

基于 H. 264 抗重压缩的视频水印算法

刘 凯¹ 李 晨¹ 田丽华^{1*} 张玉龙¹ 宋 慧²

¹(西安交通大学软件学院 陕西 西安 710049)

²(武警工程大学信息工程学院 陕西 西安 710086)

摘 要 随着 H. 264/AVC 技术在视频领域应用的越来越广,研究基于 H. 264 的视频水印技术具有重要的意义。但目前很多基于 H. 264 的视频水印算法抗重压缩性能不佳,这严重影响了水印算法的实用性。针对 H. 264 重压缩的特点进行分析,提出一种基于色度 DCT 系数的视频水印算法。选择色度 DCT 非零系数符合要求的 4×4 子块;通过调整中频非零系数的正负号来实现水印的嵌入。实验结果表明,嵌入水印后视频的视觉质量基本不受影响,并且该算法对视频的比特率较小。同时该算法具有良好的抗重压缩的能力。

关键词 视频水印 H. 264/AVC DCT 抗重压缩 预测模式

中图分类号 TP313 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2018.12.032

A VIDEO WATERMARKING ALGORITHM AGAINST RE-COMPRESSON BASED ON H. 264

Liu Kai¹ Li Chen¹ Tian Lihua^{1*} Zhang Yulong¹ Song Hui²

¹(School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

²(School of Information, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, Shaanxi, China)

Abstract With the increasing application of H. 264/AVC in the field of video, it has great significance to research video watermarking based on H. 264/AVC. However, many existing algorithms of video watermarking based on H. 264 have poor performance of to resist re-compression, which seriously affects the application of the watermarking algorithm. In the paper, we analyzed the characteristics of H. 264 re-compression and proposed a video watermarking algorithm based on chroma DCT coefficients. The 4×4 sub blocks whose chromatic DCT non-zero coefficients met the certain demand were selected. The signs of the non-zero coefficients in the medium frequency were modulated to embed watermarks. The experimental results show that the visual quality of the embedded watermark video is almost unaffected, and the bit rate of the algorithm is small. The algorithm has a better ability to resist re-compression.

Keywords Video watermarking H. 264/AVC DCT Re-compression resistance Prediction mode

0 引 言

随着互联网以及影视行业的发展,视频的传播越来越普遍,人们可以利用互联网传播可以更加方便地获取视频资源。视频的版权保护也逐渐成为现阶段研究的热点问题,视频水印技术已经成为版权保护的不二选择^[1-2]。H. 264 比其他的压缩编码标准具有更好的压缩效率,因此研究基于 H. 264/AVC 视频编解码的视频水印算法变得更具有现实意义^[3-4]。用于版权

保护的 video 水印算法大都具有鲁棒性,能抵抗各种攻击。在 H. 264/AVC 中,视频都是以压缩的形式进行存储和传输的,所以 video 水印必须要能够抵抗 H. 264/AVC 的重压缩攻击。

为了满足 video 版权保护的要求,许多基于 H. 264/AVC 的鲁棒性 video 水印算法被提出。文献[5]提出的鲁棒性 video 水印算法将水印图像压缩之后的二值序列进行扩频处理,然后通过修改某个对角线 DCT 系数中来进行水印的嵌入,该算法鲁棒性较好,但算法较复杂。文献[6]提出的算法中通过调整纹理复杂的两相

邻子块的能量来嵌入水印,该算法水印鲁棒性较好,但对视频质量影响较大。文献[7]提出的算法是一种盲水印算法,该算法在 DCT 子块中嵌入水印,具有较好的水印鲁棒性与不可见性,但水印容量较小。文献[8]提出一种鲁棒水印算法,该算法结合 BCH 码,具有较好的抗重压缩性,但不能抵抗重量化转码攻击。文献[9]提出在量化后对每个 DCT 系数进行即时解码刷新,在运动矢量中嵌入水印,但鲁棒性差。文献[10]通过调制载体图像来进行奇异值分解,根据得到的奇异值的大小关系来嵌入水印,该算法简单,但抗重压缩能力差。

