

# 基于失真反向传播的时域依赖率失真优化

郭红伟<sup>1,2</sup>, 朱策<sup>2</sup>, 杨栩<sup>3,4</sup>, 罗雷<sup>2,3</sup>

(1. 红河学院工学院, 云南 蒙自 661100; 2. 电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 611731;  
3. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 4. 成都师范学院物理与工程技术学院, 四川 成都 611130)

**摘要:** 率失真优化是基于块的混合视频编码器中一项关键技术, 然而广泛采用的独立率失真优化远未取得最优编码性能。为提升高效视频编码的率失真性能, 提出了一种时域依赖率失真优化算法。首先, 采用指数形式率失真函数, 推导出时域失真传播因子的计算式; 然后, 通过预编码获得编码失真和运动补偿预测误差, 并采用失真反向传播估算时域失真传播因子; 最后, 自适应地调节编码树单元的拉格朗日乘子和量化参数, 以优化编码比特资源分配。实验结果显示, 在低时延编码配置下, 相比于高效视频编码的率失真优化算法, 所提算法在获得同等重建视频质量的前提下, 将所有测试视频码率平均节省 4.4%, BasketballDrill 序列码率最高节省 13.0%。

**关键词:** 高效视频编码; 率失真优化; 率失真依赖; 失真传播模型; 自适应拉格朗日乘子

中图分类号: TN919.8

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022230

## Temporal dependent rate-distortion optimization based on distortion backward propagation

GUO Hongwei<sup>1,2</sup>, ZHU Ce<sup>2</sup>, YANG Xu<sup>3,4</sup>, LUO Lei<sup>2,3</sup>

1. School of Engineering, Honghe University, Mengzi 661100, China

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

3. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

4. School of Physics and Engineering Technology, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China

**Abstract:** Rate-distortion optimization (RDO) is a crucial technique in block based hybrid video encoders. However, the widely used independent RDO is far from obtaining optimal coding performance. To improve the rate-distortion (R-D) performance of high efficiency video coding (HEVC), a temporal dependent RDO algorithm was proposed. Firstly, the formula to calculate temporal distortion propagation factor was derived by using an exponential R-D function. Then, the coding distortion and motion compensation predicted error were obtained by pre-encoding, and the temporal distortion propagation factor was estimated by using distortion backward propagation. Finally, the Lagrange multiplier and quantization parameter of coding tree unit were adaptively adjusted to optimize bit resources allocation. Experimental results show that compared with the original RDO method in HEVC under the low-delay configuration, the proposed algorithm achieves an average 4.4% bit rate reduction for all test sequences, and up to 13.0% bit rate reduction for test sequence BasketballDrill, at the same reconstructed video quality.

**Keywords:** HEVC, rate-distortion optimization, rate-distortion dependency, distortion propagation model, adaptive Lagrange multiplier

收稿日期: 2022-06-12; 修回日期: 2022-10-31

通信作者: 朱策, eczhu@uestc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62061015, No.62020106011, No.U19A2052); 云南省基础研究计划基金资助项目 (No.202101AT070051, No.202001BA070001-098); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才基金资助项目 (No.202205AC160055)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62061015, No.62020106011, No.U19A2052), The Yunnan Fundamental Research Project (No.202101AT070051, No.202001BA070001-098), The Reserve Talents for Yunnan Young and Middle-aged Academic and Technical Leader (No.202205AC160055)

## 0 引言

随着互联网和多媒体信息处理技术的发展, 视频数据量呈爆发式增长。为了降低视频存储和传输成本, 近 30 年来, 工业界联合学术界推出了多个视频编码标准, 例如, 高级视频编码(AVC, advanced video coding) H.264/AVC<sup>[1]</sup>、高效视频编码(HEVC, high efficiency video coding) H.265/HEVC<sup>[2]</sup>和通用视频编码(VVC, versatile video coding) H.266/VVC<sup>[3]</sup>等。数字视频中包含空间、时间、视觉和信息熵等多种信息冗余, 为了去除上述冗余实现高效数据压缩, 当前视频编码标准采用基于块的混合编码框架, 包括预测、变换、量化和熵编码等模块。视频编码过程中, 输入视频序列被分级划分为许多子任务, 例如, 图像组(GoP, group of picture)、编码帧和基本编码单元。H.264 中的基本编码单元是宏块(MB, macro block), HEVC 和 VVC 中的基本编码单元是编码树单元(CTU, coding tree unit)。在各种标准的视频编码器中, 采用基于拉格朗日乘子的率失真优化(RDO, rate-distortion optimization)方法为一个基本编码单元选择最佳编码模式以达到最优的率失真性能。

为了进一步提升编码器率失真性能, 近年来一些文献研究视频编码过程中的率失真依赖关系, 提出多种依赖 RDO 方法。针对 H.264 帧内编码, 文献[4]通过调整  $4 \times 4$  像素块的率失真代价运算方式改善下边界和右边界像素的编码质量, 一定程度地改善了编码性能。针对 HEVC 编码器, 文献[5]通过分析帧内预测时编码单元之间的模式选择空域依赖性, 提出对垂直方向上的 2 个编码单元进行联合优化, 该方法以增加数倍编码运算复杂度为代价实现了大约 0.7% 的率失真性能提升。文献[6]对文献[5]方法进行了降低复杂度优化, 使运算复杂度降低到原始 HEVC 编码器的  $\frac{5}{7}$ , 同时提升率失真性能。优化帧内预测编码带来的压缩性能提升有限, 而且相应的运算复杂度增加较大, 因此针对空域依赖 RDO 的方法相对较少。

针对 HEVC 的分级固定量化参数(QP, quantization parameter)设置, 文献[7-10]提出了低时延编码配置下的自适应 QP 级联(QPC, QP cascading)方法, 其根据视频内容变化动态地设置编码帧的 QP。类似地, 文献[11-13]提出随机接入配置下的 QPC 方法。这些方法根据帧间率失真依赖关系自适

应调整 GoP 中视频帧的编码 QP, 然后一帧内所有 CTU 均采用相同的 QP 进行编码。文献[14]采用原始视频帧作为参考, 通过预编码估算时域失真传播, 提出 CTU 级的自适应 QP 设置, 获得了比帧级 QPC 方法更高的率失真性能。

文献[15]通过分析信源失真在 H.264 视频编码中的时域传播, 建立信源失真时域扩散模型, 自适应地调节 MB 的拉格朗日乘子, 获得了非常显著的率失真性能提升。文献[16]和文献[17]把上述信源失真时域扩散模型扩展到 HEVC 的低时延和随机接入编码结构, 同样提升了率失真性能。文献[18]在高码率条件下假设下认为参考像素的编码失真不影响后续编码单元的失真而是影响码率, 通过考虑当前编码单元失真对后续编码单元码率的增量, 提出自适应拉格朗日乘子和 QP 选择方法。上述方法均需要缓存后续待编码帧以建立时域传播链。文献[19]提出只考虑失真直接传播的自适应拉格朗日乘子选择方法, 其不需要缓存后续待编码帧, 但率失真性能低于文献[16]方法。此外, 文献[20-22]把率失真依赖关系应用到 HEVC 码率控制<sup>[23]</sup>的帧级和 CTU 级最优比特分配, 改善了码率控制下的率失真性能。针对 HEVC 码率控制方法感知率失真性能较低的问题, 文献[24]提出了一种视频主观观测实验启发的感知帧内码率控制方法。

