

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201910040



采用深度帧内跳过模式的 3D-HEVC 视频水印算法

易银城, 冯桂, 陈婧

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 考虑到目前针对 3 维高效视频编码标准的视频水印算法缺乏的问题, 提出一种基于深度帧内跳过模式的视频水印算法. 首先, 分析深度帧内跳过模式的编码过程, 并将该模式的 4 种预测类型分为垂直、水平两大类; 其次, 进一步分析帧内误差传播问题, 对深度帧内跳过模式的预测类型与水印值不匹配的嵌入单元进行选择, 以消除传播误差. 最后, 根据水印嵌入前、后的率失真代价变化来决定是否修改其预测类型. 结果表明: 在不同的量化参数下, 平均每帧嵌入容量分别为 649.567, 340.155, 173.286 和 58.130 bit, 平均比特率变化分别为 0.043%, 0.046%, 0.460% 和 0.018%. 算法对比结果还表明: 文中所提算法具有更大的嵌入容量, 对比特率的影响更小, 在对比特率影响小的同时具有一定的抗重编码攻击性能.

关键词: 视频水印; 3D-HEVC; 深度帧内跳过模式; 误差传播

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)03-0357-09

Video Watermarking Algorithm for 3D-HEVC Using Depth Intra Skip Mode

YI Yincheng, FENG Gui, CHEN Jing

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

Abstract: Currently, considering the shortage of the video watermarking for 3-dimensional high efficiency video coding (3D-HEVC), a video watermarking algorithm based on depth intra skip (DIS) mode is proposed. Firstly, the encoding process for depth intra skip mode which contains four prediction types is analyzed and these four types are classified into two categories, namely, horizontal mode and vertical mode. Secondly, the problem of intra-frame error propagation is further analyzed, the propagation error can be eliminated by the selection of embedded units in case of its prediction type does not match the watermark value. Finally, the decision for prediction type modification is made according to the variation of rate-distortion cost before and after the process of embedding. The experimental results show that, under different quantization parameters, the proposed scheme provides the average embedding capacity of 649.567, 340.155, 173.286 and 58.130 bit per frame, and the average bit changing rate of 0.043%, 0.046%, 0.460% and 0.018%, respectively. Meanwhile, the proposed algorithm, according to the comparison results has a higher embedding capacity and less

收稿日期: 2019-10-27

通信作者: 冯桂(1960-), 女, 教授, 博士, 主要从事信号与信息处理、通信系统信息安全理论、多媒体通信、基于特征的数字水印技术理论与应用等的研究. E-mail: fenggui@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61802136); 福建省自然科学基金资助项目(2016J01306); 福建省中青年教育科研基金资助项目(JAT160034); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(18013082035)

impact on the bitrate, and it also has a negligible impact on bitrate and can resist the re-compression attack to a certain extent.

Keywords: video watermarking; 3D-HEVC; depth intra skip mode; error propagation

网络宽带、用户终端、视频编码技术的不断进步推动着视频产业的发展. 诸如 H. 264/AVC(advanced video coding)^[1]和 H. 265/HEVC(high efficiency video coding)^[2]等视频编码标准为视频的传输、存储及发布带来了巨大的支持. 3D 视频的出现及其本身所带来的场景立体感^[3]及视点交互,使得 3D 视频深受欢迎,因此,3D-HEVC^[4]视频编码标准应运而生. 然而,随着高速带宽的发展以及各种视频网站的出现,视频的观看及下载变得十分容易. 视频的盗版行为随之出现,严重危害了视频制作者的利益,使得视频版权保护成为了一个急需解决的问题. 视频水印技术利用视频的冗余信息嵌入水印,从而达到保护视频版权的目的. 因此,视频水印技术成为了保护视频的一种重要方式.

现阶段,针对 HEVC 的视频水印技术比较成熟^[5-13],而与 3D-HEVC 相关的视频水印技术还在研究初期,相应的技术十分缺乏. 文献[14]利用单深度帧内模式(single depth intra mode)实现信息隐藏,根据单深度帧内模式的候选列表像素值是否相等来决定当前编码单元(coding unit, CU)是否直接作为嵌入单元. 当候选列表像素值不相等时,则对该 CU 进行进一步选择,避免误差传播问题,并根据隐秘信息调制候选列表索引值. 文献[15]利用显著性模型和大津阈值将图像区域划分为显著区域和非显著区域. 针对不同区域,根据隐秘信息及余数相等原则对 P 帧或 B 帧的量化参数(quantization parameter, QP)值按不同公式进行修改. 文献[16]根据纹理图的纹理信息及深度图的边缘信息,将深度图的编码树单元(coding tree unit, CTU)划分成 4 种类型,并根据隐秘信息和划分的 CTU 类型对 QP 值进行修改.

