

doi:10.11920/xnmdzk.2025.02.011

基于 BEMD-DWT-SVD 的数字图像水印算法

魏金玉, 郭现峰, 高春琴, 贺元, 罗杰

(西南民族大学计算机与人工智能学院, 四川成都 610041)

摘要: 聚焦于研发高鲁棒性数字图像水印算法, 以应对现有图像水印版权保护的不足. 针对旋转和 JPEG 压缩攻击的鲁棒性挑战, 提出了基于 BEMD-DWT-SVD 的数字图像水印方案. 首先利用 Arnold 变换和二维 DWT 变换对水印信息进行加密, 以达到提升水印图像的安全性; 分别对载体和水印图像块进行 SVD, 再使用加法原则分别把水印图像块嵌入到载体图像块中, 最后使用自适应阈值分割来获得水印图像. 实验结果表明, 该算法具有良好的水印嵌入效果, 且在旋转攻击、JPEG 压缩、滤波器和组合攻击等实验中, 归一化相关性系数达到 1, 证明了算法的稳健性.

关键词: 二维经验模态分解; 离散小波变换; 奇异值分解; 鲁棒性; 数字水印

中图分类号: TP309.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2025)02-0216-09

Digital image watermarking scheme based on BEMD-DWT-SVD

WEI Jinyu, GUO Xianfeng, GAO Chunqin, HE Yuan, LUO Jie

(School of Computer and Artificial Intelligence, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper focused on the research and development of high robustness digital image watermarking algorithm to deal with the shortcomings of existing image watermarking copyright protection. A digital image watermarking scheme based on BEMD-DWT-SVD was proposed to overcome the robustness challenge of rotation and JPEG compression attacks. First, Arnold transform and two-dimensional DWT transform were used to encrypt the watermark information to improve the security of the watermark image; then SVD was applied to the carrier and watermark image blocks respectively, and then the watermark image blocks were embedded into the carrier image blocks by adding principle; finally the watermark image was watermarked by adaptive threshold segmentation. Experimental results showed that the algorithm had a good watermark embedding effect, and the normalized correlation coefficient reached 1 in the experiments of rotation attack JPEG compression filter and combined attack, which proved the robustness of the algorithm.

Keywords: BEMD; DWT; SVD; robustness; digital image watermarking

随着信息技术的飞速进步, 数字媒体信息的交流已达到了前所未有的规模与深度, 数字内容的传播与复制愈发简便. 然而, 这种便捷性也带来了网上图像版权保护所面临的日益严重的挑战^[1]. 如何在互联网环境中确保版权的有效保护, 并增强水印信息的安全性, 已成为信息安全和信息隐藏领域的研究焦点. 随着多媒体技术的日新月异, 图像传输的安全性受到了

广泛重视, 以数字水印为基础的图像信息隐藏技术成为研究的热点^[2].

水印技术主要是涉及水印插入过程, 在这一过程中通常在空间域和频域两个关键领域进行操作. 在空间域方法中, 通过将水印直接嵌入封面图像的像素中来实现信息隐藏. 然而, 这种方法存在明显不足. 一方面, 其对噪声、裁剪、缩放等攻击的鲁棒性较弱, 导致

收稿日期: 2024-06-28

通信作者: 郭现峰 (1978-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 密码算法及协议构建、多媒体安全. E-mail: gxf@swun.edu.cn

基金项目: 四川省科技计划项目 (2023NSFSC0471); 西南民族大学中央高校项目 (ZYN2025206)

