

基于图像纹理特征的 HEVC 帧内编码快速算法

孙学斌, 陈晓冬, 肖禹泽, 汪毅, 郁道银

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 为降低高效视频编码(HEVC)的帧内编码复杂度,提出一种基于图像纹理特征的编码单元(CU)划分和预测模式选择算法。利用一种预处理算法来获得当前 CU 的纹理复杂度和方向。一方面,根据 CU 的纹理复杂度,该算法自适应地跳过或终止部分 CU 划分,减少 CU 深度的遍历时间。纹理复杂度高的 CU 直接划分成 4 个子 CU,纹理复杂度低的 CU 将会终止划分。另一方面,根据预测单元的纹理方向,确定相应的候选模式集,通过粗模式决策算法和率失真最优化解算法遍历候选模式集选取最优模式。将算法移植到标准食品解码软件 HM16.7 平台上,实验结果表明,与 HM16.7 算法相比,编码时间平均减少 53.66%,比特率上升 0.46%,峰值信噪比下降 0.05 dB。

关键词 图像处理; 高效视频编码; 纹理复杂度; 编码单元划分; 模式选择

中图分类号 TN919.81 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.071003

Fast Intra-Frame Encoding Algorithm Based on Image Texture Features for HEVC

Sun Xuebin, Chen Xiaodong, Xiao Yuze, Wang Yi, Yu Daoyin

Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In order to reduce the intra encoding complexity of the high efficiency video coding (HEVC), a novel algorithm is proposed, which is composed of the coding unit (CU) partitioning and the prediction mode decision based on image texture features. A preprocessing algorithm is employed to get the texture complexity and the direction of the current CU. On the one hand, according to the texture complexity of CU, the proposed algorithm can adaptively skip or suspend some CU divisions, and thus reduce the depth traversal time of the CU. The CU with high texture complexity is divided into four smaller equal-size sub-CUs directly. As for the CU with low texture complexity, the searching of partitioning is early terminated. On the other hand, a set of alternative patterns are confirmed according to the dominant texture direction of the prediction unit. the optimal model is chosen for the further rough mode decision algorithm and rate distortion optimization processes by traveling the alternative patterns. Moving the algorithm to the HM16.7, a normal decode software for food, the proposed algorithm can save 53.66% coding time on average, the negligible bit rate increases by 0.46%, and the peak signal-to-noise ratio reduces by 0.05 dB.

Key words image processing; high efficiency video coding; texture complexity; coding unit partitioning; mode decision

OCIS codes 100.3008; 100.2960; 100.2000

1 引言

高效视频编码(HEVC)作为新一代视频编码标准,利用新编码技术如灵活的编码单元(CU)划分结构和

收稿日期: 2017-02-22; 收到修改稿日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61201037)

作者简介: 孙学斌(1988—),男,博士研究生,主要从事图像处理算法、视频编解码算法等方面的研究。

E-mail: sunxuebin@tju.edu.cn

导师简介: 陈晓冬(1975—),男,博士,教授,主要从事光电检测技术及仪器、图像处理、机器视觉检测等方面的研究。

E-mail: xdchen@tju.edu.cn(通信联系人)

丰富的预测模式,与上一代标准 H.264/AVC 相比,编码效率提高了约 1 倍^[1-2]。但同时算法复杂度也急剧上升,导致编码时间变长,限制了 HEVC 在实时领域的应用。因此,降低 HEVC 的编码复杂度是近几年的研究热点。

众学者对 HEVC 帧内编码中 CU 快速分割、预测单元(PU)预测模式的选择策略进行研究,并提出各种算法以降低帧内编码复杂度。这些算法可分为两类,一类是根据当前 CU 相邻 CU 的编码结果,估计当前 CU 的最佳尺寸,避免不太可能的 CU 划分结构,减少 CU 深度遍历时间。另一类是利用视频图像的纹理特征,提前跳过或终止部分 CU 递归划分或减少 PU 帧内预测模式数目,实现快速编码。

