

基于内容感知和团购策略的云视频分发网络

赵天骐^{1,2} 陆佃杰^{1,2} 刘一良³ 张桂娟^{1,2}

(山东师范大学信息科学与工程学院 济南 250014)¹

(山东省分布式计算机软件新技术重点实验室 济南 250014)²

(山东省教育招生考试院 济南 250014)³

摘要 云视频分发网络(Cloud Video Delivery Networks,CVDNs)将云存储技术应用于视频分发网络(Video Delivery Networks,VDNs),能够以较低的成本为用户提供高质量的视频分发服务,如在线视频、在线直播等。然而,当前的云视频分发机制对视频内容分类以及用户协作的考虑较少。如何结合视频内容分类以及用户协作关系来进一步节省用户的购买成本,是一个极具挑战性的问题。从用户角度提出了一种内容感知的团购(Content-aware and Group-buying,CG)策略,对不同的视频内容进行分类定价,允许用户组成团购联盟后购买视频内容。然后,通过定义成本公式和用户购买量约束、单用户成本约束,将CG问题描述为线性规划问题并用GLPK工具对其进行求解。实验结果表明,在内容感知条件下的团购策略可以有效地降低用户成本。

关键词 CVDNs,内容感知,团购,线性规划

中图法分类号 TP3-05 **文献标识码** A

Content-aware and Group-buying Based Cloud Video Delivery Networks

ZHAO Tian-qi^{1,2} LU Dian-jie^{1,2} LIU Yi-liang³ ZHANG Gui-juan^{1,2}

(School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)¹

(Shandong Provincial Key Laboratory for Novel Distributed Computer Software Technology, Jinan 250014, China)²

(Shandong Provincial Academy of Education Recruitment and Examination, Jinan 250014, China)³

Abstract Cloud video delivery networks (CVDNs) applies cloud storage technology to the video delivery networks (VNDs), which can provide high quality video delivery service for users at a lower cost, such as live video and live streaming. However, the impact of video content classification and user collaboration are less considered in the existing cloud video delivery mechanisms. How to combine video content classification and user collaboration to further save users' purchase cost is a challenging problem. This paper put forward a content-aware and group-buying (CG) strategy, which classifies prices for different video content and allows the users to purchase them by forming coalitions. Then, cost formula, user purchase quantity constraint and single user cost constraint were defined to formulate the CG problem as a linear programming problem which can be solved by GLPK tools. The experimental results show that the CG strategy can reduce user cost effectively.

Keywords CVDNs, Content-aware, Group-buying, Linear programming

1 引言

内容分发网络(Content Delivery Networks,CDNs)的出现缓解了网络拥塞现象的发生,降低了链路中的网络流量。CDNs提供商在不同的区域设置边缘服务器,并将用户多次访问的内容存放在边缘服务器中。用户请求网络资源时,CDN利用重定向机制将用户的请求定向到距离用户最近的本地服务器,这样既避免了因大量用户访问源服务器而造成源服务器过载过大,又减少了网络拓扑中经过链路的网络流量,同时也降低了延迟,提高了服务质量^[1](Quality of Service,QoS)。

随着网络技术的发展,出现了商业CDNs,其更好地承载

了网络流量。如Akamai公司在全球部署了150万台边缘服务器,这些服务器承载了全球每年30%的网络流量^[2]。但与此同时,网络资源不断涌现,网络流量的增长速度一直维持在20%以上,其中视频资源流量占网络流量的60%^[3],促使传统的CDNs开始将视频作为分发对象,VDNs应运而生。

近年来,CVDNs^[4]的出现正在改变我们的生活,CVDNs提供商租用云空间,将视频内容存放在云端而不只是边缘服务器,以降低存储成本和更新成本,同时降低延迟,提高用户的QoS。但是,用户在享受高服务质量的同时也需要面对高消费,CVDNs提供商若将价格设定得过高则不能吸引用户,因此需要提出一种方法来缓解二者之间的矛盾。

传统的CVDNs云视频分发机制对视频内容分类和用户

本文受国家自然科学基金(61402270,61572299,61472232,61373149,61402269),山东省自然科学基金(ZR2014FQ009),山东省高等学校科技计划(J14LN09)资助。

赵天骐(1992—),男,硕士生,CCF会员,主要研究方向为内容分发网络;陆佃杰(1981—),男,博士,副教授,CCF会员,主要研究方向为认知无线网络、云计算、内容分发网络,E-mail:ludianjie@sina.com(通信作者)。

