

基于分数阶傅里叶变换和扩展变换抖动调制的鲁棒数字水印算法

张燕华 马小虎

(苏州大学计算机科学与技术学院 苏州 215006)

摘要 针对现有分数阶傅里叶变换水印算法在透明性和鲁棒性等方面的不足,提出了一种基于分数阶傅里叶变换和扩展变换抖动调制的鲁棒数字水印算法。首先对载体图像进行提升小波分解,将低频子带均匀分割,并对各子块进行分数阶傅里叶变换。然后,从频率角度构造载体向量,选择幅值系数的中低频系数构成每个子块的载体向量。在水印嵌入时,先对载体向量进行投影变换,再根据水印信息对投影后所得数据进行抖动调制。水印的提取过程采用了最小距离检测,实现了水印的盲检测。实验结果表明,该算法不仅具有很好的透明性,而且对 JPEG 压缩、滤波、噪声、剪切等常见的图像攻击具有良好的鲁棒性。此外,所提算法水印的安全性和实用性也优于常见算法。

关键词 数字水印,分数阶傅里叶变换,扩展变换抖动调制,鲁棒性

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.039

Robust Watermarking Algorithm Based on Fractional Fourier Transform and Spread Transform Dither Modulation

ZHANG Yan-hua MA Xiao-hu

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract Aiming at the existent algorithms' defects in transparency and robustness, a new robust image watermarking algorithm based on fractional Fourier transform and spread transform dither modulation was presented in this paper. First, lifting wavelet transform is performed on the original image. The lowpass subband is segmented into non-overlapping blocks, and each block is transformed by the fractional Fourier transform. Then, the low-frequency coefficients of the amplitude information are chosen to construct the host vectors depending on frequency. In the process of embedding watermark, spread transform is performed on the host vectors to obtain the projected host vectors, and then the binary watermark is embedded using dither modulation. A minimum distance decoder is used to decode the watermark. The experimental results show that the proposed algorithm can obtain better transparency as well as robustness against common image attacks such as JPEG compression, filtering, noisy, cropping and so on. Compared with previous similar schemes, the presented method achieves higher practicality and reliability.

Keywords Digital watermarking, Fractional Fourier transform, Spread transform dither modulation, Robustness

1 引言

随着计算机网络和多媒体处理技术的发展,版权保护和信息完整性保证成为迫切需要解决的重要问题。数字水印技术作为信息隐藏技术研究领域的重要分支,是实现多媒体版权保护与信息完整性保证的有效方法^[1]。数字水印技术将一些数字水印标识信息直接嵌入数字载体中,在不影响原载体使用价值的前提下修改载体特定区域的结构,以达到版权验证和篡改检测的目的^[2]。从嵌入容量、鲁棒性、安全性等角度看,频域数字水印是目前水印研究的热点。

近年来,时频域数字水印技术引起了很多研究者的兴趣,由于分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)同时包含了信号的时域和频域特征,因此在分数阶傅里

叶变换域中嵌入数字水印比单纯的空域和频域算法具有更大的灵活性^[3]。此外,变换阶作为 FRFT 的一个可控制参数,为水印增加了一个额外的安全机制,加之 FRFT 在时频平面上的旋转特性和角度连续性,分数阶傅里叶变换在数字水印领域有着广泛的应用前景。目前,基于分数阶傅里叶变换的数字水印算法大多为无意义水印,水印信息为高斯白噪声或 chirp 信号,不具有视觉意义,嵌入容量小且只能根据统计决策来进行检测,因此该类算法的实用性非常有限,不能满足实际应用需求^[4-6]。为了实现有意义水印,Rawat 等人^[7]在分数阶傅里叶变换域使用视觉密码实现了零水印算法,其具有很好的隐蔽性和鲁棒性。但该算法中不含水印的图像,缺乏一定可靠性。Bhatnagar 等人^[8]结合 FRFT 和 SVD 将灰度水印图像嵌入至原始载体图像中,算法透明性和鲁棒性良好,嵌入

到稿日期:2015-10-26 返修日期:2016-01-30 本文受江苏省自然科学基金项目(BK20141195)资助。

张燕华(1990-),女,硕士,主要研究方向为数字水印、图像处理,E-mail: zhangyanhua52@126.com;马小虎(1964-),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究方向为数字水印、人脸识别。

