

文章编号:1001-9081(2010)11-3025-03

基于哈达玛变换和奇异分解的四个彩色图像水印算法

李红丽, 赖惠成

(新疆大学 信息科学与工程学院, 乌鲁木齐 830046)

(lihongli100@sina.com)

摘要:针对在某一数字产品中仅仅嵌入一种水印已经不能满足人们要求的问题, 基于哈达玛变换的正交原理和奇异分解(SVD)的相对稳定性等优点, 提出了一种在基于离散小波变换-离散余弦变换(DWT-DCT)域上利用哈达玛变换和SVD实现4个彩色图像水印同时嵌入的算法。先利用哈达玛变换, 使4个水印成为1个水印, 再将该水印进行SVD。原载体图像先进行DWT和DCT, 再进行SVD和水印嵌入。仿真结果表明, 该方法不但可以同时嵌入多个水印, 而且具有很强的鲁棒性。

关键词: 数字水印; 哈达玛变换; 离散小波变换; 离散余弦变换; 奇异分解

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Watermarking algorithm for four color images based on Hadamard transform and singular value decomposition

LI Hong-li, LAI Hui-cheng

(Institute of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China)

Abstract: Because embedding only one kind of watermark in digital products can not satisfy people's demand anymore, in this paper, based on the orthogonality principle of Hadamard transform and the relative stability of Singular Value Decomposition (SVD) and so on, a digital watermarking algorithm for four color images using Hadamard transform and SVD in Discrete Wavelet Transform-Discrete Cosine Transform (DWT-DCT) domain was proposed. First, the four watermarking images were processed by Hadamard transform in order to become one watermark, and the one watermark was transformed by SVD. The original image was transformed by DWT, DCT and SVD. Then the image was embedded by watermarking. Tests show that the algorithm not only can embed multi watermarking at the same time to improve inbuilt information quantity, but also has a very strong robustness.

Key words: digital watermarking; Hadamard transform; Discrete Wavelet Transform (DWT); Discrete Cosine Transform (DCT); Singular Value Decomposition (SVD)

0 引言

近年来, 数字化技术和Internet飞速发展, 在某一数字产品中仅仅嵌入一种水印已经不能满足人们的要求, 在很多情况下, 让人们需要的是多重水印和多功能水印。多重水印一般指的是多重鲁棒水印, 即在同一数字产品中利用相同或不同的算法嵌入多个鲁棒水印, 以抵抗各种不同的攻击; 而多功能水印是指在同一数字产品中嵌入多个不同性质的水印, 如脆弱水印和鲁棒性水印(前者用于篡改提示, 后者用于版权保护, 如文献[1])。但是, 当前针对研究多重水印和多功能水印的研究较少, 尤其是多重彩色水印和多功能彩色水印。

当前数字水印技术一般采取多域多算法相结合的方式。例如文献[2]中提出了一种基于离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)的数字水印算法, 文献[3]中提出了一种基于DWT和离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)的新鲁棒性数字水印算法, 文献[4]中提出了一种基于奇异分解(Singular Value Decomposition, SVD)和DWT鲁棒水印算法等。但是, 文献[2-5]中研究的水印都为二值、灰度图像水印, 彩色图像水印较少, 尤其缺少多重彩色图像水印。将彩色图像作为水印有着二值图像不可代替的优点, 它具有直观、丰富、生动, 包含版权保护信息容量大、更容易被人类视觉识别等优点。

因此, 为了满足人们对多重水印的需求, 本文提出了同时嵌入4个水印的算法, 主要运用了4级哈达玛变换知识, 使得4个水印既相互独立, 又能合并成一个待嵌入水印。与此同时, 考虑到SVD具有相对稳定性, 使得图像矩阵的奇异分解有助于实现水印的透明性和稳健性; 在DWT域, 具有良好的时频局部性; 在DCT域, 许多有关图像的重要可视信息都集中在DCT的一部分系数中等突出优点, 本文提出了一种在DWT和DCT域上利用哈达玛变换和SVD实现4个彩色水印同时嵌入的算法。

1 离散哈达玛变换

哈达玛(Hadamard)变换本质上是一种特殊排序的沃尔什变换, 哈达玛变换矩阵也是一个方阵, 只包括+1和-1两种矩阵元素, 各行或各列之间彼此是正交的, 即任意两行相乘或两列相乘后的各数之和必定为零。哈达玛变换的最大优点在于它的变换核矩阵具有简单的递推关系, 即高阶矩阵可用两个低阶矩阵求得, 这个特点使人们更愿意采用哈达玛变换。一维的哈达玛变换核为:

$$g(x, u) = \frac{1}{N} (-1)^{\sum_{i=0}^{N-1} b_i(x) b_i(u)} \quad (1)$$

其中: $N = 2^n$; $u = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $x = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $b_k(z)$ 是 z 的二进制表示的第 k 位值。对应的一维的哈达玛变换式为:

