

基于离散傅里叶变换的数字全息水印

吴清乐*, 彭代渊

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

(* 通信作者电子邮箱 wuqingle00@gmail.com)

摘要:针对打印扫描过程对硬拷贝水印图像的攻击,提出一种抗打印扫描的全息水印改进算法。改进的算法将双水印的数字全息图隐藏在载体图像的离散傅里叶变换(DFT)中频系数的幅度谱中,并在中心对称的相应块做同样的替换,通过控制图像纹理的峰值信噪比(PSNR)自适应地控制水印嵌入强度,并实现最佳的水印嵌入。改进的算法不可见性明显提高,嵌入有意义水印容量大,具有抗剪切、噪声、JPEG压缩等攻击的优势,且通过打印扫描校正,可从打印扫描图像中清晰提取水印。

关键词:数字全息; 打印扫描; 数字水印

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Digital hologram watermarking based on discrete Fourier transform

WU Qingle*, PENG Daiyuan

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: A print-scan resilient watermarking algorithm based on digital hologram was studied in this paper. A hologram image of two watermark was embedded into the amplitude of middle spectral magnitude of the host image, and the same replacement was done in the central symmetry block. A Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) threshold adapted to the texture of the host image was set to adjust the watermark strength. The proposed approach shows advantages in invisibility, robustness, embedding capacity, resistance against the attack of scaling, noise, and JPEG compression. The watermark can be extracted from the watermarked image after print-scan.

Key words: digital hologram; print-scan; digital watermarking

0 引言

数字水印技术是多媒体数字作品版权保护的一种重要的方法^[1-2],其中抗打印扫描(Print-Scan, PS)数字水印技术可用于硬拷贝图文作品的版权保护。由于PS过程包括多次不均匀采样和量化,其中照明强弱、对比度变化、gamma校正、色调变化和数模转换等因素对图像的影响,使得图像容易遭受旋转、缩放、剪切等多种攻击,因而抗PS数字水印成为研究的难点。1999年Lin等^[3-4]首先开展了抗PS水印的研究,但没有提出抗PS的修正方法;此后,人们在克服PS引起几何失真和半色调变化等方面开展了一系列研究^[5-6],但水印容量、算法复杂度、图像质量等瓶颈难以克服。

计算全息(Computer Generated Holography, CGH)技术,也就是计算机技术和全息技术相结合制作全息图的一种方法,在图像隐藏和数字水印方面有了广泛的应用。2002年Takai等^[7]首次利用计算全息技术提出数字全息水印方法,该方法具有良好的抗剪裁能力。之后,许多学者分别实现了在载体图像离散余弦变换域嵌入水印全息图、基于小波域的全息水印算法、相位密钥型傅里叶计算全息数字水印方法等^[8-10]。关于抗PS全息水印,2007年孙刘杰等^[11]提出抗PS攻击全息水印并取得了初步结果,但含水印图像质量相对于载体图像有明显退化。2008年孙云峰等^[12]实现了彩色印刷图像的大信息量水印嵌入和盲检测,可是算法需要在载体图像中预

先设定两个正方形区域以定位和提取水印。2009年和2011年黄素娟等^[13-14]提出了共轭对称延拓傅里叶计算全息,并将生成的水印全息图嵌入在离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)幅度谱中,从PS后图像中提取水印,该方法具有水印容量大、抗剪切攻击等优点,但含水印图像的水印不可见,抗攻击能力有待进一步的提高。

本文对文献[14]的算法进行了改进,通过修改载体图像中频系数的幅度嵌入水印,由峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)最佳自适应地调节嵌入强度,实现双水印的全息数字水印。实验结果表明,本文算法提高了含水印图像的PSNR,具有较强的不可见性和稳健性等优势,并通过PS校正算法校正PS后的图像,可盲提取水印。

1 双水印的数字全息图的生成

本文利用共轭对称延拓的傅里叶计算全息方法生成数字全息图^[13]。设物光波 $f_0(m, n)$ 可用幅度分布函数 $A_1(m, n)$ 和相位分布函数 $\varphi(m, n)$ 表示,其中 $A_1(m, n)$ 表示图像信息,其公式为:

$$\begin{aligned} f_0(m, n) &= A_1(m, n) \exp(j \varphi(m, n)) = \\ &A(m, n) \cos(\varphi(m, n)) + \\ &j A(m, n) \sin(\varphi(m, n)) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $m = 1, 2, \dots, M-1; n = 1, 2, \dots, N/2-1$ 。共轭对称延拓后得到的复振幅分布为物光波复振幅分布为:

收稿日期:2012-09-20;修回日期:2012-11-08。

作者简介:吴清乐(1987-),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像水印、全息影像;彭代渊(1955-),男,四川资阳人,教授,博士,主要研究方向:网络信息安全、代数编码。

$$f(m,n) = \begin{cases} f_0(m,n), & m=1,2,\dots,M-1; n=1,2,\dots,N/2-1 \\ f_0^*(M-m,N-n), & m=1,2,\dots,M-1; n=N/2+1,\dots,N-1 \\ 0, & m=0 \text{ 或 } n=0 \text{ 或 } n=N/2 \end{cases} \quad (2)$$

其中:“*”表示共轭。

DFT 表示为:

$$F(\mu,\nu) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m,n) \exp(j2\pi(\frac{m\mu}{M} + \frac{n\nu}{N}));$$

$$\mu = 0,1,\dots,M-1; \nu = 1,2,\dots,N-1 \quad (3)$$

式(1)和式(2)代入式(3),可得

$$F(\mu,\nu) = \frac{2}{MN} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N/2-1} \{A_1(m,n) \cos[2\pi(\frac{m\mu}{M} + \frac{n\nu}{N}) - \varphi(m,n)]\}; \quad \mu = 0,1,\dots,M-1;$$

$$\nu = 1,2,\dots,N-1 \quad (4)$$

基于数字全息图的生成算法,本文提出了双水印的数字全息图生成算法,其算法描述如下:1) 将两个不同的水印图像 A 和 A' 扩展成布局图像 A_1 ,布局的水印图像使水印信息方向一致,为了增强水印的鲁棒性使水印信息处于水印全息图频谱的中频区域;2) 布局图像 A_1 作为幅度与随机生成的相位共轭对称延拓生成图像 B ;3) 对图像 B 做 DFT 得到 C ,其中 C 的值都是实数;4) 对图像 C 归一化,将其矩阵映射到 $0 \sim 255$ 。

全息图的特性是任意一点都包含原始物光波的振幅和相位信息,因而数字全息图通过 DFT 再提取幅度即可提取水印信息。图 1 为全息图的生成与再现,其中:(a) 为两个水印经过了适当的布局;(b) 为布局后的双水印进行共轭对称延拓;(c) 为生成的水印全息图;(d) 为由全息图再现的原图像;(e) 为全息图经过叠加高斯随机噪声,并且剪切 50% 后的再现图像。从图 1(e) 可以看出,全息图具有较强的抗剪切和抗噪声的能力,适用于抗 PS 水印。

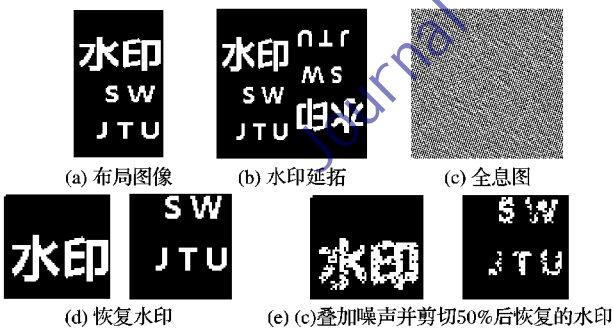


图 1 数字全息的生成与再现

2 双水印的嵌入与提取

2.1 双水印的嵌入

人眼一般对低频分量比较敏感,而且中低频信息相对稳定,将水印嵌入到中高频分量可获得较好的不可见性,所以选择在图像的中频区域嵌入水印信息。本文算法利用载体图像频谱特性和人眼视觉屏蔽特性在 DFT 中频区域的幅度谱中嵌入水印信息。同时为了增强水印鲁棒性,在保证载体图像不可感知性的条件下,选择最佳的水印嵌入强度。不同的载体图像纹理不同,所嵌入的水印强度也不一致,因此采用自适应嵌入水印方法。在嵌入水印的载体纹理图像 PSNR 大于设定的阈值条件下,选择使载体图像 PSNR 最大的水印强度嵌

