

基于 Bandelet 与自适应矩阵范数的全频率无损水印方法

杨岳湘¹ 罗永² 叶昭晖¹ 成礼智²

¹(国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073)

²(国防科学技术大学理学院 长沙 410073)

(yyx@nudt.edu.cn)

A Complete Frequency Lossless Watermarking Method via Bandelet and Adaptive Matrix Norm

Yang Yuexiang¹, Luo Yong², Ye Zhaohui¹, and Cheng Lizhi²

¹(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

²(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract The watermark is the new technology which can be used to apply to authenticate the image copyright and offer the safety. The traditional watermark protects the digital image through modifying the image data to hide the information which is used to authenticate the image copyright. It does not suit protecting some images which are not permitted to be destroyed. The lossless watermarking is an effective method to protect these image data. A complete frequency lossless watermarking method with which the image data need not be changed is proposed in this paper. Wavelet transform is first performed for the original image, and then for the high and middle frequency part of the image transformed, the geometric flow is traced by using Bandelet, and the texture and edge considered for feature parameters of the image are used to construct high frequency lossless watermarking. For the low frequency part of wavelet coefficients, by selecting optimal matrix norm a new watermarking scheme is then proposed. Through drawing the statistical character and the edge of the image, the method is able to protect the image from all-around attack. The experimental tests show that the proposed approach has the capability to resist strong attacking, and it can be widely used in protecting data which are not permitted to be modified.

Key words lossless watermark; Bandelet; matrix norm; image geometric flow

摘要 数字水印技术是一种新型的数字图像版权认证和保护技术。传统的数字水印一般通过修改图像数据达到信息隐藏的目的,不适合用于保护不允许修改的图像数据,无损数字水印为这类数据的保护提供了一种有效的方法。提出了一种无需对图像数据做修改的全频率无损数字水印实现方法。首先对图像实施小波变换,变换后的中高频部分采用 Bandelet 跟踪图像几何流,将纹理和边缘作为图像的特征从而构造出图像高频无损水印参数。对于小波变换的低频部分,通过选取最优的矩阵范数,得到低频系数水印参数生成方案,达到提取图像统计和边缘特征,对图像实现全面保护的目。实验证明该算法具有良好的抗攻击能力,能够广泛用于对不可修改数据的保护。

关键词 无损数字水印; Bandelet; 矩阵范数; 图像几何流

中图法分类号 TP391; TP309

随着人类进入数字化时代,数字多媒体产品得到广泛使用.由于数字产品易于被复制和修改,因而如何有效地保护版权及合法权益成为人们日益关注的问题,数字水印技术是实现数字版权保护的有效方法^[1-6].由于对于许多应用来说需要保留完整的数据,因此,无损数字水印^[3-5]逐渐成为信息隐藏的热点研究课题.该类数字水印主要有两种:一种实现水印载体的无损可逆重构^[3-5],而另一种水印算法本身不破坏载体信息^[5].目前的无损水印方案^[3-6]主要为空域方法^[3-5]或基于变换的低频处理方法^[6],其中文献[3-5]研究的水印为脆弱水印,而文献[6]中引入的零水印则为稳健水印,由于该水印方法是通过计算分块图像的 DCT 并按照高阶累积量从大到小的顺序依次输出无损水印实现的,因此若中间某个数据发生突变,则会影响到后面的水印输出位置,从而导致提取水印与原始水印的相似度降低,产生错误的检测结果.

为了克服基于小波变换的数字水印方法对高维数据奇异性特征不能有效处理的缺陷,本文通过对法国学者 Pennec 和 Mallat 于 2005 年^[7]提出的第 2 代 Bandedet 变换进行简化和改进,并对图像进行小波变换后的高频部分实施 Bandedet 化,提出了一种全频率无损稳健水印方法.具体实现过程是以图像中几何轮廓的方向信息(几何流方向)作为特征参数,得到高频水印算法.对于小波变换后图像的低频信息,利用矩阵范数与矩阵奇异值分解的等价性质,根据图像本身特征自适应选取最优范数,得到抗攻击能力优异的无损水印.由于矩阵范数计算简单,因此与奇异值分解相比,大大提高了水印生成和检测效率.与文献[8-11]提出的直接对图像矩阵实施奇异值分解或利用矩阵范数相比,本文首先通过小波变换将图像的低频和低频分开,分别采用不同的方法处理,提高了抗攻击能力也降低了误判率.而 2005 年文献[11]提出的基于小波域奇异值水印则只对其低频部分进行水印嵌入与提取,没有充分利用图像的高频特征信息.实验证明,对现有数字水印方法而言,一旦图像的统计特性被破坏,则计算机无法对图像进行自动认证,而本文提出的全频率方法由于在中低、高频段部分分别设计无损水印,从而部分克服了该缺陷.

