

文章编号: 2095-4980(2020)02-0284-07

基于菲涅耳变换与全变分分解的鲁棒水印算法

李贤阳^{1,2}, 邱桂华^{*1,2}, 阳建中^{1,2}, 杨竣辉³, 陆安山^{1,2}

(1.北部湾大学 电子与信息工程学院, 广西 钦州 535011; 2.钦州市电子产品检测重点实验室, 广西 钦州 535011;
3.江西理工大学 信息工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 为了兼顾水印算法的透明性与抗几何变换能力, 引入光学加密方法, 提出了基于相位截断菲涅耳变换与全变分分解的鲁棒水印算法。引入Logistic映射, 通过对其迭代来获取混沌序列, 以构建一个随机掩码; 基于Fresnel变换, 联合随机掩码, 对水印信息完成光学加密; 再利用相位截断机制, 得到2个私钥。借助全变分分解方法来处理宿主图像, 获取卡通与纹理部分; 引入离散小波变换(DWT), 分别对加密水印与纹理部分实施分解, 输出各自对应的子带信息; 并将这些子带信息进行融合, 通过可逆DWT方法, 获取嵌入水印后的纹理信息; 通过组合水印纹理部分与初始的卡通部分, 形成水印图像。设计水印检测机制, 在水印图像中检索出编码水印, 借助2个私钥来复原水印。测试数据显示: 所提算法兼顾了理想的水印透明性与鲁棒性, 在多种几何变换下, 所复原的水印失真较小, 对应的相关系数维持在0.9以上。

关键词: 图像水印; Fresnel变换; 全变分分解; 相位截断; 纹理部分

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019141

Robust watermarking based on Fresnel transform and total variational decomposition

LI Xianyang^{1,2}, QIU Guihua^{*1,2}, YANG Jianzhong^{1,2}, YANG Junhui³, LU Anshan^{1,2}

(1.College of Electronic and Information Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou Guangxi 535011, China;

2.Qinzhou Electronic Product Testing Key Laboratory, Qinzhou Guangxi 535011, China;

3.College of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: In order to take into account the transparency and anti-geometric transformation ability of watermarking algorithm, by introducing the optical encryption method, the robust watermarking algorithm based on phase truncated Fresnel transform and total variational decomposition is proposed. Logistic mapping is introduced to obtain a set of chaotic sequences by iteration for constructing a random mask. Based on Fresnel transform and random mask, the optical encryption of watermarking information is completed. And then two private keys are obtained by using phase truncation mechanism. The host image is processed by total variational decomposition to obtain the cartoon and texture parts. The Discrete Wavelet Transform(DWT) is introduced to decompose the encrypted watermarking and texture parts, and the corresponding sub-band information are obtained. These sub-band information are fused and texture information embedded in watermarking is obtained by reversible DWT method. The watermarking image is formed by combining the watermarking texture part with the original cartoon part. The watermarking extraction method is designed to detect the encrypted watermarking information from the watermarking image, and two private keys are adopted to decrypt the encrypted watermarking information. The test data show that this algorithm takes into account the ideal transparency and robustness of watermarking, and under various geometric transformations, the reconstructed watermarking distortion is small with corresponding correlation coefficient above 0.9.

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-05-30

基金项目: 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2017KY0795); 钦州市科技攻关项目(20198503); 钦州市物联网先进技术重点实验室开放课题项目(IOT2017B001)

作者简介: 李贤阳(1977-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究领域为: 信息安全、图像处理、数据挖掘等。email:lxianyang1977gz@126.com

*通信作者: 邱桂华 email:5579934@qq.com

Keywords: image watermarking; Fresnel transform; total variational decomposition; phase truncation; texture part

