

基于区域异或和三值量化的高分辨零水印算法

吴德阳¹, 胡森², 王苗苗², 金海波², 曲长波², 唐勇¹

(1. 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 辽宁工程技术大学软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 针对目前零水印算法对于受攻击图像和虚警图像生成的零水印区分度不足问题, 提出了一种基于区域异或和三值量化的高分辨零水印算法。在零水印生成过程中, 首先提取图像的空域特征和频域特征, 将载体特征和版权水印进行冗余构造, 以频域特征作为索引, 将冗余水印分成 2 个区域, 分别与空域特征和混沌矩阵异或, 并将异或后的 2 个区域进行合并得到零水印。在版权认证过程中, 从攻击后的图像中提取空域和频域特征, 以频域特征作为索引, 将零水印分成 2 个区域, 分别与空域特征和混沌矩阵异或, 提取冗余构造的水印图像, 去冗余操作后, 量化成只有 3 个数值的矩阵作为版权认证结果。实验结果表明, 所提算法可有效解决图像零水印的虚警问题, 同时在多种攻击下具有较高稳健性, 特征提取算法可任意更换, 具有较高可扩展性。

关键词: 图像版权保护; 零水印; 数字水印; 区域异或; 三值量化

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022027

Discriminative zero-watermarking algorithm based on region XOR and ternary quantization

WU Deyang¹, HU Sen², WANG Miaomiao², JIN Haibo², QU Changbo², TANG Yong¹

1. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. College of Software, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China

Abstract: Aiming at the problem that the current zero-watermark algorithm is insufficient in distinguishing the zero-watermark generated by the attacked image and the false-alarm image, a high-resolution zero-watermarking algorithm based on regional XOR and ternary quantization was proposed. In the process of zero watermark generation, the spatial and frequency domain features of the image were first extracted, the carrier feature and copyright watermark were redundantly constructed, and the frequency domain feature was used as an index to divide the redundant watermark into two regions, which were respectively related to the spatial domain features and the copyright watermark. The chaotic matrix was XOR, and the two regions after XOR were combined to obtain zero watermark. In the copyright authentication process, the airspace and frequency domain features were extracted from the attacked image, and the frequency domain feature was used as an index to divide the zero watermark into two regions, which were XOR with the airspace feature and the chaotic matrix respectively, and the redundantly constructed watermark was extracted. The image, after de-redundancy operation, was quantized into a matrix with only three values as the result of copyright authentication. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively solve the false alarm problem of image zero watermark, and at the same time has high robustness under various attacks, the feature extraction algorithm can be arbitrarily replaced, and has high scalability.

Keywords: image copyright protection, zero watermark, digital watermarking, region XOR, ternary quantization

收稿日期: 2021-11-16; 修回日期: 2022-01-10

通信作者: 胡森, husen_232323@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62173171)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62173171)

0 引言

随着信息时代的发展,各种形式的数字作品在网络中可以轻易获取,同时也出现了数字内容版权保护问题^[1]。数字水印技术可以通过将水印信息嵌入载体实现版权保护,在近些年受到了广泛关注。在图像中嵌入信息会不可避免地对图像质量产生影响,而且存在稳健性和不可见性的矛盾,零水印^[2]的提出解决了这个问题,从图像中提取具有唯一性和稳健性的特征序列,与版权标识建立联系后作为零水印保存至认证中心,完成图像版权的注册。零水印生成的过程主要可分为2个部分:图像特征提取及特征与版权建立联系(如特征与水印异或生成零水印)。零水印算法的稳健性、运行效率和虚警率等评价指标,主要受图像特征提取部分的影响;从图像提取特征后,与版权标识建立联系生成零水印,在版权认证过程中,可由零水印和图像特征得到版权标识,实现版权可视化;在零水印的生成过程中,通常需要加入加密算法,以提升零水印的安全性。

在目前的图像零水印研究中,图像特征提取的方法主要可分为以下几种。基于变换域特征,如双树复小波变换(DTCWT, dual-tree complex wavelet transform)^[3-4]、轮廓波变换(CT, contourlet transform)^[5]、非亚采样轮廓波变换^[6]、曲波变换(CT, curvelet transform)^[7]、尺度不变特征变换(SIFT, scale invariant feature transform)^[8]、Gabor变换^[9]、平移不变剪切波变换(SIST, shift-invariant shearlet transform)^[10]、元胞自动机变换(CAT, cellular automata transform)^[11]等,在得到稳定系数后,可直接将其构造为图像特征,或进一步对系数进行离散余弦变换(DCT, discrete cosine transform)^[3-5,8-10,12]、奇异值分解(SVD, singular value decomposition)^[9-10,12]、改进奇异值分解^[7,13]等操作提取其主要能量用于构造特征。基于空域特征,使用极谐变换计算图像的不变矩特征,如极谐变换(PHT, polar harmonic transform)^[14-15]、小数阶极谐变换(DoPHT, decimal-order polar harmonic transform)^[16]、四元数极谐变换(QPHT, quaternion polar harmonic transform)^[17-18]、四元数径向分数Charlier矩(QRFrCM, quaternion radial fractional Charlier moment)^[18]、四元数极谐傅里叶矩(QPHFM, quaternion polar harmonic Fourier moment)^[19-20]等,直接从空域提取特征,将子块均值和整体均值稳定关系构造成图

像特征^[21-22],构建神经网络模型提取图像稳健特征^[23]。在上述的零水印研究中,大多关注于提升图像特征的稳定性,具有较好稳健性,但当需要保护的图像数量较多或图像相似度较高时,会出现虚警问题,受攻击图像的零水印与虚警图像的零水印区分度较低,将未受保护的图像误判成已保护的图像。

在现有的低虚警零水印研究中,多从特征提取的角度解决相似图像的虚警问题,从图像中提取具有稳健性和较高唯一性的特征,用于生成零水印。文献[14]研究了医学图像零水印的相似区分问题,利用同阶幅值和同重复幅值关系的稳定性构建特征,为所有幅值指定了多个参考值,将数值大小关系构造成二值矩阵,以降低相似图像特征的相似性。在10幅医学图像的虚警实验中,平均误码率(BER, bit error ratio)和最小误码率分别为0.363 1和0.262 9。文献[15]计算图像的3个极谐变换矩,分别是PCET(polar complex exponential transformation)、PCT(polar cosine transform)和PST(polar sine transform),选择不重复幅值构造特征序列,根据特征序列相邻数值之间的大小关系构建二值特征,用于生成零水印,在相似度较高的自然图像进行虚警测试,相似图像生成的零水印的误码率在0.5左右。文献[24]将图像分成多个同心圆环区域,并计算每一区域的均值、方差、偏度、峰度信息残差特征,二值化之后将区域内的4种特征构造成一个区域的特征,在相似图像虚警测试中,误码率的平均值和最小值分别为0.4左右和0.2左右。文献[25]首先利用完备局部二值模式(CLBP, completed local binary pattern)构造3幅CLBP符号图和3幅CLBP幅值图,将其划分成多个同心圆环区域,并计算区域的均值、方差、偏度、峰度,二值化之后作为图像特征,在相似图像虚警测试中,误码率的平均值和最小值分别为0.463 6和0.111 1。文献[26]研究了眼底医学图像零水印的相似区分问题,将眼底医学图像的圆形区域分成多个扇形子块,计算相邻子块之间的差值,量化成四值特征向量作为图像特征,同时建立特征库,在版权认证时,先在特征库中进行相似度检索,以区分受保护图像和未受保护图像。文献[14-15, 24-26]分别从矩特征和圆环分块特征构造的角度,解决相似图像零水印的虚警问题,虽然可使不同图像的零水印具有一定的区分度,但均是针对固定的特征提取算法和图像类型,可扩展性较差,在不同图像零水印区分度方面仍有可提升空间。

在上述研究的基础上,为提升不同图像零水印的可区分性,提出了一种基于区域异或和三值量化的高分辨零水印算法。从图像中提取出 2 种特征,通过冗余构造特征、特征索引分区域异或等操作,将 2 种特征共同构造成零水印;通过水印冗余构造、去冗余三值量化等操作,在版权认证阶段扩大相似特征之间的差异,使受保护图像与虚警图像的零水印具有较高的区分度,以解决图像零水印的虚警问题。本文的主要贡献如下。

