

改进的基于压缩感知的鲁棒性水印算法

石红芹, 余鹰, 王艳

(华东交通大学, 南昌 330013)

摘要: **目的** 为了提高水印算法的抗攻击能力, 提出一种改进的基于压缩感知的鲁棒性水印算法。**方法** 为了确保嵌入的水印信息在载体中分布均匀, 对彩色载体图像的 R , G , B 分量进行 $N \times N$ 不重复分块后得到 R_{ij} , G_{ij} , B_{ij} , 按照下标值不同的原则, 随机选择 3 个颜色分块构成嵌入块; 为了提高水印的鲁棒性和检测的成功率, 对水印信息采用循环嵌入的方式; 详细论述水印的嵌入和提取流程, 并通过仿真与其他 3 种算法进行实验结果对比。**结果** 水印提取不需要原始图像的参与, 具有盲检测性, 水印的循环嵌入策略极大地提高了水印鲁棒性和水印检测成功率。仿真实验结果表明, 重建的水印图像具有较小的失真度, 算法能够很好地抵抗一系列的几何攻击。**结论** 算法具有较好的鲁棒性和不可感知性, 实现较简单, 在版权保护及信息安全领域具有一定的参考价值。

关键词: 分块压缩感知; 鲁棒性; 测量值; 盲水印

中图分类号: TS801.3; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)15-0230-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.15.037

An Improved Watermarking Algorithm with Strong Robustness Based on CS

SHI Hong-qin, YU Ying, WANG Yan

(East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: The work aims to put forward an improved watermarking algorithm with strong robustness based on CS to improve the anti-attack capability of watermarking algorithm. In order to ensure the uniform distribution of embedded watermark information in the carrier, the R_{ij} , G_{ij} and B_{ij} were obtained from $N \times N$ non-repetitive blocking of R , G and B of color carrier image. According to the principle of different subscript values, the embedded blocks were randomly selected from each of the three color categories. In order to improve the watermark robustness and the success rate of detection, the strategy of cyclic embedding of watermark information was adopted. The watermark embedding and extracting process were described in details. The proposed algorithm was compared with other three algorithms through simulation. The process of extracting the embedded watermark without the original image achieved a blind detection. The strategy of cyclic embedding of watermark greatly improved the watermark robustness and the success rate of watermark detection. The experimental results of simulation demonstrated that, the reconstructed watermark image had less distortion and the proposed algorithm could resist a series of geometric attacks. With better robustness and visual insensitivity, the proposed watermarking algorithm is easy to realize, which has certain reference value in copyright protection, information security and other fields.

KEY WORDS: block compress sensing; robustness; measurements; blind watermark

收稿日期: 2019-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(61563016, 61762038, 61861016); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ180320, GJJ180319); 江西省自然科学基金(20181BAB202023); 教育部人文社会科学研究一般项目(17YJAZH117, 16YJAZH029)

作者简介: 石红芹(1970—), 女, 硕士, 华东交通大学副教授, 主要研究方向为数字水印、网络信息安全。

随着网络知识产权建设和管理力度的不断加大,版权保护的意识逐渐深入到社会的方方面面。数字水印作为一种信息安全技术,正是版权保护和盗版追踪的有利工具。在不影响数字产品使用和流通的前提下,在其中嵌入能证明该产品版权所有者的标记信息^[1],一旦发生版权纠纷,可以通过权威机构验证产品中隐藏的水印信息。近年来,随着彩色图像使用范围的日益扩大,对彩色图像的版权保护已成为研究的热点^[2-3]。

对彩色图像水印算法的研究,第 1 种是在彩色载体图像颜色空间转换后的亮度分量上嵌入水印信息:李毓彬等^[4]将彩色载体图像亮度分量 Y 进行离散余弦变换后,取其中频区域,将文字信息编码为 QR 码作为数字水印嵌入其中;马婷等^[5]则对载体亮度分量 Y 分量进行非采样 Contourlet 变换(NSCT)后,对产生的低频子带进行小波变换,再对小波变换的低频系数进行奇异值分解(SVD),最后将加密的水印信息叠加到彩色图像的奇异值上。