间协作考虑得较少,不能很好地降低成本和吸引用户。针对以上问题,本文提出了一种 CG 策略方法,即将视频按照内容划分为不同的类别,并且允许用户间通过协作组成联盟后以团购的方式购买内容;同时,提出了成本公式,以用户购买量和单用户成本为约束条件,将 CG 问题描述为一个线性规划问题;最后,通过实验证明 CG 策略可以有效地降低用户成本。

本文第 2 节介绍了 VDN 优化问题的相关国内外研究现状;第 3 节介绍了 CVDNs 模式下的细粒度视频内容划分方法和团购策略思想,并提出了 CG 算法;第 4 节将问题公式化,采用合适的规划方法对问题进行求解;第 5 节进行仿真实验,并对实验结果进行评估;最后总结全文。

2 相关工作

目前,国内外学者针对 CDN 的成本优化问题已取得了一些研究成果。Papagianni 等^[4]提出了一种云内容分发网络(Cloud Content Delivery Networks,CCDNs),指出内容分发的成本包括带宽消耗成本、存储成本和内容更新成本 3 部分,并且提出了完整的成本公式和约束条件。该作者将成本优化问题规划为一种 NP 难问题,在满足用户 QoS 的条件下将成本作为目标函数,并使用整数线性规划的方法对问题进行求解;但没有对 QoS 进行具体量化。

文献[5]提出了一种提高本地服务器缓存命中率的方法,在该方法中,用户请求更多地被本地服务器满足,以减少其他服务器的开机数目,从而达到降低能耗的目的。文献[6]提出了一种用户间协作完成内容分发的方法,即某一范围内地理位置临近的用户组成虚拟用户组,以协作的方式从内容提供商处获取内容,然后在组内完成内容分发。该文章对用户组的内容传播时间和用户支付的费用进行优化,并提出了相应的优化策略,以提高用户组的整体效益;但是在优化用户组成本的同时,没有对 QoS 进行量化分析。

文献[7]运用博弈论提出了一种用户之间合作的方法,即提供商为了吸引用户,可以提出不同的价格策略;而用户间可以通过组成不同的联盟来购买商品,达到降低购买成本的目的。文中提出了群组稳定的概念,并使用博弈论证明了其存在性。文献[8]将 CDN 与云计算技术结合,不再将内容存储在 CDN 提供商的边缘服务器,而存储在云端;边缘服务器负责在云端和用户间建立内容分发路径,以在满足用户 QoS 的条件下最小化 CDN 提供商的成本。该文章提出了成本公式和约束条件,将问题规划为一个整数规划问题,并且提出了离线式和在线式贪婪算法;但是没有考虑路径上的带宽和路径距离等限制,不能很好地反映用户的 QoS。文献[9]提出了一种基于云计算的视频分发服务的部署方案,为了提高 QoS,降低提供商成本,通过权衡二者之间的关系并将问题公式化后提出了最优化服务器部署方案;但是由于在线视频的内容较大,要求用户的响应时间较短。文献[10]提出了两种内容分发的分布式算法,将内容分发中的副本放置问题看作是一个博弈问题,并使用博弈论的方法证明了算法的收敛性且最终的结果是符合纳什均衡的。文献[11]提出了一种基于传播模型的网络资源分配策略,设计多区域内容分发网络结构,并且根据传播模型有效地控制数据迁移,从而提高网络资源的利用率。文献[12-14]提出了基于内容流行度的缓存替换和存储机制,其可以有效地提高缓存命中率;并且将网络拓扑分为不同的区域,考虑了整体流行度和区域流行度的差异,提高了

准确率。文献[15]指出现有 CDN 设计过程中都将用户请求的时间信息简化,空间上的请求模型并不能得到最优的内容缓存策略。该文作者将用户请求的时间信息加入到用户请求中,提出了一种动态流量 CDN 模型,首先将缓存的放置问题规划成一个线性问题,再将目标网络中的动态流量作为输入,最小化内容分发成本。相比于静态流量的 CDN 模型,动态流量的 CDN 模型能有效地降低成本。文献[16]介绍了一种云无线接入网络中将缓存作为服务的方法,提出了总资源分配和传输速率自适应两个问题。该文章将系统成本(包括服务器成本、虚拟机成本和无线传输成本)作为目标函数,通过定义接收率的概念来刻画内容缓存和无线传输之间的关系,再将问题转化为一个混合整数非线性规划问题,最终得出结论:无线传输速率与缓存大小成反比,如果缓存比预计传输的文件短,那么系统应该加快无线传输速率,以补偿文件检索的延迟。文献[17-18]研究无线接入网络的能量效率,提出了两种不同的传输策略,即数据共享策略和压缩策略,并在不同的实验条件下比较了两种方法的优势与缺陷。

