

视频数据隐藏的差分能量调制新算法

马丽红¹⁾ 谢中华¹⁾ 刘小燕²⁾

¹⁾ (广东省无线网络与终端重点实验室, 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640)

²⁾ (珠海全盛微电子有限公司, 珠海 519000)

摘要 提出了基于差分能量调制 (DEM) 的盲视频水印算法。针对差分能量水印 (DEW) 算法可能造成视觉失真严重、水印容量小和鲁棒性较差的不足, 提出用差分能量信号的调制值来承载隐藏信息位的新方法。通过对量化块中水平子区域与垂直子区域之间的能量差值实施量化索引调制 (QM), 差分能量值能被微调至最近邻的对应水印位量化区域; 同时由于调制前后的能量误差被分配到子区域中幅值较大的 10 个系数上, 并对调制前后的码字替换进行了相似度选择, 嵌入信号因而能很好地保持原信号的视觉质量和码序列长度。实验结果表明, DEM 算法在水印的视觉失真与鲁棒性能、水印容量以及码率保持性能方面都好于 DEW 算法; 另一方面, DEM 算法是在一个区域中嵌入水印, 所以它的鲁棒性能又比只在某个系数上嵌入水印的 QM 算法好。

关键词 差分能量调制 (DEM) 误差隐藏 码率保持 量化索引调制 (QM) 差分能量水印 (DEW)

中图分类号: TN919.8 TP309 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)01-0037-08

Robust Video Concealment Based on Differential Energy Modulation

MA Lihong¹⁾, XIE Zhong-hua¹⁾, LIU Xiao-yan²⁾

¹⁾ (Guangdong Key Laboratory of Wireless Network and Terminal, School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

²⁾ (Allwinner Microelectronics, Zhuhai 519000)

Abstract To deal with the drawbacks of differential energy watermarking (DEW) algorithm such as its poor transparency, low capacity and weak robustness, we propose a blind video watermarking scheme related to differential energy modulation (DEM). It chooses the embedded regions of a quantized block, and labels a hiding bit by dithering differential energy between the horizontal and the vertical sub-regions of that block, with an adaptive quantized index modulation (QM) method. To assure transparency and robustness, the embedded error is spread over 10 biggest coefficients of each host block. The perceptual quality and the length of an original sequence could also be kept unchanged owing to its similitude codeword replacement. Experiments demonstrate that DEM is superior to DEW in the performance of transparency, capacity, robustness and rate maintenance. At the same time it achieves a better robustness than QM, for QM carries one bit in one coefficient, whereas DEM embeds one bit in one region.

Keywords differential energy modulation (DEM), error resilience, rate maintenance, quantized index modulation (QM), differential energy watermarking (DEW)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60972133); 广东省自然科学基金团队项目 (9351064101000003); 广东省能源技术重点实验室基金项目 (2008A060301002)

收稿日期: 2008-12-05 改回日期: 2009-02-04

第一作者简介: 马丽红 (1965—), 女, 副教授, 1999 年于华南理工大学无线电所获通信与信息系统专业, 博士学位。主要研究方向为图像/视频信号处理、容错编码。E-mail: eellma@scut.edu.cn

0 引言

当前众多的数字视频产品对版权保护的需求越来越迫切,作为有效的版权保护技术,长期集中在图像方向的数字水印研究的重心逐渐转移到了视频领域。与静止图像技术相比,视频水印技术除了需要符合水印的感知透明性和鲁棒性等要求外,还需要满足:1)码率均衡 嵌入水印前后的视频序列码率应尽量保持,以保持数字视频流的稳定传输和流畅播放;2)随机检测 目的是可以在视频的任何位置、在短时间内检测出水印信息;3)计算复杂度低 低复杂度的水印嵌入和提取,可确保水印的实时性和可操作性;4)与视频编码标准相结合,以兼容现有的视频处理设备;5)能够抵抗针对视频信号特点的新的攻击形式,如:帧速率和显示分辨率的改变以及帧删除、帧插入和帧重组等,而且视频序列的帧间有相关性,嵌入的信息容易遭受共谋攻击。这些特点给视频水印研究带来了新的挑战。

另一方面,为了满足实时性需要,视频水印算法最好将水印信息直接嵌入到压缩视频流中,以避免对压缩信号的完全解码和再编码过程,并降低算法的复杂度。Langelaar等人提出的差分能量水印算法(DEW)^[1-2]就是一种比较典型的压缩域水印算法。DEW算法通过移除I帧的部分高频系数,强制在水印嵌入区域的两个子区域之间制造出一个能量差值,然后以能量差值的正负来标志水印位‘1’或‘0’。不过DEW算法虽然计算复杂度较低,而且嵌入的信息也具有较强的鲁棒性,但是该算法需要仔细地选择水印嵌入区域所包含的 8×8 DCT(离散余弦变换)分块数 n 和截断索引值 c ,要考虑:1) n 越大,水印的鲁棒性越好,但容量却越小,当然水印嵌入的失真也越小,所以 n 影响着水印的容量、鲁棒性和透明性;2)截断索引值 c 决定着每一分块中被移除的DCT系数的个数,若 c 过大,被移除的DCT系数数目较少,嵌入水印时所用的能量差值就小,被噪声干扰或信道失真掩盖的几率就大,因而水印的鲁棒性就会受到影响;若 c 过小,较多的高频系数将被移除,水印嵌入的视觉失真比较明显。Hartung等人提出了DCT域基于扩频思想的视频水印算法(H&G算法)^[3],H&G算法针对的是水印嵌入中的码率保持特性,它先将水印信号进行序列扩展和伪随机序列调制,序列自适应调整后形成与视频图像

