

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201508038



HEVC 帧间编码的快速 CU 尺寸和 PU 模式决策算法

吴良堤, 冯桂

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了进一步降低高效视频编码(HEVC)帧间编码的复杂度,提出一种快速的编码单元(CU)尺寸和预测单元(PU)模式决策算法.首先,利用 SKIP 和平均运动矢量提前结束 CU 分割过程.其次,根据统计的阈值,实现概率较小的 PU 模式计算过程的跳过.算法在随机方向(RA)和低延时(LD)配置下,编码时间分别平均降低 42.2%和 36.3%,造成的 BDBR(bjntegaard delta bitrate)损失仅为 0.624%和 0.264%.实验结果表明:CU 尺寸和 PU 模式决策算法在编码质量基本不变的前提下,能正确地决策出最佳 CU 尺寸和 PU 模式,有效地提高 HEVC 的编码效率.

关键词: 高效视频编码; 帧间预测; 编码单元尺寸; 预测单元模式; 决策算法

中图分类号: TN 919.81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0121-06

Fast CU Size and PU Mode Decision Algorithm for HEVC Inter Coding

WU Liangdi, FENG Gui

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To reduce the inter encoding complexity in high efficiency video coding (HEVC), we proposed an algorithm which include fast code unit (CU) size and prediction unit (PU) mode decision. Firstly, CU split is early terminated by skip and average motion vector. Then, skip PU mode with small probability based on statistical threshold. The proposed algorithm can yield an average time saving of 42.2% and 36.3% only with average 0.624% and 0.264% BDBR (bjntegaard delta bitrate) losses for various test sequences under random access (RA) and low delay (LD) conditions, respectively. The experimental results showed that CU size and PU mode decision algorithm accurately decides the best CU size or PU mode and effectively improves the efficiency of HEVC coding when the encoding quality is invariant.

Keywords: high efficiency video coding; inter prediction; code unit size; prediction unit mode; decision algorithm

为了满足市场对高质量、高分辨率视频的需求,视频编码联合小组(joint collaborative team on video coding, JCT-VC)发布了新一代视频编码标准高效视频编码(high efficiency video coding, HEVC)^[1]. HEVC 采用新的编码策略实现了 H. 264/AVC 两倍高的编码增益;但其复杂度比 H. 264/AVC 高 9%~502%^[2]. 为了推广 HEVC 在工业上的应用,众多学者提出了诸多快速算法来降

收稿日期: 2015-08-22

通信作者: 冯桂(1960-),女,教授,博士,主要从事图像与视频信息处理与应用、图像信息系统的建立与应用、模式识别与影像理解、计算机视觉和多媒体通信的研究. E-mail:fengg@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2014J01242, 2016J01306)

低 HEVC 的复杂度. Gweon 等^[3-5]提出了 3 种方案实现了较好的编码性能,因此,被加入到了 HEVC 测试模式(HEVC test mode, HM 10.1)的官方标准代码中. Shen 等^[6]根据图像特性实现多参考帧的优化. 这些算法都在相应的 HM 测试中取得了一定的成效. 本文主要针对 HEVC 帧间编码中复杂的编码单元(CU)分割及预测单元(PU)模式选择进行优化,利用 SKIP 模式和平均运动矢量提前终止 CU 分割,并根据统计阈值优化 PU 模式决策过程.

1 HEVC 帧间 PU 模式决策

分割实例,如图 1 所示. 在 HEVC 中,最大编码单元(LCU)以四叉树递归分割成 4 个子 CUs,直至最小编码单元(SCU)为止. 每一次分割对应一个深度级(Depth),如图 1(a)所示. 每个 CU 又可分割为多种 PU 和变换单元(TU). PU 可分为帧内 $2N \times 2N$ 和 $N \times N$, 帧间 $2N \times 2N, N \times N, 2N \times N, N \times 2N, 2N \times nU, 2N \times nD, nL \times 2N$ 和 $nR \times 2N$, 如图 1(b)所示. TU 也以四叉树进行递归划分,其尺寸范围为 $32 \text{ px} \times 32 \text{ px} \sim 4 \text{ px} \times 4 \text{ px}$,如图 1(c)所示.

