

基于 Hough 变换的高效视频编码标准帧内预测模式选择快速算法

董 朵, 端木春江*

(浙江师范大学 数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004)

(* 通信作者电子邮箱 c_duanmu@aliyun.com)

摘 要: 针对高效视频编码标准(HEVC)中帧内预测模式选择计算复杂度极高的问题, 提出一种基于 Hough 变换的 HEVC 帧内预测模式选择快速算法, 该算法可以减少对 35 种预测模式的遍历次数。首先, 在对预测模式进行粗选(RMD)过程之前对各尺寸预测单元(PU)进行边缘检测与 Hough 变换; 其次, 采用直方图对检测出来的直线段方向角正切值进行统计分析; 最后, 从 35 种模式中选择出 RMD 和率失真优化(RDO)过程中较适用的候选模式集, 并在 VS 2008 运行环境下用 C++ 和 OpenCV 开发应用程序。实验结果表明, 所提算法在编码性能稍微有影响的情况下(码率平均升高 1.02%, 峰值信噪比平均下降 0.035 dB), 编码时间平均减少了 23%。所提算法增强了编码器的实时性, 适合高分辨率、大尺寸视频应用。

关键词: 高效视频编码标准; 帧内预测; 快速算法; 边缘检测; Hough 变换

中图分类号: TN943 **文献标志码:** A

Fast algorithm of high efficiency video coding intra prediction mode decision based on Hough transform

DONG Duo, DUANMU Chunjiang*

(College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang 321004, China)

Abstract: Concerning the problem that the computational complexity associated with intra prediction mode selection in High Efficiency Video Coding (HEVC) is very high, an efficient fast algorithm for HEVC intra prediction mode decision based on Hough transform was proposed, which aimed at reducing the traversed number of the 35 intra prediction modes. Firstly, the edge detection and Hough transform were carried out for the Prediction Units (PU) of various sizes before the Rough Mode Decision (RMD) process. After that, the statistical analysis of the tangent values of detected angles of the straight lines was conducted using the histogram. Finally, the applicable candidate modes were chose for the RMD and Rate-Distortion Optimization (RDO) processes, and the simulation of the proposed algorithm was carried out in the VS 2008 environment using the C++ computer language and the OpenCV libraries. The experimental results show that the encoding time can be reduced by 23% with only a small increase of the code rate of 1.02% and the decrease of peak signal-to-noise ratio of the 0.035 dB. The proposed algorithm enhances the real-time performance of the encoder greatly, and it is suitable for the videos with high resolution and large size.

Key words: High Efficiency Video Coding (HEVC); intra prediction; fast algorithm; edge detection; Hough transform

0 引言

新一代高效视频编码标准 (High Efficiency Video Coding, HEVC)^[1], 是由国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO)/国际电工技术委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 移动图像专家组 (Moving Picture Experts Group, MPEG) 和国际电信联盟电信标准化部 (International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T) 视频编码专家组 (Video Coding Experts Group, VCEG) 联合制定的, 是继 H. 264 之后的高性能视频编码标准。它的核心目标是在 H. 264 的基础上, 压缩效率提高 1 倍。为提高视频编码效率, 标准中加入许多新的技术。对于帧内预测来说, 主要是预测模式数量显著增加。但

是, 预测模式数量的增加不只提高了预测精度, 也增加了编码复杂度。由于 HEVC 标准的实时性需要减少编码时间, 故对降低编码时间开展研究非常必要。

帧内预测是视频编码的关键技术之一, 其中对帧内预测角度模式的优化是研究热点。文献[2]针对 HEVC 测试模型 1.0 (HEVC Test Model 1.0, HM1.0) 提出一种帧内预测快速算法, 在一帧图像的局部区域可能具有相同的纹理特征, 将当前块最可能预测模式 (Most Probable Mode, MPM) 始终作为一个候选模式去竞争最优预测模式。实验表明, 该算法大概节约 20%~28% 的编码时间。文献[3]针对 HEVC 测试模型 2.0 (HEVC Test Model 2.0, HM2.0) 帧内预测提出一种快速算法, 从编码单元 (Code Unit, CU) 层、预测单元 (Prediction Unit, PU) 层两个层面对帧内预测模式进行优化。实验表明, 相对