1 图像几何流方向

对于几何正则图像,沿平行于边缘线方向,图像变化是正则的,垂直于边缘方向,图像变化剧烈.平行于边缘线的方向可以用几何流来刻画,几何流是

一个定义在图像 f 的支撑区域上的向量场 $\tau(x_1, x_2)$,用以指示 f 在每一点 (x_1, x_2) 处的正则变化方向. Bandedet 变换的出发点是充分利用图像沿几何流的正则性,以实现图像的最佳稀疏表示.

小波变换实质上是小波函数与原图像的卷积,从这种意义上讲小波函数可以视为模糊核,因此小波变换对原图像有平滑作用.这种平滑使图像产生沿与几何流垂直方向的正则性,使得几何流的定位不需要严格准确,允许存在一定的偏差.由于精确定位图像边缘线很困难,因此采用上述正则性方法可以实现几何流的快速定位.

小波变换对应图像平坦区域的系数,高频子带量化后会产生大量的零系数,但对非平坦区域,小波变换的高频子带仍会残留较多的大幅值系数.对于几何正则图像,高频子带大幅值系数主要沿图像的几何流分布.几何正则图像虽然不具备全局正则性,但沿几何流方向是正则的,对于图像的中高频小波系数,本文对各高频子带实施 Bandedet 化.为了简化算法,采用第 2 代 Bandedet 变换^[6]对小波系数进行分块,在每个子块中,用直线逼近几何流,这使得几何流只需一个参数控制,我们将这个参数称为几何流方向,作为图像的特征来构造无损水印.

给定一块正方形区域 S ,沿几何流方向 d 重排 S 内的小波系数,得到一维信号.如果方向 d 选择合适,经一维小波变换可以对信号进一步处理使得零系数个数显著减少.如果 S 和 d 选择不正确,经一维小波变换,量化后非零系数个数不会有显著减少.区域 S 内的最佳几何流方向,应使得下面的 Lagrange 函数取最小:

$$\mathcal{L}(f_\theta, R) = \|f_\theta - \tilde{f}_\theta\|^2 + \lambda \cdot T^2(R_g + R_b), \quad (1)$$

其中, \tilde{f}_θ 表示由量化后的 Bandedet 系数重构的一维信号, T 为量化阈值, R_g 表示编码几何流所需比特数, R_b 表示编码量化后的 Bandedet 系数所需比特数, λ 是 Lagrange 乘子,按 Pennec 的优化结果,实验中取 $\lambda = 3/28$.

对于尺寸为 $L \times L$ 的小方块,将圆周角 $[0, \pi)$ 等角度离散为 $L^2 - 1$ 个,即 θ 可能的取值为

$$\theta = \frac{k\pi}{L^2 - 1}, k = 0, 1, \dots, L^2 - 2. \quad (2)$$

对于无几何流的情形,标记 $\theta = \text{Inf}$,表示不实施 Bandedet 化.图 1 为图像最佳几何流搜索实验图,实验用图是 Barb,图 1(b)是小波分解的一个高频子图像.如图所示,图中分块为搜索几何流的图像分块,搜索到的几何流也标记了出来.

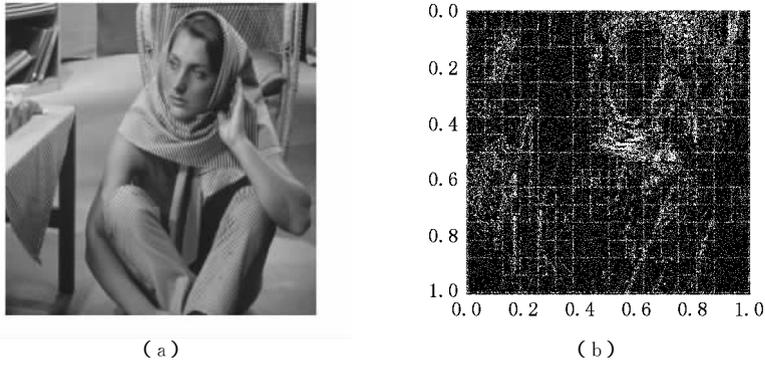


Fig. 1 Searching image geometric flow. (a) Orange image of Barb and (b) Image geometric flow.

