

一种改进的 R- λ 模型码率控制算法

郭红伟^{1,2} 骆洪军¹ 刘 帅¹ 牛 林¹ 杨 波¹

(红河学院工学院 云南 蒙自 661100)¹ (电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)²

摘 要 码率控制是视频编码系统中的重要模块,用于控制编码器输出特定目标的码率,并使编码视频失真最小。R- λ 模型码率控制方法是新一代视频编码标准 HEVC 中推荐的码率控制算法,其主要包括固定比例比特分配和自适应比率比特分配两种码率控制策略。为了提高 R- λ 模型码率控制算法的码率控制精度和率失真性能,文中提出了相应的算法改进。首先,根据图像组的编码结构设计了精确的率失真模型参数更新方法;其次,根据率失真依赖关系改进了图像组层的比特分配策略;最后,提出动态的图像组层拉格朗日乘子和编码帧比特权重计算方法。实验结果显示,所提方法在低延迟 P 帧和 B 帧配置下,码率相对误差仅为 0.006% 和 0.005%,相比自适应比率比特分配码率控制策略,改进方法的率失真性能提高了 1.2% 和 1.3%。

关键词 视频编码,码率控制,R- λ 模型,比特分配,HEVC

中图分类号 TN919.8 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.03.021

Improved R- λ Model Based Rate Control Algorithm

GUO Hong-wei^{1,2} LUO Hong-jun¹ LIU Shuai¹ NIU Lin¹ YANG Bo¹

(School of Engineering, Honghe University, Mengzi, Yunnan 661100, China)¹

(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)²

Abstract Rate control is an important module in video coding systems, which makes an encoder output specific bit rates, and minimizes the distortion of encoded videos. The R- λ model based rate control is recommended in high efficiency video coding (HEVC) international video coding standard, which mainly includes two schemes, i. e., the fixed ratio bit allocation and the adaptive ratio bit allocation. In order to improve both the accuracy of rate control and the rate-distortion (R-D) performance, this paper proposed an improved R- λ model based rate control algorithm. Firstly, an accurate R-D model update method is designed according to the coding structure of group of picture (GOP). Secondly, the GOP-level bit allocation scheme is improved according to the relationship of R-D dependency. Finally, the calculation formulas of the dynamic Lagrange multiplier at GOP-level and the dynamic bit weight for the frame to be encoded are proposed. Experimental results demonstrate that the bit rate relative errors of the proposed method are only about 0.006% and 0.005%, and achieves average 1.2% and 1.3% R-D performance gains compared with the adaptive ratio bit allocation scheme under the low delay configuration of P and B frames, respectively.

Keywords Video coding, Rate control, R- λ model, Bit allocation, HEVC

1 引言

在视频编码的研究过程中,通常是事先设定量化参数(Quantization Parameter, QP)进行编码,通过输出码流的分析对各种编码工具和编码优化技术进行定量分析和比较。但在实际应用中,要根据存储设备可提供的存储空间、传输信道可提供的传输带宽以及传输延迟的限制等设定编码器的输出码率,因此实际应用中的编码器必须包含码率控制模块。每一代视频编码标准的制定过程中都推荐了相应的码率控制算

法集成在其测试模型中^[1],如 MPEG-2 的 TM5、H. 263 的 TMN8、MPEG-4 的 VM8 和 H. 264 的 JM。码率控制不属于编码标准的一部分,相对于标准规定好的帧内预测和帧间预测等技术具有更大的灵活性,实际中可以针对不同的应用场景来调整码率控制的策略,但应用中的码率控制多数还是在标准推荐的码率控制算法的基础上发展而来的。

高效视频编码(High Efficiency Video Coding, HEVC)^[2]标准制定过程中主要推荐了两种码率控制算法,即 URQ (Unified Rate-Quantization)模型^[3]码率控制算法和 R- λ 模型^[4]

收稿日期:2018-07-06 返修日期:2018-09-30 本文受国家自然科学基金(41761079,61463013)、云南省教育厅科学研究基金(2018JS475)资助。
郭红伟(1980-),男,博士生,副教授,CCF 高级会员,主要研究方向为视频编码与通信、图像处理;骆洪军(1981-),男,硕士,讲师,主要研究方向为视频编码与通信;刘 帅(1979-),男,博士,教授,主要研究方向为信号处理、三维建模, E-mail: liushuai_csu@126.com(通信作者);牛 林(1967-),女,硕士,教授,主要研究方向为信号处理;杨 波(1977-),男,硕士,副教授,主要研究方向为视频编码。

