

文章编号:1001-9081(2005)10-2370-04

基于直方图频域统计矩的图像隐写分析

高建炯¹, 宣国荣¹, 施云庆², 柴佩琪¹, 杨志强¹

(1. 同济大学 计算机科学与技术系, 上海 200092;

2. 美国新泽西州工学院 电气工程和计算机系, 美国 新泽西)

(0320080182@smail.tongji.edu.cn)

摘 要:以图像小波子带系数直方图频域统计绝对矩作为特征,进行图像隐写分析,取得良好的分类性能。并且从理论和实际两方面证实了,对于图像隐写分析,直方图频域矩比直方图空域矩更有效。实验结果表明本文方法优于目前其他的图像通用隐写方法。在 CorelDraw 图像库上的测试结果,对多种数据隐藏方法的正确检出率达 90% 以上。

关键词:图像隐写分析;直方图频域矩;数据隐藏

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

Image steganalysis based on statistical moments in the frequency domain of the histogram

GAO Jian-jiong¹, XUAN Guo-rong¹, SHI Yun-qing², CAI Pei-qi¹, YANG Zhi-qiang¹

(1. Department of Computer Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Electric Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology, New Jersey, USA)

Abstract: This paper proposed an novel image steganalysis scheme which takes the statistical moments in the frequency domain of the histogram of wavelet subbands as features. Our theoretical analysis and experimental results shows that the statistical moments in the frequency domain of the histogram is more effective than that in the spatial domain of the histogram. The experimental results demonstrate that the proposed method is superior to existing steganalysis schemes. The test result on CorelDraw images: the detection rates of several data hiding methods are above 90%.

Key words: image steganalysis; moments in frequency domain of histogram; data hiding

0 引言

隐写分析 (Steganalysis) 是隐写技术 (Steganography) 和/或数据隐藏技术 (Data Hiding) 的反过程。隐写分析的目的是区分载体对象 (cover-object) 和隐写对象 (stego-object)。目前的隐写分析技术可以分为通用隐写分析和针对特定数据隐藏方法的隐写分析。

本文讨论使用模式识别方法进行图像通用隐写分析。目前的主要方法是在图像或者其变换域 (如小波域) 直方图中直接提取特征用于隐写分析。在文献 [1] 中, Farid 等提出了小波高阶统计量隐写分析方法, 利用小波子带抽取 72 个高阶统计量作为特征, 取得了一定的效果。另外也可以在直方图的频域中提取特征用于隐写分析。在文献 [2] 中, Harmsen 提出了图像特征函数质心隐写分析方法, 用图像空域特征函数 (Histogram Characteristic Function, HCF) 的质心 (Center Of Mass, COM) 作为特征, 也取得了一定的效果, 但由于特征数量有限, 限制了其分类能力。

1 隐写分析中特征的有效性

隐写分析实际上是模式识别问题, 即按图像是否嵌入隐藏信息, 将图像分为嵌入信息前、后两类。和一般模式识别问题相同, 隐写分析问题主要包括特征表示与提取以及分类器

设计。具体就是, 首先选取图像中一些对数据隐藏过程较为敏感的特征, 然后根据这些特征设计合适的分类器对图像进行分类。其中, 特征表示与提取是最关键的问题, 也是目前隐写分析研究的热点。

对于模式识别来说, “好” 的特征应当是 “类内聚合, 类间分散”。同样, 对于隐写分析来说, “好” 的特征应当是: 1) 嵌入信息前、后两类类内聚合, 即从各种的载体图像中提取的特征相对聚合, 且使用各种隐写方法获得的隐写图像中提取的特征也相对聚合; 2) 嵌入信息前、后两类类间分散, 即特征对于信息隐藏过程敏感。

本文提出的特征为: 图像小波系数直方图的付氏变换后得到的频率统计矩。达到了 “类内聚合, 类间分散” 的效果。

2 隐写分析特征提取

2.1 数据隐藏和加性噪声

文献 [2] 中提出了数据隐藏的一个通用模型: 加性噪声模型。该模型将待隐藏的数据视为噪声, 它是服从一定分布的伪随机序列, 数据隐藏的过程相当于将噪声叠加到载体中。噪声与载体统计独立, 且多次数据隐藏过程叠加的噪声独立同分布。该模型适用于现有的多数数据隐藏方法, 如 LSB 方法、扩谱方法和 DCT 变换域方法等。

