

文章编号:1000-582X(2008)08-0885-05

# 结合 DWT 变换的二元纯位相滤波器水印

桑 军, 向 宏, 胡海波

(重庆大学 软件学院, 重庆 400030)

**摘 要:**提出了结合离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)的二元纯位相滤波器(binary phase-only filter, BPOF)数字图像水印算法。首先对图像进行 DWT 变换,然后在 DWT 变换后的低频子带进行离散 Fourier 变换(discrete Fourier transform, DFT)变换,将 DFT 变换的相位信息二值化得到 BPOF,并将其作为水印嵌入到相应的幅值中。与对图像整体进行 DFT 变换,并在其全频域或低频域嵌入 BPOF 水印相比,在保持嵌入水印的不可感知性和检测性能的同时,显著提高了抗 JPEG 压缩性能。该方法可用于图像真实性、完整性认证,仿真实验证明了算法的有效性。

**关键词:**数字水印;二元纯位相滤波器;离散 Fourier 变换;离散小波变换

**中图分类号:**TP391

**文献标志码:**A

## Binary phase-only filter based watermarking combined with discrete wavelet transform

SANG Jun, XIANG Hong, HU Hai-bo

(School of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The binary phase-only filter (BPOF) based digital image watermarking combined with a discrete wavelet transform (DWT) was proposed. Firstly, the DWT transform was applied to an image. Then, the discrete Fourier transform (DFT) was applied to the low frequency subband of the DWT transform. Next, the phase information of the DFT was binarized to obtain the BPOF, which would be taken as the watermark and embedded into the corresponding magnitude. Compared to applying the DFT transform to the whole image and embedding the BPOF watermark in the entire frequency range, or in the low frequency range, the watermark robustness in JPEG compression is improved significantly while maintaining the watermark imperceptibility and detection efficiency. This method may be used to demonstrate the authenticity and integrity of an image. The simulation experiments demonstrate the efficiency of this method.

**Key words:** digital watermarking; binary phase-only filter; discrete Fourier transform; discrete wavelet transform

脆弱/半脆弱水印通常用于图像认证<sup>[1-5]</sup>。其基本原理是由发送方在图像中嵌入水印,而由接收方检测水印,并确认该图像是否来自于发送方以及是否在传输过程中被篡改。脆弱水印对于任何常规或恶意

的图像处理操作均不具稳健性,而半脆弱水印能够承受某些常规图像处理操作,例如, JPEG 压缩。

在用于图像认证的数字水印算法中,通常选择某种合适的图像内在特征作为图像签名(水印)<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2008-01-20

基金项目:重庆市科委自然科学基金资助项目(2006BB2012);广东省教育部产学研结合资助项目(2007B090400121)

作者简介:桑军(1968-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事信息安全、数字水印方向的研究,(Tel)023-65127222;  
(E-mail)jsang@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

文献[7-8]提出了用于图像认证的二元纯位相滤波器(binary phase-only filter, BPOF)数字水印技术。它作用于图像离散 Fourier 变换(discrete Fourier transform, DFT)域,将 DFT 变换的相位信息(以 BPOF 表达)作为水印嵌入到相应的幅值中。在检测水印时,通过计算待检测图像的相位信息与从待测图像中提取的信号的相关性,判断在待测图像中是否存在水印,从而确认其真实性与完整性。由于图像相位信息所具有的与图像内容强相关的特性<sup>[9]</sup>,使得它可以很好地用于图像认证。

文献[10]分析了基于 BPOF 数字图像水印算法的性能,得到了基于 BPOF 半脆弱数字图像水印的一些重要性质。

文献[11]在对于 BPOF 水印算法进行深入分析的基础上,对其进行了改进。提出了一种新的水印检测方法,该方法更简单、具有更高的计算效率和更好的水印检测性能。通过考察水印对于恶意图像篡改的脆弱性和对于常规图像处理操作(例如, JPEG 压缩)的稳健性,指出原始 BPOF 水印算法更适合于作为脆弱水印,而非半脆弱水印。提出采用 DFT 变换低频域嵌入 BPOF 水印,在提高抗 JPEG 压缩性能的同时,改善了对于图像篡改的脆弱性,很好地实现了半脆弱水印。

在上述研究成果的基础上,提出结合离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)的 BPOF 水印算法。它在 DWT 变换的低频子带实现 BPOF 水印,即对图像 DWT 变换的低频子带进行 DFT 变换,并嵌入 BPOF 水印。相对于文献[7-10]介绍的 BPOF 水印算法,笔者提出算法由于采用了低频嵌入,能够提高抗 JPEG 压缩性能。与文献[11]相比,则由于在 DWT 变换的低频子带嵌入 BPOF 水印,与单纯在 DFT 变换低频域嵌入水印相比,在保持嵌入水印的不可感知性和检测性能的同时,明显提高了抗 JPEG 压缩性能。