数字水印技术是将待嵌入的水印信息隐藏到载体中，可以将水印充分隐秘，兼顾了理想的透明性与鲁棒性，可以较好地保护图像内容的安全^[1-3]。如 NIU 等^[4]借助加速鲁棒特征(Speed Up Robust Feature, SURF)算子和重要位平面直方图来构建水印方案，将水印信息融入到直方图中，输出水印图像。但其提取的特征点分布不均，削弱了水印图像对几何攻击的鲁棒性，且其水印效率不理想。左悦等^[5]通过定义视觉内容分析方法，将活性因子值较大的子块确定为水印嵌入位置，并引入离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)方法来分解这些子块，获取对应的直流系数，并利用结构相似度、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)来构建目标函数，基于遗传算法，优化嵌入强度，以此来设计水印嵌入模型，将水印信息隐藏到指定的位置中，仿真数据验证了其方法具备较好的透明性与抗几何攻击能力。但是这种技术的安全性较低，一旦攻击者知道其嵌入过程，水印内容很容易泄露。Sarita 等^[6]利用混沌映射来构建加密方法，充分扰乱原始的水印数据，增强安全性，借助离散小波变换(DWT)来获取载体对应的子带信息，通过距离测量，从低频子带中确定合适的位置，通过设计水印嵌入方法，获取水印图像，仿真数据验证了其方法的有效性，其复原水印对应的 PSNR 高达 50 dB。但是把水印数据隐藏到载体中的非纹理位置，感知冗余度较低，限制了透明性与抗几何变换能力。

1 所提鲁棒水印算法

所提的基于相位截断菲涅耳变换与全变分解的鲁棒水印算法的过程见图 1。该算法主要分为 4 个过程：a) 基于相位截断菲涅耳变换的水印光学加密；b) 基于全变分解的载体图像处理；c) 基于 DWT 的水印嵌入；d) 水印检测。

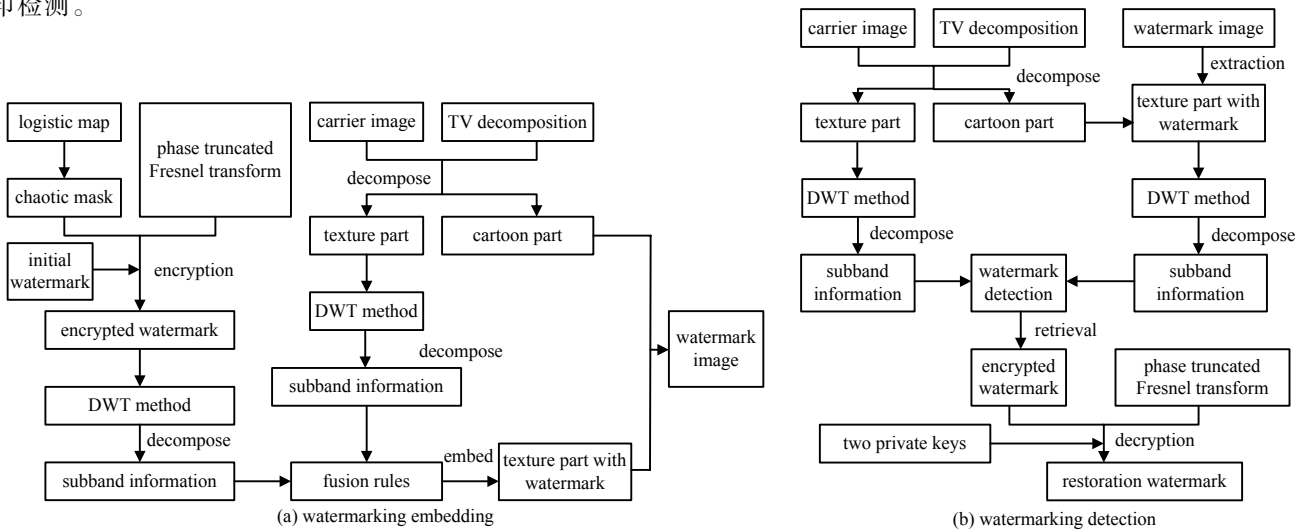


Fig.1 Process of the proposed watermarking algorithm
图 1 所提水印算法的过程

1.1 基于相位截断菲涅耳变换的水印光学加密

令待嵌入水印为 $f(x,y)$ ，其尺寸为 $m \times n$ ；随后，设 2 组不同的初始条件 x_0 与 λ ，分别对 Logistic 函数^[7]实施迭代 $m \times n$ 次：

$$x_{j+1} = \lambda x_j (1 - x_j), \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

