

基于视频内容特征值的 VVC 码率控制算法*

余东航, 李 强, 聂 骏

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对 VVC 码率控制算法没有综合考虑编码帧实际纹理特征, 其编码率失真性能和视觉体验还有待提高的问题, 提出了一种基于视频内容相关特征值的码率控制算法。通过引入灰度共生矩阵, 计算出反映编码帧纹理复杂度的相关特征值, 用于帧层图像权重的调整; 基于 R- λ 模型, 对 LCU 层的 λ 参数进行重新计算, 提高 LCU 层比特分配的精度。经测试, 该算法在低时延配置下, 与自适应比特分配算法相比, 在更接近目标码率情况下, 率失真性能提升了 0.86%, 视频编码主观质量得到较明显改善。

关键词: 多功能视频编码; 码率控制; 灰度共生矩阵; R- λ 模型; 比特分配

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211453

中文引用格式: 余东航, 李强, 聂骏. 基于视频内容特征值的 VVC 码率控制算法[J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 89-93.

英文引用格式: Yu Donghang, Li Qiang, Nie Jun. Versatile video coding rate control algorithm based on content feature value[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 89-93.

Versatile video coding rate control algorithm based on content feature value

Yu Donghang, Li Qiang, Nie Jun

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at the problem that the VVC rate control algorithm does not comprehensively consider the actual texture characteristics of the coded frame, and its rate-distortion performance and visual experience need to be improved, a rate control algorithm based on video content-related feature values is proposed. By introducing the gray level co-occurrence matrix, the relevant feature values reflecting the texture complexity of the encoded frame are calculated, which are used to adjust the image weight of the frame layer; based on the R- λ model, the λ parameter of the LCU layer is recalculated to improve the bit allocation of the LCU layer Accuracy. After testing, compared with the adaptive bit allocation algorithm in the low-delay configuration, the algorithm in this paper is closer to the target bit rate, the rate-distortion performance is improved by 0.86%, and the subjective quality of video coding is significantly improved.

Key words: versatile video coding; rate control; gray-level co-occurrence matrix; R- λ model; bit allocation

0 引言

多功能视频编码(Versatile Video Coding, VVC)是由 ISO/IEC 的 MPEG 和 ITU-T 的 VCEG 联合制定, 于 2020 年 7 月正式发布的新一代视频编码标准。与以前标准相比, VVC 具有更高的压缩性能和通用性, 可应用于高清和超高清视频、360°全向视频、高动态视频范围和广色域、沉浸式媒体等多种应用场景。

VVC 码率控制算法仍沿用了高效视频编码(High Efficiency Video Coding, HEVC)中的 R- λ 模型^[1]。基于该模型的码率控制算法具有控制效果好、比特波动小的优点, 但对局部纹理复杂边缘轮廓显著的视频, 最大编码单元(Largest Coding Unit, LCU)层的比特分配并不准确,

导致峰值信噪比有所损失。针对该模型码率控制算法的不足, 文献[2]和[3]以 LCU 层的梯度值衡量编码区域的复杂度, 用于指导 R- λ 模型中 LCU 的比特分配, 提升了 R- λ 模型的性能; 文献[4]对 LCU 层编码模型参数做偏差修正处理, 重新计算更新待编码 LCU 的权重分配, 提升了 LCU 层的比特精确度; 文献[5]根据视频帧间相关性, 参考前一帧 R- λ 模型更新后计算得到的比特数预测待编码帧的复杂度, 提高了视频编码质量; 文献[6]将 I 帧消耗大量比特的影响分摊到整个序列, 从而改进了前几个图像组(Group of Pictures, GOP)比特分配量, 并在 GOP 编码过程中根据实际消耗的比特不断更新帧层的 λ 参数, 提高了后续帧的比特分配精确度。

基于 R- λ 模型的 VVC 码率控制算法在模型参数更新过程中虽然考虑了编码实际结果的失真值, 并以 R- λ

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61906025); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201900607)

