



## 基于 DWT-SVD 压缩量化的数字图像盲水印算法

汤永利,张亚萍,高玉龙,叶青,闫玺玺

(河南理工大学 计算机科学与技术学院,河南 焦作 454000)

**摘要:**为了解决奇异值分解(singular value decomposition, SVD)算法提取水印时需要原始载体图像的缺陷,以及量化索引调制(quantization index modulation, QIM)均匀量化不适用于非均匀信号的问题,通过引入 $\mu$ 律压缩技术,提出一种新的基于 DWT-SVD 压缩量化的数字图像盲水印算法。该算法对载体图像进行分块,对每一分块实施离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT),以及对变换后的近似部分系数进行 SVD 分解,使用 $\mu$ 律压缩函数压缩分解后的最大奇异值,用 QIM 的方法嵌入二值水印。算法只用到了最大奇异值,可以盲提取水印,消除因传输原始载体图像产生的不安全性, $\mu$ 律压缩技术也减小了嵌入水印对原始载体图像的扰乱。仿真实验结果表明,该算法保持了较高的透明性,并对高斯噪声、中值滤波、联合图像专家小组(joint photographic experts group, JPEG)压缩、缩放等常见攻击具有更强的鲁棒性。

**关键词:**奇异值分解(SVD);离散小波变换; $\mu$ 律压缩;量化索引调制;盲水印;数字水印

中图分类号:TP309

文献标志码:A

文章编号:1673-825X(2018)02-0265-07

## Compression quantitative digital image blind watermarking algorithm based on DWT-SVD

TANG Yongli, ZHANG Yaping, GAO Yulong, YE Qing, YAN Xixi

(College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, P.R. China)

**Abstract:** In order to address the needs of the original image when SVD algorithms extracts the watermark, and to solve the problem of not being applicable to non-uniform signal for QIM uniform quantization, a compression quantitative digital image blind watermarking algorithm based on DWT-SVD is proposed by introducing  $\mu$ -law technology. The original image is firstly divided into blocks and conducted with discrete wavelet transform, and then SVD is applied to the approximate part coefficients of original image. In this regard the largest singular value is compressed and quantized by  $\mu$ -law technology. Finally, the algorithm embeds binary watermark data by QIM. The algorithm can blindly extract the watermark and eliminate the insecurity caused by the transmission of original image. The  $\mu$ -law compression technique also reduces the turbulence of the embedded watermark to the original cover image. Experimental results show that this algorithm solves the problems and maintains high transparency. Moreover, the proposed scheme has strong robustness against common attacks, such as Gaussian noise, median filtering, JPEG compression and image scaling attack.

**Keywords:** singular value decomposition(SVD); discrete wavelet transform;  $\mu$ -law compression; quantization index modulation; blind watermarking; digital watermarking

收稿日期:2016-09-29 修订日期:2018-03-08 通讯作者:汤永利 yltang@hpu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(61300216);河南省科技厅项目(152102410048, 142300410147);河南省教育厅项目(12A520021, 16A520013);河南理工大学博士基金(B2013-043, B2014-044)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(61300216); The Science and Technology Department Program of Henan Province(152102410048, 142300410147); The Education Department Program of Henan Province(12A520021, 16A520013); The Doctor Foundation of Henan Polytechnic University(B2013-043, B2014-044)

## 0 引言

随着互联网普及,信息通讯技术的飞速发展,多媒体技术得到了充分的应用。但是开放的互联网使这些多媒体信息的传输变得不安全,而数字水印技术恰恰能保护这些多媒体信息的传输。数字水印技术通过一定的嵌入算法将一些可以用来标识多媒体数据的来源、版本、作者等标志性信息嵌入到多媒体数据中来保护多媒体数据的版权,但是不影响原始数据的使用和价值,并且不易被人察觉<sup>[1]</sup>。