码率控制算法。URQ 模型是最早被采纳进 HEVC 通用测试软件 HM 的码率控制算法。与 H. 264 推荐的码率控制类似, URQ 模型码率控制算法利用已有带宽、帧率、编码结构、图像组(Group of Pictures, GOP)大小等相关参数确定各个 GOP、帧、最大编码单元(Largest Coding Unit, LCU)的目标比特数,然后通过 URQ 模型计算编码帧或 LCU 级的量化参数 QP 进行编码。该算法的最终效果不太理想,通常编码后的码率与给定的目标码率之间误差较大,且编码视频的质量明显下降。李斌等通过大量实验数据拟合发现双曲模型最适合描述 HEVC 标准的率失真(Rate-Distortion, R-D)特性,并基于双曲模型提出全新的 Lambda 域码率控制算法,其在码率控制精度和编码性能上较 URQ 模型码率控制都有较大提高。HEVC 标准正式发布后,针对 HEVC 标准实际应用的优化和码率控制持续成为研究关注的重点,且已有许多改进的码率控制算法被提出。文献[5-6]通过预编码确定 R-λ 模型参数,提高了码率控制精度和编码视频质量,但编码复杂度有所增加;文献[7]报道了基于 R-λ 模型的 Intra 帧码率控制;为了减小因码率控制引起的输出视频质量波动,文献[8-10]提出恒定视频质量的码率控制;为了在满足码率控制精度的同时获取尽可能高的编码视频质量,文献[11]在 R-λ 模型码率控制框架上提出自适应的比特分配方法。目前,测试软件 HM 中集成的码率控制算法是文献[4]的固定比例比特分配和文献[11]的自适应比例比特分配两种方法。相比于 URQ 模型码率控制,R-λ 模型码率控制获得了更高的码率控制精度和更好的率失真性能。然而,相比于不开启码率控制的分级固定 QP 编码器^[12],文献[4]和文献[11]报道的 R-λ 模型码率控制算法仍然具有率失真性能损失,码率控制方法的率失真性能仍然具有进一步提高的空间。

为了改善码率控制算法的率失真性能,通过分析 HEVC 的低延时编码结构和率失真特性,文中在 R-λ 模型码率控制框架下提出了新的 R-λ 模型参数更新方法,并改进了 GOP 层和帧层比特分配策略。实验结果显示,改进的算法在码率控制精度和率失真性能两方面均优于文献[4]和文献[11]的方法,即使与不开启码率控制的分级固定 QP 编码器相比,在低延时 B 帧(Low-Delay B, LDB)和低延时 P 帧(Low-Delay P, LDP)配置下,改进方法也节省了 0.6% 和 1.1% 的码率(BDBR)。

2 R-λ 模型码率控制算法

码率控制的目的是在精确达到目标码率的同时尽可能改善编码视频的质量,其主要分为两个步骤,即比特分配和比特控制。比特分配过程通常是依据目标码率和视频序列特性为每一个 GOP、帧和基本单元分配适当的目标比特数;比特控制过程是根据目标比特数,利用率失真模型计算量化参数或拉格朗日乘子进行编码,使编码器输出每一个基本单元、帧和 GOP 的比特数尽可能等于预先分配的目标比特。

2.1 R-λ 模型

视频编码中,量化参数 QP 直接决定预测残差的编码比特数,是影响编码器输出码率的主要参数。编码同一视频序

列时,QP 设置得越大,输出码率越小;QP 设置得越小,输出码率越大。然而,由于 HEVC 采用灵活的四叉树编码单元(Coding Unit, CU)和变换单元(Transform Unit, TU)划分结构及其他越来越复杂的编码工具,码流中模式和运动等非残差信息所占比特的开销越来越大,而量化仅对残差信息有效,因此在 HEVC 中建立 QP 与码率 R 的模型进行比特控制不够精确。根据视频编码的率失真优化理论,拉格朗日乘子 λ 是编码视频率失真曲线上某一点的切线斜率的绝对值。理论上,每一个拉格朗日乘子唯一地对应一组码率和失真,能极好地控制编码比特。

文献[4]提出,在 HEVC 编码标准中,双曲函数形式的率失真函数能较好地描述编码器率失真特性,即:

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

其中,D 是编码失真,用均方误差(Mean Square Error, MSE)表示;R 是编码比特,用每像素消耗比特(bit per pixel, bpp)表示;C 和 K 是与序列特性相关的模型参数。如前文所述,拉格朗日乘子 λ 是 R-D 曲线的斜率的绝对值:

