

基于频域变换与几何失真校正的图像水印算法^①

阮兰娟¹, 王 勇²

1. 广西交通职业技术学院, 交通信息工程系, 南宁 530023;

2. 桂林电子科技大学, 计算机与信息安全学院, 广西 桂林 541004

摘要: 为改善水印系统的稳健性, 提出了基于多元频域变换的彩色图像水印方案. 首先, 引入仿射映射来混淆水印数据; 再确定载体的最大中心区域, 利用四元离散 Fourier 变换对其处理, 获取 1 个实部系数矩阵与 3 个虚部系数矩阵; 考虑彩色载体的亮度、纹理与边缘掩码, 计算数据融入因子; 并以此建立同步水印隐藏方法, 把加密数据植入实部系数矩阵的低频系数中, 形成水印目标; 基于不同的内容变换, 形成训练数据; 并基于机制, 对其完成二级分解, 利用分布函数来拟合 6 个系数的经验直方图, 最终将其形状与尺度参数视为水印系统的稳健特征矢量. 借助这些稳健特征来训练支持向量机, 从而得到变换参数值, 以校正受攻击的水印图像; 最后, 计算校正水印图像的最大中心区域, 联合四元离散 Fourier 变换, 设计水印提取方法, 准确复原二值水印. 测试数据表明: 与当前图像水印技术相比, 面对几何变换攻击, 所提算法具有更高的不可感知性与鲁棒性, 其输出的水印图像对应的差分图较为理想, 复原水印失真度最小.

关 键 词: 图像水印; 几何失真校正; 水印嵌入强度; 离散 Fourier 变换; 小波变换; BKF 分布

中图分类号: TP309.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)10-0054-12

为了保证传输图像数据的真实性, 近年来, 学者们提出了多种水印方案^[1-3], 如 Hosny 等人^[4]借助阿诺德映射来对水印信息进行置乱, 然后利用精确极谐波变换处理载体图像, 输出极谐波变换矩阵, 通过水印嵌入方法, 将置乱后的水印信息嵌入到极谐波变换矩阵中, 从而完成水印的嵌入. 但是, 这种水印技术对混合几何攻击的鲁棒性较弱, 且并不是所有的极谐波变换矩阵都适合嵌入水印, 因此, 其不可感知性较低. 齐向明等人^[5]将宿主图像分成互不重叠的图像块, 并分析了每个图像块的纹理和边缘特征, 但该技术是一种基于载体特征的水印方法, 提取图像的特征点对图像修改比较敏感, 且复杂度较高, 在水印检测前, 需要额外提取图像的特征点. 如 Wang 等人^[6]利用四元 Fourier 变换来处理彩色图像的 R, G, B 分量, 以提取其实部的四元 Fourier 变换系数, 通过对称水印嵌入方法, 将水印信息嵌入到初始载体的四元 Fourier 变换系数中, 获取水印图像, 随后, 根据最小二乘支持向量机来构建几何校正方法, 增强水印图像的抗几何失真能力, 实验结果验证了其算法的有效性. 但该技术是将水印信息嵌入到所有的变换系数中, 且其水印嵌入强度忽略了人眼视觉特性, 使其不可感知性有待进一步提高, 另外, 其采用低阶伪 Zernike 矩来构建几何校正方法, 因其不能有效提供载体的多尺度分析, 而不能较好地描述载体的鲁棒特征, 导致其抗几何失

① 收稿日期: 2018-05-10

基金项目: 广西高校云计算与复杂系统重点实验室项目(YF17105); 广西高校中青年教师基础能力提升项目(2017KY0211, KY2016YB668).

作者简介: 阮兰娟(1982-), 女, 硕士, 讲师, 工程师, 主要从事多媒体技术及理论、计算机图形图像等方面的研究.

真能力有待提高. Wang 等人^[7]设计了基于非下采样 Shearlet 变换和极谐变换矩的图像水印方案, 通过非下采样 Shearlet 变换, 可以提供载体图像的近似最优逼近, 确认水印的嵌入位置, 将二值水印嵌入其中, 并利用极谐变换矩阵来预测几何失真变换参数, 对攻击水印图像完成校正. 但在其水印嵌入过程中, 没有考虑像素的水印嵌入强度, 使其不可感知性不理想, 且其采用的极谐变换系数模并非是载体的鲁棒特征, 使得几何校正机制的能力受限.

为了改善水印算法的鲁棒性, 并兼顾其不可感知性, 本文根据文献^[6]的四元 Fourier 变换思想和几何校正思想, 在频域内, 提出了新的彩色图像水印方案. 通过仿射映射的预处理, 混淆二值水印信息, 增强其不可感知性; 同时, 利用四元离散 Fourier 变换处理彩色载体的最大中心区域, 并根据其输出的实部系数矩阵, 基于水印融入机制, 把加密水印植入到宿主的低频像素中; 同时, 利用 BKF(bessel K Form)分布的形状与尺度参数来训练 SVM, 以恢复被修改的水印数据内容. 通过多组实验来验证该水印算法的抗几何失真能力与不可感知性.

1 多元频域变换

1.1 四元离散 Fourier 变换^[8-9]

四元数是一个复数的推广, 它可表示为具有一个实部和 3 个虚部的四维复数, 其模型如下^[8]:

$$q = w + xi + yj + zk \quad (1)$$

其中, w, x, y, z 均为实数; i, j, k 为虚部矢量, 三者之间的关系如下:

$$\begin{cases} i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \\ ij = K \cdot jk = i \cdot ki = j \\ ji = -k \cdot jk = -i \cdot ki = -j \end{cases} \quad (2)$$

由于彩色图像 $f(x, y)$ 包含了 R, G, B 3 个分量, 因此, 也可以利用四元数来充分描述三者之间的关系:

$$f(x, y) = f_R(x, y)i + f_G(x, y)j + f_B(x, y)k \quad (3)$$

其中, $f_R(x, y), f_G(x, y), f_B(x, y)$ 分别是 $f(x, y)$ 的 R, G, B 分量.

Fourier 变换是将图像从空域转换到频域, 可较好地反映像素的灰度变化, 是图像信号处理的常用方法^[9]. 为了拓展 Fourier 变换的优势, Ouyang 等人^[9]将四元数与 Fourier 变换结合, 提出了四元离散 Fourier 变换, 并将其用于图像信号处理^[9]中:

$$f(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-u2\pi(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N})} f(x, y) \quad (4)$$

其中, $f(u, v)$ 是彩色图像 $f(x, y)$ 的四元离散 Fourier 变换结果; MN 表示 $f(x, y)$ 的尺寸为 $M \times N$. 依据文献^[9]可知, 式(4)对应的可逆变换为:

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{u2\pi(\frac{xu}{M} + \frac{yv}{N})} f(u, v) \quad (5)$$

为了展示式(4)的四元数特点, 将其转变为如下模型:

$$f(u, v) = A(u, v) + C(u, v)i + D(u, v)j + E(u, v)k \quad (6)$$

其中, $A(u, v)$ 是彩色图像 $f(x, y)$ 的四元离散 Fourier 变换对应的实部; $C(u, v), D(u, v), E(u, v)$ 则是相应的虚部.

