

# 基于整数 DCT 变换的新水印算法

方 春 张翠芳 王宏霞 陈 导

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

**摘 要** 鲁棒性及掩蔽性是衡量数字水印算法性能的重要指标。为了用较低算法复杂度使数字水印具有较好的鲁棒性与掩蔽性,提出了一种基于整数 DCT 变换的新的鲁棒水印算法。该算法利用 DCT 变换的整数特点,首先对频域嵌入系数进行定量分析,找出适合嵌入的系数与嵌入阈值的大小关系,接着提取每个图像块的 DC 系数组成一幅新图,选择新图中具有复杂纹理的图像块再次进行整数 DCT 变换,最后将水印信号嵌入到这些图像块域的系数中。仿真实验结果表明,新算法既保证了水印的掩蔽性,又同时具有很好的鲁棒性,对 JPEG 压缩、噪声、滤波等攻击都具有很好的免疫能力,即使是在马赛克攻击下也能提取出水印图像。

**关键词** 数字水印 整数 DCT 变换 视觉掩蔽 马赛克攻击

中图法分类号:TP309 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)09-1694-07

## A Novel Image Watermarking Algorithm Based on Integer DCT

FANG Chun, ZHANG Cui-Fang, WANG Hong-xia, CHEN Dao

(Department of Information and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

**Abstract** Robustness and invisibility are used to evaluate the performance of the watermark algorithm. In order to design a complicated scheme with both preferable robustness and invisibility with low complexity, in this paper, a new watermarking based on Integer DCT scheme is proposed. At first we studied the integral transform characteristic of the frequency coefficients, to find out the coefficients which are fit to be embedded and the relation of theirs embedded threshold. Then we formed a new image by extract each block DC coefficient, and select out numbers of the blocks with complex texture. At last, by Integer DCT, the digital watermark signals were embedded into the frequency coefficients of the theses blocks. Experimental results show that the proposed watermarking scheme ensures that the invisibility of watermark, and have good robustness against various attacks such as JPEG compression, noise, filter and so on, even if under the mosaic attack.

**Keywords** Digital watermark, integral DCT transformation, visual masking, mosaic attack

## 1 引 言

多媒体通信、Internet 以及数字化信息产品的不断发展与应用,为人类的生活提供了快捷廉价的传输手段。但随之而来的版权保护和信息安全问题也日益突出。作为一种解决问题的手段——数字水印成为了当今的研究热点<sup>[1]</sup>。

目前,对静止图像水印研究可以分为两大类:空域数字水印和变换域数字水印。空域数字水印一般

鲁棒性较差,无法经受一些有损或无损的信息处理。而基于变换域的数字水印具有较好的鲁棒性和掩蔽性,因而受到更多学者的青睐。有许多算法采用离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)<sup>[2]</sup>,将水印信号嵌入到图像的频域。

当水印嵌入到图像中,要求水印信号有较好的鲁棒性以及掩蔽性。根据 Cox 等人对水印结构的研究<sup>[3]</sup>表明,具有 Gaussian 统计特性的水印信号有很好的鲁棒性。文献[4]中提出,水印信号嵌入到直流系数(direct current, DC)比交流(AC)系数有更

收稿日期:2007-01-30;改回日期:2007-03-26

第一作者简介:方 春(1982 ~ ),男,西南交通大学信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为数字水印,H.264。

E-mail: frank9933@163.com

好的鲁棒性,并且低频系数的鲁棒性比高频系数的鲁棒性好。虽然 DC 系数和低频系数都具有很好的鲁棒性,但容易出现块效应。

根据人眼视觉系统(human vision system, HVS)特性,将水印隐藏在图像复杂纹理区域的视觉掩蔽性比简单纹理区域好<sup>[5]</sup>;其次,水印在高亮度背景下,视觉掩蔽性要比低亮度的好<sup>[6]</sup>。利用 HVS 特性可以在一定程度上提高水印信号的掩蔽性。因此,选取图像的适当区域以及 DCT 频率系数嵌入水印成为研究问题的关键。

与文献[7]采用整数 DCT 变换相比,本文提出的算法采用两次整数 DCT 变换,利用图像块 DC 系数的鲁棒性,并且基于人眼视觉特性来增强水印信号的视觉掩蔽性,对水印的嵌入强度做分级处理。实验结果表明,该算法具有更好的鲁棒性和掩蔽性,能很好地抵抗各种攻击,而且在算法速度上也优于一般的 DCT 变换。

