

基于预测单元尺寸的高效视频编码帧内 预测模式快速选择的改进算法

石敏, 席诗华*, 易清明

暨南大学信息科学技术学院, 广东 广州 510632

摘要 为降低高效视频编码(HEVC)中帧内预测编码复杂度和编码耗时,提出一种基于预测单元(PUs)尺寸的 HEVC 帧内预测模式快速选择的改进算法。对最大尺寸 PUs 利用统计概率分层构建进入粗选择模式(RMD)过程的模式列表,对其他尺寸 PUs 分别采用两种不同方式提取纹理方向构建进入 RMD 过程的模式列表,其中对 32×32 、 16×16 尺寸 PUs 采用像素梯度提取纹理方向,对 8×8 、 4×4 采用像素值偏差提取纹理方向,从而减少进入 RMD 过程模式数量,有效降低编码时间。实验结果表明,本算法所用编码时间比测试模型 HM16.9 减少 32.2%,而码率仅仅增加了 0.86%。与现有优秀算法相比,本文算法进一步降低编码耗时,保证了编码质量。

关键词 图像处理; 高效视频编码; 帧内预测; 模式选择; 纹理方向

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.201001

Improved Algorithm for Intraframe Prediction Mode Fast Selecting in High-Efficiency Video Coding Based on Size of Prediction Units

Shi Min, Xi Shihua*, Yi Qingming

College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract To reduce the computational complexity and time consumption of intraframe prediction in high-efficiency video coding (HEVC), an improved algorithm for intraframe prediction mode fast selecting in HEVC based on the size of the prediction units (PUs) is proposed. For the maximum size of PUs, the statistical probability is used to hierarchically set the candidate modes into the rough mode decision (RMD) process. For other PUs, candidate modes are set by extracting the texture direction in two different ways into the RMD process. We use the pixel gradient for the 32×32 and 16×16 PUs and use pixel value deviation for the 8×8 and 4×4 PUs to extract the texture direction; therefore, fewer modes are selected to calculate and reduce the time taken by the RMD process. Experimental results show that the proposed algorithm reduces the encoding time by approximately 32.2% on average with only a 0.86% increase in code rate in comparison with HM16.9. In compared with the existing algorithms, the proposed algorithm further reduces the coding time and produces better coding quality.

Key words image processing; high efficiency video coding; intra-frame prediction; mode decision; texture direction

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 100.2960

1 引言

2013 年国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T)和国际标准化组织/国际电工委员会(ISO/IE)联合发布了最新一代高效视频编码压缩标准(HEVC/H.265^[1])。针对自然图像设计^[2]的高效视频编码

(HEVC)在保证视频编码质量不变的前提下,比特率相比上一代视频高压压缩 H.264/AVC 减少近一半^[3]。HEVC 在技术上继承 H.264/AVC 混合编码框架,并引入新的编码技术,其中帧内预测模式选择增加至 35 种^[4],预测块(PUs)灵活划分,最小至 4×4 ,这大大提高了帧内预测的精度,但不可避免地

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-04-15; 录用日期: 2019-04-22

基金项目: 国家青年自然科学基金(61603153)、广州市科创委项目(201802010028)

* E-mail: xi1634421002@stu2016.jnu.edu.cn

带来帧内编码高复杂度和编码耗时长的问题,限制了新标准在实际应用中的推广,因此降低 HEVC 编码复杂度仍是近几年的研究热点。

众多研究者提出针对帧内预测模式选择的优化方案,致力于加快 HEVC 编码速度,降低编码复杂度。文献[5]和文献[6]都是在帧内预测模式选择前,利用 Sobel 算子计算当前 PUs 像素点水平和垂直方向梯度,并计算出像素点边缘矢量角度,统计像素角度及幅值生成直方图,根据直方图分布选出可能的预测模式进入粗模式决策(RMD)和率失真优化(RDO)过程,进而得到最佳模式,从而有效降低 RMD 和 RDO 过程计算复杂度。文献[7]使用像素值偏差(PVD)快速获取 4 个纹理方向,根据其 PVD 值大小构建进入 RMD 模式列表,同时根据 PUs 尺寸减少进入 RDO 过程模式的数量,从而减少模式选择计算量。文献[8]是综合编码单元(CU)划分和 PUs 模式选择的优化算法,在模式选择上通过简易算子提取 4 个方向像素差绝对值,然后求和平均值,根据 4 个平均值大小构建候选模式集进入 RMD 过程,以减少计算的模式数量,提高编码效率。文献[9]也是综合 CU 划分和 PUs 模式选择的综合算法,模式选择上根据哈达玛(Hadamard)变换代价值分层选择进入 RMD 过程模式,每一层模式选择根据上一层哈达玛变换代价值构建本层模式集,从而有效减少模式计算。文献[10]中提出一种模式快速选择两步算法,首先利用 PUs 尺寸沿着 4 个主要方向构建第一次进入 RMD 的模式, PUs 越大,模式越少,经过 RMD 后根据前几个候选模式加入相邻模式进行第二次 RMD 计算;其次,预测过程顺序将加入最可能模式(MPM)放在 RMD 之前, RMD 过程跳过 MPM 模式计算。另外,现在还有很多学者将机器学习的思想应用于模式快速选择上,例如文献[11]提出一种基于决策树的帧内预测模式方法,计算所有 PUs 上方、左方及参考像素的方差,然后用软件 WEKA 训练决策树将 PUs 划分为三组,从而减少模式的计算量,降低编码复杂度,节省了时间,但码率上升达 1.19%。