模型为推导基准修正参数更新公式,提高了参数更新的准确性,但在视频编码过程中,VVC 码率控制算法未充分考虑编码帧的内容特性,如编码帧的纹理复杂度、空域相关性等,因此其编码率失真性能和视觉体验还有待提高。为了实现更准确的码率控制,提高视频质量,本文提出了一种基于视频内容相关特征值的码率控制算法,通过引入灰度共生矩阵,得到能有效反映编码帧纹理特征的相关值,对 GOP 中同一层级图像的权重重新调整,并对 R- λ 模型中的 λ 值进行重新求解,提升 LCU 层比特权重分配的精度,从而提升视频编码质量。

1 基于 R- λ 模型的 VVC 码率控制算法

1.1 R- λ 模型

双曲率函数型率失真函数广泛应用在码率控制模型中^[7],其计算公式如式(1)所示。

$$D(R) = CR^{-K} \quad (1)$$

其中, D 代表编码的实际失真,采用均方误差来表示; R 为编码比特,用每像素比特表示; C 和 K 是与序列内容特性相关的模型参数值^[8]。拉格朗日乘子 λ 由 R - D 曲线的斜率表示,其计算公式如式(2)所示,式中的 α 和 β 是与序列内容特性相关的两个参数^[9]。

$$\lambda = -\frac{\partial D}{\partial R} = CK \cdot R^{-K-1} = \alpha R^\beta \quad (2)$$

1.2 目标比特分配

帧层的目标比特是在编码前根据 R- λ 模型按每帧图像的权重进行分配的。在 GOP 中,属于同一层级的图像具有相等的权重。当前帧的比特分配计算公式如下:

$$T_{pic} = \frac{T_{GOP} - Coded_{GOP}}{N_{pic} - 1} \times \omega_{curpic} \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^{N_{pic}-1} \omega_{pi}$$

其中, T_{pic} 为当前帧的目标比特; T_{GOP} 和 $Coded_{GOP}$ 分别为当前 GOP 目标比特和已编码帧的实际消耗比特; ω_{pi} 和 ω_{curpic} 分别表示第 i 帧的权重与当前帧的权重。

LCU 层的目标比特是在编码前根据 R- λ 模型对所有 LCU 按权重进行分配的。对于所有的 LCU,其拉格朗日乘子为当前帧计算得到的估计值 $\lambda_{estimate}$,因此每个 LCU 权重和表示如下^[10]:

$$\Omega_{PIC} = \sum_{i=0}^{N_{lcu}} \Omega_{B_i} \quad (4)$$

其中, Ω_{PIC} 表示当前帧所有 LCU 权重和; N_{lcu} 为当前帧所含的 LCU 数量; Ω_{B_i} 表示第 i 个 LCU 权重大小。

由式(2),以比特权重值 Ω_{B_i} 代表 R- λ 模型中的参数 R ,进行等式转换后得到:

$$\Omega_{B_i} = \alpha_{B_i} \lambda_{estimate}^{\beta_{B_i}} = \frac{\lambda_{estimate}}{C_{B_i} K_{B_i}} - \frac{1}{K_{B_i} + 1} \quad (5)$$

其中, α_{B_i} 、 β_{B_i} 、 C_{B_i} 和 K_{B_i} 均表示与序列内容特性相关的第 i 个 LCU 的模型更新参数。

2 基于 R- λ 模型的 VVC 码率控制算法

2.1 图像灰度共生矩阵与视频内容特征值

对于 GOP 中的帧层目标比特分配,若能考虑每帧的实际纹理复杂度,对纹理复杂度较高的帧分配较多的目标比特数,就能提高视频编码的主观质量。灰度共生矩阵^[11](Gray-Level Co-occurrence Matrix, GLCM)能反映出图像灰度的方向、相邻间隔和变化幅度等信息。如果通过像素灰度在空间位置上反复出现的关系和频率生成编码帧的灰度共生矩阵,进而可得到反映编码帧纹理复杂度的相关特征值,如能量、熵、对比度、逆差矩、最大相关系数等,再综合考虑这些相关特征值对编码帧进行纹理复杂度分级,即能实现有效的码率控制目的。

