

基于改进颜色空间的彩色图像双水印算法

朱婷鸽^{1,2,3†}, 曹海龙¹, 刘颖^{1,2,3}, 毕萍^{1,2,3}

(1. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121; 2. 电子信息现场勘验应用技术公安部实验室, 西安 710121; 3. 陕西省无线通信与信息处理技术国合基地, 西安 710121)

摘要: 基于保护图像原始特征信息和携带标识信息的多用途需求, 提出一种彩色图像双水印算法. 其中一个水印是图像特征, 另一个水印是标识水印. 首先, 对图像进行 Curvelet 变换提取纹理特征; 其次, 对 YCbCr 改进型颜色空间 $Y'Cb'Cr'$ 的 Y' 通道分块后进行 DCT 变换, 用量化索引方式在每块 DCT 系数 SVD 变换后的最大奇异值上嵌入第 1 个纹理特征水印; 再次, 对 Cb' 和 Cr' 通道进行 Curvelet 变换, 并对低频系数进行联合, 根据能量分布自适应嵌入第 2 个水印图; 然后, 对嵌入水印后的 3 个通道频域系数进行逆变换得到空间图, 并将该图转换到 RGB 空间得到含双水印的彩色图像; 最后, 对所提出算法的性能进行验证, 并与相关算法通过对比的科学实验方法作比较, 实验结果表明嵌入图像的双水印具有良好的不可见性和鲁棒性, 特征水印能够对图像原始纹理特征进行有效的保护.

关键词: 数字水印; 彩色图像; Curvelet 变换; 纹理特征; YCbCr; $Y'Cb'Cr'$; 量化索引

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

Dual watermarking algorithm for color image based on improved color space

ZHU Ting-ge^{1,2,3†}, CAO Hai-long¹, LIU Ying^{1,2,3}, BI Ping^{1,2,3}

(1. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China; 2. Key Laboratory of Electronic Information Application Technology for Scene Investigation, Ministry of Public Security, Xi'an 710121, China; 3. International Joint Research Center for Wireless Communication and Information Processing Technology of Shaanxi Province, Xi'an 710121, China)

Abstract: This paper proposes a dual watermarking algorithm for protecting the original feature information and carrying watermark information. One of the dual watermarks is image feature, and the other is the logo watermark. Firstly, Curvelet transformation is used to extract images texture features, which is considered as a feature watermark. Then, in the improved YCbCr color space $Y'Cb'Cr'$, Y' component is divided into blocks, which is performed DCT transformation and SVD transformation in turn, and the feature watermark is embedded on the maximum singular value of each block by quantization index. Cb' and Cr' components are performed Curvelet transformation, their coefficients of low frequency are analyzed, and the second watermark is adaptively embedded according to the energy distribution. Furthermore, an improved space map is obtained by inverting the frequency coefficients of the three channels embedded in the watermark and converting the graph into the RGB space to obtain the color image with double watermarks. Finally, the performance of the proposed algorithm is verified, and compared with related algorithms through scientific experiment methods, the experimental results show that the double watermark embedded image has good invisibility and robustness, and the watermark of characteristics has an effective protection of the original image texture feature.

Keywords: digital watermarking; color image; Curvelet transform; textural features; YCbCr; $Y'Cb'Cr'$; quantized index

0 引言

近年来,随着数字多媒体技术的发展,人们的日常生活丰富多彩,但是也给恶意篡改等非法行为带来了便利. 对图像进行加密^[1]是保护图像重要信息的一种有效方式. 数字图像水印就是图像安全领域一

项重要的应用技术,通过信息隐藏的方式^[2]让载体图像携带其纹理信息、边缘信息、颜色信息等^[3],或者携带预先设定好的特定信息,达到内容认证^[4]、版权保护^[5]、提取私有信息^[6]等目的. 根据添加水印的域不同,图像水印分为基于空域的数字水印和基于变换域

收稿日期: 2017-11-29; 修回日期: 2018-04-01.

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目 (16JK1691); 公安部科技强警项目 (2016GABJC51); 陕西省国际科技合作与交流计划项目 (2015KW-005).

†通讯作者. E-mail: tgzhu114@163.com.

的数字水印. 在变换域的处理中离散余弦变换(DCT)具有很好的能量聚集度,小波变换具有时频、多分辨率分析特性. 曲波变换不仅具有多分辨率特性,而且能够提取图像中的方向信息. 相应地,基于DCT变换域的水印算法^[7],基于小波变换域(DWT)的数字水印算法^[8-9],以及基于曲波变换的算法被提出,这些算法在水印领域发挥了巨大的作用^[10]. 与传统空域数字图像水印相比,变换域数字图像水印具有更好的视觉不见特性和鲁棒性,且嵌入容量也有了很大提高. 在此之后,出现了不同方法相结合的基于变换域的图像双水印算法. 例如,文献[11]就是将图像进行整数小波变换后的系数再进行奇异值分解(SVD)后嵌入水印的算法. 将SVD和DWT相结合,在对图像进行小波变换后得到小波系数,进行SVD变换并嵌入水印信息^[12-13]. 还有将DCT变换、DWT变换、SVD变换相结合的数字水印技术^[14-15]用以提高水印的鲁棒性和视觉不见性. 以上数字图像水印算法有基于灰度图的,也有基于彩色图像的,现实生活中以彩色图像居多,因此近几年基于彩色图像的数字水印技术得到了快速发展. 其中包括将灰度图空间域数字水印技术^[16]应用到彩色图像上,但更多的是建立在彩色图像变换域的基础上^[17-21]. 文献[17]将奇异值分解应用于彩色图像实现水印的嵌入和提取,文献[18]的QR分解在数字水印领域也得到了重要的应用,文献[19-21]在Gyrator变换域实现了数字水印算法,这些方法都使得嵌入的数字水印具有更好的鲁棒性和视

觉不见性,而嵌入容量也有了进一步的提高,因此也可以将彩色图像作为待嵌入的水印进行嵌入^[22]. 虽然图像水印的研究取得了很大进展,但是单一功能水印已经不能满足人们的需求,双水印^[23-25]应运而生. 双水印与单水印相比其嵌入和提取过程变得更加复杂,但是嵌入的容量也随之有了较大的提高,水印功能也变得更加多元化.