根据嵌入位置的不同,数字水印算法分为空域和变换域水印算法。一般而言,变换域水印算法稳健性较好,主要的变换域有离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)<sup>[2]</sup>、离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)<sup>[3]</sup>和离散傅立叶变换(discrete fourier transform, DFT)<sup>[4]</sup>。在变换域中奇异值分解<sup>[5]</sup>(singular value decomposition, SVD)是一种将矩阵对角化的方法。图像的奇异值有较好的稳定性,利用这个原理可将水印信息嵌入到图像经过奇异值变换后的系数中。Chen 等<sup>[6]</sup>提出的量化索引调制(quantization index modulation, QIM)算法也是水印算法中应用很广泛的一种算法。但是 QIM 存在量化器步长设计的问题,许多现有的基于 QIM 的数字水印方案都是运用均匀量化,当载体信号是均匀分布时,均匀量化是最优选择;当载体信号是非均匀分布时,均匀量化便不适用。为了解决均匀量化存在的问题,文献[7]提出非均匀量化算法,将对数函数运用到数字水印算法中,充分利用对数函数的不可感知性。此方法虽然提高了水印的不可感知性,但在噪声环境下不利于水印的提取。根据  $\mu$  律特性 Kalantari 等<sup>[8]</sup>提出基于对数量化索引调制(logarithmic quantization index modulation, LQIM)的水印方法,并用此方法将水印嵌入到 DCT 变换后的交流系数(alternating coefficient, AC)上。文献[9]将  $\mu$  律特性运用在 DWT 域,运用带失真补偿的量化索引调制(distortion-compensated QIM, DC-QIM)将水印嵌入到载体图像 DWT 三级变换后的高能量块中,算法有很高的鲁棒性。文献[10]提出基于 DWT 域的全盲自嵌入鲁棒量化水印,通过产生自嵌入特征水印序列,并且盲提取认证水印序列达到良好的不可见性和安全性。文献[11]提出基于 SVD 的数字图像水印算法,算法通过扩频技术将水印嵌入到载体图像块中。

传统的 SVD 数字水印算法<sup>[12-13]</sup>是将水印图像的奇异值矩阵与调节因子相乘再添加到载体图像的奇异值矩阵中,提取水印时需要原始载体图像。本文通过引入  $\mu$  律函数,在传统的 DWT-SVD 算法的基础上进行改进,提出压缩奇异值后量化嵌入水印的方法,水印可以盲提取,并且提高了水印的鲁棒性和透明性。

## 1 SVD 和 $\mu$ 律压缩

### 1.1 SVD

矩阵经过 SVD 分解得到 1 个奇异值矩阵和 2 个正交矩阵。图像的奇异值有很强的稳定性,图像受到轻微的扰动时不会有显著改变。利用奇异值的这种特性,如果将水印嵌入在载体图像 SVD 分解后的奇异值上,当攻击者对含水印图像进行攻击扰乱时,我们仍能从分解的奇异值中提取出水印信息。并且,奇异值对应于图像的亮度特性,而非视觉特性,因此,在奇异值上嵌入水印能保证水印的透明性,保障了水印算法的隐蔽性与安全性。奇异值表征图像矩阵元素的相互关系,在轻微扰动时不会发生变化,因此,在奇异值上嵌入水印不会损害图像的几何特性<sup>[14]</sup>。

SVD 分解是线性代数中一种非常重要的分解方式,其定义如下。

设矩阵  $A \in R^{m \times n}$ ,  $R$  表示实数域,  $m \times n$  表示矩阵大小,  $A$  进行 SVD 处理的公式为

$$A = USV^T \quad (1)$$

(1)式中:  $U, V$  都是正交矩阵,且  $U = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_m] \in R^{m \times m}$ ;  $V = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_n] \in R^{n \times n}$ ;  $T$  表示转置;  $S$  是对角矩阵,  $S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_m) \in R^{m \times n}$ , 奇异值就是矩阵  $S$  的对角线元素,且这些对角线元素满足:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_m = 0$  (其中,  $r$  表示  $A$  的秩)<sup>[15]</sup>。

