

文章编号: 2095-2163(2023)07-0015-05

中图分类号: TP301

文献标志码: A

# 基于改进离散小波变化的数字水印技术

彭荣杰, 黎龙珍

(黔南民族职业技术学院 大数据与电子商务系, 贵州 都匀 558000)

**摘要:** 离散小波变换的数字水印算法单一,且在鲁棒性、不可见性和安全性上较差,针对这一问题,本文在原有离散小波变化的基础上提出离散小波变换和分数阶傅里叶变换(DWT-FRFT)的数字水印算法。首先对载体图像进行离散小波变化,提取第三层小波系数,再结合分数阶傅里叶变换取其幅度系数进行水印信息嵌入,与其相位系数进行重组。该方法利用小波变换的多分辨率和分数阶傅里叶变换的频域特性,能更好地把水印信息嵌入在载体图像中。通过 Matlab 2018a 实验,证明该算法相对于传统离散小波变化,峰值信噪比(PSNR)和相关系数(NC)均是最优,可以有效地保证水印的鲁棒性、不可见性和安全性。为进一步提高数字水印版权保护技术提供了参考。

**关键词:** 数字水印; 离散小波变换; 分数阶傅里叶变换; Arnold 变换

## Digital watermarking technology based on improved discrete wavelet transform

PENG Rongjie, LI Longzhen

(Department of Big Data and E-commerce, Qiannan Ethnic Vocational and Technical College, Duyun Guizhou 558000, China)

**[Abstract]** The digital watermarking algorithm of discrete wavelet transform is single and has poor robustness, invisibility and security. To address this issue, this paper proposes a digital watermarking algorithm based on the original discrete wavelet transform and fractional Fourier transform (DWT-FRFT). Firstly, discrete wavelet transform is applied to the carrier image to extract the third layer wavelet coefficients. Then, the amplitude coefficients are combined with fractional Fourier transform to embed watermark information, and their phase coefficients are recombined. This method utilizes the multi resolution of wavelet transform and the frequency domain characteristics of fractional Fourier transform to better embed watermark information in carrier images. Through Matlab 2018a experiments, it is demonstrated that this algorithm has the best peak signal-to-noise ratio (PSNR) and correlation coefficient (NC) compared to traditional discrete wavelet changes, effectively ensuring the robustness, invisibility and security of the watermark. This research could provide the reference for further improving the copyright protection technology of digital watermarks.

**[Key words]** digital watermarking; discrete wavelet transform; fractional Fourier transform; Arnold transformation

## 0 引言

随着大数据技术的日益成熟,数字化扫描仪和数码相机等设备也在增多。人们已经可以轻松地在网上分享自己的资源,但在享受便利的同时,复制、分发、编辑和身份验证等问题也相继出现。尤其在新闻、设计、摄影和电子商务等领域较为突出,给图像创作者带来了难以评估的损失。为此,需要开发出一些解决方案来杜绝此类问题。目前,数字水印即已成为保护数字版权的有效方法。文献[1]基于离散小波变换(DWT)的算法即是当前的研究重点,

通常分为时域算法和频域算法。该算法可以平衡时域中水印信号的特征和频域中通过平移和缩放操作实现不同尺度的精细分析,从而可以更有效地提取信号的特征。文献[2]提出一种基于分数傅里叶变换(FRFT)的盲数字图像水印算法,这是普通傅立叶变换的推广,其输出具有信号的混合时间和频率分量。该算法不仅具有良好的不可感知性和安全性,而且对 JPEG 压缩噪声攻击和图像处理操作具有很强的鲁棒性,即使在复合攻击下也能提供保护。所以,本文提出离散小波变换和分数阶傅里叶变换(DWT-FRFT)的数字水印算法,尝试在保证高鲁棒

**基金项目:** 黔南民族职业技术学院院级科研项目(qnzyky-2022-05)。

**作者简介:** 彭荣杰(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:信号与信息处理、计算机应用技术;黎龙珍(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:大数据技术。

