

基于 NSCT 和压缩感知的数字图像水印算法

石红芹, 余鹰, 王艳
(华东交通大学, 南昌 330013)

摘要: **目的** 依据压缩感知理论具有很好的计算保密性, 提出一种基于 NSCT 和压缩感知的数字图像水印算法, 以解决图像的鲁棒性、不可感知性及保密性之间矛盾。**方法** 首先将水印图像分块压缩感知获得测量值, 然后再将载体图像 NSCT 分解, 对低频分量 Fibonacci 置乱后非重叠分块, 对每块进行 LU 分解、奇异值分解, 将每个分块的水印测量值按不同的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。**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 压缩等类的攻击。**结论** 该算法既具有很好的鲁棒性又兼有较强的不可见性, 具有切实的可行性。

关键词: NSCT 分解; 分块压缩感知; 数字图像

中图分类号: TS801.3; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0176-05

Digital Image Watermark Algorithm Based on NSCT and Compressive Sensing

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

ABSTRACT: The work aims to propose a digital image watermarking algorithm based on NSCT and compressive sensing (CS) according to the good computational security of CS theory, so as to solve the conflict between the robustness, imperceptibility and security of images. First, the watermark image was divided into blocks for CS to obtain the measurements. Second, the carrier image NSCT was decomposed. The low-frequency portion was encrypted through Fibonacci scrambling and divided into blocks. Third, low-frequency sub-bands of each block were subject to LU decomposition and singular value decomposition (SVD). The measurements of each watermarking block were embedded in carrier's singular value matrix with an appropriate embedding strength. The images containing watermark were obtained after a series of inverse transformations. In the process of watermark embedding and extracting simulation experiment results, the PSNR value of the proposed algorithm reached over 40 dB. The reconstructed watermark image was remarkably similar to the original image and had strong robustness against cropping, Gaussian noise, salt and pepper noise, Gaussian low-pass filter and JPEG compression attacks etc. The proposed algorithm has good robustness and strong invisibility, and it is practically feasible.

KEY WORDS: NSCT decomposition; block compressive sensing; digital image

随着互联网技术的发展, 数字媒体的应用越来越广泛, 伴随而来的盗版、侵权行为也越来越猖獗, 数字水印正是在这种大背景下发展起来的一种版权保护技术^[1-2]。数字水印技术将含知识产权的版权所有者的签名、产品序列号或者版权信息作为水印嵌入图像、视频、音频等多媒体内容中, 实现产品的版权保护和内容完整性认证^[3]。一方面, 为了保证版权信息

的有效性, 嵌入的水印信息要完整、有意义; 另一方面, 为了不影响多媒体内容的正常使用, 水印的嵌入量又不能太大。压缩感知可同时进行压缩、采样和加密, 并可用少量数据对信号进行恢复重构, 因此被越来越多地应用在数字水印领域^[4-5]。张秋余^[6]等对载体图像分块, 利用周围块与目标块的统计关系判断块类型, 自适应地选择容量参数进行分块压缩感知,

收稿日期: 2016-12-20

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, 华东交通大学讲师, 主要研究方向为数字水印、网络信息安全。

并利用整数变换嵌入水印。赵慧民^[7]等提出了一种用于帧内篡改检测的压缩感知视频水印算法,由压缩感知 DCT 测量矩阵对 I-VOP 图像提取 U, V 特征参数,生成基于内容的压缩感知视频水印数据并嵌入到图像 y 分量的 DCT 中高频系数中实现帧内篡改检测。肖迪等^[8]先将图像进行不重叠分块,再利用边缘检测手段划分重要块和非重要块,仅对非重要块用压缩感知技术进行加密,重要块仍采用传统加密方式。赵春晖^[9]等考虑到大尺寸图像压缩感知速度慢,计算量大,对存储空间要求高的问题,将图像分块后,对各个图像块进行观测,并将观测值作为零水印信息注册保存。池晓芳^[10]等提出一种基于图像几何校正和分块压缩感知测量值奇异值分解的鲁棒水印方案,对测量值的奇异值进行量化嵌入水印,并在水印检测前用图像归一化技术对受到几何攻击的含水印图像进行几何校正,确保水印正确提取。魏丰等^[11]对载体图像小波变换后不同频率的系数矩阵用不同的观测矩阵进行压缩感知,得到压缩后的观测值,再将水印嵌入至小波高频系数部分的观测值中,最后使用子空间追踪算法恢复稀疏信号,得到含水印图像。文中提出一种基于 NSCT 与压缩感知的数字图像水印算法,将水印分块 CS 后的测量值嵌入到 NSCT 变换后的载体低频分量中,很好地解决水印的鲁棒性与不可感知性之间的矛盾。

