

基于 Watson 视觉感知模型的能量调制水印算法*

凌贺飞⁺, 卢正鼎, 邹复好, 李瑞轩

(华中科技大学 计算机科学与技术学院,湖北 武汉 430074)

An Energy Modulated Watermarking Algorithm Based on Watson Perceptual Model

LING He-Fei⁺, LU Zheng-Ding, ZOU Fu-Hao, LI Rui-Xuan

(College of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-27-87544285, Fax: +86-27-87544285 ext 806, E-mail: ltheifei@163.com, <http://www.hust.edu.cn>

Ling HF, Lu ZD, Zou FH, Li RX. An energy modulated watermarking algorithm based on Watson perceptual model. *Journal of Software*, 2006,17(5):1124–1132. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1124.htm>

Abstract: In this paper, a robust algorithm with large data payload and high computational efficiency is proposed, which is suitable for real-time watermarking of JPEG or MPEG streams because it operates directly on DCT (discrete cosine transform) blocks. The proposed method is based on modifying the low-mid frequency DCT coefficients imperceptibly to modulate block energy. During the modulation, a theorem deduced from the Watson's perceptual model is employed to restrict the modified magnitude of coefficients. This system is capable of embedding 2048 bits of information in images with dimensions 512×512 pixels. Experimental results indicate that the presented scheme is transparent and robust to significant valumetric distortions (including additive noise, low-pass filtering, lossy compression and valumetric scaling) and a part of geometric distortions.

Key words: digital watermarking; energy modulated watermarking (EMW); Watson's perceptual model; discrete cosine transform (DCT)

摘要: 提出一种具有大容量、低复杂性的鲁棒水印算法,主要适合于(但不局限于)JPEG 图像和 MPEG 视频流的实时水印嵌入与检测,因为该算法直接运行于 DCT(discrete cosine transform)块数据上.算法主要通过感知范围内修改 DCT 块的中低频系数来调制块能量.在能量调制过程中,利用 Watson 视觉感知模型推导出一条准则,用于限制 DCT 系数的修改幅度.该系统具有较大的水印容量,可实现在 512×512 图像中嵌入 2 048 比特.实验表明,算法不仅具有较好的透明性,而且对一些常见的攻击(如高斯噪声、低通滤波、JPEG 压缩、增减亮度等)和部分几何攻击(如线性偏移、剪切等)具有较好的鲁棒性.

关键词: 数字水印;能量调制水印(energy modulated watermarking,简称 EMW);Watson 视觉感知模型;离散余弦变换(discrete cosine transform,简称 DCT)

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60502024, 60403027 (国家自然科学基金); the Innovation Fund for Technology Based Firms of Ministry of Science and Technology of China under Grant No.04C26214201284 (科技部中小企业创新基金项目); the Electronic Development Fund of Ministry of Information Industry of China under Grant No.信部运[2004]479 (国家信息产业部电子信息发展基金项目); the Natural Science Foundation of Hubei Province under Grant No.2005ABA267 (湖北省自然科学基金)

Received 2004-12-22; Accepted 2005-10-18

中图法分类号: TP309 文献标识码: A

目前,数字水印技术正受到国内外学者的广泛关注.近年来,大多数的数字水印算法主要针对未压缩视频或者图像,而实际上,当前视频和图像更多的是以压缩的形式存在和传播的.然而,对于压缩图像和视频的数字水印实际应用,计算复杂性和水印容量等特性显得比较重要.一般压缩视频以每秒 25 帧或更快的速度播放,如果嵌入或检测速度不能满足实时性,就会造成播放延迟或者不同步.因此,水印算法应具有较低复杂度,并且易于在终端实现.另一方面,对于一些水印应用(如隐秘通信),水印容量要求越大越好,因此,水印容量也是人们关注的一个重要指标.

水印容量一直是学者关注的问题.Costa^[1]提出理想 Costa 算法(ICS),指出嵌入容量与载体无关,但实际上该算法很难实现,因为其实现的前提是需要无限大的码表.为了达到理想 Costa 算法的容量,许多学者提出基于结构化码表的一系列方法,如标量 Costa 算法(SCS)^[2]、检错码^[3]、抖动量化技术^[4]和最近的多路径网格调制技术^[5].抖动量化方法易于实现,但在高维空间下效率急剧下降(意味着水印容量降低),并且易受简单的数值度规失真攻击.检错码由于其自身不具有冗余性,因此鲁棒性较差.其他信息嵌入或信息编码过程的计算复杂性则很高(即使采用了结构化的码表).