容量也很高,但在水印嵌入过程中仅嵌入水印图像的奇异值,提取时需要原始水印的两个酉矩阵,这就引发了假阳性问题:即使图像中没有嵌入水印,也可能根据密钥从中提取出水印图像。因此该算法缺乏必要的有效性和可靠性,无法达到版权保护的目的。文献[9-11]中算法的思想基本一致,也是目前研究比较多的一类算法。该类算法使用二值图像作为数字水印,水印嵌入时,根据水印位信息的不同向 FRFT 系数中添加不同的服从均匀或正态分布的序列。水印检测时,计算 FRFT 系数与两个序列的相关性系数,根据相关性的大小判断水印位为 0 或 1。该类算法实现了水印的盲提取,对 JPEG 压缩、噪声攻击等具有良好的鲁棒性,实用性得到增强;但该类算法对滤波、剪切等图像攻击的鲁棒性较弱,且水印嵌入后对图像的视觉质量造成一定影响,算法性能还需进一步改进。

根据以上分析,现存的基于分数阶傅里叶变换的水印算法大部分是针对高斯白噪声或 chirp 信号的无意义水印,部分相关的图像数字水印技术还不是很成熟,透明性和鲁棒性等性能均需进一步提升。针对 FRFT 域图像数字水印在透明性上的欠缺性以及对抗滤波、剪切和缩放等图像攻击的脆弱性,本文在 FRFT 域中引入了扩展变换抖动调制(Spread Transform Dither Modulation, STDM),提出了基于分数阶傅里叶变换和扩展变换抖动调制的鲁棒数字水印算法。STDM 能够实现水印的盲检测,并且在鲁棒性、有效载荷及误码率等方面均具有良好的性能。分析和实验结果表明,该算法具有良好的透明性,即使水印嵌入强度较大也不会引起图像失真。此外,水印在抵抗 JPEG 压缩、滤波、噪声、剪切和缩放等攻击时具有良好的鲁棒性,其安全性也优于其他常见算法。

2 相关技术

2.1 分数阶傅里叶变换

分数阶傅里叶变换是经典傅里叶变换的推广,广泛应用于信号处理和图像操作等领域^[3]。分数阶傅里叶变换是一种时频变换方法,具有空域和频域的双域特征。传统的傅里叶变换可以看作信号在时频平面旋转 $\pi/2$,而分数阶傅里叶变换则可以解释为信号在时频平面内旋转任意角度的表示方式。一维连续信号 $f(x)$ 的 p 阶分数阶傅里叶变换可以定义为^[3]:

$$F^p[f(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(x, u) f(u) du, 0 \leq |p| \leq 2 \quad (1)$$

其中, $K_p(x, u)$ 是分数阶傅里叶变换的核,定义为:

$$K_p(x, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cos\alpha}{2\pi}} * \exp j\left(\frac{u^2+x^2}{2} \cot\alpha - xucsc\alpha\right), & \alpha \neq n\pi \\ \delta(u-x), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(u+x), & \alpha = (2n\pm 1)\pi \end{cases} \quad (2)$$

其中, p 为分数阶傅里叶变换的变换阶, α 为对应的变换角度, p 与 α 的关系为 $\alpha = p\pi/2$ 。变换阶 p 的分数阶傅里叶变换对应的逆变换为:

$$f(x) = F^{-p}[F^p(f(x))] \quad (3)$$

对一维分数阶傅里叶变换进行推广,可以得到高维的分数阶傅里叶变换。二维灰度图像信号 $f(p, q)$ 的分数阶傅里叶变换以及逆变换定义为:

$$F_{\alpha, \beta}(m, n) = \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} f(p, q) K_{\alpha, \beta}(p, q, m, n) \quad (4)$$

$$f_{\alpha, \beta}(p, q) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} F_{\alpha, \beta}(m, n) K_{-\alpha, -\beta}(p, q, m, n) \quad (5)$$

其中,二维变换核是可分离的, $K_{\alpha, \beta} = K_{\alpha} \otimes K_{\beta}$ (\otimes 表示张量积), K_{α}, K_{β} 分别是两个一维离散分数阶傅里叶变换核函数。 (α, β) 分别是 x 方向和 y 方向的变换阶,两者可以相同也可以不相同。