水印在遭受攻击时易受损,难以准确提取和验证.另一方面,由于不同图像特性差异,水印嵌入容量呈现出一致性,有时无法完整嵌入所需信息,有时则过度嵌入影响图像质量.这些问题共同降低了恢复水印图像与原始封面图像之间的相似度,限制了空间域方法在实际应用中的效果.因此,研究人员提出了基于频域的水印方案,其中包括利用离散小波变换等频域操作来实现水印嵌入.在频域方法中,覆盖数据的频谱被分解为不同的频率,常见的方法包括离散余弦变换^[3]、离散小波变换^[4]以及离散傅里叶变换^[5]等.这些方法可以将图像转换到频域,把水印信息嵌入到载体图像的频域中,从而提高水印的鲁棒性和隐蔽性.Kunder 等^[6]最早在 1999 年提出将数字水印嵌入在宿主图像的 DWT 域中,图像经过小波变换后,封面图像就会被划分为若干子带,所以图像的空频转换特性能够很好匹配视觉系统.Zhang 等^[7]研究了小波域的数字水印算法,主机图像经不同电平小波与余弦变换后,采用扩散变换量化指数调制嵌入水印,再通过正交匹配追踪算法优化去噪后的水印提取.Savaka 等^[8]使用单级离散小波变换(DWT)得到近似系数,离散傅里叶变换(DFT)用于获得足以描述整个图像的分量集,并利用奇异值分解(SVD)得到变换图像的计算可持续分量的可靠正交矩阵,该方法对旋转、裁剪、JPEG 压缩等攻击的 NC 值达到了 0.92 及以上.文献[9-10]虽尝试通过在变换域中多次嵌入相同水印以增强鲁棒性,然而这种做法却牺牲了载体图像的峰值信噪比,导致图像质量下降.WANG 等^[11]学者用 DWT 分解图像并在低频子带嵌入加密水印,对压缩鲁棒性强,但对噪声攻击的抵抗能力有待提高.ZHANG 等^[12]则进一步采用了二级 DWT 处理宿主图像,并结合 DCT 嵌入水印于图像频域,增强压缩的鲁棒性,然而,该算法对高强度噪声攻击鲁棒性不足.Singh 等^[13]提出了一种结合 DWT、DCT 和 SVD 的水印方案,尽管该方案提高了鲁棒性,但由于其复杂性以及高频分量的脆弱性,使其易受外部攻击影响.WANG 等^[14]学者采用二维 EMD 与 Hilbert 曲线技术嵌入水印,提升了水印的鲁棒性与效率,但在面对压缩攻击时,其保护效果有所减弱.对宿主图像进行了二维经验模态分解,并利用 Hilbert 曲线降低水印图像的维度,将水印信号嵌入到 BEMD 的极值点.该方法在鲁棒性和效率方

面表现出色,尤其在处理非压缩攻击时效果显著,但对压缩攻击的防护力较弱.NIDAA 等^[15]结合 LWT 与 BEMD,通过优化低频与高频信号的处理方式嵌入水印,降低了计算成本,但在极端噪声和 JPEG 压缩条件下,水印的鲁棒性有待加强.文献[16]中,研究者运用二维经验模态分解分解宿主图像,选择最后内蕴模态函数作为水印嵌入区,再经离散余弦变换嵌入水印至中频系数.但该算法在几何攻击下水印提取效果不佳,需优化以增强鲁棒性.Rahman 等学者^[17]提出一种基于 DWT 和 SVD 的图像水印方案,将载体图像的 R、G、B 分量分离,对 R 分量应用四级 DWT,再利用 DWT 的 HL 子波段进行 SVD 分解以嵌入水印.然而,该方案对旋转攻击的鲁棒性有待提高.李峰等学者^[18]提出一种混沌和 HVS 结合的小波域自适应图像水印新方法,通过二级 DWT、SVD 分解和 Logistic 混沌置乱,自适应嵌入二值水印于中频子带,具有出色的不可见性和对噪声和滤波攻击的鲁棒性,但该算法在高强度压缩攻击表现较差.杨健等人^[19]提出一种结合 SVD 分解的数字水印算法,利用剪切波多尺度分解和 SVD,在强量子带嵌入水印,实现高鲁棒性,实验显示结构相似性接近 1 和平均 NC 值在 0.98 以上,满足不可见性,但在抵抗高强度滤波攻击表现一般.赵培越等人^[20]提出基于 ZUC 与 DWT-SVD 的交换加密水印算法,基于奇异值不变性嵌入水印,并通过 ZUC 算法加密,嵌入与加密顺序灵活,且可从加密和解密后的图像中提取完整水印,但在面对高强度噪声攻击时鲁棒性不佳.

算法融合 BEMD 平滑特性抗高强度噪声,结合二维 DWT 与 SVD 稳定性,优化性能.针对图像定制嵌入强度,增强不可见性与鲁棒性;自适应分割获得水印,有效提高了抗高强度旋转攻击的能力,提高了算法的可靠性.

1 Arnold

Arnold 是一种混沌加密形式,可以提供水印安全性,由于其操作简单,被广泛应用于数字水印的预处理环节,图像被一个转换击中后,该转换显然随机化了像素的原始组织.迭代多次后,原始图像将重新出现.其矩阵运算式如式(1).

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

其中, (x_{n+1}, y_{n+1}) 为像素 (x_n, y_n) 变换后的坐标, n 表示变换次数, a, b 为参数, N 为正方形图像尺寸.

