

基于多特征和混沌加密的零水印算法^①



周绶泉, 咸雯雯, 石 慧

(辽宁师范大学 计算机与信息技术学院, 大连 116029)

通信作者: 石 慧, E-mail: shihui_jiayou@126.com

摘 要: 针对传统数字图像水印版权保护中存在的鲁棒性差和安全性低的问题, 为提升不同图像零水印的可区分性, 提出了一种基于多特征和混沌加密的零水印算法. 首先根据整体与局部的角度提取图像的 5 维特征: 均值特征、方差特征、偏态特征、峰度特征和 HOG 特征; 然后利用新提出的基于混沌映射的块置乱方法加密水印图像; 最后基于提取的多特征与置乱后水印, 构造零水印信息. 在版权认证过程中, 首先提取多特征, 再结合零水印信息, 得到加密后水印; 最后对其进行解密; 即可实现版权认证. 实验结果表明, 所提出的方法效率高、安全性高、抗攻击能力强. 基于多特征和混沌加密零水印算法综合了数字图像的多方面性质作为特征, 稳定性高, 提高了算法鲁棒性; 同时采用新提出的基于混沌映射的块置乱方法提高了水印图像安全性, 有效地解决了图像水印鲁棒性差和安全性低的问题.

关键词: 零水印; 多特征; 混沌加密; 版权保护; 鲁棒性; 特征融合

引用格式: 周绶泉, 咸雯雯, 石慧. 基于多特征和混沌加密的零水印算法. 计算机系统应用, 2022, 31(12): 147-158. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8853.html>

Zero Watermarking Algorithm Based on Multiple Features and Chaotic Encryption

ZHOU Shou-Quan, XIAN Wen-Wen, SHI Hui

(School of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Given the poor robustness and low security of traditional watermark-based copyright protection of digital images, a zero watermarking algorithm based on multiple features and chaotic encryption is proposed to improve the differentiability of the zero watermarks of different images. Specifically, global and local perspectives are utilized to extract the five-dimensional features of the image, including its mean feature, variance feature, skewness feature, kurtosis feature, and histogram of oriented gradients (HOG) feature. Then, the watermarked image is encrypted by the proposed block scrambling method based on chaotic mapping. Finally, zero watermarking information is constructed with the multiple features extracted and the scrambled watermarks. The copyright authentication process starts by extracting the multiple features. Then, the encrypted watermarks are obtained according to the zero watermarking information and decrypted, thereby achieving copyright authentication. The experimental results show that the proposed method has high efficiency, high security, and strong anti-attack capability. Integrating various properties of the digital image as the features, the proposed zero watermarking algorithm based on multiple features and chaotic encryption is stable and more robust. In addition, the proposed block scrambling method based on chaotic mapping improves the security of the watermarked images. The proposed algorithm and method effectively solve the problems of the poor robustness and low security of image watermarks.

Key words: zero watermarking; multiple features; chaotic encryption; copyright protection; robustness; feature fusion

^① 基金项目: 辽宁省社会科学规划基金 (L19BTQ001)

收稿时间: 2022-04-03; 修改时间: 2022-05-09; 采用时间: 2022-05-28; csa 在线出版时间: 2022-07-28

随着互联网技术的发展,数字图像作品可轻易获取且传播便捷。然而,互联网在给人们带来便利的同时,也带来了盗版、泄露等安全问题。数字水印技术凭借其版权保护和内容认证功能得到了广泛关注。从是否修改载体图像角度,数字图像水印大致分为两类:一类是传统的通过修改载体图像部分内容实现数字图像水印技术,该类水印算法在鲁棒性与透明性上存在着不可避免的矛盾。另一类是在不修改载体图像的情况下构造水印,即利用图像的重要特征来构造水印信息。

早在2003年,零水印的概念被提出^[1],其主要思想是利用图像的特征构造可以唯一识别的水印,在水印的嵌入过程中不改变原始图像的任何信息,同时具有更好的透明性。因此使用零水印算法可以较好地解决水印的鲁棒性和透明性之间的矛盾,这已成为水印技术的一个研究热点。

1 相关工作

零水印算法的关键在于特征提取,目前零水印图像特征提取方法大致分为以下3类。第1类是基于使用极谱变换计算图像的不变矩特征,如极谱运算(polar harmonic transform, PHT)^[2]、四元数极谱傅里叶矩(quaternion polar harmonic Fourier moment, QPHFM)^[3]、四元数径向分数Charlier矩(quaternion radial fractional Charlier moment, QRFrCM)^[4]、小数阶极谱变换(decimal-order polar harmonic transform, DoPHT)^[5]等,该类方法直接由空域中提取到的图像特征,由图像的整体均值与子块的均值的稳定关系来构造图像特征。第2类是基于变换域特征,如傅里叶变换(Fourier transform, FT)^[6]、Gabor变换、平移不变剪切变换(SIFT)^[7]、元胞自动机变换(cellular automata transform, CAT)^[8]、尺度不变特征变换(shift invariant shearlet transform, SIST)^[9]、非亚采样轮廓波变换、轮廓波变换(contourlet transform, CT)^[10]、双树复小波变换等(dual-tree complex wavelet transform, DTCWT)^[11]等。第3类是在对图像进行一定的处理之后得到一部分稳定的系数,即可将之直接构造为图像和的具体特征,如将这些系数进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD)、离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)等处理方法之后提取出其稳定的能量做为图像的特征。

He等人^[12]利用DWT的高频和低频特点提出了

抗压缩水印算法,该算法具有较好的鲁棒性。Wei等人^[13]提出了基于DCT和DFT的水印算法,该算法具有较好的嵌入能力。Sun等人^[14]提出了一种基于NSST和DCT的鲁棒零水印算法,该算法将二值水印与彩色图像特征矩阵进行异或操作来构造零水印,该算法鲁棒性较强。Amiri等人^[15]提出了一种基于NSCT-SVD的智能零水印算法,该算法利用PSO-GA-AI来提取特征构造零水印,该算法具有较高图像质量。Wu等人^[16]提出了一种基于区块链和NSCT-SVD的视频零水印算法,该算法具有较好的鲁棒性。

上述零水印算法所提取特征具有一定的稳定性,但是在特殊的情况下,如所保护图像的数目比较多或者图像的相似度比较高时,可能会出现图像的虚警问题,即受攻击图像的零水印与虚警图像的零水印的区分性比较低,存在将未受保护的图像误认为已受保护的图像的概率。

为提升不同图像零水印的可区分性,本文提出了一种区分性较高的特征提取策略,具体流程如下:首先对彩色数字图像灰度化,然后按照整体特征提取思想,将灰度图像不重叠分块,分别提取图像的1维均值特征、2维峰值特征、3维方差特征、4维偏态特征,按照局部特征提取的思想,将灰度图像重叠分块,提取5维HOG特征,结合基于混沌映射的块置乱加密算法,最终构造零水印信息,即可进行版权认证,如图1所示。试验结果表明,该算法在抵抗常规攻击和滤波攻击中取得了很好的效果。