分数阶傅里叶变换对变换阶十分敏感,对一幅图像使用不同的变换阶所得的变换系数均不相同。图 1(a)-(f) 分别为 Lena 图像在不同变换阶变换后的结果。

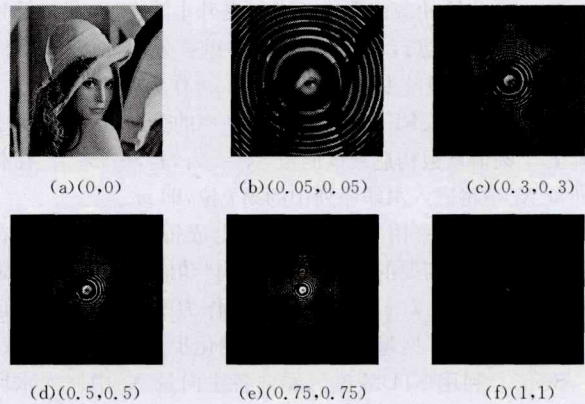


图 1 原始图像在不同变换阶变换后的结果

2.2 扩展变换抖动调制

作为量化索引调制的重要扩展,扩展变换抖动调制利用抖动调制器来调制载体向量沿某给定向量的投影,以此达到信息嵌入的目的^[12]。STDM 方法中的水印嵌入过程如图 2 所示。

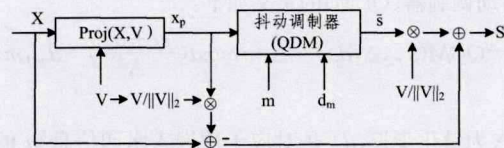


图 2 扩展变换抖动嵌入器

其中, X 是从原始信号中得到的向量, V 为投影向量, d_m 为抖动量, m 为索引,与水印信息相对应。首先将载体向量 X 投影到 V 上得到载体向量在该投影向量上的投影 x_p ,再利用抖动调制器根据所要嵌入的水印位 m 去调制 x_p 得到 \tilde{s} ,最后得到携带水印信息的向量 $S = X + (\tilde{s} - x_p) \cdot V / \|V\|_2$ 。

对于 STDM 方法,水印的提取过程是嵌入过程的逆过程,由于在传输过程中嵌入的水印信号会遭受一定的攻击,因此在检测端得到的是失真的载体向量 X' 。解码时,将向量 X' 在向量 V 上进行投影得到 x_p' ,然后利用抖动调制器在该投影上分别嵌入水印 0 和 1,得到两个数 S_0 和 S_1 ,最后采用最小距离检测器来估计出载体向量 X' 中所含的水印位 \hat{m} 。

STDM 不是针对原始图像的某一系数进行量化,而是先对原始数据中获得的提取向量进行投影变换,然后对投影所得数据进行抖动调制,这样使得只集中于一个变换系数上的嵌入失真随之扩展,这样可以满足水印的透明性^[13]。此外,在检测端使用的随机向量 V 和抖动信号 d_m 必须与嵌入端相同。将它们分别由密钥产生,有效增强了水印算法的安全性。

3 水印的嵌入和提取算法

本算法中,原始载体图像 I 为大小为 $m \times n$ 的灰度图像,数字水印 W 为大小为 $p \times q$ 的二值图像。分数阶傅里叶变换将图像分解为幅值信息和相位信息,与幅值信息相比,人眼对相位信息的变化更加敏感,且相位信息在传输过程中容易遭受影响。为了保证含水印的图像的透明性和鲁棒性,本文算法将水印信息嵌入至 FRFT 变换系数的幅值中。

3.1 水印嵌入算法

Step1 对水印图像 W 进行 Arnold 置乱得到置乱后的水印图像 W' ,将 W' 转换为一维序列 $M=[m_1, m_2, \dots, m_{p \times q}]$ 。

Step2 将原始载体图像 I 进行提升小波变换,获得低频子带 LL 。对 LL 进行 8×8 大小的不重叠分块,对每个图像块进行分数阶傅里叶变换,变换阶 $power$ 作为密钥保存。

Step3 根据 FRFT 域变换系数频率的分布,从每个块中选择 L 个幅值系数构造载体向量 $X_i=[x_1, x_2, \dots, x_L]$ 。在载体向量 X_i 中将嵌入水印序列中的第 i 位,即 m_i 。

Step4 使用密钥 $key1$ 和 $key2$ 生成每个主向量 X_i 在 STDM 调制中所需要的投影向量 V 和抖动信号 d_m ,同时确定量化步长 Δ 的值。 $key1, key2$ 和 Δ 均作为密钥保存,以保证水印检测端的投影向量、抖动信号和量化步长与嵌入端一致。

