

文章编号: 1001- 2486(2007) 03- 0076- 05

基于 HVS 的抗统计分析的小波域密写*

康志伟¹, 刘 劲¹, 何怡刚²

(1. 湖南大学 计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙, 410082)

摘要: 针对通过分析小波系数直方图特性的变化能侦测到小波域图像密写信息的存在性这一问题和
人眼对图像强纹理不敏感的特征, 提出了一种基于 HVS 的抗统计分析的小波域密写方法。该方法先将载体
图像分成固定大小的小块, 对每一小块进行基于提升策略的整数小波变换。根据符号和奇偶值将非零小波系
数分为 2 类, 分别表示 1 和 0。如果嵌入的秘密比特与小波系数表示的信息不同, 修改小波系数使它变为另一
类, 否则不变。在强纹理块, 2 层以上的小波系数用来嵌入更多的秘密信息以保证良好的视觉隐蔽性。最后,
通过小波逆变换获得载密图像。实验结果表明, 该密写方法不但能有效地保持小波系数直方图的特性, 而且
具有良好的视觉质量。

关键词: 密写; 人眼视觉; 小波变换; 统计分析

中图分类号: TN911. 73 文献标识码: A

A Steganography on Wavelet Domain Based on HVS Against
Statistical AnalysisKANG Zhiwei¹, LIU Jin¹, HE Yigang²

(1. College of Computer and Communication, Hunan Univ., Changsha 410082, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan Univ., Changsha 410082, China)

Abstract: Concerning the problem that the existence of secret information of the stego-image on wavelet domain is subject to
detection by histogram analysis for wavelet coefficient, and the visual property that human eyes are less sensitive to textured areas of an
image, a novel steganography on wavelet domain against statistical analysis based on HVS (human visual system) was proposed. First,
an image was divided into blocks of prescribed size, and every block was decomposed into wavelet using IWT (integer wavelet transform)
based on lifting scheme. Then, all nonzero wavelet coefficients were classified into two categories according to their sign and parity, and
marked by steganographic 0 and 1 respectively. If the identifier of wavelet coefficients was different from secret bit, it would be modified
to the opposite one, otherwise unchanged. And more secret information was in turn embedded into 2 or more level wavelet coefficients in
textured blocks so that good visual imperceptibility was obtained. Finally, the stego-image was obtained by the inverse wavelet transform.
From the experimental results, the proposed method effectively keeps the identity of histogram for wavelet coefficients and maintains a
good visual quality of stego-image.

Key words: steganographic; HVS; wavelet transform; statistical analysis

密写是一种新的数据保护方法, 它通过隐藏秘密信息来获得通信的安全性。由于网络通信中包含了海量的图像, 这使得图像成为隐藏秘密信息的良好载体, 已有的一些图像密写方法大多在空域^[1-3]或频域^[4-7]中将秘密信息嵌入图像。由于小波变换的多分辨率特性与人类视觉系统(HVS, human visual system)对图像的认知过程相似, 基于小波域的密写方法也得到了良好的应用。2002年, R. Machado将BPCS(bit-plane complexity segmentation)应用于JPEG2000压缩图像^[5]; J. Spaulding将BPCS应用于EZW(embedded zerotree wavelets)压缩图像^[6]; 2006年, S. N. Torres-Maya提出了一种基于BPCS和IWT(integer wavelet transform)的密写^[7]。这些基于小波的密写方法考虑到了人眼视觉特征, 具有较好的视觉隐蔽性。但是, 采用这些方法, 小波系数直方图会出现明显的阶梯效应, 从而暴露了秘密信息的存在性。

* 收稿日期: 2006- 11- 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677014); 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ50114)

作者简介: 康志伟(1962-), 男, 副教授。

鉴于以上小波域密写存在的问题, 本文提出了一种抗统计分析的小波域密写方法。该方法通过对小波系数的处理, 保持了小波直方图特性, 这样可避免基于小波直方图的密写分析, 保证了密写的安全性。此外, 根据 HVS, 在纹理区域, 该方法将秘密信息嵌入到多层小波系数以获得较好的载密图像质量。同时, 采用基于提升策略的整数小波变换来避免引入量化误差。