式中： $\lambda \in [0, 4]$ 为混沌参数； j 是迭代次数的序号。

通过迭代式(1)，可形成 2 个长度均为 $m \times n$ 的随机序列 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_{m \times n})$ ， $y_i = (y_1, y_2, \dots, y_{m \times n})$ ；然后，联合 $\{x_i\}$ 与 $\{y_i\}$ ，构建随机掩码(Chaos Random Mask, CRM)：

$$\begin{cases} Z = \{x_{m \times n}, y_{m \times n}\} \\ CRM(x, y) = \exp(r2\pi Z) \end{cases} \quad (2)$$

式中： Z 是组合序列； r 是虚部。

再引入 Fresnel 变换^[8], 对 $f(x,y)$ 完成调制。其中, Fresnel 变换的函数为^[8]:

$$f'(u,v) = FrT_z^u [f(x,y)] = \exp\left\{\frac{i\pi}{\mu z}[(u-x_0)^2 + (v-y_0)^2]\right\} \iint f(x,y) dx dy \quad (3)$$

式中: (x,y) 和 (u,v) 分别为输入平面和 Fresnel 平面内的坐标; (x_0,y_0) 为初始坐标; μ 为光波波长; z 为传播距离; $FrT(\cdot)$ 是 Fresnel 变换函数。

根据式(3), 联合 $CRM(x,y)$, 对待嵌入的水印实施光学加密:

$$f''(u,v) = FrT_z^u \left\{ f(x,y) \exp[r2\pi CRM(x,y)] \right\} \quad (4)$$

基于相位截断方法^[9], 对加密水印 $f''(u,v)$ 完成保留与截断操作, 形成 1 个私钥 P_1 和初始的编码水印 f''_0 :

$$P_1 = PR \left\{ FrT_z^u \left\{ f(x,y) \exp[r2\pi CRM(x,y)] \right\} \right\} \quad (5)$$

$$f''_0 = PT \left\{ FrT_z^u \left\{ f(x,y) \exp[r2\pi CRM(x,y)] \right\} \right\} \quad (6)$$

式中: PR 为相位保留操作; PT 为相位截断操作。

最后, 再次利用相位截断方法来处理编码水印 f''_0 , 形成第 2 个私钥 P_2 和加密水印 f_e :

$$P_2 = PR \left\{ FrT_z^u \left\{ f''_0 \exp[r2\pi \xi] \right\} \right\} \quad (7)$$

$$f_e = PT \left\{ FrT_z^u \left\{ f''_0 \exp[r2\pi \xi] \right\} \right\} \quad (8)$$

式中 ξ 是一个随机序列构成的掩码, 其元素值在 $[0,1]$ 之间。

以图 2(a) 为待嵌入水印, 取 $x_0 = 0.52, \lambda = 3.95$ 和 $x_{02} = 0.63, \lambda_2 = 3.99$, 对式(1)实施迭代, 通过式(2)所形成的随机掩码见图 2(b), 随机序列构成的掩码见图 2(c)。再根据上述加密过程, 输出的 2 个私钥和加密水印分别见图 2(d)~图 2(f)。

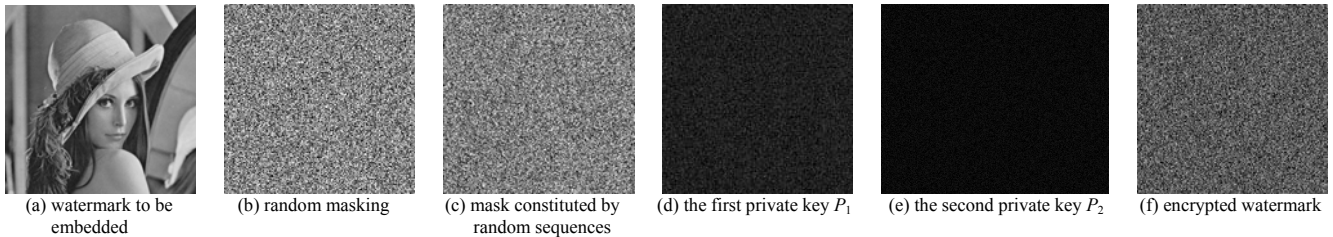


Fig.2 Encryption results of watermark to be embedded

图 2 待嵌入的水印加密结果

1.2 基于全变分分解的载体图像处理

为了得到载体图像的纹理部分, 引入全变分(Total Variation, TV)分解方法^[10-11]实现。根据文献[11], 对于尺寸为 $M \times N$ 的载体图像 f , 其对应的全变分分解模型为:

$$\inf_{(\mu,v) \in BV \times G / f = \mu + v} \left\{ J(\mu) + a \|v\|_G \right\} \quad (9)$$

式中: μ 和 v (与式(3)相同, 但含义不同) 分别为载体的卡通与纹理信息; $J(\mu)$ 为分解函数; G 为巴拿赫空间; $\|\cdot\|$ 为范数运算; BV 为有界变分空间; a 为一个正实数, 主要用于平衡每项的重要性。

文献[11]中的 TV-G 分解模型中, 卡通部分 μ 通过有界变分空间形成, 纹理部分 v 借助 G 空间建模。为了解决式(9)所示的泛函数, 采用文献[12]提出的方法, 则式(9)可演变为:

$$\inf_{(u,v) \in BV \times Gu} \left\{ J(u) + \frac{1}{2a} \|f - u - v\|_{L^2}^2 \right\} \quad (10)$$

$$G_u = \left\{ v \in G / \|v\|_G \leq w \right\} \quad (11)$$

式中 a 和 w 均为正实数, 用于平衡卡通与纹理部分的重要性。

根据文献[12]的求解过程, 可输出卡通部分 μ 和纹理部分 v 。以图 3(a) 为载体, 取 $a=0.00125, w=0.06$, 通过全变分分解方法, 输出的卡通与纹理部分分布见图 3(b)~图 3(c)。



Fig.3 Total variational decomposition of carrier image

图 3 载体图像的全变分分解结果

1.3 基于 DWT 的水印嵌入

为了将水印信息融入到载体中的纹理部分，引入离散小波变换(DWT)^[13]来设计融合准则。DWT 作为常用的多分辨率分析机制，主要是把初始图像分解成相应的小波系数，从而得到 4 个子带，分解结果见图 4(a)^[13]：

$$W_{\varphi}(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \varphi_{j_0, m, n}(x, y) \quad (12)$$

$$W_{\phi}^i(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \phi_{j_0, m, n}^i(x, y) \quad (13)$$

式中： j_0 为任意的尺度； $W_{\varphi}(j_0, m, n)$ 为尺度 j_0 下的近似系数； $W_{\phi}^i(j_0, m, n), i = H, V, D$ 为尺度 j_0 下的近水平 H , 垂直 V 和对角线 D 的系数^[13]； $\varphi(\)$ 是尺度函数； $\phi(\)$ 是小波函数。

利用一级 DWT 方法来分解纹理部分和加密水印，其过程见图 4(b)~图 4(c)。由分解结果发现，低频分量 LL_2 包含了整个图像的大部分能量，而其余子带则较好地保持了图像的细节信息，分别记为 $[LL_v, LH_v, HL_v, HH_v]$ 和 $[LL_e, LH_e, HL_e, HH_e]$ (下标 v 和 e 分别表示纹理图像和加密水印)。

设计融合机制，把水印隐藏在纹理部分中：

$$\begin{cases} LL' = (LL_v + k \times LL_e) / 2 \\ LH' = (LH_v + k \times LH_e) / 2 \\ HL' = (HL_v + k \times HL_e) / 2 \\ HH' = (HH_v + k \times HH_e) / 2 \end{cases} \quad (14)$$