**通讯作者:** 彭荣杰 Email: 1642478840@qq.com

**收稿日期:** 2023-04-18

性的基础上提高水印的安全性。

## 1 数字水印相关技术

### 1.1 离散小波变换

在图像处理中,小波变换被应用于原始图像。多分解成4个频率部分,低频部分为 $LL$ ,高频部分为 $(LH,HL,HH)$ 是时频域的一种转换,具有多次度的特点。将数字图像系数 $A_0$ 进行小波分解,再将 $A_0$ 通过低通滤波器( $H$ )和高通滤波器( $G$ )后,采样得到低通系数( $A_{j+1}$ )和高通系数( $D_{j+1}$ ),公式如下<sup>[3-4]</sup>:

$$A_{j+1}(k) = \sum_n A_j(n)H(n-2k) \quad (1)$$

$$D_{j+1}(k) = \sum_n A_j(n)G(n-2k) \quad (2)$$

### 1.2 Arnold 变换

为了增强水印的鲁棒性和安全性,将水印嵌入数字图像之前,将使用 Arnold 加密算法对水印进行预处理。Arnold 变换是一种基于像素位移和矩阵变换相结合的加密技术,可以通过改变像素的位置或灰度值进行加密<sup>[5]</sup>,这样即使攻击者提取水印,也无法获得原始水印图像<sup>[6]</sup>。Arnold 变换公式定义如下<sup>[7]</sup>:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \bmod(N) \quad (3)$$

其中,  $(x_1, y_1)$  表示原始矩阵中像素点的坐标;  $(x_2, y_2)$  表示变换后像素的坐标;  $N$  是矩阵大小,逆 Arnold 变换通过式(4)来解密 Arnold 加密消息:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} \bmod(N) \quad (4)$$

### 1.3 分数阶傅里叶变换

分数阶傅里叶变换是空间域和频率域的组合,具有旋转和角度连续性的特点,因此被用在数字水印领域<sup>[8]</sup>。二维图像信号 $f(s,t)$ 的 $P$ 阶分数阶傅里叶变化为:

$$F_{(p_1,p_2)}(u,v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(s,t) K_{p_1,p_2}(x,t,u,v) dsdt \quad (5)$$

$$f(s,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F_{(p_1,p_2)}(u,v) K_{-p_1,-p_2}(x,t,u,v) dudv \quad (6)$$

其中,

$$K_{(p_1,p_2)}(x,t,u,v) = K_{p_1}(s,u) \times K_{p_2}(t,v) \quad (7)$$

$$K_{p_1}(s,u) = \sqrt{\frac{1 - j \cot \theta}{2\pi}} e^{\frac{j(s_2^+ u_2)}{2 \tan \theta} - \frac{j s u}{\sin \theta}} \quad (8)$$

$$K_{p_2}(s,u) = \sqrt{\frac{1 - j \cot \beta}{2\pi}} e^{\frac{j(t_2^+ u_2)}{2 \tan \beta} - \frac{j t u}{\sin \beta}} \quad (9)$$

式(8)~式(9)中,  $\theta = p\pi/2, \beta = p\pi/2$  表示二维 FRFT 信号的旋转角度,  $p_1$  和  $p_2$  为变换阶数,在  $(0, 1)$  上提取,具有时频域的双重特性,并且能够描述2个域的信息。在分数阶傅里叶域中嵌入水印,可以共享空间域和变换域水印技术的特性。将水印嵌入到信号混合时频分量的中间带,不仅保证了水印的良好不可感知性,而且可以提供很好的保护,防止来自空间域和频率域的攻击。

## 2 水印嵌入和提取过程

### 2.1 水印嵌入

水印嵌入框架流程如图1所示。由图1可知,步骤如下:

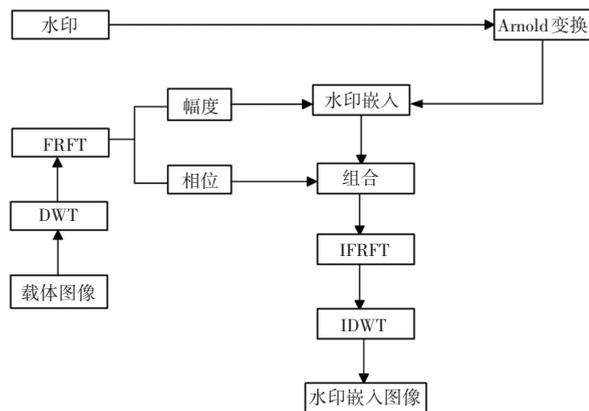


图1 水印嵌入框图

Fig. 1 Watermark embedding block diagram

(1) 对水印图像进行二值化处理,对二值化后的水印图像进行 Arnold 变换处理,得到  $I_{Arnold}(x, y)$ 。

(2) 对载体图像进行小波变换,提取第一层小波系数  $HL1$ ,再对  $HL1$  进行小波变换,提取第二层小波系数  $HL2$ ,对  $HL2$  进行小波变换,提取第三层小波系数  $HL3$ ,再对其系数矩阵进行分数阶傅里叶变换,变换阶次为  $(0.9, 0.9)$ ,得到幅度矩阵  $A1$ ,相位矩阵  $B1$ 。

(3) 用随机信号生成器生成2个不同的序列  $PN1$  和  $PN2$ ,利用加性准则嵌入水印<sup>[9-10]</sup>,推得的数学公式具体如下:

$$I_w(x,y) = A_1 + k + sequence(x) \quad (10)$$

当  $I_{Arnold}(x,y) = 0$ ,  $sequence(x)$  取  $PN1$ ,记为  $PN1\_sequence\_0$ 。当  $I_{Arnold}(x,y) = 1$ ,  $sequence(x)$  取  $PN2$ ,记为  $PN2\_sequence\_1$ ,得到新的幅度矩阵  $A'1$ 。

(4) 得到新的幅度矩阵  $A'1$  和相位矩阵  $B1$  进行重组, 得到新的重组矩阵, 对重组矩阵进行  $(-0.9, -0.9)$  分数阶傅里叶变换, 再进行逆小波变换, 最后得到水印嵌入图像。

### 2.2 水印提取

该方法的水印提取过程不需要任何原始图像, 属于盲水印算法, 提取步骤如下:

(1) 对嵌入水印的图像进行小波变换, 提取第三层小波系数  $HL2$ , 对第三层小波系数  $HL2$  进行分数阶傅里叶变换, 得到幅度矩阵和相位矩阵, 选择幅度矩阵。

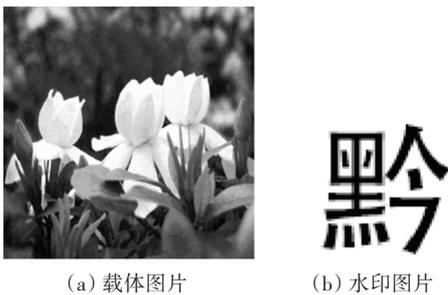
(2) 用相关系数的方法提取水印, 公式如下:

$$\begin{aligned} correlation(i) &= corr2(pn\_sequence\_0, sequence); \\ correlation1(i) &= corr2(pn\_sequence\_1, sequence); \\ I_{Arnold}(x, y) &= \begin{cases} 1 & \text{if } correlation1(i) \geq correlation(i) \\ 0 & \text{if } correlation1(i) < correlation(i) \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

(3) 对  $I_{Arnold}(x, y)$  进行逆 Arnold 变换, 得到原始水印图像。

## 3 实验与分析

为了验证本文算法的有效性, 本文利用 Matlab2018a 进行实验仿真, 选取  $1024 \times 1024$  的载体图像, 水印为  $32 \times 32$  的二值图像。本文中, 研发得到的载体图片和水印图片如图 2 所示。



(a) 载体图片 (b) 水印图片

图 2 本文的载体图片和水印图片

Fig. 2 The carrier image and watermark image of this article

### 3.1 不可感知性测试

为了描述水印图像的不可感知性<sup>[11]</sup>, 本文采用峰值信噪比(Peak Signal To Noise Ration,  $PSNR$ ) 来判断载体图像和水印图像的相似程度。定义公式见如下:

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} [H(x, y) - H'(x, y)]^2} \quad (12)$$

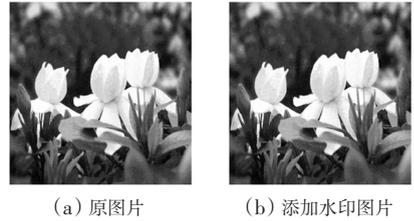
其中,  $H(x, y)$  为载体图像,  $H'(x, y)$  为水印图像。  $PSNR$  值越大, 表明相似程度越好, 水印图像的