针对上述算法抗重压缩性能不足、算法复杂等问题,本文提出一种在色度上修改非零系数符号的算法。该算法选择通过改变非零系数较多的 DCT 色度子块中正负系数个数的大小关系来嵌入水印,以达到抗重压缩的目的。

1 预测模式与 CBP 分析

基于 H. 264/AVC 对鲁棒性视频水印的嵌入最常见的是选择在 DCT 变换和量化之后,因为之后的熵编码的过程是无损的,所以在无攻击的过程中能完全提取出水印。这类的算法都是根据对应的水印序列值来对量化后的 DCT 系数进行修改来嵌入水印,并且根据 H. 264/AVC 编码的特性,一般会选择在 I 帧嵌入,使其对视觉影响尽可能小。

通过对 DCT 块的量化系数的研究分析,发现量化后的系数正负符号比较稳定并且其正负符号的比例也比较稳定^[11]。因此可以考虑通过修改 DCT 系数正负符号来嵌入水印信息,以此提高水印的鲁棒性。另外通过分析重压缩前后的 DCT 系数,发现非零系数越多即视频的纹理复杂度越高,DCT 系数越稳定,水印的鲁棒性也越好。同时根据 HVS 的特点,人眼对于纹理复杂度高的视频变化并不敏感,在纹理复杂度越高的视频嵌入水印,人眼越难识别^[12],因此可以选择在非零系数较多的子块中嵌入水印来提高水印的鲁棒性和不可见性。

而 H. 264 中 DCT 系数又具体可分为亮度分量的 DCT 系数和色度分量 DCT 系数。多数视频水印算法都是选择在亮度分量的 DCT 系数中嵌入水印,但是这类算法重压缩后水印提取大都会有明显的偏移现象,并不具有良好的抗重压性。而参考 H. 264/AVC 编码框架,帧内预测分为 3 类模式,如图 1、图 2 所示,一共包括:9 种亮度 Intra_4 × 4 预测模式,4 种亮度 Intra_16 × 16 预测模式和 4 种色度 Intra_8 × 8 预测模式。亮度

Intra_16 × 16 预测模式和色度 Intra_8 × 8 预测模式大同小异。H. 264/AVC 通过对各个模式的代价的计算,选择代价最小的预测模式来实现对当前块的预测^[13]。

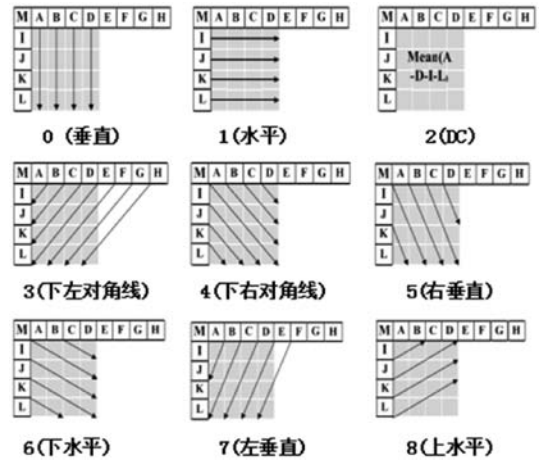


图 1 9 种亮度 Intra_4 × 4 预测模式

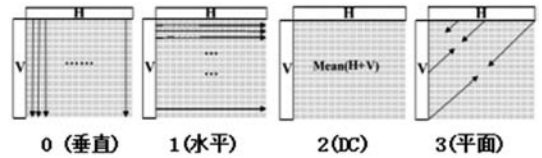


图 2 4 种亮度 Intra_16 × 16 预测模式

视频经过 H. 264/AVC 压缩编解码后,视频序列由于 DCT 变换和量化过程而出现失真。所以根据预测模式选择的原则,视频在进行重压缩的过程中会发生预测模式的转移。其中预测模式转移包括亮度预测模式和色度预测模式的内部转移,以及两类亮度预测模式之间的转移。而两类亮度预测模式之间的转移会引起水印提取不同步,对水印的结果造成严重失真。本文选取了 mobile_cif、flower_cif、tempe-te_cif、waterfall_cif 四个视频序列的前 20 帧进行重压缩实验,对四种转移发生的概率进行统计,结果如表 1 所示。发现色度仅有一类预测模式,不会发生不同类预测模式之间的转移,且色度较之于亮度变化率更小。

