度参数。实验拓扑中包含一个内容服务器，其连接实验拓扑中度最高（连接的链路数量最多）的广域网网络组件。如果度最高的广域网网络组件有多个，则随机选择其中一个。另外，将 300 个用户随机、平均地连接各局域网网络组件，用于发起网络内容请求。

图 6 展示了 LCE、Random、ProbCache、LCD、Greedy 与 C2Cache 缓存机制的缓存命中率性能。缓存命中率被定义为缓存系统中内容请求命中数占总请求数的百分比，其直接反映缓存机制的空间利用效率。总体上，C2Cache 的缓存命中率比其他主流缓存机制的缓存命中率都高。这是因为 C2Cache 通过 RM 掌握全局内容请求信息，同时通过族群协作减小了同一族群的缓存冗余，进一步均衡了缓存空间与链路带宽资源，使缓存收益最大化。另外，当 $\alpha=0.6$ 时，如图 6(a)所示，随着缓存空间的增加，缓存命中率逐渐增加，但缓存命中率的增长率逐渐减少。显然，随着缓存空间的增大，其缓存的内容增多，命中率将增大。然而，增加部分的存储空间缓存的内容流行度相对较低，产生的缓存命中率减小，从而使缓存命中率增速降低。同时，随着实验流量数据的 α 值

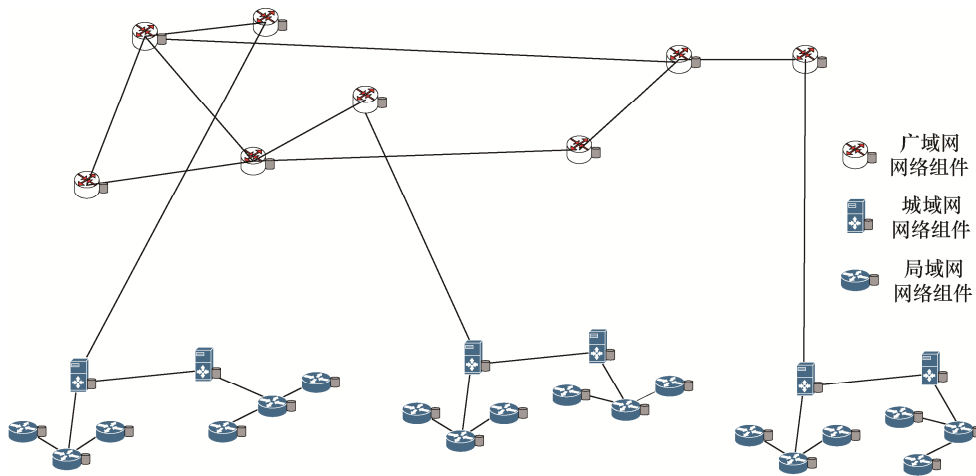


图 5 性能分析实验的网络拓扑图

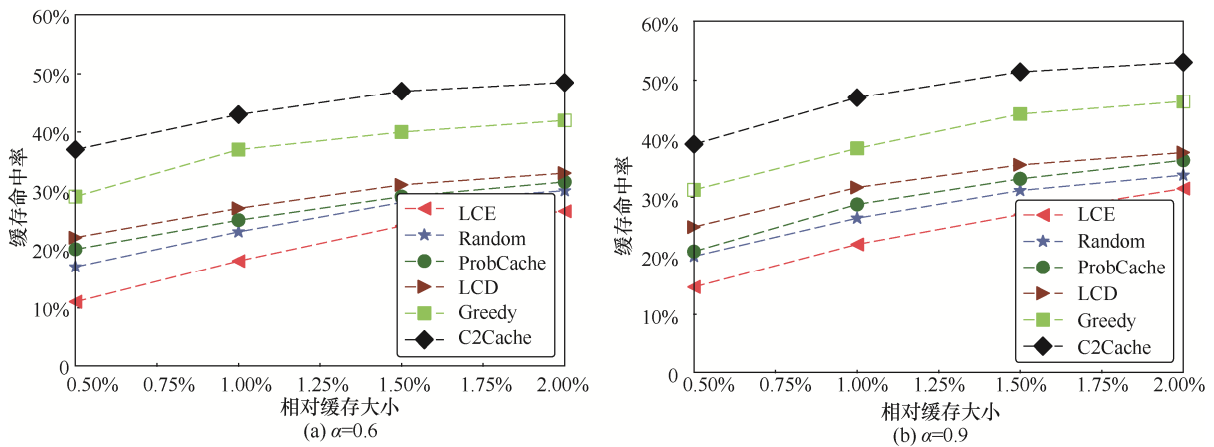


图 6 C2Cache 缓存命中率性能

增大, 缓存机制的命中率逐渐增加。如图 6(a)与图 6(b)所示, $\alpha=0.6$ 时的缓存命中率比 $\alpha=0.9$ 时的缓存命中率低 4%。这是因为随着 α 的增加, 实验流量数据中流行度排名靠前的内容占总内容的比例增大, 存储这些内容的缓存收益增大, 缓存命中率增大。