本文以编码帧原始灰度图的反差、熵、能量和逆差矩作为描述图像纹理复杂度的相关特征值。在得到编码帧的灰度共生矩阵后,通过式(6)~式(9)计算出原始灰度图的反差 σ_i 、熵 ζ_i 、能量 τ_i 及逆差矩 v_i 。

$$\sigma_i = \sum_x \sum_y (x-y)^2 P(x, y) \quad (6)$$

$$\zeta_i = \sum_x \sum_y P(x, y) \log P(x, y) \quad (7)$$

$$\tau_i = \sum_x \sum_y P(x, y)^2 \quad (8)$$

$$v_i = \sum_x \sum_y \frac{P(x, y)}{1 + (x-y)^2} \quad (9)$$

其中, x 、 y 分别表示 GLCM 对应的横纵坐标, $P(x, y)$ 是 GLCM 中位于坐标 (x, y) 位置处的值。

2.2 同层级帧权重的重分配

在 GOP 中,同一层级^[12]的帧由于权重计算公式中的参数相同,目标比特分配没有考虑当前帧的实际纹理特性及复杂度,在比特分配上存在不合理的情况^[13]。为了更准确地对每一帧进行合理的比特分配,以当前帧经归一化处理后的反差、熵、能量及逆差矩作为描述图像纹理复杂度的指标,对同一层级每帧的目标比特进行重新分配。

首先通过式(10)和式(11)对同一 GOP 中不同层级的目标比特分级求和。

$$R_{GOP} = \sum_{k=1}^3 R_{leveltotal}^k \quad (10)$$

$$R_{leveltotal}^k = \sum_{i=1}^{N_{level}^k} R_{level}^k \quad (11)$$

其中, $R_{leveltotal}^k$ 为当前 GOP 中属于 k 层级帧的目标比特和, N_{level}^k 表示第 k 层级帧的数量, R_{level}^k 表示第 k 层级第 i 帧目标比特, R_{GOP} 表示当前 GOP 总目标比特。低时延(low-delay)的 GOP 共有 8 帧,分为层级 L1、L2 和 L3,其层次分布图如图 1 所示。

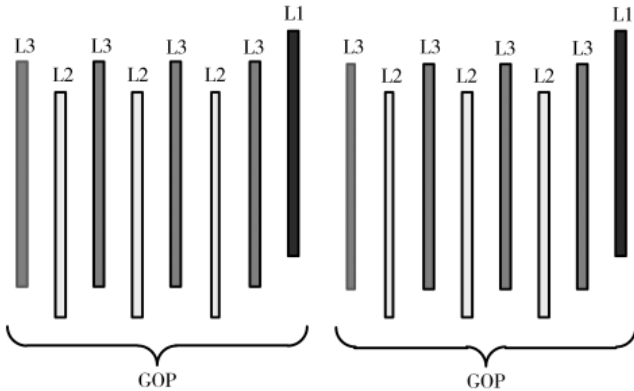


图1 GOP帧的层次分布图

然后,根据当前帧灰度共生矩阵求出的特征值 σ_i 、 ζ_i 、 τ_i 和 v_i ,对GOP层所有帧按同一层级进行比特重分配。

$$\Psi_i^k = \frac{\sigma_i + \zeta_i + \tau_i + v_i}{M} \quad (12)$$

其中, M 表示特征值的数量,本文取为4; Ψ_i^k 表示 k 层级中第 i 帧经过归一化处理后的权重值。

$$R_{\text{level}_i}^k = R_{\text{leveltotal}}^k \times \frac{\Psi_i}{\sum \Psi_i} \quad (13)$$

