

## 引文格式:

杨恩众, 杨博文, 古亮, 等. 基于 SDN 的密集小蜂窝网络中可伸缩视频传输优化 [J]. 集成技术, 2019, 8(4): 14-23.

Yang EZ, Yang BW, Gu L, et al. Optimizing the scalable video transmission in dense small-cell network based on SDN [J].

Journal of Integration Technology, 2019, 8(4): 14-23.

## 基于 SDN 的密集小蜂窝网络中可伸缩视频传输优化

杨恩众<sup>1,2</sup> 杨博文<sup>3</sup> 古亮<sup>2</sup> 刘嘉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

<sup>2</sup>(深信服科技股份有限公司 深圳 518000)

<sup>3</sup>(中国科学技术大学自动化系 合肥 230027)

**摘 要** 为了优化多媒体数据在无线网络中的传输, 该文将密集型小蜂窝网络、软件定义网络以及可伸缩视频编码技术相结合, 设计了一个完整的多媒体视频传输系统。其中, 通过密集型小蜂窝网络基站间的协作, 提高无线频谱利用率; 通过自适应码率调节技术, 为不同用户提供差分服务。该文以最大化用户体验质量为目标, 联合决策用户视频质量和无线资源分配。采用李雅普诺夫优化理论, 将原问题转化为两个独立的子问题分别进行求解, 并给出了仅依赖当前观测信息的低复杂度算法。实验结果显示, 该文所提出的算法在动态环境下能够做出较好响应, 并且可以实现更高的用户体验。

**关键词** 软件定义网络; 可伸缩视频编码; 密集小蜂窝网络; 视频传输

中图分类号 TP 37 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20190612002

## Optimizing the Scalable Video Transmission in Dense Small-Cell Network Based on SDN

YANG Enzhong<sup>1,2</sup> YANG Bowen<sup>3</sup> GU Liang<sup>2</sup> LIU Jia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

<sup>2</sup>(Sangfor Technologies Inc., Shenzhen 518000, China)

<sup>3</sup>(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract** In order to optimize the video transmission in wireless network, a complete system is designed by combining dense small-cell network, software defined networking and scalable video coding technology. Through the cooperation between base stations in dense small-cell network, the radio spectrum utilization is improved, and the differential service is provided for different users by bitrate adaptation. This paper aims at maximizing the quality of user experience by making joint decision of user video layer selection and wireless resource allocation.

收稿日期: 2019-06-12 修回日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(81661168015、81871447); 青年科学基金项目(61602521)

作者简介: 杨恩众, 博士, 研究方向为云计算、多媒体通信以及未来网络; 杨博文, 博士, 研究方向为未来网络与无线网络技术; 古亮, 博士, 研究方向为系统安全和云计算; 刘嘉(通讯作者), 博士, 研究员, 研究方向为信号处理, E-mail: jia.liu@siat.ac.cn。

By employing Lyapunov optimization method, the original problem is transformed into two independent sub-problems that can be solved separately. A low complexity algorithm only relying on the current observation is presented. The experimental results verify that the proposed algorithm can perform well in dynamic environment and achieve a higher user experience.

**Keywords** software-defined networking; scalable video coding; dense small-cell network; video transmission

## 1 引言

随着多媒体与通信技术的发展, 以视频通讯、视频会议为代表的多媒体通信已深入到人们生活中。由于智能手机等移动设备的普及, 全球移动通信流量呈爆炸式增长, 无线网络容量的增速已无法匹配日益增长的通信需求<sup>[1]</sup>。随着 5G 网络时代的到来, 人们更倾向于在移动设备上观看高清视频, 以获得更好的体验。目前视频流量已占到总移动流量 50% 以上<sup>[2]</sup>, 而高质量视频传输意味着消耗更多的网络流量, 如何保证视频用户体验质量(Quality of Experience, QoE), 对于移动网络是巨大挑战。

密集型小蜂窝网络(Dense Small-Cell Network, DSCN)<sup>[3]</sup>, 将若干小基站密集部署在特定区域, 具备部署成本低、运行功耗低等优点, 并且可提升数据流量高密度区域的频谱效率, 进而扩展网络带宽容量<sup>[4]</sup>。由于单基站覆盖范围有限, 而多基站覆盖区域有重叠, 因此在 DSCN 中用户可同时从多个基站接收数据。当前, 针对无线网络视频数据传输的研究, 主要聚焦于单用户或单基站场景。

借助先进的视频编码技术, 也可以保障多媒体用户的体验质量。通过可伸缩视频编码(Scalable Video Coding, SVC)<sup>[5]</sup>技术, 可灵活、自适应地流化视频。其中, SVC 技术将视频编码成一个基本层和若干个增强层, 根据网络状态、终端设备能力, 可灵活地调配增强层数量, 获得智能视频传输服务。无线网络中, 信道状态受环

