

数字全息水印在印刷半色调图像中的应用

谢 勇, 冯起芹, 单武扬, 薛继武, 李 娟, 王娟娟

(湖南工业大学, 株洲 412008)

摘要: 在印刷半色调图像中嵌入特定信息可用于印刷品的保护和认证。设计了一种新颖的应用于非数字形式印刷半色调图像中的信息隐藏算法, 将原始水印信息制成菲涅耳全息图, 以此作为水印信息, 利用离散小波变换算法嵌入到宿主图像中, 以实现信息隐藏。该算法利用全息图独特的不可撕毁性来增强水印的鲁棒性。实验结果表明, 该算法对图像半色调化攻击具有较好的鲁棒性。

关键词: 数字全息水印; 菲涅耳全息图; 半色调图像; 信息隐藏

中图分类号: TS853⁺.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)01-0101-05

Application of Digital Hologram Watermark in Printing Halftone Image

XIE Yong, FENG Qi-qin, SHAN Wu-yang, XUE Ji-wu, LI Juan, WANG Juan-juan

(Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract: Printed halftone image embedded with specific information can be used for protection and authentication of the print. A novel information hiding algorithm for printing halftone image was designed, which transform original watermarking information into Fresnel hologram; the Fresnel hologram was then embedded into the host image as watermarking information with discrete wavelet transform algorithm to realize information hiding. The algorithm used unique hologram to enhance the robustness of watermark. The experimental results showed that the algorithm has better robustness to image halftone attack.

Key words: digital hologram watermarking; Fresnel hologram; halftone image; information hiding

目前仍有许多的重要文件和产品包装的生产均需经过印刷环节, 因而印刷表面便自然成为了防伪信息的主要载体^[1]。数字水印技术作为印刷品防伪领域的新生力量, 具有高技术含量和强大的生命力^[2]。其在包装印刷防伪领域中的应用虽然有一定的研究, 但在实际应用中并不理想, 对含有水印信息的图像进行半色调化(网点离散化)处理, 实质上是对水印的一种攻击, 可能导致无法提取出有效的水印信息。为了增强水印信息的鲁棒性, 保证其能正常提取并认证, 使用数字全息水印技术将原始水印的信息制成计算机制全息图(CGH), 作为秘密信息嵌入宿主图像实现信息隐藏, 然后通过数字重建算法再现原始水印^[3]。全息图记录了物体的全部信息(振幅和相位), 并具有不可撕毁性(由局部恢复全体), 因此具有很高的抗干扰能力。全息图作为水印所具有的众多技术优势, 有

利于提高水印的隐秘性、鲁棒性, 特别是抗剪切、抗印刷能力。该技术起步比较晚, 成熟的研究成果不多, 在包装印刷品当中的应用研究更是鲜见报道。

文中介绍了一种新颖的应用于非数字形式印刷半色调图像中的信息隐藏算法, 首先将原始水印信息制成菲涅耳全息图; 菲涅耳全息变换本身就是对水印信息的一种加密, 为了让全息水印具有更好的安全性, 再利用 Arnold 置乱变换对其进行二次加密处理, 以此作为水印信息, 利用离散小波变换算法(DWT)嵌入到宿主图像中, 实现信息隐藏。采用峰值信噪比(PSNR)对半色调图像质量进行客观评价; 用归一化相关系数(NC)来衡量经过半色调处理后提取的水印质量。该算法利用全息图独特的不可撕毁性增强水印的鲁棒性。

收稿日期: 2012-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61170101)

作者简介: 谢勇(1964-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为包装防伪技术与防振缓冲材料。

1 全息水印的生成

数字全息技术是建立在数字计算与现代光学理论基础之上的新型全息图制作技术。与传统的光学全息技术相比,数字全息技术直接用计算机编码,将物波波前的数学描述输入计算机处理后便可直接产生全息图,替代了用光学设备记录全息图的过程。这不仅提高了效率,节省了资源,而且重复性高,噪声低,非常灵活简易,因此具有很高的应用价值。数字全息图的制作和再现过程主要包括抽样、计算处理、编码、数字再现四个步骤。根据物体的坐标与全息图记录平面相对位置的不同,计算全息图主要可分为傅里叶变换全息图、像全息图和菲涅耳全息图,文中主要研究菲涅耳全息图。

1.1 菲涅耳全息图算法

菲涅耳全息图是被记录的复数波前物体发出的菲涅耳衍射波,根据物波函数计算在某一特定距离的全息图平面上的菲涅耳衍射波的复振幅分布,它是对物光本身的记录,并不需要变换成透镜,只需要记录平面与物体的距离满足菲涅耳衍射条件^[4]。其特点是记录平面位于物体衍射光场的菲涅耳衍射区,物光波由物体直接照射到记录介质上。菲涅耳全息图记录原理见图1,其中 $O(x_0, y_0)$ 表示点光源; z_0 表示物

