

# 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

池晓芳, 冯桂, 董晓慧

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对直接在图像压缩采样测量值上嵌入水印的方案对常规攻击和几何攻击鲁棒性差的问题, 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(SVD)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, 确保水印可以被正确提取. 实验表明: 该方法提高了水印对常规攻击和几何攻击的鲁棒性.

**关键词:** 数字水印图像; 分块压缩感知; 奇异值分解; 几何攻击; 几何校正; 鲁棒性

**中图分类号:** TP 391

**文献标志码:** A

数字水印技术将含知识产权的水印嵌入图像、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<sup>[1]</sup>. 近年来提出的压缩感知理论<sup>[2]</sup>, 用远小于 Nyquist 采样率的速率来获取信号, 并实现了信号采样和压缩的合并. 彭玉楼<sup>[3]</sup>对水印进行压缩感知预处理, 提高了水印的安全性和水印嵌入容量. Zhang 等<sup>[4]</sup>将压缩感知和数字水印技术结合, 实现篡改检测及篡改恢复. 魏丰<sup>[5]</sup>通过直接修改图像测量值来嵌入水印, 可有效对抗暴力破解类的密写攻击, 但图像局部细微的变化会引起所有测量值(压缩感知域系数)改变, 导致水印的鲁棒性差. 针对文献<sup>[5]</sup>的不足, 利用奇异值对微小的扰动具有较好稳定性的特点, 对测量值的奇异值进行量化嵌入水印, 可提高常规攻击下的鲁棒性. 但是, 含水印图像受到几何攻击后, 各水印分量存在的位置与嵌入时的位置不再相同, 导致水印提取失败. 为了使水印可以抵抗几何攻击, 在水印提取前, 可利用图像归一化技术<sup>[6]</sup>校正含水印图像的几何失真. 本文提出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技术, 在满足水印不可见性前提下, 不仅具有较高的安全性, 而且能抵抗一般无意攻击(加高斯噪声、加椒盐噪声、高斯低通滤波、JPEG 压缩)和一般恶意攻击(剪切、缩放、旋转、平移、翻转及一般仿射变换).

## 1 分块压缩感知测量值奇异值分解鲁棒数字图像水印技术

先对图像进行分块压缩感知(BCS), 再对测量值进行奇异值分解, 并量化奇异值嵌入水印, 最后, 由含水印测量值用重构算法重建含水印图像. 对图像进行 BCS, 一方面可节省存储空间, 提高图像重构速率, 另一方面, 图像局部细微的变化只会引起对应块的测量值改变, 可进一步提高水印的鲁棒性.

### 1.1 分块压缩采样及图像重建

将  $I_p \times I_q$  图像  $X$  不重叠分块, 每块大小为  $B_1 \times B_1$ ,  $K = I_p \times I_q / B_1^2$ ,  $I_p, I_q$  都可以被  $B_1$  整除. 每块用光栅扫描成列向量  $x_j, j = 1, 2, \dots, K$ . 图像第  $j$  块进行  $m$  次压缩采样后的测量值为

$$y_j = \Phi_B x_j. \quad (1)$$

式(1)中:  $\Phi_B$  为  $m \times B_1^2$  的高斯随机矩阵. 整个图像的测量值为  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_K]$ . 采用基于分块压缩感知平滑投影 Landweber 算法(BCS-SPL)<sup>[7]</sup>从测量值  $Y$  重构图像, 可以保证在测量值  $Y$  嵌入的水

印信息不会因为图像重构而丢失.此外,采用BCS-SPL算法重构得到的图像质量较好.

