

基于用户偏好的多内容移动视频传输系统的效益优化

许精策^{1,2,3} 梁冰^{1,2,3} 李梦楠^{1,2,3} 纪雯^{1,3} 陈益强^{1,2,3}

(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)¹ (中国科学院大学 北京 100190)²

(移动计算与新型终端北京市重点实验室 北京 100190)³

摘要 近年来,4G 和 5G 网络的出现大大提高了移动设备数据传输的带宽,同时视频播放设备的性能也不断提高,使得用户对视频流媒体质量的要求不断提升。因此,提升移动视频传输系统的效益变得越来越重要。文中从用户偏好的角度出发,分析多内容移动视频传输系统中用户偏好对系统效益的影响,同时考虑流量价格对用户效益的影响,建立了基于用户偏好的用户效益模型,将多内容移动视频传输系统的效益优化问题转化为加权用户总效益的优化问题。考虑到拥有不同偏好的用户对用户总效益的影响不同,文中提出了一种基于偏好-码率比的用户权重选择方法,以此来选取当前用户偏好下的最优权重。文中通过求解最优加权用户总效益优化问题,得到了当前用户偏好下的最优视频传输码率。实验结果表明,所提方法相比现有效益优化方法提升了 5%~10% 的系统总效益。

关键词 用户偏好,偏好-码率比,效益,视频传输,多内容,流量代价

中图分类号 TP305 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.03.014

Profit Optimization for Multi-content Video Streaming over Mobile Network Based on User Preference

XU Jing-ce^{1,2,3} LIANG Bing^{1,2,3} LI Meng-nan^{1,2,3} JI Wen^{1,3} CHEN Yi-qiang^{1,2,3}

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)¹

(University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China)²

(Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China)³

Abstract In recent years, the emergence of 4G and 5G network has greatly improved the bandwidth of mobile device data transmission, while the performance of video playback devices has been also improved, which increases the user's demand on the quality of video streaming gradually. Thus, improving the profit of video streaming over mobile network is becoming more and more important. This paper analyzed the effect of user preference on the profit of multi-content videostreaming system. Moreover, this paper proposed the profit model of End Users based on user preference by considering the traffic cost and formulated the optimization problem of total system profit into weighted profit optimization problem. Considering that the users with different preferences have different effects on the total profit of video streaming system, this paper proposed a weight selection algorithm of End Users based on preference-bitrate ratio to select the optimal weights under the condition of current user preferences. Then the optimal bitrate under the condition of current user preference was obtained by solving the optimization problem of optimal weighted profit of End Users. The experimental results show that the proposed method improves the total profit of system by 5%~10% compared with the existing method.

Keywords User preference, Preference-bitrate ratio, Profit, Video transmission, Multi-content, Traffic cost

1 引言

随着互联网技术的不断发展,视频流量占整个互联网流量的比重也在不断升高。根据 Cisco 公司的估计,截止 2021 年,全世界的互联网流量中有 82% 的流量将会是视频流量,

相比 2016 年增长了 73%^[1]。因此,对流媒体视频传输系统中终端用户的效益进行优化变得尤为重要。然而,优化终端用户的效益是相对困难的,其原因在于终端用户的效益与许多因素有关,如用户对视频种类的偏好、视频传输时的码率以及用户观看视频时所需要付出的流量代价。

到稿日期:2018-07-11 返修日期:2018-09-21 本文受国家重点研发计划(2017YFB1400100),国家自然科学基金(61572466),北京市自然科学基金(4162059)资助。

许精策(1994-),男,硕士生,主要研究方向为多媒体通信网络、视频传输与 QoE 优化;梁冰(1992-),男,博士生,主要研究方向为进化博弈论与视频传输;李梦楠(1994-),女,硕士生,主要研究方向为视频传输与 QoE 优化;纪雯(1976-),女,博士,研究员,主要研究方向为信息编码与多媒体通信网络,E-mail:jiwen@ict.ac.cn(通信作者);陈益强(1973-),男,博士,研究员,主要研究方向为人机交互与普适计算。