## 1 基于 BPOF 的图像水印算法原理

基于 BPOF 的数字图像水印算法<sup>[7-8]</sup>在嵌入水印时,首先将原始图像变换到 DFT 域

$$H(u, v) = X(u, v) \exp[j\varphi(u, v)], \quad (1)$$

其中  $X(u, v)$  和  $\varphi(u, v)$  分别为变换后的幅值和相位。

其次,将变换后的幅值  $X(u, v)$  取整并以位平面方式表达,同时将变换后的相位  $\varphi(u, v)$  二值化

$$b(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{若 } \cos\varphi(u, v) \geq 0; \\ -1, & \text{否则。} \end{cases} \quad (2)$$

并将  $b(u, v)$  由  $\{-1, 1\}$  映射为  $\{0, 1\}$  形式,得到图像  $BPOFB(u, v)$ 。

接下来,将  $B(u, v)$  加密(主要目的是防止伪造水印。为了保持对称性,需要注意选择加密算法<sup>[12]</sup>),并用于替换某个幅值位平面,实现将 BPOF 水印嵌入到幅值位平面中。为了保证嵌入水印后图像质量及水印检测性能,通常将水印嵌入到某个居中的幅值位平面。

最后通过离散 Fourier 逆变换(IDFT),得到嵌入水印后的图像。

在检测水印时,对于待测图像进行 DFT 变换

$$H_T(u, v) = X_T(u, v) \exp[j\varphi_T(u, v)], \quad (3)$$

将幅值  $X_T(u, v)$  取整后从其位平面中提取嵌入的水印并解密,得到  $B_T(u, v)$ ,将其由  $\{0, 1\}$  形式映射为  $\{-1, 1\}$ ,记为  $b_T(u, v)$ 。

由相位  $\varphi_T(u, v)$  计算纯位相滤波器

$$T_{POF}(u, v) = \exp[-j\varphi_T(u, v)]. \quad (4)$$

最后,计算相关平面

$$\text{Corr}(u, v) = \text{IDFT}(T_{POF}(u, v) \cdot b_T(u, v)). \quad (5)$$

根据相关平面是否存在峰值及峰值的相对大小判断  $b_T(u, v)$  与  $T_{POF}(u, v)$  是否相似,从而判断图像中是否存在水印,进而确认图像的真实性和完整性。

判断水印存在性的准则包括 2 个描述相关特性的指标<sup>[13]</sup>“峰值-均值比”

$$\text{PACE} = 20 \lg\left(\frac{P_{\max}}{\mu}\right), \quad (6)$$

和“峰值-次峰值比”

$$\text{PSR} = 20 \lg\left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}}\right), \quad (7)$$

其中:  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  分别为相关平面上的最大和次大峰值;  $\mu$  为相关平面的均值。PACE 用于判断水印的存在性,其值越大,越可能存在水印。PSR 用于判断水印的虚警可能性,其值越大,虚警可能性越低。

## 2 DFT 变换低频域水印嵌入及其仿真实验

文献[11]在详细分析基于 BPOF 数字图像水印算法的基础上,提出采用从待测图像幅值中提取的水印与相应 BPOF 之间的相同值比例(identical ration, IR)检测水印的存在性并度量图像的真实性。与原算法所采用的基于相关性的水印检测相比,基于相同值比例 IR 的水印检测更简单、高效,且具有更好的水印检测性能。

此外,文献[11]讨论了在 DFT 变换低频域嵌入 BPOF 水印,即将低频域的 BPOF 作为水印嵌入到

相应的幅值中。相对于使用整个 DFT 变换域,由于嵌入的信息更少,可一定程度上改善水印的不可感知性。同时由于 JPEG 压缩对于高频系数的影响远大于对于低频系数的影响,采用低频域嵌入水印还可提高抗 JPEG 压缩性能,从整体上改进算法性能。

在 DFT 变换的不同频率范围嵌入 BPOF 水印的仿真实验针对如图 1 所示的  $512 \times 512$  灰度 Lena 图像进行,采用了 9 种不同的频率范围: $512 \times 512$  (即整个 DFT 变换域),  $385 \times 385$ ,  $257 \times 257$ ,  $193 \times 193$ ,  $129 \times 129$ ,  $65 \times 65$ ,  $33 \times 33$ ,  $17 \times 17$  和  $9 \times 9$ , 分别以方案 1 至方案 9 表示。为了保持 BPOF 和幅值的对称性,用于水印嵌入的低频区域以 DFT 变换的原点为中心,并关于原点对称。嵌入水印的幅值位平面为居中的位平面,即,第 13 位幅值平面。这里给出了嵌入水印的不可感知性、检测性能和稳健性的实验结果,分别如图 2、图 3 和图 4 所示。



