

一种小波域自适应鲁棒闭环数字盲水印技术

张 力¹, 韦 岗², 张基宏¹

(1. 深圳大学信息工程学院, 广东深圳, 518060; 2. 华南理工大学电子与通信工程系, 广东广州, 510641)

摘 要: 本文提出了一种基于小波域的闭环自适应图像鲁棒数字盲水印技术. 水印的嵌入过程是一个闭环过程, 且其嵌入的位置及强度均与原始图像有关. 水印嵌入的初始强度由小波域图像压缩的量化因子决定, 并根据检测要求不断的进行调整, 从而达到水印的最佳嵌入. 本文证明了这种闭环系统的收敛性, 并且给出了水印检测过程中正确检测概率和虚警检测概率的求解公式, 可用于闭环系统的检测性能判决条件. 水印的检测过程中不需要任何原始图像和原始水印信号的信息, 采用独立分量分析实现对水印信号的盲检测. 检测过程中不仅可以检测到水印的存在, 而且可以提取出嵌入到图像中的多个水印信号. 实验结果证实了本文提出的闭环自适应数字盲水印技术优于传统的自适应水印技术, 水印检测过程中在不需要考虑水印图像所经历的攻击类型及攻击参数的情况下可以正确的提取水印信号. 本文提出的水印算法对通用水印测试软件 *Stirmark* 具有很好的鲁棒性.

关键词: 自适应闭环水印技术; 盲检测; 独立分量分析

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 10-1472-05

A New Adaptive Closed Loop Robust Blind Image Digital Watermarking in Wavelet Domain

ZHANG Li¹, WEI Gang², ZHANG Jizhong¹

(1. Faculty of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

2. Dept. of Electronics and Communication Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract: A new adaptive closed loop robust blind image digital watermarking technique in wavelet domain is proposed. The embedding process is modified according to the results of the performance analysis of watermarking. If the watermark can not meet the requirements or the embedded watermark renders visual artifact, the embedded intensity of watermark is modified so as to obtain the optimal embedding effect. The convergence of the closed loop techniques is proved. The probabilities of false alarm and detection are also given which are used as the performance measures of the closed loop system. The watermark detection process adopt independent component analysis and do not need any information about original image and original watermark and can extract not merely detect the perfect watermarks embedded. Experimental results show that this adaptive closed loop robust blind watermarking performs better than the traditional adaptive watermarking. The method proposed in this paper has a good robustness to the popular watermark test software *Stirmark*.

Key words: adaptive closed loop watermarking system; blind detection; independent component analysis

1 引言

数字图像水印技术是指在图像中加入特定的信息用以实现版权保护和信息安全, 嵌入图像中的水印应满足两个基本要求: 水印必须是视觉上不可视的, 同时水印应对通常的图像处理操作以及有意或无意的攻击具有一定的鲁棒性. 关于数字水印技术的文献已有很多包括空间域^[1,2]和变换域^[3-5]的水印技术. 由于图像的小波变换能够很好的匹配人类视觉系统的特性^[6], 还可以与 JPEG2000 标准相兼容, 因此小波域数字水印技术具有很好的应用前景^[7-9].

独立分量分析 (Independent Component Analysis, 简称 ICA) 是近年来由信源分离技术发展起来的智能信息处理方法, 用 ICA 实现盲源分离成为信号处理中的热点问题^[10]. 本文将其应用水印盲检测过程中, 提出了一种闭环自适应鲁棒盲水印技术, 水印的嵌入是一个闭环过程且嵌入的位置与强度均与原始图像有关. 初始水印嵌入强度由小波域图像压缩模型的量化因子决定, 并且根据性能检测的要求进行相应调整. 本文证明了这种闭环水印过程具有收敛性, 并给出了水印检测过程中正确检测概率或虚警检测概率的求解公式, 可用于闭环水印技术的判决条件. 水印检测过程中采用 ICA 技术实现水

印盲检测,在不需任何原始图像和原始水印以及攻击信息的情况下不仅可以检测到水印而且可以提取水印,实验结果证明了本文提出的水印技术对 *Stirmark* 具有很好的鲁棒性.

