

一种采用内预测模式的 HEVC 视频信息隐藏算法

董晓慧, 林其伟, 许东旭

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对最新的视频编码标准高效率视频编码(HEVC),提出一种基于帧内模式选择的视频信息隐藏算法.首先,对一幅二值图像进行 Arnold 置乱和 turbo 码编码,形成待嵌入的二值信息序列.然后,结合帧内模式选择过程,调制 I 帧亮度 16×16 编码单元最优预测模式的奇偶性来实现信息隐藏.由于只在 I 帧进行信息隐藏,提取时只需部分解码即可提取隐藏信息,无需完全解码与原始视频的参与,实时性较好.实验结果表明:算法对视频质量和比特率的影响较小,且能保证一定的信息隐藏容量,符合视频隐藏算法的基本要求.

关键词: 视频信息隐藏; 帧内预测模式; 模式奇偶性; 高效率视频编码

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A

随着网络传输技术及多媒体技术的迅速发展,视频已广泛存在于生产和生活的方方面面.然而,多媒体信息安全问题也日趋严重,例如,多媒体作品的版权保护问题、作品内容的完整性认证等,而信息隐藏^[1]技术是解决这些难题的有效途径之一.此外,目前的视频正向着高清分辨率,甚至 $4\text{ K}\times 2\text{ K}$ 等超清分辨率发展,现有的视频编码技术已远远不能满足消费者的需求^[2],而高效率视频编码(HEVC)尤其适用于处理高清视频^[3].因此,研究基于 HEVC 的视频信息隐藏技术具有重要的意义.目前视频信息隐藏算法大多是基于 H. 264 和 MPEG 编码标准的.以往最常见的一种方法是在离散余弦变换(DCT)系数上嵌入隐藏信息^[4-7],另一种是在运动矢量(MV)上嵌入隐藏信息^[8-10].这类方案信息嵌入容量大,且完全不会因为隐秘信息的嵌入而降低 I 帧的视频质量^[11].然而,由于 HEVC 较之前的 H. 264 编码标准在技术上进行了大量的创新与改进,其特点决定了以往两种常用的信息隐藏方案不可直接用于 HEVC.本文结合 HEVC 独有的帧内预测特点,提出一种基于 HEVC 帧内预测模式修改的视频信息隐藏方案.

1 HEVC 帧内预测

1.1 HEVC 帧内编码单元结构

HEVC 沿用了 H. 264 的混合编码框架^[12],通过帧间预测编码和帧内预测编码消除时域空域的相关性.然而,HEVC 没有继续沿用之前的“宏块”这一概念,而是使用编码单元(CU)作为基本的编码结构.CU 的尺寸从 8×8 到 64×64 ,且 CU 的大小和图像的特性是自适应的.在图像比较平缓的区域,选择较大的 CU,而在图像边缘或纹理复杂的区域,选择较小的 CU,这样有利于提高编码效率.一个 CU 可以包含一个或者多个预测单元(PU).PU 是进行预测运算的基本单元,对于一个帧内 $N\times N(N\in\{64,32,16\})$ 的 CU,PU 尺寸只能为 $N\times N$;而对于 $N=8$ 的 CU,PU 有 8×8 或 4×4 两种尺寸.

1.2 HEVC 帧内预测

在 H. 264 中,帧内预测可以去除相邻块之间的空间冗余,取得更为有效的压缩,而 HEVC 的帧内预测技术^[13]是 H. 264 帧内预测过程的扩展和深入.HEVC 在 H. 264 基础上增加了帧内预测方向的个

数,相较于 H. 264 的 9 种帧内预测方向,HEVC 共有 35 种预测模式,分别为 DC 模式、planar 模式和 33 种角度预测模式. 这使预测方向更加细化,预测结果更加精确,能够更加有效地减少冗余.