其中, $R_{\text{level}_i}^k$ 和 $R_{\text{leveltotal}}^k$ 分别表示 k 层级中第 i 帧的目标比特和 k 层级帧的总目标比特和, m 表示 k 层级帧的数量。

2.3 LCU层目标比特更新优化

在对LCU进行编码前,码率控制算法会对当前帧的每个LCU进行权重分配,以R- λ 模型为基础,LCU的权重和比特分配方法如下^[14]:

$$\Omega_{B_i} = \alpha_{B_i}' \lambda_{\text{est}}^{\beta_{B_i}'} \quad (14)$$

$$T_{B_i} = \frac{R_p - \text{BitHeader} - \sum_{j=0}^{\text{coded}} T_{B_j}}{\sum_{i=0}^{N_{\text{lcu}}} \Omega_{B_i}} \times \Omega_{B_i} \quad (15)$$

式中, Ω_{B_i} 和 T_{B_i} 分别表示第 i 个LCU的权重大小和目标比特; R_p 表示当前帧的目标比特; BitHeader 为该帧的头信息比特值; N_{lcu} 为该帧LCU的总数; α_{B_i}' 和 β_{B_i}' 均与视频内容特性有关,为R- λ 模型中的参数值; λ_{est} 为当前帧模型参数所求得的预估值。

由于所求得的 λ_{est} 是根据编码帧模型参数更新后的预估值,用于实际LCU的权重和目标比特求解存在一定的误差,为了以更加准确的 λ 值来进行LCU层的权重估计,需根据编码帧实际的目标比特与模型参数值 α_{B_i}' 和 β_{B_i}' 对 λ_{est} 的值进行重新求解,得到最佳的模型参数值 λ_{new} ,从而达到LCU层更加准确的权重分配。将LCU层优化后的拉格朗日乘子 λ_{new} 代入式(16)可得到当前帧的目标比特 R_p 。

$$R_p = \sum_{i=1}^N T_{B_i} = \sum_{i=1}^N \alpha_{B_i}' \lambda_{\text{new}}^{\beta_{B_i}'} \quad (16)$$

其中, i 和 N 分别表示第 i 个LCU和当前帧所含总LCU的数量; α_{B_i}' 和 β_{B_i}' 由第 i 个LCU的模型参数 C_{B_i} 和 K_{B_i} 求得,其值与视频内容的特性相关。

由于上式除 λ_{new} 以外其余参数都是已知的,因此根据等式求出最佳拉格朗日乘子 λ_{new} 后,通过如下公式对LCU重新进行权重分配:

$$\Omega_{\text{new}B_i} = \alpha_{B_i}' \lambda_{\text{new}}^{\beta_{B_i}'} \quad (17)$$

$$T_{\text{new}B_i} = R_p \times \frac{\Omega_{\text{new}B_i}}{\sum_{i=0}^{N_{\text{lcu}}} \Omega_{\text{new}B_i}} \quad (18)$$

式中, $\Omega_{\text{new}B_i}$ 和 $T_{\text{new}B_i}$ 分别表示代入最佳拉格朗日乘子 λ_{new} 后第 i 个LCU的权重和目标比特; N_{lcu} 表示当前帧LCU的总个数。

根据此 λ 更新思路,在后续的编码过程中,根据编码帧的目标比特和已编码LCU的实际消耗值计算得到当前编码帧的剩余目标比特 R_{left} ,对待编码LCU的权重和目标比特不断进行更新。

$$R_{\text{left}} = R_p - R_{\text{codedLCU}} = \sum_{i=\text{codedLCU}}^N T_{B_i} = \sum_{i=\text{codedLCU}}^N \alpha_{B_i}' \lambda_{\text{updated}}^{\beta_{B_i}'} \quad (19)$$

