

# 基于能量差比率的 DEW 视频水印算法

孙文静

(南京审计学院 南京 210029) (南京理工大学 南京 210094)

**摘 要** 提出了一种基于能量差比率的 DEW 视频水印算法,该算法选择在 I 帧视频图像块能量(纹理)分布均匀的区域嵌入水印,每个 I 帧中嵌入的水印相同。实验结果证明,该算法水印鲁棒性好,码率稳定,检测可靠性高。

**关键词** 视频水印,能量差比率,DEW,I 帧

## DEW Video Watermarking Algorithm Based on Energy Difference Ratio

SUN Wen-jing

(Nanjing Audit University, Nanjing 210029, China) (Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** A DEW video watermarking algorithm based on energy difference ratio was proposed. This algorithm embeds watermarks in energy-equally-distributed areas of I-frame video image blocks. Every I-frame has the same embedded-watermarking. Experimental results show that the proposed watermarking algorithm not only has better performance in the aspect of robustness but also has stable rates and high reliability in the test.

**Keywords** Video watermarking, Energy difference ratio, DEW, I-frame

### 1 引言

Langelaar 等<sup>[1]</sup>提出了一种基于有选择的丢弃部分压缩视频 I 帧的高频 DCT 系数来嵌入水印的方法:差分能量水印算法(Differential Energy Watermarking, DEW)。该算法假定原始 I 帧定义为  $S$ , DCT 块定义为  $B$ ,  $S = \{B_k | k = 1, 2, \dots, N\}$ 。每个原始 I 帧的尺寸为  $N_1 \times N_2$ , DCT 块数为  $N = \lceil N_1 \times N_2 / 64 \rceil$ 。需要嵌入的水印序列为  $b_j (j = 0, 1, \dots, l-1)$ ,  $b_j$  逐比特地嵌入到视频 I 帧图像中的每一个含有  $n$  个  $8 \times 8$  DCT 块的区域中,  $n$  的取值在 16~64 之间。

操作中将 I 帧 DCT 系数块中量化的高频分量记作  $S(c)$ , 它是在 Zig-Zag 扫描后按频率重排产生的 DCT 系数中序号大于  $c$  的元素集合, 即:  $S(c) = \{i \in \{0, 63\} | (i > c)\}$ 。

承载区域分为上半部分  $A$ (承载子区域  $A$ )和下半部分  $B$ (承载子区域  $B$ ), 高频能量  $E_A, E_B$  的定义为:

$$E_A(c, n, Q) = \sum_{j=0}^{n/2-1} \sum_{i \in S(c)} \{[DCT(i, j)]_Q\}^2 \quad (1)$$

式中,  $DCT(i, j)$  为  $A$  中  $Z$  型扫描的第  $j$  个 DCT 系数矩阵序号为  $i$  的 DCT 系数值。同样,

$$E_B(c, n, Q) = \sum_{j=0}^{n/2-1} \sum_{i \in S(c)} \{[DCT(i, j)]_Q\}^2 \quad (2)$$

式中,  $[\ ]_Q$  表示在计算  $E_A$  和  $E_B$  之前 DCT 系数经过量化和反量化后的值, 量化因子为  $QP$ 。

$E_A$  和  $E_B$  之间的差值定义为能量差:  $D(c, n) = E_A(c, n) - E_B(c, n)$ 。水印信息位按照能量差分  $D$  编码进行:  $D > 0$  时, 信息比特位为 0;  $D < 0$  时, 信息比特位为 1。因此可以通过修改  $E_A$  和  $E_B$  的值来控制  $D$ 。如果要嵌入的信息比特位为 0, 则将承载子区域  $B$  中 DCT 块的分割序号  $c$  后面的 DCT 系数

置 0, 即  $D = E_A - E_B = E_A - 0 = E_A$ 。同理, 如果要嵌入的信息比特位为 1, 则将承载子区域  $A$  中 DCT 块中的分割序号  $c$  后面的 DCT 系数置 0, 即  $D = E_A - E_B = 0 - E_B = -E_B$ 。

