

文章编号:1002-4026(2011)01-0081-05

# 基于非抽样 Contourlet 变换的高定位精度认证水印算法

刘东彦,孙继昌,刘岩,汤永佐

(山东省海洋环境监测技术重点实验室,山东省科学院海洋仪器仪表研究所,山东 青岛 266001)

**摘要:**本文提出了一种基于非抽样 Contourlet 变换的高定位精度图像自适应认证水印算法。对原始图像进行非抽样 Contourlet 变换,选取低频子图分块后进行奇异值分解,通过自适应量化修改奇异值嵌入经混沌置乱后的二值水印信息。整个分解过程没有任何抽样环节,各尺度下各方向子带均与原始图像具有相同的尺寸,从而提高了篡改定位的精度,增加了水印的嵌入量。水印的提取只需要由混沌初值和量化参数构成的密钥,保证了算法的安全性。同时该水印算法对 JPEG 压缩稳健,对恶意操作敏感。

**关键词:**水印;认证;非抽样 Contourlet 变换;奇异值分解

中图分类号:TP309.7 文献标识码:A

## A nonsubsamped contourlet transform based adaptive watermarking algorithm for image authentication

LIU Dong-yan, SUN Ji-chang, LIU Yan, TANG Yong-zuo

(Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environment Monitoring Technology, Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China)

**Abstract:** We present a semi-fragile nonsubsamped contourlet transform (NSCT) based watermarking algorithm for image authentication. We embed watermark in the singular values (SVs) of the blocks within low-frequency subbands of NSCT by an adaptive quantization method. Watermark extraction is available only with a key constructed by chaotic signal initial value and quantization parameters. Subbands of individual scale and individual direction all have the same size as those of the original image. This algorithm can improve the tampering localization capability without causing remarkable man-made trace. Experimental results show that this algorithm is robust to JPEG compression but extremely sensitive to malicious operations.

**Key words:** watermark; authentication; nonsubsamped contourlet transform; single value decomposition

数字水印(Digital Watermarking)技术是将一些标识信息(即数字水印)直接嵌入数字载体(包括多媒体、文档、软件等)当中,但不影响原载体的使用价值,也不容易被人的知觉系统(如视觉或听觉系统)觉察或注意到。通过这些隐藏在载体中的信息,可以达到确认内容创建者、购买者、传送隐秘信息或者判断载体是否

被篡改等目的。

认证水印是用于判断载体内容完整性及提示篡改的水印。Wong<sup>[1]</sup>提出了一种分块图像认证算法,将篡改定位到独立子块,但是由于分块的独立性,极易受到矢量攻击。在文献[1]的基础上,文献[2]通过添加滑动窗口技术来解决矢量攻击的问题。Xie等<sup>[3]</sup>提出了通过修改小波高频系数嵌入水印,然而水印直接嵌入到小波高频系数中可能能够保护原始图像的可视性,但却容易受到压缩攻击。因此文献[4]通过对图像小波分解低频系数进行奇异值分解的方法来嵌入水印,该算法由于尺度变换的影响,使图像的定位精度降低。故本文提出了采用非抽样 Contourlet 变换代替小波变换,再选取低频子图分块后进行奇异值分解(SVD),自适应量化修改奇异值实现水印嵌入。由于整个分解过程没有任何抽样环节,各尺度下各方向子带均与原始图像具有相同的尺寸,从而提高了篡改定位的精度。