进一步考虑载体图像和隐写图像的直方图, 由加性噪声

收稿日期: 2005-05-08; 修订日期: 2005-06-29 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90304017)

作者简介: 高建炯 (1980-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 主要研究方向: 模式识别; 宣国荣 (1935-), 男, 上海人, 教授, 主要研究方向: 图像处理与模式识别; 施云庆 (1950-), 男, 美籍华裔, 教授, 主要研究方向: 数字信号处理; 柴佩琪 (1935-), 女, 上海人, 教授, 主要研究方向: 数字语音信号处理; 杨志强 (1964-), 男, 江苏太仓人, 副教授, 主要研究方向: 计算机应用。

模型可推得,数据隐藏过程相当于将载体图像的直方图与隐藏数据(即噪声)的概率密度函数进行卷积得到隐写图像的直方图^[2]。因而,信息隐藏前后,图像的统计信息(直方图)发生了变化。由此,给隐写分析的特征选取提供了一条思路。

2.2 直方图空域矩

卷积的效果在直方图上直接表现为:隐藏信息后,直方图的尖峰变平,直方图向两端扩展。由此可以考虑使用直方图的多阶统计矩作为特征。后文会提到我们使用小波分解技术和预测误差图像来增加特征数量。但由于小波域系数和预测误差图像直方图关于原点对称,因而奇数阶矩为零,不是很好的特征。因此,考虑使用直方图多阶绝对统计矩。

定义直方图多阶绝对统计矩 m_n (文献[1]中的特征类似于小波系数直方图的 1,2,3,4 阶矩,以下简称直方图空域矩或空域矩)如下:

$$m_n = \sum_{k=1}^N |x_k|^n p(x_k) \quad (1)$$

其中, n 是矩的阶数, N 为直方图水平轴变量的个数, x_k 为直方图水平轴变量(即统计的图像像素值), $p(x_k)$ 为 x_k 的概率分布,即:

$$p(x_k) = h(x_k) / \left(\sum_{k=1}^N h(x_k) \right) \quad (2)$$

其中, $h(x_k)$ 为图像直方图,即图像中像素值为 x_k 的像素个数。

2.3 直方图频域矩

卷积的效果在直方图频域上表现为:信息隐藏后,相当于对直方图进行了一次低通滤波。由此可以考虑用一下方法提取特征:先对直方图进行付氏变换,得到直方图的频率序列,然后计算该频率幅度序列的多阶统计矩。但由于直方图为实数,容易知道直方图的付氏变换得到的频率幅度序列关于原点对称,因而奇数阶矩为零。因此,本文选用直方图频率幅度多阶绝对统计矩作为特征。

定义直方图频域多阶绝对统计矩 M_n (类似于文献[2]中直方图特征函数质心,以下简称直方图频域矩或频域矩)如下:

$$M_n = \sum_{k=-N/2}^{N/2} |f_k|^n p(f_k) \quad (3)$$

其中, n 是矩的阶数, N 为直方图水平轴变量的个数, f_k 为付氏变换的第 k 次频率, $k = -N/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, N/2$, $p(f_k)$ 为直方图付氏变换后的幅度的分布,即:

$$p(f_k) = |H(f_k)| / \left(\sum_{k=-N/2}^{N/2} |H(f_k)| \right) \quad (4)$$

其中, $|H(f_k)|$ 是直方图 $h(x_k)$ 付氏变换的第 k 次频率的幅度,付氏变换如下:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) e^{-j2\pi fx} dx \quad (5)$$

2.4 直方图空域矩和频域矩的比较

2.4.1 直方图分布服从单个正态分布时

零均值正态分布的 n 阶绝对矩公式^[8]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x|^n N(0, \sigma^2) dx = k_n \sigma^n \quad (6)$$

$$\text{where } k_n = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\pi}}, & \forall n = 1 \\ \sqrt{\frac{2}{\pi}}(n-1)!!, & \forall n \in \text{odd}, n > 1 \\ (n-1)!!, & \forall n \in \text{even}, n > 1 \end{cases}$$

