

# 无线视频通信跨层资源分配及性能优化

张运生<sup>1,2</sup>, 姚远<sup>3</sup>, 孙世新<sup>4</sup>, 何志海<sup>5</sup>

- (1. 深圳信息职业技术学院软件学院 深圳 518172; 2. 清华大学深圳研究生院 深圳 518172;  
3. 西北工业大学电子信息学院 西安 710072; 4. 电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054;  
5. 密苏里大学哥伦比亚分校电子与计算机工程系 美国 哥伦比亚 MO 65201)

**【摘要】**提出了一种联物理-链路-应用层资源分配和性能优化方案。在资源和时延约束下,通过在物理层、链路层和应用(视频编码器)层等跨层参数自适应调整,最大化整体视频质量或尽量最小化端到端的视频失真。即在能量约束下模拟和控制视频编码的率失真行为,分析视频数据包在链路层的排队行为,研究因时延约束违反引起的包丢失对端到端视频失真的影响。通过解析和实验证明,所提出方案能够找到在延迟约束下视频编码和无线传输之间的最优能量折衷,利用链路层的延迟作为一个系统的资源,取得了显著的性能增益。

**关键词** 跨层设计; 能量最小化; 队列分析; 资源分配; 无线视频通信

中图分类号 TP37

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.01.015

## Cross-Layer Resource Allocation and Performance Optimization for Wireless Video Communication

ZHANG Yun-sheng<sup>1,2</sup>, YAO Yuan<sup>3</sup>, SUN Shi-xin<sup>4</sup> and HE Zhi-hai<sup>5</sup>

- (1. Software Engineering Dept, Shenzhen Institute of Information Technology Shenzhen 518172;  
2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University Shenzhen 518172;  
3. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072;  
4. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;  
5. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Missouri Columbia USA MO 65211)

**Abstract** In this paper, a cross-layer approach is used to maximize the overall video quality or minimize the end-to-end video distortion under the constraints of resource and delay through cross-layer adaptation of parameters in physical, link, and application (video encoder) layers. The rate-distortion behavior of video encoders under energy constraints is modeled and controlled. The video packet queuing behavior at the link layer is analyzed and the impact of packet loss due to delay bound violation on the end-to-end video distortion is studied. Analysis and experiment demonstrate that the proposed scheme allows us to find optimum energy tradeoff between video encoding and wireless transmission under delay constraints, exploit the link-layer delay as a system resource, and achieve significant performance gain.

**Key words** cross layer; energy minimization; queuing analysis; resource allocation; wireless video communication

如何通过便携式通信设备高效地编码和传送高质量的视频数据是具有挑战性的问题。本文着重解决视频编码和无线传输最佳能量分配问题,主要集中在视频压缩和无线数据传输的能量损耗,这是便携式视频通讯设备的两个主要能量需求因素。

信源编码失真  $D_s$  依赖于编码比特率  $R$  和编码功

率  $P_s$ ,  $D_s$  是  $R$  和  $P_s$  的函数,表示为  $D_s(R, P_s)$ 。对于给定  $R$ , 增加  $P_s$  将减少  $D_s$ 。另一方面,如果减少  $P_s$ , 较高的  $R$  将被需要来获取同样的编码失真,由于  $P_s$  反比例于  $R$ <sup>[1]</sup>, 这将引起物理层传输功率  $P_s$  的增加;在链路层,随着  $R$  的增加,更多的视频包被注入队列,这将引起更多的视频分组由于延迟约束违反而被丢

收稿日期: 2010-09-19; 修回日期: 2012-09-28

基金项目: 美国国家自然科学基金(DBI-0529082, DBI-0529012); 第51批博士后科学基金(2012M510453)