本文在对现有算法深入研究的基础上,提出一种基于深度帧内跳过(depth intra skip, DIS)模式的 3D-HEVC 视频水印算法.

1 3D-HEVC 视频水印算法的提出

HEVC 编码标准主要针对的是纹理图. 然而,在 3D 视频中,除纹理图外,还需要对深度图进行压缩处理. 深度图由大量像素值基本一致的平坦区域构成. 针对这种特性,3D-HEVC 编码标准在 HEVC 编码标准的基础上引入了包括深度建模模式(depth modeling modes, DMMs)^[17]、分段直流残差编码(segment-wise DC coding, SDC)^[18]和 DIS 模式等技术,以便更有效地对 3D 视频进行压缩. 同时,新技术的引入也使得针对 3D-HEVC 的视频水印算法有了更多的实现方案.

1.1 深度帧内跳过模式

DIS 模式是对 3D-HEVC 编码标准中原有技术(单深度帧内模式)的改进. DIS 模式去除了单深度帧内模式中单深度候选值的获取过程,同时引入了现有的方向预测模式(水平和垂直预测模式). 与帧间跳过模式一样,DIS 模式也没有预测残差传输到解码端. DIS 模式中共有 4 种预测类型(垂直预测模式、水平预测模式、水平单深度模式和垂直单深度模式),分别对应预测类型索引值 0~3,如图 1 所示. 图 1 中:不同颜色方块表示不同的深度值,黑色方框内的块表示参考像素.

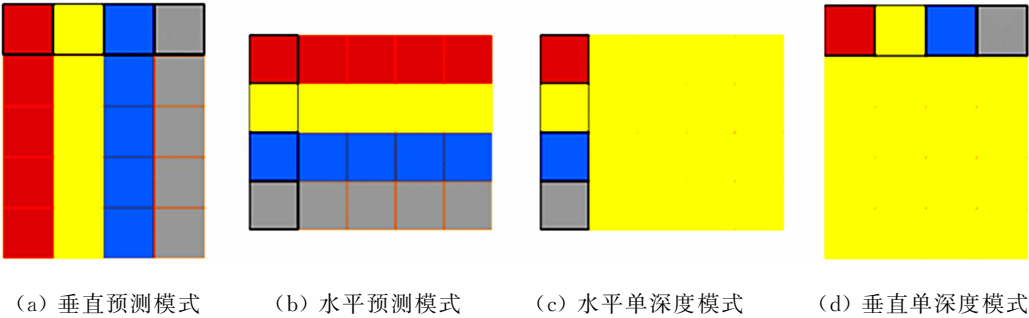


图 1 4 种 DIS 模式预测类型

Fig. 1 Four types of DIS mode

当 CU 采用 DIS 模式进行编码时, CU 的划分模式只能为 $2N \times 2N$ 模式. 此时, 若 DIS 模式的预测类型索引值为 0 或 1, 当前 CU 的预测值则为对应的垂直或水平方向预测值; 若 DIS 模式的预测类型索引值为 2 或 3, 当前 CU 的预测值则为左侧边界或上方边界的中间位置的深度值, 即黄色方块代表深度值. CU 利用上述 4 种预测类型进行编码并计算率失真代价, 选择代价最小的预测类型作为当前 CU 的 DIS 模式最终的预测类型.

经过对标准序列的测试, 得到了在不同量化参数值下, 深度图中 CU 最优编码模式为 DIS 模式的比例, 如表 1 所示. 从表 1 中可知: DIS 模式作为最优编码模式的平均比例达到了 66.42%. 表明对于绝大多数 CU 来说, DIS 模式比起其他预测模式更适合深度图的编码.

表 1 不同 CU 尺寸下 DIS 模式作为最优模式所占比例

Tab. 1 Proportions of DIS mode used as optimal mode with different CU sizes

测试序列	分辨率/ px×px	CU 尺寸 px×px	比例/%			
			QP=25	QP=30	QP=35	QP=40
Balloons	1 024×768	64×64	88.95	75.41	65.58	71.29
		32×32	61.98	55.73	52.80	56.00
		16×16	60.29	59.76	59.21	62.73
		8×8	52.17	54.26	49.12	45.99
Kendo	1 024×768	64×64	87.26	75.51	69.86	69.86
		32×32	60.84	56.23	55.57	61.00
		16×16	63.93	60.90	60.22	67.35
		8×8	57.20	58.33	65.69	69.64
Newspaper	1 024×768	64×64	72.25	57.06	48.19	53.85
		32×32	52.73	45.38	52.13	58.13
		16×16	48.06	51.41	58.67	64.20
		8×8	43.49	50.17	56.53	63.89
PoznanHall2	1 920×1 088	64×64	92.58	88.49	89.56	91.64
		32×32	78.94	79.50	77.39	82.44
		16×16	81.06	79.01	78.18	73.16
		8×8	67.78	70.75	72.17	77.30
PoznanStreet	1 920×1 088	64×64	49.17	70.65	72.62	83.76
		32×32	59.77	58.06	58.15	64.26
		16×16	59.55	58.81	64.03	71.46
		8×8	50.81	57.50	64.27	72.16
UndoDancer	1 920×1 088	64×64	69.72	76.41	84.45	87.74
		32×32	75.96	75.91	75.74	74.67
		16×16	76.57	77.22	76.89	76.92
		8×8	60.69	62.89	69.05	73.23

