

# 一种抗数字印刷/拍摄的数字水印算法研究及验证

张明贵<sup>1</sup>, 高静<sup>2</sup>

(1.四川宽窄印务有限责任公司, 四川 德阳, 618100; 2.四川中烟工业有限责任公司 长城雪茄厂, 四川 什邡 618400)

**摘要:** **目的** 数字印刷和手机拍摄是检验含有数字水印的印刷产品版权有效性的主要途径, 解决在数字印刷和手机拍摄场景下水印信息难以提取这一问题。**方法** 提出一种基于离散小波变换和奇异值分解的抗数字印刷/手机拍摄的数字水印算法。首先对宿主图像进行二级离散小波变换, 对低频子带进行奇异值分解, 将 Arnold 置乱后的水印嵌入到奇异值分解的对角矩阵中, 最后进行小波逆变换得到嵌入水印图像。**结果** 含水印信息的峰值信噪比 (PSNR) 达到了 39.67, 在不同攻击下的归一化相关系数 (NC) 均在 0.89 以上, 实际的印刷拍摄测试中 NC 值也均达到 0.94, 证明该水印算法在保证不可见性的同时对于印刷产品实际应用中的常见攻击具有很好的抵抗能力。**结论** 对不同品牌的智能手机、印刷设备以及不同种类的纸张采集到的含水印图像进行测试, 均能够在印刷和拍摄场景下实现水印提取, 证明了该算法的有效性。

**关键词:** 数字水印; 打印拍摄; 离散小波变换; 奇异值分解

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)03-0274-10

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.03.034

## Research and Verification of a Digital Watermarking Algorithm Resistant to Digital Printing/Photography

ZHANG Ming-gui<sup>1</sup>, GAO Jing<sup>2</sup>

(1.Sichuan Kuanzhai Printing Co., Ltd., Deyang 618100, China; 2.The Great Wall Cigar Factory, China Tobacco Sichuan Industrial Co., Ltd., Shifang 618400, China)

**ABSTRACT:** Digital printing and mobile shooting are the main ways to verify the validity of copyright of printed products containing digital watermarks. Therefore, the work aims to solve the problem that it is difficult to extract watermark in digital printing and mobile shooting. A digital watermarking algorithm based on discrete wavelet transform and singular value decomposition to resist digital printing/mobile shooting was proposed. Firstly, the host image was processed by two-stage discrete wavelet transform, and singular value decomposition was performed on the low-frequency sub-bands. The watermark after Arnold was scrambled was embedded into the diagonal matrix of singular value decomposition. Finally, the embedded watermark image was obtained by inverse wavelet transform. The peak signal to noise ratio (PSNR) containing watermark information reached 39.67. The normalized correlation coefficient (NC) under different attacks was above 0.89. The NC value in actual shooting test also reached 0.94, showing that watermark algorithm not only ensured invisibility but also had good resistance to common attacks in practical application of printing products. The watermark images collected from different brands of smart phones, printing devices and different kinds of paper can be extracted in

收稿日期: 2021-08-18

作者简介: 张明贵 (1973—), 男, 工程师, 主要研究方向为数字印刷和色彩管理。

printing and shooting scenes, which proves the effectiveness of the algorithm.

**KEY WORDS:** digital watermarking; printing and shooting; discrete wavelet transform; singular value decomposition

随着防伪技术的发展,信息隐藏技术在产品版权保护方面起到了巨大作用。它使得产品能具备一定的防伪功能,维护消费者和企业的合法权益,进一步地保证和促进产品销售,因此,数字水印技术作为信息隐藏技术研究领域的重要分支,是国际信息安全研究的一个重要研究热点<sup>[1]</sup>。其主要的信息防伪形式是将一段文本、标识、序列号、图像等数字信号作为水印嵌入到载体上,同时使用一定的技术检测方法可以将水印正确地提取出来,从而达到防伪验证的目的<sup>[2]</sup>。印刷包装产品作为信息表达的基本载体,可以通过数字水印防伪技术的应用,在不影响产品外包装信息的条件下,起到良好的防伪效果。

数字印刷成为了小批量印包产品的主流方式<sup>[3-5]</sup>。加载水印信息的图像后,数字印刷后图像的低频部分能较为完整地保存下来,但其高频部分大部分会缺失,相当于受到了低通滤波的攻击。同时,印刷过程中内部各个元器件的噪声和点增益都会引起印刷的图像质量受损,即受到了噪声的攻击。

除此之外,随着智能手机的迅速普及,通过拍照功能来进一步识别水印信息也变成更加智能的验证方式,常规的图像水印算法难以在手机拍摄后识别出完整的水印信息<sup>[6]</sup>。一些研究人员开始寻求通过移动设备检测水印的方法。Pramila 等<sup>[7]</sup>详细地分析了拍摄过程对于数字图像的影响,在拍摄的过程中,相机的镜头会造成桶形和枕形失真。同时智能手机拍摄图像获取原始图像时,图像缩放比例不同,手机拍摄图像时存在一定的夹角,因而导致图像旋转。手机拍摄图像不可避免地会有轻微的抖动、压缩,导致图像模糊。