1.1 BEMD 二维经验模态分解

BEMD (Bivariate Empirical Mode Decomposition) 是一种二维频域数据分解方法, 扩展自经验模态分解 EMD 算法, 用于处理非线性和非平稳信号. 它通过迭代分解二维信号的空间和时间方向, 得到不同尺度和频率的本征模态函数. BEMD 通过迭代处理剩余部分, 分离出 IMF 及剩余分量, 完成原始图像的二维经验模态分解. 这种方法在图像处理中特别有效, 能够分解图像为不同频率和尺度的成分, 对特征提取、去噪和压缩等应用具有重要意义. BEMD 算法流程如下:

步骤 1: 一个 $m \times n$ 的二维图像, 求 $I(x, y)$ 的所有极值点, 通过比较每个像素与邻域内的像素值, 可确定哪些像素是局部的最大值或最小值, 并将它们标记为极值点.

步骤 2: 通过样条曲线插值法分别对极大值点和极小值点进行插值处理, 从而计算出二维图像的上包络 (Upper Envelope, UE) 和下包络 (Lower Envelope, LE).

步骤 3: 计算上 UE 和 LE 的均值, 记作均值包络 (Mean Envelope, ME) 公式 $ME = (UE + LE) / 2$, 随后从原始图像中减去 ME, 得到 $I' = I - ME$, 即去除 ME 后的图像.

步骤 4: 计算筛分终止条件如式 (2), $I'_{j-1}(x, y)$ 和 $I'_j(x, y)$ 为两连续筛分时间序列间差异度 SD, 通常界定于 0.1 至 0.3 内, 作为筛分结束的标准.

$$SD = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \frac{|I'_{j-1}(x, y) - I'_j(x, y)|^2}{I'_j(x, y)^2}. \quad (2)$$

步骤 5: 若筛分终止条件不成立, 则算法循环执行前三步流程, 直至达成条件; 一旦满足条件, 将当前筛分得到的结果作为 IMF_1 . 再从原图提取 IMF_1 , 利用剩余信息 I_{r1} 迭代前述步骤一至四, 直至各尺度 IMF 及最终残差均被分离.

$$I(x, y) \text{ 可表示为 } I(x, y) = \sum_{i=1}^k IMF_i + res.$$

1.2 2D-DWT 二级离散小波变换

离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform) 是数字图像处理中的关键工具, 它将图像从空间域转换为频域. DWT 能将图像分解为四个子带: LL (近似细节)、HL (水平细节)、LH (垂直细节) 和 HH (对角线细节), 实现二维多分辨率分析. 图 1 展示了二级 DWT 变换分布图, 子带 LL_2 包含了图像中的低频和大部分能量, 适合保护以免损害图像质量; 而三个子带 (HL_2, LH_2, HH_2) 被称为细节部分, 更适用于嵌入鲁棒水印. DWT 的逐级分解特性使信号分析更加灵活, 适应不同处理需求, 为图像的高效表示和处理提供了有力支持.

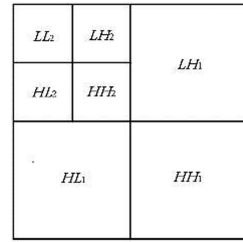


图 1 2D-DWT 后的频域分布图

Fig.1 Schematic diagram of frequency domain distribution after 2D-DWT of image

1.3 SVD 奇异值分解

奇异值分解 (Singular Value Decomposition) 是对矩阵特征分解的进一步拓展, 实现了正交变换. 它能够集中特征于对角线上, 从而实现对图像的高效分析和处理. 奇异值分解公式如式 (3) 所示.

$$A = USV^T = \begin{bmatrix} u_{1,1} & \cdots & u_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m,1} & \cdots & u_{m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \sigma_n \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1,1} & \cdots & v_{1,m} \\ v_{2,1} & \cdots & v_{2,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m,1} & \cdots & v_{m,m} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中 A 是 $M \times N$ 的原始矩阵, $M \times M$ 和 $N \times N$ 的正交矩阵分别记为 U 和 V , S 作为 $M \times N$ 的奇异值矩阵, 其包含的奇异值满足特定条件 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1} = \cdots = \sigma_n = 0$. 对于水印算法, 需具备强抗扰动能力, 以应对图像遭受攻击时载体矩阵的变化, 保障水印信息的准确提取和识别. 因此设计高鲁棒性的水印算法对实际应用至关重要.

2 算法流程

结合 BEMD、DWT 与 SVD, 实现高鲁棒性与不可见

性的水印算法.选用分别为 512×512 的 Lena、Baboon 和 Peppers 等彩色图像和 32×32 的二值水印图像.

