

包装印刷

基于压缩感知的强鲁棒性彩色图像双水印算法

石红芹, 王艳, 余鹰
(华东交通大学, 南昌 330013)

摘要: **目的** 为了解决图像的鲁棒性和透明性之间的矛盾, 依据压缩感知理论的计算保密性提出一种基于压缩感知的强鲁棒彩色图像双水印算法。**方法** 首先将水印图像 RGB 分解后, 对 G 、 B 分量分块压缩感知获得测量值, 再对载体图像 G 、 B 分量 NSCT 分解, 对低频分量非重叠分块后 LU 分解、奇异值分解, 将每个分块的水印测量值按不同嵌入强度对应嵌入载体奇异值矩阵中, 经过一系列逆变换得到含水印图像。最后用含水印图像 R 分量分块压缩感知测量值生成零水印, 发往 IPR 中心注册保存。**结果** 该算法在水印的嵌入和提取仿真实验结果中峰值信噪比大于 40 dB, 重建的水印图像与原图像相似度极高, 且能抵抗剪切、高斯噪声、椒盐噪声、高斯低通滤波和 JPEG 压缩等类攻击。**结论** 算法具有很强的鲁棒性和较好的透明性, 实现较简单具有切实的可行性。

关键词: 分块压缩感知; 彩色图像; 测量值; 双水印

中图分类号: TS801.3; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)17-0174-05

Strongly Robust Dual Watermark Algorithm for Color Image Based on Compressed Sensing

SHI Hong-qin, WANG Yan, YU Ying
(East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a strongly robust dual watermark algorithm for color image based on Compressed Sensing (CS) according to the computational secrecy of CS theory, in order to solve the dispute between the robustness and transparency of the image. First, the block CS of G and B components was done to obtain the measurements after the RGB decomposition of the watermark image. Then, the NSCT decomposition of G and B components of the carrier image was carried out. LU and singular value decompositions were done after the non-overlapped blocking of the low-frequency components. The watermark measurements of each block were correspondingly embedded into the singular value matrix of the carrier according to the different embedding strengths. After a series of inverse transformations, the watermarked image was obtained. Finally, a zero watermark was generated with the block CS measurements of R component of the watermarked image, and sent to the IPR center for registration and safekeeping. Based on the water embedding and extraction simulation experiment results, the peak signal to noise ratio of the proposed algorithm was greater than 40 dB. The similarity between the reconstructed watermark image and the original image was very high. The reconstructed watermark image could resist such attacks as shearing, Gaussian noise, salt and pepper noise, Gaussian low-pass filter and JPEG compression, etc. It is concluded that, with both strong robustness and good transparency, the algorithm is simple and feasible.

KEY WORDS: block compressive sensing; color image; measurements; dual watermark

数字水印技术是将一些标识信息直接或间接地嵌入数字载体中, 既不影响原载体的使用价值也不容

易被探知和修改。版权人可以通过识别和辨认这些隐藏在载体中的信息达到版权验证的目的。随着互联网

收稿日期: 2017-04-14

基金项目: 国家自然科学基金 (61365008, 61563016); 教育部人文社科基金 (15YJA860013); 江西省科技厅工业支撑项目 (20161BBE50092); 江西省自然科学基金 (20151BAB217011)

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、图像处理。

的发展,彩色图像的使用频率越来越高,随之而来,对彩色图像数字版权的保护问题也显得越来越重要,因此对彩色图像的版权保护与内容认证成为当今水印技术研究的热点^[1-3]。

目前常用的对彩色图像水印研究方法:将彩色图像进行颜色空间转换,提取亮度分量作为水印信息的嵌入区域,这种方法类似于灰度图像的水印嵌入^[4-6];将 1 个或者 2 个不同的水印信息嵌入到彩色图像的不同颜色分量中^[7-9],这有可能导致水印的嵌入量多或 2 个水印信息相互影响而造成载体图像的视觉效果下降;基于彩色图像的零水印算法^[10-11]。