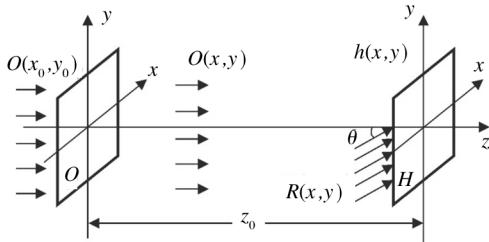


图1 菲涅耳全息图记录原理

Fig. 1 Fresnel hologram recording principle

平面 O 到记录平面 H 的距离; $O(x, y)$ 表示物光波衍射发出的球面波; θ 表示传播方向与 z 轴夹角; $R(x, y)$ 表示平面参考光波; $h(x, y)$ 为菲涅耳全息图透过率函数。

根据菲涅耳衍射原理^[4]计算得出以下公式。

物光波的衍射分布:

$$O(x, y) = \frac{\exp(jkz_0)}{jkz_0} \iint_{\infty} O(x_0, y_0) \cdot$$

$$\exp \left[j \frac{k}{2z_0} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] dx_0 dy_0 \quad (1)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 表示波数; λ 表示入射波长。

参考光的复振幅:

$$R(x, y) = R_0 \exp(j2\pi\alpha x) \quad (2)$$

式中: R_0 表示参考光波的振幅信息; $2\pi\alpha x$ 表示相位信息; $\alpha = \sin \theta / \lambda$ 表示载频系数。

菲涅耳全息图透过率函数:

$$h(x, y) = \left| R(x, y) + O(x, y) \right|^2 = \left| R(x, y) \right|^2 + \left| O(x, y) \right|^2 + R^*(x, y) O(x, y) + R(x, y) O^*(x, y) \quad (3)$$

菲涅耳全息图再现是利用相同参考光照射全息图,通过透过率函数 $h(x, y)$ 得到衍射光波后再进行积分,可得到逆菲涅耳函数:

$$O'(x, y) = \frac{ia}{\lambda z_0} \exp \left[-j \frac{k}{2z_0} (x^2 + y^2) \right] \times \iint_{\infty} h(x_0, y_0) \exp \left[-j \frac{jk}{2z_0} (x_0^2 + y_0^2) \right] \exp \left[-j \frac{k}{z_0} (x_0 x + y_0 y) \right] \cdot dx_0 dy_0 \quad (4)$$

1.2 加密全息水印

菲涅耳全息变换本身就是对水印信息的一种加密,为了让全息水印有更好的安全性,再利用 Arnold 置乱变换对其进行二次加密处理。Arnold 置乱变换可以使图像逐渐变模糊,是一种简易的图像加密手段,可用来做图像隐藏和伪装的预处理,可提高水印信息安全性^[5]。

Arnold 变换公式:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \bmod N, x, y \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\} \quad (5)$$

其中 N 为图像的边长。

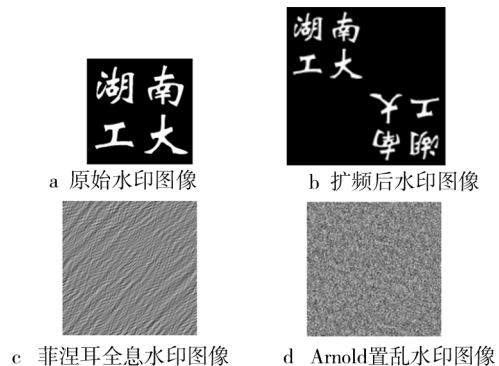


图2 水印图像

Fig. 2 Watermark image

图 2a 为原始水印图像,图像的大小为 64×64 像素;图 2b 是对图 2a 扩频后的水印图像,大小为 128×128 像素;图 2c 是图 2b 生成的菲涅耳全息图;图 2d 是图 2c 通过 Arnold 变换得到的置乱图像。

2 水印嵌入

小波变换域^[6]的数字水印,通常选择和水印图像具有同等形状和大小的区域作为嵌入位置,以加法或乘法准则作为嵌入方式。DWT 是指在特定子集上采取缩放和平移的小波变换,兼具时域和频域多分辨率能力的信号分析工具。根据 Mallat 算法^[7],若信号 $f(t)$ 的离散采样数据 $f_k = c_{0,k}$,则信号 $f(t)$ 的正交小波变换分解式为:

$$c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} h_{n-2k}, d_{j,k} = \sum_n d_{j-1,n} g_{n-2k} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (6)$$

