

文章编号 1004-924X(2011)09-2170-07

可伸缩视频编码中基于部分解码的率失真优化

黄爱爱, 陈耀武*

(浙江大学 数字技术及仪器研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:在可伸缩视频编码系统中,原始码流经过裁剪可以提取出多个子码流。为了联合优化原始码流和子码流的编码质量,提出了基于部分解码的率失真优化算法。首先,在增强层的率失真计算中,通过对离散余弦变换(DCT)系数进行有选择截断来估计子码流对编码的影响,并建立误差扩散失真图对部分解码引起的误差扩散进行预测。在基本层的率失真计算中,针对编码层之间在模式选择上的限制,使用多层联合编码方法来计算率失真代价。为了降低算法引入的计算量,对部分解码条件下的重建过程和基本层模式选择进行复杂度优化。最后,对参数选择进行了讨论,利用每个宏块的误差扩散敏感度来动态估计算法参数。实验结果表明,本方法能使子码流的峰值信噪比提高0.03~0.53 dB,可以满足可伸缩编码系统对编码效率和码率提取点的要求。

关键词:可伸缩视频编码;率失真优化;部分解码;漂移误差

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2170

Rate distortion optimization based on partial decoding for scalable video coding

HUANG Ai-ai, CHEN Yao-wu*

(*Institute of Advanced Digital Technology and Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

* *Corresponding author, E-mail: cyw@mail.bme.zju.edu.cn*

Abstract: In scalable video coding, the original bit-stream can be cropped and generate multiple sub-bit-streams. In order to optimize coding efficiency of both the original bit-stream and the sub-bit-streams, partial decoding based on a Rate Distortion Optimization (RDO) algorithm is proposed. In the enhancement layer's RDO process, the influence of sub-bit-streams on coding efficiency is predicted by selectively truncating Discrete Cosine Transform (DCT) coefficients. The propagation distortion map is then used to estimate the drift error. In the base layer's RDO process, the multi-layer coding method is employed to cope with the constraint between the layers' mode choice. In order to reduce the computational complexity of the algorithm, both the partially decoded reconstruction process and the base layer's mode decision are optimized. Finally, the configuration of parameters is discussed and chosen adaptively based on the error propagation sensitivity on a macroblock basis. From experimental results, the proposed algorithm improves the sub-bit-streams' Peak Signal to Noise Ratio(PSNR) by 0.03-0.53 dB. For the scalable video system, the proposal can meet the needs of

收稿日期:2010-11-16;修订日期:2011-02-15.

基金项目:浙江省重大科技攻关项目(No. 2006C11200;No. 2009C11035)

high coding efficiency and flexible sub-bit-rate extraction.

Key words: scalable video coding; rate distortion optimization; partially decoding; drift error

1 引言

随着网络技术和多媒体技术的迅猛发展,多媒体应用也越来越广泛。多媒体应用环境中存在着异构网络、处理能力不一的终端设备以及各种用户偏好,如何同时满足这些需求,是多媒体应用的困难和挑战。可伸缩视频编码(scalable video coding)^[1],作为 H. 264/AVC 的可伸缩扩展,经过一次编码即可产生分辨率、帧率、质量可调节的码流,是解决上述难题的有力工具,目前其在多媒体应用领域受到越来越广泛的重视。

由于传输带宽的限制,原始图像需要经过压缩才能传送,但压缩造成的图像失真会导致视频质量下降。传统单层编码系统(如 H. 264/AVC)多采用基于拉格朗日乘子的经典率失真优化算法^[2]在带宽和失真之间取得较好的平衡,可伸缩视频编码也沿用了该方法。然而,与传统单层编码相比较,可伸缩视频编码产生的原始码流具有可伸缩能力,通过裁剪(如丢弃某一部分码流)可以得到不同目标码率下的子码流。由此,在可伸缩视频编码环境下,需要进行率失真优化的不仅是原始码流,还包括子码流。