以图 1(a) 为例, 利用式(4)对其处理后, 得到的实部与 3 个虚部分别见图 1(b)~图 1(e).

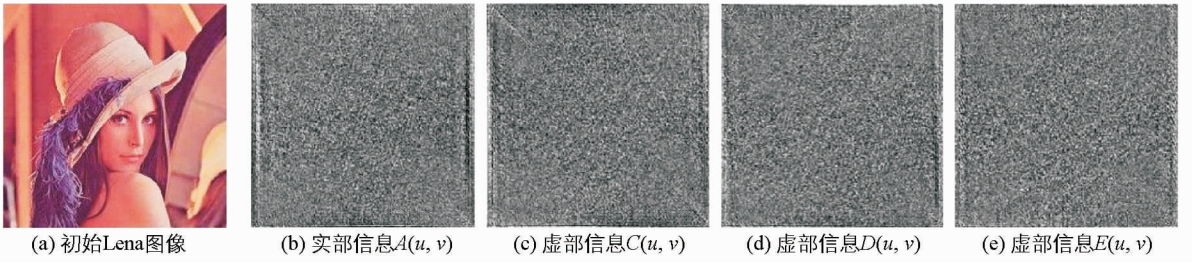


图 1 彩色图像的四元离散变换结果

1.2 四元小波变换^[10-11]

由于多尺度多分辨率特征,小波变换被广泛用于图像水印、图像加密等领域.但是,传统的图像小波变换容易受到图像平移的影响,使其鲁棒性不佳,为此,本文引入四元小波变换来解决此不足,它具有近似平移不变性和丰富的相位信息.对于图像 $f(x,y)$,其四元小波变换函数 $f_A(x,y)$ 如下所示:

$$f_A(x,y) = f_D(x,y) + H_1(f_D(x,y))\mathbf{i} + H_2(f_D(x,y))\mathbf{j} + H_T(f_D(x,y))\mathbf{k} \quad (7)$$

其中, $f_D(x,y)$ 是离散小波变换结果; H_1, H_2 是部分 Hilbert 变换; H_T 是总的 Hilbert 变换.利用四元小波变换处理 $f(x,y)$,输出系数矩阵 Q 为:

$$Q = \begin{bmatrix} LL_{\varphi_h(x)\varphi_h(y)} & LH_{\varphi_h(x)\phi_h(y)} & HL_{\phi_h(x)\varphi_h(y)} & HH_{\phi_h(x)\phi_h(y)} \\ LL_{\varphi_g(x)\varphi_h(y)} & LH_{\varphi_h(x)\phi_g(y)} & HL_{\phi_g(x)\varphi_h(y)} & HH_{\phi_g(x)\phi_g(y)} \\ LL_{\varphi_h(x)\varphi_g(y)} & LH_{\varphi_h(x)\phi_g(y)} & HL_{\phi_h(x)\varphi_g(y)} & HH_{\phi_h(x)\phi_g(y)} \\ LL_{\varphi_g(x)\varphi_g(y)} & LH_{\varphi_g(x)\phi_g(y)} & HL_{\phi_g(x)\varphi_g(y)} & HH_{\phi_g(x)\phi_g(y)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, L 代表低频; H 代表高频; $\varphi(\cdot)$ 是尺度函数; $\phi(\cdot)$ 是小波函数.

在式(8)中,每一行均对应一个四元数:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 = LL_{\varphi_h(x)\varphi_h(y)} + LH_{\varphi_h(x)\phi_h(y)}\mathbf{i} + HL_{\phi_h(x)\varphi_h(y)}\mathbf{j} + HH_{\phi_h(x)\phi_h(y)}\mathbf{k} \\ q_2 = LL_{\varphi_g(x)\varphi_h(y)} + LH_{\varphi_h(x)\phi_g(y)}\mathbf{i} + HL_{\phi_g(x)\varphi_h(y)}\mathbf{j} + HH_{\phi_g(x)\phi_g(y)}\mathbf{k} \\ q_3 = LL_{\varphi_h(x)\varphi_g(y)} + LH_{\varphi_h(x)\phi_g(y)}\mathbf{i} + HL_{\phi_h(x)\varphi_g(y)}\mathbf{j} + HH_{\phi_h(x)\phi_g(y)}\mathbf{k} \\ q_4 = LL_{\varphi_g(x)\varphi_g(y)} + LH_{\varphi_g(x)\phi_g(y)}\mathbf{i} + HL_{\phi_g(x)\varphi_g(y)}\mathbf{j} + HH_{\phi_g(x)\phi_g(y)}\mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (9)$$

对于尺寸为 $M \times N$ 的初始图像 $f(x,y)$,经过 l 级的离散小波变换分解后,得到一个 $(2^{2-l}M)(2^{2-l}N)$ 维的系数矩阵 Q .以图 1(a) 为对象,对其进行二级离散小波变换分解,其实部与 3 个虚部分别见图 2(a) -图 2(d).

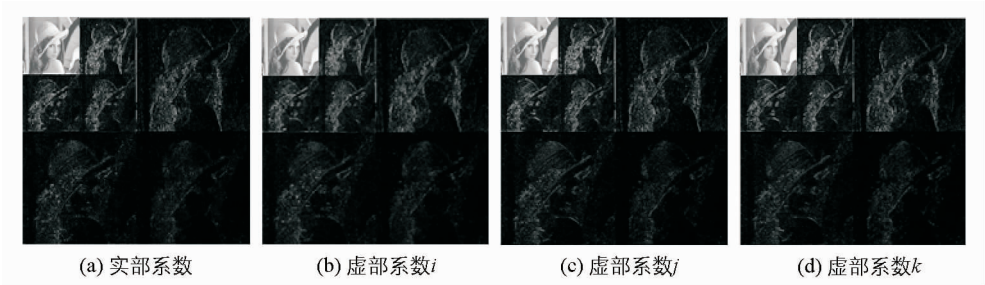


图 2 二级四元小波变换

图像特征的多尺度表示是很重要的.随着多尺度几何分析在许多领域中的广泛应用,国内外学者提出了大量的统计模型,统计模型的目的就是用少量的统计参数来描述图像的分布特征,当前,较为成熟的统计模型有:广义高斯分布、柯西分布、拉普拉斯分布以及 BKF 分布^[12].为了利用载体图像的鲁棒特征来训练 SVM 机制,需要选择出四元小波变换子带系数的最佳拟合分布.在本文中,选择二级四元小波变换的 6

个高通子带进行测试分析, 包括实部系数的水平、纵向以及对角线细节, 和虚部系数的水平细节. 图 3 显示了二级四元小波变换的 6 个高通子带的经验直方图的拟合结果. 依图可知, BKF 分布可以最好地拟合四元小波变换子带对应的经验直方图. 因此, 本文选用 BKF 分布的形状与尺度参数来表示图像的鲁棒特征.