第 2 种是将彩色载体图像 R, G, B 分解后的颜色分量作为水印信息的嵌入载体:韩绍程等^[6]在彩色水印图像 R, G, B 3 个分量上分别进行分块压缩感知,获取 3 个分量的观测矩阵后实施奇异值分解,将该奇异值以叠加扰动的方式,调制在载体图像相应分量 DWT-DCT 混合变换后对角方向中频系数的奇异值上;王晓红等^[7]将彩色载体图像 R, G, B 分解后再进行 NSCT 变换,提取低频分量进行分块 DCT 变换,对每块奇异值分解,将置乱的水印信息的各颜色分量,对应叠加到载体的奇异值中;张秋余等^[8]首先计算彩色图像 R, G, B 分量的差值直方图,然后将水印信息嵌入到 R 和 G 间的差值直方图的绝对值差中。此类算法当水印的嵌入量过大时,对水印的透明性会有较大影响。

第 3 种是基于彩色图像的零水印算法,对载体图像提取某些特征生成零水印,发往 IPR 中心保存,作为载体图像完整性验证的依据:江泽涛等^[9]首先将载体的亮度分量 Y 进行离散小波变换(DWT),再取其低频子带进行分块离散余弦变换(DCT),后对每个分块进行奇异值分解,利用分解得到的奇异值作为图像的特征来构造零水印;熊祥光^[10]通过整体图像均值与分块均值之间的关系,在空域构造特征矩阵后将此特征矩阵与预处理后的水印信息进行异或运算,构造零水印信息,再将此水印信息经过预处理后注册到知识产权数据库里,零水印不用在载体中嵌入水印,从而从根本上解决了水印的鲁棒性和透明性之间的矛盾。

文中提出了一种改进的压缩感知鲁棒性水印算法,通过对水印信息压缩感知后提取测量值,既极大地减少了嵌入的水印信息量,又可以提高算法的安全性。同时水印信息的循环嵌入也极大地提高了算法抗

剪切攻击的能力。算法为了提高水印的鲁棒性,采用了奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)与 CS 测量值相结合的策略。

1 算法原理

1.1 分块压缩感知

Donoho 等人于 2006 年提出了压缩感知理论(Compress Sensing, CS)^[12]。压缩感知理论通过非线性重构原信号时,所用随机采样获取信号的离散样本远小于 Nyquist 采样率,所以,压缩感知的核心就是其线性测量过程、测量矩阵构造、信号重构。压缩感知的观测值不但可以完整地描述原图像,而且在数据量远远小于原图像情况下,包含了图像的所有特征。这一特性应用在水印图像的预处理上,一方面可以减少水印的嵌入量,提高算法的透明性;另一方面因为不知道压缩感知矩阵就无法重构水印信息,极大提升了算法的安全性。

因为在对大幅图像进行压缩感知时时间长且难度大,所以为了降低计算的复杂度、减少水印信息重构时间、压缩存储器规模,首先对水印图像进行分块,再对每块图像进行压缩感知提取测量值^[13]。

首先对总像素值为 N 的图像 T 进行等面积无重叠分块,每块大小记为 $D \times D$,设第 j 个分块的向量信号为 x_j ,用同一压缩采样算子获取每块的测量值向量 y_j :

$$y_j = \Phi_D x_j \quad (1)$$

式中: Φ_D 是 $m \times D^2$ 的测量矩阵。通过对每个图像块提取 $m = \lfloor MD^2/N \rfloor$ 个测量值来得到一幅图像的 M 个测量值。

1.2 贪婪重构算法

贪婪算法是目前常用的信号重构算法。鉴于其中的正交匹配追踪算法(OMP)计算量小、重构效果好、易实现的特性,选择了 OMP 进行水印信号重构。其基本思想是用贪婪迭代的方式来选取测量矩阵 Φ 的列。OMP 算法的每一次迭代都运用了相关最大化进行原子挑选,每一步迭代都可以分为:原子选择和残差更新。在每次迭代中利用最小二乘法,将选择出的匹配向量正交投影到已经获得的索引矩阵的列向量上,然后更新余差,直至满足迭代终止条件后强制终止^[14]。具体步骤如下所述。