为了优化原始码流和子码流的编码质量,通常采取的策略是:在编码阶段只考虑原始码流的率失真,在码流提取阶段再优化子码流的率失真。例如, Amonou 等人^[3]认为处于不同编码帧位置上的增强层其重要性也不同,采用 Quality Layer 来表征其重要程度,在码流提取时按照 Quality Layer 的顺序来提取; Sun 等人^[4]和 Maani 等人^[5]则分别通过建立率失真模型来优化子码流的提取。然而,单纯依赖码流提取算法来优化子码流在使用方面缺乏灵活性,对于没有使用优化算法的视频服务器或解码器,其子码流的视频质量就不能得到保证。另外,这些优化算法由于需要多次解码重建等操作也增加了视频服务器或解码器的计算负荷。另一方面,考虑到目标码率的不同,原始码流和子码流在率失真选择上存在差异,所以可以在编码阶段对原始码流和子码流进行联

合率失真优化,使视频服务器或解码器可以更加灵活地提取码流。

本文提出了一种新颖的基于部分解码的率失真优化算法,通过有选择地截断离散余弦变换(DCT)系数来估计子码流对编码的影响,利用误差扩散失真图来预测部分解码引起的误差扩散。为了降低计算复杂度,对部分解码条件下的重建过程和基本层模式选择进行了优化。最后,利用宏块对部分解码所引起的失真的敏感度来自适应选择算法参数。

在可伸缩视频编码系统中,存在空间、时间和质量三种可伸缩能力。由于空间可伸缩和时间可伸缩是以编码层为单位进行粗粒度调节(或提取),在编码阶段已经对每个编码层进行了率失真优化;而质量可伸缩支持中等粒度调节,所以本文以质量可伸缩编码为例进行讨论。

2 质量可伸缩编码

在质量可伸缩编码中,基本层使用较大的量化步长进行编码,其视频质量也较低,而增强层通过使用更小的量化步长对基本层残差进行再编码,可以得到更好的视频质量。在视频服务器端或解码端,为了保证正确解码,基本层码流必须全部接收,而增强层码流可以根据网络状态或终端处理能力动态接收,如图 1 所示,虚线部分就是丢弃的码流。由图可知,每个增强层对应于不同位置上的 DCT 变换系数,其中直流分量与其他宏

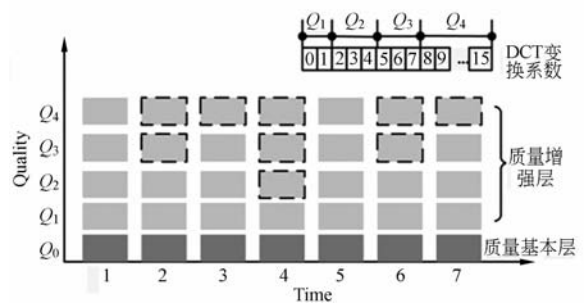


图 1 码流结构示意图

Fig. 1 Bit-stream structure of quality scalable coding

块编码信息(如运动矢量、宏块划分类型等)须出现在第一个增强层中。从编码帧来看,由增强层丢弃引起的 DCT 变换系数截断并不会影响解码重建过程,随着保留的 DCT 变换系数个数的增加,重建得到的视频质量也变好。

3 基于部分解码的率失真优化算法

3.1 系统框架

图 2 所示是增强层编码系统框架。在原有编码系统上,通过计算基于部分解码的率失真代价来选择宏块最佳模式,同时,为了预测部分解码引起的误差扩散情况,保存图像的误差扩散失真,供后续编码帧使用。由图可知,通过部分解码可以仿真子码流的编/解码情况,从而达到优化子码流编码效果的目的,而且该过程仅用于宏块模式选择,不影响编码系统的重建环路。

