

A New Robust Watermarking Algorithm

Lingxiao Guo, Xuan Wang

School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an Shaanxi
Email: 307386919@qq.com

Received: Apr. 24th, 2015; accepted: May 8th, 2015; published: May 14th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper presents a new robust digital watermarking algorithm based on Radon transform, discrete wavelet transform (DWT) and block singular value decomposition (SVD). This algorithm uses the properties of the Radon transform, wavelet transform and singular value, and needs to be done in five steps: firstly, making the Radon transform of the original image; secondly, doing discrete wavelet transform (DWT) of the resulting image; thirdly, taking the high-frequency sub-band divided into blocks; fourthly, doing singular value decomposition (SVD) for every block; finally, selecting each largest singular value to embed the watermark information by the quantization method. The algorithm is a blind watermarking algorithm, because we can detect and extract the watermark information without the original image. The simulation results show that the method has good robustness not only for the rotation, scaling, translation and other attacks, but also for ordinary adding noise, filtering, and JPEG compression attack.

Keywords

Radon Transform, Discrete Wavelet Transform, Singular Value Decomposition, Blind Watermarking, Robustness

一种新的鲁棒性水印算法

郭凌霄, 王 暄

陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安
Email: 307386919@qq.com

收稿日期: 2015年4月24日; 录用日期: 2015年5月8日; 发布日期: 2015年5月14日

摘要

本文提出了一种新的基于Radon变换、离散小波变换(DWT)与分块奇异值分解(SVD)相结合的数字图像水印算法。该算法利用Radon变换、小波变换和矩阵奇异值本身的特性,将原始图像进行Radon变换,然后将变换之后的图像作小波分解并将小波分解得到的高频子带进行分块,对每一块进行奇异值分解后,选取每块中最大的奇异值通过量化的方法嵌入水印信息。水印的检测和提取不需要原始图像。经过仿真实验证明,该方法对于旋转,缩放,平移等攻击具有很好鲁棒性的同时,对于普通的加噪,滤波, JPEG 压缩攻击也具有很好的鲁棒性。

关键词

Radon变换, 离散小波变换, 奇异值分解, 盲水印, 鲁棒性

1. 引言

随着数字多媒体技术的不断发展和广泛应用,版权保护已成为目前迫切需要解决的问题,数字水印技术的出现为图像认证、防篡改和版权保护提供了重要的手段,已成为信息安全和数字图像处理领域研究的热点。而到了二十世纪末及二十一世纪初的时候,网络技术取得了更大的发展,在网络技术的影响下,数字多媒体技术蓬勃发展,传统意义上的相片、音频、视频被数字相片、音频、视频这些数字多媒体所取代[1]。近年来数字水印技术发展迅速,目前已有大量不同的算法水印算法。按照水印嵌入的位置不同分为空间域和频率域两大类,空域水印算法的鲁棒性较差而变换域方法通常都具有很好的不可见性和鲁棒性,所以大部分数字水印算法主要集中在变换域[2]。目前的变换域数字水印技术大多数是基于离散余弦变换(DCT)、傅里叶变换(FFT)、小波变换(DWT)等。而现有的大多数变换域数字水印算法,对于普通的加噪,滤波, JPEG 压缩等一些列攻击具有较好的鲁棒性,但对于旋转和尺度变换这样的攻击效果却不是理想。本文解决的问题就是不但可以实现水印的盲检测和盲提取,而且对于普通的攻击和旋转、尺度变换等操作都具有很好的鲁棒性。

本文提出了一种新的基于 Radon 变换、离散小波变换(DWT)与分块奇异值分解(SVD)相结合的数字图像水印算法,在水印的检测与提取过程中不需要原始载体图像,更加利于实际中的应用。实验结果证明,该方法具有较好的不可见性,对常见的图像处理具有良好的鲁棒性。

1.1. Radon 变换

1.1.1. Radon 变换的定义

一个函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换是该函数沿包含该函数的平面内的一族直线的线积分[2],如式(1)所示

$$R\{f(x, y)\} = \iint f(x, y) * \delta(t - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy = p_{\theta}(t) \quad (1)$$

