

# 基于 DCT 的自适应盲数字水印

周晓娟, 孙建召

(河南经贸职业学院, 郑州 450018)

**摘要:** **目的** 为提高彩色图像数字水印的抗攻击性能, 提出一种新的、鲁棒性强的 DCT 自适应水印算法。**方法** 算法中利用 Arnold 变换对水印图像进行预处理, 自适应选择强度因子。根据 DCT 变换原理, 并利用其 DC 系数的形成过程, 不需进行 DCT 变换, 在空域中便可计算出  $8 \times 8$  分块的 DC 系数。根据 DC 系数修改量的分布特点, 直接在空域中完成水印的嵌入。**结果** 该数字水印算法具有良好的透明性和稳健性, 同时对涂抹、旋转、剪切、叠加噪声等常见攻击具有较强的鲁棒性。**结论** 该算法在保证水印隐蔽性的同时能够抵抗一定程度的攻击, 满足版权保护和数字防伪的需要。

**关键词:** 彩色图像; 数字水印; Arnold 变换; DCT 变换

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0192-05

## Self-Adaptive Blind Digital Watermarking Based on DCT

ZHOU Xiao-juan, SUN Jian-zhao

(Henan Institute of Economics and Trade, Zhengzhou 450018, China)

**ABSTRACT:** The work aims to put forward a new DCT self-adaptive watermarking algorithm with strong robustness to improve the anti-attack performance of color image digital watermarking. In the algorithm, Arnold transform was used to preprocess the watermark image, and the intensity factor was adaptively selected. According to the principle of DCT transform and by means of the formation process of its DC coefficient, DCT transform was not required and  $8 \times 8$  blocked DC coefficient could be calculated in the spatial domain. According to the distribution characteristics of DC coefficient modifiers, the watermark embedding was directly completed in the spatial domain. The digital watermarking algorithm had good transparency and robustness, and it also had strong robustness regarding painting, rotation, cutting, superimposed noise and other common assaults. The algorithm can ensure watermark concealment and it is also able to resist a certain level of attacks, which meets the needs of copyright protection and digital anti-counterfeit.

**KEY WORDS:** color images; digital watermarking; Arnold transform; DCT transform

随着数字技术的发展, 视频、音频、文本、图像等多媒体信息的存储、复制和传播已经变的十分便利, 但是同时也带来了版权归属和盗版的问题<sup>[1-2]</sup>。为解决相关问题, 数字水印技术应运而生并得到了快速发展。实践证明, 数字水印技术不仅不会影响产品的完整性和可观性, 而且可用于鉴别真伪、跟踪盗版行为<sup>[3-5]</sup>。目前, 数字水印算法较多, 可大体分为 2 类: 空域数字水印算法和频域数字水印算法<sup>[6]</sup>。空域水印法是在图像像素中直接键入水印信息, 该算法结构简单, 包含大量的信息, 但空域水印算法通常鲁棒

性较差; 频域水印法是对变换系数做适当调整将水印嵌入图像中, 该算法拥有较强的鲁棒特性。目前在图像水印算法中常用的变换域方法主要有离散傅里叶变换法(DFT)、离散余弦变换法(DCT)以及离散小波变换法(DWT)等<sup>[7-11]</sup>。

针对以上问题, 文中在离散余弦变换法的基础上, 提出了一种新的 DCT 彩色图像盲水印方法。算法中利用 Arnold 变换对水印图像进行预处理, 自适应选择强度因子。根据 DCT 变换原理, 并利用其 DC 系数的形成过程, 不需进行 DCT 变换, 在空域中便

收稿日期: 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(61572027)

作者简介: 周晓娟(1979—), 女, 硕士, 河南经贸职业学院讲师, 主要研究方向为电子政务、网络安全。

可计算出  $8 \times 8$  分块的 DC 系数。根据 DC 系数修改量的分布特点，直接在空域中完成水印的嵌入。该数字水印算法具有良好的透明性和稳健性，同时对涂抹、旋转、剪切、叠加噪声等常见攻击具有较强的鲁棒性。该算法在保证水印隐蔽性的同时能够抵抗一定程度的攻击，满足版权保护和数字防伪的需要。