## 1.2 水印嵌入过程

**步骤1** 水印预处理.用Arnold变换<sup>[8]</sup>对 $n \times n$ 水印图像 $W$ 进行多次置乱.

**步骤2** 测量值获得.每块用相同的高斯随机矩阵 $\Phi_B$ 进行压缩采样,得到图像的测量值为 $Y$ .

**步骤3** 量化测量值的奇异值,嵌入水印.对测量值构成的矩阵 $Y$ 进行分块奇异值分解,提高水印嵌入容量,分块大小为 $B_2 \times B_2$ .若直接量化最大的奇异值,测量值将发生较大的修改,图像重构的质量下降.采用最优量化规则<sup>[9]</sup>对每块的第2个到第4个奇异值嵌入水印,每块嵌入1 bit水印,重复嵌入3次.对第 $k$ 块 $Y_k$ 进行奇异值分解,有

$$Y_k = U \cdot S \cdot V. \quad (2)$$

$S$ 矩阵对角线上元素为 $[s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7]$ ,对 $j=2,3,4$ 的奇异值进行量化,嵌入1 bit水印,有

$$s_j^w = \begin{cases} (s_j - 1/2)\delta, & \text{mod}(\epsilon_j + \omega_j, 2) = 1, \\ (s_j + 1/2)\delta, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $\delta$ 为量化步长,作为密钥保存; $\epsilon_j = \lfloor s_j / \delta + 0.5 \rfloor$ 为 $s_j$ 的量化值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整函数.将 $S$ 矩阵对角线上元素替换为 $[s_1, s_2^w, s_3^w, s_4^w, s_5, s_6, s_7]$ ,则含水印的测量值为

$$Y_w^k = U \cdot S_w \cdot V. \quad (4)$$

**步骤4** 用BCS-SPL算法重构含水印测量值 $Y_w$ ,得到含水印图像.

## 1.3 水印提取过程

**步骤1** 水印提取.参照节1.2,对含水印图像 $I_w$ 进行不重叠分块压缩采样,对应含水印测量值为 $Y_w$ .对测量值构成的矩阵 $Y_w$ 进行分块奇异值分解,从每一块 $j=2,3,4$ 的奇异值中提取出1 bit水印,有

$$\eta_j = \begin{cases} 1, & \text{mod}(\lfloor s_j^w / \delta \rfloor, 2) = 1, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5)$$

如果 $\eta_2 + \eta_3 + \eta_4 \geq 2$ ,则这一块提取出的水印 $\omega_j = 1$ ;否则 $\omega_j = 0$ .

**步骤2** 反Arnold变换.将提取出的水印进行反Arnold变换,即可得到正确排序的水印.

## 2 结合图像几何校正的水印方案

利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,使水印各分量的存在位置和嵌入水印时同步,提高几何攻击下水印的鲁棒性.

### 2.1 仿射变换和图像归一化技术

假设图像是定义在整数笛卡尔坐标上的实数函数 $I(x, y)$ .其中: $0 \leq x \leq I_P$ ;  $0 \leq y \leq I_Q$ .对应的图像 $I(x, y)$ 的仿射变换图像为 $I(x_{\text{aff}}, y_{\text{aff}})$ ,其中

$$\begin{pmatrix} x_{\text{aff}} \\ y_{\text{aff}} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

典型的几何攻击包括旋转、缩放、平移,皆为式(6)仿射变换的特殊例子.

图像归一化过程可分为4个步骤,依次为中心化, $x$ 方向 shearing 归一化, $y$ 方向 shearing 归一化, $x$ 和 $y$ 方向缩放及翻转归一化<sup>[6]</sup>.归一化后的图像为 $I^{\text{norm}}(x, y) = I(x_{\text{norm}}, y_{\text{norm}})$ ,即

$$\begin{pmatrix} x_{\text{norm}} \\ y_{\text{norm}} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \gamma & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix}. \quad (7)$$

式(7)中: $\beta, \gamma$ 分别为 $x, y$ 方向 shearing 归一化参数; $a, b$ 为缩放归一化参数.