式(1)中 $|t|$ 代表沿着直线上的距离,可以表示为 $t = x \cos \theta + y \sin \theta$,沿着一系列平行线(投影线的积分)就组成了投影 $p_{\theta}(t)$,所有的投影组成的集合 $\{p_{\theta}, \theta \in [0, \pi]\}$,就是 Radon 变换或者称为 X 射线断层投影。

Radon 变换的投影如图 1 所示。

1.1.2. Radon 变换的性质

对于图像的几何变换如平移比例以及旋转变换时, Radon 变换具有如下性质:

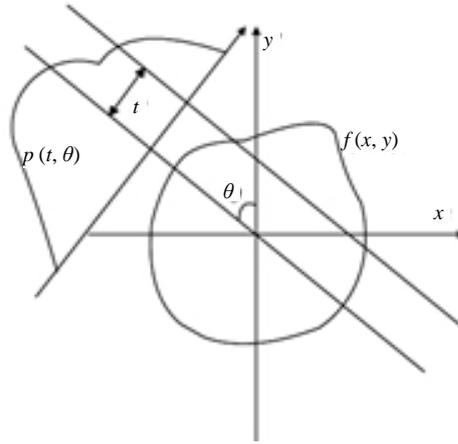


Figure 1. Radon transform of the image
图 1. 图像的 Radon 变换

1) 平移性质

原函数 $f(x, y)$ 产生平移因子为 (x_0, y_0) 的平移生成的新函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换是原函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换 $p(r, \theta)$ 沿 r 轴的平移, 平移值为 $t_0 = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta$,

$$\text{即 } R(r, \theta)\{f(x - x_0, y - y_0)\} = p(r - t_0, \theta) \quad (2)$$

2) 旋转性质

原函数 $f(x, y)$ 围绕图像中心旋转 ϕ 度产生的新函数的 Radon 变换是原函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换 $p(r, \theta)$ 沿 θ 轴的循环平移, 其平移的值为旋转角度 ϕ ,

$$\text{即 } R\{f_\phi(x, y)\} = p(r, \theta + \phi) \quad (3)$$

3) 尺度变换性质

当 $f(x, y)$ 发生因子为 $\lambda (\lambda \neq 0)$ 的尺度变换, 表示为 $f(x/\lambda, y/\lambda)$, 其对应的 Radon 变换为 $\lambda p(r/\lambda, \theta)$,

$$\text{即 } R(r, \theta)\{f(x/\lambda, y/\lambda)\} = \lambda p(r/\lambda, \theta) \quad (4)$$

1.2. 奇异值分解(SVD)

1.2.1. 从矩阵角度分析奇异值

从矩阵论的角度分析, 一幅数字图像可以看作是一个非负矩阵。用 $A \in R^{m \times r}$ 来表示一个图像矩阵。其中 R 实数域值。 A 经过奇异值分解后可以表示为

$$A = USV^T \quad (5)$$

其中 U 和 V 均为正交矩阵, S 是一个非对角线上的项都是 0 的矩阵, 其对角线上的元素满足:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq \sigma_{n+1} = \dots = 0 \quad (6)$$

其中 n 是 A 的秩, 它等于非零奇异值的个数, 于是有:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix}$$

σ_i 是 A 的奇异值, 由该分解唯一确定的。它是 AA^T 特征值的平方根。分解式 USV^T 称为 A 的奇异值分解。

因为

$$AA^T = USV^T VS^T U^T = USS^T U^T \quad (7)$$

$$A^T A = VS^T U^T USV^T = VS^T SV^T \quad (8)$$

所以 U 的列向量是 AA^T 的特征向量； V 的列向量是 AA^T 的特征向量，并且它们所对应的特征值都是 A 的奇异值的平方。

1.2.2. 从图像处理的角度分析奇异值

从图像的角度看，奇异值分解有如下特性[3]：

- 1) 奇异值分解对所要进行变换的矩阵大小没什么限制，可以是方阵也可以是长矩阵。
- 2) 一幅图像的奇异值有很好的稳定性，这意味着当图像受到轻微扰动时，它的奇异值不会发生剧烈的改变。
- 3) 奇异值能够表现出图像的内在代数特性而不是视觉特性，反映的是图像矩阵元素之间的关系。所以可以利用奇异值的特性，提高水印的鲁棒性[4]。