境影响会实时变化, 而 SVC 视频的质量/时间可伸缩性, 可使视频服务适应不同的网络环境; SVC 视频的空间可伸缩性, 则可以适配异构分辨率的终端, 达到按需服务的目的。尽管 SVC 视频具备诸多优势, 但目前并没有被广泛应用于视频服务系统<sup>[6]</sup>。究其原因, 上层应用无法感知和控制网络节点, 这阻碍了流量在网络内的自适应。

针对密集型小蜂窝网络和 SVC 存在的问题, 软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)<sup>[7]</sup>为人们提供了解决问题的有效方法。SDN 将控制平面和数据平面分离, 利用集中的控制器下发路由策略、控制网络节点的转发行为<sup>[8]</sup>, 促进了网络与应用之间的协作。

此前已有很多学者对 DSCN 及无线网络的视频传输问题进行了研究。Kim 和 Cho<sup>[9]</sup>提出通过联合决策子信道和功率分配, 最大化系统容量。Liu 等<sup>[10]</sup>对 DSCN 中的干扰管理问题进行了深入研究, 从而提升系统的性能。Chen 等<sup>[11]</sup>提出了一种无线网络资源管理的算法, 使得无线资源公平分配、视频用户可获得相对稳定的带宽。Abou-Zeid 等<sup>[12]</sup>通过预测无线网络传输速率, 实现了较高能效的视频传输, 并提出了优化模型与算法框架。然而, 以上视频传输研究均基于单个基站场景, 没有考虑基站之间的相互协作。针对 DSCN 中的视频自适应传输问题, Bethanabhotla 等<sup>[13]</sup>提出了自适应调节视频质量和动态分配无线资源的方案, 但是该方案需要较长的缓冲区来避免视频中断, 会造成播放视频时的启动时

延较长。Miller 等<sup>[14]</sup>利用经典的比例-积分-微分 (Proportional-Integral-Derivative, PID) 控制算法, 稳定播放缓冲区长度, 从而提高用户体验质量, 但并没有考虑回传网络对视频传输系统的影响。

本文将密集型小蜂窝网络、软件定义网络及可伸缩视频编码技术相结合, 设计了以密集型小蜂窝网络为边缘接入网, 以 SDN 网络为核心交换网, 以 SVC 视频为视频服务源的智能视频传输系统。其中, 利用 SDN 网络收集网络状态信息与应用进行交互, 实现自适应视频服务; 利用 SDN 网络控制视频流的传输路径, 实现小基站之间的相互协作; 通过优化小基站的资源分配, 保障用户体验质量。

## 2 系统架构

### 2.1 系统整体架构

本文所提出的移动网络 SVC 视频传输系统如图 1 所示。该系统的基础网络层由 SDN 及密

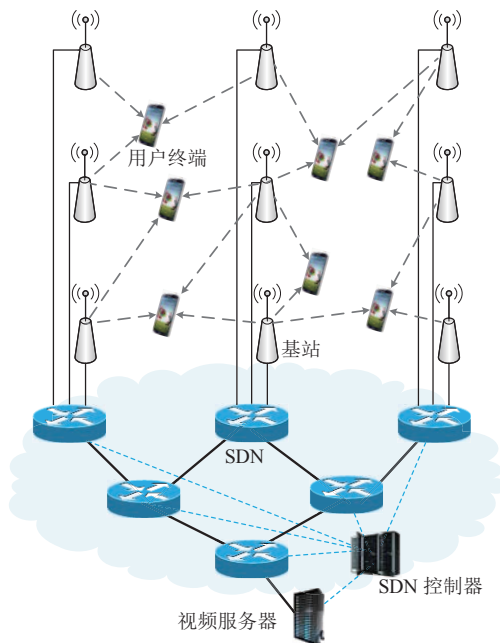


图 1 基于 SDN 的 DSCN 中可伸缩视频流化框架

Fig. 1 SVC streaming over SDN-aided DSCN

集型小蜂窝网络组成; 业务层由视频服务器和用户终端构成。

DSCN 小基站与 SDN 交换机构成了基础网络层的数据平面。每个小基站均与 SDN 交换机连接, 并从中获取用户所需的视频数据包。同时, 小基站依据其与用户间的信道状态和所需发送的视频流量信息, 动态分配无线资源, 实现无线资源的高效利用。在网络的控制层面, SDN 控制器通过边缘交换机获取 DSCN 的状态信息。例如, 用户设备与小基站之间的传输速率、连接状态等。SDN 控制器配置交换机的流表, 根据各个小基站与用户间的连接状态, 调度整个网络的视频数据流向, 实现小基站间的协作。

视频服务器作为应用层的业务数据生产者, 进行视频的编码与流化, 并通过 SDN 控制器跨层交互控制信令, 获取网络状态信息, 评估视频传输状态, 进而动态调整视频码率。用户终端作为应用数据的消费者, 可以从多个小基站同时接收视频数据, 解码并播放视频数据。

