

# 基于 ICA 和 DWT 的自适应盲水印算法

赵 伟<sup>1</sup>, 陈仁安<sup>1</sup>, 张晓玲<sup>2</sup>, 游荣义<sup>3</sup>

(1. 集美大学诚毅学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门大学通信工程系, 福建 厦门 361005;  
3. 集美大学理学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了使数字水印具有较强的鲁棒性和不可见性, 提出一种基于独立分量分析 (ICA) 和离散小波变换 (DWT) 的自适应鲁棒性盲水印算法. 该算法先将载体图像进行小波变换, 然后将原始水印进行平铺和置乱, 再根据噪声可见函数 (NVF) 的视觉掩蔽作用, 将其自适应地嵌入到载体图像小波变换域的低频系数上, 最后利用 ICA 技术实现了水印盲提取. 实验结果表明, 该算法的水印不可见性较好, 且可抵抗多种常见水印攻击, 其中对 JPEG 压缩、尺度缩放等攻击的鲁棒性较突出, 可应用于图像的版权保护.

[关键词] 数字水印; 独立分量分析; 小波变换; 噪声可见函数

[中图分类号] TP 391

[文献标志码] A

## Adaptive Blind Watermarking Algorithm Based on ICA and DWT

ZHAO Wei<sup>1</sup>, CHEN Ren-an<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ling<sup>2</sup>, YOU Rong-yi<sup>3</sup>

(1. Chengyi College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to enhance the robustness and invisibility of digital watermarking, a new adaptive watermarking algorithm based on independent component analysis (ICA) and discrete wavelet transform (DWT) is proposed. The algorithm firstly decomposes the image into wavelet domain. Then the watermark is adaptive embedded into its low frequency coefficient, under the visual mask of noise visibility function (NVF), which has been rearranged by tiling extended and scramble before embedded. It realizes blind extraction by ICA. Experimental results show that the algorithm has good transparency and better robustness, especially in JPEG compression and resizing scale attacks. It can be applicable for digital image copyright protection.

**Key words:** digital watermarking; independent component analysis; wavelet transform; noise visibility function

## 0 引言

数字水印技术作为多媒体数据版权保护的有效手段, 近年来已成为多媒体信息处理和信息安全领域的研究热点<sup>[1-4]</sup>. 数字水印技术按水印的嵌入位置可分为空间域和变换域水印. 变换域算法由于其较好的鲁棒性和不可见性而受到青睐, 尤其是小波域算法. 数字水印技术按水印提取过程是否需要原始载体和水印参与, 可分为非盲水印、半盲水印和盲水印<sup>[1]</sup>. 盲水印算法由于其水印的提取不需要原始载体及水印参与而受到广泛的关注<sup>[5-10]</sup>.

[收稿日期] 2011 - 11 - 01

[修回日期] 2012 - 02 - 26

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2010J01210)

[作者简介] 赵伟 (1984—), 男, 硕士, 助理实验师, 从事图像处理及信息安全等研究.

独立分量分析(ICA)<sup>[6]</sup>是一种基于高阶统计量的盲源分离技术.它是在源信号和传输通道参数未知,且源信号满足一定假设的条件下,仅通过观测信号就可以分离出独立的源信号的一种信号处理技术,已广泛应用于特征提取、盲源分离及图像处理等领域.由于ICA技术的盲源分离模型与数字水印技术的嵌入/提取过程极为相似,同时ICA还具有良好特征提取性能,因此人们展开了诸多有效的基于ICA的数字水印算法研究<sup>[5-8]</sup>.文献[7]基于ICA的盲源分离特性,提出了一种具有良好的不可见性和鲁棒性的空域盲水印算法——WMICAL.该算法将提取水印所需要的辅助信息(公开图像)经过加密后放在公开的网络上,较好地解决了辅助信息的保管问题,但需存储和传输与载体图像大小相同的公开图像制约了该算法的推广应用.本文基于ICA的盲源分离特性,结合图像小波域低频分量能量不易丢失的特点,利用噪声可见函数的视觉掩蔽作用将置乱过的水印自适应地嵌入载体图像,以期实现水印的盲提取,且能较好地缓和公开图像的存储和传输问题.