Balloons 第一帧图像的 DIS 模式分布, 如图 2 所示. 图 2 中: 黄色区域表示 DIS 模式作为该区域 CU 的最优编码模式. 从图 2 可知: 利用 DIS 模式嵌入水印可获得大量可选择的嵌入单元.

在文中算法中, 为实现水印的嵌入, 将 DIS 模式的预测类型分为两类, 并建立水印值与类之间的映射关系. 在划分类别时还需注意的是, 不同的类别划分会对水印的嵌入、提取过程造成不同程度的影响. 例如, 将 DIS 模式的预测类型 0, 2 分为一类, 对应水印值 0, 预测类型 1, 3 分为另一类, 对应水印值 1. 当水印值与类之间的映射不成立时, 修改 DIS 模式的预测类型, 例如, 将预测类型 0 修改为预测类型 3. 这样分类的好处在于, 预测类型 0, 3 同属于垂直模式, 在修改 DIS 模式的预测类型时对嵌入单元的影响小; 但预测类型 0, 3 对应不同水印值, 在视频遭受重编码攻击时, 预测类型 0, 3 间可能相互转换或转换为垂直方向预测模式(模式 19~34)中的任意一种, 两种情况都不利于水印的提取.

文中算法更加注重水印的误码率性能. 因此, 文中分别将 DIS 模式的预测类型 0 与 3, 1 与 2 划分为一类, 即垂直模式、水平模式, 分别对应水印值 0 和 1. 同时, 考虑修改 DIS 模式预测类型带来的影响, 只有水印嵌入前、后的率失真代价变化满足一定阈值条件时水印才真正嵌入.



(a) 原始图像 (b) DIS 模式分布图

图 2 Balloons 第一帧图像的 DIS 模式分布

Fig. 2 Distribution of DIS mode of Balloons in 1th frame

1.2 帧内误差传播问题

在嵌入水印的过程中,不可避免地会产生视频质量下降或比特率增长等问题. 在文中算法中,通过建立 DIS 模式的预测类型和水印值的映射关系来实现水印的嵌入. 在修改 DIS 模式的预测类型时,可能导致当前 CU 的预测值随之变化. 此时,若邻块 CU 以当前 CU 的边界像素作为参考像素,嵌入水印所产生的误差将传播到邻块 CU 中,即误差传播问题. 因此,需要对该误差进行消除. 文献[5]提出了两种方法用于消除误差传播问题,即修改 TU 中的部分系数,以及对水印嵌入单元进行选择. 由于 DIS 模式中没有残差传输到解码端,因此,无法通过修改 TU 的部分系数达到消除误差的目的,只能利用水印嵌入单元选择来消除传播误差.

邻块 CU 可选预测模式,如表 2 所示. 3D-HEVC 中的 35 种方向预测模式与 HEVC 中的方向预测模式一致. 因此,当前 CU 作为嵌入单元时,邻块 CU 的可选方向预测模式和文献[5]所述一致. DIS 模式及 DMMs 模式仅利用 CU 的上方和左侧像素作为参考像素. 因此可知,只有邻块 CU 的编码模式满足表 2 所列模式时才不会引起误差传播问题,当前 CU 才能作为嵌入单元.

1.3 嵌入算法

通过对 DIS 模式及误差传播问题的分析,提出一种基于 DIS 模式的 3D-HEVC 视频水印算法,对 DIS 模式的预测类型进行分类,并根据水印值和预测类型的匹配情况修改其类型. 由于修改 DIS 模式预测类型会引起深度图的变化,因此,文中还考虑了水印嵌入前、后的率失真代价变化来对嵌入单元进行进一步选择. 具体有如下 7 个嵌入步骤.

- 步骤 1 对二值水印重新排序,得到的一维水印序列 $w=\{w_1,w_2,\cdots,w_n\}$,将用于重复嵌入.
- 步骤 2 对 CU 进行解析,判断当前 CU 是否是 DIS 编码模式,否则,转到步骤 7.

