

DOI: 10.7652/xjtub201904012

高效视频编码中帧内码率控制改进算法

李维¹, 任鹏², 赵凡¹, 陈亚军¹

(1. 西安理工大学印刷包装与数字媒体学院, 710048, 西安; 2. 西安电子科技大学通信工程学院, 710071, 西安)

摘要: 针对失真漂移现象造成码率拉格朗日因子($R-\lambda$)模型编码效率低的问题,提出一种考虑区域间失真关联性的高效视频编码(HEVC)帧内码率控制改进算法。首先根据帧内预测编码原理,对编码区域间的失真关联性进行分析,得到漂移的失真、当前失真与总失真之间的关系;然后利用编码像素值、参考像素值和参考像素重构值,准确地预测出漂移的失真值;最后结合传统的 $R-\lambda$ 模型,获取基于失真漂移的拉格朗日因子 λ ,继而建立更准确的 $R-\lambda$ 模型。实验结果表明,与原始的帧内码率控制算法相比,在相同的码率下所提算法可将编码码率平均降低 1.7%,重构视频的峰值信噪比平均提高 0.1 dB,证明所提算法的编码效率得到提升,且编码时间增幅非常小。

关键词: 率失真优化;码率控制;高效视频编码;编码失真

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0079-06

A Modified Method for Intra-Coding Rate Control in High Efficiency Video Coding

LI Wei¹, REN Peng², ZHAO Fan¹, CHEN Yajun¹

(1. School of Printing, Packaging and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A modified method for intra-coding rate control in high efficiency video coding (HEVC) is proposed to solve lower coding efficiency of the rate-Lagrange ($R-\lambda$) model caused by distortion drift. The method considers the distortion relevance among the video areas. According to the intra-frame prediction coding principle, the distortion relevance among coding-blocks is firstly analyzed to obtain the relationship of drift distortion, current distortion, and total distortion. Then the value of distortion drift is accurately predicted by utilizing the value of coding pixels, the value of reference pixels, and the value of reconstructed reference pixels. The traditional $R-\lambda$ model is finally used to obtain the Lagrange factor λ based on distortion drift and to derive a more accurate $R-\lambda$ model. Experimental results and a comparison with the original scheme show that the proposed method gets a reduction of about 1.7% in bit-rate and an improvement of about 0.1 dB in PSNR of the reconstructed video in keeping the same bit-rate, and that the proposed method improves the coding efficiency with a slight increase in time-consumption.

Keywords: rate-distortion optimization; bit-rate control; high efficiency video coding; coding distortion

收稿日期: 2018-11-05。 作者简介: 李维(1985—),女,博士,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671376, 61671374);中国博士后科学基金资助项目(2017M610644);

网络出版时间: 2019-01-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190121.1106.006.html>

多媒体技术和各种智能终端产品促使高清/超高清视频应用向高分辨率、高帧率、高像素位深快速发展。新一代视频编码标准(HEVC)^[1]由于采用了各种先进的编码工具,如基于大块的四叉树分割结构^[2]、先进的运动矢量预测技术、35种帧内预测技术、内部位深扩展技术、像素自适应补偿技术等,其编码性能有了大幅度提高。凭借高的压缩率和好的视频质量,HEVC逐步走入人们的视野^[3]。实际中由于视频内容不断发生变化,经编码器后得到的码率会有较大波动,极易造成上溢或下溢现象,因此HEVC的码率控制^[4]尤为重要,直接影响着视频编码标准的实用性。编码器需要码率控制模块调整输出的码流大小,以满足给定的存储或传输带宽。

