

基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法研究

李孟涛, 孙刘杰, 李晨璐, 王子煜, 张雷洪

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 在研究傅里叶加密全息技术、数字水印技术和小波理论的基础上, 提出了一种基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法。利用该算法重建水印, 有效地抑制了载体图像的低频分量对水印产生的噪声的影响; 使能量分布在图像的所有像素上, 具有良好的抗裁切能力; 算法采用密钥加强了水印的安全性。实验表明: 嵌入水印的图像一次印刷可检测, 二次扫描印刷提取的水印脆弱, 可以抵抗基本的图像处理操作。

关键词: 数字水印; 全息水印; 傅里叶变换; 小波变换

中图分类号: TP309.1; TS853⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)01-0108-05

Research on Fourier Encryption Printing Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform

LI Meng-tao, SUN Liu-jie, LI Chen-lu, WANG Zi-yu, ZHANG Lei-hong

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A wavelet transform of Fourier encryption printing watermarking algorithm was put forward on the basis of Fourier encryption holographic technology, digital watermarking technology and wavelet theory. The algorithm was used to rebuild watermark, which can effectively control the noise caused by low frequency component of host images; it has good resistance to cutting since energy is distributed on all the pixels; and it has better security of watermark with a secret key. Experimental results showed that the embedded watermark can satisfy the need of detecting watermark and resistance to scanning as well as basic image processing for ordinary printing technology.

Key words: digital watermarking; holographic watermark; Fourier transform; wavelet transform

数字水印技术结合加密和信息隐藏技术, 是实现版权保护的有效工具。数字水印作为一种印刷防伪技术, 灵活多变, 安全有效, 不增加成本。光学全息技术生成的水印具有高安全性和强鲁棒性, 可以在身份证、护照、驾照、高档次包装等印刷品中应用。水印技术的研究方向主要集中在变换域中。变换域方法是将图像数据经过某种变换, 并通过改变变换系数来嵌入水印。在变换域中嵌入水印, 使能量分布在图像的所有像素上, 保证了水印的不可见性、鲁棒性和安全性。

CIELab 颜色空间是一种与设备无关的颜色空间, 色彩管理系统把它作为标准颜色转换空间, 可以实现不同设备之间的转换, 确保彩色图像在不同的设

备上传递和输出时颜色失真尽可能地小, 尽量减少由于颜色空间转换对水印信息的影响, 提高水印的鲁棒性, 所以水印常嵌入在 L 分量上。在数字图像处理中, 图像的绝大部分能量主要集中在图像的低频部分, 中高频部分代表图像的细节部分。在图像的低频部分嵌入水印, 不可见性差; 水印信息嵌入到中高频系数中, 对图像的感知效果影响小, 但是鲁棒性差。印刷水印要求嵌入的容量要大, 才能够满足印刷/扫描的攻击, 同时还要满足不可见性的要求。为了满足印刷水印的这些特点, 在载体图像的高频部分嵌入水印。

文献[1—8]对全息加密的数字水印进行了研究, 提出了傅里叶变换全息加密技术。该技术在提取水

收稿日期: 2011-11-07

基金项目: 上海市教委重点课程(1K-11-309-001); 上海理工大学核心课程(1K-00-309-007)

作者简介: 李孟涛(1986—), 男, 河南周口市人, 上海理工大学硕士生, 主攻数字水印和图像处理。

印时,载体图像的低频分量对提取水印产生噪声,而且直接把水印图像加在载体图像的空间域,影响图像感知质量。笔者在理论分析全息水印加密技术、小波理论和图像处理技术的基础上,提出了一种基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法,该算法能够很好抑制载体图像的低频信息,重建质量高的水印图像。

1 傅里叶变换加密全息技术

傅里叶变换全息加密技术融合全息技术和双随机加密技术,是一种新的加密技术。傅里叶变换加密全息图只有通过密钥才能解密,获得的水印图像,具有较好的安全性,可应用于版权保护和版权认证。