文献[3]~[6]算法属于第一类。Zhao 等^[3]提出一种基于相邻 CU 结构相似性的帧内编码优化算法:若当前 CU 和相邻 CU 的结构相似性高,则当前 CU 的划分结构和预测模式直接继承相邻 CU 的结果。Lim 等^[4]通过分析得出当前 PU 最佳预测模式的方向与相邻 PU 接近,据此估计当前 PU 的可能预测模式,减少帧内预测时间。Tseng 等^[5]提出一种帧内编码优化算法:通过分析 CU 划分深度和率失真(RD)代价的关系,提前跳过或终止部分 CU 划分,减少 CU 深度的遍历次数。Zhang 等^[6]通过分析当前 CU 和当前帧相邻位置 CU 及和前一帧相同位置 CU 分割结果的关系,对当前 CU 进行快速分割,降低编码时间。

文献[7]~[10]利用 CU 自身的纹理特征,实现帧内编码优化算法。Ruiz 等^[7]根据图像的纹理方向,提出一种帧内预测优化算法。Belghith 等^[8]利用 Sobel 算子对 CU 是否存在边缘进行检测,进而分析 CU 的纹理复杂度。纹理平坦的 CU 将会以当前深度进行编码,纹理复杂的 CU 跳过率失真最优化算法(RDO)过程,直接划分成 4 个子 CU,提高 CU 结构的遍历效率。Min 等^[9]提出基于图像纹理特征的 CU 尺寸快速决策算法。Yao 等^[10]通过分析 PU 的主要纹理方向,对纹理平坦的 PU 选择 DC 和 planar 模式作为候选模式;对纹理方向明显的 PU 选择与纹理方向接近的模式作为候选模式。

本文提出一种基于编码块纹理特征的 CU 尺寸快速划分和 PU 预测模式决策算法。通过预处理算法获得当前编码块的纹理复杂度和主要纹理方向。纹理复杂度高的 CU 跳过 RDO 过程直接划分成 4 个子 CU,复杂度低的 CU 直接选为最优尺寸 CU,并终止划分。根据 PU 的纹理方向,减少参与粗模式决策算法(RMD)过程中的模式数量,进一步降低帧内编码复杂度。

2 HEVC 帧内编码复杂度分析

HEVC 继承了上一代 H.264 标准中的混合编码框架^[11],但它的块划分结构更加灵活多变,主要由 CU、PU 和变换单元(TU)组成^[12]。CU 尺寸最大为 64×64 ,最小为 8×8 ^[13]。CU 是编码的基本单元,类似于 H.264 中的宏块。PU 用来进行帧内/帧间预测,TU 是进行量化和变换的基本单元。

HEVC 编码过程中,首先将一帧图像分成大小为 64×64 的编码树单元(CTU),对 CTU 单元的划分过程如图 1 所示。从上到下是 CU 的递归划分过程,从 $D_p=0$ 开始,每一深度下的每个 CU 要划分成 4 个子 CU,直到 $D_p=3$,停止划分;从下到上,是 CU 的裁剪过程,从 $D_p=3$ 开始,依次比较 4 个子 CU 和上一深度

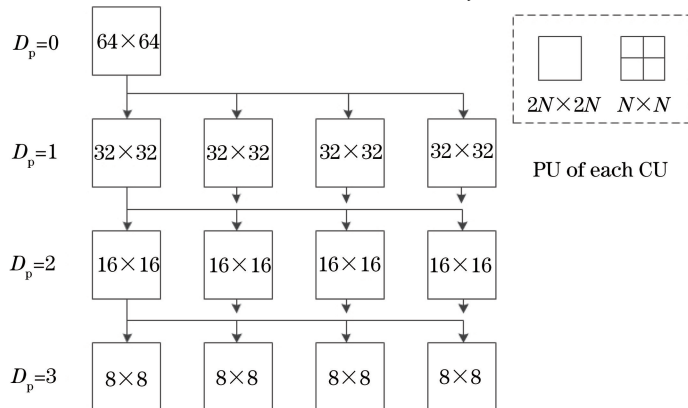


图 1 CTU 划分示意图

Fig. 1 Partition of a CTU structure

根 CU 率失真代价值的大小,直到 $D_p=0$,利用 RDO 准则确定最佳 CU 划分结构。需要进行 $341(4^0+4^1+4^2+4^3+4^4=341)$ 次递归计算,计算量较大。

