

## 无线环境下失真和时限感知的视频分组调度机制

李志鹏 卢汉成\* 洪佩琳

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系 合肥 230027)

**摘要:** 现有无线分组调度算法一般以最大化系统吞吐量或者保证用户之间公平性为目标。然而,不同视频分组之间存在着重要性差异,使得传统的内容无关调度算法不适用于无线视频传输。充分发掘视频分组之间存在的重要性差异并准确衡量视频分组的传输失真,能够在资源受限的无线环境下更合理地分配资源,提高视频传输质量。该文首先提出一种分组级别视频传输失真衡量模型,用于预测视频分组丢失对视频质量的影响,然后考虑分组时限的影响,提出分组级别的时限扩展模型。在此基础上,利用正交频分复用(OFDM)技术在无线资源(时域、频域及功率)分配上的灵活性,提出一种基于梯度的失真和时限感知调度算法。仿真结果表明该文所提出的调度算法相对于传统内容无关算法最大有4.3 dB的平均峰值信噪比(PSNR)增益。

**关键词:** 无线分组调度; 视频流; 资源分配; 时限

中图分类号: TN919.85

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)09-2213-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01290

## Distortion and Deadline Aware Packet Scheduling for Video Streaming over Wireless

Li Zhi-peng Lu Han-cheng Hong Pei-lin

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Most of current wireless packet scheduling algorithms aim at maximizing overall system throughput or achieving a certain type of fairness among mobile users. However, these content-independent algorithms can not be applied to wireless video transmission because different video packets have different levels of contribution to the overall video quality at the receiver side. Fully exploring the differences between the video packets and accurate predicting the transmission distortion caused by lost video packets can significantly improve the performance of video streaming over resource-constrained wireless networks. In this paper, a packet-level transmission distortion model is proposed to predict the quality degradation of decoded videos by lost video packets, the packet-level deadline is defined to extend the model. Based on this packet-level transmission distortion model and packet-level deadline extended model, a gradient-based distortion and deadline aware scheduling algorithm is proposed, which prioritizes the transmissions of different users by considering distortion impact, deadline requirements and fully exploit the flexibility of resource allocation provided by the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology in terms of time, frequency and power. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm outperforms the content-independent algorithms with a gain of as much as 4.3 dB in terms of average Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR).

**Key words:** Wireless packet scheduling; Video streaming; Resource allocation; Deadline

### 1 引言

随着无线通信技术的迅猛发展以及视频处理技术的进步,无线视频通信应用变得越来越广泛。网络流媒体、互联网电视(Internet Protocol Television, IPTV)、高清电视(High Definition Television,

HDTV)、视频会议等对人们的日常生活产生了深刻影响。现在,人们已经习惯于通过各种无线网络设备(手机、平板电脑等)来获取自己所需要的多媒体信息,互联网中无线视频流量呈现出了几何级的增长。

无线视频通信应用的成功依赖于在无线环境下提供具有良好服务质量(Quality of Service, QoS)保证的视频传输服务。但是无线信道固有的时变、衰落特性以及有限的带宽限制使得视频分组在到达接

2012-10-10 收到, 2013-05-20 改回

国家自然科学基金(60832005, 61170231)资助课题

\*通信作者: 卢汉成 hclu@ustc.edu.cn

收端之前可能会经历不可预知的时延,如果视频分组时延超过了接收端的解码时限就会因失去解码意义而被丢弃。无线信道的易错特性也可能导致视频分组产生传输错误而被丢弃。另一方面,视频分组不同于普通的数据分组,现有的视频编码标准为了获得高压缩率普遍采用预测编码、变换编码等多种混合(hybrid)编码技术,视频分组之间存在着严重的相关性和依赖关系,导致视频传输质量非常容易受到分组丢失的影响。分组丢失不仅会引起当前视频帧解码重建的失真,而且解码错误还会沿着运动预测的路径进行错误扩散(error propagation),造成后续帧的解码出现错误。这些问题使得无线环境下的视频传输面临着严峻挑战。