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

其中,α 和 β 的初始值设为 3.200 3 和 -1.367。在编码过程中,每编码完一个 LCU 或一帧后,利用编码信息进行参数更新,更新公式为:

$$\lambda_{\text{comp}} = \alpha_{\text{old}} \cdot R_{\text{real}}^{\beta_{\text{old}}} \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{new}} = \alpha_{\text{old}} + \delta_\alpha \times (\ln \lambda_{\text{real}} - \ln \lambda_{\text{comp}}) \times \alpha_{\text{old}} \quad (4)$$

$$\beta_{\text{new}} = \beta_{\text{old}} + \delta_\beta \times (\ln \lambda_{\text{real}} - \ln \lambda_{\text{comp}}) \times \ln R_{\text{real}} \quad (5)$$

其中,带下标 real 的量表示编码中实际的拉格朗日乘子和编码比特,更详细的推导和介绍可参考文献[4]。在编码过程中,获得拉格朗日乘子 λ 后,包括量化参数 QP 在内的其他编码参数可采用拉格朗日优化法确定。然而,多 QP 编码将使编码复杂度成倍增加,文献[13]通过大量实验统计拟合出 λ 与最佳 QP 的关系,从而避免多 QP 优化的多次编码,其计算公式为:

$$QP = 4.2005 \times \ln \lambda + 13.7122 \quad (6)$$

2.2 比特分配

比特分配过程是根据目标码率 R_{tar} 、帧率 FR、编码帧数等信息为 GOP 层、帧层和基本单元层分配目标比特,公式表示为:

$$R_{\text{PicAvg}} = \frac{R_{\text{tar}}}{FR} \quad (7)$$

$$T_{\text{GOP}} = \frac{R_{\text{PicAvg}} \times (N_{\text{coded}} + SW) - R_{\text{coded}}}{SW} \times N_{\text{GOP}} \quad (8)$$

$$T_{\text{Pic}} = \frac{T_{\text{GOP}} - Coded_{\text{GOP}}}{\sum_{\text{(AllNotCodedPics)}} \omega_{\text{Pic}}} \times \omega_{\text{PicCurr}} \quad (9)$$

$$T_{\text{LCU}} = \frac{T_{\text{Pic}} - Bit_{\text{H}} - Coded_{\text{Pic}}}{\sum_{\text{(AllNotCodedLCUs)}} \omega_{\text{LCU}}} \times \omega_{\text{LCUCurr}} \quad (10)$$

其中, R_{PicAvg} 是整个序列平均每帧的比特数; T_{GOP} , T_{Pic} , T_{LCU} 分别是分配给待编码 GOP、编码帧、编码单元的目标比特数;SW 是平滑比特分配的滑动窗;Coded 表示编码已消耗的比特数; Bit_{H} 表示编码帧的头信息; ω 表示编码帧或 LCU 的比特分配权重。

2.2.1 固定比例比特分配

根据 HEVC 采用的参考帧选择策略和帧层分级编码结构^[14],文献[4]提出固定比例比特分配方法。在低延时(LDB和LDP)配置下,GOP中各帧的比特分配权重的取值如表1所列。

表1 LD配置下 ω_{Pic} 的取值

Table 1 Values of ω_{Pic} under low delay configuration

帧序号 POC	bpp			
	(0,0.05]	(0.05,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,+\infty)
f_{4n+1}	2	2	2	2
f_{4n+2}	3	3	3	3
f_{4n+3}	2	2	2	2
f_{4n+4}	14	12	10	6

编码帧中,每一个LCU的比特分配权重由预估的复杂度决定。

2.2.2 自适应比例比特分配

由于视频序列内容连续变化,文献[11]提出自适应比例比特分配方法,即用预估的R- λ 模型参数和层级信息动态确定GOP中各帧的比特分配权重,计算公式为:

$$\omega_{Pic} = \left(\frac{a_i}{\varphi_i \lambda_g}\right)^{b_i}, i=1,2,3,4 \quad (11)$$

其中, a_i 和 b_i 与R-D模型参数有关, φ_i 与编码帧所属的层级有关, λ_g 是GOP层的拉格朗日乘子。

编码帧中,每一个LCU的比特分配权重由帧层的拉格朗日乘子和LCU的R-D模型参数确定。

3 算法改进

3.1 R-D模型参数更新

码率控制过程中,随着编码帧参考结构及内容的变化,式(1)中的R-D模型参数(C和K)也发生变化。针对在编码下一帧前无法确定其确切的率失真关系的问题,文献[4]和文献[11]的R- λ 模型参数采用与待编码帧属于同一层级且最邻近的已编码帧信息通过式(4)和式(5)进行估算,该参数更新方法只利用了已编码帧的实际编码比特 R_{real} 和拉格朗日乘子 λ_{real} ,其参数更新的收敛速度和准确度均不够理想,从而影响了比特分配和比特控制的精确性。另外,其编码完一个GOP后只能估算出下一个GOP中帧序号(Picture Order Count, POC)为 f_{4m+1} , f_{4m+2} 和 f_{4m+4} 的R-D模型参数,待 f_{4m+1} 编码完成后才能得到 f_{4m+3} 的参数。