收稿日期: 2014-07-14; 修回日期: 2014-08-20。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11026226, 40805048); 浙江省自然科学基金资助项目 (Y1110510)。

作者简介: 董朵 (1988-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向: 视频编码中的预测技术算法; 端木春江 (1974-), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 视频压缩、视频信息处理、视频通信、第 4 代 (4G) 移动通信关键技术、图像处理。

于三星公司提出的算法^[4]可节省编码时间最小达到 27%、最大达到 81%。文献[5]针对 HEVC 测试模型 3.0 (HEVC Test Model 3.0, HM3.0) 帧内预测提出一种快速算法,利用 CU、PU、变换单元 (Transform Unit, TU) 不同深度之间的关系提前终止 PU 的划分或降低率失真优化 (Rate Distortion Optimization, RDO) 过程中的候选模式。实验表明,对于高效率 (High Efficiency, HE) 和低复杂度 (Low Complexity, LC) 序列节约的编码时间分别为 22.99%、26.16%。文献[6]和文献[7]针对 HEVC 测试模型 4.0 (HEVC Test Model 4.0, HM4.0) 帧内预测分别提出利用当前块边缘方向信息减少候选模式和基于梯度直方图直观地选出候选模式的快速算法,平均节省编码时间分别是 18.88%、20%。

在已有算法基础上,针对 HM4.0,本文提出一种新算法降低粗选 (Rough Mode Decision, RMD) 过程的候选模式数量。即,先对各尺寸 PU 进行边缘检测与 Hough 变换,接着对检测出来的直线段方向角正切值统计分析,进而选出 RMD 和 RDO 过程中适用的候选模式集。

1 HEVC 帧内预测

新一代视频编码标准 HEVC 仍然采用预测加变换的混合编码框架,该框架中的技术与之前技术相比较来看,虽然大致的编码框架内容与流程并没有过多的改变,但是细节上有很大的变化。

1.1 CU、PU、TU

H.264 视频编码标准中,宏块 (Macro Block, MB) 是最基本的编码单元。但在 HEVC 编码标准中,由于高清视频的普及,甚至达到 2K、4K 分辨率的超清视频,如果再采用这样固定尺寸的编码块,很难适应高清视频的需求。因此,HEVC 没有继续采用 MB 的概念,而是采用更加灵活方式进行块结构表示:CU、PU、TU。CU 是最基本的分割单元,最大 CU 尺寸是 64×64 ,最小 CU 尺寸是 8×8 。PU 是一个携带与预测过程相关信息的基本单元,PU 尺寸小于或等于 CU 尺寸。一个 CU 可以包含一个或多个不同尺寸的 PU,一个 PU 包含若干个 TU, TU 是一个基于变换及量化的基本单元。HEVC 采用四叉树结构进行 CU 的划分。具体划分方式见图 1,图中 0、1、2、3 表示 CU、TU 划分的深度。

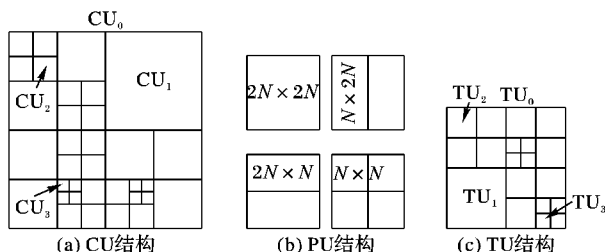


图1 HEVC 中块的四叉树分割示意图

1.2 帧内预测模式

与 H.264 帧内预测类似,HEVC 同样可以从不同方向进行预测,模式分类没有多大变化,只是预测模式数量上显著增加。HEVC 克服了 H.264 预测模式个数少、预测精度不高、不准确等缺点。HEVC 帧内预测共有 35 种预测模式,其中模式 0 表示使用 Planar 模式预测,模式 1 表示使用直流 (Direct Current, DC) 模式预测,模式 2 至 34 表示使用如图 2 所示的角度方向模式进行预测^[8-9],角度定义为 $+/- [0, 2, 5, 9,$

