

多视点视频无线资源优化

陈 怡¹⁾ 赵尔敦¹⁾ 高 戈²⁾ 杨 青¹⁾ 郑世珏¹⁾

¹⁾(华中师范大学计算机学院 武汉 430070)

²⁾(武汉大学计算机学院(国家多媒体软件研究工程中心) 武汉 430070)

摘 要 多视点视频是指在场景中放置多台摄像机,记录下多个视点数据,提供给用户视点选择和场景漫游的交互式媒体应用.多个摄像机从不同视角同时拍摄同一场景得到的一组视频信号,每一个摄像机代表一个不同的视角.可同时传输多个空间角度的视频流到用户端,并合成用户所需要的视域图像.多视点视频是一种新型的具有立体感和交互操作功能的视频,是未来一种极具应用前景的多媒体应用.然而,当前多视点的无线网络带宽分配机制中,都没有考虑大量的、不同解码能力的用户共存时的效率问题.一般情况下,合成视域往往需要至少左右两边(两条以上)的参考视频同时传输到用户端,才能使合成的视域质量不低于直接传输的视点质量,使得网络数据量成倍增加.同时,用户的设备性能影响用户感知质量.网络中手机屏幕和高清大屏显示对网络传输视频数据率的要求不同,必须考虑用户设备解码能力的限制,才能真正提供用户满意的感知质量.本文通过考虑移动无线网络带宽约束,考察不同用户端硬件的解码能力、视域大小及带宽消耗,利用博弈理论,使整体网络资源收益最大.本文分别考虑了几种特定场景下多视点视频传输的无线网络的资源分配.第一,已知网络用户的满意度参数,不考虑带宽的限制(带宽充足),如何确定每个用户需要支付的单位价格.第二,在用户个数不确定的条件下,如何判断出可以接入的用户个数和用户需提供的单位价格.第三,同时考虑用户设备对最大场景复杂度解码能力受限以及网络带宽受限两个约束条件,同时进行用户接入控制和多视点的视频质量优化,使得网络的收益和用户的效用得到最大化.本文对提出的算法进行了理论分析,证明了本文参数设置的合理性.在多视点移动网络资源调度中,本文提出的算法可以方便设置所需的价格参数.从视域大小、价格、用户效用、网络收益等各方面对实验性能进行比较.仿真结果显示本方法在同等实验条件下,多视点用户效用提升分别为5%和12%,网络总体收益增加32%.本文算法可以同时满足网络收益和用户整体效用最优,提高多视点视频在多用户下的网络资源利用率.

关键词 多视点;无线;视频;资源优化;博弈论

中图法分类号 TP18 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2020.00492

Multi-View Video Wireless Resource Optimization

CHEN Yi¹⁾ ZHAO Er-Dun¹⁾ GAO Ge²⁾ YANG-Qing¹⁾ ZHENG Shi-Jue¹⁾

¹⁾(School of Computer Science, Huazhong Normal University, Wuhan 430070)

²⁾(School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430070)

Abstract Multi-view video refers to placing multiple cameras in the scene, recording multiple view data, and providing the user with the interactive ability of view selection and scene roaming. A set of video signals obtained by multiple cameras simultaneously shooting the same scene from different perspectives, each camera represents a different perspective. Video from multiple spatial angles can be simultaneously transmitted to the client, and the image of view area required by the user can be synthesized. Multi-view video is a new type of video with three-dimensional sense and interactive operation function. It is a kind of multimedia application with great application prospect in the future. However, in the current multi-view wireless network bandwidth allocation

收稿日期:2018-08-22;在线出版日期:2019-10-27.本课题得到国家自然科学基金(61202470,61471271)和国家科技支撑计划(2015BAK33B00)资助.陈 怡,博士,副教授,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究方向为多媒体无线网络、移动计算. E-mail: cheniyi30@mail.ccnu.edu.cn.赵尔敦,博士,副教授,主要研究方向为认知网络、网络优化.高 戈,博士,副教授,主要研究方向为音频信号处理、多媒体信号处理.杨 青,副教授,主要研究方向为数据分析、深度学习.郑世珏,博士,教授,主要研究领域为物联网技术,VR技术.

mechanism, the efficiency of a large number of users with different decoding capabilities is not considered. In general, composite view area requires a higher transmission rate. Because the synthetic view area often needs at least left and right sides (two or more) of reference video to be transmitted to the client at the same time, in order to make the quality of the synthesized view area not lower than the quality of the directly transmitted viewpoint, making the amount of network data multiply. At the same time, the user's device performance affects the user's perceived quality. In the network, mobile phone users and high-definition large-screen display have different requirements on the data rate of video data transmission on the network. The increase of the rate can improve the quality of video to a certain extent, but the limitation of decoding ability of user devices must be considered to truly provide users with satisfactory perceived quality. In this paper, by considering the bandwidth constraint of mobile wireless network, the decoding capability, view size and bandwidth consumption of different client hardware are investigated, and game theory is used to achieve the maximum benefit of the whole network resources. The resource allocation for multi-view video in transmission wireless network is considered in this paper. First, if the satisfaction parameters of network users are known, how to determine the unit price needed to pay per each user, regardless of the bandwidth limitation (bandwidth is sufficient). Second, under the condition of the uncertain number of users, how to determine the number of users that can access and the unit price needed to provide per user. Thirdly, considering the limitation of decoding ability of user equipment to the maximum scene complexity and the limitation of network bandwidth, the user access control and multi-view video quality optimization are carried out simultaneously to maximize the benefits of the network and the utility of users. In this paper, the proposed algorithm is analyzed theoretically and the rationality of parameter setting is proved. In multi-view mobile network resource scheduling, the algorithm proposed in this paper can easily set the required price parameters. The experimental performance was compared from the aspects of view size, price, user utility and network benefit. Simulation results show that under the same experimental conditions, the utility of multi-view users was increased by 5% and 12% respectively, and the overall network revenue was increased by 32%. The algorithm in this paper can simultaneously satisfy the optimization of network revenue and the overall utility of users and improve the utilization rate of network resources in multi-view video with multi-users.

Keywords multi-view; wireless; video; resource optimization; game theory

1 引言

近年来,多视点视频(Multi-view video)受到越来越多的关注^{①[1]}.例如:Seiko Epson推出的2.57英寸的8视点LCD显示器可以应用在手机上.Toshiba可将9视点的裸视3D显示器导入12.1英寸LCD显示器应用^②.不同的设备可以支持不同的编码分辨率及获得不同的用户体验.

然而,要把多视点视频传输到用户端必须依靠网络供应商的传输服务^[2].多视点的用户可以自由选择自己喜欢的观看对象和观看视角,当所需视点

不在传输的视点集合中时,可以利用合成技术,参考左右视点进行内容合成.一般情况下:(1)合成视点需要更大的传输速率.因为合成视点往往需要至少左右两边(两条以上)的参考视频同时传输到用户端,才能使合成的视点质量不低于直接传输的视点质量,使得网络数据量成倍增加,但用户对合成的视

① Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017—2022. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.pdf>, 2017

② Technology Development and Market trend of Naked Multi-view 3D display, EE World. http://www.eeworld.com.cn/dygl/2012/0422/article_11668.html, 2012

点的感知质量并不会比直接传输的视点感知质量高;(2)用户的设备性能影响用户感知质量.网络中手机用户和高清大屏显示对网络传输视频数据率的要求是不同的,速率的增加可以在一定程度上提高用户视频质量,但必须考虑用户设备解码能力限制,才能真正提供用户满意的感知质量.例如:对于新型的 H.265 视频传输协议,尽管需要的视频传输带宽下降了,但计算复杂度大大增加,用户设备必须具有相应的解码能力才能获得相对应的视频质量.仅依靠码率大小对网络资源进行分配^[3],并不能判断获得视频最终的显示效果.因此,用户的设备决定了同样区域可以显示的细节清晰度上限,过度提供带宽并不会增加用户的感知质量.因此,本文与以往文献不同的特点主要有三点:

第一,我们指出,速率的增加并不能代表多视点视频观看质量的增加,这是与以往研究仅仅考虑网络带宽分配的文献不同的^[4].本文考虑了多视点视频应用的特点,提出用户感知的质量不仅取决于可以观察的视域,而且取决于用户显示设备解码的下限.

第二,针对多视点的特点,更广阔的视域范围是用户关心的.因此,本文在建立用户满意度模型时,同时考虑了多视点的视频质量和视域范围,这是与以往 2D 视频传输带宽主要用于提升视频质量不同的.

第三,针对大量用户并存的无线共享网络,本文提出了一个用户接入控制机制.通过挑选接入网络的用户,优化网络的服务效率.这是目前多用户多视点应用缺乏的.

在本文中,我们假设用户可以采用 3DTV、手机、平板等硬件接入多视点视频 3D 无线网络传输中^[5],在一段时间内,用户不会离开或没有新用户加入.并且,默认多视点 3D 视频内容已经制备好,存放在内容服务器中,或可以实时满足多视点 3D 视频编码的要求.内容服务器与网络服务器在本文中 can 等价;用户可以选择任意视点,多视点的视频内容假设是时间同步传输的.

本文通过考虑移动无线网络带宽约束,考察不同用户端硬件的解码能力、视域大小及带宽消耗,利用博弈理论^[6],达到整体网络资源收益最大.

本文的贡献:

(1)考虑到支持多视点的移动设备的多样性,本文提出设备的画质清晰度与设备硬件解码能力密切相关,并且与用户视点的选择和视域大小同时影响用户的感知质量,而非仅仅视频传输的数据量.因而提出了一个共享带宽约束下的,多用户竞争环境

下,多视点视频资源优化问题,并建立数学模型.

(2)本文提出的基于 Stackelberg 价格博弈的解决方案和具体算法,可以同时进行用户接入控制和多视点的视频质量优化,使得网络的收益和用户的效用得到最大化.

(3)本文对提出的算法进行了理论分析,证明了本文参数设置的合理性.在多视点移动网络资源调度中,本文提出的算法可以方便地设置需要的价格参数.

(4)通过实验证明了本文提出的算法有效性.

2 相关研究工作

多视点视频显示技术是一项有重大发展和应用前景的技术,其范畴包括双目立体视频、自由视点视频、裸眼 3D 等.主要原理是利用人眼存在视差的特性,依靠头盔偏光镜等辅助设备(或不依靠佩戴任何辅助设备),呈现出具有空间深度、脱离屏幕本身的逼真立体影像.人眼如果需要看到 3D 效果,至少需要两个视点图像,这两个图像必须不同,大脑才能合成立体效果.目前,由于片源不足,大多数 3D 双目视频主要由 2D 视频产生,需要佩戴眼镜才能观看,视点少,立体效果差.而多视角、具有裸眼 3D 效果的显示设备,由于其自由变换视点,越来越受到欢迎.许多研究机构已经开始了对多视点立体视频的研究.

但是,由于多视点视频需要传输的视点多,需要传输和存储的数据量成倍增加,大大增加了网络和视频传播的压力.为了减少多视点数据量,提高网络传输效率,相关的研究工作主要在以下几个方面开展.

2.1 多视点视频编码与速率控制

为了降低对传输带宽和速率的要求,研究人员需要利用视频编码消除多余的码率^[7].但是,不恰当的编码码率会导致会带来视频图像失真.为了找到码率和图像失真之间的最佳的契合点,研究者利用率失真(Rate-Distortion, RD)来帮助视频编码源进行视频码率控制.

大多数的多视点视频编码(MVC)采用统计模型,如高斯分布,对信源建模,然后采用各种假设对模型进行简化,使建立的率失真函数更加实用.文献[8]利用二阶率失真模型控制多视点视频编码和视频质量.文献[9]引入恰可感知失真到视频编码模型,可以把感知冗余的码率进一步降低.文献[10]把

速率流控制模型与二次率失真函数相结合,对多视点视频编码进行码率控制.文献[11]基于在统计的二次率失真模型上,加入四级码率控制,降低多视点视频信源编码的码率.

尽管速率控制可以通过计算预定的统计模型率失真函数获得,但这样的假设使速率控制并不能体现多视点视频对速率的实际要求.文献[12]通过实验,分析得到多视点视频中合成的视点质量与速率分配的关系,提出了一个视频编码速率与失真的关系模型.文献[13]分析了多视点图像和深度信息的关系,建立了一个视频质量与速率的函数关系.文献[14]认为可以降低多视点中B视点中的B帧速率分配,以适应低码率的传输信道.接着,文献[15]利用人眼视觉系统特性和图像感兴趣区域,进一步去除编码冗余.文献[16]从视点级、图形和深度级、帧级三个层级,进一步降低多视点视频对编码速率的要求.文献[17]也建立了三个层级的速率调节机制,分别是视点级、图像组级(GOP-Group of Pictures)和帧级,以达到最大限度降低视频码率.文献[18]分析了多视点视频的视点间和视点内的时间冗余和空间冗余,通过确定视频编码的场景复杂度和运动等级来决定视频需要的编码速率,从而达到有效估计多视点视频的传输速率.