近年来,关于用户偏好在视频传输方面的研究成果有很多。文献[2]研究了在考虑用户偏好的条件下视频传输系统中缓存选择策略的问题,通过提升用户观看视频的缓存命中率来提升视频传输系统的性能。文献[3]研究了如何通过用户偏好来提升移动视频传输系统中视频内容的传输速率,从而提升用户观看视频时的体验。文献[4]提出了一种根据用户偏好来衡量用户观看体验的视频质量模型。然而,上述方法并没有从视频码率的选择方面去考虑用户效益的提升;同时,上述研究内容也没有对用户观看视频时产生的流量代价进行考虑,也就是说,上述方法考虑的是如何尽可能地提升用户观看视频时的码率。然而现实生活中,过高的视频码率会导致过高的流量费用,进而影响用户观看视频时的效益。

另一方面,一些研究工作将流量代价纳入考虑范围,意在保证用户观看质量的同时降低观看视频时付出的流量代价,从而提升用户的效益。文献[5]提出了一种价格激励机制,通过这种价格的激励机制使得用户在观看视频的同时从其他用户处获取收益,以此来弥补流量代价。文献[6]通过设计 Sponsored Data 来激励用户选择更高的码率观看视频,从而增加用户的效益。文献[7]提出了一种码率分配方案,将流量价格作为参数进行建模,以此获得一定流量价格下的最优码率,同时提升用户的效益。虽然以上研究工作都在提升用户效益上做出了贡献,但是这些研究工作并没有联合考虑流量代价与用户偏好对用户效益的影响。

针对上述研究工作的不足之处,本文首先从用户偏好的角度出发,分析多内容移动视频传输系统中用户偏好对系统效益的影响,同时考虑流量价格对用户效益的影响,建立了基于用户偏好的用户效益模型;其次,本文进一步分析了用户偏好与码率对视频传输系统总效益的影响,并提出了基于偏好-码率比的用户权重分配方案;最后,通过求解系统总效益优化模型,获取适用于当前用户偏好的每一个用户进行视频传输的最佳码率。实验结果表明,本文提出的方法在系统总效益方面比现有效益优化方法提升了5%~10%。

本文的贡献如下:1)考虑了用户对不同视频内容的偏好以及移动用户观看视频时所付出的流量费用,建立了基于用户偏好的用户效益模型,提出了一种基于偏好-码率比的最优用户权重分配方法;2)在最优用户权重的基础上,通过求解用户效益模型,提出了最优码率选择算法,使得系统的总体效益达到最优;3)通过对比实验证明了本文所提方法在系统总效益方面比现有效益优化方法提升了5%~10%。

2 系统模型与目标

本节主要介绍多内容视频传输系统的基本概念、用户偏好预测模型以及基于用户偏好的用户效益模型,最后介绍了本文所需要优化的目标。

2.1 多内容视频传输系统的概念

本文所讨论的多内容视频传输系统的总体结构如图1所示。视频传输系统中参与视频传输的实体可以分为3类,分别是视频内容提供商(CP)、互联网服务提供商(ISP)以及终端用户(EU)。其中,视频内容提供商的职责是对现有的视频

进行分类存储,并向终端用户提供视频服务;终端用户向互联网服务提供商购买上网服务,并观看存储在视频内容提供商之中的视频。假设视频服务提供商将视频分为 M 个种类, $V^m = \{V_1^m, V_2^m, \dots, V_S^m\}$ 表示属于某一个种类 m 的视频集合。对于一个特定的用户 E_i ,在观看视频时,其对于不同种类的视频存在不同的偏好,用来 P_i^m 表示。

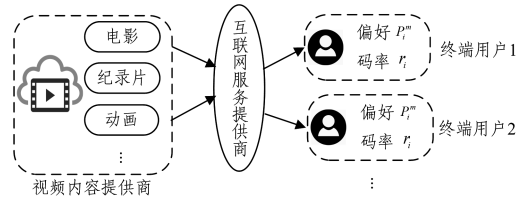


图1 多内容视频传输系统的总体结构

Fig.1 Overview of multi-content video streaming system

为了提升视频传输中码率的灵活性,使终端用户可以根据自己的偏好和效益选择合适的码率去观看视频,视频内容提供商将同一个视频编码为不同的码率并进行存储,这些码率可以用一个集合来表示,即 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_K\}$,终端用户 E_i 在播放时根据需求选择码率 $r_i \in R$ 来接收视频并进行播放。

2.2 用户偏好预测模型

用户偏好因子表示的是用户对某一类视频的喜好程度,用户偏好因子越高,表明用户越喜欢这一类视频。根据这一特点,本文使用 Mean Opinion Score (MOS)^[8]来反映用户对某一类视频的偏好。MOS有5个等级,分别对应的评分是:1(非常不满意),2(不满意),3(中立),4(满意),5(非常满意)。用户的MOS越高,表明用户对视频的偏好程度越高。

