

适用于不等保护的自适应视频编码方法

冯妮娜, 常义林, 李鹏, 卢朝阳

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 为了提高视频编码效率,同时便于设计有效的不等保护方法,提出一种同时考虑视频内容空间特性和时间特性的视频编码方法. 首先确定可表征宏块内容空间特性和时间特性的参数,然后确定反映宏块与空间邻近及时间邻近宏块之间相关性强弱的加权因子,最后将宏块划归到对恢复视频质量影响较大的重要 slice 组或一般 slice 组进行编码. 与不考虑视频内容特性的编码方法相比,该方法不但可以进一步提高编码效率,而且更有利于识别对恢复视频质量影响较大的宏块,以便利利用不等保护方法对这些重要宏块提供较多的保护. 实验结果表明,在编码比特率相近的条件下,该方法对恢复视频质量平均提高了 0.22 dB 和 0.46 dB,且在 slice 组具有相同大小的前提下,该方法定义的重要 slice 组对恢复视频质量平均提高了 1.52 dB 和 1.20 dB.

关键词: 视频编码;不等保护;内容特性;slice 组划分

中图分类号: TN919.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0094-06

An Adaptive Video Coding Method for Unequal Loss Protection

FENG Nina, CHANG Yilin, LI Peng, LU Zhaoyang

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A video coding method is proposed to improve the video coding efficiency and to be favorable for designing efficient unequal loss protection schemes. Both the spatial and the temporal characteristics of video content are considered in the proposed method. Two parameters that embody the spatial and the temporal characteristics of video content are determined, respectively. Then, two weighting factors to reflect the spatial correlation or temporal correlation between the macroblock and its spatial or temporal neighboring macroblocks are determined, respectively. Finally, the macroblocks in one frame are arranged into the important and unimportant slice groups. Compared with the coding method without considering the content characteristics, the proposed method can improve the coding efficiency. Additionally, the important macroblocks are accurately distinguished, and hence more protection can be provided to these macroblocks in unequal loss protection schemes. Simulations show that the proposed method can improve the quality of the decoded video on average 0.22dB and 0.46dB while consuming the similar number of encoded bits. Moreover, under the condition that the two slice groups have the same size, the important slice group marked in the proposed method improves the reconstructed video quality on average by 1.52 dB and 1.20 dB.

Keywords: video coding; unequal loss protection; content characteristics; slice grouping

收稿日期: 2011-07-27. 作者简介: 冯妮娜 (1981—),女,博士生;常义林(通信作者),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902081,60902052);高等学校学科创新引智计划资助项目(B08038);西电-中兴联合研究资助项目.

网络出版时间: 2012-02-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120225.0850.007.html>

编码视频数据在不同层上(如宏块层、slice 层或帧层等)^[1-3]对恢复视频质量的影响不同. 不等保护方法就是利用编码视频数据的这一特性,设计不同的保护策略^[1-3],对恢复视频质量影响较大的重要数据提供较多保护,而对非重要数据提供一般保护,以改善易错传输环境下的恢复视频质量.

在已有不等保护方法中,slice 层编码数据的不等重要性可通过 2 类方法实现:①使用简单 slice 结构编码的方法^[2-3],但这类方法不能充分利用宏块之间较强的空间相关性,降低了编码效率;②采用灵活宏块排序(flexible macroblock ordering, FMO)^[4-5]编码的方法,这类方法可充分利用宏块的内容特性,将对视频帧恢复质量影响较大的宏块划分到重要 slice 组进行编码,进而利用各种不等保护手段对重要 slice 组提供较多的保护,具有广泛的应用价值^[6-8]. 在这类 slice 组划分方法中,根据确定宏块对恢复视频质量影响程度所利用信息的不同,可分为利用预编码信息^[6-7]和原始图像信息^[8]两类方法. 由于编码信息需要通过预编码过程获得,因此这类方法具有较大的计算复杂度,而利用原始图像信息的方法,则主要根据表征原始图像内容特性的参数量化宏块丢失对恢复视频质量影响的相对程度,因此有较低的复杂度,具有更广泛的应用价值^[8].