不同于上述基于预分析的自适应 QPC 或自适应拉格朗日乘子选择算法, 本文提出一种基于失真反向传播模型的时域依赖 RDO 算法, 该算法在编码当前帧时不需要缓存后续待编码帧。本文的主要研究工作如下。

1) 根据指数形式率失真函数, 推导出时域失真传播因子可表示为编码失真除以运动补偿预测误差。为避免缓存后续帧进行预分析, 采用失真反向传播模型近似真实的失真前向传播。解决了编码块时域传播因子估算问题。

2) 分析了 HEVC 低时延分级编码结构下的 QP 和拉格朗日乘子设置, 根据  $16 \times 16$  像素块的时域传播因子确定 CTU 的权重系数, 结合帧级拉格朗日乘子确定自适应的 CTU 级拉格朗日乘子和 QP, 实现编码比特资源分配优化。

3) 实验结果表明, 在低时延 B 帧(LDB, low delay B-frame)和低时延 P 帧(LDP, low delay P-frame)编码器配置下, 相比于 HEVC 基准编码器, 本文算法分别获得了平均 4.4%、4.3%和最高 13.0%的码率节省, 在调节 I 帧 QP 后, 平均码率节

省可进一步提高到 6.4%。

### 1 时域依赖 RDO

RDO 技术贯穿于整个视频编码过程,其目标是在有限码率条件下最小化编码视频失真<sup>[25]</sup>,可描述为一个约束优化问题,即

$$\begin{aligned} & \min_{\{R_i\}_{i=1}^N} \sum_{i=1}^N D_i \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N R_i \leq R_T \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $D_i$  和  $R_i$  分别是第  $i$  个编码单元的失真和码率;  $N$  是总的编码单元数;  $R_T$  是总共可用的码率预算。

通过引入拉格朗日乘子,式(1)的约束优化问题可以被转换为

$$\begin{aligned} & \min_{\{o_i\}_{i=1}^N} \{J\} \\ & J = \sum_{i=1}^N D_i + \lambda_g \sum_{i=1}^N R_i \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $J$  是全局率失真代价函数;  $o_i$  是第  $i$  个编码单元的编码模式选择;  $\lambda_g$  是全局拉格朗日乘子,较小的  $\lambda_g$  失真较小但码率消耗较多,反之则失真较大而码率消耗较少。实际上,由于编码单元之间存在率失真依赖关系,式(2)所示的最小化问题在视频编码中难以实现。通常地,视频编码过程中假设编码单元之间相互独立,对每一个编码单元单独进行优化,表示为

$$\begin{aligned} & \min_{\{o_i\}} \{J_i\} \\ & J_i = D_i + \lambda_i R_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $J_i$  是第  $i$  个编码单元的率失真代价函数;  $\lambda_i$  是第  $i$  个编码单元进行模式选择采用的拉格朗日乘子。这种编码单元独立的假设使基于拉格朗日乘子的 RDO 方法易于在编码端实现,但该独立优化不能使视频编码达到最优的率失真性能。

事实上,为了使式(2)所示的全局率失真代价函数  $J$  最小,可令  $J$  对第  $n$  个编码单元失真的一阶导数为零,表示为

$$\frac{\partial \left( \sum_{i=1}^N D_i + \lambda_g \sum_{i=1}^N R_i \right)}{\partial D_n} = 0, n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

这里的编码单元表示 HEVC 中独立进行编码模式选择的 CTU。由于帧内预测、运动矢量预测和基于上下文的熵编码等,一帧内相邻 CTU 之间存在编码决策依赖,但文献[4-6]的研究表明,这种编

码决策依赖所引起的空域率失真依赖性较小。对于帧间预测,当前块的编码质量会显著地影响后续参考块编码单元的压缩性能。文献[15]分析表明,编码单元码率仅由它自己的编码选择决定,而编码单元失真与参考块编码质量相关性很强。

为了验证上述对视频编码过程中空域和时域率失真依赖性的描述,设计了以下实验。首先用原始 HEVC 测试模型 (HM, HEVC-test model) 在低时延 P 帧编码配置下编码如图 1(a)所示的测试序列 Basketball Pass (416 像素×240 像素),编码器输入 QP 分别采用 22、27、32 和 37,根据第 2 帧的 4 个码率点得到图 1(c)中实线所示的率失真曲线。其中,  $D(\text{MSE})$  表示使用均方误差 (MSE, mean square error) 描述失真。为观察帧间编码中参考帧编码质量变化对编码帧的率失真特性影响,修改 HM 使第 1 帧的 QP 比原始设置小 5,其他编码工具和编码结构均不做任何改变。用修改后的 HM 编码测试序列再次得到第 2 帧的率失真曲线如图 1(c)中虚线所示。从图 1(c)中可知,改善第 1 帧编码质量后,第 2 帧的率失真曲线明显下移。此外,如图 1(b)所示,把测试序列的第 1 帧划分为 2 个区域,第 1 个~第 22 个 CTU 作为第 1 个区域,第 23 个~第 28 个 CTU 作为第 2 个区域。采用原始 HM 编码后,统计第 2 个区域的 4 个码率点得到图 1(d)中实线所示的率失真曲线。为观察第 1 个区域的编码质量变化对第 2 个区域的率失真特性影响,修改 HM 使第 1 个区域中 CTU 的 QP 值比原始设置小 5,第 2 个区域中 CTU 的编码方式不做任何改变。用修改后的 HM 编码测试序列第 1 帧再次得到第 2 个区域的率失真曲线如图 1(d)中虚线所示。从图 1(d)中可知,改善第 1 个区域编码质量后,第 2 个区域的率失真特性没有明显变化。

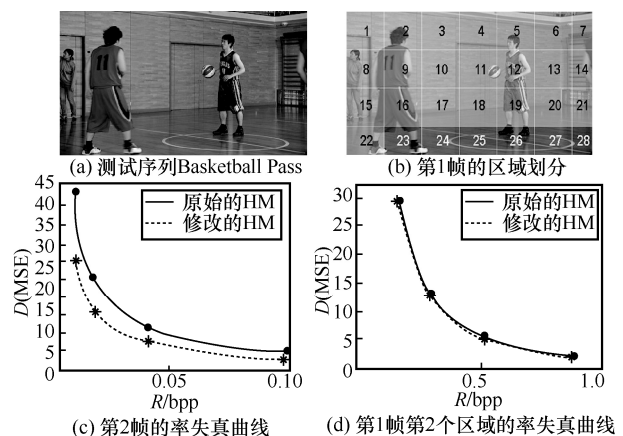


图 1 率失真依赖性

基于上述分析, 式(4)左侧的码率求和项对  $D_n$  的一阶导数可写为

$$\frac{\partial \left( \sum_{i=1}^N R_i \right)}{\partial D_n} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R_i}{\partial D_n} \right) = \frac{\partial R_n}{\partial D_n} = -\frac{1}{\lambda_n} \quad (5)$$