## 1 独立分量分析

ICA的数学模型可描述为,假设 $n$ 个相互独立的源信号 $s = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ 经过线性系统 $A$ 混合后得到 $m$ 个观测信号 $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ .则源信号和观测信号之间满足关系式: $x = As$ ,其中 $A$ 是一个 $m \times n$ 的矩阵.ICA的目标是仅通过观测信号 $x$ ,就将未知的独立的源信号 $s$ 估计出来.即求解混矩阵 $B$ ,使得 $y = Bx = BA s = G s = \hat{s}$ 的各个分量尽可能地相互独立,并把 $y$ 作为源信号 $s$ 的估计.目前常用的ICA算法有SOBI、Informax算法、FastICA算法<sup>[5]</sup>等.本文水印提取过程采用具有较快收敛速度的FastICA算法来实现.

## 2 噪声可见函数

为了能够同时满足水印的鲁棒性和不可见性,使水印可自适应地嵌入到载体图像纹理区域中,本文采用Voloshynovskiy等人<sup>[11]</sup>提出的基于噪声可见函数的视觉感知模型.NVF是一种比较灵活的纹理掩蔽函数,能够反映图像中各像素对噪声的敏感程度.噪声可见函数最常用的形式为: $V(i, j) = 1/(1 + \theta \sigma_x^2(i, j))$ ,其中, $\theta$ 是调节因子,可由实验确定. $\sigma_x^2(i, j)$ 是以像素 $(i, j)$ 为中心的窗口内图像的局部方差,其中窗口的大小为 $2L+1$ .它们定义如下: $\sigma_x^2(i, j) = \sum_{m=-L}^L \sum_{n=-L}^L (x(i+m, j+n) - \bar{x}(i, j))^2 / (2L+1)^2$ , $\bar{x}(i, j) = \sum_{m=-L}^L \sum_{n=-L}^L x(i+m, j+n) / (2L+1)^2$ ,其中, $x(i, j)$ 表示坐标 $(i, j)$ 处图像的像素值.

## 3 基于ICA和DWT的自适应盲水印算法

本文提出了一种基于ICA和DWT的鲁棒性盲水印算法.载体图像经过小波变换后的能量大部分集中在低频系数上,因此在小波域的低频系数上嵌入水印,一方面可以提高水印的鲁棒性,另一方面可以减小水印提取时辅助信息的尺寸.为了提高水印系统的安全性和鲁棒性,水印在嵌入前先进行Arnold<sup>[6]</sup>置乱变换预处理.本文采用NVF视觉模型使得水印可以根据载体图像的纹理特性自适应地嵌入到载体图像中.

### 3.1 水印的嵌入

水印在NVF的视觉掩蔽下自适应地嵌入于载体图像之中,流程图如图1所示,步骤如下:

1) 对载体图像 $f$ 进行离散小波变换,其低频小波系数用 $I$ 表示,再对 $I$ 采用NVF量化得到视觉掩蔽矩阵 $V$ .

2) 水印预处理.先将水印图像 $s$ 平铺扩展成与 $I$ 大小相同的图像 $W_0$ (即用 $n$ 个 $s$ 铺满 $W_0$ ),再对其进行Arnold置乱变换得到 $W_1$ ,保存置乱频率 $k_f$ 用于还原水印,最后将 $W_1$ 按 $W = W_1 - \beta W_1 \cdot V$ 进行视觉掩蔽处理,得到可自适应嵌入于载体图像的水印 $W$ ,其中 $\beta$ 为掩蔽系数,“ $\cdot$ ”表示矩阵相应元素相乘.

3) 嵌入水印. 将水印  $W$  按式 (4) 嵌入到  $I$  中, 得到含水印的低频系数  $I^+$ , 经过逆小波变换即可获得含水印图像  $f^+$ , 其中  $\alpha$  表示水印的嵌入强度.

$$I^+ = I + \alpha W \quad (4)$$

4) 生成提取水印所需的辅助信息——公开图像  $K_p$ . 采用伪随机算法生成一个尺寸与  $I$  相同的随机数矩阵  $K$ , 再将  $I$  和  $K$  按式 (5) 混合得到  $K_p$ , 其中产生随机数矩阵的随机种子  $K_s$  可用作密钥, 用于再次产生  $K$ .

$$K_p = \gamma I + \lambda K \quad (5)$$

### 3.2 水印的提取

利用 ICA 技术实现水印的盲提取, 流程图如图 2 所示, 具体步骤如下:

1) 小波变换. 对嵌有水印图像  $f^+$  进行离散小波变换得到低频系数  $I^+$ .