## 2 整数 DCT 变换

在视频标准 H. 264 中采用整数 DCT 变换<sup>[8]</sup>,可提高计算速度,并使硬件实现简单化。整数 DCT 变换除了具有一般 DCT 变换特性之外,其正反变换的数据实现了精确匹配。下面从一般 DCT 变换原理开始简单讲述整数 DCT 变换原理。2 维 DCT 变换矩阵形式表示为

正变换:

$$F = AfA^T \quad (1)$$

反变换:

$$f = AFA^T \quad (2)$$

式中,  $f$  为由图像像素构成的空域矩阵,  $F$  为其图像对应频域矩阵,对于  $4 \times 4$  的图像块,其  $4 \times 4$  的 DCT 变换矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} a & a & a & a \\ b & c & -c & b \\ a & -a & -a & a \\ c & -b & b & -c \end{bmatrix}$$

式中,  $a = 1/2$ ,  $b = \sqrt{1/2}\cos(\pi/8)$ ,  $c = \sqrt{1/2}\cos(3\pi/8)$  将式(1)等效表示为

$$F = (CfC^T) \otimes E \quad (3)$$

式中,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & d & -d & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ d & -1 & 1 & -d \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \\ a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \end{bmatrix}$$

式中,  $d = c/b \approx 0.414$ 。符号  $\otimes$  表示  $CfC^T$  结果中的每个元素乘以矩阵  $E$  中对应位置上系数值的运算。为实现整数运算,并且简化运算,  $d$  取 0.5。为了保持变换的正交性,  $b$  修正为  $b = \sqrt{2/5}$ 。同时将矩阵  $C$  中的第 2 行与第 4 行以及矩阵  $C^T$  中的第 2 列与第 4 列元素乘以 2。得到如下整数 DCT 变换

$$F = (C_r f C_r^T) \otimes E_r \quad (4)$$

式中,

$$C_r = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$E_r = \begin{bmatrix} a^2 & ab/2 & a^2 & ab/2 \\ ab/2 & b^2/4 & ab/2 & b^2/4 \\ a^2 & ab/2 & a^2 & ab/2 \\ ab/2 & b^2/4 & ab/2 & b^2/4 \end{bmatrix}$$

整数 DCT 变换具有与一般 DCT 变换几乎相同的压缩性能,并且整数 DCT 变换实现了数据变换的精确匹配,还具有快速算法<sup>[9]</sup>。

## 3 基于整数 DCT 变换的水印嵌入

为了使水印具有很好的鲁棒性和掩蔽性,选择嵌入的频域系数应具有如下条件:

- (1) 能够抵抗一定的信号处理及噪声干扰;
- (2) 嵌入水印信号具有较好的视觉掩蔽性。

在图像低频部分,尤其是在 DC 系数上,有很好的鲁棒性<sup>[4]</sup>。为了获得良好的水印鲁棒性,新算法先将图像划分为  $4 \times 4$  不重叠的块进行整数 DCT 变换,然后取出每个块的 DC 系数组成一幅新图(相当于原图的一个缩小图),将这幅新图也划分为  $4 \times 4$  不重叠的块进行整数 DCT 变换,再根据嵌入的水印大小选出一定数量的图像块,最后算法将水印信号嵌入到这些块的频域系数。通过这种算法,用到了第 1 层图像 DC 系数的鲁棒性,并可以使水印具有较好的掩蔽性。

### 3.1 水印在不同频率系数嵌入对图像块影响分析

当改变频域中某些系数值时,空域中的像素值

将按照一定规律进行改变,而像素值改变的大小仅与频域系数值改变大小有关,而与原频域系数值大小无关。适当改变频域中一个系数的大小,空域中每个像素值改变大小可全为整数。由式(4)计算得出在整数 DCT 变换时不同频率系数引起空域像素改变全为整数的情况(如图 1(a)~图 1(i)所示)。

