

# 基于关系的 DCT 域盲水印算法

杜高峰<sup>1)</sup> 王慧琴<sup>1),2)</sup> 白梅<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 西安 710055) <sup>2)</sup>(西安交通大学—彩虹集团公司博士后流动站, 西安 710049)

**摘要** 为了更好地进行版权保护,提出一种基于关系的 DCT 域盲提取数字水印算法。首先,对原始图像进行  $8 \times 8$  分块的高余弦变换,根据变换后每一块内的直流系数和中频系数的关系得到一个极性矩阵,将该极性矩阵与最佳置乱处理后的二值水印图像进行对比,根据对比的结果对载体图像的中频系数进行修改达到水印嵌入的目的。在水印的提取过程中不需要原始图像,实现了水印的盲提取。大量的仿真实验结果表明了该算法的有效性。

**关键词** 数字水印 离散余弦变换 置乱 极性矩阵 盲提取

**中图分类号**: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)11-2026-05

## A Blind Watermarking Algorithm Based on the Relationship of Coefficients in DCT Domain

DU Gao-feng<sup>1)</sup>, WANG Hui-qin<sup>1),2)</sup>, BAI Mei<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Information and Control Institute of Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055)

<sup>2)</sup>(Postdoctoral Research Station of Xi'an Jiaotong University-Caihong Corporation, Xi'an 710049)

**Abstract** A blind watermarking algorithm based on the relationship of coefficients in the Discrete Cosine Transform (DCT) domain is proposed. Firstly, the original image is divided into non-overlapping  $8 \times 8$ -pixels blocks, and each block is independently transformed to frequency domain through 2D-DCT. Secondly, according to the relationship of DC and middle-frequency coefficients, a polarity matrix is obtained; and then compare the polarity matrix with binary watermark image after scrambling. Finally, the middle-frequency coefficients of the original image are modified in terms of the comparison result to get the watermarked image. The binary watermark is extracted from the watermarked image without the original image. The experimental results show that the algorithm is invisible and robust against the general image processing methods.

**Keywords** digital watermarking, discrete cosine transform, scrambling, polarity matrix, blind extracting

## 1 引言

随着信息技术和计算机网络技术的快速发展,数字多媒体信息(图像、文本、音频、视频)的存储、复制与传播变得非常的方便和快捷,在给人们带来方便的同时,也带来了许多安全隐患。如何有效地防范对信息的非法复制和传播,是版权保护中的一个重要问题。数字水印技术(digital watermarking)

是一种信息隐藏技术,它的出现为解决版权保护问题提供了一种新的方案,其基本思想是在数字图像、音频和视频等数字产品中嵌入一定的秘密信息,以便保护数字产品的版权、证明产品的真实可靠性、跟踪盗版行为或者提供产品的附加信息<sup>[1]</sup>。

目前,大多数数字水印算法是将水印信息利用加性方式或者乘性方式以一定的强度嵌入到载体图像的空间域或频率域的系数中。本文提出的是一种新的基于关系的 DCT 域盲提取水印算法,该算法的

基金项目:陕西省教育厅产业化培育计划项目(02JC40);陕西省自然科学基金研究计划项目(2005F50)

收稿日期:2006-04-26;改回日期:2006-08-14

第一作者简介:杜高峰(1981-),男,西安建筑科技大学信息与控制工程学院计算机应用技术专业硕士研究生。主要研究方向为数字图像处理与多媒体通信。E-mail: loyesi@163.com

特点在于不是将二值水印图像直接嵌入到载体图像中,而是利用载体图像 DCT 变换后的直流系数和中频系数之间的关系来代表水印信息。大量实验结果表明,本文算法在满足水印信号不可见性的前提下,具有良好的鲁棒性。