3 系统架构

3.1 团购策略

团购的方法已经被广泛应用于日常生活中,如商家为了吸引更多的客户,会推出一系列的产品组合,客户购买这些产品组合会享受一定的折扣。在这样的情况下,用户购买商品的花费会降低,而商家也会因为更多的客户购买而获得更高的利润,从而达到客户和商家双赢的目的。

借鉴团购策略的思想,内容提供商可以提出一种阶梯折扣的团购策略来吸引用户。如图 1 所示,横轴表示用户购买视频内容的数量,当用户的购买量在 $0 \sim a_1$ 之间时,用户不能享受折扣,需按原价支付费用;当用户的购买量在 $a_1 \sim a_2$ 之间时,用户可以享受一定的折扣;如果用户的购买量大于 a_2 ,则其可以享受更大的折扣。

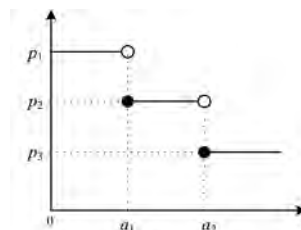


图 1 阶梯折扣图

对于用户来说,购买更多的视频内容能享受更大的折扣,从而使得购买的单价越低。但是,单个用户的购买能力是有限的,为了获得更大的折扣,用户就会寻求与其他用户合作来一起购买视频内容。我们把这样的行为叫做云视频团购。

3.2 内容感知策略

传统的 CVDNs 只是简单地处理用户请求,没有考虑到视频内容和用户请求的多样性。假设将视频内容看作商品,商品的价格和作用应是各不相同的,那么视频种类和时长也不相同,而传统的 CVDNs 只考虑了时长和价格的关系。存在以下两种用户不会选择团购的情况:如果用户的请求都是时长较短的视频内容,达不到提供商提出的最低团购折扣的购买量;或某一位用户购买量已经达到折扣标准,与其他用户组成联盟不会降低花费。在上述情况中,CVDNs 提供商提出的团购策略是不可行的。

对此,可以使用细粒度的视频内容划分方法,将所有视

频内容划分为不同的种类,并为每个种类设置不同的团购阶梯折扣。例如,新闻类视频时长较短,可以设定较低的团购折扣起始点;而影视类视频时长较长,对其可以设定较高团购折扣起始点。图2与图3分别给出了新闻类和影视类的阶梯折扣策略,可以看出,新闻类视频折扣的时间节点分别为30min和60min,而影视类为300min、600min和900min,时间节点可根据每类视频的时长特点设置。其他视频内容也可以按视频内容和时长特点分为音乐类、科教类等。在这种视频内容细粒度划分的方法下,用户的不同请求可以得到满足;同时,其也可以与其他用户共同请求同种类的内容,以享受团购折扣。

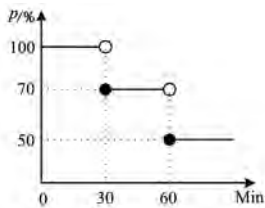


图2 新闻类视频内容的阶梯折扣

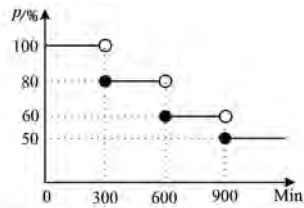


图3 影视类视频内容的阶梯折扣

因此,细粒度的视频内容划分方法能有效解决视频时长对用户参与团购的影响,防止某些用户由于观看视频时间较短而不能参与团购的现象。

3.3 CVDNs 中的团购策略

CVDNs 的网络拓扑如图4所示,其中 S_0 表示源服务器, S_1-S_5 表示边缘服务器, U_1-U_3 代表3位用户。由图4可以看出,3位用户向边缘服务器 S_1 发出请求,分别用 R_1, R_2 和 R_3 表示,此时 S_1 为3位用户的本地服务器。

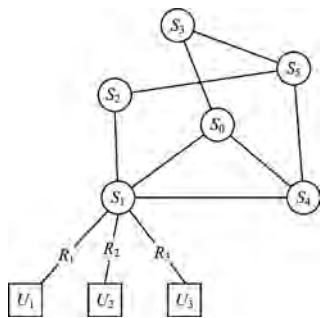


图4 CVDNs 的网络拓扑

假设本地服务器 S_1 不能满足用户请求,则向其他边缘服务器发送用户请求。如图5所示,用户 U_1, U_2 和 U_3 的请求分别被边缘服务器 S_2, S_4 和 S_5 满足,边缘服务器将内容发送到本地服务器 S_1 ,再由 S_1 提供给用户。

