

基于 Logistic 的 DWT-SVD 彩色图像水印算法



张丽艳^{1,*}, 郎振刚¹, 许慧钢², 方柳¹, 王业童¹

¹大连交通大学计算机与通信工程学院电子与通信工程系, 辽宁大连 116028

²大连交通大学自动化与电气工程学院铁道信号与控制工程系, 辽宁大连 116028

摘要: 随着多媒体业务的飞速发展, 图像版权保护的问题近年来受到广泛关注。图像水印是解决这一问题的关键技术。本文给出了一种基于 Logistic 混沌映射结合 DWT-SVD 的彩色图像水印算法, 本文方法包括水印嵌入和水印提取两部分组成。水印嵌入是指水印图像经过 Logistic 加密和 SVD 分解后嵌入到载体图像的 R、G、B 三个分量的小波低频系数奇异值中, 再通过 SVD 重组和小波重构得到嵌有水印的图像, 在嵌入过程中生成三个密钥。水印提取先对嵌有水印的图像进行小波分解, 对分解得到的低频系数进行 SVD 分解, 根据对应的两个密钥进行水印奇异值重组, 再根据第三个密钥经过 Logistic 加密得到水印的图像, 达到版权保护的目的。该算法优点是将 DWT 与 SVD 结合能较好的克服噪声、压缩, 旋转和缩放等攻击, Logistic 混沌置乱产生新的密钥, 增加了水印的安全性, 使本文方法有了更好的隐蔽性。仿真结果表明本文水印算法有较好的不可感知性和隐蔽性, 而且在图像水印在受到噪声、JPEG 压缩、旋转和缩放攻击时有较好的鲁棒性。

关键词: 版权保护; 图像水印; 离散余弦变换; 奇异值分解; Logistic 加密

DOI: [10.57237/j.cst.2024.01.002](https://doi.org/10.57237/j.cst.2024.01.002)

A Color Image Watermark Algorithm Based on Logistic and DWT-SVD

Zhang Liyan^{1,*}, Lang Zhengang¹, Xu Huigang², Fang Liu¹, Wang Yetong¹

¹Department of Electronic and Communication Engineering, School of Computer and Communication Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China

²Department of Railway Signal and Control Engineering, School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China

Abstract: With the rapid development of multimedia services, the issue of image copyright protection has received widespread attention in recent years. Image watermarking is a key technology to solve this problem. This article presents a color image watermarking algorithm based on Logistic chaotic mapping combined with DWT-SVD. The method in this paper consists of two parts: watermark embedding and watermark extraction. Watermark embedding refers to the embedding of a watermark image into the wavelet low-frequency coefficient singular values of the R, G, and B components of the carrier image after logistic encryption and SVD decomposition. Then, the image embedded with the

基金项目: 大连市重点科技研发计划项目 (2022YF11GX008).

*通信作者: 张丽艳, zhangliyan@126.com

收稿日期: 2023-11-29; 接受日期: 2023-12-28; 在线出版日期: 2024-01-20

<http://www.computscitech.com>

watermark is obtained through SVD recombination and wavelet reconstruction, and three keys are generated during the embedding process. Watermark extraction first performs wavelet decomposition on the image embedded with the watermark, SVD decomposition is performed on the low-frequency coefficients obtained from the decomposition, watermark singular value recombination is performed based on the corresponding two keys, and then the watermark image is obtained through Logistic encryption based on the third key, achieving the purpose of copyright protection. The advantage of this algorithm is that combining DWT with SVD can effectively overcome attacks such as noise, compression, rotation, and scaling. Logistic chaotic scrambling generates new keys, increasing the security of watermarks and making the method proposed in this paper more covert. The simulation results show that the watermark algorithm proposed in this paper has good imperceptibility and concealment, and has good robustness against noise, JPEG compression, rotation, and scaling attacks on image watermarks.

Keywords: Copyright Protection; Image Watermark; Discrete Cosine Transform; Singular Value Decomposition; Logistic Encryption