### 1.2 $\mu$ 律压缩

$\mu$  律压缩函数广泛地应用于语音信号,它的基本思想是对幅值较大信号进行压缩,对幅值较小信号进行放大,以此来改善信号的信噪比。而本文将  $\mu$  律压缩函数应用在数字信号中,将其与 QIM 结合后可以在保持宿主信号较少失真的情况下嵌入鲁棒性更强的水印,用于解决 QIM 均匀量化不适用于非均匀信号的问题。宿主信号的幅值更多地集中在 0 附近,需要较多小步长去量化幅值小的数据,这种方法能更均匀地量化不同幅值的数据,从而提高水印

的嵌入能力。

$\mu$  律算法的过程是载体信号先用(1)式进行压缩,将载体信号变换到对数域。

$$c = \frac{\ln\left(1 + \mu\left(\frac{|x|}{X_{\max}}\right)\right)}{\ln(1 + \mu)} \quad (2)$$

(2)式中: $x$  是输入信号; $c$  是压缩后信号; $\mu$  是压缩级别参数; $X_{\max}$  是衡量载体信号参数。对数压缩后将变换后的信号运用 QIM 方法嵌入水印。为了获取嵌入水印后的信号,要进行(3)式的处理将对数域的信号变换回原来的域。

$$y = \frac{X_{\max}}{\mu} [(1 + \mu)^z - 1] \quad (3)$$

(3)式中, $z$  是量化后的信号<sup>[9]</sup>。

## 2 基于 DWT-SVD 压缩量化的数字图像盲水印算法

### 2.1 算法思想

SVD 嵌入水印能有效抵抗几何攻击,但传统 SVD 数字水印算法在提取水印时需要原始载体图像,增加了载体图像在传输时的不安全性,降低了算法的效率。本文算法在嵌入水印过程中没有用到原图 SVD 分解后的正交矩阵,所以,提取水印时不需要原始载体图像。QIM 均匀量化不适用于非均匀信号,本文应用  $\mu$  律特性压缩后再用 QIM 量化来解决 QIM 存在的问题。

同时,DWT 变换能很好地适应人眼的视觉特性,本文先对载体图像分块,可以将原图的变化集中在每一块中,对每一块 DWT 变换得到近似分量;再将近似分量进行 SVD 分解求得其奇异值矩阵,用  $\mu$  律压缩对要嵌入水印的奇异值进行压缩;最后用量化方法得到含水印图像。本文算法一方面利用量化嵌入水印,做到水印的盲提取,降低图像传输的不安全性;另一方面  $\mu$  律压缩分解后的最大奇异值又能将 QIM 的量化变得更均匀,减小误差。

### 2.2 水印的嵌入过程

**Step 1** 选取大小  $M \times N$  灰度图作为载体图像  $C$ ,对载体图像  $C$  进行  $m \times m$  分块。

**Step 2** 对第  $i(i=1,2,3 \dots \frac{M \times N}{m \times m})$  块进行二级 Haar 小波变换,得到二级分解的近似子带系数  $ca_i$ 。

**Step 3** 运用 SVD 分解近似分量  $ca_i$ ,得到奇异

值矩阵  $S_i$  和 2 个正交矩阵  $U_i, V_i$ 。

**Step 4** 运用  $\mu$  律压缩公式(2)压缩  $S_i$  的最大奇异值  $S_i(1,1)$ ,再运用 QIM 将第  $i$  个水印比特嵌入到  $S_i(1,1)$  中,运用公式(3)逆变换回到 DWT 域得到嵌入水印后的奇异值矩阵  $S'_i(1,1)$ 。