目前数字水印算法典型的空域水印算法是最低有效位算法(LSB)。该算法采用预先设置好的密钥,由序列发生器产生随机信号,之后将产生的随机信号按一定规则组合成二维形式插入到原始图像的最低几位,完成数字水印的嵌入<sup>[8]</sup>。最低有效位算法隐藏的信息较为脆弱,对于几何攻击鲁棒性较差。在主流的变换域方法中,小波变换由于能较好地解决时频分辨率的矛盾,且与新一代国际压缩标准相兼容,从而得到了广泛的应用<sup>[9]</sup>。离散小波变换(DWT)是进行信号分析非常有用的工具<sup>[10]</sup>。通过离散小波变换在原始图像的低频子带中嵌入水印,可以很好地解决数字印刷高频信息缺失这一问题。同时奇异值分解(SVD)是数值分析中基本工具之一<sup>[11]</sup>,由于图像的奇异值分解对许多图像处理以及旋转、缩放、平移等几何攻击具有一定的不变性,奇异值分解的算法可以很好地抵抗以几何攻击为主的拍摄攻击。陈青等<sup>[6]</sup>

提出了一种基于 SIFT 变换和 DWT-SVD 的自适应图像水印算法,含水印图像在没有受到攻击时,可以无损地提取出水印,在受到攻击时,提取出的水印品质较好,且在面对小规模几何攻击时,也有良好的稳定性。

文中考虑到数字水印在数字印刷包装产品上的应用,综合考虑 DWT 和 SVD 的优点,将 Arnold 加密后的水印图像嵌入原图像中,在不改变水印图像像素值的同时更改像素位置,实现一种基于离散小波变换和奇异值分解相结合的数字水印算法,从而完成抗印刷和拍摄数字水印方案,为个性化印刷包装产品数字水印的实现提供基本的算法工具和应用范例。

## 1 水印算法基础设计方法

### 1.1 离散小波变换(DWT)

离散小波变换是小波变换中的一种<sup>[12-13]</sup>,兼具时、频两域的多分辨率分析能力,已被广泛应用于计算机领域,如数字图像处理、数字信号处理、语音识别等,以及量子物理和石油勘探等诸多领域。

研究小波变换的理论基础源于傅里叶变换,具体变换公式为<sup>[14]</sup>:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

$$WT(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\phi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad (2)$$

式(1)为傅里叶变换基本公式,其中  $e^{-i\omega t}$  函数可由欧拉公式直接展开,因此复杂的时域信号经过变换之后可由一系列的正余弦波形构成,但该信号只能反映频域特性。式(2)为小波变换的基本公式,该公式存在 2 个变量,平移量  $\tau$  和尺度  $\alpha$ 。尺度对应频率,小波函数的伸缩性质,平移量  $\tau$  对应时间,体现了小波函数的平移特性,因此小波变换同时具备时频特性。

在图像变换过程中,主要利用小波变换的多分辨率(及多尺度)特性分解图像。对于数字图像,会分别从水平方向和垂直方向进行低通滤波和高通滤波。如图 1 所示,一级离散小波变换之后图像被分为 4 个子带,其中 LL(近似子带)是由 2 个方向进行低通滤波后产生的系数,包含了图像的主要信息,能够近似地表示图像。HL(水平子带)、LH(垂直子带)、HH(对角子带)表示了图像的细节或边缘信息<sup>[15]</sup>。

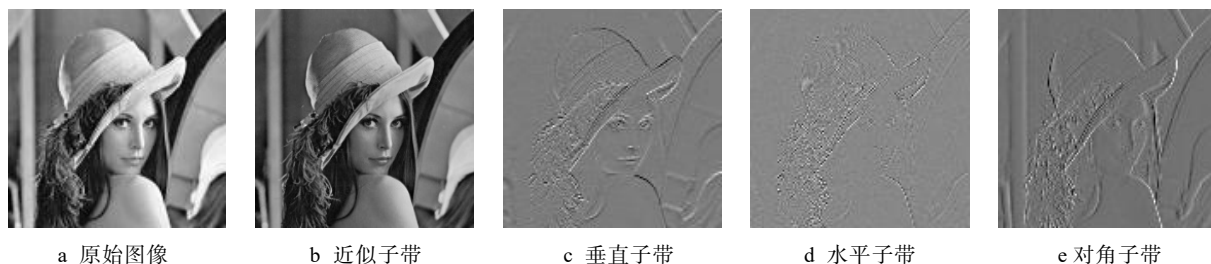


图 1 一级离散小波变换  
Fig.1 First order discrete wavelet transform

## 1.2 奇异值分解 (SVD)

奇异值分解是一种基于特征值和特征向量的数学分析工具,已被广泛地应用于图像处理领域<sup>[16]</sup>,如模式识别、图像融合、数据压缩、数字水印等,以及统计学等诸多领域。从矩阵论的角度分析,一幅数字图像可以视为一个非负矩阵。设  $A$  为  $M \times N$  的数字图像,用  $A \in R_{m \times n}$  来表示一个数字图像矩阵,其中  $R$  表示实数域。图像  $A$  经过奇异值分解后,表示为:

$$A = USV^T \quad (3)$$

式中:  $U$  和  $V$  分别为左奇异值矩阵和右奇异值矩阵;  $S$  为一个非对角线上的项都是 0 的矩阵,其对角线上的元素满足以下条件:

$$\phi_1 \geq \phi_2 \geq \dots \geq \phi_n \geq \phi_{n+1} = \dots = \phi_m = 0 \quad (4)$$

式中:  $n$  为  $A$  的秩,它等于非零奇异值的数量,于是有:

$$S = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \phi_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\phi_i$  为由该分解唯一确定的数值,称为图像  $A$  的奇异值<sup>[17]</sup>。

从图像处理的角度来看,奇异值分解特性如下所述。

1) 奇异值分解对所要进行变换的矩阵大小没有限制,可以是正方矩阵也可以是长矩阵。

2) 一幅图像的奇异值有很好的稳定性,这意味着当图像受到轻微扰动时,它的奇异值不会发生剧烈的改变。对于裁切、缩放、旋转等几何攻击干扰,图像的奇异值依然会保持稳定。