码率控制问题实质是一种有约束条件的率失真优化问题,通过调整量化参数来保证编码码率与给定的目标码率相匹配。为了在码率和失真之间找到一个最优的折中点,率失真模型的建立是至关重要的。司俊俊等从理论上分析了编码帧预测残差信号的分布特性、量化参数以及拉格朗日因子之间的关系,提出根据拉普拉斯分布特性动态调整量化参数获得有效的码率控制^[5]。Choi等假设信源服从拉普拉斯分布,利用泰勒展开式建立了 $R-Q$ 模型^[6],但基于该模型的码率控制算法在HEVC中的控制精度不高,特别是运动场景下,模型的性能下降很快。考虑到预测残差经过变换和量化后的系数中零系数比例 ρ 对编码码率有着重要的影响,特别是在码率比较低的情况下,这种影响更加显著。Liang等提出用 R 与 ρ 之间的关系代替 R 与 Q 之间的关系,从而建立一种基于 $R-\rho$ 模型的码率控制算法^[7],该算法利用绝对差均值来估计编码单元的复杂度,经码率控制后输出的编码码率上下波动较大。随后,Li等提出码率和失真之间存在双曲线函数关系,推导出一种基于码率-拉格朗日因子($R-\lambda$)模型的码率控制算法^[8],并且该算法被国际标准组织所采纳并且加入到HEVC校验模型。

上述方法均是在假设各个视频区域相互独立的情况下,利用率失真优化方法指导码率控制,但对于超高清视频以及HEVC编码器,这种假设条件下的码率控制在一定程度上影响了编码性能。由于帧内帧间预测技术的使用,致使区域之间的码率和失真具有一定的关联性^[9]。Li等研究了时域编码块之间的失真特性,建立了失真模型并提出了相应的帧间码率控制算法^[10],Liu等在码率控制算法中考虑了帧间编码中的失真漂移特性,以进一步提高编码

效率^[11],但是都只考虑了帧间编码的率失真特性,忽略了帧内编码码率控制中率失真关联特性。Zhou等分析了视频内容的复杂度,提出了一种新的帧内码率控制算法^[12],但该算法也未考虑帧内预测技术对码率与失真的影响。基于帧内预测理论,本文分析了邻近编码区域之间的关联性,并结合失真漂移现象,提出一种高效视频编码(HEVC)帧内码率控制改进算法。实验结果表明,本文提出的算法可以有效地提高码率控制的性能,与原始算法相比,在同等码率的条件下,重构视频质量可平均提高0.1 dB。

1 帧内编码码率控制

码率控制模块由码率分配和量化参数确定两部分组成^[13]。首先,根据目标码率为图像(GOP)、帧、编码树单元(CTU)分别确定最优的目标码率;然后,根据 $R-\lambda$ 模型计算相应的量化参数^[14]。帧内码率控制算法如下。

(1) GOP层码率分配。根据目标码率 R 、帧率 F 、GOP的大小 S_G 、已编码的帧数 N_c 和编码输出的码率 R_c ,计算GOP的目标码率为

$$R_G = S_G(R(N_c - w) - R_c F) / (wF) \quad (1)$$

式中:参数 w 为滑动窗口的大小,用于保证视频质量的平滑性。

(2) 帧层码率分配。根据每一帧在GOP中所占的权重值进行帧层码率分配,由于帧内编码时每一个GOP只包含一帧,因此该帧的目标码率 R_F 可估计为

$$R_F = R_G \quad (2)$$

(3) CTU层码率分配。第 i 个CTU的目标码率 B_i 取决于帧层的目标码率和当前CTU的空域复杂度,其计算公式为

$$B_i = R_F C_i / \sum_{i=1}^N C_i \quad (3)$$

式中: N 表示一帧中所含的CTU个数; C_i 为复杂度参数,表示第 i 个CTU的帧内预测残差经过哈达玛变换后的系数绝对值总和。随着编码的推进,后续CTU的目标码率 B'_i 按照下式进行更新

$$B'_i = \left[R_r + \left(\sum_{j=1}^{i-1} (B_j - A_j) \right) / w \right] C_j / \sum_{j=i}^N C_j \quad (4)$$