**Step 5** 通过  $ca'_i = U_i * S'_i * V_i^T$  得到嵌入水印后的近似部分。

**Step 6** 对子带系数运用逆 DWT 变换得到含水印图像。

### 2.3 水印的提取过程

本文采用数字水印盲检测方法,提取水印时仅需要知道  $\mu, X_{\max}$  和量化步长这些参数值。

**Step 1** 对含水印图像进行  $m \times m$  分块。

**Step 2** 对第  $i(i=1,2,3 \dots \frac{M \times N}{m \times m})$  块进行 Haar 二级小波变换,得到二级分解的近似子带系数  $ca''_i$ 。

**Step 3** 运用 SVD 分解近似分量  $ca''_i$ ,得到奇异值矩阵  $S''_i$  和两个正交矩阵  $U''_i, V''_i$ 。

**Step 4** 运用  $\mu$  律压缩公式(2)压缩  $S''_i$  的最大奇异值  $S''_i(1,1)$ 。

**Step 5** 使用最小距离解码器提取系数  $S''_i(1,1)$  中的水印,解码者提取水印时还需要知道  $\mu, X_{\max}$  和量化步长这些参数。将 0 和 1 用最小距离解码器的方法嵌入后分别得到  $r_0$  和  $r_1$ ,水印数据  $\hat{m}$  可以由公式(4)提取出来

$$\hat{m} = \arg \min_{i \in \{0,1\}} \|r - r_i\|^2 \quad (4)$$

## 3 实验结果及分析

为了验证水印算法的有效性,在 MATLAB R2014a 平台上进行了仿真实验。实验选取标准测试图像库  $512 \times 512$  像素灰度图作为载体图;选取  $32 \times 32$  像素图像作为水印图,如图 1 所示。



图 1 原始载体图像和水印图像

Fig.1 Original cover image and watermark image

### 3.1 透明性测试

透明性也即水印的不可见性,一般用峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)来衡量,表示水印图像的失真情况。PSNR 值越高,水印透明性越好,PSNR 计算公式为

$$PSNR = 10 \times \lg \left( \frac{m \times n \times 255^2}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| I(i,j) - K(i,j) \|^2} \right) \quad (5)$$

(5)式中: $m, n$  表示矩阵的行数和列数; $I(i, j)$  表示原始载体图像; $K(i, j)$  表示嵌入水印后的含水印图像。含水印图像如图 2 所示。



图 2 含水印图像

Fig.2 Watermarked image

由图 2 可以看出,运用本文算法嵌入水印后的载体图像视觉效果很好,并且含水印图像的 PSNR 值都达到 40 dB 以上,水印透明性高。

### 3.2 鲁棒性测试

鲁棒性一般用归一化互相关系数(normalized correlation, NC)衡量,NC 值越接近于 1,提取的水印与原始水印越相似,NC 计算公式为

$$NC = \frac{\sum_{i=0}^{m'-1} \sum_{j=0}^{n'-1} w(i,j) \times w'(i,j)}{\sum_{i=0}^{m'-1} \sum_{j=0}^{n'-1} (w(i,j))^2} \quad (6)$$

(6)式中: $m', n'$  表示矩阵的行数和列数; $w(i, j)$  表示原始水印图像; $w'(i, j)$  表示提取出的水印图像。一般情况下,NC>0.75 即可说明提取的水印图与原始水印图相似度高。

有时也会增加错误比特率(bit error ratio, BER)的指标来衡量提取的水印与原始水印图的差别,BER 越小,提取的水印越好。仿真实验中参数选择为  $\mu = 100, X_{\max} = 200$ ,量化步长  $\Delta = 0.01$ 。经过一系列对含水印图像的攻击得结果如表 1,表 2 所示。

从表 1,表 2 实验结果可以看出,含水印载体图能有效地抵抗(joint photographic experts group, JPEG)攻击,在 JPEG 压缩因子为 30 时水印 NC 值还能接近于 1;含水印载体图在经过高斯噪声、椒盐噪声、泊松噪声、中值滤波和缩放攻击下都能提取出误码率较小的水印。综上所述,SVD 分解后的奇异值通过压缩量化方法嵌入水印能提高水印抵抗各种常见攻击的能力,水印鲁棒性高。