从信源编码的角度可以降低对网络带宽的消耗^[19].但以上文献研究的主要是通过信源端编码减少视频内容冗余,把多个视点构成一个复合度较高的帧结构进行传输,减少对网络带宽的需要.但仅靠压缩、去掉冗余,使多个视点简化为一个或几个特殊的、较大的帧结构,会造成解码延迟和传输误差敏感,对变化的带宽缺乏应变能力^[20].

可见,网络传输带宽与视频质量密切相关.

2.2 多视点视频与网络资源

为规范多媒体视频在环境多变的网络有效传递,国际组织设定了一系列的视频传输标准.基础的H.264可以支持在1M带宽下传输720P30帧/s的图像;H.264^[21] HIGH PROFILE支持在512K带宽下传输720P30帧/s的视频,以及3D多视点AVC(Advanced Video Coding 高级视频编码)^[22]等.H.265是目前比较新的视频压缩编码^[23].H.265支持在384K带宽下传输720P30帧/s的视频.

尽管国际标准制定的视频编码和解码的模式可以适应带宽变化,但对不同的视频形式及网络结构仍需要进一步分析和处理.多视点技术中的自由视点应用^[24],由于完全取决于观看者主观意愿,对观

看者的约束小,在娱乐、游戏等交互式应用中,有巨大的前景,但巨大数量的视点内容相对于传统2D视频,数据量变得十分庞大.文献[25]分析多个视点具体采集点的物理位置及内容间相关性,提出了视点数据包简化调度方法.但该方法对采集点排列密集规范、内容相似度大的对象效果较好,对于非规范的场景适应性不高.文献[26]分析了观看者对视点的偏好,网络对用户偏好的视点内容优先调度.文献[27]采用类似思想,把用户关注的视点看作“锚视点”,优先编码传输“锚视点”,再考虑增加其他视点的数据调度.文献[28]提出一个视频接收者驱动的实时多视点编码方案,可以减少最小需要的数据量.但以上都是从实时编码的角度降低多视点网络的带宽需求,并不能主动裁剪用户个数以适应网络带宽限制.

在传统的2D视频传输中,基于组播的传输协议^[29]和P2P^[30-31]等解决方案可以提高多用户视频分发的性能,但并不能直接适用多视点的多媒体应用^[32].为了让多视点应用能够适应网络环境,研究人员也从视频本身特性入手,产生了一些有特点的多视点视频流传输控制措施.

文献[33]把视频切割成时间间隔相同的片段,同一片段采用不同的编码质量,算法根据网络条件挑选合适的编码质量片段.但该方法仍然是单个个体行为,当多个用户并存时,每个用户会竞争可用带宽,造成总体带宽利用率不高.为了适应多用户自由视点在无线网络的应用,文献[34]采用网络编码进行自由视点视频协作传输.网络编码复杂度高、适合固定节点,对于移动网络、节点个数不固定场合效果不佳.文献[35]提出了一个通用的基于web的交互式多视点流媒体框架.但该方案没有研究多用户带宽和缓存受限的问题.为了更加有效进行交互式视点切换,文献[36-37]等提出了连续运动预测等来预取需要获取的视点视频,由于工作方式没有考虑网络带宽变化带来的影响,并不能适应多用户并存的、存在竞争关系的无线网络.

为了更加准确地评估网络带宽,各种带宽吞吐量预测技术^[38]和缓存预估^[39]技术也是研究的热点.文献[40]提出了一个可以应用多视点的,结合带宽吞吐量预测和缓存估计的多视频流束分配方案.该方案基于客户端驱动,可以保证用户带宽保持在最小限制之上.但是,该文献方案是基于“服务器-客户端”,采用相对公平的带宽分配方案.当客户数量很庞大时,该带宽调节机制就无法保证多用户对视

点所需带宽的最低要求. 本文希望能够克服^[40]缺陷, 引入接入机制和带宽控制机制, 在带宽有限的约束下, 找到用户数量和带宽分配的折中, 以提高网络资源利用率和用户的满意度.

3 系统模型

3.1 网络的系统结构

目前主流的网络结构一般是由主干网络和边界路由器或区域服务器组成的层次结构. 随着无线网络技术的发展, 边界网络一般采用无线传输的方式, 使用户进入网络的模式更加自由灵活.

如图 1 所示, 边缘的多媒体网络由接入网络的内容服务器和移动用户组成.

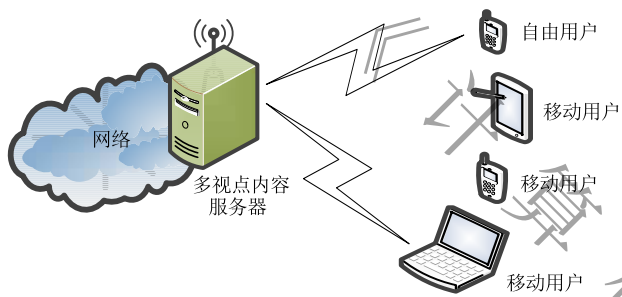


图 1 多媒体无线网络组成示意图

在一个无线网络中, 多视点 3D 视频的传输系统包括一个多视点 3D 视频服务器和多个观看者. 服务器的目标是为每个观看者(用户)确定合理的价格, 通过发送给每个用户视频, 以获得最优的收益. 而每个观看者尽力提高自己观看的视频质量, 就必然消耗一定的带宽. 用户的效用是用户满意度减去消耗的带宽价格.

对于多视点 3D 视频, 不同大小的设备可以显示不同的宽度的视域. 视域的拼接是依靠固定间隔参考帧传输回来的信息解码合成, 参考帧包含的深度信息在合成时可以合成立体图像. 根据文献^[41]假设摄像头是等间隔 θ 分布, 则观看视域 v 所需带宽可以表示为:

$$\bar{b}(v) = \left[\left\lceil \frac{v}{\theta} \right\rceil + H(v) \right] r \quad (1)$$

其中, r 为参考帧中图像编码和深度编码的速率总和. $\lceil \cdot \rceil$ 的符号表示向上取整. $H(v) = \mathbf{1}_{(0, \infty)}(v)$, 是一个阶跃函数, 表示用户正在观看在视域 v 的内容, 视域 v 内的图像信息可以由参考帧恢复出来. 如果 $H(v) = 0_{(0, \infty)}(v)$ 表示用户观看的是参考帧视点本身, 此时 $v = \theta$.

一般来说, 质量等级与场景复杂度和运动图像频率密切相关, 硬件(手机屏幕、高清电视)性能(解码能力、分辨率大小、屏幕大小)决定了人们对图像的感官质量. 即, 硬件的图像细节处理能力决定了设备的最佳性能. 文献^[18]利用实验模拟出了多视点视频场景复杂度(Scene Complexity)和运动等级(Level of Motion)两个参数与传输所需码率近似计算公式. 不同的视频内容, 即不同的场景复杂度和不同的运动等级, 采用相同的编码技术, 进行视频编码需要不同的传输速率. 文献^[18]通过实验验证, 当其他条件不变时, 视频的编码复杂度(Video coding complexity)与场景的复杂程度成正比. 因而, 可以认为编码复杂程度表达了场景内细节的多少, 体现了视频在用户设备端解码的质量.

我们设定 $c_i \forall c_i \in C$ 为等级 i 的场景复杂度值. 所需传输速率 $b'(c)$ 与场景复杂度 c_i 的关系为^[18]:

$$b'(c_i) = \alpha c_i + \beta \quad (2)$$

其中, α 和 β 是视频的特征参数, 由具体的视频内容决定. α 和 β 是速率 $b'(c_i)$ 与场景复杂度 c_i 的拟合系数, i 是场景复杂度等级. 当量化参数固定时, 视频编码速率 $b'(c_i)$ 与 c_i 的关系是固定的, α 和 β 与采用的编码方式相关.

为简单起见, 本文仅把场景复杂度作为图像质量的最主要考虑因素, 因此我们主要关注的对象是参考帧的场景复杂度(细节清晰度), 但并不妨碍根据本文的思想把运动等级加入进来. 一般场景越复杂的图像编码携带更多的视频细节, 可以满足用户显示的需要, 但会消耗更多的传输带宽^[42].

3.2 用户效用及代价

对于视域的某个观看者, 也就是用户 $n, n \in N$ (N 为参与博弈竞价的用户总数), 需要的传输速率不仅与视频场景复杂度有关, 也与用户观看的视域相关. 多视点视频传输速率的表达式为:

$$b_n(c_n) = \left[\left\lceil \frac{v_n}{\theta} \right\rceil + H(v) \right] (\alpha c_n + \beta) \quad (3)$$

定义

$$v_n^\theta = \begin{cases} \frac{v_n}{\theta}, & v_n = i\theta, i = 1, 2, 3, \dots; \\ \frac{v_n - v' + \theta}{\theta}, & v_n = i\theta + v', 0 < v' < \theta \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

则式(3)可以表示为:

$$b_n(c_n) = \lceil v_n^\theta + 1 \rceil (\alpha c_n + \beta) \quad (5)$$

式(4)表达了用户 n 观看视域所需要的参考视

点的个数 v_n^θ . 设摄像头是等间隔 θ 分布^[39], 每个摄像头传输回来的视频内容首先传回服务器. 当用户请求某视域时, 服务器为提高用户合成效率, 会按照用户视域边界, 重新编码, 产生等间隔的参考视点, 方便用户采用反向步骤, 直接进行视图复原. 用户只需通过从左至右(或从右至左)的多个参考视点复原出自己需要的视域内容. 当 $\frac{v_n}{\theta}$ 为整数, 表示用户请求视域刚好大于等于两个以上参考视点范围, 结合式(3), 所需参考视点个数为 $v_n^\theta + 1$. 当用户视域 $\frac{v_n}{\theta}$ 不能整除时, 表示用户观看的视域不是 θ 整数倍. 其中 $v' (0 < v' < \theta)$ 需要扩展至下一参考视点. 则结合式(3), 需要的参考视点个数为 $\frac{v_n - v' + \theta}{\theta} + 1$ (包括最左和最右的参考视点). 当用户不需要左右两个参考视点进行视域内图像复原, 而只是请求某个参考视点本身时, 则结合式(3), 服务器需要发送给用户的参考视点个数为 $0 + 1$. 为了简洁, 我们把 $\frac{v_n}{\theta}$ 、 $\frac{v_n - v' + \theta}{\theta}$ 和 0 统一表示为 v_n^θ , 则用户需要的参考视点就表示为 $v_n^\theta + 1$.

式(5)表达了用户显示设备显示的视域宽度和视域内细节清晰度, 并用编码带宽表示.

在网络资源分配中, 剑桥大学学者 Kelly^[43]首次对网络资源分配采用经济学进行解释, 他认为每个用户对资源的需求不是越多越好, 而是符合心理学模型. 心理学模型采用的是 $\log$ 指数形式描述用户对外界刺激变化的过程. 这个指数形式被引入到经济学中对商品建模, 反映商品受欢迎程度, 又被称为用户满意度.

对于单个用户, 视频提供的视频场景复杂度是否恰好与硬件可提供的最高工作点清晰度匹配是用户满意度至关重要的评价条件. 视频场景复杂度与用户满意度可以表示为:

$$s_n(c_n) = \lambda_n \log(1 + (v_n^\theta + 1)c_n) \quad (6)$$

其中, λ_n 是观看者 n 的满意度评价参数; 服务器有 N 个观看者, $n=1, 2, \dots, N$; c_n 是观看者视频可以处理的视频场景复杂度, 受限于其硬件解码上限 $c_n \leq C_n^{\max}$; $(v_n^\theta + 1)c_n$ 是用户多视点视域范围需要场景复杂度值(即, 同样的画质, 越宽的范围, 需要的计算量越大).