1 基本理论

1.1 NSCT 变换

NSCT 变换(Nonsubsampled Contourlet Transform)即非下采样 Contourlet 变换^[12-13]。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。NSCT 分解得到的最终图像是与原始图像大小相同。共 $1 + \sum_{m=1}^N 2^{k_m}$ 个子带,其中 k_m 为尺度 m 下的方向分解级数^[14]。NSCT 变换的分解结构见图 1。从 NSCT 低频系数中可以提取关键点,其本身就有很好的抗噪声、抵抗滤波和抗压缩等攻击的能力,是嵌入水印的极优载体。

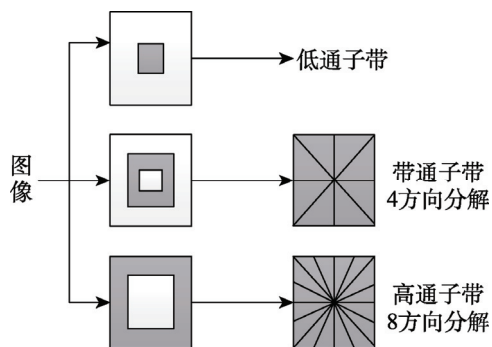


图 1 NSCT 变换
Fig.1 NSCT conversion

1.2 压缩感知

压缩感知(CS)是由 Donoho 等提出^[15]。该理论指出,对可压缩信号以远小于 Nyquist 采样率的标准来采集数据,然后通过非线性重构算法能够恢复原信号,其核心是线性测量过程及其测量矩阵的构造与信号的重构。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。这对水印图像而言,通过压缩感知可减少水印信息的嵌入量,极大地减少了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,进一步加强的水印算法的安全性。

将大尺度整幅图像分块后再压缩感知采样,可降低 CS 计算复杂度、压缩存储器规模、缩短重建时间,是目前比较切实可行的一种方案。现将大小为 $I_r \times I_c$ 的图像 X 分成 $B \times B$ 像素值的小块,总像素数 $N = I_r \times I_c$, x_i 为第 i 个分块的向量信号,对所有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 为 $m \times B^2$ 的矩阵。若对一副图像获取 M 个观测值,可以通过 CS 对每个图像子块各取 $m = \lfloor MB^2 / N \rfloor$ 个测量值。

1.3 LU 分解

对于任何一个矩阵 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^[16] $A = LU$ 。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 可以表示为 $A = LDU$,其中 D 为一个对角矩阵,其分解公式见式(2)。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ l_{21} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ 0 & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ l_{21} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & u_{12}/d_1 & \cdots & u_{1n}/d_1 \\ 0 & 1 & \cdots & u_{2n}/d_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = LDU \quad (2)$$

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

具体的水印嵌入算法如下所述。

1) 将大小为 $P \times P$ 的水印图像 W 按 $B \times B$ 像素值分块, P, B 都是 2 的整数倍, 对各块用相同的压缩采样算子观测, 可得对应的测量值^[10], 每个分块的测量值为 n 个, 用 $Y_i (i=1,2,\dots,n)$ 表示第 i 个水印图像块的测量值。

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

2) 将大小为 $M \times M$ 的灰度载体图像 O 进行 2 级 NSCT 分解, 得低频分量 A_0 和高频分量 H_0 , 对低频分量 A_0 进行 Fibonacci 置乱变换得 A'_0 , 置乱参数 r 作为密钥保存。

3) 对置乱后的 A'_0 进行非重叠分块, 分块数为 n , 对每块进行 LU 变换:

$$A'_{0j} = L_{A'_{0j}} D_{A'_{0j}} U_{A'_{0j}} \quad (4)$$

由式(4)得对角矩阵 $D_{A'_{0j}} (j=1,2,\dots,n)$, 其中 j 为每块的编号。

4) 对每块的对角矩阵 $D_{A'_{0j}}$ 进行奇异值分解:

$$D_{A'_{0j}} = U_{A'_{0j}} S_{A'_{0j}} V_{A'_{0j}}^T = U_{A'_{0j}} \begin{Bmatrix} \lambda_{j1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{j2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{jn} \end{Bmatrix} V_{A'_{0j}}^T \quad (5)$$

式中: $U_{A'_{0j}}$ 和 $V_{A'_{0j}}$ 均为正交矩阵; T 为共轭转置; $S_{A'_{0j}}$ 为对角矩阵; λ_{ji} 为矩阵 $D_{A'_{0j}}$ 的奇异值。

