

一种基于 Contourlet-DFT 的加密全息水印技术

于明伟

(重庆商务职业学院, 重庆 401331)

摘要: **目的** 提出一种新的、适用性强的加密全息水印技术。 **方法** 首先将载体图像进行一级 Contourlet 变换, 得到其低频子带图像; 其次将其低频子带图像进行离散傅里叶变换, 得到频域的幅度谱和相位; 最后将加密全息水印嵌入到其高频部分的幅度谱中, 并对中心对称块相同的嵌入。 **结果** 文中算法水印隐蔽性好, 重建水印图像视觉有意义; 算法鲁棒性强, 可以抵抗均值滤波、中值滤波和高斯滤波, 对噪声、JPEG 压缩攻击和裁切攻击有很强的抵抗能力, 同时可以有效抵抗打印-扫描攻击。提取水印时, 不需要原始图像的参与, 属于盲水印算法。 **结论** 该方法能够满足数字图像版权保护的需要。

关键词: 加密全息; Contourlet 变换; 离散傅里叶变换; 全息水印

中图分类号: TS853.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)01-0142-05

Novel Encrypted Holographic Watermarking Algorithm Based on Contourlet-DFT

YU Ming-wei

(Chongqing Business Vocational College, Chongqing 401331, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to propose a novel encrypted holographic watermarking algorithm based on Contourlet-DFT. Firstly, the carrier image was decomposed by Contourlet transform. Then the low frequency subband was transformed to the frequency domain by Fourier transform. Finally, the encrypted holographic watermark was embedded into the amplitude of high spectral magnitude of the low frequency subband. And the same replacement was done in the central symmetrical block. Simulation results showed that the algorithm was of good invisible ability, and the reconstructed watermark can be identified. The proposed method with good robustness can well resist attacks such as low-pass filtering, noise, JPEG compression and cropping. The algorithm can survive print-scan attack as well. The carrier image was not needed during watermark extraction and the proposed algorithm was blind. The proposed watermarking algorithm can meet the need of copyright protection of digital images.

KEY WORDS: encrypted holography; Contourlet transform; DFT; holographic watermarking

随着互联网和多媒体技术的迅猛发展, 信息数字化已经成为当今社会的显著特征。信息数字化让信息获取变得更加便利的同时, 也使得数字作品的复制、流通变得异常轻松, 这也使得目前网络盗版活动非常猖獗, 对数字作品进行有效的版权保护已经成为非常棘手的问题。数字水印^[1-3]是近 20 年兴起的, 其

以版权保护作为目的, 现在已经广泛应用到了版权保护领域。目前, 数字水印技术主要集中于变换域水印算法的研究, 比较成熟的变换域算法有 DFT 变换、DCT 变换、DWT 变换及 SVD 变换等。

随着数字水印技术研究的深入, 其他学科相关技术在水印算法中的应用也变得更为常见。其中, 信息

收稿日期: 2014-12-15

基金项目: “十二五”科技支撑计划(2011BAK10B05, 2012BAD29B05); 质监总局公益项目(2011HK260)

作者简介: 于明伟(1985—), 男, 山东烟台人, 硕士, 重庆商务职业学院助教, 主要研究方向为印刷色彩管理、数字印前技术、图像处理等。

光学在数字水印技术中的应用更为广泛。Taikai 和 Mifune^[4]在2003年提出了将物体的傅里叶变换全息图像作为水印信息嵌入到载体图像空域中的方法,首次实现了光学全息技术与数字水印技术的结合,但是该算法无论是含水印图像质量,还是鲁棒性均需要进一步提高。随后,结合数字全息的数字水印技术受到了越来越多的关注^[5-6]。2005年,Chang等^[7]将Takai的方法进行了改进,将全息水印嵌入载体图像离散余弦变换(DCT)域的中频系数中,改善了含水印图像的视觉质量。Yuchi等^[8]在2006年作了进一步改进,提高了抵抗JPEG压缩的鲁棒性。Sun等^[9-10]在2007年提出了加密同轴全息技术,并将加密全息图应用到数字水印技术中。算法对抗打印扫描攻击做了初步的尝试,并取得了一定成果。但是,由于使用的同轴全息技术在重建图像时会产生共轭像,因此最终解密得到的图像上有一定的背景噪声。2008年,Sun等^[11]将傅里叶全息图像隐藏在彩色图像中,并进行了打印扫描实验,取得了良好的效果,但是其算法抵抗其他攻击的性能并未做说明。2009年,Huang等^[12-13]提出了共轭对称延拓傅里叶计算全息技术,其操作简便,无需模拟参考光和物光,并将其应用到了数字水印技术中,可以有效抵抗打印扫描攻击,但是安全性较差,且抵抗其他攻击的能力有待加强。2014年,Lu^[14]提出了新的加密全息生成方式,并将其应用到了抗打印扫描数字水印中,取得了一定的效果,其加密全息图解密得到的图像背景没有视觉可辨的噪声影响,但是由于采用的是空域叠加的嵌入方式,因而抵抗其余攻击的能力有待提高。