对于用户 n , 当视域范围一定, 在同一编码模式下, 越高的场景复杂度表示用户可以获得的细节内

容越多, 画质清晰度越高. 则对多视点视频, 用户 n 效用的表达式为:

$$\max_{c_n > 0} U_n = s(c_n) - (v_n^\theta + 1)c_n p_n \quad (7)$$

$$\text{s. t. } c_n \leq C_n^{\max} \quad (8)$$

式(7)表示对于用户 n 来说, 用户效用等于用户的满意度值(正收益) $s(c_n)$ 减去用户为此付出的花费(负收益) $(v_n^\theta + 1)c_n p_n$. p_n 是用户 n 购买网络传输需要的单位价格. c_n 是用户的希望的场景复杂度等级, 其反映了用户显示设备对细节的解码的能力. $C_n^{\max}$ 是用户 n 设备的最大场景复杂度上限.

在本文中, 参与博弈的是用户效用, 用户的感受不仅与视域大小、视频质量相关, 还与用户付出的价格相关.

3.3 网络服务器收益

而对于服务器端, 网络服务器提供有效的编码视频可获得收益 U_s 表示为:

$$\max_{p \geq 0} U_s = \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)c_n p_n \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N b_n(c_n) \leq B^i \quad (10)$$

其中, 价格 p_n 是集合 $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_N]$ 中的一个取值. 每个用户根据自身硬件和视频活动(video activity), 选择的内容场景复杂度为 c_n , $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_N]$. 无线网络提供服务的带宽是一个时变的量, 但在某个较小的时间区间, 可以默认该值是恒定的. 沿文献[41], 无线网络可提供的带宽为一个矢量 $\mathbf{B} = [B^1, B^2, \dots, B^I]$ ($i \in [1, \dots, I]$) 中的某个具体值. 网络带宽最多有 I 个不同取值, 用上标表示. 则式(10)表示此时的网络带宽为 B^i . 本文默认在博弈期间, 网络带宽不会变化, 我们默认 B^i 和 B 通用, 以简化公式表达.

多视点视频由内容服务器通过网络传输提供给不同的用户. 网络收益等同于所有接收到视频内容的用户花费的总和.

3.4 网络带宽优化

假设用户设备可以处理和显示任意视频场景复杂度的视频, 即: 对场景细节复杂度变量不设限.

应用 $\frac{\partial U_n}{\partial c_n} = 0$ 后, 观看者拟预定的场景复杂度计算式为:

$$c_n = \frac{1}{v_n^\theta + 1} \left(\frac{\lambda_n}{p_n} - 1 \right), \forall 0 < c_n \leq C_n^{\max} \quad (11)$$

根据式(9)可知, 观看者会根据自己硬件特性订阅最高的视频编码, 由于 $c_n \geq 0$, 则需满足 $\lambda_n \geq p_n$.

因此,把式(11)代入式(9)和(10),对于整个网络的用户,整体优化问题可以改写为:

$$\max_{p \geq 0} U = \sum_{n=1}^N (\lambda_n - p_n)^+ \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N \left(\alpha \frac{\lambda_n}{p_n} - \alpha + (v_n^\theta + 1)\beta \right)^+ \leq B \quad (13)$$

其中, $(\cdot)^+ = \max(\cdot, 0)$. 式(12)表示每个用户订阅多视点视频的单位价格一定小于单位的用户满意度参数. 式(13)表示所有接入网络的用户所消耗的带宽总额必须小于无线网络最大能提供的带宽 B .

在本文中,假设所有用户和网络带宽的变化在一段时间内可以看成平稳分布的. 假设网络和用户每隔一段时间内会更新用户信息和网络资源. 在这段时间内,我们默认用户的个数和网络带宽是不变的. 那么,假设计算的过程足够快,则可以认为在计算优化的过程中,用户的视域要求是固定的. 则在网络的带宽足够、每位观看者的视域范围固定的情况下,优化问题进一步改写为:

$$\min_{p \geq 0} U = \sum_{n=1}^N p_n \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^N \alpha \frac{\lambda_n}{p_n} \leq B + \left(N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta \right) \quad (15)$$

式(14)表示了原问题的对偶问题,即用户希望单位带宽的价格尽量小. 式(15)表达了所有的用户消耗网络带宽不能超过网络可利用的总带宽.

定理 1. 如果网络带宽充足且用户视域固定不变,如果 N 个用户满意度增益 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$, 则用户订阅视频需付出的单位带宽价格应为:

$$p_n^* = \frac{\alpha \sqrt{\lambda_n} \sum_{n=1}^N \sqrt{\lambda_n}}{B + \left(N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta \right)} \quad (16)$$

其中, n 代表 $1, \dots, N$ 中任意一个变化的量.

证明. 证明过程见附录 1.

定理 1 的作用在于:如果已知网络用户的满意度参数,不考虑带宽的限制(带宽充足),可确定每个用户需要付的单位价格,可以使用户整体效用和网络收益最大.

定理 2. 定理 1 成立的必要条件为总带宽满足:

$$B \geq \max_j \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \sum_{n=1}^N \sqrt{\lambda_n} - \left(N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta \right) \quad (17)$$

证明. 证明过程见附录 2.

定理 2 的作用在于,对于接入到网络中进行服

务的用户,网络带宽的上限要求可以由定理 2 确定下来. 这样,可以预先判断网络是否有能力满足用户的要求.

定理 3. 在 N 个用户按照满意度增益 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 排列的网络中,假设用户场景复杂度能力足够强,则为了获得用户最佳的性能,最优价格与带宽之间的关系满足:

$$p^* = \begin{cases} \delta_N [\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_N}]^T, & \forall B > B_N \\ \delta_{N-1} [\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_{N-1}}, \infty]^T, & \forall B_N \geq B > B_{N-1} \\ \vdots & \vdots \\ \delta_1 [\sqrt{\lambda_1}, \infty, \dots, \infty]^T, & \forall B_2 \geq B > B_1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{其中, } \delta_j = \frac{\alpha \sum_{n=1}^j \sqrt{\lambda_n}}{B + \left(j\alpha - \sum_{n=1}^j (v_n^\theta + 1)\beta \right)}, \quad B_j = \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \cdot$$

$$\left(\sum_{n=1}^j \sqrt{\lambda_n} \right) - \left(j\alpha - \sum_{n=1}^j (v_n^\theta + 1)\beta \right), \quad \forall j \in [1, \dots, N].$$

证明. 证明过程见附录 3.

定理 3 的作用在于在用户个数不确定的条件下,可以由定理 3 判断出可以接入的用户个数和用户需提供的单位价格. 通过定理 3 可以使网络带宽服务的用户数上限确定下来.

3.5 算法实施

在定理 3 中,如果网络的带宽仅够 j 个观看者的硬件系统工作在最佳性能,即 $N-j$ 的观看者的价格/带宽必需设置为无穷大. 目的是避免满意度值程度低的观看者优先占据带宽,造成服务器的收益降低. 基于该理论,算法 1 设计如下.

算法 1. 用户工作于最优性能点的多视点带宽分配算法.

1. Examine the satisfaction gains of N viewers and arrange them according to $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$;
2. initialize $j=1$;
3. Compute $B_j = \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \left(\sum_{n=1}^j \sqrt{\lambda_n} \right) - \left(j\alpha - \sum_{n=1}^j (v_n^\theta + 1)\beta \right)$;
4. If $B \geq B_j$, allocate bandwidth to viewer j for Multi-view video subscription. And set $j=j+1$. Go to Step 3;
Otherwise, set $j=j-1$. Go to Step 5.

$$\text{5. Compute } \delta_j = \frac{\alpha \sum_{n=1}^j \sqrt{\lambda_n}}{B + \left(j\alpha - \sum_{n=1}^j (v_n^\theta + 1)\beta \right)}, \text{ and the}$$

optimal unit price for viewer n is $p_n^* = \delta_j \sqrt{\lambda_n} n \leq j$;
otherwise $p_n^* = \infty$

接下来,我们讨论用户提供的硬件参数性能高于视频内容(视频活动)所需的最大场景复杂度编码参数的情形。在此条件下,带宽的分配方案不再满足定理 3。我们需要讨论在用户硬件解码能力与视频内容编码能力不匹配时的带宽分配方案。

假设用户场景复杂度解码能力受限,则优化问题可以表达为:

$$\min_{p \geq 0} U = \sum_{n=1}^N p_n \quad (19)$$

$$\sum_{n=1}^N \alpha \frac{\lambda_n}{p_n} \leq B + \left(N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta \right) \quad (20)$$

$$\frac{1}{v_n^\theta + 1} \left(\frac{\lambda_n}{p_n} - 1 \right) \leq C_n^{\max} \quad (21)$$

优化问题式(19)、(20)、(21)与式(14)、(15)的区别在于优化的约束条件不仅有视域、带宽,而且增加了用户解码能力的限制。

定理 4. 在 N 个用户满意度值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 的网络中,用户最大场景复杂度解码能力受限且已知,则为了获得用户最佳的性能,最优价格与带宽之间的关系满足:

$$p^* = \begin{cases} \delta_1 [\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_N}]^T, \\ \forall C_1^{\max} \geq c_1; \\ \left[\frac{\lambda_1}{C_1^{\max}(v_1^\theta + 1) + 1}, \delta_2 \sqrt{\lambda_2}, \dots, \delta_2 \sqrt{\lambda_N} \right]^T, \\ \forall (C_1^{\max} < c_1) \& (C_2^{\max} \geq c_2) \\ \vdots \\ \left[\frac{\lambda_1}{C_1^{\max}(v_1^\theta + 1) + 1}, \dots, \frac{\lambda_{N-1}}{C_{N-1}^{\max}(v_{N-1}^\theta + 1) + 1}, \right. \\ \left. \delta_N \sqrt{\lambda_N} \right]^T, \forall (C_{N-1}^{\max} < c_{N-1}) \& (C_N^{\max} \geq c_N) \end{cases}$$

其中,

$$\delta_j = \frac{\alpha \sum_{n=j}^N \sqrt{\lambda_n}}{B - \sum_{m=1}^{j-1} b(C_m^{\max}) + (N-j+1)\alpha - \sum_{n=N-j+1}^N (v_n^\theta + 1)\beta},$$

$$c_j = \frac{1}{(v_n^\theta + 1)} \left[\frac{\sqrt{\lambda_j} \left(\mathfrak{S} - \sum_{n=N-j+1}^N (v_n^\theta + 1)\beta \right)}{\alpha \sum_{n=j}^N \sqrt{\lambda_n}} - 1 \right];$$

$$\text{if } \mathfrak{S} = B - \sum_{m=1}^{j-1} b(C_m^{\max}) + (N-j+1)\alpha.$$

证明. 证明过程见附录 4.

当无线网络的带宽充裕,约束条件式(20) 满足时,则优化问题的约束只有式(21). 不同能力的用户解码能力是确定网络带宽价格唯一决定因素. 定理 4 可以帮助我们计算出每位网络用户最合理的价格。

定理 5. 假设 N 个用户满意度增益满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$, 用户最大场景复杂度解码能力受限、网络带宽受限,则同时满足网络服务器效益和用户效用最优的价格与带宽应符合如下规则:

$$p^* = \left[\frac{\lambda_1}{C_1^{\max}(v_1^\theta + 1)}, \dots, \frac{\lambda_{i-1}}{C_{i-1}^{\max}(v_{i-1}^\theta + 1)}, \delta_i \sqrt{\lambda_i}, \dots, \delta_i \sqrt{\lambda_j}, \infty, \dots, \infty \right]^T$$

if $(B_{j+1} > B > B_j) \& (C_i^{\max} > c_i) \& (C_{i-1}^{\max} \leq c_{i-1})$.
其中,

$$\delta_i = \frac{\alpha \sum_{n=i}^j \sqrt{\lambda_n}}{B - \sum_{m=1}^{i-1} b(C_m^{\max}) + (j-i+1)\alpha - \sum_{n=i}^j (v_n^\theta + 1)\beta}$$

$$c_i = \frac{1}{(v_n^\theta + 1)} \left[\frac{\sqrt{\lambda_i} \left(\mathfrak{S}_b - \sum_{n=i}^j (v_n^\theta + 1)\beta \right)}{\alpha \sum_{n=i}^j \sqrt{\lambda_n}} - 1 \right]$$

$$\text{if } \mathfrak{S}_b = B - \sum_{m=1}^{i-1} b(C_m^{\max}) + (j-i+1)\alpha;$$

$$B_j = \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \left(\sum_{n=i}^j \sqrt{\lambda_n} \right) - \mathfrak{S}_{b1} + \sum_{m=1}^{i-1} b(C_m^{\max})$$

$$\text{if } \mathfrak{S}_{b1} = \left((j-i+1)\alpha - \sum_{n=i}^j (v_n^\theta + 1)\beta \right).$$

定理 5 同时考虑了用户设备对最大场景复杂度解码能力受限以及网络带宽受限两个约束条件. 定理 5 是定理 3 和定理 4 的联合约束求解. 可分成两个步骤:

第一步:由定理 4,考虑接入用户上限为 $C_n^{\max}$, 计算剩余带宽和接入网络的用户带宽价格。

第二步:由定理 3,根据网络带宽,判断接入网络的用户数量及其余用户带宽价格。

定理 5 的作用在于,当网络带宽资源不能满足所有用户的需求,同时每个用户需要的视频场景编码要求也不能满足时,可以确定网络用户可分配的带宽大小、单位价格以及用户视频质量(场景复杂度). 通过计算,可以确定:网络能够提供接入服务的最大用户个数为 j , 其中 $i(i \leq j)$ 个用户可以工作在最大芯片解码能力。

根据定理 5,我们设计算法 2 如下所示。

算法 2. 用户工作于最优性能点的多视点带宽分配算法.