5) 将水印第 j 块的观测值依次嵌入到第 j 块载体分量的对角矩阵 $S_{A'_{0j}}$ 的奇异值中。

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

式中: α_j 为第 j 块的嵌入强度。

6) 用 $S_{A'_{0j}}^*$ 替代式(5)中的 $S_{A'_{0j}}$ 得:

$$D_{A'_{0j}}^* = U_{A'_{0j}} S_{A'_{0j}}^* V_{A'_{0j}}^T \quad (7)$$

7) 用 $D_{A'_{0j}}^*$ 替代式(4)中的 $D_{A'_{0j}}$ 得:

$$A_{0j}^{**} = L_{A'_{0j}} D_{A'_{0j}}^* U_{A'_{0j}} \quad (8)$$

8) 由参数 r 对每个 A_{0j}^{**} 进行 Fibonacci 变换后拼接得 A^*_0 , 由 A^*_0 与 H_0 逆 NSCT 变换, 得含水印载体图像 O_w 。

水印的具体嵌入过程见图 2。

2.2 水印提取算法

1) 对含水印图像 O_w 进行 2 级 NSCT 分解, 得低频分量 A_{0w} 和高频分量 H_{0w} , 对低频分量 A_{0w} 按与水印嵌入时相同的置乱参数进行 Fibonacci 置乱变换得 A'_{0w} 。

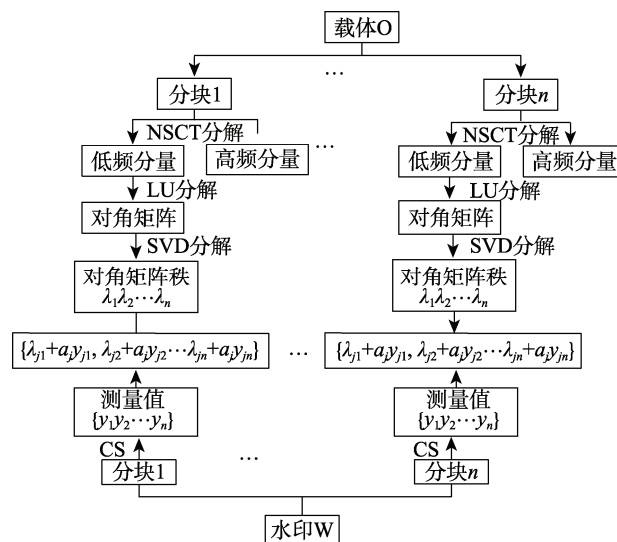


图 2 水印嵌入算法实现过程

Fig.2 Watermark embedding algorithm process

2) 对 A'_{0w} 按照与水印嵌入时相同的大小进行非重叠分块, 分块数为 n , 对每块进行 LU 变换:

$$A'_{0wj} = L_{A'_{0wj}} D_{A'_{0wj}} U_{A'_{0wj}} \quad (9)$$

3) 对每块的对角矩阵 $D_{A'_{0wj}}$ 进行奇异值分解:

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

4) 对每个对角元素 λ'_{ji} 提取水印观测值:

$$y'_{ji} = \frac{\lambda'_{ji} - \lambda_{ji}}{\alpha_j} \quad (11)$$

则第 j 个水印分块的压缩感知观测值为:

$$Y_j = \begin{Bmatrix} y_{j1} \\ y_{j2} \\ \vdots \\ y_{jn} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

对所有 n 个水印块的观测值进行重构得各水印块^[17], 再组合成水印图像 W' 。

3 实验结果分析

仿真实验采用像素为 128×128 的 logo 水印图像见图 3, 分块压缩感知算法中采用的水印分块为 32×32 , 压缩感知观测矩阵统一采用高斯随机矩阵。选用 4 幅不同纹理像素为 256×256 的灰度载体图像拱门、战机、男孩和渔船见图 4, 将载体按 4×4 块非重叠等面积分割。