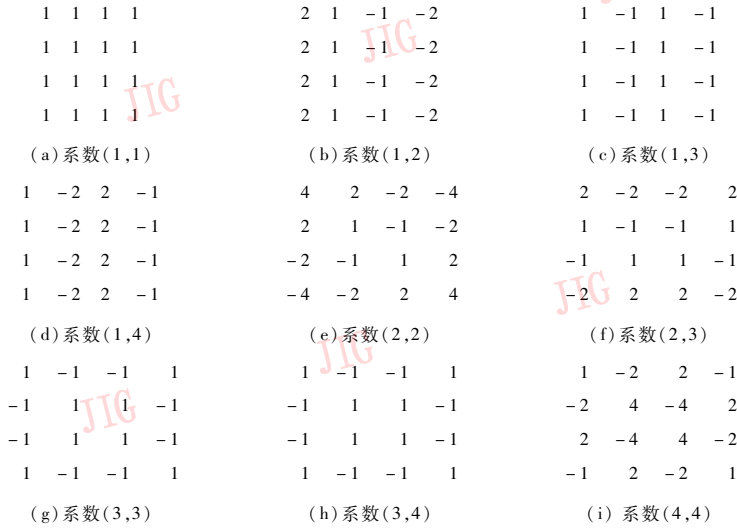


图 1 不同频率系数引起空域像素改变情况

Fig.1 The influence of difference frequency coefficient for spatial field

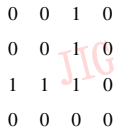


图 2 嵌入系数选择

Fig.2 The selected coefficients

为了增强水印信号的视觉掩蔽性,嵌入的图像块频域系数值应大于一定阈值。由于人眼对低频信息的敏感度大于高频信息的敏感度<sup>[10]</sup>,那么嵌入低频的阈值应该大于嵌入高频的阈值。且根据

$$\tilde{F}(u,v) = \begin{cases} F(u,v) & F(u,v) < T(u,v) \\ F(u,v) + \text{sgn}(F(u,v)) \cdot \Delta \cdot w_k & F(u,v) > T(u,v) \end{cases} \quad (6)$$

式中,

$$\Delta = \begin{cases} \delta_1 & T_2(u,v) > F(u,v) > T(u,v) \\ \delta_2 & F(u,v) > T_2(u,v) \end{cases}$$

在第 2 层 DCT 域嵌入水印的公式如式(6)所示。式中,  $F(u,v)$  为 DCT 域第  $u$  行  $v$  列的系数值,  $\tilde{F}(u,v)$  表示嵌入水印后的 DCT 域第  $u$  行  $v$  列系数值,  $\Delta$  为水印的嵌入强度,  $w_k$  表示嵌入第  $k$  个水印信号。函数  $\text{sgn}(\cdot)$  表示取数值的正负号。  $T(u,v)$  为第

值得注意的是,改变频域某些系数导致了空域某些像素过大的改变,很可能引起显著图像噪声,例如图 1(e)和图 1(i)所示,因此,不宜选择这些频域系数嵌入水印。为了兼顾水印信号的鲁棒性和掩蔽性,选取了如图 2 所示的频域系数位置用来嵌入水印信号(1 为可以嵌入位置,0 为不能嵌入位置)。

图 1(a)~(i)中的数据特点,如果空域块中像素改变的最大值越大,由于其平均嵌入强度大,其对应的嵌入阈值也应越大。因此,设频域系数的嵌入阈值关系如下:

$$T(3,2) = T(2,3) > T(1,3) = T(3,1) > T(3,3) \quad (5)$$

图像的纹理越复杂,它可掩蔽的水印信号就越强<sup>[11]</sup>。为了增强水印的鲁棒性,并根据整数 DCT 变换的整数特点,可将水印嵌入的强度分为几个等级。本文算法的水印嵌入强度分为两个等级:

1 级水印嵌入强度阈值,  $T_2(u,v)$  为第 2 级水印嵌入强度阈值。  $\delta_1$  与  $\delta_2$  分别为第 1 级和第 2 级水印嵌入强度。提高嵌入强度可以增强水印的鲁棒性,不过会导致图像的信噪比下降和水印的掩蔽性会降低。

### 3.2 图像分块变换的纹理特点

HVS 具有有限的视觉敏感度,当信号强度低于一定阈值时,人眼就很难观测到,并且信号在不同的背景纹理下,人眼对信号的敏感度也不一样,在复杂

纹理背景下人眼观测到信号的阈值就比简单纹理背景下的阈值大<sup>[12]</sup>。因此,选择在图像纹理复杂的区域嵌入水印就有更好的掩蔽性。图像纹理越复杂,图像的交流能量就越大,可通过计算图像块的交流能量大小来衡量图像纹理的复杂度,其  $4 \times 4$  块的交流能量  $P_{ij}$  为

