第6期 电 子 学 报 Vol.36 No.6
2008年6月 ACTA ELECTRONICA SINICA June 2008

基于JADE算法的鲁棒性数字水印

秦 拯[1],易叶青[2],林亚平[1]
(1. 湖南大学软件学院,湖南长沙 410082;2. 湖南大学计算机与通信学院,湖南长沙 410082)

摘 要: 鲁棒性是数字水印的一个关键问题,本文提出一种新颖的基于JADE(联合对角化)算法的鲁棒性水印算法,该算法利用迭代混合的方法嵌入水印,保证了水印具有良好的不可视性和鲁棒性,然后以混合图像作为一路观测信号,将水印信息作为另一路观测信号,再利用盲源分离JADE算法检测水印,无需知道嵌入水印的确切位置.理论分析和仿真结果表明该算法具有较强的鲁棒性.

关键词: 数字水印;独立分量分析;JADE算法;迭代混合
中图分类号: TP399 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112(2008)06-1149-05

Robust Watermark Based on JADE Algorithm

QIN Zheng[1], YI Ye-qing[2], LIN Ya-ping[1]
(1. *School of Software, Hunan University, Changsha, Hunan* 410082, *China*;
2. *School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan* 410082, *China*)

Abstract: Robustness is the key problem in digital watermarking. A robust watermarking method based on JADE algorithm is proposed. In the algorithm, watermark is embedded by iterative blending, which guarantees that the watermark has better invisibility and robustness, then regards mixed image as one observed signal, watermark information as the other observed signal. Finally, blind source separation JADE algorithm is adopted to detect the watermark without precise location. The theoretical analysis and simulation results show that it has stronger robustness.

Key words: digital watermarking; independent component analysis; joint approximate diagomalization of eigenmatrixe (JADE) algorithm; iterative blending

1 引言

计算机网络技术的飞速发展,为数字信息传播提供了极大的便利,但是随之而来的副作用是通过网络传输的数字产品很容易被恶意的个人或团体在未经许可的情况下非法使用,因而网络世界中数字产品版权保护问题成为人们亟待解决的问题.数字水印技术就是在这种情况下产生的.

一个有效的水印算法至少应满足下面两个特性:不可觉察性和鲁棒性.数字水印技术发展到今天,已有许多不同的算法,然而大多数水印技术的基本原理是首先把图像通过某种数学变换,将图像在变换域表示,通过更改图像的某些变换系数来隐藏信息,然后再利用相关系数来检测水印的存在.近十多年来,人们提出了多种数字水印算法或方案,包括LSB[1]、扩频水印[2]、CDMA水印[3]和空域与变换域(DCT,DFT,DWT)[4]水印、对视频甚至是沿时间域分布的水印等等.虽然这些水印随载体在正常使用过程中,对载体通常能够起到有效的保护作用;但是,在恶意攻击情况下,其鲁棒性依然难以保证[5].独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)[6]是近年来由盲源信号分离技术发展起来的多道信号处理方法,其基本含义是将多道观测信号根据统计独立的原则,通过优化算法分解为若干独立成分,从而实现信号的增强和分解,在语音识别、通讯、图像处理、医学信号处理等领域尤其受到关注[7],并且应用于数字水印技术领域[8].独立分量分析核心问题是分离(或解混合)矩阵的学习算法,它属于无监督的学习,其基本思想是抽取统计独立的特征作为输入,而又不丢失信息. Cardoso潜心研究了四阶累计量的代数性质,提出了基于矩阵联合对角化的预白化JADE (Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrixes) 算法[9],该算法对各种情况的盲信号具有较好的分离作用.

收稿日期:2007-10-18;修回日期:2008-03-28
基金项目:湖南省教育厅优秀青年科研项目(No.06B047);湖南省科技计划项目(No.2006FJ4110);广东省科技计划项目(No.0711020400157, No.2007B01020004);东莞市科技计划项目(No.2006D1046, No.2007108101021)

本文提出的一种基于 JADE(联合对角化) 算法的数字水印方法,与已有的 ICA 水印不同的是,此方法利用迭代混合的方法嵌入水印,保持了良好的视觉效果,以混合图像作为一路观测信号,将水印信息作为另一路观测信号,利用 JADE 算法对其进行盲分离,得到分离矩阵,然后再求出分离矩阵的逆,并通过分离矩阵的逆判断是否存在水印.理论分析和仿真结果表明该方法具有较强的鲁棒性.