Step5 利用 STDM 嵌入器向各主向量 X_i 中嵌入水印位 m_i ,携带水印信息的向量 S_i 可由下式导出:

$$S_i = X_i + \left(\frac{QDM(\text{proj}(X_i, V), \Delta, d_m) - \text{proj}(X_i, V)}{\|V\|_2} \right) V \quad (6)$$

其中, $\text{proj}(X_i, V) = \frac{\langle X_i, V \rangle}{\|V\|_2} V$, $\langle X_i, V \rangle$ 表示向量 X_i 和向量 V 的内积, $\|\cdot\|_2$ 表示取 $L-2$ 范数。

抖动调制器(QDM)的定义如下:

$$\tilde{s} = QDM(x_p, \Delta, d_m) = \Delta \cdot \text{round}\left(\frac{x_p + d_m}{\Delta}\right) - d_m, m=0, 1 \quad (7)$$

其中, Δ 为量化步长, d_m 是对应于欲嵌入水印信息 m 的随机抖动信号。

Step6 对修改后的 FRFT 系数进行变换阶为 $-power$ 的 FRFT 逆变换,获得水印嵌入后的细节子带 LL_w 。经 ILWT 变换之后,最终获得水印嵌入后的图像 I_w 。

3.2 水印提取算法

本水印算法为盲数字水印算法,在提取过程中不需要原始载体图像和原始水印信息,仅根据嵌入过程中使用的密钥即可从含水印的图像中获得嵌入的水印信息。水印提取的具体过程如下:

Step1 将含水印的图像 I_w 进行 LWT 变换,获得低频子带 LL_w 。将 LL_w 子带进行 8×8 大小的分块,每块分别进行变换阶为 $power$ 的 FRFT 变换,获得每块 FRFT 变换系数的幅值和相位值。

Step2 按与嵌入端 Step3 相同的方法组成含水印图像的各主向量 X_i' 。

Step3 利用密钥 $key1$ 和 $key2$ 计算每个主向量 X_i' 在 STDM 调制时所需要的投影向量 V 和抖动信号 d_m 。

Step4 根据 V, d_m 利用式(8)估计出每个主向量 X_i' 所携带的水印位 \hat{m} 。

$$\hat{m} = \arg \min_{m \in \{0,1\}} \text{dist}(\text{proj}(X_i', V), QDM(\text{proj}(X_i', V), \Delta, d_m)) \quad (8)$$

其中, $\text{dist}(z, s) = |z - s|$, d_m 对应于嵌入端使用的抖动信号。

Step5 将提取出的水印序列转换为 $p \times q$ 大小的二维矩阵,Arnold 逆置乱之后获得最终提取的水印图像 \hat{W} 。

4 实验结果分析

为了验证算法的性能,本文采用 Matlab2013a 作为实验平台,选择 512×512 的灰度图像作为原始载体图像,如图 3(a)所示;选择大小为 32×32 、含有“苏州大学”字样的二值图像作为原始水印图像,如图 3(b)所示。



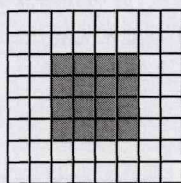
(a) 原始载体图像

苏州
大学

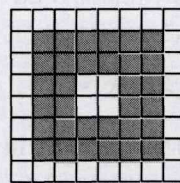
(b) 水印图像

图3 原始载体图像和水印图像

为了选择合适的载体向量,实验从频率的角度考虑,分别选用 FRFT 幅值系数的中低频系数、中高频系数和所有幅值系数构成载体向量 X_{low_mid} , X_{mid_high} 和 X_{all} ,中低频系数和中高频系数在系数块中的分布如图 4(a)和图 4(b)中的阴影部分所示。



(a) 中低频系数分布



(b) 中高频系数分布

图4 FRFT 幅值系数分布

为了客观地比较 3 种载体向量对水印性能的影响,实验中分别对这 3 种载体向量进行实验。调节各自的量化步长 Δ 使含水印的图像的 PSNR 值大概一致,分别对含水印图像进行相同的图像攻击,检测端提取出水印图像的 BER 值,如图 5 所示。