### 1 DCT 变换

离散余弦变换(DisereteCosineTransform)简称为 DCT。离散余弦变换是一种线性变换，在图像处理领域中被广泛应用。在数字图像中使用的是二维 DCT，定义一幅大小为  $M \times N$  的图像  $I(x,y)(x=0,1,2...M-1; y=0,1,2...N-1)$ ，其 DCT 定义为：

$$T(u,v) = \alpha_\mu a_\nu \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x,y) \cos \frac{\pi(2x+1)\mu}{2M} \cos \frac{\pi(2y+1)\nu}{2N} \quad (1)$$

式中： $\alpha_\mu = \begin{cases} \sqrt{1/M}, \mu=0 \\ \sqrt{2/M}, 1 \leq \mu \leq M-1 \end{cases}$ ； $\alpha_\nu = \begin{cases} \sqrt{1/N}, \nu=0 \\ \sqrt{2/N}, 1 \leq \nu \leq N-1 \end{cases}$

此时离散反变换为：

$$I(x,y) = \sum_{\mu=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} a_\mu a_\nu T(u,v) \cos \frac{\pi(2x+1)\mu}{2M} \cos \frac{\pi(2y+1)\nu}{2N} \quad (2)$$

由式(1)可知，当  $\mu$  和  $\nu$  均为 0 时，即 DCT 域中的 DC 系数  $T(0,0)$  可以表示为：

$$T(0,0) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x,y) \quad (3)$$

在 DCT 中除了 DC 系数剩下的便是 AC 系数，因此，式(2)中 DCT 逆变换可以改写为：

$$I(x,y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} T(0,0) + I^{AC}(x,y) \quad (4)$$

式中： $I^{AC}(x,y)$  为经过 AC 分量重新构成的交流成分图像。

定义分块活的原始图像表示为：

$$I(x,y) = \{I_{i,j}(m,n), 0 \leq i < M/b, 0 \leq j < N/b, 0 < m, n < b\} \quad (5)$$

式中： $M$  和  $N$  为原图像的行列尺寸。

假设将嵌入水印  $W$  嵌入到 DC 系数的第  $(i,j)$  个字块中，其修改量为  $\Delta M_{i,j}$ ，则 DCT 域中  $(i,j)$  块 DC 系数嵌入水印的过程为：

$$T'_{i,j}(0,0) = T_{i,j}(0,0) + \Delta M_{i,j} \quad (6)$$

$$I'_{i,j}(m,n) = \frac{1}{b} T'_{i,j}(0,0) + I_{i,j}^{AC}(m,n) \quad (7)$$

式中： $T_{i,j}(0,0)$  为  $(i,j)$  的 DC 系数； $T'_{i,j}(0,0)$  为经过  $\Delta M_{i,j}$  修正好的 DC 系数； $T'_{i,j}(m,n)$  为含水印的图像。通过式(5)——(7)可以进一步得到：

$$\begin{aligned} I'_{i,j}(m,n) &= \frac{1}{b} T'_{i,j}(0,0) + I_{i,j}^{AC}(m,n) \\ &= \frac{1}{b} (T_{i,j}(0,0) + \Delta M_{i,j}) + I_{i,j}^{AC}(m,n) \\ &= \frac{1}{b} \Delta M_{i,j} + I_{i,j}(m,n) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)可以看出，在空域中将  $b \times b$  块内的每个像素增加  $\Delta M/b$  即可嵌入水印。

### 2 Arnold 变换和嵌入强度因子的确定

#### 2.1 Arnold 变换

为了提高彩色图像水印算法的安全性，采用 Arnold 变换对水印图像进行加密预处理。假设像素坐标为  $x,y \in \{0,1,...N-1\}$ ，Arnold 变换为<sup>[12-14]</sup>：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N} \quad (9)$$

通过式(9)对图像每个像素点进行 Arnold 变换，从而产生了置乱后的水印像素。

#### 2.2 嵌入强度因子

将原始图像  $I(x,y)$  分为  $K$  个  $8 \times 8$  的子块，记为  $I_k(x',y')$ ， $0 \leq x',y' \leq 7(k=0,1...K-1)$ ；每个图像子块都进行 DCT 变换，图像字块经过变换后的系数定义为  $I_k(u',v')(u',v'=0,1,2...(K/2)-1)$ 。

