

# 结合图像属性的MSD-FICA盲水印算法

刘金华, 余 堃, 王文旻

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

**【摘要】**基于图像高频子分量相互独立的属性, 再结合图像低频能量不易丢失的特点, 该文设计了多分辨率子带分解的快速独立分量分析(MSD-FICA)盲水印算法, 借鉴了经典的量化调制水印(QIM)算法思想, 对原始图像小波分解后的高频成分(水平、垂直、对角小波系数)进行排序, 取中频成分。嵌入水印是对中频分量系数和低频分量系数同时嵌入, 水印的提取采用快速独立分量分析(FICA)算法, 先用主成分分析进行预处理, 然后用FICA盲提取水印。实验表明, 该算法能有效地提取出水印, 并能抵抗一定的压缩、滤波、噪声攻击。

**关键词** 盲水印算法; 数字水印; 图像属性; 小波

中图分类号 TN959.3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.016

## Using MSD-FICA and Combine with Image Property for a Blind Watermarking Algorithm

LIU Jin-hua, SHE Kun, and WANG Wen-min

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A blind image watermarking algorithm based on the multiresolution sub-band decomposition-fast independent component analysis (MSD-FICA) is proposed. In this scheme, the watermark bits are embedded in the middle-frequency components and the low-frequency components simultaneously. The middle-frequency components are selected by adopting the sorting scheme among the high-frequency components. In watermarking extraction, primary component analysis (PCA) is applied for preprocess, then the watermark is extracted by FICA. The experimental results show that the proposed algorithm is robust against JPEG compression, Gaussian noise, and median filtering. The comparison analysis demonstrates that our scheme has better performance than the QIM watermarking scheme.

**Key words** blind watermarking algorithm; digital watermarking; image property; wavelets

随着电子信息、计算机的不断发展, 数字作品的版权保护日益成为迫切需要解决的问题。作为信息隐藏领域的版权保护手段之一, 数字水印技术得到了国内外各研究机构的高度重视。盲信号处理也是目前出现的新型信号处理技术, 有很大的潜在应用价值。

已经有研究人员将独立分量分析技术应用于数字水印算法。文献[1]首先将ICA方法用于图像水印的嵌入与检测。文献[2]设计了将水印嵌入到ICA分解的统计独立源信号的方式, 保证在嵌入信息内容最大的同时, 引入的变形最小。文献[3]提出基于ICA的多边形曲线水印算法, 实验结果证明了该算法的有效性, 尤其用于仿射变换攻击, 检测水印时不需要获得仿射变换参数, 从而证实了ICA的抗扭曲性。文献[4]提出基于彩色图像无监督学习的多目盲水印

算法, 实验表明基于多分辨率子带分解的拉格郎日约束神经网络独立分量分析的水印算法具有很好的鲁棒性。

本文基于图像高频子分量相互独立的属性, 结合低频分量能量不易丢失的特点, 采用多分辨率子带分解的快速独立分量分析(MSD-FICA)方法实现水印混合信号的盲分离, 对水印进行盲提取。

### 1 多分辨率子带分解-快速独立分量分析(MSD-FICA)

#### 1.1 多分辨率子带分解的独立分量分析(MSD-ICA)

尽管标准的独立分量分析算法在许多应用中取得了很大的成功, 但是独立分量分析在一些实际问题中, 尤其是在生物医学信号处理方面, 其基本假

设(即独立成分被假定是统计独立的, 具有非高斯分布)不再成立。由于标准的独立分量分析算法不能估计具有统计相关性的源信号, 所以就有了独立分量分析技术的自然延伸和扩展, 即多分辨率子带分解的独立分量分析(MSD-ICA), 其主要思想是假设宽带源信号相关, 而窄带子分量独立, 在很大程度上降低了对源信号相互独立性假设的要求。MSD-ICA将传感器信号谱分解成它们的子谱或子带, 然后再对子谱进行单独处理, 子带信号也可以分级和单独处理。