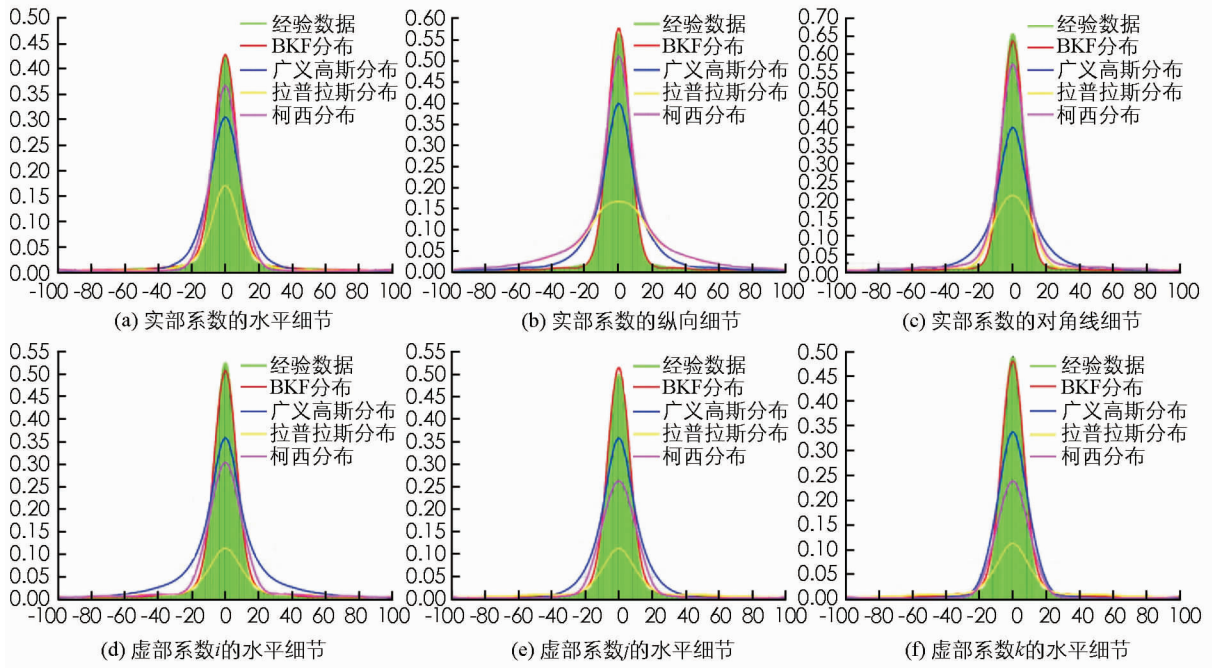


图 3 6 个高通子带的经验直方图的拟合结果

根据文献[13] 可知, BKF 分布的概率密度函数为

$$f(x; p, c) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma(p)} \left(\frac{c}{x} \right)^{-\frac{p}{2}-\frac{1}{4}} \left| \frac{x}{2} \right|^{p-\frac{1}{2}} K_{p-\frac{1}{2}} \left(\sqrt{\frac{2}{c}} |x| \right) \quad (10)$$

其中, $p > 0, c > 0$ 分别是拟合分布的形状、尺度参数; $\Gamma(t) = \int_0^\infty e^{-u} u^{t-1} du$; $K(\cdot)$ 是改进的贝塞尔函数^[14].

依据形状、尺度参数, BKF 分布的特征函数可表示为

$$\varphi(\omega) = \left(1 + \frac{c\omega^2}{2} \right)^{-p} \quad (11)$$

根据上述公式可知, 当 $p = 1$ 时, 式(11) 是一个双指数概率密度函数; 当 $p > 1$, 式(11) 接近高斯分布; 当 $p < 1$, 式(11) 的分布呈现尖峰形态. 不同的形状参数对应的 BKF 分布形态见图 4.

2 本文鲁棒图像水印算法

本文所设计的彩色水印方案的数据隐藏过程如图 5 所示, 主要分为水印数据的嵌入、同步校正与水印检测 3 个步骤.

