

文章编号 :1001-2486(2001)06-0114-05

基于局部平稳高斯模型的小波变换域盲图像水印检测*

伯晓晨,沈林成,常文森

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要 :盲数字水印是数字作品版权保护系统的关键技术之一。由于在检测时没有原始图像作为参考,所以水印检测器的设计成为盲水印算法的核心。基于图像小波变换系数的局部平稳高斯模型,提出了一种新的盲水印检测器。实验结果表明该检测器与被广泛应用的线性相关检测器相比具有更好的鲁棒性。

关键词 :数字水印;盲水印检测器;局部高斯模型

中图分类号 :TP391 **文献标识码** :A

Blind Image Watermark Detection Based on the Local Gaussian Model In the Wavelet Domain

BO Xiao-chen, SHEN Lin-cheng, CHANG Wen-sen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :Blind image digital watermarking, which can detect watermark without using the original image, is a key technique for the practical intellectual property protecting system. For its good performance in image analysis and image compression, wavelet based digital watermark algorithm has become the mainstream in the digital watermark research. Based on the local Gaussian model of wavelet coefficients, we propose a new blind watermark detector. A series of experimental results show that it is more robust than linear correlation detector.

Key words :digital watermarking; blind watermark detector; local gaussian model

面对数字化复制和网络传播的挑战,用于数字作品版权保护的数字水印技术应运而生,并成为近年来新的研究热点。数字水印(Digital Watermark)技术是指用信号处理的方法在多媒体数据中嵌入隐蔽的标记,这种标记通常是不可见的,只有通过专用的检测器或阅读器才能检测和提取。除了隐蔽性的要求以外,嵌入数字作品中的信息必须具有一定程度的鲁棒性才能称为数字水印,即在经历多种无意或有意的信号处理过程后,隐藏信息仍能保持完整或被准确鉴别。由于具有远比空域方法更强的鲁棒性,变换域数字水印方法自1995年以来逐渐成为研究的主流。其中,小波变换因其在图像压缩与分析中表现出来的良好性质,特别是与人眼视觉特性的密切联系,已经被许多数字水印算法所采用。

按水印的检测过程可以将数字水印划分为解码时需要原始图像的私有水印和盲水印两类。私有水印系统不仅需要耗费大量的存储资源和计算资源,而且如果需要认证的数字图像数量很大,那么给定一幅待测图像去查找相应的原图像也是很困难的,因为这本身就构成了一个基于内容的图像检索问题。更为严重的是,Craver在1997年提出了著名的“IBM攻击”方法^[1],绝大多数在解码时需要原图的数字水印算法都不能抵抗IBM攻击。文献^[2]指出,解决IBM攻击的根本途径是使用盲水印算法。盲水印的检测只需要嵌入的水印信息,不需要原始图像。

在小波变换域数字水印算法中,有相当一部分来源于对 $\text{CoX}^{[3]}$ 在DCT域上所做的“扩频”算法的推广,一般都把水印序列通过线性叠加的方法嵌入到图像小波分解的高频子带中。Brani在文献^[4]中提出将水印信息隐藏在高频子带中的固定位置,以使得在没有原始图像时仍能准确提取待测序列,从而构造出小波变换域上的盲水印算法。Dugad在文献^[5]中也提出了类似的盲水印算法。但是,文献^[4]和文献^[5]仍然使用线性相关检测器检测水印,并没有注意到此时作为“噪声”的小波变换细节系数并不具有高斯分布的统计特性,线性相关检测的最优性条件已经失去了。

* 收稿日期:2001-07-01
作者简介:伯晓晨(1973-)男,博士生。

1 小波变换域上的盲水印算法

由于在检测时有原始图像作为参考,所以非盲的数字水印算法在选择隐藏位置时非常灵活,可以通过幅值排序等方法选择针对某一图像的较优的宿主序列。与之相比,盲水印宿主序列的选择方法必须不依赖于图像。为了满足嵌入水印的隐蔽性要求,文献[4]将水印信息隐藏在图像的小波分解的高频子带 HL_i 、 LH_i 、 HH_i ($i=1, 2, \dots$) 中。由于随着分解层次的增加,高频子带对于视觉的重要性也随之增加,所以水印适于隐藏在较低层的子带中。