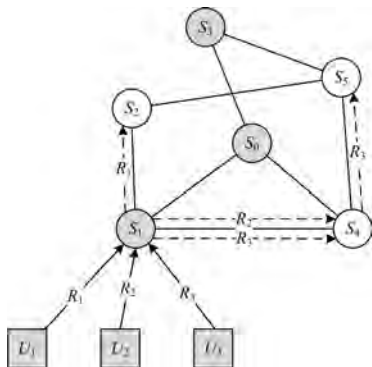


图5 CVDNs 的视频分发过程

图5所示的视频分发过程未加入团购策略。假设边缘服务器 S_5 可以满足3位用户的请求,但通过考虑带宽、延迟和QoS等因素, S_5 并不是用户 U_1 和用户 U_2 的最佳选择。为了吸引用户, S_5 可以提出团购策略,规定用户数量或视频购买量达到一定额度时可以享受折扣。此时,用户会在QoS与成本之间进行权衡,既可以选择高QoS和高花费,也可以选择相对较低的QoS和低花费。

如图6所示,用户 U_2 和用户 U_3 组成了一个团购联盟,且选择边缘服务器 S_5 提供视频内容。在这个联盟中,用户 U_2 选择了非最优服务器, QoS 会受一定影响,但是由于享受折扣而花费降低;用户 U_3 还是从边缘服务器 S_5 获取视频内容, QoS 保持不变,花费降低,因此 U_3 是团购联盟中的最大获益者。

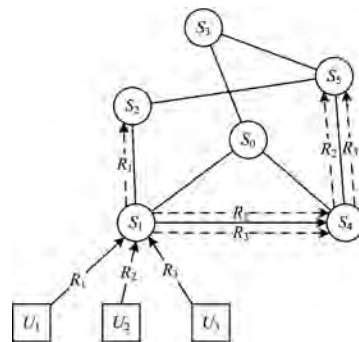


图6 加入团购策略的视频分发过程

4 问题规划

4.1 网络拓扑

为了获得稳定的团购策略和用户购买策略,把所有服务器的集合看作一个网络拓扑,网络中的用户被映射到各个服务器上,用户的需求可以被不同的服务器满足。在这一过程中,用户可以选择不同的团购策略以减少获取视频内容的花费,也可以与其他用户组成联盟获取折扣以减少花费。本节通过一个实例来说明如果更多的用户参与团购,那么对于参与团购的每个用户来说团购不一定是最优选择。

用无向连通图 $F=(S, E)$ 来表示服务器的网络拓扑,其中, S 表示服务器集合, $S=\{S_0, S_1, S_2, \dots, S_n\}$; E 表示路径集合,代表服务器间是否存在链路。此外,用 U 表示用户集合,并用 i 表示其中的某位用户;用 J 表示内容集合,并用 j 表示其中的某种内容。一位用户可以请求多种视频内容,用矢量 $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij})$ 表示用户 i 的购买策略,其中 x_{ij} 表示用户 i 购买视频内容 j 的数量。

4.2 团购策略的成本

用户 i 的花费是购买所有视频内容成本的和。假设已知用户 i 的购买策略为 X_i , 每单位内容的价格为 p_j , 根据前文提出的阶梯折扣策略,内容的价格随着用户购买量的增加会出现阶梯状降低,为此将每单位内容的价格定义为一个分段函数 $p_j(\cdot)$, 其中变量为内容 j 的购买量。因此,用户 i 的成本公式为:

$$\sum_{j \in E} x_{ij} p_j(x_{ij})$$

已知用户 i 对视频内容 j 的请求量为 d_{ij} , 而视频内容 j 每单位的数量配置为 v_j , 为了满足用户 i 的请求,需满足以下条件:

$$\sum_{j \in E} x_{ij} v_j \geq d_{ij}, \forall j \in E$$

在团购策略的思想中,单个用户的购买量有限,难以达到提供商提出的折扣额度,而用户可以组成不同的团购联盟,其中可包括一个或多个用户,当总购买量达到折扣额度时,联盟中的用户都可以享受此折扣。

假设已知一个团购联盟 $C, C \subseteq U$, 将参与团购联盟的用户定义为 $i', i' \in U$, 其中每位用户 i' 都处于合作博弈的状态, 用户是否参与联盟或不同的购买策略都会影响联盟中的其他用户。在团购联盟中, 将联盟中所有用户的总成本设为目标函数, 将每位用户的需求作为约束条件, 要求在满足用户需求的前提下最小化成本:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i \in C} \sum_{j \in E} x_{ij} p_j \left(\sum_{i' \in C} x_{i'j} \right) \\ \text{s. t.} & \sum_{j \in E} x_{ij} v_j \geq d_{ij}, \forall j \in E, \forall i \in C \end{aligned}$$