$$P_{ij} = \sum_{u=1}^4 \sum_{v=1}^4 F_{ij}^2(u,v) - F_{ij}^2(1,1) \quad (7)$$

式中,  $P_{ij}$  表示第  $(i,j)$  个  $4 \times 4$  块的交流能量大小,  $F_{ij}(u,v)$  表示对应的  $4 \times 4$  块频域系数  $(u,v)$  的值,交流能量的计算并没加入直流分量(DC)的能量值。为了限制水印信号在纹理复杂的图像区域嵌入,可以预先根据水印大小计算一个交流能量阈值  $Th$  来限制水印信号嵌入图像的区域。这样可以很好地限制水印嵌入在原图中纹理复杂的区域。其  $Th$  求解可按如下步骤实现:

(1)把图像划分为  $4 \times 4$  不重叠的块,再对每个块进行整数 DCT 变换;

(2)根据式(6)的嵌入阈值计算每个块中可嵌入水印信号的数量;

(3)按式(7)计算每个块的交流能量值;

(4)将每个块的交流能量值按从大到小排序,并统计每一交流能量阈值所能嵌入的水印数量;

(5)找出等于或恰好大于需嵌入水印数量的图像块交流能量阈值  $Th$ 。

实验表明,该算法很好地限制了水印信号嵌入在原图中纹理复杂的区域。图 3 为 Lena 原图,图 4 为提取原图每个块的 DC 系数组成的一幅新图,实际大小为原图的  $1/16$ 。图 5 为图 4 对应的交流能量图,图中能量越高显示的亮度也越亮。图 6 显示了可以嵌入 2 304 个水印信号的区域以及嵌入水印信号后在原图中产生的纹理改变情况,图 7 为不同交流能量阈值与嵌入水印个数关系曲线。可以看出,水印信号不仅被限制在了图像纹理复杂的区域嵌入,并且嵌入水印信号对原图引起的纹理改变和原图的纹理近似,因此,水印信号更好地被掩蔽在原图中。



图 3 Lena 原图

Fig. 3 Lena original image

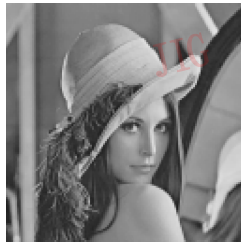


图 4 DC 系数图

Fig. 4 DC image



图 5 交流能量图

Fig. 5 AC energy image

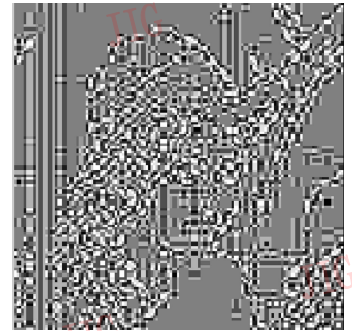


图 6 水印纹理图

Fig. 6 Watermark texture

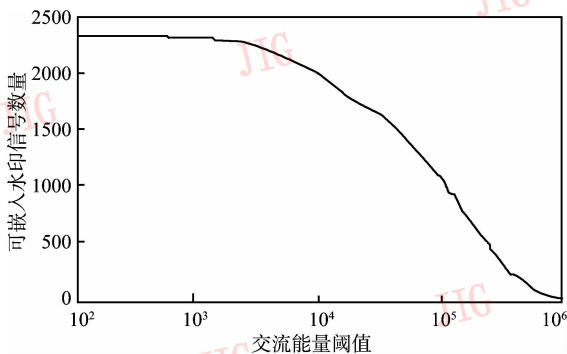


图 7 嵌入个数与能量阈值曲线

Fig. 7 Watermark number and energy threshold relation

### 3.3 水印嵌入算法

在嵌入水印前,需要对水印图像进行一些预处理。

可采用混沌技术对水印置乱<sup>[13]</sup>,置乱后代水印信号近似服从高斯分布,可以在一定程度提高水印信号的鲁棒性。接着按照如下的步骤进行。

(1)将图像  $f$  划分为  $4 \times 4$  大小不重叠的块,然后将每个块进行整数 DCT 变换;

(2)提取每个块的直流系数(DC),组成一幅新图  $f_2$ ;

(3)将  $f_2$  划分为  $4 \times 4$  大小不重叠的块,然后将每个块进行整数 DCT 变换。并用式(7)计算每个块的交流能量;

(4)由水印大小计算交流能量阈值  $Th$ ;

(5)顺序找出交流能量大于  $Th$  的块。对可以嵌入水印的 DCT 系数按照式(6)进行水印嵌入。得

到嵌入水印后的 DCT 块;