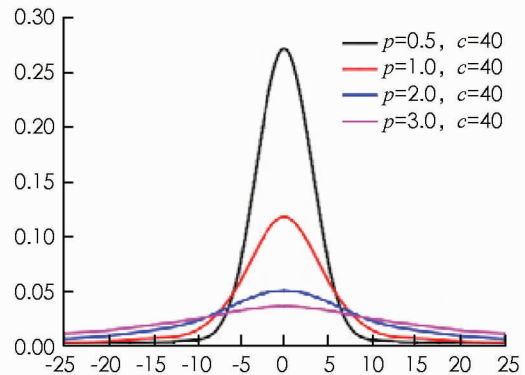


图 4 不同的形状参数对应的分布形态

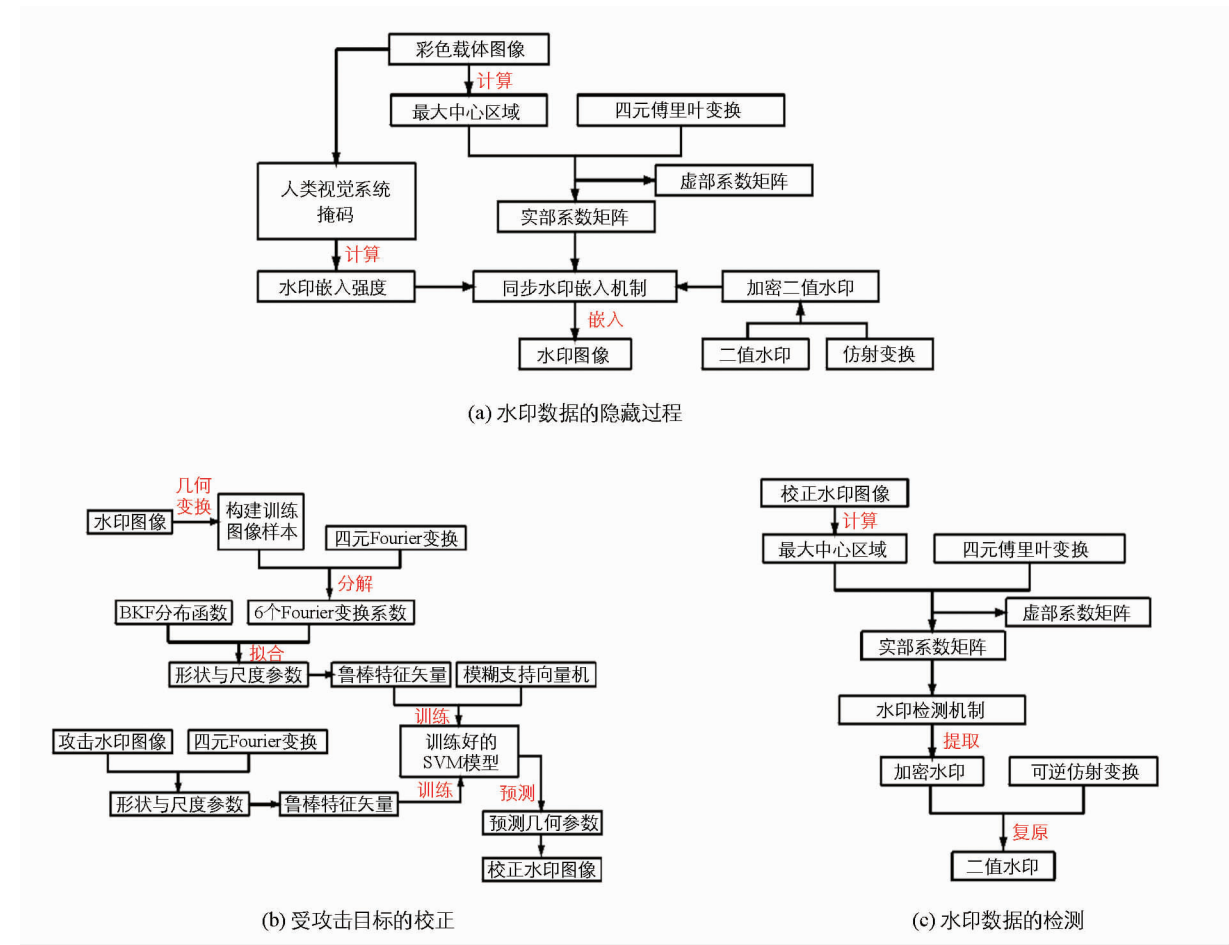


图 5 本文彩色图像水印算法的过程

2.1 水印数据的隐藏

1) 令 $I = \{f(x,y), 0 \leq x < M, 0 \leq y < N\}$ 是尺寸为 $M \times N$ 的彩色载体图像. 其中, $f(x,y)$ 是 (x,y) 位置处的像素值. $W = \{w(i,j), 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q\}$ 是二值水印, 尺寸为 $P \times Q$, 且 $w(i,j) \in [0, 1]$. 为了改善算法的不可感知性, 本文通过仿射变换^[15]来混淆二值水印, 充分破坏其像素空间关系. 其中, 仿射映射为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \tag{12}$$

其中, (x,y) 、 (x',y') 分别是加密前后的像素点坐标; a,b,c,d 都是变形系数; e,f 是平移系数. 通过式(12)的置乱后, 可获取加密水印 $W' = \{w'(i,j), 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q\}$.

2) 由于图像经过一系列的旋转与反向旋转后, 图像的边缘像素通常会丢失. 为了改善水印图像的鲁棒性, 本文计算出载体图像的最大中心区域, 该区域内被旋转与反向旋转操作后, 不会丢失像素, 具有较高的稳健性. 对图像旋转 45° 时, 可获取其最大中心区域, 见图 6. 为了便于后续的表述, 用 $I_c = \{g(x,y), 0 \leq x,y < t\}$ 来表示最大中心区域, 其中, $t = \sqrt{2}/2\min(M,N)$.

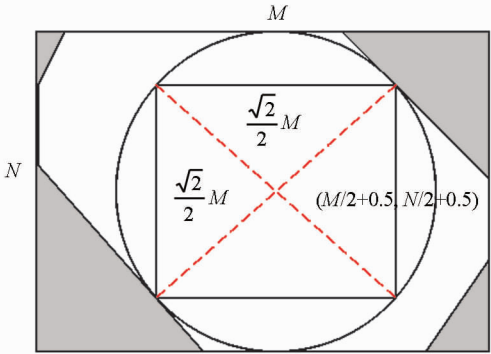


图 6 彩色图像的最大中心区域

3) 随后, 利用四元离散 Fourier 变换章节的内容, 处理最大中心区域 I_C , 输出一个实部系数矩阵 $\mathbf{A}$ 和 3 个虚部系数矩阵 $\mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{E}$.

4) 人眼对四元离散 Fourier 变换的高频信息较为敏感, 当把二者水印信息嵌入到这些高频系数中时, 会导致其不可感知性较低. 因此, 在本文算法中, 将二值水印嵌入到四元离散 Fourier 变换的低频系数中. 根据四元离散 Fourier 变换理论可知, 当水印图像经过可逆四元离散 Fourier 变换处理后, 其仍需表示为一个纯四元数形式, 使其在 RGB 颜色空间能够传输高质量的水印图像. 所以, 为了得到彩色水印图像的纯四元数形式, 除了将水印嵌入低频系数 $A(i, j)$ 之外, 还必须修改对称四元数傅立叶变换的实部系数 $A(L-i, L-j)$, 见图 7. 根据文献[6], 本文设计了同步水印嵌入方法:

$$A'(i, j) = \begin{cases} \left(\lambda(i, j) - \frac{1}{2}\right)\Delta & \text{if } \text{mod}(\lambda(i, j) + w'(i, j), 2) = 1, r(i, j) < \frac{1}{2} \\ \left(\lambda(i, j) + \frac{3}{2}\right)\Delta & \text{if } \text{mod}(\lambda(i, j) + w'(i, j), 2) = 1, r(i, j) \geq \frac{1}{2} \\ \left(\lambda(i, j) + \frac{1}{2}\right)\Delta & \text{if } \text{mod}(\lambda(i, j) + w'(i, j), 2) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$A'(L-i, L-j) = -A'(i, j) \quad (14)$$

$$\lambda(i, j) = \text{round}\left(\frac{A(i, j)}{\Delta}\right) \quad (15)$$

其中, $A(i, j)$ 代表初始的四元离散 Fourier 变换系数; $A'(i, j)$ 是嵌入水印后的四元离散 Fourier 变换系数; Δ 为水印强度因子; $w'(x, y)$ 为加密水印信息; L 为系数矩阵的维数.