2 多特征提取

为更全面得到图像的特征向量,从不同角度对图像进行特征向量提取。从整体的角度提取图像的均值特征、方差特征、偏态特征、峰度特征,从局部角度HOG特征,从而合成5维特征,以此构造零水印信息。

2.1 图像不重叠分块

假设载体图像 I 尺寸为 $m \times n$,水印图像 W 尺寸为 $p \times p$ 。对图像 I 进行互不重叠的 8×8 分块, C_k 表示各个分块,如图2所示。

2.2 1维特征——均值

每个分块的均值 \bar{x}_k 定义式为:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} C_k(i) \quad (1)$$

其中, $N_k = \lfloor (m/8) \times (n/8) \rfloor$, $C_k(i)$ 为分块中的像素点的

值. 若存在图像边像素点不能被8整除的情况, 因为采集的是整体信息, 对于分块中未取到的像素点可以采用向下取整的方式忽略掉.

统计数据均值的残差 $D_{\bar{x}}(k)$ 为:

$$D_{\bar{x}}(k) = \bar{x}_{k-1} - \bar{x}_k \quad (2)$$

整个图像 G 的均值 \bar{X} 为:

$$\bar{X} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m \times n} I(i) \quad (3)$$

其中, $I(i)$ 为分块中的像素点的值.

每个分块的均值特征向量 $B_{\bar{x}}$ 为:

$$B_{\bar{x}}(k) = \begin{cases} 1, & D_{\bar{x}}(k) > \bar{X} \\ 0, & D_{\bar{x}}(k) \leq \bar{X} \end{cases} \quad (4)$$

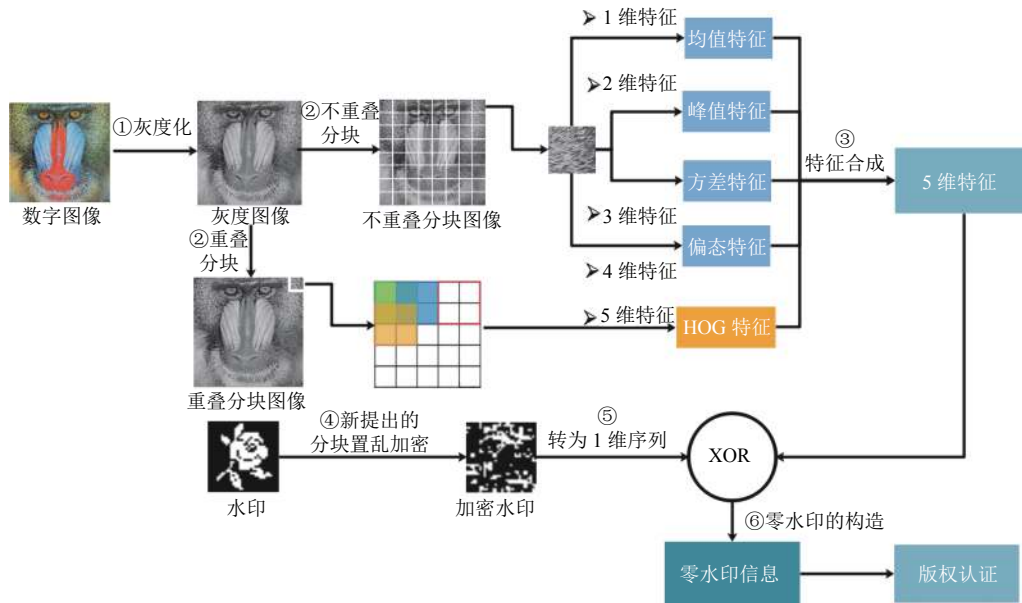


图1 基于多特征和块置乱的零水印算法流程图

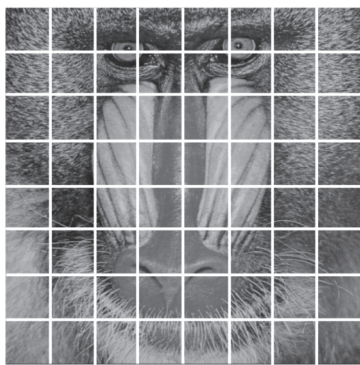


图2 不重叠分块

2.3 2 维特征——方差

每个分块的方差 δ_k 定义式为:

$$\delta_k = \frac{1}{N_k - 1} \sum_{i=1}^{N_k} (C_k(i) - \bar{X})^2 \quad (5)$$

统计数据方差的残差 D_{δ} 为:

$$D_{\delta}(k) = \delta_{k-1} - \delta_k \quad (6)$$

整个图像 G 的方差 δ 为:

$$\delta = \frac{1}{m \times n - 1} \sum_{i=1}^{m \times n} (I(i) - \bar{X})^2 \quad (7)$$

每个分块的方差特征向量 B_{δ} 为:

$$B_{\delta}(k) = \begin{cases} 1, & D_{\delta}(k) > \delta \\ 0, & D_{\delta}(k) \leq \delta \end{cases} \quad (8)$$

2.4 3 维特征——偏态

每个分块的偏态 s_k 定义式为:

$$s_k = \frac{\frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (C_k(i) - \bar{X})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (C_k(i) - \bar{X})^2} \right)^3} \quad (9)$$

统计数据偏态的残差 D_s 为:

$$D_s(k) = s_{k-1} - s_k \quad (10)$$

整个图像 G 的偏态 s 为:

$$s = \frac{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m \times n} (I(i) - \bar{X})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m \times n} (I(i) - \bar{X})^2} \right)^3} \quad (11)$$

每个分块的偏态特征向量 B_s 为:

$$B_s(k) = \begin{cases} 1, & D_s(k) > s \\ 0, & D_s(k) \leq s \end{cases} \quad (12)$$

2.5 4 维特征——偏态

每个分块的峰度 ω_k 定义式为:

$$\omega_k = \frac{\frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (C_k(i) - \bar{X})^4}{\left(\frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (C_k(i) - \bar{X})^2 \right)^2} \quad (13)$$

统计数据峰度的残差 D_ω 为:

$$D_\omega(k) = \omega_{k-1} - \omega_k \quad (14)$$

整个图像 G 的峰度 ω 为:

$$\omega = \frac{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m \times n} (I(i) - \bar{X})^4}{\left(\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m \times n} (I(i) - \bar{X})^2 \right)^2} \quad (15)$$

每个分块的峰值特征向量 B_ω 为:

$$B_\omega(k) = \begin{cases} 1, & D_\omega(k) > \omega \\ 0, & D_\omega(k) \leq \omega \end{cases} \quad (16)$$

2.6 5 维特征——HOG 特征

HOG 特征提取算法通过统计图像局部区域的梯度方向直方图得到图像特征, 该算法步骤可归纳为: 首先计算图像中每个像素点的梯度值; 其次将图像划分成大小为 $a \times a$ 的cell单元格, 根据不同的cell单元格生成梯度直方图, n 个cell单元格组成一个大的重叠的block块, 将组成的block块的梯度直方图进行归一化处理, 最后收集HOG特征. 该算法是一种目标局部特征提取算法, 在图像的局部cell单元格进行操作, HOG对图像几何的形变和光学的形变能保持较好的不变性.