1 小波直方图分析

随着小波系数绝对值的增大, 对应的小波系数出现的概率减小, 其直方图呈平滑变化特征。图 1 和图 2 分别给出了图像 Lena 和 Man (512 × 512) 的小波系数直方图特性。但是, 当采用文献[5-7]的密写方法嵌入秘密信息时, 小波直方图会出现阶梯现象(如图 3 和图 4 所示)。改动主要集中在小波系数的低比特位, 而具有相同高比特位的小波系数出现概率之间的差别减小了, 这样, 小波直方图中会出现“阶梯效应”, 从而载密图像的小波直方图不再满足上述平滑性质。分析者只要通过小波直方图分析就可以察觉到秘密信息的存在性, 因而这些小波域密写方法的安全性不高。

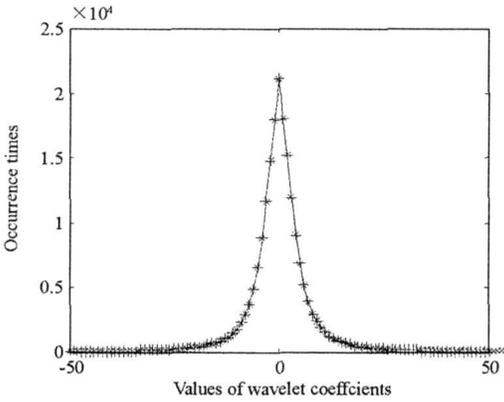


图 1 载体图像 Lena 的小波直方图

Fig. 1 Histogram for wavelet coefficients of cover image Lena

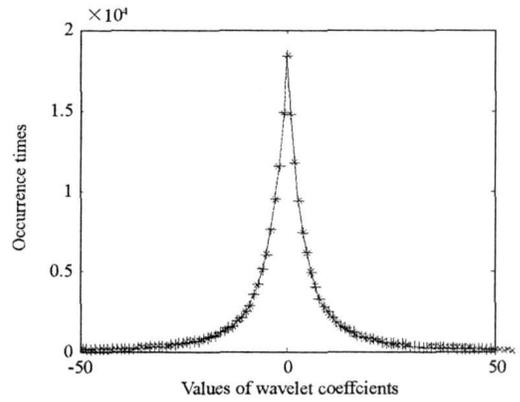


图 2 载体图像 Man 的小波直方图

Fig. 2 Histogram for wavelet coefficients of cover image Man

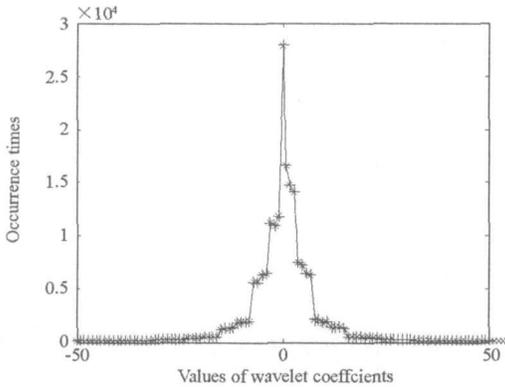


图 3 载密图像 Lena 的小波直方图

Fig. 3 Histogram for wavelet coefficients of stego-image Lena

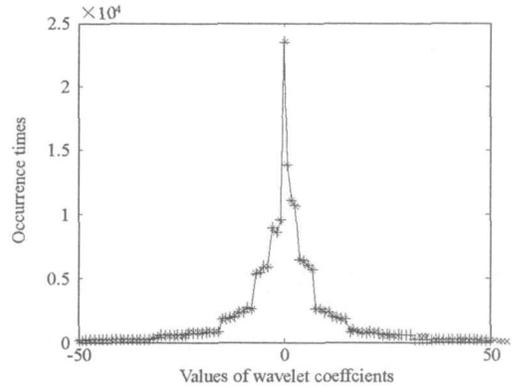


图 4 载密图像 Man 的小波直方图

Fig. 4 Histogram for wavelet coefficients of stego-image Man

2 抗小波直方图分析的密写

为了避免已有小波域密写方法的不足, 同时更好地利用人眼视觉特性, 本文在 $F4^{[4]}$ 处理 DCT (discrete cosine transform) 系数的基础上, 提出了一种抗直方图分析的小波域密写方法, 并进行了理论分析和实验验证。