2.1 水印预处理

为确保水印的安全性以及水印嵌入的隐蔽性,首先对水印图像进行预处理.这一预处理过程包括两个关键步骤:对水印实施 Arnold 变换;进一步执行二维 DWT 变换,如图 2 所示.经过上述系列操作,成功实现了水印图像的离散化处理,这一举措显著提升了水印图像的安全性.这种综合性的方法不仅混淆了水印信息的分布,还通过变换域的操作掩盖了水印的存在,从而提高了水印系统的安全性与隐蔽性,确保水印信息在嵌入过程中不易被察觉.在本文中,我们将使用 Arnold 变换对图像进行 5 次置乱处理,并将水印以强度 38 嵌入到目标图像中.



图 2 水印预处理

Fig.2 watermark preprocessing

2.2 水印嵌入算法

水印嵌入的具体算法流程如图 3 所示,我们能够有效地在保持载体图像质量的同时,将水印信息嵌入其中,实现信息的隐蔽传输和版权保护.

水印嵌入算法主要步骤如下:

步骤 1:读取大小为 $n \times n$ 的水印图像 w ,随后对水印进行 Arnold 置乱,接着对水印图像执行 2D-DWT,将其从空间域转换到小波域,得到变换后的水印图像 w_1 .

步骤 2:对尺寸为 $M \times M$ 的载体图像 z ,进行 BEMD,得到一组有限个不同特征尺度的 IMF 以及余余项 r .

步骤 3:选取 IMF_1 作为嵌入层,对 IMF_1 进行 2D-DWT,得到 IMF_1' .

步骤 4:将 IMF_1' 分为 S 个块,其中 $S = \frac{M}{n} \times \frac{M}{n}$, B_i 表示块, $i=1,2,\dots,S$.

步骤 5:对 B_i 进行 SVD,得到 $U_i \times S_i \times V_i = B_i$;再对 w_1 进行 SVD,得到 $U_w \times S_w \times V_w^T = w_1$.

步骤 6:水印嵌入,令 $S_i = S_i + \lambda \times S_w$, λ 为嵌入强度.

步骤 7:用 U_k, S_i, V_k 进行逆 SVD,得到 $B_k = U_k \times S_i \times V_k^T$.将所有的 B_k 合并为大小为 $M \times M$ 的图像.对图像进行逆 2D-DWT,得到 IMF_1'' ,并将所有分解得到的 IMF 按照权重进行加和,经过上述处理,我们得到含水载体图像.

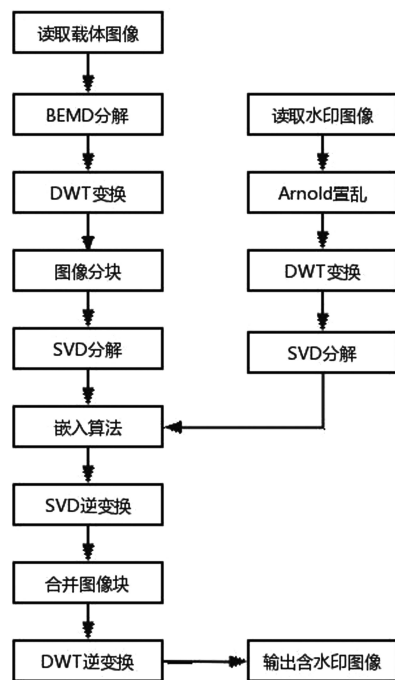


图 3 水印图像嵌入流程

Fig.3 Flowchart of watermark image embedding

2.3 水印提取算法

水印图像提取旨在从含水载体图像中准确恢复水印信息,用于版权验证等.与嵌入过程相似,其算法流程如图 4 所示.提取水印图像步骤如下:

步骤 1:对遭受攻击后的含水载体图像执行 BEMD,提取首个固有模态函数 IMF_1 .随后对提取的 IMF_1 进行 2D-DWT,从而得到经过变换处理的 IMF_1' .

步骤 2:在提取出 IMF_1' 后,对其进行分块处理,每个分块表示为 $B_j, j=1,2,\dots,S$.

步骤 3:对所有分块 B_j 进行如下处理:对每个分块进行 SVD,可得 $U_j \times S_j \times V_j^T = B_j$;计算 $S_w^1 = |S_j^1 - S_j| / \lambda$,得到提取的水印 S_w ;用 S_w^1 和 U_j, V_j 进行逆 SVD,可得 $W_j = U_j \times S_w \times V_j$.

步骤 4: 利用 W_i 进行逆 2D-DWT 和逆 Arnold 加扰, 得提出来的水印图像 W'_i . 然后把提出来的 S 块水印加起来, 可得 W_k , 最后使用自适应阈值分割将图像进行归一化和自适应计算, 恢复出二值水印 W .