在进行式(13)的数据隐藏过程中, Δ 值的大小对水印性能影响较大. 为了兼顾良好的隐秘性与鲁棒性, 本文引入人眼视觉系统 HSV^[16-17] 来优化 Δ . 基于 HSV 嵌入强度 Δ 可自适应于彩色图像的特征, 以确保最高的透明性. 为此, 根据彩色图像 I 的亮度 M_L 、纹理 M_T 与边缘掩码, 获取嵌入强度 Δ :

$$\Delta = Z = \max(\rho \times M_L \times \min(M_T, F(M_E, E_{DI}(E_{DE}(I)))))) \quad (16)$$

其中, $\rho \in [0.4, 0.5]$ 是权重因子; M_L 为亮度掩码; M_T 为纹理掩码; I 是彩色载体; $E_{DI}()$ 是常见的边缘算子; $E_{DE}()$ 是扩展操作; F 是滤波操作; Z 为 HSV 掩码.

本文利用 HSV 掩码来控制水印的嵌入强度 Δ . 将图 8(a) 作为对象, 其对应的 M_L, M_T 以及 E_{DI} 分别见图 8(b)–8(d). 最终形成的 HSV 掩码见图 8(e).

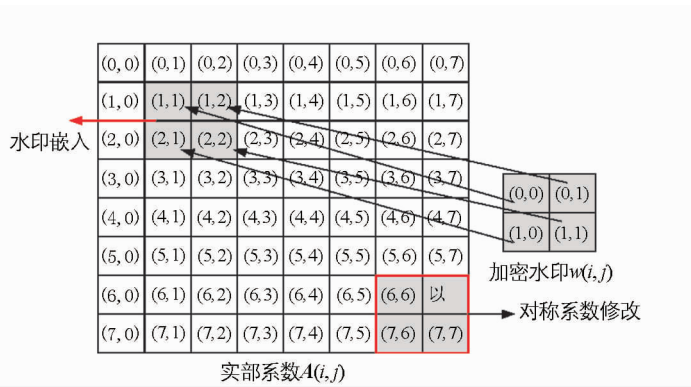


图 7 水印数据的隐藏^[6]

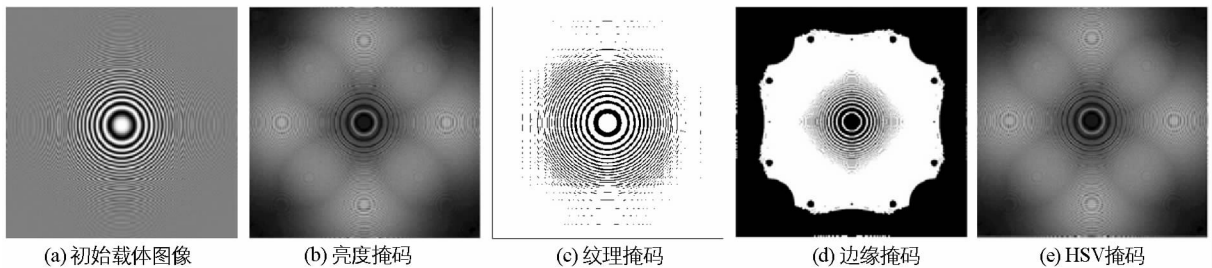


图 8 HSV 掩码的形成

2.2 稳定几何失真校正机制

为了确保提取的二值图像无失真, 本文联合 QWT(Quaternion Wavelet Transform) 与 FSVM(Fuzzy

Support Vector Machine) 方法^[17], 来恢复受攻击的水印图像. 令水印图像为 $I'\{f'(x,y), 0 \leq x \leq M', 0 \leq y \leq N'\}$. 则失真校正步骤为:

1) 形成训练数据库. 为了充分训练 FSVM, 需构建合适的训练图像集 $H^k(k = 0,1,2,\cdots,K-1)$. 首先, 将 3 种内容修改类型施加于彩色水印图像, 从而形成了训练样本库 Ω_k . 这些几何失真类型的参数分别用 $t_x^k, t_y^k, S^k, \theta^k$ 来表示. 其中, t_x, t_y 是沿着 X,Y 轴的运动距离; S 是尺度因子; θ 为旋转角度.

2) 利用 QWT, 对这些训练图像 $H^k(k = 0,1,2,\cdots,K-1)$ 进行二级分解;

3) 根据图 3 所示的 6 个高通子带的 BKF 分布的形状和尺度参数, 建立特征矢量 $p_1^k, c_1^k, p_2^k, c_2^k, p_3^k, c_3^k, p_4^k, c_4^k$ 以及 $p_5^k, c_5^k, p_6^k, c_6^k$. 再联合几何失真参数 $t_x^k, t_y^k, S^k, \theta^k$, 形成了相应的训练样本,

$$\Omega = \{p_1^k, c_1^k, p_2^k, c_2^k, p_3^k, c_3^k, p_4^k, c_4^k, p_5^k, c_5^k, p_6^k, c_6^k, t_x^k, t_y^k, S^k, \theta^k\} \tag{17}$$

4) 把训练样本 Ω 作为 FSVM 的输入矢量, 对 FSVM 实施训练, 最终得到参数值 t_x', t_y', S', θ' . 根据预测结果, 对受到攻击的彩色水印图像完成校正.

为了验证所提校正方法的预测精度, 从 USC-SIPI 数据集^[18] 中任意选择一幅彩色图像作为此次试验的对象, 见图 9(a); 再利用如下几何失真类型对其修改: 10° 的旋转攻击、沿 Y 轴平移 15 个单位、X 与 Y 轴同时移动 15 个单位、缩放比例为 0.5, 输出一组训练数据集, 如图 9(b)–9(e) 所示. 再利用这些数据来训练 FSVM, 以恢复遭受内容修改的水印图像.

再次从 USC-SIPI 数据集中挑选彩色样本 Barbara 实施恢复测试, 如图 10(a) 所示, 再对其施加表 1 中的内容修改类型, 得到的数据见图 10(b), 10(d), 10(f), 10(h). 通过校正过程, 得到的恢复图像见图 10(c), 10(e), 10(g), 10(i), 其预测的参数见表 1. 由表 1 数据和图 10 可知, 所提的几何校正机制能够准确恢复攻击图像, 且预测误差较小.