作者简介: 张运生(1972-), 男, 博士, 主要从事视频处理、压缩及通信、信息论及可靠通信、宽带网络性能建模分析与优化设计、高性能计算等方面的研究。

弃。因此,联合考虑物理层、链路层以及应用层的资源利用行为,编码功率应被智能地选择。

无线通信系统跨层设计的主要挑战在于系统具有若干层,每一层有很多控制参数,这些控制参数高度耦合,彼此之间的互动的表征是非常复杂的。虽然文献[2-4]提出视频通信系统的跨层设计方案,然而,大多数现有的无线多媒体系统的跨层设计集中在系统的适应性,而不是系统工作点的最优化。首先,缺乏一个有效的统计模型和分析模型诸如在端到端跨层视频失真,能够映射低层次资源利用的参数到应用层的视频服务质量(QoS),如在物理层的传输功率和链路层的传输延迟等;其次,由于缺乏这种类型的QoS映射模型,许多现有的跨层性能优化方案大多基于启发式方法。

本文结合实验室在P-R-D分析方面的工作<sup>[5]</sup>,整合功率消耗到视频编码系统的设计,在延迟约束下,研究其对整体视频服务质量的影响,结合链路层队列分析到资源分配和控制建立一个联合物理-链路-应用层性能优化方案。相对于传统的联合信源信道编码方案,本文提出的利用链路层队列缓冲区作为系统资源的提高整体服务的视频质量。

## 1 跨层性能优化问题描述

端到端失真是由信源编码失真  $D_s$  和传输失真  $D_t$  两部分组成。假定信道比特错误率很小且几乎可以忽略<sup>[6-7]</sup>,传输失真主要是由于延迟约束的违反引起的丢包。 $p_e$  是由于延迟约束违反引起的丢包概率,是输入比特率  $R$  到队列缓存区的函数,且信道服务速率为  $S(t)$ , 函数为  $p_e[R, S(t)]$ 。端到端失真的优化问题在概念上可被公式化为:

$$\begin{aligned} \min_{\{R, P_s\}} D &= D_s + D_t = D_s(R, P_s) + D_t(p_e[R, S(t)]) \\ \text{st. } P_s + C_p R &\leq P \\ R &\geq 0 \\ 0 &\leq P_s \leq P \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $C_p$  表示每个信息位传输能量成本<sup>[8]</sup>;  $P$  为便携式通信设备的总电源。可以看到,该优化问题联合应用层的P-R-D分析、链路层的队列过程和延迟约束违反行为分析,以及在物理层的传输功率控制到一个跨层性能优化框架。

为此本文需要从3个方面入手: 1) 在线P-R-D控制和实时视频编码优化; 2) 在链路层队列分析和延迟违反约束的概率函数  $p_e(R, S(t))$  的估计; 3) 传输失真模型数据包丢失对端到端的视频失真的影响特征。

## 2 P-R-D模型分析

在文献[8]的P-R-D分析工作中,引入了MPEG-4编码器一系列复杂度控制参数,研究了各参数的R-D行为并获得了P-R-D函数。该分析方法并不容易扩展到其他视频编码器如H.264编码<sup>[9]</sup>,当视频编码机制和复杂的控制方案变得更加复杂时,直接对R-D的控制参数进行分析变得非常困难。因此本文提出一种对P-R-D分析、建模和控制的操作系统,该方法可用于通用视频编码器。

### 2.1 P-R-D建模操作

P-R-D建模操作有以下3个主要步骤。

1) 将编码操作分为几个模块,如运动预测、预编码(变换和量化)、模式选择、熵编码,然后引入一系列控制参数  $\Gamma[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L]$  来控制这些模块的功率消耗,因此,编码复杂度  $C$  是这些控制参数的函数,表示为  $C(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L)$ 。在动态电压调整(dynamic voltage scaling, DVS)设计框架内,微处理器的功耗用  $P$  表示,它是一个计算复杂度  $C$  的函数,因此也是  $\Gamma$  的函数,表示为:

$$P = \Phi(C) = P(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L) \quad (2)$$