1. Examine the satisfaction gains of N viewers and arrange them according to $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$;
 2. Set $i=1$ and $j=1$;
 3. Compute B_j according to Theorem 5;
 4. Determine j if $B > B_j$. If the result is yes, accept the j -th viewer to share the bandwidth by getting the Multiview video, thus set $j=j+1$, set $p_k^* = \infty$, $\forall k > j$ go to Step 3; Otherwise, go ahead to Step 5.
 5. Compute c_i according to Theorem 5;
- Determine i if $C_i^{\max} > c_i$ according to $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$. If the result is yes, set $p_k^* = \delta_k \sqrt{\lambda_k}$, $\forall i \leq k < j$.

Otherwise, $p_k^* = \frac{\lambda_k}{C_k^{\max}(v_k^\ell + 1)}$, $\forall 0 \leq k < i$.

Compute δ_i according to Theorem 5;

So, the optimal price is $p^* = \left[\frac{\lambda_1}{C_1^{\max}(v_1^\ell + 1)}, \dots, \frac{\lambda_i}{C_{i-1}^{\max}(v_{i-1}^\ell + 1)}, \delta_i \sqrt{\lambda_i}, \dots, \delta_i \sqrt{\lambda_j}, \infty, \dots, \infty \right]^T$.

3.6 计算复杂度

算法 2(定理 5)的时间复杂度如下:

- 步 1. 排列 N 个观看者,算法复杂度为 $O(n) = N$.
 - 步 2. 固定赋值指令,计算复杂度 $O(n) = 1$.
 - 步 3. 根据 i 和 j 的值,由公式计算 B_j ,计算复杂度 $O(n) = 1$.
 - 步 4. 因为 $j \leq N$,最多计算 N 次,所以计算复杂度为 $O(n) = N$.
 - 步 5. 计算 c_i 的计算复杂度为 $O(n) = 1$. 比较 N 个用户是否 $C_i^{\max} > c_i$,所以本次计算复杂度 $O(n) = N$.
- 综上,计算复杂度为: $O(n) = N$.

4 实验与仿真

4.1 实验设计

本文采用算法 2 进行实验. 本文的实验网络采用图 1 所示的网络拓扑结构. 一个边缘路由器作为无线网络的接入端,可以看成区域的多媒体的内容服务器. 该内容服务器与无线通讯范围内的多个用户直接连接. 由于每个用户之间相互独立,其兴趣和关注点并不相同,与文献[38]的假设相同,在本实验中,我们默认用户视频流之间相互独立. 每个用户自由地选择视点和视域,其显示的视频质量由用户个体限制. 服务器根据网络可用带宽和用户参数,定制不同的网络价格给不同的用户,可以使得网络带宽的利用率和用户效用最大.

4.1.1 对比算法介绍

我们选择具有代表性的基于公平原则的 UP 算法和基于视域优化的 RP 算法作为对比文献.

表 1 实验对比算法

对比算法分类	算法机理	算法效果
UP ^[38] / (UP ^[42])	把带宽资源看成一种社会资源,进行公平分配.(包含 2 种方式,一种是平均分配;另一种是带宽单价统一变化)	网络收益非最优.
RP ^[39]	把带宽资源看成一种社会资源,单价随用户变化.可自适应不同用户对视域的差异化需求.	需要进行博弈算法求解.用户对多视点满意度和网络收益同时最优.
VP (本文算法)	把带宽资源看成一种社会资源,单价随用户变化.可自适应不同用户对多视点视域和视频质量的需求.	需要进行博弈算法求解.用户对多视点视域和视频质量满意度、网络收益最优.

UP:UP 基于公平原则,每个视点都至少被分配一个最低质量等级的传输速率.在自由移动的 3D 多视点,由于移动自由取决于用户,则视域大小因不同用户不同而不同.因而,多个用户情况下,用户间视域可以不同,用户视域间存在重叠.文献[38]代表了一类在多视点带宽分配中,采用用户驱动的、最小相对公平的策略.该方法首先对所有多视点用户统一分配一个相同的带宽最小配额,不考虑用户设备能力和用户数量的影响.接着再把剩余带宽按视点的优先级统一分配一个最大带宽配额.该算法主要功能是遏制用户对资源无序竞争,并未考虑用户数量和用户设备异构的问题.当用户数量较多、网络带宽不足时,该分配方案只能使视频质量维持在下限.该算法对用户间需求和个体差异不加考虑,但优点是可以迅速完成多视点用户间带宽分配任务.

文献[42]也是一类基于公平原则的多视点传输资源分配算法.文献[42]与文献[38]的相同之处在于:文献[42]也至少分配每个参考视点一个视频质量的下限传输速率.不同之处是:文献[42]进一步把视频质量与传输速率的关系划分成 5 级,而文献[38]只有两级.但无论文献[38]中的算法还是文献[42]中的算法都没有把视域和视频质量分级同时加以考虑.因为文献[38]是文献[42]的简化版,在接下来的实验中,我们采用[42]作为对比实验.

RP:RP 算法同时考虑了多视点用户与网络服务器(云端)的收益和代价,可以近似逼近网络收益和用户效用的最优平衡点.但该算法没有考虑多视点用户的视域范围可以自由选择,无法解决视域需求存在差异的多用户的网络应用优化.

文献[39]代表了一类在多视点带宽分配中,采用差异价格的分配策略.该文献利用博弈理论,建立了多用户视域优化模型,通过带宽的调节,解决了不同用户对视域范围需求存在差异的网络资源受限问题,可以提高网络传输利用率和用户整体效用.但该文献没有考虑用户设备显示能力的差异,没有考虑多视点视频在用户设备中的解码质量.该文献仅能调节多视点的视域大小,我们在实验中用算法 RP 表示.

本实验拟从视域大小、价格、用户效用、网络收益等各方面对实验性能进行比较.

4.1.2 实验参数

根据文献[18]的设置方法,当量化视频量化参数一定时, α 和 β 是一定的.设置 $QP=20$, $\alpha=205$, $\beta=80$.共有两位用户共享无线空间的可用带宽容量.其中多视点用户 2 的满意度增益 $\lambda_2=150$,用户 1 的满意度增益为 $\lambda_1=[100,150,\dots,300]^T$.无线网络带宽是一个变化的量,首先设置 $B=10.4$ MB/s,然后我们变动带宽,观察系统性能变化.

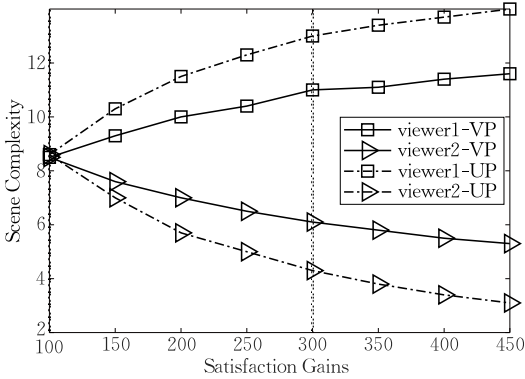
因为算法 RP 一直保持恒定的场景复杂度质量,只扩大或缩小用户的视域范围,为了对比本文算法对场景细节的适应性,在实验 1 中,我们仅选取算法 UP 与本文算法 VP 进行比较.在实验中,我们主要考察两位用户的无线网络多视点视频带宽分配情况.

用户效用、场景复杂度对用户效用及带宽价格的影响(实验 1)

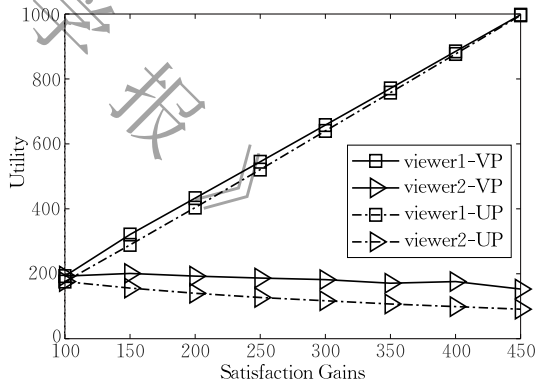
本实验设置视点范围 $\theta=30^\circ$, $v_1=v_2=30^\circ$,因此 $v_1^l=v_2^l=1$.采用带宽单价统一的算法 UP,可以比较出本文算法的带宽价格变化方式.

图 2(a)的横坐标表示用户 1 的满意度增益刻度,纵坐标表示本文算法 VP 和对比算法 UP 计算得到的两个观看者 viewer1 和 viewer2 获得的场景复杂度数值.当 viewer1 和 viewer2 的满意度增益都为 100 时,两种算法对应的画面的场景复杂度相同.随着 viewer1 的满意度增益不断增大,本文算法 VP 为 viewer1 提供的视频场景复杂度不断增加,同时使 viewer2 获得的场景复杂度不断降低.我们同时观察到使用 UP 算法时,viewer1 被提供的场景复杂度也是不断提高,同时 viewer2 得到的视频场景复杂度不断降低.但是,本文算法 VP 在 viewer1 和 viewer2 的满意度增益差值相同时,viewer1 和 viewer2 之间场景复杂度差别相比算法 UP 更小.这说明本文算法可以在相同的网络条件下,尽力缩小观看者视频的细节表达的差距,保证所有的用户不会因为细节不足引起感官质量下降.

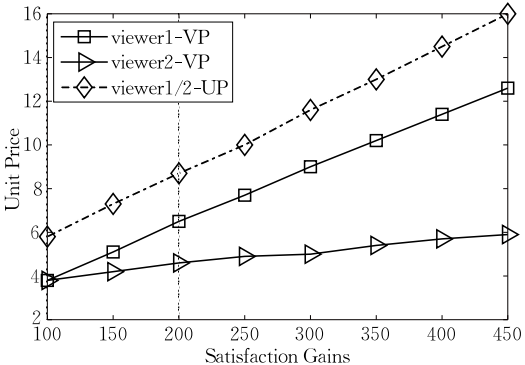
图 2(b)的横坐标表示 viewer1 的满意度增益,纵坐标表示用户获得的效用值.我们可以看出随着



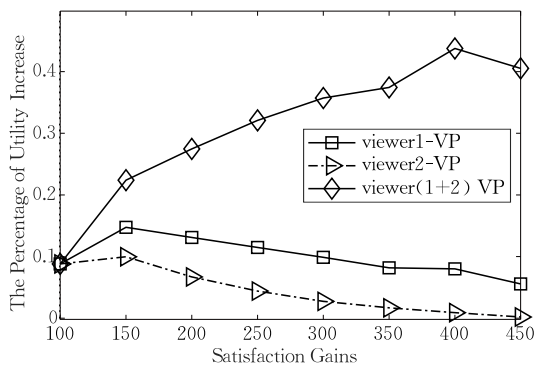
(a) 场景复杂度



(b) 用户效用



(c) 带宽单位价格



(d) 整体效用增加

图 2 用户满意度增益与(a)场景复杂度;(b)用户效用;(c)带宽单位价格和(d)效用增加百分比($B=10.4$ MB/s)

viewer1 的满意度增益不断增加,在两种算法下,viewer2 的用户效用值不断降低,viewer1 的用户效用值不断增加.但是,本文算法 VP 的用户效用相比于算法 UP 始终要高,特别是 viewer2 的用户效用,明显高于算法 UP.原因在于,本文算法采用博弈的方法获得不同的用户带宽价格,可以更合理地优化用户效用.从图 2(b)中可以看出本文算法 VP 和公平性算法 UP 可以随着用户的满意度增益不同,产生不同的用户效用,但本文算法可以提高用户的效用,特别是针对满意度增益较低的用户 viewer2,平均效用提升超过 10%.