式中:参数 R_r 表示当前帧剩余的目标比特数; A 表示已编码的CTU实际输出的编码比特数。

(4) 量化参数的确定。为了准确地获取量化参数,提出一种 $R-\lambda$ 模型,通过拉格朗日因子 λ 值来计

算量化参数, $R\text{-}\lambda$ 模型表示为

$$\lambda_i = \tau((C_i/N_p)^\chi N_p/B_i')^\beta \quad (5)$$

式中: N_p 表示 CTU 中所含的像素数; τ 、 β 和 χ 为模型参数。量化参数 Q_i 可表示为

$$Q_i = 4.2005 \ln(\lambda_i) + 13.7122 \quad (6)$$

在码率控制模块的指导下, 视频编码器得以有效地运行, 在保证一定视频质量的同时, 输出的编码码率也满足给定的目标码率。

2 改进的 $R\text{-}\lambda$ 模型

2.1 帧内块关联性分析

帧内预测将在空域上相邻的已重构的边界像素作为参考信息进行预测, 能够有效地减少空域冗余, 提高视频编码的效率。HEVC 视频编码标准定义了 35 种帧内预测模式, 包括 33 种角度模式、DC 模式和 Planar 模式^[15], 如图 1 所示。

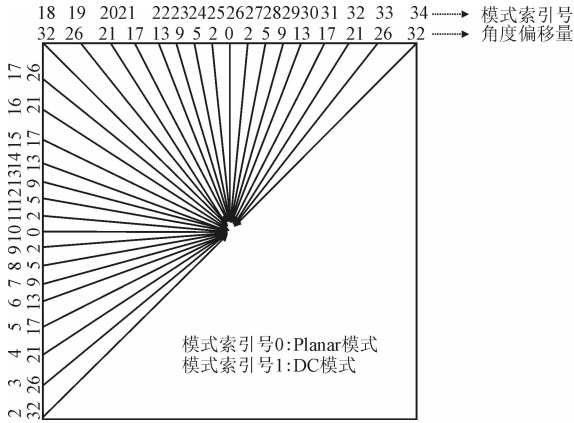


图 1 帧内预测模式

由于当前像素与周围像素之间具有强的相关性, 帧内预测编码利用最近的像素作为参考, 估计当前像素值, 但这种方式会引起潜在的编码失真漂移现象^[16]。参考像素是原始像素经编码后的重构像素, 其存在一定的失真, 并且会随着帧内预测扩散到后续的像素, 从而形成失真带。图 2 给出了参考像素失真传播的示意图, 原始图像进行编码时, 利用重构图像中的参考像素进行帧内预测, 造成失真沿着预测方向传播, 形成失真块。

假设位于 (i, j) 处的待编码像素值为 p , 利用参考像素重构值 p'_r 进行帧内预测后得到的像素值为 p' , 则失真 d 可表示为

$$d = p(i, j) - p'(i, j) \quad (7)$$

式(7)可以重写为

$$d = [p(i, j) - p_p(i, j)] + [p_p(i, j) - p'(i, j)] \quad (8)$$

式中: p_p 为参考像素原始值; p_r 为采用相同的帧内

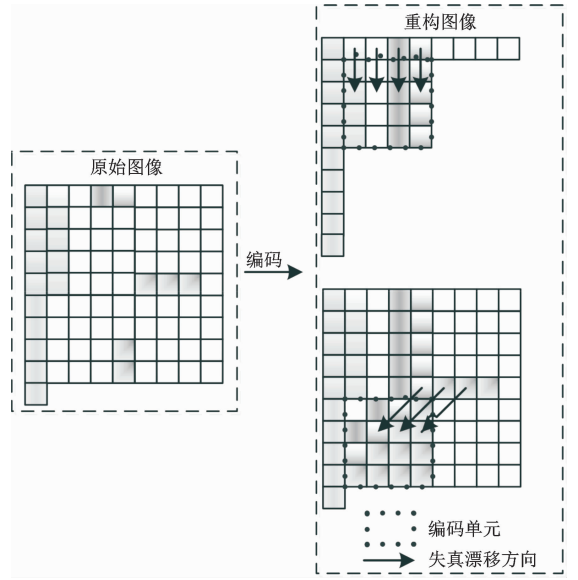


图 2 帧内失真漂移示意图

预测模式所得到的预测值。从式(8)可以看出, 像素失真由两部分构成, 前半部分表示当前像素值与参考像素原始值经帧内预测后所产生的失真 d_o , 后半部分表示参考像素原始值 p_r 与参考像素重构值 p'_r 分别经过帧内预测后所产生的失真 d_p , 该部分由参考像素的编码失真 d_r 引起的, 体现了失真的漂移特性, 即

$$d = d_o + d_p \quad (9)$$

通常, 这种帧内预测关系可以被描述为一维高斯马尔科夫模型^[17]

$$\begin{cases} p_p(i, j) = \theta p_r(i, j) + \eta \\ p'(i, j) = \theta p'_r(i, j) + \eta \end{cases} \quad (10)$$