然而,已有利用视频帧原始信息确定 slice 组划分的方法^[8]没有考虑场景切换及视频帧的编码类型对 slice 组划分的影响,同时在 slice 组划分时,主要利用表征宏块空间特性的梯度信息作为 slice 组划分的依据,因此本文提出一种同时考虑宏块所在视频帧编码类型、宏块空间特性和宏块时间特性的宏块到 slice 组的划分方法.

1 内容特性函数

1.1 空间特性

图像的梯度反映了图像局部区域像素值变化的幅值和方向. 梯度的幅值反映了图像像素值变化的快慢,在图像边缘处梯度幅值较大,在图像的平坦部分梯度幅值较小,梯度的方向反映了区域图像内像素变化的趋势,因此梯度图像反映了图像的空间特征及边缘信息^[9]. 基于上述对梯度与图像空间特性关系的分析,为了更好地度量宏块内像素梯度幅值的变化,本文选择宏块梯度幅值的方差作为表征宏块空间特性的参数.

在第 n 帧第 m 个宏块中,第 i 个像素点梯度的幅值为

$$G(n, m, i) = (G_H(n, m, i)^2 + G_V(n, m, i)^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中: $G_H(n, m, i)$ 表示水平方向像素值变化量; $G_V(n, m, i)$ 表示垂直方向像素值变化量. 式(1)可简化为^[10]

$$G(n, m, i) = |G_H(n, m, i)| + |G_V(n, m, i)| \quad (2)$$

根据式(2)计算出第 n 帧第 m 个宏块中每个像素点梯度的幅值后,第 m 个宏块梯度幅值的均值为

$$\bar{G}(n, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(n, m, i) \quad (3)$$

式中: N 表示宏块包含的像素个数. 第 m 个宏块梯度幅值的方差为

$$\sigma^2(n, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G(n, m, i) - \bar{G}(n, m))^2 \quad (4)$$

第 n 帧中所有宏块梯度幅值方差的平均值为

$$\sigma_{\text{avg}}^2(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sigma^2(n, m) \quad (5)$$

式中: M 表示视频帧包含的宏块个数.

1.2 时间特性

相邻视频帧原始像素值之间的差值反映了像素值在时间方向上变化的大小. 帧差值越大,表示像素值在时间方向上的变化越大,从而相邻 2 帧之间的内容差异越大;反之,帧差值越小,表示像素值在时间方向上的变化越小,从而相邻帧之间的内容差异越小. 因此,相邻视频帧中宏块对应位置像素值差值的均值可作为表征宏块内容时间特性的参数.

第 n 帧中第 m 个宏块与第 $n-1$ 帧中同位置宏块对应位置像素值的平均绝对差(MAD)为

$$D_F(n, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F(n, m, i) - F(n-1, m, i)| \quad (6)$$

式中: $F(n, m, i)$ 表示第 n 帧第 m 个宏块中第 i 个像素点的像素值; $F(n-1, m, i)$ 表示第 $n-1$ 帧第 m 个宏块中第 i 个像素点的像素值. 第 n 帧与第 $n-1$ 帧对应像素值的平均绝对差为

$$D_F(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M D_F(n, m) \quad (7)$$

2 slice 组划分方法

在不同编码类型的视频帧中,宏块可选的编码模式不同. 帧内编码帧中的宏块仅可选择帧内模式进行编码,而帧间编码帧中的宏块则可选择帧内编码模式或帧间编码模式进行编码. 当选择帧内模式

编码时,宏块仅可利用邻近宏块的信息进行空间预测编码;当选择帧间模式编码时,宏块仅可利用参考帧的信息进行时间预测编码.因此,对于帧内编码帧,在确定宏块到 slice 组划分时,利用宏块的空间特性来度量宏块对恢复视频质量的影响程度,而对于帧间编码帧,由于该视频帧中同时包含帧内编码宏块和帧间编码宏块,因此在确定宏块到 slice 组划分时,需同时考虑宏块的空间特性和时间特性,以便更准确地识别那些对恢复视频质量影响较大的宏块.下面分别给出不同编码类型视频帧中宏块到 slice 组的划分方法.

