

# Robust Image Watermarking Algorithm Based on Contourlet Transform and SVD Decomposition\*

Yingjiang Li, Jianhong Sun, Chunyan Li

Faculty of Engineering, Honghe University, Mengzi  
Email: 45487743@qq.com

Received: Oct. 17<sup>th</sup>, 2012; revised: Nov. 9<sup>th</sup>, 2012; accepted: Nov. 21<sup>st</sup>, 2012

**Abstract:** According to the analysis of Contourlet transform, an improved image watermarking algorithm based on Contourlet transform and SVD decomposition was proposed. Firstly, in order to improve the security of the watermark, the watermark was encrypted by chaotic encryption; Then use the Contourlet transform to image, block the intermediate frequency subband, and decompose all the block by SVD; embed the watermark into the biggest SVD value. The simulation results show that this algorithm have strong robustness.

**Keywords:** Contourlet; SVD; Chaos Encryption

## 基于 Contourlet 变换与 SVD 分解的鲁棒水印算法\*

李迎江, 孙建洪, 李春艳

红河学院工学院, 蒙自  
Email: 45487743@qq.com

收稿日期: 2012 年 10 月 17 日; 修回日期: 2012 年 11 月 9 日; 录用日期: 2012 年 11 月 21 日

**摘要:** 对 Contourlet 变换进行了分析, 并在此基础上提出一种改进的基于 Contourlet 变换与奇异值分解相结合的图像水印嵌入算法, 算法首先对水印进行混沌加密, 以提高水印的安全性, 然后对图像进行 Contourlet 变换, 对中频子带进行分块后奇异值分解, 将水印嵌入到最大奇异值中。仿真实验结果表明, 本算法具有较强的鲁棒性。

**关键词:** Contourlet 变换; 奇异值分解; 混沌加密

### 1. 引言

数字水印技术是近年来信号处理和信息安全领域的研究热点之一, 而且已经取得了很大的进展, 早期用于数字水印嵌入的方法主要是 LSB 算法, 或者进行 DCT, DFT, DWT 变换后嵌入水印, 近年来第二代水印考虑的不是应用像素或者变换域来嵌入, 而是根据信号数据的重要特征来嵌入水印信息。它把水印和图像本身联系在一起, 大大提高了算法的抗干扰性和隐蔽性, 具有更高的鲁棒性, 目前最新研究方向是

多尺度几何分析方法。2002 年, Minh N. Do 等人提出了一种新的图像二维表示法 Contourlet 变换<sup>[1]</sup>, 也称金字塔型方向滤波器组(PDFB), 是一种多分辨的、时频局域的和多方向的图像表示方法。这种新的多尺度 Contourlet 变换不仅具有小波变换的多分辨率和时频局部性, 而且有很好的各向异性<sup>[2]</sup>, 从而可以更全面地表示图像本身的几何特性。目前已经有的基于 Contourlet 变换的水印算法, 如文献[3]将图像极坐标变换后进 Contourlet 变换嵌入零水印, 提高水印的抗旋转攻击能力, 但是用穷举法来检查水印, 虚警率难以保证; 文献[4]把水印嵌入到多个方向子带中; 文献[5]

\*基金项目: 数字水印技术在个人数字信息保护中应用研究(项目编号: 2010Y164)。

把载体图像进行归一化后将水印嵌入到 Contourlet 变换低频子带中；本文提出一种 Contourlet 变换与分块奇异值分解相结合的水印算法。为了提高水印的鲁棒性，在嵌入之前对水印进行混沌加密处理，对原始图像进行三层 Contourlet 变换，将 Contourlet 变换后的带通子带进行分块奇异值分解，之后将水印图像嵌入每块奇异值的最大值中，仿真实验证明了其有效性。

## 2. 相关概念

### 2.1. Contourlets 变换

Contourlets 变换也称金字塔型方向滤波器组 PDFB(Pyramidal Directional Filter Bank)。Contourlet 变换具有良好的多分辨率、局部化和方向性等优良特性，比小波更适合于捕捉高维奇异点信息的特性。能够仅使用少量系数有效地表示平滑轮廓，而平滑轮廓正是自然图像中的重要特征，同时还具有类似于 Curvelet 变换的各向异性尺度关系。二维离散 Contourlet 变换由两个独立的步骤完成，分别是 Laplacian Pyramid(LP)和 Directional Filter Bank(DFB)变换，如图 1 所示。