以 Lena 图为例,图 3 更清晰地显示了含水印图像受到攻击后提取出的水印图及误差,误差图像中白点表示误差,白点越多,误差越大。

表 1 含水印图像受到 JPEG 攻击的结果

Tab.1 Result after JPEG attacks of watermarked image

被攻击图片	JPEG 攻击质量因子					
		20	30	40	50	60
Lena	NC	0.972 528	0.991 895	0.999 266	0.998 530	1
	BER	0.036 133	0.010 742	0.000 977	0.001 953	0
Baboon	NC	0.981 513	0.995 589	1	0.999 266	1
	BER	0.024 414	0.005 859	0	0.000 977	0
Elaine	NC	0.980 939	0.998 532	1	1	1
	BER	0.025 391	0.001 953	0	0	0
Barbara	NC	0.966 803	0.988 943	0.997 069	0.998 532	1
	BER	0.043 945	0.014 648	0.003 906	0.001 953	0
Peppers	NC	0.924 643	0.976 278	0.985 961	0.996 323	0.994 852
	BER	0.097 656	0.031 250	0.018 555	0.004 883	0.006 836

表 2 含水印图像受到其他攻击的结果  
Tab.2 Result after other attacks of watermarked image

被攻击图片		攻击名称				
		高斯噪声-0.0001	泊松噪声	椒盐噪声-0.003	中值滤波	缩放(放大 4 倍)
Lena	NC	1	1	0.990 437	0.997 796	1
	BER	0	0	0.012 695	0.002 930	0
Baboon	NC	1	1	0.995 589	0.862 224	1
	BER	0	0	0.005 859	0.173 828	0
Elaine	NC	1	1	0.994 136	0.998 532	1
	BER	0	0	0.007 813	0.001 953	0
Barbara	NC	1	1	0.981 563	0.964 566	1
	BER	0	0	0.024 414	0.046 875	0
Peppers	NC	0.999 267	1	0.961 139	0.982 292	1
	BER	0.000 977	0	0.050 781	0.023 438	0