压缩域视频水印算法按照部分解码的程度又可分为 3 类:位域^[6]、VLC 域^[7]和系数域^[8-11].Hartung 等人^[8]由于引入飘移补偿来克服预测带来的漂移和误差累计等问题,增加了该算法的计算复杂性,因为这需要实现 MPEG 的完全解码.在最近的实时水印研究中,比较经典的一些算法是通过选择性地移除高频元组,强制性地造成两组宏块集之间的能量差^[9-11]或数量差^[12,13]来实现水印嵌入.这些算法具有较低的计算复杂性,但水印容量和鲁棒性不够高,因为其水印信号嵌入在高频系数中,很容易被高强度的低通滤波器移除.

本文将提出一种具有实时性、大容量的鲁棒水印算法,主要适合于(但不局限于)JPEG 图像和 MPEG 视频流的实时水印嵌入与检测,因为该算法充分利用压缩数据格式,能够直接运行于 DCT(discrete cosine transform)块数据上.算法主要通过在感知范围内修改 DCT 块的中低频系数来调制块能量.水印信息位是以块能量与载体平均能量之间的差值为模式嵌入的.因此,块能量必须根据嵌入比特和载体平均能量的值加以调制.正是基于这种思想,我们称这种技术为能量调制水印(energy modulated watermarking,简称 EMW).

本文第 1 节简单介绍 Watson 视觉感知模型.第 2 节先对图像能量进行分析,然后给出基于 Watson 视觉感知模型的能量调制方法.第 3 节详细介绍 EMW 算法的水印嵌入和提取过程.第 4 节给出实验结果及分析.第 5 节给出结论与展望.

1 Watson 视觉感知模型

利用敏感度、掩藏和合并的概念,文献[14]提出基于离散余弦变换(DCT)的 Watson 视觉模型.该模型由一个敏感度函数、两个基于亮度和对比度掩蔽的掩蔽部分以及一个合并部分组成,具体的计算过程参见文献[14].该模型描述了一个估计图像之间的 JND(just noticeable difference)数值的感知模型,对于噪声加入图像后所产生的感知影响的估计,该模型的效果要比 MSE 好得多.JND 就是临界差异,表示可以察觉的失真级别.一个像素的 JND 值是指其对应的分块 DCT 系数在不被察觉的情况下所允许修改的最大幅度值.

2 图像能量调制

为了便于描述,本文用“图像”表示静态图像或 MPEG 的 I 帧.假定图像已经是压缩格式,因此,操作 DCT 块是很自然的选择.一般情况下,变换域的信号能量并不是均匀分布的,而是绝大部分能量集中在 DC 系数和一些低频的 AC 系数上.大多数低频系数对人类视觉来说非常重要,而高频系数鲁棒性又不好,因此,本算法选择 zigzag 扫描频率为 6~14 的中低频系数.一般来说,这些系数的能量在遭受一些常见攻击,如压缩、滤波、噪声等时,基本上变化不大.因此,通过调制该频率段的信号能量具有鲁棒性.嵌入区域能量的调制,主要通过修改中低频系数的值来完成.能量调制主要有两个方向:增加能量和减少能量.增加能量类似于对比度增强,即调节系数使其

远离平均值;减少能量则类似于对比度减弱,即调节系数使其靠近平均值.水印的鲁棒性要求能量调制的幅度越大越好,但如果能量太大,视觉失真就会很明显.因此,应有一个方法来限制视觉失真的范围,同时满足水印鲁棒性最大化的要求.我们将利用人类视觉系统的一些特性,采用 Watson 视觉感知模型来推导一个准则,用于限制嵌入区域能量调制的范围.