2. 水印嵌入和提取

基于奇异值分解的数字水印算法，目前绝大多数采用的是根据 $\lambda_0^* = \lambda_0 + \alpha_0 \lambda_w$ 这一公式来对数字图像的奇异值进行修改，以此来嵌入水印图像。根据 $\lambda_0^{w*} = \frac{\lambda_0^* - \lambda_w}{\alpha_0}$ 公式来提取水印图像。但是这种算法在提

取和检测水印的时候需要用到原图像的奇异值，所以不能实现盲水印的检测。而本文提出的算法，是先将图像进行分块，然后对分块之后的图像进行奇异值分解，最后通过更改第一个奇异值来嵌入水印。这样，不但能利用 Radon 变换的平移不变性和旋转归一化以及可逆的特性，将图像在 Radon 变换域中进行处理。这样保证了图像受到平移、旋转这样的几何攻击也可以保证其很好的鲁棒性。而且采用分块技术，即不直接整体进行奇异值分解(SVD)，而是分块之后将所得的块进行变换，然后嵌入水印，以此来得到嵌入水印的图像。因为这种方法是对图像分块后进行 SVD 分解，所以没有计算整幅图像矩阵的奇异值，因此当水印进行嵌入以及提取检测时，就会缩短大量的时间。

2.1. 水印嵌入算法

下面以 512×512 的 256 级灰度 Lena 图像作为载体图像， 32×32 的图像作为水印图像来说明水印的嵌入过程。步骤如下：

- 1) 对大小为 512×512 的 Lena 图像进行 Radon 变化，得到变换之后的图像。
- 2) 对变换之后的图像进行一级离散小波分解得到四个子带：低频子带、水平细节子带、垂直细节子带、对角线细节子带。
- 3) 对高频子带 HH1 进行分块成 4×4 的块，然后对分成的 1024 块进行奇异值分解，得到 1024 个奇异矩阵 S_i ，并且每一个 S_i 中的 σ_i 会按照降序排列。
- 4) 取每个 S_i 矩阵的 $S_i(1,1)$ ，按照如下方式进行更改：

$$\text{令 } z = \text{mod}(a, q)$$
 如果 $W(i, j) = 1$
 那么当 $z < q/4$ 时， $\sigma'_1 = \sigma_1 - z - q/4$
 当 $z \geq q/4$ 时， $\sigma'_1 = \sigma_1 - z + 3q/4$
 如果 $W(i, j) \neq 1$

那么当 $z < 3q/4$ 时, $\sigma'_i = \sigma_i - z + q/4$

当 $z \geq 3q/4$ 时, $\sigma'_i = \sigma_i - z + 5q/4$

5) 重复 4) 直到嵌入所有的水印信息, 然后进行小波的逆变换和 Radon 反变换得到嵌入水印之后的图像, 控制图像的大小与原图像相同。

2.2. 水印提取步算法

水印的提取步骤如下:

1) 对大小为 512×512 的嵌入水印之后的 Lena 图像进行 Radon 变化, 得到变换之后的图像。

2) 对变换之后的图像进行一级离散小波分解得到四个子带: 低频子带、水平细节子带、垂直细节子带、对角线细节子带。

3) 对高频子带 HH1 进行分块成 4×4 的块, 然后对分成的 1024 块进行奇异值分解, 得到 1024 个奇异矩阵 S_i , 并且每一个 S_i 中的 σ_i 会按照降序排列。

4) $z = \text{mod}(a, q)$

如果 $z > q/2$, 那么 $W(i, j) = 1$

否则 $W(i, j) = 0$

重复步骤 4), 直到得到全部的水印信息。

2.3. 仿真实验过程

在这里, 我们用大小为 512×512 的图像作为载体图像, 用大小为 32×32 的图像作为水印图像。将水印嵌入到不同图像, 所得到的嵌入之后的图像如图 2 所示。其中, (a) (b) (c) 表示分别为 Lena、Baboon、Peppers 的原图像, (b) (d) (f) 分别为嵌入水印之后的图像。

