

文章编号:1007-5321(2021)05-0067-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2021-008

结合编码交织的频数质心零水印算法

张天骐, 叶绍鹏, 柏浩钧, 刘鉴兴

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 针对传统数字水印算法的透明性随嵌入强度的增加而下降,且存在鲁棒性和稳定性差的问题,提出了一种基于极化码与二维交织算法相结合的频数质心零水印算法. 该算法依次对水印信息进行极化码编码,二维交织构造出交织矩阵,然后对载体图像进行非下采样轮廓波变换获得其低频系数,再通过分块非负矩阵分解得到一维基矩阵;根据频数分布特征计算局部频数质心以构造出特征矩阵,最后将含有水印信息的交织方阵和特征矩阵进行异或操作生成零水印. 大量实验表明,该零水印算法可以有效地抵抗常规的信号处理攻击、几何攻击以及组合攻击,水印提取的归一化系数值在 0.88 以上,具有较强的鲁棒性和稳定性,且具有良好的实用价值.

关键词: 极化码; 二维交织; 非下采样轮廓波变换; 频数质心; 零水印

中图分类号: TN309.7

文献标志码: A

Frequency Centroid Zero Watermarking Algorithm Combine with Coding Interleaving

ZHANG Tian-qi, YE Shao-peng, BAI Hao-jun, LIU Jian-xing

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China)

Abstract: The transparency of traditional digital watermarking algorithms decreases with the increase of embedding strength, and their robustness and stability are poor. To solve these problems a frequency centroid zero watermarking algorithm based on polarization code and two-dimensional interleaving algorithm is proposed. In the proposed algorithm, the watermark information is encoded by polarization code in turn, and the interleaving matrix is constructed by two-dimensional interleaving. Then, the low-frequency coefficients of the carrier image are obtained by non-subsampled contour transform. Next, the one-dimensional matrix is obtained by block non-negative matrix decomposition. According to the characteristics of frequency distribution, the local frequency centroid is calculated to construct the feature matrix. Finally, the exclusive or operation of the interlaced matrix and the feature matrix containing watermark information are carried out to generate zero watermark. Experimental results show that the zero watermarking algorithm can effectively resist conventional signal processing attacks, geometric attacks and combinatorial attacks, and the normalized coefficient of watermark extraction is more than 0.88, which is robust and stable for practical applications.

Key words: polar code; two-dimensional interleaving; non-subsampled contour transform; frequency centroid; zero watermark

收稿日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(61671095, 61702065, 61701067, 61771085); 信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC2009CA2003)

作者简介: 张天骐(1971—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 叶绍鹏(1996—), 男, 硕士生, E-mail: yspyp77@163.com.

数字水印技术是当前进行版权保护和信息隐藏的重要手段之一,对其进行研究具有相当重要的意义^[1]. 传统的数字水印算法往往是修改空间域或变换域系数将水印信息嵌入到载体图像. 如赵健等^[2]利用非下采样剪切波变换的方向特征,奇异值分解(SVD, singular value decomposition)的方法进行水印信息的嵌入,具有良好的不可见性,但对强度大一点的噪声攻击提取效果不佳. 岳桢等^[3,4]采用广义直方图 2Bin 三进制和多 Bin 多进制图像数字水印算法大大提高了嵌入水印图像质量和抗攻击能力; Khanam 等^[5]提出了一种基于快速沃尔什-哈达玛变换、SVD、密钥映射和系数排序的盲技术,但是其对抗旋转、剪切等几何攻击的效果较差. 上述算法对图像数据造成了不同程度的改变. 因此,温泉等^[6]提出了一种利用载体图像的特征构造版权水印的零水印方法. 该方法解决了鲁棒性和不可见性冲突的问题.