13, 17, 21, 26, 32]/32。HEVC 中预测模式分为方向性预测模式和非方向性预测模式。非方向性预测模式适用于能量比较分散的图像,有模式 0 和模式 1。对于方向性预测模式,HEVC 定义水平轴以下及垂直轴右边为正方向,水平轴以上及垂直轴以左为负方向。

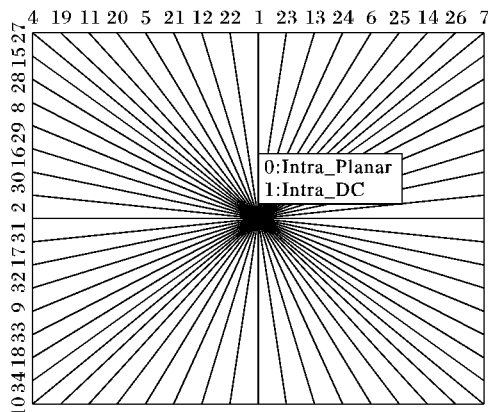


图2 HEVC 帧内预测模式示意图

1.3 帧内模式选择过程

HM4.0^[10] 帧内模式选择过程分为三个阶段,流程如图 3 所示。首先,对适合不同尺寸 PU 的模式集进行 RMD 算法,计算所有可能预测模式的率失真代价 (Rate-Distortion Cost, RD Cost),并将其按照代价递增顺序排列, RD Cost 值最小的一组预测模式即是粗选子集。其次,验证当前块左侧和上侧参考块的预测模式是否包含在粗选子集中,若不在,则将其加入子集。最后,对粗选子集中的预测模式进行 RDO 算法,代价值最小的模式即为最优预测模式^[11]。

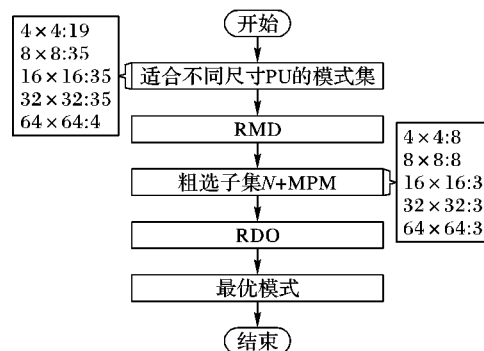


图3 HM4.0 帧内模式选择过程

2 帧内预测的优化算法

2.1 图像边缘检测

虽然一幅图像中边缘只占少量像素,但却包含了丰富的图像信息。为精确地进行图像边缘检测,近年来学者又陆续提出很多种边缘检测算子。Canny 算子能够较好地检测图像边缘,在图像除噪和边缘细节保留上取得较好的平衡,有利于后续 Hough 变换提取直线段。这里选取 Canny 算子对各尺寸 PU 进行边缘检测。

在 OpenCV 中通过函数 cvCanny 访问 Canny 算子进行边缘检测,其原型为

```
void cvCanny( const CvArr * image, CvArr * edges, double threshold1,
              double threshold2, int aperture_size = 3)
```

函数 cvCanny 采用 Canny 算法搜索输入图像的边缘且在输出图像中标识这些边缘。threshold1 用来控制边缘连接,

threshold2 用来控制强边缘的初始分割。这样不仅使边缘信息保留得更全面,而且能去掉部分伪边缘。通过实验“试凑法”得到的阈值是一种有效方法,但由于视频编码实时性并不适用。迭代法、大津法、最大熵方法是常用自适应阈值选取方法。最后本文采用迭代法选取最佳阈值^[12]。步骤如下:

1) 求出图像中最小灰度值 Z_{\min} 、最大灰度值 Z_{\max} , 则初始阈值 $T_0 = (Z_{\min} + Z_{\max})/2$ 。

2) 根据阈值 T_k 将图像分割成目标区域和背景区域, 计算两部分的平均灰度值 Z_O, Z_B :

$$Z_O = \sum_{i=0}^{T_k} (h_i \cdot i) / \sum_{i=0}^{T_k} h_i \quad (1)$$

$$Z_B = \sum_{i=T_k+1}^{255} (h_i \cdot i) / \sum_{i=T_k+1}^{255} h_i \quad (2)$$

3) 计算出 Z_O, Z_B 后, 用式子 $T_{k+1} = (Z_O + Z_B)/2$ 来计算出新阈值 T_{k+1} 。

4) 若 $T_{k+1} = T_k$, 即 T_k 为所求阈值, 则算法到此结束; 否则转到步骤 2)。迭代计算直至收敛于某个稳定的阈值, 此阈值即为最终结果。

2.2 Hough 变换

文中选用 Hough 变换对图像进行直线段检测。点一线的对偶性是 Hough 变换的基本思想。

OpenCV 中通过函数 cvHoughLines2 进行直线段的检测。cvHoughLines2 的函数原型^[13]是

```
CvSeq* cvHoughLines2 (CvArr* image, void* line storage,
                        int method, double rho, double theta,
                        int threshold, double param1, double param2)
```

将参数 method 设置成 CV_HOUGH_PROBABILISTIC 表示选择概率霍夫变换, 进行直线段的检测。实验表明, 参数 threshold、param1、param2 的设置对检测结果有直接影响, 恰当地配置这些参数才能准确定位目标图像。threshold 为阈值参数, 如果相应累计值大于它, 函数会返回这个线段。param1 表示最小线段长度, param2 表示在同一条直线上进行线段连接的最大间隔值。threshold 的设置对直线段的检测影响较

大, 因此需根据图像目标自适应地调整。为提高计算速度, 仍采用迭代法自适应地设定阈值参数。

2.3 基于 Hough 变换的帧内预测模式的快算选择

HEVC 支持最大 64×64 到最小 4×4 尺寸的预测块 (Prediction Block, PB), 但本文所提算法较适合 $8 \times 8, 16 \times 16, 32 \times 32, 64 \times 64$ 尺寸 PB。本文以 16×16 尺寸 PB 为例进行算法的详细说明。首先对 16×16 尺寸 PB 进行 Canny 算子边缘检测, 去掉梯度值较小的点, 保留梯度值较大的点; 边缘检测出图像边缘点或特征点后, 接着进行 Hough 变换直线段检测, 去除长度较短的直线段, 留下长度较长的直线段。最后, 利用式 (3) 求出各条直线段方向角 θ 的正切值。

$$\tan \theta = dy/dx \quad (3)$$

θ 的取值范围为 $(-90^\circ, 90^\circ)$, 在此范围内 $\tan \theta$ 是单调递增的且以 π 为周期, HEVC 中定义的 35 种预测模式角度范围为 $[-3\pi/4, \pi/4]$, 正好是正切函数的一个周期。因此, 如果有个方向角落在了某个角度范围, 那么这个方向的正切值也应该落在对应的正切范围内, 每条直线段方向角的正切值都能找到唯一的正切值范围。这里的正切范围指的是由边界角度的正切值所确定的范围。各种尺寸 PU 对应的各个模式的预测角度、边界角度范围、正切值范围如表 1、表 2 所示。

得出 dx, dy 之后, 可以按式 (3) 计算出各个直线段方向角的正切值, 然后比较各种预测模式的预测角度正切值, 对直线段的方向角 θ 的正切值进行统计分析, 找出所属正切值范围, 进而找到对应预测模式。采用直方图来统计当前预测块 PU 中具有相似方向角的直线段, 并将具有直线段条数较多的预测模式加入当前预测块的候选预测模式中。这一过程实际上是将直线段的方向角量化成某个预测角度。

表 1 64×64 PU 的各个预测模式的边界角度范围和正切范围

预测模式	预测角度/(°)	边界角度范围/(°)	正切值范围
1	-90	(-45, -135)	$(-\infty, -1) \cup (1, +\infty)$
2	0	[-45, 45]	[-1, 1]

