

# 基于 Krawtchouk 矩和 Contourlet 变换的多目的水印

吴一全, 谢静, 庞磊

(南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 南京 210016)

**摘要:**提出了一种基于 Krawtchouk 矩和 Contourlet 变换的多目的水印算法. 首先对图像进行两级 Contourlet 分解, 通过计算其低频分量的 Krawtchouk 低阶矩不变量来构建鲁棒水印, 然后在剩下的带通分量中选择一个作为水印嵌入域并在其中嵌入半脆弱水印, 给出了实验结果, 并从水印的不可见性、抗攻击能力及篡改的定位能力三个方面进行了定量评测. 实验结果表明, 该算法具有很强的鲁棒性和较好的脆弱性, 能同时有效地保护版权和认证图像.

**关键词:**多目的水印; 鲁棒水印; 半脆弱水印; Krawtchouk 矩; Contourlet 变换

**中图分类号:** TN911.73

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)08-2160-5

## 0 引言

随着多媒体和网络技术的广泛应用, 图像、音频、视频等多媒体数字作品的版权保护和内容认证问题迫切需要解决, 数字水印技术可对此提供一种解决方案. 目前的数字水印方案可分为鲁棒性水印、脆弱性水印和半脆弱性水印<sup>[1]</sup>. 鲁棒性水印对常见的处理有较强抵抗力, 一般用来证明数字作品的版权<sup>[2]</sup>; 脆弱性水印允许被攻击, 且能检测受到的损害, 可用来进行内容完整性认证和篡改提示<sup>[3]</sup>; 半脆弱性水印同时具有脆弱性水印和鲁棒性水印的特点, 在容忍一定限度的常见图像处理操作的同时, 可以区别对待正常的图像处理与恶意篡改, 用于数字作品的内容认证<sup>[4-5]</sup>. 然而, 以往数字水印技术的研究往往针对单一目的, 即仅仅实现版权保护或内容认证两者中的一个功能. 而实际中需要同时实现多个功能, 因此近年来一些学者开始研究多目的水印. Lu<sup>[6]</sup> 和 Xiong<sup>[7]</sup> 等相继提出了基于多阶量化的多目的水印, 对原始载体图像进行量化分解, 然后分别在不同量化阶层里嵌入鲁棒水印和半脆弱水印, 因此可达到同时实现版权保护和内容认证的目的. 然而这种基于多阶量化的多目的水印算法具有以下缺点: 1) 鲁棒水印算法稳健性较弱, 不能很好地抵抗几何攻击; 2) 由于在不同量化阶嵌入了两次水印, 因此严重降低了载体图像的质量.

本文提出了一种基于 Krawtchouk 矩和 Contourlet 变换的多目的水印算法, 首先对图像进行两级 Contourlet 分解, 通过计算其低频分量的 Krawtchouk 低阶矩不变量来构建鲁棒水印; 然后在剩下的带通分量中选择一个作为水印嵌入域并在

其中嵌入半脆弱水印; 最后从水印的不可见性、抗攻击能力及篡改的定位能力三个方面对本文提出的算法进行了定量评测.

## 1 Contourlet 变换

Contourlet 变换的基本思想是首先用一个类似于小波的多尺度分解捕捉边缘奇异点, 再根据方向信息将位置相近的奇异点汇集成轮廓段<sup>[8]</sup>.

图 1 是 Contourlet 变换的原理, 它由拉普拉斯塔式分解 (Laplacian Pyramid, LP) 和方向滤波器组 (Directional Filter Banks, DFB) 实现. LP 用于对图像的多尺度分解, 即产生原始信号的一个低通采样逼近图像及原始图像与该低通采样逼近图像之间的一个差值图像 (即高频分量). DFB 应用于 LP 分解得到的差值图像上, 在任意尺度内得到 2 的整数幂个方向子图像. 对 LP 分解得到的低通图像继续重复上述操作可得到图像的多尺度多方向分解.