目前,全息水印算法的缺点主要是算法的不可见性较差,且多数算法是针对打印扫描攻击或者是一般图像处理攻击设计,并不能很好的兼顾两者。为此,提出一种基于Contourlet-DFT的加密全息水印技术,可以在不可见性很好的前提下,有效抵抗打印扫描攻击,对一般图像处理攻击也有很强的鲁棒性。

1 新加密全息水印技术理论分析

1.1 加密全息技术

利用文献[14]提出的加密全息方法,生成计算全息图像作为全息水印信息。加密全息图像的获得分为2个步骤,首先用2个随机相位模版在空域和频域中对原始水印信息进行调制,得到经过双随机相位调制加密的复数加密图;其次对复数图像进行共轭对称

延拓计算,并进行傅里叶变换得到实数的全息图像,该实数图像记录了复数加密图像的相位和振幅信息。设待加密图像为已归一化的 $f(x,y)$,图像尺寸大小为 $M \times N$ 。令 (x,y) 为空域坐标, (ξ,η) 为频域坐标, $p(x,y)$ 和 $b(\xi,\eta)$ 为均匀分布在 $[0,1]$ 之间的2个独立白噪声随机图像,则经过双随机相位调制后的复数图像 $\varphi(x,y)$ 为:

$$\varphi(x,y) = \{f(x,y)\exp[j2\pi p(x,y)]\} \otimes h(x,y) \quad (1)$$

式中: $h(x,y)$ 是 $\exp[j2\pi p(x,y)]$ 的脉冲响应,符号 $\otimes$ 表示卷积操作。

对复数图像 $\varphi(x,y)$ 进行共轭对称延拓计算,得到尺寸为 $(2M+2) \times (N+1)$ 的复数图像 $\Phi(x,y)$,计算方式为:

$$\Phi(x,y) = \begin{cases} 0 & (x=0, \text{ or } y=0, \text{ or } x=M+1) \\ \varphi(x,y) & (x=1, \dots, M, y=1, \dots, N) \\ [ROT180(\varphi(x,y))]^* & (x=M+2, \dots, 2M+1, y=1, \dots, N) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $ROT180(\varphi(x,y))$ 为对复数图像做 180° 的旋转;*为对复数作共轭运算。对 $\Phi(x,y)$ 做离散傅里叶变换即可得到实数全息图像 $H(x,y)$:

$$H(x,y) = F(\Phi(x,y)) \quad (3)$$

式中: F 为离散傅里叶变换。对得到的实数图像进行编码得到全息图,全息图中包含了复数图像的振幅和相位信息。

上述加密全息的解密过程是加密过程的逆过程。对实数全息图像 $H(x,y)$ 做逆傅里叶变换可以得到 $\Phi(x,y)$,再在复数图像 $\Phi(x,y)$ 对应位置中将 $\varphi(x,y)$ 提取出来,利用加密的随机模板对复数图像解密,最后即可得到原始的水印图像。

1.2 Contourlet变换

Contourlet变换,也称金字塔型方向滤波器组(PDFB),是一种多尺度信号表示方法。PDFB首先利用LP(Laplacian Pyramid)分解^[15]将图像分解为低频逼近部分与高频细节部分,以捕获边缘奇异点。然后,将高频细节部分通过方向滤波器组(DFB)进行处理,以根据方向信息将捕获的奇异点汇集成轮廓段,从而获取图像中的方向信息。这种结构使得Contourlet具有较优的非线性逼近性能。将这一过程重复进行,即可得到图像的多尺度方向子带。Contourlet对图像进行分解的过程和Contourlet变换频域子带分布