对文献[4]和[5]中的算法做适当的简化,得到一个小波变换域典型水印算法。设水印 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 为二值随机序列,其中 $w_i \in \{-1, 1\}$, $i=1, 2, \dots, n$ 。采用 Daubechies-6 小波将原始图像 I 进行一次分解后得到低频子带图像 LL_1 和 高频子带图像 HL_1 、 LH_1 、 HH_1 ,从高频子带图像中抽取若干系数构成水印宿主序列 $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$,按照

$$v'_i = v_i + \alpha \cdot \sigma_i \cdot w_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

将水印嵌入 V 得到 $V'=(v'_1, v'_2, \dots, v'_n)$,其中参数 α 为水印嵌入的固定深度, σ_i 为宿主信号 v_i 对应的局部标准差,用于对视觉系统的自适应调节。以 V' 代替 V ,经重构后得到包含水印的图像 I' 。

检测时需要原始图像的私有水印算法在水印检测时首先将待测图像 I^* 与原始图像 I 分别做小波变换,相应的小波变换系数相减,得到水印信号的估计值 $W^* = V^* - V$ 。为了度量 W^* 与真实水印信号 W 之间的相似性,计算 W^* 与 W 之间的归一化相关

$$\text{sim}(W, W^*) = \frac{W^* \cdot W}{\sqrt{W^* \cdot W^*}} \quad (2)$$

当 $\text{sim}(W, W^*)$ 超过一定的阈值时,认为待测图像 I^* 中存在水印信号 W 。

事实上,如果脱离信号检测的背景,则向量 W^* 与 W 的内积 $W^* \cdot W$ 可以看作一种距离度量。因此,这一类水印信号检测完全可以看成是水印估计值与真实水印信号间的直接比对,而不是从噪声中检测出微弱的水印信号。

对于盲水印检测,文献[4][5]仍然延续了线性相关的方法。将待测图像 I^* 进行小波分解,从高频子带中抽取待测序列 V^* ,计算 V^* 与水印信号 W 的线性相关

$$T = \frac{1}{n} V^* \cdot W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^* \cdot w_i \quad (3)$$

当 T 超过一定的阈值 T_z 时,即认为 I^* 中包含水印信号 W 。

注意到此时的水印检测模型与私有水印算法已有很大的不同,如果把 V 看作观测噪声,水印 W 为微弱信号,则上述检测方法相当于用线性相关检测器检测弱信号。当 V 为高斯白噪声时,这种检测器为最优检测器。可是,众多的研究表明,图像小波变换高频子带系数 V 并不服从高斯分布,而对于线性相关检测器来说,当噪声模型偏离高斯分布时,检测器的性能将大大降低。

由于盲水印的检测是在强噪声中检测微弱信号,检测器算法的设计在很大程度上依赖于“信道”的统计模型,所以,必须基于噪声的统计模型设计水印检测器。以下我们将依据小波变换系数的局部平稳高斯模型设计水印检测算法。

2 基于局部平稳高斯模型的盲水印检测

变换系数的统计模型是设计水印检测器的基础。与 DCT 交流系数类似,图像小波变换高频子带系数大多集中在零值附近,具有脉冲型长拖尾的统计分布。Mallat 采用零均值广义高斯分布(GGD, General Gauss Distribution)来拟合小波高频子带系数的统计分布^[6],其概率密度函数为

$$f_{GGD}(x) = \frac{\gamma \alpha(\gamma)}{2\sigma \Gamma(1/\gamma)} \exp\{-[\alpha(\gamma)|x/\gamma|]^\gamma\} \quad (4)$$

其中 $\alpha(\gamma) = \sqrt{\frac{\Gamma(3/\gamma)}{\Gamma(1/\gamma)}}$, $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数,正实数 γ 为形状参数。 $\gamma=1$ 时, $f_{GGD}(x)$ 退化为拉普拉斯