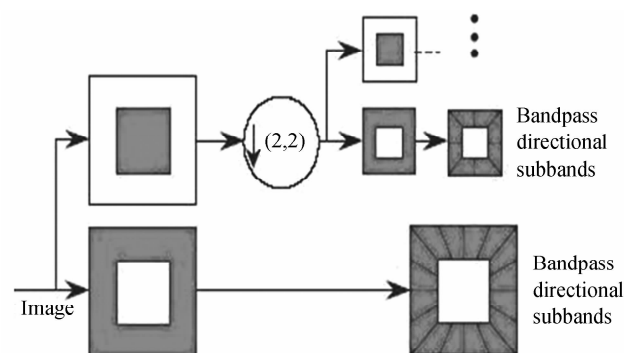


图 1 Contourlet 变换的原理

Fig. 1 Principium figure of contourlet transform

## 2 基于 Contourlet 域 Krawtchouk 矩不变量的图像鲁棒水印算法

### 2.1 Krawtchouk 矩与 Krawtchouk 矩不变量

Krawtchouk 矩是基于经典的离散 Krawtchouk

多项式提出的一组新的正交矩. 利用图像的 Krawtchouk 矩可以很好地恢复出原始图像<sup>[9]</sup>. 而且在不论有无噪声干扰的情况下 Krawtchouk 矩的性能都要优于 Zernike 矩、Legendre 矩和 Tchebichef 矩.

Krawtchouk 矩的核函数是由一系列的 Krawtchouk 多项式组成的.  $n$  阶 Krawtchouk 多项式定义为

$$K_n(x; p, N) = \sum_{k=0}^n a_{k,n,p} x^k = {}_2F_1(-n, -x; -N; 1/p) \quad (1)$$

$${}_2F_1(a, b; c; z) = \sum_{k=0}^n \frac{(a)_k (b)_k}{(c)_k} \frac{z^k}{k!} \quad (2)$$

式中,  $x=0, 1, \dots, N, N>0, p \in (0, 1), (a)_k = a(a+1)\dots(a+k-1), {}_2F_1(a, b; c; z)$  是超几何函数.

这一系列的 Krawtchouk 多项式  $\{K_n(n; p, N)\}$  是有限的, 且符合正交性条件, 即

$$\sum_{x=0}^N w(x; p, N) K_n(x; p, N) K_m(x; p, N) = \rho(n; p, N) \delta_{nm} \quad (3)$$

式中,  $w(x; p, N) = \binom{N}{x} p^x (1-p)^{N-x}$

$$\rho(n; p, N) = \frac{(-1)^n n!}{(-N)_n} \left(\frac{1-p}{p}\right)^n$$

对于大小为  $M \times N$  的图像  $f(x, y)$ , 其  $(m+n)$  阶 Krawtchouk 矩定义为

$$Q_{mn} = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \bar{K}_m(x) \bar{K}_n(y) \quad (4)$$

式中

$$\bar{K}_m(x) = \bar{K}_m(x; p_1, M-1) =$$

$$K_m(x; p_1, M-1) \sqrt{\frac{w(x; p_1, M-1)}{\rho(x; p_1, M-1)}}$$

$$\bar{K}_n(x) = \bar{K}_n(x; p_2, N-1) =$$

$$K_n(x; p_2, N-1) \sqrt{\frac{w(x; p_2, N-1)}{\rho(x; p_2, N-1)}}$$

式中

$$\sum_{x=0}^{N'-1} \bar{K}_m(x; p, N'-1) \bar{K}_n(x; p, N'-1) = \delta_{mn}$$

$$N' = \min(M, N)$$

Krawtchouk 矩不变量是一种不随图像的平移、旋转、尺度变换而变化的矩特征量, 其定义为

$$\tilde{Q}_{mn} = [\rho(n)\rho(m)]^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{i,n,p_1} a_{j,m,p_2} \tilde{\nu}_{ij} \quad (5)$$

$$\tilde{\nu}_{pq} = \sum_{p=0}^n \sum_{q=0}^m \binom{n}{p} \binom{m}{q} \left[\frac{N'^2}{2}\right]^{(p+q)/2+1} \left[\frac{N'}{2}\right]^{n+m-p-q} \nu_{pq} \quad (6)$$

式中,  $\nu_{pq}$  是标准几何矩不变量,  $\{a_{k,n,p}\}$  是由式(1)决定的加权系数. 通过式(5), 可以计算任意阶 Krawtchouk 矩不变量, 比几何矩不变量更具有广泛性.