式中： LL', LH', HL', HH' 为融入水印的 DWT 系数； k 为权重因子。

借助 DWT 逆变换(Inverse DWT, IDWT)，处理 LL', LH', HL', HH' ，形成水印纹理部分 f' ：

$$f' = \text{IDWT2}(LL', LH', HL', HH') \quad (15)$$

以图 2(f) 为样本，根据式(14)和式(15)，将其嵌入到纹理部分图 3(c) 中，形成的水印纹理部分见图 5(a)。再将水印纹理部分与初始的卡通部分 f_u 组合，可得到相应的水印图像：

$$f'' = f' + f_u \quad (16)$$

借助上述方法来处理图 5(a) 和图 3(b)，形成的结果见图 5(b)。可以发现，所提算法形成的水印图像的透明性较为理想，没有透露任何有关的水印信息。

1.4 水印检测

1) 利用式(10)分解宿主图像，得到相应的卡通 f_u (下标 u 是卡通图像) 与纹理部分 f_v ；再执行如下操作，得到水印纹理部分 f' ：

$$f' = f'' - f_u \quad (17)$$

2) 利用一级 DWT 方法分解 f' 和载体图像的纹理部分 f_v ，得到对应的子带系数，记为 $[LL_{wv}, LH_{wv}, HL_{wv}, HH_{wv}]$ 和 $[LL_v, LH_v, HL_v, HH_v]$ 。

3) 设计水印提取方法，输出加密水印的 4 个子带：

$$\begin{cases} LL_e = (2LL' - LL_v) / k \\ LH_e = (2LH' - LH_v) / k \\ HL_e = (2HL' - HL_v) / k \\ HH_e = (2HH' - HH_v) / k \end{cases} \quad (18)$$

4) 借助 DWT 逆变换来处理加密水印的 4 个子带 $[LL_e, LH_e, HL_e, HH_e]$ ，得到编码水印 f_e ：

$$f_e = \text{IDWT2}(LL_e, LH_e, HL_e, HH_e) \quad (19)$$

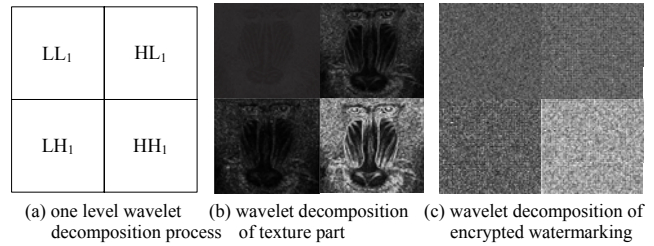


Fig.4 One level wavelet decomposition results

图 4 一级 DWT 分解结果

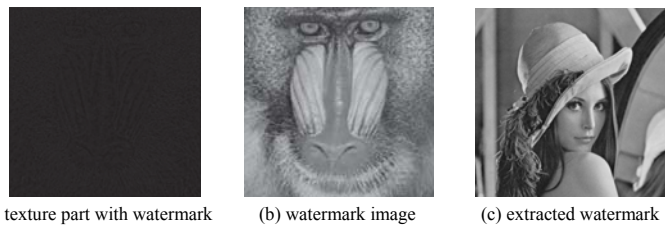


Fig.5 Watermark embedding results

图 5 水印嵌入结果

5) 利用第2个私钥 P_2 和可逆Fresnel变换, 通过相位截断操作, 得到中间水印信息 f_0' :

$$f_0' = \text{PT}\{FrT_{-z}^u(f_e P_2)\} \quad (20)$$

6) 最后, 利用第1个密钥 P_1 和可逆Fresnel变换, 借助相位截断操作, 检索出水印信息 $f(x, y)$:

$$f(x, y) = \text{PT}\{FrT_{-z}^u(f_0' P_1)\} \quad (21)$$

以图2(a)为对象, 根据上述水印检测过程, 输出的检索水印见图5(c)。

2 实验结果与分析

为了验证本文水印算法的透明性与鲁棒性, 采用 Matlab 软件, 在 3.5 GHz、双核 CPU、500 GB 硬盘与 8G 内存的 DELL 微型机上完成测试。同时为了反映出所提算法的优势, 将文献[4]和文献[6]当成对照组。考虑一般性, 在南加州大学的信号图像处理研究所(University of Southern California-Signal and Image Processing Institute, USC-SIPI)构建的数据集^[14]中随机选择 2 幅标准图像, 见图 6(a)和图 6(f), 二者大小都为 512×512; 将图 6(b)与图 6(g)视为水印信息, 大小都为 64×64。实验参数: 遗传算法的迭代次数 $m=300, Z=2, K_1=0.01, K_2=0.03$ 。评价指标: a) 透明性; b) 鲁棒性; c) 水印容量。