## 2 基于块内关系的水印算法描述

基于关系的水印算法的基本思想是:预先设定两个系数或者特征量的一种关系为“0”,另一种关系为“1”,嵌入水印时判断两个系数或特征量间的关系是否与水印位一致,一致时保持不变,而不一致时通过一定的修改方法使两个系数或特征量间的关系满足水印位所代表的关系<sup>[1]</sup>。本文所提出的算法是利用载体图像 DCT 变换后的直流系数和中频系数之间的关系来嵌入水印。由于水印嵌入到高频系数中鲁棒性差<sup>[2,3]</sup>,而图像的主要信息集中在直流系数和低频系数中,水印嵌入到这部分系数中容易引起载体图像的失真。因此,选择中频系数来嵌入水印可以很好地平衡不可见性和鲁棒性之间的矛盾。算法框图如图 1 所示。

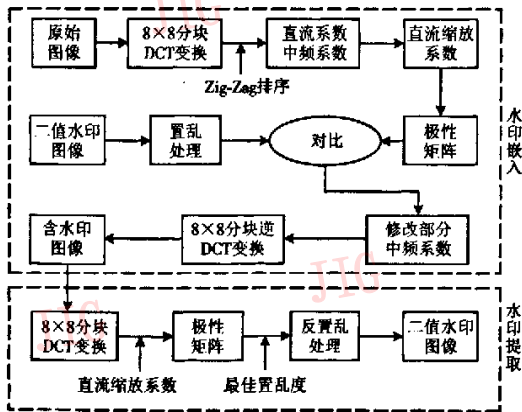


图 1 水印算法框图

Fig. 1 Watermarking algorithm

首先将原始图像分成一系列  $8 \times 8$  的小块,并对每一块进行 DCT 变换,然后对变换后的每一块的系数矩阵进行 Zig-Zag 排序,根据直流系数和待嵌入水印的中频系数之间的能量关系得到一组直流系数的缩放系数,通过判断得到一个极性矩阵(即 0 和 1 组成的一个二值矩阵),将该极性矩阵与置乱处理后的二值水印图像进行比较,当极性矩阵和水印位一

致时保持不变,否则,修改相应的中频系数使极性矩阵和水印位一致,最后对整个系数矩阵进行  $8 \times 8$  分块逆 DCT 变换得到含水印的图像。水印提取过程非常简单,只需要含水印的图像、嵌入时得到的直流缩放系数以及置乱参数(后两个作为提取水印的密钥),对含水印图像进行  $8 \times 8$  分块 DCT 变换,再结合直流缩放系数就可以得到一个代表水印信息的极性矩阵,最后对该极性矩阵进行反置乱处理就可以恢复出水印图像。

## 3 水印嵌入过程

将含有版权信息的二值图像作为水印信息,嵌入到灰度图像中。具体的嵌入过程如下:

(1) 对二值水印图像  $w$  进行最佳置乱处理得到置乱后的二值水印图像  $w'$ 。

采用 Arnold 变换来对水印图像进行置乱处理。因为 Arnold 置乱具有一个显著的优点<sup>[4,5]</sup>:水印图像经 Arnold 置乱处理后再嵌入到载体图像中,当含水印的图像受到攻击时,图像的某一部分通常会遭到损坏或丢失(例如剪切),这样以来所嵌入的水印图像也可能遭到损坏或丢失,当对提取出的水印图像进行反置乱处理之后这样的损坏或丢失就会分散到整幅图像中,从而减少了其对入眼视觉的影响,相应地提高了水印的鲁棒性。此外,Arnold 变换还具有周期性,所以,可以找到一个相对的最佳置乱度,并将最佳置乱度作为水印提取时的密钥以增加水印的安全性。

定义最佳置乱度为:设对于给定的 1 幅二值水印图像,其 Arnold 变换的周期为  $T$ ,对水印图像进行  $n$  ( $n \leq T$ ) 次迭代以达到置乱的目的。如果某次置乱后的二值水印图像与极性矩阵进行异或操作所得到的二值矩阵中“1”的个数最少,此时置乱的迭代次数  $n$  就称为最佳置乱度,此时的置乱效果就为最佳置乱。最佳置乱度与原始图像和二值水印图像都具有密切的关系。采用最佳置乱度的优点是在进行水印嵌入时需要修改的中频系数的个数最少,因而可以很好地保证水印的不可见性。