不可感知性越好。本文算法和传统算法所得结果进行对比, 见表 1。实验仿真结果如图 3 所示。

表 1 不同算法下  $PSNR$  结果

Tab. 1  $PSNR$  results under different algorithms

算法	$PSNR / \text{dB}$
DWT	40.321 5
FRFT	50.369 2
本文算法(DWT-FRFT)	60.134 6



(a) 原图片 (b) 添加水印图片

图 3 实验仿真结果

Fig. 3 Experimental simulation results

从实验仿真结果分析, 本文算法添加水印的图片和原图片的不可感知性最好, 从客观的数据分析可知, 本文算法的  $PSNR$  值最大, 不可感知性最优。

### 3.2 鲁棒性测试

为了客观描述文本算法的鲁棒性, 采用归一化相关系数 ( $NC$ ) 来评价, 公式如下<sup>[12-13]</sup>:

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{i=0}^{X-1} \sum_{j=0}^{Y-1} W(i, j) W'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{X-1} \sum_{j=0}^{Y-1} W(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{X-1} \sum_{j=0}^{Y-1} W'(i, j)^2}} \quad (13)$$

其中,  $W(i, j)$  为嵌入的水印图像,  $W'(i, j)$  为提取的水印图像。未受攻击的水印图像和未受攻击未提取的水印图像如图 4 所示。



(a) 未受攻击的水印图像 (b) 未受攻击提取的水印图像

图 4 未攻击的水印图像和未攻击提取的水印图像

Fig. 4 Unattacked watermark image and unattacked extracted watermark image

对图像进行滤波、放大、椒盐噪声、剪切、旋转、JPEG 压缩等操作, 实验结果如图 5 所示。



图5 各种攻击下的水印图像和各种攻击后提取的水印图像

Fig. 5 Watermark images under various attacks and extracted watermark images after various attacks

从图像效果来看,本文对滤波、抗噪声、放大、椒盐噪声、剪切、旋转、JPEG 压缩等攻击都有一定的作用。其中,抗 JPEG 压缩攻击方法鲁棒性最好,能完全正确地识别出水印图像,对剪切攻击方法鲁棒性最弱,但能大致提取出水印图像。

为了定量描述本文算法的性能,对水印图像采用不同攻击,攻击后进行水印提取,比较其  $NC$  值,结果见表 2。

表 2 攻击下不同算法的  $NC$  结果Tab. 2  $NC$  results of different algorithms under attack

攻击内容	算法		本文算法 (DWT-FRFT)
	DWT	FRFT	
不攻击	0.800 00	0.766 23	0.999 93
滤波	0.710 63	0.557 10	0.902 57
椒盐噪声	0.772 31	0.621 44	0.979 46
放大	0.721 56	0.733 10	0.944 77
剪切	0.566 62	0.461 12	0.894 56
旋转	0.552 34	0.451 43	0.895 57
JPEG 压缩	0.781 61	0.705 26	0.989 32

通过比较可知,本文算法在滤波、椒盐噪声、放大、剪切、旋转、JPEG 压缩等不同攻击下,与 DWT、FRFT 算法相比, $NC$  值最优,鲁棒性更强。

## 4 结束语

面对日益严重的数字版权保护问题,用于版权保护的技术也应得到加强。本文对 DWT 算法进行改进,提出 DWT-FRFT 算法,该算法利用小波变换的多分辨率和分数阶傅里叶变换的频域特性,能更好地把水印信息嵌入在载体图像中,保证了数字水印的鲁棒性、不可见性,也提高了数字水印版权的安全性。就文件类型而言,本文仅对数字图像进行了版权保护。将来,可以扩展到音频、视频等多媒体文件类型,形成多种类型的版权管理方法。

## 参考文献

- [1] KUMAR R, SINGH S, SAHARAN R. A secure non-blind block based digital image watermarking technique using DWT and DCT [C]// International Conference on Advances in Computing. Kochi, India :IEEE, 2015:2042-2048. (下转第 26 页)