

一种基于双边假设检验的 Contourlet 域乘性水印盲检测算法

叶建兵¹, 谭沈阳¹, 张学华²

(1. 南京理工大学泰州科技学院, 泰州 225300; 2. 黄山学院, 黄山 245041)

摘要: 为解决 Contourlet 变换域中乘性水印的检测问题, 根据广义高斯分布描述图像 Contourlet 变换高频方向子带系数的统计分布特征, 在服从广义高斯分布的系数中, 将水印的检测问题转化为了具有未知参数的确定性伪随机序列的检测问题, 利用双边假设检验推导出了适用于 Contourlet 域乘性水印的盲检测器。实验表明, 该盲检测器的判决准, 对任何嵌入强度均有效, 并且可以自适应地确定检测阈值。

关键词: 数字水印; Contourlet 变换; 广义高斯分布; 双边假设检验

中图分类号: TP391; TS853⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)11-0089-04

A Two-sided Hypothesis Testing Based Blind Detection Algorithm of Multiplicative Watermarks in Contourlet Transform Domain

YE Jian-bing¹, TAN Shen-yang¹, ZHANG Xue-hua²

(1. Taizhou Institute of Science and Technology, NJUST, Taizhou 225300, China; 2. Huangshan University, Huangshan 245041, China)

Abstract: To solve Contourlet transform domain multiplicative watermark detection problem, the characters of high frequency directional subband coefficients in Contourlet transform were statistically modeled using generalized Gaussian distribution. Detection of the pseudo-random sequences with unknown parameters in generalized Gaussian distribution coefficients was used to formulate the framework of watermark detection. By using two-sided hypothesis testing theory, a blind detector applicable to Contourlet domain multiplicative watermarks was constructed. Experiments showed that the decision rule of the blind detector was valid for any embedding strength, and the detection threshold can also be determined adaptively.

Key words: digital watermarking; Contourlet transform; generalized Gaussian distribution; two-sided hypothesis testing

数字水印作为传统密码学的有效补充, 是一门全新的信息安全技术。水印算法的研究主要集中在嵌入算法和检测算法。嵌入算法主要在空域和变换域^[1]进行, 随着小波之后图像的各种有效表示方法 (Ridgelet, Curvelet, Contourlet 等) 的不断出现, 图像水印的变换域算法得到了极大的扩展^[2-5]。检测算法是水印算法的另一个重大问题。在盲检测要求下嵌入强度不为检测器所知, 对于失真的水印图像, 嵌入强度更不可知。此外, 原始图像的统计分布常常表现为强烈的非高斯性, 很多水印检测算法并没有把嵌

入强度的不确定性和图像的统计特征结合起来考虑。

乘性水印检测问题的解决办法出现在 Cheng 和 Huang 的工作中^[6], 他们提出了基于局部优化检测的水印检测器, 其实质是一个单边假设检验, 当水印的嵌入强度大于零时有效。孙中伟等改进了 Cheng 和 Huang 的工作, 他们的检测器及判别准则对嵌入强度小于零的情况也有效^[7-8]。李海峰等提出的 Contourlet 域的乘性水印盲检测算法需要知道嵌入强度的准确信息^[4], 等同于 Cheng 和 Huang 的一致最优势检测器, 即使知道原始的嵌入强度, 水印图像失真

收稿日期: 2011-04-18

基金项目: 安徽省青年人才基金项目(2010SQRL169)

作者简介: 叶建兵(1981—), 男, 江苏人, 硕士, 南京理工大学泰州科技学院讲师, 主要研究方向为数字水印、几何多尺度分析与图像处理。

后,这个强度也会变化,使得检测器性能下降^[3]。朱香卫等提出的 Contourlet 域乘性水印盲检测算法使用了双边假设检验,但是判决准则不当,且没有给出检测阈值的自适应确定方法^[9]。

针对已有 Contourlet 域乘性水印盲检测算法的不足^[3-4,9],把水印的检测归结为双边假设检验,利用似然比检验推导出乘性水印的盲检测器,建立了新的判决准则,使得盲检测器对任何嵌入强度均有效,并给出了根据给定的虚警概率水平自适应确定检测阈值的方法。