2 JADE 算法

JADE 算法是独立分量分析的分离(或解混合)矩阵的学习算法,它属于无监督的学习.JADE 算法最早起源于对信号高阶累计量的研究,Cardoso 构造了一个累计张量如下:

$$F_{i,j}(M) = \sum_{k,l} m_{kl} cum(x_i, x_j, x_k, x_l) \tag{1}$$

m_{kl} 是线性变换阵 M 的第 k 行第 l 列的元素.显然 M 是一个实对称矩阵,存在一个对角矩阵与之相对应,可以进行特征值分解(Eigenvalue decomposition).假设 λ 为特征值,那么 M 为特征矩阵:

$$F(M) = \lambda M \tag{2}$$

这里选模型为 $X = A * S$,首先我们对 X 进行了白化处理:$Z = VAS = W^T$ 使得新的混合阵变正交阵,那么仅需要找一个正交阵 W 做解混合阵即可.令 $W = (w_1, w_2, \cdots, w_n)^T$,取

$$M = w_m w_m^T,\ m = 1,2,3,\cdots,n \tag{3}$$

根据原信号相互独立条件下累积量的特点及 w_m 之间的正交性,可得:

$$\begin{aligned} F_{i,j}(w_m w_m^T) &= \sum_{kl} w_{mk} w_{ml} cum(z_i, z_j, z_k, z_l) \\ &= \sum_{klqq'rr'} w_{mk} w_{ml} w_{qi} w_{q'j} w_{rk} w_{r'l} cum(s_q, s_{q'}, s_r, s_{r'}) \\ &= \sum_{klq} w_{mk} w_{ml} w_{ql} w_{qj} w_{qk} w_{ql} kurt(s_q) \\ &= w_{mi} w_{mj} kurt(s_m) \end{aligned} \tag{4}$$

从上式可以看出 $\lambda = kurt(s_m)$.这就是联合对角化方法的原理.

3 基于 JADE 算法的数字水印

3.1 数字水印的嵌入

数字图像可以表示为连续函数在离散网格点处的函数值 $F_{i,j}$,若其中 $i \in \{1,2,\cdots m\}$,$j \in \{1,2,\cdots n\}$,那么这就是一个尺寸为 $m \times n$ 图像,从数学的角度来看数字图像就是一个二维矩阵,当然也可以用一维向量来表示.

定义 1 若一维向量 f 和 g 分别表示尺寸为 $m \times n$ 的数字图像,矩阵 $A_{2\times2}$ 满足 $0 < |a_{ij}| < 1$ 的任意实数且可逆,则称:

$$\begin{aligned} S &= [s_1 \quad s_2]^T = A \times \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_{11} f + a_{12} g \\ a_{21} f + a_{22} g \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{5}$$

为数字图像 f 和 g 的 A 混合;若矩阵 A 中的两条对角线中的一条对角线元素全为 0,而另一条对角线元素全不为 0,则称为平凡混合;若矩阵 A 中有一个元素为 0,对应该行的另一个元素为 1,其余的元素不为 0,则称为半平凡混合.为了叙述方便,称 f 为载体图像,称 g 为水印图像.

定义 2 若一维向量 f 和 g 分别表示尺寸为 $m \times n$ 的数字图像,矩阵 $A_{2\times2}$ 满足 $0 < |a_{ij}| < 1$ 的任意实数且可逆,则:

$$S_1 = [s_1 \quad s_2]^T = A \times \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} f + a_{12} g \\ a_{21} f + a_{22} g \end{bmatrix}$$

$S_2 = [s_{21} \quad s_{22}]^T$,其中:

$$s_{21} = [a_{11} \quad a_{21}] \times \begin{bmatrix} f \\ s_{11} \end{bmatrix} = [a_{11} f + a_{12} s_{11}]$$

$$s_{22} = [a_{21} \quad a_{22}] \times \begin{bmatrix} g \\ s_{12} \end{bmatrix} = [a_{22} g + a_{21} s_{12}]$$

…………

$S_n = [s_{n1} \quad s_{n2}]^T$,其中:

$$s_{n1} = [a_{11} \quad a_{21}] \times \begin{bmatrix} f \\ s_{n-1,1} \end{bmatrix} = [a_{11} f + a_{12} s_{n-1,1}]$$

$$s_{22} = [a_{21} \quad a_{22}] \times \begin{bmatrix} g \\ s_{n-1,2} \end{bmatrix} = [a_{22} g + a_{21} s_{n-1,2}]$$

即:
$$S_n = [s_{n1} \quad s_{n2}]^T = \begin{bmatrix} a_{11} f + a_{12} s_{n-1,1} \\ a_{22} g + a_{21} s_{n-1,2} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式(6)称为数字图像 f 和 g 关于矩阵 A 的 n 重迭代混合.