2) 分离独立分量. 将密钥  $K_s$  通过与嵌入过程相同的伪随机算法, 得到随机数矩阵  $K$ , 并由公式 (4)、(5) 可知, 若将  $I^+$ 、 $K_p$ 、 $K$  视为 3 个观测信号, 写成矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} I^+ \\ K_p \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha & 0 \\ \gamma & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ W \\ K \end{bmatrix}. \quad (6)$$

显然, 这是一个标准的 ICA 问题, 因此可以利用 ICA 技术分离出独立分量  $I$ 、 $W$ 、 $K$ . 由于 ICA 存在分离结果在幅度和次序上的不确定性, 因此无法直接确定出分离结果  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$  与  $I$ 、 $W$ 、 $K$  的对应关系.

3) 从分离结果中识别出水印图像  $\hat{W}$ . 由相关性分析可知, 分离信号中与  $K$  的相关性最强的信号即为  $\hat{K}$ ; 同理, 剩余的两个信号中与  $I^+$  的相关性较强者为  $\hat{I}$ , 较弱者即为  $\hat{W}$ . 这里的相关性度量采用绝对值的归一化相关系数  $N_C$ .

4) 还原水印标志  $\hat{s}$ . 先利用置乱频率  $k_f$  对  $\hat{W}$  进行 Arnold 置乱还原, 再按  $\hat{s} = \sum_{i=1}^n \hat{s}_i/n$  进行平铺还原, 即可估计出原始水印  $\hat{s}$ .

## 4 仿真实验结果

为了验证本文算法的性能, 仿真实验在 MATLAB 7.0 环境下进行, 载体图像选用为 256 灰度级  $512 \times 512$  像素的标准测试图像 Lena、Baboon 和 Pepper, 原始水印采用像素的二值图像“数字水印”、大众 logo、“JMU”, 如图 3 所示. 实验通过调节嵌入强度  $\alpha$  和掩蔽系数  $\beta$  来控制含水印图像与载体图像的峰值信噪比 (PSNR)  $r_{PSN}$ , 以获取相应视觉质量的图像, 实验参数如表 1 所示. 实验采用二级离散小波变换, 其公开图像的大小为  $139 \times 139$  像素, 较文献 [7] 的  $512 \times 512$  像素大幅度地缩小, 较好地缓和了公开图像的存储和传输问题.

表 1 3 个实验的参数

Tab. 1 The configuration table for the three experiments

实验组 Expt group	$\alpha$	$\beta$	$\theta$	$\lambda$	$\gamma$	$L$	$r_{PSNR}/\text{dB}$
实验组 1 Expt1	0.29	0.95	1.6	0.82	-0.75	3	43.98
实验组 2 Expt2	0.21	0.99	1.6	0.82	-0.75	3	43.99
实验组 3 Expt3	0.40	0.95	1.6	0.82	-0.75	3	43.94