式中,  $\Phi(\cdot)$  是微处理器的功耗模型。根据测量,它可以通过下面的表达式很好地逼近:

$$P = \Phi(C) = \beta C^\gamma, \quad \gamma = 2.5 \quad (3)$$

式中,  $\beta$  是一个常数。

2) 执行视频编码器使用不同的配置控制参数的复杂性,取得相应的R-D数据,表示为  $D(R; \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L)$ 。

3) 执行功率控制参数的最佳配置,以最大化的功率约束视频质量(或最小化视频失真)。该优化问题在数学上可以描述为:

$$\begin{aligned} \min_{\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L\}} D &= D(R; \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L) \\ \text{s.t. } P(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L) &\leq P \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $P$  是视频编码可利用的功率消耗。给定R-D数据集  $\{D(R; \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_L)\}$ , 该最小化问题可通过脱机强力搜索方法解决。最佳解决方案表示为  $D(R, P)$ 。相应的最优控制参数的复杂性表示  $\{\gamma_i^*(R, P)\}$ ,  $1 \leq i \leq L$ 。

本文使用两个复杂的控制参数:绝对差的总和(SAD)估计和被跳过的宏块(MBs)。这两种编码的功率被最大编码器功率  $P_{\max}$  标准化,没有复杂的控制被应用,当复杂的控制被应用时,  $P_{\max}$  会缩减编码器的复杂性和功耗。

根据P-R-D分析结果,发现P-R-D函数有一个指

数行为, 使用下面的近似模型:

$$D(R,P) = \delta^2 2^{-\lambda R \cdot g(P)} \quad 0 \leq P \leq 1 \quad (5)$$

式中,  $\delta^2$  表示编码图片方差, 如果是运动预测的视频帧,  $\delta^2$  是运动补偿后的不同图片的方差;  $\lambda$  是 P-R-D 模型参数, 它特征化视频编码器的资源(比特和能量)利用效率。  $g(P)$  是功率消耗逆函数  $\Phi^{-1}(\cdot)$  标准化后, 使得  $g(0) = 0$  和  $g(1) = 1$ , 因此有:

$$g(P) = P^{1/\gamma} \quad (6)$$

其中, 对于 Crossbow 公司的 Stargate 微处理器  $\gamma = 2.5$ 。对于其他 DVS 功能的微处理器, 通常有典型的  $1 \leq \gamma \leq 3$  [10]。

### 2.2 P-R-D模型参数的在线估计

式(6)中的 P-R-D 模型有  $\lambda$  和  $\sigma^2$  两个主要参数。在实时视频编码中, 图片方差差异  $\sigma^2$  可直接从视频编码器获得。因此, 只需要估计 P-R-D 模型参数  $\lambda$ ,  $\lambda$  的值与视频帧运动的统计数据有强相关性。设  $[m_x(i), m_y(i)]$  是当前帧中第  $i$  个宏块的运动矢量,  $1 \leq i \leq M$ ,  $[M_x, M_y]$  是所有运动矢量的均值, 设  $\zeta$  是帧中内部帧的比例, 运动统计表示为:

$$\sigma_m^2 = \zeta 256 + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [m_x(i) - m_y(i)]^2 + [m_x(i) - m_y(i)]^2 \quad (7)$$

其中, 256 是一个经验数字, 代表了一个内部宏块 MB 平均运动的复杂性。在实验中, 运动搜索范围设置为 16 pixels。为研究运动之间  $\sigma^2$  的统计相关性和 P-R-D 模型参数  $\lambda$ , 本文在一个测试视频片段的广泛范围内操作 P-R-D 视频编码器, 这些视频片段来自于标准的 CIF (352 × 288) 视频序列。每个视频有 60 帧, 第一帧为 I-帧, 其余为 P-帧。对于每个视频段, 使用上一部分中描述的方法, 收集它的 P-R-D 数据, 并通过式(5)中的解析模型和这些数据确定  $\lambda$  的值, 并收集其运动统计  $\sigma^2$ 。