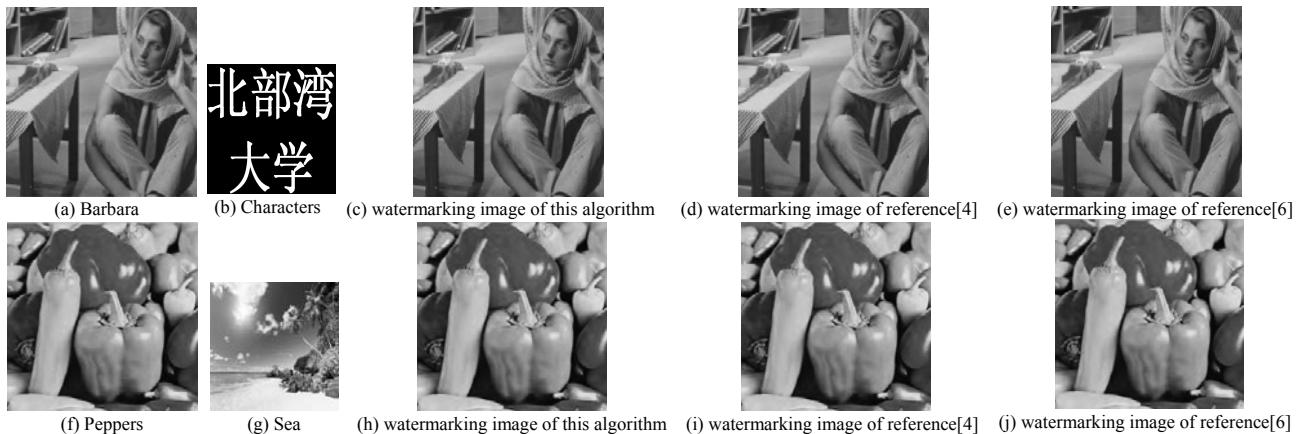


Fig.6 Watermarking images with different algorithms

图6 不同算法的水印图像

2.1 水印透明性测试分析

借助所提算法、文献[4]和文献[6]的嵌入过程, 把图 6(b)和图 6(g)融入到载体中, 得到各自的水印效果见图 6(c)~(e),(h)~(j)。由水印效果发现, 3 种方法的水印透明性均较高, 水印数据融入到载体后, 被充分隐藏。

为了客观反映三者的水印透明性, 测试图 6(c)~图 6(e)与图 6(a)之间的 PSNR^[5], 结果见表 1。由表 1 发现, 所提算法的 PSNR 值最大, 显示其透明性最高。原因是所提算法采用光学加密机制来混淆水印, 充分隐秘其信息, 并借助全变分分解方法提取

宿主图像的纹理部分, 将加密水印嵌入到纹理部分中, 降低人眼对内容修改所引起的变化敏感度, 使其水印透明性更好。文献[4]利用颜色不变性来改进 SURF 法, 以检测纹理区域的鲁棒特征, 并根据这些特征来构建仿射不变椭圆区域, 将水印信息嵌入到这些区域中, 对载体内容的修改范围较小, 但其并没有利用载体中的所有纹理特征来嵌入水印, 其水印透明性要略低于所提算法。文献[6]虽然也采用了加密方法来隐秘水印, 但其是将加密水印嵌入到少量的低频系数中, 而低频系数包含了非纹理与纹理信息, 对载体的纹理信息利用不足, 容易引起人眼对载体内容变化的注意, 降低了其不可感知性, 导致其水印透明性不佳。

2.2 鲁棒性测试

为体现3种算法在几何变换下的水印检测质量差异, 将图6(c)~图6(e)当作测试对象, 并把表2中的几何变换作用于这三者, 再基于所提算

表1 不同算法的 PSNR 值统计结果

Table1 Statistical results of PSNR values of different algorithms			
algorithm	proposed	Ref.[4]	Ref.[6]
PSNR/dB	55.37	49.25	54.89