1.1 傅里叶变换全息加密过程

傅里叶变换全息加密采用 Mach-Zehnder 干涉仪结构。待加密原始水印图像 $f(x, y)$, 输入平面上随机加密相位模板 $\alpha(x, y)$, $f(x, y)$ 和 $\alpha(x, y)$ 在输入面上紧贴在一起, 再通过傅里叶变换透镜, 进行傅里叶变换后, 由放置在傅里叶变换透镜输出频谱面上的随机相位模板 $B(\xi, \eta)$ 进行调制, 经过双随机相位加密模板调制的物光与参考光 $R(\xi, \eta)$ 进行叠加干涉, 就生成了傅里叶变换加密全息图 $I_E(\xi, \eta)$ 。 $I_E(\xi, \eta)$ 通过计算去除参考光和经过双随机相位加密调制的物光的功率谱, 得到傅里叶变换加密全息图^[1] $I_E'(\xi, \eta)$:

$$I_E'(\xi, \eta) = \{ [F(\xi, \eta) \otimes A(\xi, \eta)] B(\xi, \eta) \} R^*(\xi, \eta) + \{ [F(\xi, \eta) \otimes A(\xi, \eta)] B(\xi, \eta) \}^* R(\xi, \eta) \quad (1)$$

式(1)中的 $F(\xi, \eta)$ 和 $A(\xi, \eta)$ 分别表示 $f(x, y)$ 和 $\alpha(x, y)$ 的傅里叶变换, 符号 \otimes 表示卷积运算, (x, y) 表示空域坐标, (ξ, η) 表示频域坐标。

通过计算密钥 $B(\xi, \eta)$ 的全息图 $K(\xi, \eta)$ 功率谱, 去除常数项后, 生成傅里叶变换加密全息图的解密密钥的全息图 $K'(\xi, \eta)$ ^[1]:

$$K'(\xi, \eta) = B(\xi, \eta) R^*(\xi, \eta) + B^*(\xi, \eta) R(\xi, \eta) \quad (2)$$

1.2 傅里叶变换加密全息解密过程

将加密的傅里叶变换全息图表达式(1)和密钥全息图表达式(2)相乘:

$$I_E'(\xi, \eta) \times K'(\xi, \eta) = \{ [F(\xi, \eta) \otimes A(\xi, \eta)] B(\xi, \eta) \} R^*(\xi, \eta) [B^*(\xi, \eta) R(\xi, \eta)] + \{ [F(\xi, \eta) \otimes A(\xi, \eta)] B(\xi, \eta) \} \cdot B(\xi, \eta) \}^* R(\xi, \eta) [B(\xi, \eta) R^*(\xi, \eta)] + \{ [F(\xi, \eta) \otimes A(\xi, \eta)] B(\xi, \eta) \} R^*(\xi, \eta) [B(\xi, \eta) R^*(\xi, \eta)] + \{ [F(\xi, \eta) \otimes A(\xi, \eta)] B(\xi, \eta) \}^* R(\xi, \eta) [B^*(\xi, \eta) R(\xi, \eta)] \quad (3)$$

通过式(3)中的第 1 项和第 2 项的傅里叶变换, 就可直接解密提取出原始图像 $f(x, y)$ 和其原始图像的共轭图像 $f(x, y)$; 第 3 项和第 4 项是随机噪声信号。

2 基于小波的傅里叶加密印刷水印算法特性研究

2.1 嵌入水印图像的频谱特性分析

对嵌入水印的载体图像进行频谱分析, 频谱特征见图 1。全息水印图像是一种扩频图像, 随机均匀分

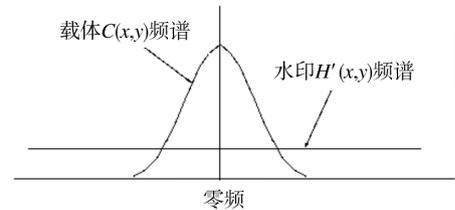


图 1 嵌入水印后图像的频谱特征

Fig. 1 Frequency spectrum characteristics of watermarked images

布于整个频率范围内; 而载体图像的低频部分对重建水印产生噪声干扰, 为了保留载体图像的高频部分, 抑制载体图像频谱低频影响, 利用小波变换的基本思想, 把载体图像进行多分辨率分解, 把图像分解成高频部分和低频部分, 在高频部分嵌入和重建水印, 有效地抑制了载体图像的低频部分对提取水印产生噪声的影响, 起到了高通滤波的作用。

2.2 图像小波分解后的频谱特性分析

该算法先把载体图像从 RGB 颜色空间转换到 CIELab 颜色空间, 对载体图像的 L 分量进行小波分解, 获得小波分解^[11-13] 后的低频分量(ca_1)、水平分量(ch_1)、垂直分量(cv_1)、对角线分量(cd_1), 然后对小波的水平分量(ch_1), 再次进行小波分解, 得到低频分量(ca_2)、水平分量(ch_2)、垂直分量(cv_2)、对角线分量(cd_2)。 L 分量小波变换后各分量的直方图见图 2。

