

基于 NSCT-DWT-SVD 的强鲁棒多重数字水印算法

马婷¹, 陈农田², 王欣¹

(1.中国民用航空飞行学院 计算机学院, 广汉 618307;

2.中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 广汉 618307)

摘要: **目的** 提出基于 NSCT-DWT-SVD 结合的复合数字水印算法, 实现水印信息的隐蔽嵌入, 提高水印的鲁棒性。**方法** 首先对水印信息进行 Arnold 置乱, 对载体图像进行 NSCT 变换, 将产生的与原载体图像大小相同的低频子带进行小波变换, 后对小波变换的低频部分进行 SVD 分解, 确定嵌入强度后将水印信息叠加到奇异值矩阵中, 实现水印的嵌入。**结果** 经仿真实验发现, 该算法在保证水印嵌入信息量的前提下, 满足了水印信息的隐蔽性, PSNR 值达到 30 dB 以上, NC 值达到了 1, 同时该算法对压缩、滤波、剪切攻击的鲁棒性较强, NC 值均达到 0.92 以上, 抵抗旋转攻击时仍能提取出较清晰的水印图像。**结论** 该算法满足了数字水印技术要求的隐蔽性和稳健性, 并且可以对数字产品起到版权保护的作用。

关键词: DWT; NSCT; SVD; 多重数字水印算法

中图分类号: TS805.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)15-0050-06

Stronger Robust Multiple Digital Watermarking Algorithm Based on NSCT-DWT-SVD

MA Ting¹, CHEN Nong-tian², WANG Xin¹

(1.School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2.Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

ABSTRACT: This paper aims to propose a complex digital watermarking algorithm based on NSCT-DWT-SVD so as to achieve the concealed embedding of watermark information and improve the robustness of the watermark. First, Arnold scrambling was carried out for watermark information. NSCT was carried out for carrier images and then WT (wavelet transform) was conducted for the produced frequency sub-bands with the same size of original carrier image. Second, SVD decomposition was made for the low-frequency part after WT. After the strength of embedding was determined, watermark information was superimposed on the singular value matrix to achieve the watermark embedding. According to the simulation experiment, the algorithm met the concealment of watermark information while guaranteeing the amount of watermark information embedding. PSNR value reached over 30 dB and NC value at 1. Meanwhile, the algorithm had stronger robust against compression, filtering and cropping attack. NC value reached over 0.92. The algorithm still extracted clearer watermark images against spin attack. In conclusion, the algorithm meets the requirements of digital watermarking technology for the invisibility and robustness. It can play a role of copyright protection in the digital products.

KEY WORDS: DWT; NSCT; SVD; multiple digital watermarking algorithm

计算机网络技术发展迅速, 人们可以通过网络 找到所需要的信息, 也可以通过网络传播信息, 但

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金 (60879022)

作者简介: 马婷 (1985—), 女, 回族, 山东济南人, 中国民用航空飞行学院讲师, 主要研究方向为图像处理和计算机应用技术。

很多信息的创造者只想信息供其他人参考给人们带来便利, 而不是轻易地被复制与盗版, 数字水印技术的研究可以避免这种问题的存在, 因此研究者们致力于研究出具有较好的隐蔽性以及高鲁棒性的数字水印算法。