2.1 密写方法

2.1.1 方法

嵌入秘密信息按如下方法: 偶负数和奇正数小波系数表示秘密信息 1, 奇负数和偶正数小波系数表示秘密信息 0, 值为 0 的小波系数不表示秘密信息。如果秘密比特与非零小波系数表示的秘密信息相同, 小波系数不改动; 否则, 小波系数绝对值减 1, 如果小波系数变为 0, 该秘密比特重新嵌入到下一非零小波系数。

提取秘密信息方法较简单, 偶负数和奇正数小波系数表示秘密信息 1, 奇负数和偶正数小波系数表示秘密信息 0。

2.1.2 保持小波直方图特性的证明

首先, 证明保持了值大于 0 的小波系数直方图特性。 $P(x)$ 表示值为 $x(x > 0)$ 的小波系数出现的概率。如果小波系数直方图满足式(1)~(3), 分析者认为小波系数直方图是平滑的, 即没有秘密信息存在。

$$P(x) > P(x+1) > P(x+2) > P(x+3) \quad (1)$$

$$P(x) - P(x+1) > k[P(x+1) - P(x+2)] \quad (2)$$

$$P(x+1) - P(x+2) > k[P(x+2) - P(x+3)] \quad (3)$$

其中, $k(0 < k < 1)$ 是定义直方图平滑度的参数, k 越小, 漏警概率越大。例如, 如果 k 为 0.3, 在图 3 和图 4 中大量的小波系数不满足式(1)~(3), 而在图 1 和图 2 中小波系数满足式(1)~(3)。

$P'(x)$ 表示嵌入秘密信息后值为 $x(x > 0)$ 的小波系数出现的概率, 假设秘密比特服从均匀分布, 值为 x 的小波系数以 1/2 的概率保持不变, 值为 $x+1$ 的小波系数以 1/2 的概率变为值为 x 的小波系数, 可得到

$$P'(x) = \frac{1}{2}P(x) + \frac{1}{2}P(x+1) \quad (4)$$

同理, 可得到

$$P'(x+1) = \frac{1}{2}P(x+1) + \frac{1}{2}P(x+2) \quad (5)$$

$$P'(x+2) = \frac{1}{2}P(x+2) + \frac{1}{2}P(x+3) \quad (6)$$

根据式(1)和(4)~(6), 可得到

$$P'(x) > P'(x+1) > P'(x+2) \quad (7)$$

式(2)加上式(3)可得到

$$P(x) - P(x+2) > k[P(x+1) - P(x+3)] \quad (8)$$

式(4)减去式(5)得到式(9), 式(5)减去式(6)得到式(10)

$$P'(x) - P'(x+1) = \frac{1}{2}P(x) - \frac{1}{2}P(x+2) > 0 \quad (9)$$

$$P'(x+1) - P'(x+2) = \frac{1}{2}P(x+1) - \frac{1}{2}P(x+3) > 0 \quad (10)$$

通过式(8), 可以知道式(9)的左边大于 $k \times$ 式(10)的左边

$$P'(x) - P'(x+1) > k[P'(x+1) - P'(x+2)] \quad (11)$$

从式(7)和(11)可知, 在嵌入秘密信息后, 保持了大于 0 的小波系数直方图特性。

同理, 可以证明在嵌入秘密信息后, 保持了小于 0 的小波系数直方图特性。

2.2 基于 HVS 的改进措施

为提高载密图像的视觉质量, 采取了以下 2 种措施:

(1) 采用基于提升策略的整数小波变换 (IWT)^[8] 使小波系数为整数, 避免在嵌入过程中引入量化误差。

(2) 根据人眼视觉特性, 在纹理区域嵌入较多秘密信息。

2.2.1 嵌入方法

嵌入秘密信息按照如下步骤:

(a) 将载体图像分成大小相同的小块, $n \times n$ 。

(b) 将每一小块作 I 层基于提升策略的整数小波变换 (IWT), 设 $i = 1, 0 \leq I \leq \lfloor \log_2 n \rfloor$ 。

(c) 修改第 i 层的小波系数, 采用 2.1 节提出的抗小波直方图分析的密写嵌入秘密信息。

(d) 决定每块的纹理强度。定义门限 T_i , 如果第 i 层非零小波系数的个数大于 T_i , 即 $\text{number}\{ |D_i(x, y)| > 0, (x, y) \in W\} > T_i$, 其中, $D_i(x, y)$ 表示第 i 层小波系数, 小块处于纹理区域, 并嵌入秘密信息到第 $i = i + 1$ 层小波系数。转入步骤(c), 直到 $i = I$ 为止。小块的纹理越强, 嵌入的秘密信息越多。

(e) 通过小波反变换得到载密图像。

2.2.2 提取方法

提取秘密信息按照如下步骤:

(a) 将载密图像按照嵌入中的方法分成大小相同的小块。

(b) 将每一小块作 I 层基于提升策略的整数小波变换 (IWT), 设 $i = 1, 0 \leq I \leq \lfloor \log_2 n \rfloor$ 。

(c) 采用 2.1 节提出的抗小波直方图分析的密写提取第 i 层小波系数中的秘密信息。

(d) 如果第 i 层非零小波系数的个数大于 T_i , 从第 $i = i + 1$ 层小波系数提取秘密信息。转入步骤(c), 直到 $i = I$ 为止。

3 实验结果

为了验证该算法具有好的视觉隐蔽性和抗统计分析特性, 选择伪随机序列作为秘密信息, T_1 和 T_2 分别取 35 和 10, 以 PSNR 为不可见性测度, 采用标准测试图像 Lena 和 Man 作为载体图像 (512×512), 将它们分为 8×8 的小块, 并采用基于提升策略的 Haar IWT 将图像作 3 层小波分解。图 5 和图 6 给出了实验结果, 图 5(c) 和图 6(c) 给出了载体图像与载密图像之间的差分图 (灰度值放大 60 倍)。改动主要集中在纹理区域, 因此可获得较好的视觉效果。从图 5(d) 和图 6(d) 可以看出, 随着小波系数绝对值的增大, 对应的小波系数出现的概率减小, 并呈现平滑变化特征。

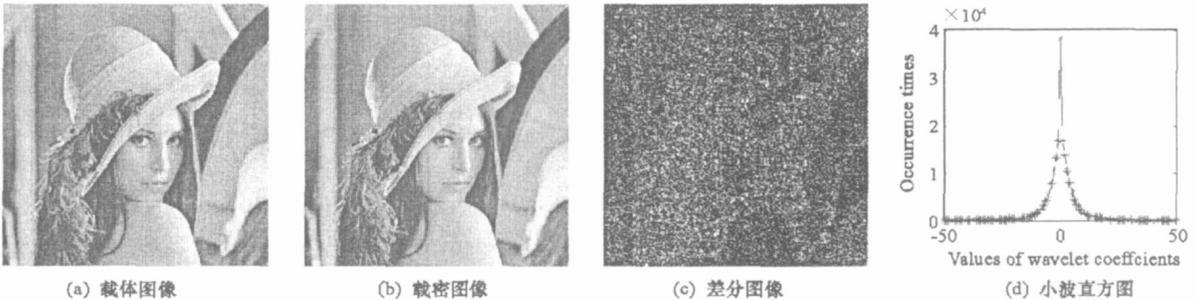


图 5 Lena 的载体图像、载密图像、差分图像和小波直方图

Fig. 5 Cover image, stego-image, difference image and histogram for wavelet of Lena