与 H.264 中 9 种帧内预测模式不同,HEVC 中有 35 种预测模式^[14]。预测模式增多,则其能更好适应图像的纹理方向,降低编码后的比特率(BR),但同时也增加了编码复杂度。如图 2 所示,利用 RDO 过程,选择最佳预测模式。RDO 的计算公式为

$$J = R_{\text{RSS}} + \lambda \times B_{\text{Bit}}, \quad (1)$$

式中 R_{RSS} 为残差平方和, λ 为拉格朗日系数, B_{Bit} 为编码码率。为减小计算量,在 HEVC 标准不断完善的过程中,Lainema 等^[15]提出了一种 RMD 算法。首先,根据预测残差绝对值(SATD)对 35 种预测模式进行一次粗选择,选择 N 种预测模式。 N 的值分别为 $\{8,8,3,3,3\}$,PU 大小为 $4 \times 4, 8 \times 8, 16 \times 16, 32 \times 32$ 和 64×64 ;其次,获取最可能预测模式,即当前 PU 的上方 PU 和左边 PU 的预测模式;最后,将这两个相邻 PU 的预测模式和 RMD 过程中选出的 N 个预测模式组成候选模式集,进行 RDO 计算,选取最佳模式^[16]。但这个过程的计算量仍然很大。

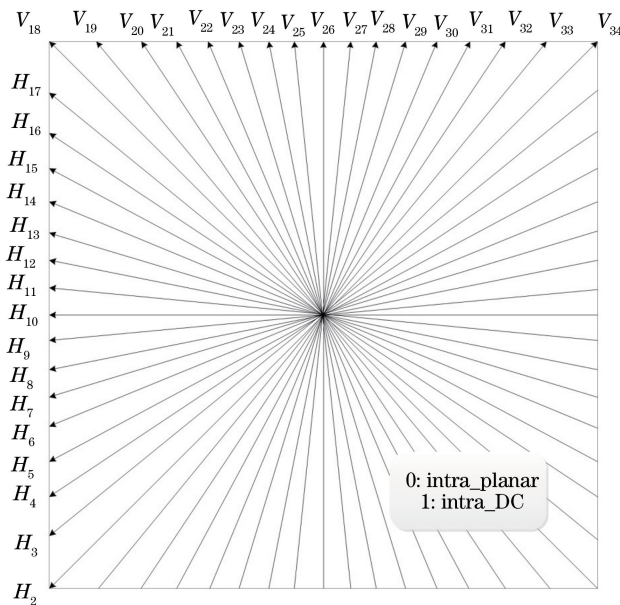


图 2 HEVC 35 种帧内预测模式

Fig. 2 35 intra prediction modes in HEVC

3 帧内编码优化算法

3.1 纹理特征函数的提出

HEVC 编码中,CU 最佳分割尺寸和 PU 预测模式与视频纹理特征紧密相关。图 3 为视频序列“BasketballDrill”第 1 帧 CU 最佳分割和 PU 预测模式的示意图,量化参数(QP)为 32。由图 3(a)可知,平坦区域(如地板)一般采用大尺寸 CU 进行编码;而对于篮球筐、衣服边缘等纹理丰富场景变化剧烈的区域大多选用 $8 \times 8, 4 \times 4$ 小尺寸 CU 进行编码^[17]。由图 3(b)可知,PU 的预测模式大多沿着图像的纹理方向,对于不存在纹理的区域(如地板),选择 DC 或 planar 模式。

本文对图像块水平、 45° 、垂直和 135° 四个方向进行纹理特征分析,计算方法为^[18]

$$D_h = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} |p(i,j) - p(i,j+1)|, \quad (2)$$

$$D_{45} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n-1} |p(i,j) - p(i+1,j)|, \quad (3)$$

$$D_v = \frac{1}{(n-1)(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} |p(i,j) - p(i+1,j+1)|, \quad (4)$$

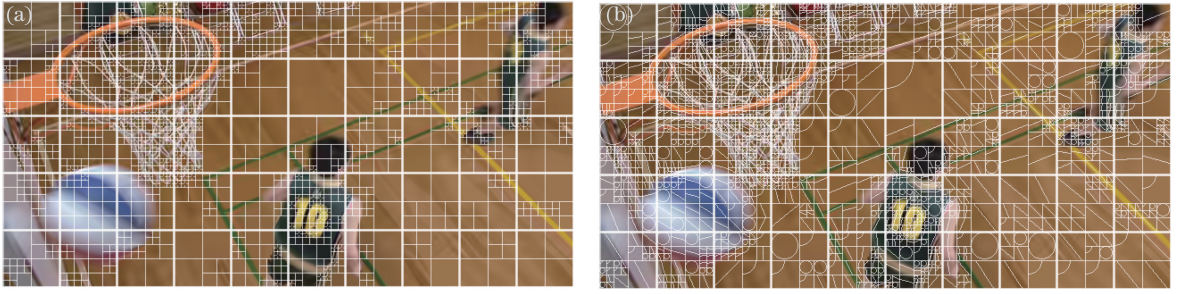


图3 “BasketballDrill”视频序列第一帧CU分割和PU预测模式示意图。(a) CU划分结果;(b) PU预测模式结果

Fig. 3 CU structure and PU mode results of the first frame of "BasketballDrill".