为了更加清楚了解带宽价格在不同算法下的分布,图 2(c)表示了随着 viewer2 满意度增益不断增加,网络单位带宽价格的变化曲线.我们看到,在本文算法 VP 中,随着 viewer1 满意度增益不断增加,viewer1 和 viewer2 的单位带宽价格不断增加,但 viewer1 的价格增加明显高于 viewer2 的价格.原因在于网络带宽有限,对于满意度增益高的用户网络通过增加单位价格,获取更高的收益;但对满意度增益低的用户,单位价格增加很少,以避免价格过高抵消了用户的满意度值,导致用户放弃订阅视频内容.作为对比,我们看到采用算法 UP,viewer1 和 viewer2 的带宽单位价格是一样的,但与 viewer1 满意增益变化成正比.因此,可以看出,本文的算法 VP 针对不同的观看者,产生不同的带宽单价,而算法 UP 采用的单位带宽价格是统一的.

图 2(d)表示的是本文提出的算法 VP 与对比算法 UP 相比,所增加的用户效用随 viewer2 满意度值变化的情况.不同用户 1 和用户 2 效用提升相对百分比用 viewer1 和 viewer2 分别表示,网络效用累加 (viewer1 和 viewer2 的用户效用之和)用 viewer1+2 表示.随着用户 2 满意度增益增加,本算法 VP 相比 UP 增加的用户效用百分比先呈上升趋势,然后缓慢下降.原因在于算法对于资源分配效率的提升受限于网络带宽资源.在用户满意度取值 250 的同等实验条件下,用户效用提升分别为 5%和 12%,网络总体效用增加 32%.

因此,在用户间满意度增益不同的条件下,本文算法采用博弈论确定价格(算法 VP)相对于带宽相对统一分配机制(算法 UP)可以提高网络整体的效用.

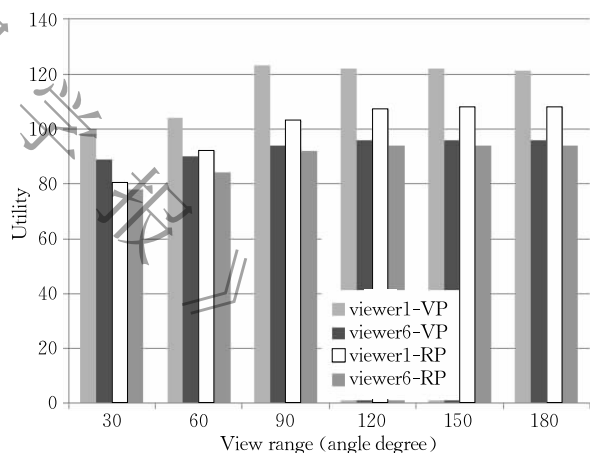
用户个数、视域大小对用户效用和网络收益的影响(实验 2)

接下来我们采用多用户环境,在用户数量 $N=6$ 和 $N=8$ 之间变动;无线带宽 10.4 MB/s;网络内的用户满意增益符合高斯统计分布:均值 $\mu=40$,方差

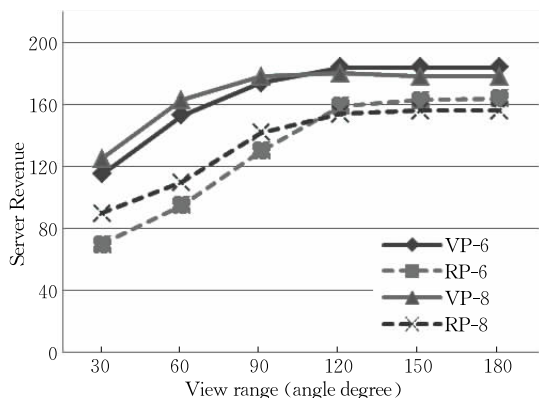
$\sigma=60$.则我们采用改变用户个数和多视点的接收视域大小,讨论算法性能,实验结果显示在图 3 中.

对于多用户环境,用户的视域变化会影响算法分配的结果.图 3(a)选取 6 位网络用户接收多视点视频,横轴是视域的角度,纵轴是网络用户效用.从图 3(a)可以看到,采用本文算法 VP,随着视域的变化,用户 1 的效用值随着视域增加而上升,超过 90° 视域后不再增加.原因在于视域的增加会加大参考视点视频编码数据量,并受限于网络共享信道上限.其中,viewer1 产生的网络效用是最大的,因为 viewer1 产生的用户满意度值最高,可以明显提高用户效用.而 viewer6 的用户网络效用比 viewer1 低、变化小,原因在于用户 6 的满意度增益低,产生的用户效用较小.而 RP 算法仅调节视域大小,用户效用整体比 VP 算法要低.

为了观察视域变化与网络整体收益之间的关系,我们把网络用户调整至 8 位.在图 3(b)中,可以观察到当网络用户数为 6 时,本文算法 VP 的网络提供商收益值比用户总数为 8 时要低;但随着视域从 30° 变化到 120° ,用户总数为 6 的网络收益分别从 115 提升到 174,但用户总数为 8 的网络收益从 125



(a) 网络效用与视域变化



(b) 网络服务收益与视域变化

图 3 (a) 网络效用与视域变化和(b) 网络服务收益与视域变化

提升到180.但超过90°视域,网络收益变得平缓,是因为网络难以提供更多的场景细节和视域质量的提高.对比算法RP,本文算法变化趋势相似,但本文算法的网络收益更高.

用户效用与网络收益的总体比较(实验3)

接下来,我们分析各种不同的算法在无线网络带宽 $B=10.4\text{ MB/s}$ 时,各用户的效用以及网络收益.在本实验中,选取6位多视点的用户,用户的满意度参数均值 $\mu=40$,方差 $\sigma=60$.在5次实验中计算用户效用如图4(a)和(b)所示,其中标记用户效

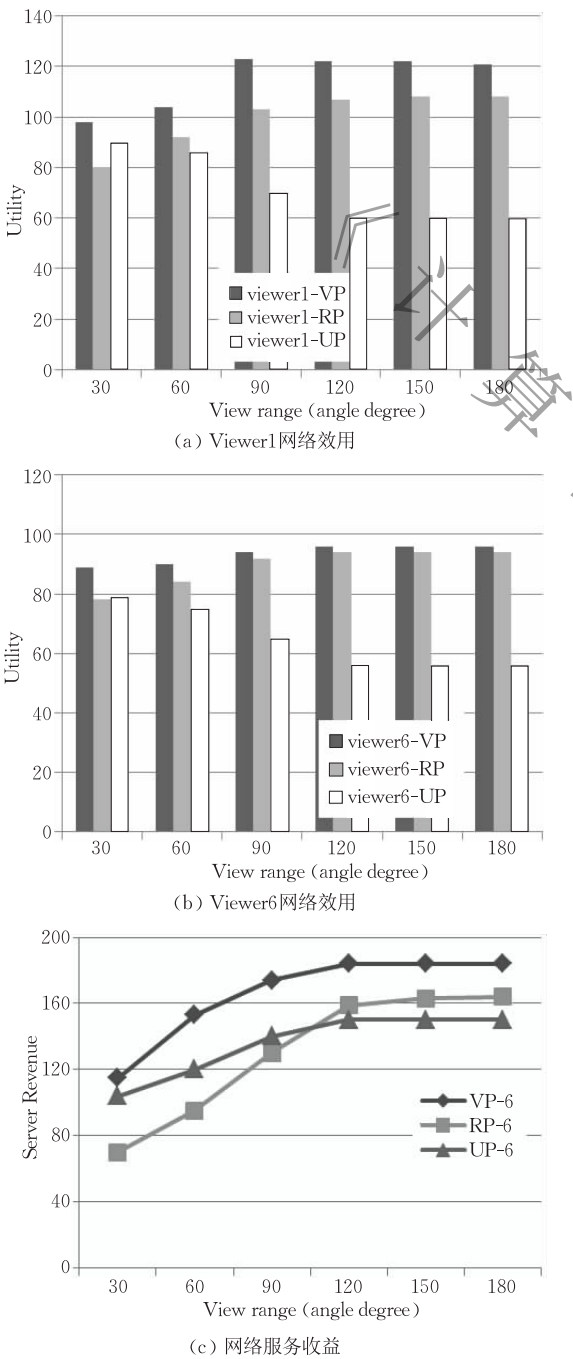


图4 (a) Viewer1网络效用与视域变化、(b) Viewer6网络效用及(c)网络服务收益

用最大的为viewer1,最小的为viewer6.对比三种算法可得,本文算法VP的效用始终高于算法UP和算法RP,原因在于:算法UP均匀分配带宽的方式并不适合满意度增益异构的用户群;而算法RP仅调节视域大小,不能调节场景复杂度,达到充分利用带宽的目的.

图4(c)表示的是在三种算法下网络提供服务所得的收益.从图可以看出本文算法在视域为30°时与算法UP的网络收益非常接近,随着视域的增加,两者的差距增大.其中的原因是:在30°时,带宽资源十分丰富,本文算法产生的网络收益等同于平均分配带宽带来的收益;但随着用户对视域角度要求加大,本文算法会考虑不同用户的区别进行优化分配,对带宽进行充分利用.算法RP在视域为30°时,并不能提升视频细节,因此网络收益最低;但当视频角度达到120°时,视域角度产生的网络收益是带宽产生的主要收益,所以算法RP开始增加并超过算法UP.但可以看出,本文算法始终能够在场景复杂度和视域角度之间进行调节,保持较好的网络收益.

4.2 大规模实验验证

4.2.1 实验数据设置

采用文献[42]的直播平台Twitch API多视点服务数据. Twitch直播由一个180°视域范围组成,用户可以在视域范围覆盖内自由移动.这180°视域范围由12或18个等角度间隔分布的参考视点覆盖传输.在相同无线网络内,可以有多个多视点事件;同一个设备就是一个用户,只能接收一个直播事件.接收视频服务的人数变化范围为100人到10000人.

根据文献[18],速率模型的参数 α 和 β 为常数,是图像序列编码的拟合参数.本文传输的视频序列为Ballet,根据文献[18]的拟合方法,其取值如表2所示,视频属性和视频编码参数如表3、表4所示.

表2 视频的速率模型参数				
Video sequences	α	β	RMSE	R-square
Ballet	0.03	23.5	0	1

表3 视频序列属性			
Video sequences	Number of frames	Frame rate/fps	Frame size
Ballet	100	30	1024×768

表4 视频编码参数			
Video sequences	c/bpp	Bitrate/(MB/s)	PSNR/dB
Ballet	0.1	2.4	22.7
	0.2	4.7	36.9
	0.3	7.1	39.1
	0.4	9.4	40.4
	0.5	11.8	41.2

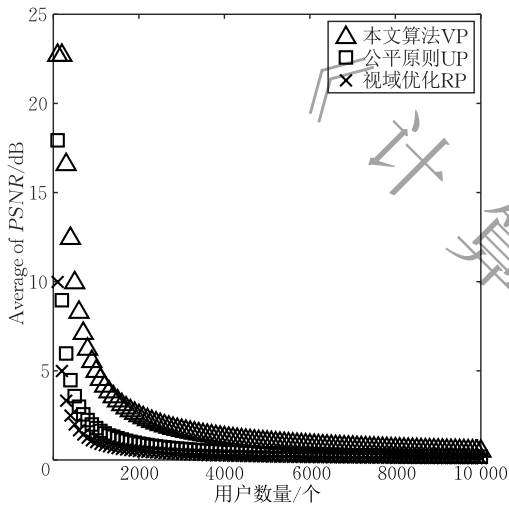
4.2.2 实验结果

实验 1. 考察平均 $PSNR$ 随用户数量变化的实验图. 图 5(a)表示了在视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,当用户期望的图像场景复杂度 c (每像素比特)为 0.1 时,随着用户数量增加,可以观测到三种算法的平均 $PSNR$ 随用户数量增加逐步衰减.当用户数量超过 8000 人时,用户无法获得网络服务,算法的平均 $PSNR$ 接近 0 .

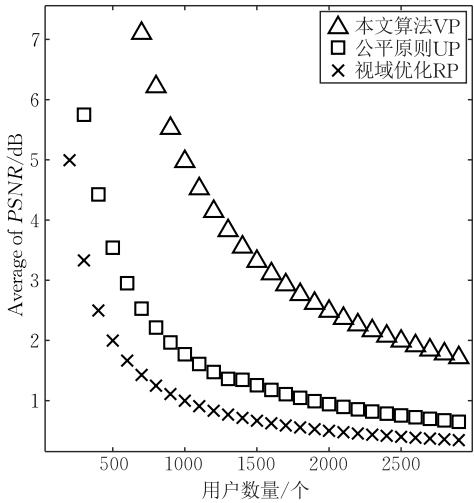
当用户数量较少时,从图 5(b)中可以观察到本文算法 VP 的平均 $PSNR$ 始终高于公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP. 在用户数量为 2000 人时,本文算法 VP 的平均 $PSNR$ 比公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP 分别高 1.59 dB 和 1.98 dB .