事实上,编码一帧后,可以得到编码帧的实际编码比特 R_{real} 、拉格朗日乘子 λ_{real} 和编码失真 D_{real} ,把这些信息代入式(1)和式(2)可直接求解率失真模型参数 C_{new} 和 K_{new} 。

$$C_{new} = \frac{D_{real}}{R_{real}^{-\lambda_{real}} \cdot R_{real} / D_{real}} \quad (12)$$

$$K_{new} = \frac{\lambda_{real} \cdot R_{real}}{D_{real}} \quad (13)$$

然后,R- λ 模型参数可表示为:

$$\alpha_{new} = C_{new} \cdot K_{new} \quad (14)$$

$$\beta_{new} = -K_{new} - 1 \quad (15)$$

HEVC的低延时编码结构中,序列的起始帧编码为I帧,且被当成一个单独的GOP。如图1所示,随后帧编码为B/P帧,每4帧为一个GOP,帧的层级(Layer,L)为L3,L2,L3,L1。层级为L1的帧称为关键帧,将被后序4个GOP中的多帧参考,编码中会分配较多比特;层级为L2和L3的帧一般只被其后一帧作为参考帧,编码中分配相对较少的比特。为充分去除时域冗余,待编码帧使用前一帧及与其时域最邻近的3个关键帧作为参考帧。以图1中POC为 $n+5$ 和 $n+7$ 的编码帧为例,两帧位于同一个GOP中,层级均为L3,但两帧选择的参考帧在编码质量和时域距离上不同,因此使用POC为 $n+5$ 的已编码帧信息估计POC为 $n+7$ 的待编码帧的R-D模型参数并不恰当。事实上,相邻两个GOP中对应位置的编码帧具有完全一致的参考帧选择策略,使用前一GOP的已编码帧信息通过式(12)和式(13)计算得到后一GOP对应位置待编码帧的R-D模型参数将更加合理。文中提出的R-D模型参数更新方法不仅更加精确,而且编码完一个GOP后,下一个GOP中4帧的R-D模型参数也都能获得。

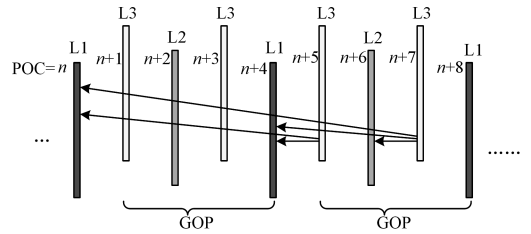


图1 低延时编码结构

Fig.1 Coding structure of low delay

3.2 GOP层比特分配

编码刚开始时由于可参考的已编码帧数不足4帧,起始帧后的第一个GOP中层级为L2和L3的帧将会被作为参考帧3次,第二个GOP中层级为L2和L3的帧则会被作为参考帧2次,之后的GOP中层级为L2和L3的帧才只被作为参考帧1次。因此,从时域率失真依赖性角度考虑,前两个GOP具有高质量的编码帧将有助于改善后续帧的编码效率,从而提高编码视频的率失真性能。另外,在编码起始阶段,编码端缓存器饱和度从零逐渐增长^[15],在达到稳定状态后才要求编码器输出相对稳定的平均码率。

起始帧通常采用较小的量化参数,而且只能编码为I帧,使编码起始帧消耗比特数是编码视频帧级平均比特数的好几倍。式(8)的GOP层比特分配将使得前几个GOP的目标比特减少,导致其中的编码帧质量降低,最终影响了整个编码视频的率失真性能。本文中,GOP层比特分配的公式为:

$$\hat{R}_{PicAvg} = \frac{R_{tar}}{FR} \times \frac{N_{total} - Coded_{First}}{N_{total} - 1} \quad (16)$$

$$T_{GOP} = \frac{\hat{R}_{PicAvg} \times ((N_{coded} - 1) + SW) - (R_{coded} - Coded_{First})}{SW} \times N_{GOP} \quad (17)$$

