

基于平衡多小波的双彩色图像水印算法

赵瑶瑶, 李万社

陕西师范大学, 数学与统计学院, 陕西 西安

收稿日期: 2021年9月21日; 录用日期: 2021年10月13日; 发布日期: 2021年10月20日

摘要

提出一种在YCbCr色彩空间下, 对原始彩色载体图像和彩色水印图像进行平衡多小波变换, 将水印信息嵌入到低中频信息中, 水印嵌入前利用Arnold置乱对Y通道灰度水印图像进行加密处理, 保证算法的安全性。实验表明, 该算法具有良好的鲁棒性, 而且在噪声攻击和抵抗JPEG压缩性能方面有明显的提高。

关键词

CARDBAL多小波, Arnold变换, 图像水印, 鲁棒性

Algorithm Based on Balance Multi-Wavelet of Double Color Image Watermarking

Yaoyao Zhao, Wanshe Li

School of Mathematics and Statistics, Shaanxi Normal University, Xi'an Shaanxi

Received: Sep. 21st, 2021; accepted: Oct. 13th, 2021; published: Oct. 20th, 2021

Abstract

This article proposed an algorithm of balanced multi-wavelet transform for the original color carrier image and color watermark image in YCbCr color space, and the watermark information is embedded into the low and middle approximation information. Before the watermark is embedded, Arnold scrambling is used to encrypt the Y-channel gray watermark image to ensure the security of the algorithm. Experiments show that the algorithm not only has good robustness, but also significantly improves the performance in resistance to noise attack and JPEG compression.

Keywords

CARDBAL Multi-Wavelet, Arnold Transform, Image Watermarking, Robustness

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着数字多媒体技术的发展, 图像水印成为数据版权保护的有效算法已经成为国内外学者研究的热点[1]。多小波具有多个尺度函数和小波函数, 它克服了单小波无法同时满足的紧支撑性、对称性和正交性的优良特性[2]。因此, 基于多小波的频域算法在实际应用中吸引了更多学者的关注[3]。多小波在信息隐藏、图像压缩和图像去噪等均有广泛应用。本文主要对载体图像和水印图像均采用平衡多小波变换, 在图像中嵌入水印, 以及提取出图像水印的过程进行一系列数据分析。

2. 图像分解与置乱

2.1. 多小波与平衡多小波变换

多小波变换是在小波变换构架的基础上提出的, 将滤波器组合小波拓展到矢量域上, 滤波器系数是矩阵系列, 进一步得到具有一般性的多小波[4]。

多小波包含多个尺度函数以及相应的多个小波函数, 且对于 $\forall \varphi \in L_2(\mathbb{R})$, 记 $\varphi_{j,k} = p^{j/2} \varphi(p^j x - k)$, $j, k \in \mathbb{Z}$, 其中要求 $p \in \mathbb{Z}^+$ 且 $p > 1$ 。记 $V_j = \text{span}\{\varphi_{j,k} : k \in \mathbb{Z}\}$ 为函数空间 $L_2(\mathbb{R})$ 中的函数族 $\{\varphi_{j,k} : k \in \mathbb{Z}\}$ 经过平移伸缩所张成的线性闭子空间。

在对图像进行多小波处理时, 因多小波滤波器组均为矩阵形式, 不能直接进行卷积运算, 需要对输入信号预处理, 但是预处理的过程可能会损坏多小波的基本特性, 而平衡多小波可以有效地避免这一问题, 既保持了单小波所有时域与频域局部化特性, 又能将对称性、正交性、正则性、平衡阶、紧支撑完美地结合在一起[5]。

2.2. Arnold 变换

Arnold 变换, 又称为 cat 变换。它的本质是改变图像内各像素点的位置, 破坏像素点之间原来的关联, 降低像素点之间的相关性, 从而增强水印系统的安全性。

Arnold 变换矩阵形式可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & b \\ a & ab \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \text{mod}(N) \quad (1)$$