图 1 Lena 图像

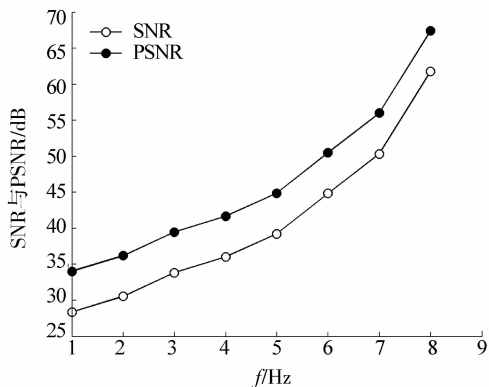


图 2 在 DFT 变换不同频率范围嵌入水印的不可感知性

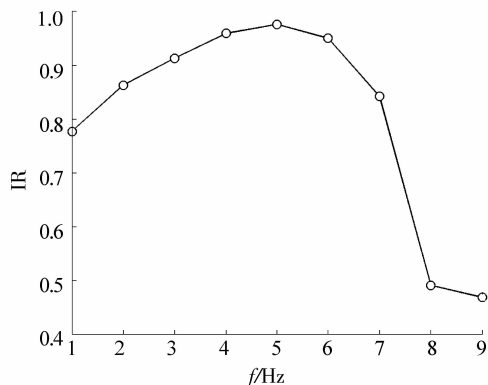


图 3 在 DFT 变换不同频率范围嵌入水印的检测性能

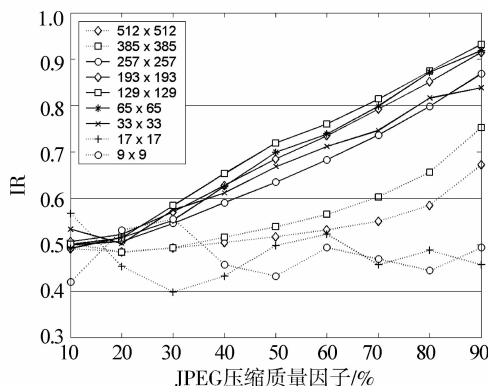


图 4 在 DFT 变换不同频率范围嵌入水印的抗 JPEG 压缩性能

于原始图像的信噪比 SNR 和峰值信噪比 PSNR 衡量。其值越高,水印不可感知性越好。

检测水印采用的是相同值比例 IR,其值大小反映了水印检测性能。

在水印稳健性方面,主要考察了抗 JPEG 压缩性能。因为实验表明,BPOF 水印算法对于大多数图像处理操作,例如 Gaussian 噪声,中值滤波等,不具稳健性,或只具备很弱的稳健性,即使采用低频域嵌入水印也是如此。

由实验结果可见,在 DFT 变换低频域嵌入 BPOF 水印,随着嵌入水印的频率范围减小,SNR 和 PSNR 的值明显增大,表明水印不可感知性增大(参见图 2)。

图 2 中方案 9 对应的 SNR 和 PSNR 的值为无穷大。这是因为此时水印嵌入区域过小,使得通过 DFT 逆变换取整后得到的嵌入水印后图像与原始图像完全一致,即,未能真正嵌入水印。

另一方面,随着嵌入水印的频率范围减小,水印

嵌入水印的不可感知性以嵌入水印后图像相对

检测性能(见图 3)以及抗 JPEG 压缩性能(见图 4)先逐步上升,当水印嵌入范围减小到一定程度时,又急剧下降。因此,采用中等大小的频率范围嵌入水印(对于  $512 \times 512$  Lena 图像,该范围大致在  $65 \times 65$  到  $257 \times 257$ )能够达到最佳水印检测性能和抗 JPEG 压缩性能,从而从整体上提高水印性能。