1) 分析了零水印虚警问题的发生原因,指出了不相似图像之间也可能发生虚警问题,并提出解决图像零水印虚警问题的方法。

2) 提出了一种分区域异或算法,将图像的 2 种特征融合构造成零水印,避免由某一特征唯一性不足导致不同图像的特征相似度过高。

3) 提出了冗余构造和三值量化算法,通过控制量化阈值,扩大表现不同图像之间的特征差异。

1 问题分析及基础理论

1.1 零水印的虚警问题

通常在基于图像特征提取的零水印算法中,从图像中提取稳健特征代表一幅图像,当 2 幅图像的特征相似度较高时,生成的零水印也会相似,可使用一幅图像从另一幅图像生成的零水印中提取出可识别的版权信息,将未受版权保护的图像认定为已受保护的图像,导致虚警问题。该类问题主要是由特征的唯一性不足引起的,根据载体图像是否相似,可将其分为以下 2 种。1) 相似图像之间的虚警问题:从图像中提取的特征往往可以表现图像的特点,当 2 幅图像相似,并且使用同一特征提取算法提取特征时,容易使 2 幅图像特征相似度较高,从而导致虚警问题。2) 不相似图像之间的虚警问题:在零水印算法中,通常从灰度或彩色图像中提取出较短的二值序列作为特征,因此二值特征的多样性必定远小于原始图像的多样性。随着图像数量的增大,可能会出现视觉效果相差较明显,但特征相似度较高的图像,引发虚警问题。

对于第一种由相似图像引发的虚警问题,如图 1 所示,为一组较相似的头 CT 图像,提取频域特征^[3]和空域特征^[22],对比特征相似度,使用 BER 作为相似度度量。表 1 和表 2 分别为相似图像的频域和空域特征的相似度,不同图像的最低误码率分别为 0.031 3 和 0.092 8,而通常误码率在 0.5 左右时,

区分度较好,因此传统特征提取算法从相似图像中提取出的特征相似度较高,会引发虚警问题。

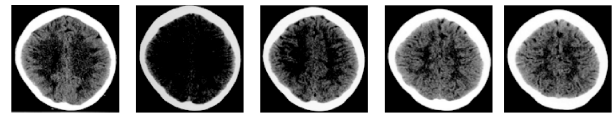


图 1 较相似的头 CT 图像

表 1 相似图像频域特征相似度 (BER)

图像	图 1(a)	图 1(b)	图 1(c)	图 1(d)	图 1(e)
图 1(a)	0	0.187 5	0.187 5	0.031 3	0.156 3
图 1(b)	0.187 5	0	0.187 5	0.156 3	0.343 8
图 1(c)	0.187 5	0.187 5	0	0.156 3	0.218 8
图 1(d)	0.031 3	0.156 3	0.156 3	0	0.187 5
图 1(e)	0.156 3	0.343 8	0.218 8	0.187 5	0

表 2 相似图像空域特征相似度 (BER)

图像	图 1(a)	图 1(b)	图 1(c)	图 1(d)	图 1(e)
图 1(a)	0	0.185 5	0.128 9	0.132 8	0.155 3
图 1(b)	0.185 5	0	0.103 5	0.181 6	0.210 0
图 1(c)	0.128 9	0.103 5	0	0.105 5	0.139 6
图 1(d)	0.132 8	0.181 6	0.105 5	0	0.092 8
图 1(e)	0.155 3	0.210 0	0.139 6	0.092 8	0

对于第二种情况引发的虚警问题,选取 Intel 图像分类数据集进行实验,该数据集中共有 14 034 幅彩色图像,图像内容分成了 6 个类别,多数图像之间差异较明显,也存在少量的重复图像和相似图像。从图像中提取空域和频域特征,分别表现为 32×32 和 32×1 的二值矩阵,使用误码率度量数据集中所有图像二值特征的相似度,如图 2 所示。

图 2(a)和图 2(b)分别为不同图像之间频域特征和空域特征的误码率,不同图像特征之间的误码率大多集中在 0.45 左右,虽然提取的特征具有一定的唯一性,但仍然存在误码率较小的情况。即随着图像数量的增大,可能出现原始图像不相似,而提取到的特征相似度较高的情况,引发虚警问题。

图 3 和图 4 分别为频域特征和空域特征相似图像,其中,频域特征和空域特征相似图像对应相似特征的误码率均小于 0.1,但每一组图像从视觉上均具有较高的辨识度,说明不相似图像之间也可能存在虚警问题。同时,由于空域特征和频域特征具有不同的特点,如表 3 所示,当一种特征误码率较高时,另一种特征误码率一般较低。

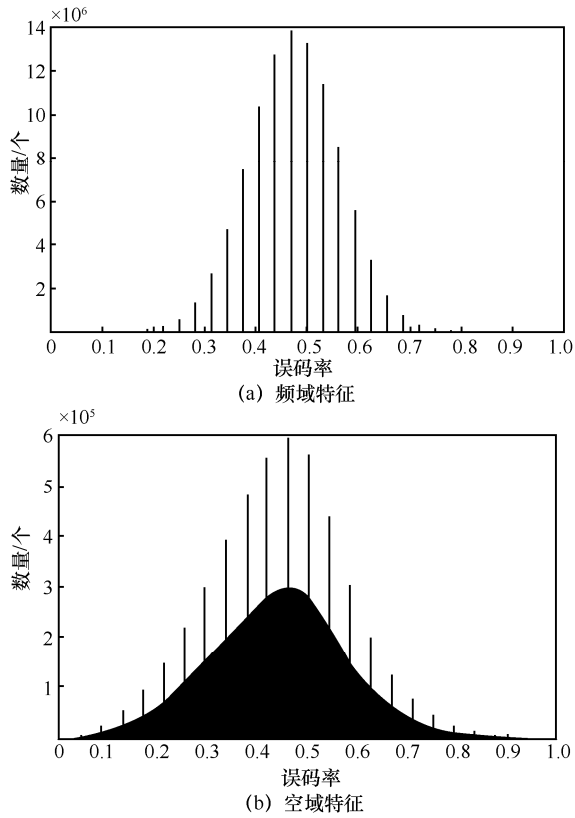


图 2 不同图像特征误码率

图像	空域特征误码率	频域特征误码率
图 3(a)	0.350 6	0.093 8
图 3(b)	0.457 0	0.093 8
图 3(c)	0.120 1	0.062 5
图 3(d)	0.299 8	0.093 8
图 3(e)	0.244 1	0.062 5
图 4(a)	0.093 8	0.406 3
图 4(b)	0.029 3	0.343 8
图 4(c)	0.093 8	0.437 5
图 4(d)	0.098 6	0.343 8
图 4(e)	0.080 1	0.406 3

1.2 特征差异扩大

零水印算法需从图像中提取特征构造零水印，当不同图像的特征相似度较高时，会引发虚警问题，因此可通过扩大不同图像特征差异，避免虚警问题。本文提出了冗余构造特征、冗余构造水印、三值量化、特征索引分区域异或等操作，

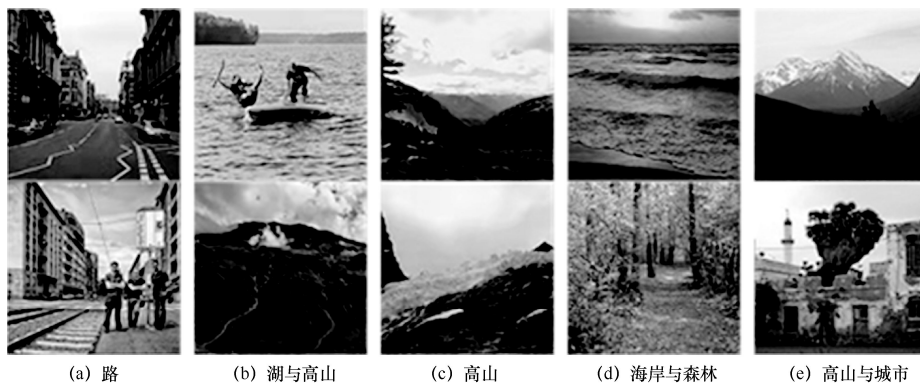


图 3 频域特征相似图像

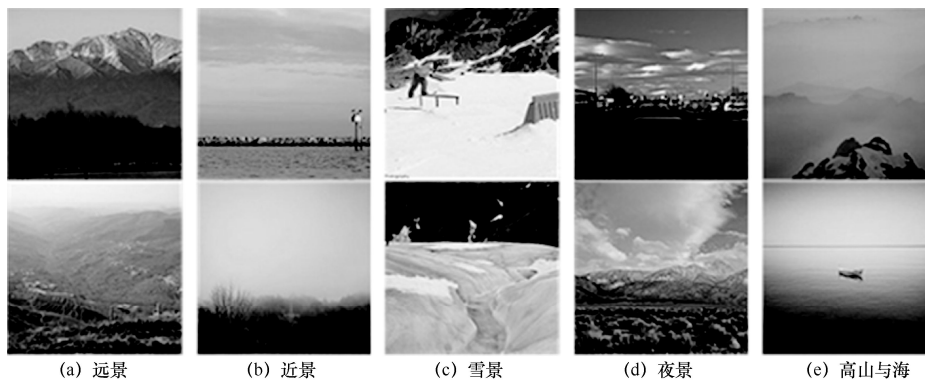


图 4 空域特征相似图像

扩大相似图像之间的特征差异，从而解决零水印虚警问题。

1.2.1 特征索引的区域异或

为提高零水印算法的安全性、降低零水印算法虚警率、使版权信息可视化表示，提出了一种特征索引的区域异或算法。从图像中提取特征，表示成二值序列，重构成大小为 $M \times N$ 的二值矩阵 F'^{FEA} ，同时将二值水印 M^w 冗余构造成为大小为 $M \times N$ 的水印 M^{ww} ，根据矩阵 F'^{FEA} 中数值选择水印 M^{ww} 中像素与 2 个二值矩阵 M_1 、 M_2 异或，得到零水印 Z ，如式(1)所示。

$$Z(i, j) = \begin{cases} (M^{ww}(i, j) \oplus M_1(i, j)), & F'^{FEA}(i, j) = 0 \\ (M^{ww}(i, j) \oplus M_2(i, j)), & F'^{FEA}(i, j) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