2 闭环自适应鲁棒盲水印算法

2.1 水印嵌入过程

传统的小波域自适应水印算法^[11]从系统结构的角度上讲是一个开环系统,如图 1 所示.水印嵌入的强度和位置与原始图像的性质有关,但是为了保证水印嵌入的不可见性,水印嵌入的强度不一定能够达到最佳嵌入.在对检测性能具有特殊的要求的场合中,无法确定水印后图像能否达到最优.

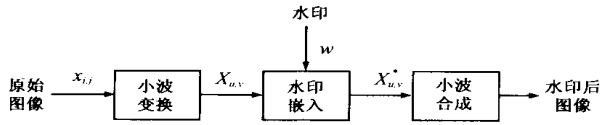


图 1 传统的小波域自适应水印技术

本文提出的水印技术嵌入过程是一个闭环过程如图 2 所示.进行初始水印嵌入后判断水印的嵌入是否影响图像的显示质量,如果没有影响图像的显示质量则对水印过程进行性能分析.水印的不可见性、鲁棒性和正确检测是数字水印技术的主要性能,这些性能可以通过原始图像与水印后图像之间的峰值信噪比以及正确检测概率和虚警概率来表示.如果性能分析结果不能满足一定的要求(如规定的正确检测概率的值或者虚警检测概率的值),则对嵌入水印的强度进行调整,直到满足检测性能为止.如果水印嵌入的强度已经影响了图像的视觉质量则减少水印嵌入的强度,从而使自适应水印过程在特定的要求下达到最优.

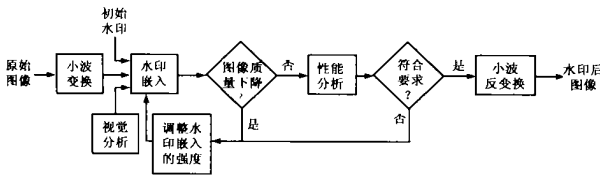


图 2 小波域闭环自适应水印技术

下面介绍本文提出的水印技术嵌入过程的具体实现步骤:

Step 1 水印信号的产生.水印采用的是 $\{-1, 1\}$ 上均匀分布序列.

Step 2 对原始图像作小波变换并进行初始嵌入强度 N_{w0} 的水印嵌入, N_{w0} 由 *Watson*^[12] 给出的显示视觉分辨率为 32 像素/弧度时不引起图像失真的图像亮度分量各级小波系数的量化因子得到.嵌入强度的初始调整步长为 q_0 , 可定义 $q_0 = QN_{w0}$, 其中 $0 < Q < 1$, 置 $k = 1$.

Step 3 判断水印的嵌入是否影响了图像的视觉质量,观察图像的视觉质量可以采用主观评价和客观评价两种方法,由于主观评价不能由机器自动完成,因此采用客观的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)对水印后的图像与原始图像的差别做出定量描述.

假定峰值信噪比的初始值为 $PSNR_0$, 为了保证水印嵌入

的不可见性,我们在实验中取 $PSNR_0 = 32$. 如果 $PSNR_k \setminus PSNR_0$, 则认为嵌入的水印是不可见的,否则认为水印的嵌入已经影响了图像的视觉质量.如果 $PSNR_k < PSNR_0$, 则寻找一个整数 $n_k > 0$, 使得如果水印嵌入的强度为 $N_{wk} = N_{wk-1} - n_k q_k$ 时嵌入的水印是可见的,而嵌入的强度为 $N_{wk} = N_{wk-1} - (n_k + 1) \# q_k$ 时嵌入的水印是不可见的.置 $q_k = Qq_{k-1}, k = k + 1$, 进行 Step 4.