分布,而 $\gamma=2$ 时, $f_{GGD}(x)$ 为高斯分布。

事实上,广义高斯分布涵盖了相当广泛的一族分布函数,在实际应用中由于参数估计的误差,影响了模型的准确性。Choi^[7]认为广义高斯分布不仅没有反映局部统计特性,而且参数估计的不精确也降低了小波变换域图像压缩的效率。注意到在文献[8]中,LoPresto虽然仍使用了广义高斯模型,但参数估计却是在高频子带图像的局部邻域中进行的,显然,此时的广义高斯分布是针对局部小波细节系数而言的。LoPresto进一步认为,如果能够使用原始图像的小波系数(而不是量化后的系数)进行参数估计,则局部高斯模型是非常精确的。文献[9]基于零均值局部平稳高斯模型对图像进行小波去噪,取得了很好的效果,也从另一方面说明了该模型的有效性。

依照熟知的结论,线性相关检测器是高斯噪声下确定性信号的最优检测器,依据局部平稳高斯假设,我们对文献[4][5]中的检测算法进行了改进。

设从某一细节子带图像中抽取的宿主信号 V 服从零均值局部高斯分布,即 $v_i \sim N(0, \sigma_i^2)$, 则 $v_i/\sigma_i \sim N(0, 1)$ 。由小波系数的性质可假设 $v_i/\sigma_i, i=1, 2, \dots, n$ 统计独立。检测水印时,首先由待测图像 I^* 抽取待测序列 V^* 并估计相应的局部方差 $\hat{\sigma}_i$, 规整化后计算 $v_i^*/\hat{\sigma}_i$ 与水印信号 W 的线性相关

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{v_i^*}{\hat{\sigma}_i} \cdot w_i \quad (5)$$

当 T 超过一定的阈值时,即认为 I^* 中包含水印信号 W 。

3 实验结果

生成 1000 个长度为 1000 高斯随机序列 $X_i (i=1, 2, \dots, 1000)$, 方差为 1, 以 X_{500} 作为水印信息嵌入测试图像 Cameraman ($256 \times 256 \times 256$) 的子带 HL_1 中。图 1(a) 和图 1(b) 分别是原始图像和嵌入水印后的图像。信噪比 $SNR = 27.32\text{dB}$, 峰值信噪比 $PSNR = 39.56\text{dB}$ 。

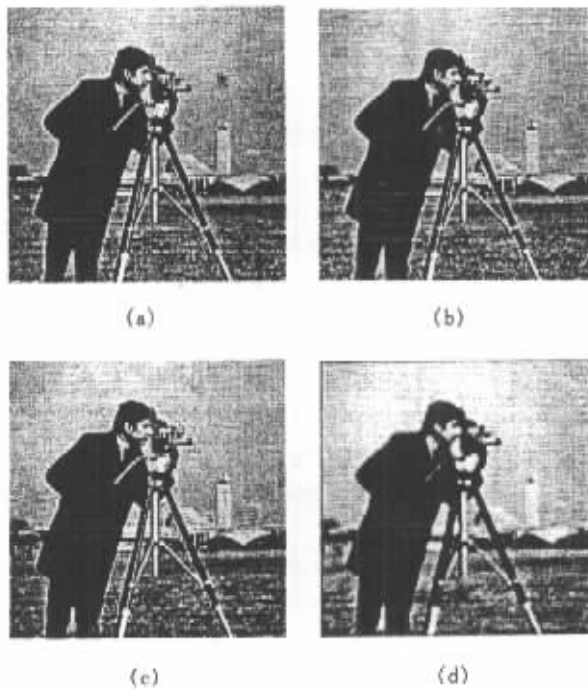


图 1 测试图像 (a) 原始图像 (b) 含水印图像 (c) JPEG 压缩后的含水印图像 (d) 均值滤波后的含水印图像

Fig.1 Test images (a) Oriangle image ;(b) Watermarked image ;