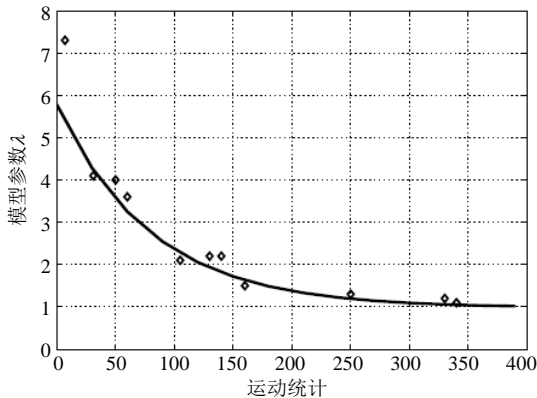


图1 运动统计  $\sigma_m^2$  与 P-R-D 模型参数  $\lambda$  的相关性

图1为 P-R-D 模型参数与它的运动统计有很高的相关性。下面的模型被用来估计  $\lambda$ :

$$\lambda = C_0 + C_1 \times 2^{C_2 \sigma_m^2} \quad (8)$$

式中,  $C_0 = 0.98$ ;  $C_1 = 4.8$ ;  $C_2 = -0.018$ 。该模型拟合结果如图1所示。这3个系数的值可以根据以前的 P-R-D 统计数字进行调整。更具体地说, 对于那些编码视频帧或片段, 知道其编码失真  $D$ , 编码比特率  $R$ , 相应的功率消耗  $P$  以及他们的运动统计  $\sigma_m^2$ 。根据这些统计数字, 可以决定  $\lambda$  的值并运用式(8)统计拟合, 更新系数  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  的值。

### 2.3 编码器复杂度控制参数在线配置

在 P-R-D 的分析过程, 运用离线测量和数值优化, 能够确定最佳编码器复杂度控制参数  $\{\gamma_i^*(R, P)\}$ 。但该方法不能适用于便携设备的实时视频编码, 因为它过于密集计算。为解决问题, 本文提出一个基于“分类-训练”的方法。具体地说, 图1显示的视频片段的 P-R-D 行为是与它们的运动统计高度相关的。这意味着, 具有相似运动统计特征的视频片段有相似的 P-R-D 行为。

在训练阶段, 将视频片段各自的运动统计  $\sigma_m^2$  分割成若干簇, 根据模拟经验, 5至7群就足够了。对于视频片段, 寻找每个群集的平均 P-R-D 函数和最佳控制参数编码器。这些最佳编码器复杂性的控制参数被存储在数据库中。在实时视频编码过程, 计算当前的视频片段的运动统计  $\sigma_m^2$ , 基于  $\sigma_m^2$  的值确定其族群, 然后使用最佳编码器的平均复杂性的集群控制参数来控制编码器。可以看到, 一旦编码器复杂度最优控制参数的数据库被建立, 在线 P-R-D 控制具有非常低的复杂性。主要的复杂性在于和计算运动统计和查找数据库。

## 3 链路层队列丢失行为在线估计

在实践中, 可从链路层队列缓冲区在线统计。在一个观测周期  $T$ , 从队列缓冲区提前  $N$  个抽样, 则  $S_n \in [0, 1]$  指示一个包是否被服务,  $Q_n$  是队列的长度(不包括正在服务的包的比特数),  $T_n$  是残留的服务时间。定义3个平均样本:

$$\hat{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_n, \quad \hat{q} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q_n, \quad \hat{T}_s = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n \quad (9)$$

则

$$\hat{\theta} = \frac{\hat{\gamma} R}{R \hat{T}_s \hat{\gamma} + \hat{q}} \approx \frac{\hat{\gamma} R}{\hat{\gamma} / 2 + \hat{q}} \quad (10)$$