因为人类视觉系统对蓝色分量的变化不太敏感,所以在蓝色分量当中嵌入水印更加不易被察觉,绿色分量中嵌入水印能更好地抵抗有损压缩和噪声攻击具有更好的鲁棒性。文中采用压缩感知技术对彩色水印的蓝色分量和绿色分量提取压缩感知测量值后分别嵌入到 NSCT 分解后的载体图像蓝色和绿色通道低频分量中,再将含水印图像红色分量分块压缩感知后提取测量值生成零水印。一方面,通过对水印图像压缩感知降低了对载体的嵌入量;另一方面,零水印的生成又具有对图像非法篡改准确定位功能。

1 相关研究

1.1 分块压缩感知

压缩感知理论(CS)是由 Donoho 等提出的^[12]。该理论通过开发信号的稀疏特性在远小于 Nyquist 采样率的条件下用随机采样获取信号的离散样本,再通过非线性重构算法重建原信号。CS 的核心是线性测量过程及其测量矩阵构造与信号重构。CS 观测值作为原图像的完整描述,涵盖了其所有的特征并且数据量远少于原图像,故通过压缩感知可极大地减少水印信息嵌入量,减少对原始载体图像的干扰。在对水印信号重构的过程中,必须在已知压缩采样矩阵的情况下才能正确重构出水印信号,这进一步加强了水印算法的安全性。考虑到大幅图像压缩感知时间长、难度大,为了降低 CS 计算复杂度及压缩存储器规模并缩短重建时间,可将图像非重叠分块后再进行压缩感知^[13]。现将总像素数为 N 的图像 X 分成大小为 $B \times B$ 的小块, x_i 为第 i 个分块的向量信号,对所有分块采用相同的压缩采样算子,得到每个图像块的测量值向量 y_i ,有:

$$y_i = \Phi_B x_i \quad (1)$$

式中: Φ_B 是个 $m \times B^2$ 的矩阵,若对一副图像获取 M 个测量值,可以通过压缩感知对每个图像子块各取 m 个测量值 ($m = \lfloor MB^2 / N \rfloor$)。又由于测量矩阵具有加密作用,使得非法攻击者在不知道密钥的情况下无法通过测量值重构原始图像信息。

1.2 NSCT 变换

所谓 NSCT 就是取消了 contourlet 变换中对于图像的上下采样而改用对滤波器进行上采样——即非下采样 Contourlet 变换^[14]。NSCT 变换是先进行多尺度分解,而后再进行方向分解的 Contourlet 变换,它包含了 Contourlet 变换所有优点同时又有效地解决了伪 Gibbs 失真问题。NSCT 分解得到的最终图像与原始图像大小相同,与小波变换的子带相比较,NSCT 方向子带更丰富更详尽地表现了各方向上的边缘、纹理、轮廓信息且 NSCT 低频系数本身有很好的抗噪声、滤波和压缩等攻击的能力,是嵌入水印的极佳载体。

1.3 LU 分解

对于任何一个方阵 A 可以表示成一个下三角矩阵 L 和一个上三角矩阵 U 的乘积: $A=LU$, 其中矩阵 L 的对角线元素全为 1,将矩阵 U 进一步分解后 A 可以表示成: $A=LDU$, 其中 D 为一个对角矩阵,其分解公式见式(2)。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ l_{21} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ 0 & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ l_{21} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{u_{12}}{d_1} & \cdots & \frac{u_{1n}}{d_1} \\ 0 & 1 & \cdots & \frac{u_{2n}}{d_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$= LDU \quad (2)$$

由经验可知,对角矩阵 D 的数值修改对图像质量的影响很小,故可以考虑把水印嵌入到对角矩阵中。

2 算法描述

2.1 水印嵌入算法

2.1.1 版权水印嵌入过程

将彩色水印图像进行 RGB 分解,对 G, B 分量进行 $M \times M$ 块的非重叠分块(M 为 2 的整数倍),对各块采用相同的高斯随机测量矩阵观测^[15],可得对应的测量值,设每个分块的测量值为 n ,用 $Y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个水印图像块的测量值:

$$Y_i = \begin{Bmatrix} y_{i1} \\ y_{i2} \\ \vdots \\ y_{in} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

