

基于奇异值分解的 Contourlet 域水印算法

余勇

(河南经贸职业学院, 郑州 450018)

摘要: **目的** 提高数字水印算法抗信号处理攻击能力, 提升水印鲁棒性。**方法** 提出一种基于 Contourlet 变换和奇异值分解 (SVD) 相结合的水印算法。对水印图像进行多次 Arnold 置乱处理, 实现置乱加密; 选择 Contourlet 域变换系数的方向子带作为水印嵌入区域; 在 Contourlet 系数构建矩阵中进行 SVD 分解, 并结合人类视觉系统进行嵌入强度的自适应选择。**结果** 实验结果得出图像的峰值信噪比为 54.1279 dB, 表明所述算法具有很好的透明性、隐蔽性。**结论** 所述图像数字水印算法具有很好的鲁棒性、不可见性以及抵抗各种攻击的能力, 对数字产品的版权保护具有促进作用。

关键词: 数字水印; Contourlet 变换; 奇异值分解; 鲁棒性

中图分类号: TS805 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0202-04

Contourlet Domain Watermarking Algorithm Based on Singular Value Decomposition

YU Yong

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

ABSTRACT: The work aims to improve the ability of anti-signal processing attacks of digital watermarking algorithm, in order to improve the watermark robustness. A watermarking algorithm based on Contourlet transform and singular value decomposition (SVD) was proposed. The watermark image was repeatedly subject to Arnold scrambling processing to achieve scrambling encryption; directional sub-bands of Contourlet transform coefficients were selected as the watermark embedding region; SVD decomposition was conducted in the Contourlet coefficient building matrix and the adaptive selection of embedding strength was done combined with the human visual system. The experimental results showed that the peak signal to noise ratio of the image was 54.1279 dB, which indicated that the proposed algorithm had good transparency and concealment. The proposed image digital watermarking algorithm has good robustness, invisibility and the ability to resist various attacks, and it promotes the copyright protection of digital products.

KEY WORDS: digital watermarking; Contourlet transform; singular value decomposition; robustness

随着信息技术的快速发展,人们能够通过各种途径快速地获得大量的数字信息,但也带来了数字产品版权保护的问题。数字水印技术通过在数字信息中嵌入不可见的信息,必要时通过一定的技术手段再提取,从而实现多媒体信息认证和版权保护^[13]。容量、鲁棒性和不可见性是数字水印相互制约、相互矛盾的 3 个要素,如何完美地兼容水印的各个方面,一直是研究热点和难点^[4-5]。

2002 年,Do 等提出了一种具有高水平的方向性和个性异性的 Contourlet 变换域方法,这种变换方法能够快速地对图像中的奇异几何特性进行捕获^[6-9]。

奇异值分解 (SVD) 是一种比较常见的数字矩阵变换方法,另外奇异值可以抵抗常见的攻击。若在数字水印算法中引用 SVD,可在一定程度上提高算法的抗攻击能力,特别是几何攻击^[10-11]。文献[12]首先对宿主图像进行 NSCT,然后对低高频部分进行奇异值分解并得到对应奇异值,最后将置乱的水印信息嵌入到奇异值内;Contourlet 变换的引入可确保算法鲁棒性以及水印的嵌入信息量。姚蕾等^[13]针对 NSCT 变换得到的高频和低频部分进行分析,并将置乱的水印信息嵌入到经 SVD 分解处理后的低频奇异值中,此方法能够提高水印稳定性,不过耗时较长。马婷等^[14]结合

收稿日期: 2016-11-01

作者简介: 余勇 (1982—), 男, 硕士, 河南经贸职业学院讲师, 主要研究方向为软件工程、算法设计。

NSCT、DCT 与 SVD 提出了一种新的水印嵌入算法,实验结果表明该算法的鲁棒性比较理想同时可保证水印信息的不可见性。WU Li-li 等^[15]提出了一种基于 Zernike 不变矩的鲁棒性水印算法,但该算法使用范围具有一定的局限性,该算法只能在 $1^\circ \sim 90^\circ$ 范围内得到较粗略的旋转校正。

为提高了数字水印算法抗信号处理攻击能力,提升水印鲁棒性,提出一种基于 Contourlet 变换和奇异值分解 (SVD) 相结合的水印算法。利用 Arnold 置乱变换进行置乱加密,在 Contourlet 域变换系数的方向子带中嵌入水印信息,并在 Contourlet 系数构建矩阵中进行 SVD 分解,利用人类视觉系统自适应选择嵌入强度。最后的实验结果表明,该方法能够有效提高水印算法的抗攻击能力,具有较强的鲁棒特性。