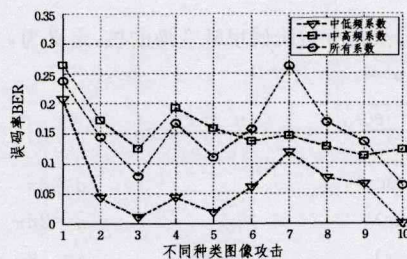


图5 3种载体向量的性能对比

图 5 中,横坐标 1~10 代表的图像攻击依次为:JPEG10, JPEG20, JPEG30, 高斯低通滤波,中值滤波,0.3%高斯噪声,0.5%高斯噪声,1%椒盐噪声,1%斑点噪声和缩放 0.5。从图 5 中可以发现,当透明性一致时,使用中低频系数构造的原始载体向量 X_{low_high} 具有更好的鲁棒性,图像经以上 10 种攻击后提取出的水印的误码率最低。通过比较,最终选择使用

图 4(a)所示的 16 个中低频系数来构造每个图像块的载体向量 X_i 。

以下分别从透明性、鲁棒性两大方面来分析本文水印算法的性能。

4.1 透明性分析

透明性反映了含水印图像与宿主图像之间的视觉差异,即水印信息在宿主图像中的不可见性。图 6(a)为 Lena 图像在嵌入水印“苏州大学”后的图像。图 6(b)为从图 6(a)中提取的未经过任何攻击的水印图像。对比图 6 与图 3 不难看出,水印嵌入至载体图像后,视觉上很难分辨出含水印图像与原始载体图像之间的区别,提取出的水印图像也与原始水印保持一致。



图 6 水印嵌入后的载体图像及提取的水印图像

此外,实验中选用峰值信噪比 $PSNR$ 来测评水印算法的透明性,其定义如下^[14]:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{m \times n \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I(i,j) - I'(i,j))^2} \right) \text{ (dB)} \quad (9)$$

其中, $I(i,j)$ 和 $I'(i,j)$ 分别为原始图像和含水印图像在位置 (i,j) 的灰度值, $m \times n$ 是图像的大小。表 1 所列采用本文算法时不同原始载体图像在嵌入水印后的 $PSNR$ 值。

表 1 不同载体图像嵌入水印后的 $PSNR$ 值

实验图像	Lena	Baboon	Peppers	Airplane	Barb
$PSNR$ (dB)	44.0034	44.3605	44.2765	44.2496	43.9592

通常情况下,当峰值信噪比大于 30dB 时,人眼无法感知图像中嵌入的水印信息。本文算法的 $PSNR$ 均值达到 44dB 以上,可见算法具有良好的透明性。

4.2 鲁棒性分析

为了检测所提算法的鲁棒性,实验中使用相关系数 NC 和误码率 BER 来计算提取的水印图像与原始水印图像之间的相似性, NC 和 BER 的计算公式如下^[14]:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q W(i,j)W'(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q W(i,j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q W'(i,j)^2}} \quad (10)$$

$$BER = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q W(i,j) \oplus W'(i,j)}{p \times q} \quad (11)$$

其中, $W(i,j)$ 表示原始水印图像, $W'(i,j)$ 表示提取出的水印图像, $p \times q$ 为水印图像的大小, \oplus 为异或运算。 NC 的值越大, BER 值越小,则提取出的水印与原始水印的相似度越高。

实验中对含水印图像进行的攻击包括: JPEG 压缩、滤波攻击、噪声攻击、剪切等。以 Lena 图为例,当含水印的图像遭受不同的图像攻击后,提取的水印图像如图 7 所示。

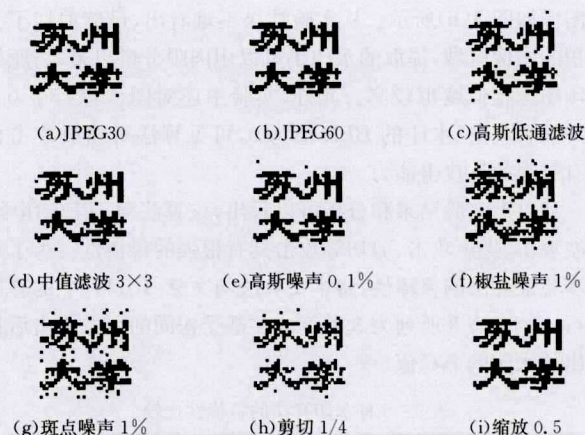


图 7 不同图像攻击后提取出的水印图像

除了 Lena 图像,实验中也把 Baboon, Peppers, Airplane 和 Barb 图像作为原始载体图像进行水印的鲁棒性测试,表 2 为不同的含水印图像在相同攻击下提取出的水印图像的 NC 和 BER 均值。