1 引言

随着通信技术与计算机技术的飞速发展,彩色数字图像信息的传播变得更加普及与广泛。如何保护数字图像信息就成为日待解决的问题。图像水印算法是将具有特定意义的版权信息利用一定的方法隐藏在数字图像中,从而达到数字图像信息的保护。图像水印算法可分为空域算法[1]和变换域算法两大类[2-7]。空域水印算法[1]具有比较简单,且计算量小等优点。但该算法水印容量小,且不能抵抗如剪裁、旋转等攻击,因此算法的鲁棒性无法满足应用要求。变换域水印算法充分利用图像的相关性、人眼视觉特性、变换域能量集中特性和载体数据冗余性,因此可以保证水印具有较好的不可感知性和鲁棒性。该算法常用的变换有三类:离散傅立叶变换[3] (DFT)、离散余弦变换[4, 5] (DCT) 和离散小波变换[6, 7] (DWT)。基于 DFT 域的水印算法原理简单,具有一定鲁棒性,但其与国际图像压缩标准不兼容,因此应用较少。基于 DCT 域的图像水印算法[4]具有较好的不可感知性,且对加噪、滤波和 JPEG 压缩等攻击具有很好的鲁棒性,但对抵抗旋转、缩放等几何攻击的能力不强。DWT [6] 具有多分辨率特性,可修改的子代系数较多,嵌入信息量大,且与人类视觉特性相符,因此基于 DWT 的图像水印算法具有更好的水印不可感知性和鲁棒性,得到了广泛应用。SVD [8, 9] 分解具有唯一的 U 矩阵,且当图像叠加噪声后, U 矩阵的列向量失真较小,因此在图像水印算法中也得到了一定的应

用。此外图像水印算法中,水印图像的加密也是该算法的一个关键,因为 Logistic [10, 11] 映射具初始条件敏感性、随机性、相关性等优良特性,因此本文给出了一种基于 Logistic 加密的 DWT-SVD 的彩色图像水印算法。

2 图像水印的算法模型

基于 Logistic 加密的 DWT 和 SVD 的彩色图像盲水印算法模型主要包括水印嵌入模型和水印提取模型两部分组成。其中水印嵌入模型如图 1 所示。水印提取模型如图 2 所示。由图 1 可知嵌入部分需要对载体图像和水印图像同时处理。处理中会产生密钥 K1、K2 和 K3,然后将水印图像的奇异值按照 2:1:4 的比例分别嵌入到载体图像的 R、G、B 三个分量的小波低频系数奇异值中,再通过 SVD 重组和小波重构即可得到嵌有水印的图像。嵌有水印图像在信道传输的过程中可能会遇到各种各样的处理和攻击,但在提取时根据密钥按照水印嵌入算法的逆过程依然可以正确提取水印信息,达到版权保护的目的。由图 2 可知水印提取部分先对嵌有水印的图像进行小波分解,然后再对低频系数进行 SVD 分解,然后提取密钥 K1,再根据密钥 K2 和 K3 进行水印奇异值重组,最后再经过 Logistic 加密得到水印的图像。

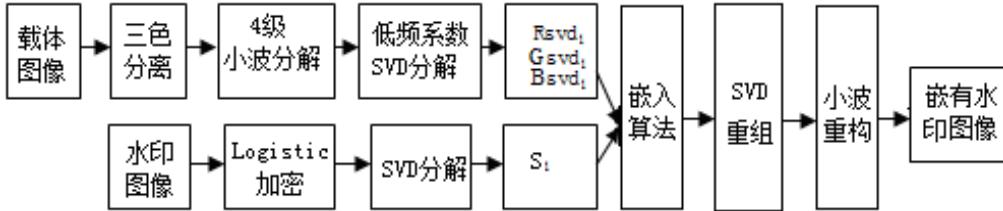


图 1 水印嵌入模型



图 2 水印提取模型

2.1 DWT

离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) [6]是一种可逆的信息保持变换，信号的特征信息保留在小波变换的系数中[5]。小波变换可以将图像分解成不同频率、不同空间的子图像，使得原信号的能量重新分配，得到一种能量紧凑的表示方式。图像经过小波变换后，图像信息的局部特征保留在小波系数中。图像经过四级小波变换后，可将图像划分为低-低、低-高、高-低和高-高四个子带。图像的大部分信息集中到低-低子带中。在小波分析中，对信号进行分解可以得到其近似分量和细节分量，具体分解如式 1 所示。

$$\begin{cases} \mathbf{a}_{j+1} = H\mathbf{a}_j \\ \mathbf{d}_{j+1} = G\mathbf{a}_j \end{cases} \quad (1)$$

其中 $j = 1, 2, 3, \dots, J$, H 为低通滤波器, G 为高通滤波器, \mathbf{a}_j 为信号分解到第 j 层的近似分量, \mathbf{d}_j 为信号分解到第 j 层的细节分量, J 表示最大分解层数。