上述帧内预测模式快速选择算法都能够有效提高 HEVC 编码效率,缩减编码时间,但仍存在自身缺陷。例如,文献[5-8]都是提取纹理方向,对所有的 PUs 执行同样的算法, PUs 越小,纹理越复杂,方式单一,基于纹理的算法适应能力弱,不能有效降低编码复杂度,容易造成编码速度被提高同时,增加过多码率,降低信噪比。文献[9]和文献[10]都采用分

层构建模式集进入 RMD,没有分析其统计信息而是直接分组分层。

本文提出一种基于 PUs 尺寸的帧内预测模式快速选择的改进算法。为增强不同尺寸 PUs 对算法的适应性,将 PUs 尺寸分为 3 类,为 64×64 、 32×32 、 16×16 、 8×8 、 4×4 。不同尺寸采用不同优化的组合算法,对第一类的 PUs 使用统计概率分层构建进入粗 RMD 过程模式列表,对其他 PUs 根据不同纹理方向提取构建进入 RMD 过程模式列表;第二类的纹理方向采用改进的各向同性 Sobel 算子提取;第三类采用文献[7]中的 PVD 方法提取。最后再根据不同类 PUs 减少进入 RDO 过程模式数量,从而分别减少 RMD 和 RDO 过程的计算复杂度,提高帧内预测编码效率。

2 HEVC 帧内预测

HEVC 引入树形结构单元(CTU),通过二叉树方式灵活划分不同大小的 CU,帧内预测中每个 CU 可以有 1 个或 4 个 PUs,所以 PUs 共有 5 种尺寸,为 4×4 、 8×8 、 16×16 、 32×32 和 64×64 ^[12]。PUs 的帧内预测通过“三步法”选取失真率代价最小的模式作为最佳预测模式,其中亮度分量预测模式一共有 35 种,为 33 种角度模式、Planar(平滑)模式和 DC(直流)模式,如图 1 所示。

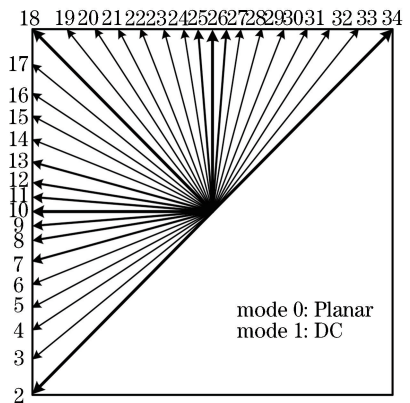


图 1 HEVC 帧内预测亮度模式

Fig. 1 Luminance modes of intraframe prediction in HEVC

“三步法”的过程为

1) RMD 筛选过程,35 种模式通过 RMD 后选取 Hadamard 代价最小的 M 个模式作候选模式,其 M 值由 PUs 尺寸决定,如表 1 所示。Hadamard 代价计算公式为

$$J_{\text{pred, satd}} = S_{\text{ATD}} + \lambda_{\text{pred}} B_{\text{pred}}, \quad (1)$$

式中, S_{ATD} 为原始像素与预测像素残差的 Hadamard 变换后的绝对值和(SATD), λ_{pred} 为拉格

朗日因子, B_{pred} 为该模式下 PUs 的编码码率。

表 1 候选模式子集个数

Table 1 Number of candidate mode subsets

PU _s size	4×4	8×8	16×16	32×32	64×64
M	8	8	3	3	3

2) 加入由当前 PUs 上方、左方构建的 MPM^[12], 这是因为空间相邻的块预测模式相同, 概率很高。

3) 将 M 个候选模式及 MPM 一起不重复地进行 RDO 计算, 得到失真率(R-D)代价最小的模式作为最佳预测模式^[13], 其代价计算公式为

$$J_{mode} = S_{SE} + \lambda_{mode} B_{mode}, \quad (2)$$

式中, S_{SE} 为原始像素与重构像素差的平方和 (SSE), B_{mode} 为失真和比特数, λ_{mod} 为拉格朗日因子。

3 个步骤带来的巨大计算量, 保证了 HEVC 帧内预测的准确性。通过统计发现 RDO 过程耗时占比超过 1/2, RMD 耗时占比近 1/4。如果能够提前减少 RMD 和 RDO 过程预测模式, 则会降低帧内预测编码复杂度, 减少编码时间。