步骤 3 判断当前水印值与 CU 的 DIS 模式预测类型是否满足 $\begin{cases} \text{case 1: } w=1, I=1 \text{ or } 2; \\ \text{case 2: } w=0, I=0 \text{ or } 3. \end{cases}$ 如果满足,则记录当前 CU 的位置信息及单一深度值 V_2 和 V_3 ,并转到步骤 7. 其中, I 为水印嵌入前的预测类型索引值; w 为待嵌入水印值; V_2, V_3 分别为利用 DIS 模式预测类型 2,3 编码所确定的单一深度值.

- 步骤 4 判断邻块 CU 是否满足表 2 所列模式,否则,转到步骤 7.

步骤 5 按 $I'=\begin{cases} 0, I=1, w=0; \\ 3, I=2, w=0; \\ 1, I=0, w=1; \\ 2, I=3, w=1, \end{cases}$ 对当前 CU 的 DIS 模式的预测类型进行修改,计算利用修改后的预测类型进行编码的率失真代价. 其中, I' 为水印嵌入后的预测类型索引值.

步骤 6 若重新编码所计算的代价值满足 $\text{abs}(D_o - D_e) < \max(T_h, D_o)$, 则记录当前 CU 的位置信息及单一深度值 V_2 和 V_3 , 否则, 当前 CU 不作为嵌入单元. 其中, D_o, D_e 分别为水印嵌入前、后的率失真代价, 阈值 T_h 经实验测试设置为 500.

步骤 7 对 CU 重新编码, 解析下一个 CU 直至全部 CU 重新编码完成.

1.4 提取算法

由于视频可能遭受重编码攻击, 因此, 在解码过程中需考虑 DIS 模式向其他模式转变的情况. 在文中算法中, 对 DIS 模式转变为方向预测模式 2~34 的 CU, 根据其预测方向来决定提取的水印值. 对 DIS 模式转变为方向预测模式 0 的 CU, 当重构 CU 的 DC 值与 V_2 和 V_3 的差值小于一定阈值时, 根据差值来决定提取的水印值. 具体有如下 5 个主要提取步骤.

步骤 1 根据嵌入过程的位置信息判断当前 CU 是否为水印嵌入单元, 否则, 转到步骤 5.

步骤 2 判断当前 CU 是否是 DIS 模式, 否则, 转到步骤 4.

步骤 3 根据 $w' = \begin{cases} 1, I \% 3 \neq 0, \\ 0, I \% 3 = 0 \end{cases}$ 对水印值进行提取, 提取水印后转到步骤 5.

步骤 4 根据 $w' = \begin{cases} 0, 18 < M_{CU} < 35 \text{ or } M_{CU} = 0, \text{abs}(P_r - V_2) \geq 20 > \text{abs}(P_r - V_3), \\ 1, 1 < M_{CU} < 19 \text{ or } M_{CU} = 0, \text{abs}(P_r - V_2) < 20 \leq \text{abs}(P_r - V_3), \\ \text{rand}(), \text{others} \end{cases}$ 对水印值提取.

其中, M_{CU} 表示当前 CU 的方向预测模式, $\text{rand}()$ 表示对 0, 1 的任意取值, P_r 表示当前 CU 的重构值.

步骤 5 解析下一个 CU 直至全部 CU 解码完成.

2 实验结果及分析

文中算法在参考软件 HTM 16.0 上进行验证. 参考软件主要参数配置如下: QP 值为 25, 30, 35, 40, 采用图像组 (group of picture, GOP) 大小为 1 的全帧内 (all-intra, AI) 编码, 共编码 32 帧, 其他参数采用默认配置. 电脑基本配置: CPU 为 Intel Xeon CPU E5-1630 3.7 GHz, 内存为 16 GB. 测试了 6 个具有两种分辨率的序列, 分别为 1 024 px×768 px 的 Balloons, Kendo 和 Newspaper1 及 1 920 px×1 088 px 的 PoznanHall2, PoznanStreet 和 UndoDancer.

2.1 嵌入容量、比特率及视频质量变化

不同的测试序列在不同的 QP 量化参数值下, 平均每帧嵌入容量 (C)、水印嵌入前、后的比特率变化 ($\Delta R = (R_e - R_o) / R_e$), 以及合成视点的平均每帧峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 变化 ($\Delta P = P_e - P_o$), 如表 3 所示. 表 3 中: R_o, R_e 分别表示水印嵌入前、后的比特率; P_o, P_e 则分别表示水印嵌入前、后合成视点的平均每帧 PSNR; R_{PSNR} 为峰值信噪比 (PSNR).