在上述目标函数中, 当价格函数 $p_j(\cdot) (\forall j \in E)$ 不再随用户购买量的变化而变化时, 目标函数可被简化为一个背包问题, 是一种典型的 NP 难问题。本文使用线性规划工具 GLPK(GNU Linear Programming Kit)来解决此问题。

4.3 算法描述

本节提出一种 CG 策略的算法, 算法描述如下:

Step1 计算不参与团购联盟时每位用户的花费 c_i^1 和总成本 C_1 ;

Step2 假设所有用户都参与团购联盟, 计算此时每位用户的花费 c_i^2 和总成本 C_2 。

Step3 判断 c_i^2 与 c_i^1 的大小, 如果 $c_i^2 > c_i^1$, 则用户 i 将退出团购联盟;

Step4 计算联盟中剩余用户的花费 c_i^2 和总成本 C_2 ;

Step5 重复 Step3 和 Step4, 直至团购联盟中每位用户的成本 $c_i^2 \leq c_i^1$;

Step6 计算每位用户的实际成本 c_i^3 和总成本 C_3 。

4.4 团购策略的实例

本节用一个实例来说明问题规划。已知网络拓扑 $F =$

(S, E) 中存在两种服务器 S_1 和 S_2 , 其已存储的视频内容可满足 3 位用户 U_1, U_2 和 U_3 的请求, 用户请求的视频内容包括新闻类、影视类和音乐类 3 种, 分别用 α, β 和 γ 表示。视频内容提供商提出的价格如表 1 所列, 表中第一行是 3 种视频内容, 第二行与第三行是服务器 S_1 和 S_2 的价格, 如 10/2 表示用户观看视频 10min 须收费为 2。其中, 服务器 S_1 的视频内容的价格是固定的, 而服务器 S_2 的视频内容的价格可随用户购买量的增多呈阶梯状降低, 并且初始价格较服务器 S_1 高。

表 1 服务器的视频内容的价格表

内容 \ 服务器	α	β	γ
S_1	10/2	20/5	5/3
	8/2	20/6	3/3
S_2	8/1.6	20/4.8	3/2.4
	8/1.4	20/4.2	3/2.1

3 位用户的视频内容请求如表 2 所列, 第一行为 3 类视频内容, 第二行是用户 U_1 对 3 类视频的请求时间, 如 15 表示用户 U_1 请求 α 类视频内容 15min, 用户 U_2 和用户 U_3 的请求时间如表中第三、四行所示。

表 2 用户的视频内容请求表

内容 \ 服务器	α	β	γ
U_1	15	20	3
U_2	10	35	6
U_3	17	38	10

表 3 列出了 3 位用户联盟的团购组合策略与成本的所有可能情况, 并计算其各自的花费和总成本。表中第一列表示团购策略组合; 第二列表示服务器的选择情况和视频内容的购买量; 第三列计算每位用户单独的花费; 最后一列计算 3 位用户的总成本。

表 3 团购组合策略与成本

团购组合	购买策略			用户成本			总成本
	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3	
$\{U_1, \{U_2, \{U_3\}\}$	$\{(2, 2, 1), 0\}$	$\{(1, 2, 1), 0\}$	$\{(2, 2, 2), 0\}$	12.0	18.0	20	50.0
$\{U_1, U_2, \{U_3\}\}$	$\{0, (2, 1, 1)\}$	$\{0, (2, 2, 2)\}$	$\{(2, 2, 2), 0\}$	10.4	17.6	20	48.0
$\{U_1, U_3, \{U_2\}\}$	$\{0, (2, 1, 1)\}$	$\{(1, 2, 1), 0\}$	$\{(0, (3, 2, 4)\}$	10.4	18.0	24	52.4
$\{U_1, \{U_2, U_3\}\}$	$\{(2, 1, 1), 0\}$	$\{0, (2, 2, 2)\}$	$\{0, (3, 2, 4)\}$	12.0	17.6	24	53.6
$\{U_1, U_2, U_3\}$	$\{0, (2, 1, 1)\}$	$\{0, (2, 2, 2)\}$	$\{0, (3, 2, 4)\}$	9.1	15.4	21	45.5