图 7 描述了 C2Cache 的访问时延性能。图 7(a)与图 7(b)分别展示了 $\alpha=0.6$ 与 $\alpha=0.9$ 的平均访问时延情况。从图 7 可以看出, 随着相对缓存大小的增加以及 α 的增加, 各缓存机制的平均访问时延逐渐减小; 同时, C2Cache 在所有缓存机制中的平均访问时延最低。如图 7(a)所示, 当 $\alpha=0.6$ 时, 随着相对缓存大小的增加, LCE、Random、ProbCache、LCD、Greedy 与 C2Cache 缓存机制的平均访问时延增长范围分别为 24.6~21.9 ms、23.2~20.6 ms、22.5~20 ms、22~19 ms、20.6~17.4 ms 与 18.7~15.8 ms。当 $\alpha=0.9$ 时, 平均访问时延值进一步降低。如图 7(b)所示, 当相对缓存大小为 2% 时, C2Cache 的平均访问时延降低至 13.3 ms。可以看到, C2Cache 能将平均访问时延降低 10%, 有效提升了用户访问体验。

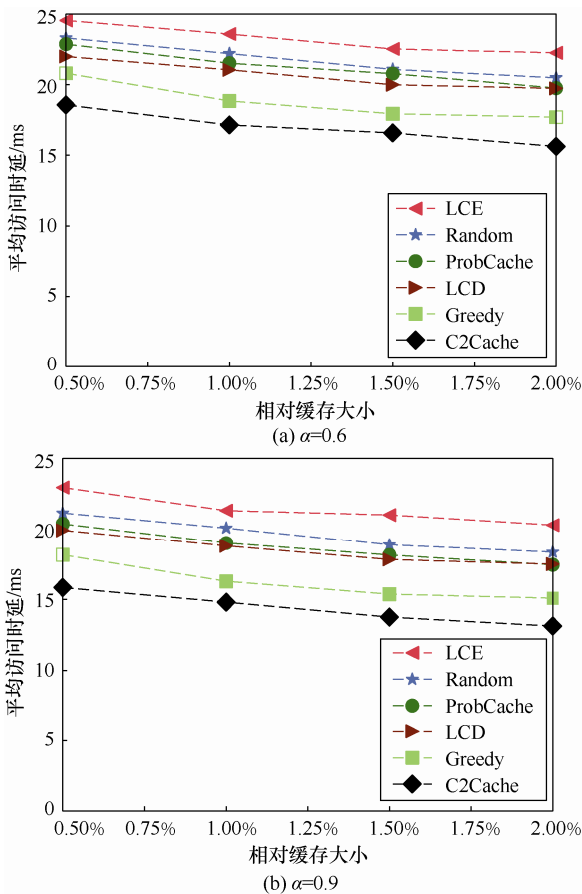


图 7 C2Cache 的访问时延性能

6 结束语

本文提出了一种 SINET 架构下的基于族群协作的缓存机制 C2Cache。C2Cache 通过利用网络拓扑状态的感知能力, 感知实际物理链路特性 (如链路速率), 并结合链路流量成本因素, 动态创建缓存功能族群。族群内所有网络组件之间拥有较高链路速率与相对低廉的流量成本, 表现为单一缓存区段。缓存族群根据流量收益排名, 保存内容副本, 从而高效地利用有限的缓存空间, 最终使得缓存收益最大化。与所有采用集中式控制的架构一样, C2Cache 集中化、细粒度的存储控制给 SINET 资源管理器带来了一定压力。因此, 下一步, 将就如何减少 C2Cache 族群协作过程中的通告信息与计算负载进行深入研究。

参考文献:

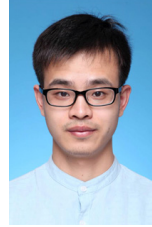
- [1] 张宏科, 程煜钧, 杨冬. 工业网络技术现状与展望[J]. 物联网学报, 2017, 1(1):13-20.
ZHANG H K, CHENG Y J, YANG D. State of the art of industrial network technologies: a review and outlook[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(1): 13-20.
- [2] CHENG N, ZHOU H, LEI L, et al. Performance analysis of vehicular device-to-device underlay communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6):5409-5421.
- [3] 张更新, 揭晓, 曲至诚. 低轨卫星物联网的发展现状及面临的挑战[J]. 物联网学报, 2017, 1(3): 6-7.
ZHANG G X, JIE X, QU Z C. Development status and challenges of LEO IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3):6-7.
- [4] XU C, QUAN W, VASILAKOS A V, et al. Information-centric cost-efficient optimization for multimedia content delivery in mobile vehicular networks[J]. Computer Communications, 2016, 99(1): 93-106.
- [5] ZHANG H, QUAN W, CHAO H C, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future Internet[J]. IEEE Network, 2016, 30(3):46-51.
- [6] KREUTZ D, RAMOS F M V, ESTEVES V P, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 103(1):10-13.
- [7] QUAN W, LIU Y, ZHANG H, et al. Enhancing crowd collaborations for software defined vehicular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(8):80-86.
- [8] RAMIREZ W, MASIP-BRUIN X, YANNUZZI M, et al. A survey and taxonomy of ID/locator split architectures[J]. Computer Networks, 2014, 60(2):13-33.
- [9] XYLOMENOS G, VERVERIDIS C N, SIRIS V A, et al. A survey of information-centric networking research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2):1024-1049.
- [10] QUAN W, XU C, GUAN J, et al. Scalable name look up with adaptive prefix bloom filter for named data networking[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(1):102-105.