式中, R_{left} 表示当前编码帧剩余的目标比特; R_{codedLCU} 表示实际已编码LCU所消耗的比特数; λ_{updated} 表示编码过程中待求解的最佳拉格朗日乘子,仍可由式(17)和式(18)对编码帧中待编码LCU重新进行权重分配和目标比特分配。

$$\Omega_{\text{updated}B_i} = \alpha_{B_i}' \lambda_{\text{updated}}^{\beta_{B_i}'} \quad (20)$$

$$T_{\text{updated}B_i} = R_{\text{left}} \times \frac{\Omega_{\text{updated}B_i}}{\sum_{i=0}^{N_{\text{lcu}}} \Omega_{\text{updated}B_i}} \quad (21)$$

式中, $\Omega_{\text{updated}B_i}$ 和 $T_{\text{updated}B_i}$ 分别表示编码过程中更新拉格朗日乘子 λ_{updated} 后重新计算得到的第 i 个LCU的权重和目标比特。编码过程中通过不断地更新 λ 值,对待编码LCU进行权重和目标比特的重新计算,从而达到更加准确的比特分配目的。

2.4 算法整体流程及复杂度分析

本文所提算法分为帧层和LCU层比特控制策略以及模型参数更新,整体算法流程描述如下:

- (1)码率控制参数初始化。
- (2)视频序列I帧的帧内编码。
- (3)根据2.1节得到GOP各帧的GLCM,由GLCM得到各帧经过归一化后的权重值。
- (4)根据步骤(3)所得到的权重值,对同层级各帧进行权重和目标比特重分配。
- (5)求得LCU层最优拉格朗日乘子 λ_{new} 。在编码过程中,根据式(19)~式(21)对待编码的LCU权重和目标比特

不断进行更新。

(6)判断已编码的 GOP 是否为最后一个 GOP,若是则跳转至步骤(7);若不是则跳转至步骤(3)。

(7)视频序列编码完成。

在上述视频编码过程中,为降低生成 GLCM 的时间复杂度,本文对其进行了灰度级压缩,将 256×256 的矩阵压缩至 64×64,减少了计算复杂度。

3 算法性能测试

为验证所提算法的有效性,本文算法在 VTM10.0 上进行了实现。以未开启码率控制为对比基准,测试平台的码率控制算法采用自适应比特分配的方式。选取官方所提供的 B 类测试序列 MarketPlace、RitualDance、Cactus 和 BQTerrace,C 类测试序列 BasketballDrill、BQMall、RaceHorses 和 PartyScene,D 类测试序列 BQSquare、BlowingBubbles、RaceHorses 和 RaceHorses,以及 E 类测试序列 FourPeople、Johnny 和 KristenAndSara。每个测试序列分别在 QP 为 22、27、32 和 37 情况下进行编解码,编码帧数为该序列所有帧数。本文所用电脑配置为 Inter® Core™ i7-9700@3.00 GHz 处理器、16 GB 内存和 64 位操作系统。

3.1 R-D 性能测试

率失真性能是评判码率控制效果的重要指标,BDBR (Bjontegaard Delta Bit Rate)^[15]表示在相同客观质量下,测试算法相对基准算法码率节省百分比。在相同的比较条件下,BDBR 值越小,表示算法的率失真性能越好。本文分别计算出 VTM10.0 自适应码率控制情况下的 BDBR 和本文算法下的 BDBR 值,相减得到的比较值用于评价 RD 性能的提升量。

从表 1 可以看出,相比于自适应码率控制算法,本文算法的 BDBR 值平均改善了 0.86%,有效提升了率失真性能。对于 PartyScene 序列,相对自适应码率控制算法,本文算法的 RD 性能降低了 0.05%,这是因为该序列镜头进行了拉伸,导致 GOP 层同层级帧间相关性下降。对于其他序列,本文算法的率失真性能都优于自适应码率控制下的性能指标。E 类序列的 RD 性能提升最为明显,平均 BDBR 值改善了 2.71%,这是因为对于背景相对固定的场景且图像多为局部变化的视频序列,GOP 层同层级的比特重分配策略会更加准确,从而改善编码帧的质量,提高率失真性能。