式中: θ 和 η 为模型参数。后半部分失真 d_p 可以表示为

$$\begin{aligned} d_p &= p_p(i, j) - p'(i, j) = \\ &[\theta p_r(i, j) + \eta] - [\theta p'_r(i, j) + \eta] = \theta d_r \end{aligned} \quad (11)$$

则当前待编码 CTU 的总失真

$$D = D_o + \theta D_r \quad (12)$$

式中: D_o 和 D_r 分别表示当前待编码 CTU 的前半部分总失真和后半部分总失真。

2.2 基于失真漂移的 $R\text{-}\lambda$ 模型

基于 2.1 节的分析, 可以看出 CTU 的编码失真与其参考失真之间存在一种线性关系。这种关系是在失真测度为绝对误差和(SAD)条件下得到的。

码率控制属于率失真优化问题, 通过拉格朗日优化方法可描述为^[18]

$$J = \sum_{i=1}^N D(i) + \lambda_{\text{SAD}} \sum_{i=1}^N R(i) \quad (13)$$

式中: J 和 λ_{SAD} 分别表示率失真代价和失真测度为 SAD 下的拉格朗日因子; 符号 $D(i)$ 和 $R(i)$ 分别表示第 i 个 CTU 经编码后产生的总失真和总码率。对于第 i 个 CTU, 它的编码失真会传播到右边第 $i+1$ 个 CTU 和相邻下边第 j 个 CTU 中, 因此根据式(12), 可得

$$\begin{aligned} \partial J / \partial R(i) &= \partial D(i) / \partial R(i) + \partial D(i+1) / \partial R(i) + \\ &\quad \partial D(j) / \partial R(i) + \lambda_{\text{SAD}} = \partial D(i) / \partial R(i) + \\ &\quad \partial (D_o(i+1) + \theta(i+1) D(i)) / \partial R(i) + \\ &\quad \partial (D_o(j) + \theta(j) D(i)) / \partial R(i) + \lambda_{\text{SAD}} = \\ &[1 + \theta(i+1) + \theta(j)] \partial D(i) / \partial R(i) + \lambda_{\text{SAD}} = \\ &\alpha_i \partial D(i) / \partial R(i) + \lambda_{\text{SAD}} \end{aligned} \quad (14)$$

所以, 式(13)被更新为

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^N J(i) = \sum_{i=1}^N (D(i) + R(i) \lambda_{\text{SAD}} / \alpha_i) = \\ &\sum_{i=1}^N (D(i) + R(i) \lambda_i^*) \end{aligned} \quad (15)$$

在实际编码中, 均方误差和 (SSE) 被用作失真测度, 该失真测度下获取的拉格朗日因子 λ_i^* 与 SAD 失真测度下获取的拉格朗日因子 λ_i^* 有以下关系^[19]

$$\lambda_i^* = (\lambda_i^*)^2 \quad (16)$$

结合式(5), 可得到改进的 $R-\lambda$ 模型

$$\begin{aligned} \lambda_i^* &= (\lambda_i^*)^2 = (\lambda_{\text{SAD}} / \alpha_i)^2 = \\ &(\sqrt{\lambda_i} / \alpha_i)^2 = (\tau / \alpha^2) [(C_i / N_P)^{\alpha} / (B'_i / N_P)^{\beta}]^{\beta} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: 参数 α_i 可利用前一个已编码块按照式(14)估算得到。图 3 给出了改进 $R-\lambda$ 模型的获取流程。将改进 $R-\lambda$ 模型加入到帧内码率控制算法中, 可以更准确地计算量化参数, 保证编码码率与目标码率的一致性。