利用信噪比：

$$SNR = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} T_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} (T'_k - T_k)^2}} \quad (10)$$

各图像子块嵌入强度因子<sup>[15-16]</sup>的计算方法是通过各图像子块的嵌入规则  $T'_k = T_k + \alpha_k w_i$ ，有：

$$SNR = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} T_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} (T'_k - T_k)^2}} = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} F_k^2}}{\alpha_k \sqrt{\sum_i (w_i)^2}} \quad (11)$$

由此可得：

$$\alpha_k = \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} T_k^2}}{\sqrt{\sum_i (w_i)^2}} 10^{-\frac{SNR}{20}} \quad (11)$$

式中： $\alpha_k$  为嵌入强度。

将  $SNR=20$  dB 代入式(11)可得到阈值：

$$\bar{\alpha} = \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{K-1} T_k^2}}{10 \sqrt{\sum_i (w_i)^2}} \quad (12)$$

嵌入强度因子为：

$$\alpha_1 = \frac{L_{VAR} - \min L_{VAR}}{\max L_{VAR} - \min L_{VAR}} \quad (13)$$

$$\alpha_2 = \frac{L_{DC} - \min L_{DC}}{\max L_{DC} - \min L_{DC}} \quad (14)$$

式中： $\max L_{VAR}$ 、 $\min L_{VAR}$  分别为图像各个子块方差最大值和最小值； $\max L_{DC}$  和  $\min L_{DC}$  分别为图像各子块经过 DCT 变换后的 DC 分量的最大值和最小值。

### 3 水印算法实现

#### 3.1 水印嵌入

设图像大小为  $m' \times m'$ ，二值水印图像大小为  $n' \times n'$ 。实现具体方法为：将宿主图像由 RGB 空间转换到 YCrCb 空间；获得 YCrCb 中的 Y 分量，并将其分成大小为  $8 \times 8$  的非重叠的像素子块；根据式(3)，在空域中直接计算每一个图像字块内的 DC 系数  $T_{i,j}$ ；对大小为  $n' \times n'$  的二值水印图像进行重复  $t$  次 Arnold 变换，得到置乱的二值水印矩阵，再将经过置乱的水印矩阵转换为一维水印序列  $w_i$ ， $w_i$  由 0,1 组成  $i=0,1 \dots n' \times n'$ ；利用式(8)，将所有像素值加上  $MT_{i,j}/8$ ，对每个图像字块上，按照式(12)~(14)和式  $\alpha_r = \alpha_1 + \alpha_2$  计算阈值  $\bar{\alpha}$  和嵌入强度  $\alpha_r$ ，当  $\alpha_r < \bar{\alpha}$ ，则用式  $T_k(u',v') = I_k(u',v') + \alpha_r w_i$  修改图像子块中的频系数，否则就用阈值  $\bar{\alpha}$  作为该块的嵌入强度；嵌入水印完成后对图像进行进行反离散余弦变换，并生成并输出嵌入水印后的图像。

#### 3.2 水印提取

- 1) 转换含水印图像  $I'$  从 RGB 到 YCrCb 空间。
- 2) 将得到 Y 分量，分割成大小为  $8 \times 8$  的非重叠的像素子块。
- 3) 通过式(3)直接得到 DC 系数  $T_{i,j}(0,0)$ 。

4) 输入密钥  $n'$ (水印图像尺寸)、 $t$ (Arnold 变换次数)和  $n''$ (嵌入水印后的图像子块中被修改的频系数的个数)。

5) 利用 Arnold 对二维水印矩阵进行  $t$  次 Arnold 反变换，便可得到恢复的水印图像。

## 4 仿真实验和结果分析

### 4.1 水印系统评价参数

通常采用均方误差(MSE,  $R_{MSE}$ )准则的峰值信噪比(PSNR,  $R_{PSNR}$ )对图像水印透明性进行评价。均方误差  $\sigma$  和峰值信噪比  $R_{PSNR}$  为：

$$\sigma = \frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N [X'(i,j) - X(i,j)]^2 \quad (15)$$

$$R_{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2 \times 3}{E_{MSE}(R) + E_{MSE}(G) + E_{MSE}(B)} \quad (16)$$