小波重构公式为:

$$c_{j-1,n} = \sum_n c_{j,n} h_{k-2n} + \sum_n d_{j,n} g_{k-2n} \quad (7)$$

其中: $c_{j,k}$ 为尺度系数; $d_{j,k}$ 为小波系数; h, g 为一对正交镜像滤波器组; j 为分解层数; n 为离散采样点数。

使用式(5)对宿主图像(Lena、Peppers 两幅灰度图像,均为 512×512 像素)进行小波分解。图 3a 为小波二级分解的示意图,LL₂, HH₂ 和 HH₁ 分别表示低频、中频和低频部分,下标则表示经过的分解级数;图 3b 和 3c 分别为 Lena 图像和 Peppers 图像经小波二级分解的效果图。

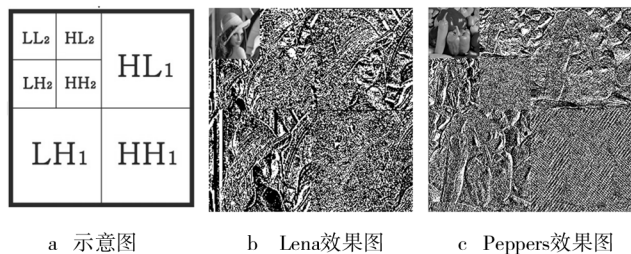


图 3 小波二级分解

Fig. 3 Wavelet two decomposition of the image

水印嵌入方程式为:

$$W'(i,j) = W(i,j) + \alpha w(i,j) \quad (8)$$

式中: $W'(i,j)$ 和 $W(i,j)$ 分别表示水印嵌入前后的小波系数; α 为强度因子; $w(i,j)$ 为水印信息。

由于人眼视觉系统相当于低通滤波器,对中频率段的能量并不敏感^[8]。故本文水印的嵌入位置选择小波变换后的中频部分,即图 3a 所示的 HH₂ 部分。水印嵌入强度 α 为 0.5。嵌入水印前后的宿主图像,见图 4。



图 4 嵌入水印前后的图像对比

Fig. 4 Contrast of images before and after watermark embedding

采用峰值信噪比 PSNR 对嵌入水印后的图像质量进行客观评价。PSNR 在一定程度上反映了图像变化前后的统计特性,通常其值在 20 dB 和 45 dB 之间,PSNR 值越大,图像的保真度就越好^[9]。经测试,图 4b 的 PSNR 值为 28.8967 dB,图 4d 的 PSNR 值为 29.0932 dB,说明图像中嵌入全息水印对图像质量有良好保真度。

3 图像半色调

数字半色调是基于人眼的视觉特性和图像的成色特性,利用数学、计算机等工具,在单色或多色二值设备上实现图像再现的技术,被广泛应用于打印、印刷、图像输出、压缩存储、纺织以及医学等领域。半色调处理方法主要有调幅(AM)、调频(FM)和 AM/FM 混合半色调 3 种^[10]:AM 半色调采用点聚集态网点技术,主要为有理正切、无理正切、Bayer 抖动以及超细胞等技术;FM 半色调采用点离散态网点技术,主要为误差扩散、直接二值搜索和蓝噪声等技术;AM/FM 混合半色调将 AM 和 FM 两者相结合,其主要技术有绿

噪声, Hybrid, SambaFlex, Sublima 晶华网点等。综合考虑应用频率,对文中主误差扩散这种具有代表性的算法进行实验分析。

误差扩散是将输出图像 $Q(i,j)$ 与输入图像 $I(i,j)$ 之间的误差 $E(i,j)$ 分散到相邻点中,其计算过程^[11]如下:

1) 阈值化:

$$Q(i,j)=\begin{cases} 0, & I(i,j)\leq 128 \\ 1, & I(i,j)>128 \end{cases} \quad (9)$$

2) 计算误差值:

$$E(i,j)=I(i,j)-Q(i,j) \quad (10)$$

3) 误差扩散表:

$$\begin{bmatrix} * & X & 7/16 \\ 3/16 & 5/16 & 1/16 \end{bmatrix} \quad (11)$$

按误差扩散表进行误差分割,* 为已访问过的像素, X 为当前像素 $I(i,j)$ 。先将其误差值分别乘以 $3/16, 5/16, 1/16, 7/16$, 添加到 $I(i-1,j-1), I(i-1,j), I(i+1,j+1), I(i,j+1)$ 四个相邻像素上,再对相邻像素值进行阈值处理,最后得到二值结果图像。其原理见图 5。