本文提出一种基于改进颜色空间的彩色图像双水印算法. 特征水印为原始载体图像的某些特征,这些特征随着特征提取方式的不同而不同,图像在存储、传播过程中会遭到信道噪声、网络压缩或恶意攻击,这对于后期的图像处理有着不同程度的影响. 例如图像检索等,这对原始图像信息的有效性、完整性有更高的要求. 因此本算法的第1个水印使用原图的特征,为后期的图像处理提供原始图像的特征信息,第2个水印作为标识水印.

1 纹理特征提取和颜色空间模型

1.1 特征提取

纹理特征是图像固有的特征之一,本文以提取原始载体图像纹理特征为例. 原始载体图像纹理特征在图像的后续处理中应用极为广泛,例如基于纹理特征的图像检索等. 而曲波变换作为一种具有方向性的多分辨率变换工具,可以将图像在不同尺度下、不同方向上的代表性信息表达出来,即变换到频域后的Detail层. 因此,从Detail层中频系数提取出的纹理特征能唯一地代表这幅图像,提取流程如图1所示.

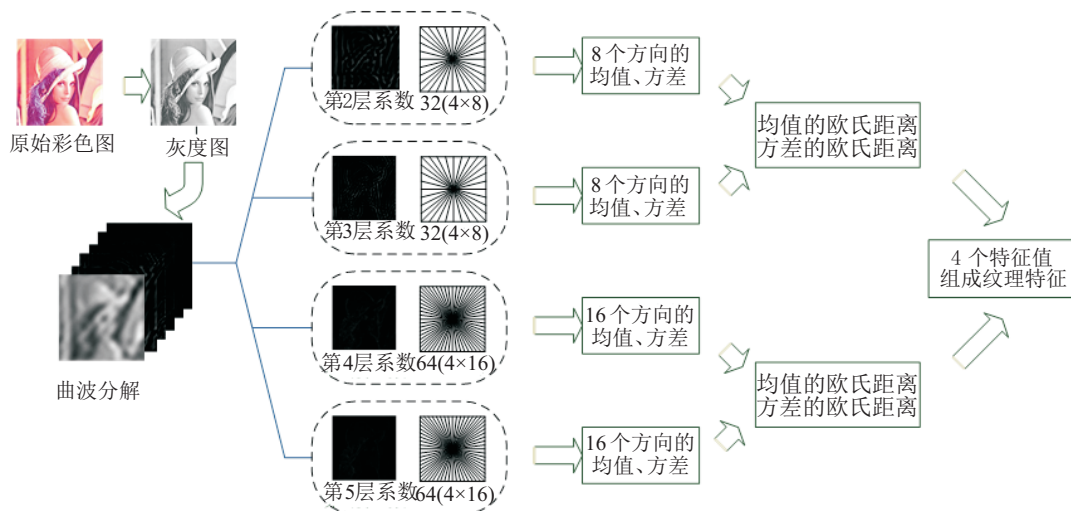


图1 特征提取过程

提取步骤如下.

- 1) 将彩色图像转换到成灰度图像.
- 2) 对灰度图作Curvelet变换,得到6层不同尺度不同方向上的曲波系数,取出Detail层系数分别记为

$C\{2\}$ 、 $C\{3\}$ 、 $C\{4\}$ 、 $C\{5\}$.

- 3) 分别求取 $C\{2\}$ 、 $C\{3\}$ 层8个不同方向上曲波系数的均值和方差, $C\{4\}$ 、 $C\{5\}$ 层16个不同方向上曲波系数的均值和方差,并合成方向特征信息向量

ave_i 和 $\text{var}_i, i = 2, 3, 4, 5$.

4) 计算向量 ave_2 与 ave_3 、 ave_4 与 ave_5 之间的欧氏距离, 以及向量 var_2 与 var_3 、 var_4 与 var_5 之间的欧氏距离, 即为所要提取的纹理特征, 记为 $t(k), k = 1, 2, 3, 4$.

1.2 改进型的颜色模型空间 $Y'Cb'Cr'$

YCbCr 是继 RGB、YUV 等颜色模型之后的另一种直接表示亮度分量和色度分量的颜色空间模型. 其中 Y 为亮度分量, Cb 为蓝色色度分量, Cr 为红色色度分量. 通常的 RGB 颜色空间模型将亮度和色度混合起来, 而 YCbCr 却将两者分离, 便于使用. YCbCr 与 RGB 之间的转换公式为

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.257 & 0.564 & 0.098 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

将图像转换到 YCbCr 颜色空间进行水印的嵌入和提取, 避免在 RGB 颜色空间直接嵌入, 可以更好地保证图像的视觉不见性, 并且要实现两个水印之间相互独立, 独立嵌入和独立提取的前提是将两个水印嵌入到原载体图的两个不同位置, 这两个位置之间不会产生信息干扰. 3 个通道的正交化是保证 3 个通道信息不产生干扰的前提. 基于 YCbCr 颜色空间模型将原彩色图像分为 3 个通道的思想, 探索出一种改进型

的颜色空间模型 $Y'Cb'Cr'$, 其正变换为

$$\begin{bmatrix} Y' \\ Cb' \\ Cr' \end{bmatrix} = A \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

逆变换为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = B \times \begin{bmatrix} Y' \\ Cb' \\ Cr' \end{bmatrix}, \quad (3)$$

最终得到 $AB = E$. 根据 RGB 颜色空间到 YCbCr 颜色空间转换模型的定义, 取

$$A = \begin{bmatrix} 0.257 & 0.564 & 0.098 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

则求得

$$B = \begin{bmatrix} 1.0881 & 0.0238 & -0.4113 \\ 1.0881 & -0.3659 & -0.7604 \\ 1.0881 & 2.0434 & 1.7984 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1.3 嵌入水印过程

对于改进的颜色空间 $Y'Cb'Cr'$, 其 3 个颜色通道实现了正交化, 通道之间相互独立且互不干扰, 因此两个水印的嵌入顺序可以任意选择. 本文算法选择先嵌入纹理特征水印, 再嵌入标识水印图. 嵌入水印过程如图 2 所示.