其中, N_{total} 是编码视频序列的总帧数, $Coded_{First}$ 是编码起始帧消耗的实际比特数。式(16)表示编码起始帧后重新计算剩余

序列平均每帧的比特数,其作用是将起始帧消耗的过多比特的影响分配到整个视频序列,从而适当提高前几个 GOP 的目标比特数,以改善其编码帧的质量。式(17)的 GOP 层比特分配方法类似于式(8),采用滑动窗 SW 平滑 GOP 的目标比特数,其中 $SW = \min\{40, N_{Left}\}$, N_{Left} 是视频序列剩余的未编码帧数。

3.3 帧层比特分配

文献[11]在 R-λ 模型和 R-D 模型框架下得出帧级拉格朗日乘子 λ_p 与 GOP 级拉格朗日乘子 λ_g 的关系为 $\lambda_p = \varphi_p \lambda_g$, φ_p 表示当前编码帧失真传播到后续帧的影响程度。在 GOP 目标比特数约束下,结合 R-λ 模型得到式(18)。自适应比例比特分配方法通过求解式(18)获得 GOP 级拉格朗日乘子 λ_g 。由于文献[11]的 R-λ 模型中,在编码完成一个 GOP 后,只能估计出下一个 GOP 中第 1,2,4 帧的 R-λ 模型参数,因此在式(18)中第 3 帧的模型参数采用第 1 帧的模型参数近似。求解式(18)后,把 λ_g 代入式(11)计算待编码 GOP 中各帧的比特分配权重,其计算的一个 GOP 中第 1 帧和第 3 帧的比特权重总是相等的。

$$\sum_{i=1}^{N_G} \left(\frac{a_i}{\varphi_{Pi} \lambda_g} \right)^{b_i} \cdot M = T_{GOP} \quad (18)$$

其中, N_G 是 GOP 中包含的编码帧数, M 是一帧内的像素数,

$\left(\frac{a_i}{\varphi_{Pi} \lambda_g} \right)^{b_i} \cdot M$ 表示 GOP 中第 i 帧的预估编码比特。

如 3.1 节所述,采用本文改进的 R-D 模型参数更新新方法,编码完一个 GOP 后,下一个 GOP 中 4 帧的 R-D 模型参数全都能被估计得到,将其代入式(18)和式(11)后能够获得更合理的帧级比特分配结果。然而,实际编码过程中,编码完 GOP 中的第 1 帧后,由于编码帧实际消耗比特数与目标分配比特数之间存在误差,使得由式(18)计算的 GOP 级拉格朗日乘子不再有效。改进措施为:首先,采用 3.1 节的 R-D 模型参数更新方法获得下一个 GOP 中所有帧的 R-λ 模型参数,并将其代入式(18)求解;然后,在编码 GOP 中的第 2 帧之前利用式(19)重新计算 GOP 级拉格朗日乘子,并计算 GOP 中第 2,3,4 帧的最优比特分配权重。

$$\sum_{i=2}^{N_G} \left(\frac{a_i}{\varphi_{Pi} \lambda_g} \right)^{b_i} \cdot M = T_{GOP} - Coded_1 \quad (19)$$

其中, $Coded_1$ 表示编码第 1 帧实际消耗的比特数。与此类似,编码 GOP 中第 3 帧前利用式(20)重新计算 GOP 级拉格朗日乘子,并计算 GOP 中第 3,4 帧的最优比特分配权重。

$$\sum_{i=3}^{N_G} \left(\frac{a_i}{\varphi_{Pi} \lambda_g} \right)^{b_i} \cdot M = T_{GOP} - (Coded_1 + Coded_2) \quad (20)$$

其中,等号右侧的表达式是当前 GOP 中剩余的可用比特数。如上所述的 GOP 中动态的编码帧比特分配权重调整使帧层比特分配更加合理,一定程度上改善了编码率失真性能,同时提高了码率控制精度。

3.4 整体算法流程及复杂度分析

与大多数码率控制方法一样,改进算法采用分层的比特控制策略,即 GOP 层、帧层和 LCU 层。算法流程描述为:

1)码率控制参数初始化。

2)编码视频序列起始帧。

3)根据式(16)和式(17)进行 GOP 层比特分配,并初始化 GOP 层参数。

4)采用 3.3 节的方法计算 GOP 级拉格朗日乘子,并进行帧层比特分配。

5)采用文献[11]的方法进行 LCU 层比特分配,编码当前帧中的 LCU,并更新 LCU 层 R-λ 模型参数。

6)采用 3.1 节的方法更新帧层 R-λ 模型参数,判断已编码帧是否是 GOP 中的最后一帧,若不是则跳转至步骤 4);若是则跳转至步骤 7)。

7)判断已编码 GOP 是否是视频序列中的最后一个 GOP,若不是则跳转至步骤 3);若是则转至步骤 8)。

8)编码结束。

从算法流程可见,本文算法的运算主要是比特分配、参数更新所涉及的普通计算,与编码器中耗时的模式选择过程相比,运算量可以忽略,因此所提算法并未增加编码器的计算复杂度。

