

一种基于 Contourlet 变换的彩色图像全息水印算法

孙刘杰, 徐 卓

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 提出了一种结合了全息水印加密技术和 Contourlet 变换技术的彩色图像水印算法。算法首先将 RGB 模式的水印载体图像转换至 YCrCb 颜色空间, 选取亮度分量作为水印载体通道, 对其进行多层 Contourlet 分解, 得到细节子带图像; 而后对二值水印图像进行傅里叶全息加密, 将加密后的图像嵌入至载体图像的 Contourlet 变换系数中。仿真实验结果表明, 该水印算法具有良好的不可见性, 对于常见的几何变换及多种攻击具有良好的鲁棒性。

关键词: 数字水印; Contourlet 变换; 全息加密; 彩色图像

中图分类号: TS801.3; TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)09-0010-04

Novel Color Image Hologram Watermarking Algorithm Based on Contourlet Transform

SUN Liu-jie, XU Zhuo

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

Abstract: A novel color image watermarking algorithm based on contourlet transformation and computer generated hologram was put forward. Firstly, the watermarked host image in RGB mode was converted to YCrCb color space, and contourlet transform was performed on the luminance Y component to get detailed sub band images. The watermarked image was encrypted with Fourier hologram technology. Finally, the encrypted digital watermark was embedded into decomposed detail sub bands of discrete contourlet transform. Simulation results showed that the proposed algorithm has good invisibility and is robust against common geometric transformation and multiple attacks.

Key words: digital watermarking; contourlet transform; computer generated hologram; color image

近年来,随着数字媒体的广泛应用和飞速发展,如何对数字内容进行有效的版权保护及版权认证成为了研究的热点之一。数字水印技术能对数字媒体的信息安全进行保护并能实现版权认证,其基本思想是使用电子签名、商标、使用权限等版权信息作为原始水印信息,将其嵌入到图像、视频等常见数字媒体中,在进行版权归属判断或版权跟踪时则能通过一定的检测方法提取出水印信息,从而达到版权保护、认证的目的^[1]。

图像是现今数字媒体中的主要载体,彩色图像的水印算法更是近年的研究重点。根据实际应用需求,彩色图像的水印算法应兼具不可见性和鲁棒性,现有的彩色图像水印算法的研究主要集中在离散余弦变

换域和小波域。Do 和 Vetterli 于 2005 年对小波变换进行拓展研究,提出了 Contourlet 变换,既具有小波变换的多分辨分析和时频局部能力,同时兼具了良好的各向异性,从而能更有效地表达图像中的边缘、轮廓和纹理等高维奇异性几何信息,因此也使得研制开发新型图像水印方案成为可能^[2]。

文中在研究 Contourlet 变换的基础上,结合傅里叶全息加解密技术,实现了一种针对彩色图像的 Contourlet 域鲁棒性数字水印算法。该算法首先将 RGB 模式的水印载体图像转换至 YCrCb 颜色空间,选取亮度分量作为水印载体通道,对其进行多层 Contourlet 分解,得到细节子带图像;而后对二值水印图像进行傅里叶全息加密,将加密后的图像嵌入至载体图像的

收稿日期: 2013-01-14

作者简介: 孙刘杰(1965-),男,安徽人,博士,上海理工大学教授,主要从事光学信息技术、数字印刷技术和印刷防伪技术的教学和研究。

Contourlet 变换系数中。

1 Contourlet 变换及全息水印加解密

1.1 Contourlet 变换

Contourlet 变换最大的特点是将多尺度分析和方向分析分开进行。其基本思想如下^[3]:首先使用拉普拉斯金字塔(LP, laplacian pyramid)变换对图像进行多尺度分析,捕获点奇异性,而后使用方向性滤波器组(DFB, directional filter bank)将分布在同一方向上的奇异点合成为一个系数。拉普拉斯金字塔和方向性滤波器组二者构成了 Contourlet 变换的核心,即可实现完全重建的“塔式方向滤波器组”(PDFB)^[2]。Contourlet 变换的频率分解见图 1。

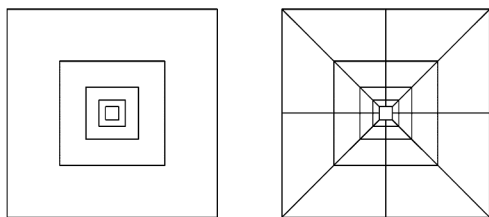


图 1 拉普拉斯金字塔分解和方向滤波器分解示意图

Fig. 1 Sketch map of Laplacian pyramid and DFB decomposition

1.2 傅里叶全息水印加解密

为了增加水印信息的安全性,常需要对水印图像本身进行加密处理。全息加密技术具有极强扫文加密性能,能大幅提升水印的安全性^[4],同时全息图还具有任意部分都能再现全息图所有信息的特性,既不断毁性,能提升水印算法鲁棒性^[5],这些特性使得数字全息图很适于作为水印图像。故本文选择对原始的二值水印图像进行傅里叶全息加密^[6],其具体的数学表达如下:

设待加密的水印图像大小为 $m \times m$ 像素,由 $f(x, y)$ 表示, (x, y) 表示其空域坐标, (ζ, η) 表示相应的傅里叶频域坐标; $P(x, y)$ 和 $B(\zeta, \eta)$ 是两个独立随机相位模板;原始水印图像 $f(x, y)$ 首先由随机加密相位模板 $P(x, y)$ 进行调制,对调制的结果进行傅里叶变换,再由随机相位模板 $B(\zeta, \eta)$ 进行调制,最后由参考光 $R(\zeta, \eta)$ 进行叠加干涉便完成了双随机相位调制生成加密的傅里叶全息图。全息图 $I_E(\zeta, \eta)$ 可以表示为:

$$I_E(\zeta, \eta) = | [F(\zeta, \eta) \otimes A(\zeta, \eta)] B(\zeta, \eta) |^2 + | R(\zeta, \eta) |^2 + \{ [F(\zeta, \eta) \otimes A(\zeta, \eta)] B(\zeta, \eta) \} R^*(\zeta, \eta) +$$

$$\{ [F(\zeta, \eta)] \otimes A(\zeta, \eta) \} B(\zeta, \eta) \}^* R(\zeta, \eta) \quad (1)$$

式中: $F(\zeta, \eta)$ 和 $A(\zeta, \eta)$ 分别表示 $f(x, y)$ 和 $P(x, y)$ 的傅里叶变换坐标,符号 $\otimes$ 则表示卷积运算。式(1)等式右侧的前两项可以通过计算参考光和经过双随机相位加密调制物光的功率谱加以去除。则变换生成加密的傅里叶变换全息图 $I'_E(\zeta, \eta)$ 可以写成以下形式:

$$I'_E(\zeta, \eta) = \{ [F(\zeta, \eta)] \otimes A(\zeta, \eta) \} B(\zeta, \eta) \cdot R^*(\zeta, \eta) + \{ [F(\zeta, \eta)] \otimes A(\zeta, \eta) \} B(\zeta, \eta) \}^* R(\zeta, \eta) \quad (2)$$

除去待加密水印图像 $f(x, y)$, 通过剩余的傅里叶全息加密系统可计算出密钥的全息图 $K(\zeta, \eta)$, 去除常数项后,生成的傅里叶变换加密全息图的解密密钥的全息图 $K'(\zeta, \eta)$ 的表达式如下:

$$K'(\zeta, \eta) = B(\zeta, \eta) R^*(\zeta, \eta) + B^*(\zeta, \eta) R(\zeta, \eta) \quad (3)$$

全息解密过程则需将式(2)和(3)相乘即可。首先进行相位值为 $-B(\zeta, \eta)$ 的变换,再进行傅里叶逆变换;然后进行相位值为 $-P(x, y)$ 的变换,再进行傅里叶逆变换,取实部进行二值化即可得到解密的水印图像。

2 基于人眼视觉模型和 Contourlet 变换的彩色图像水印算法

2.1 颜色空间转换

现今网络传播使用的彩色图像的颜色模式最为常见的是 RGB 模式,但由于 RGB 模式中 3 个颜色通道之间关联性极强,直接在其中任意一个通道中进行水印嵌入都会对图像的整体视觉效果造成较大的影响,故而在彩色图像水印算法中会涉及到将原本的 RGB 图像转换至其他颜色空间的操作步骤。考虑到 YCbCr 颜色空间具有通道之间关联性最弱、与 RGB 颜色空间之间的转换是线性的、与人眼视觉系统感知过程相似的构成原理、将色彩的亮度分量与彩度分量分离开来等优点^[7],选用 YCbCr 颜色空间进行水印嵌入,并选用代表亮度的 Y 分量作为水印嵌入通道。RGB 颜色空间与 YCbCr 颜色空间之间的转换公式为:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.257 & 0.504 & 0.098 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 水印嵌入算法