图1 图像几何流搜索。(a) Barb 原图像 (b) 图像几何流

2 全频域无损水印方法

2.1 矩阵范数与奇异值分解的等价特性

图像的低频分量矩阵是一个实数矩阵, 首先将其分为固定大小的子块矩阵 $C = (c_{i,j}) \in \mathbb{R}^{N \times M}$, 考虑下列常见的几种矩阵范数:

1) (Frobenius) 范数: $\|C\|_F = \left(\sum_{i,j=1}^{N,M} c_{i,j}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$.

2) 行范数与列范数: $\|C\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq N} \sum_{j=1}^M |c_{i,j}|$.

$|c_{i,j}|$, $\|C\|_1 = \max_{1 \leq j \leq M} \sum_{i=1}^N |c_{i,j}|$.

3) 2 范数: $\|C\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(C^T C)}$ (C^T 为 C 的转置).

4) L-范数: $\|C\|_L = \frac{\sum_{i,j=1}^{N,M} |c_{i,j}|}{\sqrt{NM}}$.

对子块矩阵 $C \in \mathbb{R}^{N \times M}$ 进行奇异值分解, 有 $C = U \Sigma V^T$, 其中 $U \in \mathbb{R}^{N \times M}$ 和 $V \in \mathbb{R}^{N \times M}$ 都是正交矩阵, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M)$ 为对角矩阵, 其对角元素满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M \geq 0$.

现在说明矩阵范数与矩阵奇异值分解具有等价性.

性质 1. 矩阵范数具有等价性, 特别的有

$$\|C\|_2 \leq \|C\|_F \leq \sqrt{n} \|C\|_2;$$

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \|C\|_\infty \leq \|C\|_2 \leq \sqrt{m} \|C\|_\infty;$$

$$\frac{1}{\sqrt{m}} \|C\|_1 \leq \|C\|_2 \leq \sqrt{n} \|C\|_1.$$

利用矩阵奇异值和 2 范数的关系 $\|C\|_F^2 =$

$$\sum_{i,j=1}^{N,M} c_{i,j}^2 = \sum_{i=1}^M \sigma_i^2$$

以及范数的等价性质 1 不难知道, 矩阵奇异值与矩阵范数方法实施数字水印具有相同的性能. 而实验表明, 基于奇异值分解的图像数字水印对于转置、镜像、旋转、放大、平移等等几何失真和攻击是非常稳健的. 考虑到矩阵范数计算远比奇异值计算简单, 因此本文利用矩阵范数方法与 Bandelet 变换相结合, 以建立全频率的无损水印. 由于对于大部分的自然图像而言, 其变化平缓部分占主要成分, 实验验证 F 范数的稳定性能最优, 但是对于非自然图像, F 范数构造的水印参数就不一定是最优的了. 因此, 本文在算法设计中引入自适应范数技术以进一步改进方法的性能.

2.2 全频率无损水印方法

全频域无损水印方法采用低频和高频两种不同的水印参数生成算法, 来刻画出图像整体的统计特征和几何特征, 从而达到保护版权的目的. 如图 2 所示, 首先对图像作小波分解, 然后对图像的低频采用矩阵范数的方法, 高频采用 Bandelet 化提取几何流方向的方法, 得到低频和高频部分的无损水印参数.

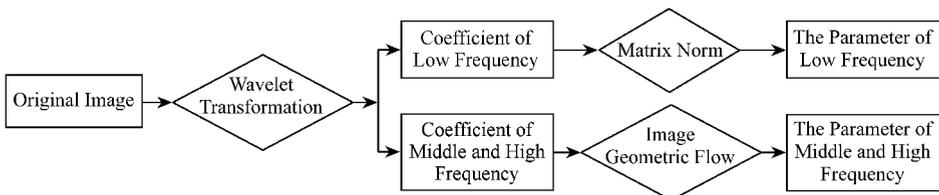


Fig. 2 The process of lossless watermarking.