假定一个图像嵌入区域由 N 个 DCT 块组成,每块选择 zigzag 扫描后频率为 f_{\min} 到 f_{\max} 的 M 个 DCT 系数,这样就构成 $M \times N$ 的二维矩阵 G .每个像素的 JND 值(量化后的值)定义为 $JND_{jk}(f)$ 表示为频率; k 表示第 k 块),矩阵 G 中的 DCT 系数和调制后的系数分别定义为 c_{jk}^o 和 c_{jk}^w ,则令

$$c_{jk}^w = c_{jk}^o + \alpha \cdot \text{sign}(c_{jk}^o) \cdot JND_{jk} \quad (1)$$

其中, α 表示比例因子,其值可由定理 1 确定.

定理 1. 如果嵌入区域的原始能量为 P_o ,即 $\sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [c_{jk}^o]^2 = P_o$,如果需要将区域能量调制到 P_t (增加或者减少到 P_t),则

$$\alpha = \frac{\sqrt{B^2 - AC}}{A} - \frac{B}{A} \quad (2)$$

其中, $A = \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [\text{sign}(c_{jk}^o) \cdot JND_{jk}]^2$, $B = \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [c_{jk}^o \cdot JND_{jk}]$, $C = P_o - P_t$.

证明:首先计算区域的修改后的能量,将公式(1)代入能量公式得

$$\begin{aligned} P_t &= \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [c_{jk}^w]^2 = \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [c_{jk}^o + \alpha \cdot \text{sign}(c_{jk}^o) \cdot JND_{jk}]^2 \\ &= \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M \{ [c_{jk}^o]^2 + \alpha^2 \cdot [\text{sign}(c_{jk}^o) \cdot JND_{jk}]^2 + 2\alpha \cdot [\text{sign}(c_{jk}^o) \cdot c_{jk}^o] \cdot JND_{jk} \} \\ &= P_o + \alpha^2 \cdot \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [\text{sign}(c_{jk}^o) \cdot JND_{jk}]^2 + \alpha \cdot 2 \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [c_{jk}^o \cdot JND_{jk}] \end{aligned} \quad (3)$$

进一步地,上式可简化为

$$A\alpha^2 + 2B\alpha + C = 0 \quad (4)$$

其中, $A = \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [\text{sign}(c_{jk}^o) \cdot JND_{jk}]^2$, $B = \sum_{k=1}^N \sum_{f=1}^M [c_{jk}^o \cdot JND_{jk}]$, $C = P_o - P_t$.

因此,我们很容易得出式(4)的解.因为 $A > 0$,所以得出

$$\alpha = \frac{\sqrt{B^2 - AC}}{A} - \frac{B}{A} \quad (5)$$

则命题得证.

讨论:如果 $C > 0$ (即 $P_o > P_t$),则 $\alpha < 0$;相反,如果 $C < 0$ (即 $P_o < P_t$),则 $\alpha > 0$.当然,如果 C 太大或者太小, α 的绝对值都有可能超过 1.0,这意味着 DCT 系数的修改幅度超过了一个 JND 值,这将引起局部失真.因此,应加以考虑.这在第 4 节的实验中会做进一步的考虑.

3 EMW 算法描述

3.1 基本原理

假定原始图像 X 尺寸为 $N_1 \times N_2$,则 DCT 块数为 $N = \lfloor N_1 \times N_2 / 64 \rfloor$.每块选择 zigzag 扫描后频率为 $f_{\min} \sim f_{\max}$ 的 M 个 DCT 系数,这些系数则构成 $M \times N$ 矩阵 C ,可得出

$$C = \{c_{jk}^o \mid f = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, N\} \quad (6)$$

在水印信号嵌入之前,先将同一频率(即矩阵 C 中的每一行)的系数置乱.这样做的目的有两点:一是有利于区域能量分布的均匀化,可以减少因水印嵌入造成的视觉失真;另一方面可以保证安全.没有密码,即使算法公开也无法检测到水印信号.对于任一口令 K ,用一个种子函数 randseed 产生一系列的种子 SK ,即

$$SK = \text{randseed}(K, M) \quad (7)$$

SK 序列共有 M 个种子,对矩阵 C 的第 f 行的系数集合,用第 f 个种子 sk_f 调用函数 shuffle 进行置乱.这样就会产生一个置乱矩阵 $C' = \{c'_{fk} | f = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, N\}$,其中

$$c'_{fk} = c_{f, \text{shuffle}(k, sk_f)}^o \quad (8)$$

假定二进制水印信号 W 由 L 个比特 $w_j (j=1, 2, 3, \dots, L)$ 组成.假设每 n 个 DCT 块嵌入一个比特,则可得出水印容量为 $L=N/n$.定义一个子矩阵 G_m 为

$$G_m = \{c'_{fk} | f = 1, 2, \dots, M; k = (m-1)n+1, (m-1)n+2, \dots, mn\} \quad (9)$$