表 3 嵌入容量、比特率及和视频质量变化实验结果

Tab. 3 Experimental results of embedding capacity, bit-rate and video quality change

测试序列	分辨率/ px×px	QP	$C /$ bit · f ⁻¹	$R_o /$ kbit · s ⁻¹	$R_e /$ kbit · s ⁻¹	$\Delta R / \%$	P_o / dB	P_e / dB	$\Delta P / \text{dB}$
Balloons	1 024×768	25	450.156	22 811.048	22 822.185	0.048	45.800	44.256	-1.544
		30	251.000	13 781.423	13 789.343	0.057	43.673	42.753	-0.920
		35	114.187	8 390.445	8 394.173	0.044	41.396	41.004	-0.392
		40	33.718	5 189.610	5 191.185	0.030	39.394	39.155	-0.239
Kendo	1 024×768	25	309.093	14 716.763	14 724.630	0.053	46.951	45.685	-1.266
		30	170.125	8 735.400	8 738.475	0.035	45.247	44.822	-0.425
		35	80.875	5 280.720	5 283.750	0.057	43.204	43.050	-0.154
		40	27.031	3 268.298	3 269.010	0.021	41.235	41.153	-0.082
Newspaper	1 024×768	25	750.812	35 808.353	35 829.218	0.058	44.918	43.601	-1.316
		30	368.218	19 354.178	19 364.040	0.066	42.591	41.957	-0.634
		35	160.937	10 751.220	10 753.208	0.018	40.238	40.115	-0.123
		40	75.031	6 180.923	6 181.290	0.005	38.290	38.240	-0.049

续表

Continue table

测试序列	分辨率/ px×px	QP	$C/$ bit·f ⁻¹	$R_o/$ kbit·s ⁻¹	$R_e/$ kbit·s ⁻¹	$\Delta R/\%$	P_o/dB	P_e/dB	$\Delta P/\text{dB}$
PoznanHall2	1 920×1 088	25	401.812	16 376.550	16 386.862	0.063	47.584	46.863	-0.721
		30	258.687	8 425.131	8 432.244	0.084	46.455	45.909	-0.546
		35	149.625	4 601.525	4 606.400	0.105	44.889	44.612	-0.277
		40	54.062	2 659.438	2 660.037	0.022	43.323	43.262	-0.061
PoznanStreet	1 920×1 088	25	1 152.875	69 950.969	69 966.319	0.021	45.746	44.553	-1.193
		30	461.093	34 262.319	34 265.587	0.009	43.414	42.871	-0.543
		35	186.312	17 603.056	17 605.313	0.012	41.438	41.233	-0.205
		40	96.031	9 508.019	9 509.700	0.017	39.670	39.600	-0.070
UndoDancer	1 920×1 088	25	832.656	111 763.369	111 780.100	0.015	44.789	43.531	-1.258
		30	531.812	56 401.019	56 415.356	0.025	42.613	42.095	-0.518
		35	348.781	24 901.475	24 911.412	0.040	40.626	40.477	-0.149
		40	62.906	10 534.044	10 535.469	0.013	39.183	39.127	-0.056

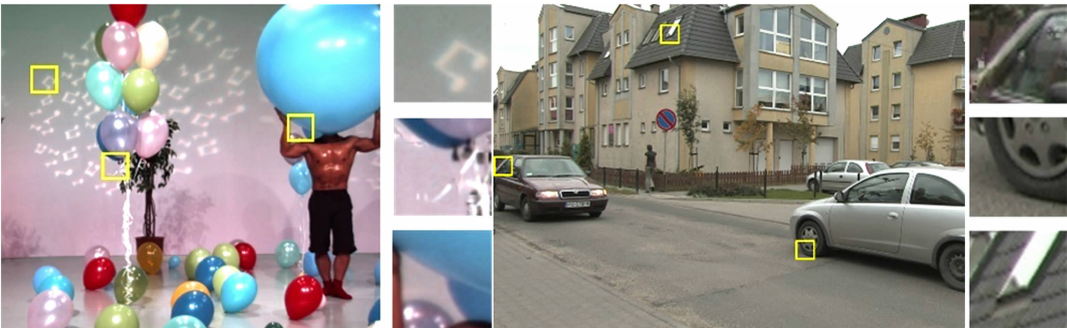
随着 QP 的增长,由于 CTU 中的 CU 趋向于大尺寸的划分,CTU 中的 CU 数目减少.同时,修改大尺寸 CU 所造成的率失真代价变化也变大,使得可选择的水印嵌入单元大大减少.而随着分辨率的提高,CTU 的数目增多,可选择的水印嵌入单元随之增多.