(a) CU partition results; (b) PU prediction modes results

$$D_{135} = \frac{1}{(n-1)(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n |p(i,j) - p(i+1,j-1)|, \quad (5)$$

式中 D_h 、 D_{45} 、 D_v 和 D_{135} 分别为水平、45°、垂直和 135°方向的复杂度, $p(i,j)$ 为编码块第 i 行和第 j 列的像素值。如果图像块整体平坦,则上述方向的像素值都会很小且相差不大。如果图像块的纹理沿着某一方向,则该方向的像素值相差不大,且复杂度值最小,而其他方向的复杂度值相对较大。如果图像块存在两个纹理方向,比如水平方向和 45°方向,那么 D_h 和 D_{45} 的值相对较小, D_v 、 D_{135} 的值相对要大。因此,通过分析 D_h 、 D_{45} 、 D_v 和 D_{135} 的值,可获得图像块的复杂度和纹理方向。

3.2 CU快速分割算法

本文CU快速划分算法流程如图4所示。首先计算出当前编码块的水平、45°、垂直和135°四个方向的纹理复杂度,即 D_h 、 D_{45} 、 D_v 和 D_{135} 。根据纹理复杂度可对编码块分成平滑、复杂、不确定编码块三类:

$$T = \begin{cases} \text{homogeneous,} & D_{\max} < T_{\text{size}} \\ \text{complex,} & D_{\min} > 1.25 \times T_{\text{size}}, \\ \text{undeternined,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中 D_{\max} 、 D_{\min} 分别为 D_h 、 D_{45} 、 D_v 和 D_{135} 中的最大值和最小值, T 为当前编码块的纹理复杂度分类。若 D_{\max} 小于阈值 T_{size} ,则认为当前编码块纹理简单,将会以当前编码深度进行编码;如果 D_{\min} 大于阈值 $1.25T_{\text{size}}$,则认为当前编码块纹理复杂,将跳过当前深度的RDO计算过程,直接划分成4个子CU,从而减少编码的计算复杂度;其他情况下,按正常编码流程进行编码。

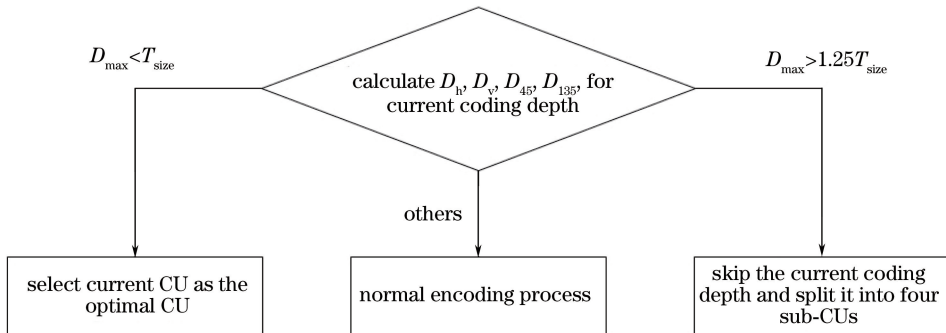


图4 CU分割算法流程图

Fig. 4 Flowchart of CU partition algorithm

本文算法的性能在很大程度上依赖于阈值的选取,如果阈值太大或者太小,编码块的最终划分结果与HM16.7算法相比会相差很大,导致编码后BR增加。如表3所示,从ClassA-ClassE中选取5个视频序列(NebutaFestival、BQTerrace、BQMall、BasketballPass、SlideEditing)作为训练样本,选择BR增加最少的阈值作为最优阈值。在QP为22、27、32和37时,选取阈值分别为2.75、3.5、4和6。

