

基于 DCT-DWT 的 FRFT 数字水印算法

华 梦,王 雷

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

摘 要: 为了提高数字水印的鲁棒性、不可见性和安全性,该文提出了基于离散余弦变换-离散小波变换(Discrete cosine transform-discrete wavelet transform, DCT-DWT) 文中的分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier transform, FRFT) 数字水印算法。该方法利用离散余弦变换的聚焦性、离散小波变换的多分辨率特性、分数阶傅里叶变换的时频性,把水印信息很好地嵌入到载体图像中,提高了水印的鲁棒性和不可见性,同时利用 Arnold 变换对水印进行加密,提高了数字水印的安全性。MATLAB 仿真表明:该算法具有很好的安全性、鲁棒性和不可见性。

关键词: 离散余弦变换; 离散小波变换; 分数阶傅里叶变换; 数字水印

中图分类号: TP301 **文章编号:** 1005-9830(2015)04-0435-05

DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2015.39.04.009

Method of digital watermark in FRFT domain based on DCT-DWT

Hua Meng, Wang Lei

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the robustness, invisibility and security of digital watermark, this paper puts forward the fractional Fourier transform(FRFT) digital watermarking algorithm based on discrete cosine transform(DCT) and discrete wavelet transform(DWT) .This method uses the focus of DCT, multiresolution of DWT and time-frequency of FRFT, the watermark information is embedded into the carrier image very well. At the same time, we use Arnold transform on the watermark encryption, security has been improved more. MATLAB simulation shows that the algorithm has good security, robustness and invisibility.

Key words: discrete cosine transform; discrete wavelet transform; fractional Fourier transform; digital watermarking

收稿日期: 2014-12-14 修回日期: 2015-04-21

作者简介: 华梦(1991-), 男, 硕士生, 主要研究方向: 数字图像处理, E-mail: 376545479@qq.com; 通讯作者: 王雷(1964-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 信息处理和图像处理, E-mail: wanglei@njust.edu.cn。

引文格式: 华梦, 王雷. 基于 DCT-DWT 的 FRFT 数字水印算法 [J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(4): 435-439.

投稿网址: <http://zrxuebao.njust.edu.cn>

随着信息技术的迅速发展,信息安全越来越被人们关注。传统的加密算法,已经不能满足数字产品的使用和知识产权的保护,人们迫切需要寻找另一种加密算法,数字水印技术正是在这种情况下应运而生。数字水印算法可分为两大类:空域算法和频域算法。最初,人们对空域数字水印算法进行了多方面的研究,如 Cox 等人^[1]首先提出了一种空域水印算法。然而由于空域算法本身的局限性,水印的鲁棒性和不可见性较差^[2]。

水印的频域算法种类有很多,经典的频域算法有离散余弦变换算法和离散小波变换算法。目前已经提出了很多基于离散余弦变换的数字水印算法^[3-5],该算法对图像压缩和噪声攻击具有良好的鲁棒性,而对剪切和滤波攻击的鲁棒性较差。基于离散小波变换数字水印算法的研究^[6-10],是在近十年发展起来的,该算法很好地解决了水印的透明性,同时水印能够很好地隐藏在载体图像中。基于分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier transform, FRFT)数字水印算法的研究^[11-13]是在最近几年发展起来的,信号经过分数阶傅里叶变换后包含了时域和频域双重信息。本文在上述三种变换域基础上,利用离散余弦变换聚焦性、离散小波变换多分辨率特性、分数阶傅里叶变换时频性的优点,提出了基于离散余弦变换-离散小波变换(Discrete cosine transform-discrete wavelet transform, DCT-DWT)的 FRFT 水印算法。分数阶傅里叶变换的变换阶次可以作为水印的密钥,增强了水印的安全性。为了实现多重加密,利用 Arnold 变换^[14]对水印进行了二次加密,安全性进一步得到提高。