### 2.2 组件功能与主要工作流程

基于 SDN 的密集小蜂窝网络中, 可伸缩视频传输各部分的模块及数据流如图 2 所示。该系统各部分主要工作流程如下:

视频服务器包含用户管理、视频层数决策和视频编码模块。当收到用户视频请求后, 用户管理模块记录视频发送指针与视频播放指针, 避免发送过多数据导致用户缓冲区溢出。同时, 层数决策模块根据 SDN 控制器同步的网络状态信息, 确定发送恰当的视频层数, 避免因网络拥塞导致高码率视频流无法有效传输而出现视频中断。最后, 可伸缩视频编码模块编码并流化视频, 使数据进入网络。

用户终端主要包括视频帧还原、视频解码和视频播放模块。由于用户终端从多个小基站接收视频, 数据包可能存在乱序问题, 故采用视频帧还原模块对接收到的数据包重新排列还原, 使视

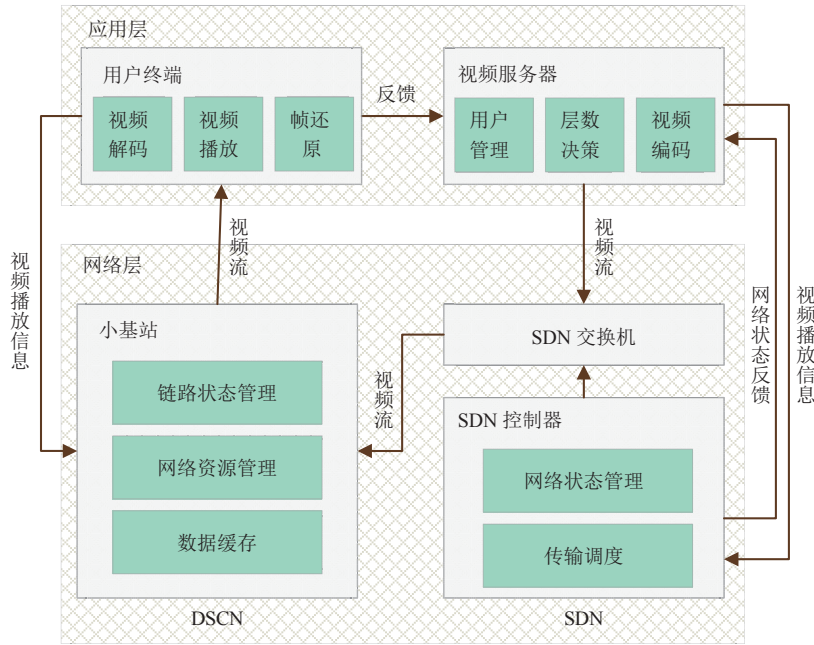


图 2 系统模块图

Fig. 2 System model

频解码与播放模块可以正确解码播放视频。

SDN 交换机根据 SDN 控制器下发的流表, 将视频流发送到相应的小基站。SDN 控制器主要包括网络状态管理与传输调度模块。当 SDN 网络收到视频服务器发来的数据时, 根据所需发送的视频层数, 结合无线网络的信道质量调度视频流, 使得 DSCN 能够充分利用无线网络资源。

DSCN 中, 每个小基站主要包含链路状态管理、网络资源管理与数据缓存模块。其中, 链路状态管理模块维护着与各用户之间的信道质量信息。当小基站收到 SDN 交换机发来的数据包时, 会将其暂存在数据缓存模块中。之后根据所缓存数据量以及各用户信道质量, 综合决策当前时隙最优的无线网络资源分配方案, 并将数据包发送给相应用户。

### 3 系统设计与实现

#### 3.1 密集型小蜂窝网络无线接入模型

密集型小蜂窝网络 (DSCN) 包含大量的用

户与小基站, 其中用户终端通过无线连接与一个或多个小基站建立连接。采用三元组  $(U_t, S; E_t)$  来描述 DSCN, 其中  $U_t$  表示用户集合,  $S$  表示小基站集合,  $E_t$  表示小基站与用户的无线连接集合, 即  $(s, u) \in S \times U_t$ 。在  $t$  时刻, 为用户  $u$  提供视频传输服务的小基站集合可以表示为  $\mathcal{N}_t(u) = \{s \in S : (s, u) \in E_t \text{ 且 } r_{su}(t) \geq r_{\min}\}$ 。其中,  $r_{su}$  是用户  $u$  与小基站  $s$  间理论最大传输速率,  $r_{\min}$  为视频传输所需要的最小带宽。

假设密集型小蜂窝网络内所有小基站具有相同的恒定信号发射功率与信道带宽。那么小基站  $s$  与用户  $u$  之间的信道容量可以根据香农 (Shannon) 公式得出:

$$c_{s,u}(t) = W \log \left( 1 + \frac{P g_{s,u}(t)}{N_0 + \sum_{s' \neq s, s' \in \mathcal{N}_t(u)} P g_{s',u}(t)} \right) \quad (1)$$

