基于 NSCT_SVD_DE 的自适应大容量水印算法

袁志华，杨百龙，赵文强，刘宇
（火箭军工程大学，西安 710025）

摘要：目的 针对 NSCT_SVD 水印算法水印容量较小的问题，提出一种基于视觉区域特性和菱形编码的自适应大容量水印算法。**方法** 对图像进行 NSCT 变换，对 NSCT 域低频系数矩阵进行 8×8 分块，选取每一块中最大的奇异值。根据人眼对图像亮度、纹理及平滑的敏感程度不同，选择在不同的分块嵌入不同大小的水印信息。**结果** 实验表明，在 6 幅标准 512×512 像素的灰度图像中嵌入水印后的 PSNR 保持在 39 左右，具有较好的不可感知性，水印容量比 DWT_SVD 水印算法提升了约 41.41 倍，比 NSCT_SVD 水印算法提升了约 20.95 倍。对常见的中值滤波、高斯滤波、椒盐噪声、旋转和 JEPG 压缩等攻击具有较好的鲁棒性。**结论** 该水印算法在满足不可见性和鲁棒性的前提下，增加了水印容量，具有一定的实用价值。

关键词：数字水印；非抽样 Contourlet 变换；奇异值分解；视觉感知；菱形编码
中图分类号：TS805.4　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3563(2017)17-0188-06

Adaptive Large-capacity Watermarking Algorithm Based on NSCT_SVD_DE

YUAN Zhi-hua, *YANG Bai-long*, *ZHAO Wen-qiang*, *LIU Yu*
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The work aims to put forward an adaptive large-capacity watermarking algorithm based on the visual regional characteristics and diamond coding, regarding the small watermark capacity of the NSCT_SVD watermarking algorithm. The NSCT transform was performed on the image, and the low frequency coefficient matrix of the NSCT domain was divided into 8 × 8 blocks, and the largest singular value in each block was selected. According to the different sensitivities of the human eye to the brightness, texture and smoothness of the image, the watermark information of different sizes was embedded in different blocks. The experiments showed that, the PSNR of the six watermarked grayscale images with 512×512 pixels was about 39, with a better imperceptibility, and the watermark capacity was about 41.41 times higher than that of the DWT_SVD watermarking algorithm, which was about 20.95 times higher than that of the NSCT_SVD watermarking algorithm. In the meantime, it had good robustness against the common median filtering, Gaussian filtering, salt and pepper noise, rotation, JEPG compression and other attacks. The proposed algorithm has increased the watermark capacity and has certain practical value on the premises of meeting the invisibility and robustness.
KEY WORDS: digital watermarking; non-sampling Contourlet transform; singular value decomposition; visual perception; diamond coding

数字水印在版权保护、鉴别真伪、电子商务、不可见通信等方面都有着重要的应用价值。不可见性、鲁棒性、安全性和水印容量都是水印系统的重要指标。很多学者把精力集中在研究水印的不可见性和鲁棒性，对于水印容量的研究较少，但提升水印容量对研究水印系统和解决水印现实需求具有重要意义。比如版权拥有者希望嵌入更多的信息表明版权，电子商务等通过嵌入更多的数据，从而保证其安全性和可靠性等。

Cunha 等[1]在 2006 年，改进了 Contourlet 变换，

收稿日期：2017-02-16
作者简介：袁志华（1992—），男，火箭军工程大学硕士生，主攻图像处理、信息隐藏。
通讯作者：杨百龙（1967—），男，火箭军工程大学教授、博导，主要研究方向为信息安全、计算机网络。

提出了非抽样 Contourlet 变换(NSCT)。NSCT 变换是一种完备的图像变换，具有多尺度、多分辨、平移性和高冗余等特点。多尺度和多分辨更加符合人类视觉系统模型，有助于提高不可见性；平移性和高冗余为增强鲁棒性创造了条件，因此，越来越多的人开始研究 NSCT 域的水印算法[2—6]。奇异值分解(SVD)是一种数学矩阵变换，具有比例不变性、旋转不变性等稳定特性，尤其是对最难抵抗的几何攻击具有较好的稳定性，因此将奇异值运用到水印算法中，可以提升水印算法的鲁棒性[7—11]。