为了客观地验证算法的性能, 文中从水印的透明性和鲁棒性两方面来衡量。



图 3 水印图像
Fig.3 Watermarking image

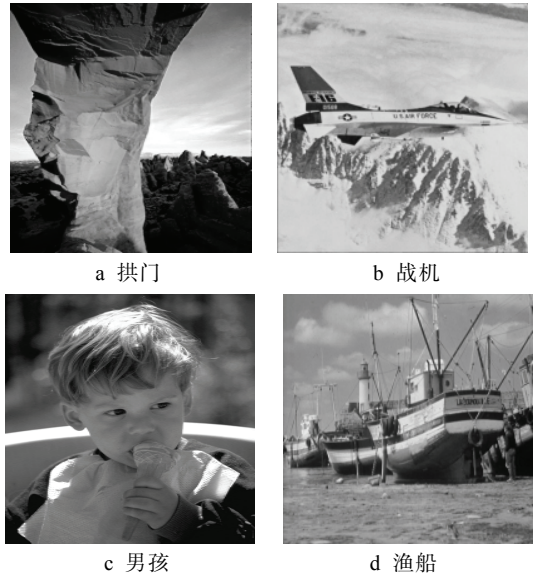


图 4 载体图像
Fig.4 Carrier images

3.1 水印的透明性

为了验证水印的透明性,引入峰值信噪比 PSNR,用来客观反映图像视觉特性, PSNR 的值越大说明水印的不可见性越好,水印的透明性越强。含水印载体图像见图 5,从视觉上完全看不出含水印图像与原载体图像的区别。从数据上看,其 PSNR 值都在 40 dB 以上,说明该算法有很好的透明性。

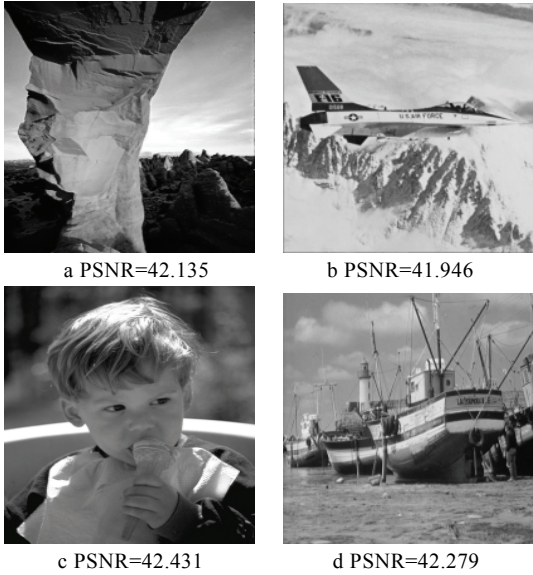


图 5 含水印载体图像及其提取水印
Fig.5 Watermarked images and the extracted watermarking images

3.2 水印的鲁棒性

文中引入归一化相关系数 NC,原始水印和提取出的水印之间的相似度可以通过相关系数 NC 检验来衡量,NC 值越大说明水印的鲁棒性越好。为了简洁起见,下面以男孩载体图像为例,含水印图像在受到高斯噪声、高斯低通滤波、加椒盐噪声、JPEG 压缩、剪切攻击的情况下提取的水印图像及其 NC 值见图 6。



图 6 含水印图像受到攻击后提取水印
Fig.6 Extracted watermarking images after attacks

含水印图像在受到 JPEG 压缩时提取的水印图像 NC 值见图 7,从图 7 中曲线可以看出文中算法能很好地抵抗 JPEG 压缩。文中算法与文献[10]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[10]。

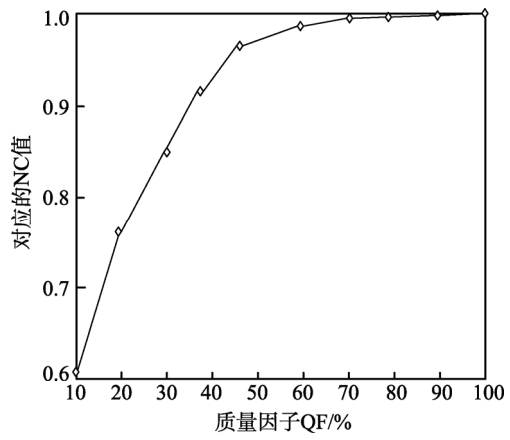


图 7 水印抗 JPEG 压缩攻击能力
Fig.7 Resisting to JPEG compression

另外,测量矩阵所具有的加密作用保证了攻击者在不知道密钥的情况下,无法通过测量值重建原始图像的内容,从而进一步保证了算法的安全性。

表 1 水印鲁棒性对比

Tab.1 Comparison of the robustness against certain attacks

各种攻击	文中算法				文献[10] 算法
	拱门	战机	男孩	渔船	丽娜
高斯低通滤波 (3×3)标准差 0.4	0.8134	0.8216	0.8194	0.8194	0.4000
高斯噪声 0.01	0.8763	0.8812	0.8717	0.8745	—
椒盐噪声 0.006	0.9122	0.9091	0.9143	0.9186	0.1072
JPEG 压缩(75)	0.9910	0.9843	0.9872	0.9835	0.0837
剪切 1/4	0.6423	0.6189	0.6314	0.6472	0.2031