### 2.2 利用图像归一化技术实现图像几何失真校正

2.2.1 几何校正方案 1) 通过式(7)计算 $I_w$ 的归一化仿射变换矩阵 $\mathbf{A}$ 并保存;2) 通过式(7)计算待检测图像 $I_w^{\text{ga}}$ 的归一化仿射变换矩阵 $\mathbf{A}_{\text{ga}}$ ;3) 校正待检测图像 $I_w^{\text{ga}}(x, y)$ ,几何校正后图像为 $I_w^{\text{gc}}(x, y) = I_w^{\text{ga}}(x_{\text{gc}}, y_{\text{gc}})$ ,表达式为

$$\begin{pmatrix} x_{\text{gc}} \\ y_{\text{gc}} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}_{\text{ga}} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix}. \quad (8)$$

步骤 1)~3) 实现了对几何攻击后图像  $I_w^{ga}$  的校正。由文献[6]可知: 经过某种不可预测几何攻击的含水印图像  $I_w^{ga}$  与原含水印图像  $I_w$  有相同的归一化图像  $I_w^{norm}$ , 且图像  $I_w^{norm}$  通过与  $A^{-1}$  相乘反归一化可得到图像  $I_w$ 。因此, 先将图像  $I_w^{ga}$  与  $A_{ga}$  相乘归一化, 归一化后的图像与  $A^{-1}$  相乘反归一化, 可得到图像  $I_w$ , 即  $I_w^{gc}$  与  $I_w$  相同。

不同旋转角度攻击后自然图像  $x$ -shearing 参数  $\beta$ , 如图 1 所示。虽然理论上校正方案 1 可以校正图像因旋转、平移、缩放、翻转及一般仿射变换导致的几何失真, 但由图 1 可知: 图像受到某个角度的旋转攻击时可能会使参数  $\beta$  异常, 导致该旋转角度下几何校正失败, 所以采用几何校正方案 2 校正图像因旋转导致的几何失真。

2.2.2 几何校正方案 2 校正待检测的图像  $I_w^{ga}(x, y)$ , 依次为旋转、缩放及翻转校正, 几何校正后图像  $I_w^{gc}(x, y) = I_w^{ga}(x_{gc}, y_{gc})$ , 表达式为

$$\begin{pmatrix} x_{gc} \\ y_{gc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix}. \quad (9)$$

式(9)中:  $\phi = \phi_w^{ga} - \phi_w^{or}$ 。旋转校正后的图像为  $I_w^{cr}$ 。

1) 旋转校正。计算图像  $I_w, I_w^{ga}$  中心化后图像特征角  $\phi_w^{or}, \phi_w^{ga}$ , 有

$$\phi = -\arctan \frac{u_{30} + u_{12}}{u_{03} + u_{21}}, \quad (10)$$

$$2(u_{30} + u_{12})\cos \phi + 2(u_{03} + u_{21})\sin \phi = 0. \quad (11)$$

式(11)中:  $u$  为图像中心距。由于按式(10)计算出的特征角是式(11)的其中一个解, 另一个解为  $(\phi + \pi)^{[6]}$ , 所以校正后的图像  $I_w^{cr}$  的特征角可能会与  $\phi_w^{or}$  相差  $180^\circ$ 。若相差  $180^\circ$ , 则对  $M \times N$  图像  $I_w^{cr}$  进行翻转校正(垂直翻转加水平翻转相当于旋转  $180^\circ$ )。

2) 缩放及翻转校正。图像  $I_w, I_w^{cr}$  的中心距分别为  $u, u^{cr}$ , 计算缩放及翻转的参数, 即

$$a = (M/I_P) \cdot (\text{sgn}(u_{50}^{cr}) \cdot \text{sgn}(u_{50})), \quad b = (N/I_Q) \cdot (\text{sgn}(u_{05}^{cr}) \cdot \text{sgn}(u_{05})). \quad (12)$$

校正后图像  $I_w^{gc}$  的宽高与载体图像相同。

### 2.3 增加图像几何校正的水印方案

**步骤 1** 水印直接嵌入载体图像中, 水印嵌入方案同节 1.2, 嵌入水印后图像为  $I_w$ 。

**步骤 2** 计算并保存图像  $I_w$  中心距  $u_{05}, u_{50}$ , 特征角  $\phi_w^{or}$ , shearing 变换参数  $\gamma_w^{or}, \beta_w^{or}$ , 归一化仿射变换矩阵  $A$ 。

