

◎图形、图像、模式识别◎

基于 Block-SVD 的小波域彩色图像数字水印算法

张玉金, 蒋品群

ZHANG Yu-jin, JIANG Pin-qun

广西师范大学 物理与工程学院, 广西 桂林 541004

College of Physics and Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China

E-mail: pqjiang@mailbox.gxnu.edu.cn

ZHANG Yu-jin, JIANG Pin-qun. Digital watermarking algorithm for color image in wavelet domain based on Block-SVD. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(33): 155-157.

Abstract: In this paper, a digital watermarking algorithm for color image in wavelet domain based on Arnold transformation and Block-SVD is proposed. The algorithm uses a color image as a carrier, a gray image as a watermark, increasing embedded information capacity. The simulation results indicate that the algorithm is characteristic of high time efficiency, good quality for watermarked image and excellent robustness, so it has some practical value for copyright protection.

Key words: Arnold transformation; block-SVD; Discrete Wavelet Transformation; digital watermarking

摘要:提出了一种基于 Arnold 变换和分块奇异值分解(Block-SVD)的小波域彩色图像数字水印算法。该算法采用彩色图像作为载体,灰度图像作为水印,增加了嵌入的信息量。仿真结果表明,该算法具有时间效率高、水印不可见性好、抗攻击能力强等特点,在版权保护方面具有一定的应用价值。

关键词: Arnold 变换;分块奇异值分解;离散小波变换;数字水印

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.33.048 **文章编号:** 1002-8331(2008)33-0155-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

1 引言

随着互联网的快速发展和普及,数字图像、数字音频、数字视频等数字媒体的传播变得越来越方便快捷,使得产品的所有权问题已经成为严重的社会问题,数字水印作为一种版权保护技术应运而生并迅速发展起来,成为信息安全和多媒体信号处理领域一个新的研究热点。数字水印技术的性能指标主要有安全性、鲁棒性和不可见性等。Arnold 变换可消除像素的空间相关性,增强抗攻击能力,提高鲁棒性,并具有变换简单、时空效率高、变换后的像素总个数和直方图不变等特点,在数字水印技术领域获得了广泛的应用^[1]。根据所基于的域,数字水印算法可分为时/空域算法、变换域算法和压缩域算法三大类^[2],其中变换域算法可以将嵌入水印的能量分布到空域的所有像素上,并可与国际数据压缩标准兼容,具有很好的鲁棒性和应用前景,如新一代的图像压缩标准 JPEG2000 和视频压缩标准 MPEG-4 就都是基于常用的离散小波变换(DWT)^[3-4]。此外,矩阵的奇异值分解(SVD)作为一种强有力的数值分析技术,具有稳定性好,即经过处理后,奇异值不会有太大变化;包含矩阵固有的代数性质等特性,也广泛用于数字水印技术研究^[5-8]。2006年,Zhou 等^[9]提出了一种基于分块奇异值分解的图像数字水印算法。与传统的奇异值分解方法相比,当载体图像尺寸比较大时,该算法明显具有时空效率高和鲁棒性强的优点,但其是在

空域内对载体图像进行分块奇异值分解,且载体图像是灰度图像,在实际应用时受到了一定的限制。将 Arnold 变换、离散小波变换和分块奇异值分解的优点有机结合,提出了一种基于 Arnold 变换和分块奇异值分解的小波域彩色图像数字水印算法。

2 基于 Block-SVD 的小波域彩色图像数字水印算法

一个秩为 r 的矩阵 $A \in R^{M \times M}$ (R 表示实数域)的奇异值分解可以表示为:

$$A = USV^T \quad (1)$$

其中 $U, V, S \in R^{M \times M}$, 且 U 和 V 为正交阵, U 的列向量是矩阵 AA^T 的特征向量, V 的列向量是矩阵 $A^T A$ 的特征向量, $S = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ 为对角矩阵,由矩阵 A 唯一确定,满足:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_i > \lambda_{i+1} = \dots = \lambda_M = 0 \quad (2)$$