则置乱矩阵 C' 可划分为许多这样的子矩阵,即

$$C' = \{G_m | m = 1, 2, \dots, L\} \quad (10)$$

对于第 m 个子矩阵 G_m ,其区域能量设为 P_m ,则

$$P_m = \sum_{k=(m-1)n+1}^{mn} \sum_{f=1}^M [c'_{fk}]^2 \quad (11)$$

这样,序列 $P_m (1 \leq m \leq L)$ 就构成一个一维序列.该序列的平均值可计算为 \bar{P} ,我们定义 P_m 和 \bar{P} 的差值为 D ,则

$$D = P_m - \bar{P} \quad (12)$$

然后,建立嵌入比特与能量差 D 的映射关系,即当 $D \geq 0$ 时,嵌入比特定义为“1”;否则,嵌入比特定义为“0”.因此,水印嵌入过程就必须调节区域能量 P_m 来实现期望的能量差 D .为鲁棒性起见,选定一个阈值 T ,当水印嵌入时,通过调制 P_m 来满足关系式 $D \geq T$ 或 $D < (-T)$.例如,如果当前嵌入比特为“1”,但关系式 $D \geq T$ 不成立,这时就必须增加区域能量 P_m ;相反,如果当前嵌入比特为“0”,但关系式 $D < (-T)$ 不成立,则必须减少 P_m . P_m 的增加或者减少可以通过利用式(1)修改 DCT 系数来实现,但式(2)中的 P_t 可表示为

$$P_t = \begin{cases} \bar{P} + T, & \text{if } P_m \uparrow \\ \bar{P} - T, & \text{if } P_m \downarrow \end{cases} \quad (13)$$

其中, \uparrow 表示需要增加 P_m , \downarrow 表示需要降低 P_m .

嵌入比例因子 α 的值主要由期望阈值 T 决定,其绝对值随着 T 的增大而增大.期望阈值 T 影响决定水印的鲁棒性和嵌入图像的视觉质量.其值越大, α 绝对值就越大,则水印也就越鲁棒,但视觉失真就会更严重.因此,阈值 T 的选定需要在鲁棒性和视觉失真两方面加以权衡.

区域的组成块数 n 影响水印的鲁棒性和容量.如果选取更多的块来嵌入一个比特(即 n 增大),则水印更鲁棒,视觉失真更小,但水印容量却减少.因此, n 的选定也需要在水印容量和鲁棒性方面加以权衡.

3.2 水印的嵌入与提出过程

因此,水印的嵌入过程可以简单描述为以下几步:

- (1) 对每一个 DCT 块,选择 zigzag 扫描频率为 $f_{\min} \sim f_{\max}$ 的 M 个 DCT 系数(在本文的实验中, f_{\min} 设置为 $6f_{\max}$ 设置为 14);
- (2) 将同一频率的 DCT 系数用口令 K 置乱;
- (3) 选择一些全局参数:
 - 设置期望阈值 T ;
 - 设置组成块数 n ;
- (4) 对水印序列 W 的每一位 w_j , 循环做:
 - 每 n 块组成一个子区域 G_m ;
 - 对每个子区域计算其区域能量 P_m 以及所有区域能量的平均值 \bar{P} ;

- 修改DCT系数来调制区域能量

如果($w_m="1"$ & $D<T$),则按照式(1)修改,其中,式(2)中的 P_i 可以表示为 $\bar{P}+T$;

如果($w_m="0"$ & $D>(-T)$),则按照式(1)修改,其中,式(2)中的 P_i 可以表示为 $\bar{P}-T$;

(5) 将所有的 DCT 系数复原到原始位置.