表 2 测试序列的特征

Table 2 Characteristics of test sequences

分类	视频数	分辨率	帧率	帧数
Class B	5	1920×1080	24 & 50 & 60	240 & 500 & 600
Class C	4	832×480	30 & 50 & 60	300 & 500 & 600
Class D	4	416×240	30 & 50 & 60	300 & 500 & 600
Class E	3	1280×720	60	600

4 实验验证

为验证本文方法的有效性,将所提的 R-D 模型参数更新、GOP 层比特分配、帧层比特分配集成到 HEVC 参考软件 HM16.7 的码率控制中,LCU 层的比特分配未做调整,与文献[11]一致。实验数据选用 HEVC 通用测试条件^[16]建议的 ClassB,ClassC,ClassD,ClassE 中的全部 16 个视频序列,编码器配置分别为 LDP 和 LDB。参考软件 HM16.7 在不开启码率控制的情况下,固定量化参数 QP 为 37,32,27,22 时编码各测试序列,每个被编码测试序列输出从低到高的 4 个码率作为码率控制实验的目标码率。实验中用于比较的算法是文献[4]的固定比例比特分配和文献[11]的自适应比例比特分配,分别记为 FixRio^[4]和 AdaRio^[11]。需要说明的是,上述两种算法已经被集成到参考软件 HM16.7 中。实验中采用的 4 类视频序列特征如表 2 所列,编码器配置文件分别是“encoder_lowdelay_P_main.cfg”和“encoder_lowdelay_main.cfg”,具体参数配置如表 3 所列。

表 3 编码器的关键参数配置

Table 3 Key parameters of encoder

参数名	配置	参数名	配置
GOPSize	4	RateControl	1
CTUSize	64×64	KeepHierarchicalBit	1 or 2
MaxPartitionDepth	4	LCULevelRateControl	1
IntraPeriod	-1	RCForceIntraQP	0

4.1 码率控制精度对比

用码率相对误差 R_{Err} 描述码率控制精确度, 定义为:

$$R_{Err} = \frac{|R_{tar} - R_{act}|}{R_{tar}} \times 100\% \quad (21)$$

式中, R_{tar} 是目标码率, R_{act} 是实际输出码率, R_{Err} 越小, 表示码率控制精确性越好。表 4 列出了每个测试序列在 4 个目标码率下的平均码率的相对误差, 数据显示, 改进算法在 LDP 和 LDB 配置下, 对全部测试序列的平均码率相对误差为 0.006% 和 0.005%, 其码率控制精度远高于文献 [4] 和文献 [11] 的方法。其中, Class B 和 Class C 的平均码率相对误差仅为 0.003%; 尽管 Class D 的平均码率相对误差略高, 分别为 0.011% 和 0.007%, 但其精度仍然远好于其他两种对比方法。

本文改进算法未对 LCU 层的比特分配和码率控制策略进行调整。然而, 提出的 R-D 模型参数更新方法提高了帧级 R- λ 模型的精度, 其结合动态帧层比特分配调整, 使每一帧的比特分配更加合理, 最终提高了码率控制精度。

表 4 3 种码率控制算法的性能比较

Table 4 Performance comparison of three rate control algorithms

(单位: %)