其中,  $P$  为小基站的信号发射功率;  $W$  为信道带宽;  $g_{s,u}$  为信道增益;  $N_0$  为背景噪声。在 DSCN 中, 小基站可以同时为多个满足带宽需求的用户提供服务。如果用  $a_{s,u}(t) \in [0, 1]$  来表示  $t$  时刻分

配给用户  $u$  的无线资源占总资源的比例, 则总的传输速率为:

$$c_u(t) = W \sum_{s \in \mathcal{N}_t(u)} a_{s,u}(t) \log \left( 1 + \frac{Pg_{s,u}(t)}{\sigma_{s,u}} \right) \quad (2)$$

其中,  $\sigma_{s,u} = N_0 + \sum_{s' \neq s, s' \in \mathcal{N}_t(u)} Pg_{s',u}(t)$ 。

### 3.2 视频质量评估模型

利用 SVC 技术中的质量可伸缩视频编码器, 将视频序列编码为 1 个基本层和  $L-1$  个增强层, 当用户仅接收到基本层视频时, 可以解码出最低质量的视频; 用户收到的增强层数量越多, 解码出的视频质量越好。使用平均主观意见分 (Mean Opinion Score, MOS)<sup>[15]</sup> 作为视频质量的评价指标。通常用户  $u$  在  $t$  时刻获得的视频质量  $q_u(t)$ , 与其接收到的视频层数  $l_u(t) \in \{1, \dots, L\}$  成正比。假设视频包含 1 个基本层和 4 个增强层, 则视频的质量 (MOS 值) 与视频层数之间的映射关系如表 1 所示。

表 1 MOS 值与视频层数映射关系

MOS 值	用户体验	接收视频总层数
5	极好	5
4	好	4
3	良	3
2	差	2
1	很差	1

为保证视频播放的流畅性, 用户的播放过程不能中断。因此, 网络的平均传输速率应不小于视频的平均码率, 即满足如下约束:

$$\bar{r}_u \leq \bar{c}_u \quad (3)$$

其中,  $\bar{r}_u$  表示时间平均的视频播放速率;  $\bar{c}_u$  表示时间平均的视频传输速率。

### 3.3 优化问题模型

为优化用户的体验质量, 定义系统瞬时效用为当前所有用户的平均 MOS 值, 即:

$$Q(t) = \frac{1}{N_t} \sum_{u \in U_t} q_u(t) \quad (4)$$

其中,  $N_t$  表示系统中的用户数量。则系统的长时间平均效用为:

$$\bar{Q} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \mathbb{E} [Q(\tau)] \quad (5)$$

因此, 小蜂窝网络中的视频播放问题可以建模为:

$$\begin{aligned} & \underset{a_{s,u}, l_u}{\text{Maximize}} \quad \bar{Q} \\ & \text{s.t.} \quad \bar{r}_u \leq \bar{c}_u, u \in U_t \\ & \quad a_{s,u}(t) \in [0, 1], \forall t \\ & \quad \sum_{u \in U_t} a_{s,u}(t) \leq 1, \forall s \in S \\ & \quad l_u(t) \in \{1, \dots, L\}, \forall t \end{aligned} \quad (6)$$

系统的优化目标是在满足无线资源及视频播放速率约束下, 通过优化视频的层数和无线信道资源的分配, 最大化系统的长时间平均效用。

## 4 多基站协同的资源调度与优化

为求解上述带约束的随机优化问题, 利用李雅普诺夫漂移理论将时间平均约束, 转化为队列稳定性问题, 从而将该问题分解为视频层数选择和无线资源分配的两个独立无约束子问题进行求解。

### 4.1 李雅普诺夫随机优化模型

原问题 (5) (公式 (5)) 带有时间平均的约束, 根据李雅普诺夫漂移理论可以构建虚拟队列  $H_u(t)$ , 即:

$$H_u(t+1) = [H_u(t) + r_u(t) - c_u(t)]^+ \quad (7)$$

其中, 符号  $(*)^+$  定义为  $(x)^+ \triangleq \max(x, 0)$ 。如果满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E} [H_u(t)]}{t} = 0 \quad (8)$$

则表示虚拟队列稳定。根据虚拟队列的更新公式 (7) 可知, 若视频的播放速率大于传输速率, 队列长度将会增加, 反之队列长度将会减小。保持队列的稳定, 即可满足播放速率的时间平均约