对于零水印技术, Ye^[7]通过图像分块,比较相邻块的直流系数之间的数值关系,得到零水印序列. 该算法将矩阵分解和传统变换相结合,提出了一种新的零水印思想,但其在实验中使用的攻击强度很小. Zhao 等^[8]提出了一种具有强健性的水印方案,利用非下采样的小波变换的多分辨率和多尺度特性来分析给定图像的方向特征. Wang 等^[9]计算原始灰度图像的极性复指数变换,并基于逻辑映射随机选择极性复指数系数,然后,计算极性复指数变换的大小以构造二进制特征图像. Jiang 等^[10]提出了一种针对彩色图像的零水印算法,把原始图像分成红、绿、蓝和灰度 4 幅图像. 然后,将 4 幅图像进行适当组合,构造出 2 个三维张量,对扩展后的数据进行 SVD 和离散余弦变换(DCT, discrete cosine transform),可以生成包含宿主图像主要信息的特征图像. 该方式比较新颖,但仍缺乏鲁棒性. 熊祥光^[11]利用子块均值与整体均值的关系构造特征矩阵生成零水印,对常规的信号处理攻击具有强鲁棒性,但在几何攻击上表现不佳. 肖振久等^[12]提出了一种新颖的 SVD 与神经网络相结合的零水印算法,解决了传统零水印算法的虚警概率. 随后, Thanh 等^[13]利用载体图像的一维 DCT 构造特征矩阵生成零水印,未对水印信息进行加密降低了安全性,在稍微大的攻击强度下鲁棒性较差. 现有的方法对抗某种攻击的鲁棒性有一定的提高,但对较为复杂的攻击,鲁棒性仍有欠缺.

基于此,提出了一种在非下采样轮廓波变换(NSCT, non-subsampled contour transform)–非负矩阵分解(NMF, nonnegative matrix factorization)变换域下,统计图像的频数质心特性,并结合纠错编码的新型零水印方案. 在 NSCT-NMF 域统计频数质心特性,能稳定地提取图像的特征矩阵,生成零水印. 采用极化编码与交织算法能提高水印提取的准确度,同时提高水印系统的安全性.

1 NSCT

NSCT 是一种超小波变换,具有平移不变性的冗余变换^[14],由非下采样金字塔和非下采样方向滤波器组构成,通过非下采样金字塔分解获取奇异点信息,提供 NSCT 的多尺度特性;利用非下采样方向滤波器连接不连续点逼近原始图像,提供方向性. 所以,具有多方向信息的图像采用 NSCT 更适合鲁棒水印图像. 此外,图像经过 NSCT 后没有降维,也能提高水印信息的嵌入容量. NSCT 分解过程如图 1 所示.

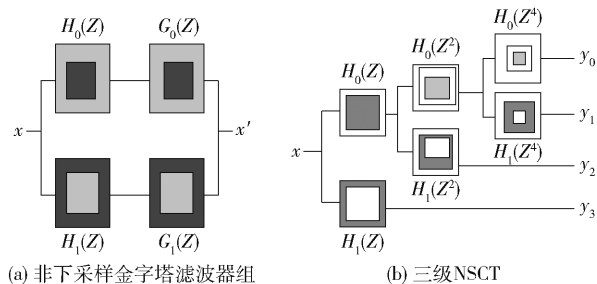


图 1 塔式滤波器与三级 NSCT

图 1(a)所示为非下采样金字塔滤波器组进行尺度分解的过程,多尺度分解是由非下采样塔式滤波器完成的,它是一个双通道滤波器,其中, $H_0(Z)$ 和 $H_1(Z)$ 分别为高通和低通滤波器. 图 1(b)所示为三级 NSCT,每一级滤波器都是对前一级滤波器的上采样获得的,当经过 l 级变换后,就会有 l 个带通分量和 1 个低通分量,共有 $l+1$ 个与原图像维度相同的子带图像.