在 HM 10.1 的帧间预测中,为了决策出最佳 PU 模式,编码器计算 RD-Cost 过程:首先,计算在 SKIP 模式下的 RD-Cost;然后,计算剩余帧间 PU 模式的 RD-Cost;再将当前 RD-Cost 最小的模式作为目前的 PU 模式,检查该最佳模式的编码块标志(CBF)是否为 0,当 CBF=0 时,跳过帧内 PU 模式的计算,否则,继续计算帧内 PU 模式的 RD-Cost;最后,选择 RD-Cost 最小的 PU 模式作为当前 CU 最终的最佳 PU 模式,并将当前 CU 分割为 4 个子 CUs,重复该过程直至当前 CU 为 SCU.

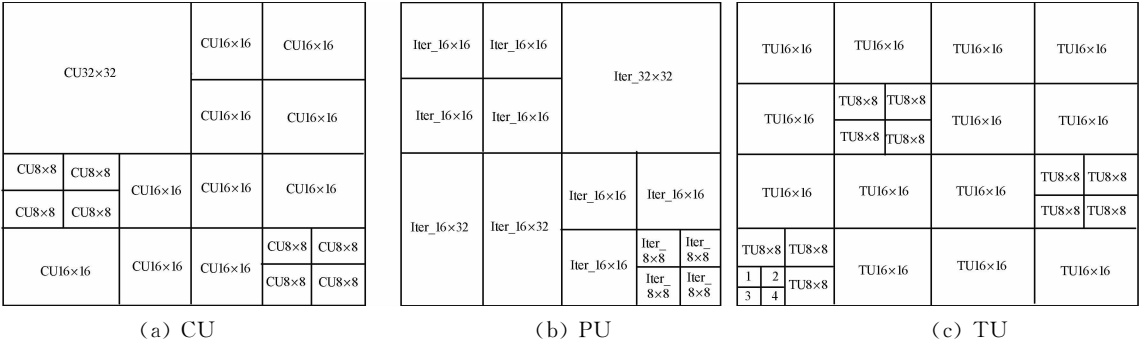


图 1 CU,PU 和 TU 分区示例
Fig. 1 Example of CU, PU and TU partitions

2 提出的算法

2.1 CU 提前终止的分割算法

在帧间预测过程中,当 CU 纹理较简单且运动较平缓时,CU 最佳分割为 $64 \text{ px} \times 64 \text{ px}$ 或 $32 \text{ px} \times 32 \text{ px}$ 的可能性较高;反之选择小尺寸 CU 分割的可能性比较大^[7-10]. 用均值绝对差(MAD_{CU})度量 CU 的纹理,即

MAD_{CU} = 1 / (M * N) * sum_{j=0}^{N-1} sum_{i=0}^{M-1} |p(i,j) - p · ave|. (1)

式(1)中:M,N 分别为 CU 的宽和高;p(i,j)表示位于(i,j)处的 CU 像素值;p · ave为 CU 块的平均像素值;当 MAD_{CU}<(16>>Depth)时,CU 为非复杂,而其他情况下,CU 为复杂,>>为右移,Depth 表示当前深度级.

表 1 为测试配置条件. 由于 MAD_{CU} 的计算可能给 HEVC 编码器带来额外的计算负担. 当 SKIP 为最佳 PU 模式时,其对应的 CU 纹理总是较为简单. 在表 1 测试配置条件下,6 个序列统计 MAD_{CU} 与 SKIP 模式的关系,如表 2 所示.

表 1 测试配置条件

Tab. 1 Test conditions

参考项目	参考值
操作系统	Microsoft Windows 8
处理器	Inter Core i5-4590 3.3 GHz
内存	4 GB
参考软件	HM 10.1
层次(Profile)	Main
图像组(GOP) 结构	Random access
最大 CU 尺寸	64 px×64 px
最大 CU 深度	4
量化参数(QP)	20,25,30,35,40
运动搜索模式	TZ Search
运动搜索范围	64

6 个序列的统计结果,如图 2 所示.图 2 中:QP 为量化参数.由图 2 可知:随着 QP 的增加,当 SKIP 模式为最佳时, $MAD_{CU} < (16 \gg Depth)$ 的概率(P)呈递减趋势.这主要是因为随着 QP 递增,CU 的分割越来越粗糙.通过取平均计算,可知满足 $MAD_{CU} < (16 \gg Depth)$ 为 85%.这说明了 SKIP 模式在一定程度上反映当前 CU 的纹理复杂度.