**步骤 3** 用几何校正方案 2 对待检测图像  $I_w^{ga}$  进行几何校正, 并计算校正后图像  $I_w^{gc}$  的 shearing 变换参数  $\beta_w^{gc}, \gamma_w^{gc}$ , 若  $|\gamma_w^{gc} - \lambda_w^{or}| < t_1$ , 且  $|\beta_w^{gc} - \beta_w^{or}| < t_2$ , 转至步骤 5; 否则, 转至步骤 4。

**步骤 4** 用几何校正方案 1 对待检测图像  $I_w^{ga}$  进行几何校正, 并计算校正后图像  $I_w^{gc}$  的 shearing 变换参数  $\beta_w^{gc}, \gamma_w^{gc}$ , 若  $|\gamma_w^{gc} - \lambda_w^{or}| < t_1$ , 且  $|\beta_w^{gc} - \beta_w^{or}| < t_2$ , 转至步骤 5; 否则, 转至步骤 6。

**步骤 5** 从校正后图像  $I_w^{gc}$  中提取水印, 提取水印方案同节 1.3。

**步骤 6** 从待检测图像  $I_w^{ga}$  中提取水印, 提取水印方案同节 1.3。

## 3 实验结果

采用峰值信噪比( $R_{PSN}$ )、归一化相关值(NC)、比特错误率( $R_{BE}$ )作为衡量指标。 $R_{PSN}$  越大, 水印不可见性越好; NC 越大, BER 越小, 水印的鲁棒性越好。

### 3.1 水印鲁棒性、不可见性及安全性测试

含水印图像和载体图像的图像质量对比, 如图 2 所示。图 2(a)~2(d) 为  $512 \text{ px} \times 512 \text{ px}$  的载体图像, 图 2(e)~2(h) 为  $64 \text{ px} \times 64 \text{ px}$  含水印的图像。根据文献[7], 取  $B_1 = 32$ , 采样次数  $m = B_2^2 \cdot n^2 / K \leq B_1^2$ , 则  $B_2 \leq 8$ 。 $B_2$  越小,  $m$  也越小, 重构图像的质量越差。因此,  $B_2 = 7$ , 则  $m = 784$ 。

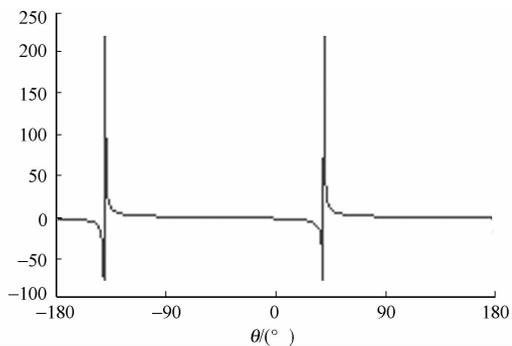


图 1 不同旋转角度攻击下的参数  $\beta$   
Fig. 1 Parameter  $\beta$  variation under different attack angle