综上所述并结合表 3 可知:水印的嵌入容量随着 QP 的增长而下降,而随着分辨率的提升而提高.在不同 QP 值(25,30,35,40)下,所有测试序列对应的平均每帧嵌入容量分别为 649.567,340.155,173.286 和 58.130 bit,平均比特率变化则分别为 0.043%,0.046%,0.460%和 0.180%.所有测试序列在水印嵌入前、后的比特率变化处于 0.05%~0.105%,说明了文中所提算法在具有较大嵌入容量的同时,对比特率的影响小.

除嵌入容量和比特率外,嵌入水印对视频质量的影响也用于验证算法的性能.由于深度图不直接用于观看,因此,通过水印嵌入前、后合成视点的平均每帧 PSNR 及其主观性能的变化反应嵌入水印对视频质量的影响.由表 3 可知:测试序列合成视点的平均每帧 PSNR 变化程度随着嵌入容量的下降而变小.合成视点平均每帧 PSNR 变化为-0.530 dB,分辨率为 1 920 px×1 088 px 及 1 024 px×768 px 视频的合成视点的平均每帧 PSNR 变化分别为-0.466 和-0.595 dB.结合嵌入容量性能可以发现,1 920 px×1 088 px 分辨率视频同 1 024 px×768 px 分辨率视频相比,平均每帧嵌入容量更大,但合成视点的平均每帧 PSNR 变化却更小.

造成这种情况的原因在于,前者与后者之间的单帧像素点个数比值约为 2.656 倍,而平均每帧嵌入容量比值仅约为 1.625 倍,这意味着前者的单位像素点嵌入容量小于后者.因此,嵌入在前者中的水印对合成视点的影响反而小于后者.

测试序列 Balloons 及 PoznanStreet 在 QP 值等于 25 时,合成视点第一帧图像的主观性能对比图,如图 3 所示.从图 3 可知:合成视点的视频质量在主观感知上变化不大.由此可知,尽管文中所提算法对合成视点有所影响,但仍处在可接受范围之内.



(a) 原始合成视点主观性能



(b) 解码合成视点主观性能

图 3 水印嵌入前、后合成视点的主观性能对比

Fig. 3 Comparison of subjective performance in synthetic viewpoints before and after watermark embedding

2.2 鲁棒性分析

文中算法的鲁棒性将利用误码率(R_{BE})来进行分析,计算公式为

$$R_{BE} = \frac{B_e}{B_t} \times 100\%.$$

其中: B_e 表示错误比特数目; B_t 为总比特数目. 由此可知 R_{BE} 越小,算法的鲁棒性越好.

文中算法误码率的测试结果,分别如图 4,5 及表 4 所示. 由图 4 可知:无攻击时, R_{BE} 为 0,能完整地提取出原始水印;而在解码视频遭受重编码攻击时,解码视频与原始视频的差异使得 CU 的最优编码模

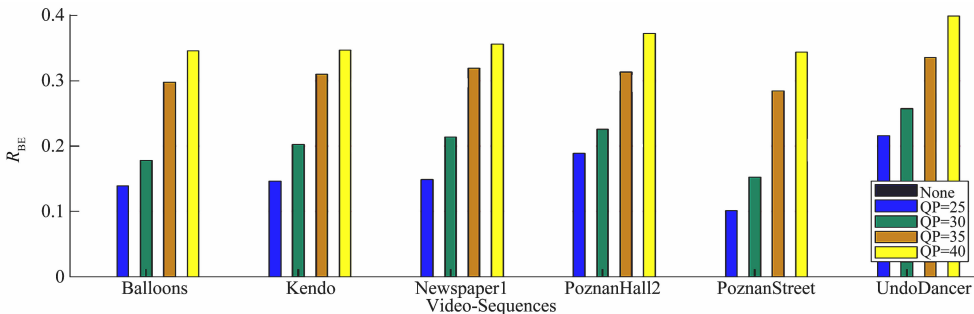


图 4 不同 QP 值下的误码率性能

Fig. 4 BER under re-encoding with different QP

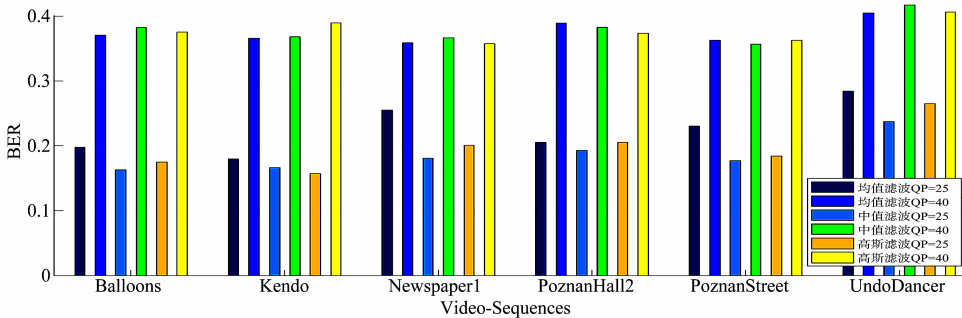


图 5 不同滤波攻击及 QP 值下的误码率性能

Fig. 5 BER under filtering and re-encoding attack with different QP

式发生变化,从而造成误码情况. 同时,随着 QP 的增大,CU 的最优编码模式更容易发生变化. 因此,误码率(R_{BE})随着 QP 的增长而增长.