由图 3 的实验结果可以看出,除了椒盐噪声、JPEG-30 攻击和中值滤波攻击有少量白点之外,提取

的水印鲁棒性高、误差小。因此,本文算法能提高水印抵抗各种常见攻击的能力,水印鲁棒性高、误差小。

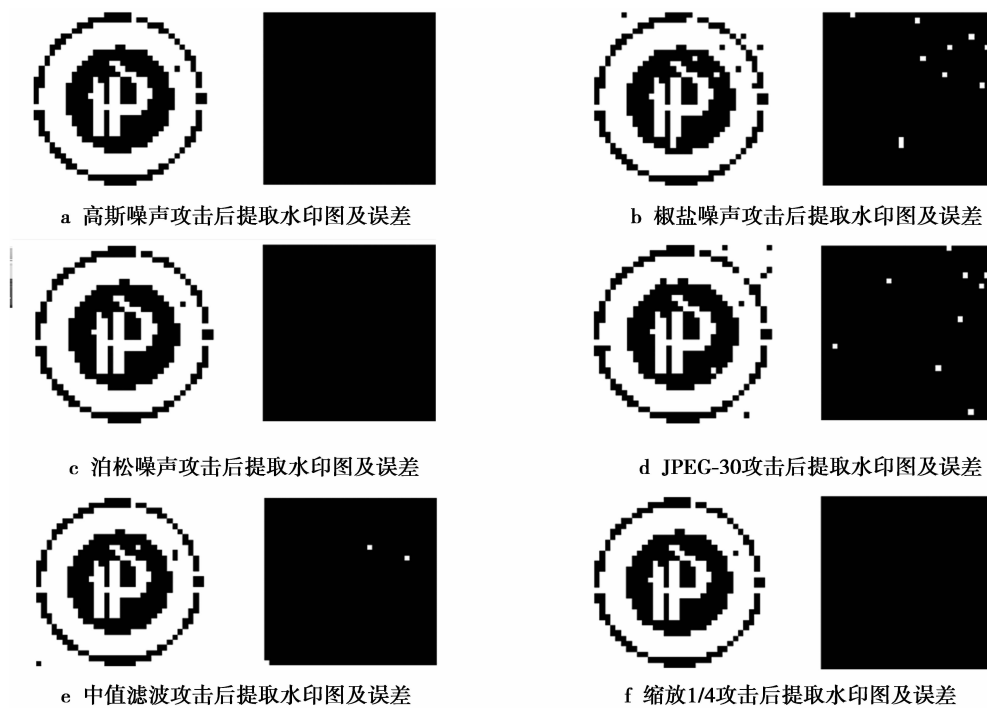


图 3 各种不同攻击后提取的水印图及误差

Fig.3 Extracted watermark image and BER under different attacks

表 3—表 5 将本文与文献[10]提出的算法进行比较,表 6 将本文与文献[11]提出的算法进行比较,比较结果如表 3—表 6 所示。

在对比实验中,由表 3—表 5 可以看出,算法与文献[10]在多种图像的常见攻击下 NC 值较高,鲁棒性强。在表 5 中,Baboon 图受到中值滤波攻击后 NC 值较低,其原因是 Baboon 图像纹理细节复杂,而

中值滤波是将每一像素点的灰度值设置为该点某邻域窗口内的所有像素点灰度值的中值,如果纹理细节复杂,中值就不能代替这一像素点的值,因此,会产生误差,但 NC 值也超过 0.75,能从提取的水印图中辨析出原始水印图像。表 6 中将本文与文献[11]进行比较,实验结果显示出本文算法在常见的高斯、椒盐、中值滤波、JPEG 压缩等攻击下 NC 值更

高,鲁棒性更强。因此,本文提出的基于 DWT-SVD 的压缩量化算法具有较强的鲁棒性。

表 3 Lena 抗攻击实验结果

Tab.3 Experimental results of resistance to attacks for Lena image

攻击类型	比较(NC 值)	
	文献[10]	本文
高斯噪声-0.000 1	0.984 4	1
高斯噪声-0.000 3	0.962 3	1
椒盐噪声-0.003	0.950 5	0.988 3
椒盐噪声-0.005	0.928 5	0.983 0
中值滤波 3×3	0.953 5	0.997 8
JPEG 压缩-50	0.960 8	0.998 5
JPEG 压缩-40	0.952 6	0.999 3
JPEG 压缩-30	0.928 1	0.991 9

表 4 Goldhill 抗攻击实验结果

Tab.4 Experimental results of resistance to attacks for Goldhill image

攻击类型	比较(NC 值)	
	文献[10]	本文
高斯噪声-0.000 1	0.972 9	1
高斯噪声-0.000 3	0.955 6	1
椒盐噪声-0.003	0.941 9	0.980 8
椒盐噪声-0.005	0.903 7	0.965 3
中值滤波 3×3	0.919 8	0.975 8
JPEG 压缩-50	0.928 1	0.999 3
JPEG 压缩-40	0.901 6	0.997 8
JPEG 压缩-30	0.879 8	0.994 9

表 5 Baboon 抗攻击实验结果

Tab.5 Experimental results of resistance to attacks for Baboon image

攻击类型	比较(NC 值)	
	文献[10]	本文
高斯噪声-0.000 1	0.988 8	1
高斯噪声-0.000 3	0.965 5	1
椒盐噪声-0.003	0.972 7	0.991 2
椒盐噪声-0.005	0.937 4	0.985 3
中值滤波	0.917 7	0.862 2
JPEG 压缩-50	0.978 7	0.999 3
JPEG 压缩-40	0.971 4	1
JPEG 压缩-30	0.943 3	0.995 6

表 6 本文与文献[11]抗攻击实验结果

Tab.6 Experimental results of resistance to attacks for this paper and theory[11]

攻击类型	比较(NC 值)	
	文献[10]	本文
高斯噪声-0.001	0.864 7	1
椒盐噪声-0.01	0.688 3	0.983 9
中值滤波 3×3	0.939 5	0.999 8
JPEG 压缩-80	0.978 7	1
缩放 1/4	0.971 0	1

