

# 非抽样 Contourlet 变换去噪滤波器设计的源相机识别

陈宗民\*, 周治平

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

(\*通信作者电子邮箱 chenzongmin@126.com)

**摘要:** 针对源相机识别和小波滤波器在获取残留噪声图像时会引入明显的场景噪声的问题, 提出一种利用非抽样 Contourlet 变换(NSCT)进行模式噪声提取的新方案。首先根据源相机识别的过程, 讨论小波滤波器在提取模式噪声上的不足, 接着重点讨论设计基于 NSCT 滤波器进行模式噪声的提取。实验表明 NSCT 滤波器不仅使场景噪声得到明显的抑制, 而且与小波滤波器相比, 对来自三种不同相机的照片的平均识别率提高了近 3.667%。

**关键词:** 数字图像取证; 源相机识别; 模式噪声; 非抽样 Contourlet 变换; Neyman-Pearson 准则

**中图分类号:** TP301.6 **文献标志码:** A

## Source camera identification based on nonsubsampled Contourlet transform denoising filter design

CHEN Zong-min\*, ZHOU Zhi-ping

(School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** Because obvious noise will occur when source camera identification and wavelet filters are getting the residual noise in the image scene, a new method for the extraction of pattern noise was proposed based on Nonsubsampled Contourlet Transform (NSCT). According to the process of source camera identification, the deficiencies of wavelet-based filter for the extraction of pattern noise were discussed first. And then, the discussion focused on the design of NSCT-based filter to extract pattern noise. The experimental results show that NSCT-based filter not only restrains the scene noise obviously, but also improves the average identification rate with 3.7% for identifying images from three different cameras compared to wavelet-based filter.

**Key words:** digital image forensics; source camera identification; pattern noise; Nonsubsampled Contourlet Transform (NSCT); Neyman-Pearson criterion

## 0 引言

随着信息技术的发展, 数字图像取证技术越来越体现出它的价值, 而数字图像来源取证作为数字图像取证技术的一个主要议题正扮演着重要的角色。在过去不到十年的时间里, 国内外学者提出各种方法来实现数字图像来源取证。Kharrazi 等<sup>[1]</sup>提取颜色、图像质量和小波系数共 34 个统计特征对图像的来源进行分类识别。Popescu 等<sup>[2]</sup>通过最大期望 (Expectation-Maximization, EM) 算法检测在数码相机成像过程中由彩色滤波阵列 (Color Filter Array, CFA) 插值所引入了的周期相关性, 并进行插值取证。Lukas 和 Fridrich 等<sup>[3-4]</sup>提出利用成像传感器模式噪声 (Photo-Response Non-Uniformity, PRNU) 来识别数码相机。模式噪声由成像传感器的非均匀性和不完美性所导致, 它是成像设备的内部固有特性, 对指定的成像设备具有相对稳定性和唯一性, 因此将其称为“机器指纹”或“机器印痕”, 在图像来源取证中具有明显的优势。

目前, 对模式噪声的提取主要采用文献[3]中设计的小波维纳滤波器。将原始图像减去其低通滤波之后的图像得到残留噪声图像, 将多幅残留噪声图像进行平均作为模式噪声的近似。该方法虽然具有简单、计算量小等优点, 但小波滤波法得到的残留噪声图像包含大量的场景噪声。文献[4]利用最大似然估计法从多幅残留噪声图像对模式噪声进行了更为

精确的估计。Li<sup>[5]</sup>利用非线性模型来实现对模式噪声的增强和场景噪声的抑制。文献[6]提出了一种利用成像传感器模式噪声的主分量信息进行源相机识别的方法。小波变换虽然能对一维信号的点奇异进行最优表示, 但不能很好地刻画二维图像中的线奇异。Zhang<sup>[7-8]</sup>采用基于 Curvelet 变换的硬阈值去噪法进行模式噪声的提取, Curvelet 变换的多尺度几何特性, 使得该方法对边缘复杂的图像能很好地进行模式噪声信息的提取。