对小波分解后的系数矩阵进行频谱分析, 由图 2 可知载体图像的 CIELab 空间的 L 分量经过小波分解后, 对一次小波分解后的高频分量(ch_1)再次进行小波分解, 得到的分量主要集中在高频部分, 把水印图像加在高频部分, 对视觉的影响较小, 克服了载体

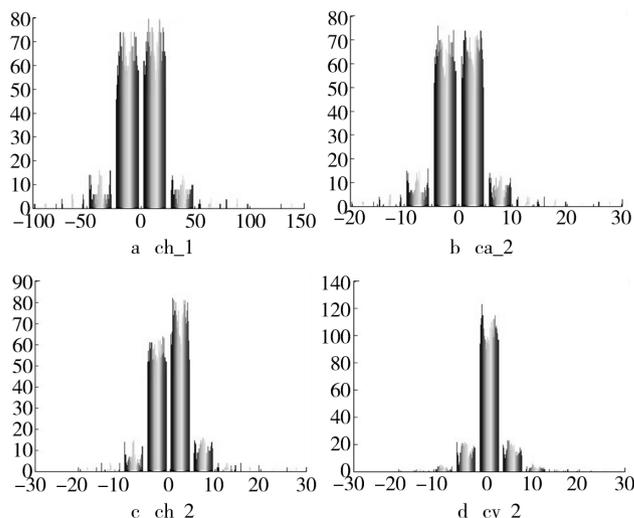


图2 图像L分量小波分解后各分量的直方图

Fig.2 Histogram of L component after wavelet decomposition

图像的低频部分对重建水印的影响,增强了水印信息检测的可靠性。

3 基于小波的傅里叶加密印刷水印嵌入和提取算法

3.1 水印的嵌入算法

- 1) 生成随机加密相位模板 $\alpha(x, y)$ 和 $B(\xi, \eta)$ 。
- 2) 对水印图像 $f(x, y)$ 进行 $\alpha(x, y)$ 调制后,进行傅里叶变换^[9-10],再进行随机加密相位模板 $B(\xi, \eta)$ 的调制,最后生成傅里叶变换加密全息图像。
- 3) 加密傅里叶变换全息之后生成全息水印图像为^[1,4]:

$$I_E(\xi, \eta) = \{ [F(\xi, \eta) \otimes A(\xi, \eta)] B(\xi, \eta) \} R^*(\xi, \eta) + \{ [F(\xi, \eta) \otimes A(\xi, \eta)] B(\xi, \eta) \}^* R(\xi, \eta) \quad (4)$$

- 4) 读取 RGB 图像,将该图像转换到 Lab 颜色空间,提取 L 分量,对 L 分量进行小波分解;对小波分解后的水平(ch_1)分量,再进行小波分解,得到不同的频带分量。

- 5) 选择合适的嵌入强度 K,把水印分别嵌入到(ch_1)分量经过小波分解后的各个分量中,再对各分量进行 2 次逆小波变换,得到含有水印的 L 分量,再把图像从 CIELab 颜色空间转换到 RGB 颜色空间。

3.2 水印的提取算法

- 1) 读取嵌入水印的彩色图像,将该图像从 RGB 颜色空间转换到 CIELab 颜色空间,提取 CIELab 颜

色空间的 L 分量,对 L 分量进行小波分解,然后对得到的水平分量(ch_1)进行小波分解。

- 2) 对水平分量(ch_1)小波分解得到的各个分量与随机加密相位模板 $B(\xi, \eta)$ 全息图像相乘,再进行逆傅里叶变换,然后把得到的各水印信息叠加在一起,就得到了重建的水印;重建水印的过程不需要原始图像的参与,属于盲提取技术。

4 仿真实验研究

4.1 打印/扫描后仿真实验

该实验用 512×512 (像素)大小的 RGB 图像作为载体图像和 128×128 (像素)大小带有 T 字母的二值图像作为水印图像,见图 3;打印机为 Color Laser-



图3 原始载体和水印图像

Fig.3 Host image and watermark

Jet Professional CP5225 (CE710A),扫描仪为中晶 9800XL 高分辨率彩色扫描仪。为了尽可能地避免扫描过程引入的几何失真,提高水印的正确率,使用 Photoshop 软件对打印扫描后的图像进行旋转校正。打印分辨率为 150 dpi,扫描分辨率为 600 dpi。