观测到三种算法的平均 $PSNR$ 随用户数量增加逐步衰减,特别是当用户数量超过 4000 人时,平均 $PSNR$ 趋近 0 ,原因在于可供分配的带宽数量不足以支持所有用户的编码复杂度需求,更高图像细节复杂度会消耗更多的编码速率.

从图 6(b)中可以观察到公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP 之间的差距很小,并且都低于本文算法 VP. 原因在于视域优化算法 RP 和公平原则算法 UP 没有考虑用户对细节编码的要求,不能更好满足用户的需求. 在用户数量为 2000 人时,本文算法 VP 的平均 $PSNR$ 比公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP 分别高 1.11 dB 和 1.24 dB .



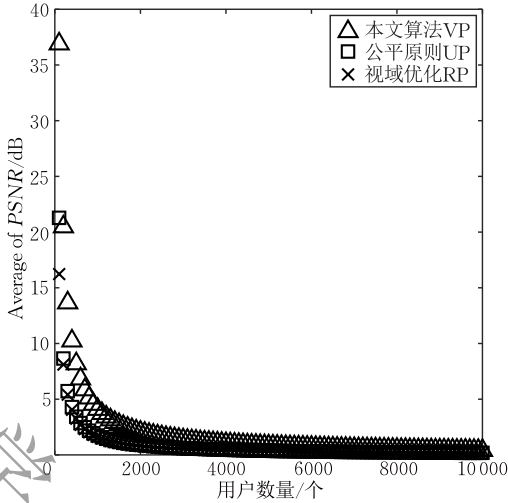
(a) 不同算法下的平均 $PSNR(c=0.1)$ /dB



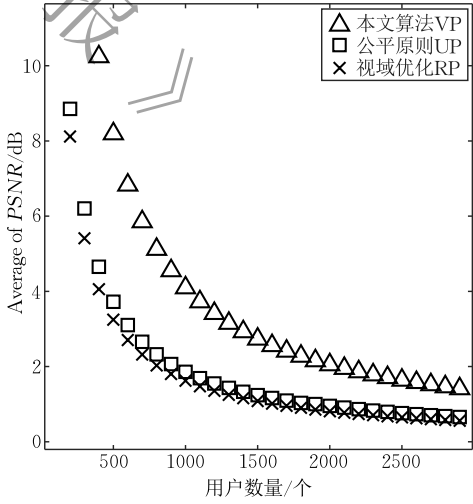
(b) 图(a)局部放大图

图 5 $c=0.1\text{ bpp}$ 、在视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,平均 $PSNR$ 随用户数量变化的对比实验图像

图 6(a)显示了在视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,当用户期望的图像场景复杂度 c (每像素比特)为 0.2 时,随着用户数量增加,仍然可以



(a) 不同算法下的平均 $PSNR(c=0.2)$ /dB



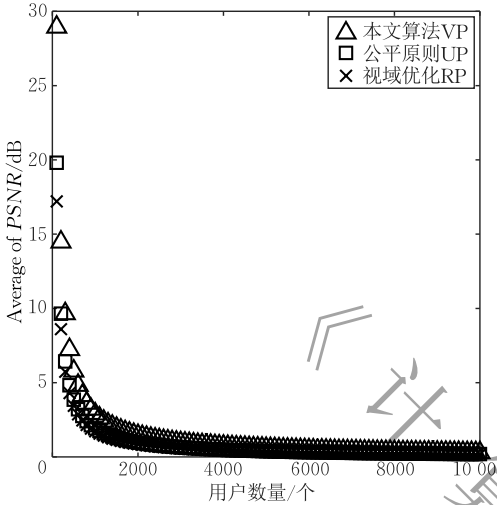
(b) 图(a)局部放大图

图 6 $c=0.2\text{ bpp}$ 、在视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,平均 $PSNR$ 随用户数量变化的对比实验图像

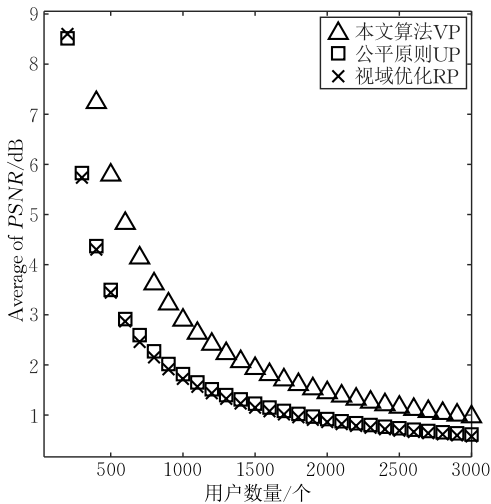
图 7(a)表示了视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,当用户期望的图像场景复杂度 c (每像素比特)为 0.3 时,不同算法的平均 $PSNR$. 当用户数量超过 3000 人时,三种算法的平均 $PSNR$ 相

互趋近,可见更高图像细节复杂度会消耗更多的编码速率。

从图 7(b)中可以观察到公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP 之间的差距很小,并且低于本文算法 VP。在用户数量为 2000 人时,本文算法 VP 的平均 PSNR 比公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP 分别高 0.5 dB 和 0.6 dB。



(a) 不同算法下的平均PSNR($c=0.3$)/dB

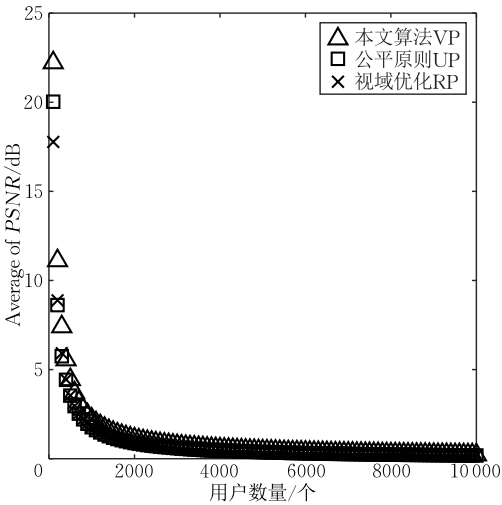


(b) 图(a)局部放大图

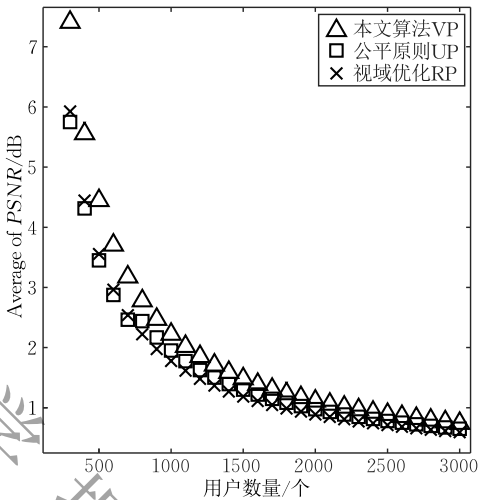
图 7 在 $c=0.3$ 、在视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,平均 PSNR 随用户数量变化的对比实验图像

图 8(a)表示了视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,当用户期望的图像场景复杂度 c (每像素比特) 为 0.4 时,不同算法的平均 PSNR。从图 8(b)中可以观察到本文算法 VP 和公平原则算法 UP、视域优化算法 RP 之间的差距非常接近,原因是图像场景复杂度增加所消耗的带宽更多,带宽受限导致不同算法的结果相差很小。

在用户数量为 2000 人时,本文算法 VP 的平均 PSNR 比公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP 分



(a) 不同算法下的平均PSNR($c=0.4$)/dB



(b) 图(a)局部放大图

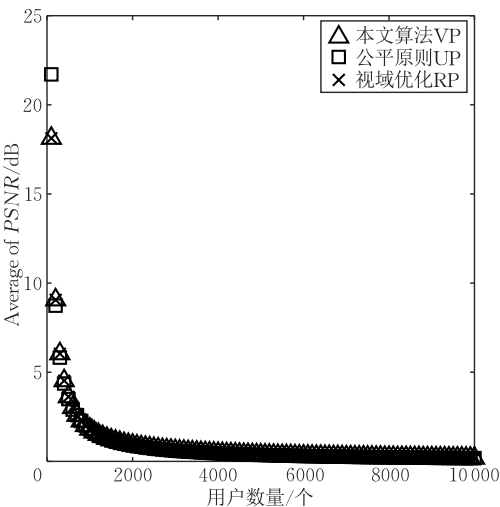
图 8 在 $c=0.4$ 、在视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,平均 PSNR 随用户数量变化的对比实验图像

别高 0.16 dB 和 0.22 dB。

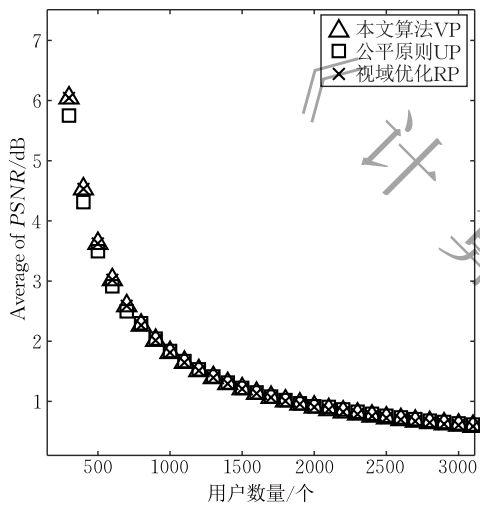
图 9(a)表示了视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,当用户期望的图像场景复杂度 c (每像素比特) 为 0.5 时,不同算法的平均 PSNR 与以上各图相似。从图 9(b)中可以观察到本文算法 VP 和公平原则算法 UP、视域优化算法 RP 之间的几乎重合,因为用户希望的细节复杂度为最高等级,在相同的视域下,本文算法 VP 与公平原则算法 UP 调节的结果相同。

在用户数量为 2000 人时,本文算法 VP 的平均 PSNR 值与公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP 的平均 PSNR 值差距近似为 0 dB。

为了进一步看清楚用户在不同的场景复杂度的期望下,算法对应的平均 PSNR 的变化规律。我们挑选用户个数分别为 100 人和 3000 人时,在表格中,记录了平均 PSNR 的数值变化。当其他参数不



(a) 不同算法下的平均PSNR($c=0.5$)/dB



(b) 图(a)局部放大图

图 9 在图像 $c=0.5$ 、在视域 180° 、可用带宽 10 GB/s 的设置参数下,平均 PSNR 随用户数量变化的对比实验图像

变,即:视域为 180° ,可用带宽为 10 GB/s 时,变化用户的编码场景复杂度 c 的期望(对应不同的用户设备处理能力).当用户为 100 人时,本文算法随着 c 的增加,平均 PSNR 从 22.7 dB ,增加到 36.9 dB ,随后一直下降到 18.1 dB .而公平原则算法 UP 和视域优化算法 RP 分别从 18.4 dB 和 9.99 dB 单调增加至 21.7 dB 和 18.1 dB .原因在于,本文算法 VP 可以根据用户对场景复杂的需求分配对应的编码速率,兼顾了视频质量和视域范围.而公平原则算法 UP 采用带宽平均分配,当超过资源限制时,尽管视频质量较高,不能保证用户视域的要求.随着用户对带宽细节处理编码需求增大,公平原则算法 UP 用户的 PSNR 值不断增加, $c=0.5$ 时 PSNR 最高,但是会损失用户视域的范围.视域优化算法 RP 随着用户对带宽细节处理编码需求增大,用户的 PSNR 值也不断增加,但低于本文算法 VP 和公平原则算法

UP. 视域优化算法 VP 可以有效调节不同用户对视域大小的需求,但当所有用户对视域需求无差时,视域优化算法由于其不考虑用户其他特性,会采取发送细节编码复杂度 c 的所有转码速率,增加视频对网络用户的普适性,但对带宽的消耗增加.