首先用 LP 变换进行多尺度分析捕获点奇异性，接着使用方向性滤波器组 DFB 将分布在同一方向上的奇异点合成为一个系数，捕获高频分量(即方向性)。LP 和 DFB 二者的结合，就构成了 Contourlet 变换的核心，“塔式方向滤波器组(PDFB, Pyramidal Directional Filter Bank)”。图 2 给出了 Contourlet 变换一个可能的频率分解。由于 LP 和 DFB 具备完全重构特性，因此其组合 PDFB 也必然能实现完全重构。由于 LP 的冗余性，Contourlet 变换具有 4/3 的冗余度<sup>[6]</sup>。

### 2.2. 奇异值分解(SVD)

从线性代数的角度来看，一幅数字图像可以看成是由一个许多非负标量项组成的矩阵。用  $A \in R^{M \times N}$  来表示这样一个图像矩阵，其中  $R$  表示实数数域。则  $A$  的奇异值分解可定义为：

$$I = USV^T$$

式中， $U \in R^{M \times N}$  和  $V \in R^{M \times N}$  均为正交矩阵， $S \in R^{M \times N}$  是一个非对角线上的项都是 0 的矩阵  $\sigma_2$ ，且主对角线上的元素满足  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$ ， $r$  为矩阵  $S$  的秩，

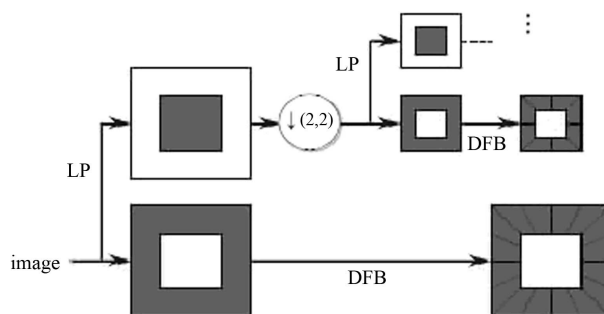


Figure 1. Contourlet transformation schematic diagram  
图 1. Contourlet 变换示意图

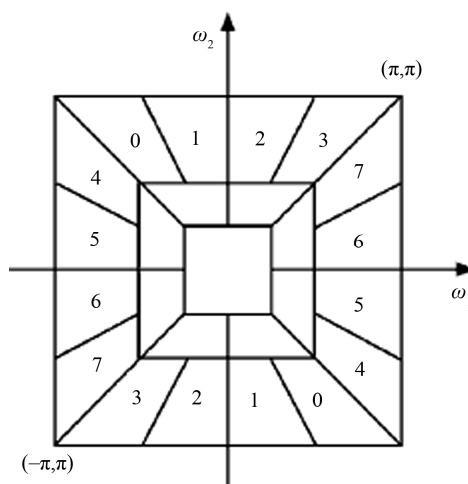


Figure 2. Contourlet transformation frequency domain segmentation sample diagram  
图 2. Contourlet 变换频域分割示例图

它等于非零奇异值的个数。 $\sigma_r$  是  $AAT$  特征值的平方根，是由该分解所唯一确定的，叫做  $A$  的奇异值。

矩阵分解得到的奇异值具有强稳定性，当原矩阵受到轻微干扰时，它的奇异值不会发生很大的变化。将水印嵌入图像矩阵的奇异值中将提高水印的鲁棒性。

### 2.3. 混沌加密

图像置乱是一种数字图像加密算法，它是通过对数字图像的位置或灰度级等做变换，打乱原先的图像。常见的几种主要置乱方法有 Hilbert 变换、K 采样变换、Arnold 变换、幻方变换等，本文应用基于混沌序列变换，由于混沌序列变换没有周期的，也不需要迭代，且对初始值极端敏感，即使破译者知道了加密算法，如果得不到初始值，也无法得到混沌序列。所以基于混沌序列变换的图像置乱加密比其它方法更