图2 无损水印方案流程

2.3 低频部分无损水印构造算法

1) 首先对原始图像 X 作 L (针对 512×12 图像后面的实验 L 取 1) 层的小波变换, 得到该尺度下的低频系数矩阵 C ;

2) 对矩阵 C 进行分块, 子块矩阵大小统一设为 $N \times M$ (这里取 $M = N = 8$), 按照一定的顺序排列, 得到新的矩阵系列 $\{C^{(k)}\}_{k=1}^m$;

3) 计算矩阵 $C^{(k)}$ 的不同范数 $\|C^{(k)}\|$, 令 $t_k = \|C^{(k)}\|$ (如取 F 范数 $t_k = \|C^{(k)}\| = \sum_{i,j=1}^{N,M} C_{i,j}^{(k)^2}$), 于是得到序列 $T = \{t_k\}_{k=1}^m$;

4) 由种子 $seed$ 生成同样含有 m 个自然数的随机序列 (且该序列可以根据种子再现, 种子 $seed$ 也作为水印密钥) $S = \{s_i\}_{i=1}^m$, 其取值范围在 $[1, m]$, 且 s_i 互不相同 (实际上, S 即为正整数 $1, \dots, m$ 的随机排列);

5) 用 S 序列中的随机数作 D 的下标产生新的序列 $T^* = \{t_{s_k}\}_{k=1}^m$;

6) 令序列 $T^* = \{t_{s_k}\}_{k=1}^m$ 的第 i 项与序列均值 $\bar{t} \left(\bar{t} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m t_{s_k} \right)$ 作比较, 若比均值大, 则相应水印序列 W 中第 i 项为 1, 否则为 -1.

这样便得到了低频水印序列 W_1 .

2.4 中高频无损水印算法

下面通过一组实验来演示图像几何流生成过程.

第 1 步: 数据准备

对图像做二维小波变换, 对各高频子带做固定分块, 例如均匀分块的情形. 由于图像在遭受破坏以后, 自适应的分块方式不一定能够完全再现, 此时无法正确检测水印, 因此本文采用固定方式对图像进行分块.

第 2 步: Bandedet 化

图 3 为一个分块子图像, 下面描述对于这个分块子图像的几何流方向搜索过程.



Fig. 3 The child-image.

图 3 分块子图像

1) 根据方块大小, 取有限离散角度, 每个角度对应一个几何流方向.

2) 将方块格点沿几何流方向重采样, 得到一维信号.

3) 对一维信号做一维小波变换, 最佳几何流方向对应的一维信号做一维小波变换后能量集中性最好. 根据式 (2) 判定最佳几何流的方向, 如图 4 所示.

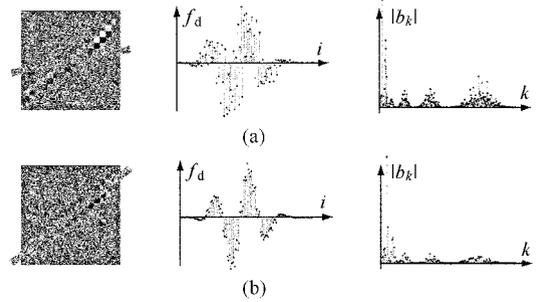


Fig. 4 Searching image geometric flow. (a) The selected geometric flow direction is different to image geometric flow and (b) The selected geometric flow direction is accordant to image geometric flow.

图 4 图像几何流搜索。(a) 选择的几何流方向与图像几何流不一致的情形 (b) 选择的几何流方向与图像几何流一致的情形

有了几何流搜索算法以后, 下面介绍中高频部分水印算法的流程:

1) 中高频小波系数分块, 子块矩阵大小统一设为 $M \times N$ (本文实验采用 $N = M = 16$), 按照一定的顺序排列, 得到中高频小波系数矩阵序列 $\{H^{(k)}\}_{k=1}^n$.