3 实验结果

为了验证帧内码率控制改进算法的有效性, 利用 HEVC 编码器的参考软件 HM16.0, 对各种标准序列进行相关指标测试。标准序列使用 JCTVC 组

表 1 本文算法与原有算法性能对比

序列	$\Delta R_{\text{bit}} / \%$				$\Delta P_{\text{SNR}} / \text{dB}$				$\Delta T / \%$			
	IM	IM10	RM	RM10	IM	IM10	RM	RM10	IM	IM10	RM	RM10
Class B	-1.5	-1.9	-0.6	-0.8	0.11	0.13	0.07	0.10	0.06	0.08	0.03	0.04
Class C	-1.2	-1.7	-0.4	-0.5	0.10	0.12	0.05	0.09	0.05	0.07	0.02	0.03
Class D	-1.1	-1.6	-0.3	-0.5	0.10	0.11	0.04	0.06	0.04	0.05	0.02	0.02
Class E	-1.8	-1.9	-0.6	-0.7	0.12	0.14	0.06	0.07	0.05	0.05	0.03	0.02
均值	-1.4	-1.7	-0.5	-0.6	0.11	0.13	0.05	0.08	0.05	0.06	0.02	0.03

注: ΔR_{bit} 为本文算法编码率与原有算法编码率之间的差值; ΔP_{SNR} 为本文算法峰值信噪比与原有算法峰值信噪比之间的差值; ΔT 为本文算法编码时间与原有算法编码时间的差值。

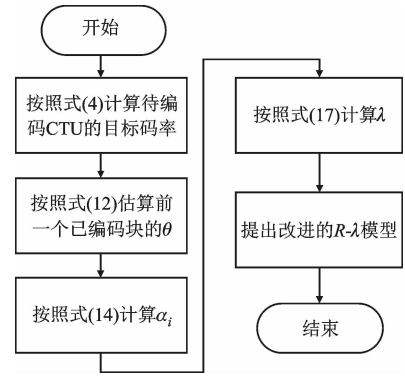


图 3 改进 $R-\lambda$ 模型的获取流程图

织提供的 Class B、Class C、Class D、Class E 这 4 类序列, 其涵盖了不同分辨率、不同纹理的视频。本实验分别在帧内编码配置 Intra_only Main(IM)、Intra_only Main10(IM10) 和帧内帧间编码配置 RA Main(RM) 和 RA Main10(RM10) 环境^[20] 下进行测试。编码帧数设置为 300, 硬件采用 Window7 平台, 处理器为 Intel Core i5-4590。本文从编码效率和编码复杂度两方面评价改进模型的总体性能。

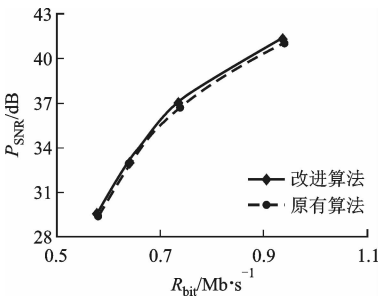
3.1 编码效率

首先本文从编码效率上来验证所提算法的性能, 评价的指标是 ΔR_{bit} 和 ΔP_{SNR} ^[21]。 ΔR_{bit} 反映编码输出码率的变化情况, 值为负, 表示编码比特率 R_{bit} 减小; ΔP_{SNR} 反映视频质量的变化情况, 值为正, 表示峰值信噪比 P_{SNR} 增大。

在帧内编码 IM 和 IM10 配置下采用本文改进算法和原有算法的性能进行对比, 结果如表 1 所示。由表 1 可以看出: 在 IM 配置下本文算法的比特率平均降低了 1.4%, 峰值信噪比平均提高了 0.11 dB; 在 IM10 配置下本文算法的比特率平均降低了 1.7%, 峰值信噪比平均提高了 0.13 dB。由于本文算法是在帧内预测编码原理的基础上结合率失真优化推导出的改进算法, 因此编码效率得到了提升。为了证明本文算法对帧内帧间联合编码配置也有贡献, 分别在 RM 和 RM10 配置下对本文改进算法和