采用Gamma矫正法对图像进行颜色空间归一化得到图像 G , $G(i, j)$ 为图像 G 各像素点的灰度值. Gamma压缩公式为:

$$G(i, j) = I(i, j)^{\text{Gamma}} \quad (17)$$

其中, $\text{Gamma} = 0.5, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$

根据水平方向和垂直方向的掩膜, 可得水平梯度的分量 grad_x 和垂直梯度分量的 grad_y 为:

$$\text{grad}_x = \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\text{grad}_y = \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, $*$ 表示卷积运算符.

图像像素点水平方向的梯度值 $\mu_x(i, j)$ 和垂直方向的梯度值 $\mu_y(i, j)$ 为:

$$\mu_x(i, j) = \text{grad}_x(i+1, j) - \text{grad}_x(i-1, j) \quad (20)$$

$$\mu_y(i, j) = \text{grad}_y(i, j+1) - \text{grad}_y(i, j-1) \quad (21)$$

其中, $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$.

根据式 (21)、式 (22) 可得像素点的梯度值 μ 和梯度方向 θ 为:

$$\mu(i, j) = \sqrt{\mu_x(i, j)^2 + \mu_y(i, j)^2} \quad (22)$$

$$\theta(i, j) = \tan^{-1} \left(\frac{\mu_x(i, j)}{\mu_y(i, j)} \right) \quad (23)$$

其中, $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$.

将图像分成若干个大小为 $a \times a$ 的cell单元格, 采用 m 个bin的直方图统计cell单元格的梯度信息, 即cell单元格的梯度方向 360° 分成 m 个方向范围块, 每个像素点的梯度大小作为投影的权值, 根据范围块计算bin的数值, 生成该cell单元格的梯度方向直方图, 每一个直方图对应 m 维的特征向量. 如 $a = 6, m = 9$, 则 6×6 的cell单元格的梯度方向 360° 分成9个方向范围块, 方向范围块分别是 $[0^\circ, 20^\circ], (20^\circ, 40^\circ], (40^\circ, 60^\circ], (60^\circ, 80^\circ], (140^\circ, 160^\circ], (160^\circ, 180^\circ]$, 如图3所示. 当像素点(1,1)的梯度值和梯度方向为 $\mu(1, 1) = 2, \theta(1, 1) = 25^\circ$ 时, 像素点(1,1)的方向梯度属于 $(20^\circ, 40^\circ]$, 因此第2个bin的数值加 $\mu(1, 1)$. 根据上述计算, 该 6×6 的cell单元格生成一个9维的特征向量直方图.

为了压缩光照、阴影和边缘的像素点, 缩小梯度范围的变化, 将每4个cell单元格组合成一个大小为 $2a \times 2a$ 的block块. 这些block块互有重叠, 每个cell单元格的特征会以不同的结果多次出现在最后的特征向量中. 如图4所示.

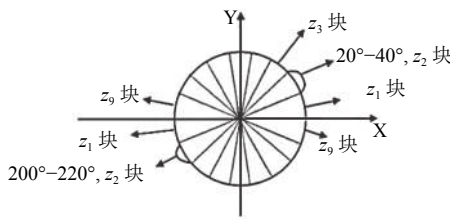


图3 cell 单元格梯度分布图

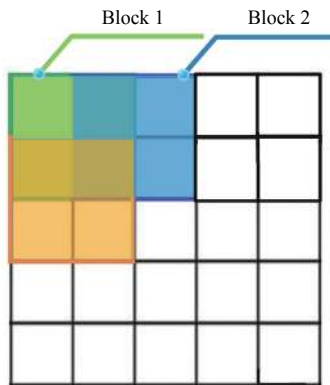


图4 Block 分块示意图

对每个block块的4m维的特征向量进行归一化处理. 将每一个归一化的结果特征向量组合为一个整体, 即HOG特征. 最后对HOG特征向量进行可视化得到2维特征向量. 如图5所示.



图5 HOG特征的2维特征向量

对运用HOG特征提取算法得到的2维特征向量 B_{HOG} 进行 8×8 的池化, 生成具有代表意义的特征向量 $B_{HOG}'(i, j)$:

$$B_{HOG}'(i, j) = \max\{B_{HOG}(8i-7, 8j-7), \dots, B_{HOG}(8i+56, 8j+56)\} \quad (24)$$

其中, $1 \leq i \leq \lfloor m/8 \rfloor, 1 \leq j \leq \lfloor n/8 \rfloor$.

得到局部特征向量 B_{HOGx} (图4所示), 将得到的局部特征向量 B_{HOGx} 如转换为二进制数组 B_{HOGz} 为:

$$B_{HOGz} = \begin{cases} 1, & B_{HOGx} > 128 \\ 0, & B_{HOGx} \leq 128 \end{cases} \quad (25)$$

2.7 5维特征合成

将得到的所有特征向量按照由整体到局部的顺序进行组合, 生成图像总体特征向量 B 为:

$$B(o) = \begin{cases} B_{\bar{x}}(k), & 1 \leq o \leq n/8 \\ B_{\delta}(k), & n/8 < o \leq n/4 \\ B_s(k), & n/4 < o \leq 3n/8 \\ B_{\omega}(k), & 3n/8 < o \leq n/2 \\ B_{HOGx}, & o > n/2 \end{cases} \quad (26)$$

3 水印加密

本文提出了一种基于混沌映射的块置乱方法. 首先, 将水印图像分成不重叠子块, 再基于混沌映射生成密钥序列, 最后依据密钥完成图像块位置置乱.

3.1 生成混沌伪随机数

混沌系统^[11]是指在一种复杂的非线性的动力系统, 即在确定性的系统中, 存在着随机的不规则运动. 其中 Logistic 映射应用最为广泛, 定义式为:

$$x_{k+1} = \mu x_k(1 - x_k) \quad (27)$$

其中, $0 \leq \mu \leq 4$ 称为分枝参数, 当 $x_k \in (0, 1)$ 且 $3.56994 \leq \mu \leq 4$ 时, Logistic 映射为混沌状态, 可生成一段有限长度的混沌序列.

依据式(29)生成块置乱密钥:

$$R_k = \begin{cases} 1, & x_k > 0.5 \\ 0, & x_k \leq 0.5 \end{cases} \quad (28)$$

3.2 基于混沌映射的块置乱算法

Step 1. 水印图像分块.