3 帧内预测模式快速选择算法

为减低编码复杂度, 对帧内不同尺寸 PUs 预测进行分析, 采用不同算法对其优化, 帧内预测快速算

法流程图如图 2 所示。根据大量统计数据发现, 对于 64×64 第一类最大 PUs, 帧内预测最佳模式更多地集中在 Planar 模式、DC 模式及角度中垂直、水平、45° 和 135° 4 个主方向模式, 所以对最大 PUs 采用统计概率分层快速算法得到 RMD 候选模式, 然后保留前 2 个模式 RMD[0] 和 RMD[1] 直接进入 RDO。其他尺寸 PUs 模式选择的规律性弱, 最佳模式选择与纹理方向高度相关。因此通过判断当前 PUs 纹理方向筛选进入 RMD 过程模式列表, 其中对 32×32、16×16 第二类尺寸 PUs 利用各向同性 Sobel 边缘检测算子提取纹理方向。8×8、4×4 第三类尺寸 PUs 利用 PVD 提取纹理方向, 并选择少许模式组成集合 Δ 、Planar 模式和 DC 模式进入 RMD。经过 RMD 后得到 3 或 8 个 RMD 候选模式, 对第二类 PUs 保留前 2 个候选模式, 对第三类 PUs 保留 RMD[0]、RMD[1] 和 RMD[2] 前 3 个候选模式, 再加入 MPM 进入 RDO 过程。这样可以降低进入 RDO 的模式数量, 从而减少编码复杂度, 节省编码时间。

3.1 基于统计概率分层快速算法

大小为 64×64 尺寸 PUs 纹理简单, 极大部分是平坦渐变、水平变化、垂直变化或斜向变化, 所以最优模式概率分布绝大多数在模式 0 和模式 1 处, 其他分布主要集中于水平模式(模式10)、垂直模式

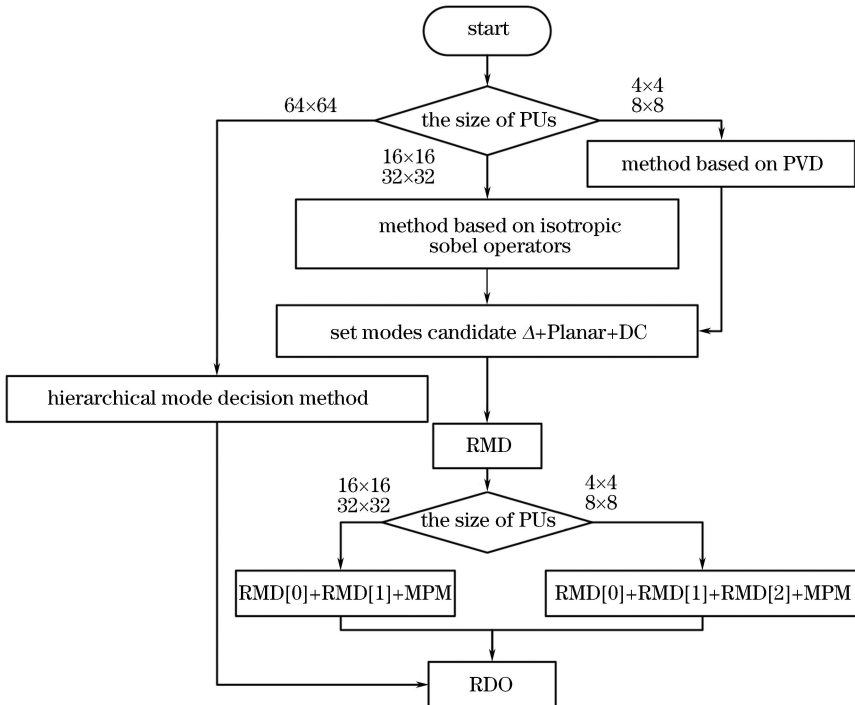


图 2 帧内预测总体流程图

Fig. 2 Overall flowchart of intraframe prediction

(模式 26)、45°模式(模式 18)、135°模式(模式 2 和模式 34)及其附近。

图 3 是 16 个视频序列最优帧内预测模式统计结果,非角度模式(模式 0 和模式 1)及水平、垂直、45°和 135°4 个主方向模式成为最佳预测模式的概率达到 76.6%,主方向模式紧邻的两个模式成为最佳预测模式概率占比达到 15.6%,剩下的模式仅占 7.75%。根据以上数据统计分析,每层模式总和成为最佳模式的概率呈跳跃式递减,对 64×64 的 PUs 帧内预测采用基于统计概率分层决策方法,将模式分为 3 层进入 RMD 过程,除第一层,每层的模式集根据上一层 RMD 前两个候选模式进行构建。

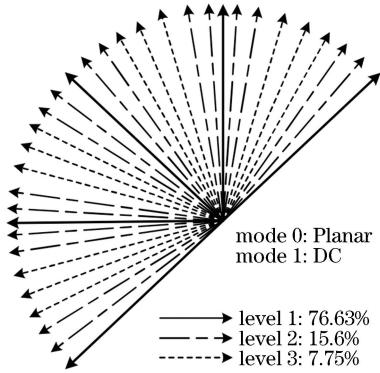


图 3 64×64 的 PUs 最佳模式统计概率

Fig. 3 Best mode statistical probability of 64×64 PUs

第一层:非角度模式和主方向模式。用 Δ_1 表示第一层模式集合,所以 $\Delta_1 = \{0, 1, 2, 10, 18, 26, 34\}$ 。第一层模式经过 RMD 后得到代价最小模式 (F_{MM1}, S_{MM1}) 及第二小模式 (S_{MM1}, S_{MM1})。