3.3 预测模式优化算法

由3.1节分析可知,PU最佳预测模式的方向一般和图像纹理方向一致,通过分析 D_h 、 D_{45} 、 D_v 和 D_{135} 的

值,可以得到 PU 的纹理方向。35 种帧内预测模式按方向性分成 4 类,分别为水平方向、45°方向、垂直方向和 135°方向预测模式集,如表 1 所示。根据 PU 的纹理方向,选择对应的预测模式集进行后续计算。为了提高预测模式选择的准确性,每一类都包含了 DC 和 planar 模式。

表 1 候选预测模式集

Table 1 Candidate subsets of prediction modes

Class C_i	Judgement condition	Texture direction	Subset of modes chosen for RMD calculation
C_0	$D_{\min} = D_h$	Horizontal	$H_6, H_7, H_8, H_9, H_{10}, H_{11}, H_{12}, H_{13}, H_{14}, DC, \text{ planar}$
C_1	$D_{\min} = D_{45}$	45°	$H_2, H_3, H_4, H_5, V_{30}, V_{31}, V_{32}, V_{33}, V_{34}, DC, \text{ planar}$
C_2	$D_{\min} = D_v$	Vertical	$V_{22}, V_{23}, V_{24}, V_{25}, V_{26}, V_{27}, V_{28}, V_{29}, V_{30}, DC, \text{ planar}$
C_3	$D_{\min} = D_{135}$	135°	$H_{14}, H_{15}, H_{16}, H_{17}, V_{18}, V_{19}, V_{20}, V_{21}, V_{22}, DC, \text{ planar}$

图 5 为本文提出的 PU 预测模式快速选择算法流程图,首先计算 D_h, D_{45}, D_v 和 D_{135} 的值,分析图像纹理复杂度。若 D_{\max} 与 D_{\min} 的差值小于 $10\% \times D_{\min}$,则说明当前 PU 平坦,不存在明显的纹理,直接选择 DC 和 planar 模式进行 RDO 计算;如果 D_{secmin} 与 D_{\min} 的差值小于 $10\% \times D_{\min}$,其中 D_{secmin} 是 D_h, D_{45}, D_v 和 D_{135} 中的第二最小值,则说明 PU 存在两个不同方向的纹理,两个纹理方向所对应的候选模式集 C_i 和 C_j 一起选择作为候选模式集进行 RMD 计算;其他情况下,说明 PU 存在一个明显的纹理方向,选择该纹理方向对应的候选模式集进行 RMD 计算。经过 RMD 计算后,得到基于 SATD 值模式排序表,从中选择 N 个获选模式,再加上最可能模式(MPM)构成候选模式集进行 RDO 计算,选出最优预测模式。