## 2.2 基于 Contourlet 域 Krawtchouk 矩不变量的鲁棒水印算法

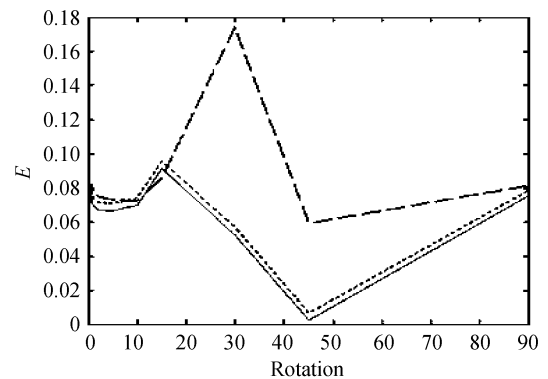
图像经 Contourlet 分解后, 图像的能量更加集中, 提取的图像不变量更加稳健. 现提取图像 Contourlet 域低频分量的 7 个 Krawtchouk 低阶矩不变量  $[q_{01}, q_{10}, q_{11}, q_{02}, q_{20}, q_{12}, q_{21}]$ , 并利用这 7 个不变量构造函数  $F^{[10]}$ , 即

$$F = [3(q_{01} + q_{10}) + 2(q_{11} + q_{02} + q_{20}) + (q_{12} + q_{21})]/14 \quad (7)$$

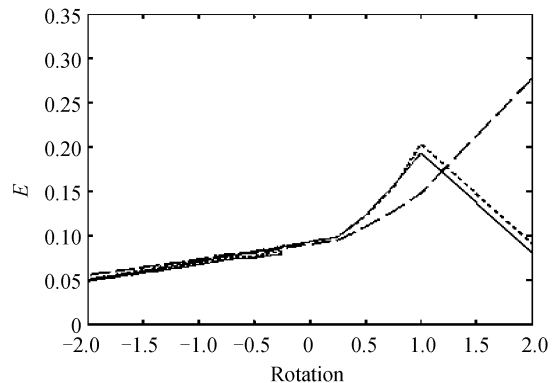
则  $F$  即为构造的鲁棒水印, 它的容量是 1 bit.

水印检测时, 只要计算待测图像的 Contourlet 域 Krawtchouk 矩不变量  $F'$ , 并比较其与  $F$  的绝对偏差  $E$ , 即  $E = |F - F'|$ . 若  $E \leq \epsilon$ , 则认为水印存在; 否则认为水印不存在. 其中  $\epsilon$  是容忍度,  $\epsilon$  越大, 容忍的攻击强度越大, 反之则越小, 一般在实验中取为  $0.2 \sim 0.3$ .

本文进行一系列攻击实验, 比较它在不进行任何变换、进行小波变换、进行 Contourlet 变换下提取的 Krawtchouk 矩不变量的稳健性. 图 2(a) 为旋转不同角度后的偏差比较, 图 2(b) 为旋转加尺度变换后的偏差比较. 虚线是不进行任何变换的结果, 点线是进行小波变换的结果, 实线是进行 Contourlet 变换的结果. 由图 2 可以看出, 进行 Contourlet 变换



(a) Deviation after different rotation degrees



(b) Deviation after rotation and scaling

图 2 攻击后的绝对偏差比较

Fig. 2 Absolute deviation comparison after some attacks

后的不变量偏差最小,提取的 Krawtchouk 矩不变量最稳健.

### 3 Contourlet域图像半脆弱认证算法

#### 3.1 水印嵌入

本文采用一幅二值图像作为水印,在水印嵌入前先对其进行加密处理.为了保证嵌入水印后的图像与原始图像的差别在视觉上不可感知,本文遵循人类视觉系统(HVS)的特性嵌入水印. Watson等<sup>[1]</sup>研究了小波域的HVS特性,针对9-7双正交小波滤波器,提出了一个量化矩阵,水印嵌入时只要小波系数的变化不超过量化矩阵给定的最大容许值,即可满足水印图像的透明性.本文使用Watson量化矩阵实现Contourlet域内嵌入水印<sup>[12]</sup>.

水印嵌入的具体步骤如下:

1) 水印加密. 将二值水印图像  $W$  进行二维

Arnold置乱,其中置乱次数  $k$  作为密钥,置乱后的水印图像表示为  $W^*$ .