将彩色载体图像 O 进行 RGB 分解,对 G, B 分量再进行 1 级 NSCT 分解,得低频分量 A_{G0}, A_{B0} 和高频分量 H_{G0}, H_{B0} 。对 A_{G0}, A_{B0} 分别进行 $M \times M$ 块的非重叠

分块(M 为2的整数倍),分块数为 t ,然后对每块进行LU变换:

$$A_{Goj} = L_{A_{Goj}} D_{A_{Goj}} U_{A_{Goj}} \quad (4)$$

$$A_{Boj} = L_{A_{Boj}} D_{A_{Boj}} U_{A_{Boj}}$$

得对角矩阵 $D_{A_{Goj}}$ 和 $D_{A_{Boj}}$,其中 j 为每块的编号($j=1,2,\dots,t$)。以 $D_{A_{Goj}}$ 代替 $D_{A_{Goj}}$ 和 $D_{A_{Boj}}$,对每块的对角矩阵进行奇异值分解:

$$D_{A_{Goj}} = U_{A_{Goj}} S_{A_{Goj}} V_{A_{Goj}}^T = \begin{matrix} U_{A_{Goj}} \begin{Bmatrix} \lambda_{j1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{j2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{jn} \end{Bmatrix} V_{A_{Goj}}^T \end{matrix} \quad (5)$$

式中: $U_{A_{Goj}}$ 和 $V_{A_{Goj}}$ 均为正交矩阵; T 为共轭转置; $S_{A_{Goj}}$ 为对角矩阵; λ_{ji} 为矩阵 $D_{A_{Goj}}$ 的奇异值。

将第 j 块水印的测量值依次嵌入到第 j 块载体分量的对角矩阵 $S_{A_{Goj}}$ 的奇异值中。

$$S_{A_{Goj}}^* = \begin{Bmatrix} \lambda_{j1} + \alpha_j y_{j1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{j2} + \alpha_j y_{j2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{jn} + \alpha_j y_{jn} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中: α_j 为第 j 块的嵌入强度。

用 $S_{A_{Goj}}^*$ 替代公式(4)中的 $S_{A_{Goj}}$ 得:

$$D_{A_{Goj}}^* = U_{A_{Goj}} S_{A_{Goj}}^* V_{A_{Goj}}^T \quad (7)$$

用 $D_{A_{Goj}}^*$ 替代公式(4)中的 $D_{A_{Goj}}$ 得:

$$A_{Goj}^* = L_{A_{Goj}} D_{A_{Goj}}^* U_{A_{Goj}} \quad (8)$$

对每块的 A_{Goj}^* 和 A_{Boj}^* 进行拼接得 A_{Go}^* , A_{Bo}^* 分别与各自的高频分量 H_{Go} , H_{Bo} 进行逆NSCT变换,得 G^* , B^* 分量再与原 R 分量一起合成含水印载体图像。

2.1.2 零水印的生成

将含水印图像 O_w 进行RGB分解,对 R 分量按版权水印嵌入时大小非重叠分块,用2.1.1节中高斯随机测量矩阵观测,得到每块对应的测量值。将测量值作为零水印与生成压缩感知测量矩阵的种子和分块尺寸作为水印密钥保存,以及水印图像 R 分量一起打包发往IPR中心注册保存,作为水印完整性的检验依据。水印具体嵌入流程见图1。

2.2 水印提取算法

2.2.1 版权水印的提取

对含水印图像 O_w 进行RGB分解,对 G , B 分量进行1级NSCT分解,分别得低频分量 A_{Go_w} , A_{Bo_w} 和低频分量 H_{Go_w} , H_{Bo_w} 对各低频分量按照水印嵌入时相同的大小进行非重叠分块,分块数为 t ,对每块进