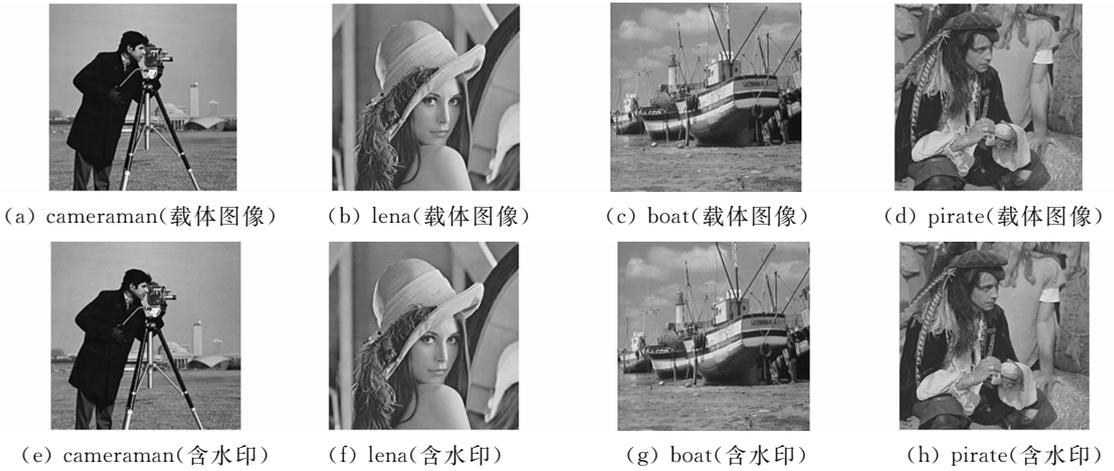


图 2 含水印图像和载体图像的图像质量对比

Fig. 2 Comparison of the visual quality between the original and the watermarked images

不同量化步长下含水印图像的  $R_{PSN}$  值,如图 3 所示. 为了权衡水印不可见性和鲁棒性,载体图像 boat, priate, lena, cameraman 量化步长  $\delta$  分别为 27, 28, 28, 31,  $R_{PSN}$  分别为 34. 03, 34. 09, 35. 49, 35. 50 dB. 由图 2, 3 可知: 该算法具有良好的水印不可见性. 另外, 在没有攻击时都能正确地提取出水印图像. 常见攻击下水印鲁棒性测试, 如表 1 所示. 水印安全性测试, 如图 4 所示. 虽然图 4 只给出了 1 次正确密钥和 2 999 次错误密钥的检测结果, 但在没有正确的测量矩阵密钥时, 更多次的破解尝试也是徒劳.

表 1 常见攻击下水印鲁棒性测试

Tab. 1 Measurement of robustness of the watermarking scheme to common attacks

攻击类型	$R_{BE}$			
	cameraman	lena	boat	pirate
高斯噪声(0.000 6)	0.004 2	0.004 9	0.003 7	0.003 2
高斯噪声(0.001 8)	0.085 2	0.115 5	0.128 9	0.117 7
高斯噪声(0.003 0)	0.204 1	0.052 5	0.271 5	0.253 9
椒盐噪声(0.006)	0.114 7	0.107 2	0.128 2	0.108 4
椒盐噪声(0.008)	0.150 1	0.169 7	0.189 0	0.182 9
椒盐噪声(0.010)	0.205 1	0.218 5	0.222 2	0.229 5
高斯低通滤波 $3 \times 3(0.4)$	0	0.400 0	0	0
高斯低通滤波 $3 \times 3(0.6)$	0.045 7	0.049 3	0.090 8	0.073 2
高斯低通滤波 $3 \times 3(0.8)$	0.246 1	0.249 5	0.278 1	0.283 4
JPEG 压缩(95)	0	0	0	0
JPEG 压缩(75)	0.087 9	0.083 7	0.068 6	0.063 0
JPEG 压缩(55)	0.202 9	0.204 1	0.178 2	0.185 8
剪切(左下 1/8)	0.092 8	0.092 8	0.092 8	0.092 8
剪切(左下 1/4)	0.204 1	0.203 1	0.194 6	0.202 9

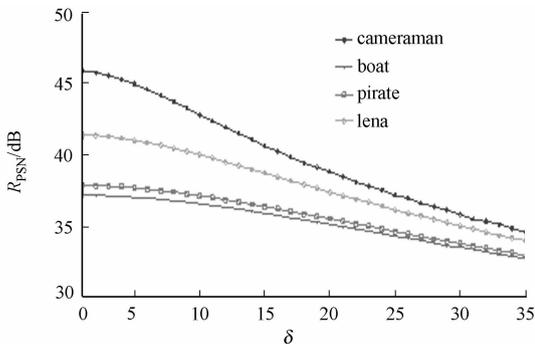


图 3 不同量化步长下含水印图像的  $R_{PSN}$   
Fig. 3  $R_{PSN}$  variation with different parameter