无线分组调度可以根据用户的 QoS 需求和当前的无线信道质量,决定哪些用户的哪些分组被优先服务,使得有限的无线资源在用户间达到最优分配,因此能有效解决无线视频通信所面临的问题。然而,现有的无线分组调度算法一般建立在机会调度算法的基础上,主要集中在研究如何在保证一定的公平性前提下,尽可能利用多用户分集增益来最大化系统总吞吐量。Neely<sup>[1]</sup>在 Lyapunov 优化中引入时延,将吞吐量和时延同时作为优化目标,提出了一种具有分组时延保证的机会调度算法。Li 等人<sup>[2]</sup>研究了多跳网络中分组具有端到端时限约束的调度算法。Cui 等人<sup>[3]</sup>综述了现有的时延感知调度算法。这些调度算法虽然考虑了分组的时限,但是没有考虑视频应用的内容特征,现有视频编码标准普遍采用混合编码技术,不同于传统的数据分组,不同视频分组之间存在着重要性差异,系统总吞吐量最大并不能保证接收端用户感知到的视频质量最佳。Zhang 等人<sup>[4]</sup>提出了一种细粒度传输失真模型用于预测视频分组丢失引起的传输失真,基于此模型提出了一种内容和时限感知调度机制,但是论文中的无线信道模型比较简单,没有考虑无线信道的时变特征以及无线资源分配的灵活性。Fu 等人<sup>[5]</sup>提出了一种无线视频分组调度的系统解决方案,考虑了视频分组内容的异构性和无线信道的动态时变特征,但是研究针对单用户单跳的无线网络场景。Dua 等人<sup>[6]</sup>研究了多用户视频流分组下行调度问题,提出了一种信道、时限和失真感知的调度算法,但是为了简化模型,每个传输时隙只有一个用户的某一视频分组能被调度,并且没有考虑到当前视频分组丢失对其它分组解码所造成的影响即视频分组的错误扩散的特征。Fu 等人<sup>[7]</sup>将多用户视频流传输调度建模为多用户 Markov 决策过程,并综合考虑视频内容的异构性和无线信道的时变特征,但是多用户共享

信道采用 TDM 协议,在同一时隙只能调度一个用户的分组。Pahalawatta 等人<sup>[8]</sup>同样研究多用户视频流调度问题,并提出了一种失真感知的梯度调度算法,但是没有考虑到时限的影响。

为了获得更好的传输鲁棒性,压缩编码后的视频流通常根据需要分割成若干大小合适的分组,然后再进行传输。由于视频分组对接收端的视频质量具有不同重要程度的贡献,基于内容感知的分组调度优化算法需要了解各视频分组对失真的影响。然而前人提出的视频失真模型集中于研究帧级别传输失真的建模和预测<sup>[9,10]</sup>,只度量视频帧重要性的失真感知方法不能区分出属于同一视频帧的不同分组之间的重要性差别,而视频序列的变化通常具有局部特征,某些帧的局部宏块组成的分组丢失带来的失真更严重。因此,目前大多以视频帧重要性为度量的方法不再适用。而基于像素级别视频失真度量方法,如经典的 ROPE(Recursive Optimal per-Pixel Estimate)等算法,需要在像素域进行递归计算,算法复杂度非常高。

本文研究无线环境下多用户视频流的传输调度和资源分配问题。不同于已有的帧级别失真模型,本文首先提出一种分组级别的失真模型,用于预测视频分组丢失对视频质量造成的影响,该模型还考虑了错误扩散的因素;其次对分组的时限进行了扩展,提出分组级别的时限扩展模型。在此基础上,不同于已有的没有同时考虑视频流内容的异构性和无线资源分配的灵活性的次优解决方案,本文提出一种基于梯度的失真和时限感知调度算法,该算法充分考虑了不同用户视频分组的重要性差异和时限,同时考虑到 OFDM 技术提供的无线资源如时域、频域及功率分配的灵活性。仿真结果表明本文提出的算法相比传统算法平均 PSNR 最大提高 4.3 dB。

本文的结构如下:第 2 节首先给出系统模型和本文中的一些说明及假设,在 2.1 节和 2.2 节中分别介绍分组级别失真模型和时限扩展模型;2.3 节讨论无线信道模型;第 3 节对问题进行建模并提出分组级别失真和时限感知调度算法;第 4 节对所提出的模型和调度算法进行仿真实验;第 5 节为结束语。

## 2 系统模型

本文研究无线环境下多用户视频流的调度问题,系统模型如图 1 所示。视频服务器通过高带宽的骨干网与基站相连,基站下各用户向服务器请求不同的视频流序列。假设骨干网是无损的,视频服务器到基站间的传输时延可以忽略。视频分组可以被缓存在基站上,若在时限到达之前没有传递给用户将会被丢弃。