在版权认证过程中，从图像中提取出大小为 $M \times N$ 的矩阵 F''^{FEA} ，根据矩阵 F''^{FEA} 中数值选择零水印 Z 中像素与 2 个二值矩阵 M_1 、 M_2 异或，得到版权认证图像 M'^{ww} ，如式(2)所示。

$$M'^{ww}(i, j) = \begin{cases} (Z(i, j) \oplus M_1(i, j)), & F''^{FEA}(i, j) = 0 \\ (Z(i, j) \oplus M_2(i, j)), & F''^{FEA}(i, j) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中， $i \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ 、 $j \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ 为矩阵中元素位置索引， M_1 和 M_2 均为 $M \times N$ 的随机生成的二值矩阵，当使用引发虚警的特征相似的图像进行版权认证时，从虚警图像中提取出与矩阵 F'^{FEA} 具有较高相似度的特征矩阵 F''^{FEA} ，矩阵 F''^{FEA} 由矩阵 F'^{FEA} 修改部分元素得到。特征矩阵的差异矩阵 D^F 和差异率 d^f ，以及随机矩阵的差异矩阵 D^M 如式(3)~式(5)所示。

$$D^F = \text{XOR}(F'^{FEA}, F''^{FEA}) \quad (3)$$

$$d^f = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \text{XOR}(F'^{FEA}(i, j), F''^{FEA}(i, j))}{MN} \quad (4)$$

$$D^M = \text{XOR}(M_1, M_2) \quad (5)$$

其中， D^F 和 D^M 为二值矩阵，分别表示特征差异和随机矩阵的差异，当 D^F 和 D^M 中的某一点为 0 时，表明在该点处不存在差异；当 D^F 和 D^M 中的某一点为 1 时，表明在该点处存在差异。在式(2)的版权认

证过程中，当 $D^M(i, j) = 0$ 时，即 $M_1(i, j) = M_2(i, j)$ ，满足 $Z(i, j) \oplus M_1(i, j) = Z(i, j) \oplus M_2(i, j)$ ，此时无论 $D^F(i, j)$ 的取值为 0 或 1，均满足 $M'^{ww}(i, j) = M^{ww}(i, j)$ ；当 $D^M(i, j) = 1$ 时，即 $M_1(i, j) \neq M_2(i, j)$ ，此时若 $D^F(i, j) = 1$ ，则 $M'^{ww}(i, j) \neq M^{ww}(i, j)$ ，若 $D^F(i, j) = 0$ ，则 $M'^{ww}(i, j) = M^{ww}(i, j)$ 。因此只有当 $D^F(i, j)$ 和 $D^M(i, j)$ 均为 1 时，版权认证得到的 $M'^{ww}(i, j)$ 会出现错误，由于 M_1 和 M_2 为随机二值矩阵，因此矩阵中数值不相同的概率为 $P(D^M(i, j) = 1) = 0.5$ ； F'^{FEA} 和 F''^{FEA} 分别为零水印构造和版权认证过程中所用到的图像特征，二者之间差异可由误码率 μ 表示，因此矩阵中数值不同的概率为 $P(D^F(i, j) = 1) = \mu$ 。

当 M_1 和 M_2 为随机二值矩阵时，特征索引分区域异或后，版权认证水印 M'^{ww} 中数值错误的概率为 $P(D^M(i, j) = 1)P(D^F(i, j) = 1) = 0.5\mu$ ，即版权认证水印的误码率约为 0.5μ 。

不同的特征提取算法往往具有不同的特点，如表 3 所示，当 2 幅图像的某一种特征相似度较高时，使用另一种特征提取算法提取到的特征相似度往往较低，可据此解决不相似图像的虚警问题。使用图像特征 M'_1 代替随机二值矩阵 M_1 ，以降低零水印算法的虚警率；使用由密钥生成的混沌二值矩阵 M'_2 代替 M_2 ，以提升零水印算法安全性。此时零水印构造和版权认证过程如式(6)和式(7)所示。

$$Z(i, j) = \begin{cases} (M^{ww}(i, j) \oplus M'_1(i, j)), & F'^{FEA}(i, j) = 0 \\ (M^{ww}(i, j) \oplus M'_2(i, j)), & F'^{FEA}(i, j) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$M'^{ww}(i, j) = \begin{cases} (Z(i, j) \oplus M''_1(i, j)), & F''^{FEA}(i, j) = 0 \\ (Z(i, j) \oplus M''_2(i, j)), & F''^{FEA}(i, j) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中， Z 为零水印， M^{ww} 为冗余水印， F'^{FEA} 和 F''^{FEA} 分别为零水印构造和版权认证过程中的图像特征， M'_1 和 M''_1 分别为零水印构造和版权认证过程中所用到的另一种特征， M'_2 为混沌二值矩阵， M'^{ww} 为版权认证后得到的冗余水印。

当 M'_1 和 M''_1 完全相同、 F'^{FEA} 和 F''^{FEA} 的误码率为 μ 时，版权冗余水印 M'^{ww} 的误码率约为 0.5μ ；当 F'^{FEA} 和 F''^{FEA} 完全相同、 F'^{FEA} 和 F''^{FEA} 二值均

衡、 M'_1 和 M''_1 之间误码率为 μ' 时，版权冗余水印 M'^{rw} 的误码率约为 $0.5\mu'$ 。即当一种特征相似度较高时，可由另一种特征的差异，避免版权冗余水印 M'^{rw} 的误码率过低，以达到降低虚警的目的。若 2 种特征相似度同时较高，可增加至 3 种特征或更多。构建索引密钥，索引矩阵中数值的数量与特征的数量相同，将冗余水印分成多个区域，每个区域与不同的特征异或，当少数的几种特征相似度较高时，可通过其他特征的差异，避免冗余水印 M'^{rw} 的误码率过低。

1.2.2 冗余水印与三值量化

将大小为 m_3m_4 的二值水印 M^w 冗余构造成为 m_3m_4R' 的冗余二值水印 M^{Rw} ，在冗余水印 M^{Rw} 中修改随机位置的二值数据，以模拟版权认证过程后得到的结果，修改数量为 $\beta m_3m_4R'$ ，其中 $\beta \in [0,1]$ 表示冗余水印 M^{Rw} 在版权认证后被修改的程度，矩阵 M^{Rw} 中每一个比特被修改的概率为

$$P(A_{i,j}^k) = \frac{\beta m_3m_4R'}{m_3m_4R'} = \beta \quad (8)$$

其中， $P(A_{i,j}^k)$ 为矩阵中元素 $M^{Rw}(i,j,k)$ 被修改的概率， $i \in \{1,2,3,\dots,m_3\}$ 、 $j \in \{1,2,3,\dots,m_4\}$ 、 $k \in \{1,2,3,\dots,R'\}$ 为矩阵 M^{Rw} 的下标索引， R' 为冗余构造水印的冗余度。 M^{Rw} 中数值被修改后，得到 M'^{rw} 版权认证冗余水印，以式(9)的方法去冗余化，得到矩阵 M'^w ，其中数值的取值范围为 $\{0,1,2,3,\dots,R'\}$ 。

$$M'^w(i,j) = \sum_{k=1}^{R'} M^{Rw}(i,j,k) \quad (9)$$

在矩阵 M'^w 中，每一个元素的改变量 $\Delta M'_{i,j}$ 的期望 $E(\Delta M'_{i,j})$ 为

$$E(\Delta M'_{i,j}) = P(A_{i,j}^k) R' = \beta R' \quad (10)$$

其中， $M'_{i,j}$ 表示矩阵 M'^w 中的某一元素 $k \in \{1,2,3,\dots,R'\}$ 。由于 $\beta \in [0,1]$ ，随着冗余度 R' 的增加， M'^w 中元素的改变量期望 $E(\Delta M'_{i,j})$ 也随之增大，即去冗余矩阵 M'^w 与 $R'M^w$ 之间相差的数值变大。为扩大不同图像的特征之间差异程度，在零水印版权认证过程中，使用三值量化处理矩阵