尺寸相同的水印图像;对该水印图像进行 8×8 DCT变换后与视频序列对应位置上的DCT系数值进行简单的线性叠加可完成水印信息的嵌入。为了不增加视频序列的码率,H&G算法只把DCT变换后的水印系数添加到嵌入水印后编码比特数没有明显增加的视频序列的非零DCT系数中,同时引入漂移补偿来克服水印嵌入引起的预测误差累积问题,提高了重建质量和解码系统的稳定性,但漂移补偿增加了算法中数据记录的复杂度和解码的困难。此外,量化索引调制算法(QM)是近年出现的一种新颖思想,它根据水印信息,把原始载体数据量化到不同的水印值索引区间,其本质是微调载体值至指定的量化电平,从而在获得具有较高鲁棒性的嵌入水印的同时,具有较小的嵌入失真。但QM的致命弱点是,当对嵌入信号作幅值处理时,如果缩放量超过量化器的容差范围时,量化步长将失效;同时它也不考虑载体信号的内容特性,没有充分利用人眼视觉特性(HVS)视觉特性来改善透明性。Lagendijk等人针对QM算法对图像幅值缩放敏感的特点,提出在解码端对受幅值缩放攻击的图像概率密度函数建模,再通过极大似然法来估计缩放因子^[4],但它在检测时需要原始载体并假设信道噪声已知,这限制了它的应用。Perez-Gonzalez等人提出合理抖动量化算法(RDM)^[5],RDM主要是在编解码端同时使用对增益不变的自适应量化步长来实现。Zhu等人借鉴了RDM思想,通过提取图像内容来构造增益不变的量化矢量^[6],但这类方法也不考虑HVS感知特性,所以透明性会受到不同程度的破坏。而L等人修改Watson视觉感知模型中的亮度掩蔽公式,使亮度掩蔽门限随图像幅度缩放自行调整,具有一定的自适应性^[7],不过它的自适应量化步长在嵌入水印前后有所不同,当量化步长与嵌入水印系数不能匹配时,会造成解码错误。

针对DEW和H&G算法的不足,结合QM算法优点,并改善其系数级嵌入鲁棒性不足的缺点,提出了水印差分能量调制(DEM)算法。DEM的主要思想是:以嵌入块的差分能量序列作为载波信号,以水印位为调制信息,采用抖动调制方法,将量化块中水平子区域与竖直子区域之间的能量差值调制为与嵌入水印位相匹配的信号值;同时为了保证水印的鲁棒性和视频序列的视觉质量,调制前后的能量误差被分配到子区域中幅值较大的系数上。因此DEM算法有如下优点:1)克服了DEW方法因直接删除高频

系数而导致视觉失真较大的缺点,并能提高 DEW 算法的水印容量。2) DEM 算法只是轻微修改一个区域的 DCT 系数,容易获得好的码率保持特性,简化了码率保持策略^[3]。3) DEM 算法的区域嵌入比 QM 算法的系数嵌入有更好的鲁棒性。

1 DEW 算法和 QM 算法

1.1 DEW 差分能量水印算法

图 1 是 DEW 算法示意图^[1],其中每个水印的嵌入区域包含 16 个 8×8 DCT 块,即分块数 $n = 16$ 。

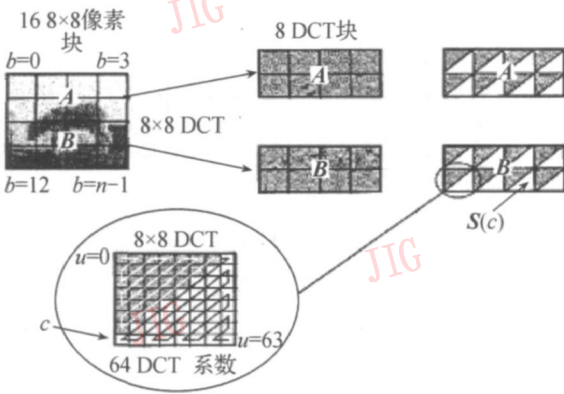


图 1 在 16 个块中嵌入一位水印信息的 DEW 方案

Fig 1 1-bit embedding in a 16-blocks lc -region in DEW

DEW 算法首先将水印嵌入区域分成 A 和 B 两个子区域,分别对应图 1 上方及下方的 8 个正方形组成的区域。定义 A 和 B 中特定的高频子集为 $S(c)$ (图 1 中白三角所示区域),表示频率 u 大于截断索引值 $c(u > c)$ 的 DCT 系数集合, $S(c)$ 可表示为

$$S(c) = \{u \in \{0, \dots, 63\} \mid (u > c)\} \quad (1)$$

然后将区域 A 和区域 B 中包含在 $S(c)$ 集合内的系数能量值分别定义为 E_A 和 E_B :

$$E_A = \sum_{b=0}^{n/2-1} \sum_{u \in S(c)} (DCT \text{ coeff}_{(u,b)})^2 \quad (2)$$

$$E_B = \sum_{b=n/2}^{n-1} \sum_{u \in S(c)} (DCT \text{ coeff}_{(u,b)})^2 \quad (3)$$