2) 对每一个分块 H_i 搜索几何流方向 d_k , 这里还需要考虑两种特殊情况: 第 1 种在 Bandedet 变换中, 一个分块出现多个几何流方向 (Bandedet 变换对于包含了多条直线, 变分块算法是继续细分, 由于水印的特殊性, 这里采用固定分块方式, 就会出现一个分块多条直线); 第 2 种分块没有包括轮廓线, 也就是检测不出直线, 对于这两种情况都将方向记录为 -1. 几何流方向是一个大于 0 的数, 从而很容易分辨出这 2 种特殊情况, 于是得到序列 $D = \{d_k\}_{k=1}^n$.

3) 由种子 $seed$ 生成同样含有 n 个自然数的随机序列 (且该序列可以根据种子再现, 种子 $seed$ 也作为水印密钥) $S = \{s_i\}_{i=1}^n$, 其取值范围在 $[1, n]$, 且 s_i 互不相同 (实际上, S 即为正整数 $1, \dots, n$ 的随机排列).

4) 用序列 S 中的随机数作 D 的下标产生新的序列 $D^* = \{d_{s_k}\}_{k=1}^n$.

5) 令序列 $D^* = \{d_{s_k}\}_{k=1}^n$ 的第 k 项与序列均值 $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{s_i}$ (这里没有几何流方向和包含多个方向的块, 即 $d_i = -1$ 的项不参与计算平均值 $n' \leq n$) 作比较, 若比均值大, 则相应水印序列 W 中第 k 项为 1, 否则为 -1, 对于没有几何流方向的分块, 将其

记录为 0.

\bar{d} 是图像纹理的主体走向, 这样建立的水印参数保证了 1 和 -1 的分布比较平均, 而且使得水印描述的是各个几何流之间的相对关系. 通过以上的算法就得到了中高频部分水印 W_2 .

2.5 水印的提取与检测

低频水印的提取过程是对检测的图像执行与水印构造相同的步骤:

- 1) 对检测图像 X' 做 L 层的小波变换得到低频系数矩阵 C' ;
- 2) 进行矩阵分块得到子块矩阵系列 $\{C^{(k)}\}_{k=1}^m$;
- 3) 依照水印构造的方法, 根据矩阵范数得到序列 $T' = \{t'_k\}_{k=1}^m$;
- 4) 根据水印密钥 $seed$ 产生随机序列 S , 依照水印构造的方法, 对序列 T' 进行调序并与序列 T' 的均值进行比较, 提取出相应水印序列 W'_1 .

中高频水印提取过程:

- 1) 对检测图像的中高频小波变换系数进行固定分块 $\{H^{(k)}\}_{k=1}^m$;
- 2) 搜索分块 H'_i 几何流方向, 得到序列 $D' = \{d'_k\}_{k=1}^m$;
- 3) 由密钥 $seed$ 再现随机序列, 对 D' 进行换序, 通过均值 \bar{d}' , 按照水印生成一样的原则提取出相应的水印序列 W'_2 .

本文的水印检测采用相关性判定, 采用的水印相关性检测公式为

$$\rho = \frac{|W \cdot W'|}{\sqrt{W \cdot W} \sqrt{W' \cdot W'}}, \quad (3)$$

其中, W 为在原始图像中构造的水印, W' 为待检测的图像中提取的水印. 为判定版权要设定合适的阈值, 对于待检测图像, 将提取出来的水印与原水印进行相关性检验, 若检测值大于该阈值, 则承认其版权; 否则, 视为侵权. 从统计学观点出发, 考虑可能的误判概率以及虚警概率, 设定本算法的阈值为 0.4, 即相关性的检测值大于 0.4 就认为有水印存在, 认定版权.

3 实验结果

实验中采用的原始图像为 512×512 的 Lena 图像, 考虑到图像大小只做 1 层小波变换, 低频系数矩阵为 256×256 , 水印序列的长度为 1024. 产生 1000 个取值为 1 和 -1 的二值随机序列, 令第 500 个为根据原始图像构造的水印序列, 把待检测图像中提取的水印和这 1000 个随机序列作相关性检测, 可以

检测此算法的鲁棒性. 检测结果的横坐标表示 1000 个二值随机序列, 第 500 个为根据原始图像构造水印, 纵坐标是相关性的检测值, 如果横坐标为 500 处有明显高于其他检测值的峰值, 并大于判定阈值, 则可以判断水印的存在. 在下面的实验中包括了两类: 第 1 类是低频矩阵范数水印参数抗攻击实验, 包括模糊、JPEG 压缩、直方图均衡、剪切、缩放、噪声等攻击手段试验; 第 2 类是抗统计攻击试验, 选取了 3 种方式, 采用 Photoshop 软件实现图像的破坏, 包括浮雕特效、等高线化和素描 3 种方式.