本文采用 movielens 数据集^[9]来获取用户的MOS数据, movielens 数据集中的每一条数据包含视频名称、视频所属类别、用户特征以及用户的MOS值4个方面的数据。具体的参数列表如表1所列,其中视频所属类别包含动作片、冒险片、动画片等19个类别;用户特征包括年龄、性别和职业。本文对用户的年龄特征做了分段处理,将用户的年龄分为18岁以下、19-25岁、26-35岁、36-45岁、46-55岁、56-65岁以及65岁以上7个年龄阶段。根据这些MOS数据,可以预测出某一个拥有特定年龄、性别和职业的用户对某一类视频的MOS值。

表1 movielens 数据集的参数列表

Table 1 Attributes of movielens dataset

参数名称	取值
视频类别	动作片、冒险片、动画片、儿童片、喜剧等
用户性别	男、女
用户年龄	7-73岁
用户职业	管理人员、艺术工作者、医生、教育人员、工程师等
MOS	1-5

由于本文的工作重点不在于提升用户偏好预测的准确率,因此本文选用了计算较为简单的线性回归模型作为预测模型。令 \tilde{y} 表示用户的MOS, $\tilde{x} = (a, g, o, l)^T$ 表示用户特征与视频所属的类别,其中 a 代表用户的年龄, g 代表用户的性别, o 代表用户的职业, l 代表用户观看的视频类别。通过在

现有的 movielens 数据集上做线性回归,可以得到 \tilde{x} 与 \tilde{y} 满足如下关系:

$$\tilde{y} = \omega^T \tilde{x} + b \quad (1)$$

其中, ω 由线性回归求出。

2.3 基于用户偏好的用户效益模型

一般来说,用户的效益受到两个方面的影响,分别是用户观看视频时产生的效用以及用户观看视频时产生的流量代价。本文采用 α -fair 效用来衡量用户观看视频时产生的效用^[6],即:

$$U_i^{EU} = \frac{r_i^{1-\alpha}}{1-\alpha} \quad (2)$$

其中, α 表示用户对视频质量的敏感程度,且 $0 < \alpha < 1$, α 值越大表示用户对视频质量的要求越低。

文献[4]中的研究表明,用户的偏好对用户观看视频的效用有着一定的影响,在同一个视频和相同的码率下,用户的偏好越高,用户观看视频的效用就越高。根据上述关系,本文定义了基于用户偏好的效用模型,即:

$$P - U_i^{EU} = P_i^m U_i^{EU} \quad (3)$$

其中, P_i^m 表示用户 E_i 对 m 类视频的偏好。

由于用户接收视频时需要向互联网服务提供商购买流量,因此用户在观看视频时存在流量代价。令 p_i 表示用户 E_i 向互联网服务提供商购买每千字节(kb)流量所需要支付的费用,那么用户观看视频时所付出的流量代价为:

$$\phi_i = p_i r_i \quad (4)$$

文献[10]中已经对用户效益函数进行了一定的研究,并且在效益优化方面取得了比较好的效果,因此本文采用了与文献[10]相同的方式来定义用户的效益模型,即使用基于用户偏好的效用减去付出的流量代价:

$$Profit_i^{EU} = P - U_i^{EU} - \phi_i = P_i^m \frac{r_i^{1-\alpha}}{1-\alpha} - p_i r_i \quad (5)$$

容易看出, $Profit_i^{EU}$ 是凹函数,当且仅当:

$$r_i = \left(\frac{p_i}{P_i^m} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

$Profit_i^{EU}$ 取得最大值。

2.4 系统优化目标

2.3 节中介绍了基于用户偏好的用户效益模型,本小节对整个视频传输系统的优化目标进行形式化的描述。在多用户环境下进行视频传输,式(6)所求得的最大值不一定可达,原因在于真实网络环境中可用的带宽资源是有限的,这些可用的带宽资源无法满足每一个用户均使用自身效益的最优码率进行视频传输。

基于以上所述的带宽受限环境,本文针对视频传输系统中所有用户的带权总效益进行优化。由于各类视频间具有独立性,例如,喜爱观看电影的用户并不会对喜爱观看纪录片的用户的效益产生影响,因此基于上述带权总效益目标,定义优化问题如下:

$$\max \sum_{i=1}^{N_m} \lambda_i \left(P_i^m \frac{r_i^{1-\alpha}}{1-\alpha} - p_i r_i \right) \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^{N_m} r_i \leq r_{\max} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{N_m} \lambda_i = 1 \quad (9)$$