表 2 $8 \times 8, 16 \times 16, 32 \times 32$ PU 的各个预测模式的预测角度、边界角度范围和正切范围

预测模式	预测角度/(°)	边界角度范围/(°)	正切值范围	预测模式	预测角度/(°)	边界角度范围/(°)	正切值范围
4	-45	[-42.188, -47.813]	[-0.906, -1.103]	27	-39.375	[-36.563, -42.188]	(-0.742, -1.103]
19	-50.625	(-47.813, -53.438]	(-1.103, -1.348]	15	-33.75	[-30.938, -36.563]	(-0.599, -0.742]
11	-56.25	(-53.434, -59.063]	(-1.348, -1.668]	28	-28.125	[-25.313, -30.938]	(-0.473, -0.599]
20	-61.875	(-59.063, -64.688]	(-1.668, -2.114]	8	-22.5	[-19.688, -25.313]	(-0.358, -0.473]
5	-67.5	(-64.688, -70.313]	(-2.114, -2.795]	29	-16.875	[-14.063, -19.688]	(-0.251, -0.358]
21	-73.125	(-70.313, -75.938]	(-2.795, -3.992]	16	-11.25	[-8.438, -14.063]	(-0.148, -0.251]
12	-78.75	(-75.938, -81.563]	(-3.992, -6.742]	30	-5.625	[-2.813, -8.438]	(-0.049, -0.148]
22	-84.375	(-81.563, -87.188]	(-6.742, -20.356]	2	0	[-2.813, 2.813]	(-0.049, 0.049]
1	-90	(-87.188, -92.813]	(-20.356, $-\infty$) \cup [20.356, $+\infty$)	31	5.625	[2.813, 8.438]	(0.049, 0.148]
23	-95.625	(-92.813, -98.438]	[20.356, 6.742]	17	11.25	[8.438, 14.063]	(0.148, 0.251]
13	-101.25	(-98.438, -104.063]	(6.742, 3.992]	32	16.875	[14.063, 19.688]	(0.251, 0.359]
24	-106.875	(-104.063, -109.688]	(3.992, 2.795]	9	22.5	[19.688, 25.313]	(0.358, 0.473]
6	-112.5	(-109.688, -115.313]	(2.795, 2.114]	33	28.125	[25.313, 30.938]	(0.473, 0.599]
25	-118.125	(-115.313, -120.938]	(2.114, 1.668]	18	33.75	[30.938, 36.563]	(0.599, 0.742]
14	-123.75	(-120.938, -126.563]	(1.668, 1.348]	34	39.375	[36.563, 42.188]	(0.742, 0.906]
26	-129.375	(-126.563, -132.188]	(1.348, 1.103]	10	45	[42.188, 45]	(0.906, 1]
7	-135	(-132.188, -135]	(1.103, 1]	—	—	—	—

文中所提算法对于 4×4 PU 不太适合,由于 4×4 PU 像素个数较少,边缘检测出的特征点或边缘点不足以表征图像要表达的信息。实际上 HEVC 帧内预测中,图像信息丰富的区域需要被分割成最小块图像,需要候选预测模式数量较多。在 HM4.0 中适合 4×4 PU 的帧内预测模式共 19 种,方向性预测模式分别为:7、14、6、13、1、12、5、11、4、15、8、16、2、17、9、18、10,具体分布详见图 2。采用文献[14]所提算法基本思想对 4×4 尺寸 PU 进行候选模式的选择,以步长 1 为单位进行模式的选择,故适合 4×4 PU 的帧内预测候选模式为 7、6、1、5、4、8、2、9、10。另一方面由于 PU 尺寸不同,需要的候选预测模式数量也不相同。诸多实验表明,PU 尺寸越小,像素个数就少,计算结果可靠性差,易受到外界因素干扰。因此,在 RMD 过程中为 64×64 、 32×32 、 16×16 、 8×8 、 4×4 尺寸 PU 选择的候选模式分别为 1、3、5、7、9;在 RDO 过程中为它们选择的候选模式分别为 1、2、3、4、5。所提算法的程序流程如图 4 所示。