1 基本理论

1.1 Contourlet 变换

Contourlet 变换,即塔形滤波器组 (PDFB),该变换的优点是使用较少的系数便能够表示平滑轮廓,而平滑轮廓又是图像中非常重要的特征。在 Contourlet 变换中,多尺度分析与方向性分析是分开进行的,离散的 Contourlet 变换主要分为 2 步^[16]:使用 LP 滤波器对原图像进行子带分解,对具有奇异特性的像素点进行捕获;使用方向滤波器 (DFB) 进行方向变换,将方向相同的奇异点进行合并,从而捕获方向性。Contourlet 变换的分解过程见图 1。

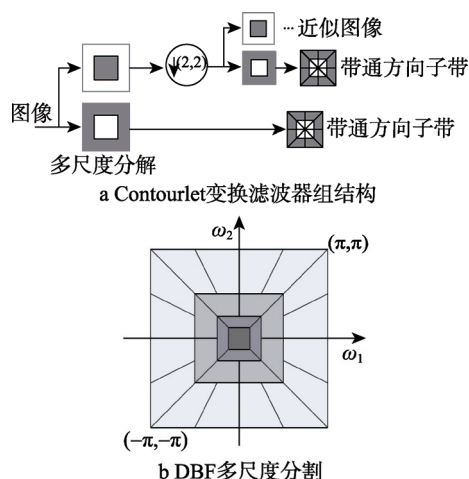


图 1 Contourlet 变换分解过程

Fig.1 Decomposition process of Contourlet transform

1.2 奇异值分解 (SVD)

奇异值分解 (SVD) 是数字水印的一项关键技术,是一种比较特殊的矩阵变换。一幅数字图像可看作一个矩阵,用 A 表示, $A \in R^{M \times N}$ 。那么矩阵 A 的奇异值分解可表示为^[16]:

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

式中: $U \in R^{M \times N}$, $V \in R^{M \times N}$ 均为正交矩阵; $S \in R^{M \times N}$ 则为对角矩阵,除对角线元素其余元素均为 0,而且对角线元素满足: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r \geq \lambda_{r+1} = \dots = \lambda_M = 0$ 。其中 r 表示矩阵 A 的秩,它表示矩阵非零奇异值的数目, $\lambda_i (i=1, 2, \dots, M)$ 则表示 A 的奇异值。奇异值不仅包含图像的内部特征,而且具备旋转、放大、转置等几何失真不变性,因此,奇异值分解可以提高图像水印的鲁棒性。

2 水印算法

2.1 水印嵌入

假设宿主图像为 $M \times M$ 灰度图像 H , 水印信号为 $N \times N$ 灰度图像 W 。 H 在 CT 域内进行分解,可以得到低通子带和方向子带。在众多方向子带中选择能量最大的子带进行 SVD, 利用 Arnold 置乱对水印信息加密置乱后, 然后嵌入到经过 SVD 分解后得到的奇异值中。其具体步骤如下所述。

1) 对水印图像 W 进行 k 次 Arnold 置乱预处理, 得到置乱后的水印图像 W_1 。

2) 水印的嵌入位置结合图像的纹理特征, 将水印图像嵌入纹理最丰富的子带中, 而纹理的特性对应于能量大小, 能量高的位置纹理较丰富, 能量低则纹理简单, 因此将水印嵌入到纹理较为丰富的子带中。根据式 (1) 得到 H 中各高频子带中能量最大的子带。

$$E_{J,d} = \frac{1}{M_{J,d} N_{J,d}} \sum_{x=1}^{M_{J,d}} \sum_{y=1}^{N_{J,d}} C_{J,d}^2(x,y) \quad (2)$$

式中: $M_{J,d}$ 为第 J 层第 d 个方向子带的宽度; $C_{J,d}$ 为相应的 CT 系数; (x,y) 为子带中的像素坐标。

3) 按照从大到小选择多个 CT 系数并构建新矩阵, 然后对此矩阵进行奇异值分解 (SVD):

$$C_{J,d(\max)} = USV^H \quad (3)$$

式中: $C_{J,d(\max)}$ 为具有最大能量的方向子带中选择的系数。

4) 按照式 (3) 嵌入水印信息, 得到一维数组 A_e 。

$$A_e(i) = A_2(i) + \alpha \times A_1(i) \quad (4)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N_1$; α 为嵌入强度。

5) 对 $A_e(i)$, U , V^H 进行 SVD 逆变换, 得到 $C_{J,d(\max)}^W = UAN^H$, 然后对 CT 系数重新排列, 对 CT 重构, 最终得到嵌入水印后的图像 H^W 。