分类	序列	FixRio ^[4]				AdaRio ^[11]				改进算法			
		LDP		LDB		LDP		LDB		LDP		LDB	
		$BDBR$	R_{Err}	$BDBR$	R_{Err}	$BDBR$	R_{Err}	$BDBR$	R_{Err}	$BDBR$	R_{Err}	$BDBR$	R_{Err}
Class B	Kimono	11.3	0.011	11.5	0.009	6.6	0.013	6.5	0.003	3.9	0.003	3.9	0.000
	ParkScene	2.4	0.022	2.7	0.028	1.7	0.006	2.1	0.009	1.4	0.008	1.7	0.010
	Cactus	-2.7	0.002	-1.1	0.005	-2.2	0.002	-1.2	0.006	-3.0	0.002	-1.9	0.001
	BasketballDrive	6.8	0.003	8.4	0.001	3.2	0.003	3.5	0.001	3.8	0.002	4.2	0.001
	BQTerrace	3.9	0.002	7.1	0.002	4.5	0.003	7.1	0.003	4.5	0.001	6.4	0.001
	平均	4.3	0.008	5.7	0.009	2.8	0.005	3.6	0.005	2.1	0.003	2.9	0.003
Class C	BasketballDrill	-5.9	0.021	-5.9	0.029	-5.9	0.012	-5.5	0.011	-5.9	0.005	-5.6	0.004
	BQMall	-1.6	0.002	-1.4	0.002	-1.8	0.002	-1.7	0.002	-1.5	0.002	-1.2	0.002
	PartyScene	-1.3	0.004	-1.2	0.003	-2.3	0.004	-2.4	0.003	-2.6	0.002	-2.6	0.002
	RaceHorses	1.5	0.003	2.7	0.035	-1.4	0.002	-0.2	0.015	-1.1	0.002	0.1	0.007
	平均	-1.8	0.007	-1.5	0.017	-2.8	0.005	-2.5	0.008	-2.8	0.003	-2.3	0.003
Class D	BasketballPass	-2.7	0.224	-2.5	0.218	-4.8	0.260	-4.9	0.261	-4.6	0.023	-4.8	0.008
	BQSquare	5.4	0.007	7.9	0.005	1.1	0.012	2.3	0.015	0.4	0.004	1.6	0.003
	BlowingBubbles	0.9	0.009	0.6	0.008	-1.7	0.013	-2.1	0.011	-1.8	0.007	-2.3	0.009
	RaceHorses	1.2	0.005	1.9	0.009	0.6	0.008	0.8	0.006	0.8	0.009	1.0	0.007
平均	1.2	0.061	2.0	0.060	-1.2	0.073	-1.0	0.073	-1.3	0.011	-1.1	0.007	
Class E	FourPeople	2.3	0.007	2.8	0.003	1.2	0.006	1.7	0.006	-3.0	0.002	-3.0	0.001
	Johnny	5.9	0.004	8.1	0.001	3.0	0.001	4.9	0.002	-2.4	0.002	-1.4	0.001
	KristenAndSara	0.4	0.027	0.9	0.031	-0.8	0.025	0.0	0.019	-6.2	0.021	-5.5	0.020
	平均	2.9	0.013	4.0	0.012	1.1	0.011	2.2	0.009	-3.9	0.008	-3.3	0.007
总平均	1.7	0.022	2.7	0.024	0.1	0.023	0.7	0.023	-1.1	0.006	-0.6	0.005	

对于绝大多数测试序列, 所提改进算法的率失真性能优于其他两种方法的率失真性能, 总平均 $BDBR$ 在 LDP 和 LDB 下分别为 -1.1% 和 -0.6%, 此性能提升甚至已经优于 HEVC 分级固定 QP 的方法。特别地, 改进算法对 Class E 序列的性能提升最大, 其主要原因是该类视频序列是背景相对固定的场景, 本文的 GOP 层比特分配策略提高了视频前几个 GOP 中编码帧的质量, 从而为后续编码提供了较好的参考重建帧, 最终改善了整个编码视频的率失真性能。

另外, 图 2 和图 3 分别给出了 LDP 编码配置下, 测试序列“FourPeople”和“Johnny”的 R-D 曲线对比。为了清楚地显示 R-D 的性能差异, 矩形框内给出了 R-D 曲线放大 10 倍的

4.2 率失真性能对比

码率控制的目标是使编码器的输出码率尽可能等于目标码率, 同时最小化编码视频失真, 因此率失真性能是评价码率控制的另一重要性能指标。本实验以不开启码率控制的 HM16.7 为基准, 分别计算 3 种测试算法的 $BDBR$ (Bjontegaard Delta Bit Rate)^[17]。BDBR 表示在同样的客观质量下, 测试算法相对于基准算法的码率节省百分比, 若其值为负则表示性能增益, 值为正则表示性能损失。在相同比较基准下, 测试算法的 $BDBR$ 值越小, 其率失真性能越好。表 4 列出了 3 种方法相对于 HM16.7 基准的 $BDBR$, 数据显示, 自适应比率比特分配方法在 LDP 和 LDB 配置下的总平均 $BDBR$ 值分别为 0.1% 和 0.7%, 低于固定比率比特分配方法的 1.7% 和 2.7%。但是, 以上两种方法的率失真性能都差于 HEVC 分级固定 QP 的方法 (即不开启码率控制的 HM16.7 编码器) 的率失真性能。