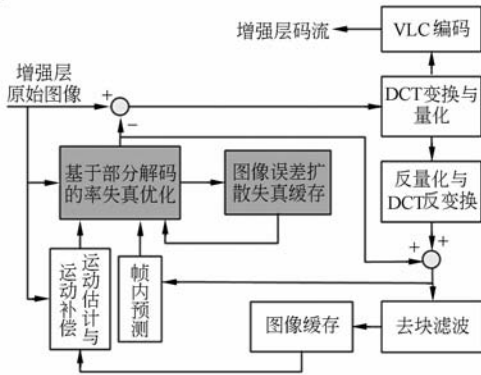


图 2 增强层编码系统框架

Fig. 2 Encoder structure of enhancement layer

在以往文献中,部分解码可以是只解析了部分码流^[6],如宏块头部信息,也可以是只进行了部分重建操作^[7],如反量化和 DCT 反变换。在本文中,部分解码是指对 DCT 变换系数进行有选择地截断,而不影响其解码重建流程。

3.2 基于部分解码的率失真优化

为了对部分解码程度进行定量描述,本文将增强层上未截断(或保留)的 DCT 变换系数个数记为系数平面。若保留下来的 DCT 变换系数个数为 ρ ,那么系数平面 ρ 满足: $\rho \in \mathbf{N}$ (非负整数)且 $0 \leq \rho \leq 16$ 。可知,当 $\rho = 16$ 时,增强层码流全部保留;当 $\rho = 0$ 时,增强层码流全部丢弃;当 $0 < \rho < 16$ 时,增强层码流部分保留。

与经典率失真优化方法^[2]类似,基于部分解

码的率失真优化也需要通过计算候选模式的率失真代价来选择宏块最佳模式,即在系数平面 ρ 上,

$$m_{\rho}^* = \arg \min_{m \in \Omega} J_{\rho}(m), \quad (1)$$

$$J_{\rho}(m) = D_{\rho}(m) + \lambda \times R_{\rho}(m), \quad (2)$$

式中: m_{ρ}^* 是系数平面 ρ 上的宏块最佳模式, Ω 是候选模式集合, $J_{\rho}(m)$ 是候选模式 m 在系数平面 ρ 上的率失真代价, $D_{\rho}(m)$ 是候选模式 m 在系数平面 ρ 上的宏块失真值, $R_{\rho}(m)$ 是候选模式 m 在系数平面 ρ 上的编码比特数, λ 是拉格朗日乘子。可见,当 $\rho = 16$ 时,等价于经典率失真算法。

在可伸缩视频编码中,增强层可以利用基本层的已有编码信息来进行预测,如基本层对应宏块的运动矢量、宏块划分类型、宏块残差系数等信息。由于这些层间预测编码工具的使用,使得增强层宏块的模式选择受到基本层宏块模式的约束,如增强层宏块的 IntraBL 模式只有当基本层宏块是 intra 编码的情况下才可以作为候选模式,而使用层间预测编码的 inter 模式也同样要求其基本层宏块是 inter 编码。为此,本文在基本层编码时使用多层联合编码方法^[8],通过计算基本层宏块和增强层宏块的加权率失真代价来选择最佳模式。基本层宏块的加权率失真代价定义为:

$$J_0(m_0) = (1 - \omega) * (D_0(m_0) + \lambda_0 * R_0(m_0) + \omega * (D_{1,\rho}(m_1 | m_0) + \lambda_{1,\rho} * R_{1,\rho}(m_1 | m_0))), \quad (3)$$

式中:下标 0 和 1 分别表示基本层和增强层, ω 是权值,取值范围为 $[0, 1]$ 。其中,增强层宏块的宏块失真和编码比特计算也均是在系数平面 ρ 上得到。

3.3 宏块失真计算

在系数平面 ρ 上,根据失真来源,宏块失真可以分为 3 种:

(1) 量化过程引起的失真,记为量化失真。通常计算原始宏块和重建宏块的误差得到,如绝对平方和(SSE)、绝对差值和(SAD)等;

(2) DCT 变换系数部分解析得到的重建宏块和 DCT 变换系数全部解析得到的重建宏块之间的失真,记为系数截断失真;