2.2 水印提取

水印的提取即嵌入的逆过程, 对加入水印后的图像进行 CT, 在相同的子带上选择较大的系数进行 SVD 变换:

$$C_{J,d(\max)}^* = U^* S^* V^{*H} \quad (5)$$

式中: $C_{J,d(\max)}^*$ 为加入水印后的图像中提取的子

带的最大的前几个系数。

再利用嵌入过程中保存的边信息进行 SVD 逆过求解:

$$C = U^W S^* V^{WH} \quad (6)$$

利用式(6)对水印信息进行提取,得到的 A' 即为水印信息。

$$A' = (A'_c(i) - A_2(i)) / \alpha \quad (7)$$

最后对提取到的水印做 Arnold 置乱变换,最终得到恢复的水印图像。

3 实验与分析

为验证所述数字水印算法的可行性和有效性,进行了相关实验验证及分析。同时,为衡量水印稳定性及透明性,选用归一化均方误差 (NMSE) 和峰值信噪比 PSNR 作为评判标准,即:

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (X(i,j) - Y(i,j))^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [X(i,j)]^2} \quad (8)$$

$$PSNR = \frac{10 \lg \{mn \max [\max (A \cdot A)]\}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (A - B)^2} \quad (9)$$

式中: X 为原始水印; Y 为提取水印; A 为载体图像; B 为含水印图像。NC 数值介于 0~1 之间,其值越大,水印算法的鲁棒性越好; PSNR 数值越大,水印算法的透明性越好。

选择大小为 512×512 Lena 灰度图像作为宿主,见图 2。选择大小为 32×32 的二值图像作为水印图像见图 3。图 4 为嵌入水印后的效果,由图 4 可以看出,水印嵌入后载体图像几乎没有失真,图像质量比较高;即从视觉上,水印嵌入前后载体图像几乎没有发生任何变化。利用式(8)计算可得,图像的峰值信噪比为 54.1279 dB,表明所述算法具有很好的透明性、隐蔽性。



图 2 原始载体图像
Fig.2 Original carrier image



图 3 水印图像
Fig.3 Watermark image

为进一步验证该算法鲁棒性,水印嵌入后对宿主图像施加椒盐噪声、高斯噪声、剪切、JPEG 压缩、

中值滤波、高斯滤波等攻击,水印提取效果见图 5。



图 4 未受攻击时嵌入水印后图像和水印图像
Fig.4 Embedded watermark image and watermark image without attack



图 5 几何攻击时水印提取效果
Fig.5 Watermark extraction effect in geometric attack

由图 5 可以看出,水印提取效果比较理想,虽然含有一些噪声,但是依然能够清晰地辨识出原水印图像。其中椒盐噪声 0.01 对应的 NMSE 值为 0.0578;高斯噪声 0.005 对应的 NMSE 值为 0.1033;剪切 1/4 对应的 NMSE 值为 0.0984;JPEG 压缩 30%对应的 NMSE 值为 0;中值滤波对应的 NMSE 值为 0.0169;高斯滤波对应的 NMSE 值为 0.1685。

针对攻击测试效果,将文中所述算法和文献[15]所述 SVD 算法进行比较,结果见表 1。通过表 1 数据可看出,文中所述算法的抗攻击能力表现比较理想,尤其是滤波和旋转攻击。综上所述,所述图像数字水印算法具有很好的鲁棒性、不可见性以及抵抗各种攻击的能力。

表 1 攻击测试结果比较
Tab.1 Attack test results

攻击方式	NMSE 值	
	文献[15]算法	文中算法
椒盐噪声 0.01	0.1669	0.0578
高斯噪声 0.005	0.1756	0.1033
剪切 1/4	0.1601	0.0984
JPEG 压缩 30%	0.0111	0
中值滤波	0.3520	0.0169
高斯滤波	0.2234	0.1685