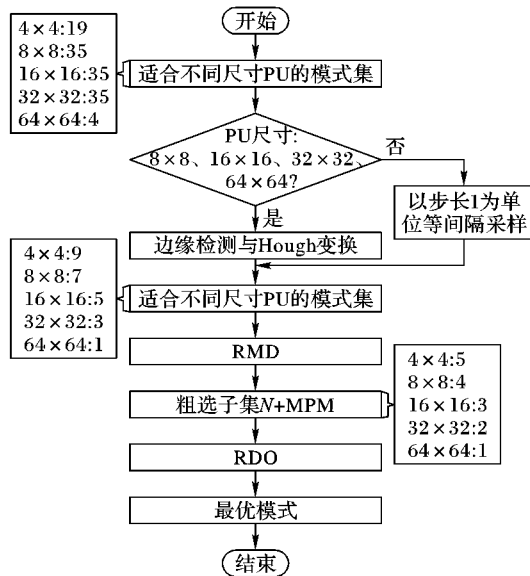


图4 提出的帧内模式选择算法流程

因为模式 0、模式 3 是非方向性预测模式,故未被统计在表 1、表 2 中,但通常它们都被作为候选模式去竞争最优预测模式。在确定各尺寸 PU 的候选模式之后,用 RMD 算法对候选模式进行遍历,确定 RDO 过程中的候选模式,从而选出当前 PU 的最优预测模式。所以所提算法可以达到大幅减少运算量,提高运行速度的目的。

3 实验结果及分析

文中提出的快速帧内预测算法在 HM4.0 中已经实现。按照文献[15]的通用测试条件,编码格式为全 I 帧结构,量化参数(Quantization Parameter, QP)分别为 37、32、27、22,且在 HE 测试条件下使用自适应二进制算术编码(Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding, CABAC)对视频序列进行熵编码。考虑到 HEVC 未来会广泛应用到高分辨率视频序列中,本次主要以高清和标清测试序列为主,主要有 2560×1600 p、 1920×1080 p、 1280×720 p 和 832×480 p,共 4 种尺寸的序列。这里主要从所提算法带来的编码时间增益及付出的相应代价来考虑该算法的性能,主要由给定同等码率

下两种方法的峰值信噪比的差异(Bjontegaard Delta-Peak Signal-to-Noise Ratio, BD-PSNR)、同样客观质量情况下两种方法的码率节省情况(Bjontegaard Delta-Rate, BD-Rate)^[16]、 ΔB 、 ΔP 及 ΔT 等参数来具体的表达所提算法的性能。实验结果如表 3 所示,所有数据结果若为正表示所提方法相对于原方法是增长的,若为负则表示相对原方法是降低的。其中计算时所用公式如下:

1) 节省的编码时间 ΔT , 即

$$\Delta T = \frac{T_{\text{Proposed}} - T_{\text{HM4.0}}}{T_{\text{HM4.0}}} \times 100\% \quad (4)$$

其中: $T_{\text{HM4.0}}$ 表示使用 HM4.0 现有算法的编码时间, T_{Proposed} 是所提算法的编码时间。获得同等编码效率条件下 ΔT 越大,表示编码端计算复杂度降低越多,所提算法性能越好。

2) 所提算法与 HM4.0 帧内预测算法码率差值 ΔB , 即:

$$\Delta B = \frac{B_{\text{Proposed}} - B_{\text{HM4.0}}}{B_{\text{HM4.0}}} \times 100\% \quad (5)$$

其中: $B_{\text{HM4.0}}$ 表示 HM4.0 标准算法编码码率, B_{Proposed} 是所提算法编码码率。 ΔB 越小,表示所提算法与 HM4.0 标准算法的编码性能越接近。

3) 所提算法与 HM4.0 帧内预测算法亮度分量 PSNR 的差值 ΔP , 即

$$\Delta P = P_{\text{Proposed}} - P_{\text{HM4.0}} \quad (6)$$

其中: $P_{\text{HM4.0}}$ 表示 HM4.0 标准算法亮度分量的 PSNR, P_{Proposed} 是所提算法亮度分量的 PSNR。 ΔP 越小,表示所提算法与 HM4.0 标准算法的编码性能越接近。