2) 选择嵌入子带图像. 对原始图像进行两级Contourlet分解,然后选取带通分量中能量最大的子图像作为嵌入子带.子图像能量的计算公式为

$$E_{j,k} = \frac{1}{HW} \sum_{m=1}^H \sum_{n=1}^W |d_{j,k}^{(i)}(m,n)|^2 \quad (8)$$

式中,  $H$  和  $W$  分别表示子图像  $d_{j,k}^{(i)}$  的高度和宽度.  $E_{j,k}$  越大意味着该子图像具有的能量越大.

3) 嵌入水印. 在步骤2)选取的嵌入域中嵌入水印  $W^*$ , 嵌入方法如下: 首先计算

$$Q(i,j) = \begin{cases} 0 & [f(i,j)/JND(i,j)] \text{ 为偶数} \\ 1 & [f(i,j)/JND(i,j)] \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (9)$$

这里  $JND(\cdot, \cdot)$  为 Watson 量化矩阵,  $[\cdot]$  为地板函数,  $f(i,j)$  为嵌入子带内  $(i,j)$  处的 Contourlet 系数. 记当前欲嵌入的水印为  $w^*(i,j)$ , 则按式(10)修改 Contourlet 系数

$$\tilde{f}(i,j) = \begin{cases} f(i,j) & \text{if } Q(i,j) = w^*(i,j) \\ ([f(i,j)/JND(i,j)] \pm 1) \cdot JND(i,j) & \text{if } Q(i,j) \neq w^*(i,j) \end{cases} \quad (10)$$

式中 Contourlet 系数  $f(i,j)$  为正时选加号,为负时用减号,最后经 Contourlet 逆变换得到含水印图像.

#### 3.2 篡改检测

对待认证图像进行两级 Contourlet 变换,记  $f'(i,j)$  为相应嵌入子带  $(i,j)$  处的 Contourlet 系数,依下式提取水印

$$\bar{w}'(i,j) = \begin{cases} 0 & [f'(i,j)/JND(i,j)] \text{ 为偶数} \\ 1 & [f'(i,j)/JND(i,j)] \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (11)$$

可见水印提取时无需原始图像,故为盲提取. 进一步对提取出的水印进行解密,结果记为  $W'$ . 按下式便可以计算水印的差值图.

$$D = |W - W'| \quad (12)$$

差值图  $D$  反映出两幅二值图像之间的差异,如果对应像素值相等,则差值图像上的像素值为 0,表现为黑点,表明该点没被更改;反之为 1,表现为白点,表明该点被篡改. 因此由差值图即可定位图像被篡改区域.

### 4 实验结果及分析

为了测试本文所提出算法的性能,针对大量灰度图像进行了实验,并从水印不可见性、抗攻击能力及篡改的定位能力三方面进行定量评测. 因篇幅所限,现给出其中针对一幅  $512 \times 512$  PEPPERS 灰度图像的实验评测结果以示说明. 所嵌入的水印是大

小为  $64 \times 64$  的二值图像,构造的鲁棒水印  $F = 5.5977$ , 容忍度  $\epsilon = 0.2$ . 图3为原始图像、二值水印图像和水印化图像(嵌入水印后的图像). 从图3可以看出,嵌入水印的图像与原始图像相比视觉上无差异,其峰值信噪比 PSNR 为 44.9111 dB.

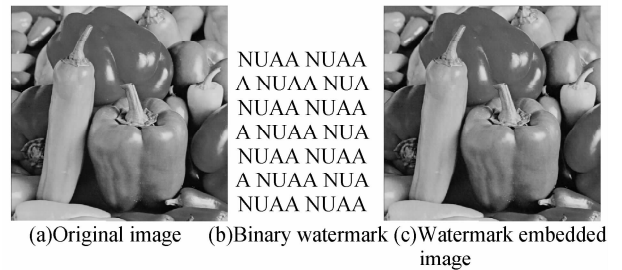


图3 原始图像、二值水印及水印化图像

Fig. 3 Original image, binary watermark and watermark embedded image

表1给出了PEPPERS图像经过各种攻击后的实验结果. 由表1可以看出,本文算法不仅对滤波、JPEG压缩、剪切、缩放、旋转等单一攻击具有很强的鲁棒性,而且对于一些几何组合攻击也具有较强的鲁棒性.

