基于傅里叶变换域全息数字水印算法研究

汪 微[1]，唐 波[2]，王夫清[2]，李孟涛[2]
(1. 上海出版印刷高等专科学校，上海 200093；2. 上海理工大学，上海 200093)

摘要：通过模拟傅里叶变换加密全息水印的生成对水印信息进行了预处理，并通过模拟加密全息水印的重建水印算法对水印信息进行了重建，保证了水印的安全性。在 DCT 和 DWT 相结合的变换域中，嵌入水印及在均匀颜色空间 CIELab 的亮度分量 L 中嵌入水印，使水印的不可见性较好，该算法利用全息加密对裁切攻击有较好的鲁棒性，且属于盲提取水印技术。实验结果表明，嵌入水印的图像能够满足人眼视觉的要求，同时也满足客观评价标准，而且重建的水印图像较清晰，能够精确判断图像的真伪。

关键词：数字水印；变换域；全息水印；傅里叶变换
中图分类号：TS853$^+$.3　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-3563(2013)19-0101-04

Holographic Digital Watermarking Algorithm Based on Fourier Transform Domain

WANG Wei[1]，*TANG Bo*[2]，*WANG Fu-qing*[2]，*LI Meng-tao*[2]
(1. Shanghai Pubilishing and Printin College，Shanghai 200093，China；2. University of Shanghai for Science and Technology，Shanghai 200093，China)

Abstract：Security of watermark was ensured by preprocessing watermark information through simulating the generation of Fourier transform holographic watermark encryption and by reconstruction of encrypted holographic watermark. The watermark was embedded based on transform domain in the DCT-DWT and the luminance component L of the uniform color space CIELab，which can improve the invisibility of the watermark；the algorithm using encrypted holographic has strong robust against cut attack，and belongs to the blind extraction of watermark technology. The experimental results showed that the embedded watermark image can meet the visual requirements，and also meet the objective evaluation criteria；the reconstructed watermark image is clear and the authenticity of images can be judged accurately.

Key words：digital watermark；transform domain；holographic watermark；Fourier transform

数字水印是解决数字版权保护的一种有效手段[1]。数字水印技术将具有特定意义的水印信息以不可见的形式隐藏于数字化图像、文档、声音、印刷品中，确保作品所有者的正当权益。在印刷包装防伪和电子商务的各类票据防伪、声像数据的隐藏标识和数字作品的知识产权保护等领域有广泛的应用前景。

目前国内外对数字水印算法的研究较多，水印算法的缺陷主要在于水印不能实现盲提取和水印的鲁棒性不强。采用傅里叶加密全息技术对水印信息进行预处理能够实现水印的盲提取，且水印的安全性较高。在 CIELab 颜色空间的亮度分量 L 的变换域中嵌入水印，亮度的轻微改动对图像色彩信息影响较小，能够保证水印的不可见性。利用 DCT 的聚能特性和 DWT 的多分辨率特性[2-4]，能够较好保持图像的质量，并且对常用的图像处理方法有较强的鲁棒性。

1　傅里叶变换全息加密技术

通过对光全息加密/解密过程的研究[5-9]，傅里叶变换全息加密技术是双随机相位调制技术和全息

收稿日期：2013-05-01
基金项目：新闻出版总署数字印刷工程研究中心数字传播重点实验室基金项目(10-00-309-000)
作者简介：汪微(1963-)，女，江苏江阴人，上海出版印刷高等专科学校实训中心辅导老师，主要研究方向为制版印刷。

技术的融合,利用调制相位加密具有较好的稳定性,它是一种新的加密技术。傅里叶变换加密全息图具有较高的安全性,只有获得授权的密钥才能重建水印信息。

1.1 傅里叶变换全息加密过程

傅里叶全息加密水印技术采用 Mach-Zehnder 干涉仪结构。待加密原始水印信息 $f(x,y)$,随机相位加密模板 $\alpha(x,y)$放在输入平面上,经过傅里叶变换透镜进行傅里叶变换。随机相位模板 $B(\xi,\eta)$放置在傅里叶变换透镜输出频谱面上,对水印信息进行相位调制,经过相位加密模板调制的物光与参考光 $R(\xi,\eta)$进行干涉,生成全息加密图像 $I_E(\xi,\eta)$。然后去除参考光和对水印信息进行相位加密模板调制物光的功率谱,获得去除功率谱之后的全息加密图像 $I_E'(\xi,\eta)$为[10-11]:

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

式中:$F(\xi,\eta)$为 $f(x,y)$的傅里叶变换;$A(\xi,\eta)$为 $\alpha(x,y)$的傅里叶变换;$\otimes$为卷积运算符号;(x,y)为空域坐标;(ξ,η)为频域坐标。

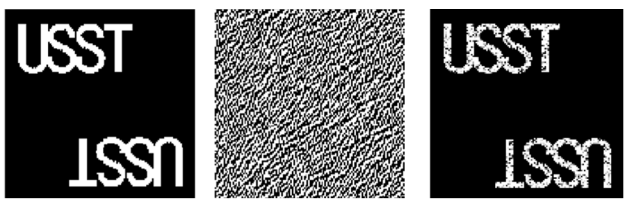
通过计算密匙 $B(\xi,\eta)$的全息图 $K(\xi,\eta)$功率谱,把常数项去除,获得解密密钥的全息图 $K'(\xi,\eta)$为:

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

1.2 傅里叶变换加密全息解密过程

解密时,将式(1)与式(2)相乘就得到了重建的水印信息。式(1)表示傅里叶变换域加密全息图,式(2)表示解密密钥全息图,式(3)表示重建的水印信息。

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



a 水印图像 b 全息图像 c 重建水印图像

图 1 傅里叶变换全息加密解密图像

Fig. 1 Encrypted and decrypted images by Fourier transform hologram

通过式(3)中的第 1 项和第 2 项的傅里叶变换能够重建出原始水印信息 $f(x,y)$和其原始水印信息的共轭图像 $f(x,y)$。

2 DCT 与 DWT 相结合特点分析

利用 DCT 的能量压缩特性和 DWT 的多分辨率的特征[2-4],能够较好地保持图像的视觉质量。首先,对载体图像分块进行 DCT 变换,抽取有意义的 DCT 系数,然后组成了系数矩阵。为了使嵌入的水印信息均匀分布在 DCT 系数中,对该系数矩阵进行 L 级 DWT 变换,得到低频的分量和高频的分量。在近似抽取 DCT 系数矩阵的低频分量中进行水印的嵌入,能够平衡水印的不可见性和鲁棒性。

3 全息加密水印的嵌入与提取算法

3.1 全息加密水印的嵌入算法

1) 生成随机矩阵 $\boldsymbol{\alpha}(x,y)$和 $\boldsymbol{B}(\zeta,\eta)$作为加密相位的模板。

2) 对水印信息 $f(x,y)$进行相位模板 $\boldsymbol{\alpha}(x,y)$的调制,然后对其进行傅里叶变换,再进行相位模板 $\boldsymbol{B}(\zeta,\eta)$的调制,最后模拟参考光和加密后的水印信息进行叠加,得到全息加密水印信息 H。

3) 把载体 RGB 颜色空间图像转换为 CIElab 颜色空间的图像。

4) 从 CIELab 颜色空间分离出 L 分量,对 L 分量进行分块,然后对每块进行离散余弦变换,抽取每块矩阵的中频系数组成系数矩阵 $\boldsymbol{D}$。

5) 对系数矩阵 $\boldsymbol{D}$ 进行小波分解,然后将全息加密水印信息 H 和小波分解的低频系数 CA 进行叠加求和。

6) 对加入水印信息的系数矩阵进行逆小波变换,获得 $\boldsymbol{D}$ 小波分量系数矩阵,然后对 $\boldsymbol{D}$ 分量系数矩阵进行逆 DCT 变换得到 L 分量,合并 L,a 和 b 分量后得到 CIELab 空间的图像,再转换颜色空间,获得含水印的 RGB 图像。

3.2 全息加密水印的提取算法

1) 将含水印的 RGB 图像转换颜色空间,获得 CIELab 颜色空间的图像,分离出 L 分量后进行分块,然后对各块进行 DCT 变换,提取每块的中频系数矩阵组成矩阵 $\boldsymbol{D}$。