式中, a, b, N 为正整数, mod 是求余数的函数。

3. 水印的嵌入与提取

3.1. 水印嵌入

水印嵌入算法步骤

1) 读取尺寸为 512×512 的彩色载体图像 data; 将 data 由 RGB 色彩空间转换为 YCbCr 色彩空间[6] [7], 分离三通道 Y、Cb、Cr 并分别表示为 YCbCr_Y、YCbCr_Cb 和 YCbCr_Cr 等价于:

$$[\text{data}_Y, \text{data}_{Cb}, \text{data}_{Cr}] = \text{YCbCrConversion}(\text{data}_{\text{RGB}}) \quad (2)$$

2) 在Y通道进行预滤波和平衡多小波变换, 得到近似系数矩阵 $ca(i, j)$, 水平系数矩阵 $cd1(i, j)$, 垂

直系数矩阵 $cd2(i, j)$ 和对角系数矩阵 $cd3(i, j)$, 特别在进行预滤波时只需采用单位矩阵 E 作为预滤波系数, 即:

$$\begin{aligned} YCbCr_Y &= \text{prep2D_appe}(YCbCr_Y, 'id') \\ [ca, cd1, cd2, cd3] &= \text{dec2D_pe}(YCbCr_Y, 'cardbal4', 1) \end{aligned} \quad (3)$$

3) 读取尺寸为 512×512 的彩色水印图像 daa , 将 daa 由 RGB 色彩空间转换为 YCbCr 色彩空间, 分离三通道 Y、Cb、Cr, 并分别表示为 $YCbCr_Y1$ 、 $YCbCr_Cb1$ 和 $YCbCr_Cr1$, 等价于:

$$[daa_Y, daa_{Cb}, daa_{Cr}] = YCbCrConversion(daa_{RGB}) \quad (4)$$

4) 对 $YCbCr_Y1$ 进行 Arnold 置乱加密, 其中置乱次数 T 作为密钥, 以此增强水印的安全性, 得到置乱后的水印图像 $imgn$;

5) 对图像 $imgn$ 进行相同操作 2, 得到近似系数矩阵 $caa(i, j)$, 水平系数矩阵 $dd1(i, j)$, 垂直系数矩阵 $dd2(i, j)$ 和对角系数矩阵 $dd3(i, j)$;

6) 通过修改近似系数矩阵中的系数值来嵌入水印信息, 得到新的近似系数矩阵 $new(i, j)$, 规则如下:

$$new(i, j) = ca(i, j) + \alpha \times caa(i, j) \quad (5)$$

7) 用新的近似系数矩阵 new 替换原始的近似系数矩阵, 再进行平衡多小波逆变换, 得到嵌入水印的图像 $fhat_Y$;

8) 将嵌入水印的图像 $fhat_Y$ 从 YCbCr 色彩空间转换成 RGB 色彩空间, 得到

$$newdata = RGBConversion[fhat_Y, data_{Cb}, data_{Cr}] \quad (6)$$

3.2. 水印提取

水印提取算法步骤

1) 读取尺寸为 512×512 的彩色载体图像 $data$ 和嵌入水印图像 $newdata$;

2) 将彩色载体图像 $data$ 和嵌入水印图像 $newdata$ 从 RGB 色彩空间转换为 YCbCr 色彩空间, 即:

$$\begin{aligned} [data_Y, data_{Cb}, data_{Cr}] &= YCbCrConversion(data) \\ [newdata_Y, newdata_{Cb}, newdata_{Cr}] &= YCbCrConversion(newdata) \end{aligned} \quad (7)$$

3) 选取原始载体图像和嵌入水印图像各自的 Y 通道上进行预滤波处理和一级平衡多小波变换;

