

一种基于时域相关性的高性能视频编码快速帧间预测单元模式判决算法

李元 何小海* 钟国韵 卿琳波

(四川大学电子信息学院 成都 610064)

摘要: 为了降低高性能视频编码(HEVC)的编码计算复杂度,根据视频时域上高度相关性的特点,该文提出一种快速高性能视频编码(HEVC)帧间预测单元(PU)模式判决算法。分析了时域上相邻帧两帧相同位置编码单元(CU)的PU模式之间的相关性;同时,针对视频中可能存在对象运动,还分析了前一帧对应位置CU的周边CU与当前帧中当前CU间PU模式的相关性。根据分析的时域相关性,跳过当前CU中冗余的PU模式,从而降低编码复杂度。实验结果表明,在编码效率和峰值信噪比(PSNR)损失很小的情况下,在目前已有的HEVC快速帧间预测算法的基础上,进一步降低了31.30%的编码时间。

关键词: 高性能视频编码(HEVC); 帧间预测; 预测单元(PU); 编码时间

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2365-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00028

A Fast Inter-frame Prediction Unit Mode Decision Algorithm for High Efficiency Video Coding Based on Temporal Correlation

Li Yuan He Xiao-hai Zhong Guo-yun Qing Lin-bo

(College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In order to reduce the computational complexity, a fast inter-frame Prediction Unit (PU) mode decision algorithm is proposed for High Efficiency Video Coding (HEVC) based on the strong temporal correlation in video sequences. The correlation of PU modes of Coding Unit (CU) between two adjacent frames is analyzed. Considering the probable objects motion in videos, the correlation of PU modes between the surrounding CUs of the corresponding located CUs in the previous frame and the current CU is also analyzed. Based on the analysis, the redundant PU modes are skipped for the current CU to reduce the coding computational complexity. The experiment results show that the proposed method save 31.30% of coding time compared with the current fast inter prediction algorithm for HEVC under the condition of minimal lose of coding efficiency and PSNR.

Key words: High Efficiency Video Coding (HEVC); Inter-frame prediction; Prediction Unit (PU); Encoding time

1 引言

2010年1月,ITU-T的Video Coding Experts Group (VCEG)和ISO/IEC (MPEG)联合成立了JCT-VC(Joint Collaborative Team on Video Coding)开始制定新一代视频编解码标准:高性能视频编码(High Efficiency Video Coding, HEVC)^[1]。到目前为止,HEVC已经基本实现了初时提出的较H.264/AVC编码效率提升一倍的目标,但同时HEVC的计算复杂度也远高于H.264/AVC。如何在保证视频编码性能的同时降低编码计算复杂度一直都是视频编码领域的研究热点。

在H.264/AVC的研究中,文献[2]在转码中借助输入码流中的运动矢量来避免当前宏块的运动估计,并且提出了新的运动矢量合成算法。文献[3,4]通过分析宏块包含的像素特性来减少帧间预测的计算复杂度。文献[5-7]利用了宏块时域或空域上的相关性来降低帧间预测的计算复杂度。文献[8,9]通过分析各种预测模式的率失真代价函数的特性,达到减少帧间预测计算复杂度的目的。文献[10]通过分析各种预测模式的统计特性来提前终止预测模式的轮询。文献[11]提出一种率-失真和计算复杂度的框架,只对特定分块进行运动估计。文献[12]提出了一种3层的分等级结构,每层采用不同的运动估计的复杂度,从而节约了编码时间。上述方法均取得了良好的实验效果,但它们均是在H.264平台上进行的改进。因此,它们并不完全适用于使用了四叉树划分技术的HEVC。

2013-01-08收到,2013-05-03改回

国家自然科学基金(61201388),高等学校博士学科点专项科研基金(20110181120009)及国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(11176018)资助课题

*通信作者: 何小海 hxxh@scu.edu.cn

2 HEVC已有快速帧间预测单元(PU)模式判决技术介绍

在HEVC的研究中,文献[13-15]提出的3种算法均在保证编码性能的前提下大幅降低了计算复杂度,并且这3种算法已经被收录到HEVC测试模型(HM)代码中。并作为加速HEVC编码的可选配置。它们在HEVC默认的配置文件中是被关闭的。