在上述实例中, 3 位用户共同组成联盟的总成本最低, 但此时用户 U_3 的花费 21 高于不参与团购联盟的花费 20。由于用户的自私性, 用户 U_3 不参与团购联盟, 此团购组合不成立。而当用户 U_1 和用户 U_2 组成联盟时, 其各自的花费较不参与团购的花费有所减少, 且总成本降低, 此团购策略可行。因此, 最终的团购组合是 $\{U_1, U_2\}, \{U_3\}$ 。

5 实验与结果分析

本节将对 CVDNs 中团购策略的性能(如用户花费、QoS 等)进行对比实验。所有实验是在一台搭载了 Core i7 处理器、CPU 频率为 3.1GHz、8GB 内存的计算机环境下进行的。首先, 使用 Visual Studio 2013 和 MATLAB 生成网络拓扑和用户; 然后, 将用户总成本作为目标函数, 将用户请求和单用户花费作为约束, 提出线性规划问题, 并用线性规划工具 GLPK 进行求解。

5.1 网络拓扑

首先, 在 10×10 的范围内随机生成 10 个节点, 每个节点代表一个服务器, 其中一个为源服务器, 其余为边缘服务器。将边缘服务器分为两类, 第一类视频内容的价格固定, 称为 S_1 类服务器; 第二类视频内容的价格随用户数的增多而降低, 称为 S_2 类服务器。 S_2 类服务器视频内容的初始价格要高于 S_1 类服务器视频内容的初始价格, 目的是防止用户盲目参与团购联盟而导致服务器负载过重。在本文实验中, 将视频内容设置为 3 类: 新闻类, 影视类和音乐类。在第一组服务器中, 3 类视频内容的定价分别为新闻类每 10 min 收费 2, 影视类每 20min 收费 5, 音乐类每 5min 收费 3; 第二组服务器中新闻类每 8 min 收费 2, 影视类每 20 min 收费 6, 音乐类每 3 min 收费 3。

然后, 在 10×10 的范围内生成 3~20 个节点, 每个节点表示一位用户, 并将距离用户较近的 S_1 类服务器作为用户的

本地服务器,用户将请求发送到本地服务器,再由本地服务器满足或转发。新闻类视频请求的时长范围为 15~40 min,影视类为 20~60 min,音乐类为 3~20 min。

最后,将阶梯折扣策略设置为 3 段:当团购联盟中的用户数少于总用户数的 50% 时,不能享受折扣;当团购联盟中的用户数多于总用户数的 50% 而低于 75% 时,可享受 20% 的折扣;当团购联盟中的用户数多于总用户数的 75% 时,可享受 30% 的折扣。

现实中,CVDNs 将视频内容分发给用户的过程会经过服务器节点,这些服务器节点会根据实际情况(如内容流行度)判断是否存储这些视频内容。本文独立重复实验多次,每一组实验都重新生成网络拓扑及用户,用以表示 CVDNs 的原始状态,考虑 CVDNs 对用户请求的单个处理。

5.2 对比实验

图 7 给出了用户总成本关系图,其中上方三角形符号标识的折线是无团购策略情况下的用户总成本,可以看出其一直高于其他两种情况下的用户总成本。下方虚线是所有用户均参与团购联盟的总成本,当所有用户均参与团购联盟而享受最高折扣时,其总成本最低。但是因为用户的自私性,所有用户均参与联盟只是一种理想状态,可以作为一种参考值。唯一的例外出现在用户数量为 7 时,此时的实际总成本低于用户均参与团购联盟的总成本。这种情况可能是一位用户因为参与了团购联盟而花费增多,退出团购联盟后花费降低,而他的离开不影响联盟中的其他用户继续享受折扣,其他用户花费不变,因此总成本降低。

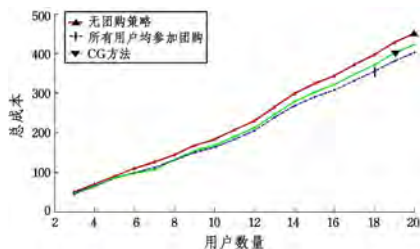


图 7 3 种条件下的总成本关系图

如果以无团购策略条件下的用户总成本为标准,则其他两种情况的占比如图 8 所示。从图中可以看出,当用户较少时,单个用户的行为对团购联盟的影响较大,用户的加入和离开对其他用户可享受的折扣有较大影响。而当用户数量增多时,单个用户占总用户数的比例降低,因此对总成本的影响较小,实际成本比无团购策略条件下的总成本降低约 8%。