第二层:如果 F_{MM1} 和 S_{MM1} 都是非角度模式,直接将这两个模式作为 RDO 模式。如果这两个模式有角度模式,则按照表 2 建立第二层模式列表 $\Delta_2, \Delta_2 = \Delta_{2-1} \cup \Delta_{2-2}$ 。同样, Δ_2 经过 RMD 过程获得第二层的 F_{MM2} 和 S_{MM2} 。

表 2 第 2 层模式列表

Table 2 Mode list of layer 2

F_{MM1}/S_{MM1}	$\Delta_{2-1}/\Delta_{2-2}$
2	{3,4}
10	{8,9,11,12}
18	{16,17,19,20}
26	{24,25,27,28}
34	{32,33}

第三层:如果 F_{MM2} 或 S_{MM2} 为第二层边界模式,可根据表 3 构建模式集合 $\Delta_3, \Delta_3 = \Delta_{3-1} \cup \Delta_{3-2}$ 。 Δ_3 中模式经过最后一次 RMD 取 F_{MM3} 和 S_{MM3} 进入 RDO 获取最佳模式,否则直接进入 RDO,

表 3 第 3 层模式列表

Table 3 Mode list of layer 3

F_{MM2}	Δ_{3-1}
$(F_{MM1} + 2)/$	$\{F_{MM2} + 1,$
$(S_{MM1} + 2)$	$F_{MM2} + 2\}$
$(F_{MM1} - 2)/$	$\{F_{MM2} - 1,$
$(S_{MM1} - 2)$	$F_{MM2} - 2\}$
S_{MM2}	Δ_{3-2}
$(F_{MM1} + 2)/$	$\{S_{MM2} + 1\}$
$(S_{MM1} + 2)$	
$(F_{MM1} - 2)/$	
$(S_{MM1} - 2)$	$\{S_{MM2} - 1\}$

该算法流程图如图 4 所示,每经过一次 RMD,更新一次 FMM 和 SMM,从而建立下一层候选模式列表。

例如,当 $F_{MM1} = 10, S_{MM1} = 26$,则 $\Delta_2 = \{8, 9, 11, 12, 24, 25, 27, 28\}$ 。经过 RMD 后, $F_{MM2} = 12, S_{MM2} = 24$,则 $\Delta_3 = \{13, 14, 23\}$,最终获得的 F_{MM3} 和 S_{MM3} 进入 RDO,取 R-D 代价最小模式作为最佳模式。帧内预测算法最多经过三次 RMD,跳过了 MPM,取前两个候选模式作为 RDO 模式。

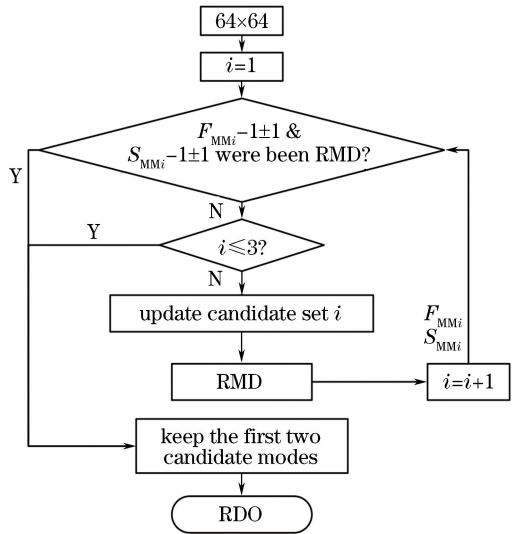


图 4 64×64 的 PUs 帧内预测流程图

Fig. 4 Flowchart of intraframe prediction in 64×64 PUs

3.2 基于像素梯度模式预测的快速算法

除最大 PUs,其他尺寸 PUs 根据纹理进行模式筛选。纹理具有方向性特征, PUs 预测方向与纹理方向具有高度相关性,梯度越大的方向,其垂直方向成为最佳预测模式可能性越大。纹理梯度方向提取方法有多种,边缘检测算子是其中一种,可以计算除 PUs 边界像素的其他像素梯度值,所以仅对第二类的 PUs 适用,第三类更小的 PUs 不适用。

对 32×32 和 16×16 的第二类 PUs 纹理梯度提取选用各向同性 Sobel^[14]算子,通过算子模板与

当前 PUs 卷积可得不同方向梯度值。各向同性 Sobel 算子和普通 Sobel 算子都是一阶导数边缘检测算子,计算简单,但加权平均数不一样,各向同性 Sobel 算子对梯度判断更加精确。算子卷积模板如图 5 所示,定义 $G_{i,j} = \{G_1(i,j), G_2(i,j), G_3(i,j), G_4(i,j)\}$ 为方向梯度,其中 $G_1(i,j)$ 、 $G_2(i,j)$ 、 $G_3(i,j)$ 和 $G_4(i,j)$ 分别表示当前像素与水平,垂直,45°,135° 4 个方向各向同性 Sobel 算子卷积,