4) 通过近似系数矩阵获得水印信息 $new1(i, j)$, 方式如下:

$$new1(i, j) = (LL - ca) / \alpha \quad (8)$$

5) 用新的水印近似系数矩阵 $new1$ 替换原水印近似系数矩阵, 再进行平衡多小波逆变换与逆预滤波, 得到提取出的水印图像 $newfhat_Y$;

6) 对提取出的水印图像 $newfhat_Y$ 采用相同的密钥进行逆 Arnold 置乱;

7) 将嵌入水印的图像 $newfhat_Y$ 从 YCbCr 色彩空间转换成 RGB 色彩空间, 得到 $newdaa$, 即:

$$newdaa = RGBConversion[newfhat_Y, daa_{Cb}, daa_{Cr}] \quad (9)$$

4. 图像的评价标准

4.1. 评价不可见性

评价不可见性的指标包括峰值信噪比和结构相似度等[6]。

4.1.1. 峰值信噪比

峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)是评价嵌入水印失真程度的客观标准[8]。PSNR 的值越大, 图像间差异越小。PSNR 的计算公式如下:

$$\text{MSE} = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W (X(i, j) - Y(i, j))^2 \quad (10)$$

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg \left[\frac{(2^n - 1)^2}{\text{MSE}} \right] \quad (11)$$

其中, 图像尺寸为 $H \times W$, X 表示原始载体图像, Y 表示嵌入水印图像用。

4.1.2. 结构相似度

结构相似度 (Structural Similarity Index Measure, SSIM) 是一种衡量两幅图像相似度的指标。设图像尺寸均为 $N \times N$ 图像 X 和图像 Y 之间 SSIM 计算公式如下

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2u_x u_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(u_x^2 + u_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (12)$$

4.2. 评价鲁棒性

归一化相关系数

归一化相关系数 (Normalized Correlation Coefficient, NCC) 是计算个体间的相似程度。设原始水印信息和提取的水印信息的长度均为 L , 原始水印信息用 w 表, 提取的水印信息用 w' 表示, 它们之间的归一化相关性 NCC 的计算公式如下:

$$\text{NCC} = \frac{\sum_{i=1}^L w(i) * w'(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^L w^2(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^L w'^2(i)}} \quad (13)$$

其中, 式(13)中 $w(i)$ 表示原始水印信息第 i 个位置上的比特值; $w'(i)$ 代表提取的水印信息第 i 个位置上的比特值。

5. 实验结果分析

为了验证本算法的性能, 采用 MATLAB 2016 完成仿真, 测试图像是均从南加州大学 USC-SIPI 图像数据库获得的标准尺寸为 512×512 的 24 位彩色图像, 水印采用陕西师范大学校徽图案, 在本文中, 提出基于平衡多小波变换的彩色图像水印算法的性能通过各种实验进行评估, 嵌入水印算法中 $\alpha = 0.05$, 实验结果如表 1。

为了测试该算法提取出的水印图像质量, 计算在未进行任何攻击时, 载体图像嵌入水印后的 PSNR 和 SSIM 以及所提取水印的 NCC 值, 从表 1 可以看出, 在 PSNR (>32dB)、SSIM (>0.96) 以及 NCC (0.99) 方面均保持了水印图像的质量。

通过对水印图像进行不同的攻击, 验证了该算法的鲁棒性。本文将攻击包括滤波攻击(均值滤波、中值滤波以及维纳滤波)、噪声攻击(高斯噪声、泊松噪声、乘性噪声以及椒盐噪声)、旋转和 JPEG 压缩攻击。图 1~5 分别描述了水印的 PSNR 和 NCC 值的变化, 以及恢复的水印对椒盐噪声、高斯噪声、乘性噪声、维纳滤波和 JPEG 压缩攻击随攻击参数变化的情况。