假设彩色载体图像 Z 的大小为 $N \times N$, 灰度水印图像 W 的大小为 $P \times P$, 且 $P = N/8$ 。

2.1 嵌入算法

步骤 1 先将彩色载体图像 Z 由 RGB 色彩空间转换到 $YCbCr$ 色彩空间:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0 & 0.114 & 0 \\ -0.169 & -0.331 & 6 & -0.500 & 0 \\ 0.500 & -0.418 & 6 & -0.081 & 3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 Y 为图像的亮度, C_b 和 C_r 为图像的色度。然后再对 Y 分量进行一级离散小波分解, 得到低频、垂直、水平、对角方向的小波系数矩阵分别为 $Y_{LL}, Y_{LH}, Y_{HL}, Y_{HH}$, 大小均为 $(N/2) \times (N/2)$;

步骤 2 先利用 Arnold 变换:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{P} \quad (4)$$

对灰度水印图像 W 置乱 Q 次, 得到预处理后的水印 W' 。其中 (x, y) 和 (x', y') 分别是变换前后像素的位置坐标, $x, y \in \{0, 1, 2, \dots, P-1\}, k \in [1, P] \in Z$ 。然后再对 W' 进行一级离散小波分解, 得到低频、垂直、水平、对角方向的小波系数矩阵分别为 $W'_{LL}, W'_{LH}, W'_{HL}, W'_{HH}$, 大小均为 $(N/16) \times (N/16)$ 。

步骤 3 将 Y_{LL} 分割成大小为 8×8 且互不相交的子块 $B_{ij}, i=1, 2, \dots, e, j=1, 2, \dots, e$; 其中 $e=N/16$; 对每一个子块 B_{ij} 进行奇异值分解:

$$B_{ij} = U_{ij} S_{ij} V_{ij}^T \quad (5)$$

步骤 4 从每个 S_{ij} 中取出最大奇异值, 记作 σ_{ij} , 将所有块的最大奇异值重新组成矩阵 C , 大小为 $(N/16) \times (N/16)$, 则

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1e} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2e} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{e1} & \sigma_{e2} & \dots & \sigma_{ee} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对 C 进行奇异值分解, 得 $C=EFG^T$ 。

步骤 5 先将 W'_{LL} 嵌入 F 中得 H :

$$H = F + \alpha_{LL} W'_{LL} \quad (7)$$

其中, α_{LL} 为嵌入强度, 然后再对 H 进行奇异值分解, 得 $H=IJK^T$, 最后得嵌有水印的图像亮度分量的低频小波系数矩阵 Y'_{LL} 如下:

$$\begin{aligned} \tilde{C} &= E J G^T \\ \tilde{B}_{ij} &= U_{ij} \tilde{S}_{ij} V_{ij}^T \end{aligned} \quad (8)$$

$$Y'_{LL} \leftarrow \tilde{B}_{ij}$$

步骤 6 类似步骤 3~5, 将 $W'_{LH}, W'_{HL}, W'_{HH}$ 分别嵌入 Y_{LH}, Y_{HL}, Y_{HH} 中, 得 $Y'_{LH}, Y'_{HL}, Y'_{HH}$, 其中, 嵌入强度分别为 $\alpha_{LH}, \alpha_{HL}, \alpha_{HH}$;

步骤 7 由 $Y'_{LL}, Y'_{LH}, Y'_{HL}, Y'_{HH}$ 重构得嵌有水印的图像的亮度分量 Y' ;

步骤 8 将 Y', C_b, C_r 分量合并后由 $YCbCr$ 色彩空间转换到 RGB 色彩空间, 得到嵌有水印的彩色图像 Z' 。

2.2 提取算法

步骤 1 将嵌有水印的彩色图像由 RGB 色彩空间转换到 YCbCr 色彩空间, 对亮度分量进行一级离散小波分解, 得到低频、垂直、水平、对角方向的小波系数矩阵分别为 $Y''_{LL}, Y''_{LH}, Y''_{HL}, Y''_{HH}$;

步骤 2 对 Y''_{LL} 进行和嵌入算法一样的分块 SVD, 并将每块的最大奇异值重新组成矩阵 C'' , 提取水印的低频系数矩阵 W''_{LL} :

$$\begin{aligned} C'' &\Rightarrow U'' S'' V''^T \\ D'' &\leftarrow I'' S'' K'' \end{aligned} \quad (9)$$

$$W''_{LL} \leftarrow (D'' - F) / \alpha_{LL}$$

步骤 3 类似步骤 2, 对 $Y''_{LH}, Y''_{HL}, Y''_{HH}$ 分别进行分块 SVD, 提取出水印的垂直、水平、对角方向的小波系数矩阵分别为 $W''_{LH}, W''_{HL}, W''_{HH}$;