输入:测量向量 y , $M \times N$ 维的测量矩阵 Φ , 信号稀疏度 k 。

输出:信号稀疏表示系数估计 $\hat{\theta}$, 重建误差 r , 重构信号 \hat{x} 。

初始化:令冗余向量 $r_0 = y$, $\hat{x}_0 = 0$, 索引集 $J_0 = \emptyset$,

迭代次数 $t=1$ 。

repeat

相关计算 $u = \Phi^T r$; 原子初选

$$J = \{i | |u_i| > \tau \|r\|_2 / \sqrt{M}\}.$$

if $\|J\|_0 \neq 0$ 正规化 $|u_i| < 2|u_j|$;

对于 $i, j \in J_0$ 选出能量最大的一组 $\|u|_{J_0}\|_2$ 。

else

$$J_0 = \max \{i | |u_i| > \tau \|r\|_2 / \sqrt{M}, 1\} ;$$

合并支撑集 Φ_Λ , 其中 $\Lambda = \Lambda \cup J_0$;

信号逼近并更新余量 :

$$x_r = \arg \min \|y - \Phi_\Lambda x\|_2, \quad r = y - \Phi_\Lambda x_r$$

until 达到重构精度。

得到信号的稀疏表示系数估计 $\hat{\theta}$:

$$\hat{\theta} = \Phi^* \times y \tag{2}$$

其中: $\Phi^* = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T$

得到 $\hat{\theta}$ 后, 利用稀疏矩阵可得重构信号 :

$$\hat{x} = \Psi \hat{\theta} \tag{3}$$

Ψ 是信号 x 的稀疏基。

1.3 循环嵌入算法

很多水印算法抗剪切攻击的能力不强,通过一种循环嵌入的思想解决了水印抗剪切攻击的问题,水印的嵌入过程见图1。

第1步:设载体图像的大小为 $M \times N$, 对其进行等面积非重叠分割,共得到 $m \times n$ 块 (M, N 分别为 m, n 的2的整数倍),可用 $B_{ij} (i=0, 1 \dots M/m - 1; j=0, 1 \dots N/n - 1)$ 来记录每个分块。

第2步:设水印图像的大小为 $Q \times Q$, 等面积非重叠分割成 $p \times p$ 块,每个分块可记为 $W_d (d=0, 1 \dots p^2 - 1)$ 。

第3步: $W_d (d = (i \bmod p) \times p)$ 为载体块每行第一列 B_{i0} 嵌入水印块,其后每一列嵌入的水印块号为 $W_{((d+1) \bmod p^2)}$ (d 取前一列的数值)。

第4步:当水印提取时选取任意 $p \times p$ 个连续的嵌入块,都能提取到完整的水印信息。

1.4 NSCT 变换

非下采样的 Contourlet 变换(NSCT)是2005年由 Arthur L 等提出的。对图像进行 NSCT 分解可得到与原图大小完全相同的图像,而且实验证明,NSCT 变换比小波变换的子带在各方向上的边缘、纹理、轮廓信息更加丰富、详尽,且在图像降噪、纹理、形状的特征提取方面具有优越的性能。特别值得一提的是,NSCT 变换的低频系数因为具有抗噪、滤波及压缩攻击能力,成为水印嵌入的优良载体。NSCT 变换的分解结构示意图见图2。

W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₀
W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃
W ₆	W ₇	W ₈	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆
W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₀
W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃
W ₆	W ₇	W ₈	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆
W ₀	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₀
W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃

图1 循环水印嵌入示意

Fig.1 Schematic diagram of cyclic watermark embedding

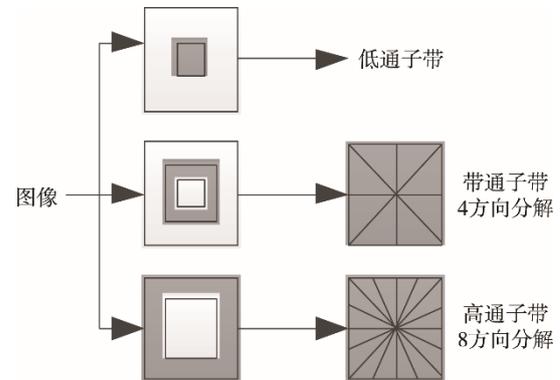


图2 NSCT 变换

Fig.2 NSCT transformation

2 算法描述

2.1 水印嵌入算法

1) 将水印图像 W 非重叠分割成 $M \times M$ 块, 对各块 $W_d (d=0, 1 \dots M^2 - 1)$ 采用相同的高斯随机测量矩阵观测, 设每个分块提取 n 个测量值, 第 d 个水印图像块的测量值可用 $Y_d (d=0, 1 \dots M^2 - 1)$ 表示:

$$Y_d = \begin{Bmatrix} y_{d1} \\ y_{d2} \\ \dots \\ y_{dn} \end{Bmatrix} \tag{4}$$