1 乘性水印的嵌入

对一幅图像进行 Contourlet 变换,得到一个低频图像和一系列的高频子带图像。水印的嵌入位置选择为某一尺度上高频方向子带中方差最大的一个。嵌入使用乘性方案:

$$y_i = x_i(1 + \gamma w_i) \quad (1)$$

其中: $i=1, 2, \dots, N$, $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_N\}$ 表示原始图像的 Contourlet 变换系数; $\vec{y} = \{y_1, \dots, y_N\}$ 表示嵌入了水印的系数序列; $\vec{w} = \{w_1, \dots, w_N\}$ 表示水印序列; γ 是嵌入强度。把嵌入了水印的 Contourlet 系数放回原来的位置,进行 Contourlet 反变换就得到了嵌入水印之后的图像。

2 乘性水印的盲检测器设计

2.1 Contourlet 变换系数的统计特征及参数估计

Contourlet 变换高频方向子带系数的统计模型是解决乘性水印检测问题的前提。采用零均值广义高斯分布(GGD)描述 Contourlet 变换高频方向子带系数的统计特征。设其概率密度函数为:

$$p(x; c, \sigma) = A e^{-|\beta x|^c} \quad (2)$$

$$\text{式中: } A = \frac{\beta c}{2\Gamma\left(\frac{1}{c}\right)}, \beta = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\Gamma\left(\frac{3}{c}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{c}\right)}}, \Gamma(z) =$$

$\int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt, z > 0$, 记为 GGD($c; 0, \sigma$); σ 为子带系数的标准差; c 为形状参数。参数估计通常采用极大似然方法^[4,9-10], 极小化相对熵方法^[7-8]等, 其中极大似然估计法还得到了进一步的改进^[11]。

将某个 Contourlet 变换的方向子带系数扫描成

一个向量 $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_N\}$, 采用下面的方法估计上述 2 个参数^[12]:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (3)$$

$$\hat{\kappa} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^4}{\hat{\sigma}^4} \quad (4)$$

$$\hat{\kappa} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{c}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{5}{c}\right)}{\Gamma^2\left(\frac{3}{c}\right)} \quad (5)$$

即从式(3)、式(4) 求出子带系数的方差 $\hat{\sigma}^2$ 和峰度 $\hat{\kappa}$, 再利用式(5) 建立一个峰度 $\hat{\kappa}$ 的表格, 从该表格中找到与给定峰态系数最接近的表格值所在的位置, 通过查表求出形状参数 c 。

2.2 Contourlet 域乘性水印检测器及判别准则

在没有原始图像和不知道嵌入强度的前提下, 把水印的检测问题归结为双边假设检验:

$$\begin{cases} H_0: \gamma = 0 \\ H_1: \gamma \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

设原始图像 Contourlet 变换后方差最大的子带系数 $x_i \sim \text{GGD}(c; 0, \sigma)$; x_i 是相互独立的 Contourlet 变换系数; 水印信息 $\vec{w} = \{w_1, \dots, w_N\}$ 是 $(-1, 1)$ 区间上服从均匀分布的伪随机序列; \vec{w} 独立于 \vec{x} , $|\gamma w_i| < 1$ 。对于式(1)的嵌入方案, 检测器为^[3]:

$$\tilde{\delta}(\vec{x}) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N c |\beta z_i|^c |w_i| \right] \gamma \quad (7)$$

$$\text{当 } \gamma > 0 \text{ 时 } \tilde{\delta}(\vec{z}) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N c |\beta z_i|^c |w_i| \right] \gamma > T_0,$$

即 $\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N c |\beta z_i|^c |w_i| \right] > \frac{T_0}{\gamma}$, 则接受假设 H_1 ; 当 $\gamma <$

0 时, $\tilde{\delta}(\vec{z}) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N c |\beta z_i|^c |w_i| \right] \gamma < T_0$, 即

$\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N c |\beta z_i|^c |w_i| \right] < \frac{T_0}{\gamma}$, 则接受 H_0 。很显然, γ 的

符号影响检测器的判别, 记检测器为:

$$\delta(\vec{z}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c |\beta z_i|^c |w_i| \quad (8)$$

该检测器不含嵌入强度的信息, 需要待检测图像的子带系数 $\vec{z} = \{z_1, \dots, z_N\}$ 及水印信息 $\vec{w} = \{w_1, \dots, w_N\}$ 。盲检测要求下, 检测器需要原始图像的 2 个统计参数 c 和 β 通过待检测图像获得^[6]。根据似然比检验的要求, 将检测器响应值与检测阈值 T 相比较。判决准则: 当 $|\delta(\vec{z})| \geq T$, 接受 H_1 , 水印存在; 当 $|\delta(\vec{z})|$