表 1 重压缩预测模式转移概率统计

视频序列	Intra_4 × 4 内部转移	Intra_16 × 16 内部转移	Intra_8 × 8 内部转移	亮度 类间转移
mobile	10.82%	0.37%	0.27%	0.05%
flower	6.81%	0.59%	0.51%	0.04%
tempe-te	14.90%	1.57%	1.19%	0.04%
waterfall	5.34%	1.89%	1.33%	0.15%

在 H. 264 中,当前块编码模式 CBP (co-ded block pattern) 代表了亮度分量和色度分量子块残差的编码方案。CBP 共有 6 bit,高 2 bit 和低 4 bit 分别代表了色度分量子块和亮度分量 8 × 8 子块是否存在非零系数。而 H. 264 是根据 CBP 的值对宏块进行编码的,CBP 的

值决定了当前块的编码模式,因为重压缩的过程是有损的,DCT 系数会发生改变,所以 CBP 值也可能会发生改变。CBP 值的改变会影响当前块的编码,如果 CBP 突变为 0,会导致某些子块不再编码,因而导致水印提取不同步^[14]。据实验统计,色度 CBP 值突变为 0 的概率很小,远小于亮度。因此为解决水印提取不同步的问题,可以考虑不选择在亮度分量上嵌入水印,而是选择在色度分量嵌入水印,这样就能很有效地解决水印提取不同步的问题。

综上所述,由于 DCT 系数正负符号有一定的稳定性,同时 DCT 系数中非零系数越多视频水印的鲁棒性越好,另外在色度分量上嵌入水印比亮度分量更能抗重压缩,故本文算法将基于色度分量的非零系数上进行水印的嵌入。

2 水印嵌入和提取的算法

2.1 水印的预处理

为了提高水印的安全性,需要对有意义的水印信息进行置乱。本文选择使用 Arnold 置乱预处理来消除图像像素之间的关联性,Arnold 置乱的计算过程简单,置乱效果好,同时也可以快速恢复置乱图像。置乱公式:

$$(x', y')^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} (x, y)^T \pmod{N} \quad (1)$$

式中:\$(x, y)\$ 是水印原始图像的像素值, \$(x', y')\$ 是水印置乱后的像素值, \$N\$ 是图像阶数。

2.2 水印的嵌入

根据第 2 小节的分析,本文选择在色度分量且纹理比较复杂的位置上嵌入水印,且为了兼顾视觉影响和鲁棒性的要求,本算法选择改变中频位置的非零系数的正负号来完成水印信息嵌入。具体步骤如下:

第 1 步 对水印信息预处理后得到序列 \$M = \{wm1, wm2, \dots, wm1024\}\$, 水印值 \$wm\$ 的值为 0 和 1。

第 2 步 在每个 \$16 \times 16\$ 的宏块中,选择非零系数个数 \$NNZ\$ 大于设定的阈值 \$K\$ 的色度子块,如果 \$NNZ\$ 大于 \$K\$,则进行水印的嵌入,反之跳过不执行。此处 \$K\$ 值的选择主要是根据视频纹理复杂度来决定,对于纹理复杂度高的视频序列可以适当提高 \$K\$ 值,对于纹理复杂度低的视频序列可以适当减小 \$K\$ 值,以此来平衡鲁棒性、不可见性和水印容量三者的关系。

第 3 步 对符合第 2 步要求的色度子块进行嵌入水印,分别计算出该色度块中正数个数 \$NP\$ 和负数个数 \$NN\$,然后比较正负数个数的大小关系。

第 4 步 通过修改 DCT 色度非零系数的正负号来满足该子块非零系数的正负数个数关系和水印信息相对应,本文算法的修改顺序是从 zig-zag 扫描后的最后一个中频系数开始从后向前进行修改。如果水印值为 1,则应满足负数的个数大于等于正数的个数,若不满足,则需改变 \$n\$ 个正数的符号;如果水印值为 0,则应满足负数的个数小于正数的个数,若不满足,则需改变 \$n\$ 个负数的符号。定义 \$diff\$ 为正负数个数差值的绝对值如下:

$$diff = |NP - NN| \quad (2)$$

本文中 \$n\$ 值的取值如下:

$$n = diff/2 + 1 \quad (3)$$

通过以上的方法,能使得每个宏块中非零系数个数大于一定阈值的色度子块中,如果对应的水印值是 1,那么非零系数中负数的个数就大于等于正数,如果对应的水印值是 0,那么负数的个数就小于正数。具体的水印嵌入的流程如图 3 所示。