水印提取首先将嵌入水印的视频画面按相同的密钥反置乱, 取出每个承载区域进行差分能量计算, 得到  $D'$ 。如果  $D' > 0$ , 则表示水印信息位为 0; 如果  $D' < 0$ , 则表示水印信息位为 1。按此方法直到水印信息位完全提取。

传统的 DEW 算法为了保证水印的鲁棒性, 一般会选择 2 到 64 个 DCT 块作为一个承载区域, 水印容量受到约束<sup>[2-4]</sup>。为了提高水印容量, Setyawan 等人提出了扩展 DEW 算法(XDEW)<sup>[2,3]</sup>, 即水印不仅嵌入到视频的 I 帧, 同时也嵌入到 P 帧。但是这样做不可避免会带来误差漂移问题, 而且 P 帧的能量相对 I 帧的能量小很多, 能在 P 帧嵌入水印的地方相比 I 帧少很多。

文献[5]利用 MPEG-2 视频 I 帧中 DCT 低频系数能量之间的关系作为内容特征构造水印信息位, 利用差分能量算法嵌入水印信息。在视频编解码过程中, 对视频的合法操作大多是转换码率的重新编码, 在这个过程中, 中低频系数比较稳定。对于视频的内容篡改(帧的删除、添加等), 这些攻击将会改变 DCT 的中低频系数。所以, 利用视频 DCT 系数中的中低频系数作为内容特征, 保证了对合法操作鲁棒, 而且可以检测出视频是否受到攻击。但是算法将视频帧中的 DCT 块置乱、重新排列后嵌入水印, 对篡改的定位误差很大。文献[47]提出的自适应 DEW 算法可自适应地选择能量阈值, 但是当阈值设定得较大以保证鲁棒性时, 对于视频中较平滑的区域, DCT 系数能量较小, 这样就会将整个 DCT 的系数置零, 出现“黑色区域”。

在 DEW 算法的水印嵌入和提取过程中,分别采用固定阈值  $D$  和  $D'$ ,而不是根据视频图像的内容自适应地选择,若承载子区域  $A$  和  $B$  属于文理比较复杂的区域,则临界点(即截断索引)取值必须较大,否则要去掉较多的 DCT 系数,从而影响视频图像的质量。但若承载子区域  $A$  包含许多纹理,而承载子区域  $B$  不包含任何细节,这时临界点的选择就会有问题<sup>[6]</sup>。为了嵌入水印信息 1,必须产生一个负的能量差  $D$ ,此时临界点的取值必须很低才能使  $E_A < E_B$ ,这样承载子区域  $B$  中几乎所有的交流系数(AC)都要去除,此时视频图像将会产生很大的失真。文献<sup>[7]</sup>提出了能量差比率:

$$R_D = \frac{D}{|E_A|_{c=0} + |E_B|_{c=0}} \quad (3)$$

用能量差比率  $R_D$  代替能量差  $D$  来嵌入和提取水印有两个优点:一是避免了由于区域的能量不够而造成的水印信号无法嵌入所引起的位错率,另一优点是在检测过程中,能够降低由于帧失真而引起的位错率。用能量差比率  $R_D$  可以使失真图像检测的截断索引尽可能地接近于所嵌入的索引。

## 2 水印嵌入与提取

### 2.1 嵌入位置的自适应选择

针对水印信息量少、水印提取速度要求高的场合,本文提出在视频序列的每个 I 帧中嵌入相同水印的构造模式。

H. 264 视频序列的每 I 帧图像划分为  $16 \times 16$  的宏块,每个宏块(Macroblock)包含 4 个亮度块、2 个色度块(视频采样比率 4:2:0)共 6 个块,每个块均由 64 个 DCT 系数组成,将 DCT 系数划分为两部分,低频部分用来形成内容认证特征码,高频部分用作水印嵌入区域。