2.2 奇异值分解

奇异值分解在数据分析、信号处理和机器学习等领域发挥着重要作用，奇异值分解得到的奇异值具有稳定性和不变性，可以较好的反映原始信号的内在特征[8, 12, 13]，基本原理如下：设秩为 r 的实矩阵 $A \in R^{m \times n}$ ，则矩阵 A 奇异值分解如式 2 所示。

$$A = USV^T = \sigma_1 u_1 v_1 + \sigma_2 u_2 v_2 + \dots + \sigma_k u_k v_k \quad (2)$$

其中，矩阵 V 称为右奇异矩阵；矩阵 U 称为左奇异矩阵；矩阵 $S \in R^{m \times n}$ 称为奇异值矩阵，其表达式如式 3 所示。

$$S = \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $S_1 = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k)$, $k = \text{Rank}(A) < p = \min(m, n)$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k \geq 0$, 0 为零矩阵。

2.3 Logistic 加密

广泛应用于密码学领域的 Logistic 混沌系统[14]是一种的一维混沌系统，它的定义如公式(4)所示。

$$X(n + 1) = \mu \cdot X(n)^* (1 - X(n)) \quad (4)$$

其中， $X(n)$ 为第 n 次的系统状态， μ 为控制参数，通常取值在 3.57 至 4.0 之间， μ 值不同，系统会产生不同的混沌轨迹。Logistic 混沌系统的轨迹一般为一条分叉的曲线。通过调整控制参数的值来获得不同的混沌序列。

3 图像水印的算法步骤

图像水印算法的实现步骤包括水印的嵌入步骤和水印的提取步骤。

3.1 水印的嵌入步骤

水印的嵌入步骤如下：

第一步处理原始图像。首先从原图彩色图像中提取 R 、 G 、 B 分量。然后分别对三个分量做四级级小波分解，得到三个低频系数分别为 Rlf_4 , Glf_4 , Blf_4 。并对这三个低频分量进行奇异值分解，求解奇异值分别为 $Rsvd_1$ 、 $Gsvd_1$ 、 $Bsvd_1$ ，将这三个奇异值矩阵记为密钥 $K1$ 。

第二步处理水印图像。首先对水印图像进行

Logistic 置乱, 置乱初值为密钥 K2, 然后对置乱后的图像进行奇异值分解, 得其奇异值为 S_1 , 其左右正交矩阵记为密钥 K3。

第三步实现水印的嵌入。最后根据彩色图像 $R: G: B$ 按 $2: 1: 4$ 的比例将水印的奇异值根据公式 $S' = S + e \bullet S_1$ 分别嵌入到 Rs_{vd_1} 、 Gs_{vd_1} 、 Bs_{vd_1} 中。第四步将嵌有水印的分量采取奇异值重组和小波重构操作, 最终就能获取嵌有水印的图像。

3.2 水印的提取步骤

本文水印提取算法是一种盲水印算法, 即提取时不需要原始图像, 只要知道嵌入过程中产生的密钥 K1、K2 和 K3。水印提取实现步骤如下所示:

第一步将经过信道传输得到的嵌有水印的图像进行三色分离, 然后分别对三个分量做四级级小波分解, 得到三个分量的第四层小波分解的低频系数分别为 Rlf_4 、 Glf_4 、 Blf_4 。

第二步对三个低频分量进行奇异值分解, 求解奇异值分别为 Rs_{vd_1} 、 Gs_{vd_1} 、 Bs_{vd_1} 。

第三步根据公式 $S_1 = (S' - S) / e$ 和密钥 K1 进行水印的提取。第四步根据密钥 K2 和 K3 进行水印奇异值重组和 Logistic 信息的重构, 最终得到水印的图像。

4 水印评价指标

水印的评价指标通常包括水印的隐蔽性和水印的鲁棒性。

水印的隐蔽性是指原始图像和嵌入水印后的图像的相似程度, 相似性越小隐蔽性越好[5, 13]。通常使用峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 定量地描述水印的隐蔽性, 如式 6 所示。

$$PSNR(C, C^*) = 10 \lg \left(\frac{\max(C_{i,j}^2)}{MSE} \right) \quad (6)$$

MSE 表示原图像和嵌入水印图像之间的均方误差, $C_{i,j}^2$ 是原图像中的像素值。通常, 水印嵌入前后峰值信噪比低于 30 dB, 说明水印的隐蔽性比较差, 如果高于 37 dB, 肉眼很难看出水印嵌入前后的差别, 说明水印的隐蔽性较好, 总之 PSNR 值越大说明隐蔽性越好[15]。