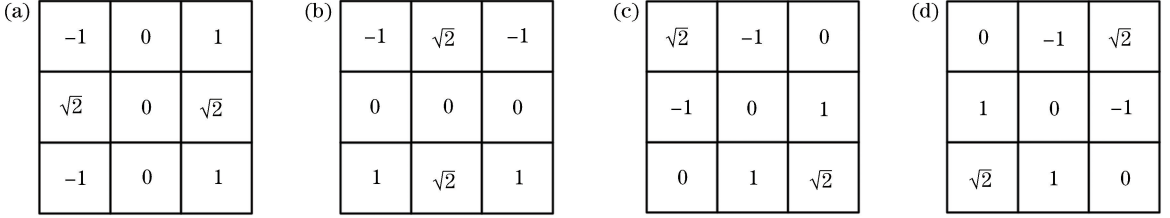


图 5 各向同性 Sobel 算子方向模板。(a)水平;(b)垂直;(c) 45°;(d) 135°

Fig. 5 Isotropic Sobel operator direction templates. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction; (c) 45° direction; (d) 135° direction

PU_s 的水平方向像素梯度幅值和为

$$A_{mp1} = \sum A_{mp1}(i,j). \quad (5)$$

其他方向梯度提取计算类似。最可能预测方向沿着边界纹理方向,所以幅值和越大,PU_s 在该方向梯度越大,梯度方向垂直切线的方向成为最可能预测方向概率就越大。分别统计出所有的梯度幅值和,取最大梯度幅值和次大梯度幅值和作为最可能模式垂直方向和次可能模式垂直方向,并构建进入 RMD 的子集 Δ ,构建方法如下:

4 个方向中幅值最大 A_{mpF} 的梯度方向的垂直方向对应第一可能模式 (FPM, F_{PM}),幅值第二大 A_{mpS} 的梯度方向的垂直方向对应第二可能模式 (SPM, S_{PM}):即 A_{mp1} 对应模式 26, A_{mp2} 对应模式 10, A_{mp3} 对应模式 2 和模式 34, A_{mp4} 对应模式 18。根据 A_{mpF} 与 A_{mpS} 差值及 FPM 与 SPM 位置关系分 5 种情况构建模式列表 Δ 。模式相对位置见图 1。

$$1) A_{mpF} - A_{mpS} \geq 0.5A_{mpF}$$

$\Delta = \{F_{PM}, F_{PM} \pm 1, F_{PM} \pm 2, F_{PM} \pm 3, F_{PM} \pm 4\}$, FPM 及相邻 4 个模式作为基本模式。

$$2) 0.5A_{mpF} > A_{mpF} - A_{mpS} \geq 0.25A_{mpF}$$

基础模式由最可能模式方向向次可能模式方向偏 1 个模式单位。

$$3) 0.25A_{mpF} > A_{mpF} - A_{mpS} \geq 0.125A_{mpF}$$

基础模式由最可能模式方向向次可能模式方向偏 2 个模式单位。

$$4) 0.125A_{mpF} > A_{mpF} - A_{mpS} \geq 0.063A_{mpF}$$

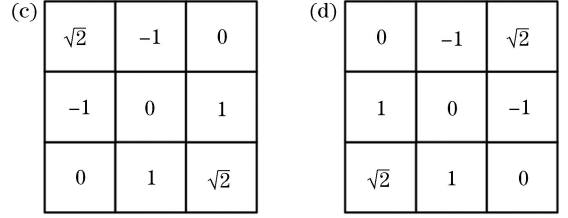
基础模式由最可能模式方向向次可能模式方向

而得的梯度值中 i 表示横坐标, j 表示纵坐标。水平方向计算公式为

$$G_1(i,j) = P(i+1,j-1) + \sqrt{2} \times P(i+1,j) + P(i+1,j+1) - P(i-1,j-1) - \sqrt{2} \times P(i-1,j) - P(i-1,j+1), \quad (3)$$

式中, $P(i,j)$ 表示 PU_s 中像素值。该像素水平方向幅值为

$$A_{mp1}(i,j) = |G_1(i,j)|. \quad (4)$$



偏 3 个模式单位。

$$5) 0.063A_{mpF} > A_{mpF} - A_{mpS}$$

基础模式由最可能模式方向向次可能模式方向偏 4 个模式单位。

另外, Planar 模式和 DC 模式成为最佳模式可能性占比较大, Δ 进入 RMD 前加入这两个模式,可得第二类 PU_s 快速帧内预测,流程图如图 6 所示。例如,如果幅值的最大与次大分别是 A_{mp1} 和 A_{mp3} ,且 $A_{mpF} - A_{mpS} = 0.2A_{mpF}$,则 $F_{PM} = 26, S_{PM} = 2, 34$,满足第三种情况, $\Delta = \{24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31\}$,因此进入 RMD 的模式为 $\{0, 1, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31\}$ 。

3.3 基于快速纹理梯度提取算法

对于尺寸为 4×4 及 8×8 第三类 PU_s,各向同性 Sobel 算子无法更好地反映梯度信息,比如 4×4 模块,算子模板只能计算中间 4 个像素的梯度,周围 12 个像素都无法用来体现梯度变化和当前 PU_s 的纹理方向,所以针对第三类 PU_s 采用 PVD 获取纹理方向。

PVD 定义为某方向均方差计算,同 Sobel 提取纹理方向类似,纹理方向分为 4 个主要方向进行计算,为水平、垂直、45° 和 135° 方向。获取该方向 PVD 计算方法分为 2 步。