HEVC 帧内预测方向,如图 1 所示. 在 planar 模式、DC 模式和 33 种角度预测模式之间进行拉格朗日率失真优化(RDO)计算,比较各个率失真代价(RDcost)后,选取最小代价对应的模式作为最优的预测模式,其计算复杂度相当大. 因此,为了降低编码器的计算复杂度,HEVC 首先进行粗略模式选择(RMD)处理,即对 35 种预测模式分别求解其对应的哈达玛代价,从中选出 N 个代价最小的模式,并考虑当前 CU 最可能的模式(MPMs);接着对可能的 N 到 $N+3$ 个候选模式进行 RDO 计算,从中选出最优的预测模式.

2 待嵌入信息预处理

2.1 Arnold 置乱

采用 32×32 的二值图像作为待嵌入信息,如图 2 所示. Arnold 变换是俄国数学家 Arnold 提出的,一幅 $N\times N$ 的数字图像的二维 Arnold 变换定义为

(x',y') = (1 1; 1 2)(x;y) mod N. (1)

式(1)中: $x,y\in\{0,1,2,\cdots,N-1\}$ 为变换前像素的位置; x',y' 为变换之后的像素位置;mod 为模运算. 数字图像可以看作一个二维矩阵,经过 Arnold 变换之后,图像的像素位置会重新排列,降低图像的相关性^[14],从而达到提高信息安全性的目的. Arnold 置乱在经过若干次迭代后,矩阵会回到最初状态,从而还原出原始图,且周期的大小与 N 有关. 对任意的 $N(N>2)$,Arnold 变换的周期为 $T_N^2/2$ ^[15],对待嵌入图像进行 Arnold 置乱后的图像,如图 3 所示.



图 2 待嵌入图像
Fig. 2 Picture to be embedded



图 3 Arnold 置乱图像
Fig. 3 Arnold transform image

2.2 Turbo 码编码

通过编译码器中交织器和解交织器的使用,turbo 码有效地实现了随机性编译码的思想,通过短码和长码的有效结合,可达到距香农理论极限 0.7 dB 以内的极好性能. 一般来说,编码后的视频序列传送到解码端的过程中会遭受各种各样的干扰. 如果在视频编码端嵌入信息,可能造成解码端提取到的信息位产生错误,从而影响隐藏信息提取的正确性. 为了降低这种影响,利用 turbo 码的纠错功能对置乱后的二值信息序列进行编码. 即使提取端出现错误提取,只要错误在 turbo 码的纠错范围之内,还能恢复出正确的隐藏信息.

虽然 turbo 编解码耗时较多,但是文中使用的 turbo 码编码是在隐秘信息的预处理阶段进行的,其计算复杂程度并不影响嵌入算法的复杂度和实时性. 同样的,在解码端,turbo 码解码也是在全部提取出嵌入信息之后进行的,因此,也不会影响算法的实时性.

3 隐秘信息的嵌入

根据人眼视觉系统的特性,人眼对视频图像中纹理较复杂和亮度较高的区域敏感性较差^[16]. HEVC 编码标准中,图像比较平坦的区域选择较大的 CU,图像边缘或纹理复杂的区域选择较小的 CU. 最小的 8×8 CU 对应的 PU 大小有两种可能的大小,其他尺寸的 CU 对应的 PU 只有一种大小.

为了使算法更加简化,且保证隐藏信息的不可见性,折中选择在 16×16 CU 中嵌入隐秘信息. 为了

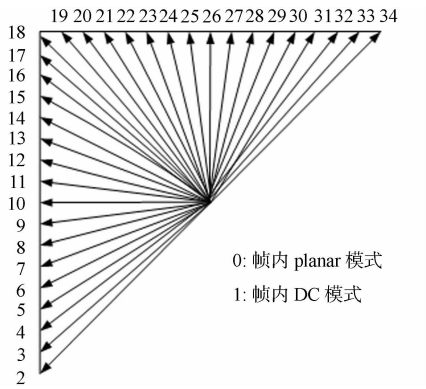


图 1 HEVC 帧内预测方向
Fig. 1 Modes and directional orientations for intrapicture prediction

操作方便,以预测模式的奇偶性进行操作:模式信息 $\{2,4,6,\cdots,30\}$ 对应“0”;模式信息 $\{3,5,7,\cdots,31\}$ 对应“1”.这里不考虑模式 0 和 1,一是因为它们都是用在纹理比较平滑的区域^[17],二是统计分析表明,选中模式 0 和 1 的概率很高,若强制改为其他模式,势必导致较大的率失真性能损失.