4 结语

针对图像数字水印抵抗攻击的能力以及水印不可见性、隐蔽性等, 基于 Contourlet 和 SVD 等特性, 提出了一种新的图像数字水印算法, 该算法的隐蔽性、鲁棒性均比较理想。实验结果表明: 文中所述算法, 不仅可以确保水印的隐蔽性, 而且提高了嵌入水印的信息量。与其他算法比较, 文中所述算法在抵抗噪声、压缩、剪切、滤波攻击等方面的性能大幅提高, 尤其是旋转、滤波攻击, 其对图像水印处理具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] MITRA P, GUNJAN R, GAUR M S. A multi-resolution Watermarking Based on Contourlet Transform Using SVD and QR Decomposition[J]. Recent Advances in Computing and Software Systems, 2012, 25(27): 135—140.
- [2] 姚蕾, 王玲, 李燕. 基于 NSCT-SVD 的多重数字水印算法[J]. 计算机工程, 2014(7): 106—109.
YAO Lei, WANG Ling, LI Yan. Multiple Digital Watermarking Algorithm Based on NSCT-SVD[J]. Computer Engineering, 2014(7): 106—109.
- [3] 张雷洪, 唐波, 李碧程, 等. 基于 DWT-SVD 的强鲁棒全息水印算法研究[J]. 包装工程, 2013, 34(21): 105—109.
ZHANG Lei-hong, TANG Bo, LI Bi-cheng, et al. The Research of Strong Robustness Holographic Watermarking Algorithm Based on DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 105—109.
- [4] 马婷, 陈农田, 王欣. 基于 NSCT-DWT-SVD 的强鲁棒多重数字水印算法[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 50—54.
MA Ting, CHEN Nong-tian, WANG Xin. Stronger Robust Multiple Digital Watermarking Algorithm Based on NSCT-DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 50—54.
- [5] 李海燕. 基于 DCT 和 DWT 域的数字水印算法[J]. 合肥学院学报, 2009, 19(3): 37—39.
LI Hai-yan. Digital Watermarking Algorithm Based on DCT and DWT Domain[J]. Hefei University, 2009, 19(3): 37—39.
- [6] 褚静, 徐安成, 张美凤. DWT 和 SVD 相融合的彩色图像水印算法[J]. 电视技术, 2013, 37(17): 29—32.
CHU Jing, XU An-cheng, ZHANG Mei-feng. The Color Image Watermarking Algorithm Based on DWT and SVD[J]. TV Technology, 2013, 37(17): 29—32.
- [7] DO M N, VETTERLI M. The Contourlet Transform: An Efficient Directional Multi-resolution Image Representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091—2106.
- [8] 孙刘杰, 徐卓. 一种基于 Contourlet 变换的彩色图像全息水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 10—13.
SUN Liu-jie, XU Zhuo. Novel Color Image Hologram Watermarking Algorithm Based on Contourlet Transform[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 10—13.
- [9] KAVIANI H R, KARIMI N, SAMAVI S. Robust Watermarking in Singular Values of Contourlet Coefficients[C]// Proc of IEEE International Conference on Machine Vision and Image Processing, Tehran, Iran, 2011: 1—5.
- [10] 陈伟琦, 李倩. 基于 DWT-SVD 的图像双零水印算法[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(10): 1991—1996.
CHEN Wei-qi, LI Qian. Double-zero Image Watermarking Algorithm Based on DWT-SVD[J]. Computer Engineering and Science, 2014, 36(10): 1991—1996.
- [11] 朱光, 张军亮. 基于 SVD 和小波包分解的自适应鲁棒水印算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(4): 1230—1233.
ZHU Guang, ZHANG Jun-liang. Adaptive Robust Watermarking Algorithm Based on SVD and Wavelet Packet Decomposition[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(4): 1230—1233.
- [12] 邓小亚. 小波变换和奇异值分解的鲁棒水印算法[J]. 激光杂志, 2015, 36(4): 86—89.
DENG Xiao-ya. Robust Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform and Singular Value Decomposition[J]. Laser Magazine, 2015, 36(4): 86—89.
- [13] 姚蕾, 王玲, 李燕. 基于 NSCT-SVD 的多重数字水印算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(7): 106—113.
YAO Lei, WANG Ling, LI Yan. Multiple Digital Watermarking Algorithm Based on NSCT-SVD[J]. Computer Engineering, 2014, 40(7): 106—113.
- [14] 马婷, 黄健华, 赵勇, 等. 基于非下采样 Contourlet 变换和 SVD 的数字水印算法研究[J]. 云南民族大学学报, 2011, 20(4): 305—309.
MA Ting, HUANG Jian-hua, ZHAO Yong, et al. Research on Digital Watermarking Algorithm Based on Non-sampling Contourlet Transform and SVD[J]. Journal of Yunnan University of Nationalities, 2011, 20(4): 305—309.
- [15] WU Li-li, YU Chun-yan. Tilt Correction Method of License Plate Based on Sobel Operator and Radon Transform[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(S1): 220—222.
- [16] 赵勇, 熊顺清, 袁莎, 等. 复合 NSCT 分解 DCT 变换和 SVD 分解的多重变换水印[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(20): 167—170.
ZHAO Yong, XIONG Shun-qing, YUAN Sha, et al. Multiple Watermarks of NSCT Complex Decomposition of DCT Transform and SVD Decomposition[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(20): 167—170.