表2 攻击类型及其参数值

Table2 Attack types and their parameters				
algorithm	angle rotation	Gaussian fuzzy	salt and pepper noise	JPEG compression
value	120°	0.5	0.07	60

法、文献[4]和文献[6]的水印检测过程，复原相应的水印。与此同时，为了客观评估复原水印的质量，借助相关系数(Correlation Coefficient, CC)值^[14]来衡量，结果见表3。由结果发现，当水印图像经过几何变换后，3种水印算法所复原的水印都有失真问题。但从总体上看，所提算法的抗几何变换能力要优于文献[4]和文献[6]算法，可以得到完整清晰的水印，相应的CC值均处于较高水平。对于文献[4]，其对旋转操作具备更高的优势，提取的水印质量更高，要优于所提算法与文献[6]，其相应的CC值分别达到了0.943。但对于其他内容修改，所提算法与文献[6]的复原水印质量要高于文献[4]。原因是所提算法利用了全变分解方法来提取载体

中的所有纹理信息，并利用DWT变换处理加密水印与载体的纹理部分，在变换域内，通过将水印的DWT系数嵌入到纹理部分，显著提高了像素的感知冗余度，从而使其具备较好的鲁棒性。文献[4]将未经处理的水印嵌入到仿射不变椭圆区域中，主要利用椭圆区域对几何变换的不变性来提高其抗几何变换能力，对旋转攻击具有出色的鲁棒性，但由于SURF算子对噪声、模糊、联合图像专家小组压缩(Joint Photographic Experts Group, JPEG)缺乏稳定性，导致其对此类攻击的鲁棒不佳。文献[6]是将加密水印的DWT低频子带嵌入到载体中合适的位置，也是在变换域内完成水印嵌入，但未能充分利用纹理信息，感知冗余度不佳，继而限制了其鲁棒性。

3 结论

为了兼顾水印算法的透明性、鲁棒与嵌入容量，设计了基于相位截断菲涅耳变换与全变分解的鲁棒水印算法。通过利用 Logistic 映射生成的随机掩码，基于 Fresnel 变换，将初始水印编码为一幅似噪声分布的密文；随后，利用全变分解方法，在巴拿赫空间内提取载体的纹理部分。引入 DWT 变换来分解加密密文与纹理部分，得到对应的低频系数。再设计融合规则，将加密水印嵌入到纹理部分的低频系数中。通过组合卡通部分与水印纹理部分，获取水印图像。在 USC-SIPI 数据集上实施测试，数据显示所提算法不仅具有理想的水印透明性，而且对于噪声、模糊与 JPEG 压缩等攻击具有较好的鲁棒性。

参考文献：

- [1] 肖宁,李爱军. 基于几何校正与非下采样 Shearlet 变换的图像水印算法[J]. 信息与控制, 2018,38(1):97-106. (XIAO Ning,LI Aijun. Image watermarking algorithm based on geometric correction and non-downsampling Shearlet transform[J]. Information and Control, 2018,38(1):97-106.)
- [2] 程艳艳. 基于离散余弦变换与 Hessenberg 分解的图像水印算法[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2019,40(1):45-51. (CHENG Yanyan. Image watermarking algorithm based on discrete cosine transform and Hessenberg decomposition[J]. Journal of Jinggangshan University(Natural Science Edition), 2019,40(1):45-51.)
- [3] NAJAFI E. A robust embedding and blind extraction of image watermarking based on discrete wavelet transform[J]. Mathematical Sciences, 2017,11(4):307-318.
- [4] NIU Panpan,WANG Xiangyang,LIU Yunan. A robust color image watermarking using local invariant significant bitplane Histogram[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017,76(3):3403-3433.
- [5] 左悦. 基于视觉内容分析和遗传算法优化的鲁棒图像水印算法[J]. 包装工程, 2019,40(1):209-217. (ZUO Yue. Robust image watermarking algorithm based on visual content analysis and genetic algorithm optimization[J]. Packaging Engineering, 2019,40(1):209-217.)
- [6] SARITA P A,JAYSHREE J,JAYSHREE K. Digital image watermarking through encryption and DWT for copyright protection[J]. Recent Trends in Signal and Image Processing, 2019,727(12):187-195.