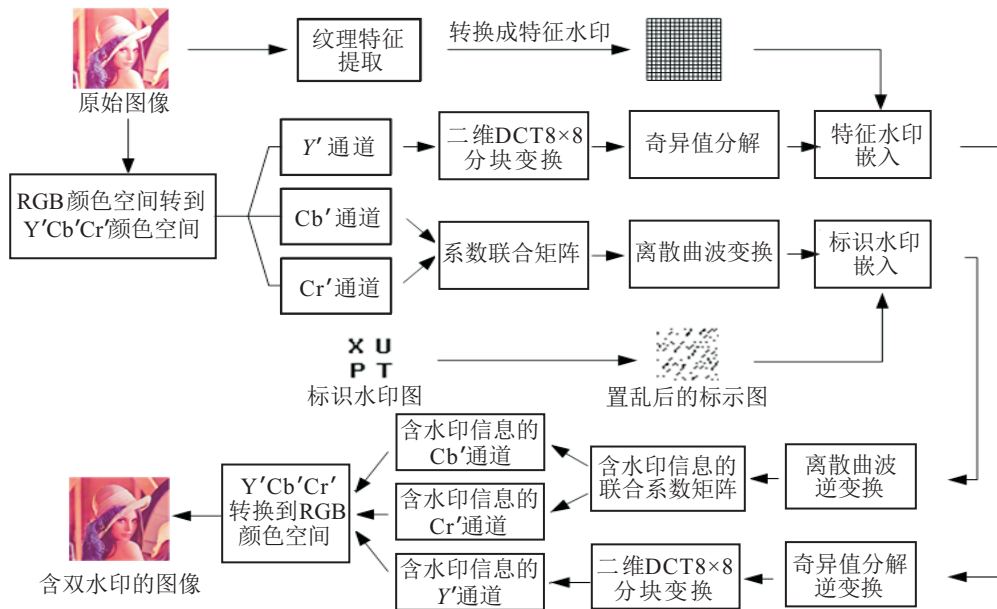


图 2 双水印嵌入过程

1.3.1 嵌入纹理特征水印

为了保护载体原始图像特性信息, 现将从原始图像中提取的纹理特征作为水印嵌入原载体图像中, 以

这种方式将纹理特征保存. 下面介绍将第 1 个纹理特征作为水印嵌入原彩色载体图像, 具体步骤如下.

1) 构造纹理特征水印.

将提出的纹理特征 $t(k) (k = 1, 2, 3, 4)$ 构造成一个特征水印, 然后嵌入到原彩色图像. 构造过程中, 首先将特征参数值转换成 0、1 比特; 其次设置数据格式, 10 个比特为一个数据单元, 将一个特征值转换成的比特存放在一个数据单元中, 一个数据单元可以

存放 1024 种不同的状态值, 表示数据大小范围十进制为 0~1023; 最后, 将 4 个数据单元拼接为一体, 表示提取出的一幅图像的特征, 再将拼接在一起的数据单元进行扩展, 形成 64×64 纹理特征水印 W_1 , 如图 3 所示.

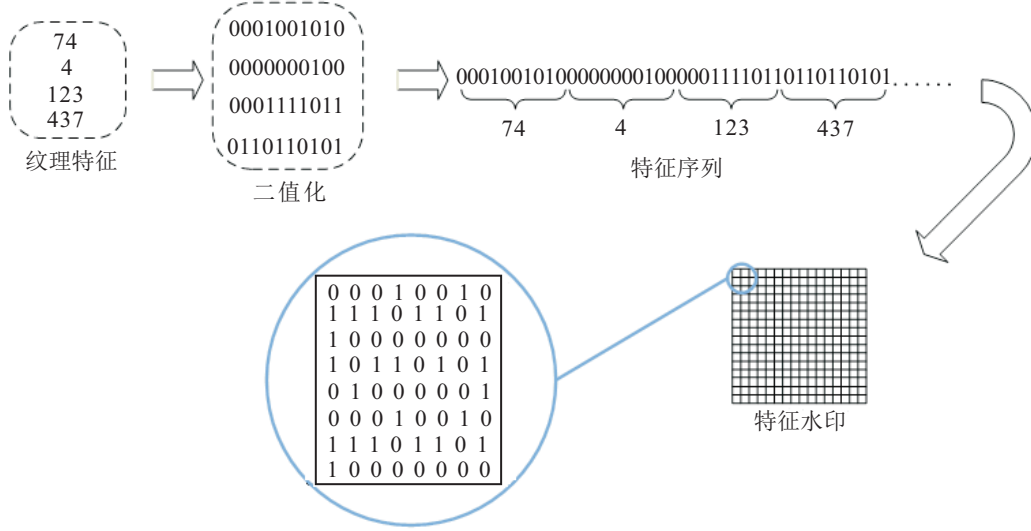


图3 特征值生成特征水印框图

2) 将原彩色图像 I 转到 $Y'Cb'Cr'$ 颜色空间, 并提取 Y' 通道图像 I_y .

3) 在 I_y 进行 8×8 分块 DCT 变换, 得到的每个小块记为 $D_{i,j}$, $i, j = 1, 2, \dots, 64$.

4) 将每个小块 $D_{i,j} (i, j = 1, 2, \dots, 64)$ 作 SVD 分解, 即

$$D_{i,j} = U_{i,j} S_{i,j} V_{i,j}. \quad (6)$$

其中: $i, j = 1, 2, \dots, 64$; $U_{i,j}$ 、 $V_{i,j}$ 为正交矩阵; $S_{i,j}$ 为对角矩阵, 并取 $S_{i,j} (i, j = 1, 2, \dots, 64)$ 中最大的奇异值, 记为 $\sigma_{i,j}$.