奇异值分解(SVD)是一种特别的数字矩阵变换方法, 奇异值对一般的攻击, 尤其是最难抵抗的几何攻击具有较好的稳定性, 正是由于奇异值具有这一特性, 所以可以将奇异值加入水印算法中, 以提高水印算法的稳健性, 关于 SVD 的数字水印算法^[1-8]也陆续有了相关研究。离散小波变换(DWT)是空间域算法中应用最为广泛的, 它具有较好的时频局部性和多尺度分析性, 是 MPEG 和 JPEG 压缩标准的核心算法, 并且由于其特性与人类视觉系统相似, 所以结合 DWT 的数字水印算法^[9-12]大量涌现。经过已有研究发现, DWT 在方向上的捕捉还有不足。2005 年, Do 和 Cunha^[13-14]提出的非采样 Contourlet 变换 NSCT, 不仅具有 Contourlet 的优点, 还具备了平移不变性的特性, 文献[15—17]均是 NSCT 与 SVD 结合的算法, 文献[15]首先对宿主图像进行 2 层 NSCT, 再将置乱的水印信息嵌入低高频进行 SVD 后的奇异值中, 由于算法引用了 NSCT, 在确保算法鲁棒性的基础上保证了水印的嵌入信息量, 但是信息量仍有待提高, 而且算法在抵抗旋转及缩放攻击的鲁棒性方面比文献[16—17]差。文献[16]分析了 NSCT 分解后低频与高频部分的特点, 将置乱的水印信息嵌入 SVD 分解后的低频奇异值中, 该算法提高了水印的稳健性, 但文献[15—16]算法的运行时间比文献[17]长。文献[17]则将 NSCT, DCT 与 SVD 相结合, 通过实验证明此算法在保证隐藏信息不可见性的基础上, 保证了算法的鲁棒性, 但与文献[15—16]比较鲁棒性较差。这里在文献[17]的基础上引入了 DWT 小波变换, DCT 在抵抗旋转和剪切等攻击的稳定性较差, 而 DWT 具有较好的时频局部性和多分辨率性, 同时, 由于 DWT 的水印算法考虑到了人类视觉系统, 所以算法会有更好的隐蔽性和稳定性。

综上所述, 由于 DWT 在数字水印算法中应用的特点优于 DCT, 加上与 NSCT, SVD 的结合可以更好地弥补方向上的不足以及可以提高抵抗旋转攻击的能力, 所以这里将文献[17]中引用的 DCT 改用为 DWT, 提出了关于 NSCT-DWT-SVD 变换结合的多重水印算法, 算法在 Matlab 上进行仿真

实验, 实验结果表明, 该算法不但确保了嵌入的水印信息量, 而且大幅度提高了算法的鲁棒性, 对比分析实验也进一步说明文中算法比文献[17]在抵抗常见攻击时表现出了更好的稳健性, 尤其是抗几何攻击的能力。

1 基本理论

1.1 小波变换

小波是由多尺度分析、金字塔算法、时频分析等发展起来的, 现在应用很广泛, 在 JPEG2000 里它也得到了很好的应用。基于小波变换的水印算法有很好的鲁棒性和适应水印的特性, 如时频局部化、优良的人类视觉模型、多尺度分析等。

小波变换是一种有限波, 如果 $f(x) \in L^2(R)$, 则 $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx < +\infty$ (1)

将小波函数的可容许性条件的尺度和平移因子离散化后, $\varphi(x)$ 为一个基本小波或小波母函数, $j, k \in Z$, 得到离散小波函数为:

$$\varphi_{j,k}(x) = 2^j \varphi(2^{-j}x - k) \quad (2)$$

对 $\forall f(x)$ 离散小波变换的定义为:

$$\varphi_{j,k}(x) \geq \int_R f(x) \overline{\varphi_{j,k}(x)} dx \quad (3)$$

$WT_f(j, k) \leq f(x)$, $f(x)$ 为任意的函数, $j, k \in Z$, $WT_f(j, k)$ 称为离散小波的变换系数。

对像素为 512×512 Lena 图像进行小波分解后的系数见图 1。

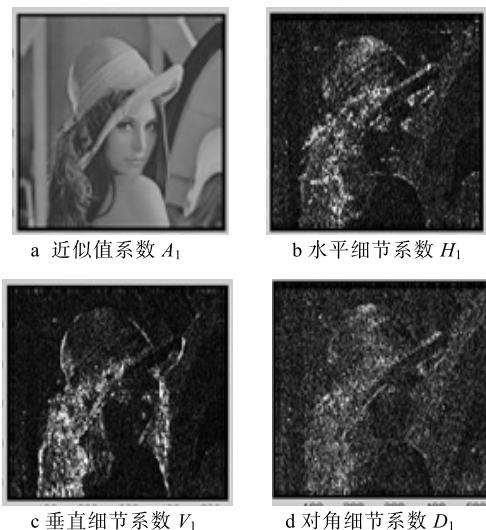


图 1 对 Lena 图像进行小波分解后的系数
Fig.1 Coefficient of Lena image after wavelet decomposition