3.1 隐秘信息嵌入过程

二值待嵌入信息序列为 $W=\{\omega_i|i=1,2,\cdots,M,\omega_i\in\{0,1\}\}$,信息的嵌入是在 HEVC 的 I 帧编码过程中进行的,具体有以下 4 个步骤.

步骤 1 在 I 帧中从第一个编码树单元(coding tree unit,CTU)开始,找出尺寸为 16×16 的 CU.

步骤 2 利用率失真开销函数计算出当前 16×16 PU 的最优预测模式 $best_pm$.

步骤 3 如果最优预测模式 $best_pm$ 为 0 或 1,则跳过当前 PU,不进行隐秘信息嵌入.如果 $best_pm$ 不为 0 或 1,则按照下面规则修改:如果 $best_pm$ 的奇偶性与当前待嵌入信息位一致,则保持 $best_pm$ 不变;如果不一致,就用 sub_pm 代替 $best_pm$.由于 HEVC 模式选择过程中是先进行 RMD 选出几种模式,再进行这几种模式的率失真计算得到最优预测模式,因此,为了保证模式修改前后的奇偶性一定不同, sub_pm 设置如下:如果 $best_pm$ 奇偶性与次优模式(即 RDcost 第二小的模式)奇偶性不同, sub_pm 就为次优模式;如果相同, sub_pm 就为 $best_pm$ 两侧相邻的两个模式中残差变换绝对值总和(SATD)较小的那个模式.嵌入过程可表示为

$$wm_pm = \begin{cases} sub_pm, & sub_pm \bmod 2 \neq \omega_i, \\ best_pm, & best_pm \bmod 2 = \omega_i. \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中: wm_pm 为嵌入隐秘信息后 PU 的预测模式; ω_i 为当前 PU 对应的待嵌入信息位.

步骤 4 遍历所有的采集传输单元(CTU),直到待隐藏信息全部嵌入完成.

3.2 隐秘信息提取过程

隐秘信息提取是嵌入的逆过程,算法只需解码含隐秘信息的视频码流中的帧内亮度预测模式即可,不需要提供原始视频,具体有以下 4 个步骤.

步骤 1 对含有隐秘信息的视频码流进行部分解码,得到 I 帧 16×16 CU 的所有亮度块的预测模式信息.

步骤 2 判断预测模式的奇偶性进行信息提取(模式 0,1 除外,如果解码出来的模式为 0 或 1,就跳过当前 PU),提取过程可表示为

$$\omega'_i = \begin{cases} 0, & de_pm \bmod 2 = 0; \\ 1, & de_pm \bmod 2 \neq 0. \end{cases} \tag{3}$$

式(3)中: ω'_i 为提取的隐秘信息位; de_pm 为解码得到的 16×16 CU 的预测模式.

步骤 3 重复上述步骤,直到隐秘信息提取完毕或视频码流结束.

步骤 4 把提取出来的信息进行 turbo 码解码和 Arnold 反置乱,可还原出原始的隐秘信息.

4 实验分析

为了验证该算法的性能,利用 HEVC 测试平台 HM12.0 进行仿真实验.实验中使用 5 个不同分辨率的标准测试序列:PeopleOnStreet, Traffic, ParkScene, BQTerrace 和 Vidyö3.参考软件配置参数,如表 1 所示,其余参数均采用默认配置.