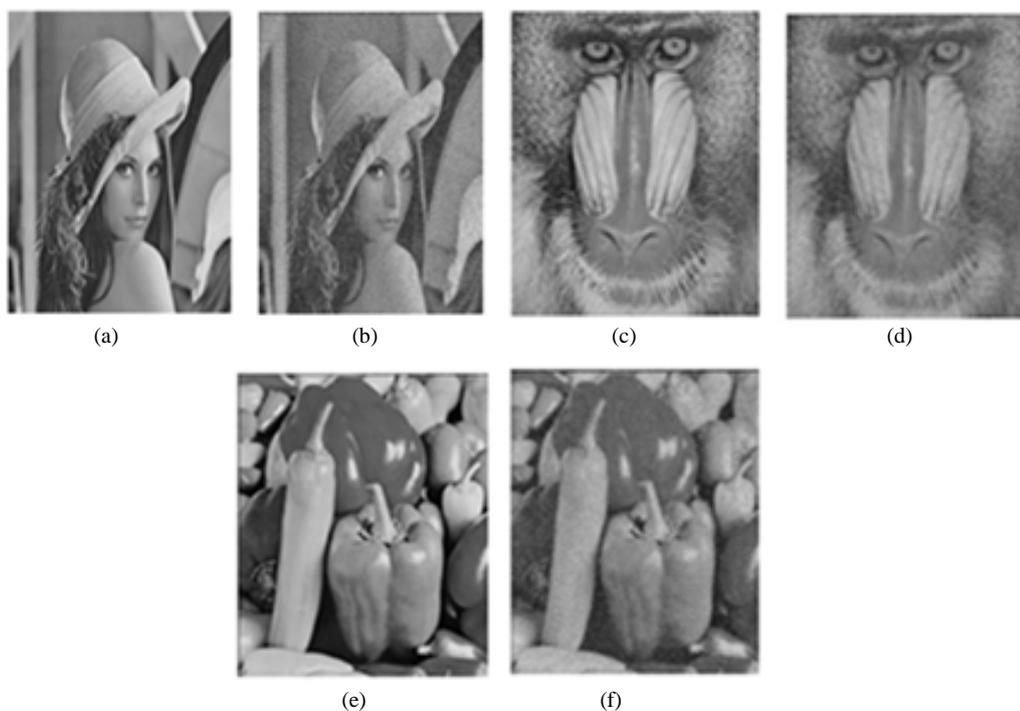


Figure 2. The original image and the watermarked image

图 2. 原图像与嵌入水印图像

根据仿真结果可以看出,对于嵌入水印之后的图像与原图像其清晰度并不是高度相似,这是由于对一幅图像进行 Radon 变换在进行反变换后的图像与原图像并不完全相同,通过实验进行仿真之后发现存在小的误差值。

载体图像的保真度是评价水印的一个重要指标,用峰值信噪比(PSNR)对嵌入水印前后图像的质量差异进行衡量[5]

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255 \times 255}{\sum \sum [C(i, j) - C_i(i, j)]^2} \quad (9)$$

由于提取出的水印可能与嵌入的水印不完全一样,这需要一个评价标准来衡量恢复的水印与原始水印的相似程度。采用归一化相似度来评判[5]。

$$NC = \frac{\sum w_i w_i}{\sqrt{\sum_i w_i^2} \sqrt{\sum_i (w_i)^2}} \quad (10)$$

为了测试算法的不可见性和鲁棒性,对于嵌入水印的载体图像进行一些常见的攻击,后通过盲检测出水印信息与 Li 的方法相比较。

用 Matlab 对该实验进行仿真,其仿真结果如图 3 所示。

本文中,用 Matlab 进行实验仿真,用 PSNR 和 NC 来评估水印的质量。

对图像进行小波变换之后会得到四个不同的子带,将水印图像嵌入到不同的子带区域,得到的水印效果并不相同,用实验的方法来对嵌入不同区域结果进行比较,结果如表 1 所示。

为了证明本方案的优越性,在这里对同一嵌入水印的图像进行椒盐噪声、斑点噪声、高斯噪声、尺度变换、旋转、中值滤波、高斯滤波、维纳滤波、锐化、直方图均衡化、JPEG 压缩等一系列攻击,然后经过攻击之后所提取出的水印信息与原水印信息相比较,来计算 NC,结果如表 2 所示。