水印实验结果见图 4,选择合适的嵌入强度,对嵌入水印后的图像质量有一定的影响,但在人眼可以接受的范围内,能够重建清晰的水印,说明提取出来的水印具有良好的稳健性,验证了该算法的可行性。

4.2 嵌入水印的图像的均方差(MSE)

评价图像感知质量最普遍的手段是 MSE, MSE 可以直接反映嵌入水印的图像和原始载体图像在品质上的差异,是评价图像质量变化的客观指标。MSE 的公式如下:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x, y) - I_w(x, y)]^2 \quad (5)$$

$I(x, y)$ 代表原始载体图像; $I_w(x, y)$ 代表含有水印的载体图像; $M \times N$ 代表图像大小; K 为嵌入强度。全息水印的嵌入系数 K 的范围为 $0.01 \sim 0.2$ 。按照

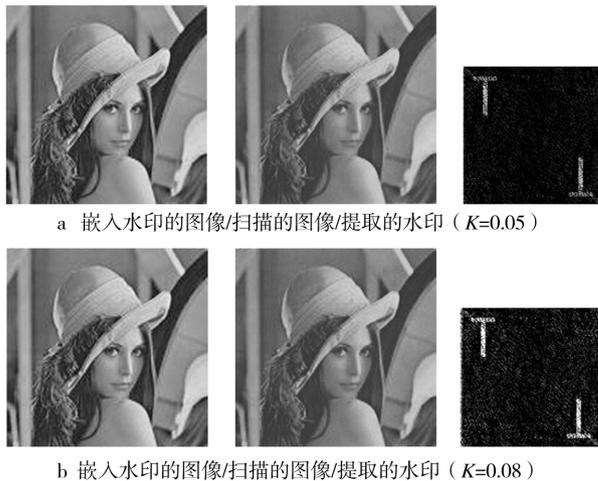


图4 水印实验结果

Fig. 4 The results of watermark experiment

嵌入系数的不同,分别计算嵌入水印的图像与原始载体图像的均方差,进行拟合绘图,见图5。嵌入水印

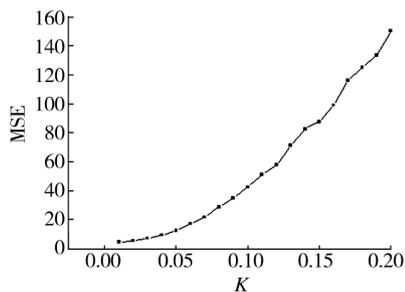


图5 原始载体图像和嵌入水印的图像的 MSE 拟合图

Fig. 5 MSE fitting chart of host image and watermarked image

的强度越小,图像的品质越高,得到的 MSE 越小。

通过图5可知, $K=0.2$ 时, $mse=151.43$ 。当 $K<0.2$ 时, $mse<151.43$,表明在这个范围内($0\sim 0.2$),嵌入水印的图像的感知质量较好,说明了在小波的高频部分中嵌入水印有较好的不可见性。

4.3 原始水印图像和提取水印图像的相关性

为了定量评估原始水印图像和提取水印图像之间的相似度,可用相关性系数^[14] R 定义,相关系数 R 越大,图像越接近,2个图像的相关度越高,它们之间的相关性系数 R 可定义为:

$$R = \frac{\sum \sum f_1(m, n) f_2(m, n)}{\sqrt{\sum \sum f_1(m, n)^2 \sum \sum f_2(m, n)^2}} \quad (6)$$

$f_1(m, n)$ 代表原始水印图像; $f_2(m, n)$ 代表提取水印图像; K 为嵌入强度。全息水印的嵌入强度的范

围为 $0.01\sim 0.2$,分别计算原始水印和提取水印的相关性(R),见图6。

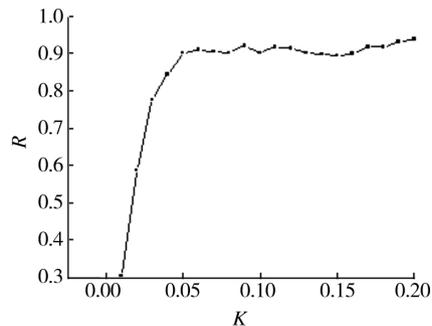


图6 原始水印图像和提取水印图像的相关性拟合图

Fig. 6 Correlation fitting chart of original watermarked image and extracted watermark