(c) Watermarked image after JPEG compression ;(d) Watermarked image after mean filtering

分别采用文献[4][5]中的线性相关检测器和本文提出的检测器进行水印检测实验。图 2(a) 是线性相关检测器的输出响应,图 2(b) 是本文提出的检测器的输出响应。在 X_{500} 的输出位置上,两种检测

器的响应都形成了峰值,但线性相关检测器输出的峰值相对较低,其检测阈值的选择空间较小,而本文提出的检测器对真实水印 X_{500} 的输出峰值较高,检测阈值的选择空间很大,性能优于线性相关检测器。

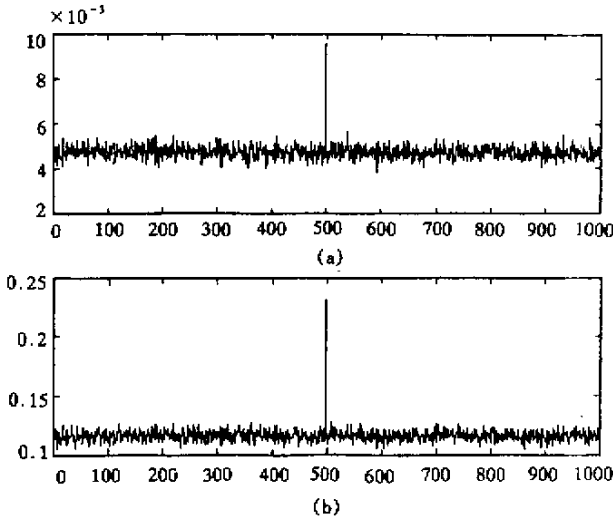


图 2 无攻击时两种水印检测器的输出响应 (a) 线性相关检测器的输出 (b) 本文提出的检测器的输出

Fig.2 Response of watermark detector without attacks

(a) Response of linear correlation detector (b) Response of detector proposed in this paper

抗 JPEG 压缩的能力是衡量图像水印鲁棒性的重要指标,也是网络环境对实用数字水印算法的要求。图 1(c) 是对含水印的图像进行 JPEG 压缩后的结果,质量系数为 15%,信噪比 $SNR = 15.43\text{dB}$,峰值信噪比 $PSNR = 27.67\text{dB}$,此时的图像质量已经非常差了。图 3(a) 是线性相关水印检测器的检测结果,图 3(b) 是本文提出的检测器的检测结果。可以看出,线性相关检测器已经不能产生正确的输出,而本文提出的检测器在 X_{500} 位置上仍然产生了较高的输出峰值。

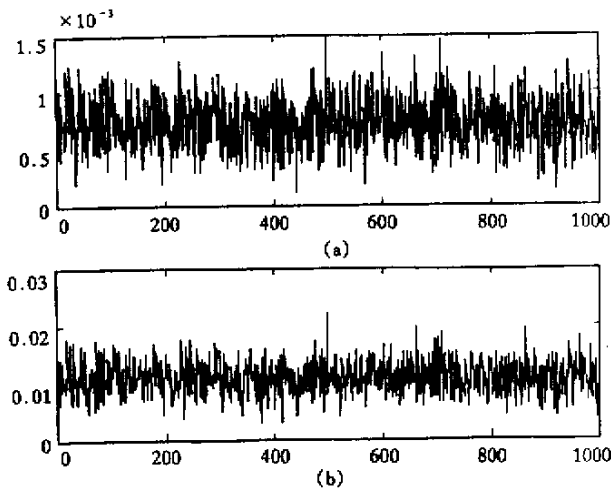


图 3 经过 JPEG 压缩后两种盲水印检测器的输出 (a) 线性相关检测器的输出 (b) 本文提出的检测器的输出

Fig.3 Response of watermark detector after JPEG compression

(a) Response of linear correlation detector (b) Response of detector proposed in this paper

采用 3×3 均值滤波器对含水印图像进行 3 次均值滤波,图 1(d) 是经过均值滤波后的含水印图像,信噪比 $SNR = 10.32\text{dB}$,峰值信噪比 $PSNR = 22.56\text{dB}$ 。图 4(a) 是线性相关检测器的输出,已经不能产