Table 1. Performance indicators of the algorithm without attack
表 1. 未攻击时算法的性能指标

含水印彩色图像	Y 通道	大小	PSNR/dB	NCC	SSIM
		512 × 512 Mandrill.ppm	32.6084	0.9998	0.9876
		512 × 512 Bird.jpg	32.8058	0.9999	0.9843
		512 × 512 Blaceyed.jpg	32.7124	0.9999	0.9818
		512 × 512 Pepper.tif	32.8044	0.9942	0.9814
		512 × 512 Lena.tif	32.9254	0.9999	0.9906

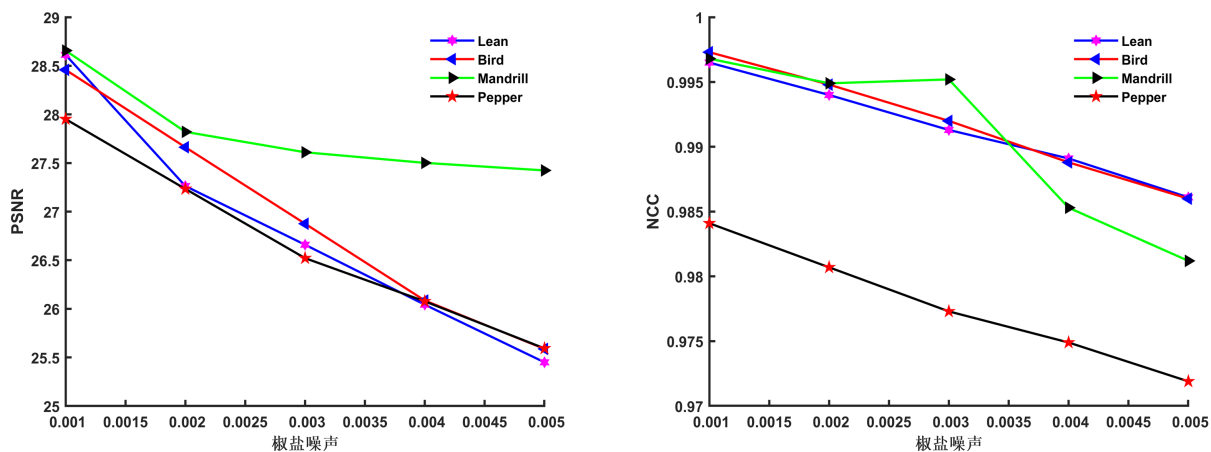


Figure 1. PSNR and NCC changes of salt and pepper noise at different densities
图 1. 不同密度的椒盐噪声 PSNR 与 NCC 变化