5) 对每个奇异值进行量化索引调制嵌入, 即

$$\sigma' = \begin{cases} \left(\frac{\text{round}(\sigma + d_0)}{\Delta} \right) \Delta - d_0, & W_1 = 0; \\ \left(\frac{\text{round}(\sigma + d_1)}{\Delta} \right) \Delta - d_1, & W_1 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

其中: Δ 是量化步长, 本文中为 120, 一般选取载体数据大小的 0.01 倍左右; $d_0 = -1$ 为任意选择的一个初始值, $d_1 = d_0 + \Delta/2$; W_1 是纹理特征水印; 奇异值 σ 也因携带纹理特征水印信息变为 σ' , 用 σ' 将 S 中的 σ 替换成为 S' .

6) 对嵌入纹理特征的图像矩阵进行 SVD 逆变换, 即

$$D'_{i,j} = U_{i,j} S'_{i,j} V_{i,j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 64, \quad (8)$$

得到含有水印信息的 DCT 系数; 然后再进行逆 DCT

变换得到 $Y'Cb'Cr'$ 颜色空间的 Y' 通道含有水印信息的图像 I'_y .

7) 用含有水印信息的 Y' 通道图像 I'_y 将 I_y 替换, 再将图像由 $Y'Cb'Cr'$ 空间转到 RGB 空间得到含纹理特征图像 I_{TZ} .

1.3.2 嵌入水印图

接下来嵌入水印图 W_2 . W_2 的嵌入是在 Curvelet 变换的低频域进行的, Curvelet 变换也是一种多尺度变换, 低频系数能够很好地抽象出彩色图像的近似信息, 因此为了保证鲁棒性, 在 Curvelet 的变换域低频部分嵌入水印图, 具体步骤如下:

1) 将含纹理特征水印的图像 I_{TZ} 从 RGB 颜色空间转换到 $Y'Cb'Cr'$ 颜色空间, 分别提取 Cb' 和 Cr' 通道的图像 $I_{TZ_{Cb'}}$ 和 $I_{TZ_{Cr'}}$.

2) 对 $I_{TZ_{Cb'}}$ 和 $I_{TZ_{Cr'}}$ 分别作 Curvelet 变换, 再取出各自的低频系数矩阵, 记为 $C_{Cb'}\{1\}$ 、 $C_{Cr'}\{1\}$.

3) 计算联合系数嵌入矩阵 C , 即

$$C = C_{Cb'}\{1\} + C_{Cr'}\{1\}, \quad (9)$$

并根据能量分布的不同计算每个系数上嵌入时的强度, 每个系数根据自身能量的不同自适应地选择嵌入该系数水印信息的强度, 这样能够在保证鲁棒性的前提下尽可能地减少水印信息嵌入量. 计算时首先计算联合嵌入矩阵的均值 $\bar{C}$, 然后再将联合矩阵中的系

数和均值做比较,即

$$E = C/\bar{C}, \quad (10)$$

得到自适应嵌入强度矩阵 E .

4) 先将水印图像 W_2 , 用 Torus 自同构映射对原始水印图像进行置乱加密, 即

$$W'_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = W_2 \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \bmod(N). \quad (11)$$

其中: $(x_i, y_i) \in [0, N-1] \times [0, N-1]$, 原始水印图像大小为 $N \times N$, $k \in [0, N-1]$ 为映射次数, W'_2 即为原始水印图像 W_2 经过 k 次映射后的结果. k 可以选择 0 到 48 之间的任何一个值, 得到置乱加密后的水印图, 然后将水印嵌入到联合系数 C , 得到含水印信息的联合系数嵌入矩阵

$$C' = C + \alpha E W_2, \quad (12)$$

其中 α 是水印的嵌入强度. 从视觉不见性和鲁棒性的角度, α 可以看作是两者之间的权衡系数. 如果嵌入强度过大则鲁棒性较好, 但视觉不见性较差, 过小则反之. 经过试验分析, 为了使综合效果最优, 本文中 $\alpha = 0.1$.

5) 计算嵌入量矩阵, 由低频系数 Cb' 和 Cr' 计算权重系数矩阵

$$Q_{Cb'} = \frac{Cb'}{Cb' + Cr'}, \quad (13)$$

$$Q_{Cr'} = \frac{Cr'}{Cb' + Cr'}. \quad (14)$$

为了按权重系数将嵌入量分配到 $C_{Cb'}\{1\}$ 、 $C_{Cr'}\{1\}$, 有

$$V = C' - C, \quad (15)$$

$$C'_{Cb'}\{1\} = C_{Cb'}\{1\} + Q_{Cb'}V, \quad (16)$$

$$C'_{Cr'}\{1\} = C_{Cr'}\{1\} + Q_{Cr'}V. \quad (17)$$

用 $C'_{Cb'}\{1\}$ 、 $C'_{Cr'}\{1\}$ 将 $C_{Cb'}\{1\}$ 、 $C_{Cr'}\{1\}$ 替换, 然后进行逆 Curvelet 变换重建 Cb' 和 Cr' 通道的图像.

6) 再由 $Y'Cb'Cr'$ 模型转换到 RGB 模型, 得到含双水印图像 I_{TZW} .

1.4 提取水印过程

提取的过程分为两部分, 即: 先提取纹理特征水印并从中恢复出纹理特征, 再提取第 2 个标识水印. 提取过程如图 4 所示.

1.4.1 提取纹理特征水印

下面给出提取纹理特征水印的详细过程.

1) 将双水印图像 I_{TZW} 从 RGB 模型转到 $Y'Cb'Cr'$ 模型, 并提取 Y' 通道图像 I_{TZW_Y} .

2) I_{TZW_Y} 图进行 8×8 的分块 DCT 变换, 得到的

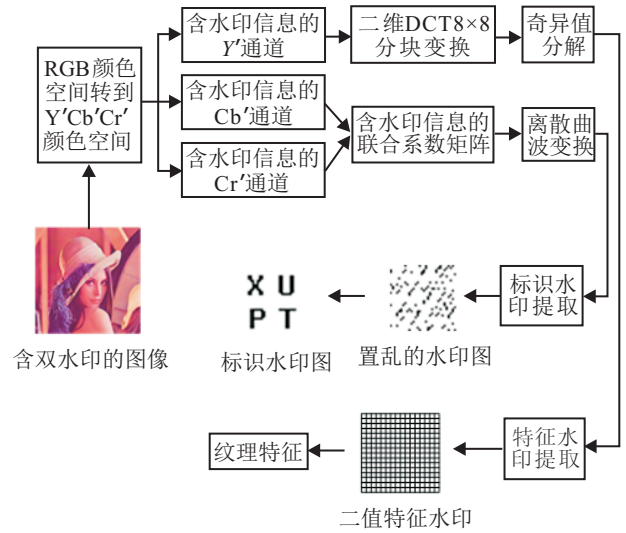


图4 双水印提取过程

每个小块记为 $D_{i,j}$, $i, j = 1, 2, \dots, 64$.