M'^w ，如式(11)所示。

$$M'_{in}{}^w(i,j) = \begin{cases} 0, & M'^w(i,j) < \alpha R' \\ 1, & R' - M'^w(i,j) < \alpha R' \\ 0.5, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中， R' 为冗余构造水印的冗余度， $\alpha \in [0,1]$ 为三值量化参数， $\alpha R'$ 和 $(1-\alpha)R'$ 为量化阈值。矩阵 M'^w 中，令每个数值的改变量为 $\Delta M'_{i,j}$ ，即

$$\Delta M'_{i,j} = |R'M^w(i,j) - M'^w(i,j)| = \begin{cases} M'^w(i,j), & M^w(i,j) = 0 \\ R' - M'^w(i,j), & M^w(i,j) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可得

$$M'_{in}{}^w(i,j) = \begin{cases} M^w(i,j), & M'^w(i,j) < \alpha R' \\ M^w(i,j), & R' - M'^w(i,j) < \alpha R' \\ 0.5, & \text{其他} \end{cases} = \begin{cases} M^w(i,j), & \Delta M'_{i,j} < \alpha R' \\ 0.5, & \Delta M'_{i,j} \geq \alpha R' \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知，当矩阵 M'^w 中数值的改变量 $\Delta M'_{i,j}$ 大于或等于三值量化阈值 $\alpha R'$ 时，矩阵 $M'_{in}{}^w$ 中对应位置的数值被标记成 0.5；当 $\Delta M'_{i,j}$ 小于三值量化阈值 $\alpha R'$ 时， $M'_{in}{}^w$ 中对应位置的数值会被标记为原本二值水印 M^w 的数值。由于版权提取过程中矩阵 M^{Rw} 中数值被随机修改，因此矩阵 M'^w 中每个数值的改变量 $\Delta M'_{i,j}$ 不完全相同，以参数 $\beta = 0.25$ 、 $R' = 16$ 进行测试，将二值水印图像冗余构造，修改随机位置数值并去冗余化，同时计算矩阵中所有元素的改变量 $\Delta M'_{i,j}$ ，其数值分布如图 5 所示。

由图 5 可知，矩阵中元素改变量 $\Delta M'_{i,j}$ 基本满足正态分布，因此根据式(10)、 M'^w 中元素的改变量期望 $E(\Delta M'_{i,j}) = \beta R'$ 和式(13)，可知认证前后的版权水印差异程度的参数 β 和三值量化参数 α 存在一定的关系，可根据 β 调整参数 α ，控制三值矩阵 $M'_{in}{}^w$ 中 0.5 数值的数量，为使三值量化后的矩阵 $M'_{in}{}^w$ 中多数数值为 0.5，应设定 $\alpha < \beta$ ；为使三值量化后的矩阵 $M'_{in}{}^w$ 中多数数值为 0 或 1，应设定 $\alpha > \beta$ 。

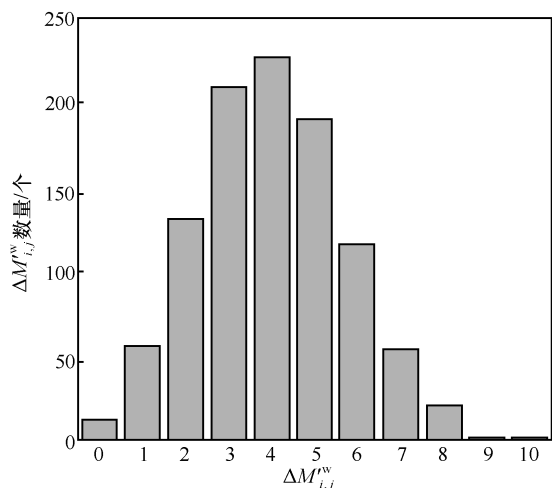


图 5 ΔM_{ij}^w 数值分布

使用二值水印图像的零水印算法在版权认证后，通常得到的是二值认证图像，当二值图像发生错误时，表现为数值 0 和 1 的互换。在本文提出的三值量化中，三值矩阵 M_{ij}^w 中的数值 0 和 1 主要来自水印图像 M^w ，用于表示版权信息，矩阵 M_{ij}^w 中的 0.5 表现为图像中的灰色像素点，主要用于遮蔽版权信息。当三值图像中灰色点较少时，图像主要表示原本的版权信息；当三值图像中灰色点较多时，图像主要信息被灰色替代，无法识别出版权信息。图 6 为三值图像中存在不同数量的灰色像素时对应的版权图像。

由于版权认证结果为三值矩阵，其中数值 0 和 1 难以出现错误，量化过程引入的数值 0.5 为原二值水印中不存在的数值，因此三值图像中灰色像素点的数量越多，版权信息受到的影响越大。为测量三值矩阵与版权信息之间的差异，可通过误码率参数计算，如式(14)所示。

$$B_{\text{tri}}^{\text{BER}} = \frac{p_{\text{count}}}{m_3 m_4} \quad (14)$$

其中， p_{count} 为三值矩阵与二值矩阵中对应位置数

值不同的元素个数， m_3, m_4 为二值矩阵和三值矩阵的大小，计算得到的误码率 $B_{\text{tri}}^{\text{BER}}$ 取值范围为 0~1。如图 6 中的三值图像所示，其中 0 和 1 完全来自水印图像 M^w ，因此灰色像素点所占比例就等于误码率 $B_{\text{tri}}^{\text{BER}}$ ，可以看出，当 $B_{\text{tri}}^{\text{BER}}$ 为 0.125 和 0.25 时，可识别出版权信息；当 $B_{\text{tri}}^{\text{BER}}$ 为 0.5 时，版权信息严重受损；当 $B_{\text{tri}}^{\text{BER}}$ 为 0.75 时，无法识别版权信息。

2 零水印的构造

在零水印构造中，首先从图像中提取频域特征和空域特征，再将空域特征、频域特征和版权水印冗余构造造成大小为 128×128 的矩阵，以频域特征为索引矩阵，用于挑选版权水印的像素点，分别与空域特征和密钥矩阵异或，得到零水印。

2.1 提取图像特征序列

从图像中提取空域特征^[22]，将大小为 $512 \times 512 \times 3$ 的彩色图像的亮度分量不重叠分块，为增加特征稳定性，令每个子块大小为 16×16 ，根据子块均值和亮度分量整体均值的大小关系构建特征，得到大小为 32×32 的空域特征 f^{SP} 。再使用离散余弦变换（DCT, discrete cosine transform）提取图像的频域特征^[3]，将彩色图像特征降维提取亮度分量，每个子块的大小为 2×2 ，计算子块均值构建成大小为 256×256 的矩阵，进行 DCT，将低频系数的正负性构建成图像频域特征。

图像空域特征和频域特征提取过程如图 7 所示。为使特征更加稳定，在低频系数中，除直流系数、与直流系数相邻的交流系数以外，选择 16 个系数，根据其正负性二值生成 16 bit 的二值序列，再以一倍冗余构造造成 32 bit 二值序列 f^{FR} 作为频域特征。



(a) 二值水印 (b) 12.5%灰色的三值水印 (c) 25%灰色的三值水印 (d) 50%灰色的三值水印 (e) 75%灰色的三值水印

图 6 三值图像中存在不同数量的灰色像素时对应的版权图像

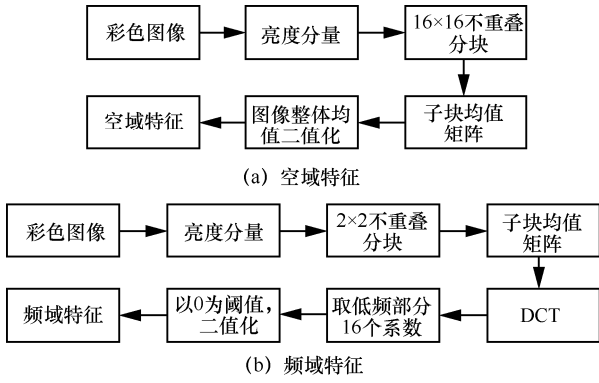


图 7 图像特征提取

2.2 冗余构造特征和版权水印

将大小为 32×32 的空域特征 f^{SP} 冗余构造成大小为 128×128 的特征 F^{SP} ，根据 32 bit 频域特征序列 f^{FR} 冗余构造 F^{FR} ，构造方法为

$$F^{SP} = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$c_{mn} = f^{SP} \quad (16)$$