文献[13]在HEVC配置代码中被定义为CFM(CBF Fast Mode setting),它通过判断CBF(Coding Block Flag)的取值来简化PU(Prediction Unit)模式的判决,PU模式的种类如图1所示。CBF包含了CBF_luma, CBF_u, CBF_v 3部分,分别用来判断在对应PU模式下CU(Coding Unit)的亮度和色度块的量化系数是否为0。如果CBF_luma, CBF_u, CBF_v中任意一个为0,则CBF为0,认为对当前CU的像素预测足够准确,从而跳过余下的PU模式判决。

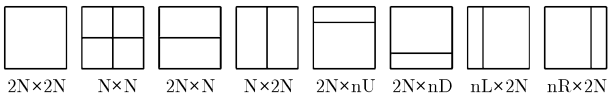


图1 HEVC中的PU模式

文献[14]在HEVC配置代码中被定义为ECU(Early CU setting),它通过简化CU四叉树划分降低编码时间。当遍历完当前CU的所有PU模式后,选出当前最佳PU模式,如果该模式满足skip条件(最佳PU模式为Merge模式且CBF为0),则认为当前尺寸下CU所包含的像素分布比较单一提前终止CU的四叉树划分。

文献[15]在HEVC配置代码中被定义为ESD(Early SKIP Detection setting),是HM7.0测试模型最新加入的加速工具。该方法将帧间2N×2N模式提前到帧间融合模式之前,并在遍历这两种PU模式后判断是否满足提早跳过条件(最佳模式为帧间2N×2N模式且CBF和DMV(Differential Motion Vector)均为0或最佳模式为帧间融合模式),如果满足该条件则跳过剩余的PU模式,否则遍历全部PU模式。

上述3种算法均被HM7.0作为加速编码工具,并且可以叠加使用。经过实验统计3种算法同时使用可以节省60%左右的编码时间。它们均是利用了编码过程中出现的特殊情况来降低编码时间。本文则利用视频时域相关性强的特点,提出一种HEVC快速帧间PU模式判决算法。在对当前CU进行编码时参考前一帧相对位置上CU的PU模式,进而减少当前CU的PU模式判决次数,最终实现在文献[13-15]算法的基础上进一步节省编码时间的目的。

3 快速帧间PU模式判决算法的提出

本节提出一种快速帧间PU模式判决算法,该算法利用视频时域的相关性,在编码当前CU时借鉴参考帧中相同位置CU及其周边CU的PU模式,将其作为当前CU的最佳PU模式,以达到减少遍历帧间PU模式次数节省编码时间的目的。

3.1 参考帧中相同位置CU的PU模式选择

视频实质上是由多帧连续静止图像组成的,其帧与帧之间具有很强的相关性。基于这种特性,我们假设当前编码CU与参考帧中相同位置CU具有相似性。在遍历当前编码CU的PU模式之前,找到参考帧中与当前编码CU相同位置的CU——CLCU(Corresponding Located CU),读取它的PU模式,将此PU模式选为当前CU编码的候选PU模式并将其加入到PU候选模式表——CandPUL中。HEVC的四叉树分割机制导致了CU尺寸的多样性。基于这种多样性我们定义变量RCU:

$$RCU = S_{cl}/S_{cur} \quad (1)$$

式中 S_{cl} 表示CLCU尺寸, S_{cur} 表示当前编码CU尺寸。我们通过RCU的不同取值自适应地选取候选PU模式。根据RCU的取值范围分为3种情况讨论候选PU模式的选取,如图2所示。

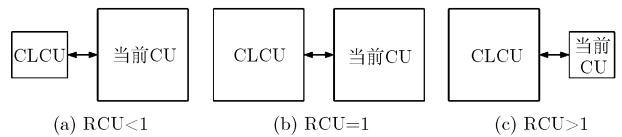


图2 RCU取值的3种情况

(1)RCU<1 将CLCU与其相邻CU进行合并形成一个RefCU(RefCU的概念为:参考帧中坐标位置和尺寸与当前CU相等的图像块),如图3所示。依次读取RefCU中子CU的PU模式,在这个过程中如果子CU的PU模式为帧内PU模式,则将孩子CU记为不可参考块——NoRefCU,否则将其PU模式加入到CandPUL中。