3) 奇异值能够表现出图像的内在的矩阵元素关系而不是视觉特性,反映的是图像的内蕴特性。所以利用奇异值分解的特性,可以提高图像水印的抗攻击性能。

由于奇异值分解具备着以上特性,可以将其引入到抗数字印刷/拍摄的数字水印算法中,能够有效地提升算法的抗打印拍摄能力。

## 1.3 抗数字印刷和拍摄的印刷品数字水印算法设计

水印模型包括了 2 个体系: 水印嵌入和水印提取。在水印嵌入后,对含水印图像进行检测,确定其含有水印,进行水印嵌入的逆过程,即可完成水印的提取。

如前所述,图像经过离散小波变换分解成 1 个低频分量和 3 个高频分量。低频分量包含了图像的大部分信息,该分量具有较高的视觉容量。相反,高频分量能量较小,视觉容量较低,不能够嵌入过多的水印信息,且易遭受低通滤波和噪声的影响,如果在高频分量中嵌入水印会使得算法不能够有效地抵抗打印拍摄攻击,因此,在离散小波变换分解后的低频分量中嵌入水印,能够更好地抵抗打印拍摄攻击,并平衡水印的鲁棒性和不可见性这一对矛盾。

考虑到离散小波变换对旋转、剪切等几何攻击鲁棒性较差,而奇异值分解对于几何攻击的鲁棒性较强,因此将离散小波变换与奇异值分解相结合,将经历 2 次离散小波变换得到的低频分量进行奇异值分解,在分解的  $LL_2$  分量中嵌入水印。

水印嵌入算法的具体流程如下所述。

1) 读取一幅原始图像  $I$ , 对原始图像  $I$  进行二级离散小波变换,得到  $HH_2$ 、 $LH_2$ 、 $HL_2$ 、 $LL_2$ 、 $HL_1$ 、 $LH_1$ 、 $HH_1$  7 个子带。

2) 对  $LL_2$  低频子带进行矩阵奇异值分解,得到左奇异值矩阵  $U$  和右奇异值矩阵  $V$ , 以及对角矩阵  $S$ 。

$$[U, S, V] = SVD(LL_2) \quad (6)$$

3) 读取水印图像  $W$ , 采用 Arnold 置乱变换算法进行水印的加密。运用加性水印公式  $T = S + K \times W$  ( $K$  为水印的嵌入强度,  $W$  为水印) 将加密后的水印嵌入到  $S$  矩阵中, 之后对新产生的矩阵再进行一次奇异值分解, 得到新产生的左奇异值矩阵  $U_1$  和右奇异值矩阵  $V_1$ , 以及对角矩阵  $S_1$ 。

$$S + KW = U_1 S_1 V_1 \quad (7)$$

4) 对  $U$ 、 $S_1$ 、 $V$  进行逆奇异值分解, 得到嵌有水印数据的低频子图  $LL_2^*$ 。

$$LL_2^* = US_1V \quad (8)$$

5) 对图像进行二级逆离散小波变换, 显示含水图像  $I_w$ , 完成水印嵌入。

水印提取算法是嵌入算法的逆过程, 流程如下所述。

1) 读取含水图像  $I_w$ , 对待检测的含水图像  $I_w$  进行二级离散小波变换 (DWT), 得到  $HH_2'$ 、 $LH_2'$ 、 $HL_2'$ 、 $LL_2'$ 、 $HL_1'$ 、 $LH_1'$ 、 $HH_1'$  7 个子带, 对低频子带  $LL_2'$  进行矩阵奇异值分解 (SVD), 得到左奇异值矩阵  $U^*$  和右奇异值矩阵  $V^*$ , 以及对角矩阵  $S^*$ 。

$$[U^*, S^*, V^*] = SVD(LL_2') \quad (9)$$

2) 将得到的  $S^*$  矩阵和式 (10) 中的  $U_1$  和  $V_1$  矩阵进行逆奇异值分解, 得到  $W^*$ 。

$$W^* = U_1 S^* V_1 \quad (10)$$

3) 按照加性水印公式  $T = S + K \times W$ , 根据  $S$  和  $K$ , 得到提取的水印图像  $W_1$ 。

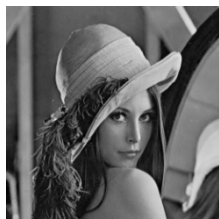
$$W_1 = (W^* - S) / K \quad (11)$$

4) 对提取的水印图像  $W_1$  进行逆 Arnold 置乱变换, 解密得到水印图像  $W'$ 。

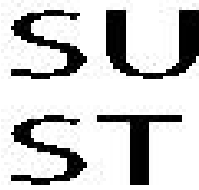
## 2 实验结果分析与讨论

文中使用 Matlab 2018b 作为编程工具完成仿真实验, 选择 256 像素×256 像素的灰度 Lena 图像 (图 2a) 作为原始载体图像, 选择 64 像素×64 像素的含有“SUST”字样的二值图像 (图 2b) 作为待嵌入的水印信息, 水印的嵌入强度  $K$  选择为 0.4。