原始图像为 Lena 图, 对原始图像没有进行任何操作的检测结果, 检测值 ρ 为 1.

3.1 低频矩阵范数水印参数抗攻击实验

1) 模糊

模糊会平滑图像中的跳变部分, 降低图像的对比特度. 实验结果表明它对水印几乎没有影响, 表 1 为水印抗模糊攻击性能检测表, 当模糊 20 次时, 检测值 ρ 仍然可以达到 0.9453.

Table 1 The Ability of Resisting Blurring Attack

表 1 水印抗模糊攻击性能检测表

Times of Blurring	Test Value
3	0.9980
5	0.9961
10	0.9707
15	0.9648
20	0.9453

2) JPEG 压缩

JPEG 压缩是一种常用的压缩方式, 一般水印只能抵抗质量数大于等于 50 的 JPEG 压缩, 而本文的算法对 JPEG 压缩表现出极强的鲁棒性, 表 2 为水印抗压缩性能检测表, 图像经过质量数为 1 的 JPEG 压缩, 检测值仍然高达 0.9121.

Table 2 The Ability of Resisting Compression Attack

表 2 水印抗压缩操作性能检测表

Compression Parameter	Test Value
50	0.9980
10	0.9883
5	0.9824
3	0.9824
1	0.9121

3) 缩放

缩放是指将图像缩小若干倍再放大同样倍数的操作, 这里的缩放参数 n 的意义为: 将图像缩小为

原图的 $\frac{1}{n}$,再放大 n 倍.可以看出本文的算法对缩放操作也表现出很强的鲁棒性,表 3 为水印抗缩放操作性能检测表.当缩放参数为 20 时,检测值仍然很高,其值为 0.71489.

Table 3 The Ability of Resisting Zoom Attack
表 3 水印抗缩放操作性能检测表

Zoom Parameter	Test Value
2	0.9863
3	0.9707
5	0.9570
10	0.9355
20	0.7148

4) 噪声

对于一般的水印算法,加噪声对水印的影响是很大的.但是实验表明,加入高斯噪声对于水印影响很小,仍然可以很清晰判定版权.文献[5]的算法,对于方差为 4 的高斯噪声,检测值已经下降得很厉害了,而本文算法在图像加入均值为 1 方差为 15 的高斯噪声的情况下,检测值为 0.3105,仍可清晰检测,表 4 为水印抗噪声性能检测表.加入均值为 4 方差为 15 的高斯噪声,检测值为 0.2812.

Table 4 The Ability of Resisting Noise Attack
表 4 水印抗高斯噪声性能检测表

Noise Parameter (Average,Deference)	Test Value
(1,1)	0.7070
(1,5)	0.5352
(1,8)	0.459
(1,15)	0.3105
(4,15)	0.2812

5) 区分度

利用相同密钥相同方法根据 Monkey 以及 Barb 产生水印序列,用相关性检验式(3)计算其与 Lena 图原始水印的相关性,得到的检测值分别为 0.0137 和 0.0801,远远小于阈值,说明水印抑制互相关性好,包含了图像的重要特征,可以区分不同的图像.

3.2 统计特性攻击实验

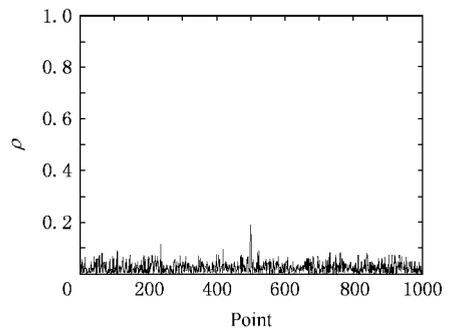
通过前面实验可知图像低频范数无损水印在抗压缩和图像处理方面的能力很强,这些特性是因为图像的统计特性没有遭到完全破坏.使用等高线化、素描特性攻击以及浮雕特性攻击时会破坏图像

的统计特征,此时文献[8-11]中方法检测值均低于 0.25,上述 3 种水印方法会失效,而本文方法却依然有效,下面的实验结果也充分说明了这一点.例如,利用 Bandedet 变换建立的图像中几何轮廓的方向信息参数水印,验证的检测值分别为等高线化 $\rho = 0.7235$,素描特效攻击 $\rho = 0.8742$,浮雕特效攻击 $\rho = 0.8351$.