马婷等[4]提出了一种基于 NSCT_SVD 数字水印算法。主要思路是选取经 NSCT 变换后载体图像的低频系数，对低频系数矩阵进行奇异值分解，在部分较大的奇异值上嵌入水印信息。实验表明该算法在保证较好不可见性的前提下，对常见的图像处理和攻击具有较好的鲁棒性。由于可以嵌入水印信息的奇异值个数有限，因此水印嵌入容量较小。熊顺清等[5]提出了基于 NSCT_SVD 的多重数字水印算法。该算法的主要思想是对载体图像进行 NSCT 变换，对其低频和高频系数矩阵进行奇异值分解，并将水印信息重复嵌入到低频和高频系数中。该算法与文献[4]中算法相比，虽然可供嵌入水印的奇异值个数增加了 3 倍，但重复嵌入降低了嵌入效率，因此水印嵌入容量并没有实质性的提高。马婷和熊顺清等提到算法是将水印信息直接嵌入到载体图像的奇异值中，由于能作为嵌入水印的奇异值个数有限，因此嵌入容量受到很大的限制。有人提出将水印也进行奇异值分解，将水印的奇异值嵌入到载体图像的奇异值中，在很大程度上提升了水印的容量，但该算法存在高虚警率问题，在实际运用中受到了很大的限制。刘大瑾[11]提出将水印奇异值分解后的一个正交矩阵嵌入到 NSCT 变换后的 2 个高频子带系数中，较好地解决了高虚警率问题。

文中在 NSCT_SVD 水印算法的基础上，结合图像区域划分和菱形编码，提出一种基于 NSCT_SVD_DE 的自适应大容量水印算法。

1　算法的基本原理

1.1　改进的菱形编码

2009 年，Chao 等[12]在研究灰度图像的隐写算法中提出了菱形编码(DE)的概念。DE 算法的主要思想是：将一个进制的数据($L=2k^2+2k+1(k\geqslant 1)$)嵌入到像素对$(x,y)$中，且引起这个像素对中每个像素值的最大改变量不超过 k，嵌入率为 $\frac{1}{2}\times Ib(2k^2+2k+1)bpp$。假设像素对$(x,y)$，要嵌入一位进制的数据 S_L。首先根据式(1)计算像素对的菱形特征值(DCV)。

$$f(x,y)=((2k+1)x+y)\bmod L \tag{1}$$

然后按照式(2)计算 $f(x)$和 S_L 的模距离 d。

$$d=(S_L-f(x,y))\bmod L \tag{2}$$

最后通过匹配邻域距离模板 D_k，得到嵌入秘密信息后的新像素对(x_1,y_1)，邻域模板是由 k 决定的。提取秘密信息时，只需要将新像素对(x_1,y_1)代入式(1)即可提取出秘密信息。

由于 $L=2k^2+2k+1(k\geqslant 1)$，因此 DE 算法中嵌入数据的进制不是任意的。针对此缺点，Hong 等[13]在 Chao 等的基础上改进了 DE 算法，提出了 APPM 算法。改进后，APPM 算法中嵌入的数据信息可以是任意进制的，且嵌入数据后失真也比 DE 算法小。APPM 算法改变了邻域距离模板，计算菱形特征值(DCV)的公式变为：

$$f(x,y)=(x+C_i\times y)\bmod L \tag{3}$$

式中：参数 C_i 的值取决于嵌入数据信息的进制。APPM 算法的嵌入和提取过程与 DE 算法类似。假设要在像素对(x,y)中嵌入数据 S_L，将像素对(x,y)代入式(3)计算 DCV 的值，参数 C_i 根据嵌入数据的进制所确定。将得到的 DCV 值代入式(2)，得到模距离 d 的值。在相应的匹配模板中找到与 d 值对应的位置，完成数据嵌入。提取时，将修改后的像素对代入式(3)，计算得到的值即为嵌入的数据 S_L。嵌入数据为 4 进制、8 进制、16 进制和 32 进制时的邻域距离模板[14]，见图 1。