当用户数量为 3000 人时,网络属于严重超载,本文算法随着 c 的增加,平均 PSNR 从 1.66 dB 单调下降到 0.60 dB ,公平原则算法 UP 几乎维持 0.60 dB 不变,视域优化算法 RP 一直处于最低,但从 0.33 dB 微微增加到 0.60 dB .原因在于随着用户对编码细节处理能力的增加,对带宽的消耗随之增加,受限于网络总带宽,本文算法 VP 对用户服务能力逐步下降,但公平原则算法 UP 一直保持恒定的带宽分配原则,当用户数量太大时,分配的带宽只能保证细节处理下限.而视域优化算法 RP 只对视域变化处理,对用户其他特性不关注,因此随 c 的增加,平均 PSNR 值略有增加,但始终小于本文算法 VP 和公平原则算法 UP.当 $c=0.5$ 时,三种算法均为 0.60 dB .原因是用户数量太大,算法之间获得增益已经不明显了.

表 5 平均 PSNR 与 c 和用户数量的关系

Average of PSNR /dB	用户数 100/个			用户数 3000/个		
	本文算法 VP	公平原则 UP	视域优化 RP	本文算法 VP	公平原则 UP	视域优化 RP
$c=0.1$	22.7	18.4	9.99	1.66	0.61	0.33
$c=0.2$	36.9	19.2	16.2	1.36	0.61	0.54
$c=0.3$	28.9	19.8	17.2	0.96	0.64	0.57
$c=0.4$	22.2	20.7	17.7	0.74	0.62	0.59
$c=0.5$	18.1	21.7	18.1	0.60	0.60	0.60

实验 2. 考察平均 PSNR 随网络带宽变化的实验图.

接下来,我们考察平均 PSNR 随网络带宽变化的规律.在视域 180° 、编码复杂度 $c=0.3$ 的设置参数下,图 10 是可用带宽在 5 GB/s 的不同算法的平均 PSNR 值.相同用户数量下,平均 PSNR 值从高到低依次为本文算法 VP、视域优化 RP 和公平原则 UP.

图 11 是可用带宽 10 GB/s 的不同算法的平均 PSNR 值.通过局部放大图我们发现:相同的用户数量下,视域优化算法 RP 和公平原则 UP 的实验结果非常接近,但始终低于本文算法 VP.但三种算法的平均 PSNR 值高于相同条件下的图 10 中的数值.

图 12 是可用带宽 100 GB/s 的不同算法的平均 PSNR 值.在相同的的用户数量,三种算法的平均 PSNR 值都大幅提高,通过图中可知,本文算法比可用带宽为 5 GB/s 和 10 GB/s 时与其余两种算法的优势更明显,相同用户数量下的 PSNR 值更大.

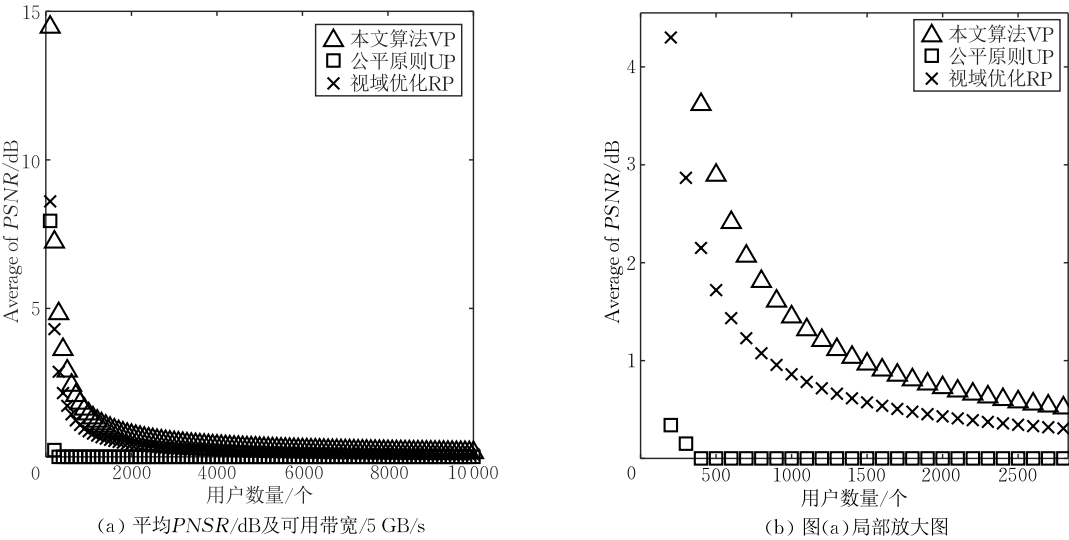


图 10 在可用带宽 5 GB/s 在视域 180° 、 $c=0.3$ 的设置参数下,平均 PSNR 随用户数量变化的对比实验图像

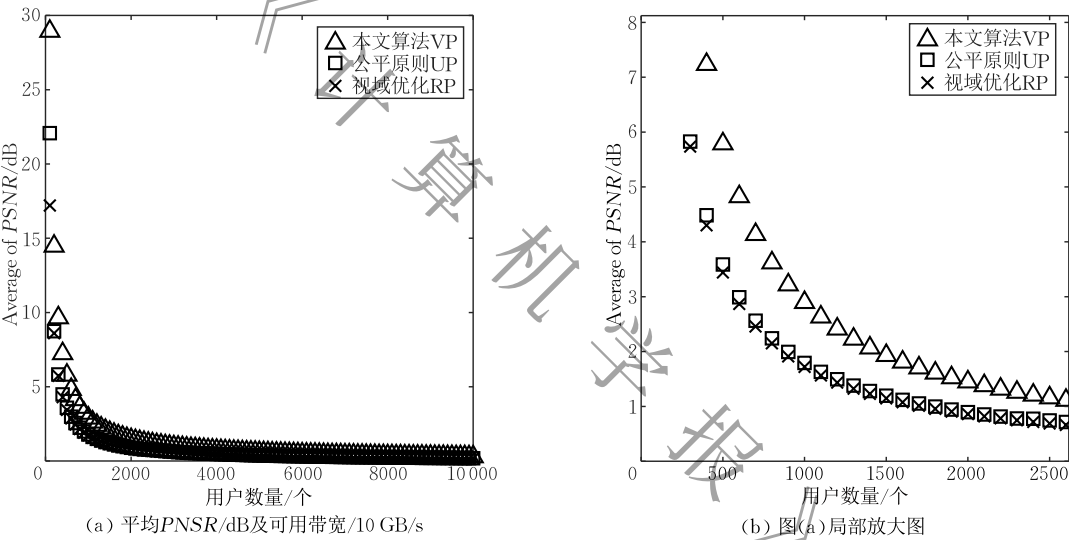


图 11 在可用带宽 10 GB/s、视域 180° 、编码复杂度 $c=0.3$ 的设置参数下,平均 PSNR 随用户数量变化的对比实验图像

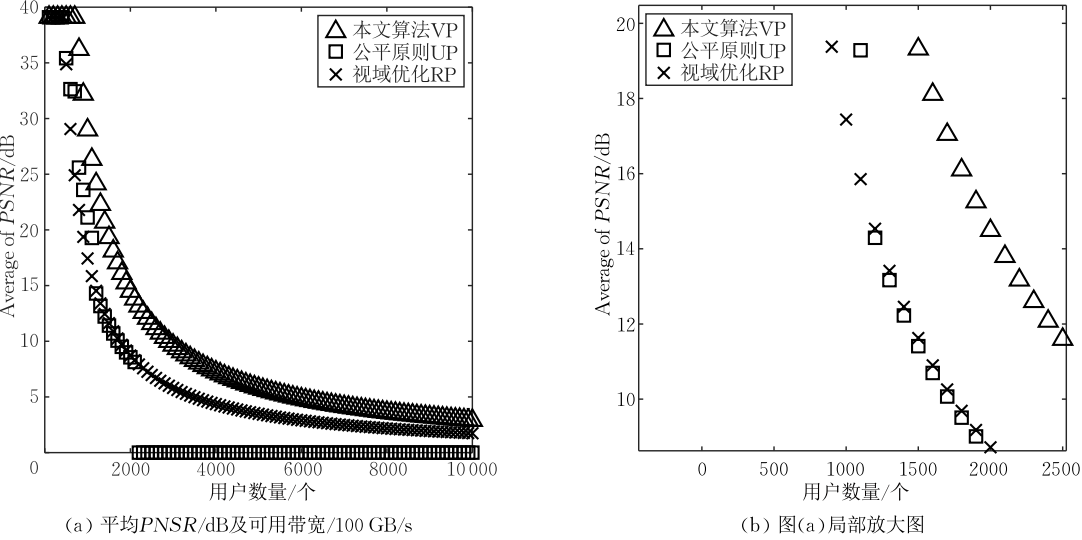


图 12 在可用带宽 100 GB/s 在视域 180° 、 $c=0.3$ 的设置参数下,平均 PSNR 随用户数量变化的对比实验图像

5 结 论

本文利用 Stackelberg 博弈理论对多用户的 3D 多路视频进行资源分配和接入控制,可以解决由于不同用户设备对多视点视域范围和视频场景复杂程度存在差异、网络收益和用户效用不高的问题. 本文联合考虑了场景复杂度和视域大小这两个影响多视点用户感受的两个主要因素,在无线网络带宽约束和用户视域变化的情况下,提出了一个价格博弈的算法,可以达到最大化网络收益和用户整体效用. 该算法可以确定允许接入网络的用户数量及带宽资源价格,并给出了证明. 仿真实验证明,本文算法可以同时满足网络收益和用户整体效用最优,提高多视点视频在多用户下的网络资源利用率.

参 考 文 献

- [1] Scandarolli T, de Queiroz R L, Florencio D A. Attention-weighted rate allocation in free-viewpoint television. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(4): 359-362
- [2] Ahmed H, Mohamed H. Energy-efficient multicasting of multiview 3D videos to mobile devices. *ACM Transactions on Multimedia Computer, Communication, Application*, 2012, 8(45): 1-25
- [3] Fan Hongfei, Ding Lin, Jia Huizhu, Xie Xiaodong. A novel joint rate allocation scheme of multiple streams. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2019, 29(3): 854-867
- [4] Zhang X, Xu Y, Hu H, et al. Modeling and analysis of Skype video calls: Rate control and video quality. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(6): 1446-1457
- [5] Lin W-Y S, Liu K J R. Game-theoretic pricing for video streaming in mobile networks. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(5): 2667-2680
- [6] Song H, Kuo C-C J. A region-based H. 263+ codec and its rate control for low VBR video. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2004, 6(3): 489-500
- [8] Yin J, Wang Y, Zhao Z. Optimal band selection for hyperspectral image classification based on inter-class separability// *Proceedings of the Symposium on Photonics and Optoelectronic*. Chengdu, China: 2010: 1-4
- [9] Zhou L, Wu G, He Y, et al. A new just-noticeable-distortion model combined with the depth information and its application in multi-view video coding// *Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. Piraeus, Greece, 2012: 246-251
- [10] Yan T, Deng A, Tsaur W J, et al. Basic unit layer rate control for video security// *Proceedings of the 2010 International Computer Symposium*. Tainan, China, 2010: 34-37
- [11] Yan T, Deng A, Deng C, et al. A joint bit allocation scheme for MV// *Proceedings of the 4th International Congress on Image and Signal Processing*. Shanghai, China, 2011: 14-17
- [12] Shao F, Jiang G, Lin W, et al. Joint bit allocation and rate control for coding multi-view video plus depth based 3D video. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2013, 15(8): 1843-1854
- [13] Cordina M, Debono C J. A novel view-level target bit rate distribution estimation technique for real-time multi-view video plus depth// *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. Melbourne, Australia, 2012: 878-883
- [14] Park S, Sim D. An efficient rate-control algorithm for multi-view video coding// *Proceedings of the IEEE 13th International Symposium on Consumer Electronics*. Kyoto, Japan, 2009: 115-118
- [15] Lee P J, Lai Y C. Vision perceptual based rate control algorithm for multi-view video coding// *Proceedings of the International Conference on System Science and Engineering*. Macao, China, 2011: 342-345
- [16] Liu Y, Huang Q, Ma S, et al. A novel rate control technique for multiview video plus depth based 3D video coding. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2011, 57(2): 562-571
- [17] Zheng Q, Yu M, Jiang G, et al. Rate control for multi-view video coding based on statistical analysis and frame complexity estimation. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, 107: 1089-1097
- [18] Roodaki H, Irvani Z, Hashemi M R, Shirmohammadi S. View-level rate distortion model for multi-view/3D video. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2016, 18(1): 14-24
- [19] ITU-T Recommendation and International Standard of Joint Video Specification, document ITU-T Rec. H. 264/ISO/IEC 14496-10 AVC, 2012
- [20] Hannuksela M M, et al. Multiview-video-plus-depth coding based on the advanced video coding standard. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(9): 3449-3458
- [21] High Efficiency Video Coding, document ITU-T Rec. H. 265, 2014
- [22] Tanimoto M, Tehrani M P, Fujii T, et al. Free-Viewpoint TV. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2011, 28(1): 67-76
- [23] Toni L, Maugey T, Frossard P. Correlation-aware packet scheduling in multi-camera networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2014, 16(2): 496-509
- [24] Pan Z, Ikuta Y, Bandai M, et al. User dependent scheme for multi-view video transmission// *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*. Kyoto, Japan, 2011: 1-5
- [25] Ren D, Chan S H G, Cheung G, et al. Anchor view allocation for collaborative free viewpoint video streaming. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2015, 17(3): 307-322
- [26] Maugey T, Petrazzuoli G, Frossard P, et al. Key view selection in distributed multiview coding// *Proceedings of the IEEE Visual Communications and Image Processing Conference*. Valletta, Malta, 2015: 486-489
- [27] Kurutepe E, Civanlar M R, Tekalp A M. Client-driven selective streaming of multiview video for interactive 3DTV. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2007, 17(11): 1558-1565