表 4 不同误码率下的提取水印

Tab. 4 Extracted watermark with different BER

$R_{BE}/\%$	0	10.1	20.2	30.9	39.8
主观图像					

文中所提算法在不同 QP 值(25, 30, 35, 40)的重编码攻击下,对应的误码率(R_{BE})平均值分别为 15.683%, 20.510%, 30.989% 和 36.055%,误码率(R_{BE})的最小值为 10.145%,最大值为 39.875%. 同时,文本验证了不同滤波及重编码混合攻击下

了误码率性能.从图 5 可知:滤波攻击使得算法鲁棒性下降,但经过重编码攻击后整体 BER 仍小于 42%.从表 4 可知:随着误码率(R_{BE})的增长,虽然提取的水印图像在主观感知上越来越差,但仍可从中辨别出嵌入的水印.

2.3 算法对比

由于文献[15-16]分配固定比特用于编码视频,其实验条件与文中有所差异.因此,只将文中算法测试结果与文献[14]所提算法进行对比用于验证算法的有效性,对比结果如表 5 所示.表 5 中: C 为平均每帧嵌入容量; P 为平均每帧 PSNR; R 为比特率.

表 5 所提算法与参考文献[14]算法的性能对比
Tab. 5 Performance comparison between proposed algorithm and algorithm in references [14]

测试序列	QP	P/dB		$C/\text{bit} \cdot \text{frame}^{-1}$		$R/\%$	
		文中	文献[14]	文中	文献[14]	文中	文献[14]
Balloons	25	-1.544	-0.000 9	450.156	348	0.048	0.14
	30	-0.920	-0.013 9	251.000	172	0.057	0.13
	35	-0.392	-0.001 8	114.187	102	0.044	0.14
	40	-0.239	-0.001 3	33.718	60	0.030	0.13
Kendo	25	-1.266	-0.000 2	309.093	263	0.053	0.18
	30	-0.425	0	170.125	103	0.035	0.14
	35	-0.154	0	80.875	54	0.057	0.12
	40	-0.082	-0.000 1	27.031	37	0.021	0.13
Newspaper	25	1.316	-0.002 1	750.812	396	0.058	0.09
	30	0.634	-0.000 4	368.218	237	0.066	0.12
	35	0.123	-0.002 5	160.937	160	0.018	0.15
	40	0.049	0	75.031	100	0.005	0.17
PoznanStreet	25	-1.193	0	1 152.875	551	0.021	0.05
	30	-0.543	-0.000 2	461.093	210	0.009	0.04
	35	-0.205	-0.009 8	186.312	121	0.012	0.06
	40	-0.070	0	96.031	66	0.017	0.04
UndoDancer	25	-1.258	0	832.656	314	0.015	0.03
	30	-0.518	0	531.812	250	0.025	0.05
	35	-0.149	0	348.781	198	0.040	0.08
	40	-0.056	0	62.906	177	0.013	0.13
平均值	—	-0.556	-0.001 6	323.182	195.95	0.032	0.11

结合图 3 可知:文中所提算法在合成视点主观图像变化几乎不可感知的前提下,平均比特率变化更小、平均嵌入容量更大.文中算法的不足之处在于合成视点的客观指标 PSNR 变化较大.虽然文中算法在嵌入过程中根据嵌入前、后的率失真代价变化对嵌入单元进行了进一步选择,但修改 DIS 模式的预测类型仍对深度图造成较大影响,因此导致了合成视点的平均每帧 PSNR 变化较大.

3 结论

文中提出了一种基于 DIS 模式的 3D-HEVC 视频水印算法.首先,对 DIS 模式的编码过程进行分析,同时对 DIS 模式预测类型进行分类并建立与水印值之间的映射关系.其次,对帧内误差传播问题进行了全面分析,根据水印值与 DIS 模式的预测类型的匹配情况来进一步对当前 CU 进行选择,选取不会造成误差传播的 CU 作为水印候选嵌入单元.最后,根据水印嵌入前、后的率失真代价变化来决定是否嵌入水印信息.