表 1 HM 的主要参数配置
Tab.1 Configuration parameters of the HM

参数	配置	参数	配置
Profile	encoder_intra_main	Intra period	4
Sequence type	“I PPP I ...”	QP(Quantization Parameter)	20
Frames to be encoded	40	FrameSkip	0
Frame rate/fps	30	RD optimization	1:on

4.1 嵌入信息对视频质量及码率的影响

5 个测试序列在嵌入隐秘信息前后的视频图像,如图 4 所示.图 4(a)~(e)为 5 个测试序列的原始

图像.图 4(f)~(j)为嵌入隐密信息后重建的视频图像.由图 4 可知:在隐密信息嵌入前后,视频质量基本没有变化,主观上证明了该算法的隐密信息满足不可见性.

测试序列的实验结果,如表 2 所示.表 2 中: R_{PSN} 为峰值信噪比; η 为码率变化量; C 为嵌入容量; δ 为编码时间变化量;“+”表示嵌入隐藏信息后,相对于原始是增加的;“-”表示嵌入隐藏信息后,相对于原始降低.由表 2 可知: R_{PSN} 和码率变化非常微小,从客观上证明了隐密信息的嵌入对视频影响很小;编码时间的变化量也在合理范围内,这是由于编码时间的变化量主要取决于最优预测模式和当前信息位不一致的块的个数多少.实验结果表明:文中算法对编码视频的率失真性能损失几乎可以忽略不计.

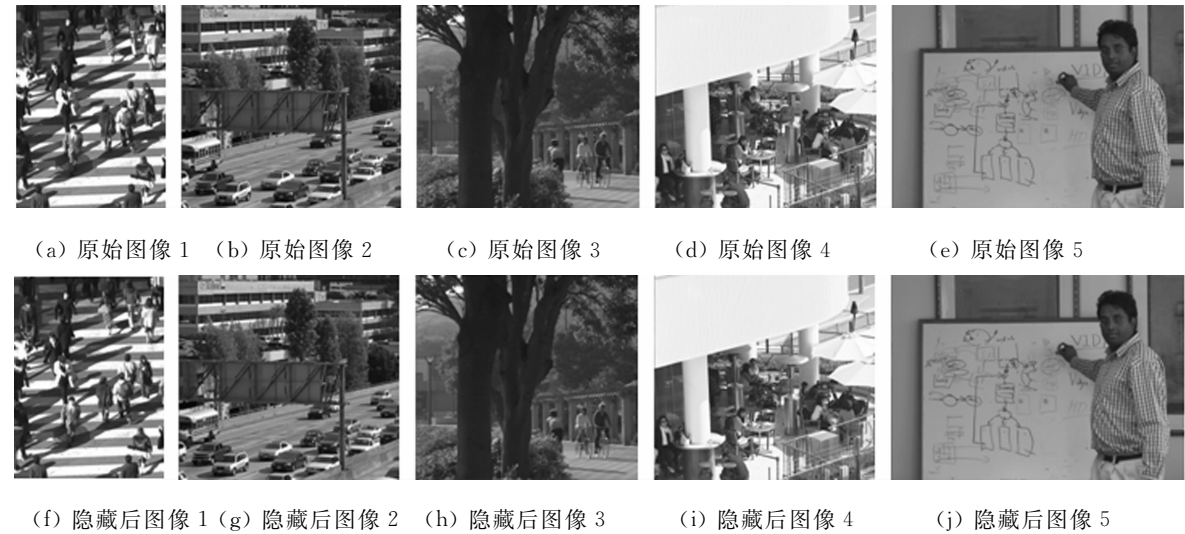


图 4 信息隐藏前后视频图像质量对比

Fig. 4 Comparison of the visual quality between the original and the marked frames

表 2 对测试序列的实验结果

Tab. 2 Experimental result for test sequence

测试序列	R_{PSN}/dB	$\eta/\%$	C/bit	$\delta/\%$
PeopleOnStreet	+0.000 2	+0.14	4 385	+0.45
Traffic	-0.000 4	+0.15	4 032	+0.73
ParkScene	-0.001 2	+0.07	1 695	+0.92
Vidyo3	-0.000 1	+0.45	1 025	+0.64
BQTerrace	+0.000 6	+0.05	676	+1.07