收稿日期:2010-05-05;修回日期:2010-07-05。 基金项目:新疆维吾尔自治区高校科学研究重点项目(XJEDU2006I10)。

作者简介:李红丽(1982-),女,山东东明人,硕士研究生,主要研究方向:数字水印; 赖惠成(1963-),男,新疆乌鲁木齐人,教授,主要研究方向:网络与通信系统。

$$\mathbf{H}(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) (-1)^{\sum_{i=0}^{N-1} b_i(x) b_i(u)} \quad (2)$$

哈达玛反变换与正变换除相差 $1/N$ 常数项外, 其形式基本相同。一维的哈达玛反变换核为:

$$h(x, u) = (-1)^{\sum_{i=0}^{N-1} b_i(x) b_i(u)} \quad (3)$$

相应的一维的哈达玛反变换为:

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \mathbf{H}(u) (-1)^{\sum_{i=0}^{N-1} b_i(x) b_i(u)} \quad (4)$$

其中: $N = 2^n$; $u = 0, 1, 2, \dots, N-1$; $x = 0, 1, 2, \dots, N-1$; 如 $N = 2^n$, 高阶与低阶哈达玛变换之间具有简单的递推关系。最低阶 ($N = 2$) 的哈达玛变换为:

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

那么, $2N$ 阶哈达玛矩阵 \mathbf{H}_{2N} 与 N 阶哈达玛矩阵 \mathbf{H}_N 之间的递推关系可用式(6)表示:

$$\mathbf{H}_{2N} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_N & \mathbf{H}_N \\ \mathbf{H}_N & -\mathbf{H}_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

那么, 有以上可知 4 阶哈达玛矩阵为:

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_2 \\ \mathbf{H}_2 & -\mathbf{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由以上知识可得, 假如 A 是一个 $4 \times N$ 的矩阵, 那么, 矩阵 A 的四级哈达玛变换为:

$$B = \mathbf{H}_4 \times A \quad (8)$$

B 再进行哈达玛反变换就可以重新得到 A , 即:

$$A = B^T \times \mathbf{H}_4 / 4 \quad (9)$$

2 数字水印的嵌入过程

本文算法是水印图像的 R、G、B3 层分别对应嵌入载体图像的 R、G、B3 层。每一层的嵌入方法相同, 所以本文只介绍 R 层的嵌入方法。该方法的具体实现步骤如下。

2.1 水印预处理

1) 为使水印有双重安全性, 本文使用 Arnold 置乱方法, 对 4 个 32×32 水印矩阵进行置乱处理, 原始水印 R 层矩阵 $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3, \mathbf{W}_4$ 置乱处理后得到 $\mathbf{W}'_1, \mathbf{W}'_2, \mathbf{W}'_3, \mathbf{W}'_4$ 次序混乱的矩阵。

2) $\mathbf{W}'_1, \mathbf{W}'_2, \mathbf{W}'_3, \mathbf{W}'_4$ 4 个矩阵分别进行行列变换生成 1×1024 的矩阵 $\mathbf{W}''_1, \mathbf{W}''_2, \mathbf{W}''_3, \mathbf{W}''_4$, 再从新组合为 $\mathbf{W}_5 = [\mathbf{W}''_1, \mathbf{W}''_2, \mathbf{W}''_3, \mathbf{W}''_4]$ 。

3) 利用 4 阶哈达玛变换, 即 $\mathbf{W}'_5 = \mathbf{H}_4 \times \mathbf{W}_5^T$, 并进行行列变换使 \mathbf{W}'_5 成为 64×64 的矩阵, 并 Arnold 置乱得 \mathbf{W}''_5 。

4) SVD 使得 $\mathbf{W}''_5 = \mathbf{U}_w \mathbf{S}_w \mathbf{V}_w$, 并提取 $\mathbf{S}'_w = \mathbf{S}_w(1:32, 1:32), \mathbf{S}'_w$ 作为待嵌入对象。

2.2 载体图像处理

首先, 载体图像 I 的 R 层进行一级 DWT, 得到 LL, HL, LH, HH 4 个部分的频率系数。 LL 系数进行 8×8 分块, 并对每一块进行 DCT, 提取每一块的直流系数 DC 分量组成一个 32×32 新矩阵 X 然后, 再进行 SVD 变换得到 $X = \mathbf{U}_x \mathbf{S}_x \mathbf{V}_x$ 。