水印的鲁棒性是指数字图像在经过某种有意或无意的处理后, 嵌入的水印信息仍能保持部分完整性, 并能被准确鉴别。评估鲁棒性可利用原始水印与提取

出的水印之间的归一化相关系数 (Normalized Cross Correlation, NC), 如式 7 所示。

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W_{i,j} * W_{i,j}^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{i,j}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{i,j}^{*2}}} \quad (7)$$

NC 值越接近 1 说明提取出的水印越接近原始水印, 在未受攻击的情况下该值应该是 1, 在受到攻击的情况下该值越高, 说明算法的鲁棒性越好[16]。

5 仿真及结果分析

本文以彩色图像 lena 作为载体图像, 图像大小为 $512 \times 512 \times 3$, 以数字图像 32 作为水印图像, 图像大小为 32×32 为二值图像。用 Matlab 语言进行仿真。仿真时取 $e=0.1$ 。图 3 给出在没有攻击的情况下的实验结果。由图 3(a)和图 3(b)可见, 视觉上经过水印嵌入后的图像和原始载体图像没有差别, 可以得出该算法具有很好的不可感知性; 由图 3(c)和图 3(d)可见, 提取水印图像与原水印图像一模一样, 验证算法的可行性。为了验证本文算法具有更好的隐蔽性, 选取邱丽红等的 DCT 与 DWT 算法[5]和张丽艳等的 DCT-HD-SVD 算法算法[6]比较。首先计算无攻击情况下嵌有水印图像的 PSNR 值, 衡量算法的不可感知性。图 3(b)计算得到 PSNR 值为 43.089 dB。邱丽红等的算法在未经攻击的情况下得到 PSNR 值为 41.246 dB。张丽艳等的算法在未经攻击的情况下得到 PSNR 值为 40.586 dB。三种算法的 PSNR 性能比较如图 5 所示。图 5 中, 横坐标单位为 dB, 由图 5 见, 本文算法的不可感知性最好。为了验证算法的鲁棒性, 仿真采用相同的载体图像和水印图像进行各种攻击测试。对传输遭受攻击得到的水印图像进行 NC 测试, 测试结果分别如表 1-表 4 所示。表 1 给出了面对噪声攻击时的 NC 性能, 表 2 给出来面对 JPEG 压缩攻击时的 NC 性能, 表 3 给出了面对旋转攻击时的 NC 性能, 表 4 给出了面对缩放攻击时的 NC 性能。

6 安全性分析

本文算法在具有 3 个密钥, 密钥 K1 为水印的 SVD 分解的左右正交矩阵, 密钥 K2 为载体图像的奇异值矩阵, 密钥 K3 为 Logistic 置乱初值及系数, 混沌置乱受初值影响较大, 且置乱后图像不规律, 所以破解难度较大。本文法只有在三个密钥的配合下才能正确解密水印信息, 仅破解一个密钥信息不能很好地识别水印

信息。因此本文算法具有很好的安全性。



(a) 载体图像 (b) 嵌有水印图像

图 3 水印的嵌入图像



(c) 原始水印 (d) 提取水印

图 4 提取的水印图像

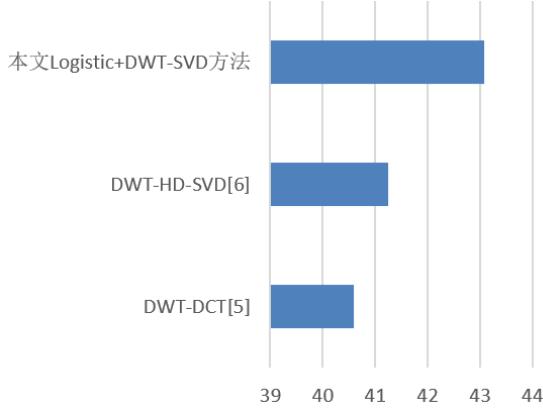


图 5 不同算法的 PSNR 性能比较

表 1 不同算法面对噪声攻击时的 NC 性能比较

攻击参数	0.001	0.02	0.01	0.02
算法	高斯噪声		椒盐噪声	
DWT-DCT [5]	0.982	0.635	0.998	0.959
DWT-HD-SVD [6]	0.982	0.716	0.924	0.772
本文方法	1	0.882	1	1

注：本文方法：本文 Logistic+DWT-SVD 方法

表 2 不同算法面对 JPEG 压缩攻击时的 NC 性能比较

算法	攻击参数	
	Q=10	Q=20
DWT-DCT [5]	0.967	0.996
DWT-HD-SVD [6]	0.991	0.956
本文方法	0.999	1