## 1.2 快速独立分量分析算法(FICA)

文献[5-6]首先提出依据4阶累计量的固定点算法。由于该算法比批处理甚至自适应算法具有更快的收敛速度, 因此被称为“快速ICA(fast ICA, FICA)算法”。

基于负熵的FICA算法采用非高斯性最大化原理, 使用固定点(fixed-point)迭代理论寻找一个极大化非高斯性方向的最大值(或者说估计一个独立成分)。算法采用牛顿迭代算法对观测信号的大量采样点进行批处理。每次从观测信号中分离出一个独立分量, 是独立分量分析的一种快速算法。

在运行FICA算法之前, 需要对数据进行预处理。FICA预处理包括去均值和白化两个过程。对观测信号去均值是FICA算法最基本的预处理步骤, 其处理过程是从观测信号中减去信号的均值向量, 使得观测信号成为零均值变量。这意味着进行独立分量分析得到的源信号 $S$ 的估计信号 $y$ 也是零均值的。

## 2 水印算法设计

### 2.1 水印的嵌入

假设待嵌入水印的原始图像表示为 $f$ , 其像素大小是 $(N \times N)$ 矩阵,  $N$ 表示图像像素矩阵的行数, 水印图像表示为 $W$ , 其像素大小是 $M \times M$ 矩阵,  $M$ 是 $W$ 矩阵的行数, 原始图像与水印图像矩阵的行数大小满足关系 $N = 2^k M$ 。本文取 $k=2$ 是因为对待嵌入水印的原始图像进行两层提升小波分解, 一层分解后低频图像成分占原来图像大小的1/4; 两层分解后中频成分大小与水印大小刚好相等, 即是原始图像的1/16。对原始图像进行小波分解后将产生水平、垂直、对角方向不同分辨率的多个高频成分子图, 即高频成分分别是水平成分子图LH、垂直成分子图HL、对角成分子图HH和一个低频子图LL。分解后的低频成分子图是原图的最佳逼近子图, 它集中了原始图像的绝大部分能量, 具有较好的稳定性。而

高频成分子图一般表示原始图像的平滑、边缘、纹理等图像细节部分。根据人类视觉系统原理, 人眼对图像的边缘或纹理部分的微小变化不敏感, 因此对高频成分作较小的改动将不会影响重构后的图像质量, 又由于图像的高频子成分相互独立, 满足独立分量分析盲分离的前提假设条件, 便于对水印进行提取。此外, 为了平衡水印的鲁棒性和不可感知性, 可对原始低频成分子图和中频成分子图同时嵌入水印, 步骤如下:

(1) 首先对原始图像 $f$ 进行 $l$ 级整数提升小波分解(lifting wavelet transform, LWT), 得到LWT小波分解的系数, 其中 $l=2$ 。本文进行2层小波分解,  $f_{k,l}(i, j)$ 为第 $l$ 级小波分解子带图像细节系数;  $k \in \{LH, HL, HH\} \Leftrightarrow k_1 = LH, k_2 = HL, k_3 = HH$ ; LH、HL、HH分别表示小波分解后的水平、垂直和对角子图细节系数;  $(i, j)$ 表示由密码算法和密钥确定的水印嵌入位置。在嵌入水印数据时, 需对原始图像小波分解后的子带图像细节系数进行排序<sup>[7]</sup>, 对同一级的3个系数 $f_{k_1,l}(i, j)$ 、 $f_{k_2,l}(i, j)$ 、 $f_{k_3,l}(i, j)$ 进行排序, 使 $f_{k_1,l}(i, j) \leq f_{k_2,l}(i, j) \leq f_{k_3,l}(i, j)$ , 找到排序后的中频成分子带系数, 同时对中频成分子图 and 低频成分子图嵌入水印。