### 3 结合 DWT 变换的 BPOF 水印及其仿真实验

由于 DWT 变换具有良好的时-频特性,在数字信号处理(包括数字图像处理)方面得到了广泛应用<sup>[14-15]</sup>。结合 DWT 变换的 BPOF 水印算法针对 DWT 变换的低频子带进行,即,对于图像 DWT 变换的低频子带进行 DFT 变换,并将 BPOF 水印嵌入到相应的幅值中(算法示意图如图 5 所示)。对于一幅大小为  $M \times M$  的图像,1 阶 DWT 分解将产生一个  $(M/2) \times (M/2)$  的低频子带,2 阶 DWT 分解得到一个  $(M/4) \times (M/4)$  的低频子带,等等。DWT 分解的低频子带集中了原始信号的大多数能量,代表了图像的主要信息。在其中实现 BPOF 水印算法,达到了对于图像主要信息进行认证和保护的目的,且可望实现更好的水印性能。实验结果证明其性能优于仅在 DFT 变换低频域嵌入 BPOF 水印,尤其是在抗 JPEG 压缩性能方面具有明显优势。

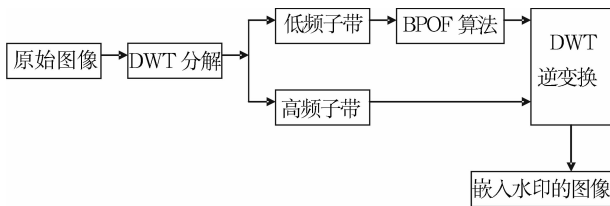


图 5 结合 DWT 变换的 BPOF 水印算法示意图

仿真实验同样针对  $512 \times 512$  灰度 Lena 图像进行。方案 1 对应于使用整个  $512 \times 512$  图像嵌入 BPOF 水印。方案 2 至方案 5 分别对应于在 1 阶、2 阶、3 阶和 4 阶 DWT 分解后的低频子带中进行 DFT 变换后,将 BPOF 水印嵌入到居中的幅值位平面。此时,各低频子带的大小分别为  $256 \times 256$ 、 $128 \times 128$ 、 $64 \times 64$  和  $32 \times 32$ 。由于不同方案对应的低频子带大小不同,其 DFT 变换幅值位平面的个数也不同。对应于方案 1 至方案 5,其居中的幅值位平面分别为第 13、13、12、11 和 11 位平面。它们分别用于在各自方案中嵌入 BPOF 水印。实验结果如图 6、图 7 和图 8 所示。

嵌入水印的不可感知性(见图 6)随着水印嵌入区域减小而逐步增大,且未出现在采用较小区域嵌入水

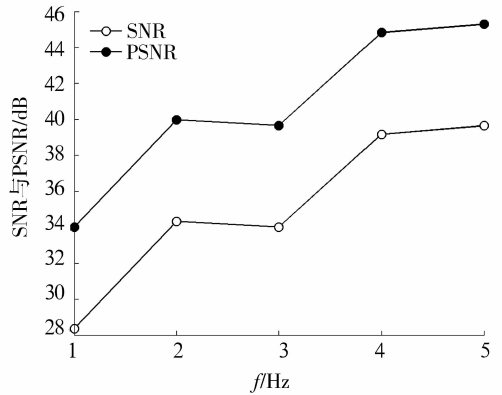


图 6 采用 DWT 分解的低频子带嵌入水印的不可感知性

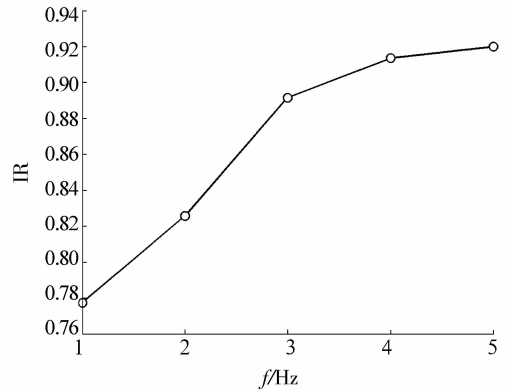


图 7 采用 DWT 分解的低频子带嵌入水印的检测性能

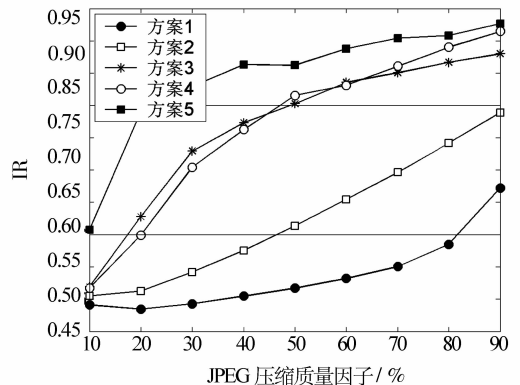


图 8 采用 DWT 分解的低频子带嵌入水印的抗 JPEG 压缩性能

区域的减小而增大。注意到当采用 1 阶 DWT 分解的低频子带嵌入 BPOF 水印时,已能达到很高的不可感知性。此时 PSNR 的值大致等于 40 dB。而通常 PSNR 的值大于 35 dB 时,认为图像质量可以接受<sup>[16]</sup>。