1) Lena-等高线化图及实验如图 5 所示,统计特性检测值为 0.1895,而基于 Bandedet 变换生成的几何特性水印的检测值为 $\rho = 0.7235$ (一方面由于图像几何特性生成的水印参数采用 3 种取值 $\{-1, 0, 1\}$,不同于低频的两种取值 $\{-1, 1\}$,并且为了能看清楚差异,没有把 Bandedet 变换生成的几何特性检测值标记在图 5(b)中,下面 2 组实验也是如此)



(a)



(b)

Fig. 5 The image geometric flow watermark resists when image remains the contour. (a) The contour of Lena and (b) Result $\rho = 0.1895$.

图 5 图像几何流水印抗等高线化实验.(a) Lena-等高线化图 (b) 检测结果 $\rho = 0.1895$

2) Lena-素描特效图及实验结果如图 6 所示,检测值为 0.1562,而基于 Bandedet 变换生成的几何特性水印的检测值为 $\rho = 0.8742$.

3) Lena-浮雕特效图及实验结果如图 7 所示,检测值为 0.2441,而基于 Bandedet 变换生成的几何特性水印的检测值为 $\rho = 0.8351$.

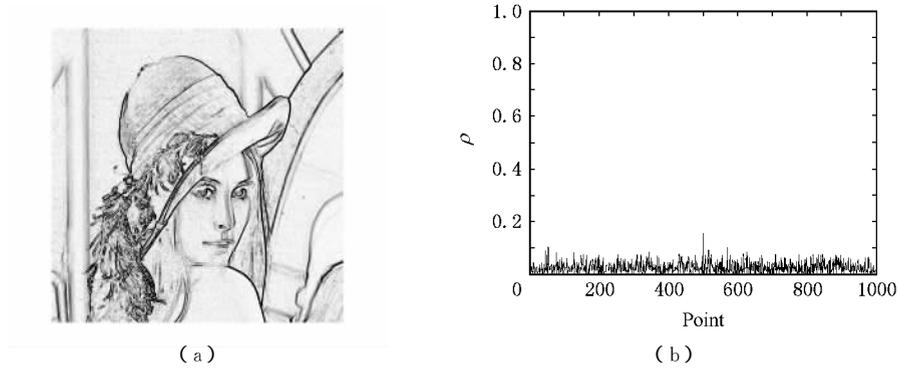


Fig. 6 The image geometric flow watermark resists when image remains the line drawing. (a) The line drawing of Lena and (b) Result $\rho = 0.1562$.

图6 图像几何流水印抗素描特效攻击实验。(a) Lena-素描特效图 (b) 检测结果 $\rho = 0.1562$

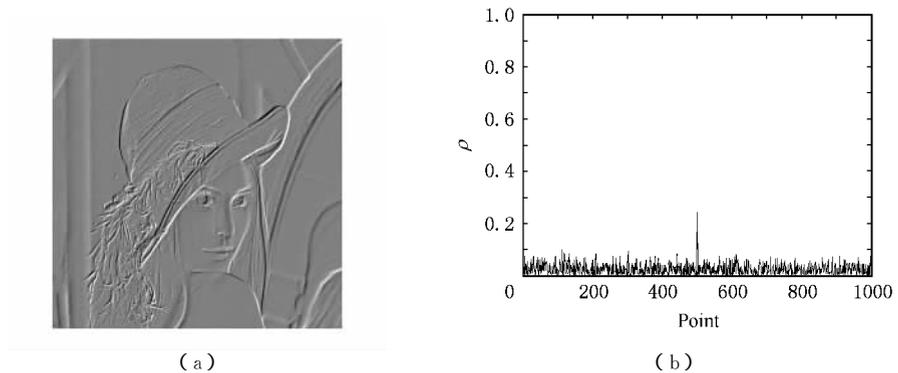


Fig. 7 The image geometric flow watermark resists when image remains the basso-relievo. (a) The basso-relievo of Lena and (b) Result $\rho = 0.2441$.