首先对原始图像进行二级离散小波变换, 对低频子带  $LL_2$  进行矩阵奇异值分解, 根据式 (7) 中的水印加性公式将置乱后的水印信息嵌入到原始图像中, 完成水印的嵌入, 通过对含水图像进行主观评价和客观评价, 完成水印的不可见性分析。其次对嵌入水印后的图像进行剪切、旋转等几何攻击, 以及不同程度的噪声、低通滤波和移动模糊等常见信号攻击, 通过对比提取出的水印图像和原始水印图像, 采用归一化相关系数值评价水印算法的抗攻击能力, 完成水印的鲁棒性分析。最后对嵌入水印信息的图像进行不同打印机、不同纸张、不同手机的印刷/拍摄测试, 通过观察提取出的水印图像, 应用归一化相关系数值评价水印算法的鲁棒性, 完成算法的印刷拍摄实际测试。



a 原始图像



b 水印图像

图 2 原始载体图像和原始水印图像

Fig.2 Original carrier image and original watermark image

### 2.1 水印的不可见性分析

算法采用式 (7) 加性水印公式, 将二值“SUST”水印图像以 0.4 的嵌入强度嵌入到原始 Lena 图中, 得到含水图像。对水印不可见性而言, 一般有主观评价和客观评价 2 种评价方法。主观上多采用人的肉眼观察的方式进行评价, 客观上衡量水印的不可见性一般采用峰值信噪比 (Peak Signal To Noise Ratio, PSNR) 算法, 来对比含水图像  $I'_w(i,j)$  与原始图像  $I(i,j)$  之间的差异, 峰值信噪比的计算式为:

$$PSNR(I_{ij}, I'_{ij}) = 10 \lg \frac{256^2 \times M \times N}{\sum_{0 \leq i \leq M} \sum_{0 \leq j \leq N} (I_{ij} - I'_{ij})^2} \quad (12)$$

式中:  $M$ 、 $N$  为原始载体图像的大小;  $I_{ij}$  为原始载体图像;  $I'_{ij}$  为含水图像, 一般来说, 当  $PSNR \geq 36$  时, 可以认为水印算法的不可见性良好, 满足水印的不可见性需求。



a 原始图像



b 含水图像

图 3 原始图像和含水图像

Fig.3 Original image and watermark image

根据 1.3 节中的水印嵌入算法, 对原始图像 (图 3a) 进行水印嵌入, 得到嵌入水印后的图像 (图 3b)。通过人的视觉系统对比观察图 3a 和图 3b, 二者并没有明显差异, 置入水印后的图片基本没有变化。同时, 通过计算得到  $PSNR = 39.67 > 36$ , 满足水印的不可见性客观评价标准, 因此水印的不可见性良好, 文中算法满足水印的不可见性要求。

### 2.2 水印的鲁棒性分析

如前所述, 印刷和拍摄过程对于数字图像主要存在 2 个方面的影响, 一方面是印刷过程中出现的低通滤波攻击、噪声攻击, 另一方面是拍摄过程中出现的剪切、旋转等几何攻击和移动模糊攻击, 因此应用各种攻击算法对图 3b 所示的含水图像进行旋转、剪切几何攻击以及噪声、低通滤波和移动模糊等攻击, 以检测水印算法的抗印刷拍摄的能力。

文中采用归一化相关系数 NC 值来衡量水印的鲁棒性, NC 值的计算式为:

$$NC(W_{i,j}, W'_{i,j}) = \frac{\sum_{x,y} W_{i,j} W'_{i,j}}{\sum_{x,y} W_{i,j}^2} \quad (13)$$

式中:  $w_{i,j}$  为原始水印图像;  $w'_{i,j}$  为提取水印图

像;  $x$  和  $y$  分别为水印图像的长和宽。通过计算得到含水印图像遭受各种攻击分别提取出的水印图像的 NC 值。一般情况下, 当 NC 值大于 0.8 时, 就可以确认为有效水印, 否则为无效水印。攻击图像和提取出的水印图像以及对应的 NC 值见图 4—13。

### 2.2.1 剪切攻击下的水印提取效果分析

文中通过剪切算法对含水印图像的左上角、上部、中间正方形区域和中间竖直区域进行了剪切, 应用 1.3 节所述的水印提取算法进行水印提取, 提取出的水印图像以及 NC 值见图 4。图 4 展示了不同位置剪切攻击下的水印提取结果, 可以看到, 对含水印图像的左上角、上部、中间正方形部分进行剪切, 可

以完整地提取出水印图像, 提取出的水印图像的 NC 值可达 0.97, 对含水印图像的中间竖直部分进行剪切, 可以较为完整地提取出水印图像, 提取出的水印图像的 NC 值可达 0.96, 可以清晰地分辨出“SUST”字样。说明该水印算法未出现因剪切攻击造成鲁棒性下降的情况。相反, 文中算法对各种复杂的剪切攻击具有较强的抵抗能力, 提取出的水印图像清晰可见。

### 2.2.2 旋转攻击下的水印提取效果分析

文中通过旋转算法对含水印图像进行了  $1^\circ \sim 10^\circ$  的二维旋转, 步长为  $1^\circ$ 。应用 1.3 节中所述的水印提取算法对旋转后的图像进行水印提取, 提取出的水印图像和 NC 值见图 5 和图 6。