效果, 从中也可看到所提算法对 R-D 性能的提升。

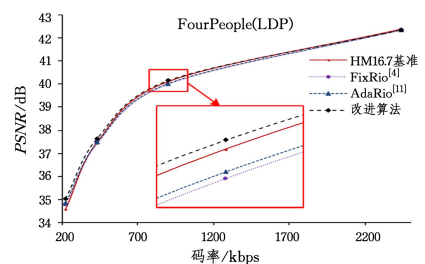


图 2 FourPeople(720p) 测试序列的率失真曲线
Fig. 2 Comparison of rate-distortion curves of FourPeople(720p)

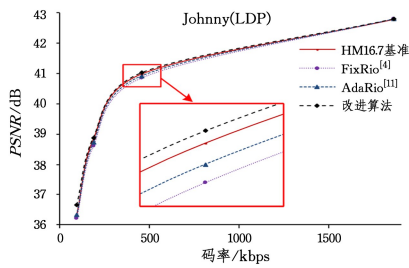


图3 Johnny(720p)测试序列的率失真曲线

Fig. 3 Comparison of rate-distortion curves of Johnny(720p)

结束语 码率控制作为视频编码控制中的重要环节,是编码器不可缺少的组成部分,合理有效的码率控制方法能够在保证视频质量的同时提高信道的利用率或满足存储需求。文中对 HEVC 推荐的 R- λ 模型码率控制算法进行了分析,并对 R-D 模型参数更新、GOP 层和帧层比特分配方法提出改进。实验结果证明,所提改进算法在码率控制精确性和率失真性能两个方面都优于 HEVC 中推荐的两种码率控制策略。若进一步优化和改进 LCU 层的模型参数估计及最优比特分配,将能进一步提高编码器的率失真性能。

参考文献

- [1] GUO H W, ZHU C, ZHOU Y M. Recent advances on rate control for HEVC[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 30(2): 199-209. (in Chinese)
郭红伟,朱策,周益民. HEVC 码率控制技术的研究进展[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018, 30(2): 199-209.
- [2] SULLIVAN G J, OHM J R, HAN W J, et al. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1649-1668.
- [3] CHOI H, YOO J, NAM J, et al. Pixel-Wise Unified Rate-Quantization Model for Multi-Level Rate Control [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2013, 7(6): 1112-1123.
- [4] LI B, LI H Q, 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.
- [5] ZUPANCIC I, NACCARI M, MRAK M, et al. Two-Pass Rate Control for Improved Quality of Experience in UHDTV Delivery [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(1): 167-179.
- [6] WEN J T, FANG M Y, TANG M H, et al. R-lambda Model Based Improved Rate Control for HEVC with Pre-Encoding [C]// Data Compression Conference (DCC). Snowbird, UT, USA, 2015: 53-62.
- [7] WANG M H, NGAN K N, LI H L. An Efficient Frame-Content Based Intra Frame Rate Control for High Efficiency Video Coding [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(7): 896-900.
- [8] WANG M H, NGAN K N, LI H L. Low-Delay Rate Control for Consistent Quality Using Distortion-Based Lagrange Multiplier [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(7): 2943-2955.
- [9] SEO C W, MOON J H, HAN J K. Rate Control for Consistent Objective Quality in High Efficiency Video Coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(6): 2442-2454.
- [10] YANG S H, VO P B. Adaptive Bit Allocation for Consistent Video Quality in Scalable High-Efficiency Video Coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017, 27(7): 1555-1567.
- [11] 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, 2018, 28(1): 130-142.
- [12] KIM I, MCCANN K, SUGIMOTO K, et al. High Efficiency Video Coding (HEVC) Test Model 11 (HM11) Encoder Description [C]// Document JCTVC-M1002. Incheon, KR, 2013.
- [13] LI B, XU J Z, ZHANG D, et al. QP Refinement According to Lagrange Multiplier for High Efficiency Video Coding [C]// International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Beijing, China: IEEE, 2013: 477-480.
- [14] LI H Q, LI B, XU J Z. Rate-Distortion Optimized Reference Picture Management for High Efficiency Video Coding [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1844-1857.
- [15] HUANG T Y, JOHARI R, MCKEOWN N, et al. A Buffer-Based Approach to Rate Adaptation: Evidence from a Large Video Streaming Service [J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2014, 44(4): 187-198.
- [16] BOSSEN F. Common Test Conditions and Software Reference Configurations [C]// Document JCTVC-L1100. Geneva, Switzerland, 2013.
- [17] BJONTEGAARD G. Calculation of average PSNR difference between RDcurves [C]// Document VCEG-M33. Austin, Texas, USA, 2001.