其中, r_{\max} 表示视频内容提供商所能承受的最大传输码率, N_m 表示观看属于 m 类视频的用户数量。

式(7)一式(9)表示的优化问题的难点在于 λ_i 的选取,不同的 λ_i 会对优化的结果产生影响。下节将会对 λ_i 的选取方法进行详细介绍。

3 基于用户偏好的系统效益优化方法

本节针对 2.3 节所述的难点,提出了一种基于偏好-码率比的用户权重选取方法,以此来确定 λ_i 的值。在确定 λ_i 的值之后,式(7)一式(9)表示的优化问题即可转化为非线性规划问题,进而可以求得最优解。3.2 节以伪代码的形式对最优码率选择算法进行了描述。

3.1 基于偏好-码率比的用户权重选择方法

用户偏好与码率的比值 P_i^m / r_i 反映了当前用户在系统中的重要程度。当 P_i^m / r_i 较小时,表明用户当前播放视频的码率无法满足观看需求,需要额外提升码率。而当 P_i^m / r_i 较大时,用户观看视频的码率已经足以满足需求,不需要额外提升码率。基于这样的特点,本文参照信息论对高斯信道^[9]的信道容量形式,定义偏好对效益的增强程度为:

$$Q_i^m = \ln \left(1 + \frac{c P_i^m}{r_i} \lambda_i \right) \quad (10)$$

其中, c 表示正则化参数,作用是将 P_i^m / r_i 的值限定在合理的范围内。

对于 N 个用户的视频传输系统来说,偏好对效益的增强程度越大,则用户权重值的选择就越好。因此求最优的用户权重等价于:

$$\max \sum_{i=1}^{N_m} Q_i^m \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^{N_m} \lambda_i = 1 \quad (12)$$

式(11)一式(12)所述的最大化目标问题可以用“注水法”^[11]求解,该问题的解为:

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{v} - \frac{r_i}{c P_i^m} \right)^+ \quad (13)$$

其中, v 的选取满足:

$$\sum_{i=1}^{N_m} \left(\frac{1}{v} - \frac{r_i}{c P_i^m} \right)^+ = 1 \quad (14)$$

对于每一个用户,均有 $\lambda_i > 0$,因此通过式(13)与式(14)可以得到:

$$\lambda_i = \frac{1}{N_m} \left(1 + \sum_{j=1}^{N_m} \frac{r_j}{c P_j^m} \right) - \frac{r_i}{c P_i^m} \quad (15)$$

从式(15)中可以看出,随着 P_i^m / r_i 的增加, λ_i 也会相应增大。这个特性与本节开始所述的用户偏好与码率的比值所反映的用户重要程度是一致的。

3.2 最优码率选择算法

根据 3.1 节中求出的用户权重,将式(15)代入式(7)中,则原系统的优化目标可以变形为:

$$\max \sum_{i=1}^{N_m} \lambda_i \left(P_i^m \frac{r_i^{1-\alpha}}{1-\alpha} - p_i r_i \right) \quad (16)$$

$$s. t. \sum_{i=1}^{N_m} r_i \leq r_{\max} \quad (17)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{N_m} (1 + \sum_{j=1}^{N_m} \frac{r_j}{cP_j^m}) - \frac{r_i}{cP_i^m} \quad (18)$$

可以看出,上述优化问题是一个带不等式约束的非线性规划问题。非线性规划问题的研究已经相对成熟,现有的算法,如内点法、序列二次规划等,可以求解该非线性规划问题。由于内容有限,本文省略了具体的求解过程。

通过求解模型(16)–(18),可以得到当前用户偏好下系统中所有用户进行视频传输所需的最优码率,使用该最优码率进行视频传输,即可获得系统的最大效益。

综上所述,对于类别为 m 的视频最优码率选择算法如算法 1 所示。

算法 1 最优码率选择算法

输入:用户特征向量 \tilde{x} ,当前处理类别 m

输出:最优码率 r_m^*

FOR 每一个正在观看 m 类视频的用户 E_i

 使用式(1)计算用户 E_i 的用户偏好 P_i^m ;

 使用式(15)计算当前用户所占的权重;

ENDFOR

求解模型(16)–(18),以获得最优码率 r_m^* ;

RETURN r_m^* .