(6) 将嵌入水印后的  $4 \times 4$  DCT 块进行逆整数 DCT 变换得到  $\tilde{f}_2$ , 然后将  $\tilde{f}_2$  中的系数值  $\tilde{f}_2(x, y)$  的值按照对应关系替换  $F_{xy}(1, 1)$ , 即替换原每个块中的直流系数。便得到嵌入水印嵌入后图像  $\tilde{f}_1$  的频域矩阵  $\tilde{F}_1$ 。

(7) 将  $\tilde{F}_1$  中的每个块进行逆整数 DCT 变换, 组合便得到嵌入水印后的图像  $\tilde{f}_1$ 。

### 3.4 水印容量分析

若载体图像大小为  $M \times N$ , 并按照图 2 所示, 选择嵌入系数, 那么第 2 层图像大小为  $M \times N/16$ , 可嵌入的频域系数为  $M \times N \times 5/256$ 。当水印大小小于该数时, 通过设定频域系数的嵌入阈值和交流能量阈值  $Th$  来限制水印信号嵌入的图像块及频域系数。当需要嵌入水印量较大, 可将部分水印信号嵌入到第 1 层图像块的频域系数。其嵌入方法和第 2 层相同。由于第 1 层 DCT 的低频系数嵌入水印后有较好的掩蔽性, 但是其鲁棒性比第 2 层 DCT 系数较差。因此, 可以将重要的水印信息嵌入到第 2 层, 较一般的水印信息嵌入第 1 层, 这样在图像视觉效果良好的条件下嵌入更多的水印信息, 并保证了水印信号的鲁棒性。

## 4 水印提取

水印的提取过程可以认为是嵌入过程的逆过程。设接收到的图像为  $\hat{f}$ 。首先采用类似于嵌入过程的方法对接收到的图像进行两次整数 DCT 变换, 根据嵌入的高频能量阈值找出可以嵌入水印的 DCT 块  $\hat{F}_{2ij}$ , 然后采用如下算法来检测水印信号的值:

$$\hat{w}_k = \begin{cases} 1 & |\hat{F}_{2ij}(u', v') - F_{2ij}(u', v')| \geq \frac{\Delta(u', v')}{2} \\ 0 & |\hat{F}_{2ij}(u', v') - F_{2ij}(u', v')| < \frac{\Delta(u', v')}{2} \end{cases} \quad (8)$$

最后将提取出来的水印图像进行混沌解码, 便得到了提取出来的水印图像  $\hat{w}$ 。设原始的水印图像为  $w$ , 利用  $\hat{w}$  与  $w$  的相关性大小  $R$  来判断水印的提取质量:

$$R(w, \hat{w}) = \frac{\sum_{k=1}^N w_k \cdot \hat{w}_k}{\left( \sum_{k=1}^N (\hat{w}_k)^2 \cdot \sum_{k=1}^N (w_k)^2 \right)^{1/2}} \quad (9)$$

相关程度  $R$  越高说明水印提取出来的质量越好, 其鲁棒性也就越好。

## 5 实验结果

实验用的原始图像大小为  $512 \times 512$  的 256 级灰度图像(如图 3 所示), 水印图像为  $48 \times 48$  二值图像。图 8 为原始水印图像, 图 9 混沌置乱后水印图像。设置频域系数嵌入阈值为  $T(3, 2) = T(2, 3) = 3.2$ ,  $T(1, 3) = T(3, 1) = 2.8, T(3, 3) = 2.5$ 。第 2 级门限阈值设置  $T_2 = (1, 3) = T_2(3, 1) = T_2(3, 3) = 3, T_2(3, 2) = T_2(2, 3) = 6$ 。由于不同的嵌入强度将导致不同的鲁棒性和掩蔽性, 因此, 本文测试了在 4 种嵌入强度模式下水印信号的掩蔽性和鲁棒性:

- A ( $\delta_1 = 1, \delta_2 = 1$ )      B ( $\delta_1 = 1, \delta_2 = 2$ )
- C ( $\delta_1 = 2, \delta_2 = 2$ )      D ( $\delta_1 = 2, \delta_2 = 3$ )