步骤 4 由 $W''_{LL}, W''_{LH}, W''_{HL}, W''_{HH}$ 重构得到水印 W'' ;

步骤 5 利用 Arnold 变换的周期性, 即如果其周期为 T , 那么 Q 次变换后的图像再变换 $(T-Q)$ 次, 将与原图像相同, 对水印图像 W'' 再变换 $(T-Q)$ 次, 即恢复水印 W^* 。

3 算法仿真及抗攻击性能测试

3.1 算法仿真

用 Matlab 对嵌入算法和提取算法进行仿真。以 512×512 的彩色 Lena 图像作为载体 Z , 如图 1 所示, 64×64 的灰度图像 Couple 作为水印, 如图 2 所示。选取 Arnold 变换中的参数 $k=1$, 则其周期 $T=48$, 对水印图像置乱 $Q=30$ 次。小波变换采用 haar 小波基函数。嵌入强度 $\alpha_{LL}=0.6, \alpha_{LH}=0.1, \alpha_{HL}=0.1, \alpha_{HH}=0.1$ 。嵌有水印的图像如图 3 所示。由图 3 可见, 嵌入算法具有较好的水印不可见性。根据提取算法恢复的水印图像如图 4 所示。由图 4 可见, 在无任何攻击的情况下, 提取算法能较好地将水印提取出来。



图 1 载体图像 Lena

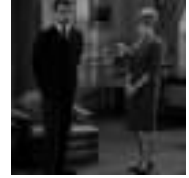


图 2 水印 W



图 3 嵌有水印的图像



图 4 提取的水印 W^*

3.2 抗攻击性能测试

在数字图像处理中, 除通过视觉判定外, 一般采用峰值信噪比 $PSNR$ 来评价图像的视觉质量, $PSNR$ 越大, 对载体图像的破坏就越小。另外, 一般采用归一化相关系数 NC 来评价恢复的水印与原水印的相似度: NC 值越大, 则两者越相似。RGB 图像的峰值信噪比 $PSNR$ 的定义如下:

$$PSNR = 10 \lg \left[\frac{255^2}{(MSE(R) + MSE(G) + MSE(B)) / 3} \right] \quad (10)$$

其中

$$MSE = \frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (Z'(i, j) - Z(i, j))^2 \quad (11)$$

为嵌有水印的图像与载体图像的均方差。式(12)中的 $Z(i, j)$ 为载体图像的 R, G, B 分量的像素值, $Z'(i, j)$ 为嵌有水印的图像的 R, G, B 分量的像素值。

归一化相关系数 NC 的定义如下:

$$NC(W, W^*) = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P W(i, j) W^*(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P W[i, j]^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P W^*[i, j]^2}} \quad (12)$$

其中 $W(i, j)$ 为原水印的像素值, $W^*(i, j)$ 为提取水印的像素值。

无任何攻击时, 嵌有水印的图像的 PSNR 值为 47.561 5, 提取的水印的 NC 值为 0.999 4。利用 Matlab 和 Photoshop 软件对嵌有水印的图像进行常见的攻击。被攻击的嵌有水印的图像的 PSNR 值和提取的水印的 NC 值如表 1 所示, 图 5 是与表 1 对应的攻击下所提取的水印。由表 1 和图 5 可知, 该算法对一

表 1 嵌有水印的图像被攻击后的 PSNR 值及提取水印的 NC 值

序号	攻击方式	PSNR 值	NC 值
a	$Q=30\%$	30.819 0	0.984 8
b	$Q=20\%$	29.765 9	0.974 8
c	JPEG 压缩 $Q=10\%$	27.506 8	0.967 9
d	$Q=1\%$	21.502 3	0.907 5
e	5°	14.761 9	0.932 3
f	旋转 10°	12.519 9	0.921 8
g	20°	11.166 2	0.920 4
h	镜像	11.715 8	0.999 4
i	转置	11.484 4	0.934 8
j	缩放(512→256→512)	33.346 1	0.949 5
k	边缘锐化	38.397 2	0.951 2
l	USM 锐化(数量 500%, 半径 1.0)	19.330 0	0.914 1
m	锐化	32.367 4	0.948 0
n	马赛克(5×5)	25.832 7	0.938 8
o	高斯模糊(半径为 3 像素)	26.252 6	0.841 5
p	挤压(数量为 45%)	17.640 5	0.955 7
q	旋转扭曲(35°)	18.352 6	0.939 7
r	高斯噪声(均值为 0, 方差为 0.1)	17.373 1	0.917 6
s	椒盐噪声(强度系数为 0.05)	18.206 1	0.896 7
t	随机噪声(均值为 0, 方差为 0.05)	18.799 8	0.907 1
u	剪切(右上角 1/4)	10.487 3	0.835 9