2) 将 RGB 分解后的彩色载体图像的 R, G, B 分量分别进行 $N \times N$ 块的等面积非重叠分割, 之后为其编号 $R_{ij}, G_{ij}, B_{ij} (i=0, 1 \dots N-1, j=0, 1 \dots N-1)$, 再按照坐标值 (i, j) 随机从各颜色分块中选择 $N \times N$ 个嵌入块。

3) 对 $N \times N$ 块中的每个分块进行 1 级 NSCT 分解, 得低频分量 A_{Ro}, A_{Go}, A_{Bo} 和高频分量 H_{Ro}, H_{Go}, H_{Bo} , 用每块的低频分量块构造嵌入数组 $Q_{N \times N}$ 。

4) 用 Q_x 代表嵌入数组中的每个分量块矩阵, 分别对其进行 SVD 分解得:

$$Q_x = U_x S_x V_x^T = U_x \begin{Bmatrix} \lambda_{x1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{xn} \end{Bmatrix} V_x^T = A_x \begin{Bmatrix} \lambda_{x1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{xn} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

其中 U_x 和 V_x 均为正交矩阵， $A_x = U_x V_x^T$ ， S_x 为对角矩阵且 λ_{xi} 为其奇异值，记录每项的 A_x 及 λ_{xi} ($x=0, 1 \dots N^2 - 1, i=0, 1 \dots n$)。

5) 将水印块的测量值循环嵌入到嵌入数组 Q 的奇异值中：嵌入规则见图 1，假如水印分块 3×3 ，载体数组 $Q[m][n]$ 每行的第 1 列嵌入水印块 W_d ($d=(i \bmod 3) \times 3, i=0, 1, 2 \dots m - 1$)，自第 2 列开始每一列嵌入 W_d ($d=(d+1) \bmod 3^2$)。

将水印块的测量值按照循环规则嵌入到载体块的奇异值矩阵中，得：

$$Q'_x = A_x \begin{Bmatrix} \lambda_{x1} + \alpha_d y_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{x2} + \alpha_d y_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{xn} + \alpha_d y_{dn} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

α_d 为第 d 块水印嵌入强度因子，用来调节水印嵌入强度，实验测定 α_d 的取值范围在 0.16 ~ 0.25 之间效果最佳。

6) 用含水印信息块 Q'_x 替换其原始分块 Q_x 后再与每块的高频分量逆 NSCT 变换，生成新的颜色分量 R', G', B' 后，合成含水印载体图像 O_w 。

水印嵌入算法实现过程见图 3。

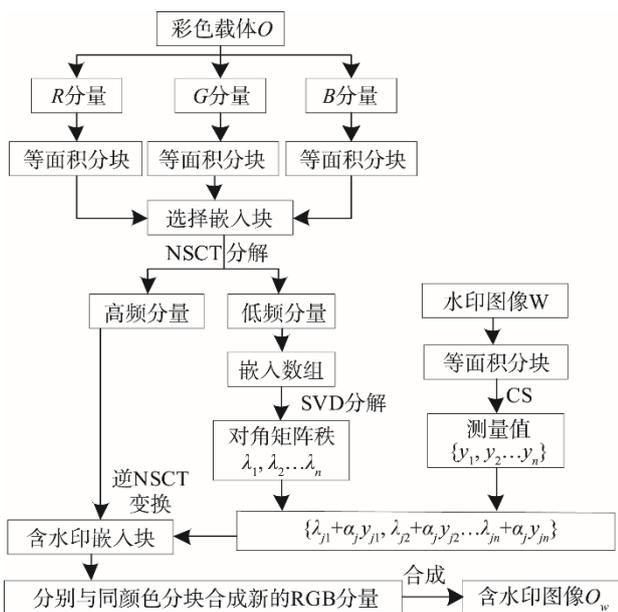


图 3 水印嵌入算法实现过程

Fig.3 Realization process of watermark embedding algorithm

2.2 水印提取算法

1) 对含水印图像 O_w 进行 RGB 分解，对 R, G, B 分量按照水印嵌入时相同的大小进行非重叠分块，按照嵌入时保存的信息选择嵌入数组，从数组中选择任意连续的 $M \times M$ 个分块，对各块分别进行一级 NSCT 分解，得低频分量 A_{O_w} 和 高频分量 H_{O_w} ，用 Q'_x 代表各分块低频分量矩阵，对每块进行奇异值分解：