图 4 不同位置裁切的 Lena 图及提取的水印

Fig.4 Lena graphs cut at different positions and extracted watermarks



图 5 旋转攻击实验结果

Fig.5 Experimental results of rotational attack

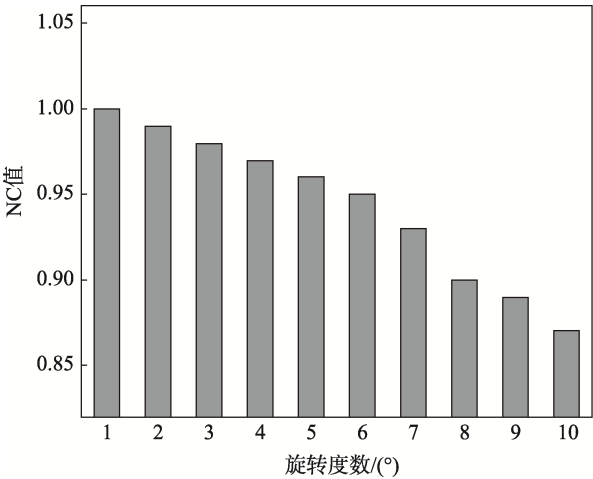


图 6 旋转攻击提取水印的 NC 值  
Fig.6 NC value of watermark extracted by rotation attack

图 5 展示了 3°、5°、7°、9°旋转攻击下的水印提取结果，可以看到，在 3°、5°旋转攻击下，提取出的水印清晰可见，NC 值分别为 0.98 和 0.96。由图 6 可知，随着旋转度数逐渐提升，提取水印的 NC 值逐渐下降，但即使是在 9°旋转攻击下，NC 值仍然能够达到 0.89，可以清晰地分辨出“SUST”字样。由于在手持智能手机进行拍摄时，智能手机与印刷在纸张上的图像的夹角一般小于 5°，所以旋转攻击对水印图像的提取影响甚微，该算法能够满足水印的抗旋转需求。

2.2.3 移动模糊攻击下的水印提取效果分析

文中通过移动模糊算法对含水印图像进行了步长为 1，从 1~10 个像素值的移动模糊攻击，利用 1.3 节中所叙述的水印提取方法分别进行水印提取，提取出的水印图像以及对应的 NC 值见图 7 和图 8。



图 7 移动模糊攻击实验结果  
Fig.7 Experimental results of moving fuzzy attack

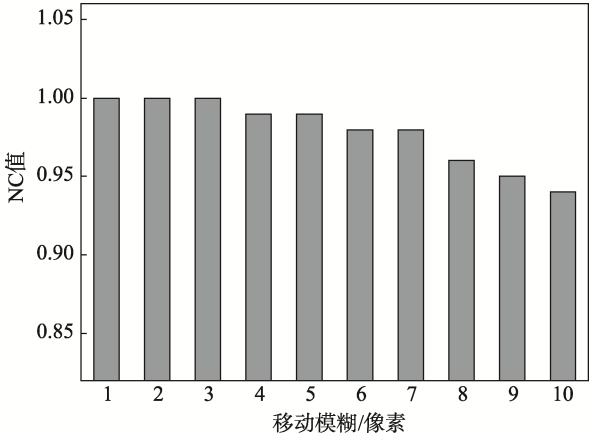


图 8 移动模糊攻击提取水印的 NC 值  
Fig.8 NC value of watermark extracted by moving fuzzy attack

图 7 展示了部分像素值移动模糊下的水印提取结果，可以看出，在逆时针方向移动 7 个像素值的移动模糊攻击下，可以完整地提取出清晰的水印图像，NC 值为 0.98。由图 8 可知，随着逆时针移动像素值的提高，提取水印的 NC 值逐渐降低，提取出的水印图像逐渐模糊，但即使是在 10 像素值的移动模糊攻击下，NC 值仍然可达 0.94，依然可以较为清晰地分辨出“SUST”字样，因此该算法可以有效地抵抗移动模糊攻击。

2.2.4 高斯噪声攻击下的水印提取效果分析

文中应用高斯噪声算法对含水印图像进行了步长为 0.01，方差为 0.01~0.1 的高斯噪声攻击，采用 1.3 节述的提取算法对高斯噪声攻击后的图像进行水印提取，提取出的水印图像以及 NC 值见图 9 和图 10。