2 极化码基础与二维交织算法

2.1 极化理论基础

极化码是由 Arikan 根据信道的极化现象提出来的,证明了极化码理论上可以达到香农极限,使得极化码成为研究的热点,其核心是信道极化理论^[15]. 在二进制输入的离散无记忆信道中,通过信

道极化后,比特信道被划分为纯噪比特信道和无噪比特信道。

极化码是一种线性分组码,编码由信息位和生成矩阵决定。编码过程为

$$\mathbf{x}_1^N = \mathbf{u}_1^N \mathbf{G}_N \quad (1)$$

其中: \mathbf{x}_1^N 为输入变量的集合; \mathbf{G}_N 为生成矩阵, $\mathbf{G}_N = \mathbf{B}_N \mathbf{F}^{\otimes n}$, \mathbf{B}_N 为 $N \times N$ 的比特转置矩阵, $\mathbf{F}^{\otimes n}$ 为对矩阵 $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 的 n 次克罗内克积,对任意的子集 A , $A \subset \{1, 2, \dots, N\}$, 式(1)可表示为

$$\mathbf{x}_1^N = \mathbf{u}_A \mathbf{G}_N(A) \oplus \mathbf{u}_{A^c} \mathbf{G}_N(A^c) \quad (2)$$

其中: $\mathbf{G}_N(A)$ 为 \mathbf{G}_N 中 A 集对应的行所构成的生成矩阵, A^c 为 A 的补集。极化码的编码可以由如下参数确定:码长为 N ,信息位的个数为 K ,码率为 K/N ,冻结位为 \mathbf{u}_A ,通常置为“0”符号,故极化码编码可表示为 $P(N, K, A, \mathbf{u}_{A^c})$ 。

2.2 二维交织算法

二维交织技术可以将集中突发的错误均匀分散开,又可以达到置乱加密的目的。将极化码与交织技术结合应用于水印系统,其抗突发错误能力更强,增加水印系统的鲁棒性。首先把 $2^n \times 2^n$ 的矩阵作为交织的单元,再把这个单位等分为4个象限,每个象限再分4个象限,以此类推,直至分为 2×2 的最小单元为止。具体构造步骤如下:

先将 2×2 最小单元里的4个元素按式(3)排列成交织方阵,再按式(4)进行升维得到高阶的交织方阵。

$$\mathbf{S}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_{4i} = \begin{bmatrix} 4 \times \mathbf{S}_i + 0 \cdot \mathbf{E} & 4 \times \mathbf{S}_i + 1 \cdot \mathbf{E} \\ 4 \times \mathbf{S}_i + 2 \cdot \mathbf{E} & 4 \times \mathbf{S}_i + 3 \cdot \mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中:交织方阵 \mathbf{S}_i 为具有 i 个元素的方阵, \mathbf{E} 为 2×2 的单位矩阵。

3 构造零水印与提取版权水印

3.1 构造零水印

将大小为 $M \times M$ 的载体图像用 I 表示, \mathbf{w} 代表 $m \times m$ 的二值版权水印图像,具体步骤如下。

步骤1:采用重构的方式将 $m \times m$ 的二值版权水印图像降维成一维序列,对该序列用极化码的编码规则,以 $N = 2m \times 2m$, $K = m \times m$,码率 $r = 1/4$ 的参数进行编码得到 \mathbf{w}_b 。再根据式(3)和式(4)进行

二维交织形成带有水印信息的交织方阵 \mathbf{S} 。

步骤2:对载体图像进行 $J(J=4)$ 级 NSCT, 获得其低频子带系数。再对低频子带系数进行 8×8 分块,最后依次对各分块进行 NMF,得到各子块的一维基向量。

步骤3:根据一维基向量构造频数质心,计算出每个子块的质心值。

步骤4:采用局部阈值生成的方法。将步骤3所算出来的质心值分成 8×8 的区域,计算出每个区域的平均值作为阈值,把这个区域中大于阈值的数设置为1,反之,设置为0,得到 $(M/8) \times (M/8)$ 特征矩阵 \mathbf{T} 。

步骤5:将交织方阵 \mathbf{S} 与特征矩阵 \mathbf{T} 进行异或操作生成零水印信息 \mathbf{Z} 注册到版权保护中心。运算方式为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{S} \oplus \mathbf{T} \quad (5)$$