$$Q'_x = U'_x S'_x V'^T_x = U'_x \begin{Bmatrix} \lambda'_{j1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda'_{j2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda'_{jm} \end{Bmatrix} V'^T_x \quad (7)$$

2) 对每个对角元素提取水印测量值：

$$y'_{ji} = \frac{\lambda'_{ji} - \lambda_{ji}}{\alpha_j} \quad (i=1, 2 \dots n) \quad (8)$$

则第 j 个水印分块的压缩感知测量值为：

$$Y'_j = \begin{Bmatrix} y'_{j1} \\ y'_{j2} \\ \dots \\ y'_{jn} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

根据贪婪重构算法，输入相应观测向量 y ，测量矩阵 Φ ，信号稀疏度 k 后，经一系列运算得到各水印分块，再合成水印图像 W' 。

3 仿真实验

对算法的鲁棒性和透明性进行了仿真实验。选用了 64×64 的灰度图像 Cameraman 作为水印图像，见图 4，采用 256×256 的彩色图像 peppers, Skyline_Arch, impact, kid 作为载体，见图 5。为了更加客观地验证算法性能，引入了归一化相关系数 NC，水印的鲁棒性是 与 NC 值的 增长成正比的；而峰值信噪比 PSNR 是衡量图像视觉特性的指标，说明了水印的透明性的优劣。



图 4 水印图像

Fig.4 Watermarking image

3.1 算法不可见性检测

对水印图像等面积非重叠分割成 4×4 块,对载体图像 RGB 分解后,分别对 R, G, B 分量等面积非重叠分割成 8×8 块。依照文中算法对载体进行水印嵌入,含水印图像见图 6,从视觉上看不出含水印图像与原始载体图像的区别。在无噪声干扰的情况下,所提算法对 Peppers_Skyline_Arch_Impact 图像的 PSNR

值分别为 41.1043, 40.9871, 40.8573, 均大于 40 dB,说明水印的不可见性良好。

3.2 算法鲁棒性检测

含水印图像受到不同攻击后,所提取的水印图像及其 NC 值见图 7。从视觉效果上,提取的所有水印图像都可以被清晰地辨认,同时实验数据也进一步表明,算法具有相当好的鲁棒性。