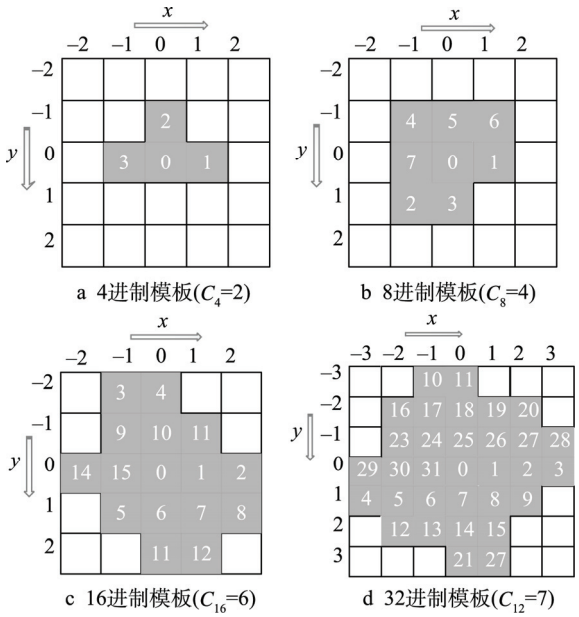


图 1　距离模板

Fig.1 Distance template

文中将 APPM 算法用于水印的嵌入和提取过程。原算法是将水印直接嵌入到像素值上，而文中算法是将水印嵌入到 NSCT 变换系数的奇异值上，因此需要将 NSCT 变换系数的奇异值进行处理后才能用于水印的嵌入。实验表明，如果对奇异值取整后直接用来

嵌入水印，嵌入水印图像的 PSNR=68.32，但提取出的水印存在失真现象，因此按照以下策略，进行处理。

嵌入处理策略：对奇异值 X_i 取整删掉个位得到 $[X_i]$，保存 X_i 的个位和小数部分 x_i；对奇异值个位数为 8 或 9 的修改为 7，个位数为 0, 1, 2 的修改为 3，其余的数保持不变，修改后将个位与小数部分记为 x'_i；用 $[X_i]$ 嵌入数据，完成嵌入后再加上 x'_i，得到修改后的奇异值 X'_i。提取水印时，只需将得到的奇异值取整，删掉个位，即可用来提取水印。

1.2 基于视觉感知特性的图像区域划分

1.2.1 频率掩蔽效应

人眼对低频信号中的噪声比对中频和高频信号中的噪声敏感。由于常见的图像处理，会破坏图像的细节和纹理信息，因此在高频子带嵌入水印难以抵抗常见的图像处理，水印的鲁棒性较差。在反复实验验证的基础上，综合考虑水印的不可见性、鲁棒性和算法的运算时间等因素，选择在 NSCT 二级分解的低频系数矩阵中嵌入水印。

1.2.2 纹理掩蔽效应

Qi 等[15]研究纹理掩蔽效应表明，人眼视觉系统对图像平滑区和图像纹理复杂区改变的敏感程度不同。NSCT_SVD_DE 算法是将载体图像分成多个 8×8 的图像块，通过计算每一个 8×8 图像块的信息熵来判断图像块是属于纹理块还是平滑块。王海洋等[16]研究表明，最大熵值的 75%是划分纹理区和平滑区的阈值。8×8 图像块的最大阈值为 6，则选择 4.5 作为纹理块和平滑块的划分阈值。