- [28] Chakareski J. Adaptive multiview video streaming: Challenges and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(5): 94-100
- [29] Kurutepe E, Sikora T. Multi-view video streaming over P2P networks with low start-up delay//*Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*. San Diego, USA, 2008:3088-3091
- [30] Chen Z, Zhang M, Sun L, et al. Delay-guaranteed interactive multiview video streaming//*Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Taipei, China, 2009: 1795-1798
- [31] Toni L, Frossard P. Optimal representations for adaptive streaming in interactive multi-view video systems. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(12): 2775-2787
- [32] Zhang B, Liu Z, Chan S H G, et al. Collaborative wireless free view video streaming with network coding. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2016, 18(3): 521-536
- [33] Ueberheide M, Klose F, Varisetty T, et al. Web-based Interactive Free-Viewpoint Streaming: A framework for high quality interactive free viewpoint navigation//*Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia*. Brisbane, Australia, 2015: 1031-1034
- [34] Garcia M N, Dytko D, Raake A. Quality impact due to initial loading, stalling, and video bitrate in progressive download video services//*Proceedings of the International Workshop on Quality of Multimedia Experience*. Singapore, 2014: 129-134
- [35] Kito T, Otomo I, Fujihashi T, et al. A novel segment scheduling method for multi-view video using progressive download//*Proceedings of the Global Communications*. Washington, USA, 2017: 1-6
- [36] Sun Y, Yin X, Jiang J, et al. CS2P: Improving video bitrate selection and adaptation with data-driven throughput prediction//*Proceedings of the ACM SIGCOMM 2016 Conference*. Florianopolis, Brazil, 2016: 272-285
- [37] Batalla J M, Krawiec P, Beben A, et al. Adaptive video streaming: Rate and buffer on the track of minimum rebuffering. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(8): 2154-2167
- [38] Carlsson N, Eager D, Krishnamoorthi V, et al. Optimized adaptive streaming of multi-video stream bundles. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(7): 1637-1653
- [39] Ho T Y, Yang D N, Liao W. Efficient resource allocation of mobile multi-view 3D videos with depth-image-based rendering. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(2): 344-357
- [40] Dorea C, Queiroz R L D. Attention-weighted texture and depth bit-allocation in general-geometry free-viewpoint television. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2017, 27(5): 1055-1065
- [41] Xu Yuedong, Zhou Yipeng, Chiu Dah-Ming. Analytical QoE models for bit-rate switching in dynamic adaptive streaming Systems. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(12): 2734-2748
- [42] Bilal K, Erbad A, Hefeeda M. Crowdsourced multi-view live video streaming. *IEEE Access*, 2017, 5: 12635-12647
- [43] Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of Operations Research Society*, 1998, 49(3): 237-252

附录 1.

优化问题式(14)和式(15)可以改写为无约束最大化问题

$$\max_{p \geq 0} J = \sum_{n=1}^N p_n + \lambda \left(B + N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta - \sum_{n=1}^N \alpha \frac{\lambda_n}{p_n} \right),$$

其中, λ 是拉格朗日变量.

为了求得极值点, 计算 $\frac{\partial J}{\partial p_n} = 0$, 得到: $1 + \lambda \frac{\alpha \lambda_n}{p_n^2} = 0$.

进一步简化表示为: $p_n = \sqrt{-\lambda \alpha \lambda_n}$.

并把该式代入 $\sum_{n=1}^N \alpha \frac{\lambda_n}{p_n} = B + (N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta)$,

得到: $\sum_{n=1}^N \alpha \frac{\lambda_n}{\sqrt{-\lambda \alpha \lambda_n}} = B + (N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta)$.

整理得到:

$$\sqrt{-\lambda} = \frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{\alpha \lambda_n}}{B + (N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta)}.$$

$$\text{则 } p_n = \sqrt{-\lambda \alpha \lambda_n} = \frac{\sqrt{\alpha \lambda_n} \sum_{n=1}^N \sqrt{\alpha \lambda_n}}{B + (N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta)}$$

$$= \frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{\lambda_n} \sum_{n=1}^N \sqrt{\lambda_n}}{B + (N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta)}.$$

证毕.

附录 2.

由式(16), 可知 $\frac{p_n^*}{p_j^*} = \frac{\sqrt{\lambda_n}}{\sqrt{\lambda_j}}$, 其中 $n, j \in \{1, \dots, N\}$. 则

$$p_n^* = \frac{\sqrt{\lambda_n}}{\sqrt{\lambda_j}} p_j^*.$$

由式(15), 可得下式

$$\begin{aligned} B + (N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta) &\geq \sum_{n=1}^N \alpha \frac{\lambda_n}{p_n} \\ &= \sum_{n=1}^N \alpha \frac{\lambda_n}{(\sqrt{\lambda_n} / \sqrt{\lambda_j}) p_j^*} = \sum_{n=1}^N \alpha \frac{\sqrt{\lambda_n} \sqrt{\lambda_j}}{p_j^*} \\ &= \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \frac{\lambda_j}{p_j^*} \sum_{n=1}^N \sqrt{\lambda_n} \stackrel{(\lambda_1 > p_1^*)}{\geq} \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \sum_{n=1}^N \sqrt{\lambda_n} \end{aligned}$$

由于 j 为任意一个用户, 则:

$$B + (N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta) \geq \max_j \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \sum_{n=1}^N \sqrt{\lambda_n}, \text{ 则}$$

$$B \geq \max_j \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \sum_{n=1}^N \sqrt{\lambda_n} - (N\alpha - \sum_{n=1}^N (v_n^\theta + 1)\beta). \text{ 证毕.}$$

附录 3.

由于定理 1(16)和定理 2(17)分别求得了优化目标下的用户的单位带宽价格和所需的带宽总量.

根据式(13), N 个用户消耗的总带宽为: $\sum_{n=1}^N \left(\alpha \frac{\lambda_n}{p_n} - \alpha + (v_n^\theta + 1)\beta \right)^+ \leq B$, 随用户个数增加, 剩余带宽单调下降, 因此网络服务的总用户数量受限. 根据定理 2, 已知网络可用带宽 B , 可以计算出待接入服务的用户个数为 j . $B_j = \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_j}} \cdot$

$\left(\sum_{n=1}^j \sqrt{\lambda_n} \right) - \left(j\alpha - \sum_{n=1}^j (v_n^\theta + 1)\beta \right)$, $B \geq B_j$. 根据定理 1, 可知第 i 个用户 ($i=1, \dots, j$) 订阅视频需付出的单位带宽价格

应为: $p_i^* = \sqrt{\lambda_i} \delta_j = \frac{\alpha \sqrt{\lambda_i} \sum_{n=1}^j \sqrt{\lambda_n}}{B + \left(j\alpha - \sum_{n=1}^j (v_n^\theta + 1)\beta \right)}$. 其余的用户

不能被接入网络, 服务器设置其带宽单价为无穷大. 根据优化目标式(14), 用户会放弃视频服务的请求.

所以, 这 N 个用户 (按满意度增益 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 排序), 用户需付出的单位带宽价格为: $p^* = \delta_j [\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_j}, \infty, \dots, \infty]$. 证毕.

附录 4.

优化问题式(19)、(20)和式(21)与原有问题式(14)和

式(15)相比, 增加了式(21), 考虑接入服务的设备是否受限于 $C_n^{\max}$, 根据式(21)可得最优状态下, 用户订阅带宽的单位

$$\text{价格为: } p_n^* = \frac{\lambda_n}{C_n^{\max} (v_n^\theta + 1) + 1}.$$

求解过程与定理 3 一样,

但剩余带宽变为: $B' = B - \sum_{m=1}^{j-1} b(C_m^{\max})$, 其中 j 为接入用户的个数, 且 $C_n^* = C_n^{\max}$.

根据定理 1, 可知如果剩余带宽 $B' > 0$, 则优化问题由式(19)、(20)和式(21)转化为式(14)和式(15), 求解过程等同定理 3.

由定理 1(16), 可以求出其余接入网络的用户单位带宽价格:

$$p_j^* = \frac{\alpha \sqrt{\lambda_j} \sum_{n=j}^N \sqrt{\lambda_n}}{B - \sum_{m=1}^{j-1} b(C_m^{\max}) + (N-j+1)\alpha - \sum_{n=N-j+1}^N (v_n^\theta + 1)\beta}.$$

再根据式(11)可得:

$$c_j = \frac{1}{(v_n^\theta + 1)}.$$

$$\left[\frac{\sqrt{\lambda_j} \left(B - \sum_{m=1}^{j-1} b(C_m^{\max}) + (N-j+1)\alpha - \sum_{n=N-j+1}^N (v_n^\theta + 1)\beta \right)}{\alpha \sum_{n=j}^N \sqrt{\lambda_n}} - 1 \right].$$

这样, 所有接入网络的用户价格为:

$$p^* = \left[\frac{\lambda_1}{C_1^{\max} (v_1^\theta + 1)}, \dots, \frac{\lambda_i}{C_{i-1}^{\max} (v_{i-1}^\theta + 1)}, \delta_j \sqrt{\lambda_j}, \dots, \delta_N \sqrt{\lambda_N} \right]^T.$$

证毕.



CHEN Yi, Ph. D., associate professor. Her research interests include multimedia wireless networks, mobile computing.

ZHAO Er-Dun, Ph. D., associate professor. His research interests include cognitive network, network

Background

Multi-view video have received much attention in recent years. Many new types of media are supported by this new technology, including 3D television (3DTV) and free-viewpoint videos(FVV). 3D-enabled mobile products, such as HTC EVO 3D, LG Optimus 3D, Sharp Lynx, are becoming new market favorites.

A multi-view and multi-video network is a working

optimization.

GAO Ge, Ph. D., associate professor. Her research interests include audio signal processing, multimedia signal processing.

YANG Qing, associate professor. Her research interests include data analysis, deep learning.

ZHENG Shi-Jue, Ph. D., professor. His research interests include Internet of Things and VR.

system in which a content server delivers multi-view 3D videos to multiple viewers. These 3D videos delivered by sever are referred as reference view-point videos which are captured directly by cameras around object targets. Texture images and associated depth maps are encoded into multiply representations with different resolution and encode complexity, one of them being chosen by reference view-point videos. A

viewer can freely choose its video and view range. European Union has initiated a collaborative research project, MOBILE3DTV, to delivery 3D video streaming in the wireless mobile networks. And Tube has supported 3D videos delivery for mobile users in wireless networks.

In contrast to traditional videos, multi-view videos request tremendous bandwidth since an image with wide view range and high resolution jointly are required. It is important to ensure the optimal allocation of the bandwidth resources for multi-view 3D viewers. Transmission of multi-view videos over wireless networks is challenging because of limited bandwidth and heterogeneous viewers.

Although many works have explored on Multiview video

bandwidth allocation, they either assume a specific view angel or broaden view range without consideration of heterogeneity of mobile devices. This paper is the first attempt to propose a price-based Multiview 3D viewing quality and range control scheme using game theory. We defined an optimization problem to characterize multi-view resource allocation and admission control. By solving this problem, the revenue from all viewer and the aggregate utilities of all viewers would be maximized by setting a proper price for the bandwidth.

This work is supported by the National Natural Science Foundation (Nos.61202470 and 61471271) and the National Science and Technology Support Plan (No.2015BAK33B00).