原有算法的性能进行对比,结果见表 1。从表 1 可以看出:在 RM 配置下本文算法的比特率平均降低了 0.5%,峰值信噪比平均提高了 0.05 dB;在 RM10 配置下本文算法的比特率平均降低了 0.6%,峰值信噪比平均提高了 0.08 dB,说明在帧内帧间联合编码的情况下,本文算法的编码效率也有一定提升;因为帧内帧间联合编码下的帧内块数量较少,所以编码效率提升的幅度没有帧内编码下编码效率提升的高。

图 4 给出了 Kimono 序列和 BQSquare 序列的率失真性能曲线,其中 Kimono 序列的分辨率为 $1\,920\times1\,080$ 像素,BQSquare 序列的分辨率为 416×240 像素。由图 4 可以看出,本文所提算法的率失真性能位于原有算法的率失真性能之上,反映了在给定码率下,本文改进算法具有更高的峰值信噪比值。表 2 给出了 IM10 配置下本文改进算法与文献[12]算法的性能对比结果。由表 2 可以看出,由



(d)IM10 配置下 BQSquare 序列

图 4 不同配置不同视频序列的率失真曲线

表 2 本文算法与文献[12]算法性能对比

序列	$\Delta R_{\text{bit}}/\%$	$\Delta P_{\text{SNR}}/\text{dB}$
Bqsquare_416×240	−1.1	0.08
RaceHorses_832×480	−1.0	0.10
Vidyo1_1280×720	−1.1	0.09
BasketballDrive_1920×1080	−1.4	0.12
均值	−1.15	0.10

于本文所提算法考虑了帧内失真漂移现象,因而在帧内码率控制方面优于文献[12]算法。

3.2 编码复杂度

本文使用编码时间差 ΔT 作为编码复杂度的评价指标, ΔT 定义为

$$\Delta T = (T_m - T_o)/T_o. \tag{18}$$

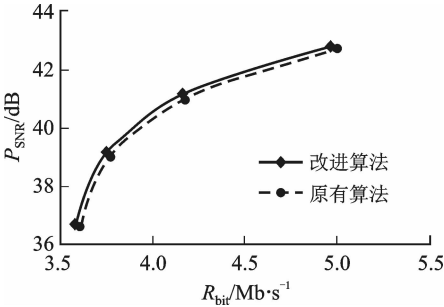
式中: T_m 表示本文改进算法被应用到码率控制中后所耗的编码时间; T_o 表示原有算法被应用到码率控制中后所耗的编码时间。从表 1 可以看出,无论是全帧内编码还是帧内帧间编码,与原有算法相比,本文所提算法的编码时间增幅非常小,编码复杂度几乎没有大的影响。综上,本文改进算法在提高编码效率的同时,并未带来高的编码负担。

4 结 论

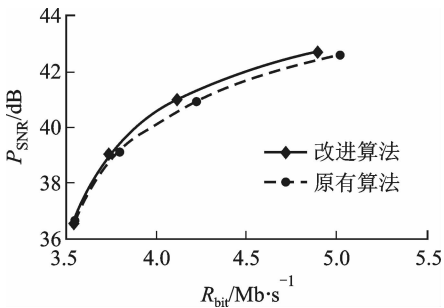
码率控制模块在视频编码中起着重要的作用,其率失真模型的好坏直接影响着最终的编码性能。本文针对 HEVC 的率失真模型,提出一种改进的帧内码率控制算法。通过分析帧内预测编码技术,找出度量失真漂移的方法,结合率失真优化原理,建立了考虑帧内块关联特性的改进 $R-\lambda$ 模型。实验结果表明,本文所提的改进算法具有较高的帧内编码性能,在相同码率下重构视频质量可平均提高 0.1 dB。

参考文献:

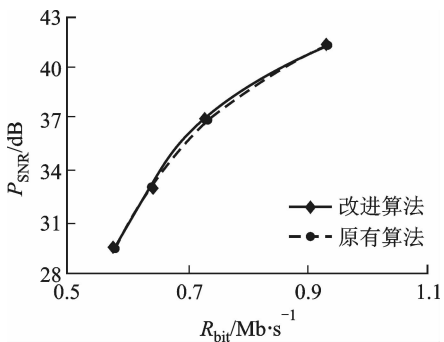
[1] FLYNN D, MARPE D, NACCARI M, et al. Overview of the range extensions for the HEVC standard;