(2) 本文算法考虑到水印的鲁棒性, 希望水印图像的统计特性类似于高斯白噪声, 即均值为0。先将像素大小为 $64 \times 64$ 的“电子科大”灰度水印图像变换为二值水印图像 $\{0,1\}$ 序列, 然后将 $\{0,1\}$ 序列变换为 $\{-1,1\}$ 水印序列。对水印图像进行一维小波分解后的子图分别是低频成分系数 $W_L$ 、高频成分系数水平细节系数 $W_h$ 、垂直细节系数 $W_v$ 和对角细节系数 $W_d$ 。

(3) 对原始图像小波分解后的低频成分子图和中频成分子图同时作水印嵌入算法:

$$f_{L,new}(i, j) = f_{L,old}(i, j) + \lambda_1 W_L(i, j) \quad (1)$$

$$f_{H,new}(i, j) = f_{H,old}(i, j) + \lambda_2 W_H(i, j) \quad (2)$$

式(1)和式(2)分别表示对低频成分子图系数嵌入水印和对中频成分子图系数嵌入水印, 水印嵌入强度因子对应的值分别为<sup>[8]</sup>:

$$\lambda_1 = 0.45 + \frac{f(i, j) - T_1}{\sigma_1} \quad (3)$$

$$\lambda_2 = 0.2 \times \frac{(f(i, j) - T_2)^2}{\sigma_2} \quad (4)$$

式中 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 分别是第2层小波分解后低频成分小波系数的方差和第2层所有高频子带细节系数的方差, 且:

$$\sigma_1 = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^{n^2} (f(i,j) - T_1)^2$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{4 \times n^2} \sum_{i,j=n^2+1}^{4 \times n^2} (f(i,j) - T_2)^2$$

对式(3)和(4)的分析如下:

(1) 式(3)中,  $f(i,j)$  是图像  $f$  进行小波分解后在位置  $(i,j)$  处的小波系数;  $T_1$  为第2层小波分解后低频成分小波系数的平均值; 分子  $f(i,j) - T_1$  是第2层低频成分分子带在某处  $(i,j)$  关于均值的偏差。图像的背景亮度能量主要位于低频成分中,  $\sigma_1$  与背景亮度成反比, 其值越大, 说明背景亮度越小, 可感知门限越低,  $\lambda_1$  越小。这意味着在背景亮度高的区域, 嵌入的水印信息较多, 而在门限低的区域, 可嵌入的信息则相对少些。 $\sigma_1$  分子的设计遵循了同样的规则,  $f(i,j) - T_1$  的值越大, 该系数反映的背景亮度越大,  $\lambda_1$  越大。选取0.45可使  $\lambda_1$  始终为正数<sup>[8]</sup>。

(2) 式(4)中,  $T_2$  为第2层所有高频子带细节系数的平均值;  $\sigma_2$  显示了纹理的平滑程度。其值越大, 说明纹理平滑度低, 可感知门限越低,  $\lambda_2$  越小。在门限高的区域, 嵌入的信息较多, 而在门限低的区域, 可嵌入的信息则相对少些。采用0.2相乘可使水印噪声对高频子带的影响不超过20%<sup>[8]</sup>。

## 2.2 水印的提取

根据独立分量分析的基本假设, 观测到的信号个数一般要大于或等于源信号个数, 信号才可辨识。从嵌入水印的图像中估计ICA的基向量, 首先对嵌有水印的图像进行线性标准化, 使其像素具有零均值、单位方差。从图像的随机位置取出10个32×32像素大小的图像块(窗口), 对每个图像块减去局部平均, 因为将ICA应用到图像上通常会得到一个表示图像局部灰度平均的成分。而这个成分的分布一般不是稀疏的, 甚至是超高斯的。所以先减去局部平均, 然后再对剩下的成分估计一个合适的稀疏编码基。预处理后的数据集作为FICA算法的输入, 算法采用tanh非线性函数。采用PCA预处理(白化)处理可以去相关、降维, 同时根据主成分分量的个数还可以确定水印信号是不是存在, 可以起到水印检测的作用。