束(3)。因此, 原优化问题(5)的时间平均约束可以转化为队列稳定性问题。

考虑多用户的视频传输场景, 令  $\mathcal{H}(t) \triangleq \{H_u(t), u \in U_t\}$  表示所有用户的虚拟队列长度向量。为了度量向量  $\mathcal{H}(t)$ , 定义二次李雅普诺夫函数为:

$$L(t) = \frac{1}{2} \sum_{u \in U_t} H_u(t)^2 \quad (9)$$

进一步定义从  $t$  时刻到  $t+T$  时刻的条件李雅普诺夫漂移为:

$$\Delta_T(t) \triangleq \mathbb{E} [L(t+T) - L(t) | \mathcal{H}(t)] \quad (10)$$

其中,  $\Delta_T(t)$  的稳定可以保证虚拟队列的稳定。为实现在满足队列稳定的条件下目标函数的优化, 将目标优化函数转化为惩罚函数, 从而定义漂移加惩罚项为:

$$\Delta_T(t) - V \mathbb{E} \left[ \sum_{\tau=t}^{t+T-1} Q(\tau) | \mathcal{H}(t) \right] \quad (11)$$

其中,  $\mathbb{E} \left[ \sum_{\tau=t}^{t+T-1} Q(\tau) | \mathcal{H}(t) \right]$  表示  $T$  时间内的平均系统效用; 参数  $V$  是一个非负常数, 用于平衡系统效用与队列稳定性的权重。较大的  $V$  使得决策偏向提高系统的效用; 相反地, 较小的  $V$  使得决策首先保证队列的稳定。最小化公式(11)也是在最大化平均系统效用, 同时能够保证  $\Delta_T(t)$  的稳定。由此, 带有时间平均约束的系统效用的最大化问题, 转化为求解漂移加惩罚函数的最小化问题。

直接对公式(11)进行求解, 需要同时决策视频层数与无线资源分配, 计算复杂很高。根据文献[16], 优化目标公式(11)存在一个上界, 即:

$$\begin{aligned} \Delta_T(t) - V \mathbb{E} \left[ \sum_{\tau=t}^{t+T-1} Q(\tau) | \mathcal{H}(t) \right] \leq \\ B + T \sum_{u \in U_t} \mathbb{E} \left[ H_u(t) r_u(t) - \frac{V}{N_t} q_u(t) | \mathcal{H}(t) \right] - \\ \sum_{\tau=t}^{t+T-1} \mathbb{E} \left[ \sum_{u \in U_t} H_u(t) c_u(\tau) | \mathcal{H}(t) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中, 正常数  $B \triangleq \frac{1}{2} T^2 N_t (r_{\max}^2 + c_{\max}^2)$ ;  $r_{\max}$  与  $c_{\max}$

分别代表视频播放和传输的最大速率。对任何给定的视频层数选择与无线资源分配策略, 上式都成立。因此, 原问题(5)可以转换为如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{a_{s,u}, l_u} \quad & T \sum_{u \in U_t} \mathbb{E} \left[ H_u(t) r_u(t) - \frac{V}{N_t} q_u(t) | \mathcal{H}(t) \right] - \\ & \sum_{\tau=t}^{t+T-1} \mathbb{E} \left[ \sum_{u \in U_t} H_u(t) c_u(\tau) | \mathcal{H}(t) \right] + B \\ \text{s.t.} \quad & a_{s,u}(t) \in [0, 1], \forall t \\ & \sum_{u \in U_t} a_{s,u}(t) \leq 1, \forall s \in S \\ & l_u(t) \in \{1, \dots, L\}, \forall t \end{aligned} \quad (13)$$

由上式可知, 在虚拟队列长度向量  $\mathcal{H}(t)$  已知情况下, 优化问题(12) (公式(12))的目标函数第一项只与视频层数  $l_u(t)$  有关, 第二项仅与无线资源分配策略  $a_{s,u}(t)$  有关。因此, 该优化问题可以分解成两个独立的子问题, 即视频层数的选择问题和无线资源的分配问题。下面将分别对这两个子问题进行求解。

## 4.2 视频层数的决策

在无线视频传输系统中, 用户之间视频层数的选择是相互独立的。在  $t = kT (k=0, 1, 2, \dots)$  时刻, 用户  $u$  的最优层数选择能够通过最大化式(12)中目标函数的第一项得到:

$$\begin{aligned} \min_{l_u} \quad & H_u(t) r_u(t) - \frac{V}{N_t} q_u(t) \\ \text{s.t.} \quad & l_u(t) \in \{1, \dots, L\}, u \in U_t \end{aligned} \quad (14)$$

虚拟队列长度  $H_u(t)$  可以作为视频播放速率的权重。当虚拟队列长度较小时, 只有增加视频层数, 即提高视频播放速率, 相应的用户体验质量提高, 才能保证公式(14)取最小值。相反, 当虚拟队列长度较大时, 减少视频层数, 即降低视频播放速率, 从而使得公式(14)取最小值。