(2)RCU=1 CLCU等价于RefCU,判断CLCU的PU模式是否为帧内PU模式,如果是,则将该

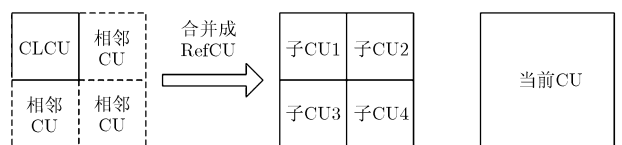


图3 RCU<1时参考CU的合并

CLCU 记为 NoRefCU；否则直接将 CLCU 的 PU 模式—— PU_{CLCU} 加入到 CandPUL 中。为了防止误差我们将 CU 编码中被选为最佳 PU 模式频率最高的帧间融合模式和帧间 $2N \times 2N$ 模式加入到 CandPUL 中。为了证明这种选取策略的合理性我们选取 4 组视频序列的前 100 帧进行编码，并统计使用 HEVC 传统算法编码时当前编码 CU 的最佳 PU 模式落入 CandPUL 中的概率，统计结果如表 1 所示。从表中我们也可以看出两帧之间相对位置 CU 在相同尺寸的情况下，其 PU 模式相似率较高，但仍有较大的误判率。而加入帧间融合模式和帧间 $2N \times 2N$ 模式后，误判率有明显下降，证实了这种选取策略的合理性。

表1 当前编码CU的最佳PU模式落入CandPUL的概率(%)

序列	CandPUL(只包含 PU_{CLCU})	CandPUL(包含 PU_{CLCU} ，帧间融合模式和帧间 $2N \times 2N$ 模式)
BQSquare (416×240)	70.12	82.77
PartyScene (832×480)	52.51	70.23
Johnny (1280×720)	88.88	90.24
Kimono1 (1920×1080)	79.61	88.65
平均	72.78	82.97

(3) $RatioCU > 1$ 同样地，先判断 CLCU 的 PU 模式是否为帧内 PU 模式，如果是，则将该 CLCU 记为 NoRefCU；否则当 $RCU=2$ 时，参考 CU 的 PU 模式对当前 CU 的 PU 模式选择有一定的借鉴意义，如图 4 所示。图 4(a) 中 CLCU 的 PU 模式为 $nL \times 2N$ ，RefCU 包含了 CLCU 的 PU 模式分割边界，认为 RefCU 采用了 $N \times 2N$ 的 PU 模式；图 4(b) 中 RefCU 没有包含 CLCU 的 PU 模式分割边界，但由于 RefCU 从属于 CLCU，仍然认为 RefCU 采用了 $N \times 2N$ 的 PU 模式。图 4(c) 中 CLCU 的 PU 模式为 $2N \times 2N$ ，出现这种情况表示 CLCU 可能处在图像纹理相对平坦的区域，同时考虑到当前 CU 与 CLCU 的相似性以及 $RCU > 1$ 的情况，可以认为当前 CU 很可能也处在图像纹理同样平坦的区域中。当 RCU 大于 2 时，当前 CU 尺寸远小于 CLCU，CLCU 的 PU 模式对当前 CU 没有足够的借鉴意义。基于以上分析，如果 $RatioCU$ 等于 2，当 CLCU 的 PU 模式为 $N \times 2N$ ， $nL \times 2N$ 或 $nR \times 2N$ 时，将 $N \times 2N$ 加入到 CandPUL 中；当 CLCU 的 PU 模式为 $2N \times N$ ， $2N \times nU$ 或 $2N \times nD$ 时，将 $2N \times N$ 加入到 CandPUL 中；当 CLCU 的 PU 模式为 $2N \times 2N$ 时，将

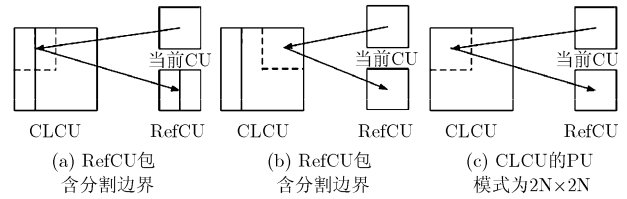


图4 $RCU > 1$ 时，候选PU模式的选取

$2N \times 2N$ 加入到 CandPUL 中。 RCU 大于 2 且 CLCU 的 PU 模式为 $2N \times 2N$ 时，将其加入到 CandPUL 中(理由与 $RCU=2$ 时相同)；为其它模式时，认为此种模式没有足够的借鉴意义，将所有 PU 模式加入到 CandPUL 中。