式中 b 代表子区域 A 和 B 中的 DCT 块。子区域 A 和子区域 B 之间的能量差值 D 定义为

$$D = E_A - E_B \quad (4)$$

若嵌入水印比特为 '0',则子区域 B 中频率大于截断索引值 c 的系数全部置 0 使

$$D = E_A - E_B = +E_A > 0 \quad (5)$$

若嵌入水印比特为 '1',则将子区域 A 中频率大于截断索引值 c 的系数全部置 0 使

$$D = E_A - E_B = -E_B < 0 \quad (6)$$

根据提取时的强制能量差 $T (T < D)$,采用与嵌入相似的方法可计算提取的截断索引值 c' ,然后计算 $E_A(c')$ 与 $E_B(c')$ 的差值:

$$T = E_A(c') - E_B(c') \quad (7)$$

若 $T \geq 0$ 则嵌入的水印比特译码为 '0';反之若 $T < 0$ 则嵌入的水印比特译码为 '1'。

1.2 QM 量化索引调制算法

抖动调制 (DM)^[8-9] 是 QM 算法的一种典型实现。为了标记水印位 '0' 和 '1',DM 算法使用两种标量量化器来修正宿主信号值,其嵌入函数为

$$S(X, W) = Q_w(X + D(W)) - D(W) \quad (8)$$

式中, X 和 W 分别是宿主信号和水印信息, $D(W)$ 是 W 的抖动矢量, S 是量化器的输出值。 Q_w 为所用量化器的总称,当水印信息位 W 为 0 时, Q_w 为量化器 $Q(0)$; 当 $W = 1$ 时, Q_w 对应量化器 $Q(1)$ 。图 2 为均匀量化器的抖动调制示意图。符号 \diamond 和 \circ 标记的值分别属于量化器 $Q(0)$ 和 $Q(1)$,任两个相邻 \diamond 值或相邻 \circ 值间的距离等于量化步长。DM 调制方法为:若 $W = 0$ 则 $Q(0)$ 将宿主信号 X 量化为最邻近 \diamond 值;若 $W = 1$,则 $Q(1)$ 将 X 量化为最相近 \circ 值。调制信号 S 经信道传输到达接收端后,水印信息可以从有噪声水印信号 S' 中提取:

$$\hat{W} = \arg \min \{S', \Delta W\} \quad W \in \{0, 1\} \quad (9)$$

式中, ΔW 是量化器 $Q(0)$ 或 $Q(1)$ 的输出值。如果 S' 是 $Q(0)$ 的输出值,那么嵌入的水印比特译码为 '0';若 S' 从 $Q(1)$ 输出,则提取的比特为 '1'。

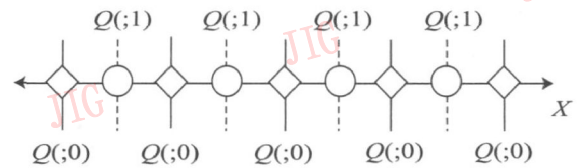


图 2 抖动调制方法示意图

Fig 2 Quantizers for dither modulation embedding

2 DEM 差分能量调制算法

提出将差分能量序列作为抖动调制的宿主信号来嵌入水印的方法。其中差分能量由量化块中邻近 DC(直流)系数的 10 个 AC(交流)系数集体投票产生,因而稳定性比较好,这种嵌入位置的选择,既避免了块效应的产生,又使水印具有较好的鲁棒性。对差分能量进行抖动调制后,嵌入误差将扩散到嵌入区域幅值较大的系数上,即水印嵌入区域的系数只是被轻微修改,从而使嵌入水印很好地保持原视

频信号的视觉质量和码序列长度。

2.1 嵌入位置选择和差分能量定义

DC 直流系数代表了 DCT 块的平均亮度, 因此改变 DC 系数很可能会引起该块的整体亮度改变, 进而导致块效应的产生, 而且其嵌入失真还会因为块间 DC 系数的差分预测编码机制而扩散到后续 DCT 块及后面的视频帧中, 造成嵌入失真在视频序列上的错误传播。对于某些视频序列, 将水印信息嵌入到 DC 系数上是可以在块效应不明显的条件下获得较大的容量的, 但这种情况并不是对所有的序列都成立, 其普遍性仍待证实。因此, 我们放弃了 DC 系数而选择了邻近 DC 系数的 10 个 AC 系数来嵌入水印信息, 在这些系数中, 5 个为水平方向的系数, 另 5 个为垂直方向的系数, 并把它们分别标记为 VF_j 和 HF_j ($j=1, 2, 3, 4, 5$), 具体位置如图 3 所示。由于这 10 个数值处于量化块中的中低频位置, 因而具有非 0 值的概率比较大, 可嵌入水印的强度也较大, 且水印的鲁棒性也较强^[10]。