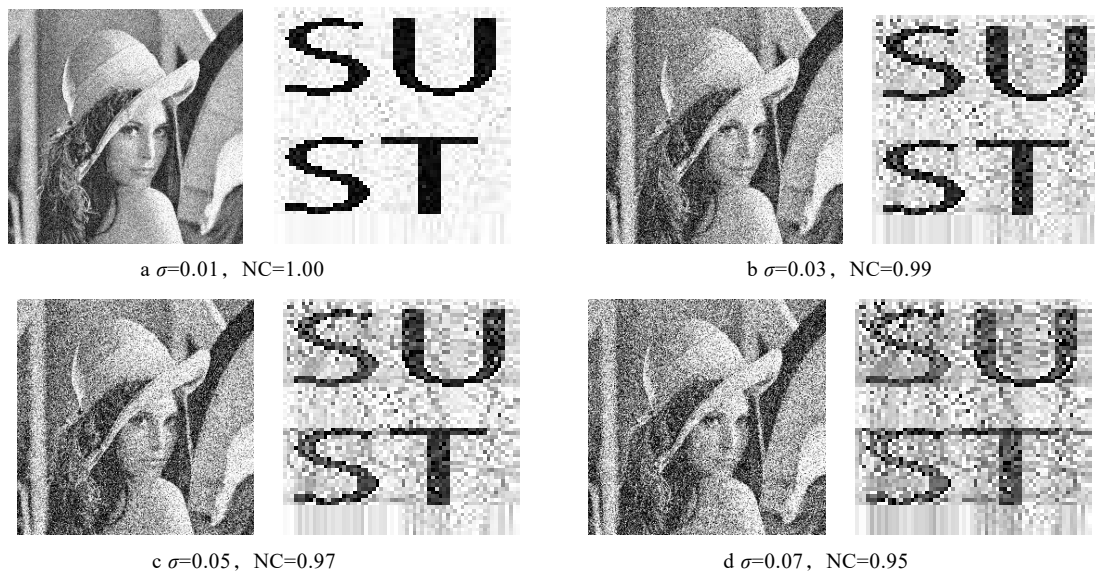


图 9 高斯噪声攻击实验结果

Fig.9 Experimental results of Gaussian noise attack

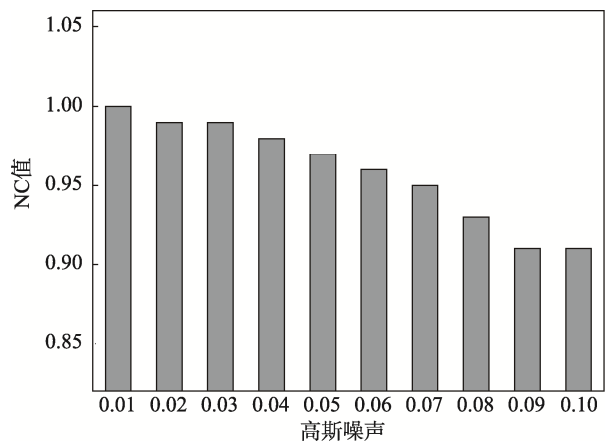


图 10 高斯噪声攻击提取水印的 NC 值

Fig.10 NC value of watermark extracted by Gaussian noise attack

图 9 展示了方差为 0.01、0.03、0.05、0.07 的高斯噪声攻击下的水印提取结果,可以看到,随着高斯噪声攻击强度不断增大,图像中的高斯噪声逐渐增加,含水印图像逐渐遭到破坏,不可避免地出现了大量的噪点。由图 10 可知,提取水印的 NC 值随着高斯噪声方差的增加而降低。尽管受到了高斯噪声的影响,提取水印的 NC 值仍然可达 0.91 以上,提取出的水印图像仍然清晰可见,表明文中算法对高斯噪声有着较强的鲁棒性。

#### 2.2.5 椒盐噪声攻击下的水印提取效果分析

文中通过椒盐噪声算法对含水印图像进行了步长为 1, 1~15 密度的椒盐噪声攻击,利用 1.3 节所阐述的水印提取算法分别进行水印提取,提取出的水印图像以及 NC 值见图 11 和图 12。

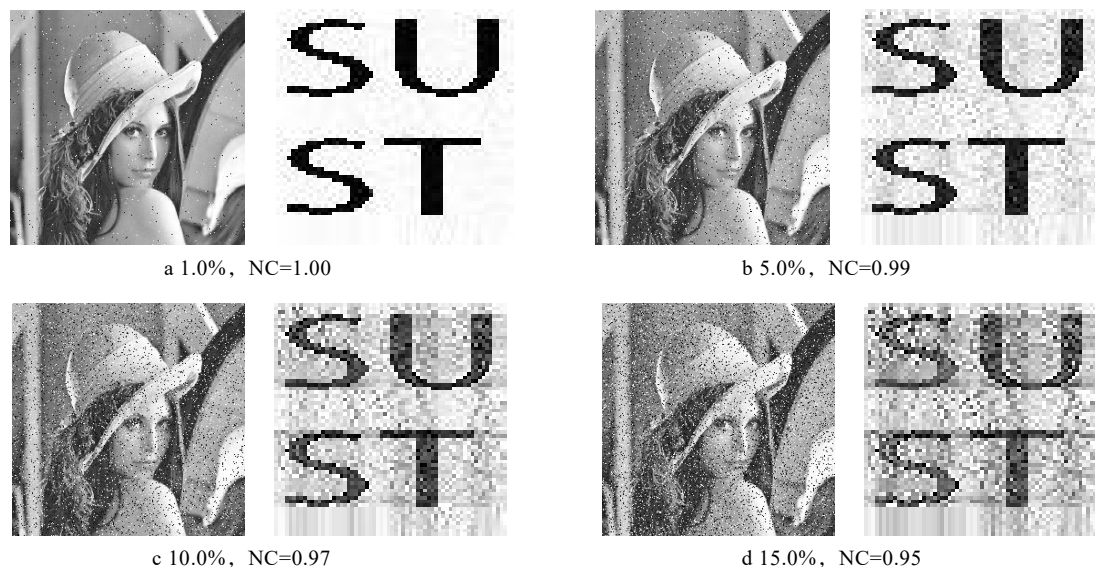


图 11 椒盐噪声攻击实验结果

Fig.11 Experimental results of pepper and salt noise attack

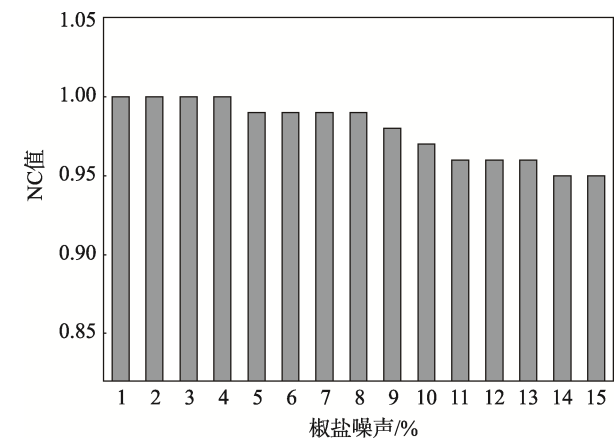


图 12 椒盐噪声攻击提取水印的 NC 值  
Fig.12 NC value of extracted watermark by pepper and salt noise attack

