

一种曲波域鲁棒数字图像水印算法

宋依青

(常州工学院 计算机信息工程学院,江苏 常州 213002)

摘 要: 提出了一种数字图像水印算法基于特殊选择的傅里叶采样卷绕的快速离散曲波变换. 利用 Arnold 变换对水印信号进行置乱加密,将置乱后的信号进行多次重复来增加冗余度. 按照曲波系数分布的特点,选择合适的尺度和系数对水印信号进行嵌入. 实验结果表明,该算法对 JPEG、加噪、滤波等图像处理具有好的鲁棒性,同时具有好的不可见性.

关键词: 数字图像水印;曲波变换;鲁棒性;不可见性

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)12-0103-04

A Robust Digital Image Watermarking Scheme Based on Curvelet

SONG yi-qing

(College of Computer&Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: This paper proposed a digital image watermarking scheme based on Curvelet transform. Wrapping of specially selected Fourier samples is employed to implement Fast Discrete Curvelet Transform to transform the digital image to curvelet domain. First, use Arnold transform to encrypt the watermark. Then, repeat the cryptographic code many times to form a new code to creat the redundant data. Fianally, the proper position to embed the mark are chosen accoding to the characteristic of curvelet coefficients. The experiment results show that the scheme is robust to common image processing including JPEG compression, adding nosie, cut, Gaussion lowpass filter, Brighter Filter, Darker Filter, Increase/Decrease Contrast. Also the scheme has good invisibility.

Key words: digital image watermarking; curvelet transform; robust; invisibility

1 引言

近年来,数字水印技术作为保护多媒体信息安全的一种非常有效的手段而引起研究者的广泛关注. 数字图像水印技术根据嵌入方式的不同可以分为:空间域水印嵌入技术和变换域水印嵌入技术. 目前,大部分水印技术都在变换域中实现^[1-5],一方面变换域方法对图像压缩、滤波和噪声等有一定的鲁棒性^[9-11];另一方面变换域水印方法能够更好地结合人类视觉特征,具有较好的不可见性. 常见的变换方法有傅里叶变换(Fourier Transform)、离散余弦变换(DCT)和小波变换(DWT). 随着图像多尺度几何分析的发展,相继出现了脊波(Ridgelet)变换、曲波(Curvelet)变换、轮廓波(Contourlet)变换,梳状

波(Brushlet)变换等,逐步实现对图像的稀疏逼近.

小波变换在表现一维‘点奇异’的信号时,具有很好的性质. 在二维图像处理中,一般的边缘是曲线而不是直线,二维小波是一维小波的张量积,这样的二维小波变换系数中的极大值只能反映出这个小波系数的位置是“过边缘”的,而不是“沿边缘”的,即不能准确地表示图像中的曲线边缘. 针对小波变换的缺点,1999 年, Candès 和 Donoho 提出了曲波变换理论^[6,12]. 由于曲波变换是各向异性的,并且具有很强的方向性,结合了脊波变换擅长表示直线特征和小波变换适合表示点状奇异性的特点,能够对曲线奇异性的目标进行“稀疏”表示和具有很高的逼近精度.

本文提出了一种基于快速离散曲波变换的鲁棒

水印算法. 首先利用 Arnold 变换置乱水印信号, 提高系统的安全性. 然后, 对置乱的水印信号进行多次重复来增加冗余度, 最后按照一定的门限范围在载体图像曲波变换的中高频系数中选择位置来嵌入水印图像. 实验结果表明, 算法具有很好的不可见性, 并且对 JPEG 压缩、加噪、剪切、增加/降低对比度、变亮/变暗、滤波等图像处理有较好的鲁棒性.