图 9 构建训练图像



图 10 几何校正结果

表 1 模糊支持向量机的预测结果

名称	几何失真参数值	预测结果
角度旋转	45°	45.000 8°
平移变换	[0, 15]	[0, 15.002 1]
尺度变换	0.5	0.499 89
长宽比变换	[15, 15]	[14.999 3, 15.001 2]

2.3 水印信息的提取

通过稳定几何失真校正方法处理后, 可获取正确的水印图像为 I^* . 随后, 通过如下水印提取方法, 将二值水印从 I^* 中检测出来, 步骤如下:

- 1) 根据图 6 所示, 计算 I^* 的最大中心区域 $I_c^* = \{g^*(x, y), 0 < x, y < t\}$;
- 2) 利用四元 Fourier 变换处理最大中心区域 I_c^* , 输出实部系数矩阵 A^* 和 3 个虚部系数矩阵 C^*, D^*, E^* ;
- 3) 根据如下水印提取方法, 从实部系数矩阵 A^* 中的低频系数中复原加密水印:

$$w^*(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{mod}(\lambda'(i, j), 2) = 1 \\ 0 & \text{if } \text{mod}(\lambda'(i, j), 2) = 0 \end{cases} \tag{18}$$

$$\lambda(i, j) = \text{round}\left(\frac{A^*(i, j)}{\Delta}\right) \tag{19}$$

- 4) 通过式(18), 可获取加密水印 $W^* = \{w^*(i, j), 0 < i < P, 0 < j < Q\}$; 随后, 对 W^* 进行可逆仿射变换, 获取二值水印.

3 测试与分析

基于 Matlab 软件完成该算法的性能测试, 同时, 为了体现该方案的先进性, 将文献[4-6]当作对比组. 仿真条件为: DELL vostro1088, 3GHz, 双核 CPU, 400GB 硬盘以及 4G 内存. 为了兼顾一般性, 从 USC-SIPI 数据集中任意选择 3 幅彩色载体, 见图 11(a) - 11(c), 尺寸均为 256×256 ; 同时, 将图 11(d) - 11(f) 作为二值水印, 其大小是 64×64 . 其中, 训练图像 $K = 100, a = b = c = 1, d = 2, e = f = 1.5$; 且选择 RBF 函数作为 FSVM 的核函数. 衡量指标: (1) 不可感知性; (2) 鲁棒性.

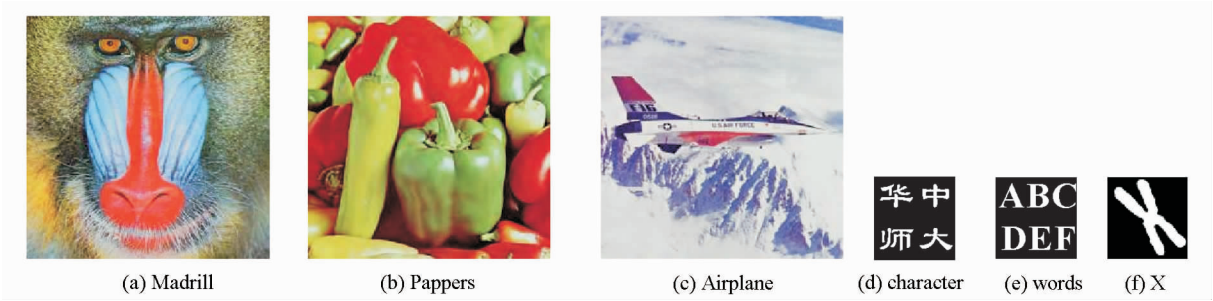


图 11 彩色载体图像及其二值水印信息

3.1 不可感知性测试

借助本文所提算法、文献[4]、文献[5]以及文献[6]的水印隐藏过程, 把图 11(d) - 11(f) 分别嵌入到图 11(a) - 11(c) 中, 输出的水印数据见图 12. 根据水印结果可知, 这 4 种方案都具备良好的不可感知性, 非授权用户不能从中直接得到任何有用的线索.

为了体现 4 种方案的差异, 为此, 本文利用差分图来客观量化所提算法与文献[4]、文献[5]、文献[6]的优劣, 通过分析水印图像与初始载体的灰度分布拟合程度来评估. 将图 12(a)、图 12(c) - 12(f) 视为对象, 嵌入率为 0.4 bpp, 根据文献[3]的方法, 输出的差分图曲线如图 13 所示. 根据测试数据可知, 本文方法的水印图像对应的灰度分布与初始载体的拟合度最高, 阶梯效应非常小, 见图 13(a); 文献[6]的差分图

也比较理想,无明显的阶梯效应,与所提算法较为接近,但是,其水印图像的灰度分布不理想,见图 13(d).而文献[4]和文献[5]方法的差分图曲线不佳,分别见图 13(b)与图 13(c).原因是所提技术通过联合多种视觉因素来得到子块的量化步长,最大化了水印图像的不可感知性;并根据嵌入强度设计了同步水印嵌入方法,将加密的二值水印嵌入到彩色载体的四元 Fourier 变换低频系数中,对载体的修改范围较小.而文献[6]是将水印信息嵌入到整个图像的四元 Fourier 变换系数中,对载体图像的修改范围较大,而且水印嵌入过程中没有考虑人眼视觉特性,使其不可感知性要低于所提技术.文献[4]虽然也对二值水印进行了加密处理,但是,该技术是将水印信息嵌入到整个载体的极谐波变换矩阵中,忽略了人眼视觉特性,对载体图像的修改范围较大,导致其不可感知性不理想.文献[5]利用人类视觉系统的隐秘特性,对每个图像块的纹理特征和边缘特征进行分析,选择隐秘性好的图像块作为嵌入位置,并将加密后的水印信息嵌入到离散小波变换的低频系数中,具有较高的不可感知性.但是,此技术在水印嵌入过程中,没有考虑水印嵌入强度对水印结果的影响,采用经验值来完成水印嵌入,容易造成水印“溢出”或“下溢”的问题,使其隐秘性能要略低于所提技术.