2.1 帧内编码帧中 slice 组的划分方法

第 n 帧第 m 个宏块的邻近宏块梯度幅值方差的均值为

$$\sigma_{\text{avg}}^2(n, m) = \frac{1}{U} \sum_{j=1}^U \sigma_{m,j}^2 \quad (8)$$

式中: U 表示第 m 个宏块的邻近宏块的个数; $\sigma_{m,j}^2$ 表示第 m 个宏块第 j 个邻近宏块的梯度幅值的方差.对于帧内编码帧,根据 $\sigma^2(n, m)$ 与 $\sigma_{\text{avg}}^2(n, m)$ 及 $\sigma_{\text{avg}}^2(n)$ 之间的关系,确定宏块到 slice 组的划分.若 $\sigma^2(n, m) > \sigma_{\text{avg}}^2(n, m)$ 且 $\sigma^2(n, m) > \sigma_{\text{avg}}^2(n)$,则将第 m 个宏块划分到第 1 个 slice 组进行编码;否则,将第 m 个宏块划分到第 2 个 slice 组进行编码.

为了确保划分后 2 个 slice 组包含的宏块个数相近,对上述 slice 组的划分结果作进一步调整.具体为:若 $S_1(n) > S_2(n)$,首先按梯度幅值递增的顺序对 slice 组 1 中的宏块重新排序,然后将前 $[S_1(n) - (M+1)/2]$ 个宏块划分到 slice 组 2;反之,首先按梯度幅值递减的顺序对 slice 组 2 中的宏块重新排序,然后将前 $[S_2(n) - (M+1)/2 + 1]$ 个宏块划分到 slice 组 1.其中, $S_1(n)$ 和 $S_2(n)$ 分别表示 slice 组 1 和 slice 组 2 包含的宏块个数, M 表示视频帧包含的宏块个数.

2.2 帧间编码帧中 slice 组的划分方法

在使用简单图像组结构编码时,同一图像组中视频帧的内容特性也可能会发生较大的变化,比如包含场景切换信息的视频帧和其他不包含场景切换信息的视频帧的内容特性存在较大的差异.因此,在确定宏块到 slice 组的划分准则之前,应先根据场景检测方法判断当前视频帧是否为场景切换帧.第 n 帧之前 3 帧 MAD 值的均值为

$$T_c = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 D_F(n-j) \quad (9)$$

那么,如果第 n 帧对应的 MAD 值 $D_F(n) > T_c$,则表

示第 n 帧的内容特性与前面 3 帧相比发生了较大的变化,因此该帧为场景切换帧;否则,该帧为非场景切换帧^[11].若第 n 帧为场景切换帧,则表示当前视频帧与前一视频帧的时间相关性较弱,此时仅利用表征空间特性的梯度信息作为确定宏块到 slice 组划分的依据,具体划分方法与 2.1 节中给出的帧内编码帧中 slice 组的划分方法相同.若第 n 帧为非场景切换帧,则根据宏块梯度幅值的方差和 MAD 信息作为 slice 组划分的依据.下面将详细给出非场景切换视频帧中 slice 组的划分准则.

对于非场景切换视频帧,为了度量宏块的内容特性,本文定义一个同时考虑空间特性和时间特性的内容特性函数 $T(n, m)$,该函数为表征宏块空间特性的梯度幅值方差 $\sigma^2(n, m)$ 与表征时间特性的 MAD 值 $D_F(n, m)$ 的加权和

$$T(n, m) = w_s(n, m) \sigma^2(n, m) + w_t(n, m) D_F(n, m) \quad (10)$$

式中: $w_s(n, m)$ 表示空间特性的加权因子,反映了第 m 个宏块与其邻近宏块之间空间相关性的强弱; $w_t(n, m)$ 表示时间特性的加权因子,反映了第 m 个宏块与前一帧同位置宏块之间时间相关性的强弱^[12].具体由下式确定

$$\left. \begin{aligned} \frac{w_s(n, m)}{w_t(n, m)} &= \frac{A_t(n, m)}{A_s(n, m)} \\ w_s(n, m) + w_t(n, m) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $A_s(n, m)$ 表示第 n 帧第 m 个宏块的空间活动性,其中空间活动性用第 n 帧第 m 个宏块的 4 个邻近宏块原始像素值的方差度量; $A_t(n, m)$ 表示第 n 帧第 m 个宏块的时间活动性,其中时间活动性用第 n 帧第 m 个宏块的 4 个邻近宏块与第 $(n-1)$ 帧中同位置宏块的 4 个邻近宏块原始像素值的均方差度量.本文宏块空间活动性与时间活动性的定义,与文献[13]提出的根据空间活动性和时间活动性强弱,自适应地从基于插值的空域误码掩盖方法和基于运动补偿的时域误码掩盖方法中选择时空活动性和时间活动性的定义类似.由于恢复像素值只有通过实际编码才可以获得,因此本文使用原始像素值计算这 2 个量.式(11)定义的 $w_s(n, m)$ 和 $w_t(n, m)$,分别体现了宏块与其邻近宏块之间空间相关性及前一帧同位置宏块之间时间相关性的强弱关系.若空间相关性强于时间相关性,则使用空域误码掩盖方法可获得较好的性能;否则,使用时域误码掩盖方法可获得较好的性能.梯度幅值方差或 MAD 值的大小,体现了使用空域误码掩盖方法或时域误码掩盖