2 波变换及实现方法

2.1 曲波变换

曲波系数 $c(j, l, k)$ 定义如下:

$$c(j, l, k) = (f, \varphi_{j, l, k}) \quad (1)$$

式中, $j = 0, 1, 2, \dots$, 是尺度参量; $l = 0, 1, 2, \dots$, 是方向参量; $k = (k_1, k_2) \in Z^2$ 是位移参量. 令母 Curvelet 为 $\varphi_j(x)$, 其傅里叶变换为 $\varphi_j(\omega) = U_j(\omega)$, U_j 是傅里叶频域的频率窗, 定义为

$$U_j(r, \theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j}r) V(\frac{2\lfloor j/2 \rfloor \theta}{2\pi}) \quad (2)$$

W 和 V 分别是“半径窗”和“角窗”. 定义尺度为 2^{-j} , 方向角为 θ_l , 位置为 $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_l}^{-1}(k_1 \times 2^{-j}, k_2 \times 2^{-j})$ 的 Curvelet 为

$$\varphi_{j, l, k}(x) = \varphi_j[R_{\theta_l}(x - x_k^{(j,l)})] \quad (3)$$

式中, $\theta_l = 2\pi \cdot 2^{\lfloor j/2 \rfloor} \cdot l, l = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq \theta_l \leq 2\pi$, R_{θ_l} 是经过方向角 θ_l 的旋转.

2.2 曲波变换的实现方法

2005 年 Candès 和 Donoho 提出了快速曲波变换 (Fast Discrete Curvelet Transform, FDCT) 的两种实现方法^[7], FDCT 完全脱离了脊波变换, 直接在频域定义, 在保留第一代曲波变换各项异性尺度关系的基础上, 使曲波变换简化. FDCT 的实现方法有两种, 分别是基于非均匀快速傅里叶变换 (unequally-spaced fast Fourier transform) 和基于特殊选择的傅里叶采样的卷绕 (Wrapping of specially selected Fourier samples, FDCT-Wrapping). 由于 Wrapping 变换的方法比 USFFT 更加简单, 而且变换速度快, 所以本文选择 FDCT-Wrapping 对载体图像进行曲波变换.

3 数字水印算法

水印的嵌入位置直接影响到水印的鲁棒性. Cox 等^[8] 提出, 水印应该嵌入在人类视觉系统感觉重要的分量上. 感觉重要的分量是图像信号的重要成分, 携带了大部分的信号能量, 并且在有一定失真 的情况下仍能保留. 图像信号在经过曲波变换后, 低

频, 中高频和高频位于不同的尺度层, 所以, 为了兼顾水印的不可见性和鲁棒性, 选择把水印嵌入在中高频尺度层的一层中.

3.1 水印选择和处理

选择能反映相应版权信息的二值图像作为水印信号. 为了增加水印系统的安全性, 需要对水印信号进行加密, 由于 Arnold 变换^[9] 简单而且具有周期性, 被广泛应用于各类数字水印算法中. Arnold 是 VL Arnold 在遍历理论研究中提出的一种变换. 对于大小为 $N \times N$ 的数字图像, 二维 Arnold 变换定义为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \bmod N \quad (4)$$

式中, (x, y) 是原始图像中像素点的坐标, (x', y') 是 (x, y) 经过 Arnold 变换后的坐标. 为了增加系统的安全性, 算法采用 Arnold 变换对水印信号进行置乱加密.

3.2 水印嵌入

水印的嵌入过程是由以下 6 步组成:

(1) 对原始图像 X 进行基于 Wrapping 的快速曲波变换得到曲波系数 C .

(2) 将二维二值图像水印信号 W 进行 n 次 Arnold 变换, 得到置乱后的水印图像 W' , 将 W' 转换成一位的水印序列 $W_1(k), k = 1, 2, \dots, m \times n$, $[m, n]$ 是水印图像的大小.

(3) 将 $W_1(k)$ 重复 11 次得到水印序列 W_2 , 以便增加水印信号的冗余性, 增加鲁棒性.

(4) 选择嵌入位置. 在 L 和 H 以及 $-L$ 和 $-H$ 之间的系数作为水印嵌入的位置. L 和 H 的选取根据选择的嵌入水印的尺度和水印信号的大小.