将 $m \times n$ 的水印图像分为不重叠的16个大块, 每个大块尺寸大小为 $m/4 \times n/4$. 再将每一大块进一步分成不重叠的16个小块, 小块尺寸为 $m/16 \times n/16$.

Step 2. 对每个大块内16个小块实施位置置乱.

首先将大块内每一个小块进行顺序编号1, 2, 3, ..., 16, 再依据生成的密钥 R_k 进行位置置乱. 若密钥序列第1个位置为0 ($R_1=0$), 则将第1个图像块放在位置序列的最右侧; 若为1 ($R_1=1$), 则将第1个图像块放在位置序列的最左侧.

以此类推, 按从左至右, 从上到下的顺序, 将每个大块中的16个小块按照上述的方法, 依据密钥 R_k , 进行位置置乱.

图6以一组密钥为例, 给出了具体置乱过程. 图7

是以 Baboon 图像为例, 给出了分块置乱的结果.

Step 3. 大块位置置乱.

对每大块按照密钥 R_k , 进行位置置乱, 得到置乱后的图像 M . 图 8 是整体置乱的结果.

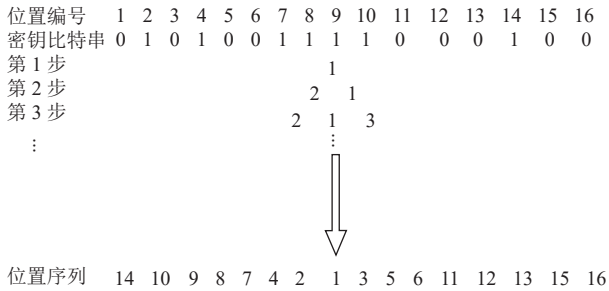


图 6 图像位置置乱



图 7 分块置乱结果



图 8 整体置乱结果

4 零水印构造与检测

4.1 零水印信息的构造

Step 1. 将第 3 节中得到的加密后 2 维水印信息转换为 1 维二进制序列 S .

Step 2. 将第 2 节得到图像整体特征向量 B 与 S 按位异或构造零水印信息 Z :

$$Z = B \oplus S \quad (29)$$

4.2 零水印信息的检测

在版权认证过程中, 首先提取多特征, 再结合零水印信息, 得到加密后水印; 最后对其进行解密; 即可实现版权认证. 版权认证的过程是零水印构造的逆过程, 如图 9 所示, 具体如下.

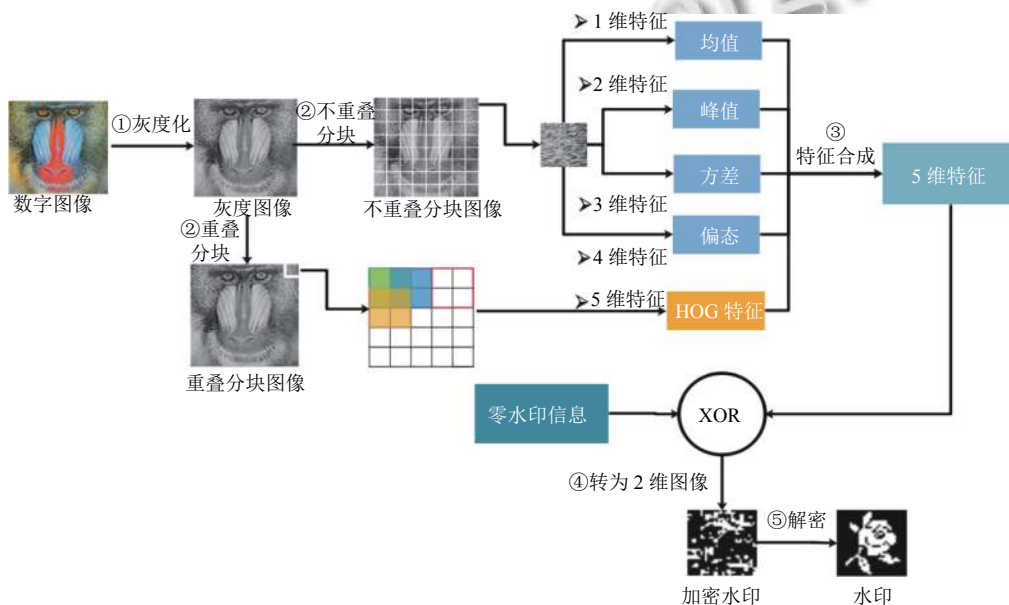


图 9 基于多特征和块置乱的零水印算法水印检测流程图

Step 1. 将待版权认证的数字图像灰度化。

Step 2. 按照第 2.1 节中的步骤对图像进行重叠分块与不重叠分块, 并根据第 2.2–2.6 节中的步骤提取图像的多维特征向量。

Step 3. 将得到的多维特征按照由整体到局部的顺序进行组合, 得到图像的特征向量 B 。

Step 4. 运用特征向量 B 与零水印信息 Z 进行异或得到的加密后水印图像为 1 维二进制序列 S :

$$S = B \oplus Z \quad (30)$$

Step 5. 将 1 维二进制序列 S 转换为二值图像。

Step 6. 若拥有密钥 key' , 则可根据第 3 节中的步骤得到位置置乱数组, 将水印图像分成不重叠的 16 个分块, 根据置乱数组对 Step 5 中的水印图像进行逆排序便可以无损解密水印图像得到原始水印 W 。

5 实验分析

5.1 实验评测指标

本算法基于 SIPI 基准数据集^[7], 在 Windows 10 和 Python 3.7 平台进行仿真实验, 将实验结果与现有算法进行性能比较和分析, 进一步证明本文算法鲁棒性好, 安全性高、抗攻击能力强, 在版权保护方面具有明显优势。

SIPI 数据集中主要使用纹理、天线、杂项、序列 4 卷, 共 306 张图像。每个卷中的图像具有不同大小, 例如 256×256 、 512×512 或 1024×1024 。

本文以原始载体图像大小为 256×256 的标准灰度图像进行说明, 如图 10 所示 (因篇幅受限, 在此只展示 6 幅图像)。为了衡量水印算法的性能, 利用提取出的水印图像与原始水印图像之间归一化相关系数 NC 值作为评测的指标。