3.2 码率相对误差测试

本文采用码率控制精度 Δerror 的对比来评估本文算法的性能。Δerror 越小,表示编码器的实际输出码率越接近目标码率,控制精度越高。Δerror 的计算公式如下, R_{tar} 和 R_{act} 分别表示目标码率与实际码率。

$$\Delta error = \frac{|R_{tar} - R_{act}|}{R_{tar}} \times 100\%$$
 (22)

表 2 是 VTM10.0 自带的自适应比特分配算法和本文算法在 LDP 配置下码率控制精度的对比数据。Δerror 值为测试序列在 4 个不同 QP 值下所得的平均误差值。

表 1 LDP 配置下 BDBR-Y 实验结果

(%)				
分类	序列	VTM10.0 算法	本文算法	比较
Class B	MarketPlace	-10.99	-11.54	-0.55
	RitualDance	0.52	0.46	-0.06
	Cactus	0.60	-0.09	-0.69
	BQTerrace	2.99	1.98	-1.01
	平均	-1.72	-2.30	-0.58
Class C	BasketballDrill	-8.24	-8.72	-0.48
	BQMall	-1.64	-1.87	-0.23
	RaceHorses	0.03	-0.24	-0.27
	PartyScene	-4.44	-4.39	0.05
	平均	-3.57	-3.81	-0.23
Class D	BQSquare	1.84	0.71	-1.13
	BlowingBubbles	-3.06	-3.34	-0.28
	RaceHorses	1.83	1.78	-0.05
	BasketballPass	-4.08	-4.19	-0.11
	平均	-0.87	-1.26	-0.39
Class E	FourPeople	3.48	1.40	-2.08
	Johnny	4.67	0.46	-4.21
	KristenAndSara	1.14	-0.70	-1.84
	平均	3.10	0.39	-2.71
总平均		-1.02	-1.89	-0.86

表 2 LDP 配置下的码率控制精度比较

(%)			
分类	序列	VTM10.0 算法	本文算法
Class B	MarketPlace	0.119	0.117
	RitualDance	0.095	0.095
	Cactus	0.105	0.103
	BQTerrace	0.172	0.170
	平均	0.122	0.121
Class C	BasketballDrill	0.283	0.280
	BQMall	0.306	0.304
	RaceHorses	0.138	0.138
	PartyScene	0.165	0.163
	平均	0.223	0.222
Class D	BQSquare	0.923	0.924
	BlowingBubbles	0.620	0.613
	RaceHorses	0.475	0.463
	BasketballPass	0.538	0.530
	平均	0.639	0.632
Class E	FourPeople	0.583	0.592
	Johnny	1.249	1.264
	KristenAndSara	0.759	0.757
	平均	0.864	0.871
总平均		0.435	0.434

VTM10.0 算法表示平台在自适应设置情况下的码率相对误差结果。由数据分析可知,本文算法总平均码率的相对误差值 Δerror 为 0.434%,码率控制精度优于自适应设置下的 0.435%。对于 E 类中的 FourPeople 和 Johnny 序列,本文算法码率在精度控制上并没有自适应码率控

制得好,这是由于这两个序列镜头比较平稳且仅有局部内容轻微变化,因此导致本文所提算法在 GOP 层中同级图像权重分配计算差别不大。对于 B、C、D 类序列,本文算法的码率控制精度均有提升,说明无论对于 B、C 类高分辨率序列或是 D 类低分辨率序列,本文算法码率控制精度都有所改善。