(5) 对于符合嵌入条件的系数按照以下规则进行修改:

$$c'(j, l, k) = \begin{cases} c(j, l, k) * (-\alpha), & \text{if } c(j, l, k) > 0 \text{ and } w = 0 \\ c(j, l, k) * (\alpha), & \text{if } c(j, l, k) \leq 0 \text{ and } w = 0 \\ c(j, l, k) * (\alpha), & \text{if } c(j, l, k) > 0 \text{ and } w = 1 \\ c(j, l, k) * (-\alpha), & \text{if } c(j, l, k) \leq 0 \text{ and } w = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, α 为嵌入强度因子.

(6) 对修改后的系数 C' 进行逆曲波变换得到含水印图像 X' .

3.3 水印提取

算法在进行水印的提取时, 需要原始图像与含水印图像, 因此属于半盲水印检测. 水印检测的过程如下:

(1) 对原始图像 X 和含水印图像 X' 进行基于

wrapping 的快速离散曲波变换得到 C 和 C' .

(2) 在 C 中按照嵌入过程中步骤(4) 来选择嵌入水印的系数位置,然后按照这些位置在 C' 中提取水印信号.

(3) 按照以下规则提取水印信号 w_i .

$$W_i = \begin{cases} 1, & \text{if } c'(j,l,k) > \beta \\ 0, & \text{if } c'(j,l,k) \leq \beta \end{cases} \quad (6)$$

式中, β 为提取因子.

(4) 将提取出的水印序列分为 11 个序列,然后将相同位置的水印位相加成一个序列,比较该序列中每一位与 $11/2$ 的大小关系,提取正确的水印信息.

(5) 将最终提取出的水印序列进行 $T - n$ 次 Arnold 变换(T 为水印图像 Arnold 变换的周期) 得到水印图像 Emark.

4 实验结果

原始载体图像选择 Lena $512 \times 512 \times 8$ bit 的标准亮度测试图像(图 1),水印采用 32×32 的二值图像(图 2). 对 512×512 的原始载体图像做曲波变换得到的曲波系数分为六个尺度,实验中选择尺度 5 作为水印嵌入的尺度层. 下面是在 $L = 1.7, H = 2.0, a = 8$ 时 得到的实验结果.



图 1 原始载体图像



图2 水印图像

4.1 不可见性测试

采用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ration, PSNR)衡量含水印图像的质量. 含水印图像如图 3 所示.



图 3 含水印图像

主观上,图 3 所示含水印图像与图 1 原始载体图像无视觉上的差异,由计算得 $PSNR = 46.1100$ dB 保真度很好,所以算法具有很好的不可见性.

4.2 鲁棒性测试

用归一化相关系数(Normalized Correlation Coefficient, NC)判断提取出水印与原始水印的相似程度. 表 1 中列出了在各种攻击下提取出的水印图像以及他们与原始水印图像的相似度,可以看出,本文算法对 JPEG 压缩、加噪、剪切、滤波、变暗、变亮、增加对比度等攻击均具有很好的鲁棒性. 当压缩比 $Q = 15\%$ 时,提取出的水印仍然可辨. 由于将水印图像置乱并且冗余的嵌入到了原始载体图像中,所以即使对图像进行边缘,中心,甚至进行 $1/2$ 的剪切时仍能很好的提取出水印图像.

表 1 在各种攻击下提取出的水印图像以及它们与原始水印图像的相似度

	攻击类型	PSNR/dB	提取出的 水印图像	NC 值
JPEG 压缩	无攻击	46.1100	数字 水印	1.000 0
	$Q=90\%$	41.340 9	数字 水印	0.993 4
	$Q=60\%$	39.098 5	数字 水印	0.938 9
	$Q=15\%$	32.479 6	数字 水印	0.840 8
剪切	11/4 左上角	10.709 0	数字 水印	0.988 2
	1/4 左上角	7.3 205	数字 水印	0.915 8
	1/4 右下角		数字 水印	
	1/4 中心	11.564 5	数字 水印	0.985 5
	周围	7.968 2	数字 水印	0.930 3