## 1 非抽样 Contourlet 变换

小波变换凭借对信号良好的时频局部分析,在信号处理中得到了广泛的应用。然而,小波变换的局限性也受到了广泛的关注,二维小波变换是由一维小波推广而来的,其小波基只具有有限个方向,即水平、垂直、对角,而实际上图像的方向是任意的。Contourlet 变换(Contourlet Transform, CT)<sup>[5]</sup>作为一种多尺度几何分析工具极大地解决了小波存在的问题,在很多领域(如图像的消噪和融合,数字水印<sup>[6]</sup>)得到了很好的应用。Contourlet 变换是通过拉普拉斯金字塔(Laplacian Pyramid, LP)分解和方向滤波器组(Directional Filter Bank, DFB)分解分别完成对图像的尺度分析和方向分析的。但是 CT 中的下抽样及上采样操作会产生频谱混叠,使变换不具有平移不变性。非抽样 Contourlet 变换<sup>[7]</sup>是由 M. N. Do, Jianping Zhou 等在 2005 年提出的,是基于基函数平移不变性所提出的一种过完备的变换形式,由非采样塔式结构(Nonsampled Pyramid, NSP)实现多尺度分析,再通过非抽样方向滤波器组(Nonsampled Directional Filter Bank, NSDFB)实现多方向性分析。图 1(a)为 NSCT 的流程图,首先由非抽样塔式结构将图像分解为一个高频子带,一个低频子带,接着用非抽样方向滤波器组将高频子带分解为几个方向子带,类似的分解步骤可以在非抽样塔式结构输出的低频子带上反复进行从而实现信号的多尺度、多方向分析。图 1(b)为三尺度,方向数分别为 8,4,4 对应的 NSCT 分解频谱图,由于整个分解过程中没有任何抽样环节,因此各尺度下各方向子带均与原输入图像有相同的尺寸。

## 2 水印嵌入

步骤 1 采用文献[8]中提出的混沌置换网络对二值水印进行混沌置乱;

步骤 2 对原始图像进行 NSCT 变换;

步骤 3 将得到的低频系数分割成大小为  $a * a$  (在本文的实验中  $a$  取 4) 的块  $E_q$ , 并对每一块进行奇异值分解;得到一个由 4 个奇异值组成的向量  $v$ , 对  $v$  作范数运算:

$$N_v = \|v\|_2 \quad (1)$$

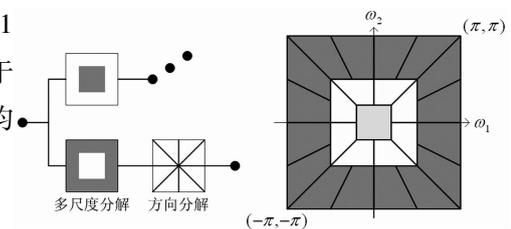
对  $N_v$  进行量化取整:

$$D = \lfloor N_v / Q_q \rfloor \quad (2)$$

其中,  $Q_q$  表示量化步长,计算方法如步骤 4 所示。从几何意义上来讲,向量的范数表达的是向量的长度,此处  $D$  的值由范数  $N_v$  量化取整所得,根据块  $E_q$  的不同而不同。

步骤 4 自适应量化。量化步长的计算公式如下<sup>[4]</sup>:

$$Q_q = Q_m + (Q_M - Q_m) \times \frac{(C_q - C_m)}{(C_M - C_m)} \quad (3)$$



(a) NSCT 流程图 (b) 理想频谱图

图 1 非抽样 Contourlet 变换

Fig. 1 Nonsampled contourlet transform

$$C_q = m_{E_q} + 3 \times \sigma_{E_q}, \quad q = 1, 2, \dots, \frac{m}{8} \times \frac{n}{8}$$

$Q_m, Q_M$  分别为量化步长的最小值和最大值,可以由实验者设定; $\sigma_{E_q}, m_{E_q}$  分别是  $E_q$  的平均值和标准偏差; $C_m, C_M$  分别为  $\{C_q\}$  的最小值和最大值。

步骤 5 水印嵌入:

$$D = \begin{cases} D + 1 & \text{mod}(D, 2) = w \\ D & \text{mod}(D, 2) \neq w \end{cases} \quad (4)$$

$w$  为二值水印图像中的一位,即通过比较整数  $D$  对 2 取模后的值与水印比特是否相同来对  $D$  进行相应的操作。

步骤 6 修改奇异值:利用公式

$$v^* = v \times (Q_q \times D + Q_q/2) / N_v \quad (5)$$

修改奇异值,并进行奇异值反变换得到含水印的块  $E_q$ 。

对  $Y$  的所有块进行上述六步处理以后再进行 NSCT 重构,得到含水印图像。

### 3 水印提取

按照水印嵌入的过程对含水印图像进行 NSCT 分解,分块计算得到  $D$  值,如果  $D$  为奇数则  $w = 1$ , 否则  $w = 0$ 。然后对提取的水印再进行混沌反置乱。为了估计篡改的程度,我们采用了下面的篡改评估函数:

$$BER = \frac{1}{M_1 \times M_2} \sum_k \sum_l w_{k,l} \oplus w'_{k,l} \quad (6)$$