1.2.3 亮度掩蔽效应

灰度敏感度表明，人眼视觉系统对中等灰度的变化很敏感。潘峰等[17]研究表明对 256 级灰度图像，低灰度、中等灰度、高灰度的分界分别在灰度为 75, 180 处。此处，8×8 图像块的平均灰度值作为每个图像块的灰度值，用来判断该块属于哪一类灰度。

1.2.4 嵌入深度的选取

为了满足不可感知性的同时又保证较大的隐藏容量，采取叠加的方式确定每块 8×8 图像块的嵌入深度 D_i（D_i 的初始值为 3）。首先根据纹理掩蔽效应开始叠加，若图像块为纹理块，则嵌入深度 D_i 加 2；若图像块为平滑区，则嵌入深度 D_i 加 1。然后在判断图像块是属于高灰度块、中等灰度块还是低灰度块。若图像块为高灰度块或低灰度块，则嵌入深度 D_i 加 1；若图像块为中灰度块，则保持嵌入深度 D_i 保持不变。

将分好块的 8×8 图像块按照 Zig-zag 扫描的方式，依次顺序取出 2 个图像块分别计算每块的嵌入深度 D_i 和 D_{i+1}。按照式(4)确定嵌入水印的进制 L_j。

$$L_j = \max(D_i, D_{i+1}) \tag{4}$$

如果 L_j 为 4，则嵌入 2^4=16 进制的水印信息；如果 L_j 为 5，则嵌入 2^5=32 进制的水印信息；如果 L_j 为 6，则嵌入 2^6=64 进制的水印信息。嵌入水印的进制的确定过程，见图 2。

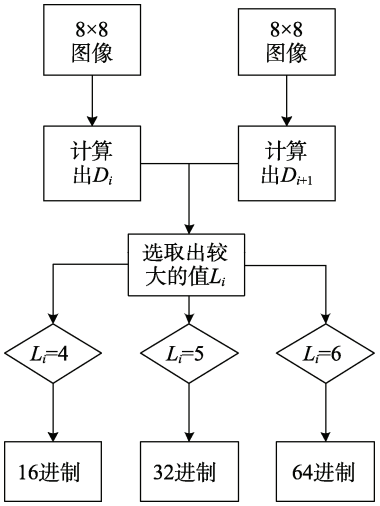


图 2 确定嵌入水印进制流程

Fig.2 Determination of the embedded watermark flow

2 算法嵌入与提取过程

提出 NSCT_SVD_DE 算法，将菱形编码应用于嵌入过程，提升了隐藏容量。根据人类视觉特性，自适应地选择嵌入水印进制，最大限度地提升了水印容量。

2.1 嵌入过程

1）读入载体图像和水印，将水印进行 Arnold 变换置乱，并将置乱次数和水印图像尺寸作为密钥 K_1。将置乱后的水印转换成二进制数据流。

2）计算水印数据块 S_j。对载体图像进行 8×8 分块，并按照 Zig-zag 扫描的方式进行编号，每一块记为 B_i。按照图 2 的流程确定嵌入进制 L_j，并记录 K_2。根据密钥 K_2 将水印转换成相应的水印数据块 S_j。

3）对载体图像进行两级 NSCT 变换，并对其低频系数矩阵分为 8×8 的图像块。对每一块系数矩阵进行 SVD 分解，按照 Zig-zag 扫描方式依次顺序取出 2 个图像块中最大的奇异值。按照奇异值嵌入处理策略①和②对取出的 2 个奇异值进行处理，得到奇异值对 $(X_i, X_{i+1})_j$。

4）根据奇异值对 $(X_i, X_{i+1})_j$ 和数据块 S_j，按照 APPM 算法，完成水印的嵌入。按照嵌入处理策略③得到恢复后的奇异值对 $(X'_i, X'_{i+1})'_j$，恢复图像。