其中 \oplus 为异或运算。

频数质心能够稳定表示图像特征。这里,对步骤3中构造质心频数的过程做详细介绍。一维基向量中数据 $\mathbf{D} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 映射到 x 轴上,取最大值为 x_{\max} ,最小值为 x_{\min} ,将数据分为 k 组,组距为 t ,设定子区间 $[x_{\min}, x_{\min} + t), \dots, [x_{\min} + (i-1)t, x_{\min} + it), \dots, [x_{\min} + (k-1)t, x_{\max}], 1 \leq i \leq k$,统计 \mathbf{D} 中数据在各个区间的次数 $\mathbf{C} = [m_1, \dots, m_i, \dots, m_k]$, $m_1 + \dots + m_i + \dots + m_k = n$,根据公式 $X_i = x_{\min} + it - t/2$,依次求出各个子区间的中位数,得到对应的中位数序列 $\mathbf{X} = [X_1, \dots, X_i, \dots, X_k]$ 。则其质心为

$$\mathbf{X}_c = \frac{\sum_i m_i X_i}{\sum_i m_i} \quad i \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (6)$$

3.2 提取版权水印

版权水印的提取与嵌入过程相似,具体步骤如下:

步骤1:将受到攻击的载体图像按3.1节步骤2~步骤4的操作,提取出特征矩阵 \mathbf{T}' 。

步骤2:把特征矩阵与零水印 \mathbf{Z} 进行异或操作得到含水印信息的交织矩阵 \mathbf{S}' 。

$$\mathbf{S}' = \mathbf{T}' \oplus \mathbf{Z} \quad (7)$$

步骤3:对 \mathbf{S}' 进行去交织、极化码译码、重构为 $m \times m$ 的图像即可得到版权水印 \mathbf{w}' 。

4 实验结果与分析

如图2所示,实验中使用的载体图像是 $512 \times$

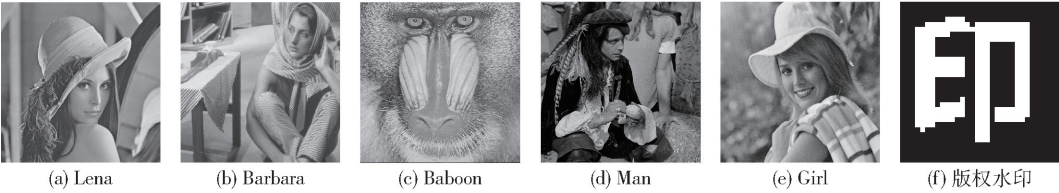


图2 载体图像与版权水印

512 像素的灰度图像,其中包括 Lena, Barbara, Baboon, Man, Girl. 版权水印信息为 32×32 像素的汉字“印”的二值图像. 所提方案采用归一化相关系数 (NC, normalization coefficient) 来评估该算法的唯一性和鲁棒性. NC 是指提取的水印图像与正确的水印图像之间的相似度. 定义 NC 的计算公式为

$$\eta = \frac{\sum_x \sum_y W(x,y) W'(x,y)}{\sqrt{\sum_x \sum_y W^2(x,y)} \sqrt{\sum_x \sum_y W'^2(x,y)}} \quad (8)$$

其中: $W(x,y)$ 为正确的水印图像, $W'(x,y)$ 为提取的水印图像.

4.1 唯一性检测

由于不同宿主图像产生的特征图像不同,即不同图像产生的零水印之间的相关性应该相对较小. 理论上,如果不使用原始宿主图像来提取水印信息,则提取的水印图像与正确的水印图像之间的相关性应该相对较低. 因此,首先进行唯一性测试,所提方案的性能如表 1 所示. 表 1 中 NC 的最大值为 0.716 3,其对应的提取水印图像如图 3 所示. 由图可知,即使 NC 为 0.716 3,也很难从提取的标识图像中获取有用信息,因此该算法具有很好的唯一性.