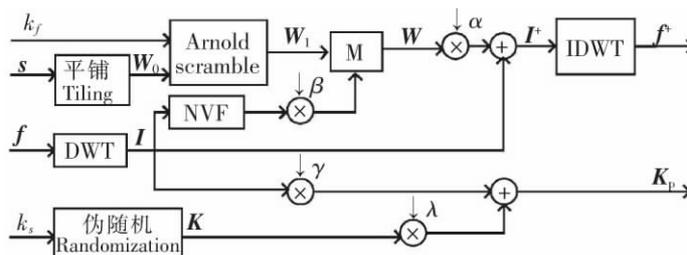


图 1 水印嵌入流程图

Fig.1 The process of embedding watermark

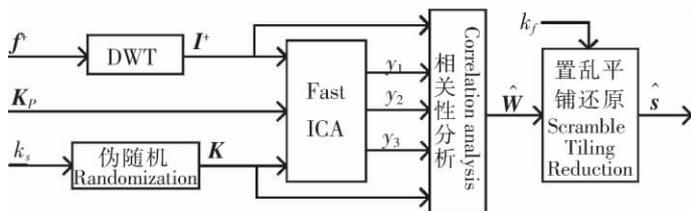
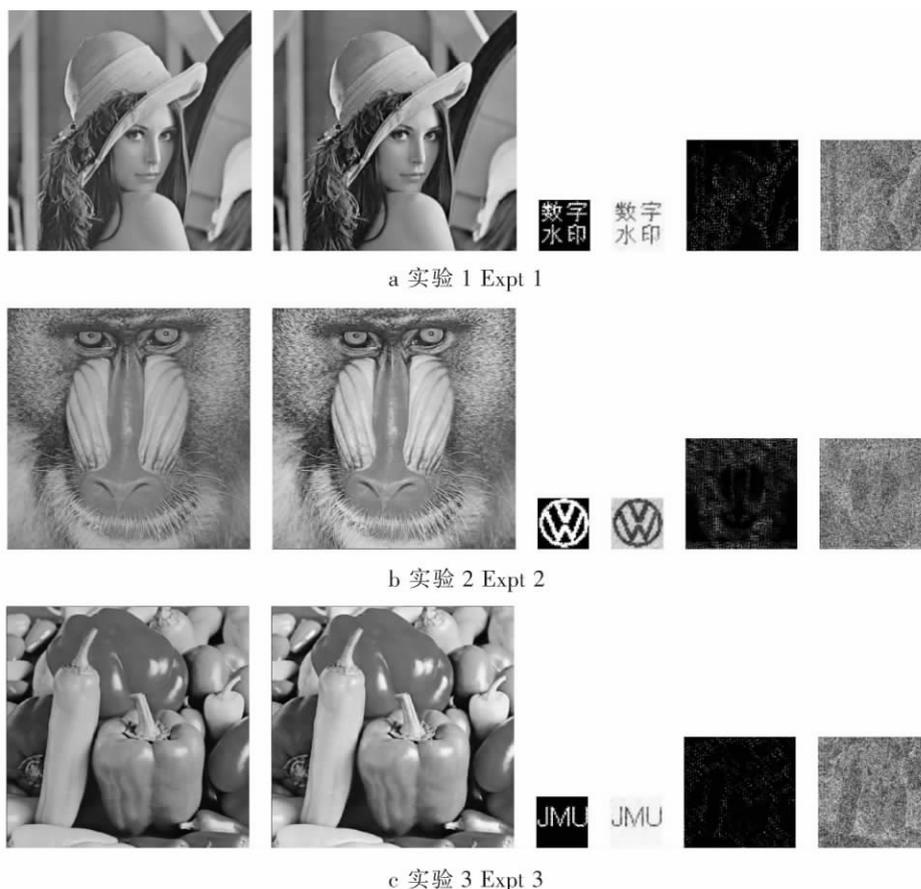


图 2 水印提取流程图

Fig.2 The process of extracting watermark



c 实验 3 Expt 3

说明: 从左到右依次为: 载体图像  $f$ , 嵌水印图像  $f'$ , 原始水印  $s$ , 提取水印  $s'$ , 自适应水印  $W$ , 公开图像  $K_p$ .

Notes: From left to right was original image  $f$ , watermarked image  $f'$ , original watermark  $s$ , extracted watermark  $s'$ , adaptive watermark  $W$ , public image  $K_p$ .

图 3 实验图像

Fig.3 The images used in experiments

由图 3 可知, 本文算法可将水印信息自适应地嵌入到载体图像的纹理区域之中, 从而使得含水印图像具有较高的主客观视觉质量. 实验采用常见图像处理方式对含水印图像进行攻击. 表 2 给出了采用本文算法提取所得水印及其与原始水印的相似度值. 笔者还将本文算法与文献 [7] 中性能较佳的 Expt2 实验数据在相同  $r_{PSN}$  值下进行比较, 结果如表 3 所示.