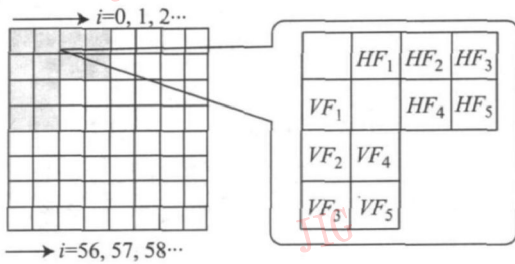


图 3 量化块中的 VF_j 和 HF_j

Fig 3 VF_j and HF_j positions in a block

为了计算简便, 定义水平因子 (VF) 和竖直因子 (HF) 来分别代表 VF_j 和 HF_j 区域的能量。

$$VF = \sum_{j=1}^5 |VF_j| \quad (10)$$

$$HF = \sum_{j=1}^5 |HF_j| \quad (11)$$

式中, VF 和 HF 是系数 VF_j 和 HF_j ($j=1, 2, 3, 4, 5$) 的幅值和, 分别代表了垂直方向和水平方向的低频能量分布, 因而可以用它们的差值 DF 来表示量化块中垂直方向和水平方向的能量差值。

$$DF = VF - HF \quad (12)$$

从上式可见, 能量差值 DF 的产生是由量化块中水平方向和垂直方向的低频系数集体投票产生的, 如果对差分能量实施 QM 调制来嵌入信息, 可以使水印在嵌入容量、最小失真和鲁棒性方面达到较好的折中。

2.2 差分能量的抖动调制方案

2.1 节表明了 DEM 算法的差分能量是由量化块中确定位置上的系数值计算得到的, 不需要像 DEW 算法那样确定合适的截断索引值, 也不需要确定水印嵌入区域所含的 DCT 块数, 这在一定程度上降低了算法的计算复杂度。

通过将 DF 抖动调制为 DF' 来实现水印的嵌入, 抖动调制规则如下:

1) 若嵌入的水印比特 $W=1$, 则

$$DF' = \begin{cases} \lfloor DF/\Delta \rfloor \times \Delta & \text{当 } \lfloor DF/\Delta \rfloor \text{ 是偶数} \\ (\lfloor DF/\Delta \rfloor + 1) \times \Delta & \text{当 } \lfloor DF/\Delta \rfloor \text{ 是奇数} \end{cases} \quad (13)$$

2) 若嵌入的水印比特 $W=0$, 则

$$DF' = \begin{cases} (\lfloor DF/\Delta \rfloor + 1) \times \Delta & \text{当 } \lfloor DF/\Delta \rfloor \text{ 是偶数} \\ \lfloor DF/\Delta \rfloor \times \Delta & \text{当 } \lfloor DF/\Delta \rfloor \text{ 是奇数} \end{cases} \quad (14)$$

式中, Δ 为量化步长。抖动调制的最大量化误差等于量化步长, 即 DF 和 DF' 满足:

$$|DF' - DF| \leq \Delta \quad (15)$$

得到 DF' 后, 通过修改 VF_j 或 HF_j 中的某些系数值, 使水平子区域与垂直子区域之间的能量差值调整至与 DF' 相一致。具体修改方法如下:

1) 计算 DF' 与 DF 之间的差值。

$$diff = DF' - DF \quad (16)$$

2) 将差值 $diff$ 分为 v_1 和 v_2 两部分。

$$v_1 = \text{int}(|diff|/2) + 1 \quad (17)$$

$$v_2 = |diff| - v_1 \quad (18)$$

3) 修改嵌水印区域的某些非零系数值。

为了保证视频质量和水印的鲁棒性, 只把嵌入误差分散到 $|VF_j|$ 或 $|HF_j|$ 中的最大值 (VF_{\max} 或 HF_{\max}) 和次最大值 (VF_{smax} 或 HF_{smax}) 上, 其他系数值保持不变。根据 $diff$ 符号的不同而采用不同的修改策略:

1) 当 $diff > 0$ 时, 如果 $|HF_{\text{smax}}| \geq v_2$ 或者 $|HF_{\max}| \geq |diff|$, 则减小 HF , 否则就增加 VF , 最终将能量差值 DF 增加到 DF' 。

2) 当 $diff < 0$ 时, 如果 $|VF_{\text{smax}}| \geq v_2$ 或者 $|VF_{\max}| \geq |diff|$, 则减小 VF , 否则就增加 HF , 最终将能量差值 DF 减小到 DF' 。

3) 当 $diff = 0$ 时, 不需要改变任何系数。

图 4 是 $diff > 0$ 时的算法流程图, DEM 算法只在量化步长范围内修改差分能量, 并把嵌入误差分散到子区域中幅值较大的系数上, 因此不仅保证了视

频质量,增加了水印的鲁棒性,而且还易于满足码率保持的要求。

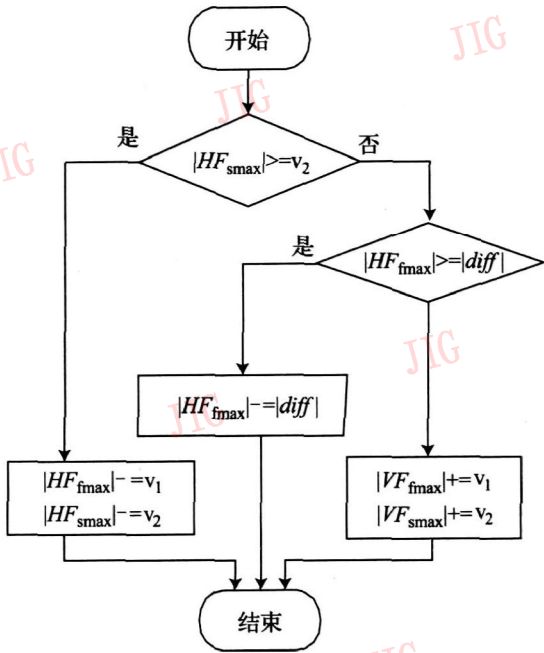


图 4 $diff > 0$ 时的算法流程图

Fig 4 Dithering of differential energy when $diff > 0$

2.3 水印方案

2.3.1 DEM 水印嵌入

DEM 算法将长为 L 的二值序列 $W_j (j = 0, 1, 2, \dots, L-1)$ 嵌入到 I 帧的亮度量化块中, 每个块中嵌入 1 比特水印, 嵌入过程如图 5。