类似地,水印的提取过程可简单描述为以下几个步骤:

(1) 对每一个 DCT 块,选择 zigzag 扫描频率为 $f_{\min}\sim f_{\max}$ 的 M 个 DCT 系数;

(2) 将同一频率的 DCT 系数用口令 K 置乱;

(3) 设置一些全局参数;

- 设置组成块数 n (与嵌入时设置的值相同);

(4) 对所有的子区域 G_m 循环做:

- 对每个子区域计算其区域能量 P_m ,以及所有区域能量的平均值 \bar{P} ;

- 如果($D=P_m-\bar{P}\geq 0$),则 $w_m=1$;否则, $w_m=0$.

3.3 算法分析与讨论

通过前面的描述我们知道,检测水印主要通过判断子区域能量与平均能量的差值的符号来决定.如果嵌入水印后的平均能量与嵌入前的平均能量相差不大,则检测没有错误;否则,就会出现一定的位错率.因此,下面将分析嵌入水印后对平均能量的影响.假定嵌入水印后的区域能量为 P_m^w ,平均能量为 \bar{P}^w ,根据式(13)调制的方法, P_m^w 可以重新写成

$$P_m^w = \bar{P} + w_m T$$

$$= \begin{cases} \bar{P} + T, & \text{if } w_m > 0 \\ \bar{P} - T, & \text{if } w_m < 0 \end{cases} \quad (14)$$

对于所有的子区域,能量调制完之后,平均能量 \bar{P}^w 可以计算出

$$\bar{P}^w = \bar{P} + \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L w_m T \quad (15)$$

如果水印信号 w 的分布近似满足随机分布(如 L 足够大或者 w 为 m -序列),则式(15)中第 2 项的值接近于 0.因此,可以认为嵌入水印后的平均能量接近于嵌入前的平均能量,即 $\bar{P}^w = \bar{P}$.

尽管 DEW^[9],XDEW^[10]和 IDEW^[11]等算法也是通过调节能量来嵌入水印,但与本算法存在以下不同:一是 DEW 系列算法主要移除部分块的高频系数来调节能量,即将水印信号嵌入在高频系数中,因此很容易被高强度的低通滤波器移除,而 EMW 算法通过修改中低频 DCT 系数来嵌入水印,具有更强的鲁棒性;二是 EMW 算法通过利用 Watson 视觉感知模型来控制中低频 DCT 系数的修改幅度,可以减少水印图像的视觉失真.

4 实验结果

为了测试本算法在视觉质量、水印容量及鲁棒性等方面的性能,我们选择标准彩色图像 Lena(512×512)作为测试图像.测试视频选择码流比特率为 6.0Mbit/s 的“Flower-garden”视频序列.嵌入期望阈值设为 3 500(即 $T=3500$),区域组成块数设置为 2(即 $n=2$).

4.1 视觉质量测试

视觉质量可以通过测量嵌入水印后的图像的 PSNR(峰值信噪比)值来评价.为了测试嵌入期望阈值 T 对视觉失真的影响,在水印嵌入过程中让 T 取一系列不同的值.因为嵌入比例因子 α 随着 T 的增大而增大,所以有可能会大于 1.0.根据文献[14],DCT 的系数的修改幅度不能超过一个 JND,也就是说, α 的值不能超过 1.0.可以通过将那些值大于 1.0 的 α 强制设为 1.0,这个过程我们称为 JND 限制处理过程(JND limited process,简称 JLP).但如果采用了 JLP,则嵌入的能量差就不能完全满足关系式($D\geq T$ 或 $D<(-T)$),即降低水印嵌入的有效性.表 1 为采用 JLP 和无 JLP 的实验结果,可以看出:PSNR 的值随着 T 的增大而减少;采用 JLP 比正常处理获得更高的 PSNR,

但是会造成更多的位错误.在后续的实验中,嵌入期望阈值 T 都设置为 3 500,得到的 PSNR 为 37.38.原始 Lena 图像、水印图片、嵌入水印后的 Lena 图像分别是图 1 中的(a)~(c).