$$F^{FR} = (c_1 \cdots c_k) \quad (17)$$

$$c_k(i, j) = f^{FR}(1, k) \quad (18)$$

其中， c_{mn} 为构造 F^{SP} 的子块， $m \in \{1, 2, 3, 4\}$ 、 $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ ，由 16 个 c_{mn} 共同组成大小为 128×128 的特征矩阵 F^{SP} ； c_k 为构造 F^{FR} 的子块， $k \in \{1, 2, 3, \dots, 32\}$ ，每个子块大小为 128×4 ， $i \in \{1, 2, 3, \dots, 128\}$ 、 $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ 为 c_k 内部元素的下标索引，由 32 个 c_k 共同组成大小为 128×128 的特征矩阵 F^{FR} 。同时将 32×32 的版权标识 w 不重叠分块，子块大小为 $\frac{32}{p} \times \frac{32}{q}$ ，生成大小为 $(4p) \times (4p)$ 的混沌矩阵 L ，将其中数值量化成 pq 种，每种数值的数量相同，保存为子块排列方式密钥 K_1 ，根据式(19)和式(20)的方法，将子块冗余排布。

$$w = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{p1} & \cdots & b_{pq} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$W(i, j) = \begin{cases} b_{11}, & K_1(i, j) = 1 \\ b_{12}, & K_1(i, j) = 2 \\ \vdots & \\ b_{pq}, & K_1(i, j) = pq \end{cases} \quad (20)$$

其中， p 和 q 为子块排布位置索引， $i \in \{1, 2, 3, \dots, 4p\}$ 、 $j \in \{1, 2, 3, \dots, 4q\}$ ，冗余构造的 W 矩阵由 b_{pq} 组成，总大小为 128×128 的冗余版权标识 W 。

空域特征和频域特征的冗余构造过程如图 8(a)和图 8(b)所示，令 $p=2$ 、 $q=2$ ，冗余构造版权水印步骤及得到的结果如图 8(c)所示。

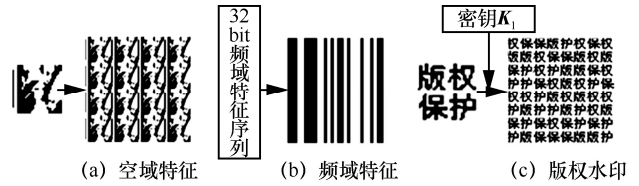


图 8 冗余构造过程

2.3 特征索引的区域异或

将冗余构造后的频域特征 F^{FR} 作为索引矩阵，将冗余版权标识 W 分割成 2 个区域，分别与冗余构造的空域特征 F^{SP} 和随机生成的二值矩阵密钥 K_2 异或，得到零水印 Z ，如式(21)所示。

$$Z(i, j) = \begin{cases} (W(i, j) \oplus F^{SP}(i, j)), & F^{FR}(i, j) = 0 \\ (W(i, j) \oplus K_2(i, j)), & F^{FR}(i, j) = 1 \end{cases} \quad (21)$$

其中， $i \in \{1, 2, 3, \dots, 128\}$ 、 $j \in \{1, 2, 3, \dots, 128\}$ 为像素位置索引。特征索引区域异或流程如图 9 所示。

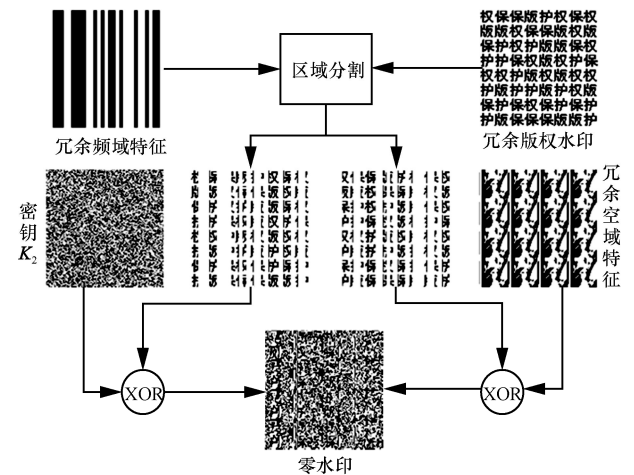


图 9 特征索引区域异或流程

3 零水印版权认证

版权水印提取过程和零水印生成过程相似，使用相同的方法从图像提取特征并冗余构造，由冗余图像特征和零水印提取出冗余构造的版权水印，将

其去冗余化，使用三值量化得到认证结果。

3.1 版权水印提取

使用 2.1 节方法提取特征, 2.2 节方法冗余构造。从需要认证版权的图像中提取大小为 128×128 的空域特征 F^{SP} 和频域特征 F^{FR} , 根据频域特征挑选零水印 Z 中的像素点, 分别与空域特征 F^{SP} 和密钥 K_2 异或, 得到冗余版权水印 W' , 如式(22)所示。

$$W'(i, j) = \begin{cases} (Z(i, j) \oplus F^{SP}(i, j)), & F^{FR}(i, j) = 0 \\ (Z(i, j) \oplus K_2(i, j)), & F^{FR}(i, j) = 1 \end{cases} \quad (22)$$

其中, $i \in \{1, 2, 3, \dots, 128\}$ 、 $j \in \{1, 2, 3, \dots, 128\}$ 为矩阵内元素索引。冗余版权水印提取过程如图 10 所示, 从攻击后的图像中提取冗余的频域特征 F^{FR} 和空域特征 F^{SP} , 然后根据零水印信息得到冗余版权水印 W' 。

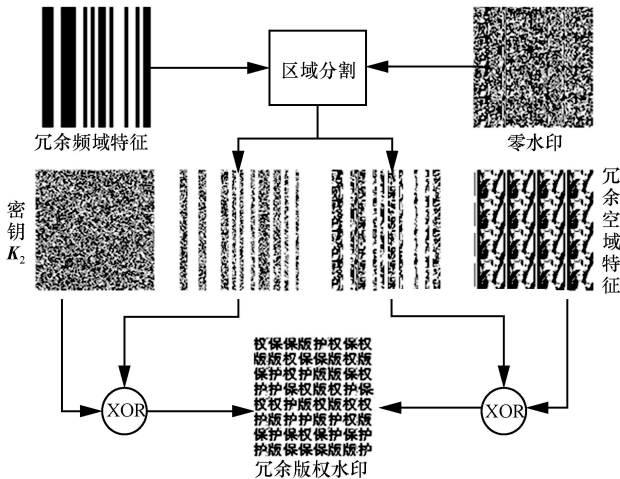


图 10 冗余版权水印提取过程

3.2 水印去冗余及三值量化

划分冗余版权水印 W' 为不重叠的子块, 子块大小与 2.2 节中一致, 为 $\frac{32}{p} \times \frac{32}{q}$, 将子块标记为 $b'_{m,n}$, 其中 $m \in \{1, 2, 3, \dots, 4p\}$ 、 $n \in \{1, 2, 3, \dots, 4q\}$, 根据排布方式密钥 K_1 去冗余化, 如式(23)所示。

$$\begin{cases} a_{11} = a_{11} + b'_{m,n}, K_1(m, n) = 1 \\ a_{12} = a_{12} + b'_{m,n}, K_1(m, n) = 2 \\ \vdots \\ a_{pq} = a_{pq} + b'_{m,n}, K_1(m, n) = pq \end{cases} \quad (23)$$

其中, $m \in \{1, 2, 3, \dots, 4p\}$ 、 $n \in \{1, 2, 3, \dots, 4q\}$ 为子块位置索引, $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{pq}$ 是大小为 $\frac{32}{p} \times \frac{32}{q}$ 、初值为

0 的矩阵, 将全部的 $b'_{m,n}$ 经过式(23)和式(24)的运算后得到大小为 32×32 水印 w' 。

$$w' = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1} & \dots & a_{pq} \end{pmatrix} \quad (24)$$

其中, w' 中每个像素点的数值范围为 0~16。根据式(25), 将水印 w' 量化成只有 3 个数值的矩阵 w^{final} , 3 个数值为 $\{0, 0.5, 1\}$, 将 w^{final} 作为最终提取结果, 完成版权认证。

$$w^{final}(i, j) = \begin{cases} 0, & w'(i, j) \leq s_1 \\ 1, & w'(i, j) \geq s_2 \\ 0.5, & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

其中, $i \in \{1, 2, 3, \dots, 32\}$ 、 $j \in \{1, 2, 3, \dots, 32\}$ 为 w^{final} 内像素索引, s_1 和 s_2 为 2 个量化阈值即 $s_1 = \alpha R'$ 、 $s_2 = (1 - \alpha)R'$, 满足 $0 \leq s_1 \leq s_2 \leq 16$, α 为三值量化参数, R' 为版权水印冗余度。当量化阈值为 $s_1 = 1$ 、 $s_2 = 15$ 时, 图 11 为冗余版权水印 W' 经过去冗余三值量化后得到最终三值矩阵 w^{final} 的过程。