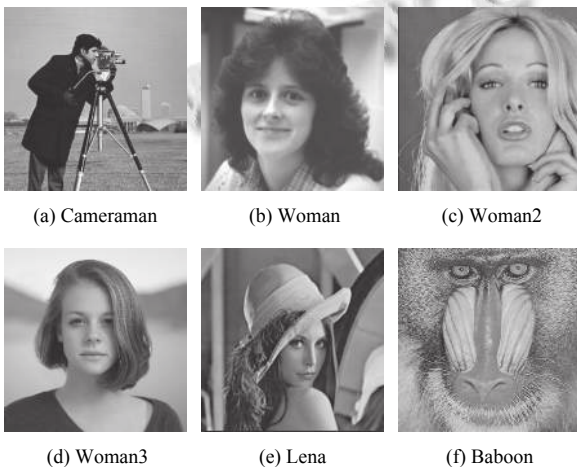


图 10 实验载体图像

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q [W(i, j) \times W'(i, j)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q [W(i, j)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q [W'(i, j)]^2}} \quad (31)$$

5.2 整体特征与局部特征对比

在零水印构建过程中, 特征提取是关键, 本文利用分块图像与整体图像的均值、方差、偏态、峰度的关系来构造前 4 维特征, 而第 5 维 HOG 特征则直接使用了图像的整体特征。图 11–图 14 分别给出了 Lena 图像的均值、方差、偏态、峰度的部分特征与整体特征图, 其中横坐标为部分特征的编号, 纵坐标为特征值的大小, 黄线代表图像整体特征的平均值。由此可知, 图像的整体特征与分块特征具有较好的区分度, 有助于抵抗均衡化攻击。

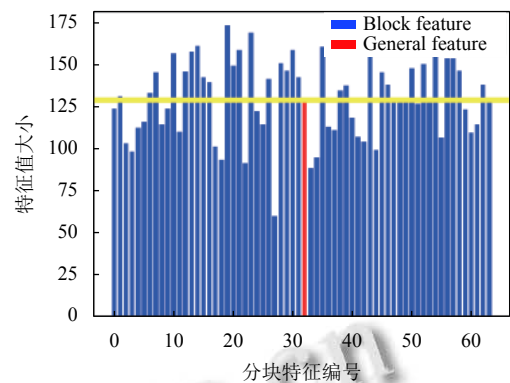


图 11 块特征与整体特征图——均值

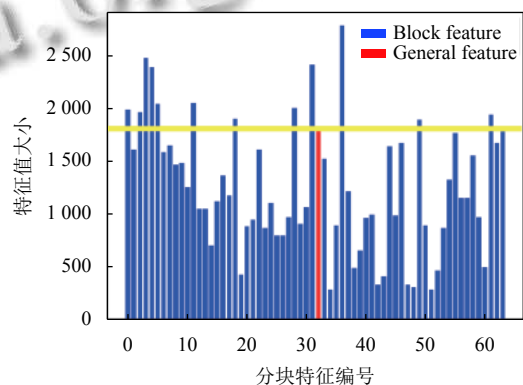


图 12 块特征与整体特征图——方差

5.3 特征稳定性分析

图像受到攻击后提取的特征可否保持稳定是判断零水印算法优劣的关键, 为了直观地展示图像在受到攻击前后所提取的特征, 以 JPEG 攻击为例, 图 15–

图 18 分别给出了 Lena 图像在攻击前和采用不同压缩因子攻击后的特征散点图, 其中横坐标代表了特征点的编号, 纵坐标代表着特征值的大小. 由此可见, 攻击前后特征点基本不变, 因此, 本文所提出的特征提取算法具有较好的稳定性.

始图像的内容高度相关. 从不同的原始图像生成的零水印信号应该是有差异的. 表 1 给出了 6 张不同的原始图像生成的零水印信号之间的相关系数 NC 值, 由表 1 可知, 6 张不同的原始图像生成的零水印信号差异较大, 其 NC 最大值和最小值分别为 0.678 8 和 0.090 7. 因此, 不同图像之间的零水印信息之间的可区分性是比较高的.