在结合傅里叶全息加密、Contourlet 变换及颜色空间的基础上,笔者提出了一种水印嵌入算法,其流

程见图 2,具体步骤如下。

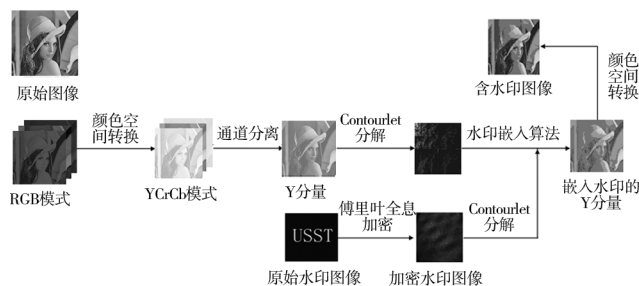


图 2 水印嵌入过程

Fig. 2 Watermark embedding process

步骤 1:根据所述的加密算法,将大小为 $m \times m$ 像素的全息加密水印图像进行一级 LP 分解,将得到的高频部分进行 8 方向分解,得到低频系数矩阵 $W_1(m \times m)$ 和 8 个高频系数矩阵 $W'_{1i}(m, m)$, 其中 $i=1 \rightarrow 8$;

步骤 2:将大小为 $M \times M$ 像素(M 为 m 的整数倍)的 RGB 模式载体图像转换至 YCbCr 颜色空间,后选取 Y 分量进行三级 LP 分解,将第三级得到的高频部分进行 8 方向分解,最后得到低频系数 $X_3(M, M)$ 和 8 个高频系数 $X'_{3i}(M, M)$, 其中 $i=1 \rightarrow 8$;

步骤 3:将大小为 $M \times M$ 的 $X_3(M, M)$ 和 $X'_{3i}(M, M)$ 进行分块,分为大小为 $m \times m$ 点的 M/m 个矩阵块,并计算出其中能量最大的一个矩阵块,分别记为 $X_{3 \max}(m, m)$ 和 $X'_{3i \max}(m, m)$, 其中 $i=1 \rightarrow 8$;

步骤 4:进行低频水印的嵌入,将 $W_1(m, m)$ 嵌入到 $X_{3 \max}(m, m)$ 当中, $X_3(m, m)$ 的其他矩阵块保持不变,得到嵌入水印后的低频系数矩阵 $E_3(M, M)$; 高频水印的嵌入,则是将 $W'_{1i}(m, m)$ 嵌入到 $X'_{3i \max}(m, m)$ 当中, 其中 $i=1 \rightarrow 8$; $X'_{3i}(M, M)$ 的其他矩阵块保持不变,则得到嵌入水印后的 8 个高频系数矩阵 $E'_{3i}(M, M)$, 其中 $i=1 \rightarrow 8$;

步骤 5:对得到的低频系数 $E_3(M, M)$ 和高频系数 $E'_{3i}(M, M)$ 进行 3 级 Contourlet 逆变换,从而得到嵌入水印后的 YCbCr 图像的 Y 分量,最后再加嵌入水印后的图像由 YCbCr 模式转换为 RGB 模式,即完成了水印的嵌入。

2.3 水印提取过程

水印提取过程则需要原始载体图像的参与,对待检测图像和原始水印图像首先都进行颜色空间转换,在 YCbCr 颜色空间进行通道分离,对 Y 分量进行 Contourlet 变换,分解尺度和方向与嵌入水印时保持一致,

而后选择嵌入水印时的 Contourlet 子带系数,计算两者之间的差值,在对差值进行 1 级 Contourlet 逆变换,即可提取出加密的全息水印图像。在使用 2.2 中所述的加密算法对其解密,即可得到提取出的水印图像。

3 实验结果与分析

为了评价提出的全息水印算法的性能,实验采用 Lena 彩色图像进行各种测试,图像大小为 512×512 像素。水印图像采用 32×32 像素的二值图像;仿真实验中,首先对原始水印图像进行傅里叶全息加密,而后对原始载体图像进行颜色空间转换、通道分离及 Contourlet 变换,其中 Contourlet 变换的 LP 采用更适合于图像信号的处理的“9-7”金字塔滤波器,方向性滤波器组则采用“pkva”方向性滤波器^[8-9],按 2.2 提出的算法完成水印的嵌入。

嵌入水印前后的原始图像见图 3,原始水印图像、加密后水印图像及恢复的水印图像见图 4。采用



图 3 载体图像 (PSNR=42.363 dB)