分别见图1和图2。近些年来,结合 Contourlet 变换的水印算法已经出现了很多^[2,16-17],由于 Contourlet 变换可以分解出更稳定的低频分量,因此现阶段很多算法都将水印嵌入载体图像经 Contourlet 变换分解出的低频分量中,这样可以有效抵抗噪声、滤波和 JPEG 压缩等攻击。

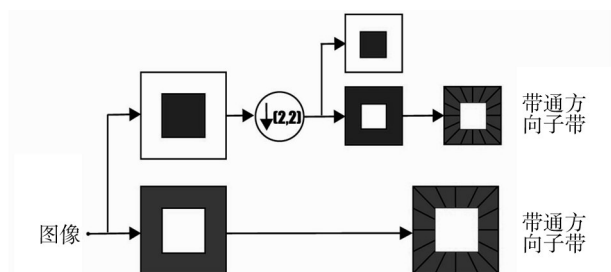


图1 Contourlet 变换分解

Fig.1 Contourlet transform decomposition

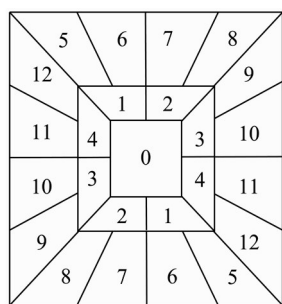


图2 Contourlet 变换尺度和方向分布

Fig.2 Frequency subband distribution of Contourlet transform

2 水印的嵌入与提取

2.1 水印嵌入算法

实验采用标准 Lena 图像作为载体图像,利用加密全息方法将原始水印信息进行加密,记录得到加密全息图像作为全息水印,并将其嵌入在载体图像的 Contourlet 变换低频分量的 DFT 域中。

1) 生成 2 个均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的随机模版 $p(x, y)$ 和 $b(\zeta, \eta)$, 其中 $p(x, y)$ 作为空域的随机相位模版, $b(\zeta, \eta)$ 作为频域的相位调制模版, 并将 2 个随机模版记录作为密钥。

2) 用空域相位模版 $p(x, y)$ 对归一化的原始水印 $f(x, y)$ 进行调制, 并将调制后的图像进行傅里叶变换, 得到频域复数图像。再对其用频域模版 $b(\zeta, \eta)$ 进行调制, 将调制后的图像进行逆傅里叶变换得到加密

的复数图像 $\varphi(x, y)$ 。

3) 将得到的复数加密图像进行共轭对称延拓计算, 再对其做离散傅里叶变换, 得到最终的实数加密全息图 $H(x, y)$, 所用的原始水印及其全息图像见图3。

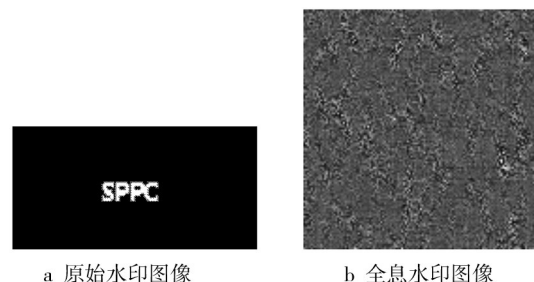


图3 水印图像和全息水印图像

Fig.3 The watermark and the hologram watermark

4) 对 Lena 灰度载体图像进行一级 Contourlet 变换, 得到载体图像稳定的一级低频分量, 并对其进行离散傅里叶变换 (DFT), 得到其对应的振幅信息和相位信息。

5) 将加密全息水印替换低频分量 DFT 域中的中高频部分的振幅信息, 对应位置的相位信息保持不变, 并在中心对称处进行同样的操作完成水印的嵌入, 嵌入公式为:

$$F' = k \times H \quad (4)$$

式中: k 为水印嵌入强度; H 为加密全息; F' 为嵌入水印信息后的振幅。同时记录水印的嵌入位置作为嵌入位置密钥。

6) 将得到的含水印频域图像进行逆离散傅里叶变换得到含水印的低频图像, 再对其进行一级逆 Contourlet 变换, 得到含水印图像。

7) 计算含水印图像和原始图像的 PSNR 值, 如果 PSNR 值小于设定的阈值, 则改变水印的嵌入强度, 重新进行第 5 步和第 6 步, 直到满足 PSNR 值大于设定阈值的要求。