5）重复步骤 3）和 4），直到完成所有水印信息的嵌入，嵌入流程见图 3。

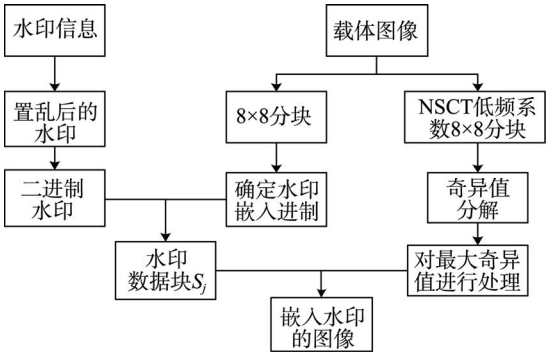


图 3　嵌入算法流程
Fig.3 Embedded algorithm flow

2.2　提取过程

1）读入载密图像。

2）和嵌入过程步骤 3）一样，对其低频系数矩阵分为 8×8 的图像块，进行 SVD 分解，按照 Zig-zag 扫描方式依次顺序取出 2 个图像块中最大的奇异值，删掉 2 个最大奇异值的个位，得到奇异值对$(X'_i, X'_{i+1})'_j$。

3）根据 APPM 算法的提取算法，依次提取出水印数据块 S_j，并根据密钥 K_2 将其转换成二进制水印数据。

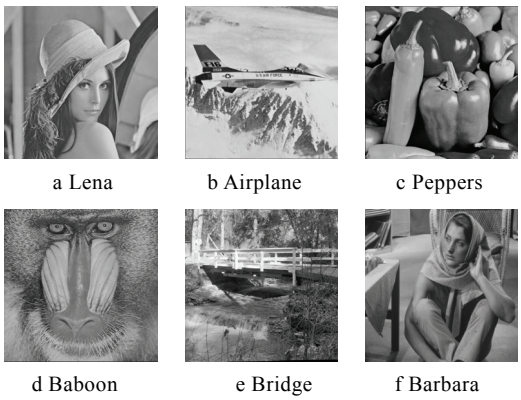
4）根据密钥 K_1，将二进制水印数据还原水印。

3　实验结果与分析

对提出的水印算法进行仿真实验，文中算法是在 Windows7 操作系统和 Matlab2014a 环境下的实验结果。实验所用测试图像为 6 幅 512×512 像素的标准灰度图像，见图 4。分别通过 PSNR 和 NC 来评价水印算法的不可感知性和鲁棒性，PSNR 和 NC 公式见式(5—6)：

$$\mathrm{PSNR}=10\lg\frac{f(x,y)_{\max}^{2}}{\sum\sum\left(f(x,y)-g(x,y)\right)^{2}} \tag{5}$$

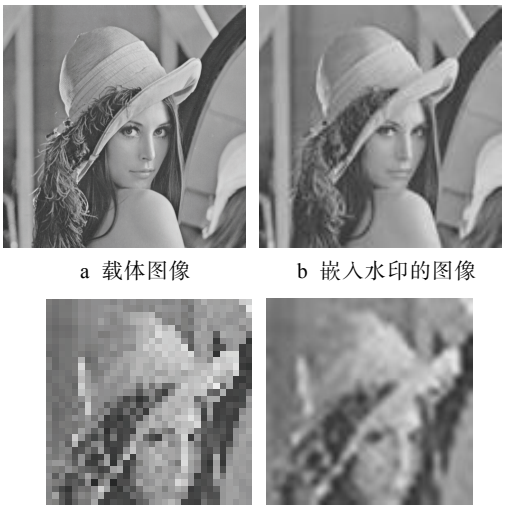
$$\mathrm{NC}=\frac{\sum_{i} w_i w_i'}{\sum\left[w_i\right]^{2}} \tag{6}$$