其中  $\hat{T}_s$  可以被  $1/(2R)$  近似。式(9)构成了本文信道估计算法, 可以用来近似预测 QoS 服务质量:

$$\sup \text{Prob}(W > d) \approx \hat{\gamma} e^{-\hat{\theta} d} \quad (11)$$

首先, 假设视频编码器输出比特率几乎不变。

根据本文经验,恒定的输入速度的要求可以放宽有效容量分析中的约束,可以使用平均编码比特率作为输入源速率比特率。实验结果表明,近似的估计误差  $p_e$  非常小。亦假设延迟违反约束的主要原因是队列延迟。这是因为其他视频处理和传输的延迟,如编码和解码的延迟,往往很小并接近于常数<sup>[11]</sup>。当着眼于其他方面时<sup>[12]</sup>,这样的延迟是可以根据QoS要求指定。

## 4 传输失真建模

在文献[7]研究工作中,传输失真有一个衰落的行为,就像一个脉冲传递函数的行为在一个线性时不变系统。具体地说,如果在帧  $n_0$  的传输错误引起失真  $D_i(n_0)$ ,在这部影片随后的视频段视频帧是免错误的,那么在帧  $n > n_0$ ,传输失真为:

$$D_i(n) = D_i(n_0)e^{-\alpha(n-n_0)} \quad (12)$$

式中,  $\alpha$  是一个褪色因子,与场景的活动程度有关。本文描述的场景用运动的活动水平参考比率(MRR),这是视频压缩过程用于运动预测的像素的比例。 $M(n)$ 是在帧  $(n-1)$  内的像素比例,用于对帧  $n$  进行运动预测,是视频段平均MRR值。衰减因子  $\alpha$  能被准确预测为:

$$\alpha = \frac{k_0}{M} + k_2 \quad (13)$$

在模拟中,得到  $k_0 = 0.91$  和  $k_1 = 0.86$ 。在实际的视频通信过程,可以从以往的统计数字在线更新。 $\sigma_F^2$ 表示视频段的补偿的帧差异的平均图像方差。根据传输失真模型<sup>[13]</sup>,平均传输失真给定为:

$$D_i = \frac{1}{1-e^{-\alpha}} p_e \sigma_F^2 \quad (14)$$

式中,  $p_e$  表示包/分组丢失率。该传输失真虽然使用一个完全不同的方法得到的,但却与文献[13]提出的模型有着大量的相似性。本文模型主要优势它是基于传输失真的分析模型的,其模型参数  $\alpha$  有一个明确的物理意义,可直接在编码器中进行统计。

## 5 跨层资源分配算法和性能优化

建议的跨层资源分配和优化算法工作在视频片段级。假设其中一个有效的场景变换检测算法已在便携式视频设备上实施。跨层资源分配过程中的主要步骤为:

1) P-R-D模型参数估计。从当前视频片段收集定义在式(7)中的平均统计  $\sigma_m^2$ 。使用式(8)估计的P-R-D模型参数  $\lambda$ 。如果当前视频片段没有任何帧被编码,

可以使用以前片段的  $\lambda$  值或一些经验值,因为它的值将使用当前段的统计数字更新。

2) 使用链路层队列分析估计丢包/分组率。收集的样本统计  $S_n$ 、 $Q_n$  和  $T_n$ ,根据式(9)发现其平均值。使用式(10)比较  $\tilde{\theta}$ ,然后估计因延迟约束违反式(11)导致的丢包/分组概率  $p_e$ 。

3) 估计平均传输失真。从目前的视频部分的编码视频帧,找到运动补偿后的平均图片方差  $\sigma_F^2$  差异。收集MRR统计,即该方案是用于预测的参考帧,并计算平均MRR。使用式(13),估计出衰减因子  $\alpha$ ,然后,由式(11)估计在数据包/分组丢失率  $p_e$  的平均传输失真。

4) 最小化端到端的失真。使用梯度搜索<sup>[12]</sup>解决式(1)中的端到端的失真最小化问题,即式(1)可写为  $P_s = P - C_p R$ ,当能量恒定时达到最小值。可以在目标函数的表达式取代  $P_s$ ,该最小化过程将确定最佳的视频编码比特率  $R$  和功率消费级别  $P_s$ 。