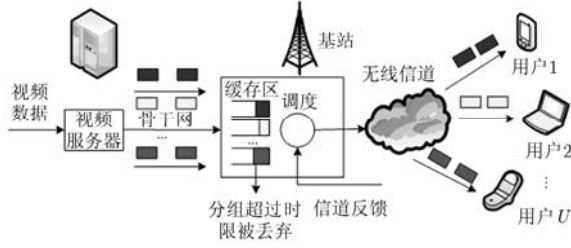


图1 系统模型

## 2.1 分组级别失真估计模型

视频序列采用 H.264 编码, 图像组(Group Of Picture, GOP)大小记为  $G$ , 采用广泛使用的均方误差(Mean Squared Error, MSE)和峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)作为视频质量评价标准。若某宏块丢失, 假设采用帧拷贝(frame copy)的错误掩盖机制, 即复制前一帧中相同位置的宏块数据。

接下来的讨论集中在某个 GOP 中, 为了简便记号表示, 在此省略 GOP 的标识  $g$ 。视频分组由若干宏块组成, 首先推导宏块级别的传输失真估计。用  $\text{NUM}_{i,j}(n)$  表示该 GOP 中的第  $n$  帧中像素  $(i, j)$  直接或间接用于预测的次数, 该值可以通过在编码端进行运动预测后计算得到, 定义该帧第  $m$  宏块的预测率为

$$M(n, m) = \frac{1}{16 \times 16} \sum_{(i,j) \in \text{MB}(n,m)} \text{NUM}_{i,j}(n) \quad (1)$$

式中前面的系数是由于 H.264 亮度块大小为  $16 \times 16$ 。

一旦该宏块丢失, 首先会对包含该宏块  $m$  的帧  $n$  的解码重建带来失真, 称之为瞬时失真, 用  $Q_0(n, m)$  来表示。用  $\hat{F}(n-1, m)$  和  $\hat{F}(n, m)$  分别表示第  $n-1$  帧和第  $n$  帧的宏块  $m$ , 由于采用简单复制的错误掩盖机制, 则第  $n$  帧第  $m$  宏块的瞬时失真为

$$Q_0(n, m) = E[\hat{F}(n-1, m) - \hat{F}(n, m)]^2 \quad (2)$$

其中  $E[\cdot]^2$  表示两帧之间像素值的均方误差(MSE)。

此外, 该宏块丢失后, 由于错误扩散还会引起当前 GOP 中其它帧的失真。因此总的传输失真记为  $Q(n, m)$  将包含两部分。现宏块的总传输失真影响可以采用一个简单的线性模型来估计:

$$Q(n, m) \approx Q_0(n, m) \cdot [M(n, m) + 1] \quad (3)$$

其中  $Q_0(n, m)$  和  $M(n, m)$  都可以在编码端通过式(1)和式(2)求得。

由于视频分组通常由多个宏块组成, 同一视频分组包含的宏块只可能来源于同一帧, 当采用帧内预测编码的宏块比例较低时, 分组内的宏块可以认为是独立的, 失真具有可加性, 即通过将分组内的

宏块失真相加可得到分组级别传输失真估计:

$$Q(\text{PKT}) \approx \sum_{m \in \text{PKT}} Q(n, m) \quad (4)$$

本文中分组内包含的宏块数目由两种方式来确定: 固定宏块数目如广泛采用的将一帧图像中的每一行打包成一个分组; 以及分组具有最大大小约束, 即在不超过大小约束下, 包含尽可能多的宏块(属于同一帧)。则分组级别失真估计算法步骤如下:

首先分析目标分组中所包含的各宏块, 对于每个宏块, 假设为第  $n$  帧的第  $m$  个 MB, 在编码过程中同时用式(1)和式(2)计算预测率  $M(n, m)$  和瞬时失真  $Q_0(n, m)$ ; 接着用式(3)计算出该宏块丢失将引起的总失真  $Q(n, m)$ ; 最后按照式(4)将分组所包含宏块的失真相加即可得到总失真  $Q(\text{PKT})$ 。