所以,当直方图 x 的分布服从 $N(0, \sigma^2)$ 时,直方图空域

矩:

$$m_n = k_n \sigma_n \quad (7)$$

当直方图 x 的分布服从 $N(0, \sigma^2)$ 时,其频率 f 的分布服从 $N(0, \frac{1}{\sigma^2})$,则直方图频域矩:

$$M_n = \frac{k_n}{\sigma_n} \quad (8)$$

2.4.2 直方图服从两个正态分布的混合分布时

为了简化问题,假设直方图分布服从两个正态分布的混合分布。本文在图像空域和小波域中提取特征。小波域的直方图分布服从均值为零且峰值较尖锐的 Laplace 分布,可以近似的看作是两个均值相差较大的正态分布的混合分布。

假设这两个分布分别为: x_1 服从 $N(0, \sigma_1^2)$, x_2 服从 $N(0, \sigma_2^2)$, 设两者先验概率为 $P(\omega_1)$ 和 $P(\omega_2)$ ($P(\omega_1) + P(\omega_2) = 1$)。假设 $\sigma^2 = \sigma_1^2, \sigma_2^2 = (\beta\sigma)^2$, 则:

$$p(x) = P(\omega_1) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right\} + P(\omega_2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_2^2}\right\} \quad (9)$$

$$p(f) = P(\omega_1) \frac{\sigma_1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\sigma_1^2 f^2}{2}\right\} + P(\omega_2) \frac{\sigma_2}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\sigma_2^2 f^2}{2}\right\} \quad (10)$$

此时空域矩 m_n 和频域矩 M_n 分别为:

$$m_n = k_n P(\omega_1) \sigma_1^n + k_n P(\omega_2) \sigma_2^n = (P(\omega_1) + P(\omega_2) \beta^n) k_n \sigma^n \quad (11)$$

$$M_n = k_n P(\omega_1) \frac{1}{\sigma_1^n} + k_n P(\omega_2) \frac{1}{\sigma_2^n} = \left(P(\omega_1) + \frac{P(\omega_2)}{\beta^n} \right) \frac{k_n}{\sigma^n} \quad (12)$$

假设加性噪声服从 $m \sim N(0, \sigma_m^2)$, 设 $\sigma_m^2 = (\alpha\sigma)^2$ 。信息隐藏后直方图分布 x_1 服从 $N(\mu_1, (1 + \alpha^2)\sigma^2)$, x_2 服从 $N(\mu_2, (\alpha^2 + \beta^2)\sigma^2)$ 。为了方便计算,假设 $P(\omega_1) = P(\omega_2) = 0.5$ 。数据隐藏前后, m_n 与 M_n 的变化率为:

$$\left| \frac{\Delta m_n}{m_n} \right| = \left| \frac{((1 + \alpha^2)^{n/2} + (\alpha^2 + \beta^2)^{n/2}) k_n \sigma^n}{(1 + \beta^n) k_n \sigma^n} - 1 \right| = \frac{(1 + \alpha^2)^{n/2} + (\alpha^2 + \beta^2)^{n/2}}{1 + \beta^n} - 1 \quad (13)$$

$$\left| \frac{\Delta M_n}{M_n} \right| = \left| \frac{\left(\left(\frac{1}{1 + \alpha^2} \right)^{n/2} + \left(\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \right)^{n/2} \right) \left(\frac{1}{\sigma} \right)^n}{\left(1 + \frac{1}{\beta^n} \right) \left(\frac{1}{\sigma} \right)^n} - 1 \right| = 1 - \frac{\left(\frac{\beta^2}{1 + \alpha^2} \right)^{n/2} + \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2 + \beta^2} \right)^{n/2}}{1 + \beta^n} \quad (14)$$

由此可得,频域矩和空域矩变化率之比为:

$$R_n = \frac{\left| \frac{\Delta M_n}{M_n} \right|}{\left| \frac{\Delta m_n}{m_n} \right|} = \frac{1 + \beta^n - \left(\frac{\beta^2}{1 + \alpha^2} \right)^{n/2} - \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2 + \beta^2} \right)^{n/2}}{(1 + \alpha^2)^{n/2} + (\alpha^2 + \beta^2)^{n/2} - 1 - \beta^n} \quad (15)$$

图 1 是,当 β 分别取 0.0, 0.1, 1.0, n 分别取 1, 2, 3 时, R_n 随着 α 变化的曲线。图中,横轴为 α , 从 0.0 到 1, 为了便于观察,纵轴取 $\ln(R_n)$ 。在分割线 (Dividing line) 以上区域时, $\ln(R_n)$