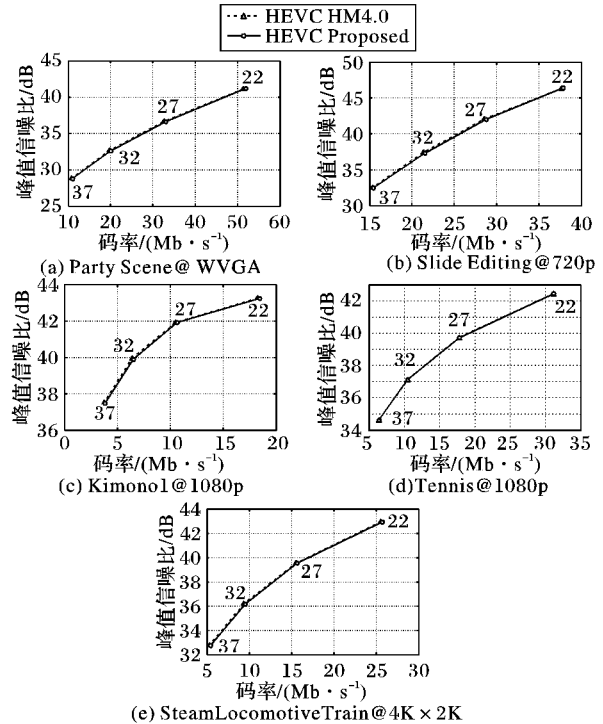


图5 实验 RD 曲线图

由实验结果得到序列的率失真曲线(Rate Distortion-Curve, RD-Curve)如图 5 所示,列举了实验结果中的四种视频序列的 RD-Curve,从图 5 可以看出两条曲线基本上相互拟合。由于快速算法的实质是跳过部分预测模式来降低编码端复杂度,因此选出的最终预测模式可能不是最优的,这样会导

致编码性能的降低,即 $PSNR$ 的降低或者码率的增大。若算法能够节省编码时间,同时只有极小的 $PSNR$ 降低及极小的码率增加,则说明算法具有较好的性能。由表3和图5可以看出,所提算法相对于 HM4.0 里的标准算法可节省最小 16.15%、最大可达到 32.73% 的编码时间,码率和 $PSNR$ 的波动较小,相对于节省的计算代价而言,性能降低几乎可以忽略。同样,与针对 HM4.0 帧内预测模式选择提出优化算法的文献[6]、文献[7]相比,在编码性能几乎相似的情况下,所提算法节省的编码时间较多。可见,所提算法具有较好的性能,可在将来的 HEVC 视频编码中得到广泛的应用。

表3 实验测试结果

视频序列	QP	$\Delta B/\%$	$\Delta P/\text{dB}$	$\Delta T/\%$	BD-Rate/%	BD-PSNR
Party Scene 832 × 480. yuv	22	1.08	-0.059	-21.29	2.43	-0.188
	27	1.23	-0.086	-19.37		
	32	1.56	-0.092	-20.06		
	37	1.67	-0.068	-25.91		
Slide Editing 1280 × 720. yuv	22	0.60	0.096	-19.80	1.10	-0.158
	27	0.60	-0.074	-23.13		
	32	0.62	-0.123	-23.87		
	37	0.64	-0.080	-25.75		
Kimono1 1920 × 1080. yuv	22	1.22	-0.008	-24.77	2.56	-0.090
	27	1.67	-0.015	-23.02		
	32	1.89	-0.035	-26.66		
	37	1.88	-0.057	-19.00		
Tennis 1920 × 1080_24. yuv	22	0.14	-0.005	-16.15	0.32	-0.016
	27	0.17	-0.005	-19.19		
	32	0.20	-0.007	-25.12		
	37	0.37	-0.003	-22.60		
SteamLocomotiveTrain 2560 × 1600. yuv	22	0.54	-0.009	-32.73	1.41	-0.090
	27	1.00	-0.006	-24.27		
	32	1.39	-0.012	-20.97		
	37	2.01	-0.061	-26.40		
平均值	—	1.02	-0.035	-23.00	1.56	-0.108