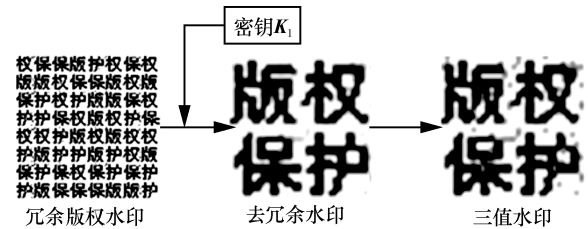


图 11 去冗余三值量化

4 实验参数说明及结果分析

为验证本文低虚警零水印方案的有效性, 从眼底医学图像、头部医学图像、肺部 CT 图像、USC-SIPI 图像、Intel 图像分类等数据集中选取部分彩色图像进行实验, 并与零水印方案^[8,12,14-16]进行对比, 对比数据均通过对文献中零水印方案复现得到。复现文献[14]所设定的最大阶数为 5; 复现文献[15]中 3 种极谐变换最大阶数均为 18; 复现文献[16]使用原文推荐参数, 将得到的 3 个零水印相互异或, 组成一个零水印进行实验。

所有对比实验均以 $512 \times 512 \times 3$ 大小的彩色图像和 32×32 的二值水印进行实验, 在 MATLAB 2015b 软件平台下进行实验。以误码率为相似度量标准, 其中本文算法进行了三值量化, 使用

式(14)计算三值图像与二值图像的误码率 $B_{\text{tr}}^{\text{BER}}$ 参数。为便于与其他文献对比，将三值认证图像量化成二值图像（将三值图像中的 0.5 置 0）计算误码率。

4.1 量化方式及参数选择

将冗余水印进行多值量化，引入除 0 和 1 以外的数值遮蔽原始二值信息，测试三值、四值和五值量化的 3 种量化方式，以表现不同量化方法对量化后版权图像的影响。三值量化方式如式(11)所示，四值和五值的量化方式如下：在三值量化的基础上，以参数 α 量化出数值 0 和 1，将剩余数值按照其数值范围等分区间，进一步量化成 {0.33,0.66} 和 {0.25,0.5,0.75}。量化过程对二值信息的遮蔽程度由冗余水印被修改程度 β 和三值量化参数 α 确定。在冗余度 $R'=16$ 的条件下进行实验，对比不同量化方式的结果，如表 4 所示。

表 4 中，当 β 为 0.1 和 0.3 时，可由量化参数 α 控制三值量化的结果是否显示出版权信息，而对于四值和五值量化，不同 α 的量化结果均显示出了版权信息，表明当冗余水印被修改程度较小时，四值和五值量化无法避免虚警问题。

由 1.2.2 节中的结论可知，三值量化参数 α 需要根据参数 β 调试，以达到区分虚警图像和抵抗攻击的目的。对引发虚警问题的图 1、图 3、图 4 中的图像进行测试，对每一组虚警图像生成零水印并

进行版权认证，提取到冗余水印后，计算 2 幅图像的误码率，冗余度参数 $R'=16$ 。计算得到的冗余水印误码率即参数 β ，在三值量化参数 α 不变的情况下，冗余版权水印差异 β 越大，得到的三值认证图像与正确水印的差异也越大，因此，为避免虚警问题，当 β 较小时，应使得到的三值量化矩阵与正确水印具有较大差异。

经过测试，最小的冗余版权水印的差异参数 $\beta=0.0776$ ，为解决虚警问题，应使参数 $\alpha < 0.0776$ ，选择 $\alpha=0.0625$ 进行后续实验。

4.2 虚警测试

在虚警测试中，先将一幅图像生成零水印，再使用与其特征相似的虚警图像进行版权认证。选用的图像均易导致特征相似，从而引发虚警问题。

4.2.1 不相似图像的虚警测试

对于不相似图像虚警问题，选用图 3、图 4 中可引发传统零水印算法^[3,22]虚警问题的图像进行实验，主要用于测试本文提出的方案能否解决原有的虚警问题，实验及对比结果如表 5 和表 6 所示。

表 5 和表 6 分别为图 3 和图 4 的虚警测试结果。文献[8,14-16]是基于图像不变矩特征和 SIFT 特征点的零水印算法，提取的特征与空域特征^[22]、频域特征^[3]具有较大差异，因此均不存在严重的虚警问题。文献[12]将彩色图像构造成张量并展开后，根据子块均值和整体均值之间的稳定关系构造特征，

表 4 不同量化方式的量化结果

修改程度	量化方式	量化参数			
		$\alpha = \frac{1}{R'}$	$\alpha = \frac{3}{R'}$	$\alpha = \frac{5}{R'}$	$\alpha = \frac{7}{R'}$
$\beta = 0.1$	三值		版权保护	版权保护	版权保护
	四值	版权保护	版权保护	版权保护	版权保护
	五值	版权保护	版权保护	版权保护	版权保护
$\beta = 0.3$	三值				版权保护
	四值	版权保护	版权保护	版权保护	版权保护
	五值	版权保护	版权保护	版权保护	版权保护

表 5 频域特征相似图像虚警测试

图像	文献[8]	文献[12]	文献[14]	文献[15]	文献[16]	本文三值量化	本文二值量化
图 3(a)	0.375 0	0.100 6	0.335 0	0.499 0	0.411 1	0.775 4	0.444 3
图 3(b)	0.375 0	0.426 8	0.352 5	0.464 8	0.398 4	0.975 6	0.544 0
图 3(c)	0.250 0	0	0.247 1	0.471 7	0.279 3	0.802 7	0.460 9
图 3(d)	0.437 5	0.238 3	0.337 9	0.450 2	0.350 6	0.890 6	0.511 7
图 3(e)	0.375 0	0	0.292 0	0.461 9	0.328 1	0.779 3	0.433 6

表 6 空域特征相似图像虚警测试

图像	文献[8]	文献[12]	文献[14]	文献[15]	文献[16]	本文三值量化	本文二值量化
图 4(a)	0.375 0	0	0.250 0	0.416 0	0.228 5	0.981 5	0.550 8
图 4(b)	0.406 3	0.324 2	0.252 9	0.429 7	0.282 2	0.725 6	0.435 6
图 4(c)	0.312 5	0	0.210 9	0.444 3	0.350 6	0.982 4	0.549 8
图 4(d)	0.343 8	0	0.333 0	0.466 8	0.304 7	0.970 7	0.546 9
图 4(e)	0.312 5	0	0.243 2	0.441 4	0.109 4	0.775 4	0.449 2

因此与空域特征提取算法^[22]具有一定的相似度。同时，由于其将版权标识冗余构造，导致提取结果的虚警程度进一步上升，出现了较严重的虚警问题。本文算法同时提取了图像的空域特征和频域特征，当某一种特征相似度较高时，可由另一种特征扩大生成零水印的差异，并通过三值量化操作将差异扩大显示，解决虚警问题。

4.2.2 相似图像的虚警测试

对于相似图像的虚警问题，不同类型的相似图像具有不同的特点，如医学图像往往表现为细节上的微弱差异，自然图像和遥感图像往往表现为拍摄视角的变化和对象状态的变化等。使用多种类型的相似图像进行虚警测试，以验证本文算法对相似图像零水印的分辨性，并与其他文献对比。选取如图 12

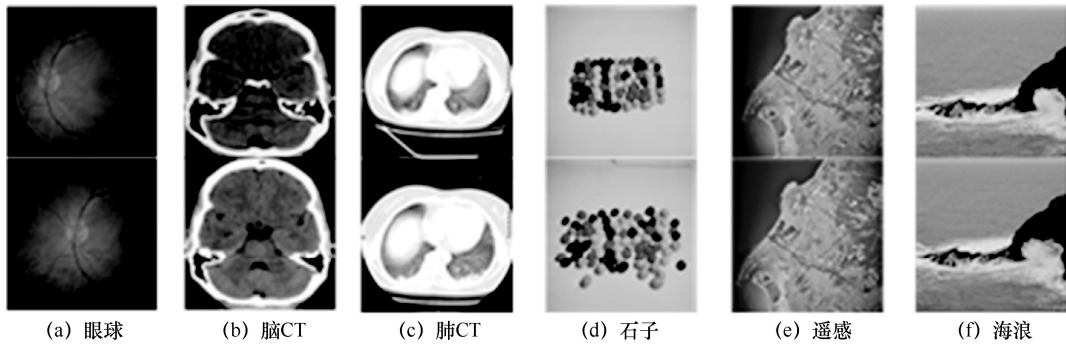


图 12 多组不同类型的相似图像

所示的相似图像进行虚警测试,测试结果如表 7 所示。

文献[8]将 SIFT 特征点描述子构建成矩阵提取特征,当检测的特征点发生变化时,会使特征发生较大变化,因此在图 12(e)、图 12(f)的拍摄视角变化图中,出现了一定程度的虚警问题。文献[12]主要根据子块均值与整体均值构建特征,并将版权水印冗余构造,导致在多种相似图像之间均存在虚警问题。文献[14,16]中,由于矩特征对视角和结构的变化敏感,对图像细节不敏感,因此在图 12(a)中,相似图像的虚警程度较高。文献[15]从图像