3.2 周边CU的PU模式选择

视频每帧中都存在静止和运动区域。静止区域中帧间相同位置 CU 的相似性很强，因此在编码当前 CU 时参考 CLCU 的 PU 模式很有意义。但在运动区域中，由于运动物体的位移，帧间同一位置的图像纹理会发生变化，当前 CU 与 CLCU 相似性会减弱。因此伴随着运动物体位置的变化，参考帧中与当前 CU 相似性最强的 CU 可能会位于 RefCU 周边。基于这种分析，为了减小 PU 模式选择误差，在 3.1 节算法的基础上，遍历 RefCU 周边 CU 的 PU 模式并从中选取候选 PU 模式，进一步更新 CandPUL；遍历过程中如果周边 CU 的 PU 模式为帧内模式，将其记为 NoRefCU。图 5 展示了 RefCU 与其周边 CU 的关系，从图中可以看出由于 CU 尺寸的多样性，RefCU 的周边 CU 尺寸不尽相同。因此，在遍历周边 CU 的过程中，同样要考虑当前 CU 与周边 CU 尺寸间的关系，为此我们依然利用 RCU (S_a 在这里表示周边 CU 尺寸) 自适应选取候选 PU 模式。

(1) $RCU < 1$ RCU 小于 1 时且 PU 模式为 $2N \times 2N$ 时，虽然可以认为周边 CU 处在图像纹理相对平坦的区域，但由于周边 CU 的尺寸小于当前 CU；因此其 PU 模式没有足够的参考价值，不对 CandPUL 进行

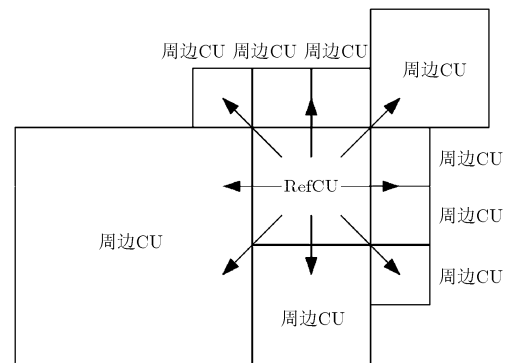


图5 RefCU 与其周边CU的关系

更新,并将该周边CU记为NoRefCU。当PU模式为其它模式时,将其PU模式加入到CandPUL中。

(2)RCU=1 或 2 RCU 等于 1 或 2 时,采取 3.1 节对应方法来选取候选 PU 模式。

(3)RCU>2 RCU 大于 2 时且周边CU的PU模式为 $2N \times 2N$ 时,直接将其加入到CandPUL中。PU模式为其它模式时,认为该PU模式没有足够的参考价值,不对CandPUL进行更新,并将该周边CU记为NoRefCU。

3.3 改善算法性能的措施

使用本文算法可以有效减少当前CU遍历PU模式的数量,但也造成了编码帧中PU模式种类随着编码帧的增多趋于单一的问题,破坏了HEVC中PU模式多样性的特性。为此我们定义RNoRef:

$$RNoRef = \frac{NumNoRefCU}{NumRefCU}, 0 < RNoRef < 1 \quad (2)$$

式中 NumRefCU 表示遍历 CU 的总数量, NumNoRefCU 表示 NoRefCU 的数量, RNoRef 的取值大小与参考帧中 CU 对当前 CU 的参考价值成反比, RNoRef 越大参考价值越小,反之亦然。设定阈值 $T(0 < T < 1)$, 当 RNoRef 大于 T 时,认为参考帧中 CU 对当前 CU 没有足够的参考价值,编码当前 CU 时遍历全部 PU 模式,否则遍历 CandPUL 中的 PU 模式。