根据人眼视觉特性,本文选择在视频图像块能量(纹理)分布均匀的区域嵌入水印,图像能量分布公式如下:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & |\varphi_i| < \alpha \max(|\varphi_i|) \\ 0 & |\varphi_i| \geq \alpha \max(|\varphi_i|) \end{cases}, \varphi_{i=0} = 0, i \in [0, 63] \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{A,B} \left( \sum_{i=0}^{63} \alpha_i / 64 \right) = \begin{cases} > \delta, \text{能量均匀} \\ < \delta, \text{能量不均匀} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\varphi_i$  表示 DCT 系数,  $i$  表示 DCT 系数中 Zig-Zag 扫描的第  $i$  个系数序号。  $\delta$  为图像能量特征阈值,  $\alpha$  为尺度因子,根据实验获得  $\delta=0.2, \alpha=0.12, \beta$  为图像块在  $(0,1)$  之间的能量分布,  $\beta$  接近于 0,表示能量分布不均,不适合嵌入水印;  $\beta$  接近 1 表示能量分布均匀,适合嵌入水印。因为直流分量幅值远远大于交流分量幅值,为了不影响判别结果,在式(4)中设定  $\varphi_{i=0}=0$ 。

### 2.2 水印嵌入

水印信号的嵌入过程分以下几步:

(1) 将视频 I 帧中  $8 \times 8$  DCT 块的位置按密钥进行随机置乱;

(2) 选择全局参数  $(R_D, n), n=2 \sim 64$ ;

(3) 对于水印序列的每一位  $b_j$ , 循环做:

顺序选择  $n$  块组成水印嵌入区域(lc-region),前  $n/2$  块组成子区域  $A$ (A-subregion),后  $n/2$  块组成子区域  $B$ (B-subregion);

对每一区域计算嵌入的实际截断索引  $c$ 。

IF  $(b_j = 1)$  THEN

$$c(c_{\min}, n, T) = \max\{c_{\min}, \max\{g \in \{0, 63\} | E_B(g, n) > T\}\}$$

ELSE

$$c(c_{\min}, n, T) = \max\{c_{\min}, \max\{g \in \{0, 63\} | E_A(g, n) > T\}\}$$

式中,  $T = R_D \times (|E_A|_{c=0} + |E_B|_{c=0})$ 。

如果  $(b_j = 0)$ ,则设置子区域  $B$  中子集  $S(c)$  的所有系数为零;如果  $(b_j = 1)$ ,则设置子区域  $A$  中子集  $S(c)$  的所有系数为零。

(4) 将所有的  $8 \times 8$  DCT 亮度块复原原始位置。

## 3 水印检测

由于算法只是在 I 帧中嵌入相同的水印,因此提取时只需找到任意一组 GOP 帧图像中的 I 帧即可。

水印信号的提取过程分以下几步:

(1) 根据密钥将视频 I 帧所有的  $8 \times 8$  DCT 亮度块随机置乱;

(2) 对于每一个区域,循环做:

顺序选择  $n$  块组成水印嵌入区域(lc-region),前  $n/2$  块组成子区域  $A$ (A-subregion),后  $n/2$  块组成子区域  $B$ (B-subregion);

对每个区域计算提取的实际截断索引  $c_c$ :

$$c_c(n, D') = \max\{\max\{g \in \{1, 63\} | E_{A_c}(g, n) > D'\}, \max\{g \in \{1, 63\} | E_{B_c}(g, n) > D'\}\}$$

式中,  $D' = R'_D \times (|E_{A_c}|_{c=0} + |E_{B_c}|_{c=0})$ ;

水印信息为  $b_j'(j=0, 1, \dots, l-1)$ 。

为此先计算 A-subregion 中每块的下标  $c$  所有可能值的  $E_{A_c}(c)$ ,使得  $E_A < D'$ ( $D'$  可以为嵌入时使用的  $T$ )。在所有满足上述条件的  $c$  中选择一个最小下标作为 lc-subregionA 的截断下标  $c_A$ ,用同样的方法计算 B-subregion 的截断下标  $c_B$ 。  $c = \max\{c_A, c_B\}$ 。如果  $c_A < c_B$ ,则令  $b_j'$  为 1;如果  $c_A > c_B$ ,则令  $b_j'$  为 0。如果  $c_A = c_B$ ,则比较  $E_{A_c}(c_A), E_{B_c}(c_B)$  的大小,如果  $E_{A_c}(c_A) < E_{B_c}(c_B)$ ,则  $b_j'$  为 1,否则  $b_j'$  为 0。

检测的具体步骤为(设阈值  $T = D'$ ):