a Lena　b Airplane　c Peppers
d Baboon　e Bridge　f Barbara

图 4　测试图像
Fig.4 Test image

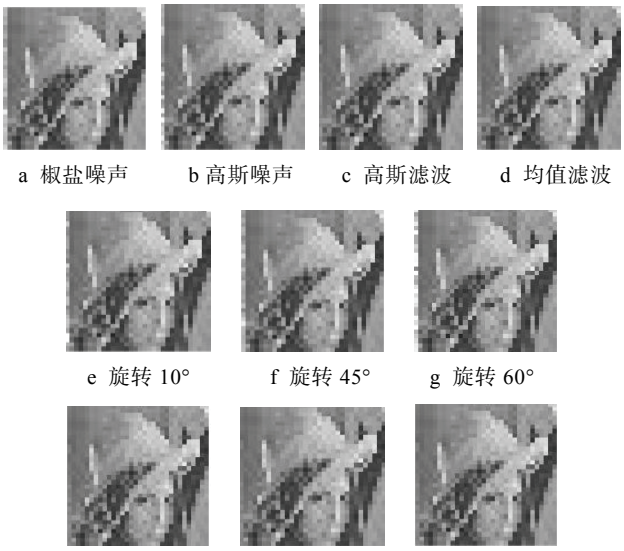
首先，通过仿真实验验证文中算法。对载体图像进行两级 NSCT 变换分解，变换中的塔形滤波器是“maxflat”。选取测试图像中的 Lena 图像作为水印载体图像，水印为 32×32 的 Lena 灰度图像。依照文中算法，完成水印的嵌入与提取。嵌入水印的图像和提取出的水印，见图 5。嵌入水印图像的 PSNR=42.12，在图 5 中人眼基本看不出载体图像和嵌入水印图像有任何差别。提取出水印与原始水印的相关系数 NC=1。



a 载体图像　b 嵌入水印的图像
c 水印图像　d 提取的水印图像

图 5　嵌入与提取
Fig.5 Embedding and extraction

为了测试文中算法的鲁棒性，给出了进行噪声攻击、滤波攻击、旋转攻击和压缩攻击后的测试结果，见图 6，部分测试数据见表 1。



a 椒盐噪声　b 高斯噪声　c 高斯滤波　d 均值滤波
e 旋转 10°　f 旋转 45°　g 旋转 60°
h JPEG 压缩(10%)　i JPEG 压缩(50%)　j JPEG 压缩(80%)

图 6　含水印图像被攻击后的测试结果
Fig.6 Text results after the watermarked image is attacked

表 1 图像经攻击后提取水印的 NC 系数与其他算法的比较
Tab.1 Comparison of the NC coefficients of the water-marked image after attack and other algorithms

攻击类型	文献[4]算法	文献[5]算法	文献[10]算法	文中算法
椒盐噪声(0.01)	0.9573	0.8029	0.9432	0.9609
高斯噪声(0.01)	0.8816	0.8155	0.8577	0.7853
高斯滤波(8×8)	0.9996	0.8338	0.9835	0.9212
均值滤波(3×3)	0.9632	0.9062	0.9891	0.9302
旋转(10°)	0.9167	0.7853	0.8788	0.7945
旋转(45°)	0.8496	0.7369	0.8008	0.7863
旋转(60°)	0.8359	0.7081	0.7513	0.7253
JPEG 压缩(10%)	1.0000	0.9882	1.0000	0.9935
JPEG 压缩(50%)	0.9996	0.9880	0.9979	0.9910
JPEG 压缩(80%)	0.9830	0.9878	0.9880	0.9835

图 6a—j 中基本都可以看出 Lena 图像的水印信息。图 6a, b, f, g 中水印信息失真较大，但仍然可以直接识别出水印信息。从表 1 可看出文中算法的鲁棒性明显优于文献[10]中的算法，略低于文献[4]和文献[5]中的算法。经椒盐噪声攻击后，文中算法的 NC=0.9605，明显高于其他算法。从表 1 可以看出，文中算法对旋转和 JEPG 压缩攻击也具有较好的抵抗力。特别在旋转 60°和 80%JEPG 压缩时，仍然能正确提取出水印。