3.3 主观质量比较

图 2(a)和图 2(b)为 VVC 官方提供的测试序列 Jonny 在 LDP 配置和 QP 值为 37 情况下,采用自适应码率控制和本文算法所得到的第 62 帧解码后的对比图,测试时的目标码率为 75.002 4 kb/s。从图像可以观察到,通过本文算法所得到的人脸特征相比于自适应码率控制算法要更清晰,对右侧衣服进行局部放大之后,采用本文算法解码出来图像仍可观察到衣服上的条纹,本文算法重构出的视频主观质量要优于自适应码率控制算法。



图 2 VVC 官方提供的测试序列 Johnny(1280×720)在 QP=37 下的主观质量对比

4 结论

为了提高 VVC 码率控制算法的编码性能,本文提出了一种基于视频内容相关特征值的码率控制算法。首先通过生成编码帧的灰度共生矩阵,得到能有效反映编码帧纹理复杂度的相关特征值,用这些相关特征值调整 GOP 中同一层图像的目标比特分配;然后基于 R- λ 模型,对 LCU 层的 λ 参数进行重新计算,提高 LCU 层比特分配的精度。通过在 VTM10.0 测试平台上进行实现和性能测试,实验结果表明,本文算法提升了率失真性能和控制精度,视频编码质量有明显改善。下一步将根据 LCU 的纹理复杂度,并结合模型参数估计进行最优比特分配,进一步提升视频编码的比特分配精度,适应更加复杂的应用场景。

参考文献

[1] LI B, LI L, LI H Q, et al. Rate control by R-lambda model for HEVC[S]. Geneva: ITU, 2012.

- [2] 姚路欢,何小海,吴晓红,等.基于梯度的 HEVC 帧内码率控制算法[J].科学技术与工程,2016,16(8):206-211.
- [3] SUN H, ZHANG C, GAO S. LCU-Level bit allocation for rate control in high efficiency video coding[C]//IEEE China Summit & International Conference on Signal & Information Processing. IEEE, 2014.
- [4] GUO H, ZHU C, XU M, et al. Temporal dependency based CTU-level bit allocation for rate control[C]//2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting(BMSB). IEEE, 2019: 1-5.
- [5] 常丹燕,杨静.考虑内容复杂度 HEVC 帧层码率控制优化[J].电讯技术,2020,60(4):455-459.
- [6] 郭红伟,骆洪军,刘帅,等.一种改进的 R- λ 模型码率控制算法[J].计算机科学,2019,46(3):142-147.
- [7] LI B, LI H, LI L. Adaptive bit allocation for R-lambda model rate control in HM[C]//JCTVC M0036, 13th Meeting of Joint Collaborative Team on Video Coding of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC, 2013.
- [8] LI L, LI B, LI H, et al. λ -domain optimal bit allocation algorithm for high efficiency video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 28(1): 130-142.
- [9] GUO H, ZHU C, GAO Y, et al. A frame-level rate control scheme for low delay video coding in HEVC[C]//2017 IEEE 19th International Workshop on Multimedia Signal Processing(MMSP). IEEE, 2017: 1-6.
- [10] 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.
- [11] 孙荣荣.基于灰度共生矩阵相似图的图像质量评价方法[J].计算机应用,2020,40(S1):177-179.
- [12] 郭红伟,刘帅.一种 HEVC 低延时编码码率控制算法[J].计算机应用与软件,2019,36(3):162-167,191.
- [13] 郑秋菊,许鹤.高效率视频编码中基于 R- λ 模型的帧层码率控制优化算法[J].现代信息科技,2018,2(12):59-61.
- [14] LI S, XU M, WANG Z, et al. Optimal bit allocation for CTU level rate control in HEVC[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 27(11): 2409-2424.
- [15] BJONTEGAARD G. Calculation of average PSNR differences between RD-curves[J]. ITU-T VCEG-M33, 2001.

(收稿日期:2021-03-04)

作者简介:

余东航(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:视频编码、码率控制。

李强(1968-),男,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向:音视频信号处理。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所