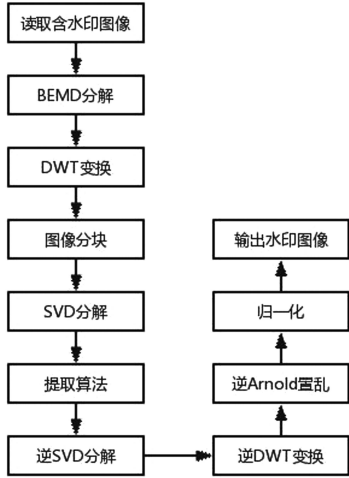


图 4 载体图像提取水印流程

Fig.4 Flowchart of carrier image watermark extraction

3 实验仿真与分析

在实验中, 我们选用了 512×512 像素的 Lena、Baboon 和 Peppers 等彩色图像作为载体图, 并使用了 32×32 像素的二值图像作为水印. 在水印嵌入过程中, 调整水印嵌入强度是优化算法性能的关键, 需确保水印信息的有效提取且不损害载体图像质量. 本文采用的是动态调整策略: 在某些情况下, 可能需要根据实际

应用场景和需求, 动态地调整水印的嵌入强度.

为了全面评估提出的水印算法性能, 我们将通过结构相似度 (SSIM) 和峰值信噪比 (PSNR) 评估水印嵌入后的图像质量, 以确保水印的不可见性.

$$SSIM(x, y) = [I(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (4)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I(i, j) - I_w(i, j))^2 \quad (5)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (6)$$

为了评价算法的鲁棒性, 我们将通过计算提取出的水印与原始水印之间的归一化相关性系数 (NC) 和误码率 (BER) 来量化水印在遭受各种攻击后的保持能力. 这些评估指标将提供全面而客观的算法性能分析依据.

$$NC = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} w(i, j) w_{ext}(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} w^2(i, j)} \sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} w_{ext}^2(i, j)}} \quad (7)$$

$$BER = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} w(i, j) \oplus w_{ext}(i, j)}{M \times N} \quad (8)$$

3.1 不可见性和鲁棒性分析

在相同强度、相同水印图像条件下, 对 Lena、Baboon 和 Peppers 等图像进行透明性实验, 结果显示信噪比均超过 31.069 3 db, 结构相似度均超过 0.980 1, 误码率为 0, 归一相关性系数为 1. 这表明本文提出的数字图像水印算法对于不同图像具有良好的嵌入和提取能力, 证明了其适用性和可行性.

表 1 不可感知性对比

Table 1 Normalized correlation comparison

图片名称	含水印图像 (512×512)	水印图像 (32×32)	PSNR	SSIM	BER	NC
Lena		西南民族福	31.115 1/31.069 3	0.982 2/0.982 0	0	1
Baboon		西南民族福	31.486 6/31.443 9	0.980 3/0.980 1	0	1
Peppers		西南民族福	31.982 2/31.941 2	0.981 6/0.981 5	0	1

注: 加粗为最优值.

表 2 为不同含水印图像经过各种攻击恢复水印图像的 NC 值.以 Peppers、Lena 和 Baboon 彩色图像为例,可知显示的 NC 值表现效果良好.在面对 1% 的噪声攻击时 NC 值均保持在 0.950 5 以上,最高达 0.999 3.算法尤其擅长应对旋转、缩放、JPEG 压缩和滤波等高强度攻击,NC 值在特定条件下甚至达到 1.0,显示出卓越的鲁棒性.在剪切攻击方面,在剪切 1/4 以内 NC 值可达 0.978 1,因此能有效地抵抗一定范围内的剪切攻击,故算法在剪裁攻击下具有不错的鲁棒性.实验数据说明,BEMD-DWT-SVD 水印算法对常见的图像处理攻击具有良好的健壮性.

表 2 不同图像受各种攻击后 NC 值

Table 2 NC value of different images after various attacks

攻击类型	参数	Peppers	Lena	Baboon
椒盐噪声	1%	0.950 5	0.956 5	0.979 1
高斯噪声	1%	0.974 1	0.982 9	0.999 3
乘性噪声	1%	1.0	1.0	0.999 1
旋转攻击	20	1.0	1.0	1.0
剪切攻击	25%	0.873 6	0.847 5	0.978 1
缩放攻击	(0.5,2)	0.940 5	1.0	1.0
JPEG 压缩	40%	1.0	1.0	1.0
中值滤波	[5,5]	1.0	1.0	0.996 9
均值滤波	[5,5]	1.0	1.0	0.961 9
高斯低通滤波	[5,5]	1.0	1.0	1.0

注:加粗为最优值.