表 1 唯一性检测 (NC)

	Lena	Barbara	Baboon	Man	Girl
Lena	1	0.646 7	0.589 2	0.564 3	0.716 3
Barbara	0.646 7	1	0.568 1	0.521 4	0.624 1
Baboon	0.589 2	0.568 1	1	0.522 9	0.579 2
Man	0.564 3	0.521 4	0.522 9	1	0.559 7
Girl	0.716 3	0.624 1	0.579 2	0.559 7	1

4.2 鲁棒性检测

4.2.1 非几何攻击

非几何攻击是一种添加性的攻击方式,是对图像的像素值进行了修改. 为测试所提算法在非几何攻击下的鲁棒性,分别对 5 幅载体图像进行噪声攻击、滤波攻击和 JPEG 压缩攻击,其中,噪声攻击采取高斯噪声、椒盐噪声和乘性噪声,攻击的噪声参数



图3 与表 1 中 NC 为 0.716 3 的水印图像

均值为 0,方差为 0.1 和 0.3;滤波攻击采取中值滤波、维纳滤波和低通滤波,滤波模板大小设为 3×3 和 9×9 ; JPEG 攻击的压缩因子设为 10 和 50,攻击后提取水印图像的 NC 如表 2 所示.

由表 2 可知,这 5 幅载体图像在经噪声攻击后,NC 最高可达 0.999 6,最小也在 0.94 以上,对于纹理特征较为丰富的 Baboon 图像,所提取水印图像的 NC 也在 0.94 以上. 在经滤波攻击后,对于 3×3 模板的攻击,大部分 NC 几乎为 1,说明该算法能有效地抵抗滤波攻击. 在 JPEG 压缩攻击方面,压缩因子为 10 时,NC 最低为 0.990 4. 因为 NSCT-NMF 变换有良好的去噪特性,统计频数质心具有很强的稳定性,所以所提算法在非几何攻击下具有良好的鲁棒性.

4.2.2 几何攻击

几何攻击既修改图像的像素,又改变其位置,对图像影响较大. 为验证所提算法对几何攻击的鲁棒性,对 5 幅载体图像采用旋转攻击、剪切攻击、行列偏移攻击,实验结果如表 3 所示.

由表 3 可知,旋转攻击对图像影响较大,但即使在旋转 5° 的条件下,由于采用编码交织技术,算法具有良好的纠错特性,NC 仍在 0.9 以上. 行列偏移攻击会使图像整体位置发生改变,在偏移 10 列时,所提算法依然能有效地提取图像特征,NC 均在 0.95 以上. 对于剪切攻击,在剪切 1/8 以内具有不错的鲁棒性,若剪切面积过大,造成图像特征损失,则图像提取效果不佳. 所以所提算法能有效抵抗一定范围内的剪切攻击. 综上所述,所提算法在几何攻击下也具有不错的鲁棒性.

表 2 非几何攻击实验下的 NC

攻击方式	参数	Lena	Barbara	Baboon	Man	Girl
椒盐噪声	方差为 0.1	0.998 9	0.999 1	0.997 8	0.999 4	0.999 6
	方差为 0.3	0.981 4	0.988 3	0.982 7	0.988 6	0.989 1
高斯噪声	方差为 0.1	0.973 6	0.963 9	0.973 9	0.971 1	0.974 8
	方差为 0.3	0.955 3	0.952 1	0.944 1	0.954 9	0.958 6
乘性噪声	方差为 0.1	0.987 0	0.981 9	0.981 8	0.984 3	0.981 7
	方差为 0.3	0.960 1	0.955 9	0.958 9	0.962 4	0.959 7
中值滤波	模板大小为 3×3	1.000 0	1.000 0	0.999 8	1.000 0	1.000 0
	模板大小为 9×9	0.998 7	0.997 4	0.995 2	0.996 9	0.997 7
维纳滤波	模板大小为 3×3	1.000 0	1.000 0	0.999 7	1.000 0	1.000 0
	模板大小为 9×9	0.998 1	0.994 3	0.995 8	0.996 6	0.998 3
低通滤波	模板大小为 3×3	0.997 8	1.000 0	0.999 8	1.000 0	1.000 0
	模板大小为 9×9	0.994 5	0.995 3	0.997 1	0.995 5	0.996 7
JPEG 压缩	压缩因子为 10	0.998 3	0.991 3	0.990 4	0.997 6	0.997 5
	压缩因子为 50	1.000 0	0.998 4	1.000 0	1.000 0	1.000 0