根据人类视觉特点，若  $R_{PSNR} > 30$  dB 则说明该水印算法透明性好， $R_{PSNR}$  值越大说明水印透明性越好。用相关系数  $\rho$  对提取水印和原始水印图像相似度进行衡量， $\rho \in (0,1)$ ， $\rho$  越大说明二者相似度越大。其相似度  $\rho$  计算公式为：

$$\rho = \frac{\sum_i \sum_j w'(i,j)w(i,j)}{\sum_i \sum_j w^2(i,j)} \quad (17)$$

式中： $w'(i,j)$ 为提取的水印信息； $w(i,j)$ 为原始水印信息。

### 4.2 透明性检测

采用一幅  $256 \times 256$  的彩色 Lena 图像作为宿主图像，一幅  $50 \times 50$  的图像作为水印。实验前后的 2 幅图像见图 1 和图 2。



图 1 水印的嵌入与提取结果  
Fig.1 Watermark embedding and extraction results

彩色图像水印透明性用  $P_{PSNR}$  衡量；用  $\rho_w$  衡量提取的水印与原始水印的相似度；用  $\rho_i$  衡量经过提取得到的宿主图像与原始宿主图像之间的相似度。其实验数据为： $P_{PSNR}=30.2416$ ， $\rho_w=0.9985$ ， $\rho_i=1$ 。通过上面的实验数据可以看出：该水印嵌入算法，透

明性标准  $P_{PSNR} > 30$  dB，由此说明该水印算法的水印隐藏性好，由图 1b 也可以看出，从视觉上根本无法辨认是否嵌入了水印；由  $\rho_w=0.9985$  和  $\rho_i=1$  可以看出，该算法不仅能够很好地复原水印，而且能够更好地复原宿主图像。

### 4.3 算法鲁棒性检测

为了验证文中提出的水印算法的鲁棒性,对图像

中加入了叠加噪声、图像压缩、涂抹、剪切以及旋转等攻击。其测试结果见表 1。

表 1 遭受攻击后的水印检测结果  
Tab.1 Watermark test results after attacks

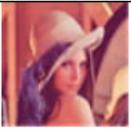
攻击类型	遭到攻击的图像	提取的水印	$\rho$	攻击类型	遭到攻击的图像	提取的水印	$\rho$
无攻击		<b>CGH</b>	0.9987	顺时针旋转90°		<b>CGH</b>	0.8655
涂抹		<b>CGH</b>	0.9722	JPEG压缩 (Q=90)		<b>CGH</b>	0.9356
高斯白噪声		<b>CGH</b>	0.9573	JPEG压缩 (Q=80)		<b>CGH</b>	0.9357
剪切		<b>CGH</b>	0.8625	JPEG压缩 (Q=70)		<b>CGH</b>	0.8677

表 1 中  $\rho$  为提取水印与原始水印的相似度,通过表 1 中数据可以看出文中提出的水印算法对涂抹、噪声、剪切以及 JPEG 压缩等攻击均具有很好的鲁棒特性。对于 JPEG 压缩,即使压缩质量因子降到 70,依然能够提取可以辨识版权的水印图像。

### 5 结语

彩色图像的数字水印广泛应用于版权保护、真伪鉴别等,为了提高水印算法的鲁棒性,提出了一种鲁棒性较强的自适应 DCT 域水印算法,该算法同时兼顾了水印的透明性和鲁棒性。实验结果证明,该算法非常适用于彩色图像水印嵌入,真正达到了水印嵌入彩色图像目的;在保证彩色图像水印透明性的前提下,能够很好的对水印图像进行提取;并对常见的图像涂抹、噪声、剪切以及 JPEG 压缩等攻击具有较强的鲁棒特性,是一种有效的彩色图像数字盲水印方法。

#### 参考文献:

[1] 柏均, 郑泽国. 基于 RGB 空间的 DCT 域彩色图像水印算法[J]. 现代电子技术, 2010, 33(4): 26—28.  
BAI Jun, ZHENG Ze-guo. Image Digital Watermarking Algorithm Based on RGB Color Space in DCT Domain [J]. Modern Electronic Technique, 2010, 33(4): 26—28.