3) 将每个小块 $D_{i,j}$ ($i, j = 1, 2, \dots, 64$) 作 SVD 分解, 即 $D_{i,j} = U_{i,j} S_{i,j} V_{i,j}$, 得正交矩阵 $U_{i,j}$ 、 $V_{i,j}$, 对角矩阵 $S_{i,j}$, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, 64$, 并取出 $S_{i,j}$ ($i, j = 1, 2, \dots, 64$) 中的最大奇异值 $\sigma_{i,j}$.

4) 提取水印的表达式如下:

$$\begin{cases} W'_{1i,j} = 1, & y_0 > y_1; \\ W'_{1i,j} = 0, & y_0 < y_1; \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, 64. \quad (18)$$

其中

$$y_0 = \left(\frac{\text{round}(\sigma_{i,j} + d_0)}{\Delta} \right) \Delta - d_0, \quad (19)$$

$$y_1 = \left(\frac{\text{round}(\sigma_{i,j} + d_1)}{\Delta} \right) \Delta - d_1, \quad (20)$$

d_0 、 d_1 、 Δ 的取值与嵌入时相同, W'_1 为提取出的纹理特征水印.

1.4.2 基于统计分析的纹理特征值恢复

提取出的纹理特征水印是纹理特征值转换而来的 0, 1 比特, 而且是按照 10 个比特为一个数据单元的格式进行存放, 4 个数据单元拼接在一块来表示一幅图像的纹理特征. 若从 W'_1 中以 4 个数据单元为单位进行读取, 则导致不同特征值对应的不同数据单元中比特的相互干扰, 只要有 1 个比特产生错误其他 3 个特征值也会被判为错误. 若以 1 个数据单元为单位进行读取, 则可有效地避免这种比特间的干扰. 没有任何攻击时 W'_1 和 W_1 完全相同, 不会产生错误比特. 每个特征值对应的数据单元中的状态出现的概率是 1/4, 其他 1020 种状态出现的概率为 0. 如果含有水印的图像遭到攻击, 则 W'_1 会有错误比特产生. 若在第 $4n+i$ ($i = 1, 2, 3, 4, n = 0, 1, 2, \dots, 101$) 个数据单元中出现错误比特, 则第 i 个特征值对应的数据单元中

比特状态出现的概率会降低 $1/408$, 而该错误状态出现的概率会增加 $1/408$. 实际出现的有 408 种 (比特状态种类最多有 1024), 且每种错误比特状态出现的概率也是未知的. 将全部数据单元读取完之后统计每种比特状态出现的概率. 随着攻击强度的增加, 错误比特状态出现概率也会增加, 特征值对应的比特状态出现的概率就会减少, 但是攻击之后纹理特征水印的基本信息整体上不会丢失, 特征值对应的比特状态出现的概率要远远大于错误比特状态的概率. 基于此, 统计完每种状态出现的概率之后概率由大到小排序, 前 4 种比特状态就是 4 个特征值对应的 4 种比特状态, 二进制的 0、1 比特转换成十进制数就是恢复出的纹理特征值, 如图 5 所示.

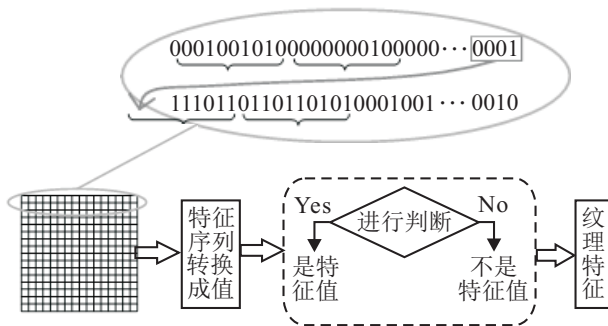


图 5 特征水印转换成特征值框图

1.4.3 提取水印

这个水印是非盲水印, 依赖于原始载体图像 I . 具体的提取步骤如下.

1) 将原始彩色图像 I 和含双水印图像 I_{TZW} 由 RGB 颜色空间分别转换到 $Y'Cb'Cr'$ 颜色空间, 并分别提取 Cb' 、 Cr' 通道图.

2) 对 I 、 I_{TZW} 的 Cb 、 Cr 颜色通道分别作 Curvelet 变换, 再提取各自 Cb 、 Cr 曲波系数的第 1 层系数矩阵, 依次记为 $C_{Cb'}\{1\}$ 、 $C_{Cr'}\{1\}$ 、 $C'_{Cb'}\{1\}$ 和 $C'_{Cr'}\{1\}$.

3) 计算联合系数嵌入矩阵 D 和 D' , 即

$$D = C_{Cb'}\{1\} + C_{Cr'}\{1\}, \quad (21)$$

$$D' = C'_{Cb'}\{1\} + C'_{Cr'}\{1\}. \quad (22)$$

D 是从不含有水印的原始图像中经过变换和计算得到的联合系数, D' 是嵌入水印后的图像经过变换和计算得到的联合系数. 同时计算自适应矩阵 E , 计算方式与嵌入时相同.

4) 提取标识水印

$$W'_2 = \begin{cases} 1, & D' - D > \frac{\text{alph}}{2} E; \\ 0, & D' - D < \frac{\text{alph}}{2} E. \end{cases} \quad (23)$$

其中 alph 同嵌入时给定的嵌入强度.

2 实验结果分析及讨论

本文实验用 2 幅图像处理领域经典彩色图像和 4 幅刑侦图库中不同内容的彩色图像作为载体图像, 如图 6 所示, 各图依次为 Lena、Plane、Village、Chamber、Door、Car, 大小均为 512×512 . 图 7 为水印信息图, 是图 6 中相应载体图像的纹理特征水印, 图 7(g) 是原始标识水印, 大小为 32×32 , 图 7(h) 是将图 7(g) 进行置乱加密后的图像.