以 4×4 的 PU_s 为例,如图 7 所示。第一步计算水平方向每一行均方差为

$$\sigma_1(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [P(i,j) - m_1(n)]^2, \quad (6)$$

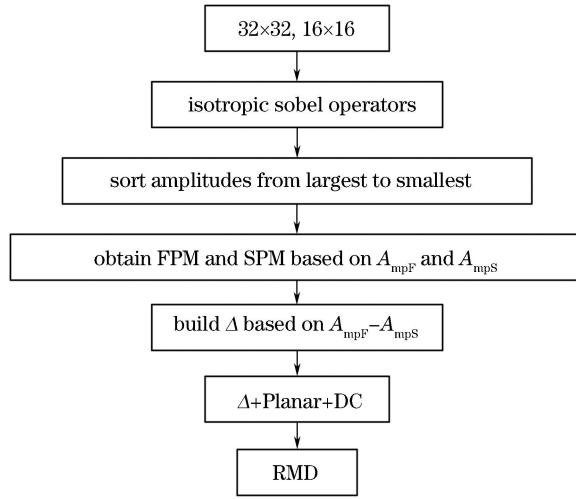


图6 第二类 PUs 帧内预测快速算法流程图

Fig. 6 Flowchart of intraframe prediction fast algorithm for type II PUs

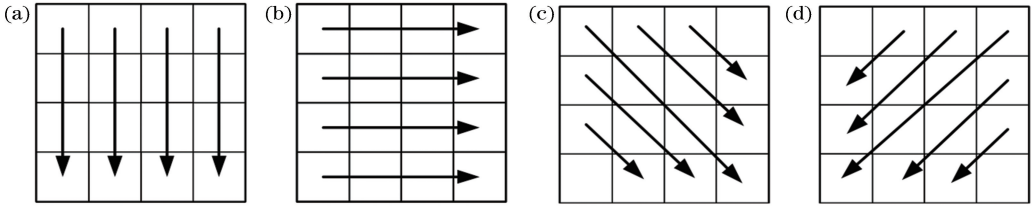


图7 快速梯度提取。(a)垂直;(b)水平;(c) 45°;(d) 135°

Fig. 7 Rapid extraction of gradient. (a) Vertical direction; (b) horizontal direction; (c) 45° direction; (d) 135° direction

式中: σ_1 为水平方向均方差, σ_2 表示垂直水平方向均方差,同理 45°为 σ_3 , 135°为 σ_4 ; n 为第 n 行,对 4×4 的 CUs 的 n 取 0, 1, 2, 3; N 为 CUs 大小,这里取 4; $m_1(n)$ 为第 n 行的像素平均值; $P(i, j)$ 为第 i 行第 j 列像素。

第二步将每行均方差进行和平均,即当前 PUs 方向的 PVD,

$$P_{VD1} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sigma_1(n), \quad (7)$$

式中, P_{VD1} 表示水平方向 PVD。同理, P_{VD2} 表示垂直方向 PVD, P_{VD3} 表示 45°的 PVD, P_{VD4} 表示 135°的 PVD。

其他方向 PVD 获取原理同水平方向一致。 8×8 大小 PUs 类似。

PVD 的大小表示相邻像素值在某个方向变化大小,即 PVD 越大,数值变化越跳跃。在视觉上, PVD 越小,则在该方向变化越明显,最佳模式越可能在这个方向上。

同 32×32 和 16×16 的 PUs 算法类似,选取最小两个 PVD 构建候选模式列表 Δ , 仍然根据两个 PVD 差值及对应方向左右相邻关系进行构建。最

小 PVD(P_F)与第二小 PVD (P_S)同 3.2 一样,结合图 1 方向分 5 种情况进行构建, $P_S - P_F \geq 0.5P_F$, $0.5P_F > P_S - P_F \geq 0.25P_F$, $0.25P_F > P_S - P_F \geq 0.125P_F$, $0.125P_F > P_S - P_F \geq 0.063P_F$ 和 $0.063P_F > P_S - P_F$, 方法同 32×32 和 16×16 预测一样,流程图如图 8 所示。

同样, Δ 进入 RMD 前加入非角度模式。例如,当前 PUs 获得的最小 P_F 是 PVD_2 , 对应 $F_{PM} = 26$, 次小 SPM 是 PVD_3 , $S_{PM} = 18$, 且 $P_S - P_F = 0.08P_F$, 结合图 1, 满足第 4 种情况, 所以 $\Delta = \{19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27\}$ 。

4 实验结果

算法内嵌在 HEVC 参考软件 HM16.9 版本^[15]上进行实验。实验平台硬件配置是主频为 3.20 GHz 的 Inter Core i5-3470 CPU, 运行内存为 4 GB 的 Windows 7 旗舰版 64 位操作系统, 开发工具是 Microsoft Visual Studio 2013。本文使用 JCTVC-L1100^[16]测试条件, 选取 A~E 五类 10 个编码标准测试序列, 编码帧数为前 20 帧。量化参数 Q_F 值分别设为 22, 27, 32, 37, 编码用全 I 帧编码模式(AI-Main)。