表 3 几何攻击实验下的 NC

攻击方式	参数	Lena	Barbara	Baboon	Man	Girl
旋转	旋转 1°	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	旋转 2°	0.996 8	0.989 7	0.986 4	0.992 1	0.990 8
	旋转 5°	0.911 3	0.917 6	0.915 6	0.909 8	0.911 5
剪切	左上剪切 1/16	0.942 3	0.938 6	0.940 4	0.940 1	0.939 2
	中心剪切 1/8	0.901 3	0.906 3	0.910 1	0.907 7	0.907 5
	右下剪切 1/4	0.854 3	0.854 6	0.860 1	0.849 7	0.854 4
行列偏移	向下偏移 1 行	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	向下偏移 5 行	0.982 4	0.976 7	0.986 5	0.984 9	0.981 7
	向左偏移 10 列	0.969 0	0.960 7	0.958 7	0.954 2	0.961 9

4.2.3 组合攻击与其他攻击

为进一步验证所提算法的鲁棒性与稳定性,采用大量的组合攻击与其他攻击方式进行测试,采取不同攻击方式的图像如图 4 所示,其中,(a)为高斯噪声(均值为 0,方差 0.1)+旋转(顺时针旋转 3°)攻击;(b)为均值滤波(模板大小为 9×9)+剪切(左上剪切 1/16)攻击;(c)为 JPEG 压缩(压缩因子为 20)+行列偏移(向右移 5 行)攻击;(d)为直方图均衡化+剪切(左上剪切 1/16)攻击;(e)为 8×8 马赛克攻击;(f)为 64×64 篡改攻击.其中,在不同攻击方式下所提取的水印图像依次如图 5 所示.

由图 4 可知,组合攻击对图像质量严重扭曲,但



图 4 不同攻击方式

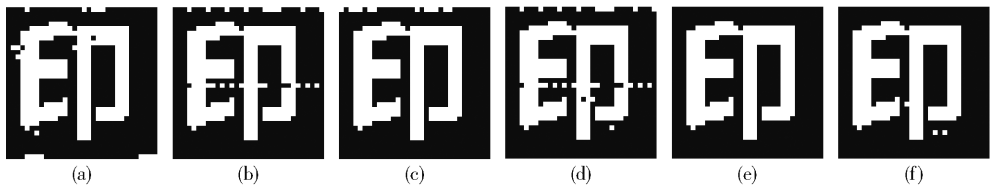


图 5 不同攻击方式所提取的水印图像

水印提取较为清晰. 马赛克攻击是由分块的均值代替整个分块的像数值所形成的,所提算法是利用分块质心的统计特征,因此可以很好地抵抗马赛克攻击. 在 64×64 篡改攻击下,所提取的水印效果也不错.

4.3 对比实验

为验证所提算法的优越性,选取 Lena 载体图

像,将所提算法与近年来较为先进且具有代表性的文献[10]中基于变换域的零水印算法,与文献[11]中空域强鲁棒零水印算法进行对比. 分别采用均值为 0 的高斯噪声攻击、均值滤波攻击、JPEG 压缩、旋转攻击、行列偏移攻击、剪切 1/8 攻击,实验结果如表 4 所示.