Fig. 3 The original host image

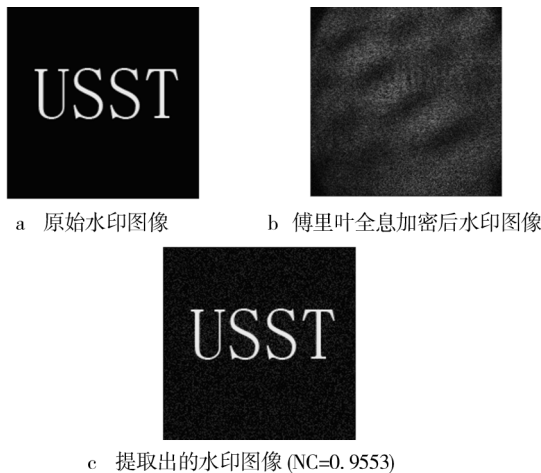


图 4 水印图像

Fig. 4 The watermarked image

目前主流的峰值信噪比 PSNR 与相关系数 NC 作为水印质量的评价指标^[10],其中含水印图像与原始图像之间的 PSNR 值用来判断水印算法的不可见性,提取的水印和原始水印之间的的相关系数 NC 则是对水印算法的鲁棒性进行评价。未受到任何攻击时,算法的 PSNR=42.363 dB, NC=0.9553,表明:在嵌入水印后,图像的失真度较小,说明水印的存在并不影响图像的视觉效果,即不可见性良好;恢复的水印质量较高,可以对其进行识别。

为进一步测试水印算法的鲁棒性,对已嵌入水印的图像进行几何变换、JPEG 压缩、添加噪声和滤波等常见水印攻击,而后再次计算峰值信噪比 PSNR 与相关系数 NC,其结果见表 1,可以看出算法对常见图像处理攻击都具有很高的鲁棒性。

表 1 嵌入水印的彩色图像受到多种攻击后的 PSNR 值与 NC 值

Tab.1 PSNR and NC value of the watermarked color images after attacks

攻击方式	攻击参数	PSNR/dB	NC
未受到攻击	-	42.363	0.9553
JPEG 压缩	$Q = 70$	32.248	0.7314
	$Q = 30$	28.159	0.7016
旋转	0.5°	26.241	0.9598
	1.0°	21.957	0.9136
裁切	1/4	10.864	0.7957
	1/2	7.869	0.6391
缩放	1/2	30.922	0.6896
	3/2	39.173	0.7834
添加高斯噪声	0.001	29.738	0.8957
	0.005	23.077	0.8336
均值滤波	3×3	35.033	0.8156

4 结论

在研究全息加密技术和 Contourlet 变换技术的基础上,提出了一种结合了全息水印加密技术和 Contourlet 变换技术的彩色图像水印算法。同时,考虑到人眼视觉系统的特性,算法中包含了颜色空间转换操作,选取 YCrCb 颜色空间中的亮度分量 Y 作为水印载体通道,增强了算法的鲁棒性。仿真实验结果表明该水印算法具有良好的不可见性,且对于常见的几何变换及图像处理攻击具有良好的鲁棒性。

参考文献:

[1] LI B, HE J, HUANG J, et al. A Survey on Image Steganography and Steganalysis[J]. Journal of Information Hiding and

Multimedia Signal Processing, 2011, 2(2):142-172.

[2] 周兵. Contourlet 域数字图像水印算法研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2009.

ZHOU Bing. Research on Contourlet Domain Digital Image Watermarking Algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2009.

[3] MINH N Do, MARTIN V. The Contourlet Transform: an Efficient Directional Multiresolution Image Representation [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2005, 14 (12):2091-2106.

[4] 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):6218-6224.

SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on In-line Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption [J]. Act A Optica Sinica, 2007, 27 (4):6218-6224.

[5] 李孟涛, 孙刘杰, 刘真. 变换域加密全息水印算法[J]. 包装工程, 2011, 32(15):22-24.

LI Meng-tao, SUN Liu-jie, LIU Zhen. Encrypted Holographic Watermarking Algorithm Based on Transform Domain [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(15):22-24.

[6] SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Watermarking by Encrypted Fourier Holography [J]. Optical Engineering, 2007, 46 (8):085801.

[7] 邵丹, 韩家伟. YUV 与 RGB 之间的转换[J]. 长春大学学报, 2004(4):51-53.

SHAO Dan, HAN Jia-wei. Intertransformation between YUV and RGB [J]. Journal of Changchun University, 2004(4):51-53.

[8] 梁栋, 殷兵, 于梅, 等. 基于非抽样 Contourlet 变换的彩色图像数字水印算法[J]. 光学学报, 2008, 28(8):1469-1474.

LIANG Dong, YIN Bing, YU Mei, et al. An Algorithm for Color Image Digital Watermarking Using the Nonsubsampled Contourlet Transform [J]. Act a Optica Sinica, 2008, 28 (8):1469-1474.

[9] 谢静, 吴一全. 基于奇偶量化的 Contourlet 变换域指纹图像水印算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(6):1365-1367.

XIE Jing, WU Yi-quan. Fingerprint Image Watermarking Algorithm Using the Quantization of Parity Based on Contourlet Transform [J]. Computer Applications, 2007, 27 (6):1365-1367.

[10] 庞晓红. 图像数字水印理论及技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2006.

PANG Xiao-hong. Research on Digital Image Watermarking [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.