2.3 水印的嵌入

利用叠加公式 $S'_x = S_x + \alpha \times S'_w$ (其中 α 是水印的嵌入强度, 本文取 $\alpha = 0.06$) 嵌入水印。

2.4 嵌入水印后重新组合

由 $\mathbf{U}_x \mathbf{S}'_x \mathbf{V}_x = X'$ 重新组合得到矩阵 X' , 使 X' 相应的元素相对应返回到低频 (LL) 系数 8×8 分块中每一块的直流系数 DC 分量, 得到新的 LL' 矩阵。

2.5 逆离散小波变换

由 LL', HL, LH, HH 进行逆离散小波变换 (Inverse Discrete Wavelet Transform, IDWT) 可得到嵌入水印后的图像 I' 。

3 水印的提取步骤

3.1 嵌入水印后的载体图像处理

嵌入水印后的载体图像 I' 的 R 层进行一级 DWT, 得到 LL', HL, LH, HH 4 个部分的频率系数。对 LL' 系数进行 8×8 分块, 并对每一块进行 DCT, 提取每一块的 DC 分量组成一个新矩阵 X'' , 然后, 在进行 SVD 变换得到 $\mathbf{U}'_x \mathbf{S}''_x \mathbf{V}'_x = X''$ 。

3.2 水印提取

由公式 $S''_w = (S''_x - S_x)/\alpha$, 可得到 S''_w 。

3.3 水印的重新组合

1) 使 S''_w 的元素相对应的返回到 $S_w(1:32, 1:32)$, 组成新的矩阵 \mathbf{S}'_w 。重新组合可得到 $\mathbf{W}''_5 = \mathbf{U}_w \mathbf{S}'_w \mathbf{V}_w$ 。

2) \mathbf{W}''_5 进行反 Arnold 置乱变换, 并进行行列变换生成 4×3072 的矩阵 \mathbf{W}'_5 , 利用 4 阶哈达玛变换即 $\mathbf{W}_5 = \mathbf{W}'_5^T \times \mathbf{H}_4 / 4$ 。

3) 从矩阵 \mathbf{W}_5 中分别对应提取 4 个 1×3072 的矩阵 $\mathbf{W}''_{11}, \mathbf{W}''_{21}, \mathbf{W}''_{31}, \mathbf{W}''_{41}$ 。这 4 个矩阵再分别进行行列变换生成 4 个 32×32 的矩阵 $\mathbf{W}'_{11}, \mathbf{W}'_{21}, \mathbf{W}'_{31}, \mathbf{W}'_{41}$ 。

4) $\mathbf{W}'_{11}, \mathbf{W}'_{21}, \mathbf{W}'_{31}, \mathbf{W}'_{41}$ 分别进行反 Arnold 置乱得到提取的 4 个 R 层水印 $\mathbf{W}_{11}, \mathbf{W}_{21}, \mathbf{W}_{31}, \mathbf{W}_{41}$ 。

4 采样结果及分析

4.1 仿真实验

本文实验在 Matlab 7.1 和 Windows XP 平台上进行仿真实验。选取 $512 \times 512, 256$ 色的 Lenna 图像作为原载体图像, 选取 4 个 $32 \times 32, 256$ 色的小图像。原始载体图像的失真度用峰值信噪比 $PSNR$, 提取水印与原始水印的相似性用归一化相关系数 NC 进行量化评估。 $PSNR$ 和 NC 可定义如下:

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{255 \times 255 \times m \times n}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (X(i, j) - X_w(i, j))^2} \quad (10)$$

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X(i, j) X_w(i, j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X^2(i, j)} \quad (11)$$

式(10)中的 $X(i, j)$ 和 $X_w(i, j)$ 分别对应原始载体图像和嵌入水印后载体图像在 i 行 j 列处的像素值, 式(11)中的 $X(i, j)$ 和 $X_w(i, j)$ 分别对应原始水印图像和提取水印图像在 i 行 j 列处的像素值。

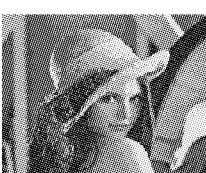
按照上述的方法进行水印的嵌入和提取结果见图 2。



(a) 原始载体图像



(b) 原始4水印图像



(a) 嵌入4水印的载体图像



(c) 无攻击直接提取的4个水印图像

图 2 嵌入和提取图像

实验数据显示,原始载体图像与嵌入水印后载体图像的 $PSNR = 40.1798 \text{ dB}$, $NC = 0.9869$ 。未受任何攻击时,4个原始水印与提取4个水印的 NC 值分别为 $NC_1 = 1$, $NC_2 = 1$, $NC_3 = 1$, $NC_4 = 1$ 。说明本文算法具有很好的不可见性和稳定的水印检测性能。