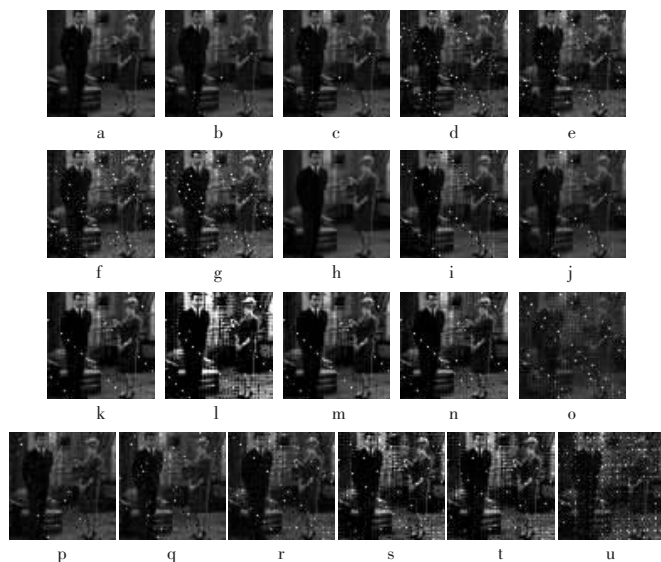


图 5 与表 1 对应的攻击下所提取的水印

些常规攻击和几何攻击均具有较好的鲁棒性。该算法同样适合其他彩色载体, 也具有较好的鲁棒性和不可见性。

4 结论

将 Arnold 变换、离散小波变换和分块奇异值分解的优点有机结合, 提出了一种基于 Arnold 变换和分块奇异值分解的小波域彩色图像数字水印算法。采用灰度图像作为水印, 增加了嵌入的信息量; 利用 Arnold 变换对灰度水印图像置乱处理, 消除了像素间的相关性, 增强了抗攻击能力; 将预处理后的水印的主要能量和信息量嵌入到彩色载体图像亮度分量的低频逼近子图中, 次要的能量和信息量嵌入到彩色载体图像亮度分量的细节子图中, 这样既可以提高嵌入水印的鲁棒性, 又有利于保证图像边缘细节的完整性。算法嵌入和提取水印时间较短。仿真结果表明该算法具有较好的水印不可见性, 不仅可以抵抗一些常规攻击如叠加噪声、JPEG 压缩、锐化等, 而且对于一些几何攻击如旋转、镜像、转置等也具有较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 葛辛, 陈娟, 罗向阳, 等. 基于二值混沌阵列及 Arnold 变换的数字图像加密算法[C]//2006 中国控制与决策学术年会论文集, 2006.
- [2] 孙圣和, 陆哲明, 牛夏牧, 等. 数字水印技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 44-55.
- [3] 于帅珍, 沈建国. 一种基于 DWT 的彩色图像数字水印方案[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(10): 84-86.
- [4] 杨素敏, 王嘉祺, 彭德云, 等. 基于 HVS 和小波变换的零水印数字图像算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(12): 67-69.
- [5] Chang Chin-Chen, Tsai Piyu, Lin Chia-Chen. SVD-Based digital image watermarking scheme[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(10): 1577-1586.
- [6] Gorodetski V I, Popyack L J, Samoilo V, et al. SVD-based approach to transparent embedding data into digital images[C]//International Workshop on Mathematical Methods, Models and Architectures for Computer Network Security (MMM-ACNS 2001), St. Petersburg, Russia, May 21-23, 2001.
- [7] Chandra D V S. Digital image watermarking using singular value decomposition[C]//Proceedings of 45th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, Tulsa, OK, August 2002: 264-267.
- [8] Liu R, Tan T.A. SVD-based watermarking Scheme for protecting rightful ownership[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(1): 121-128.
- [9] Zhou Zude, Tang Bing, Liu Xinhua. A block-SVD based image watermarking method[C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21-23, 2006, Dalian, China, 2006.