[2] FARAH I R, ISMAIL I B, AHMED M B. A Water-

marking System Using the Wavelet Technique for Satellite Images[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2006, 17: 97—102.

[3] 孔玲君, 聂鹏. 一种基于 DWT-DCT 变换域的全息水印技术[J]. 光电子.激光, 2016, 27(2): 198—202.  
KONG Ling-jun, NIE Peng. A Holographic Digital Watermarking Technology Based on DWT-DCT Transform Domain[J]. Journal of Optoelectronics, Laser, 2016, 27(2): 198—202.

[4] 孙菁, 杨静宇, 傅德胜. 彩色图像四元数频域幅值调制水印算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 123—126.  
SUN Jing, YANG Jing-yu, FU De-sheng. Watermarking Algorithm for Color Images Based on Quaternion Frequency Modulation[J]. Computer Science, 2011, 38(3): 123—126.

[5] GUO Q, LIU Z J, LIU S T. Image Watermarking Algorithm Based on Fractional Fourier Transform and Random Phase Encoding[J]. Optics Communications, 2011, 284: 3918—3923.

[6] POLJICAK A, MANDIC L, AGIC D. Discrete Fourier Transform-based Watermarking Method with an Optimal Implementation Radius[J]. Electron. Imaging. 2011, 20(3): 869—882.

[7] 冯巍, 胡波. 基于超复数相位相关的彩色图像配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 183—187.  
FENG Wei, HU Bo. Novel Color Image Registration Algorithm Using Quaternion Phase-only Correlation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1): 183—187.

[8] SAMI B, LALA K, THAWAR A, et al. Watermarking

- of Digital Images in Frequency Domain[J]. International Journal of Automation and Computing, 2010, 7(1): 17—22.
- [9] LOU D C, TSO H K, LIU J L. A Copyright Protection Scheme for Digital Images Using Visual Cryptography Technique[J]. Computer Standards & Interfaces, 2007, 29(1): 125—131.
- [10] USMAN I, KHAN A. BCH Coding and Intelligent Watermark Embedding: Employing Both Frequency and Strength Selection[J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(1): 332—343.
- [11] 王定成, 田翠翠, 陈北京, 等. 基于四维四元数频域的彩色图像双重水印算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1336—1346.  
WANG Ding-cheng, TIAN Cui-cui, CHEN Bei-jing, et al. Dual Watermarking for Color Images Based on 4D Quaternion Frequency Domain[J]. Journal of University(Engineering and Technology Edition), 2015, 45(4): 1336—1346.
- [12] 司银女, 康宝生. 基于改进的 Arnold 变换的数字图像置乱[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(2): 74—76.  
SI Yin-nv, KANG Bao-sheng. Digital Image Scrambling Based on Improved Arnold Transformation[J]. Computer Technology and Development, 2008, 18(2): 74—76.
- [13] KANG X G, HUANG J W, ZENG W J. Efficient General Print-scanning Resilient Data Hiding Based on Uniform Log-polar Mapping[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(1): 1—11.
- [14] 白韬韬, 刘真, 卢鹏. 基于 QR 码的 Contourlet 域数字水印算法[J]. 光电子·激光, 2014, 25(4): 769—776.  
BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Digital Watermarking Scheme in Contourlet Domain Based on QR Code [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(4): 769—776.
- [15] QIN Chan, WEN Xian-bin. A Novel Digital Watermarking Algorithm in Contourlet Domain[J]. Journal of Information and Computational Science, 2014, 11(2): 519—526.
- [16] BI Hong-bo, LI Xue-ming, ZHANG Yu-bo, et al. A novel HVS-based Watermarking Scheme in CT Domain[J]. Sensors and Transducers, 2014, 163(1): 53—59.