其中,  $\lambda_n$  是 HEVC 编码 CTU 所采用的拉格朗日乘子。在编码器中, CTU 按顺序被编码, 在编码第  $n$  个 CTU 时, 前面的第 1 个~第  $n-1$  个 CTU 已经编码结束, 它们产生的码率和失真已经确定, 即  $D_1 \sim D_{n-1}$  为常量。因此, 式(4)左侧失真求和项对  $D_n$  的一阶导数可表示为

$$\frac{\partial \left( \sum_{i=1}^N D_i \right)}{\partial D_n} = 1 + \frac{\partial \left( \sum_{i=n+1}^N D_i \right)}{\partial D_n} \quad (6)$$

把式(5)和式(6)代入式(4), 整理得到

$$\lambda_n = \frac{\lambda_g}{1 + \frac{\partial \left( \sum_{i=n+1}^N D_i \right)}{\partial D_n}} \triangleq \frac{\lambda_g}{1 + k_n}, \quad n=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中,  $k_n$  表示第  $n$  个 CTU 编码失真变化引起后续直接和间接参考它的编码单元总失真变化率, 称为时域失真传播因子。时域依赖 RDO 通常采用式(7)的拉格朗日乘子调节 CTU 的编码优化目标, 以改善率失真性能。

对于时域失真传播因子的估计, 文献[15]针对 H.264 中的 IPPP 编码结构, 首先在原始视频帧中通过前向运动搜索建立如图 2 所示的时域传播链, 从而确定被当前编码块失真直接和间接影响的后续像素块; 然后提出信源失真时域扩散模型计算时域失真传播因子。由于 HEVC 采用具有多参考帧的分级编码结构, 当前 CTU 编码失真具有多条传播路径, 使时域传播因子估计变得非常困难。针对 HEVC 低时延分级编码结构, 文献[16]通过统计关键帧和非关键帧在编码过程中被参考的概率, 建立具有多分支的时域传播链, 从而把信源失真时域扩散模型扩展到 HEVC 低时延分级编码结构中。

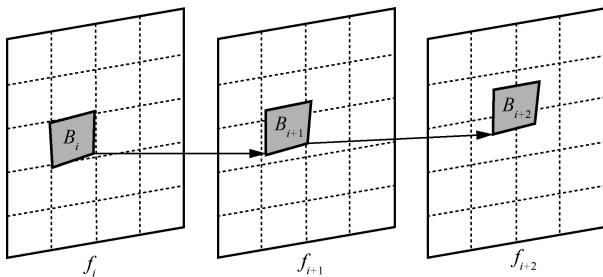


图 2 时域传播链

## 2 基于失真传播模型的依赖 RDO 算法

### 2.1 时域失真传播因子

根据式(7), 时域失真传播因子表示为

$$k_n = \frac{\partial \left( \sum_{i=n+1}^N D_i \right)}{\partial D_n} \quad (8)$$

式(8)涉及失真变化量, 因此视频编码过程中难以直接采用式(8)计算传播因子。

视频编码中, 在高码率条件下, 编码码率和失真之间的关系可表示为<sup>[15]</sup>

$$D_{n+1} = e^{-bR_{n+1}} D_{n+1}^{\text{MCP}} \quad (9)$$

其中,  $b$  是一个与运动补偿预测残差分布有关的常量;  $R_{n+1}$  是编码码率, 其大小主要由当前编码采用的 QP 和拉格朗日乘子决定, 令  $\eta_{n+1} = e^{-bR_{n+1}}$ , 它是一个与参考块失真不相关的项;  $D_{n+1}^{\text{MCP}}$  是运动补偿预测 (MCP, motion compensation prediction) 误差, 可以表示为

$$\begin{aligned} D_{n+1}^{\text{MCP}} &= \|B_{n+1} - B_n^C\|^2 = \\ &= \|B_{n+1} - B_n + B_n - B_n^C\|^2 = \\ &= \|B_{n+1} - B_n\|^2 + \|B_n - B_n^C\|^2 + 2\|B_{n+1} - B_n\| \cdot \|B_n - B_n^C\| = \\ &= D_{n+1}^{\text{OMCP}} + D_n + 2\|B_{n+1} - B_n\| \cdot \|B_n - B_n^C\| \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $\|\cdot\|$  是 2 范数运算符;  $B_{n+1}$ 、 $B_n^C$  和  $B_n$  分别是当前编码像素块、重建参考像素块和原始参考像素块;  $D_n = \|B_n - B_n^C\|^2$  是重建参考像素块的失真;  $D_{n+1}^{\text{OMCP}} = \|B_{n+1} - B_n\|^2$  是原运动补偿预测 (OMCP, original MCP) 误差, 表示采用原始参考像素块进行帧间运动补偿, 因此  $D_{n+1}^{\text{OMCP}}$  与重建参考像素块的失真不相关。另外,  $\|B_{n+1} - B_n\|$  和  $\|B_n - B_n^C\|$  可以看作 2 种残差, 它们之间互不相关。对式(10)右侧第 3 项求数学期望可表示为

$$\begin{aligned} &E\left(2\|B_{n+1} - B_n\| \cdot \|B_n - B_n^C\|\right) = \\ &2E\left(\|B_{n+1} - B_n\|\right)E\left(\|B_n - B_n^C\|\right) \end{aligned} \quad (11)$$

由于运动补偿预测残差通常服从在零点具有较大峰值的拉普拉斯分布, 残差项  $\|B_{n+1} - B_n\|$  和  $\|B_n - B_n^C\|$  可以认为近似服从均值为零的拉普拉斯分布, 因此有

$$E(\|B_{n+1} - B_n\|)E(\|B_n - B_n^c\|) = 0 \quad (12)$$

根据式(12),  $\|B_{n+1} - B_n\| \cdot \|B_n - B_n^c\|$  的大小也应该接近于零。因此, 式(10)中的 MCP 误差可近似表示为

$$D_{n+1}^{MCP} \approx D_{n+1}^{OMCP} + D_n \quad (13)$$

把式(13)代入式(9), 得到

$$D_{n+1} = e^{-bR_{n+1}} D_{n+1}^{MCP} = \eta_{n+1} (D_{n+1}^{OMCP} + D_n) = \eta_{n+1} D_n + C_{n+1} \quad (14)$$

其中,  $C_{n+1} = \eta_{n+1} D_{n+1}^{OMCP}$  是与重建参考像素失真  $D_n$  不相关的项。因此,  $D_{n+1}$  被分解成与  $D_n$  相关的项  $\eta_{n+1} D_n$  加上与  $D_n$  不相关的项  $C_{n+1}$ 。类似地, 时域传播链上后一像素块的编码失真  $D_{n+2}$  可表示为

$$\begin{aligned} D_{n+2} &= \eta_{n+2} (D_{n+2}^{OMCP} + D_{n+1}) = \\ &= \eta_{n+2} (D_{n+2}^{OMCP} + \eta_{n+1} D_n + C_{n+1}) = \\ &= \eta_{n+2} \eta_{n+1} D_n + \eta_{n+2} (D_{n+2}^{OMCP} + C_{n+1}) \triangleq \\ &= \eta_{n+2} \eta_{n+1} D_n + C_{n+2} \end{aligned} \quad (15)$$