4.2 性能检测实验

为检验算法的鲁棒性能,对嵌入4个水印的载体图像进



图 3 嵌入水印的载体图像遭受攻击及提取的水印图像

表 1 遭受攻击后提取4水印与原始4水印的 NC 值

攻击方法	提取水印的 NC			
	水印 1	水印 2	水印 3	水印 4
白噪声	0.9969	0.9919	0.9882	0.9964
椒盐	0.02	0.9783	0.7702	0.7731
噪声	0.04	0.8414	0.7219	0.6354
马赛克(5×5)	0.9576	0.8440	0.8615	0.9832
2×2	0.9352	0.9952	0.9995	0.9445
中值	4 \times 4	0.9089	0.9786	0.9689
滤波	8 \times 8	0.8848	0.9723	0.9656
	12 \times 12	0.8705	0.9546	0.9534
低通滤波		0.9206	0.9470	0.9468
	1/16	0.8868	0.8125	0.8447
剪切	1/4	0.8855	0.7562	0.8399
	1/2	0.8854	0.7486	0.8332
	0.5°	0.8596	0.9531	0.9680
旋转	1°	0.7662	0.8623	0.9120
(N 整数)	45°	0.5928	0.5538	0.6371
	90° N	1	1	1
JPEG	50%	0.9993	0.9927	0.9957
压缩	20%	0.9964	0.9827	0.9873
	10%	0.9843	0.9450	0.9795
				0.9569

由以上提取水印图像和仿真实验数据可知,该水印抵抗各种攻击的能力是很强的。与文献[6]实验结果相比具有更强的鲁棒性和较好的不可见性。

5 结语

本文提出了一种在 DWT-DCT 域上利用哈达玛变换和 SVD 实现四彩色水印算法,该算法具有以下几个特点:

1) 4个水印先置乱,再组合成一个待嵌入水印,然后,再对待嵌入水印置乱,使得水印具有多重安全性。即使待嵌入水印被提取出来,但由于对方不知道待嵌入水印是组合水印,

行信号处理攻击和几何攻击,并对攻击后水印结果进行分析评估。图 3 为嵌入水印的载体图像遭受白噪声、高斯低通滤波、椒盐噪声、马赛克、旋转 1°、旋转 90°、剪切 1/2、中值滤波、20% JPEG、10% JPEG 压缩攻击后的图像及其提取的水印图像。

相对应得到的提取 4 个水印与原始 4 个水印的相似性归一化相关系数 NC 如表 1。

对方也得不到 4 水印,所以水印安全性很高。

2) 利用哈达玛变换,使 4 个水印即保持相互独立、互不干扰,又组合成一个待嵌入水印,可以同时嵌入。这样即保持了嵌入水印的多样性、信息量大,又使得水印的安全性提高。

3) 利用 DWT、DCT 和 SVD 各个优点的完美结合,使得水印抵抗添加白噪声、椒盐噪声、高斯低通滤波、中值滤波、剪切、旋转、马赛克等攻击时,具有很强的鲁棒性。

仿真实验表明,本文算法具有很强的鲁棒性和良好的不可见性,该算法能够满足实时性的需要。

参考文献:

- [1] SANG J, ALAM M S. Fragility and robustness of binary-phase-only-filter-based fragile/semi-fragile digital image watermarking [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(3): 595–606.
- [2] ISLAM M, DEBNATH S M, HOSSAIN A. DWT based digital watermarking technique and its robustness on image rotation, scaling, JPEG compression, cropping and multiple watermarking [C]// International Conference on Information and Communication Technology. Washington, DC: IEEE, 2007: 246–249.
- [3] KASMANI S A, NAGHSH-NILCHI A. A new robust digital image watermarking technique based on joint DWT-DCT transformation [C]// Third 2008 International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 539–544.
- [4] ZHANG LI-JING, LI AI-HUA. Robust watermarking scheme based on singular value of decomposition in DWT domain [C]// 2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 19–22.
- [5] LIU RUI-ZHEN, TAN TIE-NIU. An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(1): 121–128.
- [6] WANG BEN, DING JIN-KOU, WEN QIAO-YAN, et al. An image watermarking algorithm based on DWT-DCT and SVD [C]// Proceedings of IC-NIDC 2009. Washington, DC: IEEE, 2009: 1034–1038.