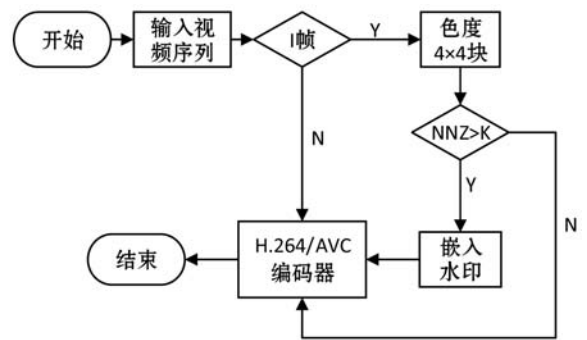


图 3 水印的嵌入流程图

2.3 水印的提取

水印的提取过程相当于水印嵌入的逆过程,在 H. 264/AVC 的解码端完成,由于本文算法中水印的嵌入是在量化之后进行的,所以水印的提取是在熵解码之后反量化之前进行的。结合水印的嵌入过程和 H. 264 的编解码原理,可利用如下步骤来提取水印。

第 1 步 在解码端的每个 \$16 \times 16\$ 的宏块中,并将其每个色度块的非零系数个数 \$NNZ\$ 与设定的阈值 \$K\$ 进行比较,如果 \$NNZ\$ 大于 \$K\$,则意味着该子块有水印的嵌入,需要进行水印的提取,反之跳过不执行。

第 2 步 计算符合第 1 步要求的色度子块计算其正数个数 \$NP\$ 和负数个数 \$NN\$,根据式(4)比较二者的关系来求得水印值。

$$wm = \begin{cases} 1 & NN \geq NP \\ 0 & NN < NP \end{cases} \quad (4)$$

第 3 步 将提取出的水印进行 Arnold 反置乱,最后得到原始的水印。

3 实验结果与分析

本文算法通过在 VS2012 上运行 H.264/AVC 测试模型 JM8.6 来进行仿真实验,运行服务器参数为: Intel(R) Core(TM) i5-3470M 3.20 GHz,内存:4 GB。具体的实验参数设置如表 2 所示。

表 2 JM 实验参数配置

参数类型	参数值
视频格式	CIF
帧率	30 fps
GOP 结构	IPPP
熵编码类型	CAVLC
编码帧数	250
量化参数	28

本文选择 tempete_cif、mobile_cif、flower_cif、waterfall_cif、akiyo_cif、news_cif 等视频作为被测视频,对其进行水印的嵌入。

3.1 不可见性测试

不可见性是视频水印最基本的要求,水印的嵌入应该以不影响视频质量为前提。图 4、图 5 显示了 mobile_cif、news_cif、waterfall_cif、tempete_cif、flower_cif 五个视频序列嵌入水印前后的第 30 帧的重构图像对比。通过对比可以发现,水印的嵌入前后的同一视频帧几乎没有差别,因此本文算法主观上具有良好的不可见性。



图 4 嵌入水印前的重构图像



图 5 嵌入水印后的重构图像

为了从客观上分析算法的不可见性,本文引入了峰值信噪比 PSNR (Peak Signal Noise Ratio) 和结构相似性 SSIM (Structural Similarity) 这两个视频质量评价指标。PSNR 和 SSIM 是通过对比嵌入水印前后的视频同一帧进行比较的结果,二者能较好地评价嵌入水印前后的视频质量。图 6、图 7 分别给出了本文算法的第 30 帧重建图像的 PSNR 值和 SSIM 值。通常认为,当 PSNR 值在 30 之上,SSIM 值在 0.90 之上就说明视