图 6 载体图像

74	4	72	5	36	5
123	437	863	724	516	283
(a) 纹理特征1	(b) 纹理特征2	(c) 纹理特征3			
32	2	28	2	98	5
597	242	1007	310	905	445
(d) 纹理特征4	(e) 纹理特征5	(f) 纹理特征6			

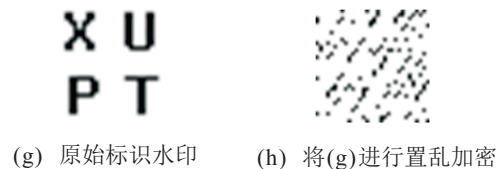


图 7 纹理特征与标识水印

2.1 水印系统性能评价标准

水印嵌入后要求原图像的质量在视觉上和客观评价上都具有良好的不可见性,同时还具有良好的鲁棒性. 这里用到的客观评价标准有峰值信噪比(Peak signal to noise ratio, PSNR)

$$\text{PSNR} = 10 \lg 10 \left(\frac{(2^n - 1)^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X(i, j) - Y(i, j))^2} \right). \quad (24)$$

其中: $n = 8$ 表示一个像素用8个比特表示, X 和 Y 分别表示原始图像和经处理后的图像, M 和 N 分别表示图像的高度和宽度.

归一化互相关系数(The normalized correlation coefficient, NCC)的计算公式为

$$\text{NCC} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X(i, j)Y(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y(i, j)^2}}. \quad (25)$$

其中: X 和 Y 分别表示原始图像和经处理后的图像, M 和 N 分别表示图像的高度和宽度.

误比特率(Watermarking bite error ration, BER)衡量是纹理特征水印的鲁棒性,有

$$\text{BER} = \frac{\text{特征水印中错误比特数}}{\text{特征水印中总比特数}} \times 100\%. \quad (26)$$

结构相似性(SSIM)也是一种图质量评价指标,计算公式为

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}. \quad (27)$$

其中

$$\mu_x = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X(i, j), \quad (28)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{MN - 1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X(i, j) - \mu_x)^2, \quad (29)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{MN - 1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X(i, j) - \mu_x)(Y(i, j) - \mu_y). \quad (30)$$

X 和 Y 分别表示原始图像和经处理后的图像, M 和 N 分别表示图像的高度和宽度.

2.2 视觉不见性和鲁棒性测试

用 PSNR 和 SSIM 可以从能量和纹理结构的角度对水印视觉不见性做定量分析. NCC 和 BER 用来衡量水印算法的鲁棒性,对于第1个纹理特征水印用 BER 指标来衡量水印的鲁棒性,第2个水印图用 NCC 值衡量水印的鲁棒性. 除了直接提取测量水印性能外,还对载体图像进行了不同类型不同强度的攻击,提取攻击之后的水印并对其进行性能测试,而且与文献[25]的算法作了对比.

2.2.1 测试未攻击时视觉不见性和鲁棒性

在不对载体图像进行任何攻击的情况下,计算载体图像水印嵌入前后的相关指标,衡量水印算法性能,计算结果如表1所示.

表1 对含水印图不做任何攻击的性能指标

含双水印图像						
PSNR	52.493 80	51.949 36	53.977 21	53.550 04	52.875 18	52.888 39
SSIM	1	1	1	1	1	1
特征水印的BER	0	0.012 21	0	0.042 97	0.034 67	0
标识水印的NCC	0.998 13	0.985 39	0.967 80	1	0.956 21	0.982 01

2.2.2 测试不同攻击时视觉不见性和鲁棒性

图像在存储、传输、使用过程中会遭到主动或被动两大类攻击. 本文对载体图像进行几种典型的攻击,如椒盐噪声、高斯噪声、裁减攻击、JPEG 压缩攻击、旋转攻击. 经过不同类型不同强度的攻击之后,计算水印嵌入前后载体图像的 PSNR 和 SSIM 值来测试水印的不可见性能,利用 BER 来测试提取出的纹理特征水印鲁棒性,利用 NCC 值来测试提取出的第2

个水印的鲁棒性. 图8(a)~图8(f)为含水印的载体图在不同类型不同强度下,进行攻击测试所得到的评价指标值.

由数据可知,在同一种类型不同强度的攻击下,随着攻击强度的增加,PSNR 减小,同时 SSIM 和 NCC 也减小,BER 增大. 在受到攻击的情况下,如果攻击强度不是很大,部分 PSNR 大于 28 dB,则图像质量较好,表明本文算法具有良好的视觉不见性,且 SSIM 也具