1 FRFT 和 Arnold 变换

1.1 FRFT

时域信号函数 $x(t)$ 的 p 阶分数阶傅里叶变换为

$$X_p(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(u, t) x(t) dt \quad (1)$$

$$K_p(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} \exp(j\frac{u^2+t^2}{2} \cot\alpha - tucsc\alpha) & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t-u) & \alpha = 2n\pi \\ \delta(t+u) & \alpha = (2n\pm 1)\pi \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\alpha = p\pi/2$, 对于图像 $x(x, t)$ 的二维 FRFT

如下

$$F^{p_1, p_2}(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x(s, t) K_{p_1, p_2}(s, t, u, v) ds dt \quad (3)$$

$K_{p_1, p_2}(s, t, u, v)$ 是二维 FRFT 的变换核,

$$K_{p_1, p_2}(s, t, u, v) = A_\alpha A_\beta \exp\left(\frac{j\pi(u^2+s^2)}{\tan\alpha} - \frac{j2\pi us}{\sin\alpha}\right) \times \exp\left(\frac{j\pi(v^2+t^2)}{\tan\alpha} - \frac{j2\pi vt}{\sin\alpha}\right)$$

式中:

$$A_\alpha = \exp\left(\frac{\exp[-j\pi \operatorname{sgn}(\sin\alpha)/4 + j\alpha/2]}{|\sin\alpha|^{1/2}}\right)$$

$$A_\beta = \exp\left(\frac{\exp[-j\pi \operatorname{sgn}(\sin\beta)/4 + j\beta/2]}{|\sin\beta|^{1/2}}\right) \quad (4)$$

为变换核常数, $\alpha = p_1\pi/2$, $\beta = p_2\pi/2$ 为 FRFT 的两个旋转角度。

1.2 Arnold 变换

对于大小为 $N \times N$ 的图像 $s(x, y)$, Arnold 的定义如下:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \bmod N \quad (5)$$

式中: (x, y) 为原图像的像素坐标, (x', y') 为经过 Arnold 变换后的像素坐标。Arnold 变换具有周期性, 对于一个周期为 T 的 Arnold 变换, 当置乱次数 L 后, 在进行 $T-L$ 次置乱次数就可以恢复出原始图像。不同的 N 值, 周期 T 的大小不一样。只有正确知道 T 的情况下才能得到正确的图像。

这里选取 512×512 的 lena 图像作为测试图像, 如图 1 所示。

2 基于 DCT-DWT 的 FRFT 数字水印算法

2.1 算法的嵌入

水印的嵌入框图如图 2 所示。

水印嵌入步骤如下。

(1) 首先对水印 watermark 进行 Arnold 变换, 得到 watermark_arnold 置乱水印;

(2) 对载体图像 original 进行小波变换, 提取出第二层小波变换的垂直子图系数矩阵 $HL2$ 。对系数矩阵 $HL2$ 进行分数阶傅里叶变换, 变换阶次为 $(0.95, 0.95)$, 得到幅度矩阵系数和相位矩阵系数 $p(x, y)$, 然后对幅度部分进行 8×8 的离散余弦变换, 得到系数矩阵 $s(x, y)$;

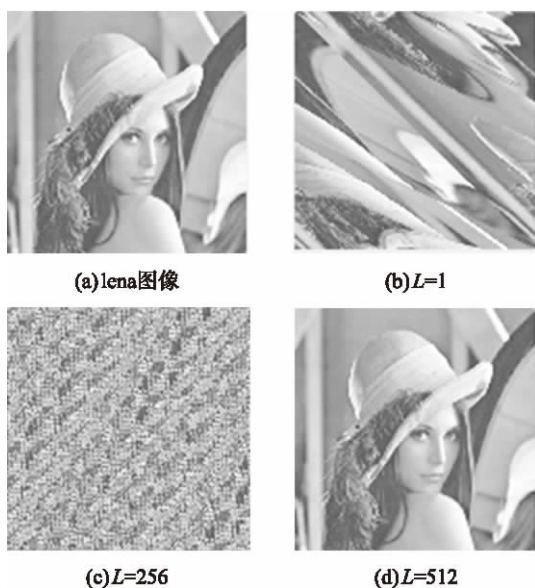
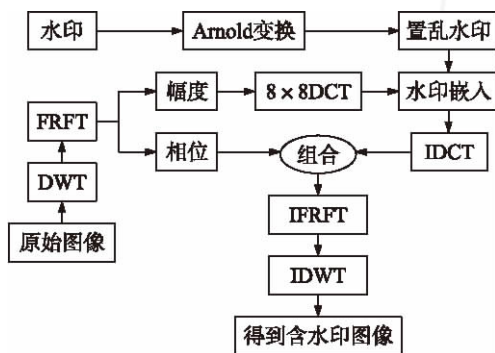
图 1 不同置乱次数 L 的测试结果