表 2 测试序列
Tab.2 Test sequences

纹理特性	序列	分辨率/ px×px	统计编 码帧数
同质	KimonoI	1 920×1 080	60
	ParkScene	1 920×1 080	60
	Traffic	2 560×1 600	60
非同质	BasketballPass	416×240	60
	RaceHorsesC	832×480	60
	PeopleOnStreet	2 560×1 600	60

为了衡量当前 CU 运动剧烈度,文中定义了平均运动矢量(\overline{MV}),即

$$\overline{MV} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^1 (|\overline{MV}_{x_i}| + |\overline{MV}_{y_i}|).$$

(2)

式(2)中: $i=0$ 和 $i=1$ 分别表示参考列表 0,1; X 和 Y 分别表示水平和垂直方向.

当 $\overline{MV}_{cur}=0, \overline{MV}_{lef}=0, \overline{MV}_{abo}=0$ 时,CU 为运动平缓;其他情况下,CU 为运动剧烈.其中, $\overline{MV}_{cur}, \overline{MV}_{lef}, \overline{MV}_{abo}$ 分别表示当前 CU、左邻近 CU、上邻近 CU 的平均运动矢量.

通过对 CU 纹理复杂度和运动剧烈度的分析,提出提前终止 CU 分割的算法.当 CU 对应的最佳 PU 模式为 SKIP,且 \overline{MV} 满足 CU 的运动强度时,提前终止 CU 的进一步分割.为了证明该算法的正确性,在表 1 的测试条件下,统计表 2 的测试序列 CU 分割的正确率,统计结果如表 3 所示.表 3 中: η 为正确率.由表 3 可知:利用 SKIP 和 \overline{MV} 提前结束 CU 分割的正确率随 QP 的增加而增大;总体平均正确率达到了 94.7%.这一统计结果充分说明了,提前终止 CU 分割的算法具有较好的正确性.

表 3 利用 SKIP 和 \overline{MV} 提前终止 CU 分割的正确率

Tab.3 Accuracy of early termination CU split by SKIP and \overline{MV} %

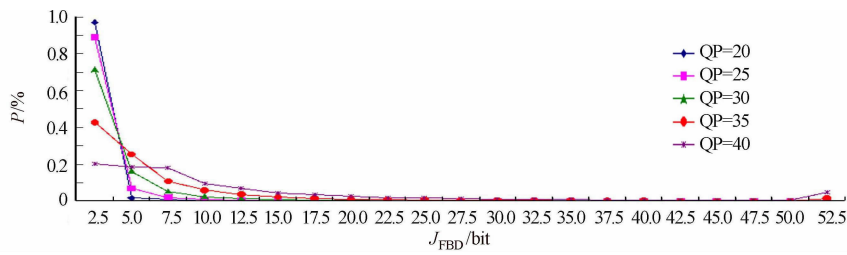
序列	η					平均值
	QP=20	QP=25	QP=30	QP=35	QP=40	
Traffic	92.4	96.4	97.9	98.8	99.4	97.0
Kimono	95.9	97.2	98.1	98.7	99.0	97.8
ParkScene	91.3	94.7	96.7	98.0	98.8	95.9
PeopleOnStreet	84.3	87.8	91.7	94.7	96.9	91.1
RaceHorsesC	83.0	87.6	91.7	94.7	96.9	90.8
BasketballPass	92.4	94.4	96.1	97.7	98.8	95.9
平均值	89.9	93.0	95.4	97.1	98.3	94.7

2.2 PU 模式决策优化算法

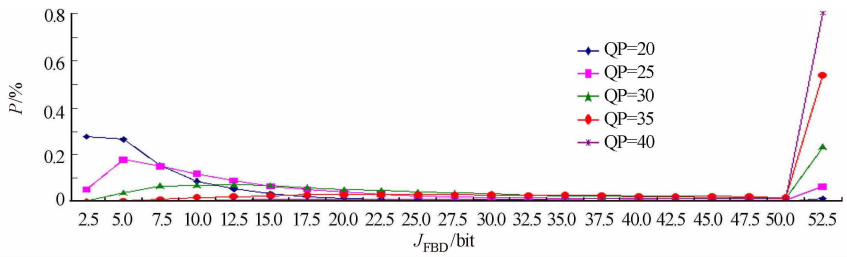
为了获得最佳的 PU 模式,HEVC 对每一个 CU 都进行多种 PU 模式的计算.若能设计出一种方法提前决策最佳的 PU 模式,或跳过某些 PU 模式将能极大地降低编码复杂度.为了实现 PU 模式决策过程的优化,统计了在表 1 测试条件下表 2 的测试序列,当 SKIP 模式和 AMP 模式分别为最佳 PU 模式时与其对应的 RD-Cost 的分布,如图 3 所示.图 3 中: J_{FBD} 为 RD-Cost,即率失真代价.