水印检测性能(见图 7)亦随着嵌入水印区域的

印时检测性能急剧下降的情形,说明采用 DWT 变换低频子带嵌入 BPOF 水印的同时也改善了水印检测有效性,且稍优于在 DFT 变换低频域嵌入 BPOF 水印。

至于嵌入水印的抗 JPEG 压缩性能,则随着采用更小的频率范围嵌入水印,而不断提高(图 8),且明显优于如图 4 所示的实验结果。例如,设定 IR 的检测阈值为 0.8,采用 4 阶 DWT 变换得到大小为  $32 \times 32$  低频子带,在该低频子带嵌入 BPOF 水印,即使在质量因子为 30% 的 JPEG 压缩下,仍能检测到水印的存在。而根据图 4 的实验结果,在 DFT 变换域,无论采用何种大小的频率范围嵌入 BPOF 水印,如设定 IR 的阈值为 0.8,最好的情形也只是在质量因子为 70% 的 JPEG 压缩下,能够检测到存在水印。

## 4 结 语

针对基于 BPOF 的数字图像水印,在已有研究成果的基础上,提出了结合 DWT 变换的 BPOF 水印算法。它首先对于图像进行 DWT 变换,在其低频子带实施 DFT 变换,并将 DFT 变换的 BPOF 嵌入到其相应的幅值位平面中。与仅在图像 DFT 变换的低频域嵌入 BPOF 水印相比,该方法在保持嵌入水印的不可感知性和检测性能的同时,明显提高了抗 JPEG 压缩性能。

### 参考文献:

- [1] COX I J, MILLER M L, BLOOM J A. Digital watermarking [M]. CA: Academic Press, 2002.
- [2] ZHU B B, SWANSON M D, TEWFIK A H. When seeing isn't believing multimedia authentication technologies [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004(5):40-49.
- [3] 刘泉,江雪梅. 用于图像篡改定位和恢复的分层半脆弱数字水印算法 [J]. 通信学报,2007,28(7):104-110.  
LIU QUAN, JIANG XUE-MEI. Hierarchical semi-fragile digital watermarking algorithm for image tamper localization and recovery [J]. Journal on Communications, 2007, 28(7): 104-110.
- [4] KATZEN B S, PETITCOLAS F A P. Information hiding techniques for steganography and digital watermarking [M]. [S. l.]: Artech Houses Inc, 2000.
- [5] WONG P W. A public key watermark for image verification and authentication [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Chicago: IL,

1998(10): 455-459.

- [6] WONG H C, BERN M W, GOLDBERG D. An image signature for any kind of image [J]. IEEE International Conference on Image Processing, 2002, 9: 22-25.
- [7] AHMED F, MOSKOWITZ I S. Correlation-based watermarking method for image authentication applications [J]. Optical Engineering, 2004, 43(8): 1833-1838.
- [8] AHMED F, MOSKOWITZ I S. The binary phase only filter as an image watermark [EB/OL]. [2004-02-01]. <http://www.stormingmedia.us/82/8245/A824564.html>.
- [9] OPPENHEIM A, LIM J. The importance of phase in signals [J]. Proceedings of IEEE, 1981, 69(3): 529-541.
- [10] 桑军,王成良,祝伟华. 二元纯位相滤波器与半脆弱数字图像水印 [J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(28): 33-36  
SANG JUN, WANG CHENG-LIANG, ZHU WEI-HUA. Binary phase-only filter and semi-fragile digital image watermarking [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(28): 33-36.
- [11] SANG J, ALAM M S. Fragility and robustness of binary phase-only filter based fragile/semi-fragile digital image watermarking [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(3): 595-606.
- [12] STALLINGS W. Cryptography and network security principles and practice [M]. [S. l.]: Prentice Hall, 2003.
- [13] VIJAY KUMAR B V K, HASSEBROOK L. Performance measures for correlation filters [J]. Applied Optics, 1990, 29(11): 2997-3006.
- [14] KUNDUR D, HATZINAKOS D. Digital watermarking using multiresolution wavelet decomposition [J]. Proceedings of the International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, 1998: 2969-2972.
- [15] 车生兵,黄达,李光. 基于视觉特性的半脆弱水印算法 [J]. 通信学报,2007,28(10):134-140.  
CHE SHENG-BING, HUANG DA, LI GUANG. Semi-fragile image watermarking algorithm based on visual features [J]. Journal on Communications, 2007, 28(10): 134-140.
- [16] CHEN L H, LIN J J. Mean quantization based image watermarking [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21: 717-727.

(编辑 侯 湘)