定理 1 数字图像 f 和 g 关于矩阵 A 满足 $0 < |a_{ij}| < 1$ 的任意实数且可逆的 n 重迭代混合 S_n 有:

$$S_n = \begin{bmatrix} (a_{11} + a_{11} a_{12} + \cdots + a_{11} a_{12}^{n-1}) f + a_{12}^n g \\ (a_{21} + a_{21} a_{22} + \cdots + a_{21} a_{22}^{n-1}) f + a_{22}^n g \end{bmatrix} \tag{7}$$

定理的证明比较容易.

定理 2 数字图像 f 和 g 关于矩阵 A 满足 $0 < |a_{ij}| < 1$ 的任意实数且可逆的 n 重迭代混合 S_n,当混合为非平凡混合、非半平凡混合时 n 重迭代混合 S_n 的两个分量收敛于载体图像 f 和水印图像 g,有:

$$\begin{cases} \lim\limits_{n\to\infty} s_{n1} = Cf \\ \lim\limits_{n\to\infty} s_{n2} = Cg \end{cases} \tag{8}$$

证明:由式(7)可得:

$$\begin{aligned} s_{n1} &= (a_{11} + a_{11} a_{12} + \cdots + a_{11} a_{12}^{n-1}) f + a_{12}^n g \\ &= a_{11}(1 + a_{12} + \cdots + a_{12}^{n-1}) f + a_{12}^n g \end{aligned}$$

$$= \frac{a_{11}(1 - a_{12}^n)}{1 - a_{12}} f + a_{12}^n g$$

因为 $0 < |a_{12}| < 1$,所以当 $n \to \infty$ 时

$$s_{n1} = \frac{a_{11}}{1 - a_{12}} f = Cf$$

同理,当 $n \to \infty$ 可得:$s_{n2} = \frac{a_{22}}{1 - a_{21}} g = Cg$

[证毕]

推论 1　当 a_{11}、a_{12} 均不为 0,其中 $a_{21} = 0$, $a_{22} = 1$ 时 n 重迭代混合 S_n 是数字图像 f 和 g 关于矩阵 A 的半平凡混合.

证明:由定理 1 可得

$$S_n = \begin{bmatrix} (a_{11} + a_{11}a_{12} + \cdots + a_{11}a_{12}^{n-1}) f + a_{12}^n g \\ (a_{21} + a_{21}a_{22} + \cdots + a_{21}a_{22}^{n-1}) f + a_{22}^n g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_{11} + a_{11}a_{12} + \cdots + a_{11}a_{12}^{n-1}) f + a_{12}^n g \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma f + \beta g \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & \beta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix}$$

其中 $\gamma = a_{11} + a_{11}a_{12} + \cdots + a_{11}a_{12}^{n-1}$, $\beta = a_{12}^n$, $\gamma f + \beta g$ 为混合图像.[证毕]

由定理 2 和推论 1 便可以得到一个水印嵌入方案:

选择两幅统计独立的图像 f 和 g, f 为载体图像, g 为水印图像;

生成混合矩阵 A(a_{11}、a_{12} 均不为 0,其中 $a_{21} = 0$, $a_{22} = 1$);

按定义 1 的方式求得 S_1;

$i = 1$;

while(混合图像 s_{i1} 不满足视觉效果){

按定义 2 的方法对图像进行 l 次迭代混合 S_i;

$i = i + 1$;

}

3.2　数字水印的检测

由于独立分量分析要求观察信号的个数不少于源信号的个数.由推论 1 可知上述嵌入水印的方法是只是载体图像和水印图像的半平凡混合,以混合图像(含水印的图像)作为一路观测信号,那么另一路观测信号则只能选择水印图像.这样自然就给出了一个水印检测的方法:

Step1:将待检测图像和水印图像组合成两路观测信号;

Step2:调用 JADE 算法求出分离矩阵 B;

Step3:计算出分离矩阵的逆 A′;

Step4:通过矩阵 A 的 a'_{12} 的大小来判断待检测图像是否含有水印.