与文献[6]的算法相比,本文提出的鲁棒水印算法有如下优点:1)具有更强的鲁棒性. 文献[6]的水印算法在遭受剪切1/4、旋转 $3^\circ$ 、中值滤波攻击后,恢复的水印质量严重下降,而本文提出的算法即使在剪切掉40%、旋转 $10^\circ$ 、中值滤波攻击下,也能

表 1 PEPPERS 图像经过各种攻击后的实验结果

攻击类型	$F'$	$E$	检测结果
JPEG 20	5.555 1	0.042 6	OK
3×3 中值滤波	5.548 9	0.048 9	OK
椒盐噪声 20%	5.560 0	0.037 7	OK
剪切掉 10%	5.574 5	0.023 3	OK
剪切掉 40%	5.418 6	0.179 2	OK
缩小 15%	5.513 1	0.084 6	OK
放大 25%	5.644 3	0.046 5	OK
旋转 10°	5.664 4	0.066 6	OK
旋转 2°+剪切	5.523 6	0.074 2	OK
旋转 2°+剪切+缩放比例	5.557 4	0.040 3	OK

很好地恢复出高质量的水印;2)水印的嵌入不影响载体图像.文献[6]采用分层嵌入水印算法,由于在

重要系数中嵌入水印信息,因此降低了载体图像的质量,而本文由于采用零水印的思想,不会对载体图像有任何影响.

图 4(a)、(c) 和图 4 (e)、(g) 给出了对水印化图像分别进行剪切操作和替换操作的结果,其相应的水印差值图分别如图 4(b)、(d) 和图 4(f)、(h). 差值图的白色区域表明原始图像与之相应的位置遭到恶意篡改;反之,黑色区域则表明原始图像相应位置未被篡改.由此可见,本文提出的半脆弱水印算法对恶意篡改具有脆弱性,不仅可用来进行图像内容完整性认证,而且可以通过脆弱水印的差值图对篡改进行准确定位,确定发生篡改的位置.