本文算法性能的优劣取决于CandPUL中PU模式,其PU模式数量越少选取越准确,编码时间节省越多对编码性能的影响越小。为了验证PU模式选取策略的优劣,我们进行了相关实验统计,实验结果如表2和表3所示。从表2中可以看出CandPUL中PU模式平均数量为2.09,远低于所有帧间PU模式的数量。表3中统计了CU遍历所有PU模式后选出的最佳PU模式包含在CandPUL中的概率。可以看出,最佳PU模式出现在CandPUL中的平均概率为83.58%,PU模式选取策略的准确率较高,但仍存在一定的误判率。为此,我们将帧间融合模式和帧间 $2N \times 2N$ 模式作为CandPUL必须包含的两种模式,并统计最佳PU模式出现在CandPUL中的概率,结果显示使用这种方法误判率明显降低,可以保证在编码效率的情况下节省编码时间。对以上所有算法细节进行整理,本文整体算法流程如图6所示。

4 实验结果及相关分析

本文实验选取 HM7.0 测试模型。实验的测试环境遵从 HM7.0 测试标准^[16],使用 lowdelay_P_HE10 的配置文件,并选取不同分辨率的 6 个视频序列的前 100 帧分别在量化参数 QP=22,27,32,37 的情况下

表2 CandPUL中PU模式平均数量

序列	CandPUL 中 PU 模式平均数量
BQSquare(416×240)	2.15
PartyScene(832×480)	2.29
Johnny(1280×720)	1.61
Kimono1(1920×1080)	2.32
平均	2.09

表3 CandPUL中PU模式选取准确率(%)

序列	CandPUL	CandPUL(包含帧间融合模式和帧间 $2N \times 2N$ 模式)
BQSquare(416×240)	79.31	90.49
PartyScene(832×480)	78.14	92.06
Johnny(1280×720)	92.09	99.11
Kimono1(1920×1080)	84.76	97.55
平均	83.58	94.80

进行测试。实验平台为 CPU 为 intel core i5 M430 2.27 GHz 及内存 4 GB 的 PC。为了充分证明本文算法的性能,分别在关闭和打开 HM7.0 中 CFM, ECU 和 ESD 加速工具这两种情况下进行实验。实验中阈值 T 设为 0.3,即 NoRefCU 在所有遍历过的 CU 中比重超过 30%时,将所有帧间 PU 模式加入到 CandPUL 中。

实验结果如表 4 所示,表中 $\Delta PSNR(Y)$, ΔBR 和 ΔT 分别表示本文算法与 HM7.0 算法在 PSNR (峰值信噪比)、码率和编码时间 3 项数值上的增减,

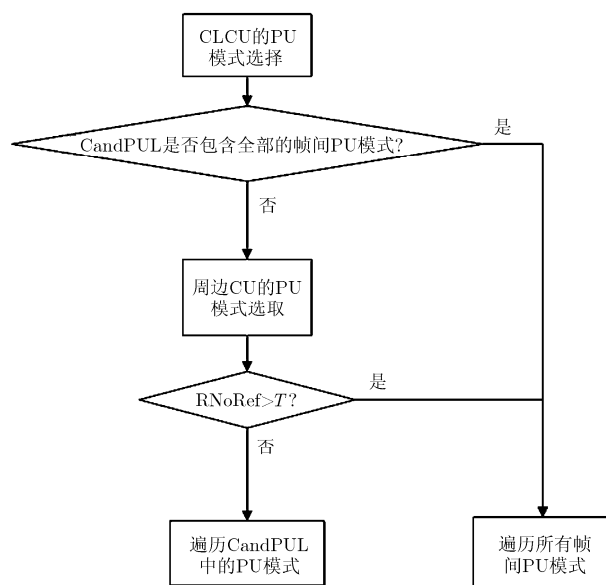


图6 本文整体算法流程

其计算公式为

$$\Delta \text{PSNR}(Y) = \text{PSNR}(Y)_P - \text{PSNR}(Y)_{\text{HM7.0}} \quad (3)$$

$$\Delta \text{BR} = \frac{\text{BR}_P - \text{BR}_{\text{HM7.0}}}{\text{BR}_{\text{HM7.0}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\Delta T = \frac{T_p - T_{\text{HM7.0}}}{T_{\text{HM7.0}}} \times 100\% \quad (5)$$

从表4可以看出, 本文算法与HEVC默认PU模式判决算法相比, 时间平均节省47.67%, 即使在加入了文献[13-15]的快速算法的情况下本文算法仍将编码时间进一步降低了31.30%, 同时码率和PSNR的波动很小。