由图 3(a)可知:当 SKIP 为最佳 PU 模式时,QP 越小,RD-Cost 所占的比率越大.由图 3(b)可知:当 AMP 为最佳 PU 模式时,随着 QP 的递增,其 RD-Cost 的分布呈现出了与图 3(a)几乎相反的分布规律.由此可得,当 SKIP 模式为最佳 PU 模式时,其对应的 RD-Cost 倾向于较小值;而当 AMP 模式为最佳 PU 模式时,其对应的 RD-Cost 分布小于 5 000 的概率.

基于上述统计分析,选取表 2 的 6 个测试序列,以分别超过 95%和 85%命中率的 SKIP 模式和



(a) SKIP 模式



(b) AMP 模式

图 3 最佳时 RD-Cost 的分布
Fig. 3 RD-Cost distributions in optima

AMP 模式设定阈值, 以此进行 PU 优化. 进一步拟合, 可得

$$\text{TH}_{\text{SKIP}} = \begin{cases} 70.98 \cdot \exp(0.1599\text{QP}) + 2040, & \text{Depth} = 0, \\ 7.758 \cdot \exp(0.2063\text{QP}) + 1098, & \text{Depth} = 1, \\ 3.461 \cdot \exp(0.2234\text{QP}) + 675.2, & \text{Depth} = 2, \\ 4.436 \cdot \exp(0.1990\text{QP}) + 296.7, & \text{Depth} = 3. \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{TH}_{\text{AMP}} = \begin{cases} 1252 \cdot \exp(0.08942\text{QP}) - 1719, & \text{Depth} = 0, \\ 45.3 \cdot \exp(0.1696\text{QP}) + 813.4, & \text{Depth} = 1, \\ 8.91 \cdot \exp(0.2963\text{QP}) + 850.6, & \text{Depth} = 2. \end{cases} \quad (4)$$

优化 PU 模式决策过程的算法: 当 SKIP 模式的 RD-Cost 小于对应深度级的 TH_{SKIP} 时, 则跳过当前 CU 及其他帧间 PU 模式的测试; 当除 AMP 模式外其他帧间 PU 模式的最佳模式 RD-Cost 小于对应深度级的 TH_{AMP} 时, 则当前 CU 的 PU 决策跳过 AMP 模式的计算.

为了进一步证明提出的 TH_{SKIP} 和 TH_{AMP} 的合理性, 在表 1 的测试条件下, 统计了表 2 的测试序列在式(3),(4)下最佳 PU 模式的命中率, 统计结果如表 4 所示. 表 4 中: δ 为命中率.

表 4 预设阈值下最佳 PU 模式命中率

Tab. 4 Best PU mode hit ratio under preset thresholds

%

序列	δ					平均值
	QP=20	QP=25	QP=30	QP=35	QP=40	
Traffic	89.3	96.4	98.2	98.9	99.3	96.4
Kimono	69.4	85.0	90.6	93.3	95.3	86.7
ParkScene	89.5	97.1	98.3	98.7	99.1	96.5
PeopleOnStreet	71.9	91.9	96.2	97.2	97.6	91.0
RaceHorsesC	95.4	98.2	99.0	99.3	99.6	98.3
BasketballPass	70.4	84.9	91.9	94.6	96.4	87.7
平均值	81.0	92.3	95.7	97.0	97.9	92.8

由表 4 可知: 在式(3),(4)设定的阈值下, 随着 QP 的增加, 其命中率不断提升. 总体的平均命中率达到 92.8%. 这说明了预设的阈值能较好地预判 PU 的最佳模式.

2.3 整体算法

提出的算法主要由两部分组成: 提前 CU 终止分割和 PU 模式优化. 提出的算法流程图, 如图 4 所示. 图 4 中: J_{SKIP} 表示 SKIP 模式的 RD-Cost; J_{BEST} 表示除 AMP 和帧内模式外最佳模式的 RD-Cost.