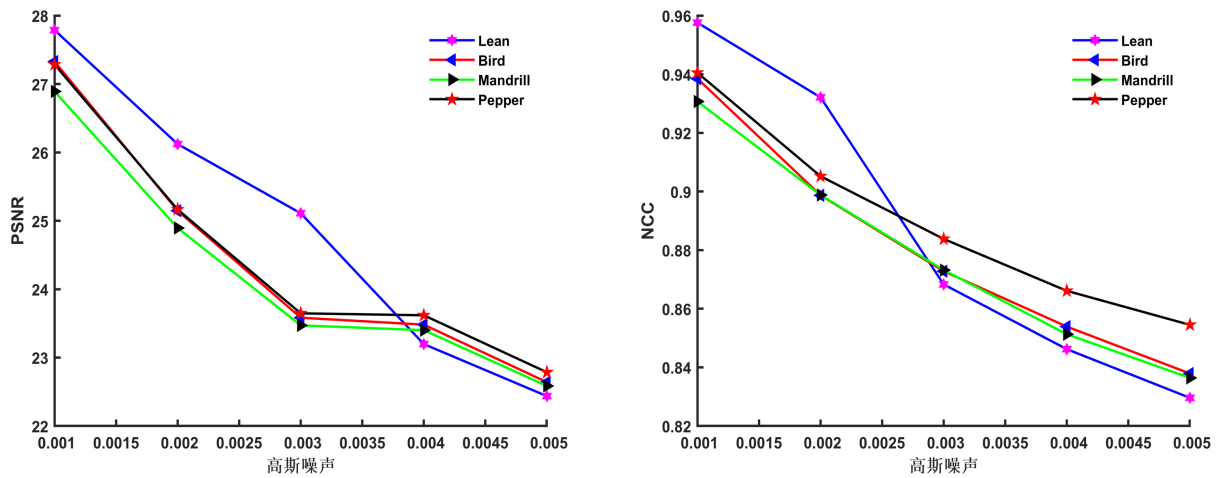


Figure 2. PSNR and NCC changes of Gaussian noise with different densities

图 2. 不同密度的高斯噪声 PSNR 与 NCC 变化

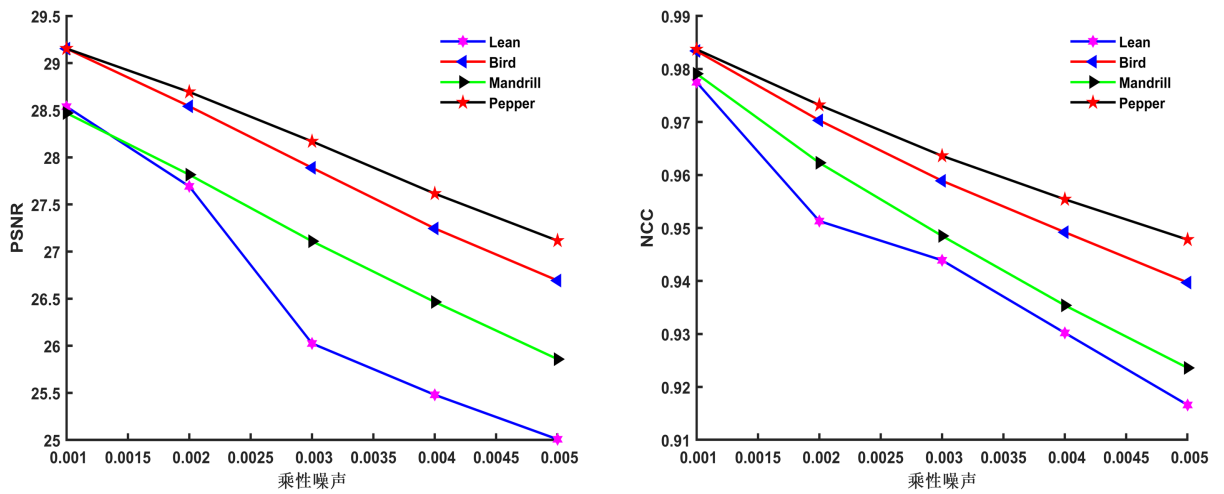


Figure 3. Variation of PSNR and NCC of multiplicative noise at different densities