入。纹理较丰富的图像选择其 PSNR 阈值较低,相对平滑的图像选择 PSNR 阈值较高。嵌入水印的框图如图 2 所示。

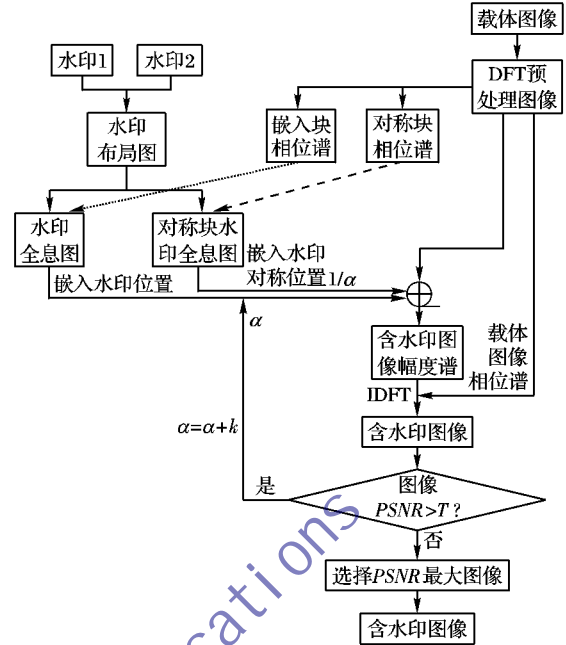


图 2 水印嵌入框图

具体实现步骤如下:

步骤 1 载体图像预处理。对载体图像 $P(a,b)$ 做 DFT, 得到 P 的频谱分布:

$$F(u,v) = m(u,v) \exp(j\varphi(u,v)) \quad (5)$$

其中: $m(u,v)$ 为载体图像幅度谱, $\varphi(u,v)$ 为其相位谱。根据嵌入水印块的大小和其中频部分离边界的距离随机选取载体图像 DFT 相应的块 1 中频区域系数,将其幅度置为 0,暂存相位谱,并选择块 1 中心对称的块,做同样的处理。选取的 2 块中频区域为:

$$I_i(u_i, v_i); i = 1, 2$$

其中 u_i, v_i 满足:

$$\begin{cases} U_{i1} \leq u_i \leq U_{i2} \\ 0 < U_{i1} < U_{i2} < a/2 \\ V_{i1} \leq v_i \leq V_{i2} \\ 0 < V_{i1} < V_{i2} < b/2 \end{cases} \quad (6)$$

其中: $U_{i2} - U_{i1}$ 和 $V_{i2} - V_{i1}$ 分别为需嵌入的水印全息图的高度 M 和宽度 N ; a, b 为载体图像的高和宽。

步骤 2 生成双水印数字全息图。全息图的生成过程如图 1 所示,首先由两个原始水印信息生成布局图像,如图 1(a) 所示。将其作为物光波的幅度,为了缩小全息图的动态范围并提高水印的不可见性,利用步骤 1 所选取的 2 块的相位信息作为物光波的相位信息,对物光波分别进行共轭对称延拓和 DFT,并归一化得到两个全息图 H_1, H_2 ,其归一化公式为:

$$H_{gi} = 255 * (H_i - \min(H_i)) / (\max(H_i) - \min(H_i)) \quad (7)$$

其中: $i = 1, 2$; $\min(H_i)$ 为 H_i 中的最小值; $\max(H_i)$ 为 H_i 中的最大值。

步骤 3 嵌入水印。将预处理的载体图像中频块的幅度与水印全息图相加,由于 DFT 系数的共轭对称性,即当频谱中某点的幅值改变时,其相应中心对称点的频谱值也相应地等幅改变,因而在水印的嵌入过程中还需满足:

$$F(u,v) = F^*(M-u,N-v) \tag{8}$$

因而选择 2 块上半平面的块嵌入水印,下半平面的块作对称替换。则含水印载体图像的幅度为:

$$\begin{cases} I_1' = abs(I_1) + \alpha H_1 \\ I_2' = abs(I_2) + H_2/\alpha \end{cases} \tag{9}$$

其中: α 为嵌入强度系数, $abs(I_i)$ 表示 I_i 的幅度。

步骤 4 生成含水印的图像。预处理后的载体图像相位和含水印载体图像的幅度进行反 DFT,得到含水印图像 W 。

步骤 5 计算含水印图像与载体图像的 PSNR,若大于阈值则存储该图像,并调节嵌入强度 $\alpha = \alpha + k$ (其中 k 为嵌入强度 α 的调节步长),并重复步骤 3 ~ 5;否则进入步骤 6。