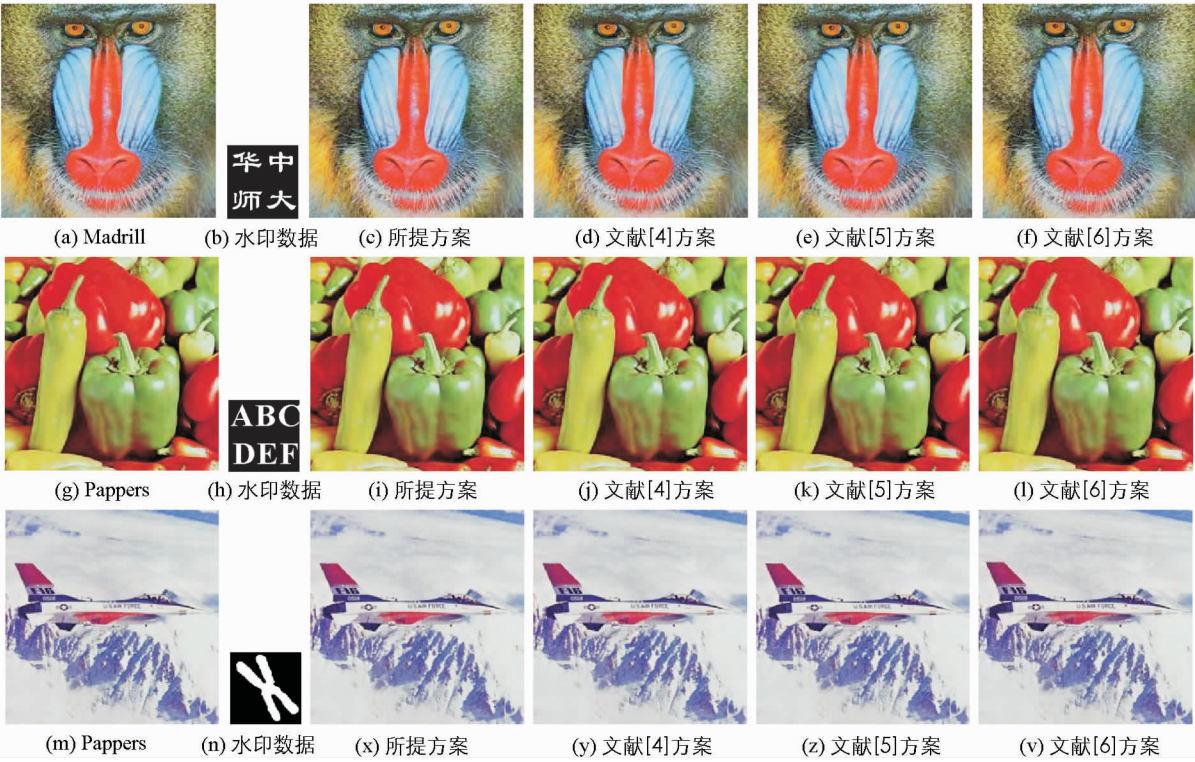


图 12 不同算法的输出水印图像

3.2 鲁棒性测试

为了突出所提技术的抗几何失真能力,以水印图像(图 9(c)–9(e))为样本,分别将方差为 0.02 的椒盐噪声攻击、45°的旋转、1 倍的缩放、以及“旋转+缩放”的组合攻击施加给每幅水印图像,并基于本文所提算法、文献[4]、文献[5]和文献[6]的水印提取机制来复原二值水印,利用 PSNR 与 NC 来客观评价复原水印的失真度,数据见表 2. 根据测试数据可知,4 种技术所提取的二值水印与源水印数据间存在差异,然而,本文方案的鲁棒性最强,其提取的二值水印质量最高,对应的 PSNR 与 NC 值始终是最大的.文献[6]算法的抗几何失真能力比较强,要优于文献[4]和文献[5],其对应的 PSNR 与 NC 值始终与所提算法较为接近.而文献[4]、文献[5]的抗几何失真能力不佳,当水印图像被攻击时,二者所复原的二值水印均有不同程度的失真,对应的 PSNR 与 NC 值都要小于所提技术.主要是因为本文所提水印算法利用被攻击后水印图像的 6 个高通子带的 BKF 分布的形状和尺度参数作为特征矢量来训练 FSVM 模型,这些参数更适合描述图像特征,从而有效提高了二值水印的提取质量.而文献[6]与所提算法类似,都是构建了几何校正方

法, 将彩色载体的低阶伪 Zernike 矩阵作为特征矢量来训练最小二乘支持向量机 LS-SVM 模型, 利用训练好的 LS-SVM 来预测几何失真参数, 这些预测结果来校正水印图像, 增强了二值水印的提取质量, 但是, 低阶伪 Zernike 矩阵无法提供图像的多尺度分析, 使其不能很好地描述载体的鲁棒特征, 使其几何校正能力要略低于本文所提算法. 文献[4]则是利用水印图像的极谐波变换矩阵对应的不变性来抵御几何失真, 但是, 这种极谐波变换难以抵御混合攻击. 文献[5]采用的 SIFT 技术对噪声攻击较为敏感, 存在一定的伪特征点, 且 SIFT 特征无法有效描述图像的分布特征, 限制其稳健性.