图 3. 不同密度的乘性噪声 PSNR 与 NCC 变化

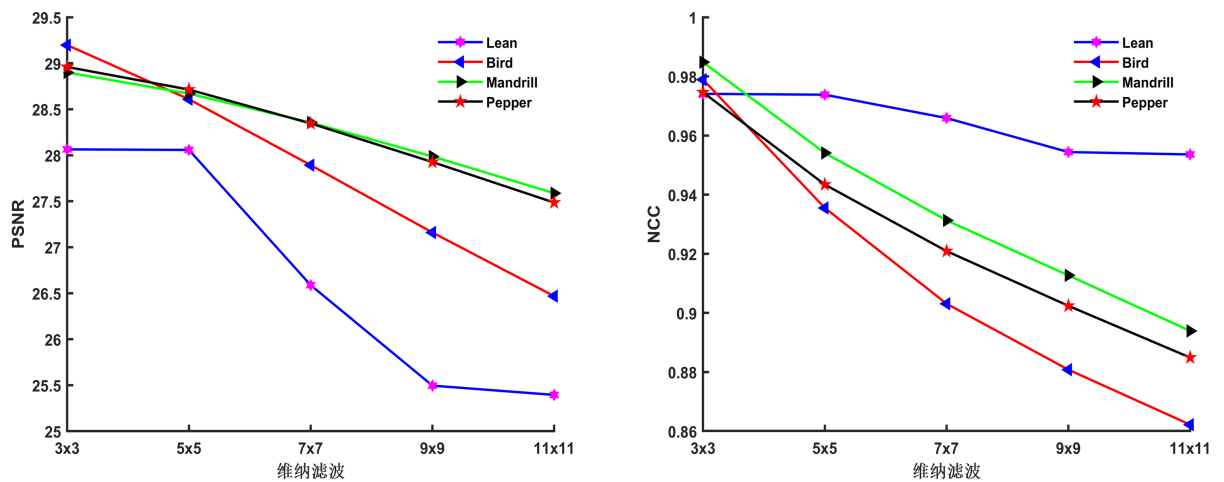


Figure 4. Changes of PSNR and NCC with different Wiener filter sizes

图 4. 不同维纳滤波器大小 PSNR 与 NCC 变化

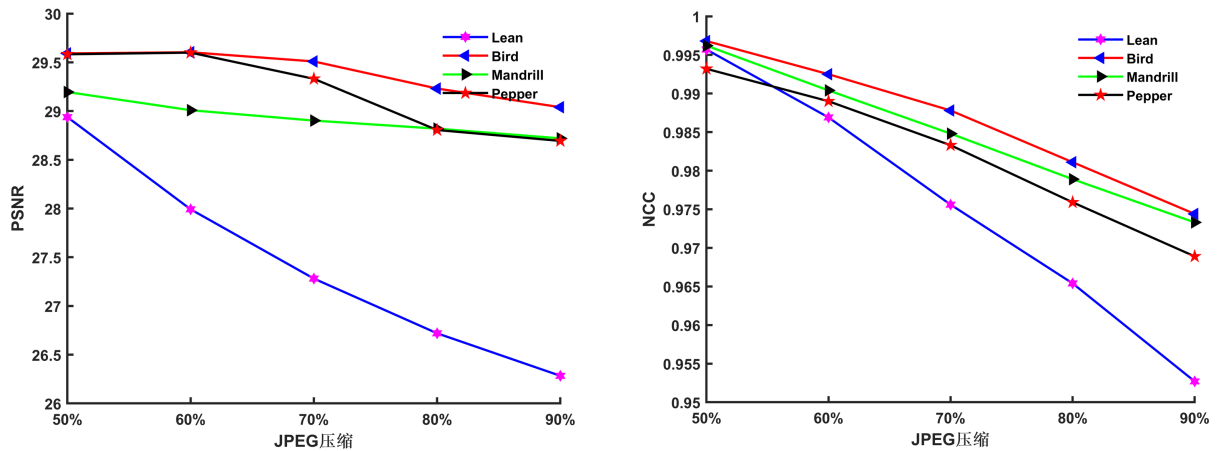


Figure 5. PSNR and NCC changes of different JPEG compression ratios

图 5. 不同 JPEG 压缩比 PSNR 与 NCC 变化

图 1、图 2 和图 3 实验结果分析, 当嵌入水印图像收到不同密度的椒盐噪声和乘性噪声攻击时, 其 PSNR 的值均大于 25 dB。从图 5 可以看出, 图像受到 JPEG 压缩攻击, 其 PSNR 大部分大于 28 dB, 对应的提取出的水印的 NCC 值大部分在 0.97 以上, 即该算法的抗击性能也较好。