Table 1 PSNR, bit error rate (BER) under normal circumstance and JLP circumstance
表 1 采用 JLP 和正常处理对视觉质量和嵌入有效性的影响

T	PSNR (db)		Bit error rate (%)	
	Normal	JLP	Normal	JLP
500	40.71	40.76	1.07	1.80
1 000	40.10	40.16	0	0.93
1 500	39.50	39.60	0	0.97
2 000	38.95	39.05	0	1.02
2 500	38.37	38.50	0	1.02
3 000	37.80	37.95	0	1.07
3 500	37.22	37.38	0	1.12
4 000	36.57	36.75	0	1.12
4 500	35.86	36.05	0	1.07
5 000	34.89	35.07	0	1.03



Fig.1
图 1

4.2 飘移对视觉质量的影响

由于 P 帧和 B 帧是由 I 帧和 P 帧预测得来的,因此在 I 帧嵌入水印对视觉质量的影响同样也会在 P 帧和 B 帧中存在.但由于 P 帧和 B 帧只是部分地从其他帧预测,因此视觉失真程度减弱.如图 2 所示为“Flower-garden”视频嵌入水印后的 PSNR 曲线图,其中水印嵌入有效载荷为 5.28kbit/s.可以看出,I 帧的视觉质量失真程度最大,而随着多次预测后,视觉失真程度逐渐减弱.这主要是因为只在 I 帧嵌入水印,而对 P 帧和 B 帧没有修改,因此误差累计不是非常明显.通过 PSNR 曲线可以得知,该嵌入方法不需要进行飘移补偿.

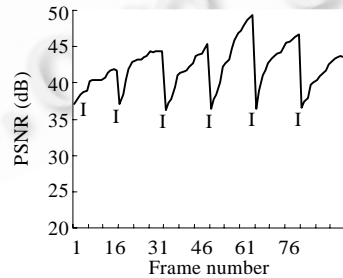


Fig.2 PSNR of the watermarked “Flower-garden” sequence
 图 2 “Flower-garden”视频嵌入水印后的 PSNR 曲线图

4.3 水印容量估计

水印容量主要由区域组成块数 n 来决定,可以通过式(16)计算.可见,水印容量与 n 成反比, n 增加 1 倍,水印容量则减少一半.当 n 增加时,PSNR 值也增加,同时,水印也更具有鲁棒性.为了获得较大的水印容量,我们将 n 设置为 2(即每 2 个 DCT 块嵌入 1 比特),这意味着 512×512 Lena 图像能够嵌入 2 048 比特.而对于 6.0Mbit/s 的“Flower-garden”视频,可以 5.28kbit/s 的速度嵌入水印.如果 P 帧和 B 帧也嵌入水印,水印容量则增加两倍.

$$L = \left\lfloor \frac{N}{n} \right\rfloor \quad (16)$$

4.4 鲁棒性测试

实际上,嵌入水印后的图像一般都会遭受到一些处理或攻击.因此,水印算法的设计必须禁得起一些常见的处理.为了验证本算法的鲁棒性,我们对嵌入水印后的图像进行一些攻击,包括高斯噪声、低通滤波、JPEG 压缩、亮度比例缩放及部分几何攻击等.对于每一类攻击,都有一个变化的参数对攻击的程度进行调节.水印的鲁棒性可以用检测的水印位错率来评价.根据文献[15],如果 80%的信息比特能够准确地检测出来(即位错率(BER)小于 20%),我们就认为该算法是鲁棒的.

为了检测本算法的鲁棒性,对水印图像实施以下攻击,具体包括:

- (1) 添加均值为 0、标准方差为 σ 的高斯噪声,其中 σ 在 [0,30] 区间变化;
- (2) 进行宽度为 σ_g 的高斯低通滤波,其中 σ_g 在 [0,2] 区间变化;
- (3) 以质量因子为 QF 进行 JPEG 压缩,其中 QF 在 [10%,100%] 区间变化;
- (4) 以比例因子为 v 进行亮度缩放,其中 v 在 [0.2,2] 区间变化;
- (5) 部分几何攻击,如线性偏移和剪切等.