$|\cdot| < T$, 接受 H_0 , 水印不存在。

2.3 检测阈值的确定

按上述对子带系数和水印信息的假设, 通过计算检测器的期望和方差, 确定检测阈值。在原假设 H_0 下, $z_i = x_i$, 此时:

$$E[\delta(\vec{z})] = \frac{1}{N} c |\beta|^c \sum_{i=1}^N E(|x_i|^c) E(w_i) = 0 \quad (9)$$

$$\sigma_L^2 = \text{Var}[\delta(\vec{z})] = \frac{1}{N^2} c^2 \beta^{2c} \cdot$$

$$\sum_{i=1}^N E(|x_i|^{2c}) E(w_i^2) = 0 \quad (10)$$

式(10)中, 分别利用方差公式和积分性质可得:

$$E(w_i^2) = \text{Var}(w_i) + [E(w_i)]^2 = \frac{1}{3} \quad (11)$$

$$E(|x_i|^{2c}) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_i^{2c} A e^{-|\beta x_i|^c} dx_i =$$

$$2A \int_0^{+\infty} x_i^{2c} e^{-|\beta x_i|^c} dx_i \quad (12)$$

式(12)中, 令 $|\beta x_i|^c = u$, 利用换元积分法可得:

$$E(|x_i|^{2c}) = \frac{2A}{c\beta^{2c+1}} \int_0^{+\infty} e^{-u} u^{2+\frac{1}{c}-1} du =$$

$$\frac{2A\Gamma\left(2 + \frac{1}{c}\right)}{c\beta^{2c+1}} \quad (13)$$

将式(11)、式(13)代入式(10)得:

$$\sigma_L^2 = \text{Var}[\delta(\vec{z})] = \frac{2cA\Gamma\left(2 + \frac{1}{c}\right)}{3N\beta} \quad (14)$$

依据中心极限定理用高斯分布近似 $\delta(\vec{z})$ 的分布:

$$\delta(\vec{z}) \sim N(0, \sigma_L^2) \quad (15)$$

将其标准化:

$$\delta_N(\vec{z}) = \frac{\delta(\vec{z})}{\sigma_L} \sim N(0, 1) \quad (16)$$

对于给定的虚警概率 P_f :

$$P_f = P(|\delta(\vec{z})| > T | H_0) = P(\delta_N(\vec{z}) > T | H_0) + P(\delta_N(\vec{z}) < -T | H_0) = 2Q(T) \quad (17)$$

由此得到检测阈值为:

$$T = \sigma_L Q^{-1}\left(\frac{P_f}{2}\right) \quad (18)$$

式中: Q^{-1} 是 Q 的反函数; $Q(t) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du。$$

3 实验

以标准测试图像“lena”(大小 256×256 , 8 bit/pixel) 为例, 见图 1, 用实验验证检测器及新的判别准

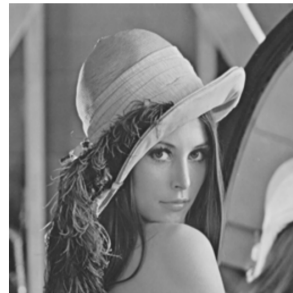


图 1 lena 图像
Fig. 1 lena image

则的有效性。Contourlet 变换的 LP 分解采用“9-7”双正交滤波器, 方向滤波使用“pkva”滤波器。LP 分解进行 2 层, 2 个带通子带方向分解的数目分别是 4 和 8(见图 2)。水印 $\vec{w} = \{w_1, \dots, w_n\}$ 是 $(-1, 1)$ 区间

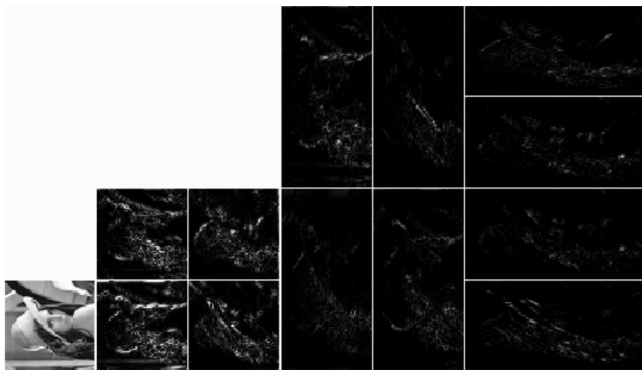
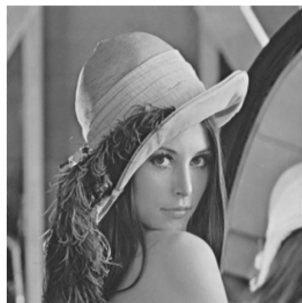