方法对受损宏块进行掩盖的难易程度. 梯度方差或MAD值越大,表明该宏块越难掩盖,从而该宏块丢失对恢复视频质量影响较大. 因此,将式(11)定义的 $w_s(n,m)$ 和 $w_t(n,m)$ 作为宏块内容空间特性和时间特性的权值因子.

对于非场景切换帧间编码帧,根据式(10)计算的内容特性函数值将宏块划分到 slice 组,具体为:若 $T(n,m)>T$,则将宏块 m 划分到第1个 slice 组;否则,将宏块 m 划分到第2个 slice 组. 其中,门限值 $T = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M T(n,m)$.

采用与2.1节中调整 slice 组大小类似的方法,对划分后的 slice 组作进一步调整,使2个 slice 组包含的宏块个数相近.

综上,本文提出的内容自适应视频编码方法包括如下过程:

(1)根据使用的编码结构,确定第 n 帧的编码类型,若当前帧编码为帧内编码帧,则按2.1节给出的准则确定 slice 组的划分;

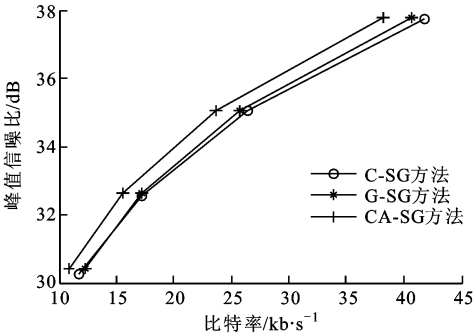
(2)若当前帧需编码为帧间编码帧,则按2.2节给出的准则确定宏块到 slice 组的映射关系.

3 仿真结果

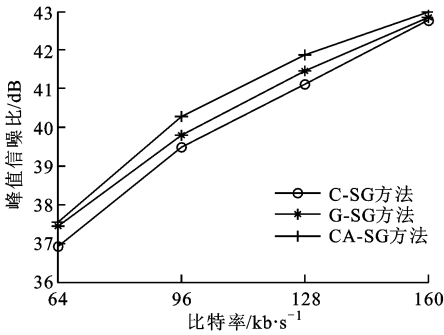
本文采用 H. 264/AVC 参考软件^[14]作为仿真实验平台,使用8个 QCIF 格式的标准视频序列 Mother& Daughter、Foreman、Carphone、Mobile、Grandma、Container、Silent 和 Salesman 进行仿真. 采用 IP...IP...I 编码结构,图像组大小为15帧,帧率为15帧/s,每个序列编码90帧. 使用28、32、36和40作为固定量化参数(quantization parameter, QP),以及使用64、96、128和160 kb/s的固定码率进行编码. 仿真中,假设帧内编码帧和 slice 组1都正确传输,只有 slice 组2受到分组丢失的影响. 使用文献[15]给出的分组丢失模式进行仿真,分组丢失率分别为3%、5%、10%和20%. 由于分组丢失的随机性,每个序列进行50次仿真,使用平均峰值信噪比来评估恢复视频质量.