通过对实验数据的观察, 发现 ΔBR 会随着QP的升高而降低。这是因为高QP下CU包含的像素纹理趋于平坦, 最佳PU模式为inter 2N×2N的可能性会增大, 而本文算法将inter 2N×2N模式选为必须遍

历的一种PU模式, 因此在高QP下, 本文算法的PU选取误判率较低, 编码性能损失较小。视频的运动特性和分辨率也会影响本文算法的性能。QP为22时, ΔBR 最大和最小的分别为BlowingBubbles和KristenAndSara。BlowingBubbles中目标物体的运动方向有很强的不确定性; 因此其PU分割模式将会呈现多样性降低帧间PU模式的相关性, 增大了本文算法PU模式误判率, 影响了编码性能。KristenAndSara中目标物体运动幅度较小, PU分割模式相对单一, 帧间PU模式相关性强, 本文算法对其编码性能的影响更小。同时, 高分辨率视频的 ΔBR 明显低于低分辨率视频, 这种实验结果与表1和表3的统计相吻合。从表1和表3中可以看出, 高分辨率下视频帧间PU的相关性更高, 本文算法对高分辨率视频

表 4 实验统计结果

序列	QP	关闭 CFM, ECU 和 ESD			打开 CFM, ECU 和 ESD		
		$\Delta \text{PSNR}(Y)(\text{dB})$	$\Delta \text{BR}(\%)$	$\Delta T(\%)$	$\Delta \text{PSNR}(Y)(\text{dB})$	$\Delta \text{BR}(\%)$	$\Delta T(\%)$
BlowingBubbles(416×240)	22	-0.06	2.21	-40.63	-0.04	1.35	-26.47
	27	-0.08	2.25	-44.89	-0.05	1.23	-31.38
	32	-0.10	1.62	-47.68	-0.08	1.22	-34.92
	37	-0.10	1.54	-48.08	-0.07	1.01	-37.35
BasketballDrill(832×480)	22	-0.04	2.03	-40.10	-0.03	1.28	-23.19
	27	-0.04	1.52	-45.09	-0.04	1.14	-26.99
	32	-0.05	1.56	-48.23	-0.04	1.06	-35.73
	37	-0.06	0.65	-51.04	-0.06	0.92	-40.84
FourPeople(1280×720)	22	-0.03	1.44	-47.45	-0.01	1.02	-24.32
	27	-0.03	1.57	-50.37	-0.03	1.02	-28.42
	32	-0.03	1.12	-53.89	-0.04	0.86	-33.94
	37	-0.04	0.76	-55.02	-0.06	0.54	-38.62
KristenAndSara(1280×720)	22	-0.03	0.69	-47.39	-0.02	0.76	-26.35
	27	-0.04	1.01	-51.08	-0.03	0.78	-30.58
	32	-0.04	0.94	-54.23	-0.04	0.62	-35.21
	37	-0.05	0.18	-54.26	-0.06	0.11	-39.27
BasketballDrive(1920×1080)	22	-0.01	1.50	-39.64	-0.02	0.99	-22.43
	27	-0.03	0.54	-41.53	-0.03	0.49	-26.12
	32	-0.05	0.26	-45.82	-0.03	0.20	-31.29
	37	-0.04	0.17	-45.67	-0.05	0.11	-35.41
BQTerrace(1920×1080)	22	0.01	1.10	-40.33	-0.02	0.90	-24.13
	27	-0.04	0.31	-45.87	-0.03	0.30	-28.82
	32	-0.03	0.19	-51.59	-0.04	0.15	-32.20
	37	-0.02	0.18	-54.31	-0.01	0.12	-37.21
平均值		-0.04	1.06	-47.67	-0.04	0.76	-31.30

PU模式判决的准确率也更高。因此本文算法对高清视频的编码性能损失更小,符合HEVC针对高清视频编码的这一特性,充分体现了本文算法在HEVC中的意义。

5 结论

本文利用视频时域相关性强的特点并充分考虑了视频帧中静止区域和运动区域各自的特性,在编码当前CU时利用参考帧中CLCU以及RefCU周围的CU的帧间PU模式,减少CU编码时遍历帧间PU模式的次数,从而降低CU编码时间。实验结果显示,本文提出的算法可以在文献[13-15]所提出的算法上叠加使用,并在其基础上进一步节省了31.30%的编码时间。