3 实验结果与分析

为了验证提出的快速算法的有效性,以通用测试条件^[11]对全部 18 个测试序列各编码 100 帧进行测试. 使用 BDBR^[12] 和平均时间节省 (average time saving, ATS) 来衡量提出的算法在随机访问 (random access, RA) 配置和低时延 (low delay, LD) 配置下的编码性能. 选取 $QP = \{22, 27, 32, 37\}$, 其余测试条件如表 1.

ATS 的定义为

$$ATS = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{T_{Prop}(QP_i) - T_{Anchor}(QP_i)}{T_{Anchor}(QP_i)} \times 100\%. \quad (5)$$

式(5)中: $T_{Prop}(QP_i)$ 表示提出算法在不同 QP 下的编码时间; $T_{Anchor}(QP_i)$ 表示原始 HM 10.1 标准代码在不同 QP 下的编码时间(表 4).

文中提出的综合算法与文献[6]在 RA 和 LD 配置下的编码性能对比,如表 5 所示. 由表 5 可知:提出的综合算法在 RA 配置下平均能节省 42. 2% 的编码时间, BDBR 增加 0. 624%. 与文献[6]提出的算法比对可以发现:提出的算法在编码复杂度降低小 2. 9% 的情况下, BDBR 的损失少了一半左右. 同样,通过对 LD 配置下的实验数据分析可知:在 LD 配置下,提出的算法平均降低了 36. 3% 的编码复杂度,相比于文献[6]的 43. 9% 有所不足,提出的算法 BDBR 的增加仅为文献[6]的 0. 23. 这充分说明了,相较于文献[6],提出的算法能在编码复杂度节省与编码性能损失之间取得更好的平衡.

表 5 文中提出的综合算法与文献[6]的编码性能对比

Tab. 5 Performance comparison between algorithm of this paper and reference [6]

编码配置方式		RA				LD			
类别	序列	提出的算法		文献[6]提出的算法		提出的算法		文献[6]提出的算法	
		BDBR/%	TS/%	BDBR/%	TS/%	BDBR/%	TS/%	BDBR/%	TS/%
Class A WQXGA	Traffic	0. 639	−54. 4	1. 059	−60. 5	0. 456	−47. 7	1. 015	−54. 7
	PeopleOn Street	0. 875	−24. 3	0. 228	−42. 5	0. 301	−22. 1	0. 477	−32. 5
Class B 1 080 pix	Kimono	0. 686	−39. 8	1. 013	−47. 3	0. 335	−35. 6	0. 898	−38. 0
	ParkScene	0. 796	−48. 3	0. 972	−45. 2	0. 430	−39. 4	0. 893	−40. 5
	Cactus	0. 849	−42. 9	1. 054	−42. 1	0. 416	−36. 3	0. 596	−43. 5
	Basketball Drive	0. 361	−39. 3	1. 025	−41. 8	0. 219	−35. 1	0. 844	−42. 3
Class C WVG	ABQTerrace	0. 872	−52. 2	1. 168	−49. 7	0. 382	−45. 5	1. 337	−42. 7
	Basketball Drill	0. 341	−35. 9	2. 133	−39. 8	0. 045	−31. 3	1. 912	−44. 0
	BQMall	0. 822	−34. 3	1. 652	−40. 0	0. 362	−30. 1	2. 023	−43. 5
	PartyScene Race	0. 704	−30. 7	1. 164	−45. 8	0. 247	−19. 2	1. 029	−40. 0
	HorsesC	0. 504	−21. 4	1. 826	−38. 5	0. 169	−19. 7	1. 010	−34. 1
Class D WQVGA	Basketball Pass	0. 651	−38. 2	1. 812	−28. 9	0. 143	−33. 9	1. 525	−35. 4
	BQSquare	0. 501	−43. 4	0. 464	−34. 4	0. 092	−26. 2	0. 467	−36. 0
	Blowing Bubbles	0. 865	−30. 0	1. 375	−33. 7	0. 356	−21. 0	2. 263	−39. 7
	RaceHorses	0. 772	−16. 5	1. 849	−24. 4	0. 213	−14. 5	0. 723	−30. 8