图 8 水印图像图  
Fig. 8 watermark



图 9 混沌置乱水印图像  
Fig. 9 chaos disordered

### 5.1 水印掩蔽性分析

嵌入水印后, 水印信号的视觉掩蔽性可用峰值信噪比(PSNR)来判断。图 10 显示了 4 种嵌入强度模式下嵌入水印后的图像。可以看出, 水印信号在模式 A、B、C 下掩蔽性很好, 模式 D 水印的掩蔽性稍差。另外图 11 显示嵌入的水印纹理, 为了显示清楚,



图 10 在每种模式下嵌入水印后的图像  
Fig. 10 Watermarked image of each embed patter

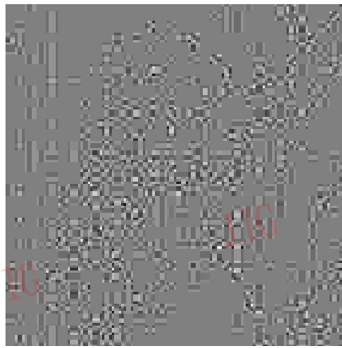
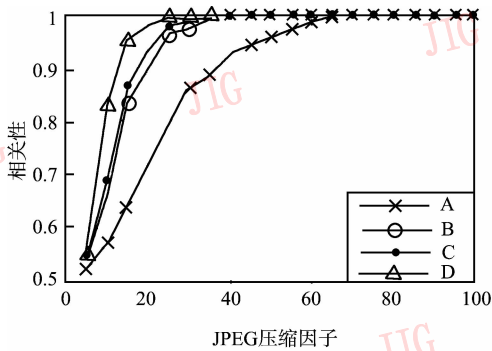


图 11 嵌入的水印纹理

Fig. 11 Watermark texture

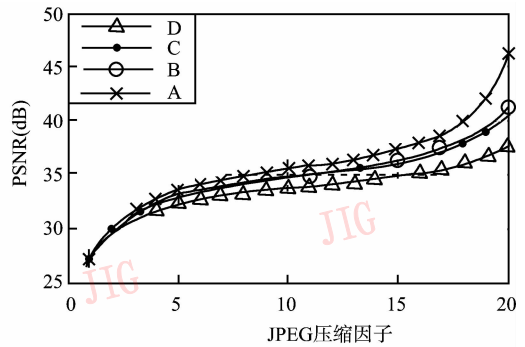


(a)相关性 with JPEG 压缩因子关系

其显示的改变值在背景灰度值 125 下放大了 10 倍。可见,水印信号被嵌入到图像纹理复杂的区域,并且嵌入的水印信号和载体图像中的纹理近似,因此有更好的掩蔽性。

### 5.2 水印鲁棒性测试

为了验证水印鲁棒性,对图像进行一些攻击。图 12 显示了在 4 种嵌入强度模式下水印抗 JPEG 压缩的关系曲线,表 1 分别列出了在加性噪声攻击、中值滤波以及马赛克攻击下水印鲁棒性数据。实验数据表明,嵌入强度模式 D 具有很好的鲁棒性,嵌入强度模式 A 鲁棒性相对较弱。如果结合鲁棒性和掩蔽性



(b)PSNR with JPEG 压缩因子关系

图 12 抗 JPEG 压缩鲁棒性

Fig. 12 Robustness versus JPEG compression

表 1 抗部分攻击鲁棒性

Tab.1 Robustness versus some attacks

攻击	相关性 (%)				PSNR (dB)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
高僧噪声方差为 0.002	69.3	87.2	89.1	97.7	27.96	26.82	26.82	26.64
高僧噪声方差为 0.004	62.7	76.6	79.2	90.1	23.94	23.90	23.93	23.81
椒盐噪声密度为 1%	66.1	81.7	84.6	93.4	22.38	25.44	25.30	25.33
椒盐噪声密度为 2%	60.0	70.4	73.8	84.6	25.42	22.53	22.31	22.36
3 × 3 中值滤波	62.5	75.9	78.1	85.2	33.74	33.52	33.44	33.03
2 × 2 马赛克攻击	81.8	92.7	93.4	97.0	30.10	29.87	29.81	29.46
3 × 3 马赛克攻击	52.3	59.8	61.9	69.6	28.14	28.02	27.99	27.82

考虑,嵌入强度模式 B、C 综合性能最好。为了说明本文提出算法的优越性,将本文算法与文献[7]提出的整数 DCT 水印算法进行比较,如表 2 所示,数据显示,本文算法具有比文献[7]算法(TT 所在列)更好的抗攻击性能,尤其是抗 JPEG 压缩能力。