本文运用了 Radon 变换,所以对图像的旋转和尺度变换较其他算法有比较大的优越性,其部分仿真结果如表 3 和图 4 所示。

图 5 表示的是将水印嵌入到小波变换之后的不同子带区域,该算法对不同攻击的鲁棒性,实验结果表明,将水印嵌入到高频区域,整体效果最好。其中(a)代表椒盐噪声(感染密度 0.3);(b)代表斑点噪声(方差 0.01);(c)代表高斯噪声(均值 0,方差 0.5);(d)代表尺度变换(放大倍数 2);(e)代表旋转(2 度);(f)代表中值滤波(3 × 3);(g)代表高斯滤波(3 × 3);(h)代表维纳滤波(3 × 3);(i)代表锐化;(j)代表直方图均衡化;(k)代表 JPEG 压缩(Q = 10)。

根据仿真结果可以看出,尽管本算法对于嵌入水印之后图像有极小的影响,但总体来说对于水印图像的影响并不大。所以与 Li [6]和[7]的方案比较,本文方案对于旋转,缩放,平移以及普通的加噪,滤波, JPEG 压缩攻击也具有很好的鲁棒性。

3. 结束语

本文提出了一种新的鲁棒性水印算法,首先对原图像进行 Radon 变换,然后将得到的图像作小波分解然后对高频子带进行分块,对每一块进行奇异值分解后,通过改变每块奇异值的方法嵌入水印信息。其特点是: 1) 根据 Radon 变换的性质,具有旋转不变性和尺度归一化的特性,提高了水印对旋转和尺度变换的鲁棒性。2) 将水印嵌入到经 Radon 变换、DWT-SVD 变换后的数据块中,比嵌入单一变换域有更好的不可见性和鲁棒性。3) 检测水印无需原图像,实现了盲检测,可用于保护数字版权,具有一定的应用价值。