步骤 6 选择使 PSNR 最大的图像作为最佳含水印信息图像,并归一化得到最终的含水印载体图像。

文献[14]将水印信息仅隐藏在载体图像的幅度谱中,本文算法直接将水印信息隐藏在载体图像的中频幅度谱中,并对 DFT 系数作共轭对称的改变,获得更好的视觉屏蔽效果。在相同嵌入强度下的水印不可见性明显改善。采用文献[14]和本文算法在嵌入强度都为 0.15 的条件下比较,文献[14]含水印载体图像的 PSNR 为 35.4,本文算法含水印载体图像 PSNR 高达 40.3,视觉质量明显得到改善。

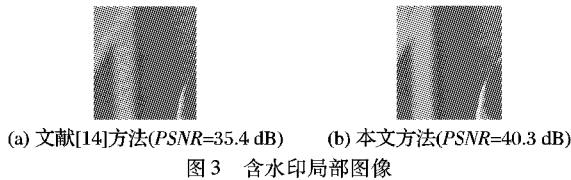


表 1 最佳嵌入强度和含水印图像的 PSNR

含水印图像	最佳嵌入强度	PSNR/dB	
		文献[14]算法	本文算法
Lena	0.15	35.4	40.3
Peppers	0.22	33.6	45.6
Airplane	0.20	36.3	41.4
Goldhill	0.10	35.9	41.8

2.2 双水印的提取

由水印嵌入的过程可知,水印信息和载体图像的频谱是可分离的,因此经过 DFT 提取相应块的幅度信息,可得到水印延拓的信息。为获取更好的水印性能,对提取的水印进行叠加,并用图像增强修正图像使其更接近原来的水印图像。对于灰度水印,DFT 后将水印从载体图像中提取出来,并反归一化,得到提取水印信息。

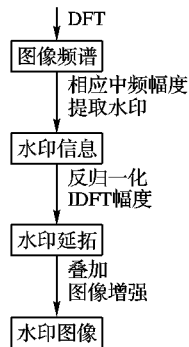


图 4 水印提取流程

3 实验结果

实验用图采用国际标准测试图像。当 PSNR 大于 35 dB 时,人眼已察觉不到图像的细节变化,因此实验中将 PSNR 阈

值设定在 35 dB;对于纹理较丰富的图像例如 Pepper 图像,为增强水印鲁棒性,嵌入水印时将 PSNR 阈值设定为 33 dB。设定载体图像大小为 512×512 ,水印全息图像为 128×128 。本文算法嵌入的水印信息容量较大,当采用二值图像时,嵌入水印量为 $2 \times 128 \times 128 = 32\,768$,因而有意义信息是 16 384 b;当采用灰度图时,嵌入水印量为 $2 \times 128 \times 128 \times 8 = 262\,144$,因而有意义信息是 131 072 b。实验中打印机采用 HP laserJet 1320 激光打印机,打印分辨率分别为 300 dpi,扫描仪为 Canon 4400F,扫描分辨率为 600 dpi。因 PS 使得图像像素失真和几何失真比较严重,为了提高水印提取效果,对 PS 图像进行失真校正。对于旋转变形,采用基于 log 算子提取图像轮廓和边缘检测算法检测图像旋转角度,并采用坐标旋转算法旋转校正。通过伽玛值调节 PS 图像的 PSNR 达到亮度失真校正,结合三次立方插值重采样的方法抵抗图像 PS 过程的几何攻击,采用上述算法对扫描图像进行校正并在校正图像中提取水印信息。

水印嵌入提取检测结果如图 5 所示,从中可看出本文算法可以有效抵抗 PS 攻击,水印提取效果明显。



图 5 水印嵌入提取效果

如表 2 所示,数字全息水印具有极强的抗剪切能力,其中 R 为衡量水印鲁棒性的水印相关系数^[14-15]。

表2 各种攻击下提取的水印系数 R

攻击类型	Lena		Goldhill		Peppers	
	灰度水印	二值水印	灰度水印	二值水印	灰度水印	二值水印
剪切 25% (Max)	0.943 5	0.950 4	0.935 1	0.948 7	0.941 1	0.969 2
剪切 25% (Min)	0.921 7	0.943 7	0.921 1	0.927 1	0.926 3	0.941 8
剪切 50% (Max)	0.932 8	0.942 2	0.922 7	0.931 2	0.933 7	0.949 7
剪切 50% (Min)	0.917 3	0.938 4	0.896 3	0.919 9	0.907 8	0.936 5
高斯噪声	0.943 1	0.917 3	0.942 8	0.925 3	0.878 8	0.931 6
椒盐噪声	0.942 9	0.922 1	0.942 8	0.931 7	0.872 9	0.925 6
JPEG 压缩(质量因子 90)	0.939 2	0.947 4	0.921 2	0.938 5	0.922 1	0.931 5
JPEG 压缩(质量因子 80)	0.931 7	0.939 8	0.896 4	0.901 9	0.917 8	0.905 3
PS 攻击	0.926 8	0.885 3	0.895 3	0.867 3	0.921 5	0.889 6