## 2.2 分组级别时限扩展模型

假定视频 GOP 的大小为  $G$ , 帧速率为  $1/\lambda$  fps, 即帧间隔为  $\lambda$  s, 用  $\text{PKT}_{g,n}^{(k)}$  来表示第  $g$  个 GOP 中第  $n$  帧的第  $k$  个分组, 则可以将该分组时限表示为<sup>[11]</sup>

$$D(\text{PKT}_{g,n}^{(k)}) = \Delta + ((g-1)G + (n-1))\lambda \quad (5)$$

其中  $\Delta$  为视频流的初始时延(initial delay)。

对该分组的时限模型进行扩展, 以反映出分组的不同重要性, 用  $\text{Ex}(\text{PKT}_{g,n}^{(k)})$  表示该分组的时限扩展, 由式(1)可以得到该分组中所包含宏块的预测率  $M(n, m)$ , 假设该分组共包含  $M$  个宏块。定义时限扩展为

$$\text{Ex}(\text{PKT}_{g,n}^{(k)}) = \lambda \left[ \frac{1}{M} \sum_{(n,m) \in \text{PKT}_{g,n}^{(k)}} M(n, m) + 1 \right] \quad (6)$$

则该分组的时限可以表达为

$$D(\text{PKT}_{g,n}^{(k)}) = \Delta + ((g-1)G + (n-1))\lambda + \text{Ex}(\text{PKT}_{g,n}^{(k)}) \quad (7)$$

由式(7)可见, 越重要的帧打包成的分组(预测率越大)的时限将会越大, 即分组的时限也体现了分组的重要性, 通过本文第3节的讨论可以发现该时限扩展模型将很好地服务于本文所提出的调度算法。

## 2.3 无线信道模型

考虑单 OFDM 小区多用户的下行视频流传输场景, 一个基站下的移动用户集合记为  $\mathcal{U} = \{1, \dots, U\}$ , 各用户  $u \in \mathcal{U}$  分别请求不同的视频流服务。在每个时隙(time-slot), 系统的调度和资源分配决策可以视为从当前可达速率域  $\mathcal{R}_t \subseteq \mathbb{R}_+^U$  中选择速率向量  $\mathbf{r}_t = (r_{1,t}, \dots, r_{u,t}, \dots, r_{U,t})$ 。

为了得到依赖于时变信道状态的可达速率域  $\mathcal{R}_t$ , 本文基于已有的下行 OFDM 系统的模型<sup>[12,13]</sup>。该模型将  $\mathcal{R}_t$  参数化为分配给用户的子载波以及各

子载波上的功率。系统是时隙的，每个时隙大小固定且包含整数个 OFDM 符号，频带划分为子载波，用  $v \in \mathcal{V}$  表示。用户  $u$  在时隙  $t$  所能达到的速率，依赖于分配的资源(子载波、功率)以及信道的增益。用  $p_{uv,t}$  表示在子载波  $v$  上分配给用户  $u$  的功率，用户  $u$  占用子载波  $v$  的时间比记为  $x_{uv,t}$ ，用  $e_{uv,t}$  表示时隙  $t$  单位功率下的信噪比。则理想信道估计情况下，用户  $u$  在子载波  $v$  上的可达速率为

$$r_{uv,t} = x_{uv,t} B \log_2 \left( 1 + \frac{p_{uv,t} e_{uv,t}}{x_{uv,t}} \right) \quad (8)$$

即带宽为  $x_{uv,t} B$ ，接收端信噪比 SNR 为  $p_{uv,t} e_{uv,t} / x_{uv,t}$  高斯信道容量，则时隙  $t$  可行速率域为

$$\mathcal{R}_t = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{r}_t : r_{u,t} = \sum_v x_{uv,t} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{uv,t} \tilde{e}_{uv,t}}{x_{uv,t} + \beta p_{uv,t} \tilde{e}_{uv,t}} \right) \\ \sum_{u,v} p_{uv,t} \leq P, \sum_u x_{uv,t} \leq 1, \forall u \in \mathcal{U}, v \in \mathcal{V} \end{array} \right\} \quad (9)$$

### 3 分组级别失真和时限感知调度

本文的调度和资源分配算法思想来源于基于梯度的调度算法模型框架<sup>[8,12,13]</sup>，在该模型中，每个用户  $u \in \mathcal{U}$  在时隙  $t$  都有一个依赖于其平均吞吐量  $W_{u,t}$  的效用函数  $f_u(W_{u,t})$ ，在每个时隙  $t$ ，系统的目标就是从当前可达速率域  $\mathcal{R}_t \subseteq \mathbb{R}_+^U$  中选择一个速率向量  $\mathbf{r}_t = (r_{1,t}, \dots, r_{u,t}, \dots, r_{U,t})$  使得所有用户的加权重率最大，且权重定义为用户效用函数的梯度。即系统的调度和资源分配决策使得  $\max_{\mathbf{r}_t \in \mathcal{R}_t} \sum_{u \in \mathcal{U}} w_{u,t} r_{u,t} =$