频质量很好。由图中数据可得,每个视频序列的 PSNR 值均在 36 以上,每个视频序列的 SSIM 值都在 0.93 以上。因此本文算法在客观上具有良好的不可见性。

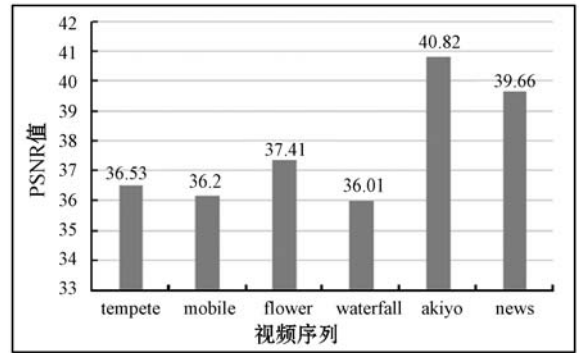


图 6 本文算法 PSNR 值统计图

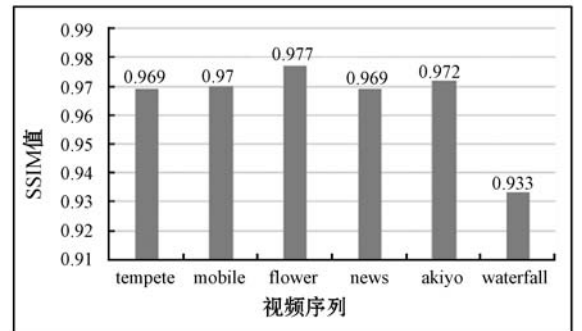


图 7 本文算法 SSIM 值统计图

3.2 比特增加率测试

比特增加率 BIR (BitIncrease Rate) 是衡量视频网络亲和力的一个指标。视频嵌入的前后比特率的稳定有利于视频的传输,因此视频水印算法要求尽量降低比特增加率。本文选择对数量较少的色度非零值进行改变来嵌入水印,因此本文算法对比特率的影响并不大。比特增加率 BIR 的计算公式如下:

$$BIR = (B_w - B_o) / B_o \times 100\% \quad (5)$$

式中: B_w 为视频嵌入水印后的比特率, B_o 为视频嵌入水印前的比特率。如图 8 所示,对比文献[14]的 BIR 值,可以发现本文算法具有更低的 BIR 值,因此本文算法具有较好的网络亲和力。

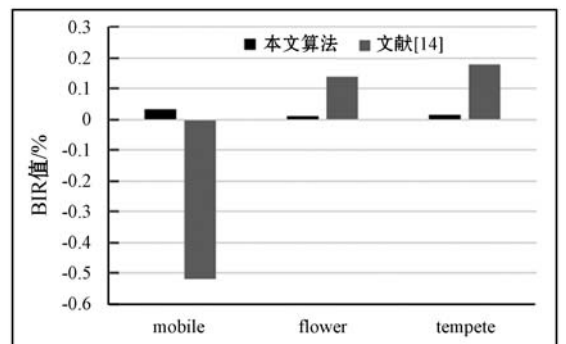


图 8 比特增加率对比图

3.3 鲁棒性测试

为了对水印算法的抗重压缩能力进行测试,对上文中的 6 个已经嵌入过水印的视频进行等量化值重压缩 ($QP=28$),重压缩后提取的水印结果如表 3 所示。从主观上看,仍然可以清晰地识别出“交大”的字样,能够达到版权保护的作用。同时对比不同视频的水印图像,发现纹理复杂度越高的视频,提取出来的水印结果也越好。

表 3 重压缩后水印的提取效果图

视频	原始水印	重压缩后
tempete	交大	交大
mobile	交大	交大
flower	交大	交大
waterfall	交大	交大
akiyo	交大	交大
news	交大	交大