同理, 式(15)中的  $C_{n+2}$  也是与时域传播链上原始参考像素块  $B_n$  的编码失真  $D_n$  不相关的项。式(8)中  $D_i$  表示时域传播链上受  $D_n$  影响的后续帧中相应像素块编码失真, 其下标  $i=n+1, n+2, \dots, N$ 。这里的  $N$  表示以  $B_n$  为起始块的时域传播链上最后一个像素块的序号。由式(15)可写出  $D_i$  的通式为

$$D_i = \eta_i \eta_{i-1} \dots \eta_{n+1} D_n + C_i = \prod_{t=n+1}^i \eta_t D_n + C_i \quad (16)$$

把式(16)代入式(8)得到时域失真传播因子为

$$k_n = \frac{\partial \left( \sum_{i=n+1}^N \left( \prod_{t=n+1}^i \eta_t D_n + C_i \right) \right)}{\partial D_n} = \sum_{i=n+1}^N \prod_{t=n+1}^i \eta_t \quad (17)$$

此外, 根据式(9)得到  $\eta_i$  为

$$\eta_i = \frac{D_i}{D_i^{MCP}} \quad (18)$$

因此, 不需要获得失真变化量, 由时域传播链上各像素块的编码失真和 MCP 误差即可计算时域传播因子。

## 2.2 算法实现

根据式(17)和式(18)计算时域传播因子需要提前编码后续帧以获得编码失真和 MCP 误差, 而实时视频通信在编码当前帧时, 后续帧的图像还没有

采集。因此, 本文算法采用失真后向传播来近似计算时域失真传播因子, 具体步骤描述如下。

### 1) 计算 16×16 像素块的时域传播因子

在 HEVC 中, CTU 的大小为 64×64 像素块, 根据视频内容特性 CTU 会被划分为 32×32 像素块、32×16 像素块或 16×16 像素块等更小的预测单元 (PU, prediction unit) 进行预测编码。因此, 帧间预测中的重建参考像素块可能具有上述不同的形状和大小。本文在算法 1 的基础上测试了以 32×32 像素块和 16×16 像素块为单元计算时域传播因子, 结果显示采用 16×16 像素块能获得更好、更稳定的率失真性能。例如, 在低时延 P 帧编码配置下, 对于视频 ParkScene 和 BQTerrace, 采用 16×16 像素块的算法 1 获得了 5.5% 和 1.1% 的率失真性能提升; 而采用 32×32 像素块的算法 1 对视频 ParkScene 只获得了 4.2% 的率失真性能提升, 对视频 BQTerrace 甚至遭受了 2.2% 的率失真性能损失。这是因为对于场景和纹理较复杂的视频, 编码器趋向于选择较小的预测单元编码, 这时采用 32×32 像素块计算的时域传播因子不够准确。因此, 出于率失真性能和算法稳健性考虑, 本文最终选择以 16×16 像素块为单元计算时域传播因子。为了获得 16×16 像素块 MCP 误差和编码失真, 首先对当前帧进行一次预编码。预编码过程采用 HEVC 原有的固定 QP 设置, 通过检测 64×64 像素块、32×32 像素块和 16×16 像素块这 3 种帧间模式减少预编码时间。预编码后, 当前帧中第  $j$  个 16×16 像素块的时域传播因子由式(19)计算得到。

$$k_{t,j} = \frac{D_{t,j}}{D_{t,j}^{MCP}} + \frac{D_{t,j}}{D_{t,j}^{MCP}} \frac{D_{t-1,j}}{D_{t-1,j}^{MCP}} + \frac{D_{t,j}}{D_{t,j}^{MCP}} \frac{D_{t-1,j}}{D_{t-1,j}^{MCP}} \frac{D_{t-2,j}}{D_{t-2,j}^{MCP}} \quad (19)$$

其中, 下标  $t$  表示当前帧是第  $t$  帧,  $D_{t,j}$  和  $D_{t,j}^{MCP}$  表示当前帧中 16×16 像素块的编码失真和 MCP 误差;  $D_{t-1,j}$ 、 $D_{t-2,j}$ 、 $D_{t-1,j}^{MCP}$  和  $D_{t-2,j}^{MCP}$  是先前 2 帧, 即第  $t-1$  帧和第  $t-2$  帧中对应位置 16×16 像素块的编码失真和 MCP 误差。式(19)采用反向操作近似帧间预测中的直接和间接失真传播, 由于视频中图像运动具有连续性, 该反向传播模型能有效估算大多数像素块的时域失真传播因子。但是反向传播与真实的失真前向传播之间的误差随着时域距离的增加而增大, 因此本文算法设置反向传播长度为 3, 实验部分进一步分析和讨论了该长度的设置。

## 2) 计算 CTU 的权重系数

根据式(19)得到当前编码帧中  $16 \times 16$  像素块的时域传播因子。然后结合式(7)引入 CTU 的拉格朗日乘子权重系数为

$$W_m = \frac{1}{L_m \sum_{j=1}^{L_m} (1+k_{t,j})} = \frac{L_m}{\sum_{j=1}^{L_m} (1+k_{t,j})} \quad (20)$$

其中,  $W_m$  是第  $m$  个 CTU 的拉格朗日乘子权重系数;  $L_m$  是第  $m$  个 CTU 中包含的  $16 \times 16$  像素块个数, 一般情况下,  $L_m=16$ 。但由于一些视频序列的空间分辨率不是 64 的整数倍, 在这些视频帧的右边界和下边界处 CTU 中包含的  $16 \times 16$  像素块个数少于 16。

## 3) 自适应拉格朗日乘子和 QP

HEVC 采用分级编码结构, 低时延配置下, 一个 GoP 包含 4 帧图像, 其层级分别为 3、2、3 和 1, 默认编码帧的 QP 设置为

$$QP = QP_0 + QP_{\text{Offset}} \quad (21)$$

其中,  $QP_0$  是编码器的输入 QP;  $QP_{\text{Offset}}$  是编码帧所属的层级。此外, 编码帧的拉格朗日乘子为

$$\lambda_F = \omega_L 2^{\frac{QP-12}{3}} \quad (22)$$

其中,  $\omega_L$  是一个与编码帧所属层级和 QP 大小有关的权重系数, 层级越小,  $\omega_L$  的值越小, 计算得到的拉格朗日乘子也越小。式(22)一定程度地考虑了帧级别的时域率失真依赖关系, 其倾向于把层级低的帧编码得更好, 以减小当前编码失真对后续帧编码失真的影响。

本文算法中, CTU 级拉格朗日乘子由式(22)的帧级拉格朗日乘子和式(20)的拉格朗日乘子权重系数确定。由于式(20)中权重系数总是小于 1, 为了保持当前帧的总体优化目标不变, 采用式(23)和式(24)重新调整 CTU 级拉格朗日乘子权重系数, 使其均值为 1。

$$\bar{W} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M W_m \quad (23)$$

$$\widetilde{W}_m = \frac{W_m}{\bar{W}}, \quad m=1, 2, \dots, M \quad (24)$$

其中,  $M$  是一帧中包含的 CTU 个数。式(24)表示的 CTU 级拉格朗日乘子权重系数均值为 1, 其中具有较大时域传播因子的 CTU 权重系数小于 1, 而具有较小时域传播因子的 CTU 权重系数大于 1。