图 5 展示 Baboon 和 Peppers 图像在不同高斯噪声密度下的表现.Baboon 图的水印即使噪声密度从 2.0% 增至 20.0%,水印提取的 NC 值仍为 1.0,显示水印完整性未受损;Peppers 图的水印 NC 值由 0.967

5 略降至 0.957 5,但高值仍证明水印的辨识度和完整性良好.实验表明,算法对高斯噪声攻击展现出强鲁棒性,能有效保护图像,验证了其在图像保护方面的有效性.

图 6 展示了 Peppers、Lena、Couple 和 Baboon 图像在 [5,5] 和 [9,9] 大小中值滤波攻击下水印提取结果.实验表明,尽管滤波攻击对图像产生了一定影响,但提取的水印在大多数情况下 NC 值仍保持 1.0.对于纹理复杂的图像如 Baboon,随着滤波攻击程度增强,水印 NC 值从 0.996 9 降到 0.943 6,但整体仍清晰可辨.这验证了本文算法在面对中值滤波攻击时的高鲁棒性.

图 7 清晰地展示 yacht 和 Baboon 图像在 70%、50%、30% 和 10% 压缩比下的处理效果,以及对应的水印提取结果.无论压缩比如何降低,图像细节虽减少,但水印提取的 NC 值始终保持在 1.0.这验证了本文算法在 JPEG 压缩攻击下的高鲁棒性,即使图像质量受到严重影响,水印仍能保持完整和可识别.这充分证明了本文算法在 JPEG 压缩攻击下具有较高的鲁棒性.

图 8 显示了 Boat 和 Lena 图像在经受不同旋转角度攻击后的效果及水印提取结果.随着旋转角度从 5 度增至 45 度,图像的几何结构发生显著变化,但水印算法表现出强大的鲁棒性.尽管水印 NC 值从 1.0 降低到 0.981 7,但即使面对 45 度旋转,提取的水印仍清晰可辨.这表明本文水印算法在抵抗大角度旋转攻击时能保持水印信息的完整性,具有很高的鲁棒性.