表 2 水印的鲁棒性结果

攻击类型	参数	NC	BER
JPEG	30	0.9938	0.0084
JPEG	60	1	0
高斯低通滤波	[3 3]	0.9650	0.0479
	[5 5]	0.9392	0.0822
中值滤波	[3 3]	0.9795	0.0281
	[5 5]	0.9186	0.1089
高斯噪声	0.1%	0.9951	0.0068
	0.3%	0.9581	0.0570
	0.5%	0.9088	0.1217
椒盐噪声	1%	0.9357	0.0865
斑点噪声	1%	0.9556	0.0603
剪切	1/4	0.9469	0.0769
缩放	0.5	0.9952	0.0064

(1) JPEG 压缩攻击

JPEG 压缩是最常见的图像压缩标准,对含水印图像进行 QF 为 30 和 60 的 JPEG 压缩后,提取的水印图像如图 7(a)和图 7(b)所示。当 QF 低至 30 时,视觉效果上能够明显分辨出水印信息, NC 高达 0.9938,可见该算法具有较强的抗压缩攻击能力。

(2) 滤波攻击

为了检测算法对滤波攻击的鲁棒性,实验中分别对含水印的图像进行 3×3 和 5×5 高斯低通滤波和中值滤波。图 7(c)和图 7(d)分别为图像经过 3×3 的高斯低通滤波和中值滤波后提取出的水印图像。此外,滤波攻击后检测到的水印的 NC 值相当高, BER 值均未达到 0.1。因此,本算法能够有效地抵抗滤波攻击。

(3) 噪声攻击

对于噪声攻击,实验中向含水印的图像添加了多种类别的噪声,包括不同方差的高斯噪声、椒盐噪声和斑点噪声。图 7(e)一图 7(g)分别为图像经高斯噪声、椒盐噪声和斑点噪声攻击后提取的水印图像。当高斯噪声的强度达到 0.5%,本文算法提取出的水印的 NC 值仍达到了 0.9218。

(4) 几何攻击

仿真实验中分别对含水印图像进行剪切和缩放攻击。对于剪切攻击,实验中剪切了图像右下角 1/4 的区域,提取的水

印图像如图 7(h)所示。从实验结果不难看出,虽然剪切了大面积的图像区域,提取的水印仍可以用肉眼分辨出来,与原始水印图像相似度也较高。此外,实验中还对图像进行了 0.5 倍的缩放攻击,水印的 BER 值为 0,可见算法对缩放攻击也具有较强的抗攻击能力。

从以上实验结果和分析可以看出,该算法对 JPEG 压缩、滤波攻击、噪声攻击、剪切等攻击具有很强的鲁棒性。为了进一步验证算法的鲁棒性,将本文算法与文献[10,11]中的算法进行比较。表 3 所列为 3 种算法在遭受相同的图像攻击后提取出的水印的 NC 值。

表 3 3 种水印算法的鲁棒性比较

攻击类型	参数	文献[10]	文献[11]	本文算法
JPEG	30	0.5726	0.8665	0.9929
	50	0.8846	0.9580	1
	70	0.9749	0.9948	1
高斯低通滤波	[3 3]	0.8312	0.9147	0.9695
	[5 5]	0.8160	0.8577	0.9490
中值滤波	[3 3]	0.4475	0.8894	0.9872
	[5 5]	0.5458	0.7327	0.9335
高斯噪声	0.1%	0.9950	0.9995	0.9965
椒盐噪声	1%	0.9829	0.9691	0.9443
斑点噪声	1%	0.9858	0.9747	0.9518
剪切	1/4	0.8605	0.7859	0.9459
缩放	0.5	0.6826	0.8844	0.9993

通过比较表 3 中的 NC 值可以看出,本文算法在抗 JPEG、滤波、剪切等攻击方面明显优于文献[10,11]中的算法。虽然在抗击噪声攻击方面略有欠缺,但提取的水印图像的 NC 值均大于 0.94,能明显分辨水印信息。