为了测试文中算法的水印容量，在 6 幅测试图像中嵌入随机数据，记录 6 幅图像达到满嵌时嵌入的随机数据量。这里的随机数据是利用 Matlab2014a 中 rand( )函数随机产生的二进制数。实验数据表明，6 幅测试图像在满嵌状态下，平均水印容量为 10 724 bit，最大水印嵌入容量达到了 11 096 bit。满嵌状态图像的 PSNR 平均保持在 39.26，最低的 PSNR 也达到了 38.38。对于平滑图像误码率较低，纹理图像的误码率略大于平滑图像，但误码率也较小。文献[4]和文献[5]中的 PSNR 分别为 38.92 和 30.54，相比而言，文中算法有更好的不可见性。文献[4]和文献[5]中的嵌入容量为 512 bit，文献[10]中算法的嵌入容量为 259 bit，文中算法的平均水印容量为 10 724 bit，文中算法的水印容量比文献[4]和[5]增加了约 20.95 倍，比文献[10]增加了 40.41 倍。6 幅满嵌状态下的测试图像见图 7，满嵌状态下测试图像的 PSNR 和水印容量见表 2。

设非自适应算法的嵌入深度为 4，嵌入数据为随机产生的 8192 bit 二进制数据。自适应算法与非自适应算法对比见表 3。从表 3 可以看出，嵌入 8192 bit 数据时，非自适应算法已达到满嵌状态，此时自适应算法平均还能嵌入数据 2532 bit，且平均 PSNR 为 43.86，高于非自适应算法的 42.84。

表 2 满嵌状态下的 PSNR 与隐藏容量
Tab.2 PSNR and hidden capacity in full embedded state

测试图像	PSNR	水印容量/bit	误码率/%
Lena	39.56	10 745	0
Airplane	38.38	10 928	0.003
Peppers	38.77	11 096	0
Baboon	38.78	10 648	0.009
Bridge	40.46	10 288	0.008
Barbara	39.60	10 640	0.010
平均	39.26	10 724	0.005

a Lena b Airplane c Peppers

d Baboon e Bridge f Barbara

图 7 满嵌状态下的测试图像
Fig.7 The test image in full embedded state

表 3 自适应与非自适应算法对比
Tab.3 Comparison of adaptive and non-adaptive

测试图像	自适应算法		非自适应算法		提高容量/bit
	PSNR	容量/bit	PSNR	容量/bit	
Lena	43.67	10745	42.12	8192	2553
Airplane	42.79	10928	41.89	8192	2736
Peppers	43.14	11096	41.99	8192	2904
Baboon	44.68	10648	43.58	8192	2456
Bridge	45.88	10288	44.86	8192	2096
Barbara	42.98	10640	42.57	8192	2448
平均	43.86	10724	42.84	8192	2532

4 结语

NSCT_SVD 水印算法的具有较好的不可见性和鲁棒性，但水印容量较小。针对 NSCT_SVD 水印算法容量小的问题，提出了运用视觉区域特性和菱形编码，改进 NSCT_SVD 水印算法。改进后的算法，与原算法相比，不可见性有所提高，鲁棒性基本上没有下降，水印容量得到了较大提升。算法提取过程中，需要水印生成时产生的 2 个密钥，密钥保证了水印算法的安全性。提取水印过程中不需要载体图像的参与，因此为盲水印算法。综上所述，文中提出的基于 NSCT_SVD_DE 的自适应大容量水印算法，具有一定的实用价值。

参考文献：

[1] DA C A, ZHOU J, DO M N. The Nonsubsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2006, 15(10): 3089—3101.