小波变换是对函数进行多尺度分析,将高频和低频细分后,集中信号的全部细节,可以满足时频信号分析的要求。分解后的高频部分集中了时频的细节信息,如果对高频部分进行任意的改动,信息极其敏感,很容易被改变;分解后的低频主要描述了信息的粗糙边缘轮廓部分,在低频部分嵌入水印信息,对原始函数影响较小,可以使水印算法具有较高的透明性和较好的鲁棒性。

1.2 奇异值分解

数字图像可以看作是一个矩阵,如果用 A 来表示, A 属于 $m \times n$ 型矩阵, 设 U 和 V 是两正交矩阵, S 是半正定对角阵,它其中的元素称为奇异值,使得

$$A = U^T S V = \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $S = \text{diag}(S_1, S_2, \dots, S_t)$, $S_1 \geq S_2 \geq S_3 \dots S_t \geq 0$, t 为 S 的秩。

奇异值分解主要用到的特性: 奇异值存在转置、放大和旋转等几何失真方面的不变性; 奇异值的稳定性决定奇异值面对微小的变换时不敏感; 奇异值包含了图像的内部特征。

1.3 非采样 contourlet 变换

NSCT 具有多尺度性、较好的各方向异性和平移不变性。NSCT 主要是非采样塔式滤波器(NSPFB)和非采样方向滤波器(NSDFB)两部分组成,非采样塔式滤波器先对图像进行多尺度分解,然后除去低频部分,非采样方向滤波器组对高频部分进行方向分解,使得 NSCT 具有多尺度性和多方向异性。

与 Contourlet 变换不同的是非采样塔式滤波器是一个双通道的滤波器组,它不对低频子带进行下采样,而是对非下采样双通道滤波器进行插值和对低频子带进行卷积,从而对图像进行分解。同样,非采样方向滤波器也只进行上采样,保证了平移不变性。NSCT 分解框架见图 2。NSCT 是高冗余的 Contourlet 变换,因此,可嵌入的水印信息更多,且避免了丢失方向子带的位置和各子带信息的频谱重叠。对 Lena 图像进行 2 层 NSCT 变换见图 3,得到的子带图像与原始图像大小相同^[6]。

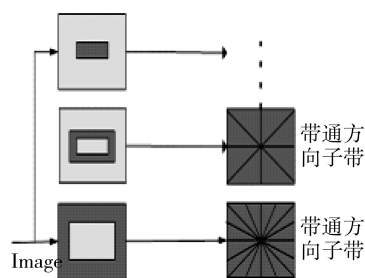


图 2 NSCT 分解框架

Fig.2 NSCT decomposition framework

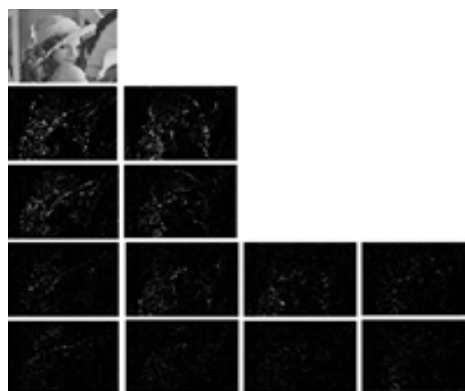


图 3 Lena 图进行 2 层 NSCT

Fig.3 Lena diagram of two layers NSCT

2 水印算法

一个理想的水印算法是将水印信息嵌入载体图像时,应使载体图像尽可能减少失真,同时算法要具有较好的抵抗各种攻击的鲁棒性。该算法通过 NSCT 的高冗余性,确保了嵌入信息量,通过分析分解后的高频部分集中信息的细节极其敏感,如果对其进行信息的改动,很容易被改变;然而分解后的低频部分集中了粗糙边缘轮廓信息,对其进行改动,则影响较小。