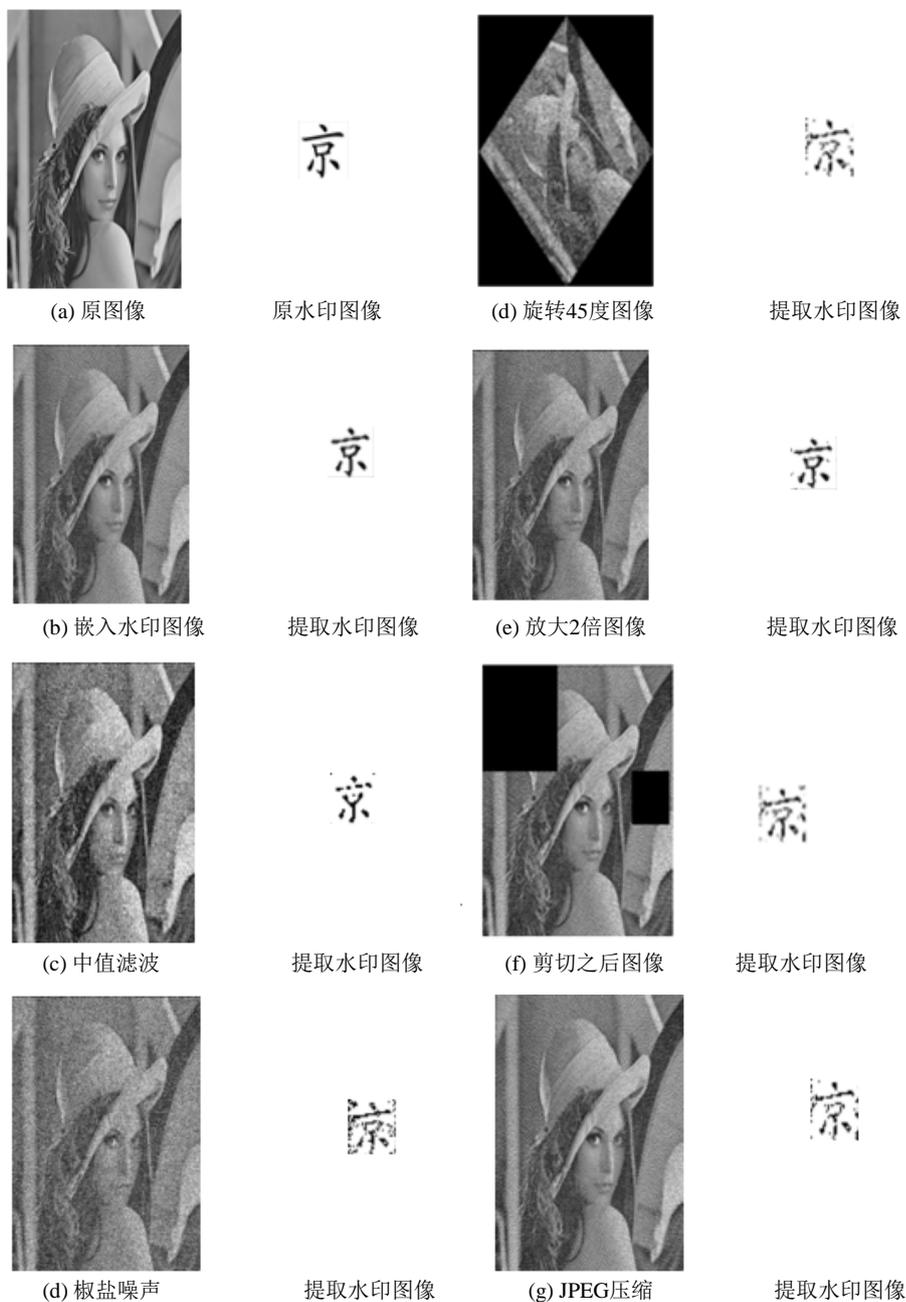


Figure 3. Watermarked image attacked and extracted watermark under various attacks
 图 3. 在不同攻击下的图像和提取出的水印

Table 1. The values of PSNR and NC for different images
 表 1. 对不同图像该方法的 PSNR 值和 NC

图片名称	LL1		LH1、HL1		HH1	
	PSNR (dB)	NC	PSNR (dB)	NC	PSNR (dB)	NC
Baboon	45.2569	0.8467	48.5217	0.8575	54.2707	0.9872
Lena	46.8691	0.8549	49.2573	0.8827	55.8693	0.9939
Pepper	47.5982	0.8834	49.9684	0.8929	56.1158	0.9967

Table 2. The NC compared between our scheme and Li' scheme
表 2. 我们的方案的 NC 与 Li 的方案 NC 比较

攻击名称	Li 的方案	[2]的方案	本文方案
椒盐噪声(感染密度 0.3)	0.6967	0.9204	0.8516
斑点噪声(方差 0.01)	0.9393	0.9091	0.9572
高斯噪声(均值 0, 方差 0.5)	0.5949	0.8410	0.8617
尺度变换(放大倍数 2)	0.5127	0.9046	0.9349
旋转(2°)	0.7456	0.8057	0.9759
中值滤波(3 × 3)	0.7886	0.9029	0.9076
高斯滤波(3 × 3)	0.9374	0.9105	0.9065
维纳滤波(3 × 3)	0.8845	0.9004	0.9119
锐化	0.7984	0.8861	0.8747
直方图均衡化	0.8395	0.8219	0.8521
JPEG 压缩(Q = 10)	0.8532	0.9256	0.9538

Table 3. The ability of anti rotation
表 3. 抗旋转的能力

旋转角度	Li 的方法	[2]的方法	本文方法
1°	0.7855	0.7881	0.9959
2°	0.7456	0.7843	0.9947
4°	0.7209	0.7741	0.9837
7°	0.7005	0.7606	0.9673
10°	0.6896	0.7517	0.9532
12°	0.6774	0.7428	0.9492
15°	0.6695	0.7240	0.9385
17°	0.6543	0.7065	0.9327
20°	0.6406	0.6589	0.9319
25°	0.6037	0.6410	0.9220
30°	0.5726	0.6278	0.9151
35°	0.5239	0.6019	0.9003
40°	0.5001	0.5874	0.8829
45°	0.4869	0.5423	0.8610