最后, 选用 5 幅标准测试图像 (512×512) 做实验, 嵌入量和 PSNR 如表 1 所示, 可以看出图像纹理越强, 嵌入的秘密信息越多。载密图像的 PSNR 均高于 45dB, 由于 PSNR 高于 38dB, 人眼就不能察觉到图像质量的降级^[9], 因此该方法保持了较好的视觉隐蔽性。

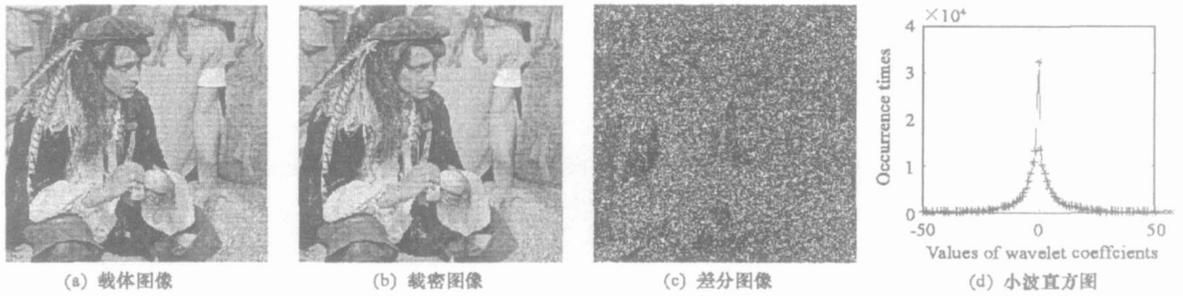


图6 Man的载体图像、载密图像、差分图像和小波直方图

Fig. 6 Cover image, stego-image, difference image and histogram for wavelet of Man

表1 实验结果

Tab. 1 Experimental results for the proposed methods

载体图像	嵌入量	PSNR
(512×512)	(bit)	(dB)
Lena	191 519	47.4248
Baboon	239 231	45.6758
Man	206 087	46.6069
Couple	212 396	46.6127
Peppers	205 269	47.0386

4 结论

视觉和统计不可见性是评价密写质量的两个重要指标,而已有的小波域密写不能抗统计分析,如小波直方图分析。文中所提出的小波域密写方法,在保持小波直方图特性和利用人眼视觉特征方面效果明显,从而提高了载密图像抗检测能力和视觉不可见性。

参考文献:

- [1] Kawaguchi E, Eason R O. Principle and Application of BPCS-Steganography[C]//Proceedings of SPIE: Multimedia Systems and Applications, Boston: Massachusetts, 1998, 464-472.
- [2] Zhang X, Wang S. Steganography Using Multiple-base Notational System and Human Vision Sensitivity[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(1):67-70.
- [3] Jarmo Mielikainen. LSB Matching Revisited[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(5):285-287.
- [4] Westfeld A. F5- A Steganographic Algorithm[C]//Proceedings of 4th International Workshop on Information Hiding, Lecture Notes in Computer Science, Verlag-Springer, 2001, 289-302.
- [5] Machado R, Noda H, Spaulding J, et al. Application of Bit-plane Decomposition Steganography to JPEG2000 Encoded Images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(12):410-413.
- [6] Spaulding J, Noda H, Shirazi M N, et al. BPCS Steganography Using EZW Lossy Compressed Images[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(13):1579-1587.
- [7] Torres-Maya S, Nakano-Miyatake M, Perez-Meana H. An Image Steganography Systems Based on BPCS and IWT[C]//Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Electronics, Communications and Computers, 2006.
- [8] Sweldens W. The Lifting Scheme: A Custom-design Construction of Biorthogonal Wavelets[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1996, 3(2):186-200.
- [9] Petitcolas F A P, Anderson R J. Evaluation of Copyright Marking Systems[C]//Proc. of IEEE Multimedia Systems, Italy: Florence, 1999.