图 2 lena 图像的 Contourlet 分解

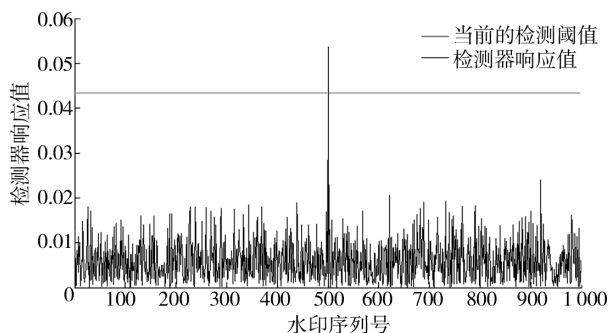
Fig. 2 Decomposition of lena image in Contourlet domain

上服从均匀分布的伪随机序列。求出 8 方向子带中方差最大的一个, 按式(1)修改系数, 在其中嵌入水印。将修改后的系数放回原位置, 反变换得到含水印图像, 见图 3。

用密钥控制生成 1000 个不同的水印, 第 500 个为真正嵌入到原始图像中的水印。把图 3 作为待检测图像, 做相同的 Contourlet 变换, 同样求出 8 方向子带中方差最大的一个, 将其系数作为检测器接收到的系数 $\vec{z} = \{z_1, \dots, z_N\}$ 。检测器需要的原始图像的 2 个统计参数 c 和 β 通过 $\vec{z} = \{z_1, \dots, z_N\}$ 获得, 由此计

图3 含水印图像($\gamma = -0.7$)Fig. 3 Watermarked image, $\gamma = -0.7$

算出检测阈值(虚警概率 $P_f = 10^{-8}$)。将 1 000 个水印逐个输入检测器,计算各自的响应值,见图 4。

图4 检测结果($P_f = 10^{-8}$)Fig. 4 Detection results, $P_f = 10^{-8}$

结果表明,第 500 个水印的检测器响应值大于当前的检测阈值,其余水印的检测器响应值小于当前的检测阈值,新的判决准则对嵌入强度小于 0 的情况有效($\gamma = -0.7$),且此时的检测阈值可以根据给定的虚警概率水平自适应确定,而不需要事先给定。

4 结论

检测器不需要事先知道嵌入强度的大小,符合盲检测的要求,新的判别准则对嵌入强度小于 0 的情况有效,从而对任意嵌入强度有效,改进了文献[3, 4, 9]的结果。检测阈值可以根据给定的虚警概率水平自适应确定,解决了水印检测中用以作为比较的检测阈值问题,完善了文献[9]的结果。另外,该检测器及其判决准则和检测阈值的确定方法也可以应用到非下采样 Contourlet(nonsubsampled Contourlet)域以及结合人类视觉系统的 Contourlet 域的乘性水印的检测中。

参考文献:

- [1] 丁盈盈,刘真. 3 种频域数字水印算法的分析和比较[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 103-107.
- [2] CAMPISI P, KUNDUR D, NERI A. Robust Digital Watermarking in the Ridgelet Domain [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(10): 826-830.
- [3] 叶建兵. 一类 SVD 水印算法的问题分析及 Contourlet 域的水印嵌入与检测算法[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] 李海峰, 宋巍巍, 王树勋. 基于 Contourlet 变换的稳健性图像水印算法[J]. 通信学报, 2006, 27(4): 87-94.
- [5] 陈开亮, 王建军. 一种 HVS 和 Contourlet 结合的图像水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(6): 811-816.
- [6] CHENG Qiang, HUANG Thomas S. Robust Optimum Detection of Transform Domain Multiplicative Watermarks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(4): 906-924.
- [7] 孙中伟, 冯登国. DCT 变换域乘嵌入图像水印的检测算法[J]. 软件学报, 2005, 16(10): 1798-1804.
- [8] 孙中伟, 冯登国, 武传坤. 基于弱信号检测理论的离散小波变换域数字水印盲检测算法[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(11): 1920-1926.
- [9] 朱香卫, 肖亮, 吴慧中. 基于 Contourlet 变换的乘性水印及盲检测算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(5): 150-152.
- [10] DO M N, VETTERLI M. Wavelet-Based Texture Retrieval Using Generalized Gaussian Density and Kullback-Leibler Distance [J]. IEEE Transactions Image on Processing, 2002, 11(2): 146-158.
- [11] PI Ming-hong. Improve Maximum Likelihood Estimation for Subband GGD Parameters [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27: 1710-1713.
- [12] 侯建华, 熊承义, 田金文, 等. 基于 MATLAB 的图像小波子带广义高斯模型的研究[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(1): 131-132.