实际系统中, 可伸缩视频的层数通常只有 2 至 6 层。因此, 对所有可能的层数  $l \in \{1, \dots, L\}$

进行遍历, 能够很容易求解子问题(14)(公式(14))。考虑多用户场景, 求解过程只与用户的数量有关, 即算法复杂度仅为  $O(N_t)$ 。

### 4.3 无线资源的分配

在任意时刻  $t \in [kT, (k+1)T-1]$  ( $k=0,1,2,\dots$ ), 将公式(2)代入问题(13)(公式(13))的第二项, 可以得到:

$$\begin{aligned} \max_{a_{s,u}} \quad & W \sum_{s \in S} \sum_{u \in U_t} H_u(kT) a_{s,u}(t) \log \left( 1 + \frac{P g_{s,u}(t)}{\sigma_{s,u}} \right) \\ \text{s.t.} \quad & a_{s,u}(t) \in [0,1], \\ & \sum_{u \in U_t} a_{s,u}(t) \leq 1 \end{aligned} \quad (15)$$

其中, 基站侧能够获得当前时刻的虚拟队列长度  $H_u(kT)$ 。实际系统中, 用户终端根据导频信号估计信道质量, 并通过信道质量标识(Channel Quality Indicator, CQI)的方式反馈给基站, 基站据此就可以计算出相关信号发射功率  $P$  与信道增益  $g_{s,u}$ 。

基站之间的决策是相互独立的, 每个小基站可以根据当前获得参数独立决策最优无线资源分配。对基站  $s$ , 为使目标函数最大, 需要将所有的无线资源都分配给  $H_u(kT) \log \left( 1 + \frac{P g_{s,u}(t)}{\sigma_{s,u}} \right)$  最大的用户。

## 5 实验结果与分析

为了评估所提出算法的有效性和性能, 本

文设计了基于 Matlab 的仿真实验。在实验中, 将本文所提出的算法统一为动态视频传输调节算法(Dynamic Video Transmission Adaptation, DVTA)。作为对比实验, 本文将 Miller 等<sup>[14]</sup>的 PID 算法应用到该系统中。

### 5.1 实验环境配置

在实验中, 假设 DSCN 部署在  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  的正方形区域中, 而区域由 25 个边长为 20 m 的小正方形组成, 每个小正方形的中心部署 1 个小基站。这些小基站采用 5 GHz 的载波频段, 同时相邻的小基站采用正交信道来降低干扰, 信道带宽被设置为 330 kHz, 信号发射功率为 43 dBm。依据 Döttling 等<sup>[17]</sup>所提出的信道模型, 可计算小基站  $s$  与用户  $u$  之间的信道增益:

$$g_{s,u}(t) = 10^{-\frac{PL[d_{s,u}(t)]}{10}} \quad (16)$$

其中,  $d_{s,u}(t)$  表示小基站  $s$  与用户  $u$  之间的距离; 路径损失函数  $PL(d) = A \log(d) + B + C \log(0.25f_0) + \chi_{dB}(f_0)$  ( $f_0$  为载波频率,  $\chi_{dB}$  表示服从对数正态分布的阴影衰减, 其方差为  $\sigma_{dB}^2$ )。依据 Döttling 等<sup>[17]</sup>给出的模型, 当  $3 \leq d \leq 100$  时, 相关参数可设置为  $A=18.7, B=46.8, C=20, \sigma_{dB}^2=9$ ; 当  $0 \leq d \leq 3$  时,  $PL(d) = PL(3)$ 。本文将小基站  $s$  与用户  $u$  可用带宽小于 0.5 Mbps 的信道认为是不可用信道。

本文采用视频编码软件 JSVM<sup>[18]</sup>, 将视频序列“Gandhi”、“The Terminator”与“Die

表 2 视频序列统计信息

Table 2 Average bitrate of video sequences

SVC 视频	Gandhi		The Terminator		Die Hard	
	比特率(kbps)	PSNR (dB)	比特率(kbps)	PSNR (dB)	比特率(kbps)	PSNR (dB)
层 1	114.83	35.10	145.34	34.89	79.28	37.30
层 2	139.66	36.31	128.76	36.18	125.04	39.02
层 3	80.07	37.77	115.27	37.80	56.62	40.77
层 4	54.82	38.78	72.94	38.86	36.09	41.81
层 5	65.96	40.27	77.93	40.15	36.22	43.01

注: PSNR 为峰值信噪比

Hard”编码为具有 1 个基本层和 4 个增强层的 SVC 格式可伸缩视频, 视频序列信息如表 2 所示。实验中, 每个用户在 3 个视频中随机选择一个进行播放。

## 5.2 算法性能对比分析

本文选择系统效用、用户播放中断率作为评价指标, 来反映本文提出的算法性能。在实验中, 为了保证用户体验质量, 对比算法根据 Miller 等<sup>[14]</sup>推荐的 PID 参数, 利用 PID 控制器调节视频层数和无线资源分配, 使得用户播放器缓冲区数据量稳定在目标值附近。同时, 为了评估 DVTA 算法在不同用户负载压力下的表现性能, 令用户数从 25 变化到 200, 并且实验结果取 50 次独立实验数据的平均值。