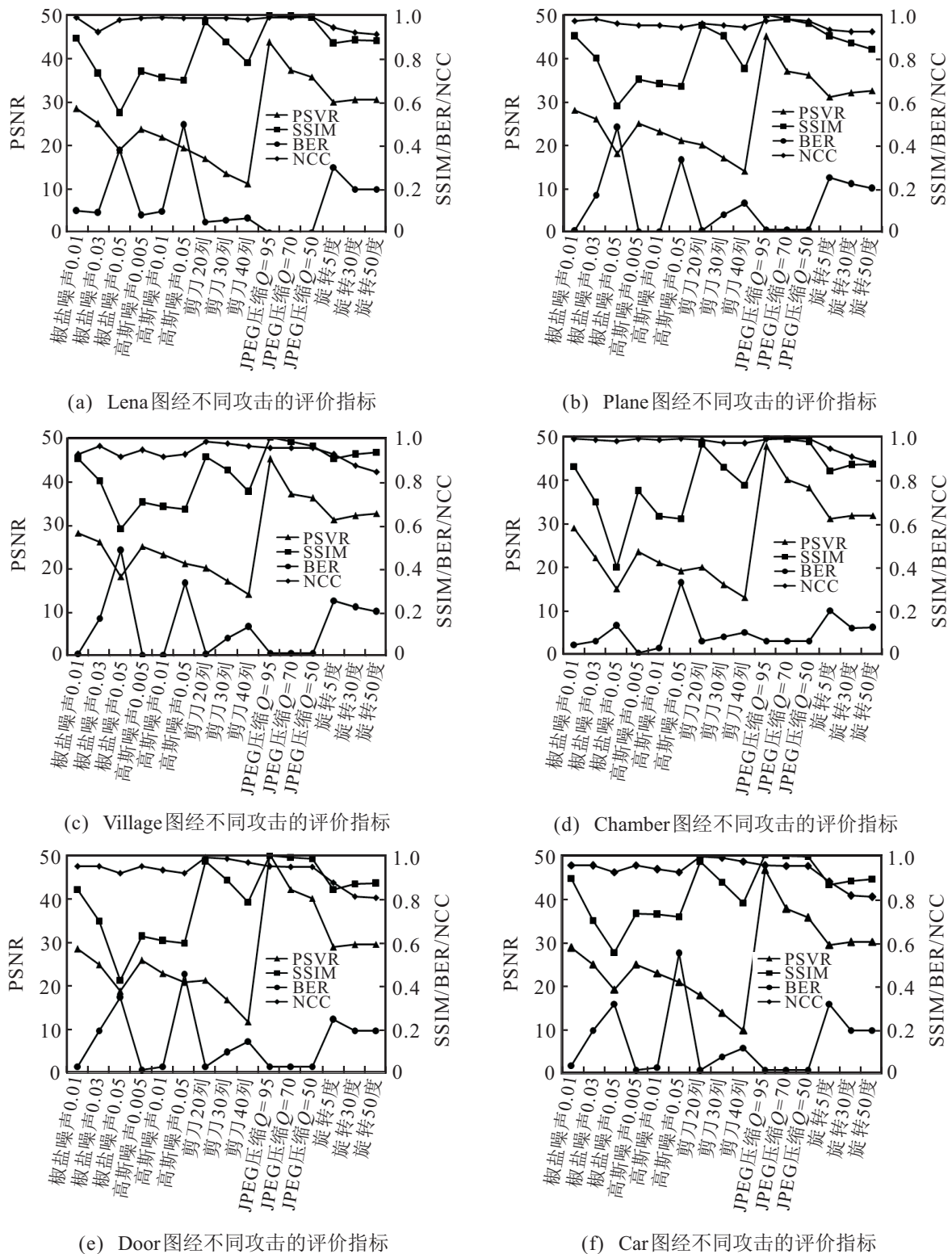


图8 载体图像经不同攻击的评价指标

有较高的值.在鲁棒性方面,经攻击后提取特征水印的BER也具有较低的值,最高为0.0905.NCC平均在0.9800左右,表明具有良好的鲁棒性.

2.2.3 与相关算法进行比较

本文算法用图6(a)(即Lena图)与文献[25]中的Lena图进行算法比较.选择文献[25]的原因为:1)本文算法与文献[25]都是基于双水印的算法,水印都

具有多重功能,因此嵌入容量相当;2)在算法的大体实现框架上具有相似性,都是基于彩色图像的不同颜色通道实现的两个水印的嵌入和提取,都进行了DCT分块变换;3)本文与文献[25]的算法都选取了Lena图像作为实验图像,具有直接比较的基础.

从视觉不见性和鲁棒性两个方面的性能来作比较.结果如表2所示.

表 2 Lena图与文献[25]算法进行比较

攻击类型	攻击参数	PSNR		文献[25]算法提取的第1个水印 和本文纹理特征水印的BER		文献[25]算法提取的第2个水印 和本文第二个水印的NCC值	
		文献[25]算法	本文算法	文献[25]算法	本文算法	文献[25]算法	本文算法
未攻击		42.219 8	52.493 8	0	0	1	0.998 7
椒盐噪声	$M = 0, \text{var} = 0.01$	27.714 8	28.491 1	0.067 1	0.091 8	0.977 8	0.987 5
	$M = 0, \text{var} = 0.03$	24.952 9	25.012 6	0.120 1	0.083 0	0.951 0	0.913 2
高斯噪声	$M = 0, \text{var} = 0.005$	20.125 7	25.307 8	0.108 1	0.054 2	0.926 7	0.988 7
	$M = 0, \text{var} = 0.01$	20.098 8	23.682 2	0.121 4	0.090 5	0.908 4	0.985 7
裁剪	20 columns	16.515 8	18.809 2	0.036 4	0.028 6	0.997 4	0.995 6
	30 columns	14.721 2	15.304 9	0.051 3	0.039 4	0.996 7	0.992 0
	40 columns	13.196 0	14.058 7	0.079 1	0.058 1	0.998 5	0.983 6
压缩	$Q = 70$	37.284 2	37.259 1	0	0.000 2	1	0.988 7
	$Q = 50$	35.343 3	35.754 7	0	0.000 7	1	0.989 1

1) 视觉不见性方面: 本文算法嵌入双水印的 PSNR 优于文献 [25] 算法, 其中未攻击时的 PSNR 远远优于文献 [25] 算法, 在压缩品质为 70 的攻击下 PSNR 略微小于文献 [25] 算法, 其余攻击下 PSNR 都大于文献 [25] 算法。

2) 鲁棒性方面: 特征水印的 BER 在压缩攻击下略大于文献 [25] 算法第 1 个水印的 BER, 其余攻击下 BER 都小于文献 [25] 算法第 1 个水印的 BER, 在未进行攻击时 BER 都为 0。标识水印在高斯噪声的攻击下 NCC 优于文献 [25] 算法第 2 个水印, 视觉不见性和鲁棒性具有负相关性, 因本文算法 PSNR 几乎均大于文献 [25] 算法, 可能会造成标识水印在一些攻击下的 NCC 值略小于文献 [25] 算法。

整体而言, 在算法功能、算法框架较类似的情况下, 本文算法在嵌入时根据能量分布的不同自适应地选择嵌入强度, 可以有效地缓解视觉不见性与鲁棒性之间的矛盾, 使得算法整体较优于文献 [25] 算法。