## 3 实验比较分析

仿真实验在MATLAB 7.0环境下进行, 采用像素大小为256×256的“lena”作为原始待嵌入水印图像和像素大小为64×64“电子科大”二值图像作为水

印图像。小波变换分别采用离散小波变换DWT(discrete wavelet transform, DWT)和整数提升小波LWT, 小波基选用双正交“bior4.4”。实验对嵌有水印的图像进行无攻击和有攻击测试, 并与量化调制水印QIM算法进行比较分析。攻击测试采用均值滤波、中值滤波、加椒盐噪声、高斯噪声、JPEG2000压缩。采用峰值系数信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和相似系数(normalized Correlation, NC)来衡量水印的图像质量。



a. 原始lena图像



b. 原始水印

图1 lena图像水印

### (1) 叠加噪声攻击

对嵌有水印的图像叠加椒盐噪声、高斯噪声和斑点噪声, 再从混有噪声的“lena”图像中提取水印, 实验表明水印具有一定的鲁棒性。实验结果如图2所示。



a. 加椒盐噪声



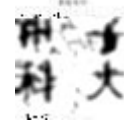
b. 加高斯噪声



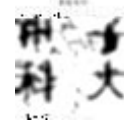
c. 加斑点噪声



d. 提取水印



e. 提取水印



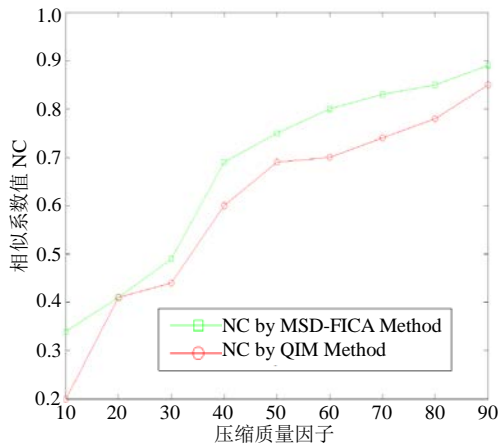
f. 提取水印

图2 叠加噪声后的lena图像和从中提取的水印

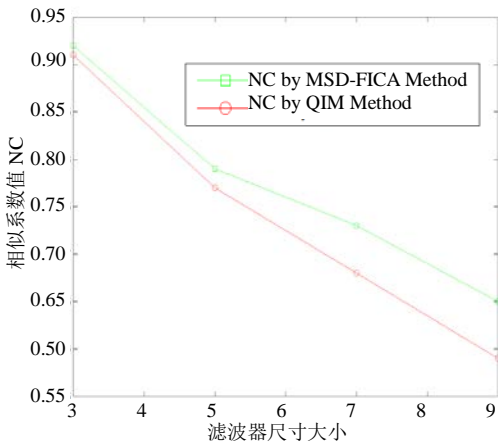
### (2) MSD-FICA算法与经典QIM算法在攻击下水印图像相似度比较

图3中, NC表示提取的水印与原始水印的相似系数值。图3a表示对嵌有水印的“lena”图像进行JPEG2000压缩攻击, 从图3a可看出本文算法水印的鲁棒性较经典QIM算法好。图3b表示采用3×3均值滤波攻击嵌有水印的图像, 相似系数也较QIM算法计算的NC值大, 算法的鲁棒性更强。

本文算法优于QIM算法的原因在于, 算法中嵌入水印时采用整数提升小波分解, 计算机对整数的处理效率较高; 另外, 水印的提取算法采用ICA算法, ICA基向量具有的自由度要比小波大得多, 小波仅有两个方向, 而ICA基向量则有很多; 小波没有相位差别, ICA向量则有不同的相位。