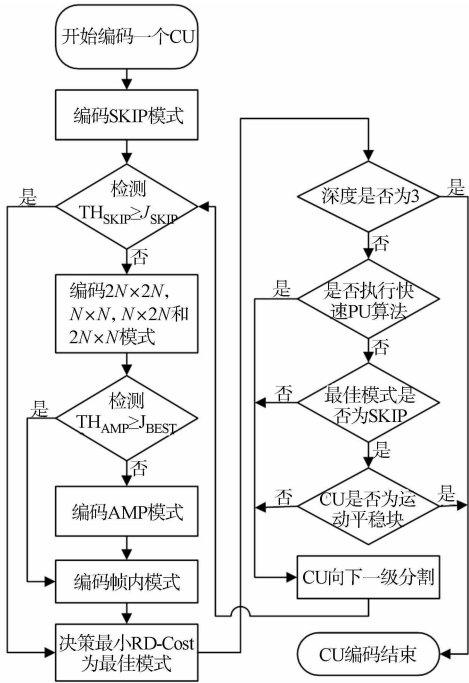


图 4 整体算法流程图

Fig. 4 Flowchart of overall process

续表									
Continue table									
编码配置方式		RA				LD			
类别	序列	提出的算法		文献[6]提出的算法		提出的算法		文献[6]提出的算法	
		BDBR/%	TS/%	BDBR/%	TS/%	BDBR/%	TS/%	BDBR/%	TS/%
Class E 720 pix	FourPeople	0.249	−67.8	1.495	−66.3	0.121	−63.5	1.104	−64.0
	Johnny	0.300	−70.6	0.912	−67.8	0.286	−66.6	1.329	−66.9
	KristenAnd Sara	0.436	−69.7	1.346	−62.5	0.185	−65.4	1.488	−60.9
	平均值	0.624	−42.2	1.252	−45.1	0.264	−36.3	1.162	−43.9

4 结 束 语

提出的利用 SKIP 和 \overline{MV} 提前终止 CU 分割,并引入统计阈值 TH_{SKIP} 和 TH_{AMP} 分别提前判决 SKIP 模式和跳过 AMP 模式计算的快速编码算法,在产生 0.624%BDBR 损失的情况下,能有效地大幅降低编码复杂度.另外,值得一提的是,所提出的算法易于在软件上实现.下一步研究的重点主要是提出自适应在线更新阈值,进一步优化编码复杂度.

参考文献:

[1] SULLIVAN G J, OHM J, HAN W, *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. DOI: 10.1109/TCSVT.2012.2221191.

[2] CORREA G, ASSUNCAO P, AGOSTINI L, *et al.* Performance and computational complexity assessment of high efficiency video encoders[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12): 1899-1909.

[3] GWEON R, YUNG-LYUL L E E. Early termination of CU encoding to reduce HEVC complexity[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2012, 95(7): 1215-1218.

[4] CHOI K, PARK S H, JANG E S. Coding tree pruning based CU early termination (JCTVC-F092)[C]// Proceedings of the JCT-VC 6th Meeting. Turin: IEEE Press, 2011: 2.

[5] KIM J, YANG J, WON K, *et al.* Early determination of mode decision for HEVC[C]// Picture Coding Symposium. Krakow: IEEE Press, 2012: 449-452. DOI: 10.1109/PCS.2012.6213251.

[6] SHEN Liquan, ZHANG Zhaoyang, LIU Zhi. A daptive inter-mode decision for HEVC jointly utilizing inter-level and spatiotemporal correlations[J]. Circuits and Systems for Video Technology, 2014, 24(10): 1709-1722. DOI: 10.1109/TCSVT.2014.2313892.

[7] JOU S, CHANG S, CHANG T. Fast motion estimation algorithm and design for real time QFHD high efficiency video coding[J]. Circuits and Systems for Video Technology, 2015 (25): 1533-1544. DOI: 10.1109/TCSVT.2015.2389472.

[8] MA Siwei, WANG Shiqi, WANG Shanshe, *et al.* Low complexity rate distortion optimization for HEVC[C]// Data Compression Conference. Snowbird: IEEE Press, 2013: 73-82.

[9] LU Jiajia, LIANG Fan, XIE Liwei, *et al.* A fast block partition algorithm for HEVC[C]// Conference on Information, Communications and Signal Processing International. Tainan: IEEE Press, 2013: 1-5.

[10] YUAN Yuan, ZHENG Xiaozhen, HE Yun. Skip mode coding for nonsquare prediction blocks[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2015(81): 425-432.

[11] BOSSEN F, COMMON HM. Test conditions and software reference onfiguration[C]// 12th JCT-VC Meeting. Geneva: [s. n.], 2013: 1-3.

[12] BJONTEGAARD G. Calculation of average PSNR difference between RD-curves[C]// 13th VCEG Meeting. Texas: VCEG, 2001: 290-291.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)