图 2 水印嵌入框图

(3) 随机序列生成器产生两个不同的序列 PN1 和 PN2。利用加性准则嵌入水印: $s'(x, y) = s(x, y) + \lambda \times \text{sequence}(x)$ 。当 $\text{watermark_arnold}(x, y) = 0$ 时, $\text{sequence}(x)$ 取 PN1 值, 记为 pn_sequence_zero ; 当 $\text{watermark_arnold}(x, y) = 1$ 时, $\text{sequence}(x)$ 取 PN2 值, 记为 pn_sequence_one , 得到新系数矩阵 $s'(x, y)$;

(4) 把得到新系数矩阵 $s'(x, y)$ 和相位矩阵系数 $p(x, y)$ 重组, 得到新的系数矩阵, 对该系数矩阵进行阶数为 $(-0.95, -0.95)$ 的分数阶傅里叶变换后, 再进行逆小波变换, 得到含水印载体图像。

水印的提取步骤如下。

(1) 首先对含水印载体图像进行小波变换, 提取系数矩阵 $HL2$ 。对系数矩阵 $HL2$ 进行分数阶傅里叶变换, 变换阶次为 $(0.95, 0.95)$, 得到幅度矩阵系数和相位矩阵系数, 然后对幅度部分进行 8×8 的离散余弦变换, 得到系数矩阵 $F(u, v)$ 。

(2) 提取水印方法为: 计算相关系数。

```
correlation(i) = corr2(pn_sequence_zero, sequence);
correlation1(i) = corr2(pn_sequence_one, sequence);
if( correlation1(i) < correlation(i) )
    watermark_arnold(i) = 0;
else
    watermark_arnold(i) = 1;
end
```

(3) 对 watermark_arnold 进行逆 Arnold 变换, 得到原始水印图像。

3 仿真实验分析

本文采用 MATLAB7.0 进行仿真, 载体图像为 512×512 的 lena 图像, 水印为 32×32 的二值图像。仿真结果如图 3 所示。

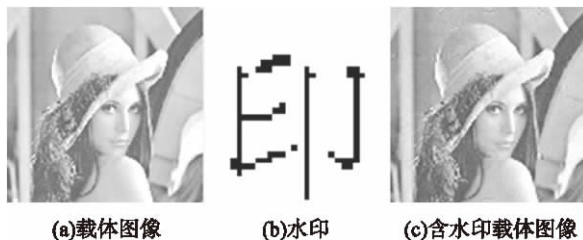


图 3 仿真实验结果

从图 3 可以看出, 原始载体图像 (a) 和含水印载体图像 (c), 这两个图像很难看出有什么不同, 因此该水印的不可见性非常好, 很好地实现了信息隐藏。为了能够更客观地评价水印算法, 分别用峰值信噪比 (Peak signal-to-noise ratio, PSNR) 和相关系数 (Normalized correlation, NC) 来衡量水印的好坏。

PSNR 是用来评价水印的不可见性, PSNR 值越高, 说明两图像之间的透明性就越好, PSNR 公式如下

$$PSNR = 10 \lg_{10} \left(\frac{255^2 \times M^2}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} (I(x, y) - I'(x, y))^2} \right) \quad (6)$$