中提取 3 种 PHT 矩,挑选矩系数构造特征,由于计算的 3 种矩特征具有一定的差异,因此在虚警测试中不同图像之间差异可以表现为特征差异,使相似图像生成的零水印具有较高的可辨识度。本文算法中同样提取了 2 种特征构造零水印,因此可避免相似图像之间的虚警问题。

4.3 稳健性测试

为了测试本文算法的稳健性能,选用眼底和头部医学图像、遥感图像、自然图像进行测试,稳健测试图像如图 13 所示。

表 7 相似图像虚警测试结果

图像	文献[8]	文献[12]	文献[14]	文献[15]	文献[16]	本文三值量化	本文二值量化
图 12(a)	 0.375 0	 0	 0.226 6	 0.429 7	 0.068 4	 0.766 6	 0.428 7
图 12(b)	 0.500 0	 0	 0.328 1	 0.425 8	 0.342 8	 0.842 8	 0.476 6
图 12(c)	 0.343 8	 0	 0.287 1	 0.482 4	 0.370 1	 0.845 7	 0.454 1
图 12(d)	 0.406 3	 0.019 5	 0.323 2	 0.463 9	 0.333 0	 0.811 5	 0.442 4
图 12(e)	 0.250 0	 0	 0.317 4	 0.455 1	 0.371 1	 0.824 2	 0.477 5
图 12(f)	 0.250 0	 0	 0.235 4	 0.456 1	 0.276 4	 0.644 5	 0.356 5

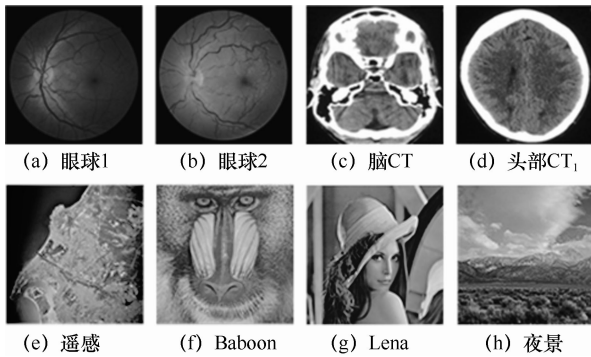


图 13 稳健性测试图像

表 8 为图 13 中多幅图像在非几何攻击下的平均误码率和最大误码率。文献[8]基于 SIFT 特征点描述子提取图像特征，虽然 SIFT 特征点具备一定的稳健性，但不足以抵抗测试中的几种非几何攻击。文献[12]是在大小为 64×64 的水印下进行的实验，在本次实验的复现中，为统一测试，使用了更

小的水印图像，从而使冗余度更高，因此稳健性强于文献[12]水平。文献[14-16]基于图像矩特征构造零水印，具有共同的特点，在高强度噪声攻击下稳健性不佳。文献[14]在构造特征过程中，利用矩系数同行同列的系数大小关系构造特征，因此可以计算更少的阶数，增加了特征稳定性，使其相比于另外 2 种基于矩的零水印算法^[15-16]具有更高的稳健性。本文算法在特征提取阶段，提取了图像的 2 种特征^[3,22]，每种特征在非几何攻击中均具有较强的稳定性，在图像受攻击后仍能稳定不变，多幅测试图像的最大误码率小于 0.070 0，因此本文算法对噪声、滤波、JPEG 压缩攻击具有较强稳健性。

表 9 为几何攻击下的平均误码率和最大误码率。文献[8]提取的 SIFT 特征点对几何攻击具有较高稳健性，但将特征点描述子排列构造成矩阵后，若部分特征点缺失或错位，则会导致描述子的排列

表 8 图 13 中多幅图像在非几何攻击下的平均误码率和最大误码率

攻击方法	攻击参数	文献[8]		文献[12]		文献[14]		文献[15]		文献[16]		本文二值量化	
		平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER
高斯	0.050 0	0.367 2	0.468 8	0	0	0.064 1	0.149 4	0.111 7	0.251 0	0.109 4	0.206 1	0.026 7	0.062 5
噪声	0.100 0	0.382 8	0.593 8	0.002 9	0.010 7	0.075 7	0.155 3	0.189 6	0.376 4	0.178 5	0.388 7	0.040 9	0.066 4
椒盐	0.050 0	0.316 4	0.531 3	0	0	0.038 2	0.083 0	0.098 9	0.188 6	0.086 5	0.169 9	0.007 2	0.013 7
噪声	0.100 0	0.367 2	0.656 3	0	0	0.061 8	0.151 4	0.120 3	0.210 1	0.123 8	0.195 3	0.016 1	0.023 4
中值	5×5	0.281 3	0.437 5	0	0	0.014 0	0.021 5	0.076 9	0.096 7	0.046 4	0.078 1	0.008 3	0.024 4
滤波	11×11	0.359 4	0.437 5	0	0	0.055 2	0.074 2	0.125 5	0.241 2	0.114 5	0.238 3	0.017 0	0.052 7
维纳	5×5	0.273 4	0.406 3	0	0	0.009 5	0.019 5	0.049 8	0.071 3	0.035 9	0.067 4	0.004 2	0.013 7
滤波	11×11	0.390 6	0.468 8	0	0	0.038 0	0.050 8	0.118 4	0.175 8	0.103 0	0.203 1	0.012 5	0.026 4
JPEG	10%	0.363 3	0.468 8	0	0	0.049 6	0.132 8	0.131 7	0.271 5	0.086 8	0.166 0	0.013 1	0.023 4
压缩	15%	0.332 0	0.531 3	0	0	0.041 0	0.109 4	0.092 3	0.217 8	0.095 6	0.172 0	0.011 4	0.019 5

表 9 几何攻击下的平均误码率和最大误码率

攻击方法	攻击参数	文献[8]		文献[12]		文献[14]		文献[15]		文献[16]		本文二值量化	
		平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER	平均 BER	最大 BER
剪切	左上 1/32	0.023 4	0.093 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001 2	0.004 9
	右下 1/16	0.019 5	0.093 8	0	0	0.202 1	0.301 6	0.228 4	0.377 9	0.178 4	0.278 4	0.002 7	0.013 7
旋转	顺时针 1°	0.128 9	0.152 3	0	0	0.001 8	0.005 9	0.003 8	0.019 5	0.001 5	0.002 6	0.047 5	0.137 7
	逆时针 1.5°	0.132 8	0.160 2	0	0	0.002 4	0.008 8	0.007 5	0.019 5	0.001 9	0.002 4	0.079 8	0.145 5
平移	向右 1 向下 2	0.109 4	0.187 5	0	0	0.109 7	0.142 6	0.176 7	0.253 7	0.178 8	0.290 0	0.046 0	0.081 1
	向左 2 向上 1	0.089 8	0.218 8	0	0	0.111 6	0.158 2	0.195 8	0.303 8	0.179 6	0.306 6	0.043 6	0.083 0
缩放	0.500 0	0.214 8	0.343 8	0	0	0.003 1	0.009 8	0.003 2	0.047 9	0.016 7	0.032 2	0.000 7	0.004 9
	1.500 0	0.074 2	0.187 5	0	0	0.000 7	0.002 9	0.004 9	0.025 4	0.004 4	0.015 6	0	0.001 0

方式发生改变,降低稳健性。文献[12]将版权水印冗余,构造的操作提升了算法稳健性。文献[14-16]基于矩特征构造零水印,由于矩特征良好的缩放和旋转不变性,对该2种攻击具有强的稳健性。但同时由于极谱不变矩的特性,对剪切和平移攻击稳健性不佳。在低强度的边角剪切攻击中,由于所剪切的未用于计算矩特征,因此文献[14-16]在左上角剪切 $\frac{1}{32}$ 的攻击中,误码率均为0。本文算法在空域特征^[22]提取算法的基础上,选用了更大的分块方式,增加了特征稳定性;在频域特征^[3]提取算法的基础上,在低频部分选择16个交流系数,增加了特征稳定性,因此在低强度的几何攻击下具有较强稳健性。