从攻击后的水印载体中提取水印信号,并与原始水印信号比较,从而计算出位错率 BER.攻击(1)~攻击(4)的实验结果如图 3~图 6 所示.攻击(5)的实验结果见表 2.从以上实验结果可以看出,本算法在鲁棒范围(BER 小于 20%)内能够抵抗的最大强度攻击有:平均值为 0、标准方差 $\sigma=22$ 的高斯噪声;宽度 $\sigma_g=1.0$ 的高斯滤波;质量因子 $QF=10\%$ 的 JPEG 压缩;亮度按比例因子 $v=0.2$ 减弱、亮度按比例因子 $v=2$ 增强;线性偏移 (5_ROW_17_COL_REMOVED)和剪切 50%等.其中亮度减弱、亮度增强及剪切 50%后的水印载体图像如图 7(a)~图 7(c)所示(其他攻击后的载体图像显示出来效果不明显,因此略掉).我们之所以考虑对亮度变化的鲁棒性,主要是因为目前许多基于量化的信息水印^[4]对亮度变化不具有鲁棒性.算法对线性偏移和剪切具有鲁棒性,主要是因为这两种操作只破坏一部分块的同步性,而另外一些几何攻击,如旋转、比例缩放等,完全破坏所有块的同步性,水印就不具有鲁棒性了.这也是今后需要完善的地方.

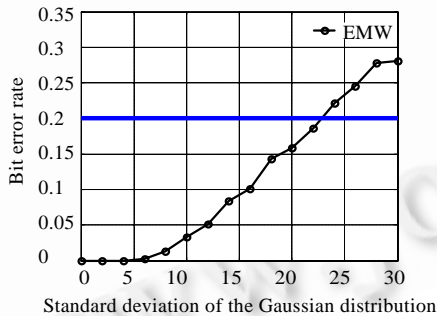


Fig.3 Robustness versus Gaussian noise

图3 抗高斯噪声攻击的鲁棒性

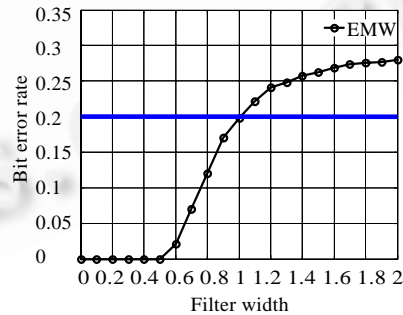


Fig.4 Robustness versus low-pass filtering

图4 抗低通滤波攻击的鲁棒性

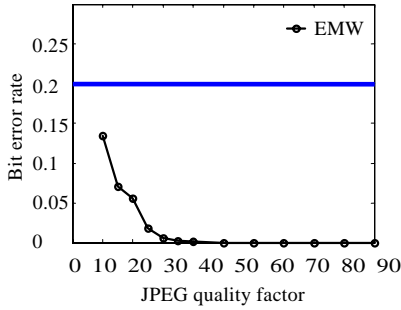


Fig.5 Robustness versus JPEG compression

图5 抗JPEG压缩攻击的鲁棒性

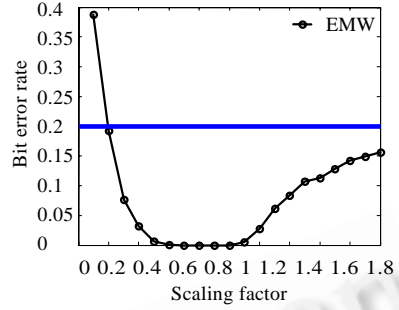


Fig.6 Robustness versus valumetric scaling

图6 抗亮度缩放攻击的鲁棒性

Table 2 Bit error rate after some geometric distortions including line shifting and cropping
表 2 部分几何攻击(包括线性偏移和剪切)产生的位错率

Attack	Bit error rate (%)
1_ROW_1_COL_REMOVED	8.4
1_ROW_5_COL_REMOVED	9.2
5_ROW_1_COL_REMOVED	10.0
5_ROW_17_COL_REMOVED	11.9
17_ROW_5_COL_REMOVED	11.2
CROPPING_25	7.3
CROPPING_50	12.4
CROPPING_RANDOM	15.5



Fig.7 Watermarked image after attack

图 7 部分遭受攻击后的水印载体图像

5 结论与展望

本文通过调制区域能量实现了一种具有大容量、低复杂性的鲁棒水印.在能量调制过程中,利用 Watson 视觉感知模型推导出一条准则,用于限制 DCT 系数的修改幅度.本系统具有较大的水印容量,可实现在 512×512 图像中嵌入 2 048 比特.实验表明,算法不仅具有较好的透明性,而且对一些常见的攻击(如高斯噪声、低通滤波、JPEG 压缩、增减亮度等)和部分几何攻击(如线性偏移、剪切等)具有较好的鲁棒性.