最终, 当前帧中用于编码各个 CTU 的自适应拉格朗日乘子为

$$\lambda_m = \widetilde{W}_m \lambda_F, \quad m=1, 2, \dots, M \quad (25)$$

由于编码每个 CTU 采用了不同的拉格朗日乘子, CTU 的 QP 也应该进行相应调整, 采用文献[26]中拟合的  $\lambda$ -QP 可得

$$QP_m = 4.2005 \ln(\lambda_m) + 13.7122, \quad m=1, 2, \dots, M \quad (26)$$

由式(25)和式(26)得到 CTU 级自适应的拉格朗日乘子和 QP, 然后对当前帧进行编码。为便于对本文算法的理解, 算法 1 用伪代码描述了本文算法的具体实现过程。

**算法 1** 基于失真反向传播的时域依赖率失真优化

输入 当前待编码帧

输出 CTU 级自适应的拉格朗日乘子  $\lambda_m$  和量化参数  $QP_m$

1)  $QP \leftarrow QP_0 + QP_{\text{Offset}}$

2)  $\lambda_F \leftarrow \omega_L 2^{\frac{QP-12}{3}}$

3) 采用 QP 和  $\lambda_F$  预编码当前待编码帧

4) for  $j=1$  to  $N_{16 \times 16}$  do

5)  $k_{t,j} \leftarrow \frac{D_{t,j}}{D_{t,j}^{\text{MCP}}} + \frac{D_{t,j}}{D_{t,j}^{\text{MCP}}} \frac{D_{t-1,j}}{D_{t-1,j}^{\text{MCP}}} + \frac{D_{t,j}}{D_{t,j}^{\text{MCP}}} \frac{D_{t-1,j}}{D_{t-1,j}^{\text{MCP}}}$

$\frac{D_{t-2,j}}{D_{t-2,j}^{\text{MCP}}}$

6)  $W_{\text{sum}} \leftarrow 0$

7) for  $m=1$  to  $M$  do

8)  $W_m \leftarrow \frac{L_m}{\sum_{j=1}^{L_m} (1+k_{t,j})}$

9)  $W_{\text{sum}} \leftarrow W_{\text{sum}} + W_m$

10)  $\bar{W} \leftarrow \frac{W_{\text{sum}}}{M}$

11) for  $m=1$  to  $M$  do

12)  $\widetilde{W}_m \leftarrow \frac{W_m}{\bar{W}}$

13)  $\lambda_m \leftarrow \widetilde{W}_m \lambda_F$

14)  $QP_m \leftarrow 4.2005 \ln(\lambda_m) + 13.7122$

## 3 实验结果

### 3.1 实验设置

为了验证所提时域依赖 RDO 算法的有效性, 把本文算法集成到 HEVC 参考软件 HM16.7。与其他大多数视频编码优化算法一样, 本文算法通过优化编码比特资源分配来提升编码器率失真性能, 不会改变

HEVC 码流句法结构，不需要改动解码器。测试实验中，编码器采用 LDB 和 LDP 分级编码结构，对应的编码器配置文件分别是“encoder\_lowdelay\_main.cfg”和“encoder\_lowdelay\_P\_main.cfg”，参数配置采用上述 2 个文件中的默认设置。测试序列为通用测试条件（CTC, common test condition）<sup>[27]</sup>对 LDB 和 LDP 配置建议的 Class B、Class C、Class D、Class E 和 Class F 中全部 20 个视频，包括了从 416 像素×240 像素到 1920 像素×1080 像素不同分辨率、帧率和场景内容的原始 YUV 序列。每个视频序列依据 CTC 测试输入 QP 为 22、27、32 和 37 的 4 个码率点。

对比算法包括文献[9]、文献[10]、文献[16]、文献[18]和文献[19]的算法。其中，文献[9]算法使视频序列起始 I 帧的 QP 值降低 5，即编码器输入 QP 为

32，则 I 帧 QP 为 27。由于 I 帧编码质量对整个视频序列编码影响很大，为了公平比较，本节除了测试上述算法 1 描述的本文算法外，还测试了在算法 1 基础上直接对 I 帧 QP 值减小 5 以后的算法，命名为本文算法+调节 I 帧。另外，本节也测试了算法 1 中只调节 CTU 的拉格朗日乘子的情况，即不执行算法 1 的步骤 14)，命名为本文算法-调节 QP。

### 3.2 率失真性能对比

为了全面客观地呈现本文算法和其他算法的率失真性能，采用 BD-Rate（Bjontegaard Delta rate）作为评价指标。BD-Rate 表示在相同客观质量下，测试方法相对于基准编码器的码率节省百分比，正值表示率失真性能损失，负值表示率失真性能改善，本文中的客观质量用压缩视频亮度分量的峰值信噪