生正确的输出。图 4(b)是本文提出的检测器的输出,仍然保持了足够的峰值。

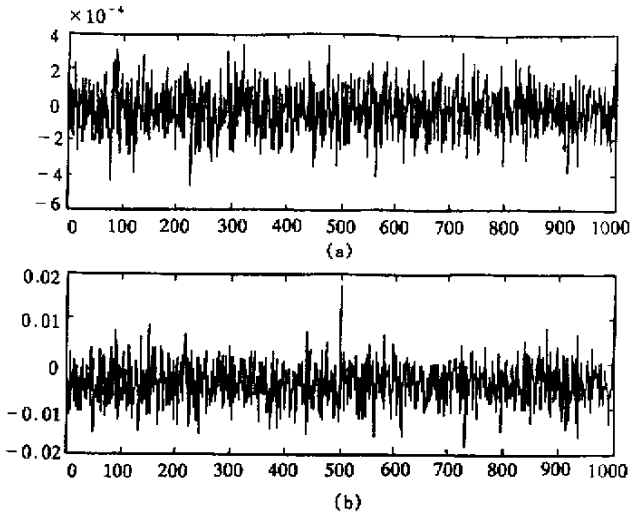


图 4 经过均值滤波后两种盲水印检测器的输出 (a) 线性相关检测器的输出 (b) 本文提出的检测器的输出

Fig.4 Response of watermark detector after mean filtering

(a) Response of linear correlation detector (b) Response of detector proposed in this paper

4 结论

由于在检测时没有原始图像作为参考,盲图像水印算法中检测器的设计非常关键。在图像压缩技术的研究中,积累了许多关于图像小波变换系数统计分布模型的实验结果,这些模型为盲数字水印检测器的设计提供了重要的研究基础。基于局部平稳高斯模型设计盲水印检测算法具有较强的理论依据,实验结果也充分表明了提出的检测方法具有较好的性能。

参考文献:

- [1] Craver S, Memon N, Yeo B, Yeung M. Can Invisible Watermarks Resolve Rightful Ownership? [A]. SPIE Electronic Imaging: Storage and Retrieval of Image and Video Databases, 1997: 310-321.
- [2] Wenjun Zeng, Bede Liu. A Statistical Watermark Detection Technique Without Using Original Images for Resolving Rightful Ownership of Digital Images [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 8(11): 1534-1548.
- [3] Cox I J, Kilian J, Leighton T, Shamoon T. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia [J]. IEEE Trans. On Image Processing, 1997, 12(6): 1673-1687.
- [4] Barni M, Bartolini F, Cappellini V, Lippi A, Piva A. A DWT-based Technique for Spatio-Frequency Masking of Digital Signatures [A]. Proceedings of SPIE vol. 3657, Security and Watermarking of Multimedia Contents, Electronic Imaging '99, San Jose, CA, January 1999: 159-168.
- [5] Dugad R, Ratakonda K, Ahuja N. A new wavelet-based scheme for watermarking images [A]. In Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, ICIP '98, Chicago, IL, USA, October 1998.
- [6] G. Mallat S. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. IEEE Trans. on PAMI., 1989, 11(8): 674-693.
- [7] Choi H, Baraniuk R G. Information-theoretic Analysis of Besov Spaces [A]. Proceedings of SPIE Technical Conference on Wavelet Applications in Signal and Image Processing VIII, San Diego, August 2000.
- [8] Lopresto S, Ramchandran K, Orchard M T. Image coding based on mixture modeling of wavelet coefficients and a fast estimation-quantization framework [A]. In Data Compression Conference '97, (Snowbird, Utah), 1997: 221-230.
- [9] Mikcak M K, Kozintsev I, Ramchandran K. Spatially adaptive statistical modeling of wavelet image coefficients and its application to denoising [A]. In Proc. IEEE Int. Conf. On Acoust., Speech, Signal proc. ICASSP '99, March 1999.