图 11 展示了 1%、5%、10%、15%密度的椒盐噪声攻击下的水印提取结果。可以看出，在 1%、5%、10%密度椒盐噪声的攻击下，可以完整地提取出清晰的水印图像，NC 值分别为 1、0.99 和 0.97。由图 12 可知，随着椒盐噪声攻击强度的不断增大，提取水印的 NC 值逐渐降低。当椒盐噪声攻击强度增大到 15% 时，含有水印的图像受到较大的破坏，在提取出的水印图像上出现了大量的噪点，但即使是在 15%密度的椒盐噪声攻击下，NC 值依然高达 0.95，仍然可以较为清晰地分辨出“SUST”字样，表明该算法对椒盐噪声的鲁棒性较强。

2.2.6 低通滤波攻击下的水印提取效果分析

文中通过低通滤波算法对含水印图像分别进行了 3×3、5×5、7×7、9×9 的低通滤波攻击，利用 1.3 节中所提出的水印提取算法分别对其进行水印提取，

提取出的水印图像以及 NC 值见图 13。由图 13 可以看出，在 3×3 和 5×5 的低通滤波的攻击下，NC 值为 1，在 7×7 和 9×9 的低通滤波的攻击下，NC 值为 0.99，可以非常清晰地分辨出“SUST”字样，表明该算法对低通滤波的鲁棒性较强。

2.3 印刷拍摄实际测试

为了验证水印信息在打印拍摄过程中受到像素失真和几何失真后的稳健不变性，使用 Matlab 2018b 将水印信息嵌入到原始载体图像中，将含水印图像保存。使用 EPOSON、科美数码等不同型号的打印机将含水印图像打印在不同的纸张上，并使用不同型号的智能手机拍摄含水印图像得到印刷拍摄后的图像，修改图像大小为 256 像素×256 像素，使用 Matlab 2018b 将水印信息提取出来。打印拍摄修改大小后的含水印图像和提取出的水印信息见图 14，提取出的水印图像的 NC 值见表 1。

由图 14 可以看出，经过印刷拍摄后几幅 Lena 图像都发生了轻微的旋转，并且略微变暗。使用 EPSON1390 打印在喷墨打印纸上的 2 幅图像提出来的水印 NC 值高达 0.97，可以清晰地分辨出水印图像。使用 EPSON 数码打印机打印在相纸上，并用苹果手机提取出的水印图像 NC 值高达 0.96，可以清晰地分辨出“SUST”字样。使用科美数码印刷机印刷在普通打印纸上的 2 幅图像提取出的水印和使用 EPSON 数码打印机打印在相纸上，并用华为 mate 9 提取出的水印图像 NC 值均达到了 0.95，可以较为清晰地分辨出水印图像上的内容。使用科美数码印刷机印刷在铜版纸上的 2 幅图像 NC 值均达到了 0.94，可以较为清晰地识别出水印图像上的“SUST”文字。

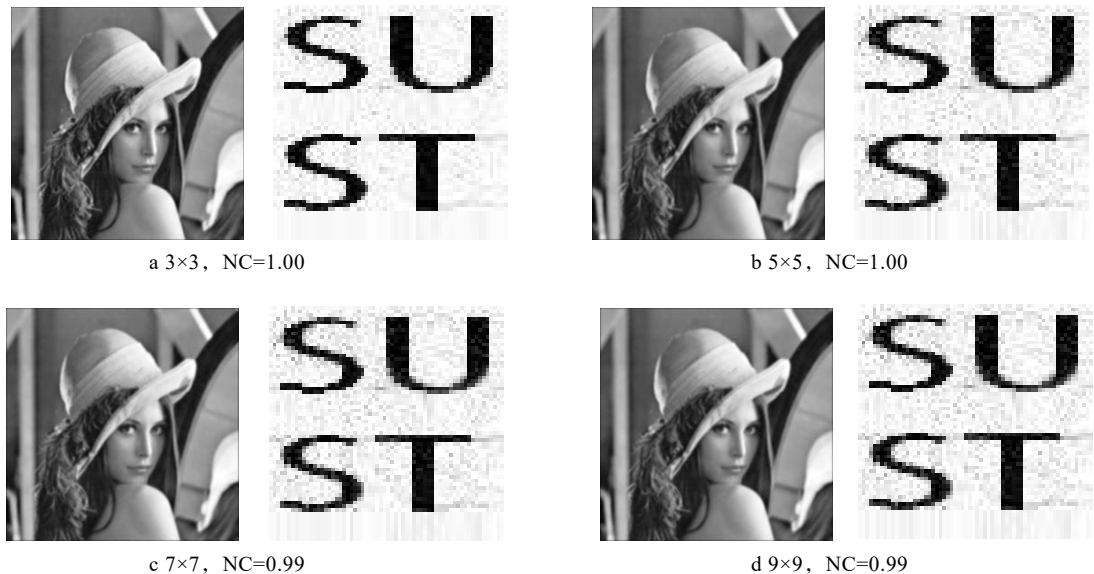


图 13 低通滤波攻击实验结果  
Fig.13 Experimental results of low-pass filtering attack





图 14 打印拍摄后的 Lena 图及提取的水印

Fig.14 Lena diagram after printing and shooting and the extracted watermark

表 1 印刷拍摄后的检测结果

Tab.1 Test results after printing and shooting

| 打印机       | 纸张    | 手机型号     | NC 值 | 打印机       |
|-----------|-------|----------|------|-----------|
| EPSON1390 | 喷墨打印纸 | 华为 mate9 | 0.97 | EPSON1390 |
| EPSON 数码  | 相纸    | 华为 mate9 | 0.95 | EPSON 数码  |
| 科美数码      | 普通打印纸 | 华为 mate9 | 0.95 | 科美数码      |
| 科美数码      | 铜版纸   | 华为 mate9 | 0.94 | 科美数码      |
| EPSON1390 | 喷墨打印纸 | 苹果       | 0.97 | EPSON1390 |
| EPSON 数码  | 相纸    | 苹果       | 0.96 | EPSON 数码  |
| 科美数码      | 普通打印纸 | 苹果       | 0.95 | 科美数码      |
| 科美数码      | 铜版纸   | 苹果       | 0.94 | 科美数码      |