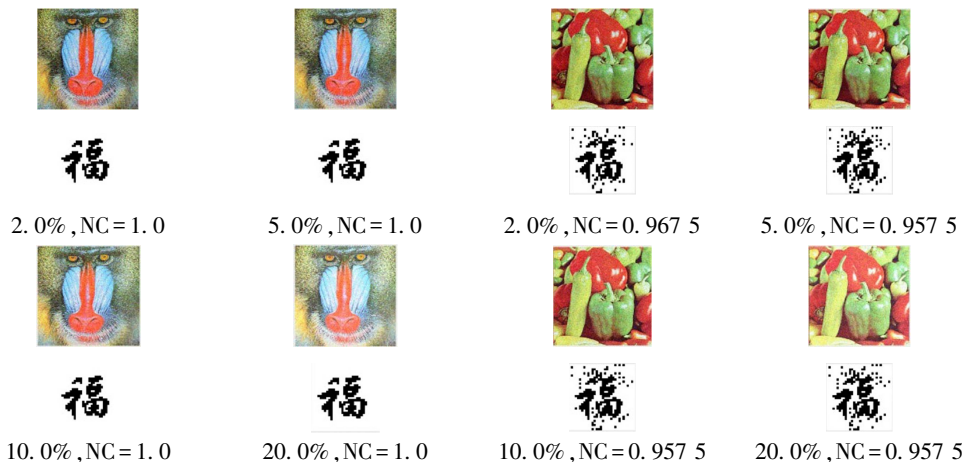


图 5 高斯噪声攻击实验结果

Fig.5 Experimental results of Gaussian noise attack



图 6 中值滤波攻击实验结果

Fig.6 Experimental results of median filtering attack

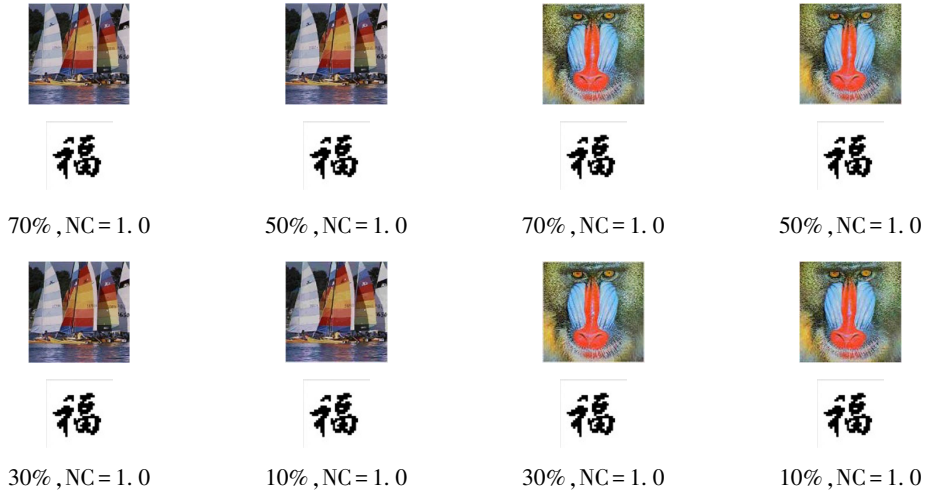


图 7 JPEG 压缩攻击实验结果

Fig.7 Experimental results of JPEG compression attack



图 8 旋转攻击实验结果

Fig.8 Experimental results of rotation attack

图 9 显示了 Baboon、Boat、Lena 和 Yacht 图像在经受组合攻击后的效果及水印提取结果.各图像在受到椒盐噪声密度为 0.1 和高斯低通滤波为 [5,5] 时 NC 值均为 0.922 3 以上,各图像在受到 JPEG 压缩比

为 50%和旋转攻击 45°时 NC 值均为 0.981 7 以上,提取的水印依旧清晰可辨,这表明本文水印算法在抵抗这两种组合攻击时能保持水印信息的完整性,具有较高的鲁棒性.



图 9 组合攻击实验结果

Fig.9 Experimental results of Combinatorial attack

3.2 与其他算法的对比

本文提出的图像水印算法,结合 BEMD、DWT 和 SVD 的特性,通过对水印图像加密并采用分块嵌入以及自适应分割技术,显著提升了水印的不可见性和安全性.与文献[21] DWT-GBT-SVD 和文献[22] RDWT-SVD 算法相比,实验显示,在保持载体图像 SSIM 值不变的前提下,选用 Baboon 图像作为载体图像,通过

BER 值来评估各算法的鲁棒性.如表 3 所示,本文算法在面对除椒盐噪声外的各种攻击时表现出更高的鲁棒性.虽然 DWT-GBT-SVD 在椒盐噪声攻击下性能优越,其 BER 值仅为 0.016 6,但本文算法在其他强度攻击下 BER 值均为 0,证明了其全面的鲁棒性.这一结果表明,本文算法在面对多样化攻击时的高效和鲁棒性.

表 3 不同算法受各种攻击后 BER 值对比

Table 3 Comparisons of BER values of different algorithms under various attacks

攻击类型	参数	DWT-GBT-SVD	RDWT-SVD	BEMD-DWT-SVD
椒盐噪声	1%	0.016 6	0.025 4	0.040 0
高斯噪声	1%	0.075 2	0.039 1	0.000 0
乘性噪声	1%	0.002 9	0.011 7	0.000 0
旋转攻击	2°	0.042 8	0.535 2	0.000 0
JPEG 压缩	50%	0.000 0	0.000 0	0.000 0
均值滤波	[3,3]	0.055 7	0.210 9	0.000 0
中值滤波	[3,3]	0.013 7	0.157 2	0.000 0
移动模糊	9	0.102 5	0.062 5	0.000 0
剪切攻击	左上 1/16	0.037 1	0.030 3	0.000 0
行列交换	(1,20)行	0.010 7	0.010 7	0.000 0

注:加粗为最优值

4 总结与展望

本文提出了一种基于 BEMD-DWT-SVD 的数字图像水印方案算法。通过权衡水印的鲁棒性与隐蔽性,选定将置乱水印的 BEMD 信息嵌入宿主图像的相应内蕴模态函数中。在大量透明性测试中,选取国际处理标准图像中的图像进行测试,在相同嵌入强度的前提下,图像嵌入水印前后的相似系数差异较小,信噪比值均为 31 db 以上,人体视觉无法察觉,NC 值能达到 1,可见文本提出的算法不可见性良好。通过 Arnold 变换和二维 DWT 变换对水印信息进行加密,有效提升了水印图像的安全性。利用 BEMD 分解和 SVD 变换,将置乱水印的 BEMD 信息嵌入到宿主图像的相应内蕴模态函数中,实现了水印的灵活嵌入。但由于结合了 BEMD、DWT 和 SVD 等多种变换方法,算法的计算复杂度相对较高,影响了实际应用中的处理速度。在大量鲁棒性测试中,本文提出的数字图像水印算法在滤波攻击、JPEG 压缩、旋转攻击和缩放攻击实验中表现较好,尤其对于图像纹理复杂的图像效果好。尽管算法在多种常见攻击下表现良好,但可能仍对某些特定类型的攻击(如裁剪攻击、恶意篡改等)表现出一定的敏感性。未来会研究基于图像内容或感知特性的自适应嵌入强度控制方法,以在保持水印鲁棒性的同时减少对载体图像质量的影响,通过并行计算进一步优化算法的处理速度。