表 1 不同算法相对于 HEVC 基准编码器的 BD-Rate 对比

Class	序列	文献[9]算法		文献[10]算法		文献[16]算法		文献[18]算法		文献[19]算法		本文算法- 调节 QP		本文算法		本文算法+ 调节 I 帧	
		LDB	LDP	LDB	LDP	LDB	LDP	LDB	LDP	LDB	LDP	LDB	LDP	LDB	LDP	LDB	LDP
B	BasketballDrive	-1.2%	-1.2%	0.5%	0.6%	-3.7%	-4.1%	-3.4%	-3.3%	-1.8%	-1.5%	-0.9%	-0.1%	-2.9%	-2.1%	-2.7%	-1.8%
	BQTerrace	2.7%	3.6%	3.8%	2.9%	0.0%	-1.6%	-0.3%	-2.9%	-1.2%	-1.2%	0.0%	0.0%	-0.5%	-1.1%	-0.5%	-1.3%
	Cactus	-6.8%	-6.5%	1.4%	2.8%	-3.2%	-3.8%	-3.5%	-3.6%	-2.3%	-1.9%	-2.3%	-0.9%	-4.5%	-3.6%	-7.8%	-6.9%
	Kimono	-2.8%	-3.1%	1.2%	1.2%	-0.9%	-1.8%	-2.6%	-2.9%	-0.8%	-0.9%	-0.4%	-0.5%	-3.1%	-3.4%	-2.0%	-2.3%
	ParkScene	-2.7%	-2.8%	0.7%	1.0%	-4.0%	-4.0%	-4.4%	-4.2%	-2.7%	-2.5%	-3.9%	-3.4%	-6.0%	-5.5%	-6.4%	-6.1%
C	BasketballDrill	-5.6%	-5.8%	-4.0%	-4.1%	-8.4%	-9.1%	-9.6%	-9.6%	-4.6%	-4.3%	-8.6%	-7.6%	-13.0%	-12.1%	-15.0%	-14.4%
	BQMall	-2.3%	-2.4%	-0.5%	-0.5%	-2.8%	-2.8%	-3.9%	-3.8%	-1.5%	-1.2%	-1.6%	-0.9%	-3.4%	-2.8%	-3.5%	-3.0%
	PartyScene	-4.5%	-4.4%	-1.2%	-1.3%	-2.6%	-2.9%	-2.7%	-2.8%	-2.9%	-2.3%	-4.7%	-3.3%	-6.7%	-5.7%	-7.4%	-6.5%
	RaceHorses (WVGA)	0.4%	0.5%	0.6%	0.6%	0.0%	-0.3%	-1.6%	-2.3%	0.7%	0.8%	3.0%	3.4%	2.0%	1.9%	2.4%	2.4%
D	BasketballPass	-3.4%	-3.5%	-1.4%	-1.3%	-4.5%	-4.6%	-4.3%	-4.3%	-1.5%	-1.4%	-1.7%	-1.5%	-5.0%	-4.6%	-6.2%	-5.8%
	BlowingBubbles	-3.9%	-3.8%	-2.3%	-2.2%	-2.6%	-2.9%	-3.8%	-3.7%	-1.3%	-1.0%	-1.9%	-1.3%	-3.3%	-3.1%	-3.3%	-3.1%
	BQSquare	-2.5%	-2.6%	-3.4%	-3.9%	0.6%	-0.3%	0.7%	-0.9%	0.0%	-0.2%	0.4%	0.3%	0.2%	-0.9%	-1.5%	-2.5%
E	RaceHorses (WQVGA)	-0.5%	-0.5%	0.3%	0.3%	-1.3%	-1.3%	-1.7%	-1.8%	-0.4%	-0.3%	-0.1%	0.3%	-1.9%	-1.7%	-1.4%	-1.3%
	FourPeople	-12.9%	-13.6%	-12.0%	-12.3%	-7.7%	-8.6%	-7.3%	-7.8%	-3.7%	-3.8%	-7.0%	-6.7%	-9.5%	-9.7%	-18.1%	-18.3%
	Johnny	-9.5%	-10.4%	-8.0%	-8.3%	-2.4%	-3.2%	-5.5%	-6.3%	-1.9%	-1.7%	-3.3%	-3.4%	-4.4%	-4.9%	-12.1%	-13.0%
F	KristenAndSara	-14.2%	-14.6%	-10.1%	-10.5%	-4.1%	-4.4%	-5.7%	-6.2%	-2.9%	-3.1%	-5.3%	-5.7%	-6.8%	-7.4%	-17.1%	-18.4%
	Basketball DrillText	-5.7%	-6.0%	-4.5%	-4.7%	-6.7%	-7.2%	-7.8%	-7.9%	-4.1%	-3.8%	-7.2%	-6.3%	-11.0%	-10.4%	-13.5%	-13.2%
	ChinaSpeed	-7.1%	-7.2%	-6.1%	-6.1%	-2.7%	-2.9%	-3.2%	-3.5%	-1.1%	-1.1%	-1.3%	-1.4%	-3.0%	-3.0%	-8.3%	-8.4%
	SlideEditing	-1.7%	-0.7%	0.1%	-1.0%	-0.6%	-0.2%	-1.0%	-0.6%	0.6%	0.4%	1.8%	2.2%	1.4%	1.4%	0.7%	0.7%
平均值	SlideShow	-12.9%	-13.3%	0.2%	0.3%	-6.4%	-6.6%	-7.1%	-7.4%	-1.4%	-1.5%	-3.2%	-3.1%	-5.9%	-6.6%	-5.0%	-5.4%
	Class B	-2.2%	-2.0%	1.5%	1.7%	-2.4%	-3.0%	-2.8%	-3.4%	-1.8%	-1.6%	-1.5%	-1.0%	-3.4%	-3.1%	-3.9%	-3.7%
	Class C	-3.0%	-3.0%	-1.3%	-1.3%	-3.5%	-3.8%	-4.5%	-4.6%	-2.1%	-1.8%	-3.0%	-2.1%	-5.3%	-4.7%	-5.9%	-5.4%
	Class D	-2.6%	-2.6%	-1.7	-1.8%	-2.0%	-2.3%	-2.3%	-2.7%	-0.8%	-0.7%	-0.8%	-0.6%	-2.5%	-2.6%	-3.1%	-3.2%
	Class E	-12.2%	-12.9%	-10.0%	-10.4%	-4.7%	-5.4%	-6.2%	-6.8%	-2.8%	-2.9%	-5.2%	-5.3%	-6.9%	-7.4%	-15.8%	-16.6%
Class F	-6.8%	-6.8%	-2.6%	-2.8%	-4.1%	-4.2%	-4.8%	-4.8%	-1.5%	-1.5%	-2.5%	-2.1%	-4.6%	-4.7%	-6.5%	-6.6%	
总平均 BD-Rate		-4.9%	-4.9%	-2.2%	-2.3%	-3.2%	-3.6%	-3.9%	-4.3%	-1.8%	-1.7%	-2.4%	-2.0%	-4.4%	-4.3%	-6.4%	-6.4%

比 (PSNR, peak signal-to-noise ratio) 度量。实验对比中, 把原始未修改过的 HEVC 参考软件 HM 作为基准编码器。表 1 列出了 LDB 和 LDP 编码配置下, 文献[9]、文献[10]、文献[16]、文献[18]、文献[19] 和本文 3 种算法相对于 HEVC 基准编码器的 BD-Rate。文献[9]的自适应 QPC 算法降低了 I 帧 QP 编码, 其获得相对较高的率失真性能提升, 在 LDB 和 LDP 编码配置下都达到平均 4.9% 的码率节省。文献[10]是针对监控视频的自适应 QPC 算法, 其对监控视频编码获得较高的率失真性能提升, 但对于 CTC 测试序列, 在 LDB 和 LDP 编码配置下只有平均 2.2% 和 2.3% 的码率节省。文献[16]通过建立失真时域传播链估算块间率失真依赖, 从而自适应调节 CTU 的拉格朗日乘子和 QP, 在 LDB 和 LDP 编码配置下分别获得平均 3.2% 和 3.6% 的码率节省。文献[18]通过估计编码失真对后续编码单元的码率增量, 自适应选择拉格朗日乘子和 QP, 在 LDB 和 LDP 编码配置下分别获得平均 3.9% 和 4.3% 的码率节省。文献[19]通过分析失真直接传播影响, 自适应调节 CTU 级的拉格朗日乘子, 但一帧中所有 CTU 仍然采用相同的 QP 编码, 该方法在 LDB 和 LDP 编码配置下分别获得平均 1.8% 和 1.7% 的码率节省。

如表 1 所示, 本文算法在 LDB 和 LDP 编码配置下分别获得平均 4.4% 和 4.3% 的码率节省, 率失真性能仅次于文献[9]。而在本文算法基础上直接减小 I 帧 QP 值后, 本文算法+调节 I 帧可达到平均 6.4% 的码率节省, 率失真性能提升显著高于文献[9]的自适应 QPC 算法。此外, 在只调节拉格朗日乘子情况下, 本文算法-调节 QP 获得平均 2.4% 和 2.0% 的码率节省。为了直观地展示本文算法和 HEVC 基准编码器对各个视频序列的编码性能, 图 3 给出了 LDP 编码配置下全部 20 个测试序列的率失真曲线对比。图 3 中, 纵轴表示压缩视频亮度分量的 PSNR, 曲线越靠上, 表示率失真性能越好。从图 3 中可以看到, 与表 1 的 BD-Rate 数据一致, 对于绝大多数测试序列, 本文算法的率失真性能优于 HEVC 基准编码器。特别地, BasketballDrill、PartyScene 和 FourPeople 等测试序列的率失真曲线显示本文算法在低码率和高码率下均获得比 HEVC 基准编码器 HM16.7 更好的压缩性能。