基于上述仿真条件,将本文提出的内容自适应 slice 组划分(CA-SG)方法与棋盘类型 FMO(C-SG)中 slice 组划分方法和文献[8]利用梯度信息确定 slice 组划分(G-SG)方法进行比较. 在这3种 slice 组划分方法中,每个视频帧编码为2个 slice 组,其中第1个 slice 组包含50个宏块,第2个 slice 组包含49个宏块. 对于C-SG方法,由于没有考虑宏块

的内容特性,因此没有定义 $w_s(n,m)$ 和 $w_t(n,m)$;在G-SG方法中,由于主要利用了宏块的空间特性作为 slice 组划分的依据,因此 $w_s(n,m)=1, w_t(n,m)=0$;在本文提出的CA-SG方法中,由于 $w_s(n,m)+w_t(n,m)=1$,因此对视频帧中的任何宏块,当 $w_s(n,m)$ 增加时, $w_t(n,m)$ 减小,反之亦然. 根据式(11)中第1个式子, $w_s(n,m)$ 是增加或减小由宏块对应的空间活动性与时间活动性的强弱关系确定. Mother&Daughter 序列使用固定量化参数及 Grandma 序列使用固定比特率进行编码时,3种 slice 组划分方法对应的编码性能如图1所示. 图2给出 Mobile 序列编码为128 kb/s时采用3种方法在不同分组丢失率下的性能比较.



(a) Mother&Daughter 序列



(b) Grandma 序列

图1 2个视频序列采用3种方法的编码性能比较

由图1可知,本文提出的方法相比已有方法编码性能有较大的提高. 由图2可知,在 slice 组具有相同大小的前提下,本文方法中 slice 组2的丢失对恢复视频质量影响最小.

表1给出了8个视频序列在不同分组丢失率下的平均峰值信噪比. 为了进一步验证按照式(11)确定 $w_s(n,m)$ 和 $w_t(n,m)$ 的合理性,表2和表3分别给出了按照不同方法确定 $w_s(n,m)$ 时,Foreman 序列的编码性能及不同分组丢失率下的恢复视频质量. 为表示方便, $w_s(n,m)$ 用 w_s 表示.

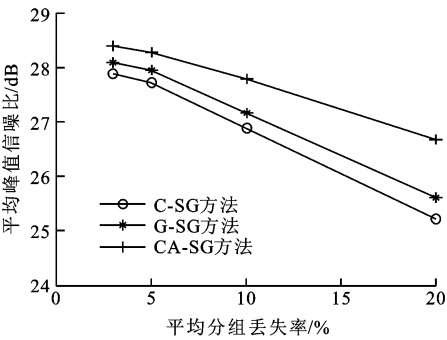


图 2 Mobile 序列在不同分组丢失率下的平均峰值信噪比

表 1 不同视频序列采用 3 种方法时的平均峰值信噪比

序列	平均峰值信噪比/dB		
	C-SG	G-SG	CA-SG
Mother&Daughter	39.80	40.23	41.66
Foreman	33.78	34.26	35.22
Carphone	36.08	36.25	37.96
Mobile	26.54	26.77	27.29
Grandma	38.83	39.16	40.30
Container	38.60	38.61	39.68
Silent	35.21	35.86	37.48
Salesman	36.52	36.80	37.94
平均	35.67	35.99	37.19

表 2 Foreman 序列在 w_s 取不同值时的编码性能

比特率/ kb · s ⁻¹	峰值信噪比/dB			
	$w_s=0.3$	$w_s=0.5$	$w_s=0.7$	式(11)确定的 w_s
64	34.14	33.95	33.91	34.20
96	36.50	36.52	36.48	36.58
128	38.02	38.02	38.22	38.07
160	39.39	39.41	39.40	39.42

表 3 Foreman 序列在 w_s 取不同值时不同分组丢失率下的平均峰值信噪比

比特率/ kb · s ⁻¹	平均峰值信噪比/dB			
	$w_s=0.3$	$w_s=0.5$	$w_s=0.7$	式(11)确定的 w_s
64	32.08	31.89	31.84	32.26
96	33.56	33.62	33.55	34.05
128	34.46	34.41	34.68	35.08
160	35.34	35.46	35.56	36.00

由表 1 可知,相比参考方法 C-SG 和 G-SG,本文方法对恢复视频质量平均提高了 1.52 dB 和 1.20 dB. 本文方法中 slice 组 2 的丢失对恢复视频质量影响较小的主要原因在于,本文方法能较准确地识别对恢复视频质量影响较大的宏块,并将这些宏块划分到 slice 组 1 进行编码,从而 slice 组 2 包含对恢复视频质量影响相对较小的宏块. 由表 2 和表 3 可知, w_s 的取值对编码性能有影响. 与使用固定 w_s 编码的方法相比,本文使用式(11)确定 w_s 的方法具有更好的性能,主要原因在于式(11)在确定 w_s 时充分考虑了宏块内容的空间特性和时间特性.