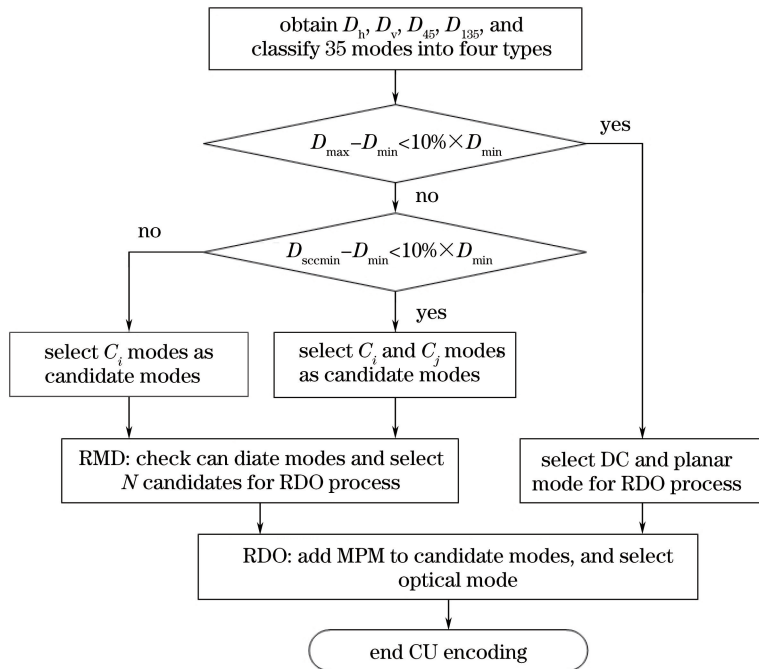


图 5 帧内模式决策算法流程图

Fig. 5 Flowchart of intra mode decision algorithm

4 实验结果与分析

4.1 实验条件

为验证本文算法的性能,将该算法移植到 HM16.7 软件上测试其 RD 性能、峰值信噪比(PSNR)和编码复杂度。实验平台的硬件配置为 Intel Core i3-4130 CPU 3.4 GHz,内存为 8 GB。实验参数采用高效配置,视频序列采用帧内编码,QP 分别为 22、27、32 和 37。采用通用测试序列中的 18 个测试序列进行编码实验,每个视频序列分别选取 100 帧。为了分析算法的性能,以 ΔR_{psn} 、 ΔB 和 Δt 作为衡量标准。 ΔR_{psn} 为 PSNR 的差值^[19-20], ΔB 为 BR 的增加百分比, Δt 为节省的编码时间百分比,计算公式如表 2 所示。 $R_{\text{psn-HM}}/B_{\text{HM}}/t_{\text{HM}}$ 分别为利用 HM16.7 标准算法编码得到的 PSNR、BR 和编码时间值。 $R_{\text{psn-pro}}/B_{\text{pro}}/t_{\text{pro}}$ 分别为采用本文

算法得到的 PSNR、BR 和编码时间值。

表 2 评价标准

Table 2 Evaluation criteria

Criteria	Description	Formula
$\Delta R_{\text{psn}}/\text{dB}$	PSNR loss	$R_{\text{psn-HM}} - R_{\text{psn-pro}}$
$\Delta B / \%$	Bit rate increase	$\frac{B_{\text{pro}} - B_{\text{HM}}}{B_{\text{HM}}} \times 100\%$
$\Delta t / \%$	Encoding time speedup	$\frac{t_{\text{HM}} - t_{\text{pro}}}{t_{\text{HM}}} \times 100\%$

4.2 实验结果

表 3 为本文算法与标准算法 HM16.7 对比的实验结果。可以看出,本文算法平均节省 53.66% 的编码时间,PSNR 仅下降 0.05 dB,BR 平均增加 0.46%。SlideShow 和 Vidyol 序列中每帧图像纹理相对平坦,编码时间节省得最多,分别为 80% 和 66.3%;RaceHorses 和 FourPeople 纹理适中,节省的编码时间也适中,为 53.83% 和 63.63%;而 BlowingBubbles 和 SlideEditing 细节丰富,节省的编码时间最少,为 40% 和 44.36%。

表 3 本文算法与 HM16.7 对比的实验结果

Table 3 Performance comparisons between the proposed algorithm and HM16.7

Resolution	Sequence	$\Delta B / \%$	$\Delta R_{\text{psn}}/\text{dB}$	$\Delta t / \%$
Class A/2560×1600	Nebuta Festival	0.50	0.24	46.55
	Steam Locomotive Train	1.39	0.15	53.50
	Traffic	0.67	0.02	54.59
Class B/1920×1080	BQTerrace	0.67	0.02	50.68
	Cactus	0.68	0.02	62.14
	BasketballDrive	0.64	0.01	61.58
Class C/832×480	BQMall	-0.14	0.04	47.56
	RaceHorses	0.31	0.02	51.98
	PartyScene	-0.18	0.02	39.30
	BasketballDrill	-0.19	0.04	58.82
Class D/416×240	BasketballPass	0.28	0.02	53.66
	BQSquare	-0.24	0.03	46.81
	BlowingBubbles	-0.13	0.02	40.00
	RaceHorses	0.22	0.04	53.85
Class E/1280×720	SlideEditing	0.74	0.16	44.36
	SlideShow	1.54	0.04	80.51
	FourPeople	0.41	0.03	53.63
Average	Vidyol	1.12	0.03	66.30
		0.46	0.05	53.66

为评价算法编码性能的损失,图 6 分别给出 SlideShow、SlideEditing、Traffic 和 BQTerrace 序列的 RD 曲线。本文算法和标准算法 HM16.7 的 RD 曲线几乎重合,表明编码性能和标准算法几乎一致。

表 4 为本文算法、文献[3]~[10]算法和 HM16.7 标准算法在 PSNR、BR 和编码时间方面的比较结果。有些算法能大幅度降低帧内编码复杂度,但 BR 增加过大,有些算法编码时间节省得少,BR 增加较小。为了公平地评价算法性能,引入评价参数 $(\Delta B \times 100)/\Delta t$ ^[21]。该参数可反映算法编码复杂度和 BR 之间的关系。算法复杂度越低,BR 的增加值 ΔB 越小,算法的性能越优秀, $(\Delta B \times 100)/\Delta t$ 的值越小。