$\max_{\mathbf{r}_t \in \mathcal{R}_t} \sum_{u \in \mathcal{U}} \frac{\partial f_u(W_{u,t})}{\partial W_{u,t}} r_{u,t}$ ，该调度算法已被证明在时变速率域  $\mathcal{R}_t$  下能最大化所有用户的长期平均效用，即能

使得  $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{u \in \mathcal{U}} f_u(W_{u,t})$  最大。然而该模型框架没

有显式考虑时限约束，因此对于实时视频流应用来说不是很适合，这就驱使本文设计一种新的权重定义方法，显式考虑分组的时限及对视频失真影响。

先对基站上为各用户缓存的视频分组进行排序，排序的规则如下：对于每个用户的视频分组，首先按照 GOP 顺序排序，对于同一 GOP 内的分组按重要性  $Q_{u,t}$  (PKT) 排序，重要性相同时按时限排序(解码的时限为  $d_{u,t} \triangleq D_{u,t}(\text{PKT}) - t$ )，由于本文 2.2 节对分组时限进行了扩展，因此不同于传统 EDF 算法的地方是，时限越长的分组优先级反而越高， $Q_{u,t}$  (PKT) 和  $D_{u,t}$  (PKT) 的值可以由式(4)和式(7)求得。排好序之后在每个时隙  $t$  只考虑各用户的队首(Head Of Line, HOL)分组，将用户  $u$  的 HOL 分组的大小记为  $s_{u,t}$ ，这样可以得到用户  $u$  期望传送速率  $\hat{r}_{u,t} = s_{u,t} / d_{u,t}$ 。类似于效用梯度权重，本文定义权重为

$$w_{u,t} = \frac{Q_{u,t}}{\hat{r}_{u,t}} = \frac{Q_{u,t}}{s_{u,t} / d_{u,t}} = \frac{Q_{u,t}}{s_{u,t}} d_{u,t} \quad (10)$$

式(10)的物理意义为单位期望速率降低的失真。这样就显式考虑了分组的时限及对失真的影响，将分组失真影响跟用户期望达到的速率联系起来。此外，由于本文采用了时限扩展模型， $Q_{u,t}$  越大的用户  $d_{u,t}$  也会越大，因此本文所采用的时限模型正好与权重模型相匹配。

因此问题可以建模为

$$\left. \begin{array}{l} V^* = \max_{\mathbf{x}, \mathbf{p}} V(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \\ V(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \triangleq \sum_{u \in \mathcal{U}} w_{u,t} r_{u,t} = \frac{Q_{u,t}}{s_{u,t}} d_{u,t} r_{u,t} \\ = \sum_u \frac{Q_{u,t}}{s_{u,t}} d_{u,t} \sum_v x_{uv,t} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{uv,t} e_{uv,t}}{x_{uv,t}} \right) \end{array} \right\} \quad (11)$$

约束条件为  $\sum_{u,v} p_{uv,t} \leq P, \sum_u x_{uv,t} \leq 1, \forall v \in \mathcal{V}$ 。

可以证明问题是凸优化问题(证明略)。原问题的 Lagrange 函数为  $L(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) := \lambda P + \sum_v L_v(x_v, p_v, \lambda, \mu_v)$ 。其中

$$\begin{aligned} L_v(x_v, p_v, \lambda, \mu_v) &:= \sum_u w_u x_{uv} \ln \left( 1 + \frac{p_{uv} e_{uv}}{x_{uv}} \right) \\ &\quad + \mu_v \left( 1 - \sum_u x_{uv} \right) - \lambda \sum_u p_{uv} \end{aligned}$$

Lagrange 对偶函数(dual function)为

$$\begin{aligned} L(\lambda, \mu) &:= \sup_{\mathbf{x}, \mathbf{p}} L(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) \\ &= \lambda P + \sum_v \sup_{x_v, p_v} L_v(x_v, p_v, \lambda, \mu_v) \end{aligned}$$