5) 视频编码器控制。利用前面所讨论的方法,配置视频编码器的复杂度控制参数以达到目标的功耗水平  $P_s$ 。实验中MPEG-4编码器使用内置的线性速率控制来控制量化步长,以获得目标比特率  $R$ 。

建议的跨层资源分配和性能优化算法的计算复杂度相对较低。主要复杂度在于收集统计数据,如运动统计  $\sigma_m^2$  方差信息  $\sigma_F^2$ 。根据经验,这5个步骤能使端到端失真最小化,式(1)中的目标函数经常有一个相对简单的行为,即单一的全局最低。这点可以从图7和图8看到,因此,在发现最小的端到端的视频失真过程,梯度搜索往往是非常有效的方法。

## 6 实验结果

### 6.1 仿真设置

实验使用基线MPEG-4视频编码器。测试序列为CIF(352×288),每秒15帧的大小。每60个编码的P-帧编码一个I-帧。使用两个复杂的控制参数SAD的数量(绝对差的总和)计算跳过的宏块数量来控制视频编码器计算复杂度。运动估计搜索范围设置为[-32,32]。线性率控制算法用于速度控制。使用由式(4)描述的Intel PAX255 XScale微处理器的功耗模型来转换编码器的复杂度(即处理器周期数)为功耗将功耗。此外,使用杰克信道模拟器模拟时变无线频道<sup>[13]</sup>。压缩的比特流被分割为512 byte的数据包。通过模拟跟踪每个视频数据包进入缓冲时间,如果一个数据包延迟大于延迟的约束将被视为丢失。对

于这些丢失的数据包, 相应的图像区域的修复是复制前一帧中相同位置的像素。这种模拟的执行与编码比特率、能量分配和延迟约束是具有不同的配置。对于每个配置, 队列和传输过程被模拟用25个无线衰落信道实现。

### 6.2 在时延约束下优化编码比特率

比较所提出的联合链路层和应用层速率自适应方案与传统的没有自适应联合的方案的性能。

在传统的方案中, 编码器自己决定编码的比特率而不考虑链路层的排队行为, 根据延迟约束的要求并调整其编码的比特率。图2为端到端的失真对于帧率15的Foreman CIF视频以不同的比特率和延迟边界。