表 2 鲁棒性比较  
Tab.2 Robustness comparison

攻击	相关性(%)				
	A	B	C	D	TT
无攻击	100	100	100	100	93
高噪声方差为 0.001	78.3	94.8	96.6	99.6	93
高噪声方差为 0.003	63.9	81.1	83.6	94.0	63
JPEG 压缩因子为 80	100	100	100	100	90
JPEG 压缩因子为 40	92.3	99.6	100	100	73
3×3 中值滤波	62.5	76.0	78.1	85.2	63

## 6 结 论

根据整数 DCT 变换特性,对频域系数的鲁棒性和掩蔽性进行分析,提出了基于整数 DCT 变换的新水印算法。实验测试了在不同嵌入强度水印嵌入下算法的掩蔽性和鲁棒性。实验数据表明,随着嵌入强度的增加,其 BER 降低,但 PSNR 也会降低,综合考虑鲁棒性和掩蔽性要求,嵌入强度模式 B、C 达到了该算法综合性能的最优。比如嵌入强度模式 C,水印嵌入图像后 PSNR 为 40.68dB,并且水印嵌入到图像纹理复杂区域,表明该算法具有很好的掩蔽性。另外算法具有很好的抗 JPEG 压缩性能,在噪声和滤波等攻击下也具有很好的免疫能力,即使是在 3×3 的马赛克攻击下也能提取出水印图像,表明算法具有很好的鲁棒性。

由于采用的是和 H. 264 标准相同的整数 DCT 变换,具有算法速度快,便于硬件实现的特点,后续的工作将研究如何把该算法和 H. 264 标准结合起来,实现视频水印嵌入。

### 参考文献 (References)

1 Bao Chui-mei. Digital watermarking and applications for copyright

protecting of digital works [J]. *New Technology of Library and Information Service*, 2006, (6): 64 ~ 68 [鲍翠梅. 数字水印及其在数字作品版权保护中的应用[J]. *现代图书情报技术*, 2006, (6): 64 ~ 68.]

- Bami M, Bartolini F, Cappellini V, *et al.* A DCT-domain system for robust image watermarking[J]. *Signal Processing (Special Issue on Watermarking)*, 1998, **66** (5): 357 ~ 372.
- Cox I J, Kilian J, TLeighton, *et al.* Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. *IEEE Transactions on image Processing*, Jan., 1997, **12** (1): 1673 ~ 1687.
- Huang Ji-wu, Shi Y Q, Chen Wei-dong. Embedding strategy for image watermarking in DCT domain [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, **28**(4): 58 ~ 61. [黄继武, Shi Y Q, 程卫东. DCT 域图像水印: 嵌入对策和算法[J]. *电子学报*, 2000, **28**(4): 58 ~ 61.]
- Jayant N, Johnston J, Safranek R. Signal compression based on model of human perception [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1993. **81** (10): 1385 ~ 1422.
- Watson B. DCT quantization matrices visually optimized for individual images [J]. *SPIE: Human Vision, Visual Processing and Digital Display IV*, 1913, **1913**: 202 ~ 216.
- Zhang J, Ho A T S. An efficient digital image-in-image watermarking algorithm using the integer discrete cosine transform (IntDCT) [A]. In: *Proceedings of ICIS PCM [C]*, Singapore, 2003: 1163 ~ 1167.
- Malvar H, Hallapuro A, Karczewicz M. *et al.* Kerofsky: Low-complexity transform and quantization in H. 264/AVC [J]. *IEEE Transactions on Circuits and System Video Techndogy*, 2003. **13**(7): 637 ~ 644.
- Iwahashi M, Nakagawa K, Chokchaitam S, *et al.* Theoretical analysis on optimum word length assignment for integer DCT [J]. *Image Processing*, 2004, **4**(8): 2507 ~ 2510.
- Haykin S, Xiao B L. Detection of signals in chaos [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1995, **83**(1): 95 ~ 122.
- Huang Biao-bing, Tang Shao-xian. A contrast-sensitive visible watermarking scheme [J]. *Multimedia of IEEE*, 2006: **13**(4) ~ (7): 60 ~ 66.
- Delaigle J F, Devleeschouwer C, Macq B, *et al.* Human visual system features enabling watermarking [A]. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo [C]*, Switzerland, 2002: 489 ~ 492.
- Lu Jin-hu, Lu Jun-an, Chen Shi-hua. *Chaos Time Sequence [M]*. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. [吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 55 ~ 83.]