实验结果表明,文中算法有较高的嵌入容量且对比特率影响小,但文中算法的抗重编码攻击性能一般,且对深度图造成的影响使得合成视点的平均每帧 PSNR 变化较大.因此,提升算法的抗重编码攻击性能及减少对深度图的影响将作为接下来的研究方向.同时,水印嵌入过程中的阈值选择的自适应化及水印提取过程中对误码情况的判断也有待进一步优化.

参考文献:

- [1] SULLIVAN G J, WIEGAND T. Video compression—from concepts to the H. 264/AVC standard[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(1): 18-31. DOI:10.1109/JPROC.2004.839617.
- [2] 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 & Systems for Video Technology, 2013, 22(12): 1649-1668. DOI:10.1109/TCSVT.2012.2221191.
- [3] MULLER K, SCHWARZ H, MARPE D, *et al.* 3D high-efficiency video coding for multi-view video and depth data [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(9): 3366-3378. DOI:10.1109/TIP.2013.2264820.
- [4] TECH G, CHEN Ying, MUELLER K, *et al.* Overview of the multiview and 3D extensions of high efficiency video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2016, 26(1): 35-49. DOI:10.1109/TCSVT.2015.2477935.
- [5] CHANG P C, CHUNG K L, CHEN J J, *et al.* A DCT/DST-based error propagation-free data hiding algorithm for HEVC intracoded frames[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(2): 239-253. DOI:10.1016/j.jvcir.2013.10.007.
- [6] SALAHUDDIN S, KHIZAR H, AFAR S. A watermarking scheme for high efficiency video coding (HEVC)[J]. PLoS ONE, 2014, 9(8): e105613(1-8). DOI:10.1371/journal.pone.0105613.
- [7] GAJ S, KANETKAR A, SUR A, *et al.* Drift-compensated robust watermarking algorithm for H. 265/HEVC video stream[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, 2017, 13(1): 1-24. DOI:10.1145/3009910.
- [8] KAUR G, KASANA S S, SHARMA M K. An efficient watermarking scheme for enhanced high efficiency video coding/h. 265[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 78(8): 1-23. DOI:10.1007/s11042-018-6791-x.
- [9] GAJ S, SUR A, BORA P K. A robust watermarking scheme against re-compression attack for H. 265/HEVC[C]//Fifth National Conference on Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing and Graphics (NCVPRIPG). Patna: IEEE Press, 2015. DOI:10.1109/NCVPRIPG.2015.7490065.
- [10] DUTTA T, GUPTA H P. A robust watermarking framework for high efficiency video coding (HEVC): Encoded video with blind extraction process[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38: 29-44. DOI:10.1016/j.jvcir.2015.12.007.
- [11] TEW Yiqi, WONG K S. Information hiding in HEVC standard using adaptive coding block size decision[C]//IEEE International Conference on Image Processing. Paris: IEEE Press, 2015. DOI:10.1109/ICIP.2014.7026113.
- [12] 张明辉, 冯桂. 基于纹理方向的高效视频编码鲁棒视频水印[J]. 计算机应用, 2015, 35(9): 2531-2534. DOI:10.11772/j.issn:1001-9081.2015.09.2531.
- [13] 蔡春亭, 冯桂, 王驰, 等. 基于帧内预测模式多划分的 HEVC 鲁棒视频水印算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(6): 1772-1776. DOI:10.11772/j.issn:1001-9081.2017.06.1772.
- [14] 王静, 郁梅, 蒋刚毅, 等. 基于单深度帧内模式的 3D-HEVC 深度视频信息隐藏算法[J]. 光电子·激光, 2017, 28(8): 893-901. DOI:10.16136/j.joel.2017.08.0213.
- [15] 王静, 郁梅, 陈芬, 等. 基于视觉感知的 3D-HEVC 帧间信息隐藏算法[J]. 光电子·激光, 2018, 29(4): 389-395. DOI:10.16136/j.joel.2018.04.0220.
- [16] 左力文, 骆挺, 蒋刚毅, 等. 基于多视点视频特征的 3D-HEVC 深度视频信息隐藏算法[J]. 光电子·激光, 2018, 27(5): 530-538. DOI:10.16136/j.joel.2018.05.0238.
- [17] ZHAO Jinchao, ZHAO Xiaoxin, ZHANG Weiwei, *et al.* An efficient depth modeling mode decision algorithm for 3D-HEVC depth map coding[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(24): 12048-12055. DOI:10.1016/j.ijleo.2016.10.008.
- [18] LIU Hongbin, CHEN Ying. Generic segment-wise DC for 3D-HEVC depth intra coding[C]//IEEE International Conference on Image Processing. Paris: IEEE Press, 2015. DOI:10.1109/ICIP.2014.7025651.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)