如果 $PSNR_k \setminus PSNR_0$, 则寻找一个整数 $n_k > 0$, 使得如果水印嵌入的强度为 $N_{wk} = N_{wk-1} + n_k q_k$ 时嵌入的水印是不可见的,而嵌入的强度为 $N_{wk} = N_{wk-1} + (n_k + 1) q_k$ 时嵌入的水印是可见的.置 $q_k = Qq_{k-1}, k = k + 1$.

Step 4 为了判断水印能否正确的提取,需计算正确检测概率 p_d 和虚警概率 p_r . 假设 p_d 和 p_r 的初始值分别为 p_{d0} 和 p_{r0} , 根据具体的水印应用场合来确定.实验过程中我们取 $p_{r0} = 10^{-5}, p_{d0} = 0.99999$. 表 1 描述了概率与水印能否正确提取之间的关系.

表 1 概率与水印能否正确提取的关系表

$p_d \setminus p_{d0}$	$p_r \setminus p_{r0}$	水印能够正确提取
$p_d \setminus p_{d0}$	$p_r > p_{r0}$	水印信号不能正确提取
$p_d < p_{d0}$	$p_r > p_{r0}$	水印信号不能正确提取
$p_d < p_{d0}$	$p_r \setminus p_{r0}$	水印信号不能正确提取

若水印信号不能被正确提取则寻找一个整数 $m_k > 0$, 使得如果水印嵌入的强度为 $N_{wk} = N_{wk-1} + m_k Qq_{k-1}$ 时水印不能被正确提取,而如果水印嵌入的强度为 $N_{kw} = N_{wk-1} + Q(m_k + 1) q_k$ 时水印信号可以被正确提取.置 $q_k = Qq_{k-1}, k = k + 1$, 返回 Step 3.

如果嵌入的水印可以满足要求,即 $p_d \setminus p_{d0}$ 与 $p_r \setminus p_{r0}$ 则寻找一个整数 $m_k > 0$, 使得水印嵌入的强度为 $N_{kw} = N_{wk-1} - Qm_k q_k$ 时水印信号可以被正确提取,而嵌入的强度为 $N_{kw} = N_{wk-1} - Q(m_k + 1) q_k$ 时水印信号不能被正确的提取.

Step 5 N_{wk} 就是最终不可见水印嵌入的强度,进行小波合成得到水印后的图像.

当 k 为偶数时, N_{wk} 可表示为:

$$N_{wk} = N_{w0} - \sum_{i=0}^{k/2} Q^{(i-1)} q_0 ((n_{2i-1} + 1) - Q m_{2i-1} + 1) \quad (1)$$

$$N_{wk+1} - N_{wk} = Q^k q_0 (m_k + 1) \quad (2)$$

当 k 为奇数时, N_{wk} 可表示为:

$$N_{wk} = N_{w0} - \sum_{i=0}^{(k-1)/2} Q^{(i-1)} q_0 ((n_{2i-1} + 1) - Q m_{2i-1} + 1) - Q^k q_0 (n_k + 1) \quad (3)$$

$$N_{wk+1} - N_{wk} = -Q^k q_0 (n_k + 1) \quad (4)$$

由于 $0 < Q < 1$, 因此可以得到:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (N_{wk+1} - N_{wk}) = 0 \quad (5)$$

从式(5)可以得到下面的结论:图 2 表示的闭环水印技术是一个收敛的过程.

2.1.2 水印检测过程

本文中 *JCA* 技术用于水印检测过程中,使得水印检测

过程在无任何原始图像和原始水印以及攻击信息的情况下不仅可检测到水印而且可提取水印. 水印检测过程中 ICA 过程采用 FASTICA 方法^[3]实现. 水印检测过程的具体步骤如下:

Step 1 对待检测图像的预处理. 首先从图像中减去其均值, 即进行居中处理. 然后对居中后的信号进行白化处理得到不相关的单位方差信号, 以便于后续的独立分量分析.