由表 1 可知, 提取出的水印的归一化相关系数 NC 值均可达 0.94 以上。另外由图 14 可以看出, 提取出的水印图像中的“SUST”字样均较为清晰。结果表明, 文中算法对于几种不同型号的打印机打印、不同种类的纸张和不同型号的手机拍摄均具有良好的抗印刷拍摄的能力。

### 3 结语

文中通过分析数字印刷/手机拍摄过程对水印图像的各种影响, 根据印刷/拍摄特点, 提出了一种基于离散小波变换和奇异值分解的抗数字印刷/手机拍摄水印算法。通过仿真实验结果可以看出, 该算法恢复的水印信息能够获得良好的图像视觉效果, 对于剪切、旋转等几何攻击和噪声、模糊、低通滤波等常规的信号处理具有很强的抵抗能力, 符合水印算法对鲁棒性和不可见性的要求。同时对于不同型号的打印机、智能手机和不同种类的纸张, 均能够在印刷和拍摄场景下实现水印提取, 证明了该算法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] RAY A, ROY S. Recent Trends in Image Watermarking Techniques for Copyright Protection: A Survey[J]. International Journal of Multimedia Information Retrieval, 2020, 9(4): 249-270.
- [2] WANG Jun, WAN Wen-bo. A Novel Attention-Guided JND Model for Improving Robust Image Watermarking[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(33/34): 24057-24073.
- [3] 霍佳琦. 抗打印扫描数字水印算法研究与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 30-34.  
HUO Jia-qi. Research and Implementation of Anti-Printing Scanning Digital Watermarking Algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 30-34.
- [4] RIAD R, DOUZI H, EL M, et al. A Print-Scan Resilient Watermarking Based on Fourier Transform and Image Restoration[J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 128(15): 13-17.
- [5] 张雯, 孟婕. 数字水印技术在印刷防伪领域应用的研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 143-148.  
ZHANG Wen, MENG Jie. Progress of Applying Digital Watermarking Technology in Printing Anti-Counterfeiting[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 143-148.
- [6] 陈青, 伍东升. 基于 SIFT 变换和 DWT-SVD 的自适应图像水印算法[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 254-259.  
CHEN Qing, WU Dong-sheng. Adaptive Image Watermarking Algorithm Based on SIFT Transform and DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 254-259.
- [7] PRAMILA A, KESKINARKAUS A, TAKALA V, et al. Extracting Watermarks from Printouts Captured with Wide Angles Using Computational Photography[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(15): 16063-16084.
- [8] NAZARI M, MEHRABIAN M. A Novel Chaotic IWT-LSB Blind Watermarking Approach with Flexible Capacity for Secure Transmission of Authenticated Medical Images[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(7): 10615-10655.
- [9] CHOPRA A, GUPTA S, DHALL S. Analysis of Frequency Domain Watermarking Techniques in Presence of Geometric and Simple Attacks[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(1/2): 501-554.
- [10] 刘琰, 周理. 基于小波变换域的数字图像嵌入和提取方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(1): 68-72.  
LIU Yan, ZHOU Li. Digital Image Embedding and Extracting Method Based on Wavelet Transform Domain[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(1): 68-72.
- [11] ZERMI N, KHALDI A, KAFI R, et al. A DWT-SVD Based Robust Digital Watermarking for Medical Image Security[J]. Forensic Science International, 2021, 320: 110691.
- [12] CHEN Bing-quan, CUI Jin-ge, XU Qing, et al. Coupling Denoising Algorithm Based on Discrete Wavelet Transform and Modified Median Filter for Medical Image[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(1): 120-131.
- [13] 杨明鹏, 叶幅华. 基于小波变换的三维网格模型盲水印算法[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 32-36.  
YANG Ming-peng, YE Guo-hua. A Blind Watermarking of 3D Models Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2020, 36(3): 32-36.
- [14] POONAM, ARORA S M. A DWT-SVD Based Robust Digital Watermarking for Digital Images[J]. Procedia Computer Science, 2018, 132: 1441-1448.
- [15] 李海洋. 基于离散小波变换的抗噪图像水印处理[J]. 信息化研究, 2019, 45(5): 23-26.  
LI Hai-yang. Anti-Noise Image Watermarking Processing Based on Discrete Wavelet Transform[J]. Informatization Research, 2019, 45(5): 23-26.
- [16] WANG S, MENG X, YIN Y, et al. Optical Image Watermarking Based on Singular Value Decomposition Ghost Imaging and Lifting Wavelet Transform[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 114: 76-82.
- [17] 陈星娥, 郑薇玮, 吴小菁, 等. 基于奇异值分解的 QR 电子票数字水印防伪方法[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2020(1): 41-44.  
CHEN Xing-ge, ZHENG Wei-wei, WU Xiao-jing, et al. An Digital Watermarking Method for QR Electronic Ticket Based on Singular Value Decomposition[J]. Journal of Mudanjiang Teachers College (Natural Sciences Edition), 2020(1): 41-44.