本文针对小波变换在表达二维图像上的缺陷和小波维纳滤波法在提取模式噪声上的不足, 从另一著名的多尺度几何变换——非抽样 Contourlet 变换 (Nonsubsampled Contourlet Transform, NSCT) 出发, 设计 NSCT 局部自适应软阈值去噪法进行模式噪声的提取。该方法首先对图像进行 NSCT, 接着对得到的 NSCT 系数进行局部自适应预测处理, 最后对预测系数进行 NSCT 反变换得到去噪图像。实验通过对模式噪声的估计和 Neyman-Pearson 准则对阈值的计算, 与文献[3]中的小波滤波法相比, 本文设计的滤波器具有更小的漏检率 (False Rejection Ratio, FRR) 和更高识别率。

## 1 模式噪声与图像来源识别

### 1.1 模式噪声估计

数码相机成像的一般过程如图 1 所示, 主要包括镜头系

收稿日期: 2011-07-15; 修回日期: 2011-09-15。

**作者简介:** 陈宗民 (1986-), 男, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字图像取证; 周治平 (1962-), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士, 主要研究方向: 数字图像取证、视频信号处理、模式识别。

统、彩色滤波阵列 (CFA)、成像传感器 (如光电耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD)、CFA 插值模块以及数字图像处理模块 (Digital Image Processor, DIP), 其中成像传感器是整个数码相机核心也是最为昂贵的部分。

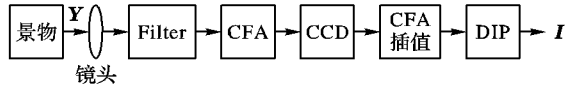


图1 数码相机成像过程

不同型号的数码相机的各个组成部分可能存在差异, 但对每一颜色分量图像  $I$  可近似描述<sup>[4]</sup> 为:

$$I = g^\gamma \cdot [(1 + K)Y + A]^\gamma + Q \quad (1)$$

其中:  $I$  为数码相机输出的二维图像,  $g$  和  $\gamma$  为增益系数和 gamma 校正系数,  $Y$  为入射光图像,  $K$  则表示传感器的模式噪声系数矩阵,  $A$  为其他噪声源的综合 (包括暗电流噪声、读出噪声和激发噪声等),  $Q$  则表示由量化和 JPEG 压缩等引入的噪声, 运算符  $\cdot$  表示矩阵的元素相乘。将式 (1) 展开, 并取其 Taylor 展开式的前两项得

$$I = (gY)^\gamma \cdot [1 + K + A/Y]^\gamma + Q = (gY)^\gamma \cdot (1 + \gamma K + \gamma A/Y) + Q = I^{(0)} + I^{(0)} K_1 + \theta \quad (2)$$

其中:  $I^{(0)}$  是理想的无噪输出,  $K_1 = K \cdot \gamma$  是模式噪声项,  $\theta$  为各种随机噪声的综合。则根据最大似然估计法可得到模式噪声的估计为

$$\hat{K}_1 = \frac{\sum_{k=1}^d W_k I_k}{\sum_{k=1}^d (I_k)^2} \quad (3)$$

其中  $I_k (k = 1, 2, \dots, d (d \geq 50))$  是数码相机的  $k$  幅输出,  $W_k$  为图像  $I_k$  的残留噪声图像,

$$W_k = I_k - \hat{I}_k^{(0)} \quad (4)$$

其中  $\hat{I}_k^{(0)} = F(I_k)$ , 即采用去噪滤波器  $F$  对图像  $I_k$  进行去噪处理得到的无噪输出图像  $I_k^{(0)}$  的估计。对彩色图像可以得到对应于各颜色分量的模式噪声  $K_R, K_G, K_B$ 。