注：本文方法：本文 Logistic+DWT-SVD 方法

表 3 不同算法面对旋转攻击时的 NC 性能比较

算法	攻击参数（旋转度数：度）	
	1	10
DWT-DCT [5]	0.978	0.556
DWT-HD-SVD [6]	0.776	0.679
本文方法	0.989	0.572

注：本文方法：本文 Logistic+DWT-SVD 方法

表 4 不同算法面对缩放攻击时的 NC 性能比较

算法	攻击参数（缩放尺度）	
	0.6	1.2
DWT-DCT [5]	0.581	0.576
DWT-HD-SVD [6]	0.913	0.981
本文方法	1	1

注：本文方法：本文 Logistic+DWT-SVD 方法

7 结论

本文给出了一种 DWT 和 SVD 相结合盲图像水印算法。该算法利用人眼对 RGB 三个颜色分量敏感度不同，实现水印信息有比例嵌入，提高了算法的不可感知性。同时，本算法充分结合了 DWT 的时频分解特性和 SVD 的几何不变形，在小波分解的低频系数的奇异值中嵌入水印信息，提高了算法的鲁棒性。采用 Logistic 加密技术提高了算法的安全性。仿真结果证明了该算法对加噪、剪切、JPEG 压缩等攻击具有较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] 邵利平, 覃征, 衡星辰. 一种基于图像置乱变换的空域图像水印算法 [J]. 计算机工程, 2007, 02: 122-124.
- [2] 金美玲. 基于 DWT-SVD 域的彩色图像水印算法研究 [D]. 西北师范大学, 2017.
- [3] 奚旭, 张新长, 鲍建腾等. 一种改进 DFT 和 QR 码的矢量地图数字水印算法 [J]. 测绘科学, 2022, 47(10): 190-197.
- [4] 闫丽君, 康宝生, 岳晓菊. 改进的基于 DCT 的自适应水印算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 08: 197-200.
- [5] 邱丽红, 张丽艳. 一种 DCT 域的最优均值量化盲图像水印算法 [J]. 计算机应用研究, 2013, 02: 497-499.
- [6] 张丽艳, 温万钦. 一种基于 DWT-HD-SVD 的数字图像水印算法 [J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(06): 105-109+115.
- [7] 谢斌, 彭林, 刘珊. 一种基于 DWT_SVD 的抗几何攻击彩色图像水印算法 [J]. 电视技术, 2015, 39(21): 10-14.

- [8] 张丽艳, 殷福亮. 一种改进的奇异值分解语音增强方法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 02: 357-361.
- [9] 张天骐, 马焜然, 杨宗方等. NSCT-GBT-SVD 结合特征区域的鲁棒水印算法 [J/OL]. 信号处理: 1-15 (2023-11-29).
- [10] 汪勍, 徐国天. 基于改进 Logistic 映射和双图混合的加密算法 [J]. 信息网络安全, 2022, 22(12): 76-86.
- [11] 曾祥秋, 叶瑞松. 基于改进 Logistic 映射的混沌图像加密算法 [J]. 计算机工程, 2021, 47(11): 158-165+174.
- [12] 窦顺坤, 李常贤, 张丽艳. 基于奇异谱分析与 LSSVM 算法的列车无线网络控制时延预测方法 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(01): 127-133.
- [13] 邱丽红, 张丽艳, 李笑, 等. 基于 DCT-SVD 的抗几何攻击图像水印算法 [J]. 大连交通大学学报, 2014, 35(06): 93-96.
- [14] 洪媛, 徐宁, 涂兴华. 基于 Logistic 混沌的图像实值加密 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(02): 149-155.
- [15] 张丽娜. 基于矩阵分解的小波域鲁棒水印算法研究[D]. 西安电子科技大学, 2020.
- [16] 吴德阳, 张金羽, 容武艳, 唐勇, 赵静, 曲长波. 数字图像水印技术综述 [J]. 高技术通讯, 2021, 31(02): 148-162.

作者简介

张丽艳

1974 年生, 副教授, 博士, 研究方向为无线通信、信号与信息处理、嵌入式系统开发.

E-mail: zhangliyan@126.com

郎振刚

1998 年生, 硕士生, 研究方向为图像信号处理.

E-mail: 512020111@qq.com

许慧钢

1996 年生, 硕士生, 研究方向为无线通信、信号处理

E-mail: 921635926@qq.com

方柳

1999 年生, 硕士生, 研究方向为信号处理、人工智能.

E-mail: 3289413695@qq.com

王业童

1999 年生, 硕士生, 研究方向为信号处理、人工智能.

E-mail: 1216737839@qq.com