(a)IM 配置下 Kimono 序列



(b)IM10 配置下 Kimono 序列



(c)IM 配置下 BQSquare 序列

- tools, profiles, and performance [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(1): 4-19.
- [2] 李维, 张和仙, 杨付正. 高效率视频编码快速模式判决算法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(8): 104-109.
- LI Wei, ZHANG Hexian, YANG Fuzheng. A fast mode decision algorithm for high efficiency video coding [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(8): 104-109.
- [3] WANG S, LUO F, MA S, et al. Low complexity encoder optimization for HEVC [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 35: 120-131.
- [4] TONG T, LING L. Rate control for non-uniform video in HEVC [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2017, 48: 254-267.
- [5] 司俊俊, 马思伟, 王诗淇. 一种基于变换系数拉普拉斯分布的 HEVC 码率控制算法 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2013, 19(3): 229-234.
- SI Junjun, MA Siwei, WANG Shiqi. Laplace distribution based rate control algorithm for HEVC [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2013, 19(3): 229-234.
- [6] CHOI H, YOO J, NAM J, et al. Pixel-wise unified rate-quantization model for multi-level rate control [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2013, 7(6): 1112-1123.
- [7] LIANG X, WANG Q, ZHOU Y, et al. A novel R - Q model based rate control scheme in HEVC [C]//2013 IEEE International Conference on Visual Communications and Image Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 6706343.
- [8] LI B, LI H, LI L, et al. λ domain rate control algorithm for high efficiency video coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(9): 3841-3854.
- [9] 苏洪磊, 李兵兵, 杨付正. H. 264/AVC 网络视频编码失真评估的比特流层模型 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(6): 36-41.
- SU Honglei, LI Bingbing, YANG Fuzheng. A bitstream-layer model for assessing coding distortion of H. 264/AVC networked video [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(6): 36-41.
- [10] LI Y, JIA H, XIE X, et al. Rate control for consistent video quality with inter-dependent distortion model for HEVC [C]//2016 IEEE Visual Communications and Image Processing Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 7805594.
- [11] LIU M, REN P, XIANG Z. Frame-level bit allocation for hierarchical coding of H. 265/HEVC considering dependent rate-distortion characteristics [J]. Signal, Image and Video Processing, 2016, 10(8): 1457-1463.
- [12] ZHOU M, ZHANG Y, LI B, et al. Complexity-based intra frame rate control by jointing inter-frame correlation for high efficiency video coding [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2017, 42: 46-64.
- [13] KUO C, SHIH Y, YANG S. Rate control via adjustment of Lagrange multiplier for video coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(11): 2069-2078.
- [14] LI B, LI H, LI L. Rate control by R -lambda model for HEVC [C]//Proceedings of the 11th JCTVC Meeting. Geneva, Switzerland: ITU, 2012: 1-9.
- [15] TARIQ J, KWONG S, YUAN H. HEVC intra mode selection based on rate distortion cost and sum of absolute difference [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 35: 112-119.
- [16] CHEN H, ZHANG T, SUN M, et al. Improving intra prediction in high-efficiency video coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(8): 3671-3682.
- [17] TU Y K, YANG J F, SUN M T. Efficient rate-distortion modeling for efficient H. 264/AVC encoding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(5): 530-543.
- [18] LI S, ZHU C, GAO Y, et al. Lagrangian multiplier adaptation for rate-distortion optimization with inter-frame dependency [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(1): 117-129.
- [19] LI W, ZHAO F, ZHANG E, et al. Lagrange optimization in high efficiency video coding for SATD-based intra mode decision [J]. Signal, Image and Video Processing, 2017, 11(6): 1163-1170.
- [20] BOSSEN F. Common test conditions and software reference configurations [C]//Proceedings of the 15th JCTVC Meeting. Geneva, Switzerland: ITU, 2013: 1-4.
- [21] HJONTEGAARD G. Calculation of average PSNR differences between RD-curves [EB/OL]. (2001-03-26) [2017-05-18]. http://wftp3.itu.int/av-arch/video-site/0104_Aus/VCEG-M33.doc.

(编辑 刘杨)