4 结 论

本文在确定宏块对恢复视频质量的影响程度时,同时考虑宏块包含视频内容的空间特性和时间特性,并根据当前宏块与邻近宏块之间空间相关性 及当前宏块与前一帧同位置宏块之间时间相关性, 自适应地确定度量宏块内容特性的函数,并以此作为将宏块划分到不同 slice 组进行编码的依据. 与已有不考虑内容特性的 slice 组编码方法相比,由于内容特性相似的宏块被划分到同一个 slice 组进行编码,因此这些宏块之间的空间相关性可被充分利用,从而提高了编码效率;另一方面,由于所定义的特征宏块内容特性的函数可准确地度量宏块对恢复视频质量的影响,因此那些对恢复视频质量影响较大的宏块被划分到同一个 slice 组进行编码,而其余宏块被划分到另外一个 slice 组进行编码,以便有利于设计各种保护方法对重要 slice 组提供较多保护,而对一般 slice 组提供较少保护,从而在有效利用有限带宽资源的同时,获得更好的恢复视频质量.

参考文献:

[1] 宋彬,李子诺,秦浩. 视频通信中的选择性重传技术[J]. 西安交通大学学报,2009, 43(6): 82-87.
SONG Bin, LI Zinuo, QIN Hao. Selective retransmission technology in video communications [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 82-87.
[2] 李鹏,常义林,冯妮娜,等. 用于视频传输的自适应分级正交幅度调制不等保护方法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 72-77.
LI Peng, CHANG Yilin, FENG Nina, et al. Unequal error protection method for video transmission using adaptive hierarchical quadrature amplitude modulation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45 (4): 72-77.

- [3] HA H, PARK J, LEE S, et al. Perceptually unequal packet loss protection by weighting saliency and error propagation [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(9): 1187-1199.
- [4] Telecommunication Standardization Sector. ITU-T recommendation H.264 advanced video coding for generic audiovisual services [S]. Geneva, Switzerland: Telecommunication Standardization Sector, 2010.
- [5] LAMBERT P, NEVE W D, DHONDT Y, et al. Flexible macroblock ordering in H.264/AVC [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2006, 17(2): 358-375.
- [6] TAN K, PEARMAIN A. An improved FMO slice grouping method for error resilience in H.264/AVC [C]// *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1442-1445.
- [7] TAN K, PEARMAIN A. An FMO based error resilience method in H.264/AVC and its UEP application in DVB-H Link layer [C]// *IEEE International Conference on Multimedia and Expo Suntec*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 214-219.
- [8] SONG Li, MA Xin. Improving flexible macroblock ordering of H.264/AVC [C]// *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 742-745.
- [9] 杨付正, 常义林, 万帅, 等. 基于图像内容失真的全参考视频质量评估方法 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2005, 32(6): 869-872.
- YANG Fuzheng, Chang Yilin, WAN Shuai, et al. Fullreference video quality assessment method based on the distortion of image content [J]. *Journal of Xidian University*, 2005, 32(6): 869-872.
- [10] WU Dajun, PAN Feng, LIM K P, et al. Fast inter-mode decision in H.264/AVC video coding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(6): 953-958.
- [11] WU Guanlin, CHEN Chingyi, WU Tunghsing, et al. Efficient spatial-temporal error concealment algorithm and hardware architecture design for H.264/AVC [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(11): 1409-1422.
- [12] HSIA S C, CHENG S C, CHOU S W. Efficient adaptive error concealment technique for video decoding system [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2005, 7(5): 860-868.
- [13] AGRAFIOTIS D, BULL D R, CANAGARAJAH. Enhanced error concealment with mode selection [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2006, 16(8): 960-973.
- [14] Heinrich Hertz Institute. VCEG reference software version JM15.1 [CP/OL]. (2009-7-7) [2010-03-25]. http://iphome.hhi.de/suehring/tml/download/old_jm/jm15.1.zip.
- [15] WENGER S. Proposed error patterns for internet experiments [EB/OL]. (1999-10-3) [2010-09-20]. http://ftp3.itu.ch/av-arch/video-site/9910_Red/q15i16.zip.

(编辑 刘杨)