为了更客观地对水印的鲁棒性进行分析,本文引入了归一化互相关系数 NC(Nor-malized Correlation)和误比特率 BER(BitError Rate)这两个视频水印鲁棒性评价指标^[15]。表 4 所示为各个视频序列嵌入水印并重压缩后提取的水印与原始水印对比计算得到的 NC 值和 BER 值,通常认为,当 NC 值大于 0.8, BER 值小于 0.35 就说明水印信息可以被正确识别出来。由表中数据可得,每个视频序列对应的水印的 NC 值均在 0.92 以上,每个视频的 BER 值都在 0.14 以下,因此本文算法在客观上具有良好的鲁棒性。通过对比文献[14]算法中相同序列重压缩后提取的水印的 BER 值,对比结果如图 9 所示,发现本文算法具有比文献[14]更低的 BER 值,说明本文算法具有更好的抗重压缩性。

表 4 重压缩后水印的 NC 值和 BER 值

视频	NC 值	BER 值
tempete	0.95	0.09
mobile	0.98	0.03
flower	0.92	0.14
waterfall	0.94	0.11
akiyo	0.97	0.04
news	0.98	0.04

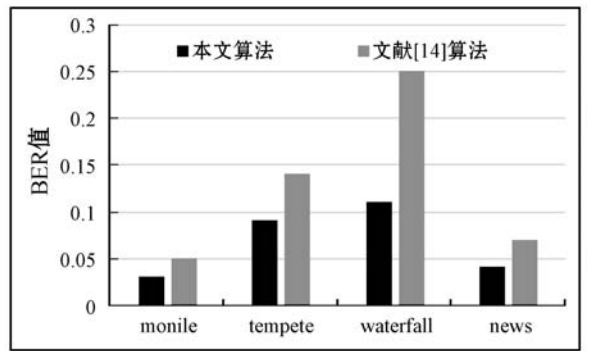


图 9 本文与文献[14]算法的 BER 值对比

为了进一步验证本文算法的鲁棒性,实验对各视频序列进行了不同量化值情况下的水印提取,并测量了其 BER 值。本文将 QP 值由 24 变为 22,表 5 是其中若干视频的水印效果图。观察可得,重量化步长攻击会使水印的辨识度降低,但主观上仍然能够比较清晰地识别出“交大”的字样。图 10 所示为各个视频序列改变量化参数后提取的水印的 BER 值。发现除了 akiyo 的 BER 为 0.19 外,其他的视频均在 0.13 以下。说明改变量化值的情况下水印的鲁棒性依然良好。同时对比文献[14],对比结果如图 11 所示,发现本文算法具有比文献[14]更低的 BER 值。文献[14]是在色度上修改相邻的两个非零系数的大小关系,本文是在色度上修改非零系数的正负数个数的大小关系,因为 DCT 系数的符号要比它的数值大小更加稳定,所以本算法具有更好的鲁棒性。