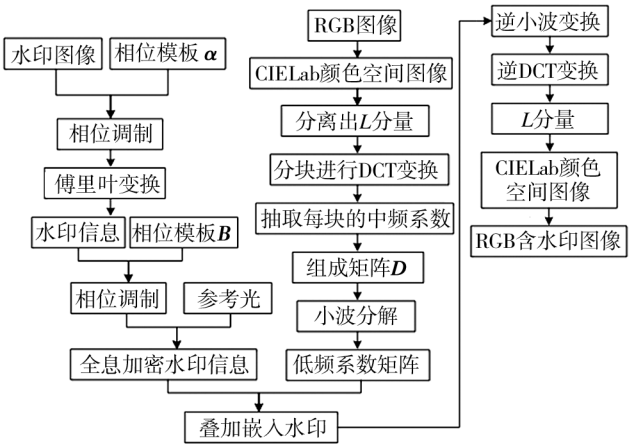


图 2　全息加密水印嵌入算法流程

Fig. 2 Flow chart of encrypted holographic watermark embedding algorithm

2）通过对矩阵 $\boldsymbol{D}$ 系数进行小波分解，将获得的低频系数矩阵与相位调制模板 $\boldsymbol{B}(\zeta,\eta)$ 相乘，再进行傅里叶逆变换重建水印信息。该算法能够实现盲提取。

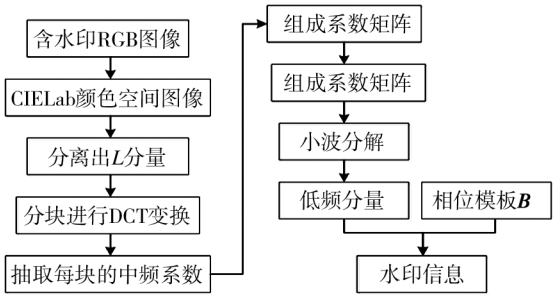


图 3　全息加密水印提取算法流程

Fig. 3 Flow chart of encrypted holographic watermark extraction algorithm

4　仿真实验

4.1　水印客观评价指标

4.1.1　峰值信噪比(PSNR)

采用峰值信噪比 PSNR(Peak Signal Noise Ratio，PSNR)能够客观地评价嵌入水印后图像的质量，作为评价原始彩色图像与嵌入水印后的图像之间差别的标准。PSNR 的计算公式为：

$$\mathrm{PSNR}=10\lg\frac{255^2}{[(\mathrm{MSE}(R)+\mathrm{MSE}(G)+\mathrm{MSE}(B)]/3} \tag{4}$$

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{N\times N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}[X^*(i,j)-X(i,j)]^2$$

式中：$X^*(i,j)$为含水印图像的 R,G,B 分量的像素值；$X(i,j)$为原始载体图像的 R,G,B 分量的像素值。在式(4)中取以 10 为底的对数的 10 倍，目的是使计算结果换算成标准单位分贝(dB)。结合主观评价，PSNR 值越大，图像的感知效果越好，视觉可以容忍的 PSNR 值在 20 dB 以上。

4.1.2　相关性 R

相关性 R 能够定量评价原始水印信息和重建水印信息的相似度程度，利用相关性系数 r[12] 定义，相关系数 r 越大，重建的水印信息与原始水印信息越接近，相关系数 r 的计算公式可定义为：

$$r=\frac{\sum\sum f_1(m,n)f_2(m,n)}{\sqrt{\sum\sum f_1(m,n)^2\sum\sum f_2(m,n)^2}} \tag{5}$$

式中，$f_1(m,n)$为原始水印信息；$f_2(m,n)$为重建水印信息。

4.2　水印的嵌入与提取仿真实验结果

文中仿真实验选择 1024×1024 的 RGB 图像作为载体图像，选择 64×64 有意义的二值图像作为水印图像。通过 Matlab 软件对水印的嵌入与提取算法进行仿真，利用水印的客观评价标准 PSNR 和相关性系数 R 对水印算法进行客观评价。仿真实验中嵌入强度 $K=0.2$，从仿真结果看 PSNR = 55.1，客观上满足人眼视觉要求，重建的水印从主观和客观上评价也有较高的水印质量，见图 4—5。