NC 是用来衡量水印的鲁棒性, NC 系数值越大, 则说明提取出的水印与原始水印相似程度越大, NC 公式如下

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

为了研究算法的鲁棒性,对含水印载体图像分别进行了 JPEG 压缩、椒盐噪声、高斯噪声、高斯滤波、中值滤波、剪切常规攻击。图 4、表 1 和

表 2 的实验结果表明,该算法在上述 6 种常规攻击下,都能够提取出质量较好的水印,因此该算法具有很好的鲁棒性。

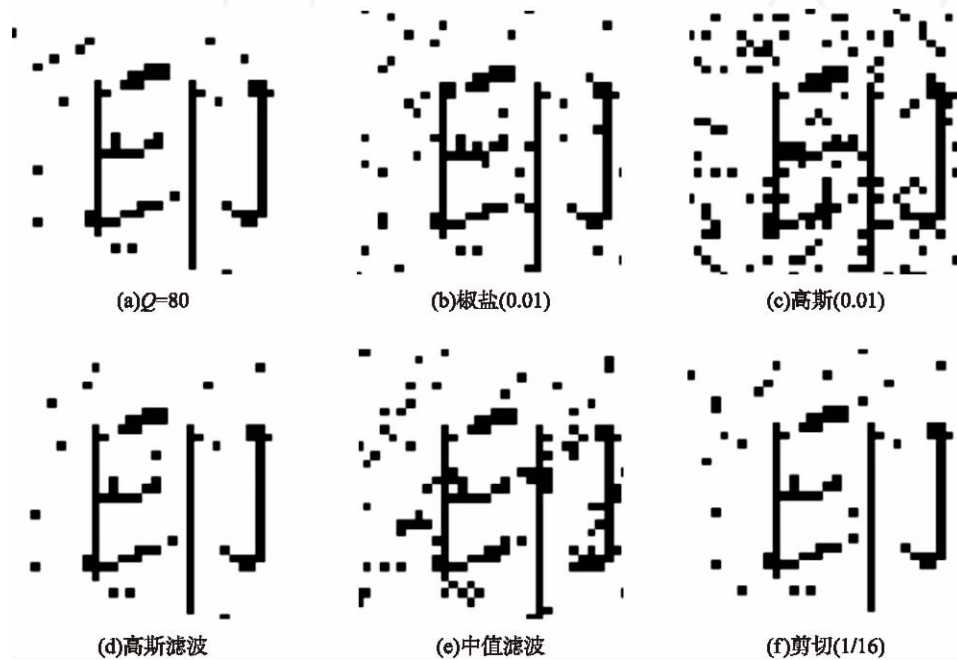


图 4 几种典型的常规攻击方式下检测出的水印

表 1 不同类型算法的 PSNR 测试结果

算法类型	FRFT	DCT-FRFT	DWT-FRFT	DST-FRFT	DCT-DWT-FRFT	DST-DWT-FRFT
PSNR/dB	11.1260	4.7654	38.5858	4.4766	38.6830	38.7679

表 2 不同类型算法在典型攻击下的 NC 测试结果

算法类型		FRFT	DCT-FRFT	DWT-FRFT	DST-FRFT	DCT-DWT-FRFT	DST-DWT-FRFT
不受攻击		0.8778	0.8306	0.8940	0.8463	0.8905	0.8889
JPEG 压缩	$Q=40$	0.8692	0.7840	0.8954	0.8237	0.8855	0.8786
	$Q=60$	0.8693	0.7774	0.8913	0.8170	0.8793	0.8732
椒盐噪声	$m=0.01$	0.8542	0.7805	0.8911	0.7863	0.8772	0.8547
	$m=0.02$	0.8390	0.7694	0.8779	0.7621	0.8656	0.8315
高斯噪声	$n=0.01$	0.8292	0.7528	0.8673	0.7367	0.8416	0.8223
	$n=0.02$	0.7863	0.7420	0.8508	0.7258	0.8160	0.7715
高斯滤波		0.8778	0.8306	0.8940	0.8463	0.8905	0.8889
中值滤波		0.6007	0.6603	0.8655	0.6425	0.8664	0.8320
旋转角度 1 度		0.8166	0.6899	0.6899	0.7019	0.6686	0.6440
剪切攻击	$cut=1/16$	0.8770	0.8306	0.8947	0.8479	0.8843	0.8848
	$cut=1/4$	0.8239	0.8305	0.8920	0.8441	0.8808	0.8854