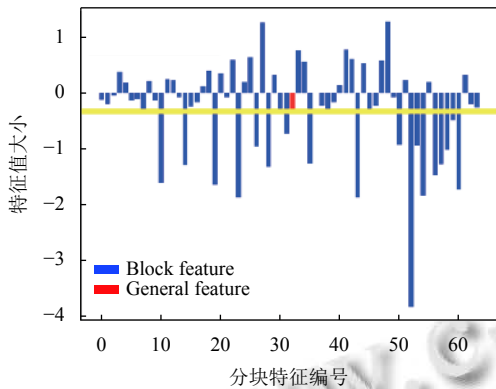


图 13 块特征与整体特征图——偏态

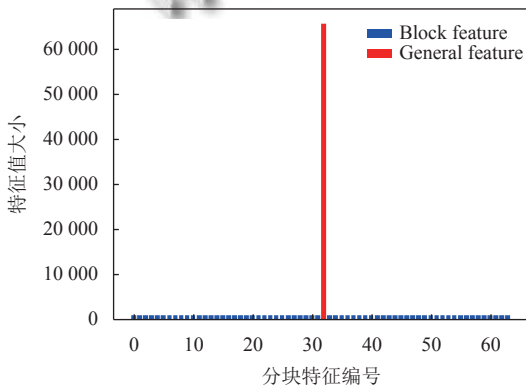


图 14 块特征与整体特征图——峰度

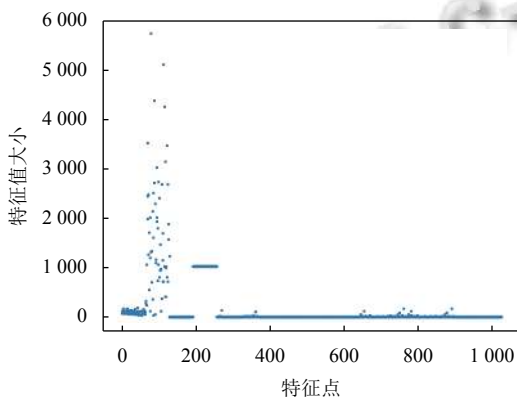


图 15 Lena 图像特征散点图

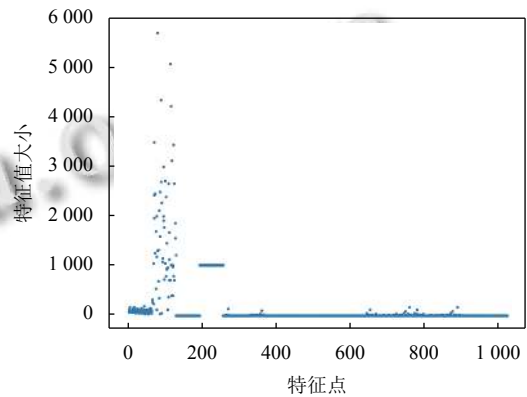


图 16 JPEG (压缩因子 80) 特征散点图

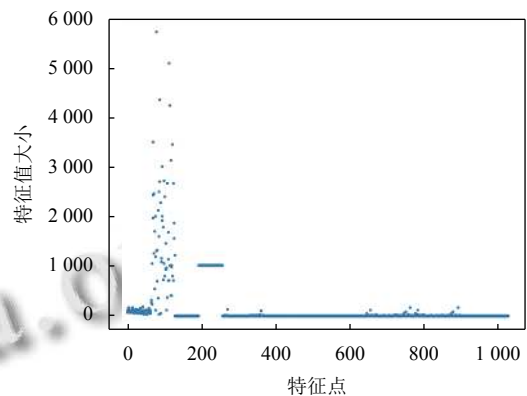


图 17 JPEG (压缩因子 70) 特征散点图

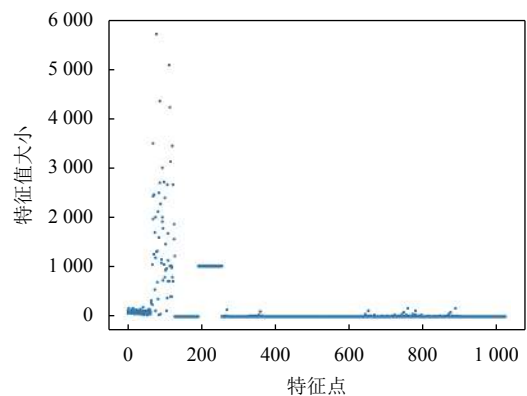


图 18 JPEG (压缩因子 60) 特征散点图

5.4 均衡性分析

零水印的生成依赖于原始图像的内容特征, 与原

表1 不同图像构造水印的 NC 对比

图像	Baboon	Cameraman	Lena	Woman	Woman2	Woman3
Baboon	1.0000	0.1278	0.1104	0.1010	0.0907	0.1322
Cameraman	0.1278	1.0000	0.6788	0.5175	0.6490	0.5605
Lena	0.1104	0.6788	1.0000	0.4779	0.5627	0.6314
Woman	0.1010	0.5175	0.4779	1.0000	0.6068	0.5446
Woman2	0.0907	0.6490	0.5627	0.6068	1.0000	0.6286
Woman3	0.1322	0.5605	0.6068	0.5446	0.6286	1.0000

5.5 鲁棒性分析

为了保证实验的普遍性, 实验的攻击内容包括滤波攻击、加性噪声攻击、JPEG 压缩攻击等。图 19–图 25 分别给出了不同攻击性不同图像提取水印与原始水印之间的 NC 值, 其中横轴代表了图像编号, 纵轴代表 NC 值的大小。

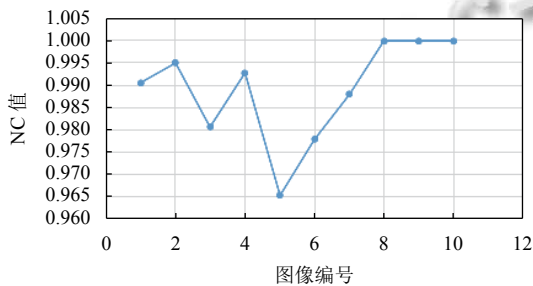


图 19 不同图像维纳滤波 (9×9) 攻击下 NC 值分布

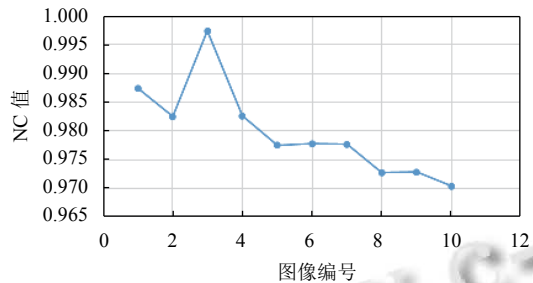


图 20 不同图像 (9×9) 中值滤波攻击下 NC 值分布

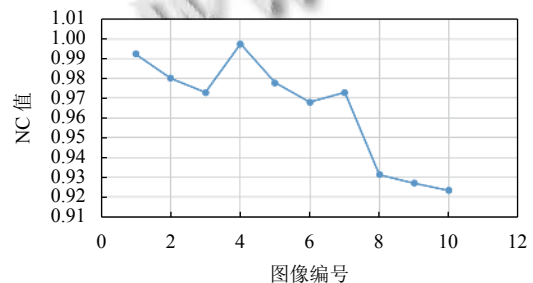


图 21 不同图像均值滤波 (5×5) 攻击下 NC 值分布

表 2 给出了本算法与其他相关算法在不同攻击下提取水印图像与原始水印图像 NC 值的比较结果, 由

表 2 可知, 本算法在维纳滤波、中值滤波、高斯噪声和旋转攻击下的平均 NC 值分别高达 0.997 4、0.984 2、0.987 5 和 0.997 4, 远高于其他文献; 高斯滤波攻击下, 本算法的平均 NC 值为 0.984 7, 远高于文献 [13,18–20], 但略低于文献 [21]; JPEG 压缩攻击下, 本算法的平均 NC 值分别为 0.963 0, 略低于文献 [13,19,20], 但远高于文献 [18,21]; 椒盐噪声攻击下, 本算法的平均 NC 值为 0.970 4, 略低于文献 [20] 的 0.978 4, 但远高于文献 [13,18,19,21]. 综上, 本算法在不同的攻击之下其 NC 与相关文献相比, 表明本算法在抗攻击性上有优势之处。

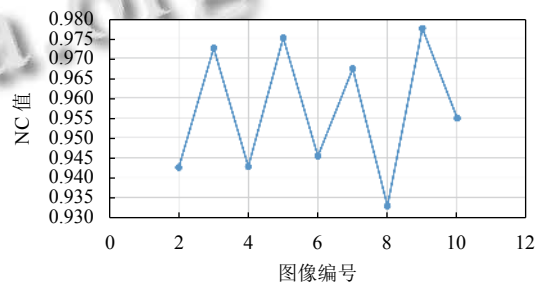


图 22 不同图像 JPEG (因子 10) 攻击下 NC 值分布

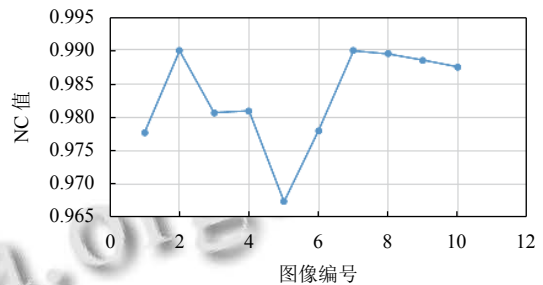


图 23 不同图像高斯噪声 (0.1) 攻击下 NC 值分布

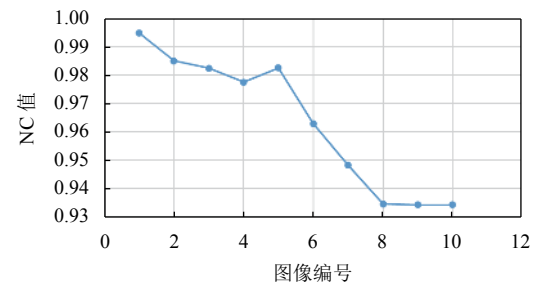


图 24 不同图像椒盐噪声 (0.1) 攻击下 NC 值分布

为了更加全面的衡量零水印的鲁棒性, 引入误码率 (bit error ratio, BER) 对鲁棒性进一步测试比较。BER 是指从水印中提取的错误比特数与原始水印中总

比特数的比值, 介于 0 和 1 之间. BER 越接近 0, 水印的鲁棒性越好, 其定义如下:

$$BER = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Wr(i, j) \oplus W(i, j)}{m \times n} \quad (32)$$

其中, $Wr(i, j)$ 和 $W(i, j)$ 分别表示攻击后提取水印和原始水印的像素, \oplus 表示异或操作, $m \times n$ 是水印的大小.