(1) 如果  $E_A < T$  并且  $E_B < T$ ,则无水印信息,不进行检测;

(2) 如果  $E_A \geq T$  并且  $E_B = 0$ ,若  $b_j' = 1$ ,则认证成功;若  $b_j' = 0$ ,则检测失败;

(3) 如果  $E_A = 0$  并且  $E_B \geq T$ ,若  $b_j' = 0$ ,则认证成功;若  $b_j' = 1$ ,则检测失败;

(4) 如果  $E_A \geq T$  并且  $E_B \geq T$ ,则检测失败。

由提取过程可以看出:水印提取并不需要原始视频,为盲提取过程;水印提取并不需要原始码流进行完全解码,这样就可在一定程度上保证水印提取的实时性。

## 4 实验仿真及结果分析

实验环境,CPU: Intel Core2 Duo CPU 2.66GHz;内存: 1G;操作系统,Windows XP;编程工具: Visual C++ 6.0。

实验所用的视频序列为 CIF 格式( $352 \times 288$ )的 foreman 序列,帧图片组 GOP 设定为 IPPP 结构,帧频为 30Hz,帧数为 100 帧,I 帧和 P 帧的量化步长  $QP$  初始均为 28。能量差比率  $R_D = 0.002$ 。每帧共有  $1584(352 \times 288/64)$  个  $8 \times 8$  的 DCT

块。选择一幅 22×64 的二值图像作为水印信号。

图 1 为测试序列 foreman 在量化参数  $QP=28, 36$  时嵌入水印后所截得的视频帧,其中,图(a)、图(c)为嵌入水印前,图(b)、图(d)为嵌入水印后。由此可见,嵌入前、后图像视觉差异几乎可以忽略。

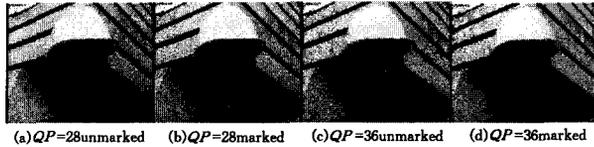


图 1 嵌入水印前后 I 帧图像对比( $R_D=0.002$ )

图 2 给出了水印前后对视频序列的质量影响情况,图的横坐标为帧号,纵坐标为峰值信噪比,表示水印嵌入后图像的失真度。可以看到  $PSNR \geq 30dB$ , 水印引起的视频序列质量下降最多为 0.3,表明本文提出的水印算法可以保证视频的质量。

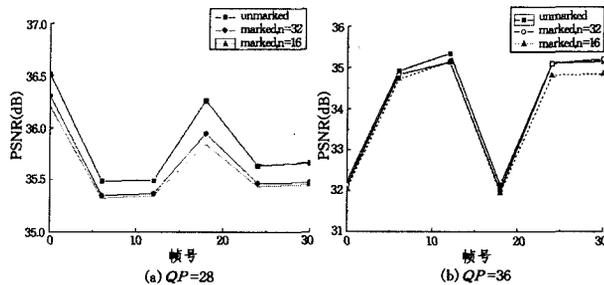


图 2  $QP=28, 36$  时嵌入水印前后视频质量( $R_D=0.002$ )

表 1 给出了嵌入水印前后不同图像码率的变化情况。可以看到水印前后码率的变化并不大,相对变化率((水印后视频码率-水印前视频码率)/水印前视频码率)在 0.4%~0.3%之间,几乎可以忽略,满足码率稳定的要求。

表 1 水印前后平均码率变化(kbps)

QP	水印前视频码率	水印后视频码率	码率相对变化率(%)
28	850.08	853.22	0.37
36	753.04	755.54	0.33

为了客观评价所提取的水印序列,采用归一化相关系数来衡量原始水印  $b$  和提取的水印  $b'$  的相似度,定义为:

$$\rho(b, b') = \frac{\sum_{j=0}^{L-1} b_j b'_j}{\sqrt{\sum_{j=0}^{L-1} b_j^2} \sqrt{\sum_{j=0}^{L-1} b'^2_j}} \quad (6)$$