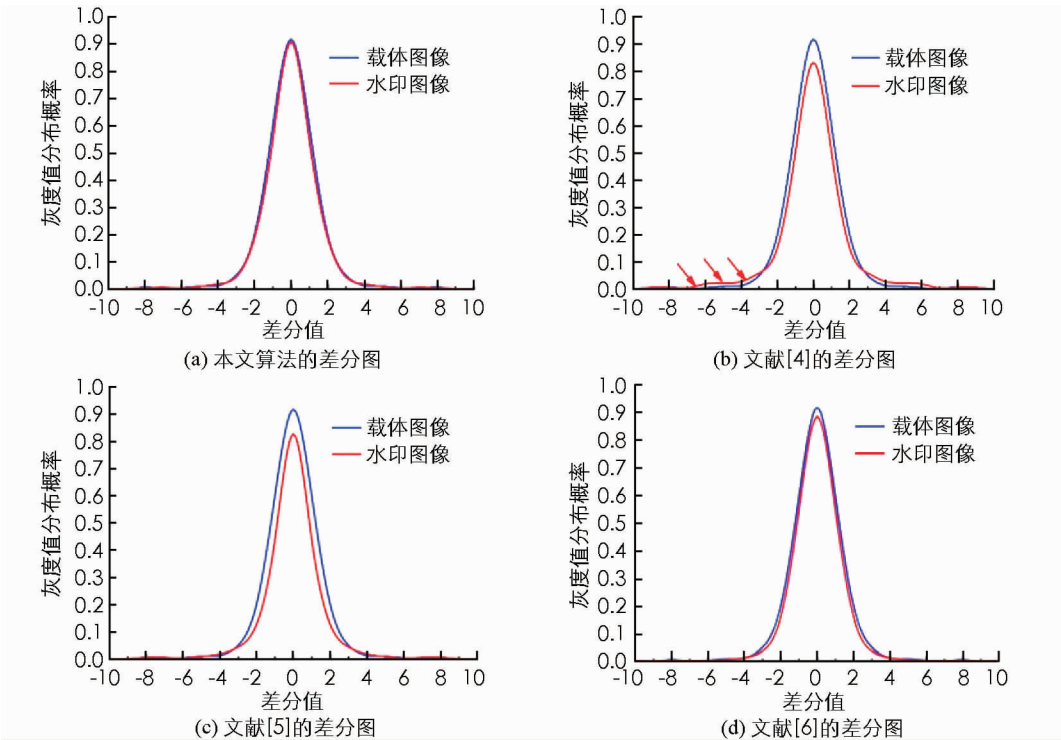


图 13 4 种算法输出的水印图像对应的差分图

表 2 不同方案的鲁棒性测试

名称	评价指标	旋转	尺度变换	椒盐噪声	旋转+尺度变换
本文所提方案	PSNR(dB)	42.65	45.39	48.16	41.08
	NC	0.951	0.978	0.997	0.921
	复原水印				
文献[4]	PSNR(dB)	44.75	45.12	47.68	31.92
	NC	0.971	0.976	0.984	0.793
	复原水印				
文献[5]	PSNR(dB)	40.82	44.31	26.19	38.59
	NC	0.917	0.949	0.482	0.877
	复原水印				
文献[6]	PSNR(dB)	42.09	46.53	48.05	40.26
	NC	0.932	0.981	0.991	0.908
	复原水印				

4 结束语

为了确保提取水印信息的质量,本文设计了多元频域变换与稳定几何失真校正的彩色图像水印算法.利用仿射变换来混淆二值水印图像,高度破坏其像素的空间关系,改善水印信息的隐秘程度.利用四元离散 Fourier 变换和四元小波变换,分别对彩色载体的最大中心区域进行频域变换和二级分解,降低图像对几何变换的敏感性;并根据系数分布函数对应的形状与尺度参数来构建训练样本,完成训练并恢复篡改水印图像的位置.测试数据表明了所提算法具有较高的鲁棒性与不可感知性,所复原的二值水印的失真度较小.

参考文献:

- [1] 李红日,方 逵. 基于误差扩展与像素容量评估的图像水印算法 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(10): 109-118.
- [2] 陆 璐,杨志献,姜永亮. 一种基于 HVS 的 DWT 数字水印算法研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(11): 165-169.
- [3] 陈 琳,王建鹏. 最优像素调整耦合基因算法的高容量图像隐写研究 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(8): 2429-2432.
- [4] HOSNY K M, DARWISH M M. Invariant Image Watermarking Using Accurate Polar Harmonic Transforms [J]. Computers and Electrical Engineering, 2017, 62(8): 429-447.
- [5] 齐向明,高婷. 图像块的不可见性与鲁棒性均衡水印算法 [J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(6): 719-730.
- [6] WANG X Y, WANG C P, YANG H Y, et al. A Robust Blind Color Image Watermarking in Quaternion Fourier Transform Domain [J]. Journal of Systems and Software, 2013, 86(2): 255-277.
- [7] WANG X Y, LIU Y N, LI S, et al. Robust Image Watermarking Approach Using Polar Harmonic Transforms Based Geometric Correction [J]. Neurocomputing, 2016, 174: 627-642.
- [8] 田宇航. 基于四元数的彩色图像加密和去噪算法研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016: 14-17.
- [9] OUYANG J L, COATRIEUX G, SHU H Z. Robust Hashing for Image Authentication Using Quaternion Discrete Fourier Transform and Log-Polar Transform [J]. Digital Signal Processing, 2015, 41: 98-109.
- [10] SANGEETHA N, ANITA X. Entropy Based Texture Watermarking Using Discrete Wavelet Transform [J]. Optik, 2018, 160: 380-388.
- [11] GAI S. New Banknote Defect Detection Algorithm Using Quaternion Wavelet Transform [J]. Neurocomputing, 2016, 196: 133-139.
- [12] BIAN Y, LIANG S. Locally Optimal Detection of Image Watermarks in the Wavelet Domain Using Bessel K Form Distribution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(6): 2372-2384.
- [13] GRENANDER U, SRIVASTAVA A. Probability Models for Clutter in Natural Images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(4): 424-429.
- [14] BIAN Y, LIANG S. Image Watermark Detection in the Wavelet Domain Using Bessel K Densities [J]. IET Image Processing, 2013, 7(4): 281-289.
- [15] NAG A, SINGH J P, KHAN S, et al. Image Encryption Using Affine Transform and XOR Operation [C]//2011 International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies, Thuckafay, India: IEEE, 2011: 309-312.
- [16] QI H Y, ZHENG D, ZHAO J Y. Human Visual System Based Adaptive Digital Image Watermarking [J]. Signal Processing, 2008, 88(1): 174-188.
- [17] 杨建新,王中叶,李威. 基于方向金字塔分解与稳定几何失真校正的鲁棒图像水印算法 [J]. 包装工程, 2019, 40(1): 196-208.
- [18] BIRAJDAR G K, MANKAR V H. Blind Method for Rescaling Detection and Rescale Factor Estimation in Digital Images Using Periodic Properties of Interpolation [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(7): 644-652.

On Image Watermarking Algorithm Based on Frequency Domain Transformation and Geometric Distortion Correction

RUAN Lan-juan¹, WANG Yong²

1. Department of Traffic Information Engineering, Guangxi Vocational and Technical College of Communications, Nanning 530023, China;
2. School of Computer Science and Information Security, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China

Abstract: In order to enhance the ability of image watermarking to resist unknown attack, an color image watermarking algorithm based on multi-frequency domain transformation has been proposed in this paper. Firstly, affine mapping was introduced to encrypt the binary watermark information for destroying the pixel spatial relationship. Then the maximum center area of the carrier image was determined so that the real coefficient matrix and three imaginary coefficient matrices matrix were obtained based on quaternion discrete Fourier transform. The data integration factor was calculated based on the brightness, texture and edge mask of the image. Then a synchronous watermark embedding method was designed according to the integration factor for embedding the encrypted data into the low frequency coefficients in the amplitude information matrix for forming the watermark image. The training dates were constructed by applying different contents transformations. The two level decomposition of quaternion wavelet transform was done on them, and the BKF distribution function was used to fit the empirical histogram of the 6 DWT coefficients for considering the shape and the scale parameters as the robust feature eigenvector of the watermark image. With the help of these robust feature, the support vector machine was trained to get the transform parameter values for correcting attacted watermark images. Finally, the maximum center area of the watermark image was calculated, and the watermark extraction method was designed based on quaternion discrete Fourier transform to accurately restore the binary watermark. The test data show that this algorithm has higher uncertainty and robustness in the face of geometric transformation attacks which the differential image of the output watermark image was more ideal, as well as the distortion of the restored watermark was minimal compared with the current image watermarking technology.

Key words: image watermarking; geometric distortion correction; watermark embedding intensity; discrete Fourier transform; wavelet transform; BKF distribution

责任编辑 崔玉洁