[2] 刘晶, 刘刚, 李爱民, 等. 基于非采样 Contourlet 特征的水印算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(17): 143—145.
LIU Jing, LIU Gang, LI Ai-min, et al. Watermark Algorithm Based on Non-Subsampled Contourlet Tranform Feature[J]. Computer Engineering, 2009, 35(17): 143—145

[3] 丁兴号, 章登峰, 钱坤, 等. 基于无下采样 Contourlet 变换和人眼视觉系统的稳健盲水印算法[J]. 光学学报, 2009(12): 3344—3350.
DING Xing-hao, ZHANG Deng-feng, QIAN Kun, et al. A Robust Blind Watermarking Algorithm Based on Non-subsampled Contourlet Transform and Human Visual System[J]. ACTA Otica Sinica, 2009(12): 3344—3350.

[4] 马婷, 黄剑华, 赵勇, 等. 基于非采样 Contourlet 变换和 SVD 的数字水印算法研究[J]. 云南民族大学报(自然科学版), 2011, 20(4): 305—309.
MA Ting, HUANG Jian-hua, ZHAO Yong, et al. Study on the Digital Watermarking Algorithm Based on NSCT and SVD[J]. Journal of Yunnan University of Nationalities, 2011, 20(4): 305—309.

[5] 熊顺清, 袁莎, 夏薇, 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 Shun-qing, YUAN Sha, XIA Wei, et al. Multiple Transform Domain Watermarking Algorithm Based on NSCT Decomposition DCT Transform and SVD Decomposition[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(20): 167—170.

[6] 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.

[7] 熊祥光, 王力. 一种改进的 DWT-SVD 域参考水印方案[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(7): 75—79.
XIONG Xiang-guang, WANG Li. Improved Reference Watermarking Scheme in DWT-SVD Domain[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(7): 75—79.

[8] 周波, 陈健. 基于奇异值分解的、抗几何失真的数字水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 506—512.
ZHOU Bo, CHEN Jian. A Geometric Distortion Resilient Image Watermarking Algorithm Based on svd[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(4): 506—512.

[9] 张玉金, 蒋品群, 韩绍程, 等. 基于奇异值分解的双重变换域图像水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(12): 109—111.
ZHANG Yu-jin, JIANG Pin-qun, HAN Shao-cheng, et al. Image Watermarking Algorithm in Dual Transform Domains Based on SVD[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(12): 109—111.

[10] 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—55.
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—55.

[11] 刘大瑾. 联合非下采样Contourlet变换与奇异值分解的多水印算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(12): 3850—3853.
LIU Da-jin. Multiple Watermarks Algorithm Based on Nonsubsampled Contourlet Transform and Singular Value Decomposition[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(12): 3850—3853.

[12] CHAO R M. A Novel Image Data Hiding Scheme with Diamond Encoding[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2012, 7(1): 176—184.

[13] HONG W, CHEN T S. A Novel Data Embedding Method Using Adaptive Pixel Pair Matching[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2012, 7(1): 176—184.

[14] 金涛, 何加铭, 杨任尔. 基于菱形编码和修改量化表的 DCT 域图像隐写[J]. 宁波大学学报, 2014(1): 33—36.
JIN Tao, HE Jia-min, YANG Ren-er. Image Steganography in DCT Domain Based on Diamond Encoding and Quantization Table[J]. Journal of Ningbo University, 2014(1): 33—36.

[15] QI Hui-yan, ZHENG Dong, ZHAO Ji-ying. Human Visual System Based Adaptive Digital Image Watermarking[J]. Signal Processing, 2008, 88(1): 174—188.

[16] 王海洋. 基于人眼灰度敏感特性的信息隐藏技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
WANG Hai-yang. Research on Information Hiding Technology Based on Human Gray Level Sensitivity[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011.

[17] 潘峰, 李军, 杨晓元, 等. 基于图像复杂度的隐写方法研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(7): 2712—2714.
PAN Fen, LI Jun, YANG Xiao-yuan. Research on Steganography Based on Image Complexity[J]. Computer Application Research, 2011, 28(7): 2712—2714.