安全。

Logistic 映射是一种常见的混沌动力系统，基于一维 Logistic 映射进行加密是一种平凡的混沌加密，安全性难以保障，且可以证明二维 Logistic 映射<sup>[7]</sup>所产生的混沌点集合不存在有效的无误差构造形式，具有更安全的加密效果。二维 Logistic 映射的系统模型为：

$$\begin{cases} x_{n+1} = \mu\lambda_1 x_n (1-x_n) + \gamma y_n \\ y_{n+1} = \mu\lambda_2 y_n (1-y_n) + \gamma x_n \end{cases} \quad (1)$$

其中， $x_0, y_0$  为系统初值，通常取值  $x_0 = 0.10$ ， $y_0 = 0.11$ ， $\mu, \lambda_1, \lambda_2, \gamma$  为系统的控制参数，通常取  $\mu = 4$ ，其他参数的取值分四程序情况进入混沌状态。

### 3. 基于 Contourlet 及 SVD 变换的水印算法

#### 3.1. 水印加密

1) 首先利用二维 logistic 混沌映射产生两个混沌序列  $x(n)$  和  $y(n)$ ，这是截短后的序列大小为  $m \times n$ ，截取混沌序列的  $n$  位有效数字(位数根据图像而定)，然后根据每一位有效数字的奇偶，得到  $n$  位二进制序列，定义奇数为 1，偶数为 0。

2) 把生成的二进制序列作为混沌序列的每个像素值，即得到两幅新的混沌图像，选取由  $x(n)$  生成的图像的奇数行(或列)和由  $y(n)$  生成的图像的偶数行(或列)组合成一幅图像；用最终生成的混沌图像与原始水印图像  $I$  进行异或处理，得到加密后的水印图像  $I'$ 。

3) 将加密后的水印  $I'$  按照行扫描规则扫描成一维向量  $I''$ ，水印长度为  $l$ 。

#### 3.2. 水印嵌入

1) 对原始图像  $W$  进行二级离散 Contourlet 分解，中频方向子带数设为 4，高频方向子带数设为 8。水印将嵌入到 4 个中频方向子带中。

2) 将 4 个中频方向子带进行  $7 \times 7$  分块，根据式(2)计算各个子块的能量值，按照能量值由大到小的顺序排列，选择前  $l$  个子块  $\{B_1, B_2, \dots, B_l\}$  为待嵌入子块(大能量块包含更多纹理和边缘信息，是图像的重要内容区域，且人眼对这类信息的变化较不敏感，水印嵌入这些区域不可见性更好)。

$$E_{\text{block}} = \frac{1}{49} \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 c_{ij}^2 \quad (2)$$

式中  $c_{ij}^2$  是每个块中的 Contourlet 系数。

3) 将  $B_i (1 \leq i \leq l)$  分别做 SVD 分解：

$$B_i = U_i S_i V_i^T (1 \leq i \leq l) \quad (3)$$

修改  $S_i$  的最大奇异值(第一个)  $\sigma_{i1}$ ，嵌入 1 位水印信息， $\alpha$  为水印嵌入强度因子：

$$\sigma'_{i1} = \sigma_{i1} (1 + \alpha \times I_i'') \quad (4)$$

用  $\sigma'_{i1}$  替换  $\sigma_{i1}$  得到修改后的奇异值矩阵  $S'_i$ 。用  $S'_i$  计算获得：

$$B'_i = U_i S'_i V_i^T (1 \leq i \leq l) \quad (5)$$

4) 将  $B'_i$  替代原来的  $B_i$  放回到 4 个方向子带中，作逆 Contourlet 变换，得到嵌入水印的图像。

#### 3.3. 水印提取

水印提取是水印嵌入的逆过程，在水印的检测过程中，设待检测图像为  $W'$  (可能已遭受攻击或破坏)，将  $W'$  与原始图像  $W$  均作两层离散 Contourlet 变换，对中频子带作  $7 \times 7$  分块，根据块能量找出图像  $W'$  的水印嵌入子块  $\{B''_1, B''_2, \dots, B''_l\}$  和  $I$  中对应的原始  $\{B_1, B_2, \dots, B_l\}$  分别作 SVD 分解：

$$B''_i = U''_i S''_i V''_i{}^T (1 \leq i \leq l) \quad (6)$$

$$B_i = U_i S_i V_i^T (1 \leq i \leq l) \quad (\text{同式 3})$$

提取  $S''_i$  的第一个奇异值  $\sigma''_{i1}$  和  $S_i$  的第一个奇异值  $\sigma_{i1}$  进行计算：

$$\omega_i = \sigma''_{i1} - \sigma_{i1} \quad (7)$$

将得到的所有  $\omega_i (1 \leq i \leq l)$  进行二维化处理，然后再进行混沌解密，得到最终提取的水印信息  $I_\omega$ 。