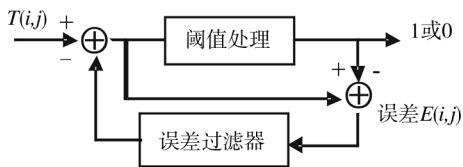


图 5 误差扩散半色调原理

Fig. 5 Error diffusion halftone principle diagram

误差扩散算法具有 FM 半色调的特性,保存了一定的局部量化误差,对临近的像素而言是一种补偿,使处理前后图像的总灰度保持一致。

4 实验结果分析

首先在 Matlab 环境下,使用上述的误差扩散算法对含全息水印测试图像(图 4b 和 4d)进行半色调处理,处理结果见图 6a 和 6b;然后根据式(6)和(7)对图像 6a 和 6b 进行小波逆变换初步提取水印信息,并根据水印嵌入时的置乱算法作相应的反置乱变换,最后根据式(4)对提取的全息图进行数字再现得到解密后的水印图像,分别见图 6c 和 6b。

用归一化相关系数 NC 来衡量经过半色调处理

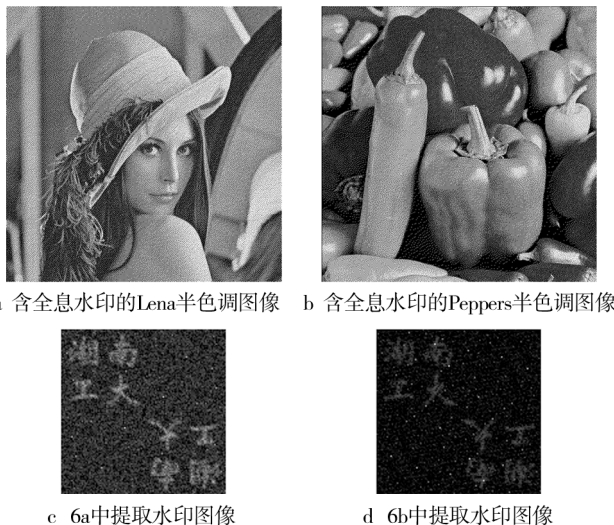


图 6 半色调图像和提取水印图像

Fig. 6 Halftone images and extracted watermark image

后提取的水印质量,NC 数值范围为 $[0,1]$,数值越大,表示提取水印的质量越好^[12]。图 6c 的 NC 值为 0.7089,图 6d 的 NC 值为 0.6724。说明此算法的数字水印对数字半色调印刷有较好的鲁棒性。

5 结论

对于非数字形式印刷半色调图像的信息隐藏防伪技术,基于小波域中频嵌入菲涅耳全息水印的算法对半色调攻击具有较好的鲁棒性,对原图像的保真度较好,计算速度较快;但恢复后水印图像不够清晰,水印的鲁棒性还有待于提高,水印嵌入使用的是简单的叠加方式,嵌入位置选择单一,今后可以考虑根据宿主图像的相关特征优化选择嵌入位置和算法。数字全息水印技术的研究将给包装印刷防伪带来新的希望。

参考文献:

- [1] 冯起芹,曹小龙,单武扬,等.印刷品水印图像的半色调算法比较[J].包装学报,2012,4(3):34-38.
FENG Qi-qin,CAO Xiao-long,SHAN Wu-yang,et al. Comparison Study of Halftoning Algorithm for Printed Watermarking Image[J]. Packaging Journal,2012,4(3):34-38.
- [2] 薛磊,张逸新,刘春林.数字水印技术在印刷品防伪中的应用[J].包装工程,2008,29(2):96-98.
XUE Lei,ZHANG Yi-xin,LIU Chun-lin. Application of Digital Watermark Technology in Forgery Detection of Printed