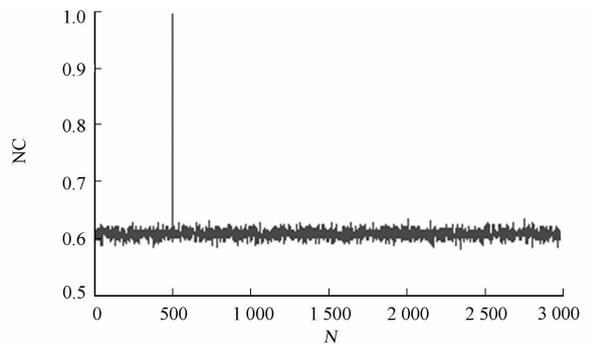


图 4 水印安全性测试  
Fig. 4 Security experiment of the watermarking scheme

### 3.2 增加图像几何校正方案的水印鲁棒性和不可见性测试

水印不可见性测试及各图像的量化步长同节 3.1,  $t_1, t_2$  为经验常数,  $t_1 = 0.0009, t_2 = 0.009$ . 当载体图像为 lena 时, 文中算法与文献[5]的水印方案的性能对比, 如表 2 所示. 表 2 中:  $C$  为水印容量;  $R_{PSN}, NC$  分别作为水印不可见性、鲁棒性的衡量指标. 图像受到  $90^\circ$  整数倍旋转攻击时, 由于图像各像素只是在空间位置上发生改变, 其值不变, 所以校正后都能完全正确地提取出水印. 其他几何攻击下提取水印的  $R_{BE}$ , 如表 3 所示.

表 2 文中算法与文献[5]算法的性能对比

Tab. 2 Comparison of the proposed watermarking scheme with reference [5]

方法	$R_{PSN}/dB$	$C/bit$	NC				
			高斯噪声 (0.001)	椒盐噪声 (0.006)	高斯低通滤波(0.4)	JPEG 压缩 (95)	旋转 $45^\circ$
文中算法	35.4917	$64 \times 64$	0.9789	0.9168	1.0000	1.0000	0.9566
文献[5]	34.4300	$50 \times 50$	0.6940	0.7766	0.9043	0.6911	—

表 3 几何攻击下水印鲁棒性测试

Tab. 3 Measurement of robustness of the watermarking scheme to geometric attacks

载体图像	$R_{BE}$					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
cameraman	0.0659	0.0688	0.1172	0.0498	0.1277	0.0056
lena	0.0891	0.0764	0.1287	0.0601	0.1472	0.1255
boat	0.1206	0.1067	0.1772	0.1028	0.2183	0.0160
pirate	0.1184	0.0322	0.1631	0.0955	0.1831	0.1763
载体图像	$R_{BE}$					
	A7	A8	A9	A10	A11	A12
cameraman	0.1118	0.0750	0.1523	0.1951	0.1575	0.0269
lena	0.1436	0.0823	0.1377	0.1892	0.1243	0.0366
boat	0.2024	0.1211	0.1814	0.2029	0.1570	0.1064
pirate	0.1809	0.1140	0.1816	0.2034	0.1494	0.0352

表 3 中: A1, A2 分别代表用变换矩阵  $\begin{bmatrix} 1 & 0.05 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix}$  进行  $x$  和  $y$  方向 shearing 攻击; A3 代表用变换矩阵  $\begin{bmatrix} 1 & 0.05 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0.05 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$  进行  $x$  和  $y$  方向 shearing 及垂直翻转的联合攻击; A4 代表用变换矩阵  $\begin{bmatrix} 1.25 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.05 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0.05 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  进行  $x$  和  $y$  方向 shearing 及缩放纵横比不等的联合攻击; A5 代表用变换矩阵  $\begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1.013 & 0.008 \\ 0.011 & 1.008 \end{bmatrix}$  进行一般仿射变换和旋转变换的联合攻击; A6, A7 分别代表用变换矩阵  $\begin{bmatrix} 1.010 & 0.013 \\ 0.009 & 1.011 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -3.56 & 0.62 \\ -2.56 & -0.34 \end{bmatrix}$  进行一般仿射攻击; A8 代表用变换矩阵  $\begin{bmatrix} 0.75 & 0 \\ 0 & 0.75 \end{bmatrix}$  进行  $x$  和  $y$  方向都缩小 0.75 倍的攻击; A9 代表加强度为 0.006 的椒盐噪声后, 再旋转  $45^\circ$  的攻击; A10 代表加均值为 0, 加方差为 0.001 的高斯噪声后, 再旋转  $45^\circ$  的攻击; A11 代表 JPEG 压缩 ( $Q=75$ ) 后, 再旋转  $45^\circ$  的攻击; A12 代表图像放大两倍后, 再旋转  $45^\circ$  的攻击. 由表 2, 3 及图 5 可知: 该方案对旋转攻击和一般仿射变换攻击具有较强的鲁棒性, 对大尺度剪切攻击和大幅度缩放攻击