4 结语

从图 1 可以看出,在没有密钥 T 的情况下,无

法正确提取出水印信息,因此 Arnold 变换提高了水印算法的安全性;通过 MATLAB 仿真,图 3 表明该算法可以很好的隐藏信息,此时 PSNR 值达到 38.683 dB,具有很好的不可见性。最后通过对

FRFT、DCT-FRFT、DWT-FRFT、DST-FRFT、DCT-DWT-FRFT、DST-DWT-FRFT 的鲁棒性测试,结果表明本算法对 JPEG 压缩、椒盐噪声、高斯噪声、高斯滤波、中值滤波、剪切常规攻击,具有很好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] Cox I J, Kilian J, Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [A]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12) : 1673-1687.
- [2] Cho Yongho, Ahn B, Kim Jae-Seok, et al. A study for watermark methods appropriate to medical images [J]. Journal of Digital Imaging, 2001, 14(1) : 891-895.
- [3] 黄继武, Shi Yun Q, 姚若河. 基于块分类的自适应图像水印算法 [J]. 中国图象图形学报, 1994, 4(8) : 640-643.
Huang Jiwu, Shi Yun Q, Yao Ruohu. Adaptive image digital watermarking algorithm based on HVS [J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4(8) : 640-643.
- [4] Podilchuk C T, Delp E J. Digital watermarking: algorithms and applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2001: 1367-1370.
- [5] Xu Z J, Wang Z Z, Lu Q. Research on image watermarking algorithm based on DCT [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 467-471.
- [6] 朱铨. 基于混沌理论与小波变换的图像加密方法研究 [D]. 东华大学信息科学技术学院, 2014: 679-683.
- [7] 李铭新. 基于小波变换的数字水印算法 [D]. 西北工业大学信息工程学院, 2013: 238-245.
- [8] 叶闯, 沈溢青, 李豪, 等. 基于人类视觉特性(HVS) 的离散小波变换(DWT) 数字水印算法 [J]. 浙江大学学报, 2013, 40(2) : 152-155, 165.
Ye Chuang, Shen Yiqing, Li Hao, et al. A DWT digital watermarking algorithm based on HVS [J]. Journal of Zhejiang University, 2013, 40(2) : 152-155, 165.
- [9] Jiang Wenbo, Zhou Dazhuo, He Liwei. Digital watermark algorithm against geometrical attacks based on DWT and DCT [A]. Proceedings of the Third International Symposium on Test Automation & Instrumentation [C]. Fuzhou, China: China Instrument Society, 2011(2) : 108-189.
- [10] Gu Tianming, Wang Yanjie, Changchun. DWT-based digital image watermarking algorithm [A]. Proceedings of IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments(ICEMI'2011) VOL. 03 [C]. Chengdu, China: Chinese Institute of Electronics, 2011: 301-302.
- [11] 张贞凯, 田雨波, 王建华. 分数傅立叶变换域的一种鲁棒性图像水印算法 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2009, 12(1) : 697-703.
Zhang Zhenkai, Tian Yubo, Wang Jianhua. A novel algorithm for watermarking in Fractional Fourier transform domain [J]. Jiansu University of Science and Technology, 2009, 12(1) : 697-703.
- [12] 邹露娟, 汪波, 冯久超. 一种基于混沌和分数阶傅里叶变换的数字水印算法 [J]. 物理学报, 2008(05) : 567-574.
Zou Lujuan, Wang Bo, Feng Jiuchao. A novel algorithm for watermarking in chaos and Fractional Fourier transform domain [J]. Journal of Physics, 2008(05) : 567-574.
- [13] Shi Jun, Zhang Naitong, Liu Xiaoping. A novel fractional wavelet transform and its applications [J]. Science China Information Sciences, 2012, 55(6) : 1117-1121.
- [14] 孔涛, 张亘. Arnold 反变换的一种新算法 [J]. 软件学报, 2004(10) : 32-36.
Zhang Tao, Zhang Shan. A new anti-arnold transformation algorithm [J]. Software Journal, 2004(10) : 32-36.