$w_{k,l}$  是原始的水印,  $w'_{k,l}$  是提取的水印,  $M_1 \times M_2$  是水印的大小,  $\oplus$  是指进行异或操作, BER 的值在  $[0, 1]$  之间。

水印使用者可以根据应用场合的不同设定不同的域值  $\tau$ , 当  $BER \geq \tau (0 \leq \tau \leq 1)$  时,认为图像被篡改过,在安全性要求较高的场合可以把  $\tau$  值设小。

### 4 实验结果分析

#### (1) 抗 JPEG 压缩实验

本算法能够有效地抵抗 JPEG 压缩,但对恶意篡改行为较为敏感。本文的实验采用了多幅  $256 * 256$  的图像。表 1 中列出了标准图像“Lena”, “Peppers”, “Woman”在不同的量化步长及相应的 JPEG 压缩比下,峰值信噪比 (PSNR) 和误码率 (BER) 的值,其中 PSNR 用于描述图像视觉质量。

从表 1 可以看出,当 JPEG 压缩比为 50% 时, Lena 图像的 PSNR 值为 40.75, BER 值为 1.51%, 说明此算法形成的水印图像不但拥有很高的视觉质量,而且具有很好的抗 JPEG 压缩的鲁棒性。图 2 分别为 Lena 含水印图像在压缩比为 90%, 70%, 50%, 30% 下提取到的水印图像,其中 BER 的值分别为 0, 0.01%, 1.51%, 9.04%。

表 1 不同压缩比下 PSNR 与 BER 之间的关系

Table1 The relation between PSNR and BER in different images

| 图像      | PSNR  | 不同 JPEG 下的 BER |        |       |       | 参数    |       |
|---------|-------|----------------|--------|-------|-------|-------|-------|
|         |       | 90%            | 70%    | 50%   | 30%   | $Q_m$ | $Q_M$ |
| Lena    | 40.75 | 0              | 0.01%  | 1.51% | 9.04% | 6     | 36    |
| Peppers | 39.06 | 0              | 0.03%  | 1.93% | 9.98% | 9     | 45    |
| Woman   | 41.42 | 0              | 0.009% | 1.32% | 8.84% | 12    | 40    |

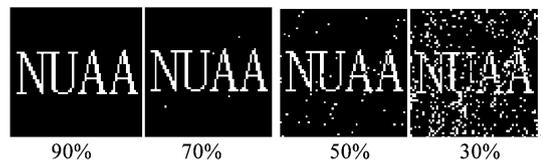


图 2 不同 JPEG 压缩下提取的水印图像

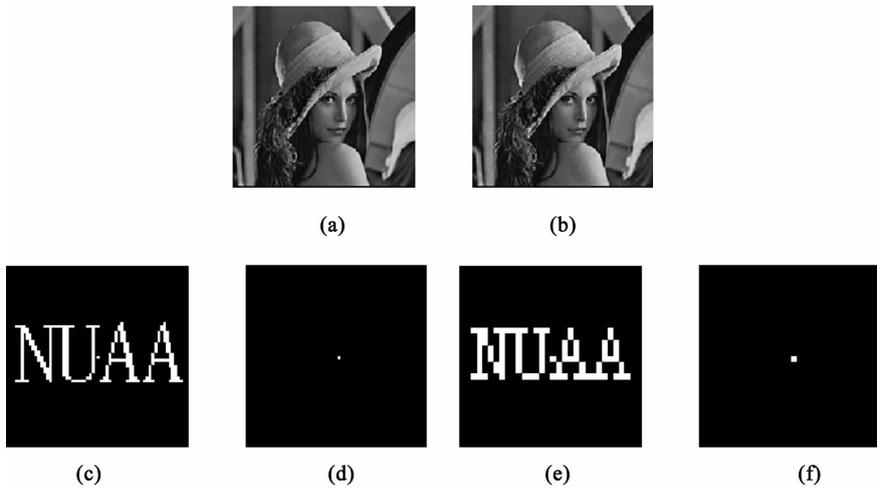
Fig. 2 The extracted watermarks after different JPEG compression ratios