注:Max、Min 表示同一实验重复 50 次获得 R 的最大值和最小值。

4 结语

本文提出了基于双水印数字全息的图像水印算法,该算法是盲水印,通过校正几何失真和像素失真,可从 PS 图像中盲提取出较强的水印信息,且具有较强的抗剪切攻击、JPEG 压缩攻击、噪声攻击的性能。与同类水印算法相比,提高了水印不可见性,增强了水印鲁棒性,为平面媒体知识产权保护提供了新的有效手段。

参考文献:

- [1] HARTUNG F, KUTTER M. Multimedia watermarking techniques [J]. Proceedings of IEEE, 1999, 87(7): 1079–1107.
- [2] 杨义先, 钮心忻. 数字水印理论与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 97–138.
- [3] LIN C Y, CHANG S F. Distortion modeling and invariant extraction for digital image print-and-scan process[C]// International Symposium on Multimedia Information Processing. Taiwan: [s. n.], 1999: 1–10.
- [4] FUNG L W W, KUNISA A. Rotation, scaling and translation-invariant multi-bit watermarking based on log-polar mapping and discrete Fourier transform[C]// 2005 International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005.
- [5] CHIU Y, TSAI W. Copyright protection against print-and-scan operations by watermarking for color images using coding and synchronization of peak locations in frequency domain[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2006, 22(1): 483–496.
- [6] GUO C G, XU G A, NIU X X, et al. A color image watermarking algorithm resistant print-scan[J]. International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security, 2010, 10(1): 518–521.
- [7] TAKAI N, MFUNE Y. Digital watermarking by a holographic technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 865–873.
- [8] CHANG H T, TSAN G T. Image watermarking by use of digital holography embedded in the discrete cosine transform domain[J]. Applied Optics, 2005, 44(29): 6211–6219.
- [9] 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.
- [10] 黄建平. 一种基于数字全息及小波变换的图像水印算法[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 19(5): 536–539.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 黄素娟, 王杜瑶, 任艳丽. 基于数字全息及失真校正的抗打印扫描数字图像水印[J]. 应用科学学报, 2011, 29(3): 281–288.
- [15] WANG S Z, HUANG S J, ZHANG X P, et al. Hologram-based watermarking capable of surviving print-scan process[J]. Applied Optics, 2010, 49(7): 1170–1178.

(上接第 751 页)

入强度又保证了嵌入水印后的图像质量,嵌入到 DCT 域又使得水印具有较好的不可见性。

实验结果表明,该算法在不可见性和鲁棒性之间达到较好的平衡,不仅保证了嵌入水印后的图像质量,而且在抵抗任何攻击方面也具有较强的抗攻击能力。

参考文献:

- [1] LOOG M, LAUZE F. The improbability of Harris interest points [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(6): 1141–1147.
- [2] WANG X Y, YANG Y P, YANG H Y. Invariant image watermarking using multi-scale Harris detector and wavelet moments [J]. Computers and Electrical Engineering, 2010, 36(1): 31–44.
- [3] 柏均, 张敏瑞, 梁文莉. 基于特征点的图像水印嵌入方案[J]. 计算机工程, 2011, 37(13): 139–140, 149.
- [4] LEE H Y, KIM H S, LEE H K, et al. Robust image watermarking using local invariant features [J]. Optical Engineering, 2006, 45(3): 1–10.
- [5] LU C S, SUN S W, HSU C Y. Media Hash-dependent image watermarking resilient against both geometric attacks and estimation attacks based on false positive-oriented detection [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2006, 8(4): 668–685.
- [6] 李健, 叶有培, 何春梅, 等. 基于 SIFT 特征点的抗几何攻击水印算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(19): 170–171, 174.
- [7] 陈杰, 付永刚. DCT 域基于 PSNR 的扩频水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7): 111–114, 118.
- [8] 景丽. 结合图像局部特征的数字水印技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2009.
- [9] WATSON A B. DCT quantization matrices optimized for individual images [C]// SPIE Proceedings of Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV. Bellingham, WA: SPIE Press, 1993: 202–216.
- [10] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91–110.
- [11] 金聪. 数字水印理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [12] 张强, 王正林. 精通 Matlab 图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.