由图6知, K 在 $0.04\sim 0.2$ 的范围内,提取水印与原始水印有较大的相似度,说明了该算法能够很好的抑制载体图像低频的影响,重建水印的质量较好。

4.4 嵌入水印的图像的鲁棒性实验

在保证图像质量的前提下,测试嵌入水印的图像的鲁棒性,对嵌入水印的图像进行裁剪、有损压缩、中值滤波、加入高斯噪声、加入椒盐噪声等操作;然后打印和扫描,客观评价提取水印图像的相关性,见图7。



图7 水印攻击实验效果

Fig. 7 The results of different attacks

从图 7 结果看,嵌入水印的图像裁剪较大比例,仍然可以较好地重建水印图像,这充分表明了水印算法的抗裁剪能力;从重建水印和原始水印的相关性可以看出,该算法具有较好的抗 JPEG 压缩的特性;嵌入水印后的图像加入强椒盐、高斯噪声后和经过中值滤波,重建的水印还具有良好的表现,说明该算法有较强的抗噪声和滤波的能力;这些测试图像是经过一次打印和扫描攻击后,再重建的水印,说明该算法能够抵抗一次打印和扫描的攻击,二次扫描打印,重建水印脆弱。

5 结论

在理论分析傅里叶变换加密全息的基础上,通过计算机对全息水印进行了加解密模拟仿真,实验数据分析表明该算法重建水印时,能够有效避开载体图像的低频部分,保留嵌入水印的大部分信息。提出的基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法,提取水印图像不需要原始图像的参与,该算法属于盲检测水印技术,能够抵抗打印、扫描、高斯噪声、椒盐噪声、JPEG 压缩和裁切等攻击,具有强鲁棒性,该水印技术在印刷防伪中有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] JAVIDI B, NOMURA T. Securing Information by Use of Digital Holography[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(1): 28—30.
- [2] NISHCHAL N K, JOSEPH J, SINGH K. Fully Phase Encryption Using Digital Holography [J]. *Opt Eng*, 2004, 43(12): 2959—2966.
- [3] XU L, PENG X, GUO Z, et al. Imaging Analysis of Digital Holography[J]. *Opt Express*, 2005, 13(7): 2444—2452.
- [4] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(5): 865—873.
- [5] KISHK S, JAVIDI B. 3D Watermarking by a 3D Hidden Object[J]. *Opt Express*, 2003, 11(8): 874—888.
- [6] KISHK S, JAVIDI B. Information Hiding Technique with Double Phase Encoding[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(26): 5462—5470.
- [7] 孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密全息标识防伪技术研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(1): 31—34.
SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Anti-fake Technique by Double Dandom Phase Encrypted Holographic Mark [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 31—34.
- [8] 孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 621—624.
SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on Inline Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 621—624.
- [9] 张雷洪, 孙刘杰, 郑继红, 等. 傅里叶变换全息加密数字水印解密实验研究[J]. *包装工程*, 2011, 32(17): 8—12.
ZHANG Lei-hong, SUN Liu-jie, ZHENG Ji-hong, et al. Experiment Study on Decryption of Fourier Transform Holography Encrypted Watermark[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(17): 8—12.
- [10] 田瑞卿, 何泉, 王彦敏. 一种傅里叶域图像数字水印方案的研究[J]. *北京石油化工学院学报*, 2006, 14(1): 1—4.
TIAN Rui-qing, HE Quan, WANG Yan-min. Study on Digital Image Watermarking in the Fourier Transform Domain[J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology*, 2006, 14(1): 1—4.
- [11] 刘真, 丁盈盈. 一种优化的基于 DWT 的抗打印扫描的数字水印算法[J]. *包装工程*, 2011, 32(11): 93—99.
LIU Zhen, DING Ying-ying. An Optimized and DWT Based Printing and Scanning Resistant Watermark Algorithm[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(11): 93—99.
- [12] KESKINARKAUS A, PRAMILA A, SEPPANEN T, et al. Wavelet Domain Print-Scan and JPEG Resilient Data Hiding Method[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 4283: 82—95.
- [13] MEERWALD P, UHL A. A Survey of Wavelet-domain Watermarking Algorithms[C]. *Proceedings of SPIE, Electronic Imaging, Security and Watermarking of Multimedia Contents III*, SPIE, (San Jose, CA, USA), 2001.
- [4] 朱竹青, 冯少彤, 聂守平, 等. 基于离散余弦变换的复制加密图像隐藏技术[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 176—181.
ZHU Zhu-qing, FENG Shao-tong, NIE Shou-ping, et al. Complex Valued Encrypted Image Hiding Technology Based on Discrete Cosine Transform[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(1): 176—181.