结束语 本文设计了一种基于分数阶傅里叶变换和扩展变换抖动调制的数字水印算法。算法中使用具有视觉意义的二值图像作为水印,并在检测端实现了水印的盲提取,与 FRFT 域常见的无意义水印相比,水印的实用性得到增强。水印的嵌入过程中使用量化调制的思想。为了兼顾水印的透明性和鲁棒性,算法从频率角度构造载体向量,使得抖动调制只影响低频和中频系数。鉴于 STDM 在鲁棒性、有效载荷及误码率等方面的良好性能,本文算法的鲁棒性与常见算法的相比得到了有效提升。此外,分数阶傅里叶变换的变换阶作为一个可控参数,有效增强了水印算法的安全性。实验证明,本算法不仅满足数字水印透明性的要求,而且对 JPEG 压缩、滤波、噪声、剪切、缩放以及其他类型的图像攻击均具有良好的鲁棒性。

本文算法实现了分数阶傅里叶变换域的有意义水印,但嵌入的水印图像为二值图像,载体图像也只是限于灰度图像或彩色图像的一个色度分量,水印的嵌入容量依赖于载体图像的大小。因此,如何有效增大水印算法的嵌入容量,并在保证透明性和鲁棒性的前提下向载体图像中嵌入灰度或彩色水印图像,同时实现水印的盲提取,将是后续研究工作的重点。

参 考 文 献

[1] Yin Hao, Lin Chuang, Qiu Feng, et al. A Survey of Digital Wa-

termarking [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(7): 1093-1099 (in Chinese)

尹浩, 林闯, 邱鋒, 等. 数字水印技术综述 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(7): 1093-1099

[2] Chen He-shan, Lv Zhen-zhen, Luo Wei. Digital Image Watermarking Algorithm Based on Dispersed Chaotic Mapping System [J]. Computer Science, 2014, 41(12): 48-52 (in Chinese)
陈河山, 吕珍珍, 罗伟. 一个基于离散混沌加密的数字水印算法 [J]. 计算机科学, 2014, 41(12): 48-52

[3] Sejdic E, Djurovic I, Stankovic L J. Fractional Fourier transform as a signal processing tool; An overview of recent developments [J]. Signal Processing, 2011, 91(6): 1351-1369

[4] Savelonas M A, Chountasis S. Noise-resistant watermarking in the fractional Fourier domain utilizing moment-based image representation [J]. Signal Processing, 2010, 90(8): 2521-2528

[5] Feng Z, Xiaomin M, Shouyi Y. Multiple-chirp typed blind watermarking algorithm based on fractional Fourier transform [C]// Proceedings of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS). IEEE, 2005: 141-144

[6] Gao L, Qi L, Wang Y, et al. Rotation Invariance in 2D-FRFT with Application to Digital Image Watermarking [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2013, 72(2): 133-148

[7] Rawat S, Raman B. A blind watermarking algorithm based on fractional Fourier transform and visual cryptography [J]. Signal Processing, 2012, 92(6): 1480-1491

[8] Bhatnagar G, Raman B. A new robust reference logo watermarking scheme [J]. Multimedia Tools and Applications, 2011, 52(2): 621-640

[9] Wang Jian-hua. DWT-DFRFT Combining Image Watermarking Algorithm [J]. Automation and instrumentation, 2013(3): 192-194 (in Chinese)
王建华. 基于 DWT 和 DFRFT 相结合的图像数字水印算法 [J]. 自动化与仪器仪表, 2013(3): 192-194

[10] Duman O, Akay O. A new method of wavelet domain watermark embedding and extraction using Fractional Fourier Transform [C]// 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE, 2011: 187-191

[11] Lang J, Zhang Z. Blind digital watermarking method in the fractional Fourier transform domain [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 53(2): 112-121

[12] Chen B, Wornell G W. Achievable performance of digital watermarking systems [C]// IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, 1999. IEEE, 1999, 1: 13-18

[13] Xiao Jun, Wang Ying. Project-vector of Spread Transform Dither Modulation Watermarking Algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 11(12): 1799-1805 (in Chinese)
肖俊, 王颖. 扩展变换抖动调制水印算法中投影向量的研究 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 11(12): 1799-1805

[14] Ji Yan. Adaptive Blind Watermarking Based on DCT [J]. Computer Science, 2013, 40(7): 129-130 (in Chinese)
季燕. 基于 DCT 的自适应盲数字水印 [J]. 计算机科学, 2013, 40(7): 129-130