实验结果表明,文献[3]~[10]算法都能得到很好的视频质量,PSNR 损失都很小,在 0.09 dB 以下。文献[6]和文献[4]算法的 BR 分别增加 1.75% 和 1.18%,但算法复杂度低,节省的编码时间均在 44% 以上,适用于对带宽要求不高,对实时性要求高的场合。文献[7]算法的 BR 增加最小,为 0.4%,但算法复杂度不理想,平均节省 29.7% 的编码时间。本文算法编码时间平均减少 53.66%,BR 增加约 0.46%, $(\Delta B \times 100)/\Delta t$ 值为 0.86,编码性能优于文献[3]~[10]算法。

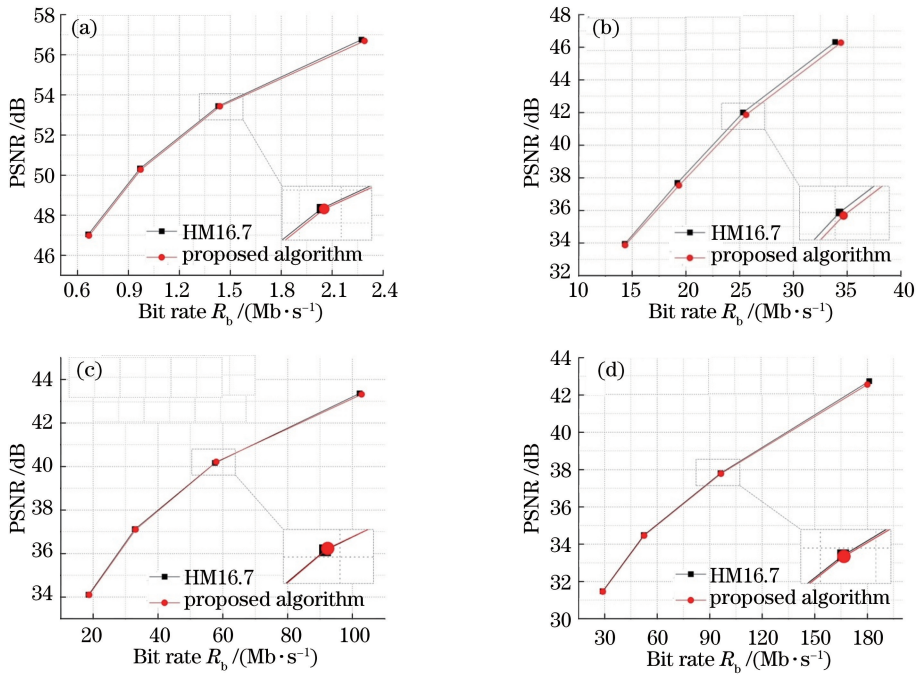


图 6 本文算法与 HM16.7 的 RD 曲线比较。(a) SlideShow 序列 RD 曲线;(b) SlideEditing 序列 RD 曲线;
(c) Traffic 序列 RD 曲线;(d) BQTerrace 序列 RD 曲线

Fig. 6 Comparison of the RD curves of the proposed algorithm and HM16.7. (a) RD curves of SlideShow;
(b) RD curves of SlideEditing; (c) RD curves of Traffic; (d) RD curves of BQTerrace

表 4 本文算法与现有算法的性能比较

Table 4 Performance comparisons between the proposed algorithm and the existing algorithms

Algorithm	$\Delta R_{psn} / \text{dB}$	$\Delta B / \%$	$\Delta t / \%$	$(\Delta B \times 100) / \Delta t$
Ref. [3]	0.02	0.56	24.12	2.32
Ref. [4]	0.09	1.18	44.05	2.65
Ref. [5]		1.4	52.0	2.69
Ref. [6]	0.08	1.75	49.6	3.35
Ref. [7]	0.04	0.4	29.7	1.35
Ref. [8]	0.09	0.76	31.3	2.43
Ref. [9]	0.05	0.82	52.34	1.57
Ref. [10]	0.07	0.57	36.26	1.57
Proposed algorithm	0.05	0.46	53.66	0.86