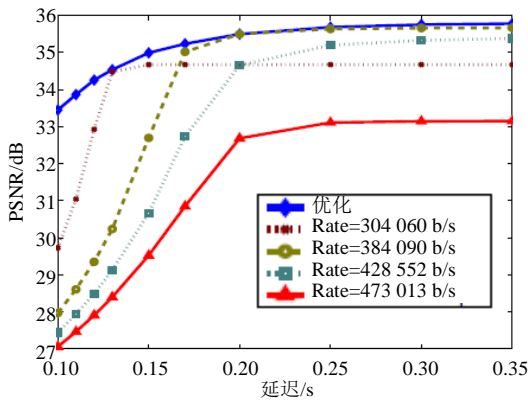


图2 “Foreman” CIF (帧率15)在不同延迟下端到端的视频质量

图3为Coastguard CIF(帧率15)序列的结果。可以看出, 本文方案获得了显著的性能增益, 特别是在较小延迟的边界约束下。

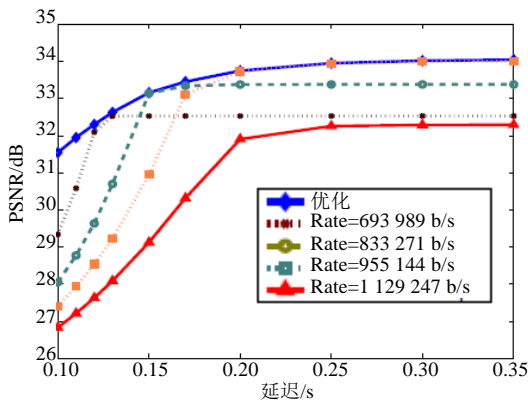


图3 “Coastguard” CIF(帧率15)在不同延迟下端到端的视频质量

### 6.3 给定的延迟边界下的比特和能量资源分配

测试序列是有广泛场景活动范围的标准视频。通过对影片进行测试以确定最佳的编码比特率和编码器的功耗级别。每比特传输能量代价设置为

90 nJ/bit<sup>[14]</sup>。

图4和图5为在不同延迟和功率条件下通过算法获得的端到端的失真。可以看出, 随着时延边界的增加, 或用于视频编码和无线传输支持的总功率的增加, 端到端的失真减小。

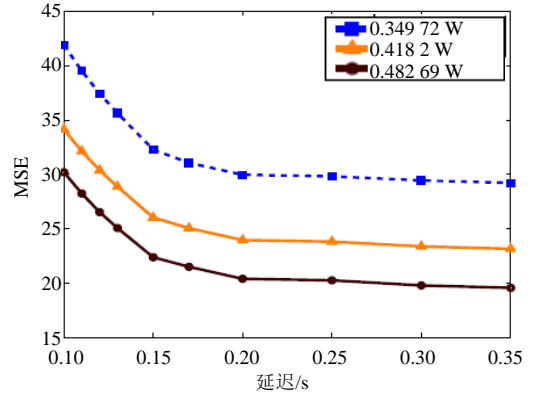


图4 “Foreman” CIF (帧率15) 在不同延迟和功率约束下的最小端到端失真

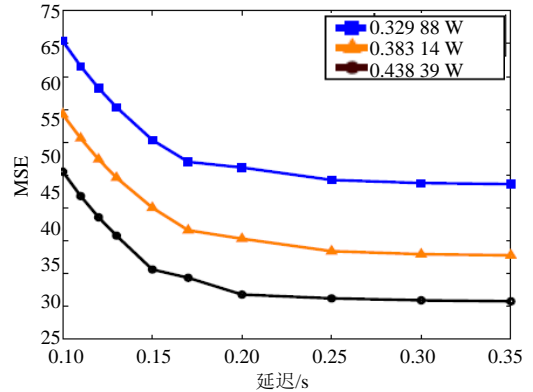


图5 “Football” CIF (帧率15) 在不同延迟和功率约束下的最小端到端失真

接下来实验评估建议跨层资源分配算法的节能性能。传统的控制算法没有P-R-D控制和跨层能量资源分配。

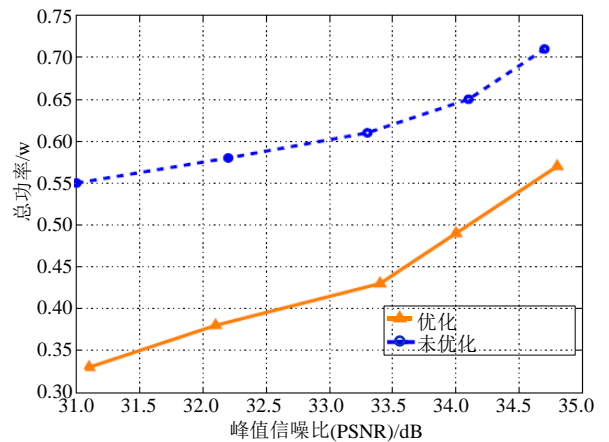


图6 “Foreman” CIF (帧率15), 延迟0.15 s通过建议的跨层性能优化所获得的能量节省

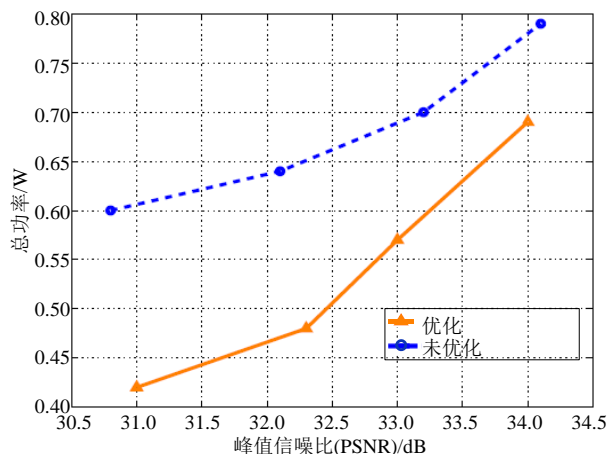


图7 “Football” CIF (帧率15), 延迟0.20 s时, 通过建议的跨层性能优化所获得的能量节省

图6和图7分别显示了在不同视频质量水平下的能量总消耗(视频编码和无线传输总功率消耗), 以0.15 s的延迟约束。在较高质量等级节约能量变得少一些。同时可以看出, 所提出的跨层资源分配可以减少40%的整体功耗。这是通过建议跨层资源分配实现的节能, 通过建议的方案联合编码器和链路层速率自适应, 找到了视频编码和无线传输的最佳折中。

## 7 结论

本文研究了便携式视频设备的无线视频通信中各种资源约束, 包括带宽, 能量和延迟等下的优化问题。根据对P-R-D分析、有效容量和传输失真模型等工作, 提出了数学模型来描述在物理、链路层和应用层的无线视频通信系统资源利用率的行为。开发了一个在线估计实际视频编码和通信过程中这些模型中的参数。在此基础上, 研究如何将资源分配以最大限度地提高智能视频质量和分析资源约束条件下的无线视频通信系统的性能极限。实验结果表明, 本文所提方案能找到视频编码和无线传输能量的最佳折衷, 能为无线视频通信系统提供重要的跨层资源分配和性能优化思路。

### 参考文献

[1] BHARDWAJ M, CHANDRAKASAN A P. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments[C]//Proc IEEE Infocom. [S.l.]: IEEE, 2002.

- [2] LIN X, SHROFF N B, SRIKANT R. A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(8): 1452-1463.
- [3] SRIVASTAVA V, MOTANI M. Cross-layer design: a survey and the road ahead[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(12): 112-119.