表 2 本文算法鲁棒性实验数据  
Tab.2 Watermark resisting attack experiments

攻击方式 Attack	攻击参数 Strength	$\hat{s}$	Expt1 $ N_c $	$\hat{s}$	Expt2 $ N_c $	$\hat{s}$	Expt3 $ N_c $
JPEG	20%		0.75		0.74		0.76
尺寸缩放 Resizing	50% (256 × 256)		0.91		0.83		0.92
灰度级量化 Gray - Scale reduction	16 level		0.88		0.88		0.89
高斯噪声 Gauss noise	(0 0.002)		0.69		0.72		0.71
椒盐噪声 Salt & pepper noise	0.005		0.77		0.78		0.78
中值滤波 median filter	3 × 3		0.84		0.58		0.85
均值滤波 mean filter	3 × 3		0.57		0.56		0.62

表 3 两种算法鲁棒性对比  
Tab.3 Robust performance comparison

攻击方式 Attack	参 数 Strength	Expt1   $N_c$	Expt2   $N_c$	Expt3   $N_c$	WMICAI Expt2   $N_c$
JPEG	70%	0.95	0.93	0.95	0.88
	50%	0.92	0.91	0.92	0.85
	30%	0.86	0.84	0.85	0.80
	20%	0.75	0.74	0.76	0.73
尺寸缩放 Resizing	75% (384 × 384)	0.97	0.93	0.96	0.78
	62.5% (320 × 320)	0.96	0.92	0.96	0.97
	50% (256 × 256)	0.91	0.83	0.92	0.58
	37.5% (192 × 192)	0.63	0.48	0.70	0.59
灰度级量化 Gray - Scale reduction	64 level	0.97	0.95	0.97	0.97
	32 level	0.95	0.93	0.95	0.95
	16 level	0.88	0.88	0.89	0.85
	8 level	0.60	0.69	0.67	0.58

从实验结果可以看出, 由于水印信息自适应地嵌入到载体图像小波变换域低频部分的纹理区域中, 因而水印具有较好的不可见性和较强的鲁棒性, 可有效抵抗各种常见图像处理及其攻击. 通过比较可知, 本文算法较文献 [7] 能够更好地抵抗住 JPEG 压缩、尺寸缩放、灰度级量化攻击, 而且公开图像的尺寸大幅度缩小, 可以较好地缓和公开图像的存储和传输问题.

### [参 考 文 献]

- [1] PATRA J C, PHUA J E, BORNAND C. A novel DCT domain CRT - based watermarking scheme for image authentication surviving JPEG compression [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20: 1597-1611.
- [2] 刘全, 张乐, 张永刚, 等. 基于角点特征的几何同步数字水印算法 [J]. 通信学报, 2011, 32(4): 25-31.
- [3] 付永钢. 基于广义 Arnold 变换与支持向量机的图像水印算法 [J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2011, 16(1): 65-70.
- [4] 宋海明, 李传目. 基于视觉特性的自适应图像水印算法 [J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2009, 14(3): 310-314.
- [5] 刘金华, 余堃, 王文旻. 结合图像属性的 MSD - FICA 盲水印算法 [J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(4): 542-545.
- [6] MURILLO - FUENTES J J. Independent component analysis in the blind watermarking of digital images [J]. Neurocomputing, 2007, 70: 2881-2890.
- [7] NGUYEN T V, PATRA J C. A simple ICA - based digital image watermarking scheme [J]. Digital Signal Processing, 2008, 18: 762-776.
- [8] 赵伟, 陈仁安, 张晓玲, 等. 基于 ICA 和 DCT 的鲁棒性盲水印算法 [J]. 厦门理工学院学报, 2011, 19(2): 22-26.
- [9] 王慧琴, 崔福明, 杜高峰. 利用 Arnold 变换和纠错编码实现盲数字水印 [J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(1): 97-101.
- [10] 刘晶, 王映辉, 刘刚, 等. 一种可抵抗几何攻击的 Directionlet 变换域盲水印算法 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 442-447.
- [11] VOLOSHYNOVSKIY S, HERRIGEL A, BAUMGAERTNER N, et al. A stochastic approach to content adaptive digital image watermarking [C] // Proc Int Workshop on Information Hiding, Dresden, Germany. [s. n.], 1999: 212-236.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)