为了验证本文提出的算法的良好性能, 将其与使用相同图像的一些现有技术进行了比较, 以获得公平的决策和结论。

在未进行攻击下, 与文献[6]、文献[10]相比, 实验结果如表 2 所示。

Table 2. Comparison of NCC values of different algorithms under attack

表 2. 受到攻击时不同算法 NCC 值比较

攻击	文献[9]	文献[10]	本文算法
椒盐噪声 0.001	0.98	0.93	0.99
椒盐噪声 0.002	0.95	-	0.99
椒盐噪声 0.006	0.81	0.84	0.98
泊松噪声	0.99	0.85	0.89
高斯噪声 0.001	0.91	-	0.93
高斯噪声 0.002	0.83	0.85	0.89
高斯噪声 0.006	0.60	0.84	0.81
乘性噪声 0.001	0.98	-	0.97
乘性噪声 0.002	0.95	-	0.95
乘性噪声 0.006	0.83	-	0.91
中值滤波[3 × 3]	-	0.74	0.89
中值滤波[5 × 5]	0.81	0.74	0.81
高斯低通滤波[3 × 3]	0.93	-	0.97
高斯低通滤波[5 × 5]	0.93	-	0.97
维纳滤波[3 × 3]	0.92	0.89	0.92
维纳滤波[5 × 5]	0.83	-	0.84

从表 2 的结果可以看出, 在嵌入水印的图像进行不同程度的攻击时, 提取出水印的 NCC 值大部分略高于文献[6]和文献[10], 说明算法的鲁棒性较好。

6. 结论

本文提出的基于平衡小波变换的双彩色图像水印算法, 对载体图像和水印图像均采用了 4 阶 cardbal 小波变换, 并对水印图像进行 Arnold 置乱加密, 提高了算法的鲁棒性。通过各种攻击对该算法的鲁棒性进行分析, 实验结果表明, 本文所提算法在保证嵌入的水印具有不可见性的同时也具有较高的抗攻击性。

参考文献

- [1] 周美丽, 白宗文. 基于 HVS 的压缩域数字水印嵌入系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2015(4): 78-80.
- [2] Cui, L.H. and Li, W.G. (2011) Adaptive Multiwavelet-Based Watermarking through JPW Masking. *IEEE Transactions on Image Processing*, **20**, 1047-1060. <https://doi.org/10.1109/TIP.2010.2079551>
- [3] Gomathi, R. (2019) Robust Watermarking Scheme in YCbCr Color Space Using SVD and DKT-DCT Hybrid Wavelet Transforms. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, **9**, 3697-3700. <https://doi.org/10.35940/ijitee.B6363.129219>
- [4] 茹庆云, 郭献洲. 基于图像处理的多小波变化理论及其应用[J]. 现代电子技术, 2017, 40(18): 95-97+100.
- [5] Pravin, S.M., Deepika, R., Aarnika, R., et al. (2021) Digital Watermarking for Medical Images Using DWT and Svdtechnique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1084**, Article ID: 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1084/1/012034>
- [6] Mahendra, K.P., Girish, P., Rajeev, G., et al. (2019) Non-Blind Arnold Scrambled Hybrid Image Watermarking in YCbCr Color Space. *Microsystem Technologies*, **25**, 3071-3081. <https://doi.org/10.1007/s00542-018-4162-1>
- [7] Soumitra, R. and Arup, K.P. (2018) An SVD Based Location Specific Robust Color Image Watermarking Scheme Using RDWT and Arnold Scrambling. *Wireless Personal Communications*, **98**, 2223-2250. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4971-z>
- [8] Su, Q.T., Niu, Y.G., Wang, G., et al. (2014) Color Image Blind Watermarking Scheme Based on QR Decomposition. *Signal Processing*, **94**, 219-235. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.06.025>
- [9] 赵瑶瑶, 李万社. 基于离散小波变换和离散余弦变换的彩色图像水印算法[J]. 应用数学进展, 2021, 10(4): 1096-1102.
- [10] Manish, G., Girish, P., Rajeev, G., et al. (2015) Discrete Wavelet Transform-Based Color Image Watermarking Using Uncorrelated Color Space and Artificial Bee Colony. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, **8**, 364-380. <https://doi.org/10.1080/18756891.2015.1001958>