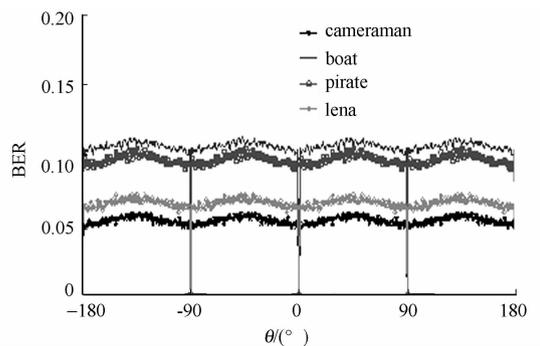


图 5 不同旋转度数攻击下水印错误提取率

Fig. 5  $R_{BE}$  variation under different attack angle

的鲁棒性一般.

## 4 结束语

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技术,利用测量值的计算保密性,奇异值的稳定性和运用图像归一化技术对几何失真含水印图像的有效校正,提高了水印的安全性和鲁棒性.通过修改测量值嵌入水印的技术有助于实现成像和水印嵌入同步.由于提出的几何校正的水印技术与水印嵌入方案无关,因此,可与其他水印技术相结合,提高水印抗几何攻击的能力.

### 参考文献:

- [1] ZHANG Yan-qun. Digital watermarking technology: A review[C]// International Conference on Future Computer and Communication, Wuhan: IEEE Press, 2009: 250-252.
- [2] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [3] 彭玉楼. 基于混沌和压缩感知的鲁棒性数字水印研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013: 35-39.
- [4] ZHANG Xin-peng, QIAN Zhen-xing, REN Yan-li, et al. Watermarking with flexible self-recovery quality based on compressive sensing and compositive reconstruction[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(4): 1223-1232.
- [5] 魏丰. 基于压缩感知的数字图像盲水印算法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2013: 34-48.
- [6] DONG Ping, BRANKOV J G, GALATSANOS N P, et al. Digital watermarking robust to geometric distortions[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2140-2150.
- [7] MUN S, FOWLER J E. Block compressed sensing of images using directional transforms[C]// 16th IEEE International Conference on Image Processing, Cairo: IEEE Press, 2009: 3021-3024.
- [8] WU Ling-ling, ZHANG Jian-wei, DENG Wei-tao, et al. Arnold transformation algorithm and anti-arnold transformation algorithm[C]// 1st International Conference on Information Science and Engineering. Nanjing: IEEE Press, 2009: 1164-1167.
- [9] 李旭东. 图像量化水印方法中量化公式的最优化分析[J]. 光电工程, 2010, 37(2): 96-102.

## Robust Digital Watermarking Algorithm Based on Image Geometric Correction and SVD of Block Compressive Sampling Measurements

CHI Xiao-fang, FENG Gui, DONG Xiao-hui

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** It will lead to the poor robustness when the watermark is directly embedded into the compressive sampling measurements. To solve this problem, a robust digital watermarking algorithm based on image geometric correction and singular value decomposition (SVD) of block compressive sampling measurements is proposed in this paper. The watermark is embedded into the singular values of the image in compressive sampling transform domain. Meanwhile, the watermarked image under geometric attacks is corrected using the image normalization technique. After geometric correction, the watermark can be correctly extracted. Experimental results have shown that the proposed algorithm achieves the better robustness to common attacks and geometric attacks.

**Keywords:** digital image watermarking; block compressive sampling; singular value decomposition; geometric attacks; geometric correction; robustness

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)