算法 1 每次运行可以在 $O(N_m)$ 的时间复杂度下求出传输一类视频的最优码率,要想获得多内容条件下每一类视频的最优码率,需要改变输入的种类,再次运行算法。

4 实验结果与分析

本节主要从两个方面进行实验分析:1)用户偏好对用户效益的影响;2)本文提出的优化方法与现有优化方法的比较。

4.1 用户偏好对用户效益的影响

本节的实验中考虑 3 个用户参与视频传输的情况,将式(16)中的参数 α 设置为 0.5, p_i 设置为 0.02。这样设置的原因是参数 α 体现了系统中的公平性,该值越大表明系统中的用户越公平,选取 0.5 表明用户之间存在一定的公平性,但公平性较小;参数 p_i 取 0.02 是为了与国内运营商流量包的单位价格保持一致。 r_i 的范围设置为 0~4000, r_{\max} 的值设置为 9000, c 的值设置为 8000。初始时,3 个用户的偏好分别为 1, 2, 3。改变偏好为 1 的用户的用户偏好,然后计算改变用户偏好后 3 个用户的效益。实验结果如图 2 所示。

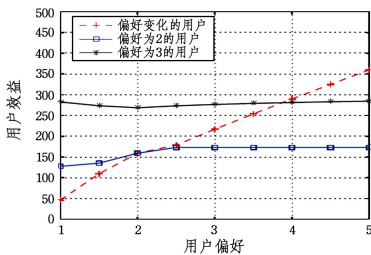


图 2 用户偏好对用户效益的影响

Fig. 2 Effect of user preference on user profit

图 2 中的结果表明,用户偏好的上升对用户效益有提升

的作用,同时单个用户的偏好升高会影响系统中其他用户的效益。当用户的偏好升高时,系统中用户偏好较高的用户的效益会有所下降,同时用户偏好较低的用户效益会随之一起上升。出现这种现象的原因是,在总码率受限的情况下,系统会优先选择提升偏好-码率比较大的用户的效益。用户偏好上升时,偏好-码率比随之上升,系统便会为其分配更高的码率,以使得系统的总效益得到进一步的提升。

4.2 用户效益的对比

本节的实验中假设当前系统中有 100 个用户参与视频传输,随机选取这 100 个用户的特征向量 \tilde{x} ,除 r_{\max} (取值为 $100 * 3000$) 外,所有参数的取值均与 4.1 节相同。

在本实验中对比的方法有两个:

1) 不考虑用户偏好的视频传输方法。该方法仅对用户的效益进行总体的最大化,不考虑用户偏好的影响。

2) 文献[12]中的方法。文献[10]提出了一种 QoE 驱动的优化方法,考虑了用户偏好对视频传输系统性能的影响,其优化思路是利用用户偏好占所有用户偏好总和的比值来进行优化。

实验结果如图 3 和表 2 所示,本实验中的用户效益由式(5)计算得出。其中,图 3 采用的指标是累积概率分布函数(CDF),其中横坐标表示的是用户效益的大小,纵坐标表示的是用户效益的累积分布概率。若用户效益在某个区间内的累积概率分布函数越陡峭,则效益在该区间之内的用户数量越多。表 2 中的系统总效益反映的是整个系统的综合用户体验情况,本实验中的系统总效益由系统中所有用户的效益求和得到。

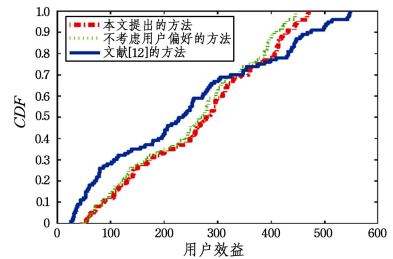


图 3 本文方法与其他方法在用户效益上的比较

Fig. 3 Comparison among proposed method and others on user profit

表 2 系统总体效益的比较

Table 2 Comparison of total profit of video streaming system

方法	系统总效益
不考虑用户偏好的方法	2423.3
文献[12]中的方法	2539.9
本文方法	2666.5

根据上述实验结果可以看出:在用户效益方面,对比不考虑用户偏好的方法,本文提出的方法在低效益的用户数量上少于不考虑用户偏好的方法,同时在高效益的用户数量上多于不考虑用户偏好的方法,因此总体上本文提出的方法优于不考虑用户偏好的方法;对比文献[12]中提出的方法,本文提出的方法虽然在高效益的用户数量上少于文献[12]提出的方法,但是在低效益的用户数量上也少于文献[12]中提出的方