图7 图像统计特性水印抗浮雕特效攻击实验。(a) Lena-浮雕特效图 (b) 检测结果 $\rho = 0.2441$

4 结论与评价

本文提出了一种覆盖全频率域的无损水印方法, 刻画出图像整体的统计特征和几何特征. 该算法对于不允许破坏的图像数据来说, 是一个非常有效的保护手段. 该算法有很强的抗图像处理攻击能力, 对于破坏统计特性的攻击同样有效.

参 考 文 献

- [1] R G Schyndel Van, A Z Tirkel, C F Osborne. A digital watermark [C]. IEEE Int'l Conf on Image Processing, Austin, 1994
- [2] Yin Hao, Lin Chuang, Qiu Feng, *et al.* A survey of digital watermarking [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(7): 1093-1099 (in Chinese) (尹浩, 林闯, 邱锋, 等. 数字水印技术综述 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(7): 1093-1099)
- [3] M U Celik, G Sharma, A M Tekalp, *et al.* Lossless authentication watermark LAW [G]. In: SPIE 5020. Bellingham: SPIE Press, 2003. 689-698
- [4] M U Celik, G Sharma, E Saber, *et al.* Lossless watermarking for image authentication: A new framework and an implementation [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(4): 1042-1049
- [5] Z C Ni, Y Q Shi, N Ansari, *et al.* Reversible data hiding [J]. IEEE Trans on Circuits and System for Video Technology, 2006, 16(3): 354-362
- [6] Q Wen, T F Sun, S X Wang. Concept and application of zero-watermark [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216
- [7] E L Pennec, S Mallat. Sparse geometric image representation with bandelets [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(4): 423-438
- [8] R Liu, T Tan. A SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership [J]. IEEE Trans on Multimedia, 2002, 4(1): 121-128
- [9] D V S Chandra. Digital image watermarking using singular value decomposition [C]. The 45th IEEE Midwest Symp on Circuits and Systems, Tulsa, 2002

- [10] Li Xudon , Zhang Zhenyue. Public watermarking using matrix norm [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics , 2005 , 17(8) : 1857-1861 (in Chinese)
(李旭东 , 张振跃 . 利用矩阵范数实现的公开水印技术 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报 , 2005 , 17(8) : 1857-1861)
- [11] P Bao , X H Ma. Image adaptive watermarking using wavelet domain singular value decomposition [J]. IEEE Trans on Circuits and System for Video Technology , 2005 , 15(1) : 96-102



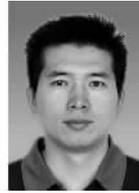
Yang Yuexiang , born in 1965. Professor. His main research interests include network and information security , parallel algorithm , *etc* .

杨岳湘 , 1965 年生 , 教授 , 主要研究方向为网络与信息安全、并行算法等。



Luo Yong , born in 1976. Ph. D. and lecturer. His main research interests include application mathematics , information security and signal process , *etc* .

罗 永 , 1976 年生 , 博士 , 讲师 , 主要研究方向为应用数学、信息安全、信号与图像处理等。



Ye Zhaohui , born in 1975. Lecturer. His main research interests include information security , information search and information process .

叶昭晖 , 1975 年生 , 讲师 , 主要研究方向为信息安全、信息检索、信息处理等。



Cheng Lizhi , born in 1962. Ph. D. , professor and Ph.D. supervisor. His main research interests include new algorithm and software , wavelet and image processing , application math , *etc* .

成礼智 , 1962 年生 , 博士 , 教授 , 博士生导师 , 主要研究方向为信息科学中新型算法与软件、小波变换与图像处理、应用数学等。

Research Background

Watermarking has become an effective method to protect digital image , but the traditional watermarking always destroys the image for hiding the information. For some applications , such as image of CT , we hope that the image should be original. To solve this problem , a complete frequency lossless watermarking method with which the image data need not be changed is proposed in this paper. This research is supported by the National Natural Science Foundation of China under grant Nos. 60573027 and 60603014. The experimental tests show the proposed approach has the capability to resist strong attacking. The watermarking afforded by this paper can be widely used in protecting the digital image which should not be destroyed.