4 结语

本文在分析了 HEVC 标准中帧内预测算法和已有的一些快速优化算法的基础上,提出一种基于边缘检测与 Hough 变换的 HEVC 帧内预测模式选择快速算法,该算法充分利用图像边缘方向信息快速选择最优预测模式的思想,有效地解决了帧内预测编码复杂度高的问题。分析实验结果可以看到,所提算法对于高分辨率、大尺寸视频的编码时间降低尤为明显。因此所提算法具有较高的实际应用价值,未来可应用于 HEVC 的实时高清编码中,迎合了视频应用不断向高清晰度、高帧率、高压缩率方向发展的趋势。

参考文献:

- [1] SULLIVAN G J, OHM J, 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] ZHAO L, ZHANG L, MA S, *et al.* Fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC[C]// Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Visual Communications and Image Processing. Piscataway: IEEE, 2011: 1 - 4.
- [3] CHEN Y, TENG G, SHI X, *et al.* Fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC [J]. Journal of Video Engineering, 2012, 36(21): 4 - 7. (成益龙, 滕国伟, 石旭利, 等. 一种快速 HEVC 帧内预测算法[J]. 电视技术, 2012, 36(21): 4 - 7.)
- [4] GENG L, WANG J. Low complexity implementation of channel estimation and equalization for TDS-OFDM system[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway: IEEE, 2011: 1 - 4.
- [5] KIM J, YANG J, LEE H, *et al.* Fast intra mode decision of HEVC based on hierarchical structure[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Information, Communications and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2011: 1 - 4.
- [6] SILVA T, AGOSTINI L, CRUZ L A. Fast HEVC intra prediction mode decision based on EDGE direction information[C]// Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference. Piscataway: IEEE, 2012: 1214 - 1218.
- [7] JIANG W, MA H, CHEN Y. Gradient based fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2012: 1836 - 1840.
- [8] ZOU F, AU O C, PANG C, *et al.* Rate distortion optimized transform for intra block coding for HEVC[C]// Proceedings of the 2011 Visual Communications and Image Processing. Piscataway: IEEE, 2011: 1 - 4.
- [9] van WALLENDael G, van LEUVEN S, de COCK J, *et al.* Improved intra mode signaling for HEVC[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway: IEEE, 2011: 1 - 6.
- [10] BOSSEN F, FLYNN D, SUHRING K. HM Software manual [EB/OL]. [2014-06-11]. https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVCSoftware/trunk/doc/software-manual.pdf.
- [11] LIU Y, HU X, DUAN J. Algorithm analysis and comparison of the new video coding technology HEVC [J]. Journal of Video Engineering, 2012, 36(20): 45 - 49. (刘昱, 胡晓爽, 段继忠. 新一代视频编码技术 HEVC 算法分析及比较[J]. 电视技术, 2012, 36(20): 45 - 49.)
- [12] HEI G. Research on the female book segmentation algorithm based on iterative threshold [J]. Journal of Software Guide, 2011, 10(9): 61 - 63. (黑光月. 基于迭代阈值的女书分割算法研究[J]. 软件导刊, 2011, 10(9): 61 - 63.)
- [13] BRADSKI G, KAEHLER A. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library[M]. Sebastopol: O'Reilly Media Inc, 2008.
- [14] ALWANI M, JOHAR S. A method for fast rough mode decision in HEVC[C]// Proceedings of the 2013 Data Compression Conference. Piscataway: IEEE, 2013: 476 - 476.
- [15] BOSSEN F. Common test conditions and software reference configurations [EB/OL]. [2014-06-11]. <http://phenix.int-evry.fr/jct/JCTVC-E700.doc>.
- [16] BJONTEGAARD G. Document VCEG-M33: Calculation of average PSNR differences between RD-curves[C]// Proceedings of ITU-T VCEG Thirteenth Meeting. Austin: VCEG, 2001: 1 - 4.