(3) 使用了 DCT 变换系数部分解析得到的重建宏块作为参考而引起的失真,记为漂移失真。

所以,系数平面 ρ 上的宏块失真定义为:

$$D_{\rho}(m) = D_s(m) + D_{\text{drift_ref}}(m) + D_{\text{drift_trunc}}(m), \quad (4)$$

式中: D_s 是宏块量化失真, $D_{\text{drift_trunc}}$ 是宏块系数截

断失真, $D_{\text{drift_ref}}$ 是宏块漂移失真。对于 intra 类型, 由于不使用帧间预测, 所以其宏块失真可简化为:

$$D_{\rho}(m) = D_s(m) + D_{\text{drift_trunc}}(m). \quad (5)$$

由于部分解码引起的失真会随着时域上帧间预测扩散至后续编码帧, 所以需要对误差扩散进行预测, 以 4×4 块为单位, 建立误差扩散失真图, 其中, 误差扩散失真定义为:

$$D_{\text{drift_prop}}(k, m) = D_{\text{drift_ref}}(k, m) + D_{\text{drift_trunc}}(k, m), \quad (6)$$

式中: k 是 4×4 块在宏块中的位置。由于宏块漂移失真是由参考帧上的误差扩散引起, 所以可以根据参考帧上的误差扩散失真图来计算宏块漂移失真。采用文献[9]中应用于丢包环境下的漂移失真计算方法, 以 4×4 块为例:

$$D_{\text{drift_ref}}(m) = \sum_{k=1}^K D_{\text{drift_ref}}(k, m) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^4 \mu_l \times D_{\text{drift_prop}}(k_l, m_l), \quad (7)$$

式中: K 是宏块中 4×4 块个数, μ_l 是权值, 与参考块覆盖面积成正比(如图3所示)。

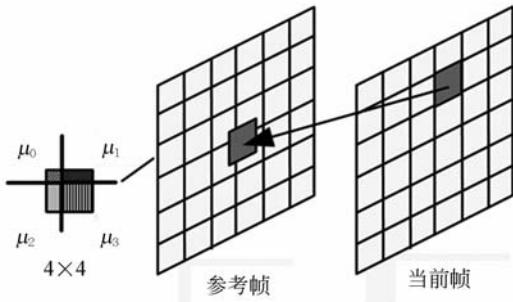


图3 漂移失真计算

Fig. 3 Calculation of drift distortion

3.4 算法复杂度优化

与经典率失真优化相比, 基于部分解码的率失真优化需要额外的计算资源: (1) 部分解码时的重建过程; (2) 嵌套在基本层编码中的增强层模式选择过程。由于这些是编码系统中最消耗资源的部分^[10], 所以本文分别对这两方面进行优化, 降低算法引入的计算复杂度。

首先, 由图2可知, 基于部分解码的运算过程仅限于率失真计算模块, 在编码系统的重建环路中仍然使用的是传统方法。结合上一节内容, 可知, 部分解码时的重建结果主要用来计算系数截

断失真($D_{\text{drift_trunc}}$), 根据文献[11], 宏块失真计算可以通过像素域上的残差数据计算得到。所以, 可以省去部分解码的重建过程, $D_{\text{drift_trunc}}$ 计算可简化为:

$$D_{\text{drift_trunc}} \| \mathbf{C} - \mathbf{C}_{\rho} \|_{\text{F}}^2 = \| (\mathbf{P} + \mathbf{R}) - (\mathbf{P} + \mathbf{R}_{\rho}) \|_{\text{F}}^2 = \| \mathbf{R} - \mathbf{R}_{\rho} \|_{\text{F}}^2, \quad (8)$$

式中: \mathbf{C} 、 \mathbf{P} 、 \mathbf{R} 分别是重建宏块、预测宏块、残差宏块, $\| \cdot \|_{\text{F}}$ 是 Frobenius 范数, 下标 ρ 表示系数平面 ρ 上的情况。