接下来, 对实验结果做进一步的讨论。数据显示, 对于包含相对静止和缓慢运动目标的视频序列, 本文算法最有效。例如, 对于 Class E 的会

议场景视频, 在 LDB 和 LDP 编码配置下, 本文算法获得了平均 6.9% 和 7.4% 的码率节省。另外, 对于背景变化相对缓慢, 并包含多个运动目标的视频序列 BasketballDrill, 本文算法获得了最高 13% 的码率节省。其原因是这些视频中许多 CTU 具有很强的时域率失真依赖性, 通过改善它们的编码质量可以显著降低编码失真时域传播, 从而提升率失真性能。事实上, 对于具有固定背景的视频, 直接调整 I 帧编码质量就能达到明显的压缩性能提升, 如文献[10]通过减小 I 帧 QP, 在背景基本不变的监控视频上达到很高的压缩性能, 但对于包含多种视频场景的 CTC 测试序列, 该算法平均性能提升相对较小。本文算法+调节 I 帧在 LDP 配置时对 Class E 的平均码率节省达到了 16.6%, 证实了 I 帧编码质量对具有固定背景的视频影响很大。

然而, 时域依赖 RDO 和改善 I 帧编码质量并非对所有视频序列有效。表 1 数据显示, 本文算法调节 I 帧后, Kimono、RaceHorses 等几个测试序列的率失真性能反而降低了。这是因为这些视频的场景内容变化较快, 提升 I 帧编码质量对后续编码帧带来的收益较小。另外, LDB 配置下, 本文算法在 Class C 的 RaceHorses (WVGA) 上遭受 2.0% 的性能损失, 而在 Class D 的 RaceHorses (WQVGA) 上却得到 1.9% 的性能增益。事实上, RaceHorses (WQVGA) 是由 RaceHorses (WVGA) 降采样得到的, 它们具有相同的场景内容。再次观察表 1 数据发现, 其他几种对比算法<sup>[9-10,16,19]</sup>同样出现类似的情况, 这些算法对分辨率较大的 RaceHorses (WVGA) 的性能都差于对分辨率较小的 RaceHorses (WQVGA) 的性能。其原因是 RaceHorses 场景中具有复杂纹理和快速运动目标, 而高分辨率视频的相邻帧中像素运动尺度更大, 很难利用时域率失真依赖进行编码优化。对于下采样后的视频, 其相邻帧中像素运动尺度相对减小, 因此为时域依赖率失真优化提供了一定的性能提升空间。对于 Class F 中的测试序列 SlideEditing, 本文算法也遭受 1.4% 的性能损失。其原因是该屏幕内容视频包含多个局部场景切换, 从而导致失真反向传播估计的时域传播因子出现较大误差。

### 3.3 算法分析

本文算法采用了预编码以获得当前帧的编码失真和 MCP 误差, 必然会一定程度地增加编码器运算量。为了评估本文算法的运算复杂度, 引入式(27)的编码时间增加百分比。

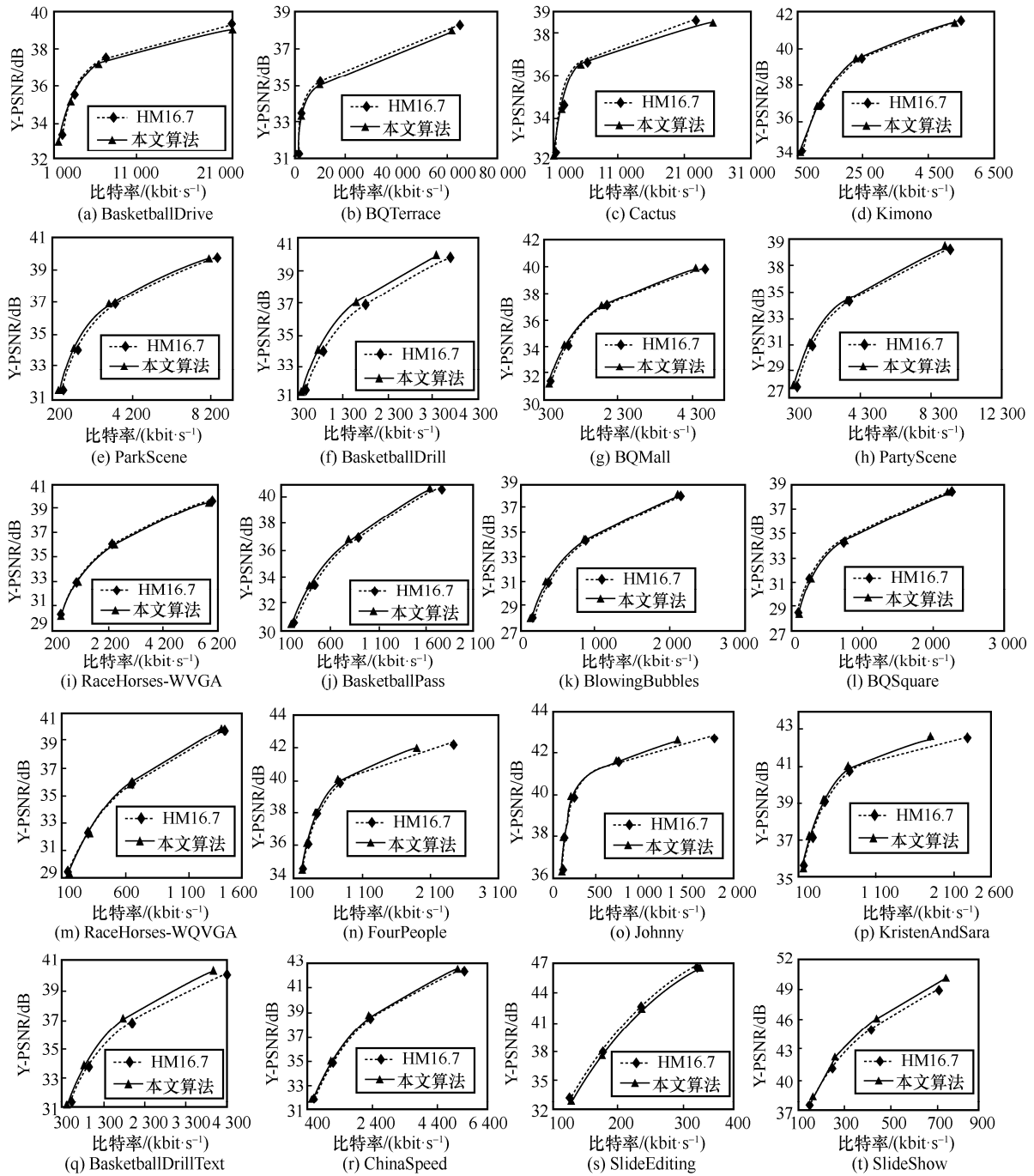


图 3 率失真曲线对比

$$\Delta \text{EncT} = \frac{T_{\text{Prop}} - T_{\text{Orig}}}{T_{\text{Orig}}} \times 100\% \quad (27)$$

其中,  $T_{\text{Prop}}$  和  $T_{\text{Orig}}$  分别是本文算法和原始 HM16.7 的编码时间。为了降低单个视频序列编码时间波动的影响, 使用每一类视频序列的总编码时间计算  $\Delta \text{EncT}$ , 结果如表 2 所示。实验数据显示, 本文算法相对原始 HM16.7 的运算复杂度仅增加了 23%。这是因为预编码的模式选择过程中只进行  $64 \times 64$  像