- [11] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究[J]. 电子学报, 2013, 41(7): 1249-1254.
ZHANG H K, LUO H B. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7): 1249-1254.
- [12] LI H, ZHANG H. A survey on smart collaborative identifier networks[J]. China Communications, 2018, 15(3): 168-185.
- [13] ZHANG H, DONG P, QUAN W, et al. Promoting efficient communications for high-speed railway using smart collaborative networking[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(6):92-97.
- [14] 权伟, 张宏科. 未来互联网体系的研究现状、热点与探索实践[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(6):804-810.
QUAN W, ZHANG H K. Research status, hotspot and exploration practice of future Internet system[J]. Scientia Sinica Informations, 2017, 47(6): 804-810.
- [15] 兰巨龙, 王鹏, 申涓, 等. 大规模接入汇聚网络的抵近式缓存技术研究[J]. 物联网学报, 2017, 1(1):50-54.
LAN J L, WANG P, SHEN J, et al. Research on push cache of large-scale converging access convergence networks[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(1):50-54.
- [16] QUAN W, LIU Y, JIANG X, et al. Intelligent popularity-aware content caching and retrieving in highway vehicular networks[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2016(1):200.
- [17] ZHANG S, HE P, SUTO K, et al. Cooperative edge caching in user-centric clustered mobile networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(8):1791-1805.
- [18] ZHANG S, ZHANG N, YANG P, et al. Cost-effective cache deployment in mobile heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(12):11264-11276.
- [19] YANG C, YAO Y, CHEN Z, et al. Analysis on cache-enabled wireless heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1):131-145.
- [20] LI H, ZHOU H, ZHANG H, et al. Emustack: an openstack-based DTN network emulation platform (extended version)[J]. Mobile Information Systems, 2016(3):1-15.
- [21] QUAN W, WANG K, LIU Y, et al. Software-defined collaborative offloading for heterogeneous vehicular networks[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2018(99):1-9.
- [22] LAOUTARIS N, CHE H, STAVRAKAKIS I. The LCD interconnection of LRU caches and its analysis[J]. Performance Evaluation, 2006, 63(7):609-634.
- [23] PSARAS I, WEI K C, PAVLOU G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks[C]// Edition of the ICN Workshop on Information-Centric Networking, August 17, 2012, Helsinki, Finland. New York: ACM, 2012:55-60.
- [24] MING Z, XU M, WANG D. Age-based cooperative caching in information-centric networking[C]//International Conference on Computer Communication and Networks, August 4-7, 2014, Shanghai, China. Piscataway: IEEE Press, 2012:1-8.
- [25] BANERJEE B, SEETHARAM A, TELLAMBURA C. Greedy caching: a latency-aware caching strategy for information-centric networks[C]//

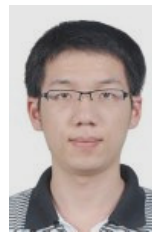
IFIP Networking Conference, June 12-16, 2017, Stockholm, Sweden. Piscataway: IEEE Press, 2018.

- [26] CALVERT K I, DOAR M B, ZEGURA E W. Modeling Internet topology[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(6):160-163.

[作者简介]



李海峰 (1989-), 男, 北京交通大学博士生, 主要研究方向为未来网络体系、智慧标识网络、软件定义网络、网络功能虚拟化与云计算网络等。



权伟 (1987-), 男, 北京交通大学讲师, 主要研究方向为未来网络体系及智慧车联网、智慧标识网络、软件定义网络、空地网络、5G和车载网络等。



承楠 (1987-), 男, 滑铁卢大学博士后, 主要研究方向为智慧车联网及 5G 网络、VANET 协议设计和网络性能分析、车载移动数据卸载、自动驾驶和车载大数据等。



张宏科 (1957-), 男, 北京交通大学教授、下一代互联网互联设备国家工程实验室主任、国家“973”项目首席科学家, 主要研究方向为未来网络体系理论及工程技术应用相关研究。



沈学民 (1958-), 男, 滑铁卢大学教授、加拿大皇家学会院士、加拿大工程院院士、加拿大工程研究院院士、IEEE Fellow, 主要研究方向为车联网、无线通信、网络空间安全理论与应用等。