其次, 对于基本层上的多层联合编码, 不需要对基本层上的所有候选模式都用式(3)进行计算, 可以先使用经典率失真优化方法分别得到 intra 和 inter 类型中具有较小率失真代价的模式, 再利用式(3)对这两种模式重新进行计算并选出最佳模式。

另外, 利用基本层和增强层在模式选择上的相关性^[12], 可以减少增强层上参与计算的候选模式个数。统计发现, 如果基本层宏块是 inter 编码, 增强层宏块很有可能是 blskip 模式; 如果基本层宏块是 intra 编码, 增强层宏块选择 intraBL 的机率就很高。结合以上分析, 式(3)可以简化为:

基本层宏块 intra 编码时:

$$J_0(m_0) = (1 - \omega) * (D_0(m_0) + \lambda_0 * R_0(m_0)) + \omega * (D_{1,\rho}(\text{intraBL} + m_0) + \lambda_1 * R_{1,\rho}(\text{intraBL} | m_0)), \quad (9)$$

基本层宏块 inter 编码时:

$$J_0(m_0) = (1 - \omega) * (D_0(m_0) + \lambda_0 * R_0(m_0)) + \omega * (D_{1,\rho}(\text{blskip} | m_0) + \lambda_1 * R_{1,\rho}(\text{blskip} | m_0)). \quad (10)$$

3.5 参数选择讨论

由前面分析可知, 系数平面 ρ 的取值决定了部分解码的程度, 而权值 ω 则指示了增强层编码在基本层编码占的比重。图4所示是 Football 序列在 $\rho=14$, ω 不同取值下的率失真性能比较。从曲线中部来看, 在相同系数平面 ρ 下, 较大的权值 ω 得到的编码质量更好; 从曲线两端来看, 较大的权值 ω 在相近编码质量下产生的码率会偏高, 从而降低了编码效率。

为了平衡码率可提取范围内的编码效果, 需

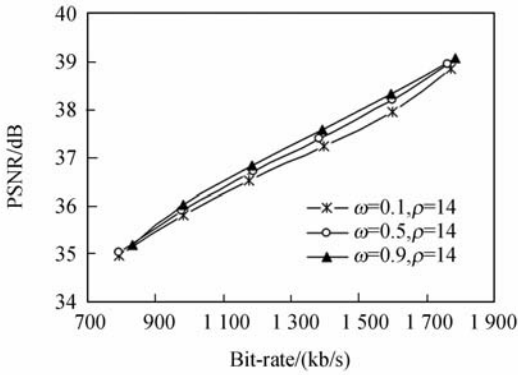


图 4 Football 序列在不同 ω 参数下的率失真性能比较
Fig. 4 Comparison of rate-distortion performance with different ω on Football

要对子码流(如图中曲线中段)和原始码流(如曲线两端)在编码过程中的权重进行动态调整。考虑到子码流编码和误差扩散之间的关系,本文通过误差扩散敏感度来自适应选择参数:对误差扩散敏感区域,增加子码流的权重,如使用较小的 ρ 和(或)较大的 ω ;对误差扩散不敏感区域,则增加原始码流的权重,如使用较大的 ρ 和(或)较小的 ω 。误差扩散敏感度(ξ)定义为:

$$\xi = \frac{(D_{\text{drift_ref}} + D_{\text{drift_trunc}})}{D_s}, \quad (11)$$

由于在宏块编码前参数就需要设定,所以使用参考帧上的数据来计算该值。参数设置与误差扩散敏感度的关系如下:

$$\begin{cases} \omega = \omega_h, \rho = \rho_l, & \text{if } \xi > 0.8 \times \bar{\xi} \\ \omega = \omega_l, \rho = \rho_h, & \text{if } \xi < 0.3 \times \bar{\xi} \\ \omega = \omega_m, \rho = \rho_m, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $\bar{\xi}$ 是参考帧上 ξ 平均值, ω_l 、 ω_m 、 ω_h 、 ρ_l 、 ρ_m 、 ρ_h 均是常量,且满足 $0 \leq \omega_l < \omega_m < \omega_h \leq 1$, $0 \leq \rho_l < \rho_m < \rho_h \leq 16$,其初始值分别为 0.5 和 8。