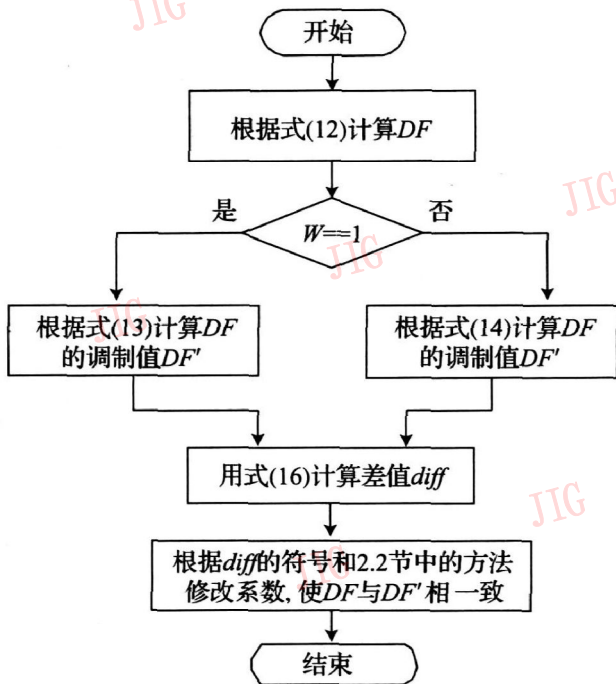


图 5 DEM 算法的水印嵌入过程

Fig 5 The embedding flow chart of DEM

2.3.2 水印提取

DEM 可以实现盲提取, 首先用式 (12) 计算嵌水印块的差分能量 DF , 然后取整数商 $m = [DF / \Delta]$ 。若 m 为偶数, 嵌入的水印比特译码为 '1', 反之译码为 '0'。提取过程如图 6 所示。

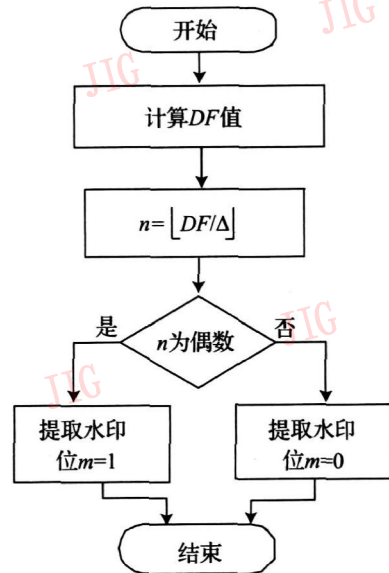


图 6 DEM 算法的水印提取过程

Fig 6 Watermark extracting in DEM algorithm

3 实验结果

实验主要测试 DEM 算法在视觉失真、水印容量、鲁棒性和码率保持 4 个方面的性能。测试序列 Fomn 包含 100 帧 (其中 9 个 I 帧), 每帧大小为 176×144 (440 个亮度块)。DEM 算法中每个 I 帧最多可嵌入 440 个水印比特 (1 比特/亮度块), 量化步长 Δ 分别取为 3、4 和 5。

3.1 与 DEW 算法比较

DEW 算法中每个水印比特被嵌入到 n 个 8×8 的 DCT 块中, 实验中 n 取为 16, 嵌入的强制能量差为 $D = 5000$, 最小截断索引设为 $C_{min} = 3$, 检测的强制能量差为 $T = 50$ 。实验中分别采用 DEM 和 DEW 算法在视频序列中嵌入长度为 225 的水印序列, 即每个 I 帧中嵌入 25 个比特。

3.1.1 透明性

视觉失真影响是通过计算分别用 DEM 和 DEW 两种方法嵌入水印后的视频流的 PSNR 值来评价的。如图 7 所示, DEM 算法的 PSNR 曲线在大部分情况下高于 DEW 算法的 PSNR 曲线。嵌入水印后, DEM 算法中 9 个 I 帧的 PSNR 值平均下降了小于 1 dB

($\Delta=3$)、小于 2 dB ($\Delta=5$), 而且量化步长越大, *PSNR* 值下降越大, 实际上对量化块而言 $\Delta=5$ 已经是比较大的量化步长。DEM 算法将需要改变的量分配到每个嵌入区域 10 个系数值上, $\Delta=3$ 、 $\Delta=4$ 已是适合的量化步长。同时从 *PSNR* 曲线中看出 P/B 帧的质量得到了保持, 嵌入水印后视频序列的 *PSNR* 值平均下降了 0.144 0 dB ($\Delta=3$)、0.253 0 dB ($\Delta=4$) 和 0.376 0 dB ($\Delta=5$)。相比之下, DEW 算法在嵌入相同容量的水印后 I 帧的 *PSNR* 值平均下降了 6 dB, P 帧平均下降了 0.550 0 dB。因此, 在嵌入水印容量相同时 DEM 算法在视觉失真方面要好于 DEW 算法。