表 3 给出了本算法与其他算法在不同攻击下提取水印与原图像水印的平均误码率之间的比较. 由表 3 可知, 高斯噪声攻击下, 本文的误码率仅为 0.025 1, 远低于其他文献^[7,8,21-23], 表明本文抗高斯噪声攻击能力强; 在高斯滤波攻击下, 本文的 BER 为 0.0082, 仅略高于文献 [21], 远低于文献 [7,8,22,23]; 在进行缩放攻击和旋转攻击下, 本文提取水印与原水印之间的误码率分别为 0.0203 和 0.0574, 远低于文献 [7,21-23], 仅略高于文献 [8]; 在进行 JPEG 压缩攻击时, 本文提取水印与原水印之间的误码率为 0.0264, 远低于文献 [7,8,22,23], 仅略高于文献 [21]; 在进行中值滤波 (采样窗口为 3×3)

攻击时, 本文提取水印与原水印之间的误码率为 0.0174, 远低于文献 [7,21,23], 略高于文献 [8,22]; 在进行中值滤波 (采样窗口为 9×9) 攻击时, 本文提取水印与原水印之间的误码率为 0.0223, 远低于文献 [7,8,22,23], 仅略高于文献 [21]; 在进行均值滤波攻击时, 本文提取水印与原水印之间的误码率为 0.0302, 远低于文献 [7,8,21], 只略高于文献 [22,23]. 综上, 与相关文献中的相比, 本算法在不同的攻击之下其误码率较低, 表明本算法在鲁棒性上有优势之处.

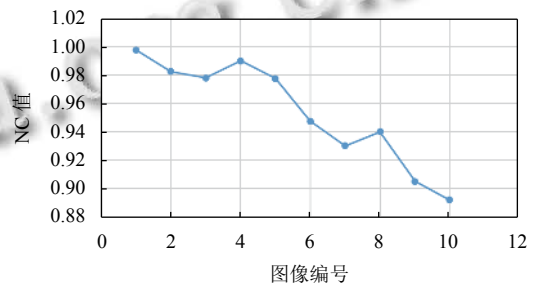


图 25 不同图像缩放 (0.5) 攻击下 NC 值分布

表 2 本算法与其他零水印算法 NC 值比较

攻击	参数	提取水印	本文	文献[13]	文献[18]	文献[19]	文献[20]	文献[21]
维纳滤波	9×9		0.9974	0.9901	0.8265	0.9781	0.9898	0.9496
中值滤波	9×9		0.9842	0.8571	0.8062	0.9652	0.9839	0.9496
高斯滤波	3×3		0.9874	0.9821	0.8423	0.9075	0.9374	0.9963
JPEG压缩	10		0.9630	0.9908	0.8300	0.9876	0.9820	0.9562
高斯噪声	0.1		0.9875	0.8529	0.7072	0.9432	0.9667	0.9241
椒盐噪声	0.1		0.9704	0.9392	0.7613	0.9691	0.9784	0.9556
旋转攻击	5°		0.9974	0.9958	0.9457	0.9967	0.9630	0.9458

5.6 时间复杂度分析

随着大数据技术的飞速发展,水印算法的处理能力越来越重要.算法的时间复杂度是零水印算法在实际应用中的一项重要指标.本文分析了水印嵌入(零水印生成)和提取(零水印检测)所需的处理时间.本实验

在8核16线程的3.40 GHz的CPU上进行,32 GB内存.表4给出了本算法与其他零水印算法的时间复杂度.由表4可知,本文中所提出的零水印算法比文献[20]略慢,但明显快于文献[4,19,21,22,24-26],这表明了本算法在执行时间方面更有优势.

表3 本算法与其他零水印算法平均误码率的比较

攻击	参数	本文	文献[7]	文献[8]	文献[21]	文献[22]	文献[23]
高斯滤波	3×3	0.0082	0.2734	0.0114	0.0020	0.0125	0.0176
缩放攻击	0.5	0.0203	0.0415	0.0084	0.0270	0.0301	0.0535
JPEG压缩	30	0.0264	0.3633	0.2232	0.0039	0.0497	0.0742
高斯噪声	0.01	0.0251	0.3672	0.0260	0.0264	0.0906	0.0345
旋转攻击	5°	0.0574	0.3164	0.0080	0.0703	0.1198	0.5016
中值滤波	3×3	0.0174	0.2813	0.0071	0.0273	0.0147	0.0332
中值滤波	9×9	0.0223	0.2601	0.0755	0.1601	0.0271	0.0044
均值滤波	5×5	0.0302	0.0718	0.0309	0.0164	0.0215	0.1000

表4 本算法与其他零水印算法时间复杂度对比

时间	文献[4]	文献[19]	文献[20]	文献[21]	文献[22]	文献[24]	文献[25]	文献[26]	本算法
零水印构造时间	42.186	19.070	0.6326	41.251	0.6931	39.472	16.172	10.427	0.6218
零水印检测时间	42.761	19.080	0.4377	41.793	0.6292	40.047	16.683	11.183	0.6351
总时间	84.947	38.150	1.07033	83.044	1.3223	79.519	32.855	21.610	1.2569

6 结论与展望

本文提出了一种基于多特征和块置乱的零水印算法.为提升不同图像零水印的可区分性,本文以图像的均值特征、方差特征、偏态特征、峰度特征、HOG特征作为最终的5维特征,该特征稳定性较高,能够有效抵抗均衡化攻击.同时,本文提出了一种基于新的混沌映射的块置乱算法以提高算法安全性.此外,本算法鲁棒性强,能够有效抵抗维纳滤波、中值滤波、均值滤波、JPEG压缩、高斯噪声、椒盐噪声和缩放攻击.而且,本算法时间复杂度低,在执行时间方面更有优势.在下一步工作中,将进一步结合深度学习技术,研究鲁棒性更强、安全性更高的零水印模型水印.