#### (2) 检测篡改及篡改定位

文献[4]中将  $256 * 256$  的图像单尺度小波变换后对低频子

图进行分块,分块的大小为  $4 * 4$ ,嵌入的水印量为  $32 * 32 = 1024$  bits,然而由于小波域的尺度变换,使得实际的定位精度为  $8 * 8$ 。本算法中,单尺度 NSCT 变换后输出的子带图像与原始图像具有同样的大小,实际的定位精度为  $4 * 4$ ,水印嵌入量为  $64 * 64 = 4096$  bits。虽然嵌入水印量增多,但是图像的视觉质量并没有明显下降。下面我们以 Lena 图像为例进行说明。

实验中采用 photoshop 的铅笔工具对含水印的 Lena 图像(图 3(a))进行修改形成待认证图像(图 3(b))。然后分别采用本文的方法和文献[4]中的方法检测篡改并对篡改进行定位,结果分别如图 3(c)和图 3(e)所示。为了对比定位的精度,将提取的水印图 3(c)和图 3(e)与原始水印相减再取绝对值得图 3(d)和图 3(f),可以明显的看出本文的算法能够将篡改锁定在更精确的范围内,具有较高的定位精度。同时本算法能够有效的识别恶意篡改,如图 4(a)为经过剪切的 Lena 图像,图 4(b)为从中提取到的水印。



(a)原始图像;(b)待认证图像;(c)利用 NSCT 域算法提取的水印;  
(e)利用 DWT 域算法提取的水印;(d),(f)提取水印与原始水印的差

图 3 篡改定位精度分析

Fig. 3 The analysis of the ability for location after modified

(3)安全性分析:水印提取只需由量化参数和混沌初值组成的密钥而不需要原始图像,因此水印的提取是盲提取的。在不知道密钥的情况下,不可能提取到正确的水印,从而能够有效地防止非授权者的认证。在图 5 所进行的实验中,将量化参数  $Q_m = 6$  由修改为  $Q_m = 6.03$ ,而不改变含水印图像如图 5(a),提取到如图 5(b)所示的水印,从图中可以看出水印已经被破坏,不能进行有效认证。



(a)篡改过的图像 (b)提取的水印

图 4 对恶意篡改的定位

Fig. 4 The location of the tampering

(a)未经修改的含水印图像 (b)使用错误密钥提取的水印

图 5 安全性分析

Fig. 5 The analysis of the security

## 6 结论

本文提出的 NSCT 域认证水印算法采用图像自适应的方法进行嵌入,从而减小了因为水印嵌入所造成的图像视觉质量的下降。同时利用 NSCT 输出子图与原始图像具有同样大小的特性增加了水印的容量,提

高了算法检测篡改的定位能力。水印是盲提取的,不需要原始图像,只需要由量化参数构成的密钥。该水印算法还具有抗 JPEG 压缩的良好性能,对恶意操作敏感,能有效地区分压缩与恶意篡改。

### 参考文献:

- [1] WONG P W. A public keywatermark for image verification and authentication [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Chicago, USA, 1998(4-7): 455-459.
- [2] OUDA A H, EL-SAKKA M R. Localization and security enhancement of block-based image authentication [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Genova, Italy, 2005(11-14): 673-676.
- [3] XIE L, ARCE G R. Joint wavelet compression and authentication watermarking [J]. Proc Int Conf Image Process, 1998, 2(4-7): 427-431.
- [4] BAO P, MA X. Image adaptive watermarking using wavelet domain singular value decomposition [J]. IEEE Trans Circ Syst Video Technol, 2005, 15(1): 96-102.
- [5] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [C] // IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(6): 760-769.
- [6] JAYALAKSHMI M, MERCHANT S N, DESAI U B. Significant pixel watermarking in contourlet domain [C] // IET Int Conf on Visual Information Engineering, 2006(CP522): 416-421.
- [7] DO M N, ZHOU J. The Nonsampled contourlet transform: theory, design and applications [C] // IEEE Trans on Image Processing, 2005, 1(1): 469-472.
- [8] PENG Z, LIU W. Color image authentication based on spatiotemporal chaos and SVD [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2008, 36(4): 946-952.
- [9] LIAN X, DING X, GUO D. Digital watermarking based on non-sampled contourlet transform [R] // IEEE Int workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification, 2007(16-18): 138-141.
- [10] YANG M, YIN Z, ZHONG Z, et al. A contourlet-based method for handwritten signature verification [C] // IEEE Int Conf on Automation and Logistics, 2007(18-21): 1561-1566.