3.1.2 水印容量

基于块的水印算法的容量是由嵌入 1 个信息位所用的块数决定的。DEW 算法将一个水印比特嵌入到 n 个 8×8 的亮度块中, 而文献 [2] 中指出, n 通常满足式子 $n=16 \times k^2$ ($k=1, 2, 3, \dots$), 它的典型取值为 16~64 因此 DEW 算法的 n 越大, 视频失真越小, 水印的鲁棒性越强, 但水印容量也会越小。而在 DEM 算法中, 一个亮度块就可以嵌入一位水印信息, 且视频失真比较小。因此, DEM 算法的容量至少是 DEW 算法的 16 倍。

3.1.3 鲁棒性

表 1 给出了 DEM 算法在一些攻击后提取水印的 NC(归一化)值。它表明了 DEM 对帧删除攻击具有很好的鲁棒性。当删除 1~4 个 I 帧或 5~15 个 P/B 帧时, DEM 的 NC 值都为 1, DEW 在删除 5~15 个 P/B 帧时的 NC 值保持为 0.992 但是当删除 1~4 个 I 帧时则从 0.992 降低到 0.561。在受到加性高斯白噪声 (AWGN) 攻击时, DEM 在量化步长 $\Delta=4$ 和 $\Delta=5$ 时性能都好于 DEW 算法, 只是在 $\Delta=3$ 时性能稍逊于 DEW, 这是因为较小的量化步长容易被噪声掩盖。当量化步长增大时, DEM 算法抵抗噪声攻击的性能会提高。从表 1 中可以看到, 当 $\Delta=4$ 或 $\Delta=5$ 时 AWGN 攻击后提取水印的 NC 值都为 1, 而 $\Delta=3$ 时, NC 值为 0.984。

3.1.4 码率保持特性

算法的码率保持特性用嵌入水印前后编码每个图像组 (GOP) 所用的比特数的变化量来评价。图 8 为 *Foman* 序列在嵌入水印前后编码每个 GOP 所用比特数的变化量。DEM 算法嵌入水印时, GOP 编码比特数的平均改变量 (bits) 分别为 301.777 8 ($\Delta=$

3), 245.222 2 ($\Delta=4$), 265 ($\Delta=5$); 而 DEW 算法引起的平均改变量为 322.111 1 bits。从图 8 可看出 DEM 算法嵌入水印所引起的编码比特数的改变量要大于 DEW 算法所对应的改变量, 因此只能说, 对于同一视频序列, 在嵌入相同的水印信息时, DEM 算法引起的编码比特数的平均变化量要小于 DEW 算法引起的变化量。

3.2 与经典 QM 算法的比较

为了在同等实验条件下作比较, QM 算法与 DEM 算法选用相同的水印嵌入容量, 即在 I 帧的一个 8×8 DCT 块嵌入一个比特, 在一个 I 帧中一共嵌入 110 个比特。两种算法的量化步长均遍历 3, 4 和 5, QM 算法通过调制最大的 AC 系数来嵌入水印。

3.2.1 透明性

图 9 显示了量化步长为 3 时原始视频流和嵌入水印后的视频流的 *PSNR* 曲线。图 10 和图 11 则分别表示了量化步长为 4 和 5 的 *PSNR* 曲线。当 $\Delta=3$ 时, DEM 和 QM 的 *PSNR* 分别平均降低了 0.406 dB 和 0.471 dB。DEM 的失真比 QM 的小, 因为在 QM 中, 系数值的最大修改可能为 Δ 但在 DEM 中 Δ 的修改分布在整个嵌入区域的多个系数中, 可调整裕度一般可达到 Δ^2 的 2~3 倍。

3.2.2 水印容量及鲁棒性

因为 QM 可以在一个块中的每个非零系数值中嵌入 1 比特的水印, 而 DEM 在一个块中只嵌入 1 比特, 所以 QM 的容量或许会比 DEM 好, 但直接对系数值作量化调制将会比能量调制带来更大的失真。

表 2 显示了在帧删除攻击和 AWGN 攻击下提取水印的 NC 值。当删除 1~5 个 I 帧或 5~15 个 P/B 帧时, DEM 的 NC 值都为 1; 当删除 1~4 个 I 帧或 5~15 个 P/B 帧时, QM 的 NC 值都为 1, 但删除 5 个 I 帧的时候, NC 值降到了 0.968。在 AWGN 攻击时, DEM 的 NC 值为 0.960 而 QM 的 NC 值为 0.929。因此 DEM 在抵抗噪声攻击和删除 I 帧攻击时的鲁棒性均比 QM 强。

3.2.3 码率保持特性

表 3 比较了原始水印视频流和嵌入水印后的视频流的最大、最小和平均比特率。从表 3 中的数据显示 DEM 和 QM 两种算法在嵌入水印后的码率基本一致, 它们都能够满足码率保持的要求。