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] 吕卓逸, 贾克斌, 萧允治. H.264 跳帧转码中帧间模式选择和运动估计快速算法[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(12): 4814-4817.
Lü Zhuo-yi, Jia Ke-bin, and Xiao Yun-zhi. Fast inter mode decision and motion estimation in H.264 frame-skipping transcoding[J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(12): 4814-4817.
- [3] Lee P J, Kuo K T, Huang S H, *et al.*. Coding mode determination using fuzzy reasoning in H.264 motion estimation[J]. *IET Signal Processing*, 2011, 5(2): 242-250.
- [4] 韦耿, 刘文予, 李鹏飞. 基于运动区域划分的 H.264 低复杂度模式选择[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2008, 20(1): 93-98.
Wei Geng, Liu Wen-yu, and Li Peng-fei. Low complexity mode selection for H.264 based on motion region partitions[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(1): 93-98.
- [5] Paul M, Lin W, Lau C T, *et al.*. Direct intermode selection for H.264 video coding using phase correlation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(2): 461-473.
- [6] Zhao T, Wang H, Kwong S, *et al.*. Fast mode decision based on mode adaptation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, 20(5): 697-705.
- [7] 冯镔, 刘文予, 朱光喜. 基于空间相关性的 H.264 快速自适应模式选择算法[J]. *通信学报*, 2006, 27(1): 75-80.
Feng Bin, Liu Wen-yu, and Zhu Guang-xi. Fast adaptive mode decision algorithm for H.264 based on spatial correlation[J]. *Journal on Communications*, 2006, 27(1): 75-80.
- [8] Grecos C and Yang M. Fast mode prediction for the baseline and main profiles in the H.264 video coding standard[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2006, 8(6): 1125-1134.
- [9] Kim S H and Ho Y S. Fast mode decision algorithm for H.264 using statistics of rate-distortion cost[J]. *Electronics Letter*, 2008, 44(14): 849-850.
- [10] 刘鹏宇, 何絮, 贾克斌. 对特定模式进行预判的 H.264 帧间快速编码算法[J]. *兵工学报*, 2011, 32(4): 439-444.
Liu Peng-yu, He Xu, and Jia Ke-bin. A fast H.264 inter-frame prediction algorithm for special mode[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(4): 439-444.
- [11] Ates H F and Altunbasak Y. Rate-distortion and complexity optimized motion estimation for H.264/AVC video coding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, 18(2): 159-171.
- [12] Yu A C W, Martin G R, and Park H. Fast inter-mode selection in the H.264/AVC standard using a hierarchical decision process[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, 18(2): 186-195.
- [13] Choi Kiho, Park Sang-hyo, and Jang E S. Coding tree pruning based CU early termination[OL]. JCT-VC-Meeting, JCTVC-F092, Torino, Italy, July 2011. <http://phenix.int-evry.fr/jct/index.php>, 2011.
- [14] Gweon Ryeong-hee, Lee Yung-lyul, and Lim Jeong-yeon. Early termination of CU encoding to reduce HEVC complexity[OL]. JCT-VC-Meeting, JCTVC-F045, Torino, Italy, July 2011. <http://phenix.int-evry.fr/jct/index.php>, 2011.
- [15] Yang Jung-young, Kim Jaeh-wan, Won Kwang-hyun, *et al.*. Early SKIP detection for HEVC[OL]. JCT-VC-Meeting, JCTVC-G543, Geneva, Swiss, Nov. 2011. <http://phenix.int-evry.fr/jct/index.php>, 2011.
- [16] Frank B. Common test conditions and software reference configurations[OL]. JCT-VC-Meeting, JCTVC-I1100, Geneva, Swiss, April 2012. <http://phenix.int-evry.fr/jct/index.php>, 2012.

李元: 男, 1987年生, 硕士生, 研究方向为 HEVC 视频编码算法。

何小海: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、模式识别、网络通信及计算机应用等领域的教学和科研工作。

钟国韵: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为视频处理、视频压缩领域的科研工作。

卿璐波: 男, 1982年生, 讲师, 主要从事图像处理、图像识别及视频通信的科研工作。