## 4 结束语

本文在传统的 DWT-SVD 的方法上提出了采用  $\mu$  律压缩技术对分解后的最大奇异值进行压缩,并用 QIM 量化方法嵌入水印信息的数字水印算法。算法将 SVD 与量化结合,使提取水印时不再需要原始载体图像,减小了载体图像传输的不安全性, $\mu$  律压缩也使量化更加均匀。仿真结果表明,该算法保持了很好的透明性,并对高斯噪声、中值滤波、JPEG 压缩等常见攻击具有更强的鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] LANG F, ZHOU J, CANG S, et al. A self-adaptive image normalization and quaternion PCA based color image watermarking algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(15):12046-12060.
- [2] SINGH A K, DAVE M, MOHAN A. Hybrid Technique for Robust and Imperceptible Image Watermarking in DWT-DCT-SVD Domain[J]. National Academy Science Letters, 2014, 37(4):351-358.
- [3] JANE O, ELBASI E. A new approach of nonblind watermarking methods based on DWT and SVD via LU decomposition[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014, 22(5):1354-1366.
- [4] URVOY M, GOUDIA D, AUTRUSSEAU F. Perceptual DFT Watermarking With Improved Detection and Robustness to Geometrical Distortions [J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2014, 9(7):1108-1119.
- [5] 朱建忠, 姚志强. 基于 DWT-SVD 和 Turbo 码的彩色图像盲水印算法[J]. 吉林大学学报:理学版, 2014, 52(4):773-778.  
ZHU Jianzhong, YAO Zhiqiang. Blind Watermarking Algorithm for Color Images Based on DWT-SVD and Turbo Codes [J]. Journal of Jilin University: Science Edition,

- 2014, 52(4):773-778.
- [6] CHEN B, WORNELL G W. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(4):1423-1443.
- [7] COMESAA P, PEREZ-GONZALEZ F. On a Watermarking Scheme in the Logarithmic Domain and its Perceptual Advantages [C]//IEEE International Conference on Image Processing. San Antonio, USA: IEEE Press, 2007: II-145-II-148.
- [8] KALANTARI N K, AHADI S M. Logarithmic Quantization Index Modulation: A perceptually better way to embed data within a cover signal [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2009, 19-24 April 2009. Taipei, China: IEEE Xplore, 2009:1433-1436.
- [9] LIU J, YE P. A Logarithmic Quantization Index Modulation Data Hiding Using the Wavelet Transform [C]// Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. Qinhuangdao, China: IEEE Press, 2013:1181-1184.
- [10] 叶天语. DWT-SVD 域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6):644-650.  
YE Tianyu. Perfectly Blind Self-embedding Robust Quantization-based Watermarking Scheme in DWT-SVD Domain [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(6):644-650.
- [11] GUO J M, PRASETYO H. False-positive-free SVD-based image watermarking [J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2014, 25(5):1149-1163.
- [12] 王祖喜, 毛刘刚, 胡汉平. 基于数字全息和奇异值分解的鲁棒性数字水印方案 [J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(8):1789-1793.  
WANG Zuxi, MAO Liugang, HU Hanping. Robust Digital Watermarking Scheme Based on Digital Holography and Singular Value Decomposition [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(8):1789-1793.
- [13] BEKKOUCH S, FARAOUN K M. Robust and Reversible Image Watermarking Scheme Using Combined DCT-DWT-SVD Transforms [J]. Journal of Information Processing Systems, 2015, 11(3):406-420.
- [14] 王奔. 基于 DWT-DCT-SVD 的图像数字水印算法 [D]. 北京:北京邮电大学, 2010.  
WANG Ben. An Image Watermarking Algorithm Based on DWT-DCT-SVD [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.

- [15] MAK BOL N M, KHOO B E. Robust blind image watermarking scheme based on Redundant Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2012, 67(2):102-112.

## 作者简介:



汤永利(1972-),男,河南孟州人,副教授,博士,主要研究领域为信息安全与密码学。  
E-mail: yltang@hpu.edu.cn。



张亚萍(1993-),女,河南信阳人,硕士研究生,主要研究领域为密码学、数字水印。  
E-mail: yaping8831@163.com。



高玉龙(1989-),男,河北人,硕士研究生,主要研究领域为密码学、数字水印。



叶青(1981-),女,辽宁营口人,讲师,博士,主要研究领域为密码学。



闫玺玺(1985-),女,河南灵宝人,讲师,博士,主要研究领域为密码学。

(编辑:刘 勇)