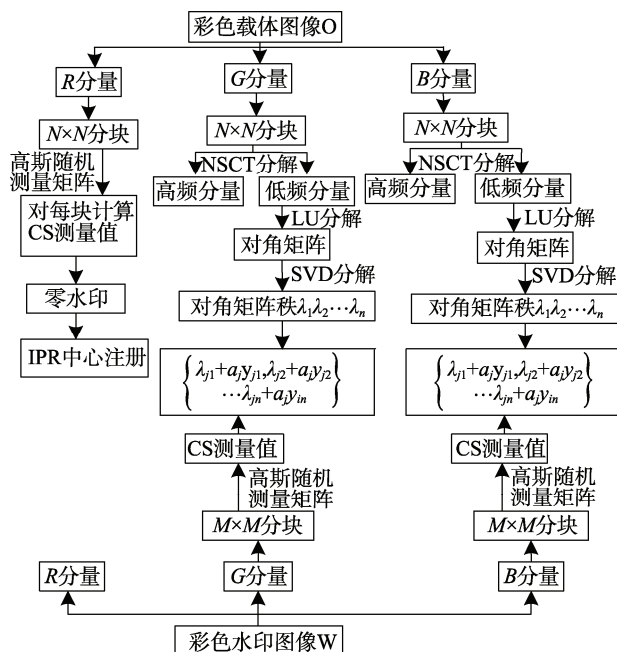


图1 水印嵌入算法实现过程

Fig.1 Watermark embedding algorithm process

行LU变换,见式(9)。

$$A_{Go_w} = L_{A_{Go_w}} D_{A_{Go_w}} U_{A_{Go_w}} \quad (9)$$

$$A_{Bo_w} = L_{A_{Bo_w}} D_{A_{Bo_w}} U_{A_{Bo_w}}$$

对每块的对角矩阵 $D_{A_{Go_w}}$ ($f=G, B$)进行奇异值分解:

$$D_{A_{Go_w}} = U_{A_{Go_w}} S_{A_{Go_w}} V_{A_{Go_w}}^T = \begin{matrix} U_{A_{Go_w}} \begin{Bmatrix} \lambda'_{j1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda'_{j2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda'_{jn} \end{Bmatrix} V_{A_{Go_w}}^T \end{matrix} \quad (10)$$

对每个对角元素提取水印测量值:

$$y'_{ji} = \frac{\lambda'_{ji} - \lambda_{ji}}{\alpha_j} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (11)$$

则第 j 个水印分块的压缩感知测量值为:

$$Y'_j = \begin{Bmatrix} y'_{j1} \\ y'_{j2} \\ \vdots \\ y'_{jn} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

因正交匹配追踪算法(OMP)作为贪婪迭代算法不仅方法简单而且实现容易^[16],故对 G , B 分量所有分块的测量值采用OMP算法进行重构得到 G'_w 和 B'_w 再与从IPR中心提取的水印图像 R 分量组合成水印图像 W' 。

2.2.2 零水印的提取

从IPR中心提取的数据包中,由已知测量矩阵种子生成高斯随机测量矩阵,对含水印载体图像的 R 分量分块压缩感知,提取每块的测量值为 Y'_{ik} ,根据类似方差的思想将每块测量值与作为零水印提取的测

量值 Y_{ik} 对比。

$$T_i = \sum_k^n (y'_{ik} - y_{ik})^2$$

(13)

当二者的差值 T_i 大于预设阈值 T 时，即被认为图像块受到过恶意篡改。

$$T = t_1 + \alpha t_2$$

(14)

式中： t_1 为合法操作强度； t_2 为非法篡改引起的最小扰动； α 为与扰动相关的系数。

3 仿真实验

为了对算法的鲁棒性和透明性进行验证，文中选用了 128×128 的彩色 Logo 水印图像见图 2， 256×256 的彩色载体图像 Lena, peppers 见图 3。为了客观地验证算法性能而引入归一化相关系数 NC，衡量原始水印和提取水印图像的相似度，引入图像视觉特性指标峰值信噪比 PSNR 以客观反映水印透明性。