算法主要适合于(但不局限于)JPEG 图像和 MPEG 视频流的实时水印嵌入与检测,因为该算法直接运行于 DCT 块数据上.尽管本文的实验是以 JPEG 静态图像为载体,但 MPEG 的 I 帧的数据格式类似于 JPEG 静态图像,因此,本算法完全适用于 MPEG 视频流.不同的是,一般视频流要求嵌入水印后的长度大小不变,这可通过以下措施加以解决:如果嵌入水印后的视频流大小增加,则可删除部分高频系数,对图像的视觉质量影响不大;如果嵌入水印后的视频流大小减少,则可以在 Slice 头插入适量的哑元比特.当然,本文算法不会造成嵌入水印后的视频流大小变化太大,因为算法只修改非零系数,则不会出现大量由零到非零的情况.

References:

- [1] Costa M. Writing on dirty paper. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1983,29(3):439–441.
- [2] Eggers JJ, Bauml R, Tzschoppe R, Girod B. Scalar Costa scheme for information embedding. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003,51(4):1003–1019.
- [3] Chou J, Pradhan S, Ghaoui LE, Ramchandran K. A robust optimization solution to the data hiding problem using distributed source coding principles. In: Vasudev B, Hsing TR, Tescher AG, Stevenson RL, eds. *Proc. of the SPIE Image and Video Communications and Processing 2000*. San Jose: SPIE Press, 2000. 301–310.
- [4] Chen B, Wornell GW. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2001,47(4):1423–1443.
- [5] Miller ML, Doerr GJ, Cox IJ. Applying informed coding and embedding to design a robust high-capacity watermark. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2004,13(6):792–807.
- [6] Langelaar, GC, Lagendijk RL, Biemond J. Real-Time labeling of MPEG-2 compressed video. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1998,9(4):256–270.
- [7] Lu CS, Chen JR, Liao HY, Fan GQ. Real-Time MPEG2 video watermarking in the VLC domain. In: Suen C, ed. *Proc. of the 16th Int'l Conf. on Pattern Recognition (ICIP 2002)*. New York: IEEE Press, 2002.
- [8] Hartung F, Girod B. Watermarking of uncompressed and compressed video. *Signal Processing*, 1998,66(3):283–301.
- [9] Langekaar GC, Lagendijk RL. Optimal differential energy watermarking (DEW) of DCT encoded images and video. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2001,10(1):148–158.
- [10] Setyawan I, Lagendijk RL. Low bit-rate video watermarking using temporally extended differential energy watermarking (DEW) algorithm. In: Ping W, Edward J, eds. *Security and Watermarking of Multimedia Contents III*. San Jose: SPIE Press, 2001. 73–84.
- [11] Ling HF, Lu ZD, Zou FH. Improved differential energy watermarking (IDew) algorithm for DCT-encoded imaged and video. In: Yuan B, ed. *Proc. of the 7th Int'l Conf. on Signal Processing (ICSP 2004)*. New York: IEEE Press, 2004. 2326–2329.
- [12] Ling HF, Lu ZD, Zou FH. New real-time watermarking algorithm for compressed video in VLC domain. In: Meng-Hwa ER, Alex K, eds. *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Image Processing (ICIP 2004)*. New York: IEEE Press, 2004. 2171–2174.
- [13] Ling HF, Lu ZD, Zou FH. Turbo-Based DNW algorithm for compressed video in VLC domain. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2005,10(1):297–302.
- [14] Watson AB. DCT quantization matrices optimized for individual images. In: Allebach JP, Rogowitz BE, eds. *Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV*. San Jose: SPIE Press, 1993. 202–216.
- [15] Kutter M, Petitcolas FAP. A fair benchmark for image watermarking systems. In: Ping W, Edward J, eds. *Security and Watermarking of Multimedia Contents*. San Jose: SPIE Press, 1999. 226–239.



凌贺飞(1976 -),男,河南商城人,博士,副教授,主要研究领域为数字水印,信息隐藏,数字版权管理,图像处理.



邹复好(1974 -),男,博士,主要研究领域为数字水印.



卢正鼎(1944 -),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布式异构系统集成,信息安全.



李瑞轩(1974 -),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为分布式计算,信息安全.