(2) 对原始图像进行  $8 \times 8$  分块 DCT 变换,并计算极性矩阵  $P$ 。

预先设定直流系数和中频系数之间的两种关系,当中频系数大于直流系数与对应的缩放系数的乘积时,判定为“1”;否则,判定为“0”。按下式进行计算:

$$P(x, y) = \begin{cases} 1 & |X_{i,k}| > |s_k * X_{0,k}| \\ 0 & |X_{i,k}| \leq |s_k * X_{0,k}| \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $X_{0,k}$  表示第  $k$  块的直流系数,  $X_{i,k}$  表示第  $k$  块的第  $i$  个中频系数,  $s_k$  为第  $k$  块的直流系数的缩放系数, 它的取值要以鲁棒性和不可见性为依据。算法中用到的  $s_k$  根据下式得到:

$$s_k = \frac{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |X_{i,k}|}{|X_{0,k}|} \quad (2)$$

式中,  $M$  表示每一块中应嵌入水印的位数,  $K$  表示原始图像总的块数,  $0 < k \leq K$ 。通过这种方法得到的缩放系数是自适应的, 不同的原始图像或原始图像中不同的块将对应不同的缩放系数, 这样可以使极性矩阵中“0”和“1”的个数比较接近, 保证了在嵌入水印时中频系数的修改量尽可能地小, 同时也保证了含水印图像的视觉效果。

(3) 按下式进行水印的嵌入:

$$X^*(i, j) = \begin{cases} X(i, j) \pm \delta_m & P(i, j) = 0 \text{ 且 } \hat{w}(i, j) = 1 \\ X(i, j) \mp \tau_n & P(i, j) = 1 \text{ 且 } \hat{w}(i, j) = 0 \\ X(i, j) & P(i, j) = \hat{w}(i, j) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $X(i, j)$  和  $X^*(i, j)$  分别为嵌入水印前后的 DCT 系数,  $\delta_m$  和  $\tau_n$  为修改量,  $m + n = M \times K$ 。当  $X(i, j)$  大于 0 时,  $\delta_m$  取正号,  $\tau_n$  取负号; 反之,  $\delta_m$  取负号,  $\tau_n$  取正号。  $\delta_m$  和  $\tau_n$  由下式得到:

$$\begin{cases} \delta_m = |s_k * X_{0,k}| - |X_{i,k}| + \varepsilon & |X_{i,k}| \leq |s_k * X_{0,k}| \\ \tau_n = |X_{i,k}| - |s_k * X_{0,k}| + \varepsilon & |X_{i,k}| > |s_k * X_{0,k}| \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\varepsilon$  为一个合适的正数, 当  $\varepsilon$  取得过大时水印的不可见性差; 而当  $\varepsilon$  取得过小时提取出的水印图像的视觉效果差、对攻击的鲁棒性也比较弱。经过反复实验得出,  $\varepsilon$  取 4 时的效果最好, 可以使不可见性和鲁棒性这对矛盾之间达到很好的折中。根据这种方法得到的中频系数的修改量与每一个中频系数是一一对应的, 这样保证了原始图像在没有明显失真的前提下, 修改之后的直流系数和中频系数之间的关系能够完全反映水印信息。

(4) 对第 3 步得到的系数矩阵  $X^*(i, j)$  进行  $8 \times 8$  分块逆 DCT 变换就可以得到嵌入水印后的图像。

## 4 水印提取过程

水印的提取过程非常简单, 且不需要原始图像。

具体过程如下:

(1) 对嵌入水印后的图像进行  $8 \times 8$  分块的 DCT 变换, 再结合水印嵌入过程中得到的直流缩放系数  $s_k$  (将  $s_k$  作为提取水印的密钥), 计算代表水印信息的极性矩阵  $\hat{P}$ , 判定规则与嵌入过程相同, 按下式进行计算:

$$\hat{P}(x, y) = \begin{cases} 1 & |X_{i,k}^*| > |s_k * X_{0,k}^*| \\ 0 & |X_{i,k}^*| \leq |s_k * X_{0,k}^*| \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $X_{0,k}^*$  表示含水印图像 DCT 变换后的第  $k$  块的直流系数,  $X_{i,k}^*$  表示第  $k$  块的第  $i$  个中频系数。

(2) 根据嵌入过程中得到的最佳置乱度 (将最佳置乱度作为提取水印的密钥) 对极性矩阵  $\hat{P}$  进行反置乱处理就可以恢复出二值水印图像。

## 5 仿真实验及结果

为了验证算法的有效性, 实验中利用 MATLAB6.5 对算法进行了仿真, 所用的原始图像为  $256 \times 256$  灰度级的 Lena 图像, 水印图像采用  $64 \times 64$  的二值图像。实验过程中最佳置乱度为 29。经过多次实验,  $\varepsilon$  取 4 鲁棒性最好。实验结果如图 1 和图 2 所示。



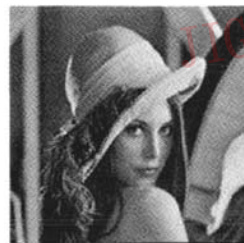
(a) 原始图像

数字  
水印

(b) 水印图像

图 1 原始图像与水印图像

Fig. 1 Original image and watermark image



(a) 嵌入水印后的图像

数字  
水印

(b) 从(a)中提取出的水印

图 2 嵌入水印后的图像与从中提取出的水印

Fig. 2 Watermarked image and extracted watermark

从图 1(a)和图 2(a)可以看出,视觉上人眼很难分辨出嵌入水印后的图像和原始图像的区别,说明水印具有很好的不可见性。因为本文是将有意义的二值图像作为水印,所以可以从以下两个方面来评价提取出的水印图像的效果。一是将人眼观察作为主观评价标准;二是将误判率和相似性  $NC$  作为客观评价标准。定义:

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j (w(i, j) \hat{w}(i, j))}{\sum_i \sum_j [w(i, j)]^2} \quad (6)$$

式中,  $w(i, j)$  表示原始水印图像,  $\hat{w}(i, j)$  表示提取出的水印图像。误判率越小说明提取出的水印图像效果越好;  $NC$  值越接近于 1, 表明提取出的水印越接近于原始水印图像。

在未受攻击的条件下, 提取出的水印图像如图 2(b)所示, 从此图可以看出, 其视觉效果是令人满意的, 另外, 从表 1 得出客观分析的结果也是令人满意的,  $NC$  值可以达到 1, 而误判率只有 0.01。

表 1 常见图像处理对提取结果的影响

Tab. 1 Effect of general image processing on extraction

攻击方法	$NC$ 值	误判率
无攻击	1.00	0.01
剪切 1/8	0.95	0.05
剪切 1/4	0.84	0.10
90% JPEG 压缩	0.94	0.07
70% JPEG 压缩	0.88	0.12
强度为 0.02 的椒盐噪声	0.94	0.10
强度为 0.1 的椒盐噪声	0.84	0.18
3 × 3 中值滤波	0.46	0.57

为了测试算法的鲁棒性, 对嵌入水印后的 Lena 图像分别进行了剪切、JPEG 压缩和加噪处理等几种常见的攻击。实验结果分别如图 3(b)、图 4(b)和图 5(b)所示。从实验结果可以看出, 虽然在攻击条件下提取出的水印图像有一定的失真, 但是人眼还是能很容易地分辨出水印信息, 说明算法具有较强的鲁棒性。