### 4. 仿真实验与分析

仿真实验中，采用  $512 \times 512$  的 Lena 标准灰度图像作为待嵌入水印的载体图像，水印为  $32 \times 32$  二值图像，混沌加密并一维化后的水印长度为 1024，嵌入强度因子  $\alpha$  取 0.25。仿真实验中，对载体图像作 3 次 Contourlet 变换，LP 滤波器取为“7-9”，DFB 滤波器取为“pkva”。将 4 个中频方向子带进行  $7 \times 7$  分块后算出能量值大的前  $l$  个分块，奇异值分解后嵌入水印，

水印嵌入结果如图 3 所示。

嵌入水印的图像峰值信噪比为 49.52 dB，具有很好的透明性。为了验证算法的鲁棒性，对嵌入水印图像进行了较为常见的各类仿真攻击，包括 JPEG 压缩、剪切及缩放、小角度旋转、噪声污染及滤波处理，为了验证本文算法的鲁棒性，选择同样基于 Contourlet 变换与 SVD 结合的文献[8]中算法进行了仿真结果的比较。仿真实验结果如表 1 所示(用归一化相似度(NC)来表示提取出的水印图像和原始水印图像之间的相似性)。

由仿真结果可以看出，本文算法对于各类常见的图像攻击都具有较高的鲁棒性，在某些方面抗攻击性



Figure 3. (a) Original image; (b) Embedded watermark image  
图 3. (a) 原始图像; (b) 嵌入水印后的图像

Table 1. Contrast effect of the robustness of watermark after common attack  
表 1. 常见攻击对水印鲁棒性的影响

| 攻击类型          | 文献[8]算法<br>NC 值 | 本文算法<br>NC 值 |
|---------------|-----------------|--------------|
| 高斯噪声          | 0.9675          | 0.9723       |
| 3 × 3 中值滤波    | 0.7302          | 0.9815       |
| 1/4 左上角剪切     | 0.9376          | 0.9337       |
| 60% 的 JPEG 压缩 | 0.9754          | 0.9921       |
| 缩小 1/2 后再还原   | 0.8872          | 0.9015       |
| 旋转 0.1 度      | 0.8754          | 0.9143       |
| 旋转 0.2 度      | 0.7553          | 0.8541       |

能优于文献[8]。但是若对图像进行平移操作，水印将失去信号同步性，提取之前需要将图像进行反向平移才可以进行水印的提取；同样大角度旋转攻击也需要进行角度恢复后才可以进行水印提取。

## 5. 结论

在对 Contourlet 变换特性研究的基础上提出了一种改进的基于 Contourlet 变换的鲁棒数字水印算法，该算法首先应用混沌置乱算法对水印进行加密，提高水印的安全性，然后将载体图像先进行两层离散 Contourlet 变换，对中频子带进行分块后再做奇异值分解，将水印嵌入到最大奇异值中，很好的平衡了鲁棒性和透明性的要求，实验结果证明了本算有效性及鲁棒性。

## 参考文献 (References)

- [1] M. N. Do, M. Vetterli. Contourlets: A directional multi-resolution image representation. IEEE International Conference on Image Processing, 2002: 357-360.
- [2] 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975-1981.
- [3] 何冰, 王晖等. 基于 Contourlet 变换的抗旋转攻击零水印算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(3): 3.
- [4] 楼偶俊. 基于 Contourlet 域特征点的抗几何攻击水印方法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(1): 113-120.
- [5] 王向阳, 朱丹丹, 杨红颖. 基于图像归一化的 Contourlet 域数字水印方案[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(11): 2272-2276.
- [6] R. Eslami, R. Hayder. On low bit-rate coding using the Contourlet transform. Proceeding of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2003: 1524-1528.
- [7] 王琳娟. 基于 Logistic 映射的多重图像加密技术[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(8): 1818-1821.
- [8] J. P. Wang, S. W. Lv. Image watermarking algorithm based on singular value decomposition and Contourlet transform. Chinese Journal of Sensors and Actuator, 2009, 22(6): 883-886.