- Material[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 96-98.
- [3] XIE Yong, SHAN Wu-yang, CAO Xiao-long, et al. Analysis and Comparison of Holographic and Traditional Digital Image Watermarking in DWT Domain[C]//The 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2012). Melbourne, Australia, 2012: 790-793.
- [4] 徐满平, 周杰. 菲涅耳全息的计算机模拟[J]. 嘉应学院学报(自然科学), 2007, 25(3): 32-35.
- XU Man-ping, ZHOU Jie. The Fresnel Holographic Computer Simulation[J]. Journal of Jiaying University (Natural Science), 2007, 25(3): 32-35.
- [5] HUANG F Y. Image Scrambling Based on Arnold Transforming and Implementation[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2008, 25(3): 276-279.
- [6] ZHANG Yan-hong. Blind Watermark Algorithm Based on HVS and RBF Neural Network in DWT Domain[J]. WSEAS Transactions on Computers, 2009, 8: 174-183.
- [7] MALLAT S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation[J]. IEEE Trans PAMI, 1989, 11(7): 674-693.
- [8] 徐宏平, 万晓霞, 许法强. 基于视觉模型和误差扩散的半色调水印算法[J]. 包装工程, 2007, 28(12): 77-79.
- XU Hong-ping, WAN Xiao-xia, XU Fa-qiang. Watermarking Algorithm for Halftone Images Based on HVS and Error Diffusion[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(12): 77-79.
- [9] 姚莉. 数字半调技术及其评价方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(3): 4-8.
- YAO Li. Review on Digital Halftoning and Quality Assessment Schemes[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(3): 4-8.
- [10] 谢侍棋, 成刚虎. 数字加网技术的比较分析[J]. 印刷杂志, 2009(10): 39-42.
- XIE Shi-qi, CHENG Gang-hu. Comparative Analysis of the Digital Screening Technology[J]. Printing Field, 2009(10): 39-42.
- [11] FLOYD R W, STEINBERG L. Adaptive Algorithm for Spatial Grey Scale[C]//Proc International Symposium Digest of Technology. 1976, 17(2): 36-37.
- [12] WANG S, ZHENG D, ZHAO J. An Image Quality Evaluation Method Based on Digital Watermarking[C]//IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2007, 17(1): 98-10.

(上接第 94 页)

- [2] 黄国栋, 陈杰. CONWIP 拉式机制在自动包装线中的应用设计[J]. 包装工程, 2012, 33(11): 58-68.
- HUANG Guo-dong, CHEN Jie. Design of CONWIP Pull Mechanism Implementation in Automatic Packaging Line[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 58-68.
- [3] 刘淑英. 基于 PLC 的集合包装机控制系统设计[J]. 包装工程, 2009, 30(5): 47-49.
- LIU Shu-ying. Design of Control System of Collective Packaging Machine Based on PLC[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5): 47-49.
- [4] 孙鹤旭, 万文献, 董砚, 等. 基于模糊调节的永磁同步电动机步进控制系统[J]. 微电机, 2007, 40(8): 45-48.
- SUN He-xu, WAN Wen-xian, DONG Yan, et al. Permanent Magnet Synchronous Motor Step-motion Control System Based on Fuzzy Modeling[J]. Micromotors Servo Technique, 2007, 40(8): 45-48.
- [5] 高岩, 马丽娟. 基于 ARM7 的表贴元件包装机智能控制系统[J]. 包装工程, 2008, 29(7): 17-20.
- GAO Yan, MA Li-juan. Intelligent Control System for Encapsulation Machine Based on ARM7[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(7): 17-20.
- [6] 沈萌红, 王贤成, 黄方平. 一体化年糕生成包装机控制系统设计[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 138-140.
- SHEN Meng-hong, WANG Xian-cheng, HUANG Fang-ping. Design of the Control System for Integrated Cake Packaging Machine[P]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 138-140.
- [7] 于镭, 常军, 黄存柱. 基于 DSP 的自动包装机控制系统软件设计[J]. 微型机与应用, 2010(1): 3-5.
- YU Lei, CHANG Jun, HUANG Cun-zhu. Software Design of Automatic Packer Control System Based on DSP[J]. Microcomputer & Its Applications, 2010(1): 3-5.
- [8] 余宏生. 模糊 PID 算法在燃气热水器水温控制中的应用[J]. 微计算机信息, 2007, 6(1): 93-95.
- YU Hong-sheng. Application of Fuzzy PID Algorithm in The Water Temperature Control of Gas Water Heater[J]. Microcomputer Information, 2007, 6(1): 93-95.
- [9] 孙绍杰, 齐晓慧. 一种基于模糊控制的智能车转向控制算法研究[J]. 微计算机应用, 2011, 32(1): 27-30.
- SUN Shao-jie, QI Xiao-hui. Research on Intelligent Car's Servo Control Algorithm Based on Fuzzy Control[J]. Microcomputer Applications, 2011, 32(1): 27-30.
- [10] 刘法治, 赵明富. 模糊控制技术在高楼恒压供水系统中的应用[J]. 微计算机信息, 2005, 21(7): 21-23.
- LIU Fa-zhi, ZHAO Ming-fu. Application of Fuzzy Control Technology to Constant Pressure Water Supply Automatic Control System for High Building[J]. Microcomputer Information, 2005, 21(7): 21-23.