图 2 彩色水印图像

Fig.2 Color watermarking image



图 3 彩色载体图像

Fig.3 Color carrier images

3.1 算法透明性检测

为了简洁起见，以下所有测试都是以 Lena 图像为例。对载体图像颜色分解后的 G 、 B 分量进行大小为 32×32 分块，对水印图像的 G 、 B 分量进行尺寸为 16×16 的分块，依据文中算法对载体进行水印嵌入，含水印图像见图 4，其中 Lena 的 PSNR 为 40.5376，Peppers 的 PSNR 为 41.0286。由经验可知当图像的峰值信噪比大于 30 时，说明图像的透明性良好，且由视觉效果可知，图 4 的含水印图像具有很好的透明性。在无噪声干扰的情况下，含水印图像 Lena 和 Pepper 在文中算法的 PSNR 值分别为 40.5376，41.0286，文献[17]的 PSNR 值分别为 34.41 和 31.5。

3.2 算法鲁棒性检测

含水印图像在不同状态下提取的水印图像及其 NC 值见图 5，从视觉上可以清晰看出提取的水印图

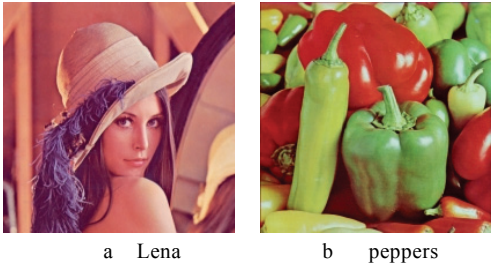


图 4 含水印图像

Fig.4 Watermarked images

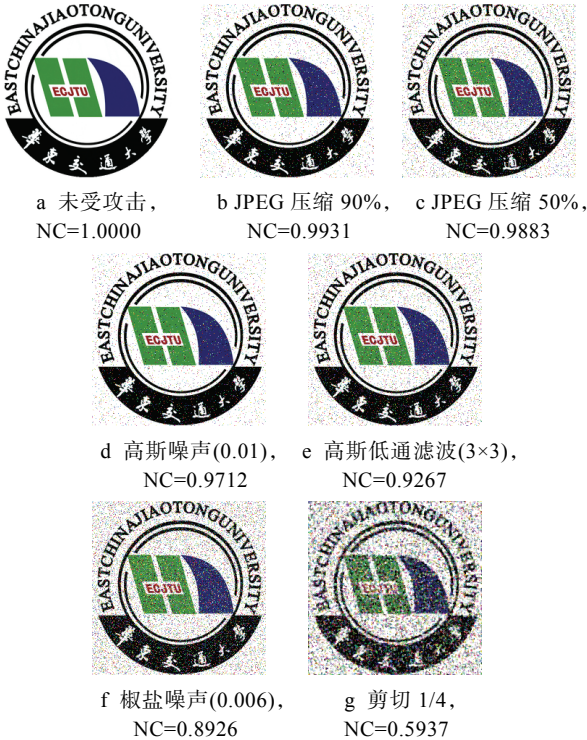


图 5 含水印图像受到攻击后提取水印

Fig.5 Extracted watermarking images after attacks

像。由实验数据可知，文中算法具有很好的鲁棒性。文中算法与文献[17]含水印图像受到不同攻击情况下提取的水印图像 NC 值对比见表 1。从表 1 中数值可以看出文中算法性能优于文献[17]。压缩感知算法中只有在获知测量矩阵的生成种子的情况下才能生成测量矩阵，进而才能计算出测量值，使得文中算法的安全性能进一步得到了保证。

表 1 文中算法与文献[17]算法 NC 值对比
Tab.1 Comparison of NC values from the algorithm in this paper and that in literature [17]