由于原问题是凸优化问题并且满足 Slater's 条件，因而具有强对偶性(strong duality)，即对偶间隙(duality gap)为 0。因此对偶问题的最优值  $L^* := \min_{\lambda \geq 0, \mu \geq 0} L(\lambda, \mu)$  也是原问题目标函数的最优值  $V^* = L^*$ 。求解该对偶问题的算法可以基于参考文献[12]。求解该问题后，可以得到各用户在每个给定时限应该以多大速率传输，分组级别失真和时限感知调度算法详细描述如表 1 所示，该算法的主要步骤为：

(1)根据基站下各用户  $u$  的 HOL 分组的传输失真  $Q_{u,t}$  和分组大小  $s_{u,t}$  以及解码时限  $d_{u,t}$  信息，按照式(10)计算出对应的权重  $w_{u,t}$ ；

(2)求解加权重率最大化的凸优化问题式(11)，得出各用户的  $u$  最优传输速率  $\mathbf{r}_t = (r_{1,t}, \dots, r_{u,t}, \dots, r_{U,t})$ ；

(3)基站上的调度器按照步骤(2)中得到的速率传输分组。

算法最坏情况下的时间复杂度为  $O(UV)$ , 其中  $U$  为用户数,  $V$  为子载波的数目。其中各用户的权重  $w_{u,t}$  可以预先计算好, 因此该步骤时间复杂度可以忽略, 而求解失真和时限感知调度问题即加权速率最大化问题的复杂度为  $O(UV)$ 。

#### 4 仿真结果与分析

本节分别对分组级别失真估计模型以及失真和时限感知算法做性能评估, 仿真试验中视频序列使用 H.264/AVC 参考软件 JM16.0<sup>[14]</sup>进行编码。视频原始数据格式为 QCIF(176×144, 4:2:0), 帧速率为 30 fps, GOP 类型为  $G(15,1)$ , 即 GOP 大小  $G=15$ , 第 1 帧为 I 帧, 其余 14 帧为 P 帧。若某视频分组丢失, 包含该视频分组的重建帧采用帧拷贝的错误掩盖机制, 即复制前一帧中相同位置的宏块数据。下行无线信道仿真的参数设置参考了文献[12], 仿真单个 OFDM 小区, 用户数  $U = 45$ , 基站总功率  $P=6$  W, 系统带宽 5 MHz, 包含 512 个子载波, 每 8 个子载波组成一个子信道, 即一共 64 个子信道。

##### 4.1 分组级别失真估计模型性能分析

本小节对分组级别失真模型进行分析验证, 采用 4 组不同的视频序列 (Foreman, Coastguard, Mobile 和 News), 视频帧的每一行宏块打包成一个分组, 各视频序列的原始码率和平均 PSNR 如表 2 所示。

表1 失真和时限感知调度算法

(1)	Initialization $t = 0$ ;
(2)	for $t = 0$ to no more video to be streamed
(3)	for user $u = 1$ to $U$
(4)	do check the deadline of the current HOL packet;
(5)	if the deadline has passed then
(6)	do discard the packet not useful;
(7)	do calculate the priority weight $w_{u,t}$ according to Eq.(10);
(8)	end for
(9)	do solve the weighted rate maximization convex Problem Eq.(11) using the described algorithm, and each user $u$ is allocated transmission rate $r_{u,t}$ ;
(10)	for user $u = 1$ to $U$
(11)	do transmit the current HOL packet with rate $r_{u,t}$
(12)	if the current packet is transmitted successfully before the end of the time slot then
(13)	do obtain the next packet from the media server;
(14)	do transmit with rate $r_{u,t}$
(15)	end for
(16)	do $t = t + 1$
(17)	end for

表2 各视频序列原始码率和平均PSNR

视频序列	原始码率(kbps)	平均 PSNR(dB)
Foreman	192.90	36.6053
Coastguard	277.89	35.1309
Mobile	598.98	34.2848
News	136.51	37.5860

根据 2.1 节中分组级传输失真估计模型计算分组丢失引起的失真  $Q(\text{PKT})$ , 图 2 为各视频序列前 50 个分组根据本文提出的失真估计模型计算出的失真(用均方误差 MSE 值来表示)。由于视频帧的每一行宏块打包成一个分组, 因此每一帧将被打包成  $144/16=9$  个分组, 图 2 中分组序号 0~8 为 I 帧分组, 其余为 P 帧分组, 从图 2 中可以看出各分组对失真的影响有显著区别, I 帧分组相比 P 帧分组具有更重要的影响, 利用本文提出的模型计算出来的结果跟实际情况相符合。