本文将用户终端在播放视频时出现中断时刻的 MOS 值定义为 0。该视频传输系统在不同算法下, 长时间平均系统效用公式(5)与用户数的关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 系统效用随用户数的增加而减小。这是由于无线资源有限, 随着用户数增加, 每个用户的平均资源会减少, 进而降低无线传输速率, 无法提供足够带宽传输高质量视频, 这说明算法根据系统状态的变化调节视频的层数。另外, 根据图 3 可判断 DVTA 算法(本文算法)的系统效用比 PID 算法要高。这是由于经典 PID 控制算法对复杂、非线性和时变系统表现不尽如人意, 并且 PID 算法的目标是稳定用户视频播放器的缓冲区长度, 而非最

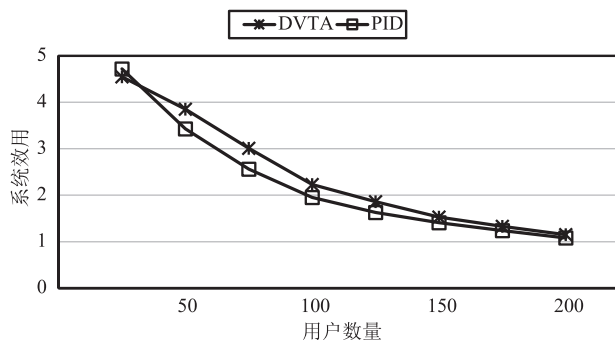


图 3 用户数变化时算法的长时间平均系统效用

Fig. 3 System utility for various users

大化系统效用, 而 DVTA 在建立数学模型公式(6)时, 明确以最大化系统效用为目标。

视频中断会极大地影响观看者的体验。本文定义了视频播放中断率, 即中断时间与总播放时间的比率, 以此来评估视频播放质量。在两种算法中, 视频播放中断率与用户数量的关系如图 4 所示。由于无线资源有限, 视频播放中断率随着用户数的增加而增大。由图 4 可以得出, 相比于 PID 算法, DVTA 算法具有更低的视频播放中断率。这是因为在推导 DVTA 算法时, 本文考虑了速率约束公式(3), 通过保证长时间平均的视频传输速率大于长时间平均的视频播放比特率, 来降低视频播放中断率。

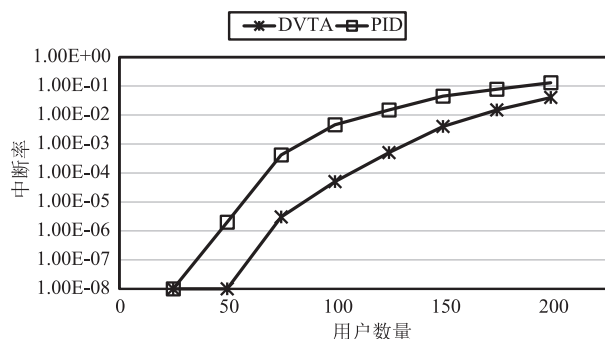


图 4 用户数变化时算法的用户播放中断率

Fig. 4 Playback interruption for various users

从上述实验可以得出, 由于本文所提出系统模型不但考虑小基站之间的相互协作, 同时又考虑了回传网络对系统的影响, 利用李雅普诺夫优化理论求解建模后的问题, 达到了相较于对比算法更好的性能。

## 5.3 参数灵敏度分析

本节通过实验研究公式(13)中参数  $V$  对算法性能的影响, 实验结果如图 5 和图 6 所示。图 5 结果表明, 长时间平均系统效用随参数  $V$  的增加而增加。按照李雅普诺夫优化理论, 参数  $V$  代表惩罚项的权重, 较大的  $V$  值可导致系统做出提高视频层数的决策, 进而提高系统效用。但是传输高层数视频, 会使虚拟队列  $H_u(t)$  变长。较长的  $H_u(t)$  意味着视频播放比特率较难匹配可用传输带