## 1.2 图像来源识别

为了验证彩色图像  $p$  是否由相机  $C$  拍摄, 首先对图像的各颜色分量进行去噪处理得到残留噪声  $W_R, W_G, W_B$ 。计算残留噪声与相机  $C$  的模式噪声之间的相关系数:

$$\rho_i = \text{corr}(W_i, K_i) = \frac{(W_i - \bar{W}_i) \cdot (K_i - \bar{K}_i)}{\|W_i - \bar{W}_i\| \|K_i - \bar{K}_i\|}; i = R, G, B \quad (5)$$

其中:  $\bar{W}_i$  和  $\bar{K}_i$  分别为  $W_i$  和  $K_i$  的均值, 则总的相关系数为  $\rho = (\rho_R + \rho_G + \rho_B)/3$ 。根据文献[3], 残留噪声与相机模式噪声之间的相关系数服从广义高斯分布:

$$f(\rho; \alpha, \beta) = \left[ \frac{\beta}{2\alpha\Gamma(1/\beta)} \right] \exp(-(|\rho|/\alpha)^\beta) \quad (6)$$

模型的参数可采用最大似然估计法和矩估计法进行估计。通过 Neyman-Pearson 假设检验算法, 在设置适当的虚警率 (False Acceptance Ratio, FAR) 下, 选择使得漏检率 (FRR) 最小的相关系数阈值  $t$ , 则当  $\rho > t$  时就判断图像  $p$  由相机  $C$  拍摄得到。

由于模式噪声是由 CCD 中各像素点的光照响应不均匀性引起的, 其本质是一种扩频信号, 且具有非常小的值。从式 (3) 和 (5) 可以看出去噪结果的好坏直接影响到模式噪声的估计和相关系数的计算, 如果残留噪声  $W$  中含有较大的场景

噪声, 则对模式噪声的估计和相关系数的计算将非常不利。另外, 由于小波变换在表达二维图像上的不足, 小波滤波器往往会在图像的边缘和纹理等细节地带留下明显的场景噪声。本文将采用一种“真正”的二维图像表示法 NSCT, 设计基于 NSCT 的滤波器来实现对场景噪声的抑制。

## 2 NSCT 与 NSCT 滤波器设计

### 2.1 NSCT

针对小波变换在表达二维图像时的非最优性以及缺乏多方向几何信息等缺点, 近年来人们提出了 Ridgelet 变换、Curvelet 变换、Contourlet 变换等一系列多尺度几何分析工具。Do 和 Vetterli 提出了一种“真正”的二维图像表示法 Contourlet 变换<sup>[9]</sup>, 它使用比小波变换更少的系数来表达光滑的曲线。Contourlet 变换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。由于 LP 和 DFB 中的下采样和上采样, Contourlet 变换不具有平移不变性, 使得去噪之后的图像存在明显的伪 Gibbs 现象, 为此 Cunha 和 Do 又给出了 NSCT<sup>[10]</sup>。NSCT 是基于非下采样塔式分解 (Nonsubsampled Pyramid, NSP) 和非下采样方向滤波器组 (Nonsubsampled Directional Filter Banks, NSDFB) 的一种变换。首先由 NSP 对输入图像进行塔式分解, 把原始图像分解为低频子带和高频子带。高频子带再经过 NSDFB 分解为多个方向子带来捕获图像中的多方向信息, 而低频子带则继续进行如上分解以实现多尺度分析。图 2(a) 为高频子带的 NSDFB 分解示意图, 图 2(b) 为二级 NSCT 示意图。