在解码端计算分组失真引起的实际失真  $\hat{Q}(\text{PKT})$ , 定义相对误差为

$$\text{RE} = \frac{|Q(\text{PKT}) - \hat{Q}(\text{PKT})|}{\hat{Q}(\text{PKT})} \times 100\%$$

表 3 为 4 个视频序列的相对误差平均值, 可以看出 4 个测试视频序列的相对误差均小于 3%, 本文提出的分组级别失真模型可以较为准确地估计失真。

表3 各视频序列利用失真模型计算和真实失真之间的相对误差

视频序列	相对误差(%)
Foreman	2.20
Coastguard	1.83
Mobile	2.76
News	1.38

##### 4.2 失真和时限感知调度算法性能分析

本文比较 3 种调度机制, 即不考虑内容权重  $w_{u,t}=1$  的速率最大化机制 (Rate Maximization, RM)、不考虑时限的纯梯度 (Pure Gradient-based, PG) 调度机制<sup>[8]</sup>以及不进行时限扩展 (Not Extended, NE) 的内容感知调度机制<sup>[13]</sup>。

首先比较不同初始时延  $\Delta$  对调度机制的影响, 图 3 显示了初始时延  $\Delta$  为 200 s~800 ms 时, 4 种调度机制下所有用户的平均 PSNR 值。

从图 3 中可以看出速率最大化机制和不进行时

限扩展的内容感知机制的测试结果比较接近,这是因为当不进行时限扩展时,权重  $w_{u,t} = Q_{u,t} \times d_{u,t} / s_{u,t}$  随  $d_{u,t}$  减小而减小,即分组越快到时限权重越小,与  $Q_{u,t}$  对于权重的影响产生反作用,这种现象被称为“时限将到反作用 (approaching deadline effect)<sup>[13]</sup>”。从图中还可以看出,本文提出的失真和时限感知方案 (Distortion and Deadline Aware, DDA) 相比传统的速率最大化调度机制最大有 4.3 dB 的平均 PSNR 增益。

接下来对比用户在不同信噪比 (SNR) 情况下各调度机制的性能。选定两个 SNR 门限值 22.5 dB 和 32.5 dB, 情况 1 (poor) 所有 45 个用户的 SNR 不超过 22.5 dB, 情况 2 (fair) 所有用户的 SNR 在 22.5 dB

和 32.5 dB 之间, 情况 3 (good) 所有用户的 SNR 大于 32.5 dB, 情况 4 (average) 为 poor, fair 和 good 的用户数各占 1/3 即 15 个。

图 4 为 4 种情况下各调度机制的性能比较, 从图 4 可以看出对于信道状况较差的用户, 本文提出的调度机制 (DDA) 相比其它 3 种调度机制有明显的平均 PSNR 增益, 但是对于信道状况较好的用户, 几种调度机制的性能差别不大。速率最大化机制的性能在 4 种情况下都比其它方案差, 这是因为视频分组对于视频质量的影响有显著差异 (从图 2 可以看出), 这也说明不区分视频分组重要性的调度机制不太适用于视频流传输。