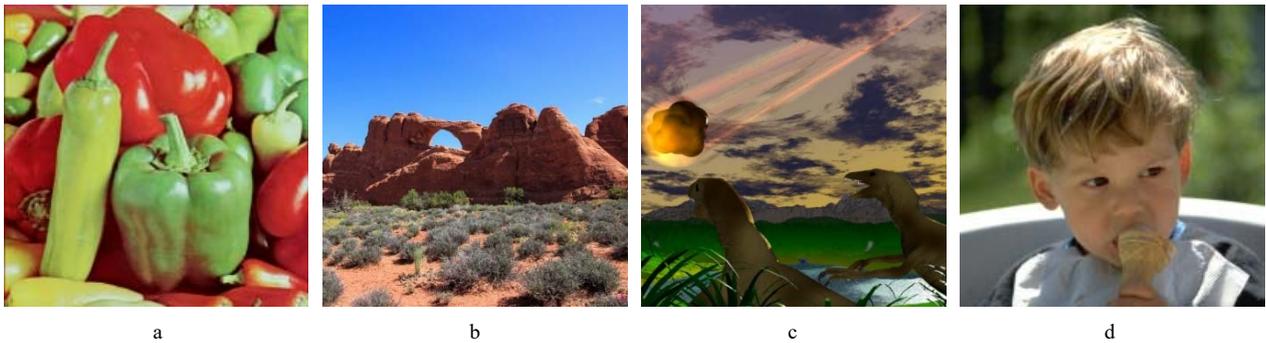


图 5 彩色载体图像
Fig.5 Color carrier images

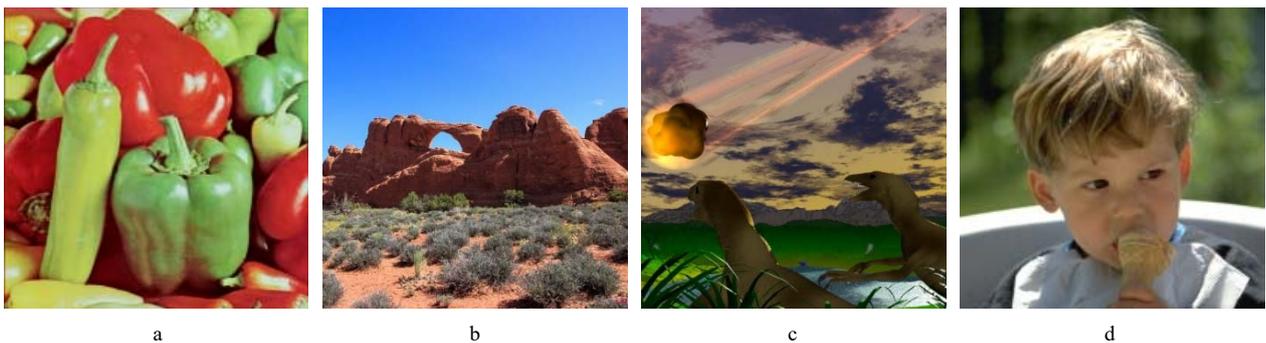


图 6 含水印图像
Fig.6 Watermarked images



图 7 含水印图像受到攻击后提取的水印
Fig.7 Extracted watermark of watermarked images after attacks

含水印图像受到不同攻击情况下,所提算法与文献[15—17]算法提取的水印图像 NC 值对比见表 1。从表 1 可以看出,所提算法在剪切、JPEG 压缩、椒盐噪声、

缩放攻击等方面的性能都优于对比文献。因在不知道压缩感知测量矩阵的情况下,无法通过测量值恢复出原始图像,这使得算法的安全性进一步得到了保障。

表 1 水印鲁棒性测试
Tab.1 Watermark robustness test

攻击方式	NC 值			
	文中算法	文献[15]	文献[16]	文献[17]
高斯低通滤波(3×3)	0.9054	0.8938	1	0.8628
高斯噪声 0.001	0.9905	0.9973	0.9719	0.9957
椒盐噪声 0.01	0.9423	0.8031	1	0.9317
JPEG 压缩(QF=70)	0.9793		0.8942	0.9428
内圈剪切 1/4	0.9901		0.9125	

4 结语

结合压缩感知技术提出了一种改进的盲水印算法。该算法不仅提高了水印的鲁棒性,而且因为压缩感知技术的加入,降低了水印信息的嵌入量,提高了算法的安全性。仿真实验数据进一步表明,算法对于常用的几何攻击具有较好的鲁棒性。由 PSNR 值也可以看出,文中算法具有很好的不可见性。如何在提高算法的鲁棒性的前提下进一步提升其不可见性,是下一步水印研究的重点。

参考文献:

- [1] 肖振久,李南,王永滨,等.基于 Contourlet 奇异值分解的强鲁棒数字水印算法[J].计算机工程,2016,42(9):138—143.
XIAO Zhen-jiu, LI Nan, WANG Yong-bin, et al. Strong Robust Digital Watermark Algorithm Based on Contourlet Singular Value Decomposition[J]. Computer Engineering, 2016, 42(9): 138—143.
- [2] 索红军,何冰.基于四元数实矩阵和对数极坐标的彩色图像零水印算法[J].光学技术,2017,43(1):77—82.
SUO Hong-jun, HE Bing. A Zero Real Color Image Watermarking Based on Quaternion Matrix Representation and Log Polar Mapping[J]. Optical Technique, 2017, 43(1): 77—82.
- [3] 魏代海,王晓红,刘玄玄,等.一种强鲁棒性的彩色图像数字水印技术[J].包装工程,2016,37(9):124—128.
WEI Dai-hai, WANG Xiao-hong, LIU Xuan-xuan, et al. A Color Image Digital Watermarking with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 124—128.
- [4] 李毓彬,孙刘杰,包观笑.一种基于 QR 码的彩色图像数字水印[J].包装工程,2015,36(7):91—95.
LI Yu-bin, SUN Liu-jie, BAO Guan-xiao. A Novel Color Image Digital Watermarking Algorithm Based on