另外, 表 1 给出了较详细的实验分析结果。包括: (1) 在未受攻击条件下, 提取出的水印图像的效果; (2) 嵌入水印后的图像被剪切掉 1/8 和 1/4 后所提取出的水印图像的效果; (3) 嵌入水印后的图像经过不同质量系数的 JPEG 压缩后所提取出的水印图像的效果; (4) 嵌入水印后的图像被加入不同



(a) 剪切掉 1/8 后的含水印图像

数字  
水印

(b) 从(a)中提取出的水印

图 3 剪切掉后的含水印图像和从中提取的水印

Fig. 3 Cropped watermarked image and extracted watermark



(a) 70% 的 JPEG 压缩后的  
含水印图像

数字  
水印

(b) 从(a)中提取出的水印

图 4 JPEG 压缩后的含水印图像和从中提取的水印

Fig. 4 Watermarked image after JPEG lossy compression and extracted watermark



(a) 加入椒盐噪声后的含水印图像

数字  
水印

(b) 从(a)中提取出的水印

图 5 椒盐噪声处理后的含水印图像和从中提取的水印

Fig. 5 Noisy watermarked image and extracted watermark

强度的椒盐噪声后所提取出的水印图像的效果; (5) 嵌入水印后的图像经过中值滤波后所提取出的水印图像的效果。

由表 1 可见, 算法对于常见的剪切、JPEG 压缩以及加椒盐噪声等攻击都具有较强的鲁棒性, 对中值滤波效果比较差。

## 6 结 论

本文具有以下特点: (1) 本文提出的水印算法

不是将原始水印图像直接嵌入到载体图像中,而是利用 DCT 变换后的直流系数和中频系数的关系来反映水印信息,安全性高;(2)水印的提取过程简单,实现了水印的盲提取;(3)嵌入过程中的缩放系数和修改量都是自适应的,有效地保证了水印的不可见性;(4)嵌入过程中对二值水印图像进行了最佳置乱,在增强了水印鲁棒性和不可见性的同时,也保证了水印的安全可靠性;(5)将缩放系数和最佳置乱度同时作为水印提取的密钥,增强了水印的安全性。本文算法的弱点是:对于经过滤波处理后的含水印图像,水印提取效果令人不太满意(如表 1 所示),因为滤波处理改变了图像的绝大多数像素值,严重地破坏了原来的关系。

今后的研究工作,一方面是对该算法进行更深入的研究,提高其抗滤波的能力;另一方面是将开展基于关系的小波域水印算法的研究。

#### 参考文献 (References)

1 Sun Sheng-he, Lu Zhe-ming, Niu Xia-mu. Digital Watermarking

Technology & Applications[M]. Beijing: Science Press, 2004:35 ~ 36. [孙圣和,陆哲明,牛夏牧. 数字水印技术及应用[M]. 北京: 科学出版社,2004: 35 ~ 36.]

2 Lin S D, Chen C F. A robust DCT-based watermarking for copyright protection[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46(3):415 ~ 421.

3 Su F L, Ma G Q, Ge H T. Robust image watermarking research based on DCT transform[A]. In: International Conferences on Info-tech and Info-net (ICIN' 2001) [C], Beijing, China, 2001, 5: 83 ~ 88.

4 Kang Jian-peng, Wu Xiao-bo, Zhu Wei-hua. Digital watermarking embedding algorithm based on arnold transform and image gradient [J]. Department of Logistical Information Engineering, 2004, (4): 1 ~ 3. [康健鹏,吴晓波,朱卫华. 基于 Arnold 变换和图象梯度的水印算法[J]. 后勤工程学院学报, 2004, (4): 1 ~ 3.]

5 Ding Wei, Yan Wei-qi, Qi Dong-xu. Digital image scrambling technology based on arnold transformation[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2001, 13(4): 338 ~ 341. [丁玮,阎伟齐,齐东旭. 基于 Arnold 变换的数字图像置乱技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(4): 338 ~ 341.]