2.1 水印嵌入过程

首先对水印信息进行 Arnold 变换置乱加密,再对载体图像进行三层 NSCT,将得到与原图像大小相同的低频部分进行二级小波分解,加大了嵌入信息量,为提高算法的鲁棒性,再次对分解的低频部分进行 SVD,在确定嵌入强度基础上,在奇异值中加入置乱的水印信息,重构含水印信息的低频分量,对各系数一同进行小波反变换和 NSCT 逆变换,得到水印图像。此多重算法强化了抵抗几何攻击的能力。

水印的嵌入过程见图 4，分别为：读取原始载体图像和水印图像，对载体图像进行三层 NSCT，对水印图像进行 Arnold 变换置乱加密；对 NSCT 变换后的与原载体图像大小相同的低频子带进行两级小波变换分解；对小波变换分解后的低频子带矩阵进行 SVD 分解，即 $A = USV^T$ ，得到奇异值区间 $S = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_t]$ ；确定嵌入强度，将置乱后的水

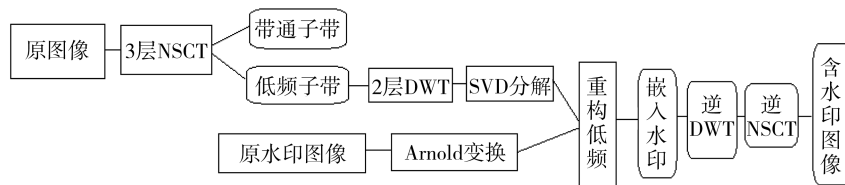


图 4 水印的嵌入过程

Fig.4 Watermark embedding process

2.2 水印提取过程

水印嵌入流程的逆过程则是水印提取的流程，见图 5。具体步骤为：对载体图像和含水印的图像分别进行三层 NSCT，对得到的低频子带矩阵进行两级小波变换分解；对小波分解后的低频子带矩阵 A 和 A' 分别进行 SVD，即 $A = USV^T$ ， $A' = U'S_1V_1^T$ ；将得到的奇异值矩阵相减得到提取的水印奇异值；最后得到提取的置乱水印信号， $W' = (U_1S_1V_1^T - S)/\alpha$ ；对水印信号进行 Arnold 逆变换，提取出水印信息。

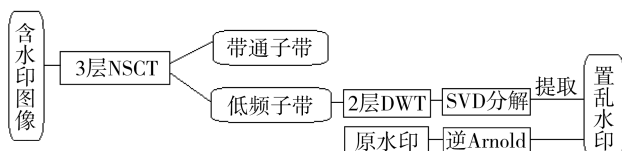


图 5 水印的提取过程

Fig.5 Watermark extraction process

3 仿真实验

这里采用峰值信噪比(PSNR)作为衡量水印透明性的评判标准，如式(5)，用相似度 NC 作为鲁棒性的评判标准，如式(6)。

$$PSNR = \frac{10 \lg \{mn \max[\max(A \cdot A)]\}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (A - B)^2} \quad (5)$$

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{(i,j)} \cdot b_{(i,j)}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [a_{(i,j)}]^2} \quad (6)$$

印信息迭加到分解的奇异值矩阵上得到 S' ， $S' = S + \alpha W$ ；将含水印的奇异值矩阵 S' 再次进行 SVD： $S' = U_1 S_1 V_1^T$ ，得到奇异值矩阵 S_1 ，将其替代原来的奇异值矩阵 $S = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_t]$ ，与对应的酉矩阵 U_1 ， V_1 重构低频子带部分；采用逆 DWT 变换对系数进行重构，再对重构的系数连同其他子带进行逆 NSCT 变换，得到含水印图像。

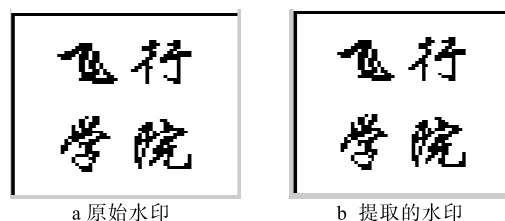
式中： A 代表原始图像， B 代表含水印图像， a 代表原始水印， b 代表提取水印。PSNR 值越高，说明算法的透明性越好。使用 NC 值表示算法的鲁棒性，NC 值介于 0~1 之间，NC 值越接近于 1，说明算法的鲁棒性越好。