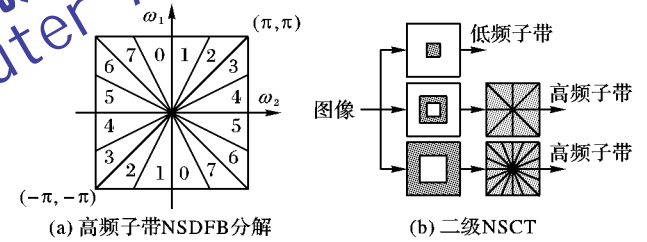


图2 高频子带 NSDFB 分解与二级 NSCT 示意图

### 2.2 NSCT 局部自适应软阈值去噪滤波器设计

根据式 (2), 数码相机的输出图像可以看成是原始无噪图像和服从  $N(0, \sigma_0^2)$  高斯白噪声的叠加。本文设计 NSCT 局部自适应软阈值去噪法对输出图像进行去噪处理。首先对图像  $I$  进行 NSCT 得到 NSCT 系数  $c(i, j, k)$ , 采用 5 层 NSCT, 按照从粗尺度到细尺度的顺序, 方向子带数依次为 4, 8, 8, 16, 16。接着对系数  $c(i, j, k)$  进行软阈值处理得到无噪图像的 NSCT 系数估计, 软阈值函数为

$$\hat{c}(i, j, k) = \text{sgn}(c(i, j, k)) \cdot \max(|c(i, j, k)| - T_{i,j}, 0) \quad (7)$$

其中自适应局部贝叶斯阈值如下所示:

$$T_{i,j} = \sigma_{N_{i,j}}^2 / \sigma_{i,j,k} \quad (8)$$

$\sigma_{N_{i,j}}^2$  是尺度  $i$ 、方向  $j$  高频子带的噪声方差,  $\sigma_{i,j,k}$  是尺度  $i$ 、方向  $j$  高频子带中第  $k$  个系数的标准差。根据文献[4]选取噪声标准差  $\sigma_N = 2$ , 由于 NSCT 的非正交性, 不同方向子带的噪声方差不相同, 故本文采用 Monte Carlo 算法<sup>[11]</sup> 获取各尺度各方向子带的噪声方差。每个高频方向子带系数的标准差  $\sigma_{i,j,k}$  采用局部自适应进行估计:

$$\hat{\sigma}_w(i, j, k) = \max\left(0, \frac{1}{w^2} \sum_{k' \in Z} c^2(i, j, k') - \sigma_{N_{i,j}}^2\right) \quad (9)$$

其中:  $w$  为窗口尺度,  $Z$  为窗口所包含的邻域系数。为了实现

对窗口尺度的自适应,根据文献[12],本文选取  $w \in \{3, 5, 7, 9\}$ , 最终的系数估计方差  $\hat{\sigma}^2(i, j, k)$  为

$$\hat{\sigma}^2(i, j, k) = \min(\sigma_3^2(i, j, k), \sigma_5^2(i, j, k), \sigma_7^2(i, j, k), \sigma_9^2(i, j, k)) \quad (10)$$

最后对系数  $\hat{c}(i, j, k)$  进行 NSCT 反变换得到去噪图像  $F(I)$ 。

图3(a)是来自 Nikon S220 的样本, (b) 和 (c) 是分别采用本文设计的 NSCT 去噪方法和文献[3]的小波去噪方法得到的残留噪声图像, 图像的显示范围为  $[0, 5]$ 。从图3(b)与(c)的比较中可以看出, NSCT 去噪法提取的残留噪声比小波去噪法小得多, 特别是在屋顶的纹理和边缘等细节地带景物噪声得到了明显的抑制。另外, 由于 NSCT 是一种平移不变变换, 因此不需要如文献[8]中对图像进行 Cycle-Spinning 操作。对一幅  $512 \times 512$  图片的行和列分别进行 5 次平移, 并采用文献[8]中的方法进行去噪所需要的时间大约为 270 s, 而本文算法的运行时间约为 190 s (运行环境为: Intel Core2 Dou, 2 GB 内存, Matlab2009a), 这样降低了去噪过程中的运算复杂度。