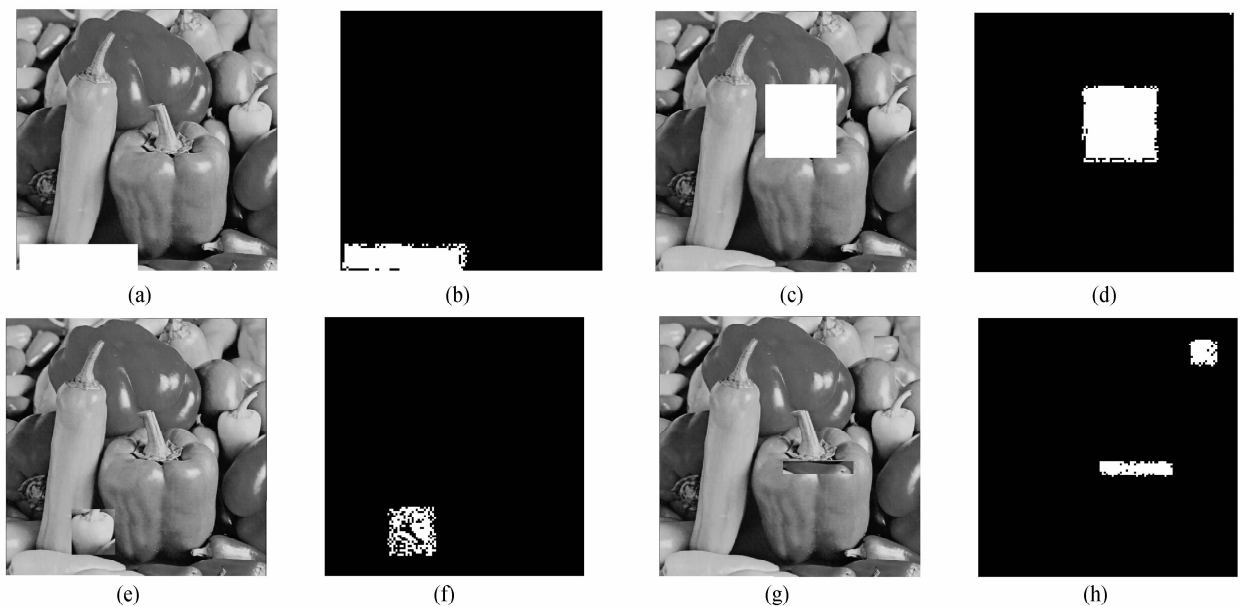


图 4 篡改图像及相应的水印差值图

Fig. 4 Falsified images and the difference images of the watermark

## 5 结论

本文提出了一种结合 Krawtchouk 矩和 Contourlet 变换的多目的水印算法,主要有优点为:基于 HVS 特性实现水印的嵌入,使得因水印嵌入而导致的图像失真视觉上不可感知,保证了水印的不可见性;基于 Krawtchouk 矩不变量的鲁棒水印算法具有很强的稳健性,不仅能够抵抗诸如 JPEG 压缩、噪声、滤波等信号处理攻击,还能抵抗剪切、缩放、旋转等严重的几何攻击;基于 HVS 的半脆弱水印算法,结合用于认证的水印信息,可进一步判断出图像是否遭受伪认证攻击,提高了水印的安全性.大量实验结果也证明了本文提出的算法的有效性.

### 参考文献

[1] 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.

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.

[2] ZHAO Jian, QIN Hua, TIAN Ze. An improved wavelet watermarking scheme based on logistic chaotic sequences [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1236-1238.

赵健,齐华,田泽.改进的小波混沌数字水印算法实现[J].*光子学报*, 2004, **33**(10): 1236-1238.

[3] LIN E T, DELP E J. A review of fragile image watermarks[J]. *Proceedings of the Multimedia and Security Workshop (ACM Multimedia '99)*, 1999: 25-29.

[4] LIN C Y, CHANG S F. Semi-fragile watermarking for authentication jpeg visual content[C]. *SPIE*, 2000: 140-151.

[5] WU Xiao-yun, LIU Hong-mei, HUANG Ji-wu. Semi-fragile image authentication based on Zernike moments and watermark [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **2** (33): 145-150.

吴晓云,刘红梅,黄继武.结合 Zernike 矩和水印的半脆弱图像认证[J].*自动化学报*, 2007, **2**(33): 145-150.

[6] LU Zhe-ming, XU Dian-guo, SUN Sheng-he. Multipurpose image watermarking algorithm based on multistage vector

- quantization [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(6): 822-831.
- [7] XIONG Shu-hua, ZHOU Ji-liu, HE Kun, *et al.* A multipurpose image watermarking method based on adaptive quantization of wavelet coefficients [C]. *First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences*, 2006: 294-297.
- [8] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2005, **14** (12): 2091-2106.
- [9] YAP P, RAVEENDRAN P, ONG S. Image analysis by Krawtchouk moments [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, **12**(11): 1367-1377.
- [10] HAO Hong-jie, WU Yi-quan. A watermarking algorithm based on Krawtchouk moment and wavelet transform [C]. *Proceedings of The 13th National Conference on Image and Graphics*, 2006: 171-175.
- 郝红杰, 吴一全. 基于 Krawtchouk 矩和小波变换的数字水印算法 [C]. 第十三届全国图象图形学学术会议论文集, 2006: 171-175.
- [11] WATSON A B, YANG G Y, SOLOMON J A, *et al.* Visibility of wavelet quantization noise [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1997, **6**(8): 1164-1175.
- [12] CHENG Kai-liang, WANG Jian-jun. A contourlet-based image watermarking algorithm combined with HVS [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, **19**(6): 811-816.
- 陈开亮, 王建军. 一种 HVS 和 Contourlet 结合的图像水印算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, **19**(6): 811-816.

## Multipurpose Watermarking Algorithm Based on Krawtchouk Moment and Contourlet Transform

WU Yi-quan, XIE Jing, PANG Lei

(School of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A multipurpose watermarking scheme for digital image is proposed. After contourlet transform, the subband coefficients are extracted. Then the lower order Krawtchouk moments of the low frequency subbands coefficients are computed, and the watermark is composed of the mean of several functions of the moments. An embedded domain from other subbands is chosen, and the semi-fragile watermark is embedded in it. Quantitative evaluation of invisibleness, ability of resisting the attack and location ability of resisting the falsification of the watermark was made. The results demonstrate the effectiveness of our algorithm in terms of robustness and semi-fragility.

**Key words:** Multipurpose watermarking; Robust watermarking; Semi-fragile watermarking; Krawtchouk moment; Contourlet transform



**WU Yi-quan** got his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, and now he is a professor at this university. His research interests focus on the fields of image processing, target detection and tracking and so on.