式中,  $\rho$  的取值在 0~1 之间。  $\rho=1$  代表嵌入的水印信息全部

被正确检测出来。  $\rho$  的值越大,受攻击后  $\rho$  的变化越小,代表水印的鲁棒性越强。

表 2 为量化参数  $QP=28$  和 36 的 foreman 水印序列重编码提取水印相似度。由表 2 可见,经重量化编码后,从 I 帧提取的水印相似度很大,  $\rho(b, b')=1$  的概率  $\geq 87.5\%$ ,即说明水印对重量化攻击具有良好的鲁棒性。

表 2 foreman 水印序列重编码提取水印相似度( $\rho$ )

QP	I 帧帧号							
	0	4	8	12	16	20	24	28
28	1	1	1	1	1	1	1	1
36	1	1	0.98	1	1	1	0.96	0.99

**结束语** 本文提出了一种基于能量差比率的 DEW 视频水印算法,该算法选择在 I 帧视频图像块能量(纹理)分布均匀的区域嵌入水印,每个 I 帧中嵌入的水印相同。实验结果证明,该算法水印鲁棒性好,码率稳定,具有较高的保真度,而且,水印提取并不需要原始视频,为盲提取过程。

## 参考文献

- [1] Langelaar G C, Lagendijk R L. Optimal differential energy watermarking of DCT encoded images and video [J]. IEEE Transactions on Image processing, 2001, 10(1): 148-158
- [2] Setyawan I, Lagendijk R L. Extended differential energy watermarking (XDEW) algorithm for low bitrate video watermarking [C] // Proceedings of the Seventh Annual Conference of the Advanced School for Computing and Imaging. 2001
- [3] Setyawan I, Lagendijk R L. Low bitrate video watermarking using temporally extended differential energy watermarking (DEW) algorithm [C] // Proceedings of SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Contents III. 2001, 4314: 73284
- [4] 周伟. 鲁棒与半脆弱的数字水印研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006
- [5] Da Y, Thiemert S, Steinebach M. Feature-based watermarking scheme for MPEG-I/II video authentication [C] // SPIE 2004. 2004: 5306
- [6] Jordan, Kutter M, Ebrahimi T. Proposal of watermarking technique for hiding/retrieving data in compressed and decompressed video [C] // ISO/IEC JTC1/SC29/WG11. 1997
- [7] 凌贺飞, 卢正鼎, 邹复好. 基于 MPEG 的实时视频水印技术 [J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(12): 2181-2185
- [8] 莫佳, 谭素琴. 一种基于矩阵分解的脆弱水印算法 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(5): 107-110, 120

(上接第 189 页)

- [3] 林闯, 刘婷, 曲扬. 一种不确定时段的扩展时段时序逻辑: 时间 Petri 网表示和线性推理 [J]. 计算机学报, 2001, 24(12): 1299-1309
- [4] 刘婷, 林闯, 刘卫东. 扩展时段时序逻辑的推理机制 [J]. 计算机学报, 2002, 25(6): 637-644
- [5] 马军霞. 一类时间不确定性问题的处理 [D]. 郑州: 郑州大学, 2007
- [6] 杜彦华. 基于 EFTPN 不确定时间知识的分析处理及其在铁路中的应用 [D]. 北京: 铁道科学研究院, 2006
- [7] 董玉梅, 张力臣. 模糊时间 Petri 网及扩展的模糊时间 Petri 网 [J]. 计算机科学, 2005, 32(11): 241-246
- [8] Schockaert S, De Cock M, Kerre E E. Fuzzifying Allen's Tem-

poral Interval Relations [J]. Transactions on fuzzy systems, 2008, 16(2): 517-533

- [9] 莫孙冶, 林嘉宜, 彭宏. 基于模糊集的不确定时间的表示及时态关系 [J]. 计算机工程, 2005, 31(18): 197-199
- [10] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96
- [11] 雷英杰, 王宝树, 路艳丽. 基于直觉模糊逻辑的近似推理方法 [J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 305-310
- [12] 邢清华, 刘付显. 直觉模糊集隶属度与非隶属度函数的确定方法 [J]. 控制与决策, 2009, 24(3): 393-397
- [13] Vlachos I K, Sergiadis G D. Intuitionistic fuzzy information-Applications to pattern recognition [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28: 197-206