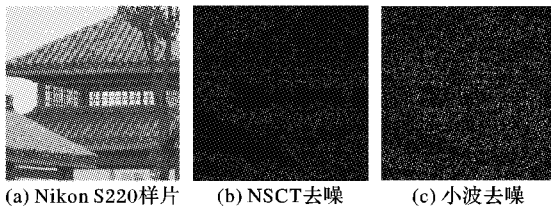


图3 残留噪声图像对比

### 3 实验与讨论

实验采用 Nikon S220、Canon IXUS950 和 Olympus FE360 三种数码相机拍摄的共 750 张照片, 拍摄时采用自动聚焦和最大分辨率。为了使照片的大小一致, 同时降低实验的运算

量, 将每一幅照片沿中心裁剪为  $512 \times 512$  的图片, 共形成 750 幅实验样本。随机选取各相机的 50 张样本用于相机模式噪声的提取, 剩余的 200 张作为测试样本。

对所有的实验样本分别采用本文设计的 NSCT 滤波器、小波滤维纳滤波器和文献[8]中的 Curvelet 硬阈值去噪滤波器进行残留噪声的获取。通过式(3)和(5)计算各数码相机模式噪声和各测试样本的残留噪声与模式噪声的相关系数。表1列出了来自 Nikon S220 的 10 幅测试样本在三种不同滤波器下与 Nikon S220、Canon IXUS950 和 Olympus FE360 三种数码相机的模式噪声之间的相关系数。从表1可以看出测试样本与 Nikon S220 相机的模式噪声之间的相关系数最大, 因此可以判定这 10 幅测试样本由 Nikon S220 相机拍摄得到。且从表中还可以看出, 通过 NSCT 滤波器得到的相关系数比通过小波滤波器得到的相关系数高, 因此可以认为 NSCT 滤波器对残留噪声中的场景噪声进行了抑制, 所提取残留噪声更能反映与之对应的数码相机的模式噪声特性。从表的第2列和第8列可以看出, 由于 Curvelet 滤波器中的硬阈值处理和伪 Gibbs 现象的存在, 得到的相关系数比 NSCT 滤波器略低。

利用最大似然估计法对数码相机  $C(C = 1, 2, 3)$  的测试样本与数码相机  $C_0(C_0 = 1, 2, 3)$  的模式噪声间的广义高斯相关系数分布的参数进行估计。采用 Neyman-Pearson 准则确定各数码相机的判定阈值。表2为在设定  $FAR = 10^{-3}$  下, 各数码相机判定阈值  $t_{FRR}$  以及对应的测试集识别率。从表2可以看出由于 NSCT 具有更好的边缘表达能力和平移不变特性, 在相同的 FAR 下 NSCT 滤波器比小波滤波器具有更小的 FRR, 且与小波滤波器相比, 对三种数码相机 Nikon S220、Canon IXUS950 和 Olympus FE360 的识别率分别提高了 3.5、2.5 和 5 百分点。平均识别率比小波滤波器和 Curvelet 滤波器分别提高了 3.667 和 1.167 百分点。

表1 三种滤波器下 Nikon S220 10 幅测试样本与各相机模式噪声间相关系数

N	NSCT 滤波器			小波维纳滤波器			Curvelet 硬阈值去噪滤波器		
	Nikon S220	Canon IXUS950	Olympus FE360	Nikon S220	Canon IXUS950	Olympus FE360	Nikon S220	Canon IXUS950	Olympus FE360
1	0.0580	-0.00023	-0.00188	0.0529	-0.00171	-0.00048	0.0546	-0.00013	0.00153
2	0.0530	0.00046	0.00102	0.0503	-0.00100	0.00122	0.0517	-0.00047	0.00202
3	0.0451	0.00034	0.00025	0.0442	-0.00181	-0.00059	0.0446	0.00135	-0.00005
4	0.0341	-0.00002	-0.00021	0.0331	-0.00028	0.00094	0.0353	-0.00012	-0.00019
5	0.0498	0.00026	-0.00083	0.0496	0.00115	0.00094	0.0496	-0.00106	-0.00183
6	0.0531	0.00017	-0.00188	0.0529	0.00021	-0.00412	0.0549	0.00037	-0.00272
7	0.0534	-0.00052	0.00044	0.0498	-0.00336	-0.00023	0.0521	-0.00042	-0.00009
8	0.0296	0.00003	0.00099	0.0290	0.00129	-0.00042	0.0287	0.00103	0.00320
9	0.0519	-0.00073	-0.00072	0.0468	-0.00004	-0.00125	0.0515	0.00053	-0.00158
10	0.0231	-0.00028	-0.00062	0.0222	0.00155	0.00005	0.0233	-0.00058	-0.00317