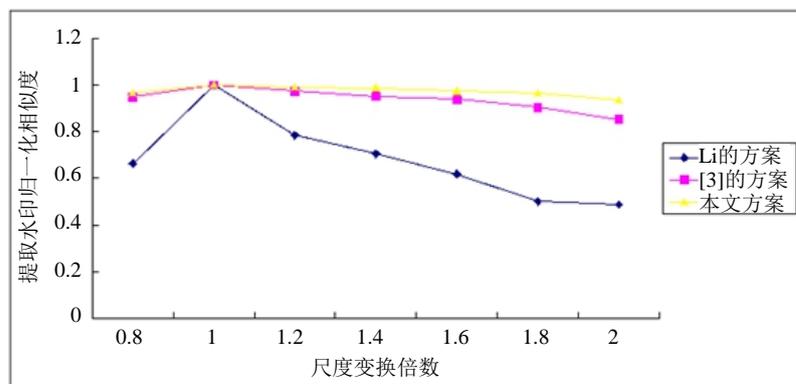


Figure 4. Robustness comparison between different method
图 4. 尺度变换对不同方案水印的影响

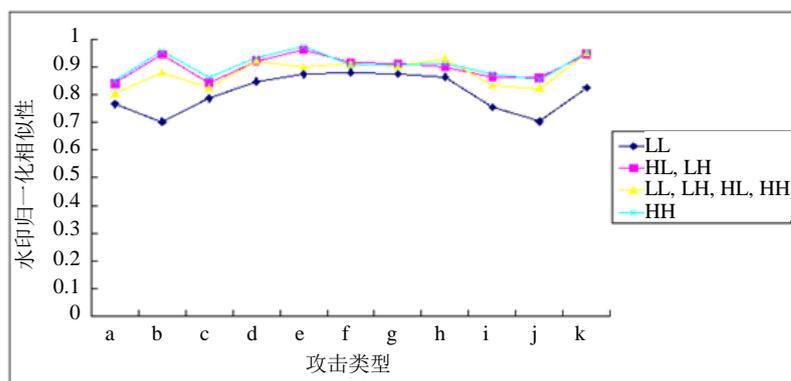


Figure 5. Comparison NC parameter of for different cover images against mentioned attacks

图 5. 嵌入不同区域的抗攻击能力

尽管本文提出的鲁棒性数字水印算法具有很好的鲁棒性，但是也存在一些不足之处。对于 Radon 变换而言，分连续 Radon 变换和有限的 Radon 变换。连续 Radon 变换实际上在模拟实验过程中发现，原图像与经过连续 Radon 变换和反 Radon 变换得到的图像并不是完全一致的，这样就会对水印嵌入之后图像的质量有一定的影响。有限的 Radon 变换是完全可逆的，可以很好地解决这一问题，但因为有限的 Radon 变换研究非常少，可供参考的资料也寥寥无几，所以本文没有深入研究。本文可改进的方向也是向着有限的 Radon 变换代替连续 Radon 变换，来实现更好的效果。

致 谢

在研究生期间，通过不断课堂学习以及查阅大量资料，根据自己的兴趣爱好，最终和导师确立了所研究的方向。在刚决定研究本算法的时候，因为刚刚进入到这一领域，很多知识掌握不牢固也不熟练，导师王晖教授对我不断地进行点播梳理，耐心解读我的任何一个问题，并且不断对我进行鼓励，使我得以克服难关。

同时感谢所有物理学与信息技术学的老师，在这一阶段，我身体出了问题，在院治疗期间，收到老师们的关爱和照顾，非常的感激。尤其是王晖老师，不但在学习上给与指导，并且在生活上时时刻刻关心着我们。感谢辛云宏老师、郭建中老师、张小凤老师、陈春娥老师、曹宇巍导师等对我学业以生活上的帮助。

研究生生活充实而又美好，在此期间我学到了很多知识，感谢一路走来陪伴我的人，衷心说一声：谢谢！

参考文献 (References)

- [1] 王颖, 黄志蓓 (2003) 数字水印. 电子工业出版社, 北京.
- [2] 马兰, 张新荣 (2003) 数字水印技术述评. *电视技术*, **4**, 56-59, 71.
- [3] 陶峰 (2009) 基于 DWT-SVD 的图像盲水印研究. *信息化纵横*, **5**, 62-65.
- [4] 刘瑞楨, 谭铁牛 (2001) 基于奇异值分解的数字图像水印方法. *电子学报*, **2**, 168-171.
- [5] 王颖, 肖俊, 王蕴红 (2007) 数字水印原理与技术. 北京科学出版社, 北京.
- [6] Rastegar, S., Namazi, F., Yaghmaie, K. and Aliabadian, A. (2011) Hybrid watermarking algorithm based on singular value decomposition and radon transform. *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, **65**, 658-663.
- [7] Vahedi, E., Zoroofi, R.A. and Shiva Toward, M. (2012) A new wavelet-based watermarking approach for color images using bio-inspired optimization principles digit. *Signal Process*, **22**, 153-162.