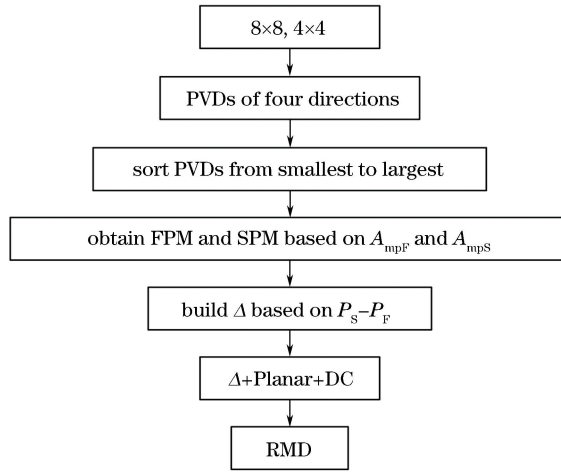


图 8 第三类 PUs 帧内预测快速算法流程图

Fig. 8 Flowchart of intraframe prediction fast algorithm for type III PUs

统计分析编码时间和编码码率,评估方法采用 Bjøntegaard^[17] 在提案 VCEG-M33 中所提的 BD-BR 方法。BD-BR 表示在相同客观质量下编码码率节省情况。编码节省时间通过 ΔT 计算,其计算公式为

$$\Delta T = \frac{1}{4} \sum \frac{T_{HM16.9}(Q_P) - T_{prop}(Q_P)}{T_{HM16.9}(Q_P)} \times 100\%, \quad (8)$$

式中, T_{prop} 表示本文算法编码耗时, $T_{HM16.9}$ 表示 HM16.9 原始编码耗时, $Q_P \in \{22, 27, 32, 37\}$ 。

表 4 是本文算法与标准 HM16.9 对比的实验结果,可以看出,本文算法编码时间平均节省了 32.2%,BD-PSNR 仅下降 0.04 dB,BD-BR 平均增加 0.86%。除了 B 类的 BasketballDrive 和 ParkScene 视频序列在时间上节省稍微多一点,C 类的 BQMall

视频序列的节省时间最少以外,其他视频序列在本算法下节省时间相差不多,说明在不同分辨率及不同图像中,本文算法能对纹理复杂度高及纹理复杂度低的图像降低编码复杂度。另外,对非均质运动剧烈的 PepeopleOnStreet、BasketballDrive、BasketballDrill、BasketballPass 及 RaceHorses 视频序列,BD-BR 比起其他视频明显要高很多,但结合 BD-PSNR,仅降低一点点,本算法编码的视频序列在主观视觉评价^[18-19]上与原始编码器编码的视频质量效果基本一致。为更加直观地看到本文算法编码性能,图 9 为视频序列 Traffic 标准算法与本文算法的失真率 R-D 曲线对比图。图中可以看出,原始标准编码 R-D 曲线与本文算法 R-D 曲线几乎重叠,表明帧内预测模式快速选择算法编码性能良好。

表 4 本文算法与原始算法编码性能对比

Table 4 Performance comparison between proposed algorithm and original algorithm

Class	Resolution	Sequence	BD-BR / %	BD-PSNR/dB	ΔT / %
A	2560×1600	Traffic	0.64	-0.03	31.2
		PeopleOnStreet	0.86	-0.05	32.1
B	1920×1080	BasketballDrive	0.81	-0.04	34.0
		ParkScene	0.64	-0.02	33.6
C	832×480	BasketballDrill	1.06	-0.03	31.5
		BQMall	0.93	-0.04	30.8
D	416×240	BasketballPass	0.80	-0.05	31.7
		RaceHorses	0.91	-0.04	31.6
E	1280×720	FourPeople	0.75	-0.04	31.3
		Johnny	1.22	-0.06	33.5
Average			0.86	-0.04	32.2

表 5 为本文算法与相关文献实验结果对比表,可以看到,文献[6]和[11]在编码速度上比本文算法高

出 3%~5%,但 BD-BR 损失比本算法多,编码性能与本算法相当。文献[7]和[10]速度要慢 2%~3%,

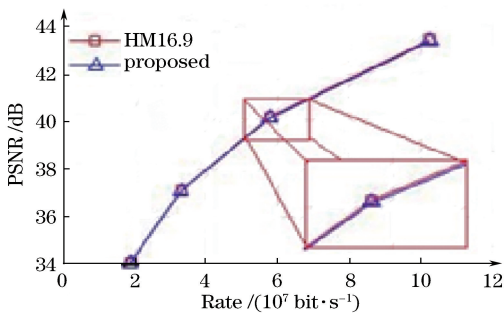


图9 Traffic序列R-D曲线

Fig. 9 R-D curves of Traffic sequence

表5 本文算法与现有算法的性能比较

Table 5 Performance comparison between proposed algorithm and existing algorithms

Algorithm	BD-BR / %	ΔT / %
Method in Ref. [5]	1.42	20.5
Method in Ref. [6]	1.07	35.6
Method in Ref. [7]	0.70	29.3
Method in Ref. [10]	0.70	30.9
Method in Ref. [11]	1.19	37.8
Proposed method	0.86	32.2