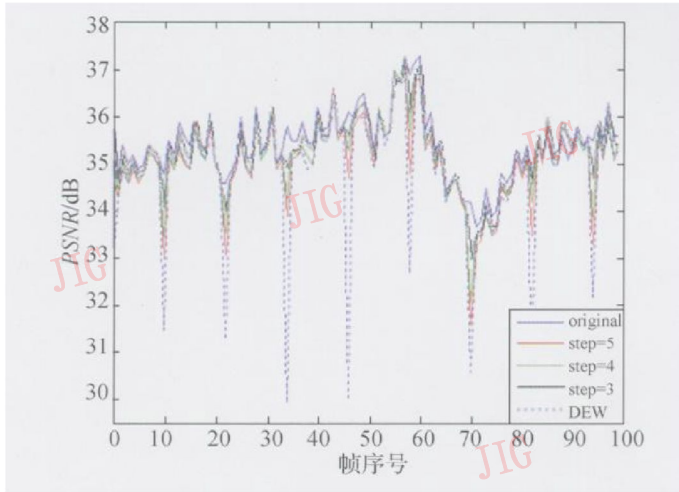


图 7 DEM /DEW 算法 I 帧 PSNR 比较 (码率 0.4 M bps)

Fig 7 PSNR comparison of DEM and DEW at different quantization step sizes under bitrate of 0.4 M bps

表 1 DEW 和 DEM 算法在图像被攻击后的 NC 值比较

Tab 1 NC values of DEW and DEM after attacks

攻击	NC 值			
	DEW	DEM $\Delta=3$	DEM $\Delta=4$	DEM $\Delta=5$
无攻击	0.992	1.000	1.000	1.000
AWGN	0.992	0.984	1.000	1.000
丢失的 P/B 帧				
5	0.992	1.000	1.000	1.000
10	0.992	1.000	1.000	1.000
15	0.992	1.000	1.000	1.000
丢失的 I 帧				
1	0.882	1.000	1.000	1.000
2	0.778	1.000	1.000	1.000
3	0.669	1.000	1.000	1.000
4	0.561	1.000	1.000	1.000

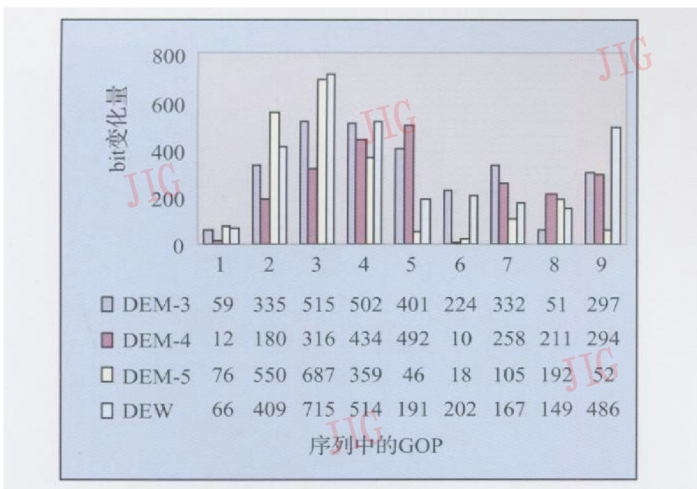


图 8 嵌入前后编码 GOP 位数的变化量 (码率 0.4 M bps)

Fig 8 Comparison of variation of bits per GOP between the original and the watermarked sequence (Bitrate= 0.4 M bps)

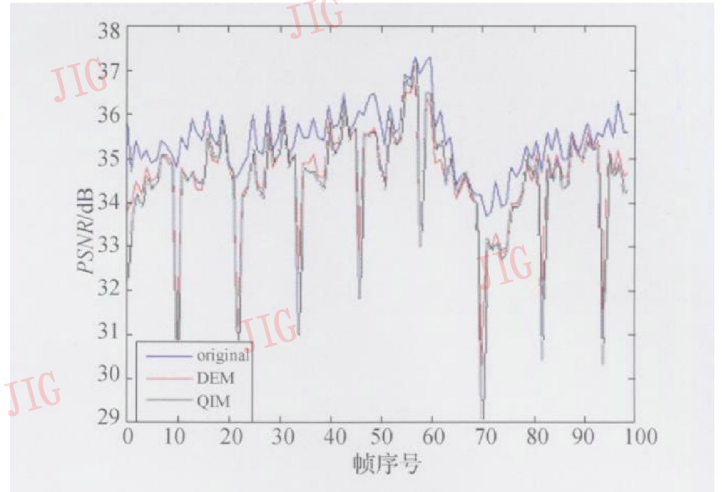


图 9 DEM 和 QIM 的 PSNR 曲线 ($\Delta=3$)

Fig. 9 PSNR curves of DEM and QIM ($\Delta=3$)