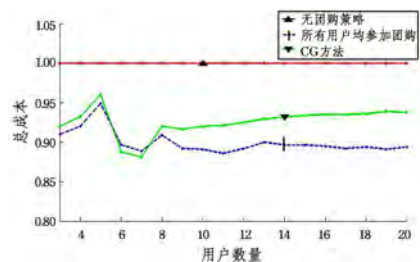


图 8 3 种条件下的总成本比值

响应时间是衡量 QoS 的重要指标,内容分发经过的链路长度与响应时间成正比。因此,本实验中使用内容分发过程中经过链路的物理距离来衡量响应时间,并且规定用户请求

被本地服务器满足这一过程的响应时间为 2。假设 30% 的用户请求可被本地服务器满足,70% 的用户请求被其他边缘服务器满足。在第一组实验中不存在团购策略,若用户从 S_2 类服务器获得视频内容则花费增加,因此用户为了减少花费而选择 S_1 类服务器。第二组实验存在团购策略,参与团购联盟的用户从 S_2 类服务器获取内容,由于目的服务器改变,用户请求经过的物理距离也会改变,因此响应时间会发生变化;而不参与团购联盟的用户仍从 S_1 类服务器获取内容,其目的服务器没有改变,响应时间不变。实验结果如图 9 所示。

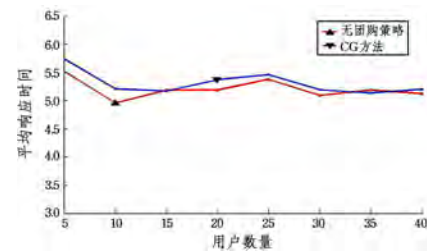


图 9 平均响应时间

从图 9 可以看出,在有团购策略和无团购策略的条件下,参与团购联盟用户的平均响应时间基本相同,表明用户在选择参与团购联盟时,QoS 基本不受影响。

结束语 为了解决 CVDNs 中较少考虑视频内容分类及用户协作关系的问题,本文提出了一种 CG 策略。首先,CG 策略对不同的视频内容进行分类定价,从而解决了不同视频内容有相同时长和定价的问题;同时,CG 策略允许用户间组成团购联盟后以团购的方式购买内容,使用户因享受折扣而降低花费。最后,我们以用户总成本为目标函数,用户购买量和单用户成本为约束,提出了线性规划问题,并使用 GLPK 工具进行解决。实验结果表明,基于内容感知的团购策略方法在保护用户 QoS 的前提下能有效降低用户成本。本文在多服务器多用户实验方面考虑不周,今后将增加服务器数量,并考虑网络拓扑变化的情况。

参考文献

- [1] 张玉洁,何明,孟祥武. 基于用户需求的内容分发点对点网络系统研究[J]. 软件学报,2014,25(1):98-117.
- [2] NYGREN E, SITARAMAN R K, SUN J. The Akamai network: a platform for high-performance internet applications[J]. Acm Sigops Operating Systems Review, 2010, 44(3): 2-19.
- [3] Index VN. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2010-2015[R]. White Paper Cisco Systems Inc, 2011.
- [4] PAPAGIANNI C, LEIVADEAS A, PAPAVALASSILOU S. A Cloud-Oriented Content Delivery Network Paradigm: Modeling and Assessment[J]. IEEE Transactions on Dependable & Secure Computing, 2013, 10(5): 287-300.
- [5] XU N, YANG J, NEEDHAM M, et al. Toward the Green Video CDN[C]//Green Computing and Communications. IEEE, 2010: 430-435.
- [6] 胡海洋,李忠金,胡华. 面向移动社交网络的协作式内容分发机制[J]. 计算机学报,2013,36(3):613-625.
- [7] WANG J, XIAO X, WANG J, et al. When group-buying meets cloud computing[C]//Proc. of IEEE INFOCOM 2016. 2016: 1-9.

- [8] CHEN F, GUO K, LIN J, et al. Intra-cloud lightning: Building CDNs in the cloud[C]//Proc. of IEEE INFOCOM 2012. 2012: 433-441.
- [9] HE J, WU D, ZENG Y, et al. Toward Optimal Deployment of Cloud-Assisted Video Distribution Services[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2013, 23(10): 1717-1728.
- [10] PACIFICI V, DAN G. Distributed algorithms for content allocation in interconnected content distribution networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2015. 2015: 2362-2370.
- [11] 王智. 在线社交视频内容分发策略研究[D]. 北京:清华大学, 2013.
- [12] LI S, XU J, SCHAAR M, et al. Popularity-driven content caching[C]//Proceedings of INFOCOM 2016. 2016: 1-9.
- [13] 叶剑虹, 叶双. 基于混合模式的流媒体缓存调度算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(2): 61-64.
- [14] 聂华, 张敏, 郭敬荣. 基于内容流行度差异性的 CDN-P2P 融合分发网络缓存替换机制研究[J]. 通信学报, 2015, 36(s1): 9-15.
- [15] TANG G, WU K, BRUNNER R. Rethinking CDN design with distributed time-varying traffic demands[C]//IEEE INFOCOM 2017 IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2017: 1-9.
- [16] TANG J, QUEK T Q S, TAY W P. Joint resource segmentation and transmission rate adaptation in Cloud RAN with Caching as a Service[C]//IEEE, International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. IEEE, 2016.
- [17] DAI B, YU W. Energy Efficiency of Downlink Transmission Strategies for Cloud Radio Access Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 1037-1050.
- [18] LIU D, YANG C. Energy Efficiency of Downlink Networks With Caching at Base Stations[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 34(4): 907-922.