表 4 不同算法在不同攻击下的 NC 对比

攻击类型	参数	文献[10] 算法	文献[11] 算法	所提 算法	攻击类型	参数	文献[10] 算法	文献[11] 算法	所提 算法
高斯噪声	方差为 0.1	0.962 8	0.979 1	0.998 9	旋转	旋转 1°	0.952 8	0.963 4	1.000 0
	方差为 0.2	0.922 4	0.975 2	0.981 4		旋转 2°	0.924 4	0.935 6	0.996 8
	方差为 0.3	0.904 4	0.964 3	0.974 3		旋转 3°	0.882 4	0.920 8	0.962 4
	方差为 0.4	0.874 2	0.945 2	0.958 6		旋转 4°	0.835 9	0.870 8	0.936 7
	方差为 0.5	0.853 3	0.900 0	0.884 2		旋转 5°	0.825 1	0.842 2	0.911 3
均值滤波	模板大小为 3×3	0.994 4	0.997 5	1.000 0	行列偏移	向下偏移 1 行	0.995 6	0.999 5	1.000 0
	模板大小为 5×5	0.988 6	0.995 6	1.000 0		向下偏移 2 行	0.974 5	0.994 3	1.000 0
	模板大小为 7×7	0.982 4	0.988 9	0.999 4		向下偏移 3 行	0.958 7	0.986 3	0.995 6
	模板大小为 9×9	0.979 6	0.979 2	0.998 7		向下偏移 4 行	0.925 6	0.980 0	0.994 3
	模板大小为 11×11	0.968 6	0.976 8	0.990 1		向下偏移 5 行	0.908 5	0.950 0	0.982 4
JPEG 压缩	压缩因子为 10	0.988 4	0.990 0	0.998 3	剪切	右上剪切 1/8	0.977 1	0.940 0	0.911 3
	压缩因子为 20	0.997 6	0.992 4	1.000 0		左上剪切 1/8	0.934 2	0.950 0	0.913 4
	压缩因子为 30	0.999 3	0.998 9	1.000 0		中心剪切 1/8	0.961 7	0.941 4	0.911 7
	压缩因子为 40	0.999 1	0.999 9	1.000 0		左下剪切 1/8	0.942 6	0.943 3	0.928 4
	压缩因子为 50	0.999 4	1.000 0	1.000 0		右下剪切 1/8	0.968 9	0.944 2	0.911 2

在非几何攻击方面,选取了常见的加噪、滤波、压缩攻击. 由表 4 可知,3 种算法随着噪声强度的增加,所提取水印的 NC 均呈下降趋势,所提算法的 NC 下降趋势较为缓慢,且在方差小于 0.5 时,NC 均都高于其他 2 种算法. 对于滤波攻击和 JPEG 压缩攻击,3 种算法均有良好的鲁棒性,NC 都在 0.98 以上,但就变化趋势而言,所提算法的稳定性更加突出. 对于几何攻击,选取了具有代表性的旋转攻击、剪切攻击和行列偏移攻击. 对于旋转攻击,随着旋转角度的增大,文献[10]算法和文献[11]算法的 NC 下降较快,而所提算法的 NC 最低也在 0.9 以上. 在行列偏移攻击中,所提算法的 NC 均高于其他 2 种算法,文献[10]算法的稳定性较差. 对不同区域剪切攻击方面,所提算法提取水印的 NC 略低于其他 2 种算法,但最低也在 0.9 以上. 综上所述,所提算法整体性能优于其他 2 种算法.

所提算法与文献[10]算法和文献[11]算法相比,在抵抗非几何攻击的性能上有较大的提升,尤其在滤波攻击上,所提取图像的 NC 几乎为 1,主要因为所提算法结合了 NCST 变换的多尺度与多方向特

性,同时在滤波和去噪方面具有良好的性能,加上纠错编码技术能更准确地提取水印信息. 文献[10]算法要提取不同分量的 DCT 和 SVD 系数,当受到攻击后各分量的误差容易累计;当噪声攻击和滤波攻击强度较低时有较好的鲁棒性,当攻击强度增大时,DCT 变化较快使得构造的特征矩阵稳定性较差,提取效果不佳. 文献[11]采用图像子块的空间关系构造零水印,是在空间域上进行处理,然而,几何攻击很容易破坏这种稳定性,使得该算法抗几何攻击效果不佳;在抗几何攻击上,文献[11]采用传统的 SVD 分解,在受到旋转攻击时,最大奇异值的最高位容易被破坏. 所提算法利用 NMF 分解,再根据局部统计特性算出频数质心,提取特征矩阵,避免了最大奇异值改变的问题. 因此,所提算法的鲁棒性优于文献[10]和文献[11]算法.