为了分析该算法的鲁棒性给出如下的定义:

定义 3　对一个信号 $y(t)$ 的振幅进行拉申、压缩或平移,并保持其波形不变的变换得 $y'(t)$,则称 $y'(t)$ 为 $y(t)$ 的等效变换.

定义 4　对一个信号 $y(t)$ 随机地选取几个时间段 $[t_a, t_b]$ 进行剪裁并替换得到 $y'(t)$,则称 $y'(t)$ 为 $y(t)$ 的剪裁变换.

定义 5　令 $y'(t) = y(\frac{t}{\sigma})$,则称 $y'(t)$ 是 $y(t)$ 的频变换.

定义 6　令 x_1 和 x_2 为两路观测信号,利用盲源分离算法进行分离得到分离矩阵 B,并求出 B 的逆 A′,那么 A 的 a'_{12} 的值称为混合系数.

由上述的定义我们可以到处如下的一个结论,即:一维向量 f 和 g 分别表示相互独立的载体图像和水印图像, S_i 是它们关于矩阵 A(a_{11}、a_{12} 均不为 0,其中 $a_{21} = 0$, $a_{22} = 1$)的半平凡混合,一维向量所表示的混合图形 s_{i1} 经过等效变换、剪裁变换、频变换得 s'_{i1},视 s'_{i1} 和 g 两路观测信号利用盲源分离算法进行分离得到分离矩阵混合系数的绝对值一定大于 0.

上述结论中混合系数的意义是:如果信号 s'_{i1} 和 g 统计独立则混合系数的值为 0,否则混合系数的值不为 0,因此上述结论可转换为如下描述:

已知方差不为 0 的两个随机平稳信号 $f(t)$ 和 $g(t)$ 是相互独立的,令 $s(t) = \gamma f(t) + \beta g(t)$ (γ, β 均不为 0),那么相当于有下一些结论:

(1) $s(t)$ 和 $g(t)$ 不相互独立.

(2) $\lambda s(t)$ 和 $g(t)$ 不相互独立

(3) $s(t + t_0)$ 和 $g(t)$ ($t_0 < T$) 不相互独立.

(4) $s(at + t_0)$ 和 $g(t)$ ($t_0 < T$, $a \neq 0$) 不相互独立.

先看结论 1:

$$\begin{aligned} & E\{s^2(t)g^2(t)\} - E\{s^2(t)\}E\{g^2(t)\} \\ & = E\{[\gamma f(t) + \beta g(t)]^2 g^2(t)\} \\ & \quad - E\{[\gamma f(t) + \beta g(t)]^2\}E\{g^2(t)\} \\ & = E\{[\gamma^2 f^2(t)g^2(t) + 2\gamma\beta f(t)g^3(t) + \beta^2 g^4(t)]\} \\ & \quad - E\{\gamma^2 f^2(t)g^2(t) + 2\gamma\beta f(t)g(t) \\ & \quad + \beta^2 g^2(t)\}E\{g^2(t)\} \\ & = 2\gamma\beta\{E[f(t)g^3(t)] - E[f(t)g(t)]E[g^2(t)]\} \\ & \quad + \beta^2 D[g^2(t)] \end{aligned}$$

由 $f(t)$ 和 $g(t)$ 的方差不为 0,所以 $E\{s^2(t)g^2(t)\} - E\{s^2(t)\}E\{g^2(t)\} \neq 0$,由文献[10]所提供的结论可知 $s(t)$ 和 $g(t)$ 不相互独立.

结论 2 是显然成立的,再看结论 3:

$$\begin{aligned} & I(s(t + t_0), g(t)) \\ & = \sum_{t=0}^{T-t_0}\sum_{t=0}^{T} p[s(t + t_0), g(t)]\log\frac{p[s(t + t_0), g(t)]}{p[s(t + t_0)]p[g(t)]} \\ & = \sum_{t=0}^{T}\sum_{t=0}^{T} p[s(t), g(t)]\log\frac{p[s(t), g(t)]}{p[s(t)]p[g(t)]} \end{aligned}$$

$$-\sum_{t=0}^{t_0}\sum_{t=0}^{T}p[s(t),g(t)]\log\frac{p[s(t),g(t)]}{p[s(t)]p[g(t)]}$$

上式是信号 $s(t+t_0)$ 和 $g(t)$ 的互信息,表达式 $I(s(t+t_0),g(t))$ 可表示为两部分的差,而 $\sum_{t=0}^{t_0}\sum_{t=0}^{T}p[s(t),g(t)]\log\frac{p[s(t),g(t)]}{p[s(t)]p[g(t)]}$ 是 $\sum_{t=0}^{T}\sum_{t=0}^{T}p[s(t),g(t)]\log\frac{p[s(t),g(t)]}{p[s(t)]p[g(t)]}$ 的一部分,其中 $t_0<T$,因此 $I(s(t+t_0),g(t))\neq 0$,所以 $s(t+t_0)$ 和 $g(t)$ 不相互独立.