图 4　载体图像和水印图像

Fig. 4 The host image and watermark image

4.3　水印的鲁棒性实验

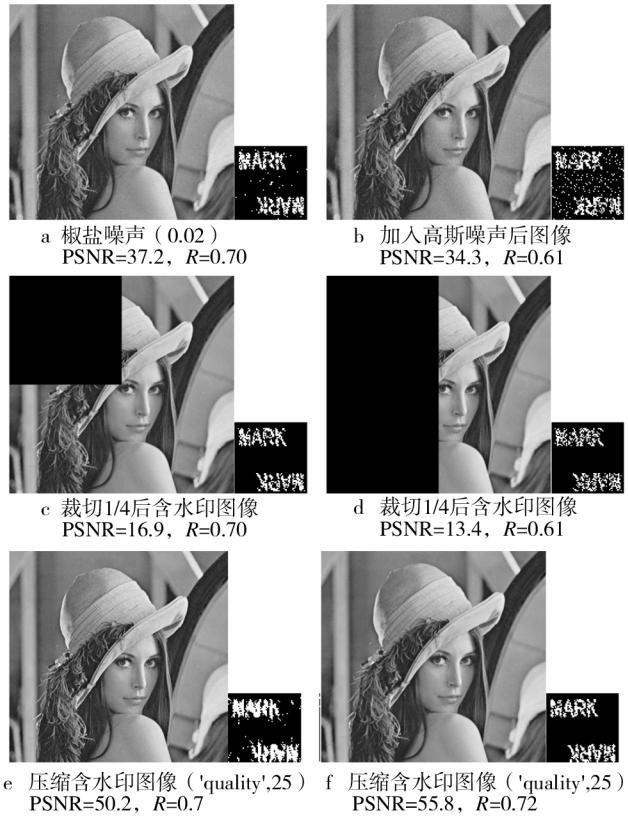
该仿真实验通过对含水印图像进行基本图像处理的攻击，验证水印算法的鲁棒性，攻击仿真实验结果见图 6。

从水印攻击实验效果和重建水印信息仿真结果



图 5 含水印图像和提取水印图像(PSNR=55.1,R=0.72)

Fig. 5 The watermarked image and extracted watermark (PSNR=55.1,R=0.72)



a 椒盐噪声(0.02) PSNR=37.2, R=0.70

b 加入高斯噪声后图像 PSNR=34.3, R=0.61

c 裁切1/4后含水印图像 PSNR=16.9, R=0.70

d 裁切1/4后含水印图像 PSNR=13.4, R=0.61

e 压缩含水印图像('quality',25) PSNR=50.2, R=0.7

f 压缩含水印图像('quality',25) PSNR=55.8, R=0.72

图 6 水印攻击实验效果和重建水印信息

Fig. 6 Effect of watermark attack experiments and reconstructed watermark information

可知,嵌入强度 K=0.2 时,对嵌入水印后的图像进行以上几种常见的图像处理攻击后,主观判断提取的水印信息较清晰,客观判断能满足客观评价标准要求,说明了该水印算法有较强的鲁棒性。

5 结语

基于 CIELab 颜色空间、傅里叶全息和小波变换等技术,提出了傅里叶变换域全息数字水印算法。计算机模拟仿真光学傅里叶全息加密的方法,把二值水印图像生成傅里叶全息图。在 L 分量的 DWT-DCT 变换域中嵌入水印信息,具有较好的抗裁切能力。通过水印的嵌入和重建仿真实验及鲁棒性攻击实验,实验结果验证了该数字水印算法在数字图像版权保护中应用的可行性。

参考文献:

[1] 范伟. 图像信息隐藏中的数字水印技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
FAN Wei. Image Information Hiding in Digital Watermarking Technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[2] 鞠武,万鲁冲. 基于二维混合变换(DCT-DWT)的图像水印算法[J]. 微计算机信息,2010,26(2):202-205.
JU Wu, WAN Lu-chong. Two-dimensional Hybrid Transform (DCT-DWT) for 2-D Image Watermarking[J]. Mrcrocomputer Information, 2010, 26(2): 202-205.

[3] 于帅珍,沈建国. 基于 DCT 和 DWT 的彩色图像盲数字水印算法[J]. 计算机应用与软件,2007,24(8):210-212.
YU Shuai-zhen, SHEN Jian-guo. Blind-watermark Algorithm Based on DCT and DWT for Color Image[J]. Computer Applications and Software, 2007, 24(8): 210-212.

[4] 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.

[5] JAVIDI B, NOMURA T. Securing Information by Use of Digital Holography[J]. Opt Lett, 2000, 25(1): 28-30.

[6] NISHCHAL N K, JOSEPH J, SINGH K. Fully Phase Encryption Using Digital Holography[J]. Opt Eng, 2004, 43(12): 2959-2966.

[7] XU L, PENG X, GUO Z, et al. Imaging Analysis of Digital Holography[J]. Opt Express, 2005, 13(7): 2444-2452.

[8] KISHK S, JAVIDI B. 3D Watermarking by a 3D Hidden Object[J]. Opt Express, 2003, 11(8): 874-888.

[9] KISHK S, JAVIDI B. Information Hiding Technique with Double Phase Encoding[J]. Appl Opt, 2002, 41(26): 5462-5470.