5 结束语

所提算法根据图像的特征,提出了基于 NSCT-NMF 域的频数质心算法,能根据图像的统计与局部特征,稳定地提取图像特征;并首次将极化码和交织

算法与零水印系统结合,在水印提取时能避免突发错误并具有纠错能力,能更好地提取水印。与传统水印算法相比,载体图像达到了无损的要求。大量实验结果表明,所提算法能有效地抵抗较大强度的加噪、滤波、JPEG 压缩、旋转、剪切、行列偏移、直方图均衡化、马赛克、篡改等攻击,且最低 NC 也在 0.88 以上。所提算法既能在不修改载体图像数据信息的情况下,又能在较为复杂的攻击条件下稳定提取图像特征恢复水印信息,因此可以广泛地应用在数字产品的版权保护中。

参考文献:

- [1] 印曦, 黄伟庆. 基于混沌理论的彩色 QR 编码水印技术研究[J]. 通信学报, 2018, 39(7): 50-58.
Yin Xi, Huang Weiqing. Research on QR code watermarking technology on chaos theory [J]. Journal on Communications, 2018, 39(7): 50-58.
- [2] 赵健, 张婉如, 张顺利等. 一种新的结合 SVD 的非下采样 Shearlet 数字水印[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(S1): 34-38.
Zhao Jian, Zhang Wanru, Zhang Shunli, et al. A novel hybrid digital watermarking scheme using SVD in non-subsampled shearlet[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(S1): 34-38.
- [3] 岳桢, 李子臣, 杨义先. 广义直方图多 Bin 多进制水印算法[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(1): 1-6.
Yue Zhen, Li Zichen, Yang Yixian. A generalized multi-bin and M-ary histogram-based image watermarking algorithm [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(1): 1-6.
- [4] 岳桢, 李子臣, 杨义先, 等. 直方图 2Bin 多进制图像数字水印算法的研究[J]. 电子学报, 2020, 48(3): 531-537.
Yue Zhen, Li Zichen, Yang Yixian, et al. A histogram-based 2bin M-ary image digital watermarking algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(3): 531-537.
- [5] Khanam T, Dhar P K, Kowsar S, et al. SVD-based image watermarking using the fast Walsh-Hadamard transform, key mapping, and coefficient ordering for ownership protection[J]. Symmetry, 2019, 12(1): 52-72.
- [6] 温泉, 孙铨锋, 王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214-216.
Wen Quan, Sun Tanfeng, Wang Shuxun. Concept and application of zero-watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216.
- [7] Ye Tianyu. A robust zero-watermark algorithm based on singular value decomposition and discrete cosine transform [J]. Parallel and Distributed Computing and Networks, 2011, 137: 1-8.
- [8] Zhao Jian, Xu Wensheng, Zhang Shunli, et al. A strong robust zero-watermarking scheme based on shearlets' high ability for capturing directional features [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(11): 1-11.
- [9] Wang Chunpeng, Wang Xingyuan, Chen Xingjun, et al. Robust zero-watermarking algorithm based on polar complex exponential transform and logistic mapping [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(24): 26355-26376.
- [10] Jiang Feifeng, Gao Tiegang, De li. A robust zero-watermarking algorithm for color image based on tensor mode expansion [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(1): 7599-7614.
- [11] 熊祥光. 空域强鲁棒零水印方案[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 160-175.
Xiong Xiangguang. A zero watermarking scheme with strong robustness in spatial domain [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1): 160-175.
- [12] 肖振久, 张晗, 陈虹, 等. 增强奇异值分解和细胞神经网络的零水印[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(3): 288-296.
Xiao Zhenjiu, Zhang Han, Chen Hong, et al. Zero-watermarking based on boost normed singular value decomposition and cellular neural network [J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(3): 288-296.
- [13] Thanh T M, Tanaka K. An image zero-watermarking algorithm based on the encryption of visual map feature with watermark information [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(11): 13455-13471.
- [14] 张天骐, 周琳, 梁先明, 等. 基于 Blob-Harris 特征区域和 NSCT-Zernike 的鲁棒水印算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(7): 2038-2045.
Zhang Tianqi, Zhou Lin, Liang Xianming, et al. Robust watermarking algorithm based on Blob-Harris feature region and NSCT-Zernike [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2021, 43(7): 2038-2045.
- [15] Arikan E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.