4 实验结果与分析

为了测试本文所提出方法的有效性,利用可伸缩视频编码标准参考模型 JSVM9.18^[13] 为平台进行实验。测试条件为:(1)测试序列为 CIF 大小,帧率为 15 frame/s,序列长度为 150 frame (Football 序列为 130 frame);(2)使能 MGS 编码,MGS 矢量设置为 (3,3,3,3,4);(3)量化参数(QP)设置为 $(QP_B, QP_E) = (30, 20)$,搜索范围为 32,参考帧个数为 1,GOP 大小为 8,使用可分级

P 帧结构;(4)使用文献[3]的 Quality Layer 方法来提取对应码率条件下的子码流。为了抑制误差扩散,I 帧间隔设为 16,而本文方法由于已经考虑了该情况,只需要设置第一帧是 I 帧编码。

实验中,本文方法所使用的参数分别设置为: $\omega_l = 0.3$, $\omega_m = 0.5$, $\omega_h = 0.7$, $\rho_l = 4$, $\rho_m = 8$, $\rho_h = 12$ 。参考算法为 JSVM9.18 中使用的经典率失真优化方法。在测试过程中,对编码得到的原始码流按照设定码率进行提取,然后计算并对比解码 PSNR 值。表 1、表 2 和表 3 所示分别是 Crew 序列、Football 序列和 Foreman 序列的测试结果,图 5 是 Football 序列的率失真性能曲线。由测试结果可知,由于本文方法在编码阶段就考虑了子码流的影响,所以在不同测试码率下,编码效果都有不同幅度的提高,部分场景下提高幅度可达 0.5 dB。

表 1 Crew 序列测试结果

Tab. 1 Test results for Crew sequence (dB)

测试码率(kb/s)	对比方法	
	参考方法	本文方法
768	36.61	36.83
896	37.02	37.22
1 024	37.41	37.6
1 280	38.21	38.44
1 536	39.13	39.45

表 2 Football 序列测试结果

Tab. 2 Test results for Football sequence (dB)

测试码率(kb/s)	对比方法	
	参考方法	本文方法
1 024	35.7	35.88
1 280	36.45	36.8
1 536	37.29	37.67
1 792	38.05	38.58
2 048	38.93	39.43

表 3 Foreman 序列测试结果

Tab. 3 Test results for Foreman sequence (dB)

测试码率(kb/s)	对比方法	
	参考方法	本文方法
384	36.11	36.14
448	36.33	36.45
512	36.54	36.67
768	37.36	37.54
1024	38.86	39.01

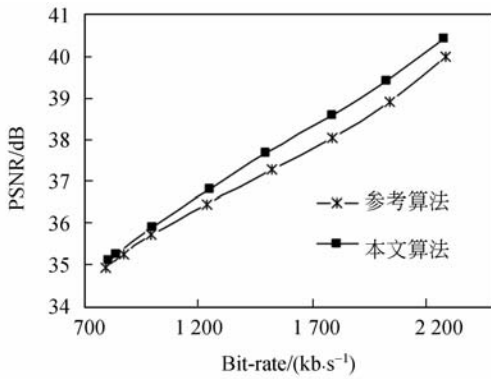


图5 Football序列率失真曲线

Fig. 5 R-D performance of Football sequence

5 结论

本文提出了一种新颖的基于部分解码的率失

真优化算法,在经典率失真优化算法基础上,通过有选择地截断 DCT 变换系数来估计子码流对编码的影响,通过建立误差扩散失真图对部分解码引起的误差扩散进行预测,然后,根据宏块的误差扩散敏感度来动态选择参数,使编码结果更符合多个码率提取点上的实际情况。本文同时对基于部分解码的重建过程和基本层模式选择进行了优化,大大降低了算法引入的计算复杂度。实验结果表明:本文所提出的基于部分解码的率失真优化方法比传统方法具有更好的视频质量,根据场景不同提高幅度可达 0.03~0.53 dB,可以满足可伸缩编码系统在码率可提取范围内达到高编码质量的要求。