宽, 这会导致用户终端播放视频中断。如图 6 所示, 增大参数  $V$  会增加视频播放中断率。

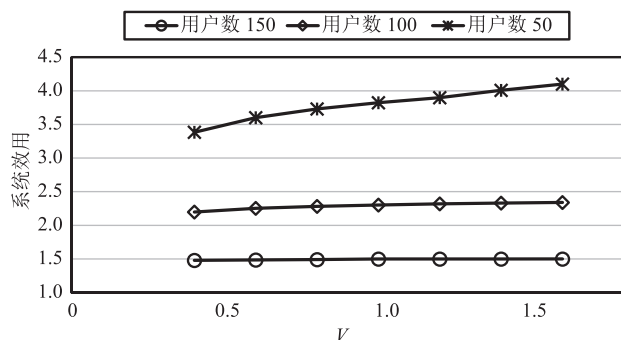


图 5 长时间平均系统效用对参数  $V$  的灵敏度

Fig. 5 System utility for various  $V$

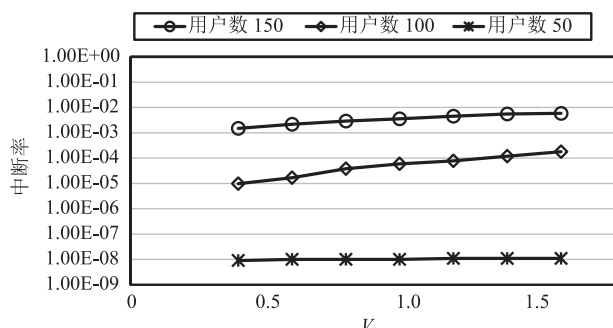


图 6 视频播放中断率对参数  $V$  的灵敏度

Fig. 6 Playback interruption for various  $V$

当用户数较少时, 视频播放中断率较低, 并且中断率对参数  $V$  变化不敏感, 但此时增加  $V$  可较明显增大系统效用; 当用户数较多时, 系统效用对参数  $V$  变化不敏感, 但降低  $V$  可以较明显降低中断率。由此可得出, 在系统负载较低时, 适当调高  $V$  的值可获得更高的系统效用; 在系统负载较高时, 可以调低  $V$  来获取较低的中断率。因此, 通过调节参数  $V$ , 可在系统效用与视频播放中断率之间做出平衡。

## 6 结论

本文设计了在密集型小蜂窝网络中的可伸缩视频传输系统, 用以保障用户体验, 并将问题建模为具有时间平均约束的联合优化问题。利用李雅普诺夫优化理论, 将该问题分解为视频层数选

择、无线资源分配两个子问题, 然后利用系统模块进行独立优化。本文使用真实视频轨迹, 评估了所提方法的性能。实验结果表明, 所提出的算法能对环境动态波动作出快速响应, 实现较好的性能并保障用户体验。

## 参考文献

- [1] Hanzo L, Haas H, Imre S, et al. Wireless myths, realities, and futures: from 3G/4G to optical and quantum wireless [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(Special Centennial Issue): 1853-1888.
- [2] Li CL, Xiong HK, Zou JN, et al. Joint dynamic rate control and transmission scheduling for scalable video multirate multicast over wireless networks [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(2): 361-378.
- [3] Hoydis J, Kobayashi M, Debbah M. Green small-cell networks [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2011, 6(1): 37-43.
- [4] Kamel M, Hamouda W, Youssef A. Performance analysis of multiple association in ultra-dense networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 3818-3831.
- [5] Schwarz H, Marpe D, Wiegand T. Overview of the scalable video coding extension of the H.264/AVC standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(9): 1103-1120.
- [6] Yang J, Yang E, Ran YY, et al. Controllable multicast for adaptive scalable video streaming in software-defined networks [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2017, 20(5): 1260-1274.
- [7] Kreutz D, Ramos FMV, Verissimo PE, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.
- [8] Wang GD, Zhao YX, Huang J, et al. A K-means-based network partition algorithm for controller placement in software defined network [C] // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2016: 1-6.

- [9] Kim J, Cho DH. A joint power and subchannel allocation scheme maximizing system capacity in indoor dense mobile communication systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(9): 4340-4353.
- [10] Liu JY, Sheng M, Liu L, et al. Interference management in ultra-dense networks: challenges and approaches [J]. *IEEE Network*, 2017, 31(6): 70-77.
- [11] Chen JS, Mahindra R, Khojastepour MA, et al. A scheduling framework for adaptive video delivery over cellular networks [C] // *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking*, 2013: 389-400.
- [12] Abou-Zeid H, Hassanein HS, Valentin S. Energy-efficient adaptive video transmission: exploiting rate predictions in wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(5): 2013-2026.
- [13] Bethanabhotla D, Caire G, Neely MJ. Adaptive video streaming for wireless networks with multiple users and helpers [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(1): 268-285.
- [14] Miller K, Bethanabhotla D, Caire G, et al. A control-theoretic approach to adaptive video streaming in dense wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2015, 17(8): 1309-1322.
- [15] Moldovan AN, Ghergulescu I, Muntean CH. VQAMap: a novel mechanism for mapping objective video quality metrics to subjective MOS scale [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2016, 62(3): 610-627.
- [16] Neely MJ. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems [M] // *Synthesis Lectures on Communication Networks*, 2010: 1-211.
- [17] Döttling M, Mohr W, Osseiran A. *Radio Technologies and Concepts for IMT-Advanced* [M]. John Wiley & Sons, 2009.
- [18] Seeling P, Reisslein M. Video transport evaluation with H.264 video traces [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 14(4): 1142-1165.