码率仅比本算法低 0.1%，如果对大量视频帧编码，更需要缩短时间，则本文算法更具有优势。性能最差的是文献[5]的算法。快速算法不仅要追求时间节省，还要保证编码质量，故本文算法的综合性能表现更优秀。

5 结 论

提出一种基于 PUs 尺寸的 HEVC 帧内预测模式快速选择的改进算法，将 PUs 按照尺寸分为三类，对不同类别的 PUs 采用不同优化算法。最大尺寸为第一类，根据三层最佳模式统计概率，模式预测分为三层进入 RMD 计算，每层模式列表基于上一层筛选出来的候选模式构建。32×32 和 16×16 的 PUs 为第二类，利用边缘检测算子各向同性 Sobel 算子提取像素 4 个方向梯度，统计幅值，根据前两个最大幅值构建进入 RMD 过程模式列表，从而减少 RMD 过程，计算模式数量。8×8 和 4×4 的 PUs 为第三类，和第二类不同的是，这里采用更适用于小尺寸的 PVD 计算提取纹理方向，但构建进入 RMD 过程的模式列表与第二类 PUs 类似。本文基于 PUs 尺寸选择不同的模式快速选择算法，比起对所有尺寸 PUs 采用单一算法减少了模式计算，因此本算法在减少编码复杂度更具有优势，且码率损失在可接受范围内。实验表明，与官方 HEVC 测试平台 HM16.9 相比，本文算法在保证编码性能基本不变

的情况下，编码时间节省 32.2%，BD-PSNR 下降 0.04 dB，BD-BR 平均增加 0.86%，编码速度得到显著提高。目前机器学习应用越来越广，结合纹理特征提取，后续研究可以加入机器学习，不仅可以提高编码速度，还能降低码率损失。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Fang C, Liu Y. HEVC-SCC adaptive palette mode fast decision algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071001.
方诚, 刘昱. HEVC-SCC 自适应调色板模式快速决策算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071001.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Jiang W, Ma H J, Chen Y W. Gradient based fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC [C] // 2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECN), April 21-23, 2012, Yichang, China. New York: IEEE, 2012: 1836-1840.
- [6] Jamali M, Coulombe S, Caron F. Fast HEVC intra mode decision based on edge detection and SATD costs classification [C] // 2015 Data Compression Conference, April 7-9, 2015, Snowbird, UT, USA. New York: IEEE, 2015: 43-52.
- [7] Liu X G, Liu Y B, Wang P C, *et al.* An adaptive mode decision algorithm based on video texture characteristics for HEVC intra prediction [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2017, 27(8): 1737-1748.
- [8] Sun X B, Chen X D, Xiao Y Z, *et al.* Fast intra-frame encoding algorithm based on image texture features for HEVC [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071003.
孙学斌, 陈晓冬, 肖禹泽, 等. 基于图像纹理特征的

- HEVC 帧内编码快速算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071003.
- [9] Ramezanpour M, Zargari F. Early termination algorithm for CU size decision in HEVC intra coding [C] // 2015 9th Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP), November 18-19, 2015, Tehran, Iran. New York: IEEE, 2015: 45-48.
- [10] Liao W H, Yang D Q, Chen Z Z. A fast mode decision algorithm for HEVC intra prediction [C] // 2016 Visual Communications and Image Processing (VCIP), November 27-30, 2016, Chengdu, China. New York: IEEE, 2016: 16579709.
- [11] Zhu S P, Zhang C Y. A fast algorithm of intra prediction modes pruning for HEVC based on decision trees and a new three-step search [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(20): 21707-21728.
- [12] Koumaras H, Kourtis M, Martakos D. Benchmarking the encoding efficiency of H. 265/HEVC and H. 264/AVC [C] // 2012 Future Network Mobile Summit (FutureNetw), July 4-6, 2012, Berlin, Germany. New York: IEEE, 2012: 12980534.
- [13] Hu N, Yang E H. Fast mode selection for HEVC intra-frame coding with entropy coding refinement based on a transparent composite model [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 25(9): 1521-1532.
- [14] Sobel I, Feldman G. A 3×3 isotropic gradient operator for image processing [C] // Bro-inspired Systems: Computation and Ambient Intelligence: Volumn 5517 of the Series LSCS. [S.l.: s.n.], 1967: 302-309.
- [15] JCT-VC. HM software [CP/OL]. [2019-03-15]. https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVCSoftware/tags/HM-16.9/.
- [16] Bossen F. Common test conditions and software reference configurations [C] // JCTVC-L1100, January 14-23, 2013, Geneva, USA: JCT-VC, 2013: 1-4.
- [17] Bjøntegaard G. Calculation of average PSNR differences between R-D curves [C] // VCEG-M33, April 2-4, 2001, Austin, Texas, USA. [S.l.: s.n.], 2001.
- [18] Yang J, Li S M, Ma R Z, *et al.* Exploration and analysis of the subjective assessment results of stereo video quality [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 091102.
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): 091102.
- [19] Hu J J, Li S M, Chang Y L, *et al.* Measurement of comfortable contrast range of stereo image based on salient region [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0215001.
胡佳洁, 李素梅, 常永莉, 等. 基于显著区域的立体图像舒适对比度范围的测量 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0215001.