3 结 论

实验表明, 本文所提出的基于改进颜色空间的彩色图像双水印算法, 在彩色图像的 RGB 颜色空间转换到 Y'Cb'Cr' 颜色空间, 实现了 3 个颜色通道的完全正交, 从而避免了两个水印之间的信息干扰, 实现了双水印的嵌入和提取, 保证没有信息干扰。将每个颜色通道变换到频域进行操作, 保证了两个水印的视觉不见性。提取 Y' 通道进行分块 DCT 变换, 对每块系数进行 SVD 变换, 取出每块的最大奇异值进行纹理特征水印的嵌入, 保证了纹理特征水印的强鲁棒性。由于曲波变换具有较强抽象出图像近似信息的能力, 对 Cb' 和 Cr' 通道进行曲波变换后在低频近似

信息上联合嵌入水印图, 使得第 2 个水印具有较强的鲁棒性。经过几种不同类型不同强度的攻击测试, 本文算法具有良好的视觉不见性和鲁棒性, 与文献 [25] 相比, 性能略优。

参考文献 (References)

[1] Zhou N, Li H, Wang D, et al. Image compression and encryption scheme based on 2D compressive sensing and fractional Mellin transform[J]. Optics Communications, 2015, 343: 10-21.

[2] Bouslimi D, Cozic M, Cozic M, et al. Data hiding in encrypted images based on predefined watermark embedding before encryption process[J]. Signal Processing Image Communication, 2016, 47(C): 263-270.

[3] Zhou Z, Chen L, Hu X. Color images enhancement for edge information protection based on second order Taylor series expansion approximation[J]. Optik-Int J for Light and Electron Optics, 2015, 126(3): 368-372.

[4] Qi X, Xin X. A singular-value-based semi-fragile watermarking scheme for image content authentication with tamper localization[M]. Orlando: Academic Press, 2015: 312-327.

[5] Rao U P, Patel D R, Vikani P M. Relational database watermarking for ownership protection[J]. Procedia Technology, 2012, 6(4): 988-995.

[6] Qin C, Zhang X. Effective reversible data hiding in encrypted image with privacy protection for image content[M]. Orlando: Academic Press, 2015: 154-164.

[7] Hsu L Y, Hu H T. Blind image watermarking via exploitation of inter-block prediction and visibility threshold in DCT domain[J]. J of Visual Communication

- & Image Representation, 2015, 32(C): 130-143.
- [8] Bhatnagar G, Wu Q M J. A new logo watermarking based on redundant fractional wavelet transform[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2013, 58(1/2): 204-218.
- [9] Al-Nabhani Y, Jalab H A, Wahid A, et al. Robust watermarking algorithm for digital images using discrete wavelet and probabilistic neural network[J]. J of King Saud University — Computer and Information Sciences, 2015, 27(4): 393-401.
- [10] Wang T Y, Li H W. A novel scrambling digital image watermark algorithm based on double transform domains[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(8): 1-13.
- [11] Ansari I A, Pant M, Chang W A. Robust and false positive free watermarking in IWT domain using SVD and ABC[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016, 49: 114-125.
- [12] Makbol N M, Khoo B E. Robust blind image watermarking scheme based on redundant discrete wavelet transform and singular value decomposition[J]. AEU-Int J of Electronics and Communications, 2013, 67(2): 102-112.
- [13] Ansari I A, Pant M. Multipurpose image watermarking in the domain of DWT based on SVD and ABC[J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 94: 228-236.
- [14] Fazli S, Moeini M. A robust image watermarking method based on DWT, DCT, and SVD using a new technique for correction of main geometric attacks[J]. Optik-Int J for Light and Electron Optics, 2016, 127(2): 964-972.
- [15] Hu H T, Hsu L Y. Exploring DWT-SVD-DCT feature parameters for robust multiple watermarking against JPEG and JPEG2000 compression[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 41: 52-63.
- [16] Abraham J, Paul V. An imperceptible spatial domain color image watermarking scheme[J]. J of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2016, DOI: 10.1016/j.jksuci.2016.12.004.
- [17] Li Y, Wei M, Zhang F, et al. A new double color image watermarking algorithm based on the SVD and arnold scrambling[J]. J of Applied Mathematics, 2016, DOI: 10.1155/2016/2497379.
- [18] Su Q, Niu Y, Wang G, et al. Color image blind watermarking scheme based on QR decomposition[J]. Signal Processing, 2014, 94(1): 219-235.
- [19] Shao Z, Duan Y, Coatrieux G, et al. Combining double random phase encoding for color image watermarking in quaternion gyrator domain[J]. Optics Communications, 2015, 343: 56-65.
- [20] Abuturab M R. Generalized arnold map-based optical multiple color-image encoding in gyrator transform domain[J]. Optics Communications, 2015, 343: 157-171.
- [21] Sui L, Zhou B, Wang Z, et al. An optical color image watermarking scheme by using compressive sensing with human visual characteristics in gyrator domain[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2017, 92: 85-93.
- [22] Su Q, Niu Y, Liu X, et al. A novel blind digital watermarking algorithm for embedding color image into color image[J]. Optik-Int J for Light and Electron Optics, 2013, 124(18): 3254-3259.
- [23] Shao Z, Shang Y, Zeng R, et al. Robust watermarking scheme for color image based on quaternion-type moment invariants and visual cryptography[J]. Signal Processing Image Communication, 2016, 48: 12-21.
- [24] Lee G J, Yoo K Y. An improved double image digital watermarking scheme using the position property[J]. Multimedia Tools & Applications, 2015, 74(17): 7261-7283.
- [25] Roy S, Pal A K. A blind DCT based color watermarking algorithm for embedding multiple watermarks[J]. AEU-Int J of Electronics and Communications, 2017, 72: 149-161.

作者简介

朱婷鸽(1976—), 女, 讲师, 博士生, 从事图像安全及其应用的研究, Email: tgzhu114@163.com.

曹海龙(1991—), 男, 硕士生, 从事数字水印等图像安全领域的研究, Email: chlxbj@163.com.

刘颖(1970—), 女, 高级工程师, 博士, 从事图像检索领域的研究, E-mail: ly_yolanda@sina.com.

毕萍(1981—), 女, 讲师, 硕士, 从事图像处理领域的研究, Email: biping@xupt.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)