a. JPEG2000压缩的影响

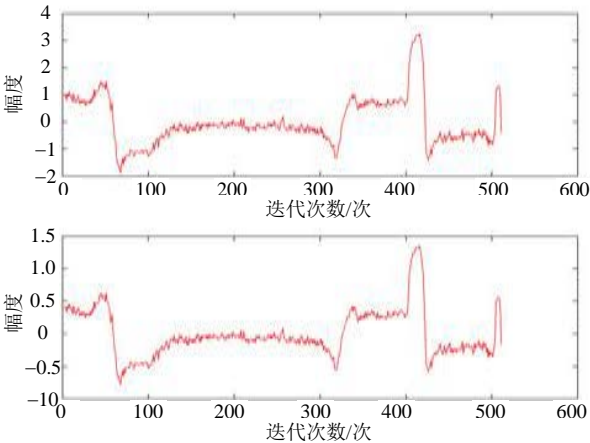


b. 3x3均值滤波的影响

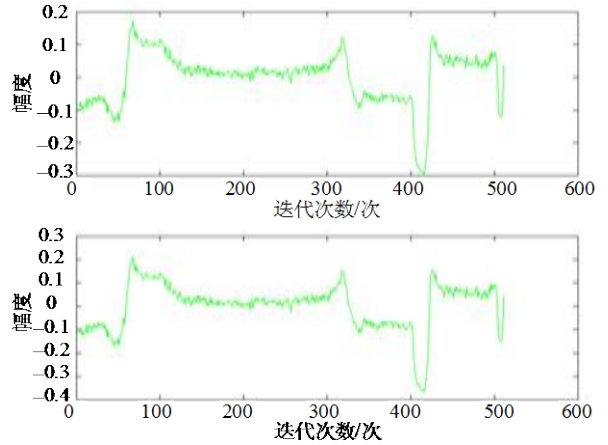
图3 压缩、滤波的相似值比较

(3) 采用MSD-FICA盲分离的信号波形分析。

实验中采用FICA牛顿迭代算法进行盲分离, 首先生成2x2随机混合矩阵A, 先取256x256的两行向量进行混合, 混合后的图像波形如图4a所示, 后对混合信号进行盲分离, 分离后的信号波形如图4b所示。实验中FICA之前先进行了PCA白化处理, 然后再对源信号用FICA处理。实验进行了512次迭代, 结果表明盲信号分离能达到较好的效果。



a. 分离前的源混合信号波形



b. FICA分离后的信号波形

图4 信号波形图

### 4 结论

本文介绍了独立分量分析技术在数字水印中的研究现状, 以及多分辨率子带分解的独立分量分析(MSD-ICA)的相关原理和基于负熵的快速固定点算法(FICA); 设计了基于图像属性的MSD-FICA盲数字水印算法, 并与经典的QIM量化调制水印算法进行了攻击测试比较。实验表明, 本文算法水印的鲁棒性优于QIM算法, 本文设计的算法是有效的。

### 参考文献

- [1] YU Dan, FAROOK S, MA Kai-Kuang. Watermark detection and extraction using independent component analysis method. EURASIP [J]. Journal on Applied Signal Processing, 2002, 1: 92-103.
- [2] BOUNKONG S, THCH B, SAAD D, et al. ICA for watermarking digital image[J]. Journal of Machine Learning Research, 2003, 4: 1471-1498.
- [3] 王 炎, 王建军, 黄旭明. 一种基于ICA的多边形曲线水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(7): 1054-1059.
- [4] WANG Yan, WANG Jian-jun, HUANG Xu-ming. A polygon curve watermarking arithmetic based on ICA[J]. Journal of Computer-aided Design and Graphics, 2006, 18(7): 1054-1059.
- [5] SHE Kun, HUANG Jun-cai, ZHOU Ming-tian. Wavelet digital watermarking with unsupervised learning[J]. Chinese Journal of Electronics, 2005, 14(1): 10-14.
- [6] HYVÄRINEN A, OJA E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1997, 9(7): 1483-1492.
- [7] HYVÄRINEN A. Fast and robust fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. IEEE Trans on Neural Network, 1999, 10(3): 626-634.
- [8] CHEN B, WORNELL G W. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(4): 1421-1443.

(下转第620页)