参考文献:

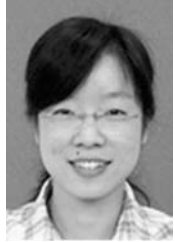
- [1] SCHWARZ H, MARPE D, WIEGAND T. Overview of the scalable video coding extension of the H.264/AVC standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(9):1103-1120.
- [2] SULLIVAN G J, WIEGAND T. Rate-distortion optimization for video compression [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1998, 15(6):74-90.
- [3] AMONOU I, CAMMAS N, KERVADEC S, et al.. Optimized rate-distortion extraction with quality layers in the scalable extension of H.264/AVC [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(9):1186-1193.
- [4] SUN J, GAO W, ZHAO D, et al.. On rate-distortion modeling and extraction of H.264/SVC fine-granular scalable video [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(3):323-336.
- [5] MAANI E, KATSAGGELOS A K. Optimized bit extraction using distortion modeling in the scalable extension of H.264/AVC [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(9):2022-2029.
- [6] JIANG J, FANG H, YANG S Y. Low-cost and fast partial decoding of compressed videos [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(2):334-340.
- [7] CHANG H S, KANG K. A compressed domain scheme for classifying block edge patterns [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(2):145-151.
- [8] SCHWARZ H, WIEGAND T. R-D optimized multi-layer encoder control for SVC [C]. *Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP)*, San Antonio, 2007:II281-II284.
- [9] GUO Y, CHEN Y, WANG Y K, et al.. Error resilient coding and error concealment in scalable video coding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(6):781-795.
- [10] 祝世平, 申晓东. 十字交叉六边形块运动的估计搜索 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12):3069-3076.
ZHU SH P, SHEN X D. Cross-hexagon search algorithm for fast block-matching motion estimation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):3069-3076. (in Chinese)
- [11] PO L M, GUO K. Transform-domain fast sum of the squared difference computation for H.264/AVC rate-distortion optimization [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, 17(6):765-773.
- [12] LI H, LI Z G, WEN C. Fast mode decision algorithm for inter-frame coding in fully scalable video coding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and*

Systems for Video Technology, 2006, 16 (7): 889-895.

(JSVM 9.18) and manual, CVS sever at garcon.ient.rwth-aachen.de, Jun. 2009.

[13] Joint Video Team, H.264/SVC reference software

作者简介:



黄爱爱(1982—),女,浙江宁波人,博士研究生,2004年于浙江大学获得学士学位,主要从事视频编码及图像分析与处理方面的研究。E-mail: huangai@zju.edu.cn



陈耀武(1963—),男,辽宁铁岭人,博士,教授,博士生导师,1985年、1988年、1998年于浙江大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事图像信号处理、嵌入式系统和网络多媒体等方面的研究。E-mail: cyw@mail.bme.zju.edu.cn

●下期预告

低功率水工质脉冲等离子体推进器的工作特性

朱平^{1,2},侯丽雅¹,章维一¹

(1.南京理工大学机械工程学院,江苏南京210094;

2.中北大学电子测试技术国家重点实验室,山西太原030051)

为了解决 Teflon 脉冲等离子体推进器存在的性能低、有污染等问题,设计了以水为工质的脉冲等离子体推进器系统,并对主要工作特性指标的能量阈值进行了研究。在水工质脉冲等离子体推进器系统的放电类型形成条件及原因分析的基础上,通过放电电压和电流测试实验,对工作能量阈值进行了实验研究。实验结果表明,在足够高的电场强度和足够大的触发电流下,才能产生保证稳定工作触发概率的初始等离子体,得到与稳定运行能量对应的储能电容值;水工质脉冲等离子体推进器的正常工作能量范围由储能决定,与储能电容的容值不相关。该结果为发展无污染、性能高、具有广适性的低功率水工质脉冲等离子体推进器技术打下了一定的基础。