Step 2 对居中和白化后的信号进行独立分量提取即寻找分离矩阵. 若图像中含有多个水印信号, 则在每次提取出一个独立分量时要减去这个分量之后进行下一个独立分量的提取, 从而提取出嵌入的所有水印信号.

Step 3 根据水印嵌入过程中相应的密钥恢复出水印信号.

3 水印算法的性能分析

由于水印的检测过程实际是一个严格的假设检测过程, 水印的检测过程可以通过假设检验来实现, H_0 : 假设待检测图像 Y 中不含有指定的水印 W , H_1 : 假设 Y 中含有 W , 即:

$$H_0: Y(i, j) = X(i, j) \quad (6)$$

$$H_1: Y(i, j) = X(i, j) + W(i, j)$$

采用原始水印 $w(n)$ 与提取水印 $wc(n)$ 之间的归一化相关函数 $\text{sim}(w, wc)$ 作为统计量:

$$\text{sim}(w, wc) = \left[\sum w(n)wc(n) \right] \sqrt{\sum w^2(n)} \sqrt{\sum wc^2(n)} \quad (7)$$

则正确检测概率定义为:

$$p_d = \text{Pr}\{\text{sim}(w, wc) \geq G | H_1\} \quad (8)$$

虚警概率定义为:

$$p_r = \text{Pr}\{\text{sim}(w, wc) \geq G | H_0\} \quad (9)$$

其中, G 为判决门限. 为了简化分析过程, 假设 $w(n)$ 和 $wc(n)$ 只取 -1 和 1, 所以 $w^2(n) = wc^2(n) = 1$. 定义: $k(n) = w(n)wc(n)$, 则 $\text{sim}(w, wc)$ 可表示为:

$$\text{sim}(w, wc) = \left[\sum w(n)wc(n) \right] \sqrt{N_w} = \sum k(n) / \sqrt{N_w} \quad (10)$$

由于 $k(n) \in \{-1, 1\}$, 则式(9)可以写为:

$$p_r = P \left\{ \sum_{n=1}^{N_w} k(n) > N_w G / \sqrt{N_w} \right\} \\ = \sum_{m=7N_w(G-1)/25}^{N_w} P \left\{ \sum_{n=1}^{N_w} k(n) = -N_w + 2m / H_0 \right\} \quad (11)$$

其中, $P \left\{ \sum_{n=1}^{N_w} k(n) = -N_w + 2m / H_0 \right\}$ 是指序列 $\{k(n)\}$ 包含 m 个 1 $N_w - m$ 个 -1 时的概率, 假设 $k(n) = -1$ 的概率为 p_0 , 则:

$$P \left\{ \sum_{n=1}^{N_w} k(n) = -N_w + 2m / H_0 \right\} \\ = \frac{N_w!}{m! (N_w - m)!} p_0^{N_w - m} (1 - p_0)^m \quad (12)$$

由于我们假设检测图像中不含有水印, 因此提取的水印信号 wc 可以认为是由一系列 $\{-1, 1\}$ 中独立均匀分布的值构成的, 因此 $p_0 = 0.5$, 由此可知:

$$p_r = \sum_{m=7N_w(G-1)/25}^{N_w} \frac{N_w!}{m! (N_w - m)!} 0.5^{N_w} \quad (13)$$

因此对于 p_r 有以下结论: 当检测门限 G 的值增加时, p_r

减小, 当 G 不变, 水印嵌入的强度 N_w 增加时, p_r 减小.

证明 当 G 的值增加时, p_r 减小的结论很容易证明, 下面证明当 G 不变, N_w 增加时, p_r 减小.