续表 1

攻击类型	PSNR/dB	提取出的 水印图像	NC 值
高斯噪声(0.01)	19.434 9		0.710 5
椒盐噪声(0.01)	25.020 4		0.876 3
高斯低通滤波 1.5(3)	32.343 5		0.968 4
高斯低通滤波 1.5(5)	29.871 7		0.902 6
变亮[0.3,1]	15.909 2		1.000 0
变暗[0,0.6]	12.562 7		0.998 7
增加对比度	10.753 4		0.927 6
减小对比度	18.811 2		1.000 0

4.3 与其他算法的性能比较

为了验证本文算法的有效性,将本文算法与文献[5]中介绍的算法相比较,如表 2 所示.在相同程度的攻击下,本文算法提取出的水印相似度明显高于文献[5]的算法.

表 2 本文算法与文献[5]算法鲁棒性测试比较

攻击类型	NC 值	
	本文算法	文献[5]算法
无攻击	46.110 0	0.906 3
JPEG(Q=15%)	0.840 8	0.820 6
剪切周围	0.930 3	0.504 0
加噪	0.727 6	0.520 0
低通滤波	0.968 4	0.754 0

5 结束语

本文提出了一种基于曲波变换的数字图像水印算法,算法能够在保证嵌入水印的图像有较高的保真度的情况下,有效的抵抗 JPEG 压缩、滤波、加噪、裁剪等攻击.与文献[3-5]算法相比本文算法性能更加优越.由于本文算法需要根据一定的范围选定水印嵌入位置,所以在提取的时候需要原始载体图像,不属于盲检测.下一步的工作是研究可以盲提取的基于曲波变换的数字水印算法.数字水印技术要求把水印信息嵌入在视觉重要的系数中,曲波变换对线状奇异性的稀疏能准确的捕获图像局域视觉上的重要信息,因此曲波域数字水印技术是值得深入研究的.

参考文献:

[1] 何泉,王瑞卿,王彦敏. 分数傅里叶域图像数字水印方案[J]. 计算机工程与设计,2006,27(24):4642—4644.
[2] 张玉金,蒋品群. 基于离散余弦变换和 Arnold 变换的数字水印算法[J]. 广西师范大学学报:自然科学版,2009,

27(1):13—16.
[3] 阳婷婷,李峰. 一种基于多小波变换的数字图像水印算法[J]. 计算机工程及应用,2007,43(30):111—115
[4] 胡裕峰,朱善安. 基于脊波变换的量化水印算法[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(11):2017—2022
[5] Thai Duy Hien, Kazuyoshi Miyara, Yen Chen, et al. Curvelet transform based logo watermarking[J]. Innovative Algorithms and Techniques in Automation. Industrial Electronics and Telecommunication, 2007: 305—309
[6] Candès E J, Donoho D L. (2000) Curvelets: a surprisingly effective nonadaptive representation of objects with edges [C]// In Curve and Surface Fitting: Saint—Malo 1999 Albert Cohen, Nashville, TN: Vanderbilt University Press, 2008:1—10
[7] Candès E J, Demanet L, Donoho D L, et al. Fast discrete curvelet transforms [J]. Applied and Computational Mathematics California Institute of Technology, 2005: 1—43
[8] Cox J, Killian J, Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing,1997,6(12):1673—1687.
[9] 丁玮,阎伟齐,齐东旭. 基于 Arnold 变换的数字图像置乱技术[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2001, 13(4): 338—341
[10] 曾高荣,裘正定. 数字水印的鲁棒性评测模型[J]. 物理学报,2010(8):5871—5879.
[11] 黄良永,肖德贵. 认证水印中实现篡改恢复的置乱技术研究[J]. 计算机工程与设计,2010,31(15):3360—3366
[12] 安虎,李怡璇、徐力,等. 基于曲波变换的彩色图像零水印研究[J]. 电子测量技术,2010(2):45—48.

作者简介:

宋依青 男,(1960—),硕士研究生,副教授.研究方向为电子信息与通信系统.