各类攻击	文中算法		文献[17]	
	Lena	Peppers	lena	Peppers
高斯低通滤波 (3×3)	0.9267	0.9189	0.9043	0.8938
高斯噪声 0.01	0.9712	0.9834	0.9999	0.9913
椒盐噪声 0.006	0.8926	0.8893	0.7766	0.8531
JPEG 压缩(50%)	0.9883	0.9794	—	—
剪切 1/4	0.5937	0.6014	—	—

4 结 语

文中提出了一种基于压缩感知的强鲁棒彩色图像双水印算法, 水印图像 G 、 B 分量经过压缩感知得到的测量值分别嵌入到彩色载体图像 G 、 B 分量中, 以实现载体的版权保护。通过对含版权水印图像 R 分量分块压缩感知提取测量值生成零水印, 实现对图像内容的完整性认证。仿真实验数据表明算法对于 JPEG 压缩、滤波、剪切、椒盐噪声具有很好的鲁棒性, 且由含水印图像的 PSNR 值可以看出算法具有很好的透明性。在今后的研究中将进一步降低算法的复杂度以期实现对彩色图像的实时处理。

参考文献:

- [1] 冯巍, 胡波. 基于超复数相位相关的彩色图像配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 183—187.
FENG Wei, HU Bo. Novel Color Image Registration Algorithm Using Quaternion Phase-only Correlation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1): 183—187.
- [2] SU Qing-tang, NIU Yu-gang, LIU Xian-xi, et al. Embedding Color Watermarks in Color Images Based on Schur Decomposition[J]. Optics Communications, 2012, 285(7): 1792—1802.
- [3] 郝世博. 针对彩色图像的新型零水印算法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(6): 298—301.
HAO Shi-bo. New Zero-watermarking Algorithm for Color Image[J]. Computer Application and Software, 2013, 30(6): 298—301.
- [4] LIU X L, LIN C C, YUAN S M. Blind Dual Watermarking for Color Images' Authentication and Copyright Protection[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016(99): 1.
- [5] 郭倩, 陈广学, 陈奇峰. 基于小波变换的数字水印技术[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 115—120.
GUO Qian, CHEN Guang-xue, CHEN Qi-feng. Digital Watermarking Technology Based on Wavelet Transform[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 115—120.
- [6] 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.
- [7] 蓝夏梅, 李宏昌. 基于纠错编码的彩色图像双水印算法研究[J]. 通信技术, 2013, 46(11): 99—102.
LAN Xia-mei, LI Hong-chang. Dual Watermarking Algorithm of Color Image Based on Error Correcting codes[J]. Communications Technology, 2013, 46(11): 99—102.
- [8] 虞晓庆, 李宏昌, 张茂. 兼具版权保护和内容认证彩色图像双水印算法[J]. 电子设计工程, 2012, 20(11): 32—35.
YU Xiao-qing, LI Hong-chang, ZHANG Mao. A Multifunctional Double-watermarking Algorithm of Color Digital Image for Copyright Protection and Authentication[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(11): 32—35.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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—140.
XIONG Xiang-guang. A Robust Zero-watermarking Algorithm for Spatial Domain Color Images[J]. Computer Engineering & Science, 2017, 39(1): 103—140.
- [12] DONOHO D L. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289—1306.
- [13] 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]. 2012, 38(4): 609—617.
- [14] ZHAO Jie. Digital Watermarking Method Based on Non-subsampled Contourlet Transform[J]. Information Technology Journal, 2013, 12(24): 8153—8158.
- [15] CANDLES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust Uncertainty Principles: Exact Signal Reconstruction from Highly Incomplete Frequency Information[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(2): 489—509.
- [16] 吴延海, 马孟新. 彩色图像有效分块压缩感知及联合重构[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(7): 2453—2457.
WU Yan-hai, MA Meng-xin. Effective Block Compressive Sensing and Joint Reconstruction for Color Images[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(7): 2453—2457.
- [17] 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[J]. 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.