采用数学归纳法证明. 定义函数:

$$F(N_w) = \sum_{m=7(N_w+1)(G-1)/25}^{N_w+1} \frac{(N_w+1)!}{m! (N_w+1-m)!} 0.5^{N_w+1} \\ - \sum_{m=7N_w(G-1)/25}^{N_w} \frac{N_w!}{m! (N_w-m)!} 0.5^{N_w} \quad (14)$$

当 $N_w = 2$ 时, $F(2) = 0.25 - 0.5 < 0$ 成立. 假设 $N_w = k$ 时,

$$F(k) = \sum_{m=7(k-1)(G-1)/25}^{k-1} \frac{(k-1)!}{m! (k-1-m)!} 0.5^{k+1} \\ - \sum_{m=7k(G-1)/25}^k \frac{k!}{m! (k-m)!} 0.5^k < 0 \quad (15)$$

则 $N_w = k+1$ 时:

$$F(k+1) = \sum_{m=7(k+2)(G-1)/25}^{k+2} \frac{(k+2)!}{m! (k+2-m)!} 0.5^{k+2} \\ - \sum_{m=7(k+1)(G-1)/25}^{k+1} \frac{(k+1)!}{m! (k+1-m)!} 0.5^{k+1} \\ = \sum_{m=7(k+2)(G-1)/25}^{k+1} \frac{(k+2)!}{m! (k+2-m)!} 0.5^{k+2} \\ - \sum_{m=7(k+1)(G-1)/25}^k \frac{(k+1)!}{m! (k+1-m)!} 0.5^{k+1} \\ < \sum_{m=7(k+2)(G-1)/25}^k \frac{(k+2)!}{m! (k+2-m)!} \frac{k+1}{k+1-m} 0.5^{k+2} \\ - \sum_{m=7k(G-1)/25}^k \frac{k!}{m! (k-m)!} \frac{k+1}{(k+1)-m} 0.5^{k+1} \\ < \sum_{m=7(k+1)(G-1)/25}^{k+1} \frac{(k+1)!}{m! (k+1-m)!} 0.5^{k+1} \\ - \sum_{m=7k(G-1)/25}^k \frac{k!}{m! (k-m)!} 0.5^k < 0 \quad (16)$$

所以当 $N_w = k+1$ 时, $F(k+1) < 0$ 成立, 即当 G 一定时, 随着 N_w 的增大, p_r 相应减小.

下面推导正确检测概率 p_d 的求解公式. 在 H_1 假设下, 由强大数定理和中心极限定理可知: wwc 均值为 $E(wwc) = 1/3$; 方差为 $D(wwc) = 4/45$. 因此 $Z_c = [N_w \text{sim}(w, wc) - N_w/3] / \sqrt{4N_w/45}$ 服从正态分布 $N(0, 1)$, 由此可知, $\text{sim}(w, wc)$ 服从正态分布 $N\left(\frac{1}{3}, \frac{4N_w}{45}\right)$. 则 p_d 为:

$$p_d = P \{ \text{sim}(w, wc) > G / H_1 \} = \int_G^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(8PN_w)/45}} e^{-\frac{(t-1/3)^2}{4N_w/45}} dt \quad (17)$$

对于确定的 G , 当 N_w 增加时, p_d 的值增大.

4 实验结果

我们对本文提出的小波域自适应闭环鲁棒盲水印技术进行了实验. 闭环水印嵌入的初始强度与传统水印过程嵌入的量相同, 在实验过程中根据检测性能的要求不断的调整水印嵌入的强度. 对水印鲁棒性的测试采用的是通用水印测试软

件 Stirmark 实现的。

4.1 水印嵌入强度的比较

表 2 中给出了 4 中不同原始图像采用传统的水印过程与闭环水印过程得到的 PSNR 值、水印嵌入的强度, 从实验数据中可以看出闭环水印嵌入过程嵌入的水印强度明显比传统的水印过程嵌入的多。

表 2 传统水印与闭环水印的 PSNR 值及水印嵌入的强度

原始图像	lena	Woman	Camerman	Wbarb
传统 PSNR (db)	38.4003	34.1698	37.8886	34.6401
闭环 PSNR (db)	36.7779	33.3793	35.0728	32.6089
传统嵌入强度	4731	11320	5353	6000
闭环嵌入强度	6129	12378	8037	8140
循环次数(次)	23	17	32	25