表 5 不同量化值的水印提取结果

视频	QP(24 ->22) 水印图
tempete	交大
flower	交大
mobile	交大

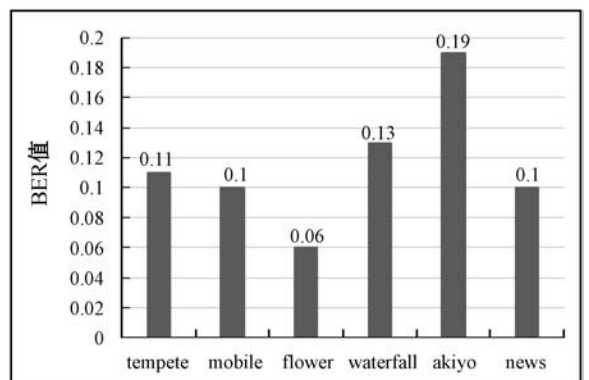


图 10 QP(24 ->22)的 BER 值

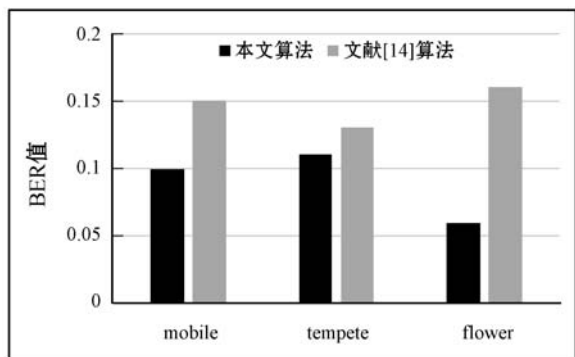


图 11 QP(24 → 22) 的 BER 值

4 结 语

本文提出一种抗重压缩的鲁棒性算法。通过对 H.264/AVC 帧内预测模式的转移以及 CBP 值突变的规律进行分析,发现了在色度分量上嵌入水印要比亮度更加抗重压缩攻击。同时通过大量实验分析发现,纹理复杂度越高其 DCT 系数值越稳定视频质量越不受影响和 DCT 系数的正负号具有一定的稳定性,由此提出一种基于色度上通过改变非零系数较多的非零系数的正负号来进行水印的嵌入。实验结果表明该算法在具有良好的水印不可见性的前提下具有较好的抗重压缩和抗重量化攻击的特性,并且和已有的算法相比,本文算法具有更好的效果。本算法虽然比在亮度上更具有较好的抗重压缩和抗重量化攻击的特性,但无法抵抗其他的恶意的攻击,如恶意篡改、帧删除等,这也是今后需要更进一步深入研究的工作。

参 考 文 献

[1] Nie X S, Liu J, Sun J D. A LLE based video copy detection method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(5): 1030 - 1034.

[2] Cedillo-Hernandez A, Cedillo-Hernandez M, Garcia-Vazquez M, et al. Transcoding resilient video watermarking scheme based on spatio-temporal HVS and DCT[J]. Signal Processing, 2014, 97(7): 40 - 54.

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

[4] 刘立冬,田翔.基于 H.264 压缩域的视频盲水印算法[J].计算机应用,2013,33(7):1866 - 1869,1889.

[5] Zhang J, Ho A T S, Qiu G, et al. Robust video watermarking of H.264/AVC[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs, 2007, 54(2): 205 - 209.

[6] 张维纬,张茹,刘建毅,等.基于纹理特征的 H.264/AVC 顽健视频水印算法[J].通信学报,2012,33(3):82 - 89.

[7] Mansouri A, Aznaveh A M, Torkamani-Azar F, et al. A low complexity video watermarking in H.264 compressed domain [J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2010, 5(4): 649 - 657.

[8] Liu Y, Li Z, Ma X, et al. A robust without intra-frame distortion drift data hiding algorithm based on H.264/AVC[J]. Multimedia Tools & Applications, 2014, 72(1): 613 - 636.

[9] Qiu G, Marziliano P, Ho A T S, et al. A hybrid watermarking scheme for H.264/AVC video [C]//Proceeding of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 865 - 868.

[10] Kong W, Yang B, Wu D, et al. SVD based blind video watermarking algorithm [C]//Proceedings of the first International Conference on Innovative Computing, Information and Control. Washington DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2006.

[11] Wang M, Fan K, Yue B, et al. A content protection scheme for H.264-based video sequence [C]//Proceedings of the Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing-Volume 03. IEEE Computer Society, 2007: 388 - 393.

[12] Peng C Z, Jiang Z J, Cai X B, et al. Implementing chord with declarative networking language [C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Piscataway: IEEE Press, 2012: 586 - 590.

[13] 毕厚杰,王健.新一代视频压缩编码标准——H.264/AVC [M].2 版.北京:人民邮电出版社,2009.

[14] 李淑芝,张翔,邓小鸿,等.一种抗重压缩的 H.264/AVC 视频水印算法[J].计算机应用研究,2016,33(2):521 - 525.

[15] 吴昉,宋培义.数字内容产品的版权保护机制研究[EB/OL].北京:中国科技论文在线 [2014-01-02]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201401-71>.

(上接第 106 页)

[6] Chu M, Matthews J, Love P E D. Integrating Mobile Building Information Modelling and Augmented Reality Systems: An Experimental Study [J]. Automation in Construction, 2018, 85: 305 - 316.

[7] Gheisari M, Irizarry J. Investigating human and technological requirements for successful implementation of a BIM-based mobile augmented reality environment in facility management practices [J]. Facilities, 2016, 34(1/2): 69 - 84.

[8] 彭雷.基于增强现实的地铁机电设备维护研究[D].武汉:华中科技大学,2015.