> 0 , 即 $R_n > 1$, 频域矩的变化率比空域矩的要大; 反之亦然。

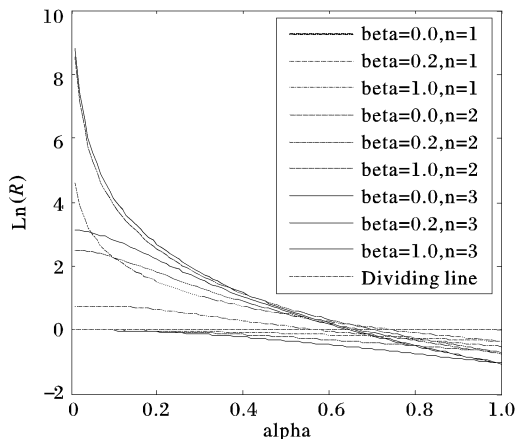


图1 空域矩和频域矩变化率比较曲线

首先解释一下 β 分别等于 0, 0.2, 1 时的意义:

1) $\beta = 0$ 对应一种特殊情况。此时, 直方图分布是一个正态分布和一个 δ 函数的混合分布。在小波域中的意义就是, 很多的小波系数都是 0, 形成 δ 函数, 剩下的小波系数形成一个正态分布。

2) $\beta = 1$ 对应另一种特殊情况。此时, 两个正态分布相同, 即直方图分布只是单个正态分布。一般情况下, 单个正态分布不能很好的描述小波直方图分布。

3) $\beta = 0.2$ 是一般情况下的一个例子。此时, 直方图分布是两个标准差相差 5 倍的正态分布的混合分布。在小波域中的意义就是, 很多的小系数形成方差较小的正态分布, 剩下的大系数形成方差较大的正态分布。小波域的直方图分布服从均值为零且峰值较尖锐的 Laplace 分布, 与此相符。

现在, 观察图 1, 可以发现:

1) 当 $\beta = 0$ 和 $\beta = 0.2$ 时, 当 α 较小时, $\ln(R_n) > 0$, 频域矩的变化率比空域矩的变化率明显要大; 随着 α 的增大, 频域矩的优势逐渐减小, 最后空域矩的变化率大于频域矩的变化率。

2) 当 $\beta = 1$ 时, 空域矩的变化率一直比频域矩大。

3) 对于 1, 2, 3 阶矩 ($n = 1, 2, 3$), $\ln(R_n) > 0$ 随着 α 的变化趋势类似。

可以得出以下结论: 隐写过程中, 一般嵌入的加性噪声的方差, 相对载体图像及其小波系数直方图分布的方差来说, 都是比较小的, 即 α 一般较小, 否则会影响隐藏信息后图像的视觉效果。且小波域中, β 的值一般也较小。当这两个条件都满足 (事实上, 一般都会满足) 时, 频域矩的变化率比空域矩的变化率明显要大。即对于数据隐藏过程, 频域矩要比空域矩敏感得多。

还能得出以下一些普遍的结论:

1) 频域矩和空域矩都可以反映直方图的变化。

2) 空域矩反映的是直方图中方差较大的分布的变化情况, 或者说空域矩反映直方图的总体的变化情况。具体对于隐藏信息的过程来说, 直方图总体的变化就是加性噪声使得直方图总体向两端扩展。而当隐藏信息较少时, 加性噪声方差较小, 直方图总体变化不大, 空域矩变化较小。

3) 而频域矩反映的是直方图中方差较小的分布的变化情况, 或者说反映了直方图尖峰处的变化情况。具体对于隐藏信息的过程来说, 直方图尖峰处变平变宽。即使隐藏的信息较少, 直方图尖峰处的变化应当还是明显的。因此频域矩对于信息隐藏过程相当敏感。

4) 一般来说, 自然图像特别是其小波系数直方图总是含

有尖峰, 因而用直方图频域矩作为特征进行图像隐写分析可以达到很好的“类间分散”的效果。

2.5 小波分解和本文特征

本文利用小波分解技术, 在预测误差图像的多级小波子带系数中计算特征函数多次矩组成多维特征, 用于隐写分析。本文提取特征过程如图 2 所示。

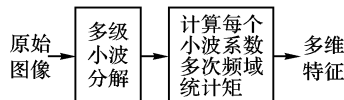


图2 本文特征的提取过程

3 实验结果

实验一 CorelDraw 图像 66 094 使用 LSB 方法隐藏信息前后的小波系数直方图空域和频域分布



图3 CorelDraw 图像 66094

图 3 是 CorelDraw 图像 66 094 的灰度图。图 4 是该图像使用 LSB 方法隐藏信息前后的小波系数直方图空域和频域分布。图 4 中, 最上面的是原图减去嵌入图后的差图的分布, 即加性噪声分布; 中间的是隐藏信息前/后 (红/蓝) 图像第一级小波 HH 子带直方图分布; 最下面的是隐藏信息前/后 (红/蓝) 图像第一级小波 HH 子带直方图频域分布。从图 3 中可以看出, 直方图频域的变化要比直方图空域大得多。