4 结语

文中提出了一种 NSCT 分解与分块压缩感知相结合的数字水印算法,经过仿真实验及与其他算法类
比可知,文中算法在同时兼具了水印的不可见性、鲁
棒性和保密性要求的同时,又减少了计算工作量、降
低了对存储空间的需求,具有一定的可行性。

参考文献:

- [1] 孙圣和, 陆哲明. 数字水印处理技术[J]. 电子学报, 2000, 28(8): 85—90.
SUN Sheng-he, LU Zhe-ming. Digital Watermarking Techniques[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(8): 85—90.
- [2] 牛夏牧, 陆哲明, 孙圣和. 彩色数字水印嵌入技术[J]. 电子学报, 2000, 28(9): 10—12.
NIU Xia-mu, LU Zhe-ming, SUN Sheng-he. The Embedding Technique with Color Digital Watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(9): 10—12.
- [3] MAK BOL N M, KLIOO B E. Robust Blind Image Watermarking Scheme Based on Redundant Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition[J]. AEU-international Journal Electronics and Communications, 2013, 67(2): 102—112.
- [4] ZHOU Nan-rui, ZHANG Ai-di, WU Jian-hua, et al. Novel Image Compression-encryption Hybrid Algorithm Based on Key-controlled Measurement Matrix in Compressive Sensing[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 62(1): 152—160.
- [5] 陈国法, 郭树旭, 李杨. 基于压缩感知的数字图像水印算法[J]. 现代电子技术, 2012, 35(13): 98—101.
CHEN Guo-fa, GUO Shu-xu, LI Yang. Digital Image Watermark Algorithm Based on Compressive Sensing[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(13): 98—101.
- [6] 张秋余, 孙媛, 晏燕. 基于分块自适应压缩感知的可逆水印算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 797—804.
ZHANG Qiu-yu, SUN Yuan, YAN Yan. A Reversible Watermarking Algorithm Based on Block Adaptive Compressive Sensing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(4): 797—804.
- [7] 赵慧民, 赖剑煌, 蔡君. 一种用于帧内篡改检测的压缩感知视频水印实现算法[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1153—1158.
ZHAO Hui-min, LAI Jian-huang, CAI Jun. A Video Watermarking Algorithm for Intraframe Tampering Detection Based Compressed Sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1153—1158.
- [8] 肖迪, 邓秘密, 张玉书. 基于压缩感知的鲁棒可分离的密文域水印算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(5): 1248—1254.
XIAO Di, DENY Mi-mi, ZHANG Yu-shu. Robust and Separable Watermarking Algorithm in Encrypted Image Based on Compressive Sensing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(5): 1248—1254.
- [9] 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]. 2013, 35(4): 797—804.
- [10] 池晓芳, 冯桂, 董晓慧. 采用图像几何校正和分块压缩感知测量值奇异值分解的鲁棒水印技术[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 535—540.
CHI Xiao-fang, FENG Gui, DONG Xiao-hui. Robust Digital Watermarking Algorithm Based on Image Geometric Correction and SVD of Block Compressive Sampling Measurements[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2015, 36(5): 535—540.
- [11] 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—67.
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—67.
- [12] 闫芬, 王康碧, 李晨, 等. 一种基于 NSCT 与抖动量化的盲水印算法[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2013, 22(3): 222—225.
YAN Fen, WANG Kang-bi, LI Chen, et al. A Blind Algorithm Based on NSCT and Dither Quantization[J]. Journal of Yunnan Nationalities University (Natural Science Edition), 2013, 22(3): 222—225.
- [13] ZHAO Jie. Digital Watermarking Method Based on Nonsubsampled Contourlet Transform[J]. Information Technology Journal, 2013, 12(24): 8153—8158.
- [14] ZHU Dan-dan, ZHANG Xiu-ping, ZHANG You-liang, et al. A New Image Watermarking Algorithm Using NSCT and Harris Detector in Green Manufacturing[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 340: 277—282.
- [15] DONOHO D L. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289—1306.
- [16] 牛少彰, 钮心忻, 杨义先. 基于矩阵 LU 分解的数字水印算法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(10): 1620—1625.
NIU Shao-zhang, NIU Xin-xin, YANG Yi-xian. Digital Watermarking Algorithm Based on LU Decomposition[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(10): 1620—1625.
- [17] 马婷, 高大鹏, 王欣. 基于 Logistic 混沌加密的 NSCT-SVD 抖动调制盲水印算法[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 156—161.
MA Ting, GAO Da-peng, WANG Xin. Jitter Modulation Blind Watermarking Algorithm Based on Logistic Chaotic Encryption and NSCT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 156—161.