法。其原因在于:本文方法在为用户分配码率时考虑了用户的码率—偏好比,使得偏好较高的用户不会分配到过高的码率,避免了偏好较高的用户承担不必要的流量代价;同时也避免了偏好较低的用户分配到过低的码率,从而保证偏好较低的用户也具有一定的视频观看质量。

从系统的总效益上看,本文的方法相比于其他两种方法能够达到更高的系统总效益。从表2中可以看出,不考虑用户偏好的方法所能达到的系统总效益最低,其原因是该方法在为用户分配码率时忽略了用户偏好对系统总效益的影响,导致了码率的分配结果不合理;而文献[12]中的方法是尽可能给用户偏好较高的用户分配较高的码率,没有考虑用户的偏好—码率比,导致高偏好的用户承担了不必要的流量代价。实验结果表明,本文方法得到的系统总效益相比不考虑用户偏好的方法提升了10%,相比文献[12]中的方法提升了5%。

结束语 本文首先从用户观看视频的主观体验数据中对用户偏好进行了分析,利用机器学习的方法从用户视频主观评价分数数据集中估计用户偏好。随后,本文进一步分析了用户偏好对视频传输系统效益的影响,建立了用户偏好影响下的用户效益模型。在用户效益优化算法方面,本文综合考虑了用户偏好、码率以及流量代价的影响,提出了一种基于偏好—码率比的视频传输系统用户效益优化算法。该算法根据偏好—码率比对用户观看视频时的码率进行分配,保证用户的视频观看质量,同时避免用户付出不必要的流量代价。最后,通过仿真实验将所提方法与不考虑用户偏好的码率分配方法和文献[12]中的方法进行了对比。实验结果显示,相比上述两种方法,本文提出的方法确实能够在保证用户视频观看质量的同时避免用户付出不必要的流量代价,并且在系统总效益方面,本文的方法较上述两种方法提升了5%~10%。

未来可以更加深入地分析影响视频传输系统中用户效益的因素,例如网络环境的波动、用户缓存状态等。通过对这些因素的分析,可以对移动多媒体视频传输系统的传输过程建立更加准确的模型,进而寻找更加准确的视频传输优化方法,提升视频传输系统的总效益。

参 考 文 献

- [1] Networking Index C V. Forecast and methodology, 2016—2021, white paper[OL]. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gcl/white-paper-c11-738085.html>.
- [2] DERNBACH S, TAFT N, KUROSE J, et al. Cache content-selection policies for streaming video services[C]// 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, 2016: 1-9.
- [3] LEE M C, MOLISCH A F, SASTRY N, et al. Individual Preference Probability Modeling for Video Content in Wireless Caching Networks[C]// IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2017: 1-7.
- [4] RODRÍGUEZ D Z, ROSA R L, COSTA E A, et al. Video quality assessment in video streaming services considering user preference for video content[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2014, 60(3): 436-444.
- [5] WU H, LIU L, ZHANG X, et al. Quality of video oriented pricing incentive for mobile video offloading[C]// 135th Annual IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, 2016: 1-9.
- [6] JOE-WONG C, HA S, CHIANG M. Sponsoring mobile data: An economic analysis of the impact on users and content providers[C]// 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2015: 1499-1507.
- [7] XIE J, XIE R, HUANG T, et al. Energy-efficient cache resource allocation and QoE optimization for HTTP adaptive bit rate streaming over cellular networks[C]// 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2017: 1-6.
- [8] STREIJL R C, WINKLER S, HANDS D S. Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives[J]. Multimedia Systems, 2016, 22(2): 213-227.
- [9] HARPER F M, KONSTAN J A. The movielens datasets: History and context[J]. ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS), 2016, 5(4): 19.
- [10] JI W, FROSSARD P, CHEN B W, et al. Profit optimization for wireless video broadcasting systems based on polymatroidal analysis[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2015, 17(12): 2310-2327.
- [11] COVER T M, THOMAS J A. Elements of information theory [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2012: 272-275.
- [12] JOSEPH V, VECIANA G. NOVA: QoE-driven optimization of DASH-base video delivery in networks[C]// INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE. IEEE, 2014: 82-90.