再看结论 4,令 $z=at+t_0$,由 $t\in[0,T]$,得:$z\in[t_0,\frac{T-t_0}{a}]$

$$\begin{aligned}
&I(s(z),g(t))\\
&=\sum_{z=t_0}^{\frac{T-t_0}{a}}\sum_{t=0}^{T}p[s(z),g(t)]\log\frac{p[s(z),g(t)]}{p[s(z)]p[g(t)]}\\
&=\sum_{t=0}^{T}\sum_{t=0}^{T}p[s(t),g(t)]\log\frac{p[s(t),g(t)]}{p[s(t)]p[g(t)]}\\
&\quad-\{\sum_{t=0}^{t_0}\sum_{t=0}^{T}p[s(t),g(t)]\log\frac{p[s(t),g(t)]}{p[s(t)]p[g(t)]}\\
&\quad+\sum_{t=\frac{T-t_0}{a}}^{T}\sum_{t=0}^{T}p[s(t),g(t)]\log\frac{p[s(t),g(t)]}{p[s(t)]p[g(t)]}\}
\end{aligned}$$

与结论 3 同理可得 $s(at+t_0)$ 和 $g(t)$ $(t_0<T,a\neq 0)$ 不相互独立.

由于一维向量所表示的混合图形 s_{i1} 经过等效变换、剪裁变换、频变换得 s'_{i1},能够保证 s'_{i1} 和 g 不相互独立,而分离矩阵的的逆 A 近似的等于混合矩阵 A,所以混合系数的绝对值一定大于 0.

此外,由于 S_i 是向量 f 和 g 关于矩阵 A 的平凡混合,那么 $s_{i1}=\gamma f$. 又 f 和 g 相互独立,即:γf 和 g 相互独立. 由于盲分离算法求得的分离矩阵为混合矩阵的逆,因此分离矩阵的逆 A 近似的等于混合矩阵 A,所以 A' 的 a'_{12} 的值应为 0. 由此我们又可以得出一结论,即:一维向量 f 和 g 分别表示相互独立的载体图像和水印图像,S_i 是它们关于矩阵 A(a_{11}、a_{22} 均不为 0,其中 $a_{12}=0$,$a_{21}=0$)的平凡混合,一维向量所表示的混合图形 s_{i1},视 s_{i1} 和 g 为两路观测信号,那么利用盲源分离算法进行分离得到混合系数的值应为 0.

对含水印的混合图像进行几何攻击、马赛克攻击,平移攻击等,实际上等效于上文中所定义的几种变换. 由上述的分析可知,我们所提出的算法,在鲁棒性和可行性方面是有保障的.

4 仿真实验

选择图 1 作为载体图像,图 2 作为水印图像,按文中的水印嵌入算法将两幅图进行迭代混合得到图 3,通常也将图 3 看成是含水印的图像. 嵌入水印后的图 3 和原图 1 的 PSNR 是 39.2738,说明文中提出的水印嵌入方法是可行的.

图 1 载体图像　图 2 水印图像　图 3 混合图像

为了验证本文水印算法的鲁棒性,采用不同的攻击方法及不同系数对混合图像进行攻击,然后按文中所提出的水印检测算法进行检测. 不攻击时的混合系数的绝对值为:0.142469

表 1 盐噪声攻击及水印检测结果

噪声强度	0.01	0.05	0.09	0.1	0.2	0.5
混合系数的绝对值	0.095687	0.057116	0.01587	0.014819	0.0124819	0.00054

表 2 拉伸攻击及水印检测结果

拉伸倍数	1.5	2	2.5	3	4	5
混合系数的绝对值	0.141459	0.141268	0.1412060	0.1412711	0.141816	0.1409906

表 3 JPEG 压缩攻击及水印检测结果

品质因子	60	50	40	30	20	10
混合系数的绝对值	0.141322	0.141216	0.1410061	0.1382117	0.132168	0.1266090

表 4 图像增亮攻击及水印检测结果

增量值	40	50	60	70	80	90
混合系数的绝对值	0.1420013	0.141686	0.1411001	0.1410280	0.138132	0.1302710