- QR Code[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 91—95.
- [5] 马婷,陈农田.基于 Logistic 混沌加密的 NSCT-DWT-SVD 彩色水印算法[J].现代电子技术,2016,39(10):37—41.
MA Ting, CHEN Nong-tian. NSCT-DWT-SVD Color Watermarking Algorithm Based on Logistic Chaotic Encryption[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(10): 37—41
- [6] 韩绍程,王蕊,张兆宁.基于 BCS 和 SVD 的混合变换域双彩色图像水印算法[J].计算机工程与设计,2016,37(7):1841—1846.
HAN Shao-cheng, WANG Rui, ZHANG Zhao-ning. Dual Color Image Watermarking Algorithm Based on Block Compressed Sensing and Singular Value Composition in Hybrid Transform Domain[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(7): 1841—1846.
- [7] 王晓红,魏代海,刘玄玄,等.一种彩色 QR 码嵌入彩色图像的数字水印技术[J].光电子·激光,2016,27(10):1094—1100.
WANG Xiao-hong, WEI Dai-hai, LIU Xuan-xuan, et al. Digital Watermarking Technique of Color Image Based on Color QR Code[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2016, 27(10): 1094—1100.
- [8] 张秋余,左航洲,晏燕,等.基于压缩感知的大容量彩色图像可逆水印算法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(8):34—38.
ZHANG Qiu-yu, ZUO Hang-zhou, YAN Yan, et al. High Capacity Reversible Watermarking Algorithm for Color Images Based on Compressed Sensing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(8): 34—38.
- [9] 江泽涛,陈微.基于 DWT-DCT-SVD 的彩色图像零水印算法[J].微电子学与计算机,2016,33(8):107—111.
JIANG Ze-tao, CHEN Wei. Zero-watermarking Algorithm for Color Image Based on DWT-DCT-SVD[J]. Microelectronics & computer, 2016, 33(8): 107—111.
- [10] 熊祥光.空域彩色图像鲁棒零水印算法[J].计算机

- 工程与科学, 2017, 39(1): 103—110.
- XIONG Xiang-guang. A Robust Zero-watermarking Algorithm for Spatial Domain Color Images[J]. Computer Engineering & Science, 2017, 39(1): 103—110.
- [11] DONOHO D L. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289—1306.
- [12] 赵春晖, 刘巍. 基于分块压缩感知的图像半脆弱零水印算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(4): 609—617.
- ZHAO Chun-hui, LIU Wei. Block Compressive Sensing Based Image Semi-fragile Zero-watermarking Algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(4): 609—617.
- [13] NEEDELLD, ROMAN V. Uniform Uncertainty Principle and Signal Recovery via Regularized Orthogonal Matching Pursuit[J]. Foundations of Computational Mathematics, 2009, 9(3): 317—334.
- [14] DA C, ARTHUR L, ZHOU Jian-ping, et al. The Non-sampled Contourlet Transform: Theory, Design and Applications[J]. IEEE Trans Image Press, 2006, 15(10): 3089—3101.
- [15] 魏丰, 梁栋, 张成, 等. 基于压缩感知观测值的数字图像水印算法安徽大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 61—68.
- WEI Feng, LIANG Dong, ZHANG Cheng, et al. Watermarking Algorithm for Digital Image Based on Compressive Sensing Measurements[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2013, 37(3): 61—68.
- [16] 温健阳, 宫宁生, 陈岩. 基于压缩感知的图像盲水印算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(11A): 377—382.
- WEN Jian-yang, GONG Ning-sheng, CHEN Yan. Blind Image Watermark Algorithm Based on Compressed Sensing[J]. Computer Science, 2016, 43(11A): 377—382.
- [17] 周燕, 曾凡智, 张志飞, 等. 一种 RGB 分块压缩感知的图像水印算法[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2016, 38(2): 73—78.
- ZHOU Yan, ZENG Fan-zhi, ZHANG Zhi-fei, et al. An Image Watermarking Algorithm Based on RGB Block Compressed Sensing[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2016, 38(2): 73—78.