5 结束语

提出一种基于帧内预测模式的 HEVC 视频信息隐藏算法,通过修改 16×16 PU 最优预测模式实现信息隐藏,算法操作简单、提取方便.对于一般视频,提取时不需要对视频码流进行完全解码,只需要解码出 I 帧 16×16 CU 亮度预测模式即可.实验结果表明:该算法在嵌入隐密信息之后,视频的主客观质量较原始视频基本没有变化,比特率的增加量也很小.略有不足之处在于算法在视频选择上还有一些局限性,对纹理复杂和分辨率较高的视频信息隐藏容量更大,效果也更好,而对纹理平坦且分辨率较低的视频容量较小.因此,今后的工作是研究如何进一步提高算法的视频信息隐藏的容量.

参考文献:

[1] ZHAO Yan-tao. Reversible data hiding based on sorting and histogram modification[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010(1): 102-106.

[2] 李恒忠,崔建明,郭勇,等. 基于 HEVC 视频标准的熵编码过程[J]. 电脑知识与技术, 2013, 9(14): 3356-3359, 3365.

[3] 洪佳庆,林其伟. 采用 HEVC 的精细可分级编码[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2014, 35(3): 253-256.

[4] 申金媛,胡青云,刘润杰,等. 一种基于 H. 264 压缩域的鲁棒性视频水印算法[J]. 郑州大学学报:工学版, 2013, 34(5): 63-67.

[5] 刘雅宁. 压缩域视频水印技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007:197-200.

[6] 张承乾. 视频信息隐藏分析研究[D]. 天津:天津大学, 2009:1453-1458.

[7] 张维伟, 张茹, 刘建毅, 等. 一种基于 H. 264/AVC 的视频可逆脆弱水印算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1):106-112.

[8] ZHUO Zhao, YU Neng-hai, LI Xue-long. A novel video watermark scheme in compressed domain based on fast motion estimation[C]//Proceedings of ICCT. Beijing:[s. n.], 2003:1878-1882.

[9] ZHANG Jun, MAITRE H, LI Jie-gu, et al. Embedding watermark in MPEG video sequence[C]//Multimedia Signal Processing. Cannes; IEEE Press, 2001:535-540.

[10] DAI Yuan-jun, ZHANG Li-he, YANG Yi-xian. A new method of MPEG video watermarking technology[C]//Proceedings of ICCT. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2003:1845-1847.

[11] 陈志玉. 压缩视频安全方法研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2013:18-20.

[12] 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.

[13] LAINEMA J, BOSSEN F, HAN W J, et al. Intra coding of the HEVC standard[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(12):1792-1801.

[14] 李丽丽, 孙劲光. SITF 特征区域 Contourlet 域遥感图像水印算法[J]. 信号处理, 2012, 9(28):1254-1261.

[15] 张春森, 范金健, 胡平波. 小波变换和 Arnold 变换的数字水印技术[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(1):95-100.

[16] 吴国桢, 冯桂. 一种基于 H. 264 半脆弱视频水印方案[J]. 通信技术, 2012, 45(1):112-118.

[17] 朱秀昌, 李欣, 陈杰. 新一代视频编码标准: HEVC[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版, 2013, 33(3):1-11.

An Information Hiding Algorithm Based on Intra-Prediction Modes for HEVC

DONG Xiao-hui, LIN Qi-wei, XU Dong-xu

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

Abstract: This paper proposed an information hidden algorithm which was based on high efficiency video coding (HEVC) intra-prediction modes. Firstly, this algorithm uses Arnold transform and turbo coding method to get a binary information sequence to be embedded. Then, combine with the process of intra frame mode selection, we hide information by modulating the best prediction modes' parity of I frame luminance block's coding units. Since the hidden information only be embedded in I frame, during the extraction, only partial decode the steam is needed, we don't need decode the steam completely and don't need original video either. Besides, the real-time performance is good. Experimental results show this algorithm only has a little influence on video quality and bit rate and also can ensure a considerable information hiding capacity. Therefore, it is conform to the basic requirements of video hiding algorithm.

Keywords: video information hiding; intra-prediction mode; mode parity; high efficiency video coding

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)