表 5 图像线性滤波攻击及水印检测结果

滤波强度	2 ×2	3 ×3	5 ×5	7 ×7	9 ×9	
混合系数的绝对值	0.131331	0.131283	0.121003	0.1210085	0.109241	

表 6 旋转攻击及水印检测结果

旋转角数	2	5	10	15	30	45
混合系数的绝对值	0.125518	0.088284	0.072247	0.026442	0.010642	0.0017868

理论上只要混合系数的绝对值大于 0 则表示混合图像中含有水印信息,但实际上盲源分离算法往往存在不精确的现象,因此需要确定一阈值 NC,当混合系数的绝对值大于该阈值 μ_0 时表明混合图像中含有水印信息. NC 一般是一个较小的值,本文取 0.01. 由表 1 - 表 6 的检测结果可知,其中盐噪声攻击取系数为 0.5 时和旋转 45 度时检测不到水印,但此时混合图像的质量已被严重破坏,无利用价值,其余情况均能检测到,特别是拉申攻击、JPEG 压缩和图像增量对混合系数的影响是微弱的,这是因为这三种攻击对混合图像来说只改变振幅

而不影响波形. 由此可知本文的水印方案具有较强的鲁棒性.

5　结论

利用独立分量分析来研究数字水印是一个新的方法,具有强大的生命力. 本文利用迭代混合的思想,嵌入水印,能保证较好的不可觉察性,利用盲源分离JADE算法检测水印. 由于ICA方法对一定的噪声干扰和混合信号振幅变化的不敏感,提取水印时也不需要知道嵌入水印的确切位置,从而使水印能有效地抵抗恶意攻击,具有较强的鲁棒性. 理论分析和仿真结果表明了该方法的有效性和可行性. 能否成功检测水印主要依赖于盲源分离算法,但目前盲源分离算法并不是十分成熟,如算法存在病态现象,如何克服这种病态现象是我们下一步研究的重点.

参考文献:

[1] Bender W, Gruhl D, Morimoto N. Technique for data hiding [J]. IBM Systems Journal, 1996, 35(3&4): 313 - 335.

[2] Cox I J, Kilian J, Leighton F T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 - 1687.

[3] Mobasseri B G. Exploring CDMA for watermarking of digital video[A]. Proc. of the IS&T/SPIE Electronic Imaging[C]. San Jose: IS&T/SPIE Press, 1999. 96 - 102.

[4] Pereira S, Pun T. Robust template matching for affine resistant image watermarks[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6): 1123 - 1129.

[5] 陈真勇,唐龙,唐泽圣,熊璋. 以鲁棒性为目标的数字多水印研究[J]. 计算机学报, 2006, 29(11): 2037 - 2043.
Chen Zheng Yong, Tang Long, Tang Ze Sheng, Xiong Zhang. Multi-wat ermark method toward goal of robustness[J]. Chinese Journal of Computer, 2006, 29(11): 2037 - 2043. (In Chinese)

[6] Pierre Comon. Independent component analysis, a new concept [J]? Signal Process, 1994, 36(3): 287 - 314.

[7] Aapo Hyvrinen. Survey on independent component analysis[J]. Neural Computing Surveys, 1999, 2: 94 - 128.

[8] Szu H, Noel S, Yim S, Willey J, Landa J. Multimedia authenticity protection with ICA watermarking and digital bacteria vaccination[J]. Neural Networks, 2003, 16(6): 907 - 914.

[9] Pham D T, Cardoso J. Blind separation of instantaneous mixtures of nonstationary sources [J]. IEEE Signal Processing, 2001, 49(9): 1837 - 1848.

[10] Hyvarinen A, Oja E. Independent component analysis: A Tutorial[EB/OL]. http://www.cis.hut.fi/projects/ica, 2007-08-16.

作者简介:

秦　拯　男,1969年出生,湖南祁东人,湖南大学软件学院教授,博士,主要研究方向是网络与信息安全,软件工程.
E-mail: qz88@263.net

易叶青　男,1976年出生,湖南邵阳人,讲师,湖南大学计算机与通信学院博士研究生,主要研究方向是数字水印,无线传感器网络.
E-mail: yeqingyi@126.com

林亚平　男,1955年出生,湖南邵阳人,教授,博士,博士生导师,主要研究领域为计算机网络、机器学习.
E-mail: yplin@hnu.cn