5 结 论

提出了一种 HEVC 帧内编码优化算法,主要包括 CU 单元的快速分割和 PU 预测模式的快速决策。首先对编码块进行预处理,计算出编码块沿水平、45°、垂直和 135°方向上的纹理复杂度。根据纹理复杂度的值,将编码块分成平滑、复杂、不确定编码块三类。处在平滑区域的 CU 将终止划分,以当前深度编码;处在复杂区域的 CU 将跳过当前深度的 RDO 计算过程,直接划分成 4 个子 CU。在帧内预测过程中,通过减少候选预测模式的个数,进一步降低算法复杂度。实验结果表明,与标准算法 HM16.7 相比,本文算法在几乎不损失视频质量的情况下,节省了 53.66% 的编码时间,BR 仅增加 0.46%。

参 考 文 献

- [1] Wiegand T, Ohm J R, Sullivan G J, *et al.* Special section on the joint call for proposals on high efficiency video coding (HEVC) standardization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(12): 1661-1666.

- [2] Ohm J R, Sullivan G J, Schwarz H, *et al.* Comparison of the coding efficiency of video coding standards-including high efficiency video coding (HEVC)[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(12): 1669-1684.
- [3] Zhao D Y, Zhu S P, Gao S P. A novel fast intra-prediction algorithm for high-efficiency video coding based on structural similarity[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(23): 4212-4218.
- [4] Lim K, Lee J, Kim S, *et al.* Fast PU skip and split termination algorithm for HEVC intra prediction[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2014, 25(8): 1335-1346.
- [5] Tseng C F, Lai Y T. Fast coding unit decision and mode selection for intra-frame coding in high-efficiency video coding [J]. *Iet Image Processing*, 2015, 10(3): 215-221.
- [6] Zhang Q W, Zhao J C, Huang X P, *et al.* A fast and efficient coding unit size decision algorithm based on temporal and spatial correlation[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(21): 2793-2798.
- [7] Ruiz D, Fernández-Escribano G, Martínez J L, *et al.* Fast intra mode decision algorithm based on texture orientation detection in HEVC[J]. *Signal Processing Image Communication*, 2016, 44: 12-28.
- [8] Belghith F, Kibeya H, Ayed M A B, *et al.* Fast coding unit partitioning method based on edge detection for HEVC intra-coding[J]. *Signal Image and Video Processing*, 2016, 10(5): 811-818.
- [9] Min B, Cheung R C C. A fast CU size decision algorithm for the HEVC intra encoder[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 25(5): 892-896.
- [10] Yao Y B, Li X J, Lu Y. Fast intra mode decision algorithm for HEVC based on dominant edge assent distribution[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(4): 1963-1981.
- [11] 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.
- [12] Karczewicz M, Chen P S, Joshi R L, *et al.* A hybrid video coder based on extended macroblock sizes, improved interpolation, and flexible motion representation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(12): 1698-1708.
- [13] Kim I K, Min J, Lee T, *et al.* Block partitioning structure in the HEVC standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(12): 1697-1706.
- [14] Zhao L, Zhang L, Ma S W, *et al.* Fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC[C]. *IEEE Visual Communications and Image Processing*, 2011: 1-4.
- [15] Lainema J, Bossen F, Han W J, *et al.* Intra coding of the HEVC standard[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(12): 1792-1801.
- [16] Sullivan G J, Wiegand T. Rate-distortion optimization for video compression[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1998, 15(6): 74-90.
- [17] Zhang Yajing, Li Minzan, Qiao Jun, *et al.* Segmentation algorithm for apple recognition using image features and artificial neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2104-2108.
张亚静, 李民赞, 乔 军, 等. 一种基于图像特征和神经网络的苹果图像分割算法[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2104-2108.
- [18] Li Qingzhong, Zang Fengni, Zhang Yang. Shiptarget detection for moving video maritime surveillance[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0814001.
李庆忠, 臧凤妮, 张 洋. 动态视频监控中海上舰船目标检测[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0814001.
- [19] Bjontegaard G. Calculation of average PSNR difference between RD-curves[C]. *ITU Telecommunications Standardization Sector, 13th Meeting*, 2001.
- [20] Yang Jian, Li Sumei, Ma Ruize, *et al.* Exploration and analysis of the subjective assessment results of stereo video quality[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 0911020.
杨 建, 李素梅, 马瑞泽, 等. 立体视频质量主观评价结果的探究分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 0911020.
- [21] Correa G, Assuncao P A, Agostini L V, *et al.* Fast HEVC encoding decisions using data mining [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, 25(4): 660-673.