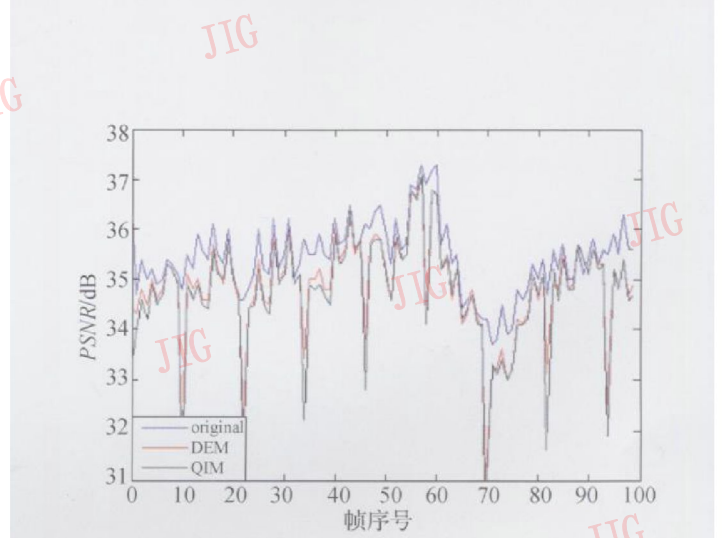


图 10 DEM 和 QIM 的 PSNR 曲线 ($\Delta=4$)

Fig. 10 PSNR curves of DEM and QIM ($\Delta=4$)

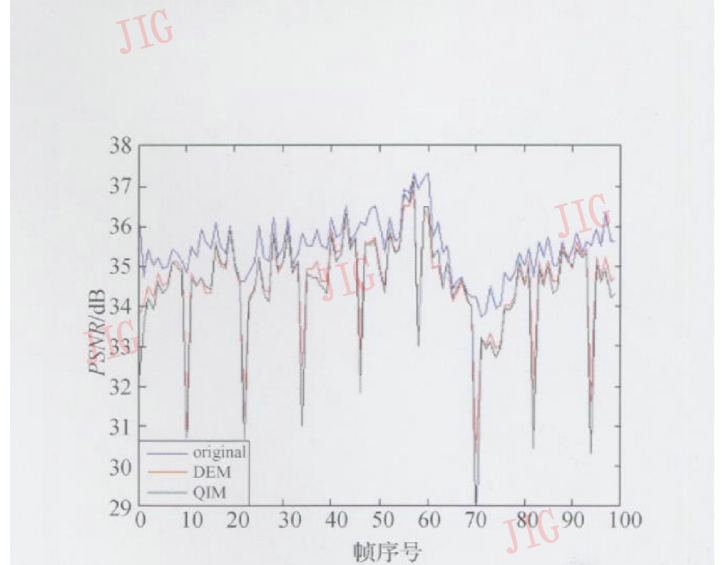


图 11 DEM 和 QIM 的 PSNR 曲线 ($\Delta=5$)

Fig. 11 PSNR curves of DEM and QIM ($\Delta=5$)

表 2 QM 和 DEM 算法在图像被攻击后的 NC 值比较 ($\Delta=3$)

攻击	NC	
	DEM	QM
无攻击	1.000	1.000
AWGN	0.960	0.929
5	1.000	1.000
丢失的 P/B 帧	10	1.000
15	1.000	1.000
2	1.000	1.000
丢失的 I 帧	4	1.000
5	1.000	0.968

表 3 原始视频和嵌入水印视频的码率比较

视频序列	最大	平均	最小
original	422 200	400 000	383 800
DEM	421 600	400 000	384 000
QM	421 600	400 000	384 200

4 结 论

提出了一种基于差分能量调制的压缩域视频水印算法。它通过抖动调制量化块中两个子区域之间的能量差值来嵌入水印信息。同时为了保持图像质量和提高水印的鲁棒性,只把嵌入误差分散到子区域中幅值较大的系数上,而且数值的改变量都很小,因而水印嵌入所引起的码率的变化量也较小。实验结果表明,DEM 算法在透明性、水印容量、鲁棒性以及码率保持性能方面都好于 DEW 算法。而 DEM 与 QM 的比较实验也表明,在鲁棒性上 DEM 要比 QM 好,尤其当受到噪声攻击时。并且在 I 帧嵌入水印对接着的 P/B 帧只有很小的影响。因此,DEM 是一种透明性好,码率可保持的水印算法,它对于帧删除和帧重排和剪切,加性高斯白噪声都具有鲁棒性。

志谢: 本文工作得到中国科学院自动化所模式识别国家重点实验室基金资助。对卢汉清教授对本文工作的宝贵建议及指导表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Langelaar G, Lagendijk R. Real-time labeling of MPEG-2 compressed video [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 1998, 9(4): 256-270
- [2] Langelaar G, Lagendijk R. Optimal differential energy watermarking of DCT encoded images and video [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(1): 148-158
- [3] Hartung F, Girod B. Watermarking of uncompressed and compressed video [J]. Signal Processing, 1998, 66(5): 283-301
- [4] Lagendijk R L, Shterev I D. Estimation of attacker's scale and noise variance for QM-DC watermark embedding [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing New York: IEEE Press, 2004: 55-58
- [5] Perez-Gonzalez F, Mosquera C, Bami M, et al. Rational dither modulation: A high-rate data-hiding method invariant to gain attacks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3960-3975
- [6] Zhu X, Tang Z. Improved quantization index modulation watermarking robust against amplitude scaling distortions [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo New York: IEEE Press, 2008: 237-240
- [7] Li Q, Cox I J. Using perceptual models to improve fidelity and provide resistance to volumetric scaling for quantization index modulation watermarking [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(2): 127-139
- [8] Chen B, Womell G W. Dither modulation: A new approach to digital watermarking and information embedding [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3657: 342-353
- [9] Chen B, Womell G W. QM: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(4): 1423-1443
- [10] Kang K, et al. Real-time video watermarking for MPEG streams [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5203: 691-702