素块、 $32 \times 32$  像素块和  $16 \times 16$  像素块的帧间预测模式判决, 略过了大量  $8 \times 8$  像素块、 $4 \times 4$  像素块和其他对称及不对称的二叉树划分。

表 2 本文算法相比原始 HM16.7 的编码时间增加百分比  $\Delta \text{EncT}$

配置	Class B	Class C	Class D	Class E	Class F	总平均
LDB	24%	24%	22%	20%	22%	23%
LDP	24%	25%	23%	21%	23%	23%

此外, 式(19)采用失真反向传播近似视频编码中真实的失真前向传播来估算时域传播因子, 选取的反向传播长度太短不能反映失真间接影响, 太长则会产生较大的近似误差。为了分析式(19)中反向传播长度对率失真性能的影响, 表 3 给出了 LDP 编码配置下设置不同反向传播长度获得的 BD-Rate。实验数据显示, 反向传播长度设置为 3 时获得的平均率失真性能提升最大。

表 3 LDP 编码配置下设置不同反向传播长度获得的 BD-Rate

反向传播长度	Class B	Class C	Class D	Class E	Class F	总平均
1	-3.4%	-3.7%	-2.4%	-4.2%	-2.8%	-3.3%
2	-3.6%	-4.5%	-2.6%	-6.1%	-4.0%	-4.1%
3	-3.1%	-4.7%	-2.6%	-7.4%	-4.7%	-4.3%
4	-2.3%	-4.6%	-2.3%	-8.1%	-5.2%	-4.2%

## 4 结束语

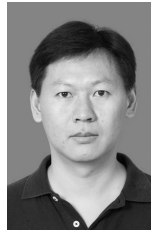
本文根据视频编码中运动补偿原理和高码率条件下的率失真函数首先推导出时域失真传播因子表达式, 然后提出一种基于失真反向传播的时域依赖 RDO 算法。该算法不用缓存后续帧建立传播链, 采用反向操作近似真实的失真前向传播, 通过已编码的两帧和预编码当前帧得到的编码失真及 MCP 误差估算时域传播因子, 进而自适应地调节 CTU 的拉格朗日乘子和 QP。实验数据显示, 与 HEVC 基准编码器相比, 本文算法获得了平均 4.4% 和最高 13.0% 的码率节省, 在增加调节 I 帧 QP 的情况下, 平均率失真性能提升达到了 6.4%。最后, 本文分析了算法的运算复杂度和反向传播长度对算法编码性能的影响。

## 参考文献:

- [1] WIEGAND T, SULLIVAN G J, BJONTEGAARD G, et al. Overview of the H.264/AVC video coding standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(7): 560-576.
- [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] BROSS B, CHEN J L, OHM J R, et al. Developments in international video coding standardization after AVC, with an overview of versatile video coding (VVC)[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(9): 1463-1493.
- [4] YOU J, CHOI C, JEONG J. Modified rate distortion optimization using inter-block dependence for H.264/AVC intra coding[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(3): 1383-1388.
- [5] BICHON M, TANOU J L, ROPERT M, et al. Inter-block dependencies consideration for intra coding in H.264/AVC and HEVC standards[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1537-1541.
- [6] BICHON M, TANOU J L, ROPERT M, et al. Low complexity joint RDO of prediction units couples for HEVC intra coding[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1733-1737.
- [7] XU Y W, LI Q, XIA L, et al. Efficient QP cascading in H.265/HEVC low-delay prediction[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 151-156.
- [8] TANG T, LI L, LI J. Improved hierarchical quantisation parameter setting method for screen content coding in high efficiency video coding[J]. IET Image Processing, 2019, 13(8): 1382-1390.
- [9] AMER H, YANG E H. Adaptive quantization parameter selection for low-delay HEVC via temporal propagation length estimation[J]. Signal Processing: Image Communication, 2020, 84: 1-12.
- [10] GONG Y H, YANG K F, LIU Y, et al. Quantization parameter cascading for surveillance video coding considering all inter reference frames[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30(6): 5692-5707.
- [11] GONG Y C, WAN S, YANG K F, et al. Rate-distortion-optimization-based quantization parameter cascading technique for random-access configuration in H.265/HEVC[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017, 27(6): 1304-1312.
- [12] HE J, YANG E H, YANG F Z, et al. Adaptive quantization parameter selection for H.265/HEVC by employing inter-frame dependency[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 28(12): 3424-3436.
- [13] YIN H B, et al. Distortion propagation modeling and its applications on frame level quantization control for predictive video coding[J]. Signal Processing: Image Communication, 2019, 78: 398-408.
- [14] BICHON M, LE TANOU J, ROPERT M, et al. Optimal adaptive quantization based on temporal distortion propagation model for HEVC[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2019, 28(11): 5419-5434.
- [15] YANG T W, ZHU C, FAN X J, et al. Source distortion temporal propagation model for motion compensated video coding optimization[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway: IEEE Press, 2012: 85-90.
- [16] GAO Y B, ZHU C, LI S, et al. Temporally dependent rate-distortion optimization for low-delay hierarchical video coding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(9): 4457-4470.
- [17] GAO Y B, ZHU C, LI S, et al. Source distortion temporal propagation analysis for random-access hierarchical video coding optimization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2019, 29(2): 546-559.
- [18] LI S, ZHU C, GAO Y B, 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] GUO H W, ZHU C, LIU Y Y, et al. Temporal dependency based Lagrange multiplier adaptation for HEVC[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [20] LI L, LI B, LI H Q, et al.  $\lambda$ -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.
- [21] GUO H W, ZHU C, LI S X, et al. Optimal bit allocation at frame level for rate control in HEVC[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2019, 65(2): 270-281.
- [22] GUO H W, ZHU C, XU M, et al. Inter-block dependency-based CTU level rate control for HEVC[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2020, 66(1): 113-126.
- [23] 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.  
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.
- [24] 公衍超, 王玲, 刘颖, 等. 视频主观观测实验启发的 HEVC 感知帧内码率控制[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 90-102.  
GONG Y C, WANG L, LIU Y, et al. HEVC perceptual intra-frame rate control inspired by video subjective observation experiment[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 90-102.
- [25] 郭红伟, 朱策, 刘宇洋. 视频编码率失真优化技术研究综述[J]. 电子学报, 2020, 48(5): 1018-1029.  
GUO H W, ZHU C, LIU Y Y. Overview of rate-distortion optimization for video coding[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(5): 1018-1029.
- [26] LI B, XU J Z, ZHANG D, et al. QP refinement according to Lagrange multiplier for high efficiency video coding[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2013: 477-480.
- [27] BOSSEN F. Common test conditions and software reference configurations[R]. 2013.

## [作者简介]



郭红伟(1980-), 男, 彝族, 云南金平人, 博士, 红河学院教授、电子科技大学在站博士后, 主要研究方向为视频编码与通信。



朱策(1969-), 男, 四川自贡人, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为视频编码与通信、视频分析和处理。



杨栩(1983-), 男, 四川苍溪人, 重庆邮电大学博士生、成都师范学院讲师, 主要研究方向为全景视频编码与通信。



罗雷(1986-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授、电子科技大学在站博士后, 主要研究方向为视频编码与通信。