- [4] van der SCHAAR M, SHANKAR N S. Cross-layer wireless multimedia transmission: challenges, principles, and new paradigms[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(4): 50-58.
- [5] HE Z, LIANG Y, CHEN L, et al. Power-rate-distortion analysis for wireless video communication under energy constraint [J]. IEEE Trans. Circuits and System for Video Technology, 2005, 15(5): 645-658.
- [6] WU D. Providing quality-of-service guarantees in wireless networks[M]. Pittsburgh, PA: Department of Electrical & Computer Engineering, Carnegie Mellon University, 2003.
- [7] ZHANG F, TODD T C, ZHAO D, et al. Power saving access points for IEEE 802-11 wireless network infrastructure[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(2): 144-156.
- [8] BHARDWAJ M, CHANDRAKASAN A P. Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments[C]//Proc IEEE Infocom. [S.l.]: IEEE, 2002.
- [9] WIEGAND T. Text of committee draft of joint video specification (ITU-T Rec. H.264-ISO/IEC 14496-10 AVC) [S]. Fairfax, Virginia, USA: Document JVTC167, 3rd JVT Meeting, 2002.
- [10] BURD T, BRODERSON R. Processor design for portable systems[J]. Journal of VLSI Signal Processing, 1996, 13(2): 203-222.
- [11] HSU C Y, ORTEGA A, REIBMAN A R. Joint selection of source and channel rate for VBR video transmission under ATM policing constraints[J]. IEEE Journal on Sel Areas in Communications, Special Issue on Real-Time Video Services in Multimedia Networks, 1997, 15(6): 1016-1028.
- [12] BAZARAA M S, SHERALI H D, SHETTY C M. Nonlinear programming: theory and algorithms[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [13] JAKES W C. Microwave Mobile Communications[M]. New Jersey: IEEE Press, 1993.
- [14] POLLIN S, MANGHARAM R, BOUGARD B, et al. MEERA: cross-layer methodology for energy efficient resource allocation in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(2): 617-628.