4.2 水印算法对 JPEG 压缩的鲁棒性测试

表 3 本文提出的水印算法对 JPEG 压缩的鲁棒性, 其中 Q 为品质因数, PSNR 用于描述压缩后水印图像与原水印图像的

表 3 本文提出的水印算法对 JPEG 压缩的鲁棒性

Q 值	90	80	70	60	50	40	30	20	10
PSNR	72.8911	42.9237	41.4464	38.3789	36.9986	35.3863	34.1631	32.3656	29.4666
NC	0.9935	0.9929	0.9926	0.9911	0.9897	0.9803	0.9460	0.9303	0.8445

表 4 本文提出的水印算法对 Stirmark 的鲁棒性

攻击类型	中值滤波	卷积滤波	尺度变换 x1.0 y1.20	尺度变换 x0.75 y2.00	扭曲 x5.0% y10.0%	扭曲 x5.0% y5.0%	删 1 行 1 列	删 17 行 5 列	旋转 2 剪切 尺度变换 2.00
NC	0.9989	0.9237	0.9976	0.9901	0.9954	0.9977	0.9967	0.9958	0.7825

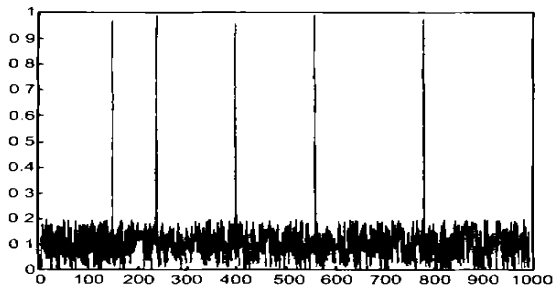


图 3 提取水印与原始水印之间的归一化相关函数

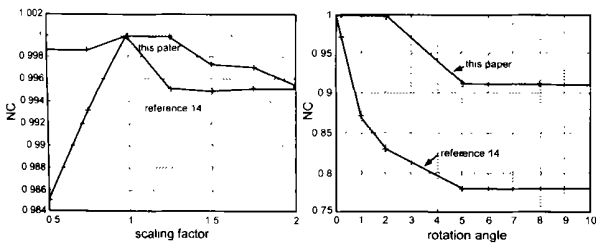


图 4 对尺度变换和几何攻击的比较实验

差别, NC 为提取的水印信号与原始水印之间的归一化相关函数, 由式(7)定义. 可以看出本文提出的水印算法对 JPEG 具有很好的鲁棒性。

4.3 水印算法对 Stirmark 攻击的鲁棒性测试

表 4 给出了本文提出的水印算法对 Stirmark 提供的攻击的鲁棒性, 由于在水印提取过程中不考虑任何关于水印攻击的信息, 因此这种水印算法对于 Stirmark 提供的攻击包括几何攻击都具有很好的鲁棒性。

4.4 水印算法对多个水印的鲁棒性测试

本文提出的水印算法可以正确提取多个嵌入的水印, 图 3 给出了提取的 5 个水印与随机生成的 1000 个水印(其中包括了 5 个原始水印)之间的归一化相关函数曲线, 可以看出水印算法对于多个水印嵌入的鲁棒性比较好。

4.5 水印算法鲁棒性与别的水印算法的比较

我们将本文提出的水印算法对于尺度变换和旋转等几何攻击的鲁棒性与文献[14]进行了比较实验, 文献[14]中采用的 ICA 的数字水印技术. 图 4 给出了比较结果, 说明本文提出的水印算法的鲁棒性能明显好。