表2  $FAR = 10^{-3}$  下各数码相机的判定阈值  $t_{FRR}$  和识别率

相机	NSCT 滤波器			小波维纳滤波器			Curvelet 硬阈值去噪滤波器		
	$t$	FRR	识别率/%	$t$	FRR	识别率/%	$t$	FRR	识别率/%
Nikon S220	0.0092	$8.7 \times 10^{-4}$	95.5	0.0081	$3.2 \times 10^{-3}$	92.0	0.0070	$9.3 \times 10^{-4}$	95.5
Canon IXUS950	0.0104	$1.2 \times 10^{-2}$	98.0	0.0116	$2.6 \times 10^{-2}$	95.5	0.0096	$1.6 \times 10^{-2}$	96.0
Olympus FE360	0.0158	$7.0 \times 10^{-3}$	97.0	0.0183	$5.4 \times 10^{-2}$	92.0	0.0175	$6.8 \times 10^{-3}$	95.5

### 4 结语

本文根据小波变换在表达二维图像上的不足, 以及小波维纳滤波器在提取模式噪声上的缺陷, 从多尺度几何变换 NSCT 出发, 设计基于 NSCT 域的局部自适应软阈值去噪法进

行模式噪声的提取。实验表明, NSCT 滤波器所获取的残留噪声图像中, 场景噪声得到了明显地抑制, 且与经典的小波维纳滤波器相比, 在相同的 FAR 下具有更小的 FRR 和更高的识别率。

(下转第 513 页)



原始算法的检测精度,也去除了大部分噪声。

用训练的SOM网络对Peppers图像进行边缘检测的结果如图4所示。

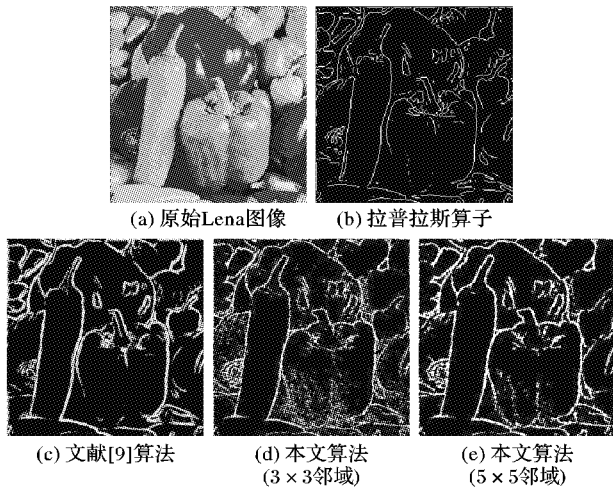


图4 Peppers 图像的边缘检测结果对比

从对实际图像的处理结果来看,本文方法具有较强的细节保持能力,与文献[9]及经典边缘检测算法相比,能更有效地检测各种边缘,并且具有较好的稳定性。

#### 4 结语

本文提出了一种新的基于四元数Cauchy积分公式和自组织映射神经网络的彩色图像边缘检测方法。该方法根据边缘点的分布特征和四元数Cauchy积分公式构造了四元数特征向量,结合了图像颜色的各个分量之间的相关性,提取出的边缘更符合人眼视觉特征。而且算法结合了神经网络,以图像的四元数特征向量作为样本对SOM网络进行训练,然后将训练完成的SOM网络直接用于边缘检测,避免了通常边缘检测方法中需设定阈值的缺点,基于SOM网络的容错性也可进一步增强抗噪性能。同时在网络训练时,不必进行人为的干预,因此训练后的网络可靠性更好,所提取出的边缘更准确。与传统的边缘检测算子相比,该方法能更完整地保留原彩色