5 结束语

针对由特征相似引起的虚警问题,分析了零水印虚警问题的产生原因,提出了区域异或算法,融合2种特征构建零水印,当某一特征相似度过高时,由另一特征避免不同图像生成的零水印过于相似。在版权认证阶段,提出了三值量化算法,将冗余版权图像去冗余后,进行三值量化,扩大表示图像特征差异,使虚警图像和受攻击图像的认证结果具有良好的区分度。在水印冗余构造和区域异或算法中加入了混沌矩阵并保存为密钥,提升了算法的安全性,混沌矩阵可由混沌系统根据密钥生成,使密钥便于用户保存。本文提出的零水印算法使用空域特征和频域特征共同构造零水印,具有较低的虚警率,但仍然不能完全避免零水印的虚警问题,并且稳健性主要依赖于特征提取算法,当提取到的特征稳健性不佳时,算法整体稳健性会急剧下降。未来将通过增加提取特征的种类、使用包含多种攻击的稳健特征提取算法来弥补本文的不足之处。

参考文献:

- [1] 黄勤龙, 马兆丰, 傅镜艺, 等. 云计算环境中支持隐私保护的数字版权保护方案[J]. 通信学报, 2014, 35(2): 95-103.
HUANG Q L, MA Z F, FU J Y, et al. Privacy-preserving digital rights management scheme in cloud computing[J]. Journal on Communications, 2014, 35(2): 95-103.
- [2] 温泉, 孙铁锋, 王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214-216.
WEN Q, SUN T F, WANG S X. Concept and application of zero-watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216.
- [3] LIU J, LI J B, MA J X, et al. A robust multi-watermarking algorithm for medical images based on DTCWT-DCT and henon map[J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 700.
- [4] LIU J, LI J B, CHENG J R, et al. A novel robust watermarking algorithm for encrypted medical image based on DTCWT-DCT and chaotic map[J]. Computers, Materials & Continua, 2019, 61(2): 889-910.
- [5] WU X Q, LI J B, TU R, et al. Contourlet-DCT based multiple robust watermarks for medical images[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(7): 8463-8480.
- [6] SHAIK A, MASILAMANI V. Zero-watermarking in transform domain and quadtree decomposition for under water images captured by robot[J]. Procedia Computer Science, 2018, 133: 385-392.
- [7] 吴德阳, 赵静, 汪国平, 等. 一种基于改进奇异值和子块映射的图像零水印技术[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 85-97.
WU D Y, ZHAO J, WANG G P, et al. An image zero watermarking technology based on ameliorated singular value and subblock mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 85-97.
- [8] LIU J L, LI J B, CHEN Y, et al. A robust zero-watermarking based on SIFT-DCT for medical images in the encrypted domain[J]. Computers, Materials & Continua, 2019, 61(1): 363-378.
- [9] FAN D, LI Y Y, GAO S, et al. A novel zero watermark optimization algorithm based on Gabor transform and discrete cosine transform[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2020, doi: 10.1002/cpe.5689.
- [10] SHI S S, LUO T, HUANG J T, et al. A novel HDR image zero-watermarking based on shift-invariant shearlet transform[J]. Security and Communication Networks, 2021, 2021: 6662700.
- [11] FAN T Y, CHAO H C, CHIEU B C. Lossless medical image watermarking method based on significant difference of cellular automata transform coefficient[J]. Signal Processing: Image Communication, 2019, 70: 174-183.
- [12] JIANG F F, GAO T G, DE LI. A robust zero-watermarking algorithm for color image based on tensor mode expansion[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(11/12): 7599-7614.
- [13] 肖振久, 姜东, 张晗, 等. 增强奇异值分解的自适应零水印[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(1): 1-12.
XIAO Z J, JIANG D, ZHANG H, et al. Adaptive zero-watermarking algorithm based on boost normed singular value decomposition[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(1): 1-12.
- [14] WANG W B, LI Y, LIU S L. A polar complex exponential transform-based zero-watermarking for multiple medical images with high discrimination[J]. Security and Communication Networks, 2021, 2021: 6615678.
- [15] KANG X B, ZHAO F, CHEN Y J, et al. Combining polar harmonic transforms and 2D compound chaotic map for distinguishable and robust color image zero-watermarking algorithm[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2020, 70: 102804.
- [16] XIA Z Q, WANG X Y, HAN B, et al. Color image triple zero-watermarking using decimal-order polar harmonic transforms and chaotic system[J]. Signal Processing, 2021, 180: 107864.
- [17] XIA Z Q, WANG X Y, ZHOU W J, et al. Color medical image lossless watermarking using chaotic system and accurate quaternion polar harmonic transforms[J]. Signal Processing, 2019, 157: 108-118.
- [18] YAMNI M, KARMOUNI H, SAYYOURI M, et al. Robust zero-watermarking scheme based on novel quaternion radial fractional Charlier moments[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021,

- 80(14): 21679-21708.
- [19] XIA Z Q, WANG X Y, WANG C P, et al. Local quaternion polar harmonic Fourier moments-based multiple zero-watermarking scheme for color medical images[J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 216: 106568.
- [20] XIA Z Q, WANG X Y, LI X X, et al. Efficient copyright protection for three CT images based on quaternion polar harmonic Fourier moments[J]. Signal Processing, 2019, 164: 368-379.
- [21] DEVI B P, SINGH K M, ROY S. New copyright protection scheme for digital images based on visual cryptography[J]. IETE Journal of Research, 2017, 63(6): 870-880.
- [22] 熊祥光. 空域强稳健零水印方案[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 160-175.
- XIONG X G. A zero watermarking scheme with strong robustness in spatial domain[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1): 160-175.
- [23] FIERRO-RADILLA A, NAKANO-MIYATAKE M, CEDILLO-HERNANDEZ M, et al. A robust image zero-watermarking using convolutional neural networks[C]//Proceedings of 2019 7th International Workshop on Biometrics and Forensics (IWBF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [24] LIU X Y, SUN Y Y, WANG J H, et al. A novel zero-watermarking scheme with enhanced distinguishability and robustness for volumetric medical imaging[J]. Signal Processing: Image Communication, 2021, 92: 116124.
- [25] LIU X Y, LOU J T, WANG Y F, et al. Discriminative and robust zero-watermarking scheme based on completed local binary pattern for authentication and copyright identification of medical images[C]//Imaging Informatics for Healthcare, Research, and Applications. Bellingham: SPIE Press, 2018, 10579: 381-389.
- [26] ZOU B J, DU J Y, LIU X Y, et al. Distinguishable zero-watermarking scheme with similarity-based retrieval for digital rights management of fundus image[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(21): 28685-28708.

[作者简介]



吴德阳 (1992-), 男, 广西钦州人, 燕山大学博士生, 主要研究方向为信息隐藏与数字水印。

胡森 (1997-), 男, 辽宁沈阳人, 辽宁工程技术大学硕士生, 主要研究方向为信息隐藏与数字水印。

王苗苗 (1995-), 女, 辽宁大连人, 辽宁工程技术大学硕士生, 主要研究方向为信息隐藏与数字水印。

金海波 (1983-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为复杂系统可靠性理论。

曲长波 (1963-), 男, 辽宁葫芦岛人, 辽宁工程技术大学高级工程师, 主要研究方向为信息隐藏与数字水印。

唐勇 (1963-), 男, 四川遂宁人, 博士, 燕山大学教授, 主要研究方向为数字媒体处理、数字仿真。

《通信学报》第十届编辑委员会

顾 问： 邬江兴 刘韵洁 方滨兴 于 全 郑建华 费爱国
何 友 尹 浩 陆建华 陆 军 姚富强 沈学民
王怀民 王金龙 崔铁军

主任委员：张 平

副主任委员：张延川 马建峰 杨 震
沈连丰 陶小峰 刘华鲁

委 员：

丁 群	王汝言	王良民	龙 军	卢建民	田 辉	田有亮
田俊峰	朱洪波	仲 红	任保全	刘西蒙	许文俊	李 伊
李少谦	李凤华	李玉峰	李建东	李陶深	杨 亮	吴 怡
吴 巍	吴启晖	吴晓平	沙学军	沈玉龙	宋令阳	宋铁成
张士兵	张云勇	张玉清	张钦宇	张朝阳	陈 巍	陈山枝
陈后金	范九伦	林金朝	欧阳缮	易东山	金 石	周一青
周武旻	周 亮	桂 冠	贾 焰	夏银水	袁东风	钱志鸿
倪国新	徐立中	郭 庆	郭 磊	郭渊博	黄 韬	黄建伟
黄梦醒	崔琪楣	梁永生	隆克平	普园媛	裴庆祺	谭晓衡

Shuguang Cui (美国)

Yi Qian (美国)

Shiping He (美国)

Jiangzhou Wang (英国)

Wen Tong (加拿大)