5 结论

本文提出了一种小波域闭环自适应鲁棒盲数字水印技术. 根据对水印过程的检测性能分析的结果对水印嵌入的强度进行相应的调整, 在保证水印不可见的前提下达到最优嵌入, 证明了这种闭环系统的收敛性. 我们对于水印的检测性能进行了分析, 给出了正确检测概率和虚警检测概率的求解公式, 可作为闭环水印过程自动性能检测判决条件. 水印信号嵌入的初始强度由小波变换域图像压缩模型所决定, 并且根据检测性能分析结果以及不影响图像显示质量的要求下进行相应的调整, 尤其是在某些具有特殊要求的应用场合中, 可以做出最优水印嵌入. 水印检测过程中采用独立分量分析实现, 在水印的检测过程中不需要任何原始图像、原始水印和水印图像可能经历的各种攻击的信息, 不仅可以检测到水印信号, 而且可以提取水印信号, 实现了真正意义上的水印盲检测. 同时这种水印算法还可以提取嵌入图像中的多个水印信号. 实验结果证明, 本文提出的水印算法对 Stirmark 具有很好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] J F Delaigle, C De Vleeschouwer and B Macq. Watermarking algorithm based on a human visual model[J]. *Signal processing*, 1998, 66: 319-335.
- [2] 张春田, 苏育挺, 管晓康. 多媒体数字水印技术[J]. *通信学报*, 2000, 21(9): 46- 52.
- [3] Shelby Pereira and Thierry Pun. Robust template matching for affine resistant image watermarks[J]. *IEEE Trans. on Image Processing* 2000, 9(6): 1123- 1129.
- [4] 夏广升, 陈明奇, 杨义先, 胡正名. 基于模运算的数字水印算法[J]. *计算机学报*, 2000, 23(11): 1146- 1150.
- [5] 黄继武, Yun Q. Shi, 姚若河. 基于块分类的自适应图像水印算法[J]. *中国图像图形学报*, 1999, 4(8): 640- 643.
- [6] L Gaudart, J Crebassa, J P Petrakian. Wavelet transform in human visual channels[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(22): 4119- 4126.
- [7] 周亚训, 叶庆卫, 徐铁峰. 一个多分辨率的图像水印方案[J]. *电子科学学刊*, 2000, 22(6): 935- 943.
- [8] 牛夏牧, 陆哲明, 孙圣和. 基于多分辨率分解的数字水印技术[J]. *电子学报*, 2000, 28(8): 1- 4.
- [9] 李华, 朱光喜, 朱耀庭. 基于视觉特性和小波分解的数字水印隐藏方法[J]. *通信学报*, 2000, 21(6): 37- 41.
- [10] P Comon. Independent components analysis, a new concept? [J]. *Signal processing*, 1994, 36(3): 287- 314.
- [11] J R Hernandez, M Amado and F PerezGonzalez. DCI2domain watermarking techniques for still images: detector performance analysis and a new structure[J]. *IEEE Trans on Image Processing* 2000, 9(1): 55- 68.
- [12] Andrew B. Watson, Gloria Y. Yang, Joshua A. Solomon and John Vilelasensor. Visibility of wavelet quantization noise[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*. Vol. 6, No. 8, August 1997, 6(8)1164- 1170.
- [13] A Hyvarinen, E Oja. Independent component analysis: a tutorial[A]. *Notes for International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN. 99)*[C]. Washington D. C., <http://www.cis.hut.fi/projects/iaoc/>, July 1999.
- [14] D Yu, F Sattar, K K Ma. Watermark detection and extraction using independent component analysis method[J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2002(1): 92- 104.

作者简介:



张 力 女, 1973 年 9 月生于山东省莱西, 华南理工大学电子与通信工程系博士研究生, 主要研究方向为数字水印技术, 图像处理. Email: wzzlh@163.net

韦 岗 男, 1963 年 1 月生于广西省宜宾, 教授, 博士生导师, 国家自然科学基金委员会电子与信息学科评委, 主要研究方向为通信与信号处理, 神经网络等.

张基宏 男, 1964 年生于江苏南通, 博士, 深圳大学信息工程学院教授, 主要研究方向: 图像矢量编码、遗传算法等.