图像的细节边缘。

#### 参考文献:

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [2] SUDBERY A. Quaternionic analysis[J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1979, 85(2): 199-225.
- [3] SANGWINE S J. Colour image edge detector based on quaternion convolution[J]. Electronics Letters, 1998, 34(10): 969-971.
- [4] EVANS C J, SANGWINE S J, ELL T A. Colour-sensitive edge detection using hypercomplex filters[C]// EUSIPCO 2000: Proceedings of the Tenth European Signal Processing Conference. Tampere, Finland: [s. n.], 2000, 1: 107-110.
- [5] 刘伟. 八元数及Clifford代数在数字图像处理中的应用[D]. 广州: 华南师范大学, 2010.
- [6] XU JIANGYAN, YE LINNING, LUO WANG. Color edge detection using multiscale quaternion convolution[J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2010, 20(4): 354-358.
- [7] 王建, 刘立, 王天慧. 基于四元数特定颜色对边缘检测的车牌定位[J]. 计算机应用, 2011, 31(3): 729-732.
- [8] 郎方年, 周激流, 闫斌, 等. 四元数与彩色图像边缘检测[J]. 计算机科学, 2007, 34(11): 212-216.
- [9] 张晶, 张权, 王欣. 一种新的基于统计向量和神经网络的边缘检测方法[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(5): 920-926.
- [10] 王保平, 刘升虎, 张家田, 等. 一种基于模糊熵和FKCN的边缘检测方法[J]. 计算机学报, 2006, 29(4): 664-669.
- [11] ZHOU JIANG, SUN YU, ZHENG JIANGUO. Automated color image edge detection using improved PCNN model[J]. WSEAS Transactions on Computers, 2008, 7(4): 184-189.
- [12] 陈鹏光. 基于各类高维解析函数特征的BP网络及其应用[D]. 广州: 华南师范大学, 2010.
- [13] 朱大奇, 史慧. 人工神经网络原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] LIN J-S, TSAI C-T, LEE J-S. An annealed chaotic competitive learning network with nonlinear self-feedback and its application in edge detection[J]. Neural Processing Letters, 2001, 13(1): 55-69.

(上接第509页)

#### 参考文献:

- [1] KHARRAZI M, SENCAR H T, MEMON N. Blind source camera identification [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2004, 1: 709-712.
- [2] POPESCU A C, FARID H. Exposing digital forgeries in color filter array interpolated images [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3948-3959.
- [3] LUKAS J, FRIDRICH J, GOLJAN M. Digital camera identification from sensor pattern noise [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2006, 1(2): 205-214.
- [4] FRIDRICH J. Digital image forensics [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(2): 26-37.
- [5] LI C-T. Source camera identification using enhanced sensor pattern noise [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2009: 1509-1512.
- [6] 胡永健, 俞兵华, 简超. 利用模式噪声主分量信息的源相机辨识技[J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 31-35.
- [7] ZHANG C, ZHANG H B. Digital camera identification based on curvelet transform [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2009: 1389-1392.
- [8] ZHANG C, ZHANG H B. Identifying color image origin using curvelet transform [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE, 2010: 2125-2128.
- [9] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [10] da CUNHA A L, ZHOU J P, DO M N. The nonsubsampled contourlet transform: Theory, design, and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [11] PO D D Y, DO M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1610-1620.
- [12] KIVANC MIHCAK M, KOZINTSEV I, RAMCHANDRAN K. Spatially adaptive statistical modeling of wavelet image coefficients and its application to denoising [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 1999, 6: 3253-3256.