实验选用像素为 512×512 的 Lena 图像做为原始载体图像，像素为 64×64 的“飞行学院”作为水印图像，NSCT 变换中的方向滤波器选用“pkva”基函数，塔形滤波器选用“maxflat”基函数，原始图像及嵌入水印后图像见图 6，原始水印图像及提取的水印图像见图 7。



a 原始图像

b 嵌入水印后

图 6 原始图像和嵌入水印后的图像
Fig.6 Original image and embedded watermark image

a 原始水印

b 提取的水印

图 7 原始水印图像和提取的水印图像
Fig.7 Original watermark and extracted watermark image

经实验计算，载体 Lena 图像与含水印 Lena 图像的 PSNR 值约为 30.54 dB，大于 20 dB，说明文

中算法可满足人视觉需求,有较好的不可见性,提取的水印图像完全没有变化,NC 值达到了 1。为了更好地评估本算法的鲁棒性,给出了进行噪声攻击、压缩攻击、滤波攻击以及剪切攻击、旋转攻击后的攻击测试结果,见图 8,评估后的局部数据见表 1。

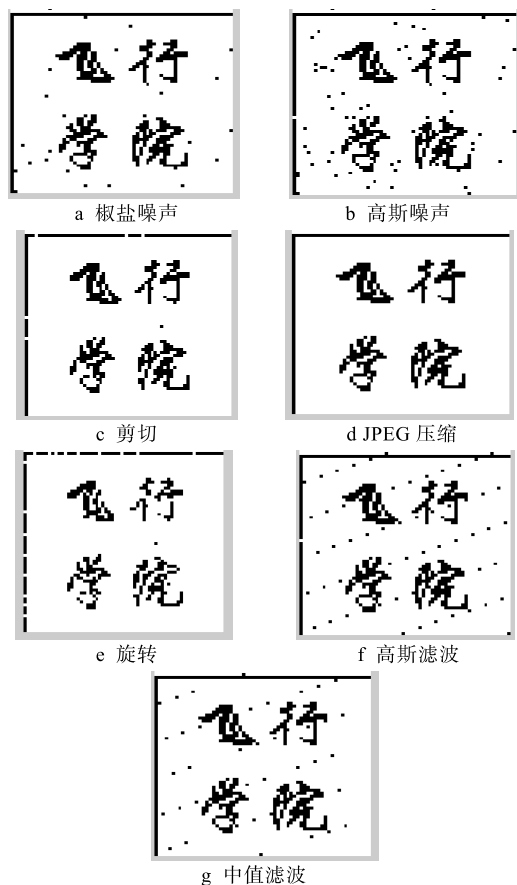


图 8 含水印图像被攻击后的测试结果

Fig.8 Test results of images with a watermark being attacked

图 8c—e 可清晰看见水印信息“飞行学院”,图 8a, 8b, 8f, 8g 提取的水印信息虽含有些许噪音,但水印的内容仍然在图中直接可以识别出来,通过攻击测试实验结果,文中算法在抵抗 JPEG 压缩 30% 攻击的 NC 值达到了 1,抵抗 JPEG 压缩 80% 攻击的 NC 值也达到了 0.9997,在抵抗椒盐噪声攻击、中值滤波攻击、高斯滤波攻击以及剪切 1/4 和 1/6 攻击时,NC 值分别是 0.9432, 0.9891, 0.9835, 0.9226, 0.9552, 算法都表现出了较好的鲁棒性,提取的水印图像较为完好,对于较难抵抗的旋转攻击,旋转 10° 的 NC 值为 0.8788,旋转 45° 的 NC 值也达到了 0.8008,算法也提取了较为清晰的水印信息,表现出了较好的鲁棒性。

文中算法与文献[17] NSCT-DCT-SVD 算法攻

击测试比较见表 1,由于文中算法将文献[17]中使用的变换域 DCT 改为 DWT,通过表中数据可以看出文中算法在文献算法的抵抗能力上提高了很多,尤其是在旋转以及滤波攻击上。