[10] 周亮,李炳法,单云凡,等. 一种新的基于数字水印的防伪印刷技术[J]. 信息技术,2005(9):31-34.

(下转第 122 页)

如干燥剂和除氧剂等，从内部环境上杜绝腐蚀的发生。叉车装卸和吊车起吊时，对箱体会造成额外的作用力，不论是木制包装箱还是瓦楞纸包装箱，都需要在接触部位加装加强筋和加强角板。在工艺设计时还应考虑运输途中风力的影响，强风可能会对包装箱造成巨大损害，使固定不当的产品和强度过低的包装箱箱体遭到破坏。在某型飞机后机身经过公路运往西雅图的途中，没有考虑到抵抗 8 级风的因素，导致箱体前壁板和顶盖完全损毁，部分机身蒙皮被破坏。由此，设计时应了解产品经过地区的自然状况，如需要应加固迎风方向的承力结构，在这样的地区禁止使用无外围防护的运输方式。

4 结语

大型航空产品在全球的运输需要安全可靠的运输载体来完成，不论是使用木制包装箱或金属托架，还是使用纸制包装箱，都要从安全可靠、环保等几个方面加以考虑，以加速生产过程，提高运输质量，降低物流成本为原则。一个合格的包装箱要具有安全性和可靠性，合理的设计是关键，因为包装箱参数的变化将直接影响到箱体的各种性能。在包装箱的结构设计中，要根据制造设备、生产工艺的不同以及航空产品的种类和特性来确定包装方案。包装设计时的成本考虑也是十分必要的，成本最小化是每个行业都在追求的目标，不断研究将新型材料应用于包装设计中，才能不断地缩减成本。新型高强度瓦楞纸板包装箱在成本和工艺性上有着明显的优势，以飞机舱门组件为例，使用这种包装箱后每年可节省 900 多万元包装费用，既降低了原材料成本及运输成本，同时也做到了绿色环保，经济效益十分可观，值得推广。

参考文献：

[1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京：印刷工业出版社，2006：64.
PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packing Design [M]. Beijing：Printing Industry Press，2006：64.

[2] 王建清. 包装材料学[M]. 北京：中国轻工业出版社，2010：38.
WANG Jian-qing. Packaging Material[M]. Beijing：China Light Industry Press，2010.

[3] 肖衡，唐昆，张开敏，等. 我国军用器材防护包装技术发展探析[J]. 包装工程，2009，30(4)：58-61.
XIAO Heng，TANG Kun，ZHANG Kai-min，et al. On the Development of China Military Equipment Packaging[J]. Packaging Engineering，2009，30(4)：58-61.

[4] GB/T 6543—2008，运输包装用单瓦楞纸箱和双瓦楞纸箱[S].
GB/T 6543—2008，Single Corrugated Boxes and Double Corrugated for Transport Packaging[S].

[5] 曾宗易，叶浩. 包装设计实用技术手册[M]. 北京：印刷工业出版社，2007：12.
ZENG Zong-yi，YE Hao. Packaging Design Practical Technical Manual[M]. Beijing：Printing Industry Press，2007：12.

[6] 张琴，许莉钧，张丽，等. 瓦楞纸箱尺寸的优化设计[J]. 包装工程，2012，33(7)：58-61.
ZHANG Qin，XU Li-jun，ZHANG Li. Optimal Design of Corrugated Box Dimension[J]. Packaging Engineering，2012，33(7)：58-61.

[7] 曹国荣. 运输包装设计[M]. 北京：中国轻工业出版社，2011：14.
CAO Guo-rong. Transport Packing Design[M]. Beijing：China Light Industry Press，2011：14.

[8] 潘松年. 包装工艺学[M]. 北京：印刷工业出版社，2004：251.
PAN Song-nian. Packaging Technology[M]. Beijing：Printing Industry Press，2004：251.

(上接第 104 页)

ZHOU Liang，LI Bing-fa，SHAN Yun-fan，et al. A New Technique of Preventing from Falsifying Presswork Based on Watermark[J]. Information Technology，2005(9)：31-34.

[11] 梁华庆，纽心忻，杨义先. 基于数字水印的证件防伪技术[J]. 信号处理，2004，20(2)：143-146.
LIANG Hua-qing，NIU Xin-xin，YANG Yi-xian. Identification Document Protection Technology Based on Digital Watermarking[J]. Signal Processing，2004，20(2)：143-146.

[12] 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)：177-181.
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)：177-181.