参考文献

- [1] 王树梅. 数字图像水印技术综述[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2022, 35(1): 31-36+68.
- [2] 冯柳. 以数字水印为基础的图像信息隐藏技术[J]. 计算机光盘软件与应用, 2015, 18(1): 223+225.
- [3] SUN L M, LIANG S L, CHEN P P, et al. Encrypted digital watermarking algorithm for quick response code using discrete cosine transform and singular value decomposition[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(7): 10285-10300.
- [4] 王树梅. 图像特征里的小波域水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(8): 175-178.
- [5] 王树梅, 张文斌. 一种基于傅里叶变换的鲁棒水印算法[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2019, 32(3): 17-22.
- [6] KUNDUR D, HATZINAKOS D. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion[J]. in Proceedings of IEEE ICIP, 1997, 7: 544-547.
- [7] ZHANG Y F, LI Y Y, SUN Y B. Digital watermarking based on joint

- DWT-DCT and OMP reconstruction[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2019, 38(11): 5135-5148.
- [8] SAVAKAR D G, GHULI A. Non-blind digital watermarking with enhanced image embedding capacity using DMeyer wavelet decomposition, SVD, and DFT[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2017, 27(3): 511-517.
- [9] SEDDIK H, SAYADI M, FNAIECH F. A new blind image watermarking method based on shur transformation[C]//2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Porto, Portugal: IEEE, 2009: 1967-1972.
- [10] SEDDIK H, SAYADI M, FNAIECH F, et al. A new multi-domains image watermarking method based on multi-watermarks embedding and neural network segmentation[J]. Applied Mathematical Sciences, 2007, 1(39): 1927-1939.
- [11] WANG K S, GAO T G, YOU D T, et al. A secure dual-color image watermarking scheme based 2D DWT, SVD and Chaotic map[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81(5): 6159-6190.
- [12] ZHANG L N, WEI D Y. Dual DCT-DWT-SVD digital watermarking algorithm based on particle swarm optimization[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(19): 28003-28023.
- [13] SINGH A K, DAVE M, MOHAN A. Hybrid technique for robust and imperceptible dual watermarking using error correcting codes for application in telemedicine[J]. International Journal of Electronic Security and Digital Forensics, 2014, 6(4): 285-305.
- [14] WANG X C, HU K, HU J P, et al. Repeated embedding image watermarking algorithm combining BEMD and Hilbert curve[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2020, 32(2): 287-296.
- [15] NIDAA H A, SHARIFAH A, SAJIDA P, et al. Design of high performance copyright protection watermarking based on lifting wavelet transform and biempirical mode decomposition[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(19): 24593-24614.
- [16] ZHAO S J, ZHANG Y B, XUAN L J. Image digital watermark algorithm based on BEMD and DCT[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(17): 59-61+64.
- [17] RAHMAN M A, FAZLE RABBI M M. DWT-SVD based new watermarking idea in RGB color space[J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2015, 8(6): 193-198.
- [18] 李峰, 陈光喜, 丁勇, 等. 基于混沌和 HVS 的小波域自适应图像水印算法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(6): 2224-2227.
- [19] 杨健, 梁凤梅, 范帅帅. 一种结合奇异值分解的非下采样剪切波数字水印算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(2): 507-510+520.
- [20] 赵培越, 张珍珍, 李祯祯, 等. 基于 ZUC 与 DWT-SVD 的交换加密水印算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(11): 3423-3427.
- [21] 闻斌, 张天骐, 熊天, 等. 基于图变换和 DWT-SVD 的鲁棒图像水印算法[J]. 光电子·激光, 2022, 33(8): 879-886.
- [22] ERNAWAN F, KABIR M N. A block-based RDWT-SVD image watermarking method using human visual system characteristics[J]. The Visual Computer, 2020, 36(1): 19-37.

(责任编辑:张阳,殷锋,付强,和力新,肖丽;英文编辑:周序林,郝玉才)