参考文献

- 温泉,孙铁锋,王树勋.零水印的概念与应用.电子学报,2003,31(2):214-216.[doi:10.3321/j.issn:0372-2112.2003.02.015]
- Wang BW, Wang WS, Zhao P. Multiple color medical images zero-watermark scheme based on quaternion generalized Fourier descriptor and QR code. Proceedings of ACM Turing Award Celebration Conference-China (ACM TURC 2021). Hefei: ACM, 2021. 248-253. [doi:10.1145/3472634.3474079]
- Xia ZQ, Wang XY, Zhou WJ, et al. Color medical image lossless watermarking using chaotic system and accurate quaternion polar harmonic transforms. Signal Processing, 2019, 157: 108-118. [doi:10.1016/j.sigpro.2018.11.011]
- Xia ZQ, Wang XY, Han B, et al. Color image triple zero-watermarking using decimal-order polar harmonic transforms and chaotic system. Signal Processing, 2021, 180: 107864. [doi:10.1016/j.sigpro.2020.107864]
- Xia ZQ, Wang XY, Wang CP, et al. Local quaternion polar harmonic Fourier moments-based multiple zero-watermarking scheme for color medical images. Knowledge-based Systems, 2021, 216: 106568. [doi:10.1016/j.knosys.2020.106568]
- Yamni M, Karmouni H, Sayyouri M, et al. Robust zero-watermarking scheme based on novel quaternion radial fractional Charlier moments. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(14): 21679-21708. [doi:10.1007/s11042-021-10717-2]
- Liu JL, Li JB, Chen YW, et al. A robust zero-watermarking based on SIFT-DCT for medical images in the encrypted domain. Computers, Materials & Continua, 2019, 61(1): 363-378. [doi:10.32604/cmc.2019.06037]
- Xia ZQ, Wang XY, Li XX, et al. Efficient copyright

- protection for three CT images based on quaternion polar harmonic Fourier moments. *Signal Processing*, 2019, 164: 368–379. [doi: [10.1016/j.sigpro.2019.06.025](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.06.025)]
- 9 Devi BP, Singh KM, Roy S. New copyright protection scheme for digital images based on visual cryptography. *IETE Journal of Research*, 2017, 63(6): 870–880. [doi: [10.1080/03772063.2017.1324328](https://doi.org/10.1080/03772063.2017.1324328)]
- 10 Sharkas M, ElShafie D, Hamdy N. A dual digital-image watermarking technique. *Proceedings of the 3rd World Enformatika Conference. Istanbul: WEC, 2005. 136–139.*
- 11 宋伟, 侯建军, 李赵红, 等. 一种基于 Logistic 混沌系统和奇异值分解的零水印算法. *物理学报*, 2009, 58(7): 4449–4456. [doi: [10.3321/j.issn:1000-3290.2009.07.013](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3290.2009.07.013)]
- 12 He ZW, Lu W, Sun W, *et al.* Digital image splicing detection based on Markov features in DCT and DWT domain. *Pattern Recognition*, 2012, 45(12): 4292–4299. [doi: [10.1016/j.patcog.2012.05.014](https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.05.014)]
- 13 Wei DY, Li YM. Novel tridiagonal commuting matrices for types I, IV, V, VIII DCT and DST matrices. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 4(21): 483–487. [doi: [10.1007/s00371-022-02406-4](https://doi.org/10.1007/s00371-022-02406-4)]
- 14 Sun YC, Li D. Robust cartoon zero-watermark algorithm based on NSST. *Proceedings of Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing. Kuala Lumpur: Springer, 2017. 53–59.* [doi: [10.1007/978-981-10-7605-3_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7605-3_9)]
- 15 Amiri A, Mirzakuchaki S. A digital watermarking method based on NSCT transform and hybrid evolutionary algorithms with neural networks. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(10): 1669. [doi: [10.1007/s42452-020-03452-0](https://doi.org/10.1007/s42452-020-03452-0)]
- 16 Wu XQ, Ma P, Jin ZH, *et al.* A novel zero-watermarking scheme based on NSCT-SVD and Blockchain for video copyright. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2022, 2022: 20. [doi: [10.1186/s13638-022-02090-x](https://doi.org/10.1186/s13638-022-02090-x)]
- 17 USC Viterbi. The USC-SIPI image database. <http://sipi.usc.edu/database/>. (2018-02-01)[2022-02-01].
- 18 Zhou WJ, Jiang GY, Yu M, *et al.* Reduced-reference stereoscopic image quality assessment based on view and disparity zero-watermarks. *Signal Processing: Image Communication*, 2014, 29(1): 167–176. [doi: [10.1016/j.image.2013.10.005](https://doi.org/10.1016/j.image.2013.10.005)]
- 19 Wang CP, Wang XY, Xia ZQ, *et al.* Ternary radial harmonic Fourier moments based robust stereo image zero-watermarking algorithm. *Information Sciences*, 2019, 470: 109–120. [doi: [10.1016/j.ins.2018.08.028](https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.08.028)]
- 20 Kang XB, Lin GF, Chen YH, *et al.* Robust and secure zero-watermarking algorithm for color images based on majority voting pattern and hyper-chaotic encryption. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(1–2): 1169–1202. [doi: [10.1007/s11042-019-08191-y](https://doi.org/10.1007/s11042-019-08191-y)]
- 21 Ma B, Chang LL, Wang CP, *et al.* Double medical images zero-watermarking algorithm based on the chaotic system and ternary accurate polar complex exponential transform. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2021, 63(9): 1160–1178. [doi: [10.1007/s10851-021-01048-w](https://doi.org/10.1007/s10851-021-01048-w)]
- 22 Zou BJ, Du JY, Liu XY, *et al.* Distinguishable zero-watermarking scheme with similarity-based retrieval for digital rights management of fundus image. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77(21): 28685–28708. [doi: [10.1007/s11042-018-5995-4](https://doi.org/10.1007/s11042-018-5995-4)]
- 23 Kang XB, Zhao F, Chen YJ, *et al.* Combining polar harmonic transforms and 2D compound chaotic map for distinguishable and robust color image zero-watermarking algorithm. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2020, 70: 102804. [doi: [10.1016/j.jvcir.2020.102804](https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2020.102804)]
- 24 Xia ZQ, Wang XY, Wang CP, *et al.* Novel quaternion polar complex exponential transform and its application in color image zero-watermarking. *Digital Signal Processing*, 2021, 116: 103130. [doi: [10.1016/j.dsp.2021.103130](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103130)]
- 25 Hosny KM, Darwish MM, Fouda MM. New color image zero-watermarking using orthogonal multi-channel fractional-order legendre-fourier moments. *IEEE Access*, 2021, 9: 91209–91219.
- 26 Hosny KM, Darwish MM. New geometrically invariant multiple zero-watermarking algorithm for color medical images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 70: 103007. [doi: [10.1016/j.bspc.2021.103007](https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103007)]

(校对责编: 孙君艳)