(上接第 317 页)

结束语 根据网络背景知识, 本文提出了一种高效的基于离散势能理论的半监督社团探测方法。从实验结果可以看出, 当将背景知识融入社团探测过程中时, 可以大大提高算法的性能, 特别是当网络社团结构是模糊的情况下。此外, 背景知识在本文算法中应用得越多, 社团划分的结果就会越好。

值得一提的是, 在实际的应用中社团数量这一信息必须提前给出, 这是一个非常严格的约束。未来的工作将集中于没有社团数量先验信息的情况, 使之能够准确地识别更加一般情况下的社团结构。

参 考 文 献

- [1] VAN D S M. Graph clustering by flow simulation[D]. Utrecht: University of Utrecht, 2000.
- [2] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community structure in social and biological networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [3] FORTUNATO S. Community detection in graphs[J]. Physics Reports, 2010, 486(3): 75-174.
- [4] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 026113.
- [5] LI H J, DANIELS J J. Social significance of community structure: Statistical view[J]. Physical Review E, 2015, 91(1): 012801.
- [6] NEWMAN M E J. Modularity and community structure in networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(23): 8577-8582.
- [7] LI H J, WANG Y, WU L Y, et al. Potts model based on a Markov process computation solves the community structure problem effectively[J]. Physical Review E, 2012, 86(1): 016109.
- [8] 李慧嘉, 李慧颖, 李爱华. 多尺度的社团结构稳定性分析[J]. 计算机学报, 2015, 38(2): 301-312.
- [9] SON S W, JEONG H, NOH J D. Random field Ising model and community structure in complex networks[J]. The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems, 2006, 50(3): 431-437.
- [10] 李慧嘉, 李爱华, 李慧颖. 社团结构迭代快速探测算法[J]. 计算机学报, 2017, 40(4): 970-984.
- [11] WESTON J, LESLIE C, IE E, et al. Semi-supervised protein classification using cluster kernels[J]. Bioinformatics, 2005, 21(15): 3241-3247.
- [12] MA X, GAO L, YONG X, et al. Semi-supervised clustering algorithm for community structure detection in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010, 389(1): 187-197.
- [13] EATON E, MANSBACH R. A Spin-Glass Model for Semi-Supervised Community Detection[C]//AAI. 2012.
- [14] ZHANG Z Y. Community structure detection in complex networks with partial background information[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 3241.
- [15] GRADY L. Random walks for image segmentation[J]. IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(11): 1768-1783.
- [16] ZHANG Q M, LÜ L, WANG W Q, et al. Potential theory for directed networks[J]. PloS One, 2013, 8(2): e55437.
- [17] WANG F, ZHANG C. Semisupervised learning based on generalized point charge models[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(7): 1307-1311.
- [18] DOYLE P G, SNELL J L. Random walks and electric networks[M]. Mathematical Association of America, 1984.
- [19] GOLUB G H, VAN LOAN C F. Matrix computations[M]. JHU Press, 2012.
- [20] ZACHARY W W. An information flow model for conflict and fission in small groups[J]. Journal of Anthropological Research, 1977, 33(4): 452-473.
- [21] CLAUSET A, NEWMAN M E J, MOORE C. Finding community structure in very large networks[J]. Physical Review E, 2004, 70(2): 066111.
- [22] LANCICHINETTI A, FORTUNATO S, RADICCHI F. Benchmark graphs for testing community detection algorithms[J]. Physical Review E, 2008, 78(4): 046110.
- [23] ROSVALL M, BERGSTROM C T. Maps of random walks on complex networks reveal community structure[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(4): 1118-1123.
- [24] LUSSEAU D, NEWMAN M E J. Identifying the role that animals play in their social networks[J]. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2004, 271(Suppl 6): S477-S481.