2.2 水印提取

水印的提取过程为水印嵌入的逆过程, 具体步骤: 对含水印的灰度图像进行一级 Contourlet 变换, 对低频分量进行 DFT 变换得到其振幅和相位信息; 利用保存的水印嵌入位置密钥, 在振幅的对应位置处提取出相应的实数矩阵, 作为提取出的全息水印图像; 将提取出的全息水印逆离散傅里叶变换, 去掉所得图像的第 1 行和第 1 列像素, 作为待解密的复数图像 $\varphi'(x, y)$; 利用加密的密钥对 $\varphi'(x, y)$ 进行解密, 得到提取出的水印信息 $f'(x, y)$ 。

3 仿真结果与分析

3.1 水印隐蔽性的客观评价指标

关于数字水印隐蔽性的评价指标很多,最常见的是使用峰值信噪比PSNR值对水印隐蔽性进行评价。灰度载体图像与灰度含水印图像的PSNR值计算公式为:

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{MSE} \quad (5)$$

式中: MSE 为载体图像和含水印图像的像素值均方差,且

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X'(i,j) - X(i,j))^2}{KL} \quad (6)$$

式中: X' 为含水印图像; X 为载体图像; (i,j) 为像素的位置坐标; K,L 为图像的尺寸大小。

实验采用1024 pixel × 1024 pixel的Lena灰度图像作为载体图像。原始水印图像采用有意义的二值图像,尺寸为127 pixel × 63 pixel,对应生成的全息水印尺寸为128 pixel × 128 pixel,见图4。采用上述嵌入方式,将全息水印嵌入载体图像,得到的含水印图像和从中提取出的水印信息。设置PSNR阈值为40 dB,经过调节得到的含水印图像嵌入强度 k 为69,含水印图像和原始图像的PSNR值为41.9666 dB,说明2幅图像的相似度很高,水印的隐蔽性很好。



图4 载体图像、水印图像和含水印图像、提取的水印图像

Fig.4 The carrier image with watermark and the watermarked image with extracted watermark

3.2 水印鲁棒性实验

测试算法的鲁棒性,对嵌入水印的图像进行几种常见的图像处理攻击,包括噪声、滤波、JPEG压缩、裁切以及打印扫描攻击。算法抵抗攻击的实验结果见图5,提取出的水印信息均未做二值化处理。

由图5a和图5b可以看出,含水印图像经过高斯噪声(加性噪声)和speckle噪声(乘性噪声)攻击后,提



图5 水印攻击实验结果

Fig.5 Experimental results of watermark attacks

取出的全息水印可以重建清晰的水印图像,视觉辨别性很强,可以清楚地分辨“SPPC”字样,说明其对常见的加性噪声和乘性噪声都有一定的抵抗能力。由图5c—e的滤波实验可以看出,算法经过高斯滤波、中值滤波、均值滤波等3种滤波方式攻击后,提取出的水印信息可以很清晰地辨别“SPPC”字样,视觉效果没有受太大的影响,说明算法对滤波攻击的抵抗性很强。由图5f可知,虽然压缩因子已经降低到40%,但是从受到JPEG压缩攻击的含水印图像中提取出的水印信息依然清晰可辨别,说明算法对JPEG压缩攻击也有很强的抵抗能力。算法对噪声、滤波、JPEG压缩攻击表现出的良好抵抗性能,主要得益于Contourlet变换分解出稳定的低频信息,当图像受到上述攻击时,由于都是对图像的高频部分进行改变,因对嵌入在低频的水印信息影响较小。由图5g可知,图像可以有效抵抗裁切攻击,虽然含水印图像被裁切掉了1/4,但是提取的水印依然清晰可辨。打印扫描实验所用的打印机型号为HPZ3200,扫描仪型号为EPSON V500,打印分辨率为150 dpi,扫描分辨率为600 dpi。由图5h可知,图像经过打印、扫描过程后,提取出的水印可以清晰地分辨“SPPC”字样,说明算法可以有效抵抗打印扫描攻击。