表3 各水印技术的鲁棒性测试

Table3 Robustness test of each watermarking technology					
algorithm	results	rotation	Gauss fuzzy	salt and pepper noise	JPEG compression
	CC	0.912	0.937	0.953	0.979
proposed	restoration watermark				
	CC	0.943	0.902	0.887	0.865
Ref. [4]	restoration watermark				
	CC	0.898	0.921	0.949	0.968
Ref.[6]	restoration watermark				

- [7] WANG Chunpeng,WANG Xingyuan,CHEN Xingjun. Robust zero-watermarking algorithm based on polar complex exponential transform and logistic mapping[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017,76(24):26355–26376.
- [8] 包林霞. 基于 DNA 编码与菲涅尔域变换的光学图像加密[J]. 光学技术, 2018,44(6):757–762. (BAO Linxia. Optical image encryption based on DNA coding and Fresnel transform[J]. Optical Technique, 2018,44(6):757–762.)
- [9] WANG Y,QUAN C. Optical color image encryption without information disclosure using phase-truncated Fresnel transform and a random amplitude mask[J]. Optics Communications, 2015,444(9):147–155.
- [10] 赵健,范帅帅,徐文胜. 基于纹理方向性的非下采样剪切波水印算法[J]. 计算机工程, 2018,44(1):263–267. (ZHAO Jian,FAN Shuaishuai,XU Wensheng. A non-downsampling shear-wave watermarking algorithm based on texture directivity[J]. Computer Engineering, 2018,44(1):263–267.)
- [11] ZHU Xinjun,TANG Chen,LI Biyuan. Phase retrieval from single frame projection fringe pattern with variational image decomposition[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014,59(3):25–33.
- [12] DU Huiqian,LIU Yilin. Minmax-concave total variation denoising[J]. Signal Image and Video Processing, 2018,12(6):1027–1034.
- [13] 林志达,吕华辉. 小波系数感知的网络流量预测机制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(1):131–135. (LIN Zhida,LYU Huahui. Wavelet coefficient aware network traffic prediction[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(1):131–135.)
- [14] BIRAJDAR G,MANKAR V H. Blind method for rescaling detection and rescale factor estimation in digital images using periodic properties of interpolation[J]. AEU:International Journal of Electronics and Communications, 2014,68(7):644–652.

(上接第 283 页)

- [13] KIM K T,SEO D K,KIM H T. Efficient classification of ISAR images[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2005,53(5):1611–1621.
- [14] ZHANG X,BAI Y. ISAR target 2D images pre-processing in ATR[C]// World Congress on Computer Science & Information Engineering. [S.l.]:IEEE, 2009,6:542–544.
- [15] 章婧. ISAR 像目标识别中的预处理及特征提取[J]. 中国新通信, 2013(2):49–50. (ZHANG Jing. Pre-processing and feature extraction of ISAR images in automatic target recognition[J]. China New Telecommunications, 2013(2):49–50.)
- [16] 何友,关键,孟祥伟. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2011. (HE You,GUAN Jian,MENG Xiangwei. Radar target detection and CFAR processing[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2011.)
- [17] 许虎寅,王治和. 一种改进的基于密度的聚类算法[J]. 微电子学与计算机, 2012,29(2):44–47. (XU Huyin,WANG Zhihe. An improved density-based clustering algorithm[J]. Microelectronics & Computer, 2012,29(2):44–47.)
- [18] 伍育红. 聚类算法综述[J]. 计算机科学, 2015,42(s1):491–499. (WU Yuhong. General overview on clustering algorithms[J]. Computer Science, 2015,42(s1):491–499.)
- [19] 杨琨,曾立波,王殿成. 数学形态学腐蚀膨胀运算的快速算法[J]. 计算机工程与应用, 2005,41(34):54–56. (YANG Kun,ZENG Libo,WANG Diancheng. A fast arithmetic for the erosion and dilation operations of mathematical morphology[J]. Computer Engineering and Applications, 2005,41(34):54–56.)