表 1 文中算法与文献[17]算法攻击测试比较

Tab.1 Algorithm in the paper and literature[17] algorithm attack test comparison table

各种攻击	文中算法的 NC 值	文献[17]算法的 NC 值
椒盐噪声 0.01	0.9432	0.8331
高斯噪声 0.005	0.8977	0.8244
剪切 1/6	0.9552	0.8534
剪切 1/4	0.9226	0.8399
JPEG 压缩 30%	1	0.9989
JPEG 压缩 80%	0.9997	0.9917
旋转 10°	0.8788	0.6915
旋转 45°	0.8008	0.6891
中值滤波	0.9891	0.6840
高斯滤波	0.9835	0.7766

4 结语

将 NSCT, DWT 以及 SVD 的特性相结合,提出了一种嵌入信息量大,鲁棒性高的多重变换域数字水印算法,通过仿真实验可以看到,文中所提出的水印算法,不但确保了水印的嵌入信息量,同时满足了水印信息的隐蔽性,并且通过与文献[17]的实验比较,算法在抵抗噪声、滤波、压缩以及剪切攻击方面的稳健性均有大幅提高,尤其是抵抗旋转攻击的能力,含水印图像经过大幅度的旋转攻击,仍能提取出比较清晰的水印信息。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李晨璐,孙刘杰. 一种新的彩色图像变换域全息水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 84—88.
LI Chen-lu, SUN Liu-jie. A New Holographic Water-

- marking Algorithm of Color Image Based on Transform Domain[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 84—88.
- [4] 周中原, 孙刘杰, 唐波, 等. 一种抗旋转的全息水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(19): 95—100.
ZHOU Zhong-yuan, SUN Liu-jie, TANG Bo, et al. A Holographic Watermarking Algorithm of Anti-rotation[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19): 95—100.
- [5] 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.
- [6] 王晓红, 许诗旸. 基于 W-SVD 的强鲁棒性数字图像水印算法[J]. 包装工程, 2012, 33(21): 113—119.
WANG Xiao-hong, XU Shi-yang. Digital Image Watermarking Algorithm Robustness with Strong Robustness Based on W-SVD[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21): 113—119.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 吴玲玲, 张建伟, 王克松. 基于 DWT 和 DCT 域的盲水印算法[J]. 微计算机信息, 2009(18): 53—54.
WU Ling-ling, ZHANG Jian-wei, WANG Ke-song. Blind Watermarking Algorithm Based on DWT and DCT Domain[J]. Microcomputer Information, 2009(18): 53—54.
- [10] 邓文权, 廖述剑. 基于小波变换的图像水印技术[J]. 电视技术, 2013, 37(9): 16—18.
DENG Wen-quan, LIAO Shu-jian. Image Watermarking Technology Based on Wavelet Transform[J]. TV Technology, 2013, 37(9): 16—18.
- [11] 赵玉青. 一种自嵌入盲检测鲁棒数字水印算法[J]. 电子技术应用, 2014, 40(7): 122—125.
ZHAO Yu-qing. A Self-Embedding Robust Digital Watermarking Blind Detection Algorithm[J]. Application of Electronic Technique, 2014, 40(7): 122—125.
- [12] 李海燕. 基于 DCT 和 DWT 域的数字水印算法[J]. 合肥学院学报, 2009(3): 37—39.
LI Hai-yan. Digital Watermarking Algorithm Based on DCT and DWT Domain[J]. Hefei University, 2009(3): 37—39.
- [13] ZHOU J, CUNHA A, DO M. Nonsubsampled Contourlet Transform: Construction and Application in Enhancement[C]// Processing of IEEE International Conference on Image Processing, Genoa, 2005.
- [14] CUNHA A, ZHOU J, DO M. The Nonsubsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications[J]. IEEE Trans Image Processing, 2006, 15(10): 3089—3101.
- [15] 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.
- [16] 马婷, 黄健华, 赵勇, 等. 基于非采样 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.
- [17] 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.