4 结语

提出了一种基于Contourlet-DFT的加密全息水印技术。利用Contourlet变换可以分解出稳定的低频信息这一特性设计水印,使算法提高了对常见图像处理攻击的鲁棒性。将加密全息水印嵌入在低频部分的DFT域中,替换对应大小的振幅信息,而保留原有的相位信息不变,使得算法的不可见性得到了显著提高。文中算法得到的含水印图像的PSNR值达到了40 dB以上,对常见的噪声、滤波、JPEG压缩、裁切以及打印扫描等攻击都有很强的鲁棒性,提取出的水印信息均可以清晰辨认,说明文中算法拥有很强的使用价值。

参考文献:

- [1] 王子煜,孙刘杰,李孟涛. 强鲁棒性QR码水印技术[J]. 包装工程,2012,33(15):84—87.
WANG Zi-yu, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. QR Code Watermark Technology with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 84—87.
- [2] 白韬韬,刘真,卢鹏. 基于QR码的Contourlet域数字水印算法[J]. 光电子·激光,2014,25(4):769—776.
BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Digital Watermarking Scheme in Contourlet Domain Based on QR Code[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(4): 769—776.
- [3] 卢鹏,刘真. 基于归一化的全息水印技术[J]. 包装工程,2013,34(1):115—118.
LU Peng, LIU Zhen. Holographic Watermark Technology Based on Image Normalization[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 115—118.
- [4] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 865—873.
- [5] 孙刘杰,李孟涛. 基于CMYK颜色空间的光全息水印算法研究[J]. 包装工程,2012,33(9):27—32.
SUN Liu-jie, LI Meng-tao. Study on Light Holographic Watermarking Algorithm Based on CMYK Color Space[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 27—32.
- [6] 白韬韬,刘真,卢鹏. 基于图像校正的抗几何变换全息水印算法[J]. 包装工程,2014,35(19):103—108.
BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Holographic Watermarking Algorithm Resistant to Geometric Attack Based on Image Correction[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(19): 103—108.
- [7] CHANG H T, TSAN C T. Image Watermarking by Use of Digital Holography Embedded in the Discrete Cosine Transform Domain[J]. Applied Optics, 2005, 44(29): 6211—6219.
- [8] 尉迟亮,顾济华,刘薇,等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. 光学学报,2006,26(3):355—361.
YUCHI Liang, GU Ji-hua, LIU Wei, et al. An Image Digital Watermark Technique Based on Digital Holography and Discrete Cosine Transform[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 355—361.
- [9] 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 Doubled Random Phase Encrypted Holographic Mark[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 31—34.
- [10] 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.
- [11] 孙云峰,翟宏琛,杨晓苹,等. 傅里叶计算全息数字水印在彩色图像印刷防伪中的应用[J]. 光电子·激光,2008,19(7):952—955.
SUN Yun-feng, ZHAI Hong-chen, YANG Xiao-ping, et al. Application of Fourier CGH Digital Watermarking Technique in Color Image Forgery-prevention Printing[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2008, 19(7): 952—955.
- [12] 黄素娟,王朔中,于瀛洁. 共轭对称延拓傅里叶计算全息[J]. 物理学报,2009,58(2):952—958.
HUANG Su-juan, WANG Shuo-zhong, YU Ying-jie. Computer Generated Holography Based on Fourier Transform Using Conjugate Symmetric Extension[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 952—958.
- [13] 黄素娟,王杜瑶,刘晓静,等. 基于小波变换的硬拷贝全息水印[J]. 光电子·激光,2011,22(9):1415—1420.
HUANG Su-juan, WANG Du-yao, LIU Xiao-jing, et al. Hardcopy Hologram Watermarking Based on Discrete Wavelet Transform[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 22(9): 1415—1420.
- [14] 卢鹏. 基于CGH的数字水印技术[D]. 上海:上海理工大学,2014.
LU Peng. Research on Watermarking Technology Based on Computer-generated Holography[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2014.
- [15] DO M N, VETTERLI M. Contourlets: A New Directional Multiresolution Image Representation[C]// Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, United States: 2002.
- [16] QIN Chan, WEN Xian-bin. A Novel Digital Watermarking Algorithm in Contourlet Domain[J]. Journal of Information and Computational Science, 2014, 11(2): 519—526.
- [17] BI Hong-bo, LI Xue-ming, ZHANG Yu-bo, et al. A novel HVS-based Watermarking Scheme in CT Domain[J]. Sensors and Transducers, 2014, 163(1): 53—59.