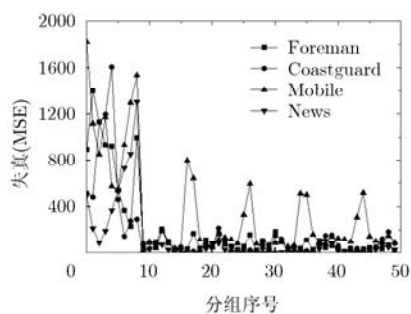


图 2 各视频序列分组失真

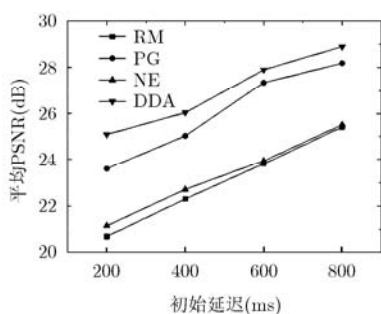


图 3 不同初始时延下各调度机制比较

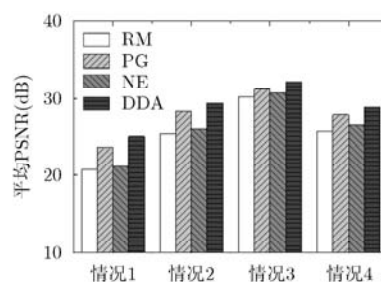


图 4 不同 SNR 约束情况下各调度机制比较

图 5 比较了在本文提出的 DDA 调度机制中, 两种分组打包方式对用户平均 PSNR 的影响, 分别为广泛采用的将一帧图像中的每一行打包成一个分组的固定宏块数目 (Fixed MB, FMB) 方式; 以及分组具有最大大小 (Max Size Constraint, MSC) 约束 (<500 Byte)。从图 5 可以看出在信道较差的情况下, 使用固定宏块数目方式视频质量比较好, 而信道较好情况下, 宏块数目由分组大小约束来确定方式比较好。造成这种情况的原因是, 采用固定宏块数目方式的分组长度较短, 信道较差的情况下丢失的分组会比较少。

## 5 结束语

本文研究多用户视频流在下行 OFDM 无线环

境中传输的调度和功率分配问题。提出了一种基于梯度的失真和时限感知调度机制, 充分考虑了不同视频分组的重要性及分组时限, 还考虑了 OFDM 技术提供的无线资源如时域、频域及功率分配的灵活性。仿真结果表明本文所提出的调度机制相比于传统机制最大有 4.3 dB 的 PSNR 增益。

下一步工作将考虑在时延敏感的非弹性流和尽力而为的弹性流同时存在的条件下, 无线资源的分配的问题, 在保证非弹性流 QoS 需求的同时最大化弹性流的吞吐量。

## 参考文献

- [1] Neely M J. Opportunistic scheduling with worst case delay guarantees in single and multi-hop networks[C]. Proceedings of the IEEE INFOCOM, Shanghai, 2011: 1728-1736.
- [2] Li R and Eryilmaz A. Scheduling for end-to-end deadline-constrained traffic with reliability requirements in multi-hop networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(5): 1649-1662.
- [3] Cui Y, Lau V K N, Wang R, et al. A survey on delay-aware resource control for wireless systems — Large deviation theory, stochastic Lyapunov drift, and distributed stochastic learning[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(3): 1677-1701.

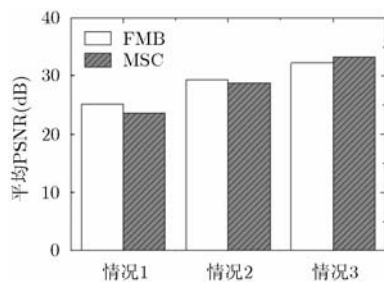


图 5 两种分组打包方式比较

- [4] Zhang Y, Qin S, and He Z. Fine-granularity transmission distortion modeling for video packet scheduling over mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2010, 12(1): 1-12.
- [5] Fu F and Van der Schaar M. Structural solutions for dynamic scheduling in wireless multimedia transmission[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(5): 727-739.
- [6] Dua A, Chan C W, Bambos N, *et al.* Channel, Deadline, and Distortion ( $CD^2$ ) aware scheduling for video streams over wireless[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 1001-1011.
- [7] Fu F and Van der Schaar M. A systematic framework for dynamically optimizing multi-user wireless video transmission[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(3): 308-320.
- [8] Pahalawatta P, Berry R, Pappas T, *et al.* Content-aware resource allocation and packet scheduling for video transmission over wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(4): 749-759.
- [9] He Z and Xiong H. Transmission distortion analysis for real-time video encoding and streaming over wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2006, 16(9): 1051-1062.
- [10] Liu S and Chen C. Scalable video transmission: packet loss induced distortion modeling and estimation[C]. Proceedings of the ACM NOSSDAV, Vancouver, 2011: 111-116.
- [11] Chen C, Lin C, and Chen Y. Cross-layer packet retry limit adaptation for video transport over wireless LANs[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(11): 1448-1461.
- [12] Huang J, Subramanian V G, Agrawal R, *et al.* Downlink scheduling and resource allocation for OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(1): 288-296.
- [13] Ji X, Huang J, Chiang M, *et al.* Scheduling and resource allocation for SVC streaming over OFDM downlink systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(10): 1549-1555.
- [14] JVT. Reference Software JM 16.0 [OL]. <http://iphome.hhi.de/suehring/tml/download>. 2012. 9.
- 李志鹏: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为无线视频通信和资源分配。
- 卢汉成: 男, 1977年生, 副教授, 主要研究方向为下一代移动互联网与极端网络环境下的路由机制。
- 洪佩林: 女, 1961年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为下一代网络体系结构域网络安全。