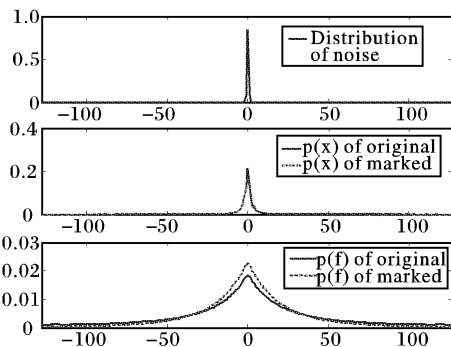


图4 66 094 信息隐藏前后 HH 子带直方图空域和频域分布

表 1 为 66 094 使用 LSB 方法隐藏信息前后的小波系数直方图空域矩和频域矩的变化情况。

表1 空域矩和频域矩的变化比较

n	m_n	m_{ne}	M_n	M_{ne}	R
1	4.19	4.30	32.63	23.83	9.9
2	0.69	0.70	20.75	11.67	54.5
3	0.23	0.23	17.29	8.16	184.4

实验二 CorelDraw1096 隐写分析结果

实验中, 本文方法使用三级小波分解加上空域共 13 个子带, 3 阶矩的特征函数的幅度 ($13 \times 3 = 39$ 维)。测试图像库为 CorelDraw 1096 图像库^[7]。随机抽取 896 张训练, 剩下 200 张测试, 重复 30 次平均。使用 Bayes 分类器。

嵌入数据使用了以下 5 种较为典型的方法: 扩谱方

法^[3,9](嵌入服从标准正态分布的 1 000 个信号序列, $\alpha = 0.1$);盲扩谱方法^[4](嵌入服从标准正态分布的 16000 个信号序列);基于 8×8 DCT 块的扩谱方法^[5](容量 0.05bpp, 每 DCT 块嵌入 3 bits);基于 8×8 DCT 块量化索引调制(QIM)方法(容量 0.1bpp, 每 DCT 块嵌入 6 bits);最低位平面(LSB)方法(容量 0.3bpp)。

表 6 是空域矩和频域矩对于 CorelDraw 图像库的隐写分析结果。表 7 是 Farid 方法和 Harmsen 方法对于 CorelDraw 图像库的隐写分析结果。

表 6 空域矩特征和频域矩特征隐写分析对 CorelDraw 的测试结果

数据 隐藏 方法	空域矩 39 维			频域矩 39 维 (本文方法)		
	原图 识别 率%	嵌入 图识 别率%	总识 别率%	原图 识别 率%	嵌入 图识 别率%	总识 别率%
Cox	62.5	51.6	57.1	94.1	96.0	95.0
Piva	77.2	69.8	73.5	88.5	96.6	92.6
Huang	93.0	90.8	92.0	93.3	98.4	95.9
QIM	90.0	86.0	88.0	97.2	99.0	98.1
LSB	87.6	32.6	60.1	93.1	93.6	93.3
综合	54.7	74.8	71.5	87.4	88.8	88.5

表 7 Farid^[1]和 Harmsen^[2]隐写分析对 CorelDraw1 096 的测试结果

数据 隐藏 方法	Farid 方法 72 维			Harmsen 方法 3 维		
	原图 识别 率%	嵌入 图识 别率%	总识 别率%	原图 识别 率%	嵌入 图识 别率%	总识 别率%
Cox	75.3	52.9	64.1	51.6	85.1	68.4
Piva	86.4	89.2	87.8	91.4	52.4	71.9
Huang	92.0	61.3	76.6	96.0	64.0	80.0
QIM	99.3	100	99.6	91.8	50.6	71.2
LSB	89.8	52.7	71.3	80.9	41.1	61.0
综合	86.3	53.0	80.7	97.8	80.1	83.3

4 结语

1) 本文第一次提出使用图像小波子带系数直方图频域多阶统计绝对矩作为特征,进行图像隐写分析,取得良好的分类性能;

2) 从理论和实际两方面论证了,对于图像隐写分析,直

方图频域矩优于直方图空域矩;

3) CorelDraw 1 096 图像库测试结果表明,本文方法优于目前其他的通用隐写方法。

参考文献:

- [1] FARID H. Detecting hidden messages using higher-order statistical models[A]. In: Proc. of the IEEE Int'l. Conf. on Image Processing 02[C], Vol II. New York: IEEE, 2002. 905 - 908.
- [2] HARMSSEN JJ. Steganalysis of Additive Noise Modelable Information Hiding [D]. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, May 2003.
- [3] COX IJ, KILIAN J, LEIGHTON T, *et al.* Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12): 673 - 1687.
- [4] PIVA A, BARNI M, BARTOLINI E, *et al.* DCT-based Watermark Recovering without Resorting to the Uncorrupted Original Image [A]. Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing (ICIP'97)[C], 3 - Vol. 1, P. 520.
- [5] HUANG J, SHI YQ. An adaptive image watermarking scheme based on visual masking[A]. IEE Electronic Letters[C], 1998, 34(8): 748 - 750.
- [6] DUDA RO, HART PE, STORK DG. Pattern Classification, Second Edition[M]. John Wiley & Sons, 2001.
- [7] CorelDraw Software[EB/OL]. <http://www.corel.com>, 2005.
- [8] 苏淳. 概率论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 刘绍辉, 姚鸿勋, 高文, 等. 针对小波域量化隐藏方法的图像监测技术研究[J]. 通信学报, 2004, 25(7): 71 - 77.
- [10] SHI YQ, GUO RX, CHENG YY, *et al.* Effective Steganalysis Based on Statistical Moments of Wavelet Characteristic Function [A]. International Conference on Information Technology Coding and Computing (IEEE ITCC 2005) [C], Las Vegas, NV, USA, 2005. 4 - 6.
- [11] SHI YQ, GUO RX, ZOU D, *et al.* Steganalysis Based on Moments of Characteristic Functions Using Wavelet Decomposition, Prediction-Error Image, and Neural Network[A], International Conference on Multimedia & Expo (IEEE ICME 2005) [C], Amsterdam, The Netherlands, 2005. 6 - 8.
- [12] GUO RX, SHI YQ, GAO J, *et al.* Steganalysis Based on Multiple Features Formed by Statistical Moments of Wavelet Characteristic Functions[A]. The 7th Information Hiding Workshop (IH05) [C]. Barcelona, Catalonia, Spain, 2005. 6 - 8.
- [13] (上接第 2366 页)
- [14] 综合上述的分析可知:本水印系统对噪声、裁剪、JPEG 压缩有较强的稳健性,在旋转处理后几乎不能检测出水印信息。
- [15] 4 结语
- [16] 本文基于混沌序列和置乱提出了一类二值图像水印改进算法,算法具有以下特点:1) 应用混沌序列加密和空域变换方法,安全性高;2) 水印嵌入到原始图像的低频区域,稳健性较好;3) 水印的嵌入和提取计算复杂度小,算法简单可靠。
- [17] 参考文献:
- [18] [1] 王颖,黄志蓓. 数字水印[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [19] [2] 冯登国. 密码学原理与实践[M]. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [20] [3] NIKOLAIDIS N, TSEKERIDOU S, NIKOLAIDIS A, *et al.* Applications of chaotic signal processing techniques to multimedia Watermark[J]. Proceedings of the IEEE workshop on Nonlinear Dynamics in Electronic Systems, Catania Italy, May 18 - 20, 2000, 1 - 7.
- [21] [4] SCHMITZ R. Use of chaotic dynamical systems in cryptography[J]. J. Franklin. Institute, 2001. 338 (4): 429 - 441.
- [22] [5] OGORXALEK KMP. Special Issue on Chaos Synchronization and Control: Theory and Application[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1997, 44(10): 853 - 1039.
- [23] [6] 张志明,王磊. 基于混沌加密的 DCT 域图像水印算法[J]. 计算机工程, 2003, 29(17): 10.
- [24] [7] 孙兆林. MATLAB 6. x 图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [25] [8] 曹芝兰. 数字图像加密与水印技术的研究[D]. 武汉: 湖北大学硕士学位论文, 2004.